

**Филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске**

**Методические указания к курсовому проекту  
по дисциплине**

**КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СРЕДСТВ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ**

**Смоленск – 2019 г.**

## **Введение**

Процесс разработки ЭВМ, представляет собой сложный комплекс взаимосвязанных работ, требующих учета разносторонних требований к конструкции машины, знания современной технологии, схмотехники, импульсной техники, сопротивления материалов, теории надежности и других дисциплин. В этом процессе принимают участие специалисты различных профилей и успех разработки зависит от того, насколько квалифицированно и согласованно они будут работать. Их неудачные или непродуманные решения приводят к значительным временным и материальным затратам на всевозможные переделки уже готовых конструкций или технологических процессов. Согласованные действия специалистов, принимающих участие в разработке и производстве возможны только в том случае, если каждый из них понимает, как его решения скажутся на последующих этапах.

Основной целью курса "Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ" является знакомство студентов со спецификой работы конструкторов и технологов, основными задачами, которые этим специалистам приходится решать, а также с особенностями процессов конструирования и производства современных ЭВМ.

### **1. Цель и задачи, объем курсового проектирования**

Целью курсового проекта является систематизация и закрепление теоретических знаний, полученных при изучении дисциплины «Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ», развитие конструкторских и расчетных навыков.

Для успешного выполнения курсового проектирования студент должен:

- расширить знания по технологическим процессам, применяемым при изготовлении ЭВМ;
- уметь анализировать результаты расчета и принимать соответствующие конструкторские решения с целью обеспечения параметров ЭВМ;
- выполнять требования, предъявляемые к оформлению конструкторской документации;
- применять автоматизированные системы проектирования;
- уметь пользоваться технической литературой, в том числе справочниками, стандартами и другими нормативно-техническими документами;

Основными задачами курсового проектирования являются:

- реализация системного подхода в разработке конструкции ЭВМ;
- получение практических навыков конструирования ЭВМ в соответствии с действующими стандартами (ЕСКД, ГОСТ и ОСТ).
- закрепление навыков практического применения интегрированного пакета САПР DipTrace.

На выполнение курсового проекта выделяется 1 з.е., 36 часов (18 часов на аудиторские консультации, 18 часов на самостоятельную работу) в 7 семестре

подготовки бакалавров направления 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника», профиль подготовки «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети».

## **2. Задание на курсовое проектирование**

Заданием курсового проекта является разработка конструкции функционального узла (части функционального узла) ЭВМ в объеме конструктивной единицы первого уровня (типового элемента замены (ТЭЗ) с проработкой отдельных технологических вопросов.

В начале семестра каждому студенту выдается индивидуальное техническое задание на курсовое проектирование, содержащее электрическую принципиальную схему конструируемого функционального узла (или его части), электрические, конструктивные, эксплуатационные характеристики, рекомендуемый список литературы.

В порядке исключения отдельные студенты, с разрешения заведующего кафедрой, могут выполнять курсовые работы, носящие научно-исследовательский характер, по новым перспективным разработкам, нашедшим отражение в отечественной или зарубежной литературе.

## **3. Состав курсового проекта**

Законченный курсовой проект состоит из расчетно-пояснительной записки и графического материала, которые должны давать достаточно полное представление о разработанной конструкции ТЭЗ, решениях и расчетах, положенных в основу разработки.

Пояснительная записка должна кратко и четко раскрывать задачи, решаемые в проекте, содержать анализ технического задания, технико-экономические обоснования принимаемых решений, иллюстрируемые эскизами, схемами, графиками, таблицами, выбор методик для конструкторских и технологических расчетов, расчеты и анализ их результатов.

Графическая часть курсового проекта состоит из следующих конструкторских документов, оформленных в соответствии с требованиями ЕСКД:

- электрическую принципиальную схему проектируемого изделия;
- чертеж печатной платы ТЭЗ;
- сборочный чертеж ТЭЗ.

К сборочному чертежу обязательно прикладывается спецификация, а к электрической принципиальной схеме - перечень элементов.

Копии перечисленных документов включаются в пояснительную записку в виде приложений.

Курсовой проект является самостоятельной формой работы студента. Студент несет ответственность за правильность всех вычислений, качество оформления расчетно-пояснительной записки и графических материалов, за своевременное выполнение проекта и предоставление его к защите.

#### 4. Расчет и проектирование типового элемента замены

Типовой элемент замены (ТЭЗ) — конструктивно законченный элемент машины, служащий для электрического объединения интегральных микросхем и радиокомпонентов, самостоятельный по технологии изготовления и взаимозаменяемый без подгонки и дополнительной настройки с однотипными ТЭЗ машины. Широкое распространение получила плоская компоновка ТЭЗ — компоненты схемы устанавливают в плоскости платы с одной или двух сторон. Для плоской компоновки характерна малая высота установки компонентов по сравнению с длиной и шириной платы. Основными преимуществами плоской компоновки являются простота выполнения монтажных работ, легкость доступа к компонентам и монтажу, улучшенный тепловой режим. Типовая конструкция ТЭЗ представлена на рисунке 4.1 [1]

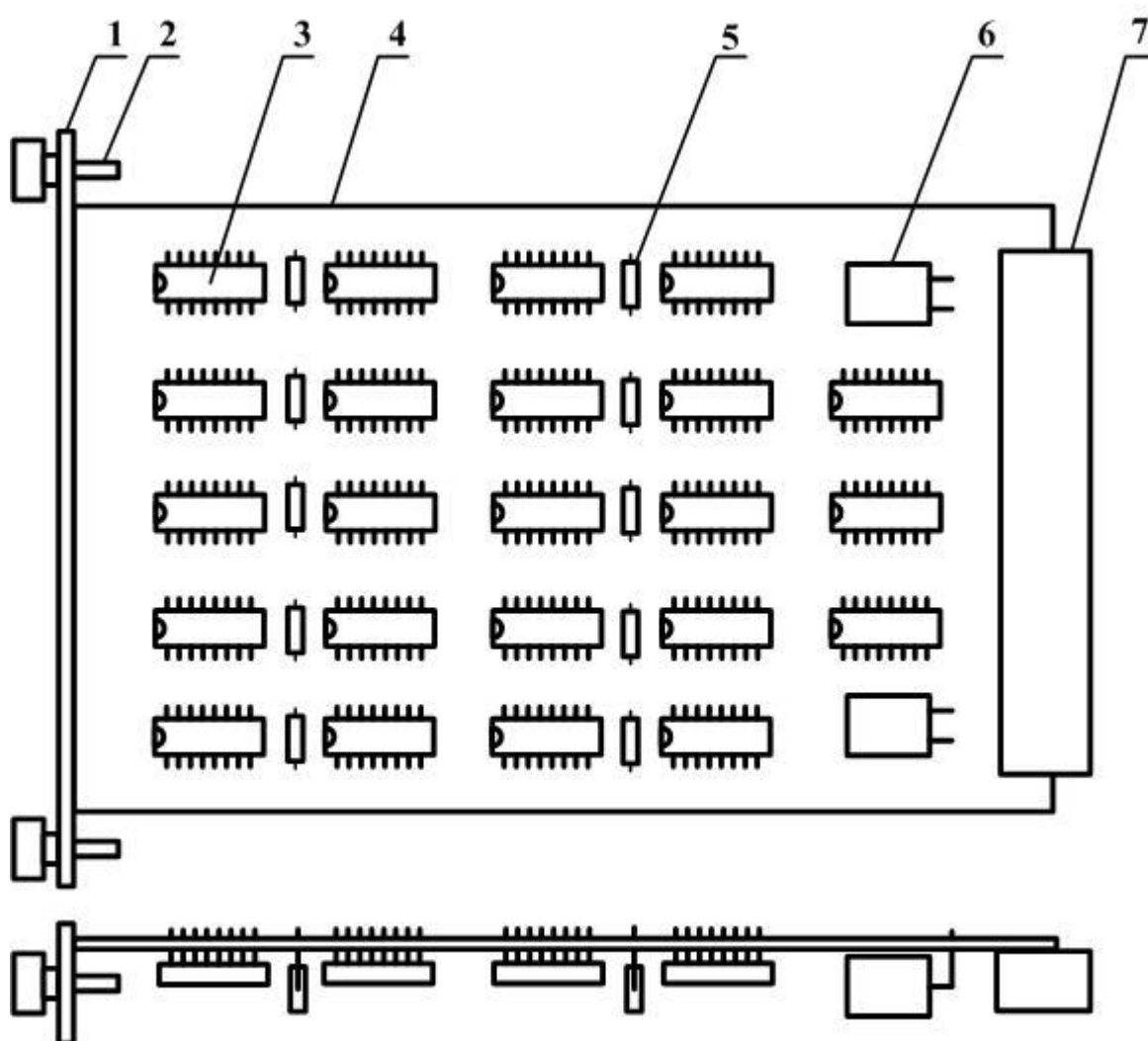


Рисунок 4.1 – Конструкция ТЭЗ

Основой ТЭЗ является печатная плата 4, служащая для электрического и механического соединения всех его элементов. На печатную плату устанавливают микросхемы 3 и для исключения влияния на работу микросхем помех по электропитанию — развязывающие низкочастотные и

высокочастотные конденсаторы 6 и 5. На лицевой панели 1 могут располагаться элементы индикации и управления, контрольные гнезда, электрические соединители, которые коммутируются с платой проводным монтажом. Также на панели помещают невыпадающие винты 2, которым ТЭЗ жестко фиксируется на несущей конструкции модуля второго уровня, наносят адрес, позволяющий отличить ТЭЗ среди подобных, а также предотвратить его неправильную установку. Разъем 7 предназначен для выполнения внешних электрических соединений схемы с модулем второго уровня. Разъемы обеспечивают наиболее быструю и легкую замену ТЭЗов и бывают прямого и косвенного сочленения. Вилка разъема прямого сочленения является частью печатной платы, на которой одним из известных методов выполнения рисунка печатного монтажа получают контакты разъема (печатные ламели).

Разъемы косвенного сочленения имеют самостоятельное конструктивное исполнение. Их устанавливают и крепят на печатную плату с помощью винтов на стороне размещения радиоэлементов, а контакты распивают к контактными площадкам на печатной плате.

При большом числе внешних электрических соединений ТЭЗ на нем устанавливают несколько разъемов, располагающихся на одной или нескольких сторонах платы.

Лицевую панель и электрический соединитель крепят к печатной плате винтовым или заклепочным соединением. В условиях жестких механических воздействий для повышения жесткости конструкции плату ТЭЗ устанавливают на рамку.

Конструирование ТЭЗ начинают с подробного изучения технического задания (ТЗ), схемы электрической принципиальной.

## 5. Анализ электрической принципиальной схемы

На этом этапе, исходя из заданных характеристик и условий эксплуатации, необходимо выбрать серию микросхем и конкретные микросхемы функционального набора серии, которые будут использованы в типовом элементе замены. В случае если электрическую принципиальную схему невозможно реализовать функциональным набором одной серии, могут быть использованы микросхемы нескольких серий. При использовании микросхем нескольких серий они должны быть совместимыми по логическим уровням и необходимо учесть нагрузочную способность при включении входов микросхем одной серии к выходам микросхем другой. Сведения о выбранных микросхемах и их характеристиках сводят в таблицу 5.1

Таблица 5.1 – Список и характеристики используемых микросхем

Тип микросхемы	$n$	Тип корпуса	масса	$U_{п}$	$I_{п}^{0}$	$I_{п}^{1}$	$U^0$	$U^1$	$I_{вх}^0$	$I_{вх}^1$	$I_{вых}^0$	$I_{вых}^1$	$t_{01}$	$t_{10}$	$\tau_{01}$	$\tau_{10}$	$C_{нmax}$	$R_{вх}$	$C_{вх}$	$R_{вых}$	$C_{вых}$	$\Delta U_{пом}$

В таблице заносятся следующие характеристики:

- $n$  - количество микросхем данного типа;
- $U_{\Pi}$  - напряжение питания микросхемы;
- $I_{\Pi}^0$  ( $I_{\Pi}^1$ ) - потребляемый микросхемой ток по цепям питания в режиме логического нуля (логической единицы);
- $U^0$  ( $U^1$ ) - уровень логического нуля (логической единицы) микросхемы;
- $I_{\text{вх}}^0$  ( $I_{\text{вх}}^1$ ) - входной ток логического нуля (логической единицы);
- $I_{\text{вых}}^0$  ( $I_{\text{вых}}^1$ ) - выходной ток логического нуля (логической единицы);
- $t^{01}$  ( $t^{10}$ ) - время задержки переключения микросхемы из состояния логического нуля в состояние логической единицы (из состояния логической единицы в состояние логического нуля);
- $\tau^{01}$  ( $\tau^{10}$ ) - длительность фронта (спада) выходного сигнала;
- $C_{\text{Нmax}}$  - максимально допустимая емкость нагрузки микросхемы;
- $R_{\text{вх}}$  ( $R_{\text{вых}}$ ) - входное (выходное) сопротивление микросхемы;
- $C_{\text{вх}}$  ( $C_{\text{вых}}$ ) - емкость входа (выхода) микросхемы;
- $\Delta U_{\text{пом}}$  – допустимый уровень помехи.

