

Методические Указания  
по проведению практических занятий  
по курсу «Физико-теоретические основы конструирования ЭВА»  
для студентов специальности направления  
подготовки 6.05092 «Радиоэлектронные аппараты»

Утверждено на заседании  
кафедры конструирования ЭВА  
Протокол №        от        2012г.

Принято на учебно-методической  
комиссии факультета Электроники  
НТУУ «КПИ»  
Протокол №        от        2012г.

Киев  
КПИ  
2012

Учебное издание  
Методические Указания  
по проведению практических занятий  
по курсу «Физико-теоретические основы конструирования ЭВА»  
для студентов специальности направления  
подготовки 6.05092 «Радиоэлектронные аппараты»

Составитель: Лескин Владимир Фатеевич, канд.техн. наук, доцент.  
Ответственный Лоненко Александр Нтколаевич, доктор техн. наук, профессор  
Редактор

Рецензент Корнев В.П., канд.техн. наук, доцент.

## Содержание

1. Занятие 1. Введение, цель практических занятий
2. Занятие 2. Выбор и обоснование элементной базы.  
Разработка посадочных мест для ИС и дискретных ЭРЭ
3. Занятие 3. Размещение конструктивных элементов в монтажном пространстве платы
4. Занятие 4. Выбор и обоснование типа материала, метода изготовления и класса точности ПП
5. Занятие 5. Конструкторско-технологический расчет элементов печатного монтажа
6. Занятие 6. Электрический расчет ПП
7. Занятие 7. Расчет основных показателей надежности печатного узла
8. Занятие 8. Проектирование ПП в среде Altium Designer

## **Занятие 1. Введение, цель практических занятий**

Целью проведения практических занятий по курсу «Физико-теоретические основы конструирования ЭВА» является приобретения навыков решения основных задач конструирования, с которыми студент встретится при курсовом и дипломном проектировании, а также в практической деятельности. При этом на каждом практическом занятии рассматривается пример и методика решения конкретной задачи. На занятии студент получает задание СРС, которое является разделом или подразделом курсового проекта, выполняемого по курсу в этом семестре. В результате выполнения всех заданий на СРС студент получит практически все выполненные обязательные разделы расчетно-пояснительной записки.

На практических занятиях рассматриваются основы основ конструирования печатных плат, правила оформления чертежа ПП и сборочного чертежа, приводится пример конструкторско-технологического расчета элементов печатного монтажа с учетом , выбранного класса точности.

## Занятие 2. Выбор и обоснование элементной базы

Схема электрическая принципиальная разрабатываемого печатного узла и перечень элементов приведены в приложении А.

Выбор серии ИС выполним по матрице параметров. Для этого выберем четыре 8-разрядных регистра разных серий K155ИР27, SN74НС377, SN74АВТ377А, SN74F377А, которые аналогичны по своей функциональности. Параметры выбранных ИС представлены в таблице 1.

Таблица 1. – Основные параметры сравниваемых ИС

Серия ИС	Параметры				
	$I_{static}$ , [мА]	$f_{max}$ , [МГц]	$t_{su}$ , [нс]	$t_{pd max}$ , [нс]	Price, [\$]
LS	28,0	30	20	27,0	0,81
НС	0,08	20	21	34,0	0,29
АВТ	15,2	150	3,0	7,30	0,40
F	81,0	110	4,5	10,5	0,48
Весовой коэффициент $b_j$	0,25	0,30	0,15	0,20	0,10

В таблицу вводятся коэффициент важности (весовой коэффициент). Величина весового коэффициента выбирается в соответствии с важностью того или иного параметра и при этом более важному параметру должен соответствовать больший весовой коэффициент  $b_j$ . Величина коэффициента важности должна быть ограничена, например, так

$$\sum_{j=1}^m b_j = 1$$

Согласно таблице основных параметров составляем матрицу параметров X:

$$X = \begin{pmatrix} 28 & 30 & 20 & 27 & 0,81 \\ 0,08 & 20 & 21 & 34 & 0,29 \\ 15,2 & 150 & 3 & 7,3 & 0,4 \\ 81 & 110 & 4,5 & 10,5 & 0,48 \end{pmatrix}$$

Проанализируем параметры (столбцы) матрицы X и приведем их к такому виду, чтобы большему значению параметра соответствовало лучшее качество ИС. Параметры неудовлетворяющие этому условию пересчитываются по формуле

$$Y_{ij} = 1 / X_j, \text{ где}$$

$i = 1, n$  – количество выбранных ИС;

$j = 1, m$  – количество параметров ИС.

Матрица Y приведенных параметров имеет вид:

$$Y = \begin{pmatrix} 0,036 & 30 & 0,050 & 0,037 & 1,235 \\ 12,5 & 20 & 0,048 & 0,029 & 3,448 \\ 0,066 & 150 & 0,333 & 0,137 & 2,5 \\ 0,012 & 110 & 0,222 & 0,095 & 2,083 \end{pmatrix}$$

Далее матрицу Y приводим к матрице нормированных параметров – А. Нормирование производим по формуле:

$$a_{ij} = (\max_j y_{ij} - y_{ij}) / \max_j y_{ij},$$

где  $\max_j y_{ij}$  - максимальный элемент в столбце j матрицы Y;

$y_{ij}$  - текущее значение элемента в столбце  $j$  матрицы  $Y$ .  
Матрица нормированных параметров  $A$  имеет вид:

$$A = \begin{pmatrix} 0,997 & 0,8 & 0,85 & 0,73 & 0,642 \\ 0 & 0,867 & 0,857 & 0,785 & 0 \\ 0,995 & 0 & 0 & 0 & 0,275 \\ 0,999 & 0,267 & 0,333 & 0,305 & 0,396 \end{pmatrix}$$

Для обобщенного анализа системы параметров вводят оценочную функцию –  $Q_i$ , которая определяется

$$Q_i = \sum_{j=1}^m a_j b_j$$

$$Q_{LS(555)} = 0,997 \cdot 0,25 + 0,8 \cdot 0,3 + 0,85 \cdot 0,15 + 0,73 \cdot 0,2 + 0,642 \cdot 0,1 = 0,827$$

$$Q_{HC} = 0,546$$

$$Q_{ABT} = 0,276$$

$$Q_F = 0,48$$

Определив  $Q_i$  для каждой ИС, выбираем ту ИС, которая по совокупности параметров наиболее полно удовлетворяет требованиям ТЗ на разработку печатного узла. Наименьшему значению  $Q_i$  соответствует лучшая ИС.

Из анализа значений  $Q_i$  делаем вывод, что оптимальной по рассматриваемым параметрам является ИС АВТ. Оказывается, что ИС АВТ и F на рынке Украины присутствуют в ограниченном количестве, что вносит определенные издержки в производство и ремонт разработанного продукта. Тогда из оставшихся 2х серий (LS 555 и HC) по критерию быстродействия лучше LS 555. Так как подразумевается, что разрабатываемое устройство не попадает в серийное производство, то финансовые затраты не существенны.

Выбор других компонентов отдадим на Ваш усмотрение, но все они должны быть выбраны обосновано, с учетом требований производства, эксплуатации и суровых внешних воздействий. Эти данные имеются в паспортах ЭРЭ.

### **Разработка посадочных мест и дискретных ЭРЭ**

Посадочное место ИС определяется видом корпуса, который характеризуется его габаритными и присоединительными размерами, числом выводов и расположением их относительно плоскости основания корпуса. Выводы ИС могут располагаться в плоскости основания корпуса (планарные выводы) или быть перпендикулярными ему (штеривые выводы).

Согласно ГОСТ 17467 – 79 в настоящее время применяются 5 типов корпусов, основные особенности которых приведены в таблице 2:

Таблица 2. – Конструктивные особенности корпусов ИС

Типы корпусов	Корпус	Выводы			
		Расположение на плоскости основания	Расположение относительно плоскости основания	Шаг, (мм)	Тип
1	Прямоугольный	В пределах проекции корпуса	перпендикулярно	2,5	Штыревые
2	Прямоугольный	За пределами проекции корпуса	перпендикулярно	2,5 1,5	
3	Круглый	В пределах и за пределами проекции корпуса	перпендикулярно	$360^\circ/n$	
4	Прямоугольный	В пределах проекции корпуса	параллельно	1,25 0,625 0,5	Планарные
5	Прямоугольный	В пределах проекции корпуса	без выводов	1,25 1,5	

Согласно перечня элементов на схему управляемого источника питания ИС типы их корпусов представлены в таблице ??.

