

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР)»



Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

Ю.П. Кобрин

Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств

Методические указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов очного и заочного обучения специальностей 211000.62 и 162107.65



Томск 2012

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
**«ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)»**

Ю.П. Кобрин

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Методические указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов очного и заочного обучения специальностей 211000.62 и 162107.65

Рецензент: доцент кафедры КИПР, к.ф.-м. н. Козлов В.Г.

Технический редактор: доцент кафедры КИПР, к.т.н. Озёркин Д.В.

Кобрин Ю.П.

Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств. Методические указания по курсовому и дипломному проектированию для студентов очного и заочного обучения специальностей 211000.62 и 162107.65

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 140 с.

Подробно проанализированы и освещены проблемы, возникающие в ходе курсового проекта по разработке конструкций печатных узлов радиоэлектронных средств на основе информационных технологий. В качестве базовых для синтеза конструкций печатных узлов предусмотрено использование системы SolidWorks, для проектирования печатного монтажа – САПР P-CAD. Сформулированы основная задача курсового проекта и разработаны методические указания по его выполнению для всех стадий проектирования. Приведены необходимые теоретические и справочные данные, нужные для выполнения курсового проекта, что позволяет свести к минимуму потребность в дополнительной литературе для студентов заочной и дистанционной форм обучения.

Пособие написано для студентов специальностей 211000.62 и 162107.65, но может быть использовано и студентами других специальностей радиотехнического профиля.

© Кобрин Ю.П., 2012

© Кафедра КИПР Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ	3
1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ	5
1.1 Информационные технологии проектирования современных РЭС	5
1.2 Цели и задачи курсового проекта	7
1.3 Задание на курсовое проектирование	8
2 МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ РЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ	11
2.1 Анализ частного технического задания на проектирование печатного узла.....	11
2.1.1 Формирование частного технического задания	11
2.1.2 Схемотехнические требования и ограничения.....	12
2.1.3 Конструктивные требования и ограничения	13
2.1.4 Эксплуатационные требования	15
2.1.5 Технологические требования	23
2.2 Выбор типа печатной платы.....	24
2.3 Выбор принципа проектирования печатных узлов.....	34
2.4 Выбор класса точности проектирования ПП	37
2.5 Выбор шага координатной сетки	38
2.6 Выбор группы жесткости	39
2.7 Выбор способов защиты устройства от внешних воздействий	40
2.8 Выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации РЭС	41
2.9 Определение вариантов установки ЭРЭ.....	42
2.10 Выбор материала основания	43
2.11 Определение габаритных размеров ПП.....	48
2.12 Расчет элементов печатного рисунка	51
2.12.1 Определение диаметров отверстий.....	53
2.12.2 Определение размеров металлизированных отверстий.....	54
2.12.3 Определение размеров неметаллизированных отверстий под крепежные детали	56
2.12.4 Округление размеров отверстий	57

2.12.5	Выбор формы контактных площадок	57
2.12.6	Определение размеров контактных площадок.....	58
2.12.7	Определение ширины печатных проводников.....	61
2.12.8	Расчет расстояния между элементами печатного рисунка.	63
2.13	Выбор конструкционных покрытий, припоев и флюсов.....	66
2.14	Выбор варианта формовки выводов и установки электрорадиоэлементов на ПП.....	74
3	ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПП С ПОМОЩЬЮ САПР P-CAD	92
3.1	Подготовка к проектированию печатных плат САПР P-CAD .	92
3.2	Размещение электрорадиоэлементов	96
3.3	Создание топологического рисунка проводящих слоев	99
3.4	Разработка маркировки	100
3.5	Разработка и оформление конструкторской документации ...	104
3.6	Указания по составлению и оформлению пояснительной записки	115
3.7	Оценка качества разработки.....	118
3.7.1	Анализ по технологическим характеристикам	118
3.7.2	Анализ по топологическим характеристикам и контролепригодности	119
3.7.3	Анализ по механическим и тепловым характеристикам ..	120
3.7.4	Анализ по электрическим и эксплуатационным характеристикам	120
4	ПРИМЕР ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЯ	122
4.1	Частное техническое задание.....	122
4.2	Анализ частного технического задания на проектирование печатного узла.....	124
4.2.1	Общие положения.....	124
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	137

1 ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

1.1 Информационные технологии проектирования современных РЭС

Проектирование современных радиоэлектронных средств (РЭС) заключается в принятии множества проектных решений по принципам действия функциональных узлов (ФУ), их схемам и построению конструкции, по элементной базе, а также по совокупности технологических процессов, предлагаемых для использования при их изготовлении, решению основных проблем технической эксплуатации [1 - 14]. Это процесс непрерывного уточнения модели проектируемого РЭС от замысла в виде технического задания к готовому проекту.

Преодолевая многообразные противоречия технического задания, проектировщик в процессе создания новых РЭС стремится выбрать **оптимальную пространственную компоновку узлов и блоков, составляющих РЭС, обеспечить их электрическое и механическое соединение и защиту от неблагоприятных воздействий внешних факторов и помех.**

Первостепенное требование при проектировании РЭС заключается в том, чтобы создаваемое устройство было эффективнее своего аналога, т.е. превосходило его по качеству функционирования, степени миниатюризации и технико-экономической целесообразности.

Поднять производительность труда проектировщиков, повысить качество, удешевить и сократить сроки проектирования можно с помощью эффективных **информационных технологий проектирования РЭС**, обобщающих опыт работы высококвалифицированных разработчиков на базе применения современных математических методов: теории графов, алгоритмов, математического программирования, исследования операций, вычислительных методов и т.д.

Под **информационными технологиями проектирования РЭС** будем понимать систематическое применение компьютеров в процессе проектирования при рациональном распределении функций между проектировщиком и компьютером. Применение информационных технологий проектирования РЭС должны способствовать обеспечению:

- нормальных режимов работы (защиту от влаги, тепловых, механических, радиационных, биологических, электромагнитных воздействий);
- снижению стоимости, в том числе и энергоемкости;
- уменьшению габаритов и массы;
- всемерному применению современных высоконадежных микроэлектронных электрорадиоэлементов;
- увеличению степени интеграции, микроминиатюризации межэлементных соединений и элементов несущих конструкций;
- электромагнитной совместимости и интенсификации теплоотводов;
- широкому внедрению методов оптимального проектирования;

- высокой технологичности, однородности структуры;
- максимального использования стандартизации;
- результативному формированию и удобной корректировке текстовой и графической документации.

Наилучшая форма организации процесса проектирования РЭС – использование интегрированных систем сквозного автоматизированного проектирования, позволяющих в значительной степени освободить разработчика от монотонной, трудоемкой и утомительной работы и повысить их интеллектуальные возможности на этапе принятия оптимальных решений.

К сожалению, в настоящее время подобной сквозной САПР, охватывающей все этапы проектирования РЭС, пока еще не создано. Тем не менее, существует колоссальное количество САПР, реализующих значительную часть проектных процедур проектирования РЭС. Один из возможных вариантов подобного комплексирования нескольких САПР, обеспечивающих решение большинства из стоящих перед проектировщиком РЭС задач, заключается в следующем.

1. Одной из популярнейших САПР конструкторского синтеза с весьма развитыми возможностями для создания и редактирования поверхностей, а также совместной обработки поверхностей и твердых тел является SolidWorks [17, 18] – параметрическая программа проектирования трехмерных моделей твердых тел, состоящих из элементов. Параметрические размеры в SolidWorks помогают так построить модель, что изменение конструкции становится простой задачей изменения размеров. SolidWorks – мощное средство проектирования, предоставляющее проектировщику реальные средства для создания прототипов, сборок, проверки динамики поведения изделий. SolidWorks способен стать ядром интегрированного комплекса автоматизации предприятия, с помощью которого осуществляется поддержка изделия на всех этапах жизненного цикла, инженерного анализа и подготовки производства изделий любой сложности и назначения, включая создание интерактивной документации и обеспечение обмена данными с другими системами.

2. В последнее время четко обозначилась тенденция группирования в интегрированные системы кроме инструментов геометрического моделирования и расчетных программ. Например, полностью интегрированный в SolidWorks COSMOSFloWorks [18] позволяет автоматически формировать сеточные модели объекта проектирования и проводить расчеты течений, теплообмена (и теплопередачи) любой сложности без какой-либо дополнительной передачи данных между ними.

3. Еще один модуль SWR-Электрика объединяет электрическую и механическую части проекта в единой среде проектирования SolidWorks, обеспечивает моделирование проводных соединений между контактами с использованием пополняемой библиотеки соединителей и различных материалов – проводов, многожильных кабелей, изоляционных трубок, экранирующих плетенок и т.д. На основе выполненного проекта монтажа, модуль автоматически

генерирует полную информацию об использованных материалах и выполненных соединениях, представляя ее в виде таблиц и отчетов.

4. Пакет программ P-CAD фирмы Personal CAD Systems, Inc. [20 - 40] – это полное комплексное программное решение для проектирования электронных устройств, в частности ввода схемы и проектирования схемной печатной платы. Комплексное решение предполагает, что логика, описанная в схеме, воплощается в топологию печатной платы; программы осуществляют функции логического моделирования, проверяют соблюдение правил проектирования, создают список соединений для моделирования, автоматически размещают компоненты и трассируют печатную плату и создают документы для автоматизированных производственных систем. Пакет содержит взаимодействующие средства проектирования, удобную для пользователя оболочку и интеллектуальную базу данных, обширную библиотеку, диалоговые редакторы, средства сопряжения с популярными средствами анализа. Пакет имеет открытую архитектуру, обеспечивает выдачу готовых документов для технологии монтажа и другую проектную документацию.

Особенностью курсового проекта является всемерное применение информационных технологий проектирования РЭС.

1.2 Цели и задачи курсового проекта

Предметом курсового проекта является разработка весьма распространенных в РЭС конструктивно законченных сборочных единиц электронных устройств – **печатных узлов (ПУ)**.

При разработке ПУ необходимо знать:

- принципы действия радиотехнических устройств и систем;
- особенности компоновок РЭС;
- свойства материалов и их проявления в различных условиях эксплуатации;
- технологию изготовления отдельных деталей и сборочных единиц;
- автоматизацию проектирования конструкций и технологических процессов;
- условия эксплуатации РЭС и методы защиты ее от дестабилизирующих факторов (теплообменные процессы, вибрации и удары, воздействие электромагнитных полей, радиации и влаги и т.д.);
- вопросы стандартизации, унификации и технологичности;
- правила оформления конструкторской документации и многое другое.

Перечисленные вопросы невозможно охватить сразу в полном объеме, поэтому главнейшими задачами, поставленными перед студентами при выполнении курсового проекта, являются:

- систематизация и расширение теоретических знаний при решении комплексных задач создания современных конструкций РЭС;

- совершенствование схмотехнических, конструкторских и графических навыков;
- практическое применение компьютерной техники при проектировании;
- изучение справочной и технической литературы по проектированию РЭС;
- изучение единой системы конструкторской документации (ЕСКД);
- подготовка к самостоятельному решению сложных конструкторских задач при выполнении дипломного проекта и последующей работы на промышленных предприятиях.

Таким образом, курсовое проектирование ставит своей целью систематизацию, закрепление и расширение теоретических знаний в области информационных технологий проектирования РЭС, развитие конструкторских и расчетных навыков, а также самостоятельности в работе.

1.3 Задание на курсовое проектирование

В начале семестра преподаватель-руководитель проекта выдает каждому студенту **индивидуальное задание на курсовое проектирование**. В нем указываются: срок выдачи задания, сроки проведения промежуточного контроля над выполнением отдельных этапов проектирования и дата защиты проекта.

Задание оформляется на специальном бланке, в котором записываются:

- тема проекта;
- исходные данные к проекту;
- перечисляются этапы работ;
- объем и содержание альбома конструкторской документации;
- объем и содержание расчетно-пояснительной записки;
- рекомендуемая литература;
- дополнительные указания к проекту.

После анализа студентом индивидуального задания на курсовое проектирование и уточнения совместно с руководителем проекта объема и содержания работ, необходимо разработать **расширенное частное технического задание (ЧТЗ)** на проектирование печатного узла.

Тема проекта. В ходе курсового проекта необходимо разработать конструктивно-законченные ФУ РЭС разнообразного назначения: бортовые, морские, наземные и т.д. При выборе темы проекта рекомендуется отдавать предпочтение ФУ, входящим в состав РЭС (или законченное РЭС), содержащие в составе не более 50 электрорадиоэлементов. Поощряются реальные темы курсовых проектов.

По конструктивной сложности разрабатываемое РЭС должно быть не ниже 1-го структурного уровня и выполнено с учетом стадий проектирования по ЕСКД.

Исходные данные к проекту. Исходными данными для выполнения проекта являются:

1) схема электрическая принципиальная ФУ с описанием работы, с перечнем входящих электрорадиоэлементов (ЭРЭ) и их параметров;

2) электрические требования с указанием данных, наиболее характерных для разрабатываемого устройства, например для радиоприемного устройства: чувствительность, избирательность, рабочий диапазон частот и другие; для радиопередающего устройства – стабильность частоты, выходная мощность, рабочий диапазон частот и т.д.;

4) условия эксплуатации различных типов РЭС в зависимости от климатических особенностей местности, где они будут работать, рода объекта (корабль, самолет, спутник и т.д.) и других причин задаются указанием в расширенном техническом задании конкретных количественных показателей воздействий. Например, бортовое самолетное РЭС: устойчивость к климатическим воздействиям по ГОСТ 15150-69, к механическим – по ГОСТ 16019-78 и ГОСТ 17676-81; условия хранения и транспортирования по ГОСТ 15150-69;

5) технико-экономические требования задаются серийностью производства устройства и группой изделия в зависимости от стоимости его разработки и производства (1, 2, 3 группы)¹.

Объем и содержание графических работ. Графическая часть проекта включает комплект чертежей на разрабатываемую печатную плату (ПП) объемом не менее 6 листов формата А4 по ГОСТ 2.301-68, выполненных с использованием компьютера:

- исходная схема электрическая принципиальная проектируемого РЭС (или рисунок из источника проектирования) с указанием применяемых электрорадиоэлементов;

- схема электрическая принципиальная проектируемого печатного узла РЭС и перечень электрорадиоэлементов к ней;

- чертеж печатной платы;

- сборочный чертеж печатного узла и спецификация к нему;

- чертеж общего вида проектируемого РЭС с использованием SolidWorks.

¹ К 1-й группе относится аппаратура, стоимость которой должна быть минимальной. Это в основном аппаратура бытового назначения.

К 2-й группе относится аппаратура, стоимость разработки и производства которой имеет существенное, но не первостепенное значение (медицинская аппаратура, радиостанции низовой народнохозяйственной радиосвязи и др.).

К 3-й группе относится аппаратура, к которой предъявляются жесткие требования по обеспечению заданных технических характеристик.

Объем и содержание расчетно-пояснительной записки. Расчетно-пояснительная записка должна состоять не менее чем из 20 печатных листов, выполненных с использованием текстового процессора Word или схожего по возможностям.

Рекомендуемая литература. Руководитель проекта называет литературу, которую целесообразно использовать студенту при разработке конструкции ПП.

Дополнительные указания к проекту. Этот раздел используется руководителем проекта для включения дополнительных требований к проекту исследовательского характера. Очевидно, что первоначальный выбор большинства характеристик (тип платы, ее габаритные размеры, параметры печатных проводников и т.п.) в процессе проектирования уточняется и изменяется. Дополнения, которые появляются у студента при работе над курсовым проектом, также включают в этот раздел.

Поскольку цикл разработки печатного узла включает в себя довольно много этапов и процедур, и на каждом этапе нужно учитывать большое количество факторов, то разумно более конкретно подвергнуть рассмотрению методику проектирования ПУ на основе информационных технологий.

2 МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНЫХ УЗЛОВ РЭС С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

2.1 Анализ частного технического задания на проектирование печатного узла

2.1.1 Формирование частного технического задания

Одна из основных особенностей современных методов проектирования РЭС, позволяющая избежать односторонних ошибочных представлений и решений, заключается в системном подходе, который является средством анализа и синтеза при одновременном использовании большого числа элементов и факторов, а также взаимосвязей, образующих данную систему. Системный подход позволяет рассматривать РЭС как единое целое при анализе и проектировании ее частей. При этом необходимо иметь способ объединения частей в единое целое.

Проектирование РЭС на основе информационных технологий и системного подхода основывается на анализе схемы электрической принципиальной и технических требований, выданных по заданию на курсовой проект. Оно сопровождается оценкой элементной базы, компоновкой, разработкой сборочных и детальных чертежей, выбором электрических соединений, соединителей, материалов и покрытий предлагаемой конструкции. При этом особое внимание обращается на обеспечение требований комплексной миниатюризации, надежности, стандартизации и технологичности.

ЧТЗ на проектируемый ПУ формируется на основании технического задания (ТЗ) изделия (индивидуального задания на курсовое проектирование). В ЧТЗ обычно оговаривают условия эксплуатации, серийность выпуска, условия размещения печатной платы в изделии и способа ее крепления, габаритно-установочные размеры, вид электрической коммутации платы с выносными ЭРЭ и другими узлами и т.п. Совместно со схемой электрической принципиальной, перечнем элементов и картой электрических режимов **ЧТЗ является основополагающим документом** для разработки печатного узла.

Анализ ЧТЗ проводится в целях выявления схемотехнических, конструктивных, эксплуатационных и технологических требований и ограничений на ПУ. При отсутствии в ЧТЗ необходимых требований их необходимо **непрерывно определить дополнительно**, так как в противном случае качество разработки ПП гарантировано быть не может.

2.1.2 Схемотехнические требования и ограничения

После изучения описания РЭС, приведенного в индивидуальном задании на курсовое проектирование, уяснения его принципа работы и назначения, следует приступить к анализу его электрической схемы. Цель такого анализа – выделение из нее схемы электрической принципиальной функционально законченного узла, который следует выполнить печатным монтажом, и определение схемотехнических требований и ограничений.

Схемотехнические требования вырабатываются на основе анализа электрических схем и карты электрических режимов работы ЭРЭ, выполненных с помощью схемотехнических САПР [15, 16]. Такой анализ позволяет обнаружить компоненты, ФУ и электрические цепи, определяющие особенности компоновки ЭРЭ на печатной плате и размещения топологического рисунка.

Необходимо определить:

- на каких элементах схемы выделяется значительная мощность. Обычно такие элементы требуют дополнительного теплоотвода с помощью радиаторов [12, 13];

- **теплочувствительные ЭРЭ**, для того чтобы разместить их подальше от ЭРЭ, являющихся источниками значительного тепловыделения;

- **массивные и крупногабаритные ЭРЭ** (силовые трансформаторы, дроссели, предохранители, транзисторы, лампы большой мощности и т.п.). Для таких ЭРЭ, в зависимости от условий эксплуатации, могут потребоваться дополнительные крепления или фиксация, чтобы существенно не снизить надежность ПУ. Если масса ЭРЭ более 70 г. или габариты такого элемента слишком велики, размещать на печатной плате ФУ его не целесообразно (во всяком случае, без специального обоснования и учета последствий);

- какие электрорадиоэлементы относятся к органам управления РЭС и органам контроля над его работой. Как правило, подобные элементы не размещают на печатной плате, а выносят на лицевую или заднюю панель корпуса РЭС. Туда же обычно выносят элементы включения (выключения) питания, входные и выходные гнезда, элементы индикации, регистрирующие приборы и другие элементы, которые нецелесообразно размещать на печатной плате;

- **подборные ЭРЭ и ЭРЭ с небольшой надежностью** (для принятия необходимых мер по многократной перепайке при настройке, регулировке и эксплуатации или быстрой замены их с помощью разъемов, колодок, зажимов и т.п.);

- способ соединения ФУ с оставшейся частью схемы РЭС. Будет ли это соединение выполняться с помощью разъема или без него, например, с помощью жгута, припаиваемого к монтажным стойкам или клеммам печатной платы;

- места введения в топологию проводящего рисунка **контрольных контактных площадок**, необходимых для проведения внутрисхемного контроля электрических параметров без разборки;

- функциональное назначение различных электрических цепей схемы. В частности, следует выделить **потенциальные** (питания и земли), **сигнальные** (маломощные) и **управляющие цепи**, а также **цепи с большой величиной сигнала**, которые необходимо **экранировать**.

Разделение электрических цепей на группы в особенности важно для обеспечения электромагнитной совместимости высокочастотных РЭС, при проектировании многослойных ПП, а также аппаратуры с малым уровнем входных токов. Вместе с тем силовые цепи должны обеспечивать прохождение значительных токов, для чего потребуются проводники с большим поперечным сечением (шириной). При высоком напряжении возникает вероятность пробоя между печатными проводниками, что вынуждает увеличивать расстояния между ними.

Кроме того, для правильного выбора ЭРЭ следует знать значения и вид (постоянный, переменный, пульсирующий или импульсный) токов в цепях и напряжений на ЭРЭ (это особенно важно для цепей с электролитическими конденсаторами). При необходимости могут быть указаны требования по расположению цепей и компонентов с точки зрения электромагнитной совместимости и введению испытательных контактных площадок.

В результате выполненного анализа ЧТЗ должны быть найдены основополагающие конструктивно-технологические решения и сформирована схема электрическая принципиальная ПП, состоящая только из тех ЭРЭ, которые следует разместить на печатной плате ФУ². Выделенная схема ПП ФУ согласовывается с преподавателем.

2.1.3 Конструктивные требования и ограничения

В ЧТЗ должно быть указано назначение РЭС (профессиональное, бытовое, стационарное, переносное и т.д.), так как им в большинстве случаев обусловливается принятие того или иного конструктивно-технологического решения при проектировании печатного узла.

Конструктивные требования включают в себя:

- габаритные размеры ПУ или требования к его размещению в РЭС;
- вариант крепления ПУ в устройстве. Для крепления ФУ можно использовать:
 - разъем (тот же, что используется для электрического соединения);
 - зажимы;

² Такую схему целесообразно выделить на исходной схеме РЭС штрихпунктирной линией.

- направляющие;
- крепежные винты и т.п. детали.
- способ соединения ФУ с другими частями РЭС (сварка, пайка, разъёмное соединение, жгут и т.д.)
- места расположения на ПП входных и выходных цепей;
- проверку правильности выбора ЭРЭ, указанных в перечне к схеме и определение вариантов замен ЭРЭ при необходимости.

Проверку правильности выбора ЭРЭ следует производить сравнением данных, помещенных в справочниках по эксплуатационным характеристикам [43 - 46] с соответствующими значениями³, указанными в ЧТЗ на разработку устройства или полученных расчетным путем с помощью соответствующих схемотехнических САПР (*PSPice, MicroCAP, OrCAD* и т.п.) [15, 16].

Надежность электрорадиоэлементов РЭС очень зависит от температуры окружающей среды. Для каждого типа элемента в технических условиях указывается предельная температура, при превышении которой элемент нельзя эксплуатировать. Поэтому одна из важнейших задач конструктора РЭС состоит в том, чтобы обеспечить правильные тепловые режимы для каждого элемента. Для повышения надежности РЭС рекомендуется рабочий режим электрорадиоэлементов по току, напряжению и мощности выбирать с коэффициентом запаса не более $K_3 = 0.7$ от паспортного.

Возможен случай, когда основная часть элементов схемы удовлетворяет требованиям ЧТЗ, а остальная часть не может нормально работать при заданных внешних воздействиях. В этом случае необходимо предусмотреть специальные меры, ограничивающие диапазон эксплуатационных воздействий на эти элементы. К таким мерам, в частности, относятся: локальная герметизация, термостатирование, амортизация и др.

Следует самому сделать выбор типа равноценного заменяющего элемента, если:

- указанный в схеме электрической принципиальной тип радиоэлемента не подходит для печатного монтажа;
- на схеме РЭС и в его описании не указан тип радиоэлемента;
- радиоэлемент является **устаревшим** и не выпускается промышленностью;
- радиоэлемент не входит в перечень допустимых к применению на данном предприятии.

При выборе типа заменяющего ЭРЭ следует учитывать:

- идентичность его по функциональному назначению, электрическим и частотным параметрам;
- возможность его установки (крепления) на печатную плату;

³ Характеристики и стоимость современных отечественных и зарубежных электрорадиоэлементов можно также получить через Интернет из каталогов предприятий и электронных магазинов, осуществляющих их поставку. Например, по адресам <http://www.platan.ru>, <http://www.promelec.ru>, <http://www.chipinfo.ru> и др.

- условия эксплуатации⁴;
- класс точности изготовления элемента;
- стоимость;
- допустимую мощность рассеивания;
- допустимое рабочее напряжение;
- допустимый рабочий ток.

При избрании класса точности изготовления элемента нельзя забывать, что чем больше технологический разброс параметров у выбранного элемента, тем меньше его стоимость. С другой стороны, класс точности изготовления элементов (допуски на комплектующие элементы) оказывает огромное воздействие на разброс значений выходных параметров РЭС. Если выбран элемент с большим разбросом, то, вероятно, потребуется его подборка при наладке, что может увеличить стоимость РЭС.

2.1.4 Эксплуатационные требования

Создаваемая конструкция должна обеспечивать защиту РЭС при эксплуатации от воздействий внешней среды: климатических, механических воздействий и помехонесущих полей.

Параметры **климатических воздействий** (температура и влажность окружающей среды, атмосферное давление, осадки, ветер, пыль, солнечная радиация, содержание коррозионно-активных агентов) позволяют выбрать группу жесткости РЭС и избрать способ дополнительной защиты от их влияния.

В соответствие с принятой классификацией (ГОСТ 15150-69) различают шесть типов климатических районов:

- на суше – с умеренным климатом (У), с холодным климатом (ХЛ), с влажным тропическим климатом (ТВ), с сухим тропическим климатом (ТС);
- на морях и океанах – с умеренно холодным морским климатом (М), с тропическим морским климатом (ТМ).

Любое изделие может иметь **климатическое исполнение**, соответствующее указанным районам и обозначаемое сокращенно теми же буквами, какими обозначен район:

- изделие, предназначенное для работы, как при влажном, так и при сухом тропическом климате, обозначают буквой **Т**;
- исполнение, допускающее работу во всех климатических районах на суше, обозначают буквой **О**;
- исполнение для всех морских районов – буквой **М**;
- исполнение для всех районов на суше и на море – буквой **В**.

⁴ Если условия эксплуатации не оговорены в ТЗ, считаем, что разрабатываемый Вами узел РЭС будет работать в лабораторных условиях, в отопляемых и хорошо проветриваемых помещениях.

Разделение поверхности земного шара на климатические районы производят по следующим признакам:

- к районам с *умеренным климатом* относят районы, в которых температура воздуха лежит в пределах от +40 до –45 °С;

- к районам с *холодным климатом* относят районы, в которых минимальная температура ниже –45 °С;

- районы, где температура больше +20 °С в сочетании с высокой относительной влажностью (более 80%) наблюдается не менее 12 ч в сутки непрерывно не менее двух месяцев подряд, относят к районам с *влажным тропическим климатом*;

- если температура воздуха превышает +40 °С, а влажность ниже норм, указанных в предыдущем пункте, то такой климат называют *тропическим сухим*;

- к районам с *умеренно холодным морским климатом* относят моря и океаны, расположенные севернее 30° северной широты и южнее 30° южной широты, при условии, что температура в них не опускается ниже –45 °С;

- в морских районах, расположенных между 30° северной широты и 30° южной широты, климат *тропический морской*.

Условия эксплуатации РЭС в сильной мере зависят от вида помещения или укрытия, в котором она расположена. В соответствии с этим РЭС подразделяют на пять категорий.

1. РЭС, предназначенное для эксплуатации непосредственно *на открытом воздухе*.

2. РЭС, предназначенное для эксплуатации в помещениях, где колебания температуры и влажности воздуха несущественно отличаются от колебаний на открытом воздухе, и имеется сравнительно свободный доступ наружного воздуха, например в палатках, в кузовах, прицепах, под навесами при отсутствии прямого воздействия солнечной радиации и атмосферных осадков.

3. РЭС, предназначенное для работы в *неотапливаемых закрытых помещениях с естественной вентиляцией*.

4. РЭС, предназначенное для работы в *закрытых отапливаемых и вентилируемых помещениях*.

5. РЭС, предназначенное для работы в помещениях с *повышенной влажностью*, например в неотапливаемых и невентилируемых подземных помещениях, в трюмах кораблей, где возможно длительное наличие воды, и т.п.

Конкретные значения температуры и влажности воздуха для различных климатических исполнений и категорий аппаратуры указаны в соответствующих стандартах.

Холодоустойчивое РЭС должно быть сконструировано так, чтобы при заданной отрицательной температуре ее параметры сохранялись в заранее установленных пределах. При эксплуатации РЭС в арктических и антаркти-

ческих условиях температура воздуха может понижаться до $-(70...80)^{\circ}\text{C}$. То же самое происходит и при подъеме на высоту более 10 км.

Понижение температуры оказывает влияние на работу электромеханических устройств, так как значительные перепады ее (например, при подъеме самолета от $+20$ до -60°C) приводят к изменениям зазоров и натягов, поскольку материалы конструкций РЭС имеют разные коэффициенты линейного расширения. Одновременно происходит сгущение смазочных веществ, что вызывает увеличение моментов и сил трения в подвижных устройствах и может привести к заклиниванию механизмов. При понижении температуры окружающего воздуха резко снижается прочность материалов (особенно при ударных нагрузках), существенно меняются и многие параметры ЭРЭ. При низких температурах в припое возникают внутренние напряжения, и так как припой плохо работает на растяжение, то возможно разрушение паяных кожухов РЭС, мест пайки и т.д.

Свойство РЭС сохранять стабильность параметров в определенных пределах при повышении температуры называют **теплоустойчивостью**.

При работе РЭС в районах с тропическим климатом температура воздуха может повышаться до $+45^{\circ}$, а в отдельных случаях и более. В закрытых помещениях, находящихся под непосредственным воздействием солнца (в самолете, который стоит на земле), температура воздуха может достигать $+70^{\circ}\text{C}$.

Обшивка сверхзвукового самолета, обтекателя ракеты могут нагреваться в результате трения о встречный газовый поток до $+(150...200)^{\circ}\text{C}$, а расположенные в них РЭС будут работать при температуре порядка $+100^{\circ}\text{C}$ и выше.