При выборе пассивных элементов следует учитывать условия эксплуатации, конструктивные особенности и стоимость.

Особое внимание необходимо обратить на выбор конденсаторов помехоподавляющих фильтров цепей питания. Если в электрической принципиальной схеме помехоподавляющие фильтры цепей питания отсутствуют, то необходимо дополнить ими схему, проведя расчет их номиналов.

Помехи в цепях питания проявляются в виде смещения уровней напряжения питания (статическая помеха), вызванного конечным сопротивлением шин «питание» и «земля», и динамической нестабильности питания (импульсная помеха), причиной которой является индуктивность этих шин и броски токов потребления логических микросхем при их переключении.

Обеспечение статической помехоустойчивости обеспечивается выбором соответствующих параметров и способом разводки шин питания, раздел 12.

Одним из методов снижения импульсной помехи по цепям питания является использование индивидуальных и групповых конденсаторов развязки [1-3].

Использование индивидуального конденсатора развязки позволяет снизить эквивалентную паразитную индуктивность шин питания за счет локализации динамических токов потребления в цепи микросхема - индивидуальный конденсатор развязки, поэтому его необходимо располагать в непосредственной близости от микросхемы и устанавливать таким образом, чтобы его выводы имели минимальную длину. Емкость индивидуального конденсатора развязки определяется выражением (5.1):

$$C_{\text{ир}} \geq \Delta I_{\text{ип}} \cdot t_{\text{нар}} / (2U_{\text{пом}}), \quad (5.1)$$

где:  $C_{ир}$  - емкость индивидуального конденсатора развязки, пФ;  $\Delta I_{ип}$  - максимальное значение переменной составляющей тока потребления, мА;  $t_{нар}$  - время, за которое происходит изменение тока (принять равным максимальной задержке переключения микросхемы), нс;  $U_{пом}$  - допустимый уровень помехи по цепям питания, В.

В качестве индивидуальных конденсаторов развязки выбирают конденсаторы с малой собственной паразитной индуктивностью (КМ5, КМ6, К10-9 и др.) с учетом напряжения источника питания.

Из-за бросков тока в цепях питания могут возникать низкочастотные колебания, которые могут продолжаться достаточно долго, а также не исключено возникновение резонанса. Для исключения этих явлений используют групповые конденсаторы развязки, емкость которых рассчитывают, используя выражение (5.2):

$$C_p \geq 4L_{ш}/(R_{ш}^2), \quad (5.2)$$

где:  $C_p$  - емкость группового конденсатора развязки, мкФ;  $L_{ш}$  - индуктивность шины питания, мкГн;  $R_{ш}$  - сопротивление шины питания, Ом.

Групповые конденсаторы развязки представляют собой электролитические конденсаторы большой емкости, размещаемые, как правило, рядом с разъемом. Их расчет и выбор следует провести после того, как будет проведен расчет элементов проводящего рисунка печатной платы.

Для выбора элементов следует использовать справочники библиотечного фонда филиала, отраслевые справочники и каталоги, сайты фирм-производителей.

## 6. Выбор конструкции печатной платы.

В зависимости от числа проводящих слоев печатной платы различают [4]:

- односторонние печатные платы (ОПП);
- двусторонние (ДПП);
- многослойные печатные платы (МПП);

К односторонним печатным платам относятся платы, имеющие одно основание, на одной стороне которого выполнен проводящий рисунок. При невозможности стопроцентной разводки печатных проводников, для трассировки пересекающихся цепей в ОПП используются перемычки, выполняемые объемными проводниками (обычно одножильный медный, луженый провод). ОПП обеспечивают самую большую точность выполнения проводящего рисунка и совмещения его с отверстиями и при этом являются наиболее дешевым классом печатных плат. Однако, плотность компоновки и механическая прочность крепления элементов на ОПП не высока. Во избежание отслоения печатных проводников все элементы следует монтировать без зазоров между корпусом элемента и печатной платой. Для повышения прочности крепления элементов возможно изготовления ОПП с металлизацией отверстий, но стоимость таких печатных плат будет

сопоставима с двухсторонними. ОПП, благодаря их дешевизне (стоимость односторонних плат составляет 0,1 – 0,2 от стоимости двухсторонних плат), вполне конкуренты. Их применяют для монтажа бытовой радиоаппаратуры, блоков питания, устройств техники связи и вспомогательной аппаратуры.

Двусторонние печатные платы имеют проводящий рисунок на обеих сторонах основания и обеспечивают высокую плотность установки компонентов и трассировки. Они допускают как монтаж компонентов на поверхности, в том числе с двух сторон, так и монтаж в отверстия. Известны две разновидности ДПП: без металлизации и с металлизацией сквозных отверстий.

Платы без металлизации по многим параметрам соответствуют ОПП, но, благодаря наличию еще одного проводящего слоя, повышается трассировочная способность ПП и плотность компоновки элементов. Электрических соединения между слоями обеспечивается применением заклепок, проволочных перемычек или пайкой выводов элементов с двух сторон печатной платы. Все это резко усложняет монтаж и в целом повышает стоимость устройства.

ДПП с металлизацией переходных отверстий имеют высокую трассировочную способность, обеспечивают высокую плотность монтажа элементов и хорошую механическую прочность их крепления. Однако, процессы металлизации монтажных и переходных значительно повышают их стоимость по сравнению с односторонними.

Благодаря компромиссу между стоимостью и достаточно высокими трассировочными возможностями, ДПП являются наиболее распространенными. Они применяются в производстве радиоэлектронных устройств, в измерительной, вычислительной технике, технике управления и автоматического регулирования, технике связи, высокочастотной технике.

Многослойные печатные платы состоят из чередующихся слоев изоляционного материала с проводящими рисунками на двух или более слоях, между которыми выполнены требуемые соединения. По своей структуре МПП значительно сложнее двухсторонних плат: они включают дополнительные экранные слои (земля и питание), а также несколько сигнальных слоев. Соединения между проводящими слоями выполняются в виде сквозных отверстий, соединяющих внешние слои между собой и с внутренними слоями, применяются также глухие и скрытые переходы. Глухой переход – это соединительный металлизированный канал, видимый только с верхней или нижней стороны платы. Скрытые переходы используются для соединения между собой внутренних слоев платы. МПП с внутренними межслойными переходами имеют более высокую трассировочную способность по сравнению с МПП без таких переходов.

Применение МПП позволяет значительно увеличить плотность монтажа в объеме платы, упростить проблемы размещения и трассировки, сократить размеры плат и длину соединений между навесными элементами. Они характеризуются также повышенной надежностью и устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям. Однако высокая стоимость,



большая сложность и трудоемкость изготовления МПП обусловила их применение в случае высоких требований к быстродействию, плотности монтажа, волновому сопротивлению, времени задержки сигнала.

При выборе конструкции печатной платы необходимо учитывать:

1. тип элементной базы: традиционная (корпусная), бескорпусная, поверхностно–монтируемые компоненты, смешанная;
2. возможность выполнения всех коммутационных соединений, что зависит от функциональной и конструкторской сложности ТЭЗ (от 8 до 12 микросхем при традиционной элементной базе применяются ДПП, от 30 до 50 – ДПП и МПП, свыше 50 – МПП);
3. технико–экономические показатели (стоимость, технологичность, уровень унификации и стандартизации и др.)

## 7. Расчет геометрических размеров печатной платы

Расчет геометрических размеров печатной платы типового элемента замены состоит в выборе ее типоразмера по заданному числу и типам комплектующих элементов. С целью максимального использования физического объема печатной платы и упрощения ее изготовления применяются печатные платы прямоугольной формы с соотношением сторон не более 3:1 [5]. Для определения геометрических размеров платы необходимо учесть все размеры конструкторско–технологических зон, представленных на рисунке 7.1 [2, 6-8]

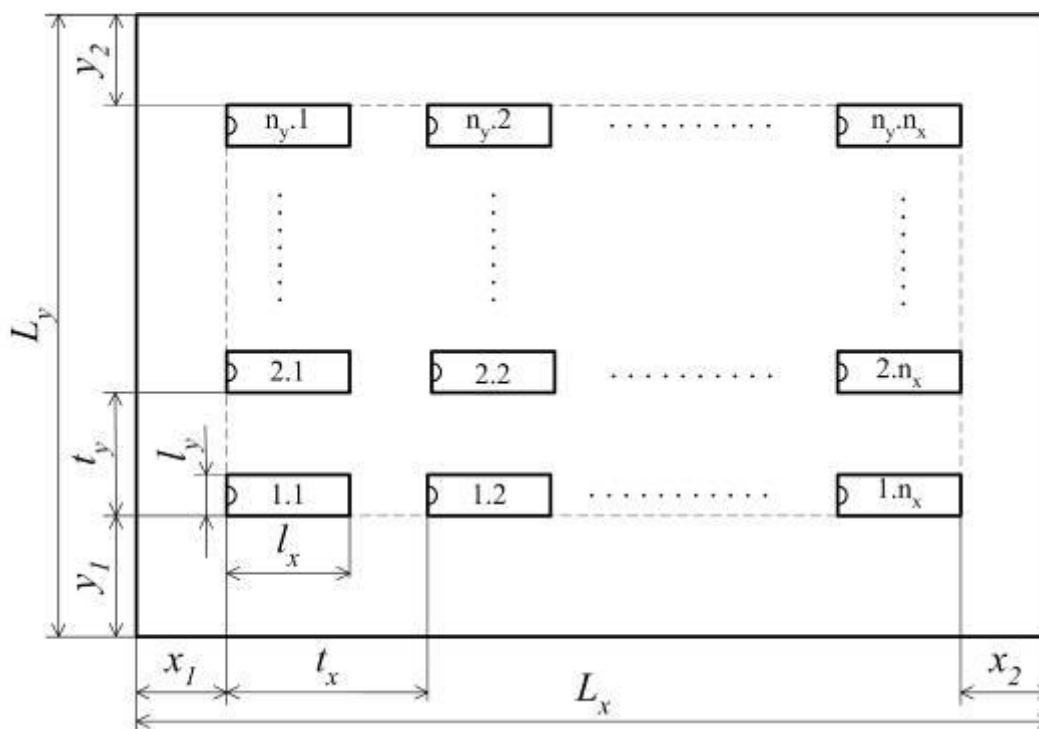


Рисунок 7.1 – Расположение конструкторско–технологических зон печатной платы.

Краевые поля  $x_1$  и  $x_2$  предназначены для крепления ТЭЗа в конструктивной единице более высокого уровня. Они обычно выбираются равными, их размер определяется способом крепления. Если крепление осуществляется винтами через отверстия по углам платы, то ширина каждого из краевых полей  $x_1$  и  $x_2$  должна быть не менее диаметра головки винта (приблизительно можно принять диаметр головки винта равным удвоенному диаметру резьбы). Если плата устанавливается в направляющих, то ширина каждого поля должна быть на 1 – 2 мм больше соответствующего размера в направляющих, но не менее 2,5 мм.