Пример условного обозначения корпуса K201.14-1  
 К – корпус; 201 – тип и размер корпуса (2- тип корпуса, 01 – порядковый номер типоразмера);  
 14 – число выводов; 1 – порядковый регистрационный номер.

Разработка посадочных мест остальных дискретных ЭРЭ производится согласно их конструкторской документации.

### Задание на СРС

1. Выбрать по любой справочной литературе три типа разных ИС, одна из которых в вашей схеме.
2. Составить таблицу с параметрами этих ИС.
3. По матрице параметров выбрать серию ИС, которая по совокупности является лучшей серией ИС.
4. Составить перечень элементов на схему.
5. Заготовить посадочные места для ваших всех типов ИС в схеме других дискретных компонентов.
6. Выполненное задание сдать на следующем занятии на проверку.

### Занятие 3. Размещение конструктивных элементов в монтажном пространстве платы

При решении задачи размещения КЭ всегда дана схема электрическая принципиальная, которая описана матрицей связей  $A$  и дано дискретное монтажное пространство, которое описано матрицей расстояний  $D$ . Требуется на каждое вакантное посадочное место разместить КЭ таким образом, чтобы функция качества размещения была оптимальна.

В качестве критериев оптимальности используется ряд критериев: минимум суммарной длины всех соединений, т.е. длины всех проводников должны быть короткими. Эти проводники занимают малую область монтажного пространства и создают благоприятные условия для прокладки разных вариантов трасс; минимизация числа наиболее длинных соединений; максимально близкое размещение КЭ, имеющих наибольшее число связей между собой; максимальное число проводников простой конфигурации и т.д.

Нам дана схема, которая содержит множество элементов  $X = \{X_1, X_2, X_3, X_4, DD_1, DD_2, DD_3, DA_1, DA_2, DA_3, DA_4, DA_5\}$  и множество посадочных мест  $P = \{P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}\}$ . При этом элементы  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – разъемы заранее размещены в посадочные места  $P_4, P_{10}, P_{11}, P_{12}$ , соответственно. Размещение восьми элементов произведем последовательным алгоритмом.

Последовательный алгоритм представляет собой пошаговый процесс размещения. На каждом шаге выбирается элемент, который имеет максимальную связность с уже размещенными элементами и размещается в одну оптимальную свободную позицию при неизменном положении ранее размещенных элементов. Критерий оптимизации: минимальная суммарная длина связей между размещенными элементами.

Упрощенная принципиальная схема приведена на рис.1, которая описана матрицей связи –  $A$ .

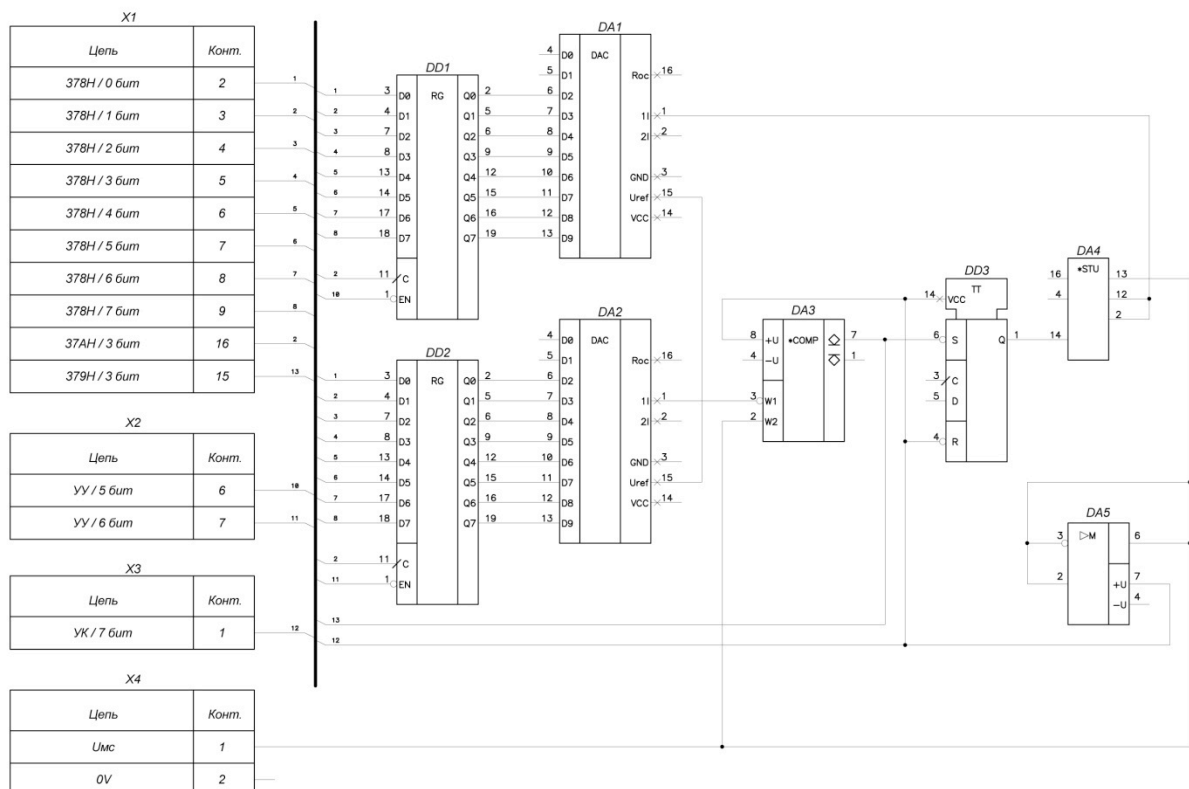


Рис. 1. –Упрощенная принципиальная схема



Матрица связи  $A$  :

	X1	X2	X3	X4	DD1	DD2	DD3	DA1	DA2	DA3	DA4	DA5
X1	0	0	0	0	9	9	1	0	0	1	0	0
X2	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0
X3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
X4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
DD1	9	1	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0
DD2	9	1	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0
DD3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	2	1	1
DA1	0	0	0	0	8	0	0	0	1	0	1	0
DA2	0	0	0	0	0	8	0	1	0	1	0	0
DA3	1	0	1	1	0	0	2	0	1	0	1	2
DA4	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	1
DA5	0	0	1	1	0	0	1	0	0	2	1	0

На рис.3 показано размещение конструктивных элементов.