Повышение температуры окружающего воздуха вызывает увеличение сопротивления проводниковых материалов⁵ и ухудшение параметров изоляционных материалов (особенно органических). Происходящее при этом уменьшение сопротивления изоляции приводит к увеличению потерь, к появлению утечек в схемах, к уменьшению добротности контуров и к другим нежелательным явлениям. Одновременно происходит уменьшение электрической прочности диэлектриков, что может приводить к пробоям в схеме и полному отказу РЭС. При изменении температуры окружающей среды меняется диэлектрическая проницаемость диэлектриков. Если диэлектрик, у которого это изменение велико, применить в конденсаторе, образующем вместе с катушкой резонансный контур, то при изменении температуры будет меняться и частота настройки контура. При этом изменится выходной уровень сигнала передатчика, где этот контур используется, что может привести к потере связи.

При длительной работе РЭС в условиях повышенной температуры могут появиться необратимые изменения параметров изоляционных материалов.

⁵ Например, перегрев технической меди на 100°C приводит к увеличению сопротивления на 40 %.

Значительно увеличивают свою проводимость с повышением температуры полупроводниковые материалы, что может привести к существенному изменению электрических режимов в схеме. При температуре свыше $+(85...100)^\circ\text{C}$ в германиевых и $+(120...150)^\circ\text{C}$ в кремниевых полупроводниковых приборах наступают необратимые изменения, приводящие к выходу их из строя.

Повышение температуры приводит к резкому снижению надежности работы большинства ЭРЭ. Так при повышении температуры с 20 до 60°C интенсивность отказов возрастает: у электронно-вакуумных приборов в $1.5...2$ раза, у резисторов в $2...3$ раза, у полупроводников приборов в $3...4$ раза, у конденсаторов в $6...8$ раз, у микросхем в $6...10$ раз.

Очевидно, тепловой режим является важнейшим фактором, определяющим эксплуатационную надежность РЭС, и задача проектировщика обеспечить нормальный тепловой режим [5 - 13].

Влагоустойчивое РЭС должно сохранять параметры в заранее установленных пределах при работе в среде с повышенной относительной влажностью.

Количество влаги, содержащейся в воздухе при различных климатических условиях, различно. В областях умеренного климата относительная влажность воздуха составляет $65...80\%$; в пустынях она может уменьшаться до $5...10\%$, а в тропиках – достигать 100% при температуре воздуха до $+35^\circ\text{C}$.

Понижение температуры сопровождается уменьшением количества паров воды в воздухе, поэтому суточные колебания температуры могут сопровождаться выпадением влаги на поверхности и внутри РЭС. Подобные явления могут произойти при попадании самолета в насыщенный влагой воздух (туман), если температура РЭС ниже температуры воздуха.

При воздействии воздуха с высоким содержанием водяных паров, особенно при повышенной температуре, влага проникает внутрь изоляционных материалов через микротрещины или благодаря явлению диффузии. Так как проводимость воды значительно выше проводимости диэлектриков, то воздействие влаги приводит к резкому уменьшению сопротивления изоляции, росту потерь в диэлектрике и изменению относительной диэлектрической проницаемости. Влажность меняет многие свойства поверхности металлов: прочность, электропроводность, теплопроводность, степень черноты, степень шероховатости и т.п.

Воздействуя на металлы, влага вызывает появление коррозии металлов. В результате коррозии ухудшается декоративный вид поверхностей, зеркальные поверхности теряют отражательную способность, разъемные соединения труднее разъединяются. При коррозии может происходить разгерметизация герметичных металлических корпусов. Из-за уменьшения поверхностной электрической проводимости при коррозии увеличивается переходное сопротивление контактов реле, переключателей и других коммутирующих элементов, снижается добротность катушек индуктивности. Повышенная влажность

снижает сопротивление изоляции у коммутирующих устройств и между проводниками печатных плат функциональных узлов.

В трансформаторах влага, проникая через трещины в заливке, уменьшает сопротивление изоляции и способствует развитию электрохимических процессов между витками, находящимися под разными потенциалами, что способствует возникновению пробоя.

Отметим, что некоторые категории РЭС, эксплуатируемые в полевых условиях (наземные, транспортируемые и переносные, морские) нередко работают при непосредственном воздействии атмосферных осадков (дождь или брызги). Кроме того, в отдельных случаях возможна работа РЭС в воде.

Негативное влияние на РЭС оказывают **биологические воздействия**. Высокая влажность воздуха способствует образованию на органических изоляционных материалах плесневых грибков. Они развиваются на пластмассах, красках, лаках, коже, резине, текстиле. Хорошей питательной средой для плесени является канифоль, которая может оставаться на местах пайки. При появлении плесени снижается сопротивление изоляции, ускоряется процесс коррозии металлов, разрушаются защитные покрытия, нарушаются контакты, возможны замыкания, пробой и т.п.

В некоторых тропических районах водятся термиты, которые, попадая в РЭС, поедают древесину, пластмассы с древесным наполнителем и некоторые другие органические материалы. Тараканы, забираясь внутрь РЭС, повреждают изоляцию и нарушают контакты коммутирующих устройств. Выделения термитов, тараканов, красных муравьев и других насекомых увеличивают проводимость между проводниками, что может привести к нарушению работы РЭС и к коротким замыканиям.

На промышленных предприятиях и в промышленно развитых городах с тяжелой индустрией РЭС могут эксплуатироваться в **воздухе, загрязненном различными коррозионно-активными агентами** (озоном, хлором, аммиаком, сернистым газом и пр.). Коррозионно-активные агенты активизируют в конструкциях РЭС химические реакции, такие как физико-химическая коррозия металлов, разрушение покрытий и снижение сопротивления изоляции.

Все категории РЭС, особенно устанавливаемой на подвижных объектах, работают при интенсивном воздействии **пыли**. Попадая в смазочные материалы движущихся механических устройств, пыль вызывает окисление смазочных материалов, повышает у них трение и износ. Оседая на поверхности различных деталей и ЭРЭ, пыль создает хорошие условия для их увлажнения. Содержащиеся в пыли растворимые соли также хорошо поглощают влагу. При этом на поверхности металлов может происходить коррозия, а на поверхности изоляционных материалов адсорбция влаги. В печатных платах снижается сопротивление изоляции, что приводит к трудно обнаруживаемым отказам. Увлажненная пыль способствует разрушению лакокрасочных покрытий. Пыль плохо проводит тепло, и оседание её на поверхностях тепловыделяющих элементов приводит к увеличению нагрева и отказу этих элементов.

При подъеме на значительную высоту происходит **уменьшение атмосферного давления**. Понижение давления воздуха сопровождается уменьшением его электрической прочности, что в ряде случаев может привести к пробою воздушных промежутков. С понижением атмосферного давления увеличивается температура тепловыделяющих элементов, так как ухудшается теплоотдача от нагретых частей РЭС за счёт конвекции (перенос тепла движущимися воздушными потоками), в результате чего их температура повышается.

При проектировании РЭС для космических аппаратов следует учитывать тепловое воздействие **невесомости**, которое характеризуется отсутствием конвективной составляющей теплоотдачи от тепловыделяющих элементов.

Солнечная радиация (ультрафиолетовое и инфракрасное излучения, а также излучение в видимой части спектра):

- изменяет цвет и структуру поверхностного слоя материалов (каучука, пластмасс, тканей и др.);
- разлагает полимеры, содержащие хлор, например полихлорвинил;
- разрушает лакокрасочные покрытия;
- способствует старению ряда материалов, например пластмасс;
- ускоряет процесс атмосферной коррозии.

Громадное влияние на конструкцию РЭС, размещенных на подвижных объектах, оказывают параметры механических воздействий (удары, вибрации, линейные ускорения), которые возникают из-за наличия неуравновешенных подвижных масс при передвижении по дорогам, при посадках самолетов, стрельбе из оружия, при изменении скорости движения и т.д. При этом на каждый элемент конструкции РЭС действует сила

$$F = m \cdot a,$$

где m – масса элемента конструкции; a – ускорение.

Воздействие этой силы вызывает деформацию отдельных частей конструкции, из-за чего возможно изменение параметров РЭС и даже ее полное разрушение.

Удары возникают при резком изменении ускорения и характеризуются количественно ускорением (от десятков до тысяч g) и длительностью (от долей до десятков миллисекунд). **Линейные ускорения** действуют на РЭС, размещённых на автономных подвижных объектах (самолетах, ракетах и т.п.).

Отношение силы F , появляющееся в результате воздействия ускорения, к силе тяжести P называют перегрузкой:

$$G = F/P.$$

Значение перегрузки G показывает, во сколько раз дополнительная сила F больше силы тяжести P , действующей на РЭС. Если известна перегрузка, то появляющаяся при этом сила может быть вычислена по формуле:

$$F = P \cdot G.$$

Вибрации представляют собой механические колебания, характеризующиеся диапазоном частот и ускорением. Особенно опасен механический резонанс, когда частота вынуждающего колебания совпадает с частотой собственных механических колебаний конструкции РЭС или отдельных её элементов. Под воздействием вибрации могут происходить нарушения в работе, и даже разрушение РЭС из-за взаимного перемещения отдельных элементов конструкции. Если на аппарат воздействует синусоидальная вибрация, то перегрузка равна:

$$G \approx 0.004 \cdot A \cdot f^2,$$

где A – амплитуда вибрации, мм; f – частота вибрации, Гц.

Вибропрочное и ударопрочное РЭС должно противостоять разрушающему действию длительной вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений, а также действию ударов заданной силы и длительности и способно после этого нормально выполнять свои функции.

Ориентировочные значения перегрузки G для РЭС, которые эксплуатируются в различных условиях, приведены в таблице 2.1.

Следует учесть, что условия, в которых находятся ЭРЭ, могут отличаться от условий, в которых работает все РЭС. Так, из-за выделяемой в РЭС теплоты температура внутри корпуса может значительно превышать температуру окружающей среды. При хорошей герметизации корпуса влажность воздуха вблизи ЭРЭ может быть существенно ниже влажности окружающего воздуха и т.д.

Таблица 2.1 – Перегрузки G для различных категорий РЭС

Категория аппаратуры	f_{\max} , Гц	Максимальная перегрузка при вибрации	Максимальная ударная перегрузка
Автомобильная	80	4	10
Самолетная	400	10	10
Корабельная	100	2.5	12

Чтобы обеспечить надежную работу РЭС в условиях механических воздействий, необходимо при проектировании предусмотреть специальные меры защиты. Это, например, выбор правильной ориентации элементов на плате (с учетом ориентации платы в блоке), способов дополнительного крепления ЭРЭ, материала основания, габаритов печатной платы и т.д.

Характер и интенсивность механических воздействий оценивают степенями жесткости, оговоренными в ГОСТ 16962–71*. Отметим, что комплекс воздействий и значения воздействующих факторов кроме климатических условий сильно зависят от характеристик объекта, на котором установлено РЭС, и даже от конкретного места установки. Например, факторы, действующие на РЭС, установленное на мачте корабля, отличаются от тех, которые действуют на РЭС, установленное в радиорубке.

2.1.5 Технологические требования

Попытки изготовить РЭС с учетом только эксплуатационных требований приводят, как правило, к ее усложнению и созданию конструкций, которые невозможно осуществить без больших материальных затрат. Конструкция РЭС технологична [14], если обеспечиваются:

- сборка без подгонок и доделок;
- взаимозаменяемость узлов и деталей по электрическим параметрам⁶;
- независимая регулировка отдельных узлов и приборов, что способствует сокращению производственного цикла изготовления изделия.

В своей практической деятельности разработчик РЭС должен руководствоваться следующими **производственно-технологическими требованиями**.

1. Максимально использовать более дешевые и надежные стандартизованные и нормализованные изделия, выпускаемые на специализированных заводах, на которых применяют высокопроизводительное специальное оборудование, позволяющее механизировать и автоматизировать процесс производства. Это позволяет исключить затраты на разработку схожих изделий, технологического процесса, специального инструмента, оборудования и значительно сокращает сроки подготовки производства РЭС.

2. Максимально использовать опыт предыдущих аналогичных разработок. Приступая к разработке какого-либо узла или РЭС, разработчик обязан тщательно проанализировать требования, предъявляемые к схемам, конструкциям и характеристикам уже выпускаемых изделий-прототипов, и сравнить их с требованиями к изделию, подлежащему разработке. Такой анализ позволяет проектировщику установить – пригодно ли уже освоенное изделие для нового РЭС, и если нет, то какие минимальные переделки понадобятся.

3. Пытаться сократить номенклатуру деталей в каждом изделии.

4. Стремиться к максимальной простоте изделия, что будет способствовать минимизации трудовых затрат, количества материалов (особенно дефицитных), рабочих площадей, снижению требований к квалификации рабочих.

Технология изготовления влияет на объем выпуска. В соответствии с ГОСТ 14.004-83 в зависимости от объема выпуска изделий современное производство подразделяется на единичное, серийное и массовое.

На предприятиях единичного производства используется универсальное точное оборудование, а специальные дорогостоящие инструменты и приспособления, как правило, не применяют. Взаимозаменяемость деталей и узлов во многих случаях отсутствует, широко распространена пригонка по месту. Уровень механизации низкий и стоимость аппаратуры высокая.

⁶ Особенно важно обеспечить взаимозаменяемость деталей и узлов в изделиях массового и серийного производства, так как без этого невозможны механизация и автоматизация производства.

При массовом и крупносерийном производстве широко применяются высокопроизводительные автоматические линии и автоматизированные производственные системы, специальная оснастка. Средняя квалификация рабочих в современном массовом производстве ниже, чем в единичном, так как на настроенных станках и автоматическом оборудовании могут работать рабочие-операторы сравнительно низкой квалификации.

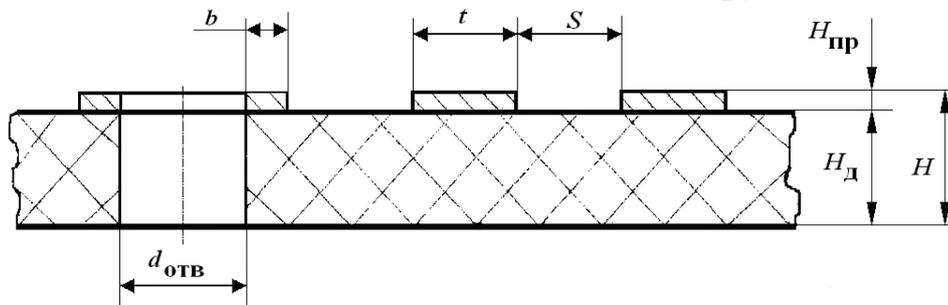
2.2 Выбор типа печатной платы

Первостепенной конструктивной базой современных РЭС являются печатные платы с установленными на них электрорадиоэлементами. ПП объединяют ЭРЭ и электрический монтаж в единую конструкцию, что создает предпосылки для комплексной механизации и автоматизации процессов изготовления и сборки РЭС, обеспечивает гарантированную стабильность и повторяемость параметров монтажа (проводимостей, паразитных емкостей и индуктивностей) от образца к образцу. По сравнению с традиционным монтажом проводниками увеличивается плотность монтажных соединений и появляется возможность микроминиатюризации изделий.

Применение печатного монтажа позволяет уменьшить габариты и массу проектируемых РЭС, снизить трудоемкость, материалоемкость и себестоимость, повысить стойкость к климатическим и механическим воздействиям, увеличить надежность за счет сокращения количества соединений и уменьшения ошибок при монтаже.

В настоящее время в РЭС наибольшим предпочтением пользуются:

- односторонние печатные платы (ОПП), имеющие один изоляционный слой, на котором находятся проводники⁷ (рисунок 2.1), отличающиеся точностью воспроизведения проводящего рисунка, простотой технологического процесса изготовления ПП и низкой стоимостью конструкции⁸;



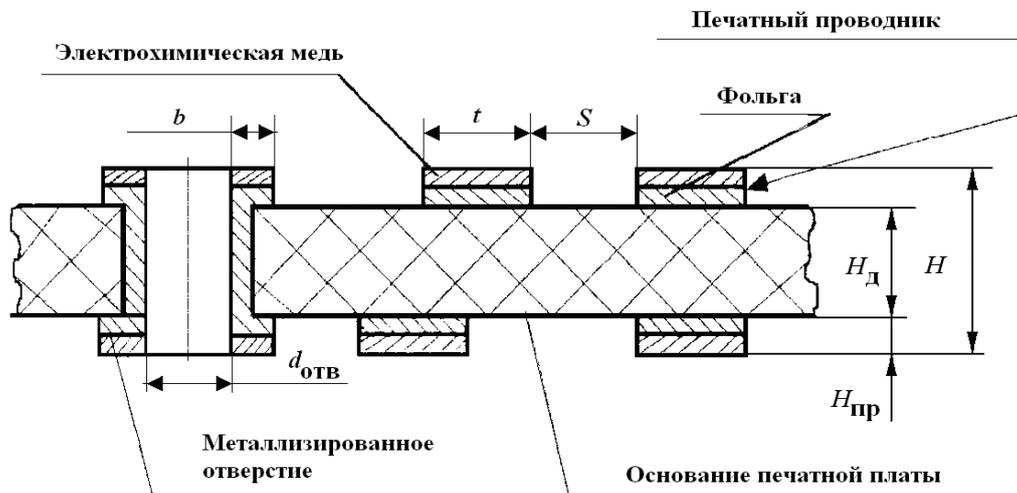
t – ширина печатного проводника; S – расстояние между проводниками

Рисунок 2.1 – Конструкция односторонней печатной платы

⁷ Корпусные ЭРЭ с радиальными выводами устанавливаются на поверхность ОПП с противоположной рисунку проводников стороны.

⁸ В частности, 80-90% бытовой аудио-видеотехники ведущих зарубежных производителей (SONY, PANASONIC, LG и т.д.) выполняется на ОПП.

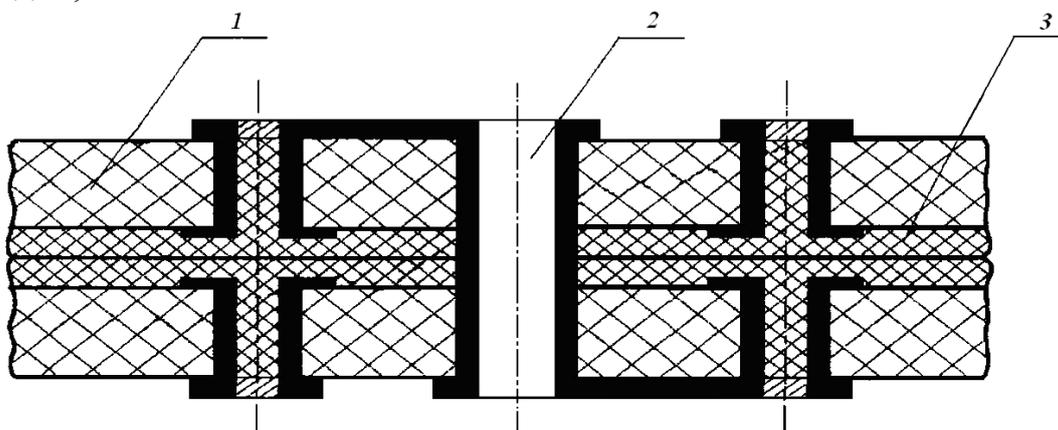
- двухсторонние (ДПП) с химико-гальванической металлизацией отверстий по комбинированной позитивной или полуаддитивной технологиям (рисунок 2.2), характеризующиеся повышенной плотностью сцепления выводов корпусных ЭРЭ с проводящим рисунком платы, высокими коммутационными свойствами, благодаря использованию переходных металлизированных отверстий, но имеющие и более высокую стоимость, чем ОПП;



t – ширина печатного проводника; S – расстояние между проводниками;
 $H_{д}$ – толщина диэлектрика (основания ПП); H – общая толщина ПП;
 $d_{отв}$ – диаметр отверстия под радиальный вывод ЭРЭ

**Рисунок 2.2 – Конструкция ДПП
с химико-гальваническим соединением слоев**

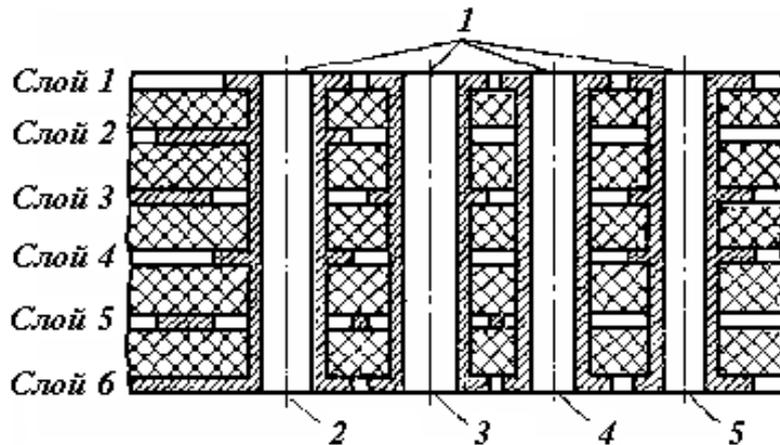
- многослойные печатные платы (МПП) (рисунок 2.3), выполненные методом попарного прессования (оптимальны четырехслойные конструкции) и с металлизацией сквозных отверстий, позволяющие увеличить плотность монтажа, сократить длину проводников и уменьшить паразитные связи и наводки;



1 – фольгированный диэлектрик, 2 – сквозное отверстие;
 3 – прокладочная стеклоткань

**Рисунок 2.3 – Конструкция МПП,
изготовленная попарным прессованием**

- МПП (рисунок 2.4), изготовленные методом **металлизации сквозных отверстий**, характеризующиеся обязательным наличием контактных площадок в каждом проводящем слое, имеющим электрическое соединение с монтажным или переходным отверстием, практически неограниченным числом слоев, высокими коммутационными свойствами и помехозащищенностью, но имеющими высокую стоимость.



- 1 – сквозные металлизированные отверстия;
2 – соединение второго, четвертого и шестого слоев;
3 – соединение третьего и шестого слоев;
4 – соединение первого и шестого слоев;
5 – соединение третьего и четвертого слоев

Рисунок 2.4 – Конструкция шестислойной МПП, изготовленная методом металлизации сквозных отверстий

Тип печатной платы определяется сложностью исходной электрической схемы, частотным диапазоном, назначением РЭС, необходимостью экранирования конкретных цепей.

Сравнительная характеристика (в относительных единицах) различных конструкций ПП представлена в таблице 2.3.

Разработчик обязан стремиться к минимизации стоимости ПП, а это напрямую зависит от числа слоев. Поэтому, при отсутствии особых требований, например, по увеличению надежности, сначала желательно выбирать одностороннюю плату.

После проведения анализа и выбора необходимых проектных решений необходимо избрать технологию изготовления печатной платы (субтрактивная, аддитивная и т.д.) и способ нанесения защитной маски (фотохимический, офсетный и т.д.), чтобы правильно вычислить элементы печатного рисунка.

Первым этапом производства ПП является разработка чертежа ПП, на котором обозначены все будущие соединения. Если это ДПП или МПП, то разрабатываются чертежи для каждой стороны или слоя. Далее формируются управляющие файлы для фотоплоттера, создающего соответствующие фотошаблоны.

Таблица 2.3 – Сравнительная характеристика различных конструкций ПП

Тип ПП ⁹	Плотность монтажа	Число слоев	Цена	Надежность	Время изготовления	Стойкость к внешним воздействиям	Тип выводов	Возможность автоматизированной сборки
ОПП	низкая	1	1	1	1	3	планарный, штыревой	+
ДПП	выше ОПП	2	2	4	2	3	планарный, штыревой	+
ППр	выше ДПП	4	3	2	4	3	планарный, штыревой	+
ОКП	выше ППр	8	3	5	3	3	планарный, штыревой	-
ВВ	выше ОКП	15	5	5	4	4	планарный	-
МСО	выше ВВ	20	4	4	4	4	планарный, штыревой	+
ПН	выше МСО	5 (50)	5	5	5	4	планарный	+

Вслед за тем, создается изображение печатных проводников – копирование фотошаблона на фоточувствительный слой, печатание изображения защитной краской через сетчатый трафарет или с помощью офсетной формы, после чего создают печатные проводники.

В настоящее время в нашей стране чаще всего применяют следующие методы создания токопроводящего слоя:

- **химический** (*субтрактивный, subtratio - отнимание*), при котором производится вытравливание незащищенных участков фольги в $FeCl_3$, $CuCl_2$ и др.;

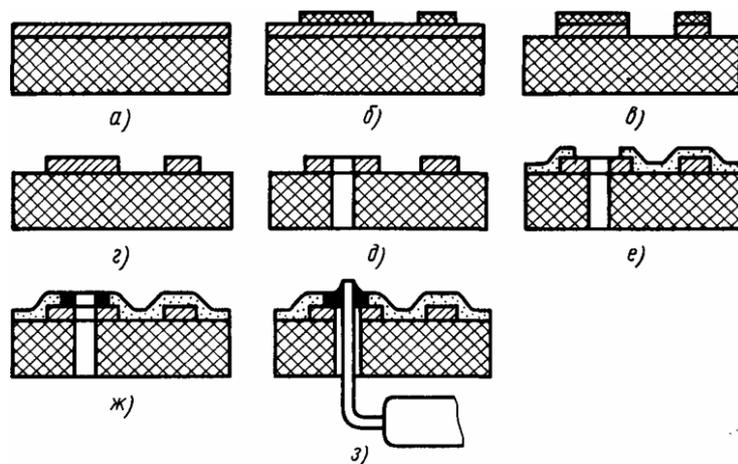
- **электрохимический** (*аддитивный, addition - прибавление*), при котором методом химического осаждения создается слой металла толщиной 1-2 мкм, наращиваемый затем гальваническим способом до нужной толщины. При использовании этого способа одновременно с проводниками металлизировать

⁹ Для многослойных печатных плат (МПП): ППр - с попарным соединением слоев; ОКП - с открытыми контактными площадками; ВВ - с выступающими выводами; МСО - со сквозной металлизацией слоев (металлизация сквозных отверстий); ПН - с последовательной металлизацией слоев (последовательное наращивание)

руют стенки монтажных отверстий и отверстий, которые можно использовать как перемычки между слоями;

- **комбинированный**, при котором проводники получают травлением фольги, а отверстия металлизуют электрохимическим методом.

При изготовлении ОПП с невысокой плотностью монтажа, а также внутренних слоев МПП более высокую производительность обеспечивает химический негативный метод (рисунок 2.5).



- а – заготовка из фольгированного диэлектрика;
 б – нанесение фоторезистивного печатного рисунка;
 в – травление печатного рисунка; г – удаление фоторезиста;
 д – механическая обработка монтажных отверстий;
 е – нанесение лаковой (эпоксидной) маски;
 ж – облуживание контактных площадок; з – пайка выводов ЭРЭ

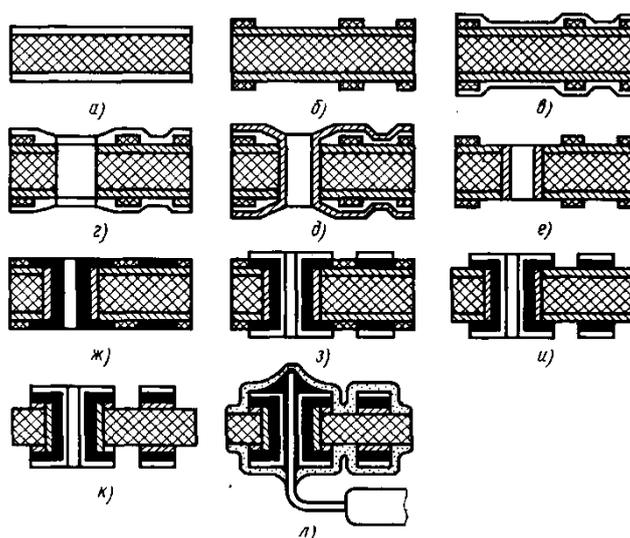
Рисунок 2.5 – Последовательность основных операций изготовления ПП химическим негативным методом

При повышенных требованиях к надежности и плотности монтажа, а также при изготовлении двусторонних и многослойных ПП чаще используется комбинированный позитивный метод (рисунок 2.6).

Производство ПП включает в себя множество этапов. Это подготовка рабочей документации, разработка технологии изготовления, приобретение исходных материалов и ЭРЭ, подготовка персонала и технологического участка, оснастки, аппаратуры контроля качества и т.д.

Чтобы спроектировать ПП с минимальным числом ошибок, необходимо иметь представление об особенностях основных этапов производства ПП.

Основными методами, применяемыми для создания рисунка печатного монтажа, являются *офсетная печать*, *сеткография (шелкография)* и *фотопечать*. Выбор метода определяется конструкцией ПП, требуемой точностью и плотностью монтажа, производительностью оборудования и экономичностью процесса.