Краевое поле  $y_1$  – коммутационная область печатной платы для установки разъемов, контактных площадок, штырей, гнезд, через которые обеспечивается соединение с внешними электрическими цепями. При использовании разъемов величина  $y_1$  находится в диапазоне 10 – 30 мм и определяется как соответствующий габаритный размер соединителя плюс 5 мм.

Краевое поле  $y_2$  предназначено для расположения элементов контроля, крепления, рычажных съемников, ручки ТЭЗ. Его размер зависит от конструкции перечисленных элементов, но не должен превышать 10 мм. Если эти элементы конструкцией не предусмотрены, то ширину поля  $y_2$  принимают равной  $x_1$  ( $x_2$ ).

При наличии отверстий в зоне краевых полей, расстояние от края отверстия до края печатной платы должно быть не менее толщины платы. Располагать печатные проводники в зонах краевых полей не допускается.

Остальная поверхность печатной платы (обведена пунктиром) является зоной монтажа и отводится для размещения соединительных проводников и элементов электрической схемы. Ее размеры определяются компоновкой и размещением элементов электрической схемы.

Основной метод геометрической компоновки дискретных схем – плоскостной многорядный. Монтажное поле печатной платы условно делят на зоны, в каждой из которой находится посадочное поле под одну микросхему. Посадочные поля образуют в зоне монтажа горизонтальные и вертикальные ряды с шагом установки  $t_x$  и  $t_y$  соответственно.

Микросхемы со штырьковыми выводами устанавливаются с одной стороны печатной платы, а микросхемы с планарными выводами допускают двухстороннюю установку. Все микросхемы на печатной плате должны быть ориентированы ключами в одну сторону.

На шаг установки микросхем влияют многочисленные факторы, такие как:

- размеры корпусов микросхем;
- сложность принципиальной схемы (среднее количество используемых выводов);
- тепловой режим;
- условие помехозащищенности (исключение влияния элементов печатного монтажа на электрические параметры схемы);
- устойчивость к механическим воздействиям;

- обеспечение технологических требований (автоматическая сборка, пайка, контроль).

Для микросхем в корпусах 2-го и 4-го типа габаритные размеры и шаги установки микросхем в зависимости от среднего числа задействованных выводов, при котором возможно применение двухсторонних печатных плат приведены в таблице 7.1 [5].

Таблица 7.1 – Габаритные размеры и шаги установки корпусных микросхем в зависимости от среднего числа задействованных выводов, при котором возможно применение двухсторонних печатных плат.

Обозначение корпуса микросхемы	Габаритные размеры корпуса $l_x \times l_y \times l_h$	Среднее число задействованных выводов не более	Шаг установки микросхем, мм	
			$t_x$	$t_y$
201.14–8, 2102.14–2	19,2×7,5×5,0	8	22,5	12,5
		9	22,5	15,0
		11	25,0	15,0
		12	25,0	17,5
		14	27,5	17,5
201.16–8 201.16–13	19,5×7,5×5,0 19,2×7,5×5,0	8	22,5	12,5
		9	22,5	15,0
		11	25,0	15,0
		12	25,0	17,5
		14	27,5	17,5
201A.16–1	19,2×10,0×4,65	8	22,5	15,0
		10	25,0	15,0
		12	27,5	17,5
		14	29,0	17,5
		16	29,0	20,0
401.14–3 401.14–5	10,0×6,5×2,3 10,0×6,7×2,2	10	12,5	15,0
		11	12,5	17,5
		12	15,0	17,5
		14	15,0	20,0
402.16–21 406.16–5	12,0×9,4×2,7	14	12,5	20,0
		16	17,5	20,0
402.16–18	12,8×9,4×2,8	14	15,0	20,0
		16	20,0	20,0

Геометрические размеры печатной платы определяются по формулам [4,5]:

$$L_x = (n_x - 1)t_x + l_x + x_1 + x_2; \quad (7.1)$$

$$L_y = (n_y - 1)t_y + l_y + y_1 + y_2, \quad (7.2)$$

где  $n_x, n_y$  – количество вертикальных и горизонтальных рядов микросхем;  $t_x, t_y$  – горизонтальный и вертикальный шаг установки микросхем;  $l_x, l_y$  – габаритные

размеры корпуса микросхемы;  $x_1, x_2, y_1, y_2$  – ширина краевых полей печатной платы.

Если в задании на курсовой проект присутствуют микросхемы в корпусах с большими габаритными размерами и числом выводов, чем приведено в таблице, то в зоне монтажа они могут занимать несколько посадочных полей. Общее количество посадочных полей для микросхем  $n_x \times n_y$  должно быть не менее числа микросхем принципиальной электрической схемы. Дискретные элементы располагаются в свободных местах зоны монтажа, в том числе и на незанятых микросхемами посадочных полях.

Определив значения  $L_x$  и  $L_y$ , выбирают ближайший типоразмер печатной платы, исходя из требований ГОСТ 10317 [5]. Рекомендуемые размеры печатных плат приведены в таблице 7.2.

Таблица 7.2 – Рекомендуемые размеры печатных плат

Ширина, мм	Длина, мм	Ширина, мм	Длина, мм
10	10,20	80	80,90, 100,120, 140,160
20	20,30,40	90	90,100,120,140,160,180
30	30, 40, 50, 60	100	100, 120, 140, 160, 180, 200
40	40, 50, 60, 80	140	200, 240, 280
50	50, 60, 80, 90, 100	160	160, 180, 200, 240, 280, 320
60	60, 80, 90, 100, 120	180	180, 200, 240, 280, 320, 360

## 8. Определение класса точности печатной платы

ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции [9] устанавливает семь классов точности печатных плат в соответствии со значениями основных параметров и предельных отклонений элементов конструкции (оснований печатных плат, проводников, контактных площадок, отверстий).

Наименьшие номинальные значения основных размеров элементов конструкции для узкого места, определенные этим стандартом, приведены в таблице 8.1.

Платы первого и второго классов точности просты в изготовлении, дешевы, но не отличаются высокими показателями плотности компоновки и трассировки. Они применяются для печатных плат с дискретными элементами при малой и средней насыщенности поверхности печатной платы навесными элементами.

Для плат третьего класса подходит рядовое, хотя и специализированное оборудование, требования к материалам и технологии не слишком высоки. Этот класс применяется для печатных плат с микросхемами и микросборками, имеющими штыревые и планарные выводы, а также с безвыводными элементами при средней и высокой насыщенности печатной платы навесными элементами.

Таблица 8.1 – Конструктивные параметры основных элементов односторонних и двухсторонних печатных плат.

Конструктивный параметр		Номинальное значение основных размеров для класса точности,						
		1	2	3	4	5	6	7
ширина проводника $t$ , мм		0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
расстояние между краями соседних элементов проводящего рисунка $S$ , мм		0,75	0,45	0,25	0,15	0,10	0,075	0,05
гарантийный поясок контактной площадки $b$ , мм		0,30	0,20	0,10	0,05	0,025	0,020	0,015
предельные отклонения ширины печатного проводника, контактной площадки $\Delta t$ , мм	без покрытия	$\pm 0,15$	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	+0 -0,03	+0 -0,02	+0 -0,015
	с металлическим покрытием	+0,25 -0,20	+0,15 -0,10	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$	$\pm 0,03$	$\pm 0,02$	$\pm 0,015$
позиционный допуск расположения печатных проводников $T_l$ , мм		0,2	0,1	0,05	0,03	0,02	0,01	0,005
позиционный допуск расположения осей отверстий $T_d$ , мм для печатных плат размером	до 180 мм	0,20	0,15	0,08	0,05	0,05	0,03	0,03
	от 180 до 360 мм	0,25	0,20	0,10	0,08	0,08	0,05	0,05
	свыше 360 мм	0,30	0,25	0,15	0,10	0,10	0,08	0,08
позиционный допуск расположения центров контактных площадок $T_D$ , мм для печатных плат размером	до 180 мм	0,35	0,25	0,15	0,10	0,05	0,03	0,02
	от 180 до 360 мм	0,40	0,30	0,20	0,15	0,08	0,05	0,03
	свыше 360 мм	0,45	0,35	0,25	0,20	0,15	0,10	0,05

Платы первого и второго классов точности просты в изготовлении, дешевы, но не отличаются высокими показателями плотности компоновки и трассировки. Они применяются для печатных плат с дискретными элементами при малой и средней насыщенности поверхности печатной платы навесными элементами.

Для плат третьего класса подходит рядовое, хотя и специализированное оборудование, требования к материалам и технологии не слишком высоки. Этот класс применяется для печатных плат с микросхемами и микросборками, имеющими штыревые и планарные выводы, а также с безвыводными элементами при средней и высокой насыщенности печатной платы навесными элементами.

Изготовление плат четвертого более высоких классов точности требует использование специализированного высокоточного оборудования, специальных материалов, поддержки с высокой точностью технологических

режимов фотохимических и гальвано–химических процессов. Эти классы применяются при высокой насыщенности поверхности платы элементами, имеющими штыревые и планарные выводы, а также элементами, монтируемыми на поверхность.

Класс точности изготовления платы определяется исходя из возможности трассировки сигнальных проводников на ее поверхности. Для двухсторонней печатной платы максимальная ширина проводника  $b$ , при которой можно выполнить трассировку электрической принципиальной схемы оценивается по формуле (8.1) [8]:

$$b \leq \frac{3 \times L_x L_y}{2(L_x + L_y) \times N_{св}}, \quad (8.1)$$

где  $L_x$  и  $L_y$  – длина и ширина печатной платы, выбранные в соответствии с ГОСТ 10317, мм;  $N_{св}$  – число линий связи, определяемое как сумма задействованных выводов всех элементов схемы.

На основании полученного значения производится выбор класса точности печатной платы, используя значения, приведенные в таблице 8.1. При выборе не следует завышать класс точности печатной платы, так как это снижает надежность и повышает ее стоимость.

Если полученное по формуле (8.1) значение  $b$  меньше 0,1 мм, производится корректировка площади печатной платы в сторону увеличения.

## 9. Выбор технологии изготовления печатной платы

Возможность реализации рисунка печатной платы выбранного класса точности зависит от схемы технологического процесса ее изготовления и определяется точностью воспроизведения проводника и зазора. Решающими факторами, влияющими на точность воспроизведения проводника являются разрешающая способность фоторезиста и величина бокового подтравливания проводника, определяемая толщиной травливаемого металла.

К наиболее распространенным методам изготовления двухсторонних печатных плат относятся [6, 10]:

1. полуаддитивный метод с избирательным травлением;
2. комбинированный позитивный метод с химической металлизацией и гальванической затяжкой;
3. тентинг-метод с прямой металлизацией.