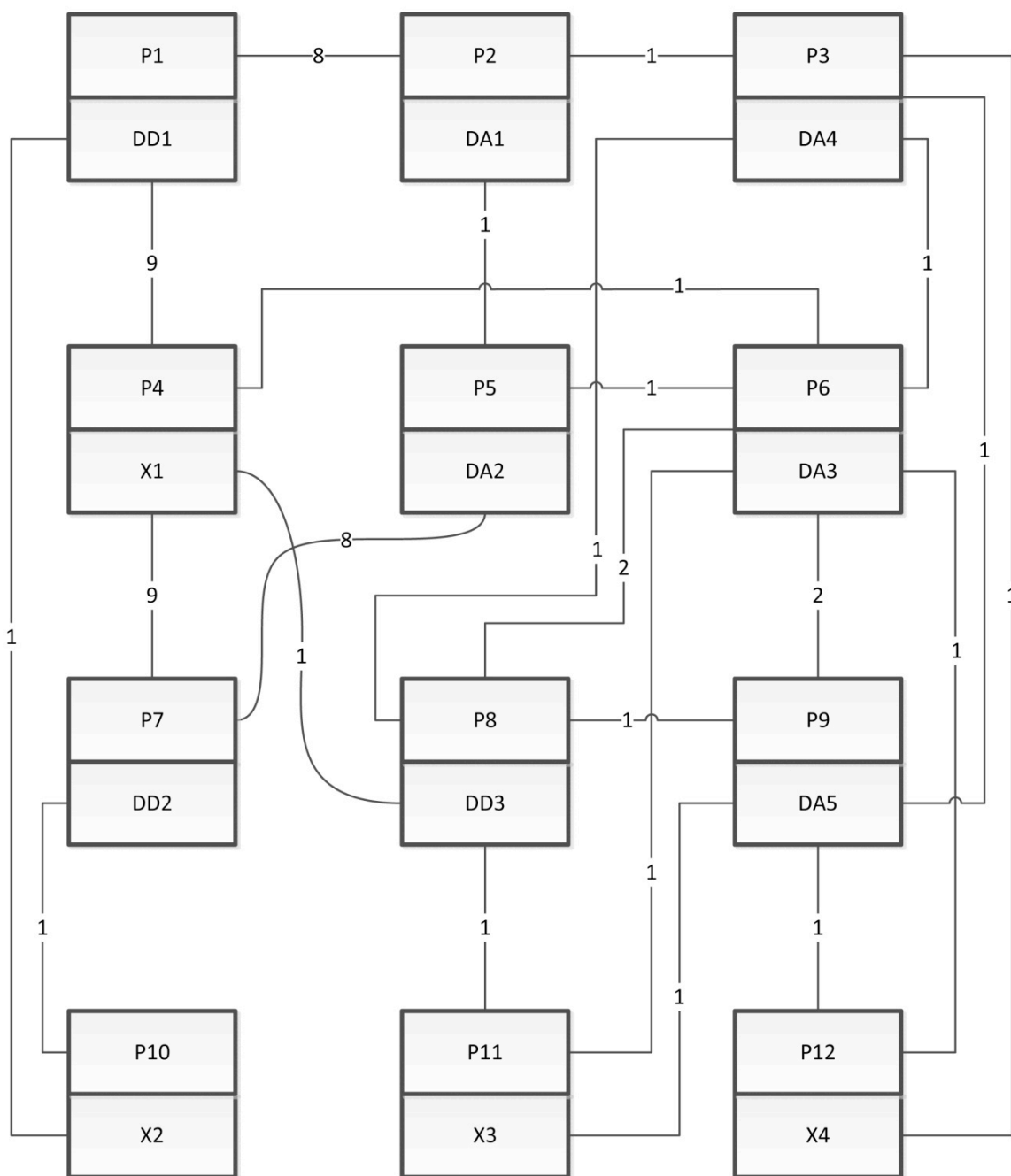


Рис.3. –Размещение конструктивных элементов.

От результатов размещения элементов зависят такие параметры печатного узла: габариты, масса, надежность, помехоустойчивость. Поэтому при установке элементов на ПП следует учитывать все последствия выбора варианта их размещения.

Выбор шага установки ИС на ПП определяется температурным режимом, сложностью принципиальной схемы, параметрами корпуса. При этом зазор между корпусами не должен быть меньше 1,25мм.

ИС на ПП располагаются линейно-многорядно. Допускается размещение ИС в шахматном порядке. Такое расположение позволяет эффективно использовать полезную площадь ПП.

Корпуса штыревых ИС рекомендуется устанавливать с одной стороны платы. С двух сторон платы разрешается устанавливать ИС в корпусах с планарными выводами.

#### **Задание на СРС.**

1. Составить матрицу связи на всю схему.
2. Составить матрицу связи на упрощенную схему.
3. Заготовить посадочные места компонентов.
4. По критериям минимальной суммарной длины проводников разместить компоненты ИС.
5. Определить суммарную длину связей.
6. Выполненное задание сдать на следующем занятии на проверку.

#### **Занятие 4. Выбор и обоснование типа материала, метода изготовления и класса точности ПП**

Печатная плата предназначена для электрического соединения и представляет собой изоляционное основание на лицевой стороне которого размещены конструктивные элементы, а на оборотной стороне размещены элементы печатного монтажа: печатные проводники, контактные площадки, металлизированные монтажные отверстия.

Печатные платы по конструкции подразделяются на такие классы: односторонние (однослойные) – ОПП, двусторонние (двуслойные) – ДПП и многослойные – МПП.

ОПП имеют проводящий рисунок на одной стороне диэлектрического основания. Они просты по конструкции и изготовлению. Монтажные и трассировочные возможности этих плат низкие. Надежность ОПП и механическая прочность крепления элементов также невысока.

ДПП имеют проводящий рисунок на двух сторонах основания. Они обладают высокой плотностью монтажа, повышенной надежностью соединений. Позволяют облегчить трассировку проводников и оптимизировать размеры платы благодаря плотному размещению элементов. ДПП имеют высокую механическую прочность их крепления. Эти ПП допускают монтаж штыревых элементов с одной стороны, а SMD – компонентов с двух сторон. Это позволяет реализовать на них более сложные схемы, чем на ОПП. Поэтому ДПП широко применяются в электронной аппаратуре.

Согласно ТЗ на разработку печатного узла формирователя величины напряжения набором оптимальных параметров обладает ДПП. Более того уровень сложности схемы ПУ не позволяет разработать его на ОПП и в то же время по известным причинам нет необходимости применять МПП.

#### **Выбор и обоснование материала ПП**

При производстве ПП применяются отечественные и импортные материалы различных производителей. Материалы, применяемые в качестве основы для ПП должны иметь: высокие электроизоляционные свойства; достаточную механическую прочность; быть устойчивыми к климатическим воздействиям. Этим требованиям удовлетворяют электротехнические материалы: стеклотекстолит; керамика; фторопластовая пленка; сапфир и др.

В настоящее время введен новый параметр – сопротивляемость воспламенению. По этому параметру выделены полимерные композиционные материалы. FR-1...FR-5. Наиболее распространенным материалом для производства ДПП и МПП является FR-4. Стандартный FR-4 представляет собой композитивный материал на основе стекловолокна (стеклотекстолита). Имеет толщину 1,6 мм и состоит из 8 слоев («препрегов») стеклотекстолита. Применение FR-4 позволяет получить отверстия высокого качества, а это важно для монтажа элементов в отверстия.

Таким образом, для реализации ДПП выбран современный, с высокими параметрами материал FR-4.

#### **Выбор и обоснование класса точности**

Точность изготовления ПП зависит от комплекса технологических параметров и с практической точки зрения определяет основные параметры элементов ПП. В первую очередь это относится к минимальной ширине проводников, минимальному зазору между элементами проводящего рисунка и к ряду других параметров.

ГОСТ 23571-86 предусматривает пять классов точности ПП (Таблица 4.1). Выбор класса точности всегда связан с конкретным производством. Попытка решить эту задачу в обратном порядке может привести к тому, что проект не будет реализован.

Таблица 4.1 – Основные параметры элементов ПП

Условное обозначение	Номинальное значение основных размеров для класса точности				
	1	2	3	4	5
$b$ , [мм]	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
$S$ , [мм]	0,75	0,45	0,25	0,15	0,1
$b_{\text{по}}$ , [мм]	0,3	0,2	0,1	0,05	0,025
$K_{\text{дт}}$	0,4	0,4	0,33	0,25	0,2

В таблице 4.1 параметр  $b$ , [мм] – ширина печатного проводника;  $S$ , [мм] – расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка;  $b_{\text{по}}$ , [мм] – гарантированный пояс;  $K_{\text{дт}}$  – отношение номинального значения диаметра наименьшего из металлизированных отверстий к толщине печатной платы.

Изготовление ПП пятого класса точности требует применение уникального высокоточного оборудования, специальных (как правило, дорогих) материалов и даже создания в производственных помещениях «чистой зоны». Таким требованиям отвечает далеко не каждое производство. Однако, ПП небольшого размера могут выполняться по пятому классу на оборудовании, обеспечивающем производство плат четвертого класса.

ПП четвертого класса выпускаются на высокоточном оборудовании, но требование к материалам, оборудованию и производственным помещениям ниже, чем для пятого класса.

ПП третьего класса – наиболее распространенные, поскольку, с одной стороны, обеспечивают достаточно высокую плотность трассировки и монтажа, а с другой – для их производства достаточно рядового, хотя и специализированного оборудования.

Выпуск ПП второго и третьего классов осуществляется на рядовом оборудовании, а иногда даже на оборудовании, не специализированном для изготовления ПП. Такие ПП, с невысокими конструктивными параметрами, предназначены для недорогих устройств с малой плотностью монтажа.

Таким образом, для реализации ПП выбран третий класс точности, так как в схеме используются штыревые элементы, а ИС имеют шаг выводов 2,5 мм и чем выше класс точности, тем выше стоимость ПП.

#### 4.4 Выбор и обоснование метода изготовления печатной платы

Существует несколько методов изготовления печатных плат: химический (субстративный), электрохимический (аддитивный), комбинированный позитивный метод, полуаддитивный метод с дифференциальным травлением.