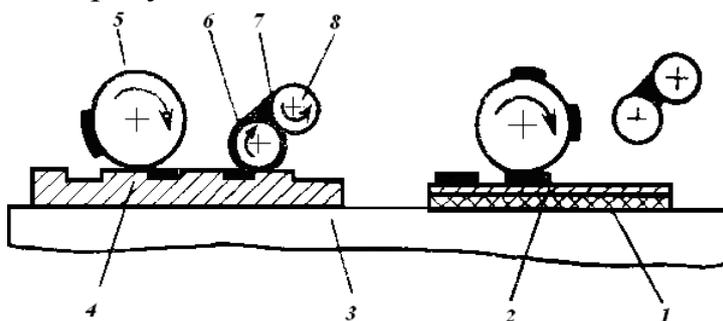


a – заготовка из фольгированного диэлектрика;
б – нанесение фоторезистивного печатного рисунка;
в – нанесение лаковой рубашки;

г – сверление монтажных и переходных отверстий; *д* – химическое меднение;
е – удаление лаковой рубашки; *ж* – гальваническое меднение;
з – нанесение защитного покрытия; *и* – удаление фоторезиста;
к – травление печатного рисунка; *л* – пайка выводов ЭРЭ и лакировка платы

Рисунок 2.6 – Последовательность основных операций изготовления печатных плат комбинированным позитивным методом

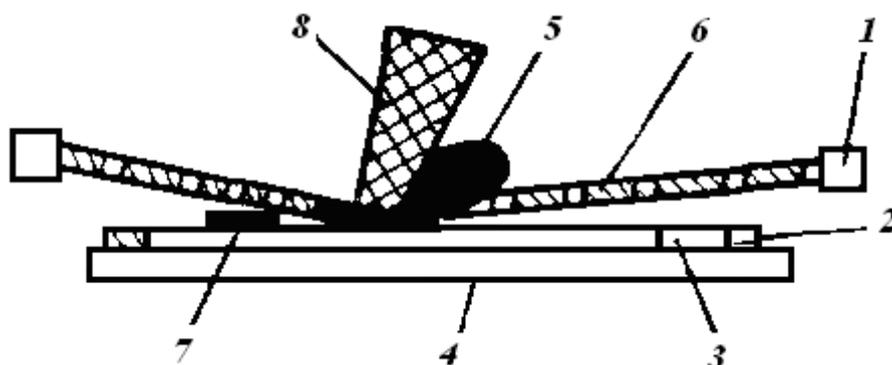
1. **Метод офсетной печати** заключается в изготовлении печатной формы, на поверхности которой формируется рисунок слоя. Форма закатывается валиком трафаретной краской, а затем офсетный цилиндр переносит краску с формы на подготовленную поверхность основания ПП (рисунок 2.7). Метод применим в условиях *массового и крупносерийного производства* с минимальной шириной проводников и зазоров между ними 0.3...0.5 мм (платы 1 и 2 классов плотности монтажа) и с точностью воспроизведения изображения ± 0.2 мм. Его недостатками являются высокая стоимость оборудования, необходимость использования квалифицированного обслуживающего персонала и трудность изменения рисунка платы.



1 – диэлектрик; *2* – медная фольга; *3* – основание; *4* – печатная форма;
5 – офсетный цилиндр; *6* – валик для нанесения краски; *7* – краска;
8 – прижимной валик

Рисунок 2.7 - Схема установки офсетной печати

2. **Сеткографический метод** (трафаретная печать) основан на нанесении специальной краски на плату путем продавливания ее резиновой лопаткой (ракелем) через сетчатый трафарет, на котором необходимый рисунок образован ячейками сетки, открытыми для продавливания (рисунок 2.8). Следует заметить, что применение такого метода весьма выгодно при ручной и полуавтоматической сборке сравнительно небольших серий и позволяет существенно повысить производительность труда. Точность и плотность монтажа аналогичны методу офсетной печати.



1 – рама; 2 – фиксатор подложки; 3 – диэлектрик; 4 – основание;
5 – трафаретная краска; 6 – трафарет; 7 – напечатанный рисунок; 8 – ракель
Рисунок 2.8 – Принцип трафаретной печати (шелкографии)

3. Самой высокой точностью (± 0.05 мм) и плотностью монтажа соответствующими 3...5 классу точности (минимальная ширина проводников и зазоров между ними 0.1...0.25 мм), характеризуется **метод фотопечати**.

На поверхность подготовленных заготовок ПП после нескольких циклов мойки и просушивания наносят фоторезист распылением или погружением. Фоторезист чувствителен к ультрафиолетовому излучению, поэтому все операции обычно выполняют при ярком желтом свете.

Затем на ПП накладывается фотошаблон и производится экспонирование. Экспонированный фоторезист смывается, а ПП протравливается в соответствующем растворе. После чистовой обрезки внешних контуров платы в ней сверлят отверстия, а оставшийся фоторезист смывают.

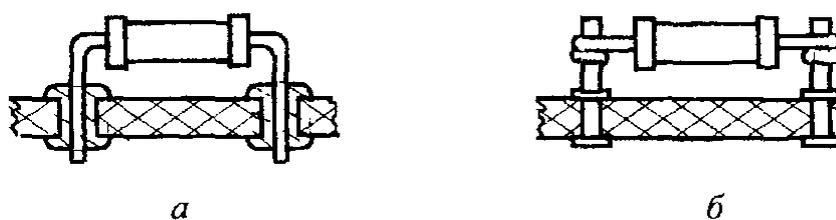
Проводники и контактные площадки слегка подтравливаются (декапируются), в результате чего становятся пригодными для дальнейшей работы с ПП.

Сверление отверстий обычно производится на многошпиндельных станках с ЧПУ с частотой вращения 40...60 тыс. об/мин. После мойки и обезжиривания переходные отверстия покрываются слоем меди толщиной 0.5...1 мкм, который затем электролитическим методом наращивается до 15...20 мкм. После этого электрохимическим методом производится металлизация отверстий.

После промывки и повторного декапирования все проводники ПП (или хотя бы места пайки) покрываются защитным слоем припоя, серебра или золота, сохраняя их от окисления¹⁰.

Для защиты поверхности платы, где в дальнейшем не потребуется пайка, наносится **маска**. Существует несколько типов масок и методов их нанесения. Фоточувствительная маска наносится тем же способом, что и фоторезист, и обеспечивает высокую точность процесса. Шелкографический способ нанесения не обладает такой точностью, но материал маски более пластичен.

Для повышения надежности в критичных местах (места частых перепаек, подключения внешних проводников, использования элементов, подбираемых при регулировке) устанавливаются металлические пистоны – пустотелые заклепки или штыри (рисунок 2.9). Пистон обеспечивает электрическое соединение печатных проводников на разных сторонах ПП и надежное закрепление в отверстиях вывода ЭРЭ или проводника.



а) – в отверстия с пустотелыми заклепками;
б) – на стержневой монтажный лепесток

Рисунок 2.9 - Установка подборных ЭРЭ с выводами

Установка компонентов на плату называется **комплектацией**. Комплектация ПП вручную обычно производится при изготовлении относительно малых серий изделий. Если партия ПП мала, то комплектация всех элементов платы производится одним человеком. Все детали располагаются на монтажном столе в специальных помеченных ячейках, а сборка идет по эталонному образцу. При большой серийности используется конвейер.

Для обеспечения комплектации со стороны установки деталей на плату наносят печатные обозначения в виде цифр, букв, позиционных обозначений элементов и другой маркировки. Для этого в САПР *P-CAD* используются слои шелкографии.

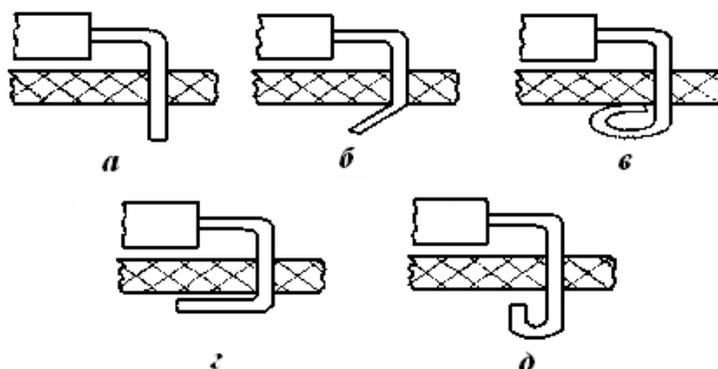
В современных САПР предусмотрены необходимые средства для обеспечения **автоматизированной установки элементов** на плату. В частности, в САПР *P-CAD 2002* добавлены команды размещения *точки приклеивания компонента* и *точки ориентации* механизма автоматической установки компонентов на плате. Эти команды предназначены для дальнейшего сопряжения с программами подготовки производства и ориентированы на последующее использование современного автоматического оборудования монтажа ПП.

¹⁰ Наиболее часто для этих целей применяют сплав «Розе», наносимый горячим способом.

После установки ЭРЭ с целью фиксации и увеличения прочности выводы на месте установки чаще всего обрезаются и подгибаются с использованием различных приспособлений (рисунок 2.10).

Тем не менее, заметим, что кроме проблематичности в применении автоматизированной сборки ПП дополнительный загиб проводника не всегда приводит и к увеличению прочности паяного соединения, так как форма вывода влияет на качество слоя припоя:

- вывод выходит под прямым углом (рисунок 2.10, а) – слой припоя равномерный, возможна автоматическая сборка;
- вывод изогнут под углом (рисунок 2.10, б) – слой припоя удовлетворительный; возможна автоматическая сборка;
- вывод изогнут по кругу (рисунок 2.10, в) – слой припоя удовлетворительный; автоматическая сборка невозможна;
- вывод изогнут вдоль обратной стороны платы (рисунок 2.10, г) – слой припоя удовлетворительный; возможна автоматическая сборка;
- вывод изогнут U-образно (рисунок 2.10, д) – слой припоя неудовлетворительный; автоматическая сборка невозможна.



- а) – без изгиба; б) – изгиб под углом; в) – изгиб по кругу;
г) – изгиб вдоль платы; д) – U-образный изгиб

Рисунок 2.10 - Формовка выводов в зоне пайки

Автоматизированная сборка ПП осуществляется на автоматизированных линиях. При этом комплектующие поступают на сборку упакованными в специальные кассеты-накопители или в виде перфолент.

Установка и использование автоматизированных линий оправданно лишь в условиях *крупносерийного производства*.

Наиболее популярным способом соединения металлических материалов является **пайка**. Образующиеся на поверхностях спаиваемых материалов окисные пленки препятствуют образованию прочного спая. Под воздействием флюсов, которые растворяют тонкие окисные пленки, поверхности спаиваемых материалов хорошо смачиваются припоем, и в результате образуется прочное соединение.

При **пайке погружением** ПП закрепляются в рамках и устанавливаются на цепном транспортере. Затем осуществляют *флюсование* – покрытие сло-

ем флюса печатного монтажа распылением или продвижением над ванной с флюсом, «кипящем» за счет подачи воздуха через отверстия в дне ванны с флюсом. После флюсования производят обдувание с подогревом печатного монтажа и погружение нижней части ПП в расплавленный припой на время пайки, определяемое скоростью движения транспортера и габаритами ванны.

Проблемы пайки погружением: необходимость постоянного удаления с поверхности жидкого припоя окислов, поддержание постоянной температуры и уровня припоя в ванне, возможное коробление ПП при нагреве и как следствие – участки непропаивания, возможное отслоение широких сплошных участков печатных проводников при нагреве за счет выделения газов из основания платы.

Пайка волной припоя чрезвычайно выгодна в условиях *поточного производства*. При этом ПП закрепляются в металлических рамках на цепном транспортере аналогично предыдущему методу.

Резервуар с расплавленным припоем (при температуре 240 °С) имеет две камеры. В нижней камере с помощью шнекового насоса создается избыточное давление, припой поднимается в волнообразующее устройство и изливается в виде волны в верхнюю камеру. Волну припоя создают определенной высоты (около 6 мм) и шириной несколько больше ширины ПП.

Проблемы пайки волной припоя: необходимость создания определенной формы волны припоя и взаимного наклона ПП для исключения «сосуллек» и перемычек между выводами ЭРЭ, а также необходимость поддержания постоянной температуры в волне припоя.

При **ручном способе пайки** температура припоя колеблется очень сильно, так как зависит от длины, диаметра и материала жала паяльника, наличия автоматизации схемы включения, от квалификации монтажника и подготовки ПП. Поэтому качество пайки может также сильно различаться.

Проблемы ручной пайки: медное жало паяльника довольно быстро обгорает и растворяется, требует зачистки и быстро укорачивается. Необходимо стремиться к тому, чтобы оно всегда было обильно покрыто оловом. Наилучшее качество пайки удастся получить при использовании паяльника с алмазным жалом, обладающим высокой теплопроводностью, четкой регулировкой температуры, имеющим длительный срок службы, хотя и дорогостоящее. Используются чаще для комплектации станков с групповой пайкой интегральных схем с планарными выводами.

Для повышения качества паяных соединений, обеспечивающих на порядок более низкую интенсивность отказов, в особых случаях используют вакуумную пайку, создавая незначительное разрежение давления паров до 10^{-3} мм рт. ст.

2.3 Выбор принципа проектирования печатных узлов

Габариты, конструкция и качество печатного узла РЭС во многом зависят от выбранного способа конструирования: моносхемный, функционально-блочный, функционально-модульный и функционально-узловой.

Моносхемный (моноконструкций) – вся электрическая схема изделия располагается на одной печатной плате. Метод отличается повышенной плоскостностью компоновки, малое количество крепежных деталей, отсутствие межплатных соединений. В виду ограниченной ремонтпригодности применяется для бытовой, дешевой и невосстанавливаемой аппаратуры.

Функционально-блочный (схемно-узловой) – вся электрическая схема разбивается на отдельные части с четко выраженными входными и выходными характеристиками (УВЧ, УПЧ и т.д.), которые выполняются на отдельных печатных платах. Для метода характерны улучшенная компоновка и ремонтпригодность. Предполагает наличие коммутационной платы или жгута.

Функционально-модульный (каскадно-узловой) – на отдельной печатной плате выполняется каждый каскад. При большой объемной плотности компоновки, простоте обслуживания и повышенной стойкости к механическим воздействиям наблюдается увеличение габаритов и массы за счет большого числа армирующих и крепежных деталей. Большое число межплатных соединений увеличивает наводки и снижает надежность изделия. Этот метод применяется редко в связи с возрастающим применением микросхем (МС) высокой степени интеграции.

Функционально-узловой – электрическая схема разбивается на узлы, каждый из которых выполняет ограниченное число функций. Отличается простотой, высокой надежностью, большой объемной плотностью и стойкостью к внешним воздействиям. Однако несколько увеличен вес и число межплатных соединений по сравнению с реализацией моносхемного или схемно-узлового принципов. Рекомендуется для аппаратуры с малым временем восстановления и для часто модернизируемой аппаратуры, а также для аппаратуры, назначение которой зависит от набора функциональных частей.

В чистом виде рассмотренные принципы конструирования аппаратуры на печатных платах применяются редко, однако при выборе любого принципа (за исключением моносхемного) необходимо стремиться к унификации по типоразмерам проектируемых ПП.

На качество проектирования печатных плат влияют также и следующие факторы:

- степень сложности;
- способ изготовления;
- назначение изделия;
- условия эксплуатации;
- диапазон частот и рабочих напряжений.

По степени сложности аппаратура делится на пять групп:

1. **Простая** (содержит до 10 активных ЭРЭ (2...3 ИМС));
2. **Нормальной сложности** (10...20 активных ЭРЭ (до 5 ИМС));
3. **Повышенной сложности** (до 50 активных элементов (до 20 ИМС), возможно использование больших интегральных схем (БИС)).
4. **Высокой сложности** (до 100 активных ЭРЭ (до 50 ИМС), применение (БИС)).
5. **Весьма высокой сложности** (свыше 100 активных ЭРЭ (свыше 50 ИМС), применение БИС и сверхбольших интегральных схем (СБИС)).

Характер производства (серийность выпуска), с учетом степени сложности, влияет на *выбор способа получения печатного рисунка* (фотоспособ, сеточный или офсетный способы). Выбор способа пайки ЭРЭ формирует требования к элементам печатного рисунка и взаимной ориентации этих элементов.

Для крупносерийного и массового производства рекомендуются офсетный и сеточный методы формирования рисунка. Применяются трафаретное маркирование и маркирование травлением.

Для серийного производства рекомендуются фотоспособ и сеточный способ. Маркирование – трафаретное и травлением.

Для единичного и опытного производства – фотоспособ и фрезерование, маркирование травлением и ручная маркировка. Применение фрезерования для других типов производств сдерживается высокой стоимостью изготовления, однако технологической подготовки производства при механическом способе формирования печатного рисунка не требуется.

Для изделий 1-2-й групп сложности применим любой способ формирования рисунка.

Для изделий 3-й группы сложности – любой способ формирования рисунка, кроме сеточного.

Для изделий 4-5-й групп сложности – формирование рисунка фотоспособом.

В таблице 2.4 приведены сравнительные данные для ПП, изготовленных по различным технологическим процессам.

Применяемые в крупносерийном производстве групповые способы пайки (пайка волной припоя, окунанием, для монтажа на поверхность – в термопечах) накладывают дополнительные ограничения на способы установки ЭРЭ и конфигурацию печатного рисунка. Например, элементы должны быть зафиксированы дополнительно на месте установки, токопроводящие дорожки должны располагаться параллельно сторонам платы, контактные площадки не должны иметь избыточной площади и т.д.

На качество проектирования ПП влияют также назначение изделия и объект установки РЭС. Для бытовых РЭС рекомендуется формировать рисунок ПП сеточным и офсетным способами, а для аппаратуры специального назначения – офсетным способом и фотоспособом. Для аппаратуры автома-

тики, телемеханики и вычислительной техники предпочтителен фотоспособ, отличающийся наибольшей разрешающей способностью.

Таблица 2.4 – Сравнительная характеристика сроков изготовления и стоимости ПП, изготовленных по субтрактивной и механической технологиям

Характеристика	Цена изготовления (срок изготовления) в зависимости от технологии изготовления, отн. ед.	
	Метод фрезерования	Субтрактивные методы
Подготовка производства	-	10 за один слой
ОПП	2.0 (0.3...0.45)	1.0 (1.0)
ДПП	4.0 (0.45...3.7)	1.3 (1.0)

Для стационарных РЭС применимы все принципы конструирования. Для носимых РЭС (кроме бытовых) – все принципы, кроме моносхемного, если при его применении плата по механическим характеристикам не удовлетворяет предъявляемым требованиям. Для подвижных РЭС применяются каскадно-узловой и функционально-узловой принципы. Для высокоподвижных основным является функционально-узловой принцип.

При проектировании простых в эксплуатационном обслуживании РЭС для аппаратуры разового действия применим любой принцип конструирования. Для ремонтпригодной и с подстройкой в процессе эксплуатации – все принципы, кроме моносхемного. Для изделий с выборочным контролем во время эксплуатации рекомендуются функционально-узловой и каскадно-узловой принципы.

На выбор способа изготовления кроме требований к конфигурации рисунка влияют также частотный диапазон и рабочее напряжение. При частотах до 6 МГц и напряжениях до 50 В допустимы все способы изготовления. До 30 МГц и до 300 В не применяется сеточный способ формирования рисунка, а выше 30 МГц и свыше 300 В ПП изготавливаются только фотоспособом.

Современное РЭС сложно представить без применения **технологии поверхностного монтажа** – перехода от монтажа компонентов с выводами в отверстия к *поверхностному монтажу безвыводных компонентов* в микрокорпусах или компонентов с планарными выводами. Его преимущества по сравнению с традиционными методами:

- повышение плотности компоновки (многие компоненты, предназначенные для монтажа, имеют шаг расположения контактных площадок, равный 1.25 или 0.625 мм, и их можно монтировать на двух сторонах платы);
- снижение затрат на изготовление ПП (устраняются операции сверления монтажных отверстий, их очистки, металлизации и контроля);

- исключение некоторых подготовительных операций при сборке (выпрямление, обрезка, формовка выводов);
- повышение надежности межсоединений.

Преимущества, которые дает поверхностный монтаж, неоспоримы – высокая плотность компоновки, улучшение электромагнитной совместимости – все это позволяет сделать вывод о том, что даже в опытных разработках будущее за поверхностным монтажом.

2.4 Выбор класса точности проектирования ПП

На основании имеющихся в ЧТЗ данных по типу производства, группе сложности и составу элементной базы, конструктор должен ориентировочно определить класс точности печатной платы.

В соответствии с ГОСТ 23751-86 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» выделены 5 классов точности (см. таблицу 2.5), устанавливающие все ограничения на элементы ПП, обусловленные существующими технологическими процессами.

Таблица 2.5 – Характеристика классов точности ПП

Класс точности	Область применения	Основной материал	Тип производства
1	Печатные платы с дискретными элементами и низкой плотностью монтажа (1 и 2-я группы сложности)	Фольгированный гетинакс	Любой
2	Печатные платы с дискретными элементами и ИМС со средней плотностью монтажа (2-4-я группы сложности)	Фольгированный текстолит	Все, кроме массового
3	Печатные платы с ИМС и высокой плотностью монтажа (3 и 4-я группы сложности)	Фольгированный стеклотекстолит с толщиной фольги 20...35 мкм	Единичное и мелкосерийное
4, 5	Печатные платы с БИС, СБИС, ИМС и высокой плотностью монтажа (5-я группа сложности)	Термостойкие травящиеся диэлектрики со сверхтонкой фольгой	Единичное и мелкосерийное

1-й и 2-й классы точности характеризуют простоту, надежность, малую стоимость, а 4-й и 5-й классы – использование высококачественных материалов, специальной оснастки и дорогого оборудования.

Класс точности учреждает, прежде всего, минимально допустимые геометрические размеры (таблица 2.6) элементов посадочных мест ЭРЭ и других элементов ПП отмеченные на рисунке 2.1 и 2.2.

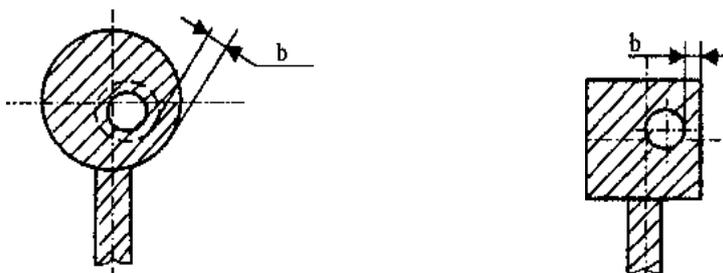
Ширина печатного проводника t – поперечный размер проводника на любом участке в плоскости основания.

Таблица 2.6 – Влияние класса точности на параметры ПП

Минимально допустимые геометрические параметры печатных плат	Класс точности				
	1	2	3	4	5
Ширина проводника t , мм	0.75	0.45	0.25	0.15	0.10
Расстояние между проводниками S , мм	0.75	0.45	0.25	0.15	0.10
Ширина гарантийного пояса b , мм	0.30	0.20	0.10	0.05	0.025
Относительная толщина платы J , мм	0.40	0.40	0.33	0.25	0.20

Расстояние между проводниками S – расстояние между краями соседних проводников на одном слое ПП.

Ширина гарантийного пояса b – расстояние между краем монтажного отверстия и краем контактной площадки (рисунок 2.11).



а) – металлизированное отверстие; б) – неметаллизированное отверстие

Рисунок 2.11 – Гарантийный пояс

Относительная толщина ПП J – отношение минимального диаметра металлизированного отверстия к толщине платы. Толщина платы определяется толщиной материала основания с учетом толщины фольги.

2.5 Выбор шага координатной сетки

Координатная сетка вводится для задания координат центров монтажных и переходных отверстий, контактных площадок и других элементов печатного рисунка на поверхности ПП и является самым удобным способом для указанных целей. Альтернативные способы приведены в ГОСТ 2.417-78.

Шаг координатной сетки – это расстояние между линиями координатной сетки и его значения (для прямоугольных координат) определены ГОСТ 10317-79 «Платы печатные. Основные размеры»: 2.5; 1.25; 0.625 и 0.5 мм. Шаг 2.5 мм является основным, а 0.5 мм применять не рекомендуется.

При выборе шага сетки руководствуются следующими соображениями. Для классов точности 1 и 2, при низкой плотности монтажа, выбирают шаг 2.5 мм. Шаг 1.25 мм применяют в том случае, если на плате устанавливают многовыводные элементы с шагом расположения выводов 1.25 мм, так как все монтажные отверстия должны попадать в узлы координатной сетки.

При использовании многовыводных элементов (количество выводов по одной стороне более 24) зарубежного производства в САПР ПП для обеспечения условий сборки ПУ необходимо применять не метрическую, а дюймовую систему задания шага.

Применяемое технологическое оборудование для автоматизированного производства ПП также накладывает свои ограничения, так как большинство из них имеет дискретность установки шага 0.25 мм.

Координатную сетку наносят следующими способами:

- на все поле платы;
- рисками по периметру;
- фрагментарно в левом нижнем углу.

При задании размеров ПП нанесением координатной сетки линии нумеруются. За начало отсчета в прямоугольной системе координат следует принимать:

- левый нижний угол ПП;
- левую нижнюю точку, образованную линиями построения (для ПП со срезанными углами);
- центр крайнего левого нижнего отверстия ПП.

Не забывайте, что нижний слой ДПП изображается на чертеже зеркально. Следовательно, начало координат для него будет справа, а нумерация линий координатной сетки выполняется справа налево!

2.6 Выбор группы жесткости

Группы жесткости нормируют условия и параметры испытаний, проводимых с целью проверки работоспособности ПП в различных климатических условиях эксплуатации РЭС. В соответствии с ГОСТ 23752-79 «Платы печатные. Общие технические условия» выделены 4 группы жесткости (таблица 2.7).

Поскольку каждое изделие РЭС проходит разные виды контроля и приемочных испытаний, то неизменное задание в конструкторской документации (КД) группы жесткости однозначно обуславливает соответствующие процедуры испытаний для конкретных ПП.

Таблица 2.7 – Группы жесткости ПП

Воздействующие факторы		Группа жесткости			
		1	2	3	4
Температура окружающей среды, °С	Повышенная	+55	+85	+85	+100
	Пониженная	-25	-40	-60	-60
Относительная влажность воздуха, %		75...98 при температуре до 35 °С		98 при температуре до 40 °С	
Смена температур, °С		От -40 до +55	От -60 до +85	От -60 до +85	От -100 до +100
Атмосферное давление, кПа (мм рт. ст.)		Нормальное		53.6 (400)	0.67 (5)

2.7 Выбор способов защиты устройства от внешних воздействий

Следует определить основные способы защиты как всего устройства в целом, так и отдельных его блоков, ячеек и наиболее ответственных деталей от воздействий **внешней среды** климатических, механических воздействий и помехонесущих полей.

При анализе вопросов защиты РЭС **от условий эксплуатации** следует определить возможность и необходимость применения следующих способов защиты:

- полная, либо частичная герметизация всего устройства с помощью корпусов (кожухов);
- герметизация отдельных ячеек и деталей заливкой, пропиткой, обволакиванием, опрессовкой;
- защита с помощью металлических, неметаллических неорганических и лакокрасочных покрытий.

При выборе способов защиты **от механических воздействий** рекомендуется рассмотреть следующие вопросы:

- изменение соотношения между собственной частотой конструкции устройства и частотами источника возмущающей силы;
- применение вибропоглощающих материалов (резина, поролон, полиуретан и др.);
- полная или частичная амортизация устройства (между изолируемой конструкцией и основанием устанавливаются амортизаторы);
- локальная амортизация отдельных ячеек и узлов;
- уравнивание возмущающих нагрузок механизмов (добавление противовесов или снятие излишнего материала);
- защита путем обеспечения вибропрочности элементов и несущих конструкций устройства.

При выборе способов защиты устройства **от помехонесущих полей** целесообразно использовать такие способы, как:

- экранирование всего устройства в целом, либо отдельных его частей;

- пространственное разнесение источника помех и чувствительных цепей устройства.

На **температурный режим РЭС** влияют два основных фактора:

- температура окружающей среды (климатические условия, в которых эксплуатируется РЭС);

- температура нагрева отдельных элементов РЭС в процессе работы¹¹.

При выборе способов защиты устройства **от температурных воздействий** целесообразно использовать такие способы, как [5 - 13]:

- уменьшение плотности компоновки элементов внутри кожуха;

- перфорация отверстий в кожухе и применение жалюзи для улучшения естественной конвекции;

- специальное окрашивание внутренних и наружных поверхностей кожуха красками с высоким значением степени черноты, позволяющее уменьшить тепловое сопротивление на участках «нагретая зона - стенки корпуса» и «стенки корпуса - окружающая среда»;

- применение тепловых экранов;

- принудительное перемешивание воздуха внутри кожуха (вентиляторы);

- применение тепловой изоляции (пенопласт и т.п.);

- применение различных типов радиаторов для облегчения теплового режима полупроводниковых приборов и микросхем;

- стабилизация температурного режима термочувствительных элементов и т.п.

2.8 Выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации РЭС

На этом шаге проектирования в РЭС нужно выделить функционально законченные узлы и предложить конструкторские решения, обеспечивающие:

- доступность к электрическим соединителям;

- возможность и удобство замены блоков, ячеек;

- возможность перепайки электрического монтажа;

- быстрый и удобный поиск необходимых ЭРЭ и электрических цепей в РЭС;

- проведение контроля электрических параметров без разборки;

- размещение органов управления, контроля и защиты.

¹¹ Примерно 90-95% всех форм энергии в РЭС в конечном итоге превращается в тепловую энергию, из-за чего повышается температура внутри блоков и снижается их надежность.

2.9 Определение вариантов установки ЭРЭ

На данном этапе топологического проектирования ПП осуществляется выбор вариантов установки ЭРЭ с определением габаритно-установочных размеров по ОСТ 4.010.030-81. Эта процедура необходима для определения габаритных размеров ПП (или возможности размещения ЭРЭ на печатной плате при заданных габаритах с учетом обеспечения теплового и механического режимов работы ЭРЭ), выбора геометрических моделей, применяемых в пакетах САПР ПП и геометрических примитивов (упрощенных изображений) в конструкторской документации.

Для всех применяемых в проекте ЭРЭ следует установить массу, габаритные размеры, установочные площади S_i , диаметры выводов d_v . Масса и габаритные размеры употребляемых ЭРЭ влияют на выбор вариантов и мест их установки, а также способов дополнительного крепления.

Диаметры выводов ЭРЭ необходимы для расчета диаметров монтажных отверстий.

Габаритные размеры, а точнее установочные площади, позволяют предварительно оценить площадь печатной платы.

Установочная площадь электрорадиоэлемента S_i вычисляется по формуле:

$$S_i = 1.3 \cdot L \cdot B, \quad (2.1)$$

где L и B – длина и ширина ЭРЭ по установочным размерам, в соответствии с вариантом установки по ОСТ 4.010.030-81 «Установка навесных элементов на печатные платы».

Поскольку, в общем случае, S_i может определяться длиной и высотой ЭРЭ, шириной и высотой или вариантом расположения на плате (рисунок 2.12) и иметь при этом разные значения, то желательно определять минимальную и максимальную установочные площади.