При использовании полуаддитивного метода с избирательным травлением исходным материалом для основания печатной платы служит нефольгированный диэлектрик. В остальных методах в качестве исходного материала используются фольгированные диэлектрики. Основные технологические операции перечисленных технологических процессов приведены в таблице 9.1

Таблица 9.1 – Основные этапы изготовления печатных плат

№	Наименование операции	Метод изготовления		
		1	2	3
1	Получение заготовки для печатной платы	+	+	+
2	Сверление отверстий, подлежащих металлизации	+	+	+
3	Подготовка поверхности заготовки	+	+	+
4	Химическая металлизация поверхности заготовки и отверстий (~ 1мкм)	+	+	+
5	Гальваническое усиление слоя химической металлизации	+	+	-
6	Формирование защитного рельефа фоторезиста на пробельных местах платы	+	+	-
7	Гальваническое наращивание слоя металлизации ( $\geq 25$ мкм)	+	+	+
8	Нанесение металлорезиста на проводники и в металлизированные отверстия	-	+	-
9	Формирование защитного рельефа фоторезиста на проводниках и отверстиях	-	-	+
10	Удаление защитного слоя фоторезиста	+	+	-
11	Травление меди с незащищенных участков	+	+	+
12	Стравливание слоя металлорезиста	-	+	-
13	Удаление защитного слоя фоторезиста	-	-	+
14	Нанесение паяльной маски	+	+	+
15	Нанесение покрытия на участки проводящего рисунка, не закрытые маской	+	+	+

Толщина слоя фоторезиста должна быть не менее толщины гальванически осажденного слоя металлизации (методы 1 и 2) и обеспечивать необходимую прочность под струями травящего раствора (метод 3), поэтому она примерно одинакова для всех методов. С точки зрения точности воспроизведения проводящего рисунка, принципиальная разница перечисленных методов заключается в толщине вытравливаемого металла. Так, для полуаддитивного метода с избирательным травлением толщина вытравливаемого металла определяется толщиной общей металлизации и составляет около 3 мкм. В связи с этим, теоретический предел воспроизведения минимальной ширины проводника и зазора этим методом составляет 0,04 мм, следовательно этот метод пригоден для изготовления печатных плат любого класса точности.

В комбинированном позитивном методе с химической металлизацией и гальванической затяжкой толщина фольги исходного материала вносит решающий вклад в толщину вытравливаемого металла, в значительной степени этот фактор влияет и на толщину вытравливаемого металла при использовании тентинг-метода. Теоретические пределы воспроизведения минимальной ширины проводника и зазора этими методами приведены в таблице 9.2 [10].

Таблица 9.2 – Сопоставление методов изготовления печатных плат по точности воспроизведения проводящего рисунка.

Толщина фольги исходного материала, мкм	Минимальная ширина проводника (зазора), мм	
	метод 2	метод 3
70	0,15	0,21
50	0,11	0,18
35	0,1	0,16
18	0,085	0,13
9	0,07	0,11

Из приведенных в таблице 9.2 значений следует, что при использовании наиболее распространенных материалов (толщина фольги 35–50 мкм) комбинированный позитивный метод позволяет реализовать печатные платы вплоть до 4 класса, тентинг-метод целесообразно использовать для печатных плат не выше третьего класса точности.

При выборе метода изготовления печатной платы следует учитывать, что прямые экономические издержки при комбинированном позитивном методе в 1,2 раза превосходят аналогичные затраты тентинг-метода, а при полуаддитивном методе – в 2 раза.

## 10. Выбор финишных и защитных покрытий

Финишные покрытия наносятся на контактные площадки и другие открытые элементы печатного рисунка в процессе производства печатных плат. Основное назначение таких покрытий - защитить медную поверхность контактных площадок и обеспечить качественную пайку электронных компонентов на печатные платы для чего они должны хорошо смачиваться припоем, сохранять паяемость в течение длительного времени, не отслаиваться при эксплуатации изделия [6, 10, 11].

В современных электронных изделиях находят применение разнообразные финишные покрытия, различающиеся своими свойствами. Выбор конкретного покрытия определяется назначением тех элементов печатного рисунка, которые им покрываются. Для контактных площадок, предназначенных для пайки, основными требованиями являются паяемость и совместимость с материалом выводов устанавливаемых элементов и составом припоя, если в схеме используются элементы, монтируемые на поверхность, большую роль играет возможность обеспечения плоскостности покрытия. На выбор покрытия для краевых разъемов существенное влияние оказывают его механические свойства: коэффициент трения, стойкость к износу, механическая прочность. На практике, для упрощения процесса изготовления, на элементы печатного рисунка наносится одинаковое покрытие с «компромиссными» свойствами. Однако если необходимо обеспечить качество и надежность печатной платы, для элементов рисунка, имеющих различное назначение, могут использоваться разные покрытия.



В качестве финишных покрытий чаще всего используются металлы и их сплавы, которые наносятся на печатный рисунок методами лужения, гальванического и химического осаждения.

Лужение – достаточно простой способ, заключающийся в погружении печатной платы на ограниченное время в ванну с расплавленным припоем. Однако при его использовании сложно получить поверхности с высокой плоскостностью, кроме того, высокие температуры в процессе лужения отрицательно влияют на надежность печатной платы. Благодаря простоте и низкой стоимости до сих пор широко используется нанесение эвтектического сплава олово-свинец с выравниванием воздушным ножом (удаление излишков припоя потоками горячего воздуха, направленными перпендикулярно поверхности платы – технология HASL), поскольку такое покрытие наилучшим образом соответствует «идеальной» поверхности печатной платы. Однако покрытие не удовлетворяет условиям плоскостности контактных площадок для монтажа микросхем с очень высокой степенью интеграции и содержит свинец – один из наиболее токсичных металлов. Ряд предприятий не используют этот способ для МПП, считая, что жесткий тепловой удар, который испытывают печатные платы при погружении в припой, значительно снижает надежность внутренних межслойных соединений.

Вторым простым и популярным сплавом для лужения является сплав Розе с температурой плавления 93<sup>0</sup>С. Нанесение покрытия осуществляется погружением печатной платы в расплав на 5-10с, мс последующим удалением с поверхности платы излишка сплава встряхиванием в направлении, перпендикулярном плоскости платы или с помощью ракеля. Из-за особенностей технологического процесса сплав Розе не используется для ответственных изделий.

Гальваническое осаждение – быстрый и хорошо контролируемый процесс. Но для обеспечения электрического контакта между всеми поверхностями применяются технологические переемычки, соединяющие различные проводники и области в единое целое, которые после нанесения покрытия удаляются, что снижает технологичность процесса. Целесообразно использовать этот метод, если финишное покрытие используется также и как металлорезист. В этом случае покрытие наносится для защиты проводников перед операцией травления, когда поверхность платы покрыта сплошным слоем металлизации, обеспечивающим электрическое соединение проводников.

В силу этих причин все большее распространение получает методы химического нанесения металлических покрытий, среди которых выделяются иммерсионные покрытия, получаемые путем химической реакции замещения металла основы на металл из раствора. Этот метод обеспечивает достаточно тонкие и однородные покрытия именно тех участков, где имеется открытая медь. Благодаря реакции замещения процесс является самоуправляемым – после образования плотной пленки процесс останавливается, так как теряется контакт раствора с металлом основы.

Никелирование. Для нанесения никеля на поверхность контактных площадок используется метод химического осаждения. Это покрытие редко

используется само по себе, в основном никель служит промежуточным слоем для осаждения других металлов. Толщина покрытия: 2,5 – 4 мкм.

Иммерсионное золото наносится после формирования рисунка топологии печатной платы (т.е. после осаждения меди, фотолитографии и травления). Возможно нанесение иммерсионного золота по чистой меди, но предпочтительней по подслою химического никеля. При этом золото обеспечивает паяемость, а никель служит барьером между медью и слоем золота, предотвращая окисление, и увеличивает время хранения печатной платы. Покрытие ровное, не влияет на размер отверстий, подходит для установки компонентов с малым шагом. Оно имеет длительный срок хранения, хорошее сцепление с подслоем химического или электрохимического никеля, хорошо паяется с малоактивными флюсами, выдерживает многократное термоциклирование, но обладает достаточно высокой стоимостью. Толщина покрытия: 0,05 – 0,2 мкм

Покрытие проводников иммерсионным оловом не влияет на размер отверстий, подходит для установки компонентов с малым шагом и является сравнительно недорогим. Однако оно не выдерживает многократный монтаж/демонтаж элементов, платы с этим покрытием требуют осторожного обращения. Толщина покрытия: 0,6 – 1,5 мкм.

Покрытие из иммерсионного серебра обладает теми же достоинствами, что и иммерсионное золото. Недостатком является то, что покрытие может тускнеть со временем. Толщина покрытия: 0,05 – 0,1 мкм

Основные конструкционные металлические покрытия проводников печатных плат и их назначение приведены в таблице 10.1.

Таблица 10.1 – Металлические покрытия проводников печатных плат.

Вид покрытия	Толщина покрытия, мкм	Назначение покрытия
Сплав Розе	1,5 – 3	Защита от коррозии, обеспечение паяемости
Олово–свинец	9 – 15	То же
Серебряное	6 – 12	Улучшение электрической проводимости
Серебро–сурьма	6 – 12	Улучшение электрической проводимости и повышение износоустойчивости концевых контактов
Золото и его сплавы	0,5 – 3	Улучшение электрической проводимости, уменьшение переходного сопротивления и повышение износоустойчивости контактов
Палладиевое	1 – 5	Снижение переходного сопротивления и повышение износоустойчивости концевых контактов

В реальных условиях эксплуатации печатные платы подвержены воздействию различных внешних факторов: климатических, биологических, механических. К ним относятся перепады температур, повышенная влажность окружающей среды, морской туман, пыль, грибковые и плесневые образования,

условия запыленности, вибрация и многое другое. Кроме того, печатные проводники на наружных слоях не имеют электрической изоляции, что может стать причиной отказов. Защита от этих воздействий осуществляется с помощью лаковых и пленочных покрытий. Эти покрытия тонким и эластичным слоем обволакивают всю поверхность платы и каждого компонента и обеспечивают надежную защиту от воздействия химических веществ, вибрации, влаги, соляного тумана, влажности и перепадов температуры. Это помогает предотвратить коррозию, рост плесени и утечку тока, которые являются причиной выхода из строя незащищенных плат.

Используемые покрытия должны удовлетворять ряду требований, к которым относятся:

- способность проникать в малые зазоры 0,3–1,5 мм;
- способность образовывать прочную, плотную пленку;
- высокая степень адгезии к материалам печатной платы и установленных на ней изделий электронной техники;
- сохранение эластичности и устойчивости к растрескиванию при длительной вибрации и механических нагрузках;
- высокая электрическая прочность и удельное объемное электрическое сопротивление;
- стойкость по отношению к различным органическим растворителям.

При выборе защитного покрытия важно обратить внимание на:

- условия работы оборудования (необходимо защитить плату от всех потенциальных рисков);
- электрическую спецификацию (напряжение пробоя, сопротивление изоляции, диэлектрическая проницаемость);
- разводку платы (расположение компонентов, не подлежащих обработке покрытием);
- метод нанесения покрытия;
- возможность ремонта или переделки платы (допустимость пайки сквозь покрытие, возможность удаления покрытия растворителем).

Ряд элементов, устанавливаемых на печатную плату, не допускают лакировки в составе печатного узла (например, разъемы, регулировочные элементы). Это требует применения трудоемких и малонадежных приемов для их защиты от попадания лака. В этом случае эффективным методом повышения надежности и снижения трудоемкости производства является селективная лаковая защита (паяльная маска). Она представляет собой пленку из термостойкой эмали или фоторезиста, которая наносится на плату до монтажа элементов методом трафаретной печати или фотолитографии таким образом, что открытыми остаются только монтажные элементы и незначительная зона вокруг них. Эти покрытия осуществляют также защиту платы от перегрева при пайке и предотвращают излишний расход припоя, открывая для пайки только контактные площадки.

Свойства ряда используемых органических покрытий и паяльных масок приведены в таблице 10.2.