Для изготовления печатного узла выбран комбинированный позитивный метод, поскольку он имеет ряд преимуществ перед другими перечисленными выше методами:

- Возможность воспроизведения всех типов печатных элементов с высокой степенью разрешения;
- Защищенность фольгой изоляции от технологических растворов – хорошая надежность изоляции;
- Хорошая прочность сцепления (адгезия) металлических элементов платы с диэлектрическим основанием.

#### Задание на СРС

1. Выбрать тип и материал ПП.
2. Выбрать класс точности ПП.
3. Обосновать метод изготовления ПП.
4. Выполненное задание сдать на следующем занятии на проверку.

## Занятие 5. Конструкторско-технологический расчет элементов печатного монтажа

При конструкторско-технологическом расчете необходимо использовать граничные значения элементов печатного монтажа (ПМ) с учетом погрешности их выполнения. Необходимые граничные значения элементов печатного монтажа и допустимые погрешности приведены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Граничные значения основных параметров ПМ

Элементы ПМ	Обозначение	Параметры элементов ПМ			
		2	3	4	5
Ширина ПП, [мм]	$b_{\text{пп}}^r$	0,4	0,25	0,15	0,1
Расстояние между элементами ПМ, [мм]	$l^r$	0,4	0,25	0,15	0,1
Отношение диаметра металлизации отверстия к толщине платы	$K_{\text{дт}}$	0,4	0,33	0,25	0,2
Ширина пояса КП, [мм]	$b_{\text{по}}$	0,2	0,1	0,05	0,025

Таблица 2 – Допустимые погрешности выполнения элементов ПМ

Смещение печатного проводника относительно КС, [мм]	$\delta_{\text{сп}}$	0,08
Расположение отверстий относительно узла КС, [мм]	$\delta_{\text{о}}$	0,07
Погрешность расположения КП относительно узла КС, [мм]	$\delta_{\text{кп}}$	0,15
Погрешность топологии и фотошаблона, [мм]	$\delta_{\text{фф}}$	0,06
Погрешность расположения КП относительно узла КС на фотошаблоне, [мм]	$\delta_{\text{фш}}$	0,05

### 1 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ПЕЧАТНОГО ПРОВОДНИКА ПО ПОСТОЯННОМУ ТОКУ ДЛЯ ЦЕПЕЙ ПИТАНИЯ И ЗЕМЛИ

Минимальная ширина печатного проводника по постоянному току  $b_{\text{мин } I}$  [мм] для цепей питания и земли определяется выражением (1.1).

$$b_{\text{мин } I} = \frac{I_{\text{max}}}{j_{\text{доп}} \cdot t_{\text{пров}}}, \quad (1.1)$$

где  $I_{\text{max}}$  [А] – максимально возможный ток в цепи,  $j_{\text{доп}} = 48 \text{ А/мм}^2$  – допустимая плотность тока для ПП, изготовленных комбинированным позитивным методом,  $t_{\text{пров}}$  [мм] – толщина печатного проводника, которая определяется выражением (1.2).

$$t_{\text{пров}} = h_{\text{ф}} + h_{\text{гм}} + h_{\text{хм}} = 0,035 + 0,055 + 0,007 = 0,097 \text{ мм}, \quad (1.2)$$

где  $h_{\text{ф}} = 0,035 \text{ мм}$  – толщина фольги,  $h_{\text{гм}} = 0,055 \text{ мм}$  – толщина слоя гальванически осажденной меди,  $h_{\text{хм}} = 0,0065 \text{ мм}$  – толщина слоя химически осажденной меди.

Параметр  $I_{\text{max}}$  в выражении (1.1) определяется как сумма токов, которые потребляют все микросхемы цепи. Значения потребляемых микросхемами токов используемых в схеме представлены в таблице 3. Расчет  $I_{\text{max}}$  представлен формулой (1.3).

$$I_{\text{max}} = 56 + 6 + 4 + 13,6 + 0,2 + 4 = 83,8 \text{ мА}. \quad (1.3)$$

Таблица 3. – Потребляемые токи используемых микросхем

ИМС	Количество ИМС	$I_{\text{потр}}, [\text{мА}]$
K555ИР27	2	$2 \cdot 28 = 56$
K572ПА1А	2	$2 \cdot 3 = 6$
K140УД6	1	4
K554СА3А	1	13,6
K561ТМ2	1	0,2
K142ЕН1А	1	4

Вычисление минимальная ширина печатного проводника по постоянному току для цепей питания и земли имеет вид (1.4).

$$b_{\min} = \frac{83,8 \cdot 10^{-3}}{48 \cdot 0,097} = 0,018 [\text{мм}]. \quad (1.4)$$

Полученное значение  $b_{\min} = 0,018 \text{ мм}$  меньше минимальной ширины проводника 3 класса точности  $b_{\text{пр}}^r = 0,25 \text{ мм}$ . Таким образом, оптимальная ширина проводника по постоянному току для цепей питания и земли равна **0,25 мм**.

## 2 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МИНИМАЛЬНОЙ ШИРИНЫ ПРОВОДНИКА С УЧЕТОМ ДОПУСТИМОГО ПАДЕНИЯ НА НЕМ НАПРЯЖЕНИЯ

Минимальная ширина проводника с учетом допустимого падения на нем напряжения определяется выражением (2.1).

$$b_{\min U} = \frac{\rho \cdot I_{\max} \cdot L_{\text{пров}}}{t_{\text{пров}} \cdot U_{\text{доп}}}, \quad (2.1)$$

где  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$  – удельное сопротивление проводника, изготовленного комбинированным методом,  $L_{\text{пров}}$  – длина самого длинного печатного проводника на ПП,  $U_{\text{доп}} = 5\%E_{\text{п}}$  – допустимое падение напряжения на печатном проводнике.

Вычисление значения  $b_{\min U}$  представлено в (2.2).

$$\begin{aligned} U_{\text{доп}} &= 0,05 \cdot 13 = 0,65 [\text{В}] \\ L_{\text{пров}} &= 0,1 \text{ м} \\ b_{\min U} &= \frac{0,0175 \cdot 83,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1}{0,097 \cdot 0,65} = 2,32 \cdot 10^{-3} [\text{мм}] \end{aligned} \quad (2.2)$$

Полученное значение  $b_{\min U} = 2,32 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$  меньше минимальной ширины проводника 3 класса точности  $b_{\text{пр}}^r = 0,25 \text{ мм}$ . Таким образом, оптимальная ширина проводника с учетом допустимого падения на нем напряжения равна **0,25 мм**.

### 3 РАСЧЕТ ДИАМЕТРА МОНТАЖНОГО ОТВЕРСТИЯ

Расчет диаметра монтажного отверстия выполняется по формуле (3.1). Вычисление значения диаметра МО представлено в (3.2).

$$d = d_{\text{вз}} + \Delta d_{\text{мо}} + r, \quad (3.1)$$

где  $d_{\text{вз}}$  – диаметр вывода элемента,  $\Delta d_{\text{мо}}$  – нижнее предельное отклонение от номинального диаметра МО,  $\Delta d_{\text{мо}} = 0,1 \text{ мм}$ ,  $r = 0,1 \div 0,2 \text{ мм}$  – разность между минимальным диаметром МО  $d_{\text{мо}}$  и максимальным диаметром вывода  $d_{\text{вз}}$ .

$$d = 0,5 + 0,1 + 0,2 = 0,8 \text{ мм}. \quad (3.2)$$

### 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИАМЕТРА КОНТАКТНОЙ ПЛОЩАДКИ

Параметры контактной площадки представлены на рисунке 4.1.