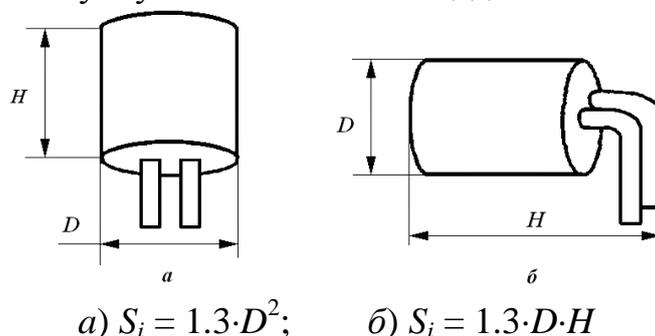


Рисунок 2.12 – Влияние варианта установки ЭРЭ на установочную площадь

При вычислении установочной площади ЭРЭ следует помнить, что установочные размеры, особенно для компонентов с разнонаправленными выводами, могут зависеть от шага координатной сетки при одном и том же варианте установки.

Перед выполнением формирования изображений посадочных мест радиоэлементов следует выписать из справочников все необходимые данные об их установочных размерах и цоколевке. Следует еще раз уточнить – подходят ли они для печатного монтажа, не слишком ли велики их размеры по сравнению с другими элементами.

Из справочников следует выписать также обозначения радиоэлементов в конструкторских документах (ТУ, ГОСТ).

Информацию о применяемых в проекте ЭРЭ удобно представить в форме таблицы конструктивных характеристик ЭРЭ (таблица 2.8).

Таблица 2.8 – Форма таблицы конструктивных характеристик ЭРЭ

Наименование, тип и обозначение ЭРЭ	Кол, шт.	Габаритные размеры, мм	Установочная площадь, мм ²	Масса, г	Диаметр выводов, мм	Вариант установки

2.10 Выбор материала основания

Материал основания ПП (см. таблицу 2.9) выбирается исходя из:

- электрических характеристик (частотный диапазон, пробивное напряжение и т.д.);
- климатических воздействий (температура и влажность);
- стойкости к механическим и другим внешним воздействиям (прочность, жесткость, ударная вязкость и т. д.);
- типа печатной платы (количество слоев) и предполагаемой технологии изготовления, стоимости.

Таблица 2.9 – Назначение материалов оснований ПП

Наименование	Марка	Тип платы	Назначение
Гетинакс фольгированный ГОСТ 10316-78	ГФ-1- ГФ-2-	ОПП, ДПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц и в негерметичных РЭС. Толщина фольги 35 и 50 мкм
Стеклотекстолит фольгированный ГОСТ 10316-78	СФ-1- СФ-2-	ОПП, ДПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Толщина фольги 35 и 50 мкм
Стеклотекстолит нагревостойкий ГОСТ 10316-78	СФ-1Н- СФ-2Н-	ОПП, ДПП	Для термостойких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Нагревостойкость: плюс 180 °С в течение 100 часов

Продолжение таблицы 2.9

Наименование	Марка	Тип платы	Назначение
Стеклотекстолит гальваностойкий ГОСТ 10316-78	СФ-1-35Г- СФ-2-35Г- СФ-1-50Г- СФ-2-50Г-	ОПП, ДПП	Для ПП изготавливаемых сеточным и офсетным способами и работающих в диапазоне частот до 1МГц
Стеклотекстолит повышенной нагревостойкости ТУ 16-503.091-71	СФПН-1- 50 СФПН-2- 50	ОПП, ДПП	Для термостойких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц. Нагревостойкость: плюс 200 °С в течение 50 часов
Материал для полупроводниковой технологии (слофадит) ТУ 6-19.136-79	СТПА-5-1, СТПА-5-2	ОПП, ДПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Лавсан фольгированный	ЛФ-1-35 ЛФ-1-50	ГПП	Для гибких ПП (ГПП), работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Стеклотекстолит фольгированный травящийся одно- и двухсторонний ТУ 16-503.154-75	ФТС-1-18- А, Б ФТС-1-18- А, Б ФТС-2-18- А, Б ФТС-2-18- А, Б	МПП, ГПП	Для многослойных ПП, изготовленных методом металлизации сквозных отверстий и работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Гибкий фольгированный диэлектрик ТУ 61 У0.029.409	ФДЛ-1	ГПП, ГПК	Для печатных плат, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Диэлектрик фольгированный никелем одно- и двухсторонний ТУ ИЖ 68-71	ФДН-1 ФДН-2	ОПП, ДПП	Для печатных узлов с креплением элементов сваркой и работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Диэлектрик фольгированный тонкий одно- и двухсторонний гибкий ТУ ИЖ 51-66	ФДМ-1А ФДМ-1Б ФДМ-2А ФДМ-2Б	МПП, ГПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц

Окончание таблицы 2.9

Наименование	Марка	Тип платы	Назначение
Диэлектрик фольгированный тонкий для микроэлектроники ТУ ИЖ 54-67	ФДМЭ-1А ФДМЭ-1Б ФДМЭ-2А ФДМЭ-2Б	МПП, ГПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Полиамид фольгированный	ПФ-1-35 ПФ-2-35	ГПП	Для гибких ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Фольгированный арилокс ТУ 6/2-71	ФА-4	ОПП, ДПП, МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц
Фольгированный армированный фторопласт-4	ФАФ-4	ОПП, ДПП, МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц, и при повышенных требованиях к механическим характеристикам
Фольгированный фторопласт-4 ТУ 6-05-1414-71	ФФ-4	ОПП, ДПП, МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 10 ГГц. Не гигроскопичен, но менее механически прочен, чем ФАФ-4
Фольгированный микропол МРТУ 16-503.097-69	ФМ-2В ФМ-2Б ФМ-2А	МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 ГГц
Стеклоткань прокладочная ТУ 16-503.097-69	СП-2 СП-1	МПП, ОПП, ДПП	Для изоляции элементов от проводников и ПП, работающих в диапазоне частот до 1 ГГц
Стеклоткань травящаяся прокладочная ТУ 16-503.035-75	СП-0.25 СП-3	МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц
Огнеупорный стеклотекстолит	FR-4	ОПП, ДПП, МПП	Для ПП, работающих в диапазоне частот до 1 МГц

По частоте (см. таблицу 2.10) материалы делятся на работающие при частотах до 10^6 Гц (гетинакс, стеклотекстолит и др.) и до 10^{10} Гц (фторопласт и др.).

Таблица 2.10 - Эксплуатационные параметры материалов печатных плат

Наименование и марка материала		Параметры воздействий		Толщина	
		Диапазон температур, °С	Отн. влажность, % при температуре, °С	материала, мм	металлизации, мкм
Гетинакс фольгированный ГФ		От -60 до +90	45...75 при 40	1.0...3.0	35, 50
Стеклотекстолит фольгированный СФ		От -60 до +105	98 при 40	0.5...3.0	35, 50
Огнеупорный стеклотекстолит FR-4		От -60 до +135	98 при 40	0.78; 1.56; 2.33; 3.13	до 50
Диэлектрик фольгированный тонкий	односторонний ФДМ-1	-	-	0.2	18, 35
	двухсторонний ФДМ-2	-	-	0.25	18, 35
	гибкий ФДМЭ-1	-	-	0.1...0.2	18, 35
Стеклотекстолит фольгированный травящийся односторонний	ФТС-1-18-А, Б	От -60 до +150	-	0.08; 0.15	18
	ФТС-1-35-А, Б	От -60 до +150	-	0,5	35
Стеклотекстолит фольгированный травящийся двухсторонний	ФТС-2-18-А, Б	От -60 до +150	-	0.08; 0.15	18
	ФТС-2-35-А, Б	От -60 до +150	-	0.5	35
Слофадит СТПА-5-1		От -60 до +150	-	0.1...3.0	5
Фольгированный арилокс ФА-4, ФА-6		От -60 до +150	-	0.5...3.0	35
Фольгированный фторопласт ФФ-4		От -60 до +250	-	1.5...3.0	35

Окончание таблицы 2.10

Наименование и марка материала	Параметры воздействий		Толщина	
	Диапазон температур, °С	Отн. влажность, % при температуре, °С	материала, мм	металлизации, мкм
Фольгированный фторопласт армированный ФАФ-4	От -60 до +250	-	1.0...3.0	35
Фольгированный микапол МФ-2А, МФ-2В	От -60 до +80	-	1.5; 2.0	35
Гибкий фольгированный диэлектрик ФДЛ-1	От -60 до +125	-	0.045...0.08	20, 35
Стеклоткань прокладочная СП-1, СП-2	От -60 до +100	98 при 40	0.025; 0.06	Без металлизации

Наиболее дешевым материалом является фольгированный гетинакс. Тем не менее, его редко применяют при жестких климатических и механических воздействиях, при высоких рабочих напряжениях и малых зазорах между печатными элементами, в герметичном РЭС. Он также не рекомендуется при металлизации отверстий.

Наибольшее распространение в производстве ПП получили фольгированный гетинакс марок ГФ-1 (фольгированный с одной стороны), ГФ-2 (фольгированный с двух сторон) и фольгированный стеклотекстолит марок СФ-1 (фольгированный с одной стороны), СФ-2 (фольгированный с двух сторон).

Толщина основания ПП зависит от типа печатной платы (ОПП, ДПП, МПП), ее размеров, особенностей эксплуатации и, прежде всего, от механических воздействий – вибрации, ускорения, наличия крупных навесных элементов и т.д.

Установлен следующий размерный ряд значений толщины оснований ПП (в мм) – как гибких, так и жестких:

<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,4</i>	<i>0,8</i>	<i>1,0</i>	<i>1,5</i>	<i>2,0</i>	<i>3,0</i>
<i>Гибкие</i>				<i>Жесткие</i>			

Наибольшее распространение получили толщины 1.0 и 1.5 мм. Толщина 1.0 мм обычно используется для ПП с габаритами сторон не более 100 мм.

При выборе материала основания следует учитывать, что толщина фольги определяет и возможность получения минимальной ширины проводников (4-й, 5-й класс точности, таблица 2.6): чем тоньше проводник, тем уже его можно сделать.

2.11 Определение габаритных размеров ПП

Габариты и конфигурация ПП задаются в ЧТЗ одним из следующих способов:

1. **Жестко** – указанием всех необходимых размеров, определяемых конфигурацией платы.
2. **Ориентировочно** – указанием размеров других плат изделия с целью их унификации.
3. **Ориентировочно** – указанием площади платы.
4. **Ориентировочно** – указанием площади платы и соотношения сторон.

По конфигурации наиболее предпочтительна *прямоугольная* форма ПП. Круглая и другие формы должны применяться лишь в технически обоснованных случаях.

В любом случае следует определить необходимую площадь ПП. Если размеры ПП заданы жестко (первый случай), то вычисление монтажной зоны позволяет оценить возможность размещения ЭРЭ, определенных перечнем элементов, на заданной площади печатной платы. При необходимости могут быть скорректированы варианты установки ЭРЭ. В других случаях нахождение площади, занимаемой ЭРЭ, является основанием для выбора численных значений габаритных размеров ПП.

Площадь монтажной зоны, занимаемая ЭРЭ $S_{ЭРЭ}$, вычисляется как сумма установочных площадей ЭРЭ S_i , определенных при анализе ЧТЗ (см. формулу 2.1). Расчетная площадь печатной платы S_p , определяется как:

$$S_p = \frac{\sum S_i}{k_3}, \quad (2.2)$$

где $k_3 \approx 0.6 \dots 0.7$ – коэффициент заполнения по площади.

Длину и ширину монтажной зоны приблизительно можно определить по (2.3):

$$L = B = \sqrt{S}. \quad (2.3)$$

Площадь ПП состоит из рабочей (монтажной) зоны и зоны краевого поля, предусматриваемого для вспомогательных целей (размещения разъемов, крепежных отверстий, зон для направляющих элементов и т.п.) (рисунок 2.13).

Ширина краевого поля есть расстояние от края ПП до первого ряда посадочных мест. Она состоит из четырех зон:

X_1 – ширина краевого поля (1.5...5 мм) по оси X (как правило, одинакова слева и справа), которая определяется направляющими элементами конструкции, конструкцией выводов устанавливаемых на ПП ЭРЭ, крепежными изделиями и т.д.;

Y_1 – ширина краевого поля нижней кромки ПП, предназначенного для установки соединителя. Размер краевого поля Y_1 зависит от типа выбранного соединителя (см. таблицу 2.11);

Y_2 – ширина краевого поля на верхней кромке ПП, где размещаются лицевая панель для модулей кассетной конструкции и контрольные гнезда.

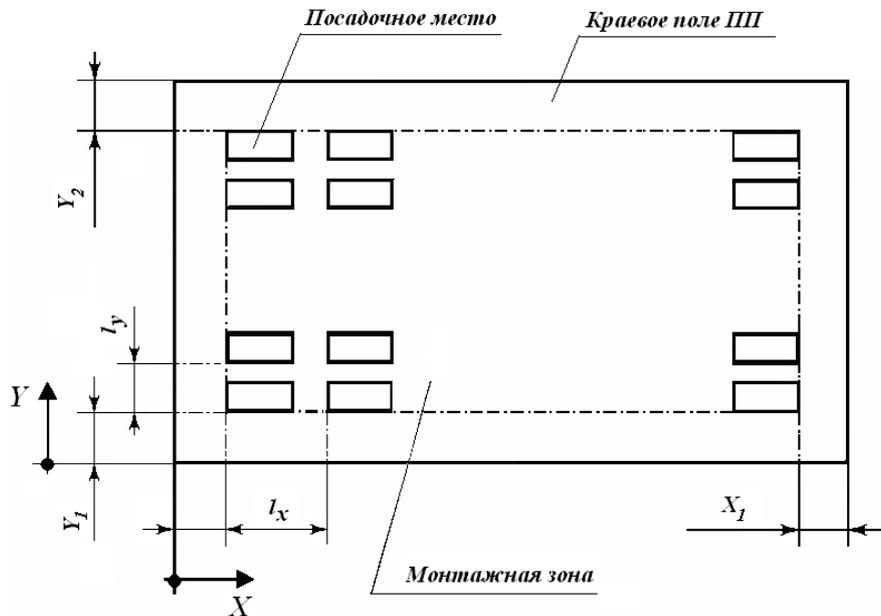


Рисунок 2.13 – Расположение компоновочных зон на ПП

Таблица 2.11 - Зависимость размера краевого поля Y_1 от типа соединителя

Тип соединителя	Число контактов	Ответная часть на ПП	Паяный шов	Y_1 , мм
ГРППЗ	14; 36; 46; 58	Вилка	В отверстиях	17.5
ГРППЗ	24	Вилка	Внахлест	15
ГРПМ1-ШУ	31; 45; 51; 90	Вилка или розетка	В отверстиях	22.5
ГРПМ1-ШУ	122	Вилка или розетка	В отверстиях	25
ГРПМ1-ГУ	25	Вилка или розетка	В отверстиях	25
ГРПМ9-Н	25	Вилка	Внахлест	17.5
РППМ	40	Вилка	В отверстиях	30.0
РППМ2	142	Вилка	Внахлест	22.5
РППМ26	17; 72	Вилка	Внахлест	17.5
СНП34	135	Розетка	В отверстиях	15.0
СНП58	16; 32; 48; 64; 96	Вилка	В отверстиях	17.0
СНП59	16; 32; 48; 64	Вилка	В отверстиях	18.5

Окончание таблицы 2.11

Тип соединителя	Число контактов	Ответная часть на ПП	Паяный шов	Y_1 , мм
Кабель гибкий печатный	-	-	В отверстиях или внахлест	25.0
Жгут объемный	-	-	В отверстиях	35.0

При использовании ЭРЭ со штыревыми выводами величину X типично принимают равной 5 мм, а с планарными – 2.5 мм. Величина Y_2 при отсутствии контрольных гнезд равна 2.5 мм, а при их наличии – 12.5 мм. При установке лицевых панелей Y_2 увеличивается примерно на 5...10 мм и зависит от конкретного конструктивного исполнения.

Следует учесть **зоны механического крепления ПП** и зоны, определяемые несущей конструкцией блока (направляющие и т.п.). От края платы до центра крепежного отверстия должно быть **не менее 5 мм**. Кроме того, крепежные изделия (шайбы, гайки и т.п.) или их элементы (головки винтов, болтов и т.д.) не должны выступать за габариты печатной платы.

Если конфигурация и габариты платы не определены жестко базовой несущей конструкцией, то полученные численные значения размеров длины и ширины ПП следует **округлить** в соответствии с ОСТ 4.010.020-83 (таблица 2.12).

Таблица 2.12 – Линейные размеры ОПП, ДПП, МПП на жестком основании

Размеры сторон печатных плат, мм					
Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина
22.5	60	70	(70); (90); 110; 120; (140); 150	120	140; (160); 180; 200; 220; 240; 280
30	40; 55; 60; (90)	75	170	130	150; 170; 200; 300
35	100	80	80; 90; 100; (110); (120); 140; 160; 200; 240	140	(140); 150; 220; 240; 280
40	(40); 50; 60; (80); 100; (120)	85	150	150	170; (180); 200; 240; 280
50	(50); 60; (70); 75; 80; 100	90	(90); 100; 110; 120; 130; 150; 160; 170; (180); 200; 260	160	200; 210; 240; 320

Окончание таблицы 2.12

Размеры сторон печатных плат, мм						
Ширина	Длина	Ширина	Длина	Ширина	Длина	
60	60; (75); 80; 90; (100); 110; 120; (160); 180	100	100; 110; 120; 150; 160; (170); 180; 200	170	170; 200; 240; 250; 270; 280; 300; 340	
62.5	125	105	125; 130	185	205; 270	
65	90; 100	110	150; (160); 170; (200); 260	200	220; 240; 320	
				240	300; 320	

Примечание. Размеры ПП без скобок являются предпочтительными.

Максимальный размер любой из сторон должен быть не более 470 мм. Соотношение линейных размеров сторон ПП должно быть не более 3:1. Рекомендуются следующие соотношения сторон: 1:1; 2:1; 3:1; 3:2; 5:2, предпочтительное – 2:1.

Размеры каждой стороны печатной платы должны быть кратными:

- 2.5 – при длине до 100 мм;
- 5 – при длине до 350 мм;
- 10 – при длине более 350 мм.

Допуски на линейные размеры сторон печатной платы должны соответствовать ГОСТ 25346-82 и ГОСТ 25347-82. Для сопрягаемых размеров ПП (например, при установке по направляющим) устанавливается допуск по 12-му качеству, для несопрягаемых – по 14-му. Отклонение от перпендикулярности печатных плат не должно быть более 0.2 на 100 мм длины.

Рекомендуемое количество типоразмеров ПП в изделии не более трех.

2.12 Расчет элементов печатного рисунка

Минимально необходимые размеры элементов печатного монтажа (расстояния между печатными проводниками и контактными площадками) и их взаимное расположение определяются в результате расчета, исходя из технологических ограничений и заданных электрических режимов работы (токов, напряжений и т.д.) проектируемого ПУ.

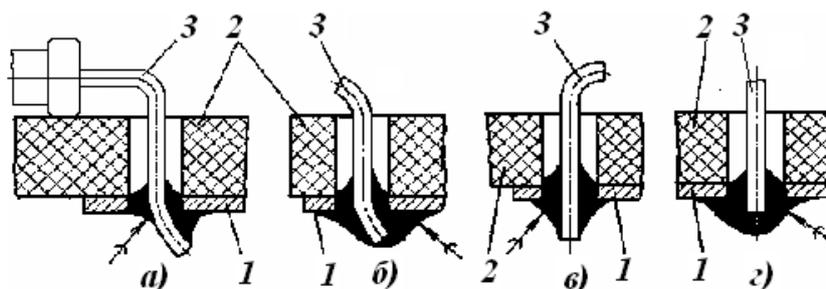
Слишком малые размеры элементов печатного монтажа и жесткие допуски значительно снижают процент выхода годных ПУ. Поэтому после определения расчетных параметров элементов печатного монтажа устанавливают их оптимальные размеры, зазоры между ними и допуски на изготовление.

Полученные значения следует проверить на обеспечение необходимой электрической прочности изоляции и при необходимости увеличить мини-

мально допустимые расстояния между печатными проводниками или оговорить необходимость применения диэлектрических лакокрасочных покрытий.

В заключение размеры следует округлить до предпочтительных значений.

Диаметр отверстий в печатной плате должен быть больше диаметра вставляемого в него вывода, что обеспечит возможность свободной установки ЭРЭ. При диаметре вывода до 0.8 мм диаметр **неметаллизированного отверстия** (см. рисунок 2.14, *a – з*) обычно делают на 0.2 мм больше диаметра вывода; при диаметре вывода более 0.8 мм – на 0.3 мм больше. При автоматизированной установке компонентов на плату диаметр отверстия берется на 0.4 мм больше диаметра вывода.



1 – контактная площадка; 2 – основание платы; 3 – вывод навесного ЭРЭ

Рисунок 2.14 – Форма паяных соединений в неметаллизированных отверстиях ПП

В первом приближении диаметры отверстий в ПП выбираются в зависимости от диаметров выводов навесных элементов, устанавливаемых в эти отверстия (таблица 2.13).

Таблица 2.13 – Ориентировочные диаметры отверстий в ПП

Максимальный диаметр вывода, мм	Номинальный диаметр неметаллизированных отверстий, мм	Номинальный диаметр монтажных и переходных металлизированных отверстий, мм
0.4...0.6 включительно	0.9	0.8
0.6...0.8	1.1	1.0
0.8...1.3	1.6	1.5
1.3...1.7	2.1	2.0

Ориентировочные размеры, приведенные в таблице 2.13, обязательно следует проверить расчетом на соответствие выбранному классу точности.

Условные обозначения диаметра отверстий в платах выполняются на чертежах ПП в соответствии с ОСТ 27-72-694-834.

При выполнении обозначения отверстий на ПП таким способом на поле чертежа ПП приводится таблица отверстий, в которой указывается:

- условное обозначение отверстий;
- диаметры отверстий, мм;
- диаметры зенковок с двух сторон, мм;
- наличие металлизации;
- размеры контактных площадок;
- количество отверстий.

Размеры, количество граф и форма таблицы ГОСТом не устанавливаются.

Рекомендуется на одной ПП иметь не более трех различных диаметров отверстий, хотя это относится скорее к платам, изготавливаемым на старом оборудовании. Тем не менее, следует стремиться к уменьшению номенклатуры отверстий.

Расстояние между краями любых отверстий или между отверстием и краем ПП не должно быть меньше толщины ПП для обеспечения достаточной механической прочности.

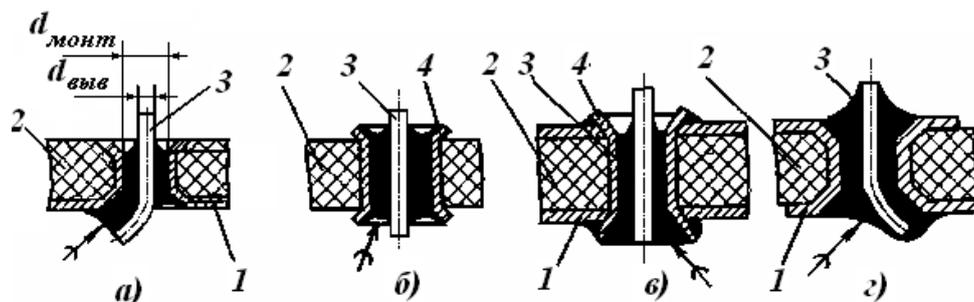
Необходимость зенковки монтажных и переходных отверстий диктуется конкретными особенностями и количеством выводов элементов, а также методом изготовления и комплектации ПП.

Все монтажные отверстия должны иметь контактные площадки правильной формы, центр которых совпадает с центром отверстий.

2.12.1 Определение диаметров отверстий

Исходя из типа ПП, надежности и т.п., определяется необходимость наличия металлизации в отверстиях (рисунки 2.14, 2.15, $a - z$) и ее тип (химико-гальваническая металлизация или с помощью заклепок). Следует учитывать, что химико-гальваническая металлизация отверстий предполагает применение комбинированного позитивного или полуаддитивного способа изготовления ПП.

Центры монтажных и переходных отверстий должны быть расположены в узлах (точках пересечения линий) координатной сетки. Если устанавливаемый на печатную плату элемент имеет два вывода или более, расстояние между которыми кратно шагу координатной сетки, то отверстия под все такие выводы должны быть расположены в узлах сетки. Если устанавливаемый элемент не имеет выводов, расстояние между которыми кратно шагу координатной сетки, то один вывод следует располагать в узле координатной сетки, а центр отверстия под другой вывод – на вертикальной или горизонтальной линиях координатной сетки.



1 – контактная площадка; 2 – основание платы; 3 – вывод;
4 – пустотелая заклепка

**Рисунок 2.15 – Форма паяных соединений
в металлизированных отверстиях ПП**

2.12.2 Определение размеров металлизированных отверстий

Металлизированные отверстия на печатных платах могут быть двух типов:

- **переходные** – для создания электрических связей между слоями¹²;
- **монтажные** – для крепления вывода ЭРЭ.

Диаметр металлизированного отверстия зависит от диаметра вставляемого в него вывода и от толщины платы. Связано это с тем, что при гальваническом осаждении металла на стенках отверстия малого диаметра, сделанного в толстой плате, толщина слоя металла получится неравномерной, а при большом отношении длины к диаметру некоторые места могут остаться непокрытыми. Диаметр металлизированного отверстия должен составлять не менее половины толщины платы.

Металлизированные отверстия *не выполняют на гетинаксе, фольгированном фторопласте (ФФ-4) и фольгированном армированном фторопласте (ФАФ-4)*. Гетинакс имеет температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР), отличающийся от меди примерно в 10 раз (стеклотекстолит – всего в 3 раза), поэтому возможно отслаивание осажденной металлизации. С фторопластом осажденная медь имеет плохую адгезию и, соответственно, надежность металлизированных отверстий в ФФ-4 и ФАФ-4 низка.

1. **Минимальный диаметр $d_{\text{мин}}$ металлизированного отверстия** зависит, в первую очередь, от класса точности (таблица 2.5) и его можно определить из следующего соотношения:

$$d_{\text{мин}} = J \cdot H, \quad (2.4)$$

где J – относительная толщина ПП (выбирается по таблице 2.5); H – толщина платы с учетом фольги (см. рисунки 2.1 и 2.2).

¹² Контактное соединение между слоями производят только через отверстия, через край ПП – недопустимо.

2. **Минимально применимый диаметр переходного отверстия $d_{\text{пер}}$ для отверстий в пластмассах**, применяемых для оснований ПП необходимо вычислять по формуле:

$$d_{\text{пер}} = J \cdot H + |\Delta d|, \quad (2.5)$$

где Δd – максимальное предельное отклонение диаметра рассчитываемого отверстия.

В соответствие с ГОСТ 23751-86 допуск Δd на номинальный размер диаметра может быть как положительным, так и отрицательным (таблица 2.14). Для переходных отверстий значение Δd следует выбирать как для **неметаллизированных** отверстий. Для переходных отверстий необходимо проводить поверочные расчеты на возможность протекания через них заданного в ЧТЗ тока.

Таблица 2.14 – Предельные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий

Диаметр отверстия d , мм	Наличие металлизации	Предельное отклонение диаметра Δd , мм, для класса точности				
		1	2	3	4	5
До 1.0	Без металлизации	± 0.10	+0.10	+0.05	± 0.05	± 0.025
	С металлизацией без оплавления	+0.05; -0.15	+0.05; -0.15	+0 -0.1	+0 -0.1	+0; -0.075
	С металлизацией и с оплавлением	+0.05; -0.18	+0.05; -0.18	+0 -0.13	+0 -0.13	+0; -0.13
Св. 1.0	Без металлизации	± 0.15	± 0.15	± 0.1	+0.1	+0.01
	С металлизацией без оплавления	+0.1; -0.20	+0.1; -0.20	+0.05 -0.15	+0.05 -0.15	+0.05 -0.15
	С металлизацией и с оплавлением	+0.1; -0.23	+0.1; -0.23	+0.05 -0.18	+0.05 -0.18	+0.05 -0.18

3. **Диаметр монтажного металлизированного отверстия $d_{\text{монт}}$** , в отличие от переходного, должен быть больше диаметра вывода на величину, удовлетворяющую условиям пайки и автоматизированной сборки, и может быть рассчитан следующим образом:

$$d_{\text{монт}} = d_{\text{выв}} + |\Delta d| + r, \quad (2.6)$$

где $d_{\text{выв}}$ – диаметр (для прямоугольных выводов – размер по наибольшей стороне) вывода ЭРЭ; r – гарантированный зазор между диаметром монтажного отверстия и выводом ЭРЭ (см. таблицу 2.6).

Величину Δd для монтажных отверстий следует выбирать с учетом всех приведенных в таблице 2.14 факторов (диаметра, металлизации и оплавления). Оплавление следует учитывать при нанесении покрытий (припой ПОС-61 и сплав РОЗЕ) горячим методом (для ПП, изготовленных фотоспособами)

или гальваническим (О-С (60)) с последующим оплавлением (комбинированный позитивный способ или полуаддитивная технология).

Численное значение гарантированного зазора r лежит в пределах 0.1...0.4 мм. Отметим, что чем меньше зазор, тем больше капиллярный эффект и, соответственно, лучше пропай в монтажном отверстии. С другой стороны, большая величина зазора облегчает автоматизацию сборочных работ. Поэтому **при автоматизированной установке ЭРЭ на ПП желательно применять металлизированные отверстия с зазором, равным 0.4 мм.**

Формула (2.6) применима для случая, когда $d_{\text{выв}} > d_{\text{пер}}$. В противном случае, при расчете $d_{\text{монт}}$ необходимо использовать формулу:

$$d_{\text{монт}} = J \cdot H + |\Delta d| + r. \quad (2.7)$$

Условия выбора значения Δd такие же, как и для выражения (2.6). Обычно монтажные отверстия диаметром менее $0.5 \cdot H$ не применяют.

У металлизированных отверстий и торцов плат **шероховатость** должна быть лучше $R_z \leq 40$.

2.12.3 Определение размеров неметаллизированных отверстий под крепежные детали

Диаметры неметаллизированных монтажных отверстий рассчитывают по выражению (2.6) с учетом того, что при автоматизированной сборке печатных узлов гарантированный зазор $r = 0.4$ мм, при ручной сборке $r = 0.1...0.2$ мм.

В соответствии с ГОСТ 11284-75 диаметр сквозного отверстия под крепежные детали имеет гарантированный зазор, определяемый габаритами резервной зоны,¹³ и выбирается по таблице 2.15.