Таблица 10.2 – - Защитные органические покрытия

Наименование	Цвет	Термостой- кость	Прочность диэлектрика	Диэлектрическая проницаемость (1000 Гц)	Удельное сопротивление
<b>Защитные лаки</b>					
URETHANE-CLEAR	прозрачный	-40 ÷ +130°C	82900 В/мм	2,21	5,1·10 <sup>14</sup> Ом см
URETHANE-RED	красный, непрозрачный	100°C	35000 В/мм	3,8	8 · 10 <sup>13</sup> Ом см
PLASTIK	прозрачный	-70 ÷ +120°C	21000 В/мм	-	5·10 <sup>14</sup> Ом см
ISOTEMP	бесцветный, прозрачный	-45 - +200°C	52000 В/мм	-	4,9 · 10 <sup>16</sup> Ом см
УР 231 ТУ 6-21-14-90	теоретически бесцветный	-60 ÷ +120°C	60000 В/мм	4,5	1·10 <sup>14</sup> Ом см
УР-231Л ТУ 6-21-14-90	теоретически бесцветный	-60 ÷ +120°C	50000 В/мм	5,0	1·10 <sup>13</sup> Ом см
ЭП-9114 ТУ 6-21-3-89	желтый, прозрачный	-60 ÷ +165°C	50000 В/мм	4	1·10 <sup>15</sup> Ом см
ГАММАВОСК" СИМ-01	белый, светло-серый	-60 ÷ +100°C		2,4	5·10 <sup>15</sup> Ом см
ЭП-730 ГОСТ 20824-81	светло желтый	-	60000 В/мм	-	5·10 <sup>12</sup> Ом*см
Э-4100 ТУ ЯН-35-58	-	-60 ÷ +180°C	-	3,3	4,5·10 <sup>15</sup> Ом*см.
СБ-1с ТУ МХП 2785-54	-	-60 ÷ +150°C		4	2·10 <sup>14</sup> Ом*см
<b>Двухкомпонентные фотопроявляемые защитные маски</b>					
R500 - G32 IPC SM840 C Class T.	-	-	-	4,5	1·10 <sup>13</sup>
GL 2467 SM- GG GL 2467 SM- DG GL 2467 SM-YG	GG – светло-зеленый DG – темно-зеленый YG – желто-зеленый	-65 ÷ +125°C	80000 В/мм	3,7	1·10 <sup>14</sup>
GL 2469 SM	Желто-зеленый	-	110000 В/мм	-	1·10 <sup>14</sup>

## 11. Выбор материала основания и толщины печатной платы

В качестве конструкционных материалов печатных плат используются фольгированные и нефольгированные диэлектрики (пластики) типа и толщины керамика, металлические жесткие основания, покрытые диэлектриком. Фольгированные диэлектрики представляют собой электроизоляционные основания, плакированные обычно электролитической медной В зависимости от назначения фольгированные диэлектрики могут быть односторонними и двусторонними и иметь толщину от 0,06 до 3,0 мм. Нефольгированные диэлектрики, предназначенные для полуаддитивного и аддитивного методов производства плат, имеют на поверхности специально нанесенный адгезивный слой, который служит для лучшего сцепления химически осаждаемой меди с диэлектриком.

В настоящее время подавляющее большинство технологий печатных плат базируется на использовании слоистых диэлектриков на основе бумаги (гетинаксы) или стеклоткани (стеклотекстолиты), пропитанной фенольной либо эпоксидной смолой и облицованной с одной или двух сторон медной фольгой. Некоторые из наиболее используемых материалов приведены в таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Материалы для изготовления печатных плат.

Марка	Материал основания, назначение	Толщина, мм	
		основания	фольги
ГФ-1-35Г	Гетинакс фольгированный для изготовления ОПП химическим и комбинированным методами.	0,5-3,0	0,035
ГФ-1-50Г			0,05
ГФ-2-35Г	Гетинакс фольгированный для изготовления ДПП химическим и комбинированным методами.	0,5-3,0	0,035
ГФ-2-50Г			0,05
СФ-1-35Г	Стеклотекстолит фольгированный для изготовления ОПП	0,5-3,0	0,035
СФ-1-50Г			0,05
СФ-2-35Г	Стеклотекстолит фольгированный для изготовления ДПП.	0,5-3,0	0,035
СФ-2-50Г			0,05
СТНФ-1-18	Стеклотекстолит теплостойкий и негорючий фольгированный с гальваностойкой фольгой для изготовления ДПП и МПП.	0,1-2,5	0,018
СТНФ-2-18			0,018
СТНФ-1-35			0,035
СТНФ-2-35			0,035
СФПН-1-50	Стеклотекстолит фольгированный с повышенной нагревостойкостью	0,08-3,0	0,05
СФПН-2-50			0,05
СТЭФ-1-2ЛК	Стеклотекстолит листовой	1,0; 2,0	-
СТЭК	Стеклотекстолит с двусторонним адгезионным слоем	1,0; 1,5	-
СТАМ	Стеклотекстолит с катализатором	0,7-2,0	-

Таблица 11.1 - Продолжение

Марка	Материал основания, назначение	Толщина, мм	
		основания	фольги
ФАФ-4Д	Фольгированный армированный фторопласт	0,5–5,0	0,035 0,05
ДФС-1	Диэлектрик фольгированный самозатухающий с гальваностойкой фольгой	0,06–2,0	0,02
ДФС-2			
ДФО-1	Диэлектрик фольгированный общего назначения с гальваностойкой фольгой	0,06–2,0	0,035
ДФО-2			

Гетинакс фольгированный марки ГФ (ГОСТ 10316–78) представляет собой листы, изготовленные на основе прессованной электроизоляционной бумаги, пропитанной связующим на основе фенольных смол и облицованные с одной (ГФ–1) или двух сторон (ГФ–2) медной электролитической гальваностойкой фольгой. Материал характеризуется низкой стоимостью, хорошей обрабатываемостью, невысокой механической прочностью, легко впитывает влагу, склонен к разбуханию. Предназначен для изготовления печатных плат, эксплуатирующихся в условиях относительной влажности воздуха (45–75)% при температуре (15÷35)<sup>0</sup>С (с дополнительной влагозащитой – до 98% при температуре не выше 40<sup>0</sup>С). Стеклотекстолит фольгированный марки СФ (ГОСТ 10316–78) состоит из прессованных стеклотканей, пропитанных связующим на основе эпоксидных смол и облицованных с одной (СФ–1) или двух (СФ–2) сторон медной электролитической гальваностойкой фольгой. По сравнению с гетинаксом имеет более высокие механические и электроизоляционные свойства, обладает меньшее влагопоглощение, но хуже поддается механической обработке, имеет более высокую стоимость.

Из-за существенного различия температурных коэффициентов линейного расширения меди и стеклотекстолита в направлении толщины повышается риск разрыва металлизации в отверстиях при пайке. Стеклотекстолит предназначен для изготовления печатных плат, на которые в процессе работы может воздействовать окружающая среда, характеризующаяся относительной влажностью воздуха до 98% при температуре не выше 40<sup>0</sup>С.

СТНФ–2–35 (ТУ 16–503.161–83) – стеклотекстолит теплостойкий, негорючий. Допускает работу на воздухе в интервале от –60<sup>0</sup>С до +120<sup>0</sup>С в течение 130 часов.

СФПН–2–50 (ТУ 6–05–1776–76) – стеклотекстолит фольгированный повышенной нагревостойкости, двухсторонний с фольгой толщиной 50 мкм. Такие материалы рекомендуют для печатных плат работающих при температурах до +160<sup>0</sup>С в течение 100 часов и влажности 98% при +40<sup>0</sup>С.

При выборе материала необходимо учитывать электроизоляционные свойства, механическую прочность, обрабатываемость, стабильность параметров при воздействии агрессивных сред и изменяющихся климатических условий, себестоимость. Электрофизические свойства ряда диэлектриков приведены в таблице 11.2.

Таблица 11.2 – Электрофизические свойства фольгированных диэлектриков.

Марка материала	Толщина материала, мм	Масса, кг/м <sup>2</sup>	Толщина фольги, мкм	$\epsilon$ на частоте 1000 Гц	Удельное объемное сопротивление, Ом·м	Диапазон рабочих температур, °С	
ГФ-1-35	1,0±0,11	1,655	35	7	5·10 <sup>7</sup>	-60 ÷ +85 (-60 ÷ +100)	
	1,5±0,14	2,352					
	2,0±0,15	3,052					
ГФ-2-35	1,0±0,11	1,655					
	1,5±0,14	2,352					
	2,0±0,15	3,052					
СФ-1-35 (СФ-1Н-35)	0,8±0,009	1,837		50	5,5		5·10 <sup>9</sup>
	1,0±0,11	2,181					
	1,5±0,14	3,067					
	2,0±0,15	4,050					
СФ-2-35 (СФ-2Н-35)	0,8±0,009	2,099					
	1,0±0,11	2,444					
	1,5±0,14	3,280					
	2,0±0,15	4,313					
СФ-1-50 (СФ-1Н-50)	0,8±0,009	1,967	35	5,2	10 <sup>10</sup>		
	1,0±0,11	2,311					
	1,5±0,14	3,197					
	2,0±0,15	4,180					
СФ-2-50 (СФ-2Н-50)	0,8±0,009	2,359					
	1,0±0,11	2,704					
	1,5±0,14	3,540					
	2,0±0,15	4,313					
СОНФ-1	0,8÷3,0	–		35	5,2	10 <sup>11</sup>	
СОНФ-2	0,8÷3,0	–					
ДФНГ-1 (FR-4)	0,8÷3,0	–					
ДФНГ-2 (FR-4)	0,8÷3,0	–					

Толщина печатной платы определяется толщиной материала основания и проводящего рисунка. Ее выбирают в зависимости от конструктивных, технологических особенностей и механических нагрузок: вибраций и ударов при эксплуатации и транспортировке, которые могут вызвать механические перегрузки и привести к деформации и разрушению печатной платы. Для ОПП и ДПП предпочтительными значениями толщины являются 0,8; 1,0; 1,5; 2,0 мм.

При выборе толщины печатной платы необходимо учитывать длину штыревых выводов устанавливаемых элементов и разъема (для обеспечения нормальных условий пайки и получения качественного соединения выводы должны выступать из монтажного отверстия на величину 0,5÷1,0 мм),

установочный размер разъема прямого сочленения (если используется этот тип разъема), механические нагрузки в процессе эксплуатации и при транспортировке.

Наиболее распространенным видом механических воздействий на аппаратуру является вибрация. Устойчивость печатной платы к механическим воздействиям можно оценить на основе ее собственной частоты свободных колебаний. Если она в 2–3 раза выше максимальной частоты внешних воздействующих вибраций, то можно ожидать, что резонансные явления не возникнут, и конструкция не будет разрушаться. Собственную частоту свободных колебаний платы можно определить на основании выражения

$$f_0 = \frac{Ch}{a^2} K_M K_{\mathcal{E}} \cdot 10^5, \quad (11.1)$$

где  $C$  – частотная постоянная;  $h$  – толщина материала платы, мм;  $a$  – большая сторона платы, мм;  $K_M = \sqrt{E \cdot \rho_C / E_C \cdot \rho}$  – поправочный коэффициент на материал платы;  $E, E_C$  – модули упругости материала платы и стали;  $\rho, \rho_C$  – их плотности;  $K_{\mathcal{E}} = 1 / \sqrt{1 + m_{\mathcal{E}} / m_{\Pi}}$  – поправочный коэффициент учитывающий распределение массы элементов по поверхности платы;  $m_{\mathcal{E}}$  – масса элементов;  $m_{\Pi}$  – масса платы.

Значения модуля упругости и плотности для некоторых материалов приведены в таблице 11.3. Масса элементов рассчитывается после уточнения элементной базы в ходе анализа электрической принципиальной схемы.

Таблица 11.3 – Значения  $E$  и  $\rho$  для материалов.

Материал	Модуль упругости $E \cdot 10^{10}, \text{Н/м}^2$	Плотность $\rho \cdot 10^3, \text{кг/м}^3$
СФ	3,02	2,05
СТЭФ	3,2	2,47
Сталь	22	7,8
Алюминий	7,3	2,7

Значение частотной постоянной  $C$  определяется способом закрепления печатной платы в конструктивной единице более высокого уровня и соотношением ее сторон. Возможные варианты закрепления платы приведены на рисунке 11.1.