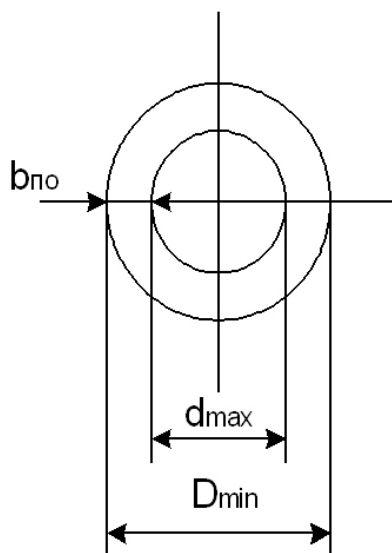


Рис. 4.1 – Параметры контактной площадки

Параметры  $D_{\text{min}}$  и  $d_{\text{max}}$  (Рис. 4.1) определяются формулами (4.1) и (4.3) соответственно.

$$D_{\text{min}} = D_{\text{минП}} + 1,5h_{\text{ф}} + 0,03, \quad (4.1)$$

где  $D_{\text{минП}}$  – минимальный эффективный диаметр контактной площадки (определяется выражением (4.2)),  $h_{\text{ф}} = 35 \text{ мкм}$  – толщина фольги, коэффициент 1,5 учитывает подтравливание печатного проводника в ширину, коэффициент 0,03 учитывает комбинированный метод изготовления.

Определим максимальный диаметр контактной площадки:

$$D_{\text{max}} = D_{\text{min}} + 0,02 = 1,5 \text{ мм}$$

Определяем минимальную и максимальную ширину проводника на печатной плате:

$$b_{\text{min}} = b_{\text{гран}} + 1,5h_{\text{ф}} + 0,03$$

$$b_{\min} = 0,25 + 1,5 \cdot 0,035 + 0,03 = 0,333 \text{ мм}$$

$$b_{\max} = b_{\min} + 0,02 = 0,353 \text{ мм}$$

Определим минимальное расстояние  $S_{\min\text{ПП}}$  между двумя соседними проводниками

$$S_{\min\text{ПП}} = L_o - (b_{\min} + 2\delta_{\text{сп}}),$$

где  $L_o$  – шаг координатной сетки,  $L_o = 1,25$  мм;

$\delta_{\text{сп}}$  – погрешность смещения проводника,  $\delta_{\text{сп}} = 0,05$  мм

$$S_{\min\text{ПП}} = 1,25 - (0,35 + 2 \cdot 0,05) = 0,8 \text{ мм}$$

Определим минимальное расстояние между проводником и контактной площадкой

$$S_{\min\text{ПКП}} = L_o - (0,5 \cdot D_{\max} + \delta_{\text{кп}} + 0,5 \cdot b_{\max} + \delta_{\text{сп}}),$$

где  $L_o$  – расстояние между центрами элементов,  $L_o = 1,25$  мм;

$b_{\max}$  – максимальную ширину проводника;

$D_{\max}$  – максимальный диаметр КП;

$\delta_{\text{кп}} = \delta_{\text{сп}} = 0,05$  мм – погрешности.

$$S_{\min\text{ПКП}} = 1,25 - ((1,25 : 2) + 0,05 + (0,35 : 2) + 0,05) = 0,225 \text{ мм}$$

Определим минимальное расстояние между двумя контактными площадками

$$S_{\min\text{КПКП}} = L_o' - (D_{\max} + 2 \cdot \delta_{\text{кп}}),$$

где  $L_o'$  – расстояние между центрами соседних КП,  $L_o' = 2,5$  мм;

$D_{\max}$  – максимальный диаметр КП;

$\delta_{\text{кп}}$  – погрешность расположения КП относительно узла координатной сетки,

$\delta_{\text{кп}} = 0,05$  мм

$$S_{\min\text{КПКП}} = 2,5 - (1,5 + 2 \cdot 0,05) = 0,9 \text{ мм}$$

Покажем, что между двумя выводами ИС (двумя соседними КП) можно проложить проводник. Для этого определим расстояние между проводником и КП

$$S_{\min\text{ПКП}} = 0,5 \cdot L_o' - (0,5 \cdot D_{\max} + 0,5 \cdot b_{\max}) = 1,25 - (0,75 + 0,175) = 0,35 \text{ мм}$$

### Задание на СРС

1. Составить расширенную таблицу граничных значений параметров ПМ;
2. Составить расширенную таблицу допустимых погрешностей выполнения ПМ;
3. Выполнить расчет минимальной ширины печатного проводника, диаметра монтажного отверстия, размеров контактной площадки для SMD – компонентов, минимального расстояния между соседними проводниками, минимального расстояния между проводниками и контактной площадкой;
4. Выполнить проверочные расчеты и убедиться, что полученные элементы печатного монтажа соответствуют выбранному классу точности.
5. Выполненное задание сдать на следующем занятии на проверку.



## Занятие 6. Электрический расчет печатной платы

С уменьшением геометрических размеров конструктивных элементов и повышением плотности их размещения между сигнальными проводниками возникают емкостная и индуктивная связи. При переключении элементов по сигнальным цепям протекают высокочастотные импульсные токи с крутыми фронтами, которые вследствие наличия паразитных связей наводят на соседних сигнальных проводниках помехи. Последние при определенных условиях вызывают ложное срабатывание дискретных элементов. Необходимо, чтобы значения помех не превышали допустимого предела.

Влияние емкости и индуктивности сигнальной связи выражается в задержке включения схем. Время задержки определяется током, сопротивлением нагрузки и сопротивлением сигнального проводника.

1. Определим падение напряжения на самом длинном печатном проводнике. Падение напряжения на печатном проводнике определяется

$$U_{\text{пад}} = (\rho \cdot I_{\text{max}} \cdot l_{\text{np}}) / (b_{\text{np}} \cdot t_{\text{np}}),$$

где  $\rho = 0,0175 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2 / \text{м}$  - удельное объемное сопротивление для комбинированного позитивного метода изготовления ПП;

$l_{\text{np}}$  [м] – максимальная длина печатного проводника;

$t_{\text{np}}$  [мм] - толщина проводника;

$I_{\text{max}}$  [А] – ток в проводнике, тогда

$$U_{\text{пад}} = (0,0175 \cdot 83,8 \cdot 10^{-3} \cdot 0,08) / (0,35 \cdot 0,097) = 3,455 \text{ мВ},$$

Рассчитанное значение падения напряжения ( $U_{\text{пад}} = 3,455 \text{ мВ}$ ) не превышает 5% от напряжения питания ( $U_{\text{пит}} = 13 \text{ В}$ ).

2. Определим мощность потерь двухсторонней печатной платы. Мощность потерь определяется:

$$P_{\text{пот}} = 2 \pi f \cdot C \cdot E_{\text{п}}^2 \cdot \text{tg } \sigma,$$

Где  $f = 1$ , т.к. напряжение питания постоянная величина,

$\text{tg } \sigma = 0,002$  – тангенс угла диэлектрических потерь для материала FR4.

$$C = (0,009 \cdot \varepsilon \cdot S_{\text{м}}) / h,$$

Где  $C$  – емкость печатной платы,

$\varepsilon = 4,5$  диэлектрическая проницаемость FR4,

$S_{\text{м}}$  [мм<sup>2</sup>] – площадь металлизации,

$h$  [мм] – толщина платы.

$$C = (0,009 \cdot 4,5 \cdot 600) / 1,5 = 16,2 \text{ пФ}$$

$$P_{\text{пот}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 1 \cdot 16,2 \cdot 10^{-6} \cdot 13^2 \cdot 0,002 = 34,39 \text{ мкВт}$$

Паразитная емкость между двумя соседними проводниками одинаковой ширины, расположенными на одной стороне платы определяется:

$$C = (0,12 \cdot \varepsilon \cdot l_{\text{np}}) / \lg(2 S / (b_{\text{np}} + t_{\text{np}})),$$

где  $S$  [мм] – расстояние между двумя параллельными проводниками;  
 $b_{np}$  [мм] – ширина печатного проводника;  
 $t_{np}$  [мм] – толщина печатного проводника;  
 $l_{np}$  [мм] – длина взаимного перекрытия двух параллельных проводников

$$C = (0,12 \cdot 4,5 \cdot 20 \cdot [\lg(2 \cdot 0,8 / (0,35 + 0,096))]^{-1}$$

3. Взаимная индуктивность двух параллельных печатных проводников равной длины

$$M = 0,02 (l_{np} \cdot \lg((\sqrt{l_{np}^2 + L_o^2} + l_{np}) / L_o) - \sqrt{l_{np}^2 + L_o^2} + L_o),$$

где  $l_{np}$  [см] – длина перекрытия параллельных проводников,  
 $L_o$  [см] – расстояние между осевыми линиями двух параллельных проводников,

Полученные значения паразитной емкости и взаимной индуктивности позволяют утверждать, что на работоспособность схемы они не повлияют.