Таблица 2.15 – Номинальные значения диаметров крепежных отверстий

Диаметр крепежного отверстия, мм	Диаметр крепежного отверстия, мм			Диаметр резервной зоны, мм	Диаметр крепежного изделия, мм	Диаметр крепежного отверстия, мм			Диаметр резервной зоны, мм
	1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд			1-й ряд	2-й ряд	3-й ряд	
2.0	2.2	2.4	2.6	7.0	4.0	4.3	4.5	4.8	13.0
2.5	2.7	2.9	3.1	9.0	5.0	5.3	5.5	5.8	17.0
3.0	3.2	3.4	3.7	11.0	6.0	6.4	6.6	6.8	19.0

Примечание. Для заклепочных отверстий 3-й ряд не применять.

¹³ **Резервная зона** - это зона вокруг крепежного отверстия запрещенная для расположения проводников и других элементов печатного рисунка. Ее размер определяется внутренним и внешним диаметрами металлических шайб и диаметром крепежного отверстия.

Допуски на отверстия 1-го ряда должны соответствовать 12-му качеству по ГОСТ 25346-82, а 2-го и 3-го – 14-му.

Допуск на межцентровое расстояние $\Delta d_{кр}$ рассчитываются:

- для винтовых соединений (в одной из деталей отверстия резьбовые):

$$\Delta d_{кр} = \frac{d_{кр} - d_{отв}}{2}, \quad (2.8)$$

- для болтовых соединений (сквозные нерезьбовые отверстия изготавливаются в обеих соединяемых деталях):

$$\Delta d_{кр} = d_{кр} - d_{отв}, \quad (2.9)$$

где $d_{кр}$ – диаметр крепежного изделия; $d_{отв}$ – диаметр крепежного отверстия.

Отверстия на плате нужно располагать таким образом, чтобы расстояние между краями отверстий было **не меньше толщины платы**, иначе перемычка между отверстиями не будет иметь достаточной механической прочности.

Для неметаллизированных отверстий и торцов плат шероховатость поверхности делают такой, чтобы параметр шероховатости $R_z \leq 40$.

2.12.4 Округление размеров отверстий

Расчетные значения диаметров монтажных и переходных металлизированных и неметаллизированных отверстий приводятся к номинальным, которые в соответствии с ГОСТ 10317-79 должны быть выбраны из ряда 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; 1.9; 2.0; 2.1; 2.2; 2.3; 2.4; 2.5; 2.6; 2.7; 2.8; 3.0.

Предпочтительные размеры монтажных отверстий выбирают из ряда 0.7; 0.9; 1.1; 1.3; 1.5, переходных – из ряда 0.7; 0.9; 1.1. Рекомендуемое количество типоразмеров значений диаметров **не более трех** как для монтажных, так и для переходных отверстий.

2.12.5 Выбор формы контактных площадок

Для более надежной припайки к печатному проводнику объемного проводника или вывода навесного ЭРЭ на проводнике делают контактную площадку (КП) в виде участка с увеличенной шириной. Контактные площадки выполняют около каждого монтажного отверстия, для металлизированных отверстий – с двух сторон.

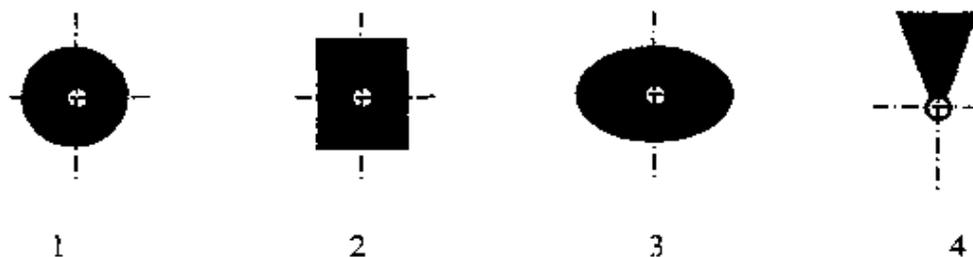
Форма контактных площадок (рисунок 2.16) выбирается исходя из варианта монтажа выводов – планарная или штыревая (в отверстие):

1. **Круглая контактная площадка** (наиболее распространенная) технологична и обеспечивает равномерное растекание припоя.

2. **Овальная контактная площадка** при равномерном растекании припоя создает более прочное и надежное соединение.

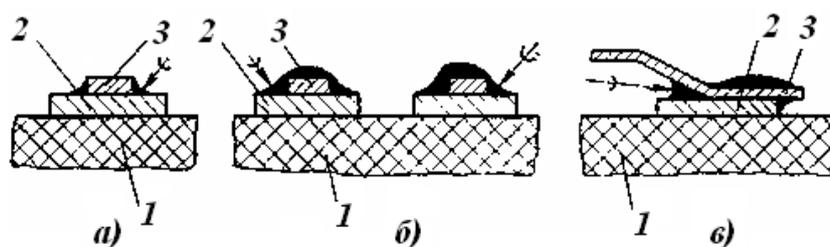
3. **Прямоугольная контактная площадка** (рисунок 2.17, *a – в*) из-за неравномерности растекания припоя и, соответственно, низкого качества соединения, для монтажа выводов ЭРЭ в отверстия практически не применяется. Основное ее назначение – для пайки планарных выводов микросхем и безкорпусных ЭРЭ. Нередко прямоугольная контактная площадка применяется также как ключевая площадка для выделения первого вывода микросхем и других ЭРЭ.

4. **Клиновидные контактные площадки** применяются в узких местах при недостатке площади под другие типы контактных площадок.



1 – круглая; 2 – прямоугольная; 3 – овальная; 4 – клиновидная

Рисунок 2.16 – Основные формы контактных площадок



1 – основание платы; 2 – контактная площадка; 3 – планарный вывод

Рисунок 2.17 – Форма паяных соединений планарных выводов навесных элементов с контактными площадками ПП

2.12.6 Определение размеров контактных площадок

Вначале для каждого монтажного или переходного отверстия необходимо рассчитать **минимальный эффективный диаметр контактной площадки**¹⁴ $D_{i.эфф}$:

$$D_{i.эфф} = 2 \left(b + \frac{d_{i \max}}{2} + T_d + T_D \right), \quad (2.10)$$

¹⁴ **Минимальный эффективный диаметр контактной площадки** - диаметр, полученный при изготовлении с учетом подтравы проводящего слоя под защитной маской (подтрав составляет порядка 70 % от толщины проводящего слоя)

где d_{\max} – максимальный диаметр монтажного или переходного отверстия с учетом допуска; T_d и T_D – позиционные допуски расположения осей отверстий и контактных площадок по ГОСТ 23751-86 (таблицы 2.16 – 2.17), соответственно.

Таблица 2.16 – Значения позиционного допуска расположения осей отверстий

Размер печатной платы по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения осей отверстий T_d , мм, для класса точности				
	1	2	3	4	5
До 180 включительно	0.20	0.15	0.08	0.05	0.05
Св. 180 до 360 включительно	0.25	0.20	0.10	0.08	0.08
Св. 350	0.30	0.25	0.15	0.10	0.10

Таблица 2.17 – Значения позиционного допуска расположения центров контактных площадок

Вид изделия	Размер печатной платы по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения центров контактных площадок T_D , мм для класса точности				
		1	2	3	4	5
ОПП; ДПП; ГПП; МПП (наружный слой)	До 180 включ.	0.35	0.25	0.15	0.10	0.05
	Св. 180 до 360 включ.	0.40	0.30	0.20	0.15	0.08
	Св. 360	0.45	0.35	0.25	0.20	0.15
МПП (внутренний слой)	До 180 включ.	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10
	Св. 180 до 360 включ.	0.45	0.35	0.25	0.20	0.15
	Св. 360	0.50	0.40	0.30	0.25	0.20

Вычисление **минимального диаметра КП** D_{\min} проводим для каждого монтажного и переходного отверстия с учетом выбранного класса точности и метода изготовления ПП. Поскольку толщина проводящего слоя $H_{\text{пр}}$ (толщина фольги (рисунок 2.1) или толщина фольги плюс толщина осажденной меди (рисунок 2.2)) различается для различных типов печатных плат, то при расчете **минимального диаметра контактной площадки** D_{\min} способ изготовления ПП обязательно должен быть учтен. Способ нанесения защитной маски также влияет на величину D_{\min} .

Для субтрактивных технологий:

$$D_{\min} = D_{\text{эфф}} + 1.5H_{\text{пр}}. \quad (2.11)$$

Для комбинированного позитивного метода и полуаддитивной технологии при фотохимическом способе нанесения защитной маски:

$$D_{\min} = D_{i\text{эфф}} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.03. \quad (2.12)$$

Для сеткографического способа нанесения защитной маски:

$$D_{\min} = D_{i\text{эфф}} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.08. \quad (2.13)$$

Толщина осажденной меди для комбинированного позитивного способа изготовления ПП составляет 15...25 мкм.

Коррекция полученных размеров КП проводится с учетом необходимой площади для получения качественной пайки. Контактную площадку, рассчитанную по формулам (2.11) – (2.13), необходимо развивать в свободную сторону, чтобы ее площадь, без учета отверстия, составляла для **1-го и 2-го классов точности не менее 2.5 мм²**, а для **3-го и 4-го – 1.6 мм²**, но не более **8 мм²** для любого класса точности.

Точность позиционирования, в свою очередь, определяет возможность автоматизированной установки ЭРЭ на печатную плату и совмещения установленных на плату электрорадиоэлементов (светодиодов, переменных резисторов и т.п.) с отверстиями в экранах, передней и задней панелях и других конструктивных элементах.

Поэтому, например, у печатных плат, предназначенных для автоматической установки навесных элементов, T_d , независимо от класса точности ПП, устанавливается для монтажных отверстий по 4-му классу точности, а для переходных – по 3-му.

Если позиционный допуск расположения осей отверстий необходимо учитывать при разработке элементов конструкции, то предельные отклонения расстояния между центрами двух отверстий ПП определяют как полусумму позиционных допусков расположения центров этих отверстий.

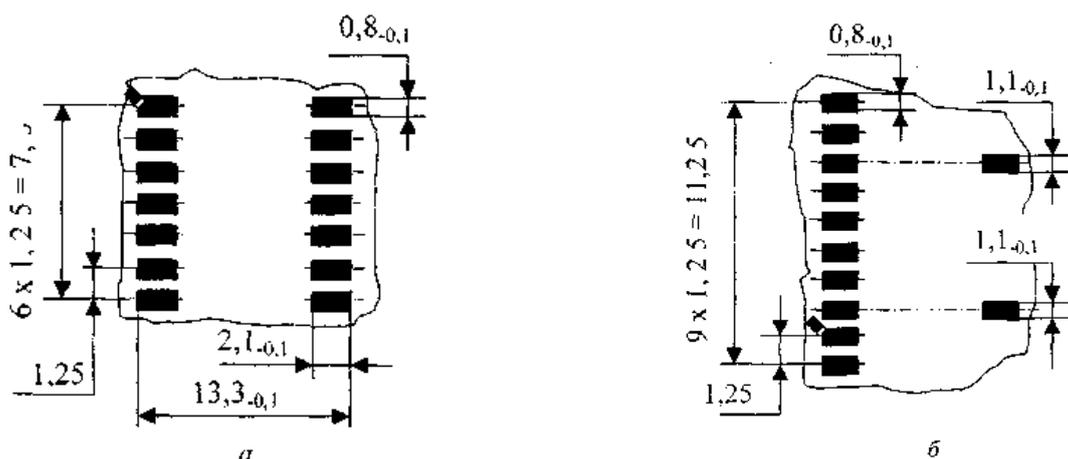
Контактные площадки, к которым будут припаиваться выводы от планарных корпусов, рекомендуется делать **прямоугольными** (см. рисунок 2.17, а – в).

В ОСТ 4.010.030-81 «Установка навесных элементов на печатные платы» приведены размеры контактных групп для некоторых микросхем с планарными выводами (см. рисунок 2.18).

При специальном проектировании прямоугольных контактных площадок их габаритные размеры должны быть **больше соответствующих размеров выводов** на **0.1...0.4 мм**, а расстояние между ним соответствовать 1-2-му классу точности (таблица 2.6).

Габариты прямоугольных КП для бескорпусных ЭРЭ и под планарные выводы ЭРЭ зависят от размеров паяемых элементов или выводов, а расстояние между КП определяются возможностями технологического оборудования и электрической прочностью.

Предельные отклонения размеров ширины печатных элементов Δt (*проводников, контактных площадок, концевых печатных контактов, экранов*) для узких мест не должны превышать значений, указанных в таблице 2.18.



а) – для микросхемы в корпусе 401.14-3; б) – для диодной матрицы 2Д908А

Рисунок 2.18 – Пример контактных групп для микросхем с прямоугольными контактными площадками

Таблица 2.18 – Предельные отклонения ширины печатных элементов

Наличие металлического покрытия	Предельные отклонения ширины печатных элементов Δt , мм, для класса точности				
	1	2	3	4	5
Без покрытия	± 0.15	± 0.10	± 0.05	± 0.03	0 -0.03
С покрытием	+0.25 -0.20	+0.15 -0.10	± 0.10	+0.05	± 0.03

2.12.7 Определение ширины печатных проводников

Минимально-допустимую ширину проводника t_{dmin} выбирают по таблице 2.6 с учетом выбранного класса точности и затем проверяют с помощью энергетических расчетов. При использовании значений ширины печатного проводника t , расстояния между проводниками S и ширины гарантийного пояса b , указанных в таблице 2.6, следует иметь в виду, что они заданы для узких мест. Для свободных мест указанные значения следует устанавливать по любому более низкому классу, а для первого класса – увеличивать в два раза.

После этого минимально допустимая ширина проводника t_{dmin} корректируется с учетом подтрава проводящего слоя и выбранной технологии изготовления.

Для субтрактивных технологий:

$$t_{min} = t_{dmin} + 1.5H_{пр}. \quad (2.14)$$

Для комбинированного позитивного метода и полуаддитивной технологии при фотохимическом способе нанесения защитной маски:

$$t_{\min} = t_{d\min} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.03. \quad (2.15)$$

Для сеткографического способа нанесения защитной маски:

$$t_{\min} = t_{d\min} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.08. \quad (2.16)$$

При проведении предварительных энергетических расчетов допустимую токовую нагрузку на элементы проводящего рисунка ПП (в зависимости от допустимого перегрева проводника относительно температуры окружающей среды) выбирают по таблице 2.19.

Таблица 2.19 – Допустимая плотность тока для медных проводников

Характеристика медного слоя	Допустимая токовая нагрузка, А/мм ²
Медная фольга	От 100 до 250
Гальваническая медь	От 60 до 100

Для проводников, имеющих дополнительное металлическое покрытие менее 12 мкм, за толщину принимают толщину основного проводящего слоя (фольги). При толщине покрытия более 12 мкм за толщину принимают суммарную толщину основной и осажденной меди $H_{\text{пр}}$ (рисунок 2.2). Величину допустимой токовой нагрузки следует уменьшать на 15 % для проводников, расположенных на расстоянии равном или меньшем их ширины, а также для проводников, выполненных по полуаддитивной или аддитивной технологиям.

Плотность тока и потери кроме ширины проводника t , зависят и от толщины проводящего слоя $H_{\text{пр}}$, которая определяется толщиной фольги и, при использовании полуаддитивных технологий, толщиной гальванически наращенной меди. Толщина фольги, в зависимости от марки применяемого материала (таблица 2.10), регламентирована для отечественных фольгированных диэлектриков значениями 5, 20, 35 и 50 мкм, для импортных – 12, 18 и 35 мкм. Если потери незначительны для работы электрической схемы, то предпочтение отдается минимальной толщине. Проводники толщиной более 50 мкм делать не рекомендуется, так как с увеличением толщины происходит ухудшение сцепления проводника с материалом основания ПП.

На графике (рисунок 2.19) приведена нагрузочная способность по току одиночных медных проводников постоянной ширины $S_{\text{пр}}$, мм, расположенных на расстоянии большем, чем ширина проводников.

Представленный график используют при выборе токовой нагрузочной способности проводников для ПП, критичных к рассеиваемой мощности с их поверхности, и проводников, допускающих прохождение тока большой плотности. В частности, для проводника толщиной 35 мкм, шириной 1 мм при нагреве на 20 °С нагрузочная способность по току будет составлять примерно 3 А.

Допустимую токовую нагрузку следует уменьшать на 15% для проводников, расположенных на расстоянии, равном или меньшем их ширины, и для проводников, выполненных по полуаддитивным технологиям. Исходя из

нагрузочной способности по току, обычно выбирают 2...3 типоразмера ширины проводников на проектируемой печатной плате.

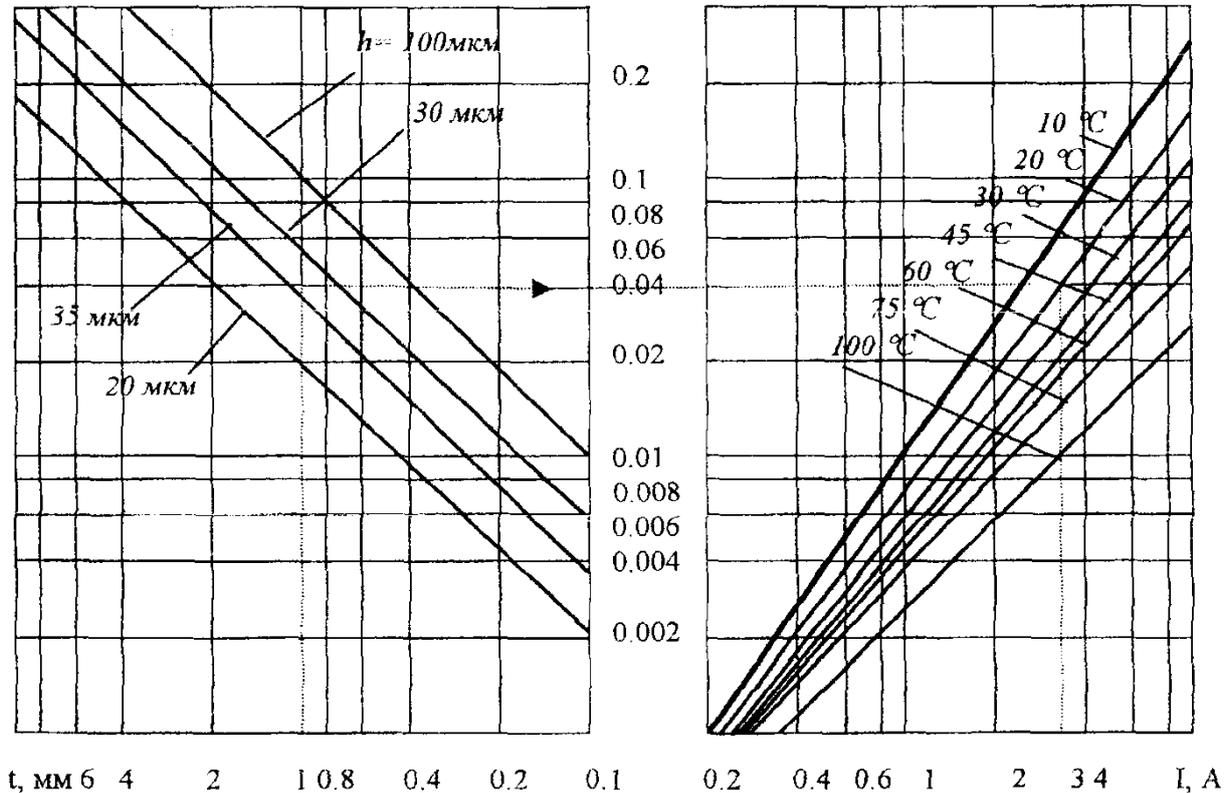


Рисунок 2.19 – Нагрузочная способность по току для печатных проводников

Вычисление таких электрических параметров проводящего рисунка, как сопротивление проводников, их индуктивность, емкость, возможно только после проведения трассировки проводников, когда будут определены их все геометрические размеры.

Электрическое сопротивление печатных проводников с покрытием R_{np} можно определить по формуле:

$$R_{nn} = \frac{\rho_0 \cdot l}{H_{np} \cdot t}, \quad (2.17)$$

где ρ_0 – удельное электрическое сопротивление материала проводника (см. таблицу 2.19); H_{np} – толщина проводника с покрытием (см. рисунки 2.1 – 2.3); l – длина печатного проводника; t – ширина печатного проводника.

2.12.8 Расчет расстояния между элементами печатного рисунка

Минимальное расстояние между центрами элементов печатного рисунка S_{min} определяется исходя из технологических возможностей производства ПП (разрешающая способность), условий сборки ПУ (автоматизированная

или ручная) и электрических параметров (пробивного напряжения и сопротивления изоляции). Технологические ограничения S_{\min} задаются классом точности (см. таблицу 2.6), а электрические – указанием в ЧТЗ пробивного напряжения, допустимых токов утечки и т.д.

Расстояние L_0 между серединой проводника и центром контактной площадки определяется по формуле:

$$L_0 = S_{\min} + \frac{D_{\max}}{2} + \frac{t_{\max}}{2} + T_l, \quad (2.18)$$

где T_l – позиционный допуск расположения печатного проводника относительно соседнего элемента проводящего рисунка (таблица 2.20); D_{\max} – диаметр КП с учетом допуска при изготовлении:

$$D_{\max} = D_{\min} + (0.02 \dots 0.06); \quad (2.19)$$

t_{\max} – ширина печатного проводника с учетом допуска при изготовлении:

$$t_{\max} = t_{\min} + (0.02 \dots 0.06). \quad (2.20)$$

Таблица 2.20 – Значения позиционного допуска расположения печатного проводника

Вид изделия	Размер ПП по большей стороне, мм	Значения позиционного допуска расположения T_l , мм, для класса точности				
		1	2	3	4	5
ОПП; ДПП; ГПК; МПП (наружный слой)	До 180 включ.	0.35	0.25	0.15	0.10	0.05
	Св. 180 до 360 включ.	0.40	0.30	0.20	0.15	0.08
	Св. 360	0.45	0.35	0.25	0.20	0.15
МПП (внутренний слой)	До 180 включ.	0.40	0.30	0.20	0.15	0.10
	Св. 180 до 360 включ.	0.45	0.35	0.25	0.20	0.15
	Св. 360	0.50	0.40	0.30	0.25	0.20

Расстояние L_0 между центрами двух контактных площадок определяется как:

$$L_0 = S_{\min} + D_{\max} + 2T_l. \quad (2.21)$$

Расстояние L_0 между центрами двух проводников равно:

$$L_0 = D_{\max} + 2T_l. \quad (2.22)$$

Минимально допустимое расстояние между печатными проводниками S_{\min} из расчета обеспечения электрической прочности изоляции, определяется расположением проводников в одном (таблица 2.21) или разных слоях (таблица 2.22).

Таблица 2.21 – Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в одном слое

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Рабочее напряжение, В, для материалов							
	Воздействующие факторы							
	Нормальные условия		Относительная влажность 98% при температуре 40 °С		Давление, мм рт. ст.			
	ГФ	СФ	ГФ	СФ	400		5	
ГФ					СФ	ГФ	СФ	
От 0.15 до 0.20 вкл.	-	25	-	15	-	20	10	
Св. 0.20 до 0.30 вкл.	30	50	20	30	25	40	20	30
Св. 0.30 до 0.40 вкл.	100	150	50	100	80	110	30	50
Св. 0.40 до 0.70 вкл.	150	300	100	200	110	160	50	80
Св. 0.70 до 1.20 вкл.	300	400	230	300	160	200	80	100
Св. 1.20 до 2.00 вкл.	400	600	300	360	200	300	100	130
Св. 2.00 до 3.50 вкл.	500	830	360	430	250	430	110	160
Св. 3.50 до 5.00 вкл.	660	1160	500	600	350	560	150	210
Св. 5.00 до 7.50 вкл.	1160	1500	660	830	500	660	200	250
Св. 7.50 до 10.00 вкл.	1300	2000	830	1160	560	1000	230	300
Св. 10.00 до 15.00 вкл.	1800	2300	1160	1600	660	1160	300	330

Примечание. Цепи с напряжением более 250 В в МПП применять не рекомендуется; цепи с напряжением более величин, указанных в таблице 2.21, также применять в ПП не рекомендуется.

Таблица 2.22 – Допустимое рабочее напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в соседних слоях

Расстояние между элементами проводящего рисунка, мм	Рабочее напряжение, В, для материалов	
	Гетинакс фольгированный (ГФ)	Стеклотекстолит фольгированный (СФ)
От 0.10 до 0.20 вкл.	-	25
Св. 0.20 до 0.30 вкл.	-	50
Св. 0.30 до 0.40 вкл.	75	100
Св. 0.40 до 0.50 вкл.	150	200
Св. 0.50 до 0.75 вкл.	250	350
Св. 0.75 до 1.50 вкл.	350	500
Св. 1.50 до 2.50 вкл.	500	850

Нанесение на ПП диэлектрических покрытий (таблица 2.23) позволяет повысить устойчивость ПП к климатическим воздействиям, а также уменьшить расстояние между проводниками (в 1.5...2 раза) вследствие увеличения

пробивного напряжения. При этом пробивное напряжение между проводниками не будет зависеть от влажности и атмосферного давления.

Таблица 2.23 – Электрофизические параметры лаков для покрытия ПП

Параметр	Лак		
	ФЛ-583 (фенольный)	Э-4100 (эпоксидный)	УР-231 (уретановый)
Относительная диэлектрическая проницаемость, отн. ед.	-	4	3.46
Электрическая прочность, МВ/м, не менее	75	-	75
Удельное объемное сопротивление, Ом·см	-	$1 \cdot 10^{15}$	$7.3 \cdot 10^{15}$
Тангенс угла потерь (при $f=1000$ Гц), отн. ед.	-	0.02	0.02
Технологическая толщина покрытия, мкм:			
двухслойное ¹⁵	-	35...40	35...40
трехслойное ¹⁶	-	30...55	30...55

Лак ФЛ-593 применяется и для увеличения влагостойкости, Э-4100 – при эксплуатации в жестких климатических воздействиях. Кроме указанных в таблице 2.23 для защиты ПП могут применяться лаки ЭП-730 и ЭП-9114.

2.13 Выбор конструкционных покрытий, припоев и флюсов

К конструкционным относят металлические покрытия, служащие для обеспечения защиты проводников от коррозии и улучшения паяемости и диэлектрические, применяемые для обеспечения необходимой электрической прочности монтажа.

Электрофизические параметры наиболее распространенных материалов проводников печатных плат и их металлических покрытий приведены в таблице 2.24.

Припои предназначены для горячего облуживания и создания металлургического соединения деталей с помощью металла или сплава, имеющего более низкую температуру плавления, чем соединяемые им металлы. Припои

¹⁵ Нанесение методами окунания или облива.

¹⁶ Нанесение распылением, окунанием с последующим центрифугированием, кистью.

должны иметь заданную температуру плавления. При этом температура пайки должна превышать температуру плавления припоя на 20...70 °С.

Таблица 2.24 – Электрофизические параметры материалов проводников печатных плат и их металлических покрытий

Материал	Толщина покрытия, мкм	Удельное электрическое сопротивление, 10^{-4} Ом/м	Метод нанесения	Область применения
Медная фольга	5...50	1.72	Ламинирование	Проводящий материал
Медь: гальваническая химическая	5...25 1...3	1.9 2.8	Гальванический Химический	Металлизация отверстий, дополнительная металлизация проводников
Олово	4...10	12.0	Гальванический, горячий	Защита от коррозии, улучшение способности к пайке
Сплав «Розе»	4...10	-	Горячий	То же
Сплав олово-свинец	9...12	9...12	Гальванический	То же
Припой ПОС-61	4...10	-	Горячий	То же
Серебро	6...12	1.59	Гальванический	Улучшение электропроводности и износоустойчивости
Золото	0.25...3	2.22	Гальванический	Снижение переходного сопротивления контактов
Никель	3...5	7.8	Гальванический	Придание твердости контактам. Улучшение способности к сварке. Подслой под палладий
Палладий	1...5	10.8	Гальванический	Повышение износоустойчивости контактов

Припой должен легко вытеснять флюс, образуя с основными металлами соединение достаточной механической прочности, обладать заданными электрическими характеристиками, а также определенной плотностью, коэффициентом теплового расширения и антикоррозионными свойствами, как в процессе пайки, так и при последующей эксплуатации изделий.

Технологические требования к припою предусматривают хорошую смачиваемость им соединяемых металлов, возможность его капиллярного подъема в узких зазорах, максимально быструю кристаллизацию с переходом в твердую фазу для исключения появления трещин и пористости в паяных соединениях, возможность дозирования его в виде проволоки, шариков, таблеток и т.п.

Следует учитывать, что многие микросхемы и ЭРЭ нельзя нагревать выше определенной температуры и превышать заданное время воздействия этой температуры. Для предотвращения перегрева чувствительных к нагреву элементов в простейших случаях применяют местные теплоотводы (пинцеты, плоскогубцы и т.п.).

Исходя из выбранной технологии изготовления, определяется марка применяемого припоя (таблица 2.25).