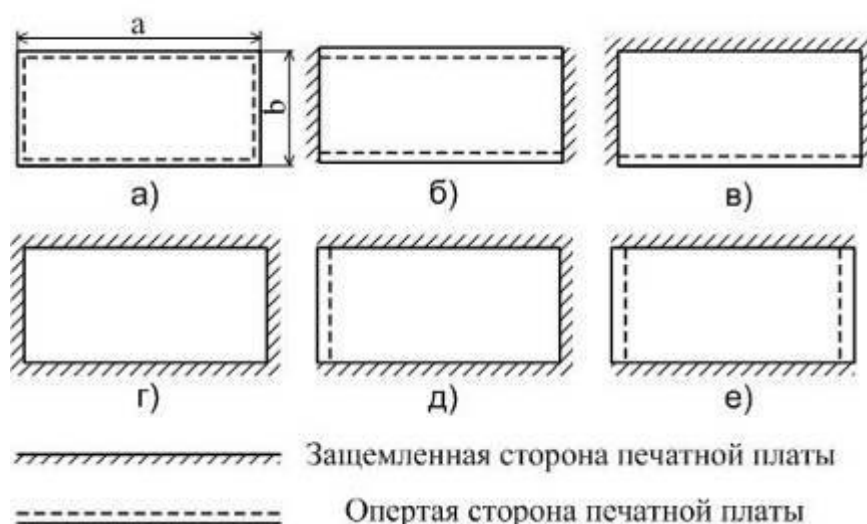


Рисунок 11.1 – Варианты закрепления печатной платы

Сторона платы считается заземленной, если она приклеена, приклепана или привинчена в нескольких точках по длине к жесткой рамке или планке или жестко закреплена на каркасе блока; а также если на краю платы закреплён разъемный соединитель с большим числом контактов, соединяющийся при установке с жестко закрепленной ответной частью соединителя; Опираение стороны обеспечивается, если край платы скользит вдоль направляющей в каркасе; если она прикреплена к нежесткой или нежестко закрепляемой на каркасе планке или угольнику. Значения частотной постоянной, соответствующие различным вариантам закрепления печатной платы, приведены в таблице 11.4. Для значений  $a/b$ , не указанных в таблице, величина частотной постоянной  $C$  определяется аппроксимацией.

Ориентировочная оценка толщины печатной платы производится на основании формулы (11.1) и заданного уровня механических воздействий. Выбор окончательного значения определяется коррекцией оценочного значения в сторону увеличения исходя из ассортимента выбранного материала.

Таблица 11.4 – Значения частотной постоянной для различных вариантов установки печатных плат.

Вариант закрепления платы	Значения частотной постоянной $C$ для $a/b$						
	0,2	0,5	1	1,5	2	2,5	3
а	23,8	28,6	45,8	74,4	114,5	166,0	228,9
б	52,4	55,3	67,3	90,9	127,6	176,9	238,8
в	52,5	56,2	74,1	102,5	170,6	248,5	345,1
г	52,6	57,2	83,8	141,4	228,6	343,7	485,4
д	23,9	32,1	67,6	131,1	221,4	337,9	480,9
е	36,7	42,2	74,1	135,4	224,6	340,6	482,8

## 12. Расчет элементов проводящего рисунка печатной платы

При разработке конструкции печатной платы должны учитываться сопротивление проводников, допустимая токовая нагрузка, электрическая прочность изоляции, сопротивление изоляции, электрическая емкость, помехозащищенность и т.д. От этих параметров зависят размеры элементов проводящего рисунка: длина, ширина, толщина проводников, диаметры монтажных и переходных отверстий, размеры контактных площадок, расстояние между ними. Кроме того, на размеры элементов проводящего рисунка влияют факторы технологического характера.

Ширину печатных проводников рассчитывают и выбирают в зависимости максимальной величины тока и падения напряжения на проводнике.

Нагрузочная способность печатного проводника по току характеризуется допустимой плотностью тока  $j_{доп}$  через проводник [2, 9]. Ее значение лежит в широких пределах и для конкретного проводника определяется многими факторами, такими как материал и способ получения печатного проводника, его допустимый перегрев, температура окружающей среды, наличие или отсутствие защитных покрытий платы, форма сечения проводника. Так, при одинаковой площади сечения более тонкий проводник имеет большую площадь охлаждения и, следовательно, при прочих равных условиях, допускает прохождение тока большей величины. Исходя из допустимой плотности тока, минимальная ширина проводника определяется, как

$$b_1 \geq I_{\max} / (j_{доп} \cdot h_{пр}), \quad (12.1)$$

где  $I_{\max}$  – максимальный ток через проводник, А;  $j_{доп}$  – допустимая плотность тока проводника для выбранного метода изготовления печатной платы, А/мм<sup>2</sup>;  $h_{пр}$  – толщина печатного проводника, мм.

При выполнении расчетов в курсовом проекте принять, что для медных проводников внешних слоев печатной платы, полученных электрохимическим осаждением  $j_{доп}$  составляет величину порядка 20 А/мм<sup>2</sup>, для проводников, полученных методом химического травления фольги – 30 А/мм<sup>2</sup>, для проводников внутренних слоев МПП при любом методе изготовления – 15 А/мм<sup>2</sup>.

Ввиду конечного сопротивления печатного проводника, прохождение через него электрического тока сопровождается падением напряжения на проводнике. Для обеспечения работоспособности схемы, величина этого напряжения не должна превышать предельного допустимого значения  $\Delta U_{доп}$ , поэтому ширина проводника должна удовлетворять следующему условию:

$$b_2 \geq I_{\max} \cdot l_{пр} \cdot \rho / (h_{пр} \cdot \Delta U_{доп}) \quad (12.2)$$

где  $I_{\max}$  – максимальный ток через проводник, А;  $\rho$  – удельное объемное сопротивление проводника, Ом·мм<sup>2</sup>/м;  $l_{пр}$  – длина проводника, м;  $h_{пр}$  – толщина печатного проводника, мм.

Если конструкция печатного проводника состоит из нескольких соизмеримых по толщине слоев меди и различных металлов, удельные сопротивления которых значительно различаются (например, проводник из медной фольги с гальванически осажденной медью и палладиевым покрытием), то минимальная ширина проводника рассчитывается как:

$$b_2 \geq I_{\max} \cdot l_{\text{пр}} \cdot \left( \sum_{i=1}^k \frac{h_i}{\rho_i} \right)^{-1} / \Delta U_{\text{доп}} \quad (12.3)$$

где  $h_i, \rho_i$  – толщина и удельное объемное сопротивление слоя проводника,  $k$  – количество слоев проводника.

Удельное сопротивление проводника  $\rho$  определяется его материалом, а так же зависит от метода изготовления проводника. Значения удельного сопротивления для ряда металлов, используемых при производстве печатных плат, приведены в таблице 12.1.

Максимальный ток через проводник определяется как максимальный выходной ток микросхемы для сигнальных цепей и как сумма максимальных потребляемых токов от источников питания для всех микросхем – для цепей питания. Так как еще не выполнены размещение и трассировка элементов принципиальной схемы, то в качестве ориентировочной длины проводника  $l_{\text{пр}}$  можно взять полупериметр печатной платы  $L_x + L_y$ .

Таблица 12.1 – Удельное объемное сопротивление проводника различных металлов.

Материал	Удельное сопротивление проводника $\rho$ , Ом·мм <sup>2</sup> /м
Медная фольга	0,0172
Гальванически осажденная медь	0,019
Химически осажденная медь	0,028
Олово	0,12
Серебро	0,0159
Золото	0,0222
Никель	0,078
Палладий	0,108

Для электронных логических схем ЭВМ допустимое падение напряжения на проводниках сигнальных цепей не должно превышать запаса помехоустойчивости используемых логических элементов  $U_{\text{Пдоп}}$ , а на проводниках цепей питания – 1÷2% от номинального значения подводимого напряжения питания  $U_{\text{п}}$ .

Расчет ширины проводников проводят отдельно для сигнальных цепей и для цепей питания, окончательно ширину проводника выбирают на основании выражения:

$$b = \max(b_1, b_2) + \Delta t_{но} \quad (12.4)$$

где  $b_1, b_2$  – минимальная ширина проводника исходя из допустимой токовой нагрузки и падения напряжения соответственно, мм;  $\Delta t_{но}$  – нижнее предельное отклонение ширины проводника, мм.

Если полученное значение ширины сигнального проводника меньше минимально допустимого значения для выбранного класса точности (таблица 8.1), то в качестве его ширины принимают минимально допустимое значение ширины печатного для выбранного класса точности.

### 13. Расчет диаметров монтажных и переходных отверстий

Диаметр металлизированных и неметаллизированных монтажных отверстий устанавливается исходя из диаметра выводов монтируемых элементов. Расчет диаметра монтажного отверстия определяется соотношением:

$$d + \Delta d_{но} = d_г + c, \quad (13.1)$$

где  $d$  – диаметр монтажного отверстия, мм;  $\Delta d_{но}$  – нижнее предельное отклонение диаметра отверстия, мм (определяется выбранным классом точности печатной платы по ГОСТ Р 53429-2009 и диаметром отверстия  $d$ , таблица 13.1);  $d_г$  – диаметр вывода элемента, мм (в случае, если вывод элемента в сечении имеет форму, отличную от окружности, в качестве диаметра берут диаметр описанной окружности);  $c$  – разность между минимальным значением диаметра отверстия и максимальным значением диаметра вывода устанавливаемого элемента, ее значение выбирается из диапазона 0,2 ... 0,4 мм.

Таблица 13.1 – Допуск на диаметры монтажных и переходных отверстий по ГОСТ Р 53429-2009.

Диаметр отверстия $d$ , мм	Наличие металлизации	Предельное отклонение $\Delta d$ для класса точности, мм						
		1	2	3	4	5	6	7
от 0,3мм до 1 мм	Без металлизации	±0,1	±0,1	±0,05	±0,05	±0,05	±0,025	±0,02
	С металлизацией без оплавления	+0,05	+0,05	+0	+0	+0	-0,025	-0,02
		-0,15	-0,15	-0,1	-0,1	-0,1	-0,075	-0,05
свыше 1 мм	Без металлизации	±0,15	±0,15	±0,1	±0,1	±0,1	±0,05	±0,03
	С металлизацией без оплавления	+0,1	+0,1	+0,05	+0,05	+0,05	0	-0,02
		-0,2	-0,2	-0,15	-0,15	-0,15	-0,01	-0,08
	С металлизацией и с оплавлением	+0,1	+0,1	+0,05	+0,05	+0,05	-	-

Рассчитанные значения диаметров монтажных отверстий  $d$  округляют до десятых долей миллиметра в сторону увеличения и сводят к ряду 0,05; 0,075; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,4; 1,5; 1,6; 1,7; 1,8; 2,0; 2,1; 2,2; 2,3; 2,4; 2,5; 2,6; 2,7; 2,8; 3,0 мм [9]. Кроме того, для металлизированных монтажных отверстий необходимо выполнить условие:

$$d + \Delta d_{\text{но}} \geq \gamma \cdot h, \quad (13.2)$$

где  $\gamma$  – принять равной 0,4 для 1-3 классов точности и 0,25 для 4-7 классов точности;  $h$  – толщина печатной платы, мм.

Диаметры переходных отверстий выбирают из того же ряда, ориентируясь только на соотношение (13.2)

Для повышения технологичности необходимо стремиться к сокращению количества различных диаметров путем объединения отверстий с близкими значениями диаметров, следя за тем, чтобы значение  $c$  не выходило за пределы диапазона 0,1 – 0,5 мм.

Все монтажные и переходные отверстия печатной платы должны иметь контактные площадки. Диаметр контактных площадок для ОПП и ДПП определяется в соответствии с формулой [9]:

$$D = (d + d_{\text{во}}) + 2b + \Delta t_{\text{во}} + (T_d^2 + T_D^2 + \Delta t_{\text{но}}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (13.3)$$

где  $d$  - диаметр монтажного или переходного отверстия, мм;  $d_{\text{во}}$  - верхнее предельное отклонение диаметра монтажного или переходного отверстия, мм;  $b$  - гарантийный поясок контактной площадки, мм;  $\Delta t_{\text{во}}$ ,  $\Delta t_{\text{но}}$  - верхнее и нижнее предельное отклонение диаметра контактной площадки, мм;  $T_d$  – значение позиционного допуска расположения осей отверстий, мм;  $T_D$  – значение позиционного допуска расположения центров контактных площадок, мм.