### **Задание на СРС.**

1. Определить паразитную максимальную емкость, т.е. между проводниками, расположенными на лицевой или лицевой и обратной сторонах ПП.
2. Определить максимальную взаимную индуктивность в двух параллельных печатных проводниках равной длины.
3. Определить емкость ПП.
4. Проанализировать результаты и если необходимо подкорректировать результаты проектирования ПП.
5. Выполненное задание сдать на следующем занятии на проверку.

## Занятие 7. Расчет основных показателей надежности печатного узла

Наиболее точная количественная мера надежности каждого конструктивного элемента – его индивидуальная наработка до момента возникновения отказа. На практике же достаточно полная характеристика надежности – плотность распределения времени безотказной работы данного типа КЭ  $f(t)$  и интенсивность отказов  $\lambda(t)$ . Функции  $f(t)$  и  $\lambda(t)$  определяются экспериментально. При этом период нормальной эксплуатации для ИС характеризуется высокой надежностью.

Зная  $f(t)$  и  $\lambda$ , можно определить другие количественные характеристики надежности в течение времени от 0 до  $t$ , вероятность отказа равна

$$Q(t) = 1 - P(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

Важная характеристика надежности - среднее время безотказной работы определяется  $T_{ср} = 1 / \lambda$ .

Интенсивность отказов ЭРЭ является их исходной характеристикой надежности, зависит от режима работы и степени тяжести таких внешних воздействий, как температура, тепловой удар, влажность, вибрации и т.д.

Тогда можно записать  $\lambda_{\Sigma} = \lambda_{0\Sigma} \cdot k_1 \cdot k_2 \dots k_n$ ,

где  $\lambda_{0\Sigma}$  - интенсивность отказов элементов при нормальных условиях работы (температура окружающей среды  $T_{окр.ср} = (20 \pm 5)^\circ$ , относительная влажность  $(65 \pm 15) \%$ ), коэффициент электрической нагрузки  $k_n = 1$ ,  $k_1 \cdot k_2 \dots k_n$ , поправочные коэффициенты, учитывающие режимы работы и условия эксплуатации.

Для учета влияния режима работы на интенсивность отказов вводит коэффициент нагрузки  $k_n = N_{раб} / N_{ном}$ , равный отношению нагрузки в рабочем режиме и нагрузке в номинальном режиме.

Коэффициент нагрузки для резисторов

$$K_n = \frac{P_{раб}}{P_{ном}} = \frac{U_{раб}^2}{R \cdot P_{ном}}. \quad (1.1)$$

$$K_n = \frac{169}{10000 \cdot 0,125} = 0,135. \quad (1.2)$$

Для конденсаторов

$$K_n = \frac{P_{раб}}{P_{ном}}. \quad (1.3)$$

$$K_n = (U_{раб} / U_{ном})$$

$$K_n = \frac{13}{16} = 0,813. \quad (1.4)$$

Для стабилитронов

$$K_n = \frac{I_{раб}}{I_{ном}}. \quad (1.5)$$

$$K_H = \frac{83,87}{100} = 0,419. \quad (1.6)$$

Для транзисторов по току и по мощности

$$K_{HT} = \frac{I_{\text{раб}}}{I_{\text{ном}}}, \quad K_{HP} = \frac{P_{\text{раб}}}{P_{\text{ном}}}. \quad (1.7)$$

$$K_{HI} = \frac{83,86}{100} = 0,839, \quad K_{HP} = \frac{0,175}{0,2} = 0,875. \quad (1.8)$$

Таким образом, коэффициент нагрузки  $K_H$  для транзистора принимается равным 0,875 (для «наихудшего случая»).

Определим результирующую интенсивность отказов печатного узла формирователя величины напряжения. Печатный узел относится к наземной аппаратуре, эксплуатируется при  $T_p = 60^\circ \text{C}$ , остальные условия эксплуатации нормальные.

Исходные данные для расчета  $\lambda_p$  – схема принципиальная, перечень элементов, временные диаграммы и интенсивности отказов «компонентов ненадежности» от температурных воздействий.

По картам рабочих режимов определяем коэффициенты нагрузки, температурные коэффициенты ИС и других ЭРЭ согласно графиков на рисунке 1. Исходные данные для определения  $\lambda_p$  сведены в таблицу 1.

Таблица 1 – исходные данные для определения  $\lambda_p$

Компонент	N	$\lambda_{\text{оэ}} \cdot 10^{-7}, [\text{час}^{-1}]$	$K_H$	$\alpha_t$	$\alpha_z$	$N\lambda_{\text{оэ}}K_H\alpha_t\alpha_z \cdot 10^{-7}$
Конденсатор	4	0,5	0,813	0,4	10	6,48
Резистор	12	0,02	0,135	0,15	10	0,049
Стабилитрон	3	0,15	0,419	0,78	10	1,47
Транзистор	2	0,15	0,875	0,85	10	2,231
ИМС	8	1	1	1	10	80
Печатная плата	2	1	1	1	10	2
Контакт разъема	20	0,2	1	1	10	4
Пайка вывода	140	0,005	1	1	10	7
Суммарная интенсивность отказа печатного узла $\lambda_p \cdot 10^{-7}, [\text{ч}^{-1}]$						163,93

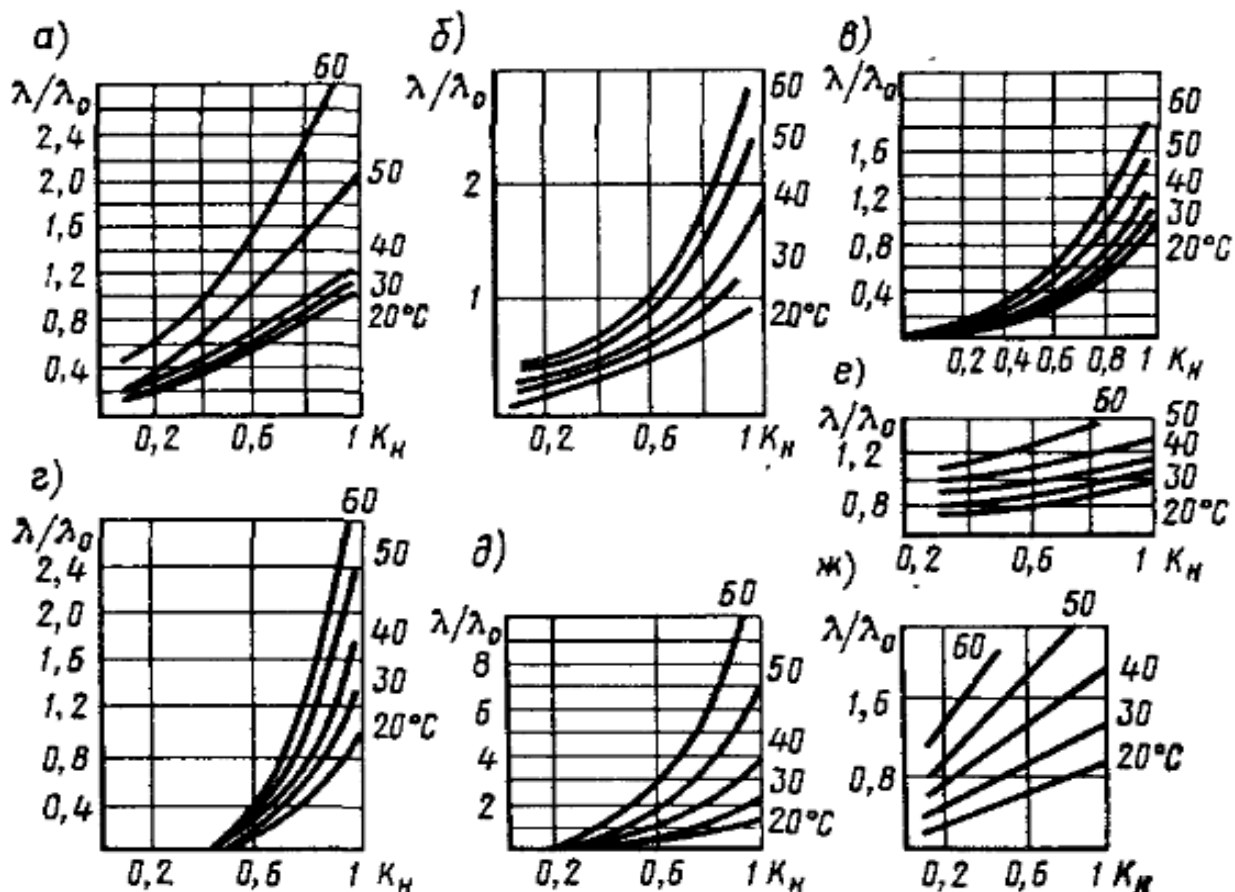


Рис. 1. - Зависимость относительной интенсивности отказов от условий работы для непроволочных резисторов (а), для керамических (в) и бумажных и металобумажных (г) конденсаторов, для трансформаторов (д), для кремниевых (е) и германиевых (б) диодов, для германиевых триодов (ж).