Таблица 2.25 – Марки припоев, их состав и назначение

Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С	Область применения
ПОС-40	Олово, 39...41 Свинец, 61...59	Медь, никель и их сплавы, ковар, серебро, золото, олово и его сплавы, кадмий	183...238	Пайка и лужение деталей и монтажных проводов, жгутов, наконечников, проходных стеклянных изоляторов
ПОС-61	Олово, 60...62 Свинец, 38...40	То же	183...190	Пайка и лужение выводов ИМС и ЭРЭ, ПП, микропроводов, пленочных покрытий, работающих при температуре не выше 100 °С

Продолжение таблицы 2.25

Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С	Область применения
ПОСК50-18	Олово, 49...51 Кадмий, 17...19 Свинец - остальное	То же	142...145	Пайка и лужение РЭС, керамических изоляторов, конденсаторов, проводов и т.д., не допускающих нагрев выше 180° С
ПОС-Су61-0.5	Олово, 60...62 Сурьма, 0.2...0.5 Свинец - остальное	Медь, никель и их сплавы, ковар, сталь, цинк, серебро, металлические и неметаллические материалы	183...189	Пайка и лужение РЭС, ПП, контактных соединений, реле, трансформаторов, дросселей
ПОС-Су40-2	Олово, 39...41 Сурьма, 1.5...2 Свинец - остальное	Медь, никель и их сплавы, сталь, кадмий, серебро	185...255	Пайка и лужение корпусов, каркасов, припайка заземляющих проводов к экранирующей оплетке
ПСр2.5	Олово, 5...6 Серебро, 2.2...2.8 Свинец - остальное	Медь, никель и их сплавы, неметаллы с напыленным, химическим или гальваническим покрытием, палладий	295...305	Пайка и лужение потенциометров, резисторов, разъемов и т.п., работающих при температуре 150...260°С. Исправление дефектов в узлах, подвергающихся серебрению

Окончание таблицы 2.25

Марка припоя	Составляющие припоя и их содержание, %	Паяемый металл (металлическое покрытие)	Температура плавления, °С	Область применения
ПСрОСЗ. 5--95	Свинец, 0.8...1.3 Серебро, 3.1...3.5 Олово - остальное	То же	220...225	Пайка и лужение монтажных элементов изделий узлов РЭС (соединение допускает электролитическое покрытие)
ПГМ-65	Медь, 34...36 Галлий, 64...66	Медь, никель, неметаллы с покрытием медью, никелем, серебром, золотом	200	Бесфлюсовая пайка микросхем и навесных элементов к ПП
ПСр-40	Серебро, 39...41 Медь, 16.4...17.4 Никель, 0.3 Цинк, 16.6...17.8	Медь и ее сплавы, сталь, медные провода в стеклянной изоляции	595...805	Пайка трансформаторов, разъемов, малогабаритных электромаши и деталей РЭС, работающих при температуре 500...700° С
ПЗл МЗ7В	Золото, 37.1...37.9 Бор, 0.1...0.3 Медь - остальное	Керамика, медь	990...1010	Пайка разъемов, гермовводов, корпусов микросхем и других деталей конструктивных узлов

Флюсы существенно ускоряют процесс пайки при минимально возможных температурах (следует помнить, что для многих электрорадиоэлементов РЭС ограничены температура воздействия и время нагрева). Они служат для устранения пленки оксидов с поверхностей металлов и припоя при пайке, защиты поверхности металлов и припоя от окисления в процессе пайки и уменьшения сил поверхностного натяжения расплавленного припоя на границе *металл - припой - флюс*.

Правильно выбранный флюс должен растворять оксиды паяемых металлов и быть безопасным в работе.

Применение того или иного флюса зависит от вида или покрытия паяемого металла, используемого припоя, температуры пайки (точка плавления припоя не является температурой пайки) и назначения паяемых изделий (таблица 2.26).

Таблица 2.26 – Марки флюсов, их состав и назначение

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
Канифоль марок А, В		Медь, серебро, олово, цинк, олово - свинец, золото, олово - висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-кадмиевые, серебряные	Пайка и лужение деталей и проводников в изделиях специального назначения. Консервация в условиях складского хранения
ФКСп	Сосновая канифоль, 10...60			
ФКЭт	Этиловый спирт, 90...40			
ФКТ	Сосновая канифоль, 10...40 Тетрабромиддипсита, 0.05...0.1 Этиловый спирт, 89.95...59.9	Медь, серебро, олово, кадмий, цинк, олово - свинец, олово - висмут, золото	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях специального назначения
ФКТС	Сосновая канифоль, 15...30 Салициловая кислота, 3...3.5 Триэтаноламин, 1...1.5 Этиловый спирт, 65...81	То же, кроме золота	То же, и серебряные	То же, но при условии полного удаления остатков флюса после пайки
ЛТИ 120	Сосновая канифоль, 20...25 Солянокислый ди-	Сталь, медь, никель и его сплавы, олово,	Оловянно-свинцовые, серебряные	Пайка и лужение деталей и про-

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
	этиламин, 3...5 Триэтаноламин, 1...2 Этиловый спирт, 68...76	серебро, кадмий, цинк, олово - свинец, олово - висмут		водников в изделиях широкого потребления

Продолжение таблицы 2.26

Марка флюса	Составляющие флюса и их содержание, %	Паяемый металл или металлическое покрытие	Применяемые припои	Область применения
ФГСп	Солянокислый гидрозин, 2...4 Этиленгликоль, 25...50 Этиловый спирт, 46...73	Медь и ее сплавы, никель и его сплавы, олово, серебро, кадмий, цинк, олово - свинец, олово - висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые, оловянно-свинцово-кадмиевые	Пайка и лужение деталей в изделиях широкого потребления. Предварительное лужение выводов в изделиях специального назначения
ФТС	Салициловая кислота, 4...4.5 Триэтаноламин, 1...1.5 Этиловый спирт, 94...95	Медь, олово, серебро, кадмий, цинк, олово - свинец, олово - висмут	Оловянно-свинцовые, оловянно-свинцово-висмутовые	Пайка и лужение контактных соединений и поверхностей в изделиях широкого потребления
ФДГл	Солянокислый диэтиламин, 4...6 Глицерин, 94...96	То же	Оловянно-свинцовые	То же, а также групповая пайка деталей и оплавление после гальванического лужения
ФЦА	Хлористый цинк, 45.5 Хлористый аммоний 9.0 Вода, 45.5	Сталь, медь и их сплавы, никель и его сплав	Оловянно-свинцовые, серебряные	Предварительное лужение поверхностей при условии полного удаления остатков флюса после пайки
ЖЗ-1-АП	Цилиндровое масло 52, 79...81 Кремнийорганическое связующее ПФМС-6, 16...17 Олеиновая кислота, 1.8...4.9 Антиоксидант НГ-2246, 0.1...0.2	-	Оловянно-свинцовые	Защита зеркала расплавленного припоя от окисления в механизированных установках для пайки

После пайки выполняют тщательную очистку и отмывку узлов и паяных соединений от остатков флюсов и других загрязнений, способных привести к коррозии и снижению сопротивления изоляции диэлектрических материалов. Для этих целей используют горячую проточную воду, смесь бензина с этиловым спиртом, трихлорэтилен и т.п. в специальных виброзвуковых или ультразвуковых установках.

2.14 Выбор варианта формовки выводов и установки электрорадиоэлементов на ПП

Для одного и того же ЭРЭ в зависимости от условий эксплуатации и технологии, применяемой на производстве, может быть предусмотрено несколько *вариантов установки* на ПП. Каждому из таких вариантов установки должен соответствовать свой вариант посадочного места в интегрированных библиотеках базовых компонентов САПР.

Исходя из требований технологичности, всегда следует ориентироваться на применение стандартизованных вариантов установки ЭРЭ в соответствии с ОСТ 4.010.030-81 или другими нормативно-техническими документами. Такой подход позволяет применять типовую технологическую базу для формовки выводов¹⁷ компонентов, установки ЭРЭ на ПП, а также уменьшить количество посадочных мест, используемых в САПР печатных плат.

Таблица 2.27 представляет варианты установки навесных элементов в соответствии с отраслевым стандартом ОСТ 4 ГО.010.030-81.

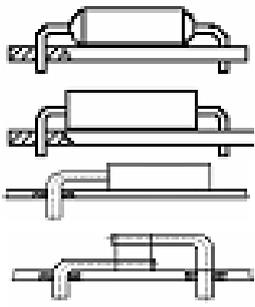
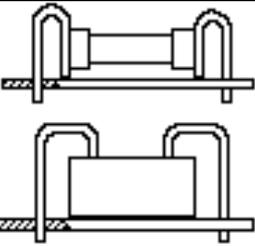
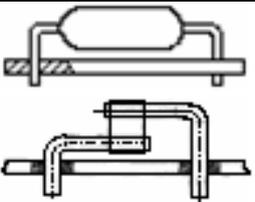
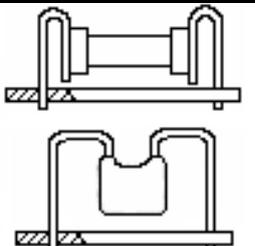
При применении элементов, не включенных в указанный стандарт, формовку и установку их на печатные платы следует производить с учетом требований ГОСТ и технических условий на эти элементы. На сборочном чертеже следует сделать вид, поясняющий нестандартный вариант установки ЭРЭ.

На рисунке 2.20 показаны часто применяемые способы установки элементов, имеющих два вывода, расположенных аксиально (сопротивления, конденсаторы, диоды и др.).

Вариант установки **Ia** непосредственно на плату (рисунок 2.20, *a*) прост, технологичен, обеспечивает фиксацию при групповых методах пайки. Повышение механической прочности легко осуществить покрытием электроизоляционными лаками. К недостаткам можно отнести ухудшенный конвективный отвод тепла, возможность замыкания корпуса с проводниками, проложенными под ним, а также пониженную ремонтпригодность.

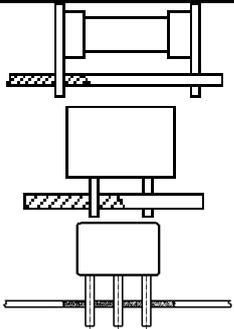
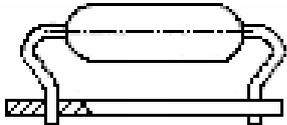
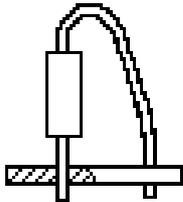
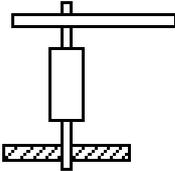
¹⁷ **Формовка** - это обрезка лишней длины выводов ИС и ЭРЭ (в зависимости от толщины используемой печатной платы (ПП) и типа корпуса) и их гибка. При установке деталей на плату выводы должны выступать за противоположную сторону ПП не менее чем на 0.5 мм и не более чем на 1.5 мм.

Таблица 2.27 – Варианты установки навесных элементов по ОСТ 4
ГО.010.030-81¹⁸

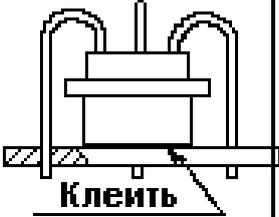
Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установки	формовки			
I	а		Ia	На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников, имеющих электроизоляционную защиту печатных проводников и металлизированных отверстий под корпусами ЭРЭ
	б		Iб	
II	а		IIa	На платах, изготовленных любым методом, с одно- и двусторонним расположением печатных проводников
	б		IIб	

¹⁸ Крепление и эксплуатация при механических нагрузках - в соответствии с ТУ на резисторы, конденсаторы, полупроводниковые приборы и реле.

Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение вариан- та	Рекомендуе- мое приме- ние
установ- ки	формов- ки			
II	В		IIв	На платах, из- готовленных любым мето- дом, с одно- и двусторонним расположени- ем печатных проводников. Вариант уста- новки приме- нять при меха- нических нагрузках, не превышающих требования 3- го класса аппа- ратуры по ГОСТ В 20.39. 304-76
	Г		IIг	
III	-		III	На платах, из- готовленных любым мето- дом, с одно- и двусторонним расположени- ем печатных проводников
IV	-		IV	Для межплат- ной конструк- ции печатного узла и на пла- тах, изготов- ленных любым методом, с од- но- и двусто- ронним распо- ложением пе- чатных про- водников

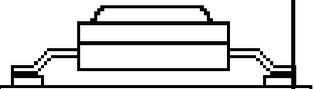
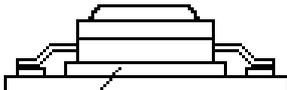
Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установки	формовки			
V	-	 <p>Клей</p>	Va	На платах, изготовленных любым методом, с одно- и двусторонним расположением печатных проводников. При двустороннем расположении печатных проводников под элементами предусмотреть изоляцию, если под ними проходят проводники. Крепление и эксплуатация при механических нагрузках – в соответствии с техническими условиями на ЭРЭ
	-	 <p>Клей</p> <p>Прокладка</p>	Vб	На платах с одно-сторонним и двусторонним расположением печатных проводников, с применением электроизоляционных подставок, стоек, втулок и т.п.

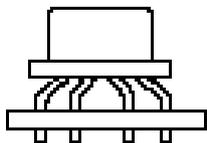
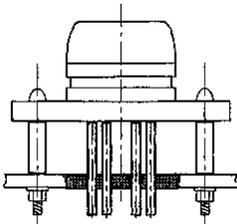
Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение вари- анта	Рекомендуемое применение
уста- новки	фор- мовки			
V	-	 <p>Держатель</p>	V _B	На платах с одно- сторонним и дву- сторонним распо- ложением печат- ных проводников, с применением механических держателей. Эксп- луатация при ме- ханических нагрузках – в со- ответствие с тех- ническими усло- виями на полу- проводниковые приборы
	-	 <p>Подставка</p>	V _Г	На платах с одно- сторонним и дву- сторонним распо- ложением печат- ных проводников, с применением электроизоляци- онных подставок. Эксплуатация при механических нагрузках – в со- ответствие с тех- ническими усло- виями на полу- проводниковые приборы

Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установки	формовки			
VI	а		VIa	На платах, изготовленных любым методом, с одно- и двусторонним расположением печатных проводников. При двустороннем расположении проводников под корпусами микросхем и микросборок предусмотреть электроизоляционное покрытие
	б		VIб	На платах, изготовленных любым методом, с одно- и двусторонним расположением печатных проводников. Эксплуатация при механических нагрузках, не превышающих требования ГОСТ В.20.39. 304-76
VI	в	 Прокладка	VIв	На платах с одно- и двусторонним расположением печатных проводников при применении теплопроводящих шин и электроизоляционных прокладок

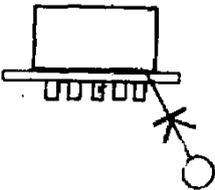
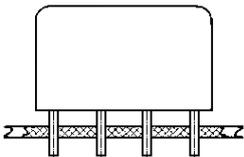
Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установки	формовки			
VII	а		VIIa	На платах, изготовленных любым методом, с одно- и двусторонним расположением печатных проводников. Эксплуатация при механических нагрузках, не превышающих требования ГОСТ В.20.39. 304-76
	б		VIIб	На платах с одно- и двусторонним расположением печатных проводников с применением электроизоляционных прокладок для увеличения жесткости крепления
VII	в		VIIб	На платах с одно- и двусторонним расположением печатных проводников с применением механического крепления. Эксплуатация при механических нагрузках в соответствии с техническими условиями на микросхемы

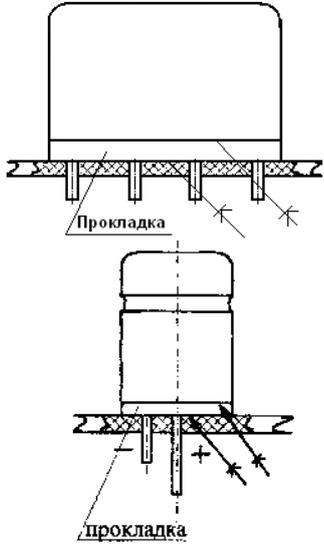
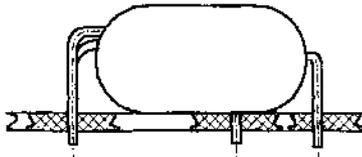
Продолжение таблицы 2.27

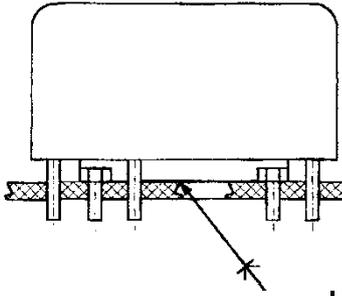
Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установка	формовки			
VIII	а		VIIIa	На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников. Эксплуатация при механических нагрузках – в соответствии с техническими условиями на полупроводниковые приборы, микросхемы и микросборки
	б		VIIIб	На платах с односторонним расположением печатных проводников с обязательным применением прокладок или теплоотводящих металлических шин. Крепление и эксплуатация – в соответствии с техническими условиями на микросхемы и микросборки

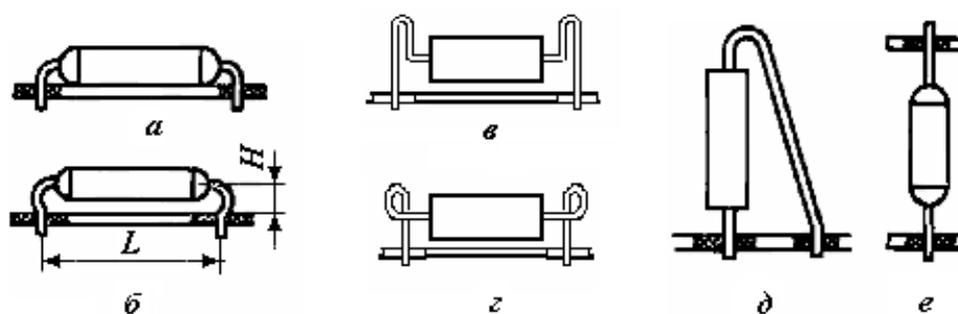
Продолжение таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение варианта	Рекомендуемое применение
установки	формовки			
VIII	В		VIIIв	<p>На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников с установкой на мастику АН по периметру. При двустороннем расположении печатных проводников под корпусами микросхем предусмотреть электроизоляционное покрытие</p>
IX	-		IXа	<p>На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников. Эксплуатация при механических нагрузках – в соответствии с техническими условиями на реле</p>

Окончание таблицы 2.27

Варианты		Конструктивное выполнение	Обозначение вари- анта	Рекомендуемое применение
уста- новки	фор- мовки			
IX	-		IXб	<p>На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников.</p> <p>Эксплуатация при механических нагрузках – в соответствии с техническими условиями на полупроводниковые приборы, микросхемы и микросборки</p>
	-			

	-		<p>IXГ</p> <p>На платах с односторонним и двусторонним расположением печатных проводников.</p> <p>Крепление и эксплуатация – в соответствии с техническими условиями на реле.</p>
--	---	---	---



- a)* непосредственно на плату; *б)* с зазором;
в) и *г)* со специальной формовкой выводов;
д) и *е)* с минимизацией установочной площади

Рисунок 2.20 – Варианты установки элементов с аксиальными выводами

Легче всего указанные недостатки можно устранить, используя вариант установки **Па** с зазором между платой и корпусом (рисунки 2.20, б). Величина зазора в соответствии с ОСТ 4.010.030-81 определяется типом элемента. Для конденсаторов, устанавливаемых вручную, а также небольших диаметра (до 10 мм) и высоты (до 15 мм), часто изоляционных прокладок не устанавливают.

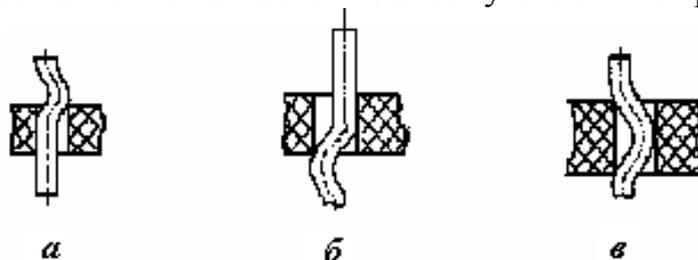
Тем не менее, данный вариант установки также имеет ограниченное применение из-за низкой стойкости к вибрационным воздействиям¹⁹ и сложности применения групповых методов пайки.

Чтобы обеспечить возможность применения групповой пайки (например, пайки «волной») элементов, устанавливаемых с зазором между платой и корпусом, необходимо предусматривать либо технологические прокладки, обеспечивающие необходимый зазор (1.5...2 мм), либо специальные изгибы выводов, как показано на рисунке 2.21. Эти изгибы удерживают элемент и не

¹⁹ Наиболее частая причина отказа в этом случае - обламывание вывода в месте крепления к корпусу.

дают ему опуститься на плату в процессе установки других элементов до операции пайки.

Варианты установки **IIг** со специальной формовкой выводов (рисунок 2.20, *в*, *г*) более устойчивы и к вибрационным воздействиям. Повышенная длина выводов позволяет использовать более тугоплавкие припои.



а) с «зигом»; *б*) с «замком»; *в*) с «зиг-замком»

Рисунок 2.21 – Виды формовки выводов ЭРЭ для обеспечения возможности групповой пайки

Варианты установки **III** и **IV** (рисунок 2.20, *д*, *е*) применяют для минимизации занимаемой площади и лучшего воздушного охлаждения. К недостаткам данных вариантов можно отнести отсутствие возможности автоматизированной сборки и низкую стойкость к вибрационным нагрузкам. На рисунке 2.20, *е* показана установка элементов с аксиальными выводами в двухплатной конструкции.

Если элемент имеет электропроводный корпус, установленный как показано, например, на рис. 2.20, *а*, и под корпусом проходит проводник, то необходимо предусмотреть изоляцию корпуса или проводника путем:

- надевания на корпус элемента трубок из изоляционного материала;
- нанесения тонкого слоя эпоксидной смолы на плату в зоне расположения корпуса (эпоксидная маска);
- наклеивания на плату тонких изоляционных прокладок.

Аналогично, если выводы ЭРЭ проходят рядом с проводящим корпусом, как, например, в варианте установки **III** на рисунке 2.20, *д*, то на них надевают защитные трубки из изоляционного материала.

Защитная маска (тонкий слой эпоксидной смолы, термостойкой краски, сухого пленочного фоторезиста) применяется не только для электроизоляции, но и для экономии припоя при групповых методах пайки с одновременной защитой проводников. В этом случае маска наносится на весь проводящий слой, за исключением монтажных и контрольных контактных площадок. При проектировании защитной маски следует учитывать, что зазоры менее 0.3...0.5 мм недопустимы.

При выборе межцентрового расстояния L , высоты H и других размеров следует учитывать, что для всех типов ЭРЭ ограничено минимальное расстояние от корпуса элемента, на котором можно производить гибку вывода, и минимальное расстояние от корпуса до места приложения паяльника при пайке.

В требованиях ГОСТ и технических условиях на ЭРЭ, как правило, указываются расстояния от корпуса элемента до места изгиба вывода (при однократной гибке) или до места пайки выводов. Межцентровое расстояние определяется не только конструкцией компонента, но и его функциональными параметрами. Так, например, для диодов 2Д103 и КД103, имеющих одинаковое конструктивное исполнение, размер L составляет 22.5 мм, а для КД102 – 12.5 мм (см. ОСТ 4.010.030-81).

Если указания о размерах от корпуса ЭРЭ до места изгиба или до места пайки выводов ЭРЭ в государственных стандартах или технических условиях отсутствуют, то ОСТ 4.010.030-81 устанавливает следующие ограничения (рисунок 2.22):

- от корпуса ЭРЭ до места пайки не менее 2.5 мм (для полупроводниковых приборов – не менее 3 мм);
- от корпуса ЭРЭ до оси изогнутого вывода не менее 2 мм;
- для выводов диаметром или толщиной до 0.5 мм минимальный внутренний радиус сгиба 0.5 мм;
- для выводов диаметром или толщиной 0.5...1.1 мм минимальный внутренний радиус сгиба 1 мм.

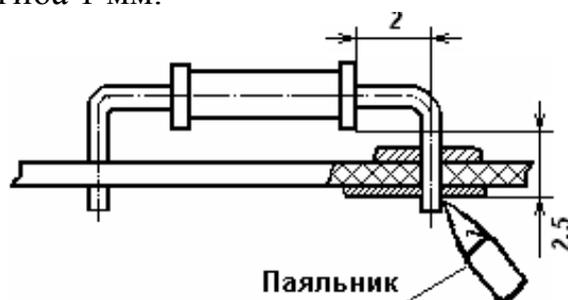


Рисунок 2.22 – Расстояния от корпуса элемента до места пайки и до оси изогнутого вывода

Эти ограничения должны быть удовлетворены не только для ЭРЭ с аксиальными выводами, но и для всех типов ЭРЭ, подключаемых пайкой.

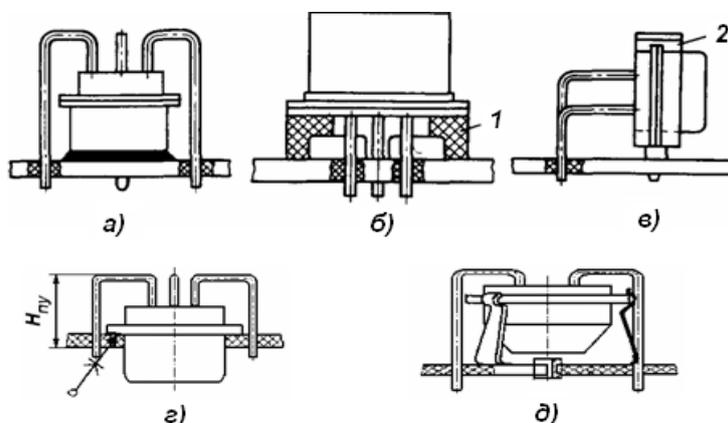
Выводы элементов одного и того же типоразмера рекомендуется изгибать на одни и те же установочные размеры по их кратности шагу координатной сетки. Центры площадок выводов ЭРЭ *обязательно* должны находиться в узлах выбранной стандартной сетки из ряда (2.5, 1.25, 0.675) мм. Для прямоугольных выводов изгиб делают по длинной стороне.

В зависимости от конструкции конкретного типа элемента и характера механических воздействий, действующих при эксплуатации (частота и амплитуда вибрации, значение и длительность ударных перегрузок и др.), ряд элементов нельзя закреплять только пайкой за выводы – их обязательно нужно крепить дополнительно за корпус. Например, на рисунке 2.23 показаны возможные варианты установки транзисторов в РЭС, работающих в условиях вибрации и ударов.

В зависимости от конструкции и массы крепление элементов за корпус можно производить:

- приклейкой к плате специальными мастиками или клеями. Так на рисунке 2.23, *а* корпус транзистора приклеен к плате (вариант **Va**), а на рисунке 2.23, *б* – к переходной втулке (вариант **Vб**);
- прилакировкой в процессе влагозащиты печатного узла;
- заливкой компаундом;
- привязкой нитками или проволокой;
- с помощью скоб, держателей (рисунок 2.23, *в, д*; варианты **Vв** и **Vг**).

Вариант, предусматривающий при больших механических нагрузках установку корпуса транзистора в отверстие на ПП (рисунок 2.23, *з*), обеспечивает уменьшение толщины печатного узла $H_{пу}$ по сравнению с предыдущими вариантами установки. В ряде случаев это позволяет уменьшить объем блока, кассеты и т.п. К недостаткам этого варианта установки можно отнести наличие дополнительных отверстий на ПП, снижающих механическую прочность платы, усложняющих технологический процесс производства печатной платы и уменьшающих площадь поверхностей, где возможна прокладка проводников.



1 – переходная втулка; 2 – крепежная скоба

Рисунок 2.23 – Установка транзистора

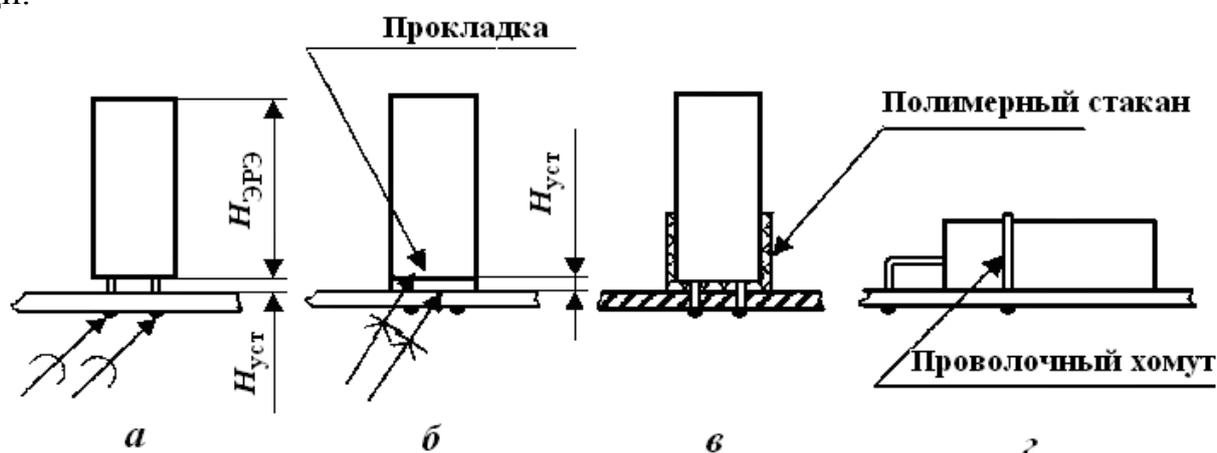
Транзисторы, установленные, как показано на рисунке 2.23, *д*, могут работать при больших механических воздействиях, наряду с этим обеспечивая надежный электрический контакт с корпусом (экран). Такая установка применяется, главным образом, для крепления высокочастотных транзисторов типа ГТ311, ГТ313 и т.п.

ОСТ 4.010.030-81 предусматривает установку электролитических конденсаторов с однонаправленными выводами по двум вариантам (таблица 2.24): **Ia** и **IIв**. При выборе варианта **IIв** предусматривается гарантированный зазор ($H_{уст}$) между платой и компонентом (рисунок 2.24, *а*). Величина зазора в соответствии с ОСТ 4.010.030-81 определяется типом конденсатора. Для конденсаторов, устанавливаемых вручную, а также небольшого диаметра (до 10 мм) и высоты (до 15 мм), часто изоляционных прокладок не устанавливают.

При увеличенных габаритных размерах, особенно высоты ($H_{ЭРЭ}$), обычно применяют фиксирующие прокладки из электроизоляционного материала (электротехнического картона, реже текстолита) (рисунок 2.24, б). При повышенных требованиях по устойчивости к механическим воздействиям осуществляют дополнительную фиксацию клеем (рисунок 2.24, б).

Вариант установки конденсатора в полимерный (обычно полиэтиленовый) стакан (рисунок 2.24, в) кроме обеспечения гарантированного зазора защищает и от возможного электрического контакта с корпусом, особенно в случае близкого расположения конденсаторов друг от друга. Основным недостатком этого варианта установки – проблематичность в дополнительном приклеивании по сравнению с вариантом, представленным на рисунке 2.24, б. При необходимости возможно применение обволакивания защитными лаками.

Наиболее качественную защиту от механических воздействий обеспечивает вариант **Ia** при применении дополнительного крепления проволоочным хомутом (рисунок 2.24, г). Отличительной особенностью данного варианта является повышение плоскостности за счет увеличения установочной площади.