Расстояние между элементами проводящего рисунка (печатными проводниками, контактными площадками, проводником и контактной площадкой), расположенными на наружных или в соседних слоях ПП, зависит от допустимого рабочего напряжения, свойств диэлектрика, условий эксплуатации и связано с помехоустойчивостью, искажением сигналов и короткими замыканиями. Минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка, расположенными на одной стороне печатной платы, в узком месте определяется по формуле [6]:

$$S = S_{\text{min}D} + \Delta t_{\text{во}} + \frac{T_l}{2}, \quad (13.4)$$

где  $S_{\text{min}D}$  – минимальное допустимое расстояние между проводниками, исходя из электрической прочности изоляции, мм;  $\Delta t_{\text{во}}$  – верхнее предельное отклонение ширины проводника, мм;  $T_l$  – позиционный допуск расположения печатных проводников, мм.

Для определения минимального допустимого расстояния между элементами проводящего рисунка  $S$  необходимо использовать данные для выбранного класса точности, приведенные в таблице 8.1, с учетом данных, приведенных в таблице 13.2.

Исходя из рассчитанных конструктивных размеров элементов печатной платы, необходимо оценить наименьшее номинальное расстояние  $l$  для прокладки  $n$ -го количества проводников. Для проведения этой оценки используют выражение [9]:

$$l = \frac{D_1 + D_2}{2} + b \cdot n + S(n+1) + T_1, \quad (13.5)$$

где  $D_1, D_2$  - диаметры контактных площадок, мм;  $b, S$  - минимальная ширина проводника и минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка соответственно, мм;  $n$  - количество проводников.

Таблица 13.2 – Допустимые рабочие напряжения между элементами проводящего рисунка.

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Значения рабочего напряжения, В							
	Нормальные условия		Относительная влажность (93±3)% при 40+2 °С в течение 48 ч		Пониженное атмосферное давление			
					400 мм рт. ст.		5 мм рт. ст.	
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ	ГФ	СФ
От 0,1 до 0,2	—	25	—	15	—	20	—	10
От 0,2 до 0,3	30	50	20	30	25	40	20	30
От 0,3 до 0,4	100	150	50	100	80	110	30	50
От 0,4 до 0,7	150	300	100	200	110	160	58	80
От 0,7 до 1,2	300	400	230	300	160	200	80	100
От 1,2 до 2,0	400	600	300	360	200	300	100	130
От 2,0 до 3,5	500	830	360	430	250	400	110	160
От 3,5 до 5,0	660	1160	500	600	330	560	150	210
От 5,0 до 7,5	1000	1500	660	830	500	660	200	250
От 7,5 до 10,0	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
От 10,0 до 15,0	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

## 14. Трассировка соединений на печатной плате

Трассировка соединений на печатной плате выполняется с помощью системы проектирования радиоэлектронной аппаратуры DipTrace, которая на сегодняшний день является одной из самых мощных, полных и последовательных систем автоматизированного проектирования для персональных компьютеров среди доступных САПР. Проект в САПР DipTrace представляется в двух видах: в виде схемы электрической принципиальной и в

виде печатной платы. Разработка печатного узла в ходе выполнения курсового проекта предполагает выполнение следующих этапов [12-15]:

## 1. Создание библиотеки элементов.

Основой проекта является библиотека радиоэлементов, которая представляется в двух видах: схемная (символьная) библиотека, состоящая из условных обозначений (символов) для схемы принципиальной электрической и технологическая библиотека, определяющая посадочные места радиоэлементов для их установки на печатную плату. Создание библиотеки радиоэлементов является первым и, практически всегда, необходимым этапом работы над новым проектом, поскольку чаще всего обнаруживается, что несколько элементов отсутствуют в имеющейся библиотеке. Этот этап является очень ответственным, поскольку ошибки, внесенные с библиотечными элементами, обычно трудно исправляются.

При создании библиотеки радиоэлементов необходимо:

- создать схемный (символьный) образ элемента;
- создать посадочное место для радиоэлемента на печатной плате;
- создать взаимосвязи между схемными и технологическими библиотечными элементами;
- внести библиотечный элемент в библиотеку;
- создать контактные площадки.

Созданные символьные образы элементов (условные графические изображения) должны соответствовать требованиям ЕСКД.

Перед созданием посадочных мест, для каждого дискретного элемента (группы элементов) необходимо выбрать вариант установки в соответствии с ГОСТ 29137 [13], при этом монтажные отверстия для выводов элемента должны располагаться в узлах координатной сетки, шаг которой выбирается исходя из плотности монтажа элементной базы в соответствии с [14]. Для микросхем и разъемов посадочные места можно определить, воспользовавшись рекомендациями из справочников библиотечного фонда, отраслевыми справочниками и каталогами, а также сайтами фирм-производителей.

При создании контактных площадок используются результаты расчетов, проведенных в разделе 13.

## 2. Построение электрической принципиальной схемы.

Построение электрической принципиальной схемы производится с помощью графического редактора DipTrace Schematic. Перед построением схемы необходимо настроить конфигурацию графического редактора: установить размер рабочего поля, выбрать основную систему единиц, установить новую сетку графического редактора, подключить необходимые библиотеки. Выбранный размер листа, на который выводится рисунок схемы, должен обеспечить компактность и ясность при чтении деталей схемы.

На электрической принципиальной схеме изображаются символы компонентов, электрические связи между ними, текстовая информация, таблицы, буквенно-цифровые обозначения и основные надписи. Выполненная схема должна соответствовать требованиям ЕСКД.

### 3. Верификация электрической принципиальной схемы.

Основной причиной ошибок в печатных платах является недостаточный контроль принципиальной схемы. Функция проверки связей (ERC) позволяет снизить вероятность ошибки во время создания печатной платы. Для этого заходим в меню Проверка и щелкаем на «Проверка связей». После проверки могут появляться сообщения об ошибках, таких как: задано несовместимое соединение выводов различных типов; неправильно заданы связи между выводами различных типов; наличие не подсоединенных выводов компонентов и т.п.

### 4. Размещение элементов на печатной плате.

Задача разработки печатных плат сводится к размещению элементов проекта по отношению друг к другу на поле печатной платы и созданию правил ручной и автоматической трассировки соединений на плате. Для этого используется программа PCB Layout.

В случае отсутствия ошибок переходим непосредственно к разводке проводников на печатной плате. Для этого заходим в меню Файл и выбираем пункт «Преобразовать в плату», после чего в рабочей области программы PCB Layout появятся изображения корпусов компонентов принципиальной схемы. Далее необходимо разместить компоненты так, чтобы добиться кратчайших связей между компонентами. Затем, используя меню, необходимо указать границы печатной платы и задать параметры трассировки

### 5. Трассировка печатной платы.

Создание топологии печатных проводников платы выполняется посредством автоматической трассировки соединений и/или при помощи интерактивной (полуавтоматической) прокладки трасс.

Автоматическая трассировка осуществляется путем нажатия клавиши F9 или через меню Трассировка/Запуск. Если одна или несколько сетей будут не разведены, запустите повторно автотрассировку: выберите «Шаг назад» или «Трассировка /Детрассировать все», затем запустите автотрассировщик повторно.

Если все-таки остались неразведенные сети, это значит, что допуски и/или расстановку компонентов следует изменить – допустимые расстояния и ширину трасс нужно уменьшить. После необходимых изменений нужно оттрассировать плату снова и посмотрите результат. В случае необходимости, проведите доработку печатной платы в ручном режиме

Разработанная плата должна быть проверена на соответствие принципиальной схеме и конструкторско-технологическим ограничениям.

## **15. Анализ электромагнитной совместимости**

Электромагнитная совместимость радиоэлектронного средства – это его способность функционировать совместно с другими техническими средствами в условиях возможного влияния непреднамеренных помех, не создавая при этом недопустимых помех другим средствам. Поэтому после размещения



элементов принципиальной схемы и выполнения трассировки необходимо выполнить проверочные расчеты, учитывающие топологию печатной платы.

Паразитные параметры линий связи вызывают искажения передаваемых сигналов. Обобщенная модель элементарного участка линии связи приведена на рисунке 15.1.

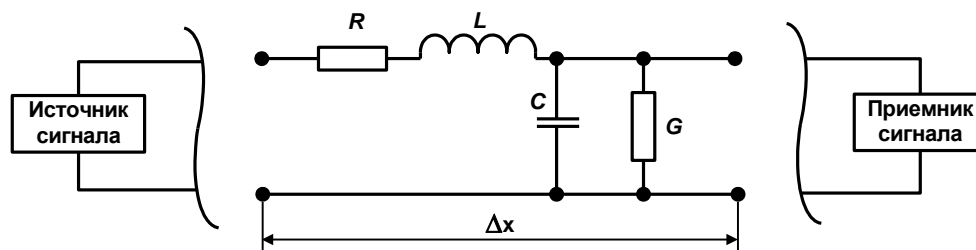


Рисунок 15.1 – Обобщенная модель участка линии связи.

Сопротивление  $R$  обуславливает активные потери (падение напряжения при протекании постоянного и низкочастотного тока по печатному проводнику) в линии связи и содержит две составляющие: сопротивление постоянному току или токам низкой частоты и сопротивление токам высокой частоты [2, 15]. Учет этих потерь проводился при расчете элементов проводящего рисунка печатной платы. Однако на этом этапе топология печатной платы была неизвестна, поэтому максимальная длина проводника оценивалась ориентировочно. В связи с этим, исходя из топологии, необходимо определить максимальную длину проводника (для сигнальных проводников и шин питания) и, если она превышает ориентировочное значение, и уточнить величину падения напряжения на них. Если полученные значения превышает допустимый уровень помех, необходимо принять меры по ее снижению. Это достигается путем изменения топологии печатной платы, направленного на уменьшение длин проводников, увеличения ширины проводника (проводников) и др. При выполнении курсового проекта явление поверхностного эффекта, связанное с протеканием по проводнику переменного тока, можно не учитывать до частоты 1 ГГц [15].

Проводимость  $G$  обусловлена наличием утечек в изоляционном материале основания печатной платы и защитных покрытий. Для современных материалов, применяемых при производстве печатных плат, этим параметром можно пренебречь.

Индуктивность  $L$  и электрическая емкость  $C$  проводника определяется его конструкцией и применяемыми материалами. Они вызывают искажения передаваемых сигналов в виде «звона», немонотонности фронтов сигнала и увеличения их длительности, дополнительной задержки сигналов, помехи отражения.

Взаимная емкость и индуктивность между электрическими цепями приводят к проникновению части сигнала из одной цепи в другую, что в цифровых устройствах приводит к сбоям в работе [1 - 3, 6, 7, 18].

Все линии связи на печатной плате можно разделить на электрически «короткие» и электрически «длинные» [2]. Электрически «короткой» называют

линию связи, время распространения сигнала в которой много меньше (как минимум в два раза) значения переднего фронта передаваемого по линии импульса. Свойства такой линии можно описать сосредоточенными сопротивлениями, емкостью и индуктивностью. Электрически «длинная» линия связи характеризуется временем распространения сигнала, значительно большим длительности фронта импульса. При расчете такие линии следует рассматривать как линии с распределенными параметрами.

В конструкциях печатных плат с электрически короткими линиями связи помехи проявляются в виде дополнительной задержки сигналов, перекрестной помехи.

### 15.1. Определение задержки в короткой линии связи

Как указывалось выше, свойства такой линии можно описать сосредоточенными параметрами. Эквивалентная схема замещения короткой линии, при допущении, что  $R=G=0$ , приведена на рисунке 15.2

Как указывалось выше, свойства такой линии можно описать сосредоточенными параметрами. Эквивалентная схема замещения короткой линии, при допущении, что  $R=G=0$ , приведена на рисунке 15.2

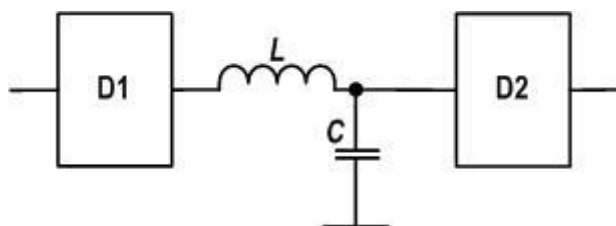


Рисунок 15.2 – Модель одиночной короткой линии связи.