В таблице 1  $\alpha_s$  - поправочный коэффициент на влияние внешних воздействий (для наземной стационарной аппаратуры  $\alpha_s = 10$ ),  $\alpha_t$  - поправочный температурный коэффициент (определяется по диаграммам, представленным на рис.1 и рис.2)

Показатели интенсивности отказа элементов, приведенные в таблице 1, несколько завышены, что позволяет выполнить расчет для «наихудшего» случая.

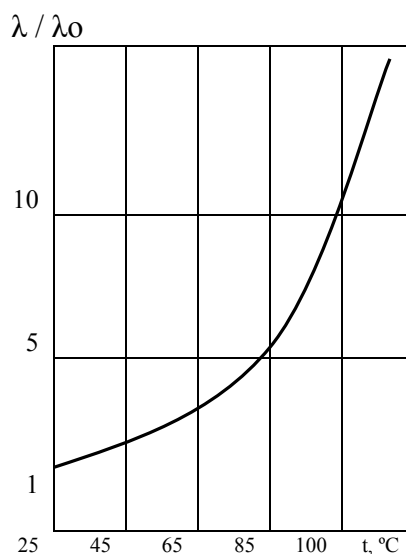


Рис. 4- Зависимость относительной интенсивности отказов ИС от температуры

Графики зависимостей безотказной работы ПУ и вероятности отказа ПУ от времени подставлены соответственно на рисунках 2 и 3.

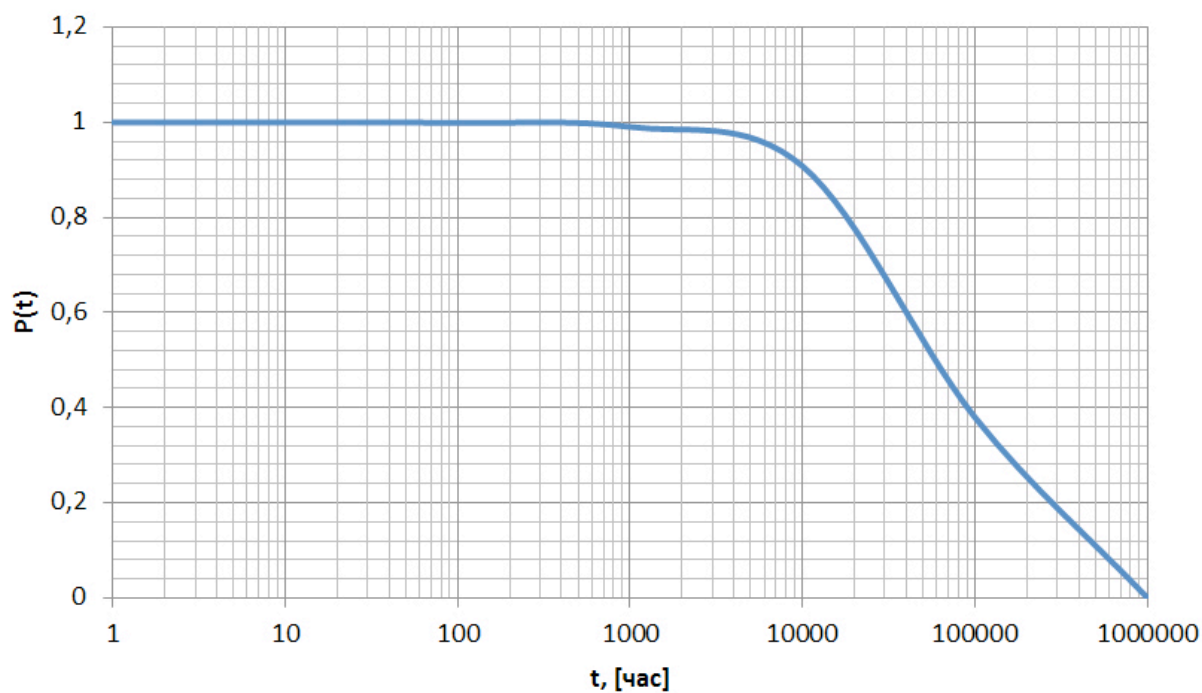


Рис. 2- Зависимость безотказной работы ПУ от времени

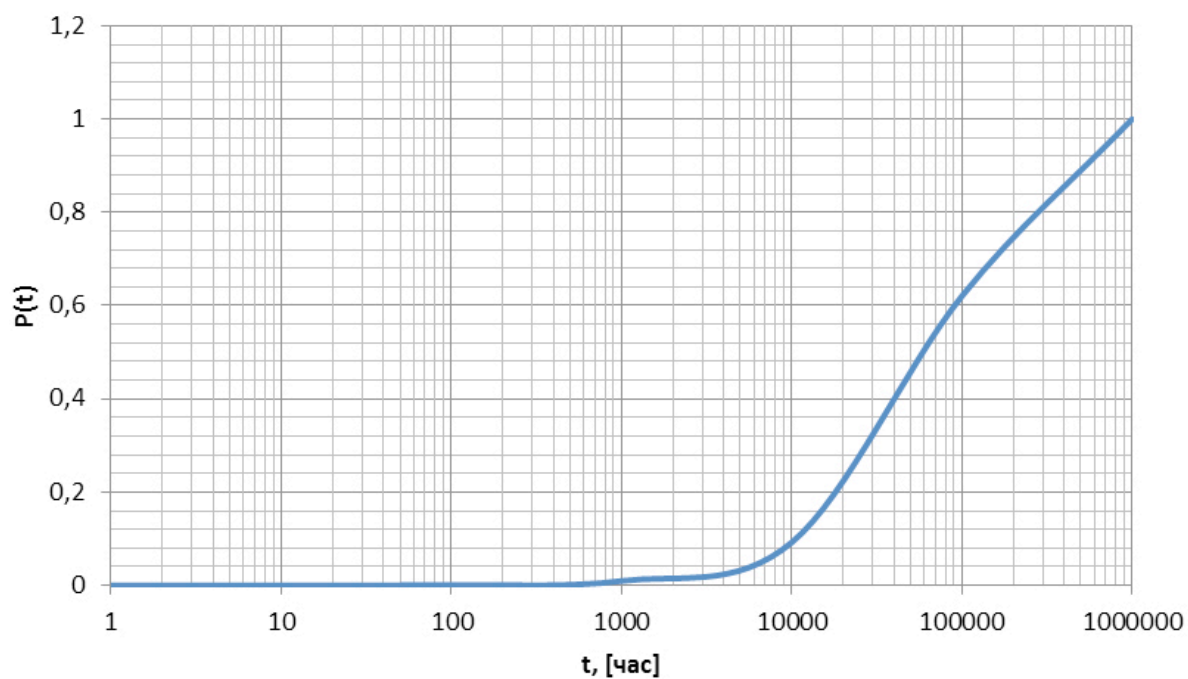


Рис. 3- Зависимость вероятности отказа работы ПУ от времени

## **Занятие 8.**

## **Проектирование печатных плат в среде Altium Designer**

Начальной точкой каждого конструктивного решения в Altium Designer является проект. Проект печатной платы (PCB Project) - набор документов, необходимых для изготовления печатной платы.

### **Библиотеки Altium Designer**

Прежде чем приступить к разработке проекта, разработчик должен иметь в своем распоряжении библиотеку компонентов элементной базы, используемой в проекте. Хотя библиотеки, поставляемые с Altium Designer, содержат порядка 87000 компонентов, созданных в соответствии со стандартом ISO 9001, имеется несколько нюансов относительно целесообразности их использования. Во-первых, УГО (условные графические обозначения) всех этих компонентов не соответствуют ГОСТ, во-вторых, в этих библиотеках отсутствует отечественная элементная база, которая применяется на наших предприятиях. Поэтому перед разработкой электрических принципиальных схем и проектированием плат, следует выполнить разработку библиотек и моделей компонентов.