а) по варианту **Iв**;

б) по варианту **Iв** с диэлектрической прокладкой; в) в полимерный стакан;

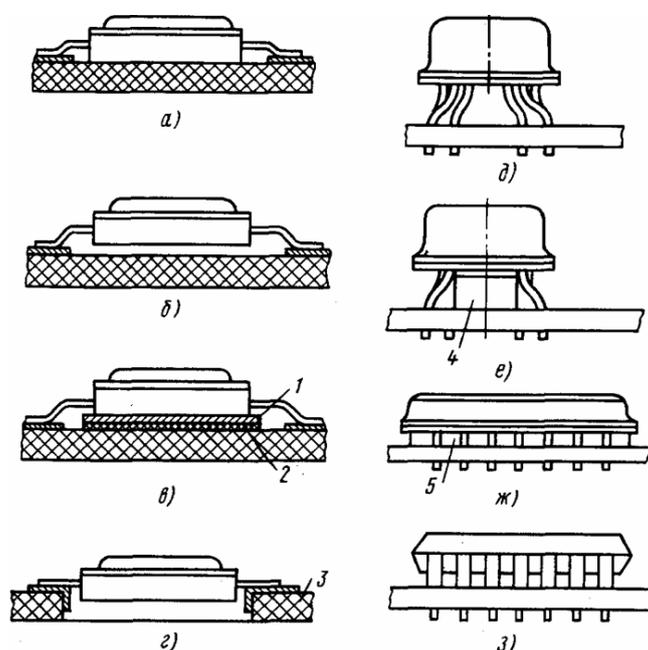
г) по варианту **Ia** с дополнительным креплением проволоочным хомутом

Рисунок 2.24 – Установка электролитических конденсаторов с однонаправленными выводами

На рисунке 2.25 показаны варианты установки микросхем в корпусах с планарными выводами, в круглых корпусах и в плоских прямоугольных корпусах со штырьковыми выводами. Все указанные способы крепления микросхем обеспечивают их надежное крепление в условиях вибрации и ударов, действующих на аппаратуру, которая устанавливается на подвижных объектах (автомобилях, самолетах, судах и т.п.). При этом обязательно покрытие узлов влагозащитными лаками, которое обеспечивает дополнительное крепление выводов микросхемы к плате.

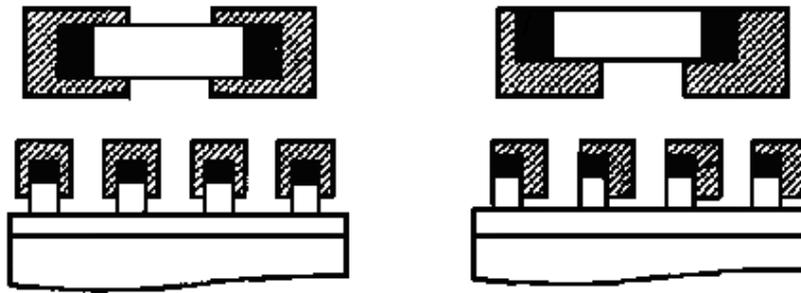
Если микросхема выделяет большое количество теплоты и функционирует при повышенной температуре, то существует опасность нагрева корпуса микросхемы выше допустимой температуры. В этом случае под корпусами микросхем устанавливают теплоотводящую медную шину 1 (рисунок 2.25, в), концы которой должны плотно прилегать к корпусу изделия или другому элементу конструкции, способному отводить выделяемую микросхемой теплоту в окружающее пространство. Медная шина должна быть изолирована изоляционной прокладкой от печатных проводников, проходящих под микросхемой. По тем же причинам изоляционные прокладки нужно применять при установке, изображенной на рисунке 2.25, а. Вместо прокладок можно покрывать нижнюю поверхность корпуса микросхемы эпоксидной смолой.

При использовании поверхностного монтажа дискретные компоненты и микросхемы с шагом выводов более 1 мм должны быть размещены так, чтобы выводы компонентов не выходили за пределы контактной площадки (рисунок 2.26). Оптимально симметричное расположение компонентов. Такие компоненты паяют методом групповой пайки в конвекционных печах.



1 – теплоотводящая шина; 2 – изоляционная прокладка;
3 – печатная плата, изготовленная методом выступающих выводов;
4 – подставка; 5 – прокладка

Рисунок 2.25 – Установка микросхем



Правильно

Допустимо

**Рисунок 2.26 – Поверхностный монтаж
дискретных компонентов и микросхем**

3 ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПП С ПОМОЩЬЮ САПР P-CAD

3.1 Подготовка к проектированию печатных плат САПР P-CAD

Одной из самых мощных, полных и последовательных систем диалогового автоматизированного проектирования многослойных ПП от начала до конца считается интегрированная система *Personal Computer Aided Design* (сокращенно *P-CAD*) [20 - 40], представляющая собой комплект взаимосвязанных основных и вспомогательных программ, работающих на персональных компьютерах типа IBM PC. Она адаптирована к операционной среде Windows и использует все настройки и возможности последней.

На рисунке 3.1 показаны первостепенные программные модули *P-CAD 2002*.

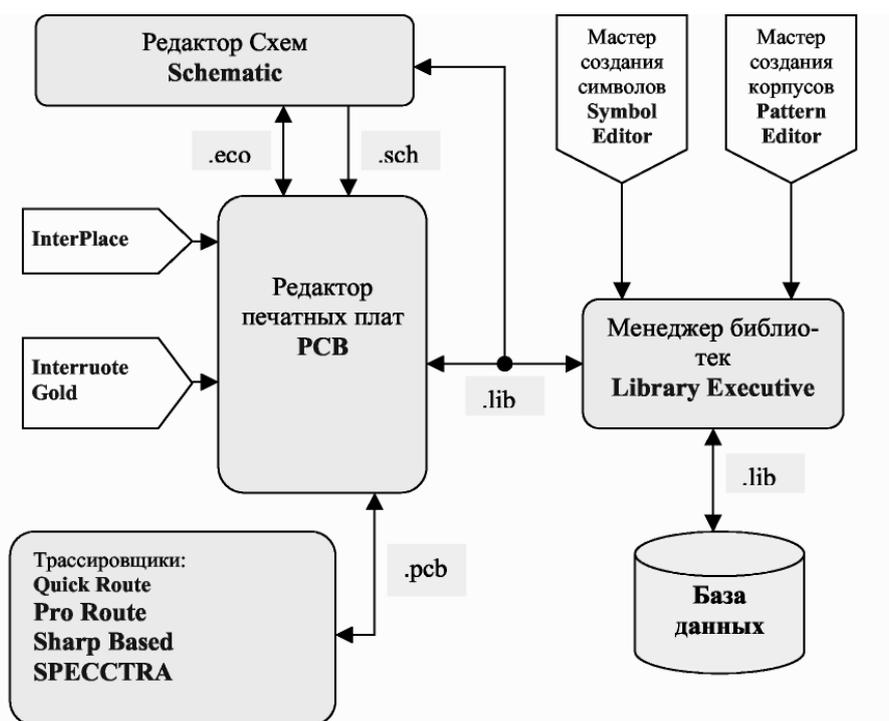


Рисунок 3.1 – Структура системы проектирования *P-CAD 2002*

P-CAD Schematic – графический редактор электрических схем [20 - 26, 35, 36] предназначен для разработки схем электрических принципиальных и может применяться для создания и размещения в библиотеках символов²⁰ условных графических обозначений (УГО) электрорадиоэлементов и редактирования существующих. Позволяет создавать сложные многостраничные схемы, в том числе и с иерархической структурой. Располагает средствами

²⁰ *Символ (Symbol)* - файл (*.sym), содержащий условное графическое обозначение (УГО) одной секции (вентиля) ЭРЭ. Включает информацию, отражающую функционирование ЭРЭ (код эквивалентности выводов), а также о структуре ЭРЭ в его физическом корпусе (упаковочная информация о количестве секций, выводов, их типах и т.д.).

проверки схем. Редактор имеет систему всплывающих меню в стиле *Windows*, а наиболее часто применяемым командам назначены пиктограммы. Информацию об особенностях трассировки отдельных цепей можно с помощью стандартных атрибутов ввести на этапах создания принципиальной схемы или ПП.

P-CAD PCB²¹ – графический редактор ПП [20 - 26, 37 - 40], предназначенный для конструкторско-технологического проектирования односторонних, двухсторонних и многослойных ПП. Он позволяет задавать:

- размеры и контур ПП;
- ширину проводников;
- величину зазоров, размеры и расположение контактных площадок, диаметры переходных отверстий (ПО);
- экранные слои, маркировку;
- создавать и размещать в библиотеках компонентов новые посадочные места и корпуса²² электрорадиоэлементов, а также редактировать существующие;
- размещать ЭРЭ на монтажно-коммутационном поле в диалоговом режиме;
- выполнять ручную, полуавтоматическую и автоматическую трассировку проводников с помощью вызываемого из меню модуля автотрассировщика ***P-CAD Autorouters***;
- осуществлять контроль за соблюдением технологических норм и правил;
- формировать управляющие файлы для технологического оборудования.

Если ***P-CAD PCB*** вызывается из редактора ***P-CAD Schematic***, то выполняется ***упаковка схемы на печатную плату*** – автоматически составляется список соединений схемы, и на поле ПП переносятся изображения корпусов компонентов с указанием линий электрических соединений между их выводами.

Модуль ***P-CAD Autorouters*** [20 - 26, 39, 40] включает два автотрассировщика:

1. Трассировщик *лабиринтного типа* ***Quick Route*** предназначен для проектирования рисунка ПП не очень сложных электрических схем.
2. Бессеточный трассировщик ***Shape Based Router***²³ предназначен для проектирования многослойных ПП с высокой плотностью расположения ЭРЭ

²¹ ***PCB (Printed Circuit Board)*** – печатная плата схемы.

²² ***Корпус (Part)*** - файл (**.pat*) конструктива компонента, содержащий информацию о корпусе компонента, расположении и типе выводов и т.п.

²³ В ***P-CAD 2004*** бессеточный трассировщик ***Shape Based Router*** заменен на более мощный также бессеточный трассировщик ***Situs*** [22], предназначенный для трассировки сложных топологий с высокоплотной компоновкой при использовании современной элементной базы с большим числом выводов и малым расстоянием между ними.

и числом сигнальных слоев до 32. Он особенно эффективен при поверхностном монтаже корпусов элементов, выполненных в различных системах координат. Имеется возможность размещения проводников под различными углами на разных слоях платы, оптимизации их длины и числа переходных отверстий.

Из программы *P-CAD PCB* или автономно из среды *Windows* может быть осуществлен вызов *SPECCTRA* [20 - 22] – программы ручного, полуавтоматического и автоматического размещения ЭРЭ и трассировки проводников для ПП большой сложности с числом слоев до 256, разработанной фирмой *Cadence*.

В программе *SPECCTRA* используется, так называемая, бессеточная *Shape-Based* – технология трассировки, позволяющая повысить эффективность трассировки ПП высокой степени сложности с высокой плотностью размещения ЭРЭ, а также обеспечивающая трассировку одной и той же цепи трассами различной ширины. Программа *SPECCTRA* имеет модуль *AutoPlace*, предназначенный для автоматического размещения компонентов на ПП. Информация о ПП в *SPECCTRA* передается через редактор *PCB*.

P-CAD Library Executive – *диспетчер (администратор) библиотек* [20 -26, 28, 29], обладающий расширенными возможностями по ведению и контролю интегрированных библиотек ЭРЭ. Программа имеет средства просмотра библиотечных файлов, поиска компонентов, символов и корпусов компонентов по всем возможным атрибутам. Имеются мастера создания символов и корпусов компонентов по всевозможным атрибутам. Располагает средствами поиска, импорта и экспорта атрибутов и проверки (верификации) библиотек и проектов.

Интегрированные библиотеки *P-CAD* содержат как графическую информацию о символах и корпусах ЭРЭ, так и текстовую информацию (число секций в корпусе ЭРЭ, номера и имена выводов, коды логической эквивалентности выводов, секций и т.д.). Предоставляется большой набор библиотек базовых компонентов (микросхем, транзисторов, диодов, резисторов, конденсаторов, соединителей и т.д.) и компонентов ведущих мировых производителей (*Intel*, *Texas Instr.*, *Motorola*, *Analog Devices*, *AMD* и др.).

В интегрированной библиотеке любому символу ЭРЭ могут быть сопоставлены *несколько вариантов посадочных мест*. Библиотеки легко пополняются с помощью графических редакторов, а упаковочная информация о цоколевке ЭРЭ, логической эквивалентности выводов и т.п. координируется администратором библиотек. Вся текстовая информация об упаковке ЭРЭ и их атрибутах заносится в две таблицы, удобные для просмотра и редактирования. Тем самым исключаются ошибки несогласованного ввода этой информации.

Программа *P-CAD Library Executive* имеет специализированные встроенные модули:

1. *P-CAD Symbol Editor* [20 - 26, 30, 31] – редактор для создания и редактирования символов элементов схем электрических принципиальных, имеющий средства проверки их правильности.

2. *Pattern*²⁴ *Editor* [20 - 26, 32, 33] – редактор для создания и редактирования посадочных мест и корпусов электрорадиоэлементов, имеющий средства проверки их правильности.

На основании данных ЧТЗ, а также после определения основных параметров печатной платы (класс точности, габаритные размеры, параметры монтажных отверстий, форма и размеры контактных площадок, размеры сигнальных цепей и т.п.) становится возможным осуществить настройку САПР печатных плат *P-CAD*. При настройке *P-CAD* следует выделить следующие основополагающие параметры и проектные процедуры:

1. Размеры печатной платы и размеры области доступной для трассировки.

2. Шаг координатной сетки.

3. Форма и размеры контактных площадок.

4. Размеры монтажных отверстий.

5. Количество слоев ПП.

6. Форма и размеры переходных отверстий (для ДПП и МПП).

7. Классы цепей (цепи питания, цепи «земли», сигнальные цепи и т.д.).

8. Ширина печатных проводников для различных классов цепей.

9. Допустимые зазоры для каждого слоя ПП: проводник - проводник, проводник - контактная площадка, контактная площадка - контактная площадка, проводник - переходное отверстие, переходное отверстие - контактная площадка, переходное отверстие - переходное отверстие.

10. Используемые алгоритмы трассировки (например, разрешить использовать трассировщику алгоритм разводки микросхем памяти, алгоритм разрыва ранее проложенных трасс, алгоритм одновременной разводки цепей различного класса, алгоритм сглаживания изгибов проводников и т.п.).

11. Возможность прокладки проводников под углом 45° (для насыщенных ПП это свойство рекомендуется исключать).

12. Барьеры для трассировки (например, области под планарными разъемами, области под некоторыми ЭРЭ, области ранее оттрассированных фрагментов схемы и т.п.).

13. Правила трассировки: индивидуальных цепей, цепей различного класса, цепей на определенном слое, отдельных слоев и т.д.

14. Стиль соединения проводников (например, разрешение или запрет на Т-образное соединение с ближайшим сегментом проводника или переходных отверстий).

15. Возможность автоматически генерировать контрольные точки для всех цепей или только для отдельно выделенных.

²⁴ *Pattern* - типовое посадочное место компонента.

Перечисленные выше параметры должны быть установлены разработчиком исходя из различных аспектов текущего проекта (используемой элементной базы, применяемой несущей конструкции, необходимости автоматизированного контроля ПП, применения унифицированных решений, параметров технологического оборудования и т.п.).

3.2 Размещение электрорадиоэлементов

Эта проектная процедура проводится в P-CAD в диалоговом режиме с учетом ограничений автоматизированной сборки печатных узлов, ремонтно-пригодности, электромагнитной совместимости, теплового и механического режимов работы и других требований.

В качественно спроектированной ПП должен быть достигнут минимум пересечений, а значит, и минимум переходных отверстий и достигнут минимум длины связей, что соответствует максимуму связей между соседними элементами.

Размещение навесных элементов проектируемого узла РЭС на печатной плате целесообразно выполнять в следующей последовательности:

1. Сначала размещают входные и выходные контактные площадки, определяют зоны установки разъемов и контактных площадок для контроля, а уже затем размещают ЭРЭ.

2. Размещение ЭРЭ проводят погруппно, от входа к выходу. Для этого схема электрическая принципиальная проектируемого РЭС разбивается на функционально связанные группы²⁵.

3. Составляется таблица соединений.

4. Производится размещение навесных элементов в каждой группе.

5. Группа элементов, имеющая наибольшее количество внешних связей, размещается вблизи разъема.

6. Группа элементов, имеющая наибольшее число связей с уже размещенной группой навесных элементов, размещается рядом и т.д.²⁶

7. При необходимости производится корректировка в размещении отдельных навесных элементов или допустимая замена адресов связей.

Размещают навесные элементы, как правило, параллельно поверхности платы, с одной стороны. Центры монтажных отверстий должны быть расположены в узлах координатной сетки и в каждом монтажном отверстии размещают один вывод.

²⁵ Группируют элементы одного каскада (особенно развязывающие и блокировочные конденсаторы и т.п.) вблизи активного прибора.

²⁶ Размещение функциональных групп отдельно друг от друга позволяет в ряде случаев значительно снизить паразитные связи и наводки без принятия дополнительных средств защиты (введения экранов, экранирующих проводников и т.д.).

Корпуса элементов целесообразно размещать на печатной плате так, чтобы осевые линии их корпусов (или осевые линии, соединяющие центры выводов) были параллельны сторонам печатной платы (рисунок 3.2, *а*, *б*), причем однотипные элементы целесообразно размещать параллельно друг другу. При таком подходе, в отличие от варианта (рисунок 3.2, *в*), достигается максимальная плотность размещения.

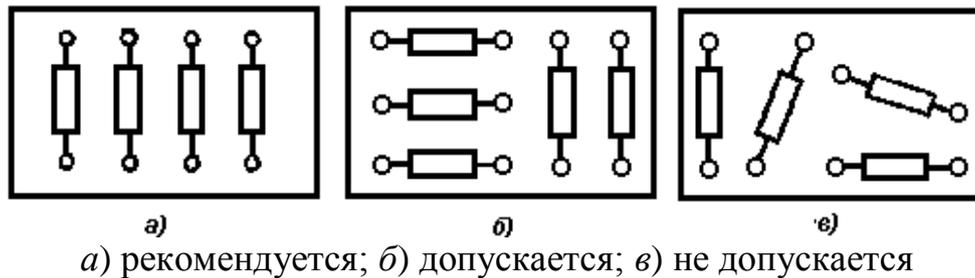


Рисунок 3.2 – Размещение и установка навесных элементов

Расстояние между осями выводов соседних ЭРЭ или осями выводов и корпусами соседних ЭРЭ должно быть не менее **2.5 мм**, минимальное расстояние между корпусами дискретных ЭРЭ **1 мм**, между корпусами дискретных ЭРЭ и микросхем – **2 мм** (рисунок 3.3).

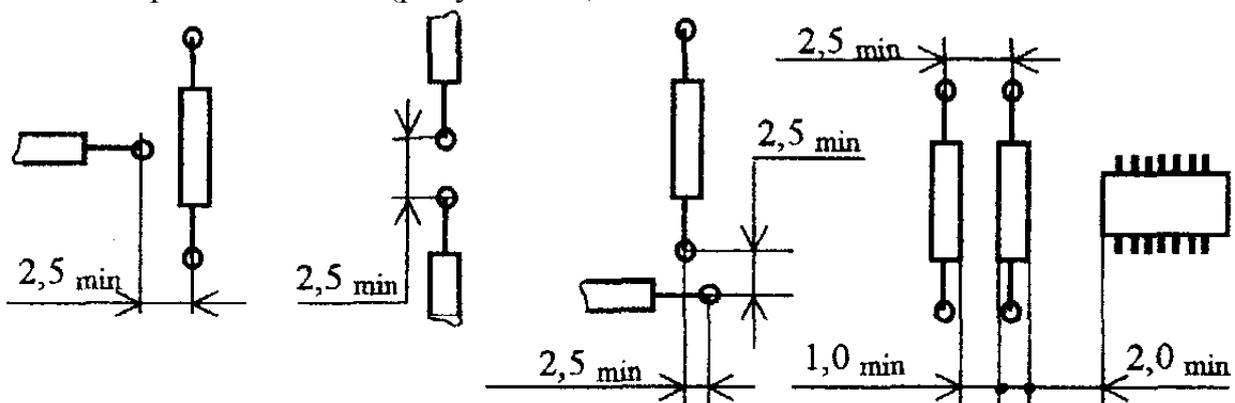


Рисунок 3.3 – Расположение ЭРЭ с учетом минимально допустимых расстояний

Для автоматической установки ЭРЭ на ПП следует оставлять зазор между корпусами не менее **1.5 мм** в одном из направлений. Зазор необходим также и для улучшенной ремонтпригодности. Поэтому варианты размещения ЭРЭ на ПП (рисунок 3.4) не рекомендуются.

Расположение электрорадиоэлементов относительно друг друга может влиять на технологичность ПП при автоматизированной установке ЭРЭ. На рисунке 3.5 приведена схема электрическая принципиальная мультивибратора, выполненная на дискретных компонентах.

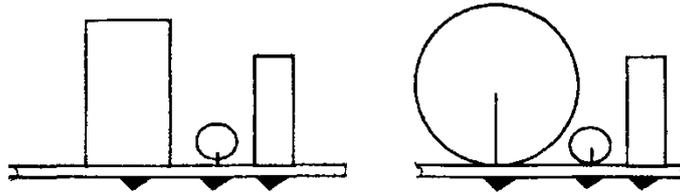


Рисунок 3.4 – Примеры неудачного расположения ЭРЭ на ПП

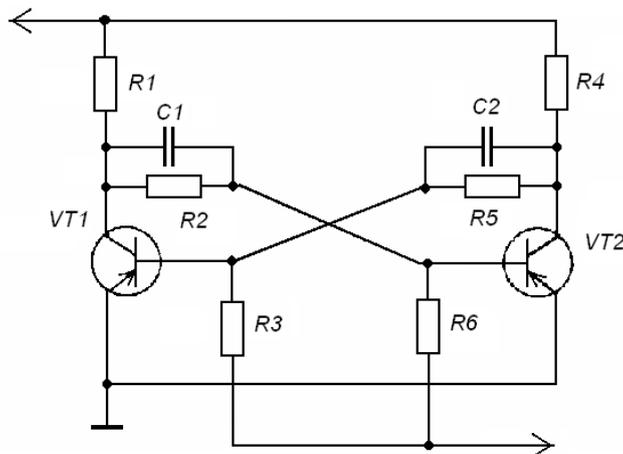
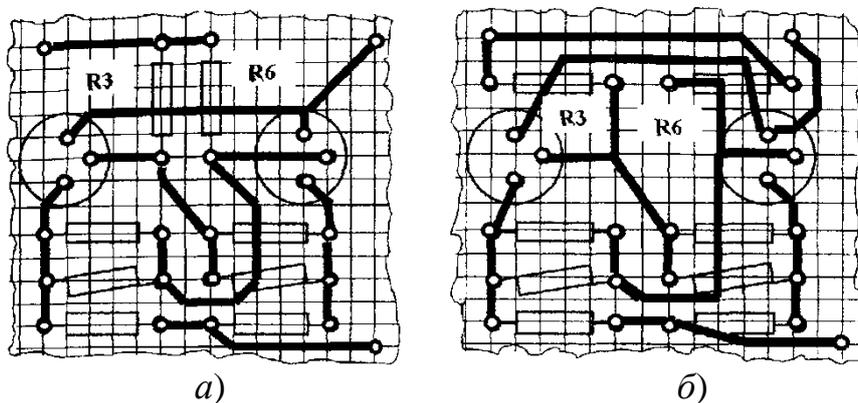


Рисунок 3.5 – Схема электрическая принципиальная мультивибратора

На рисунке 3.6 изображены два варианта топологии: первоначальный – рисунок 3.6, *а* и оптимизированный – рисунок 3.6, *б*. Эти варианты, с точки зрения правильности выполнения электрических соединений, величин паразитных связей, занимаемой площади, практически совпадают.



а) первоначальный вариант компоновки ЭРЭ;

б) оптимизированный по технологичности вариант

Рисунок 3.6 – Топология печатной платы мультивибратора
(компоненты расположены с обратной стороны)

В то же время, при операциях поворота ПП при автоматизированной установке возможны сбои при позиционировании. В этом случае оптимизированный вариант (рисунок 3.6, *б*) более технологичен, так как однотипные

элементы расположены параллельно друг другу, и в процессе автоматизированной установки печатная плата будет перемещаться только со сдвигом.

К элементам, устанавливаемым на плату, относят и **перемычки** (*Jumpers*). Они служат для соединения двух проводников одной цепи и применяются в случаях:

1. Упрощения топологического рисунка ПП.
2. Необходимости уменьшения количества проводящих слоев.
3. Для возможности отдельной настройки и регулировки отдельных ФУ.

В последнем случае они устанавливаются после завершения указанных операций. Перемычки располагают параллельно сторонам платы, аналогично другим ЭРЭ (рисунок 3.2, *a*), и их длина (до места сгиба) обязательно кратна шагу координатной сетки. По конструктивному исполнению перемычки могут быть двух типов: выполненные из медной проволоки (покрытие – лужение или серебрение) без изоляции и с полимерной изоляцией. Использование перемычек без изоляции предпочтительнее, но их применение ограничивается односторонними печатными платами. Диаметр перемычек, как правило, лежит в пределах 0.4...1.2 мм и определяется величиной протекающего тока. Количество типоразмеров перемычек обычно не более трех.

3.3 Создание топологического рисунка проводящих слоев

Прокладка проводников, аналогично размещению ЭРЭ, может проводиться как вручную, так и автоматизированно. Последний способ предпочтительнее, так как менее трудоемок. В [20 - 26, 37 - 40] приведены рекомендации по размещению и трассировке электрических цепей. При грамотной настройке программы-трассировщика и правильно выбранной стратегии разводки проводников удается развести 100 % проводников и практически не редактировать печатный рисунок.

Тем не менее, на этом этапе возможна коррекция габаритных размеров ПП, изменение класса точности и уточнение типа печатной платы.

Качество готового изделия, в частности печатной платы, во многом определяется выбранной технологией пайки ЭРЭ. Прогрессивный метод пайки –

пайка волной припоя – накладывает дополнительные ограничения на вид и расположение элементов печатного рисунка. Основные требования, обусловленные применением указанного технологического процесса, следующие:

1. Проводники должны быть расположены равномерно по плате и параллельно друг другу. Это позволяет избежать перегрева отдельных участков платы, так как теплоемкость и теплопроводность фольги и материала основания очень различаются.

2. Не должно быть более трех проводников, выходящих из одной контактной площадки под углом менее 45° . В противном случае возможно собирание капель припоя в указанных местах.

3. Дорожки должны иметь по возможности один размер и не превышать размер контактной площадки.

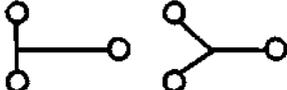
4. Не должно быть резких перегибов проводников во избежание собирания припоя в капли в таких местах.

5. Не должно быть контактных площадок избыточной площади (более 8 мм^2). Несоблюдение этого правила может привести к перегреву и отслоению проводящей фольги от основания и растеканию припоя по контактной площадке с образованием соединения с малой механической прочностью.

6. Необходимо избегать пересечения одной дорожкой другой, если их толщины отличаются более чем в два раза.

Конструктивная реализация некоторых рекомендаций по прокладке проводников представлена в таблице 3.1.

Таблица 3.1 – Топология некоторых вариантов соединений проводников

	Рекомендуется	Не рекомендуется
<i>a</i>		
<i>б</i>		
<i>в</i>		
<i>г</i>		

Особо следует остановиться на Т-образных соединениях проводников (таблица 3.1, *a*, *г*). Как правило, такая реализация соединений приводит к уменьшению суммарной длины проводников и исключению острого угла между проводниками, выходящими из одной контактной площадки. Однако этот вариант не обеспечивает параллельности дорожек с направлением волны припоя при пайке волной припоя. Поэтому в современных пакетах САПР ПП при настройке программ-трассировщиков можно разрешить или запретить формирование Т-соединений при автоматизированной разводке. Как правило, такое соединение может «безболезненно» применяться для двухсторонних ПП.

3.4 Разработка маркировки

На данном этапе выбирается количество, вид и содержание маркировки, метод ее нанесения, применяемые материалы исходя из назначения печатного узла, серийности его производства и условий эксплуатации.

Правильные эксплуатация и ремонт печатных плат и печатных узлов невозможны без применения маркировочных знаков. Маркировка передает различную информацию: наименование изделия, дату изготовления, данные, необходимые для монтажа ЭРЭ и др. В отдельную группу можно выделить знаки, удостоверяющие качество – клеймо, которое является разновидностью маркировки.

В соответствии с ГОСТ 2.314-68 «Правила нанесения на чертежи указаний о маркировании и клеймении», **маркированием** принято называть процесс нанесения на изделие, его части, упаковку и т.д. знаков, характеризующих это изделие. Соответственно **маркировка** – это совокупность знаков (текстовая информация, пиктограммы, товарные знаки – логотипы и наименования фирм-производителей и т.п.), необходимых для характеристики данного изделия. К маркировке относятся обозначение и шифр изделия, обозначение конструкторского документа, дата изготовления и др. Маркировку можно рассматривать как отдельный элемент конструкции.

Разновидностью маркирования является **клеймение** – процесс нанесения на изделие знаков, удостоверяющих качество этого изделия. **Клеймо** – это знак, удостоверяющий качество изделия (клеймо ОТК, клеймо заказчика и др.).

Маркировочные надписи должны легко восприниматься, нести максимум информации и быть лаконичными. Кроме того, маркировка должна различаться на обычном для наблюдения расстоянии, а ее изготовление быть технологичным. Немаловажными являются требования к высокой стойкости маркировки при изготовлении и эксплуатации изделия и неизменности внешнего вида в течение требуемого времени.

Маркировочные надписи, как правило, не стандартизированы, и на практике применяют множество вариантов цифровых, буквенных, символических обозначений и их комбинаций, производимых различными по габаритам, форме и цвету знаками.