Здесь источником сигнала является логический элемент **D1**, а приемником – **D2**. В зависимости от геометрических размеров линий (их сечений, длины), диэлектрических свойств изоляционных материалов тот или иной параметр линии может оказывать большее воздействие на процессы передачи сигнала, чем все остальные. Поэтому задержку распространения сигнала будем определять исходя из предположения, что линия связи носит только емкостной или только индуктивный характер. Независимо от характера модели, форма сигнала имеет одинаковый вид для обоих вариантов.

Качественно короткая линия проявляется в затягивании фронта информационного сигнала. Эквивалентная схема замещения для расчета задержки в емкостной линии связи приведена на рисунке 15.3.

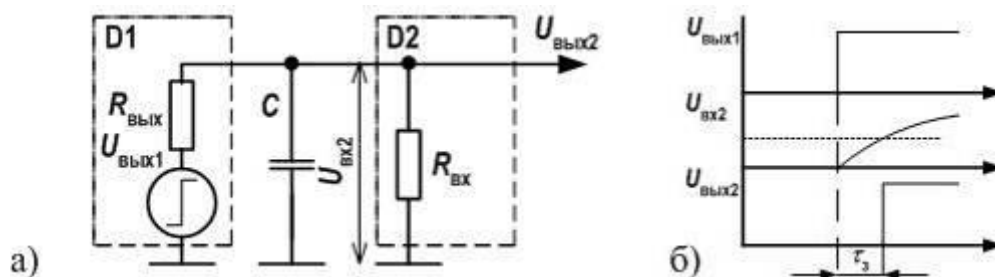


Рисунок 15.3 – Эквивалентная схема замещения емкостной линии связи.

В этом случае напряжение  $U_{\text{вх}2}$  будет определяться выражением (15.1):

$$u_{\text{вх}2} = U_{\text{вх}1} \frac{R_{\text{вх}2}}{R_{\text{вх}2} + R_{\text{вх}1}} \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (15.1)$$

где  $\tau = C \frac{R_{\text{вх}2} R_{\text{вх}1}}{R_{\text{вх}2} + R_{\text{вх}1}}$ .

С учетом того, что, как правило,  $R_{\text{вх}2} \ll R_{\text{вх}1}$ , и порог срабатывания по входу равен половине выходного напряжению, время задержки в линии связи с емкостным характером можно определить, как

$$\tau \approx 0,7 R_{\text{вх}1} C \quad (15.2)$$

Проведя аналогичные рассуждения, можно получить выражение для определения времени задержки в линии связи с индуктивным характером (15.3).

$$\tau \approx 0,7 \frac{L}{R_{\text{вх}2}} \quad (15.3)$$

В процессе выполнения курсового проекта, на основании полученной топологии печатной платы, необходимо оценить максимальную задержку, вызванную паразитными характеристиками линий связи.

## 15.2. Определение перекрестной помехи

Наиболее опасными являются перекрестная помеха, образование которой обусловлено наличием емкостной и индуктивной связей между линиями. При переключении элементов по сигнальным цепям протекают импульсные токи с крутыми фронтами, которые вследствие наличия паразитных связей (емкостных и индуктивных) наводят на соседних сигнальных проводниках помехи, которые при определенных условиях могут вызвать ложное срабатывание элементов схем.

Активная линия связи включает логический элемент (ЛЭ) – источник сигнала (Э1) и ЛЭ – приемник сигнала (Э2). Пассивная линия связи включает ЛЭ Э3 и Э4, один из которых является управляющим (к линии подключен выход логического элемента), другой – воспринимающим (к линии подключен вход логического элемента). В связи с этим различают два вида включения ЛЭ в пассивную цепь: согласное (Э3 – управляющий, Э4 – воспринимающий); встречное (Э3 – воспринимающий, Э4 – управляющий).

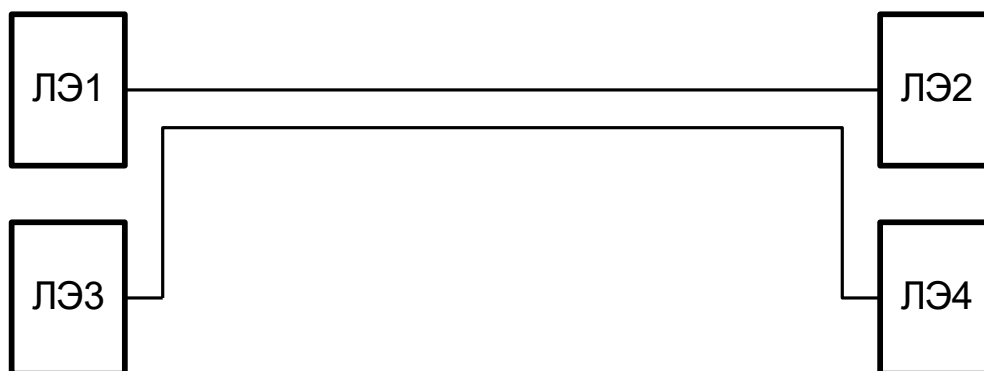


Рисунок 15.4 – Схема взаимодействующих линий связи.

Поскольку паразитная связь уменьшается с увеличением расстояния между линиями связи, существенными являются наводки от двух соседних линий. Эквивалентная схема взаимодействующих линий с паразитными связями приведена на рисунке 15.4

В реальных конструкциях линий связи имеет место комплексное взаимодействие (как емкостное, так и индуктивное), поэтому величина перекрестной помехи  $U_{II}$  будет определяться:

$$U_{II} = U_C \pm U_L, \quad (15.4)$$

где:  $U_C$  – емкостная составляющая помехи,  $U_L$  – индуктивная составляющая помехи; «+» для встречного «-» для согласного включения логических элементов.

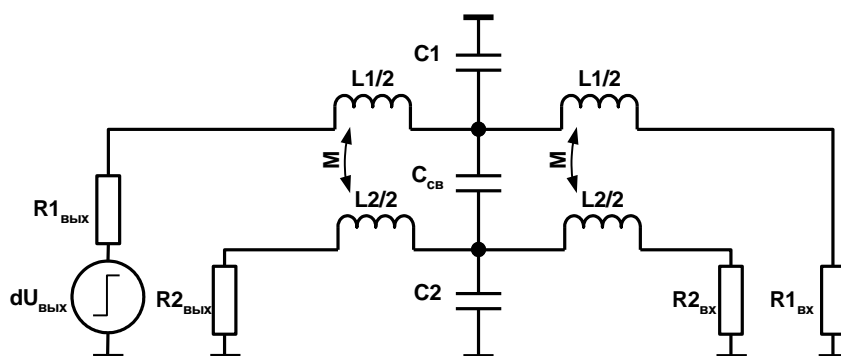


Рисунок 15.5 – Эквивалентная схема взаимодействующих линий связи.

Максимальные значения емкостной и индуктивной составляющих перекрестной помехи определяются из выражений:

$$U_C = dU \cdot C_{св} \cdot R_{вых}^1 / \tau_{фмин}, \quad (15.5)$$

где:  $dU$  – максимальный перепад напряжения на выходе источника сигнала активной линии,  $C_{св}$  – величина паразитной емкости между линиями связи;

$R_{вых}^1$  – выходное сопротивление источника сигнала активной линии;  $\tau_{фмин}$  – минимальная длительность фронта перепада напряжения;

$$U_L = -M \bullet \frac{dI}{\tau_{\text{фмин}}}, \quad (15.6)$$

где:  $M$  – взаимная индуктивность линий связи;  $dI$  – максимальный перепад тока в активной линии;  $\tau_{\text{фмин}}$  - минимальная длительность фронта тока.

При анализе разработанной топологии необходимо рассчитать паразитные параметры линий связей, имеющих на печатной плате наибольшую длину, минимальное расстояние, либо цепей, наиболее чувствительных к перекрестным помехам.

## Литература

1. Конструкторско–технологическое проектирование электронной аппаратуры: Учебник для вузов / К.И. Билибин, А.И. Власов, Л.З. Журавлева и др. Под общ. ред. В.А. Шахнова. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. — 528 с.: ил.
2. Преснухин Л.Н., Шахнов В.А. Конструирование ЭВМ и систем. Учебник для вузов. — М.: Высшая школа, 1991. — 525 с.: ил.
3. Преснухин Л.Н., Воробьев Н.В., Шишкевич А.А. Расчет элементов цифровых устройств. Издание второе, переработанное и дополненное. — М.: Высшая школа, 1986. — 512 с.: ил.
4. ГОСТ 20406-75 Платы печатные. Термины и определения.
5. ГОСТ 10.317-79 Платы печатные. Основные размеры.
6. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат: Учебник. — М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2005. — 560 с.: ил.
7. Конструирование РЭС: Учебное пособие по курсовому и дипломному проектированию / Авт.-сост. В.Ф. Борисов, А.А. Мухин, А.С. Назаров и др. — М.: МАИ, 1991. — 96с.: ил.
8. Ушкар М.Н. Конструирование электронно–вычислительных средств: Учебное пособие к практическим занятиям. — М.: МАИ, 2007 — 57с.: ил.
9. ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции.
10. Медведев А.М. Печатные платы. Конструкции и материалы. — М.: Техносфера, 2005. — 304 с.: ил.
11. Медведев А.М. Технология производства печатных плат. — М.: Техносфера, 2005. — 360с.: ил.
12. DipTrace. Руководство пользователя. Novarm Ltd., 2012г. — 223с. Режим доступа: [http://diptrace.com/books/trainings\\_rus.pdf](http://diptrace.com/books/trainings_rus.pdf), свободный. —Загл. с экрана (дата обращения: 27.08.2015).
13. ГОСТ 29137-91. Формовка выводов и установка изделий электронной техники на печатные платы. Основные требования и нормы конструирования.
14. ГОСТ Р 51040. Платы печатные. Шаги координатной сетки. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1997. — 7с.
15. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. — М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. — 616 с.: ил. — (Библиотека ЭМС).

## Содержание

Введение	2
1. Цель и задачи, объем курсового проектирования	2
2. Задание на курсовое проектирование	3
3. Состав курсового проекта	3
4. Расчет и проектирование типового элемента замены	4
5. Анализ электрической принципиальной схемы	5
6. Выбор конструкции печатной платы.	7
7. Расчет геометрических размеров печатной платы	9
8. Определение класса точности печатной платы	12
9. Выбор технологии изготовления печатной платы	14
10. Выбор финишных и защитных покрытий	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
11. Выбор материала основания и толщины печатной платы	21
12. Расчет элементов проводящего рисунка печатной платы	26
13. Расчет диаметров монтажных и переходных отверстий	28
14. Трассировка соединений на печатной плате	30
15. Анализ электромагнитной совместимости	32
15.1. Определение задержки в короткой линии связи	34
15.2. Определение перекрестной помехи	35
Литература	38

Приложение А – Образец титульного листа

**Министерство образования и науки Российской Федерации**

**Филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения  
высшего образования  
«Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске**

**Кафедра Вычислительной Техники**

**Направление 09.03.01 «Информатика и вычислительная техника»  
профиль «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети»**

**КУРСОВОЙ ПРОЕКТ**

**по дисциплине «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИИ СРЕДСТВ  
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ТЕХНИКИ»**

на тему

**«Разработка конструкции типового элемента замены»**

Студент группы *<наименование>*  
*<фамилия, инициалы студента>*

Руководитель  
*<должность, фамилия, инициалы  
руководителя>*

Смоленск 2019 г.