Компоненты являются основными строительными блоками электронных изделий. При разработке и подготовке к производству проекта каждый компонент нуждается в различных представлениях: логический символ на схеме (УГО), посадочное место на плате (Footprint), описание в формате Spice для моделирования, описание IBIS-модели для анализа целостности сигналов и трехмерное описание для объемного представления готовой платы.

Для каждого компонента не обязательно наличие всех этих представлений, но обязательно наличие стартовой точки, которой в Altium Designer является логический символ (УГО). Каждый компонент должен быть определен, как минимум, своим собственным именем в схемной библиотеке. Он может содержать выводы и графический символ в единственном или многосекционном виде и даже иметь альтернативные опции отображения. Как таковой он может быть размещен в любом схемном проекте. Однако, до тех пор, пока в компонент не добавлены модели, его нельзя применить в любом практическом понимании.

Условные графические отображения и посадочные места компонентов формируются в редакторе библиотек. В среде Altium Designer имеется четыре типа библиотек: библиотеки моделей, библиотеки символов, интегрированные библиотеки, библиотеки базы данных.

### **Построение электрических принципиальных схем**

Начальным этапом разработки любого радиоэлектронного устройства является описание его работы на некотором уровне абстракции, в качестве которой могут выступать схема структурная, схема электрическая и др. При реализации проектов печатных плат работа начинается с формирования идеи разработчика в виде электрической принципиальной схемы. Редакторы схем практически всех программ данного типа схожи между собой, однако в Altium Designer имеется довольно большое количество опций и настроек. Основной особенностью Altium Designer является проектная структура разработки, а также непривычная разработчикам схем и плат процедура компиляции схемы и проекта.

В каждом редакторе Altium Designer имеется свой набор панелей и инструментов для работы. Основной панелью, с которой ведется работа в редакторе схем, является панель Libraries. Инструменты, относящиеся к схемной части программы сгруппированы в панели инструментов Wiring (Рис. 8.1). Инструменты создания схемы описаны в таблице 8.1.

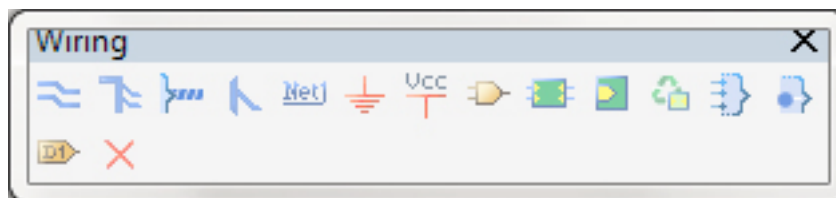


Рис. 8.1 – Инструменты редактора схем

Процедура формирования схемы довольно-таки проста, и в общем случае представляет собой последовательное размещение на листе схемы компонентов, линий связей, шин, меток цепей и других объектов, перечисленных в таблице 8.1.

В рамках компиляции проводится проверка заданных правил и создается отчет о корректности выполнения проекта. Кроме этого, все найденные в ходе проверки ошибки помечаются на схеме и сопровождаются комментарием о их природе. Результатом компиляции является отлаженный файл проекта, готовый к формированию платы. Обозначенный выше процесс состоит из следующих этапов:

- 1) Настройка компиляции проекта;
- 2) Запуск компиляции;
- 3) Поиск и исправление ошибок.

После поиска и исправления ошибок выполняется повторный запуск компилятора и проводится исправление оставшихся ошибок, так процесс повторяется до полной отладки проекта.

Таблица 8.1 – Команды панели Wiring

Пиктограмма	Описание команды
	Place Wire (Размещение цепи)
	Place Bus (Размещение шины)
	Place Signal Harness (Размещение жгута)
	Place Bus Entry (Размещение выхода из шины)
	Place Net Label (Размещение метки цепи)
	GND (VCC) Power Port (Размещение порта питания или земли)
	Place Part (Размещение компонента)
	Place Sheet Symbol (Размещение символа листа)
	Place Sheet Entry (Размещение входа на символ листа)
	Place Device Sheet Symbol (Размещение символа подсхемы)
	Place Harness Connector (Размещение разъема жгута)
	Place Harness Entry (Размещение выхода разъема жгута)
	Place Port (Размещение порта)
	Place No ERC (Размещение метки No ERC)

## Проектирование печатной платы

Редактор печатных плат Altium Designer является самым важным из редакторов, ведь вся работа в других редакторах ведется ради одной конечной цели – файлов для производства платы! В отечественных условиях кроме технологических файлов необходимо получить полный комплект конструкторской документации.



Создание файла платы может быть выполнено вручную, а также при помощи мастера PCB Board Wizard, который по этапам запрашивает информацию о печатной плате, которая потом выразится в виде конструктивных параметров и правил проектирования.

Под разработкой конструктивных параметров подразумевается этап разработки печатной платы от формирования файла платы до размещения компонентов, состоящий из четырех шагов: формирования контура печатной платы, описания стека слоев, установки крепежных отверстий и определения запрещенных зон для трассировки.

Процедура переноса информации из схемы в плату, как и последующее внесение изменений, являются одной из наиболее простых задач, решаемых в Altium Designer. Для этого из редактора схем выполняется команда Design→Update PCB Document..., и если в структуре проекта находится несколько файлов плат, то будет предложено выбрать файл, куда вносить изменения.

Основным этапом разработки платы, который, в общем-то, и определяет, какой будет эта плата, является процедура расположения компонентов на плате с учетом технического задания и формирование топологии печатных проводников. В Altium Designer имеются автоматические и полуавтоматические инструменты размещения компонентов на плате, к которым относят инструменты группы Tools→Component Placement. Большую роль здесь играют, так называемые, «комнаты» - область платы за которой закреплена некоторая группа компонентов.

При передаче информации из схемы в плату Altium Designer всегда автоматически формирует комнаты на плате, если это не отключено в настройках. Комнаты формируются согласно листам схемы, и наиболее целесообразно применять комнаты в тех случаях, когда имеются одинаковые фрагменты схемы, которые на плате должны быть реализованы тоже одинаково.

Эти комнаты необходимо расположить на плате с учетом расположения групп компонентов, которые привязаны к этим областям. Располагать области в площади платы следует аккуратно. Стоит помнить, что при перемещении комнаты перемещаются и компоненты, закрепленные за ней. Поэтому для позиционирования комнаты нужно ее выделить, а затем менять форму и положение, перетаскивая метки, расположенные в вершинах комнаты.

Задача интерактивной трассировки в редакторе P-CAD могла решаться с помощью команд Manual Route, Advanced Route или с помощью одного из двух автотрассировщиков (Specctra или Situs, для P-CAD 2006). В Altium Designer имеется примерно схожий инструментарий, который в отличие от P-CAD обладает большей гибкостью в настройках.

Инструментарий автотрассировки расположен в меню AutoRoute, в котором имеются следующие инструменты:

- All – трассировать все проводники;
- Net – трассировать одну цепь;
- Net Class – трассировать класс цепей;
- Connection – трассировать все цепи подсоединенные к данному выводу;
- Area – трассировать все проводники соединяющие выводы в выделенной области;
- Room – трассировать все проводники, между компонентами в выбранной области размещения;

- Component – трассировать все проводники, подходящие к выбранному компоненту;
- Component Class – трассировать все проводники, подходящие к выбранному классу цепей;

- Connections on selected components – трассировать все проводники внутри выбранных компонентов;

- Connections between selected components – трассировать все проводники между выбранными компонентами;

- Fanout – трассировать Fanout для выбранного элемента (цепь, КП, компонент и т.д.).

Автоматическая трассировка отдельных элементов дает не очень удовлетворительный результат, т.к. нет возможности настройки ее алгоритма, который может быть указан только для трассировки всей платы.

В Altium Designer имеется интерфейс обмена данными с программой Specctra. Для импорта платы в программу Specctra, она сохраняется с расширением \*.dsn, для этого нужно

выполнить команду File→SaveAs. После трассировки платы в Specctra будут созданы файлы отчета, главным из которых является файл \*.lte, содержащий описание проложенных проводников. Именно он должен быть импортирован в Altium Designer. Для этого должна быть выполнена команда File→Import.