Основными способами нанесения информации на печатные платы и узлы являются:

- **травление** (одновременно с нанесением проводников);
- **краской** (вручную, через трафарет или штемпелеванием);
- **клеевые этикетки** (бумажные или тканевые).

К достоинствам получения маркировки травлением можно отнести долговечность, отсутствие дополнительных затрат на материалы и достаточно высокую разрешающую способность (не меньшую, чем у элементов печатного рисунка), поскольку данная информация наносится на фотошаблон, сеточный трафарет и т.д. одновременно с формированием рисунка проводников. К сожалению, данная маркировка является токопроводящей и отбирает место у элементов печатного монтажа. Цвет маркировочных знаков, полученных травлением, может быть либо красноватым (цвет медной фольги), либо, в зависимости от типа покрытия – от серебристо-блестящего до серого. Кон-

трастность такой маркировки зависит также от цвета материала основания ПП.

Травлением обычно наносят:

- обозначения ПП или ПУ по основному конструкторскому документу;
- шифр платы;
- иногда и нумерацию выходных контактных площадок или знаки полярности.

Большая часть маркировки на ПП наносится краской. Ручные способы нанесения применяются редко (обычно для единичного производства) из-за высокой стоимости и неэкологичности производства. Краской можно наносить маркировку любого назначения и содержания. Основным недостатком маркирования краской является недостаточная стойкость к истиранию или возможность повреждения внешними механическими воздействиями при монтаже или ремонте.

Трафаретная печать является основным способом в массовом производстве и применяется при нанесении маркировки и паяльной маски. *Точность нанесения* – примерно $\pm 0.015'$ (0.38 мм).

Штемпелеванием обычно наносятся знаки приемки (клейма) как после контроля отдельных технологических операций, так и при окончательной приемке.

В процессе производства электронные печатные платы подвергаются высокотемпературным и химическим воздействиям. В некоторых случаях температура процессов при пайке может превышать 250 °С, а для очистки печатных плат после пайки используются агрессивные химикаты. Следовательно, маркировка должна выполняться на материалах, стойких к высокотемпературным воздействиям: полиамида (до 380 °С), полиэфирамида (до 250 °С) и полиэстра (до 200 °С).

Из навесных маркировок возможно применение технологических бирок и надеваемых на выводы полупроводниковых приборов, как правило, транзисторов, разноцветных изоляционных трубок – кембриков.

Последние служат для электрической изоляции и цветовой маркировки, которая выбирается следующим образом для эмиттера – черным цветом, для коллектора – желтый, и для базы – белый.

Таким образом, маркирование печатного узла может выполняться всевозможными способами.

Так, **обозначение шифра печатной платы** целесообразно выполнять *травлением*, поскольку наносимая информация является постоянной и должна быть сохранена в течение всего срока службы (для ремонта, заказа и т.д.). Как и все проводники, эта информация должна быть покрыта защитным слоем.

Обозначение ПУ, типа устройства, порядковый (серийный) номер могут изменяться. В частности, в разных печатных узлах, отличающихся количеством устанавливаемых ЭРЭ, перемычек и т.п., могут использоваться одинаковые ПП (например, в материнских платах компьютеров). От этого может

меняться тип устройства, серийный номер и т.д. Поэтому такую маркировку наносят краской, а для увеличения долговечности ее покрывают защитным слоем.

Для правильного монтажа компонентов, удобства ремонта и эксплуатации наносятся следующие маркировочные знаки:

- маркировка позиционных обозначений навесных электрорадиоэлементов в соответствии со схемой электрической принципиальной;
- знаки полярности («+» – обычно для диодов, электролитических конденсаторов; «+», «-», «~» и др. – для выходных контактных площадок);
- функциональное назначение ЭРЭ (например, разъемов) (NO PAPER – нет бумаги, TRANSPORT – отправка и т.д.);
- обозначения выводов многовыводных компонентов (например, разъемов), а также нумерация выходных контактных площадок;
- места установки ЭРЭ.

Маркировка знаков полярности и нумерации выводов многовыводных компонентов необходима в первую очередь для однозначности установки ЭРЭ на ПП. Для этой же цели может служить различная форма маркировочных знаков, обозначающая места установки электронных компонентов.

Маркировочные краски применяют двух цветов: черная и белая. Белая краска обеспечивает лучшую контрастность на стеклотекстолите и гетинаксе, и потому используется наиболее часто. Кроме того, зрительно воспринимаемая ширина белых линий больше, чем черных, что повышает распознаваемость маркированного элемента.

Размеры и тип шрифта маркировочных знаков выбираются исходя из минимизации расхода материала и удобства чтения. Обычно высота шрифта составляет **2...3.5** мм, шрифт прямой, обеспечивающий наибольшую различимость знаков.

Маркировка является местом возможного скопления пыли и грязи и, соответственно, уменьшения пробойного напряжения или утечки тока. Следовательно, при ее нанесении со стороны печатных проводников без применения защитных масок пересечение маркировочным знаком более одного проводника нежелательно, а для изделий спецтехники – недопустимо.

Наиболее часто для маркирования печатных плат при ручном или трафаретном маркировании с небольшим разрешением применяются маркировочные эпоксидные краски **МКЭБ** (маркировочная краска эпоксидная белая) и **МКЭЧ** (маркировочная краска эпоксидная черная).

При маркировке сеткографией применяются специальные кислото-щелочестойкие краски марок Ст. Например, Ст **3.191-01**, черная ТУ 29-02-1126-86.

3.5 Разработка и оформление конструкторской документации

Содержание и объем графического материала согласовывается с преподавателем-руководителем курсового проекта. Все графические документы проекта должны быть разработаны с помощью САПР *SolidWorks* [17, 18], отечественной САПР *КОМПАС* [19], САПР *P-CAD* [20 - 40].

Чертежи схем электрических принципиальных ПП (вместе со служебной информацией) должны быть разработаны в соответствии с ГОСТ 2.303-68, ГОСТ 2.743-91, ГОСТ 2.759-82 и более поздних нормативных документов.

Графические обозначения элементов и соединяющие их линии связи следует располагать на схеме таким образом, чтобы обеспечивать наилучшее представление о структуре изделия и взаимодействии его составных частей

Линии на схемах всех типов выполняются в соответствии с ГОСТ 2.303-68. **Толщина линии** выбирается в пределах от **0.2** до **1** мм и выдерживается постоянной во всем комплекте схем на изделие. Как условные графические обозначения, так и линии соединений выполняются линиями **одинаковой толщины**. Как правило, утолщенными линиями изображают **общие шины** (жгуты). Тип линии зависит от изображаемого объекта. Допускается выделять утолщенной линией отдельные электрические цепи, например силовые.

При выполнении схемы устанавливается просвет между соседними линиями УГО не менее 1 мм, между отдельными УГО – не менее 2 мм, между соседними линиями связи (цепями) – не менее 3 мм. Линии соединений должны состоять из горизонтальных и вертикальных отрезков.

Номера действующих ГОСТов, определяющих правила выполнения схем, приведены в таблице 3.2.

При выполнении схем применяют условные графические обозначения (УГО), установленные в стандартах ЕСКД.

Оформление конструкторской документации ПП заключается в изготовлении чертежей слоев ПП с выводом на чертеж штампов и всех регламентированных ГОСТом сопроводительных надписей и пояснений, а также подготовке пакета необходимых для производства документов.

Чертеж печатной платы должен содержать основные проекции платы с печатными проводниками и отверстиями. Его выполняют в масштабе 2:1 или 4:1. На чертеже платы линиями типа выносных наносят координатную сетку в соответствие с выбранным масштабом. Координатную сетку наносят либо на все поле платы, либо рисками по периметру, либо фрагментарно в левом нижнем углу.

Размеры на чертеже печатной платы указывают одним из следующих способов:

- с помощью размерных и выносных линий;

- нанесением координатной сетки в прямоугольной или в полярной системе координат;
- комбинированным способом с помощью размерных и выносных линий и координатной сетки.

Таблица 3.2 – ГОСТы, определяющие правила выполнения схем

Номер ГОСТа	Название
ГОСТ 2.701-84	Схемы. Виды и типы. Общие требования к выполнению
ГОСТ 2.702-75	Правила выполнения электрических схем
ГОСТ 2.705-75	Правила выполнения электрических схем обмоток и изделий с обмотками
ГОСТ 2.708-81	Правила выполнения электрических схем цифровой вычислительной техники
ГОСТ 2.709-81	Система обозначения цепей в электрических схемах
ГОСТ 2.710-81	Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах

При задании размеров ПП нанесением координатной сетки линии нумеруются.

Печатные проводники шириной менее 2.5 мм изображают на чертеже одной линией, являющейся осью симметрии проводника. Проводники шириной более 2.5 мм можно изображать двумя линиями (расстояние между которыми штрихуется или зачерняется). При этом в технических требованиях чертежа *должна быть указана ширина проводника*.

Печатные проводники следует изображать на чертеже в виде отрезков линий, совпадающих с линиями координатной сетки или под углом, кратным 15°. Допускается выполнение проводников произвольной конфигурации, о чем делается запись в технических требованиях. Печатные проводники не должны иметь резких перегибов и острых углов. Обычно радиус закругления не менее 2 мм.

Печатные проводники следует выполнять одинаковой толщины на всем протяжении. В узких местах их сужают до минимально допустимой для данного класса ширины на возможно меньшей длине. Печатный проводник, проходящий между двумя близко расположенными контактными площадками (см. рисунок 3.7) или любыми отверстиями, следует располагать перпендикулярно линии, соединяющей их центры.

Во многих случаях для плат ограничивается только минимальная ширина проводника. Ее указывают отдельно для свободных и узких мест, как, например, показано в таблице 3.3.

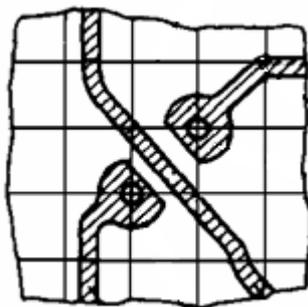


Рисунок 3.7 – Проведение печатного проводника между двумя близко расположенными площадками

Таблица 3.3 – Пример оформления на чертеже таблицы параметров элементов ПП

Параметры элементов платы	Размеры, мм, не менее	
	в свободных местах	в узких местах
Ширина проводников	0.8	0.3
Расстояние между двумя проводниками	0.8	0.4
Расстояние между двумя контактными площадками или проводником и контактной площадкой	0.8	0.3

Таблицу помещают в «Технические требования», которые размещают на поле чертежа.

При применении не очень качественных материалов и невысокой плотности монтажа для предупреждения отслаивания узких печатных проводников (0.3...0.4 мм) через 25...30 мм желательно располагать металлизированные отверстия или контактные площадки для увеличения прочности сцепления проводника с основанием.

Проводники шириной до 2 мм можно располагать с любой стороны ПП, а с большей шириной – желательно со стороны установки навесных элементов.

Заземляющие проводники следует выполнять максимально широкими. Но для уменьшения паразитных емкостей и возможного вспучивания фольги газами, выделяющимися из основания при нагреве во время пайки, их делают «сетчатыми» или снабжают различными вырезами.

Прокладка входных и выходных печатных проводников рядом или параллельно на разных сторонах платы не рекомендуется во избежание возникновения паразитных наводок.

Печатные проводники входных высокочастотных цепей и мощных выходных цепей прокладываются в первую очередь. Они должны быть разнесенными в пространстве и максимально короткими.

При проектировании ПП цифровых РЭС шины питания для снижения помех делаются максимально широкими; предусматривается равномерное

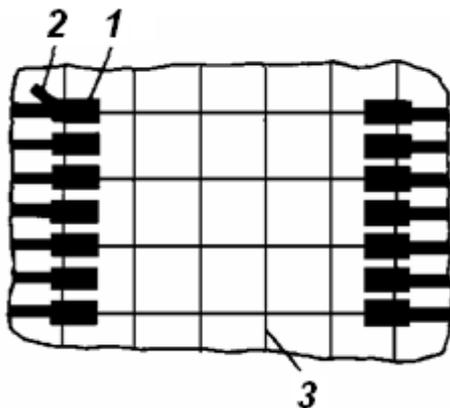
распределение конденсаторов в цепях питания ИС из расчета 0.01 мкФ на корпус (керамический, рядом с ИС) и 1...2 мкФ (электролитический) на 5...7 корпусов ИС.

Отдельные элементы рисунка печатной платы (широкие проводники, контактные площадки, экраны, изоляционные участки и т.п.) можно выделять штриховкой, чернением.

Круглые отверстия, имеющие зенковку, и круглые контактные площадки с круглыми отверстиями изображают одной окружностью.

Размер диаметров круглых контактных площадок указывают в технических требованиях.

Если у контактной площадки регламентируется только минимальная радиальная ширина b_{\min} , то такую площадку показывают окружностью, диаметр которой равен диаметру отверстий, а в технических требованиях указывают: «Форма контактных площадок произвольная, $b_{\min} = \dots$ ». Контактные площадки для припайки выводов планарных корпусов микросхем выполняют, как показано на рисунке 3.8.



1 – контактные площадки;

2 – ключ у площадки, к которой будет припаиваться вывод №1 микросхемы;

3 – линии координатной сетки

Рисунок 3.8 – Контактные площадки для пайки ЭРЭ с планарными выводами

При выполнении обозначения отверстий на ПП таким способом на поле чертежа ПП приводится таблица отверстий, в которой указывается:

- условное обозначение отверстий;
- диаметры отверстий, мм;
- диаметры зенковок с двух сторон, мм;
- наличие металлизации;
- размеры контактных площадок;
- количество отверстий.

Размеры, количество граф и форма таблицы ГОСТом не устанавливаются.

Параметры отверстий (диаметр, допуск на диаметр, зенковку и допуск на нее, наличие и отсутствие металлизации) непосредственно около каждого

отверстия не проставляют. Условные обозначения диаметра отверстий в платах выполняются на чертежах ПП в соответствии с ОСТ 27-72-694-834.

Участки платы, по которым не должны проходить печатные проводники, обводят штрихпунктирной линией и соответствующее указание делают в технических требованиях. Зенковку на отверстиях графически не показывают.

В технических требованиях, располагаемых на поле чертежа ПП, могут указываться особенности ее изготовления:

1. *Плату изготовить .. методом.*
2. *Плата должна соответствовать .. (ГОСТ, ОСТ, ТУ и т.д.).*
3. *Шаг координатной сетки, .. мм.*
4. *Конфигурацию проводников выдерживать по координатной сетке с отклонением от чертежа, .. (1.5; 1.0 или 0.5) мм.*
5. *Допускается скругление углов контактных площадок и проводников (радиус скругления, .. мм).*
6. *Места, обведенные штрихпунктирной линией, не занимать.*
7. *Ширина проводников в свободных местах .. мм, в узких .. мм.*
8. *Расстояние между двумя проводниками, между контактными площадками или между проводниками и контактными площадками: в свободных местах - .. мм, в узких местах - .. мм.*
9. *Форма контактных площадок – произвольная, максимальный размер, указать в мм.*
10. *Предельные отклонения между центрами отверстий .. мм.*
11. *Суммарная площадь металлизации платы .. .*
12. *Указания о гальваническом покрытии проводников печатной платы, например: «Печатный монтаж серебрить $Sr9$ », «Поверхности контактных площадок покрыть сплавом «Розе» чистым ТУ 6-09-6706-70» и т.п.*

Для поверхностей печатной платы, которые в процессе изготовления подвергаются механической обработке (контур платы, отверстия, пазы и т.п.), устанавливают норму на **шероховатость**.

Шероховатость ограничивают, нормируя максимально допустимое значение параметра шероховатости R_z (высота неровностей, вычисленная по десяти точкам профиля); обычно R_z не должна превышать 40 мкм (поверхности деталей, не соприкасающиеся с другими поверхностями и не используемые в качестве технологических баз).

Шероховатость поверхностей печатной платы на чертеже обозначают следующим образом:

- на линиях контура или выносных, относящихся к поверхностям платы, на которых находятся печатные проводники (или противоположные им для односторонних плат), ставят знак ∇ , означающий, что шероховатости этих поверхностей должны удовлетворять нормам, установленным на материал, из которого изготовлена плата;

- для всех поверхностей, подвергаемых механической обработке, обычно устанавливают одинаковые требования шероховатости поверхности. При этом в правом верхнем углу чертежа ставят знак \checkmark и пишут значение параметра шероховатости, например $Rz40 \checkmark$. После этого ставят знак (\checkmark), который означает, что норма $Rz < 40$ мкм относится ко всем поверхностям, кроме обозначенных знаком \checkmark . В рассмотренном нами примере в правом верхнем углу чертежа должно быть написано:

$Rz40 \checkmark (\checkmark)$.

В соответствующей графе основной надписи чертежа должна быть указана марка материала, из которого сделана печатная плата или изображенная на чертеже деталь ПП, а также номер ГОСТ или ТУ на этот материал.

ГОСТ 2.123-93 «Комплектность конструкторских документов на печатные платы (ПП) при автоматизированном проектировании» устанавливает комплектность КД на ОПП, ДПП и МПП, а также требования по их выполнению при автоматизированном проектировании и изготовлении.

Документы на носителях данных (магнитные носители данных, перфоленты и т.п.), включаемые в комплект конструкторских документов на ПП, предназначены для получения конструкторских документов в традиционной форме:

- для механической обработки;
- для контроля ПП;
- для изготовителя фотошаблона;
- для передачи информации о результатах проектирования в систему (подсистему) автоматизированного изготовления ПП.

В каждом конкретном случае состав конструкторских документов, передаваемых для изготовления ПП, определяется разработчиком совместно с изготовителем в соответствии с комплектностью, установленной ГОСТ 2.123.

Состав конструкторских документов на ПП, выполненных базовым способом, приведен в таблице 3.4.

Установленный ГОСТ 2.123-93 состав конструкторских документов может дополняться в зависимости от характера, назначения и конструктивно-технологического варианта изготовления, а также от технического оснащения автоматизированных систем проектирования и изготовления ПП. В состав комплекта конструкторских документов на ПП допускается включать программные документы, полученные в результате автоматизированного проектирования и необходимые для производства ПП. По согласованию с изготовителем и заказчиком допускается вместо таблиц, указанных в номенклатуре, включать в комплект КД на ПП программы автоматизированного контроля ПП.

Таблица 3.4 – Состав конструкторских документов на ПП

Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
-	Чертеж детали (заготовки)	Изображение ПП, материалы, габаритные размеры отверстий и т.д.	Выполняется на каждый типоразмер согласно ГОСТ 2.106-96	Может оформляться по правилам ГОСТ 2.109-73 для деталей, на которые не выпущены чертежи
			При оформлении чертежа детали базовым способом чертеж заготовки не выполняется	
-	Чертеж детали (прокладки)	Изображение прокладки, материал, габаритные размеры	Не выполняется	Может оформляться по правилам ГОСТ 2.106-96, ГОСТ 2.109-73 для деталей, на которые не выпущены чертежи
-	Базовый чертеж детали	Постоянные данные для всех исполнений типоразмера (изображение ПП, материал, габаритные размеры, размеры отверстий, шероховатость и другие требования)	Выполняется на каждый типоразмер для ОПП и ДПП	Выполняется на печатную плату как составную часть МПП
-	Чертеж исполнения детали	Переменные данные, относящиеся к конкретному исполнению (изображение ПП, отверстия и их размеры, технические требования, проводя-	Для ДПП выполняется на каждое исполнение проводящего слоя	Выполняется на каждое исполнение проводящего слоя печатной платы

Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОП и ДП	МП
		щий рисунок и т.д.)		

Продолжение таблицы 3.4

Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
СБ	Базовый сборочный чертеж	Постоянные данные, общие для всех исполнений типоразмера (изображение МПП, размеры, технические требования, постоянная часть проводящего рисунка, номера позиций)	Не выполняется	Выполняется на каждый типоразмер
СБ	Сборочный чертеж исполнения	Переменные данные, относящиеся к конкретному исполнению (упрощенное изображение МПП, отверстия, технические требования, проводящий рисунок)	То же	Выполняется на каждое исполнение
-	Базовая спецификация	По ГОСТ 2.113-73, ГОСТ 2.108-68, ГОСТ 2.417-85	Не выполняется	Выполняется на каждое исполнение
-	Спецификация исполнения	По ГОСТ 2.113-73, ГОСТ 2.108-68, ГОСТ 2.417-85	То же	То же
Д	Технические требования	Одинаковые технические требования для МПП	Выполняется согласно ГОСТ 2.417-85	
ТБ	Таблица проверки монтажа	Данные для контроля электрических соединений	Выполняется на каждое исполнение. При автоматизированном контроле печатных плат допускается таблицы не выполнять	

Окончание таблицы 3.4

Код док.	Наименование документа	Основное содержание документа	Указания по выполнению документа	
			ОПП и ДПП	МПП
ТБ	Таблица координат отверстий	Принятые условные обозначения отверстий, соответствующее количество отверстий, координаты расположения отверстий всех слоев ПП		
Т1М	Данные фотошаблона (1)	Информация о рисунке слоя ПП	Выполняется на каждый слой	
Т2М	Данные сверления (1)	Информация о координатах расположения диаметра и количества отверстий ПП	Выполняется на каждое исполнение с учетом конструктивно-технологических вариантов	
Т3М	Данные для обработки контура (1)	Информация о контуре ПП	Выполняется на каждый типоразмер	
Т4М	Данные контроля (1)	Информация о координатах контактов или контактных площадок, электрически соединенных между собой, слоя ПП	Выполняется на каждое исполнение или слой	
ВН	Ведомость документов на носителях данных	По ГОСТ 28388 и 1.3 данного стандарта	Выполняется на каждое исполнение. Допускается выполнять в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами	
По действующей НТД	Данные о результатах проектирования печатных плат		Выполняется на магнитном носителе данных в соответствии с ГОСТ 28388. Допускается выполнять в соответствии с отраслевыми нормативно-техническими документами	

Программы на носителях данных записывают в «Ведомость документов на носителях данных» (ВН). При выполнении трех и менее документов на носителях данных ВН можно не выпускать. При этом ВН записывают в спецификацию ПП в раздел «Документация» после документов, предусмотренных ГОСТ 2.102-68, в таком же порядке записывают в спецификацию ПП программы на носителях данных в случае, когда ВН выпускается. Программные документы и программы, выполненные на носителях данных, записывают в конце раздела «Комплекты» спецификации.

В состав постоянных данных, помещаемых на базовом чертеже, могут быть включены:

- изображение ПП;
- размеры и прочие указания для механической обработки;
- указания о материале;
- разметка для установки электрического соединителя;
- крепежные отверстия для установки ПП в сборочной единице;
- контрольные элементы (для контроля и проведения испытаний ПП);
- технические требования;
- проводящий рисунок;
- маркировка позиционных обозначений электрорадиоэлементов и конструкторский адрес;
- место обозначения ПП;
- место обозначения сборочной единицы;
- место порядкового номера изменения;
- номера позиции для МПП и т.д.

В состав переменных данных, помещаемых на чертеже исполнения, могут быть включены:

- упрощенное изображение ПП;
- проводящий рисунок ПП;
- маркировка позиционных обозначений электрорадиоэлементов и/или конструктивный адрес;
- обозначение ПП;
- обозначение сборочной единицы;
- порядковый номер изменения;
- таблица переходных и монтажных отверстий;
- технические требования;
- номера позиций для МПП и т.д.

При выполнении чертежа исполнения ПП автоматизированным способом на двух или более листах технические требования помещают *на первом листе*, проводящий рисунок может быть выполнен на последующих листах.

3.6 Указания по составлению и оформлению пояснительной записки

Расчетно-пояснительная записка должна быть выполнена на персональном компьютере на стандартных листах бумаги формата А4 и подшита в обложку с титульным листом по типовой форме.

В расчетно-пояснительной записке даются подробные исходные данные к проекту, и отражается выполнение всех пунктов задания на курсовое проектирование. При изложении и оформлении материала расчетно-пояснительной записки необходимо придерживаться основных требований и рекомендаций по выполнению курсовых и дипломных работ [41]. Обязательны ссылки на использованную литературу и разрабатываемые графические и текстовые документы.

Изложение расчетно-пояснительной записки должно быть выполнено грамотно, ясным техническим языком и кратко. Следует избегать сложных и длинных предложений.

В тексте записки не должно быть общих фраз, общих рекомендаций, распространяющихся на аппаратуру вообще. В записке следует строго придерживаться схемы обоснования конструкторских решений:

**частная задача ⇒ варианты ее решения ⇒ их анализ ⇒
⇒ обоснование выбранного оптимального варианта.**

Содержание и объем расчетного материала в каждом конкретном случае определяется преподавателем-руководителем курсового проектирования.

Рекомендуется следующее содержание расчетно-пояснительной записки:

Титульный лист.

Реферат.

Задание на курсовое проектирование.

Содержание.

Введение.

1. Расширенное частное техническое задание.

2. Анализ частного технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы.

3. Разработка конструкции РЭС.

4. Формирование личной библиотеки символов и корпусов электрорадиоэлементов, используемых в проектируемом устройстве.

5. Проектирование схемы электрической принципиальной ФУ в системе P-CAD.

Выводы и заключение.

Список использованной литературы.

Приложения.

В текстовую часть «Введения» рекомендуется включить следующие вопросы:

- задача курсового проекта по дисциплине «Информационные технологии проектирования РЭС»;
- цель данной конструкторской разработки;
- предполагаемые параметры устройства, определяющие его приоритет или преимущество перед аналогами, в том числе и зарубежными;
- соответствие проектируемого устройства нормативно-техническим документам;
- преимущества и целесообразность использования информационных технологий при проектировании РЭС.

Подробные указания по составлению разделов «**Расширенное техническое задание**» и «**Анализ технического задания, электрической схемы и оценка элементной базы**» предоставлены в разделе 2.

В раздел «**Разработка конструкции РЭС**» рекомендуется включить следующие вопросы.

1. Выбор варианта компоновки устройства.
2. Анализ базовых и типовых несущих конструкций, выбор оптимального унифицированного варианта или аргументированное обоснование оригинального конструкторского решения:
 - возможность размещения РЭС в стандартной (по ГОСТ), либо унифицированной в отрасли или на предприятии базовой несущей конструкции;
 - возможность применения унифицированных деталей для крепления печатных плат;
 - условия для снижения номенклатуры применяемых комплектующих изделий, материалов, крепежных деталей и технологических процессов.
3. Выбор типа электрического монтажа (способы реализации внутриблочных и межблочных электрических соединений).
4. Для печатного монтажа обосновывают и определяют:
 - число слоев ПП, метод и материал ее изготовления;
 - размер печатной платы и ее толщину из ограничительного ряда;
 - размеры печатных проводников, контактных площадок, монтажных отверстий;
 - способы установки навесных ЭРЭ и ИС на печатной плате;
 - способы крепления ЭРЭ и ИС.
5. Для навесного монтажа определяют:
 - марку, сечение жилы и вид изоляции монтажного провода;
 - способ соединения проводов между собой, проводов и выводов навесных элементов между собой;
 - способ крепления жгутов, кабелей и проводов к корпусу РЭС.
6. Выбор способов защиты устройства от дестабилизирующих факторов (механических, климатических и различных помех).
7. Выбор конструкторских решений, обеспечивающих удобство ремонта и эксплуатации устройства.
8. Обеспечение требований стандартизации, унификации и технологичности конструкции устройства.

9. Разработка элементов и узлов конструкции устройства (принятие основных технических решений):

- выбор базовых несущих конструкций и их элементов;
- выбор элементов крепления и фиксации (направляющих, штырей, ловителей и т.д.);
- выбор конструктивных элементов электрического монтажа;
- анализ типов электрических соединителей;
- выбор материала припоя и флюса.

10. **Описание выбранного варианта компоновки устройства должно содержать:**

- описание конструкции устройства с учетом дополнительных требований по защите РЭС от внешних воздействий, удобству ремонта и эксплуатации, доступности регулировочных элементов;
- чертеж выбранного варианта компоновки устройства. Чертеж должен быть выполнен как чертеж общего вида в соответствии с ЕСКД ГОСТ 2.118-73 с использованием САПР *SolidWorks* [17, 18].

11. **Выбор защитных и защитно-декоративных покрытий.** В этом разделе для каждой детали и узла следует выбрать конкретный вид покрытия. Для каждого вида покрытия дать основные характеристики. Например, для металлических покрытий определить металл покрытия, способ нанесения, толщину покрытия, число слоев и т.д.

12. **Выбор способов маркировки деталей и сборочных единиц.** Здесь должны быть определены способы маркировки деталей и сборочных единиц, нанесение надписей на лицевых панелях:

- элементов электрической схемы (резисторов, транзисторов, ИС, микросборок и т.д.);
- проводов, кабелей и других элементов;
- ячеек, функциональных узлов, плат и т.д.

В разделе «**Формирование личной библиотеки символов и корпусов электрорадиоэлементов, используемых в проектируемом устройстве**» необходимо организовать личную библиотеку используемых в проекте компонентов в соответствии с действующими нормативно-техническими документами.

В разделе «**Проектирование схемы электрической принципиальной ФУ в системе P-CAD**» рассматриваются особенности формирования схемы электрической принципиальной, получения списка цепей. Проводится контроль ошибок, составляется перечень элементов.

В разделе «**Проектирование ПП ФУ в системе P-CAD**»:

- создается конструктив ПП;
- производится диалоговое размещение электрорадиоэлементов и последующая оптимизация их установки с учетом заданных ограничений;
- осуществляется выбор программы трассировки и коррекция ее стратегии;
- выполняется автоматическая трассировка соединений;

- проводится анализ результатов трассировки ПП и ее оптимизация.

В разделе «**Выводы и заключение**» необходимо:

- подвести итог проделанной работы;
- провести оценку качества разработки (см. раздел 3.7);
- сделать заключение о полном (или частичном) выполнении пунктов технического задания;
- наметить основные пути дальнейшего совершенствования разработанной конструкции.

Раздел «**Перечень использованной литературы**» должен содержать перечень тех книг, журнальных статей, нормативно-технических документов, которые были использованы при работе над курсовым проектом. На указанные в перечне использованной литературы материалы должны быть сделаны ссылки по тексту пояснительной записки. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.1-84.

В раздел «**Приложения**» включаются графические документы проекта.

3.7 Оценка качества разработки

После выполнения топологического проектирования необходимо оценить качество разработки, что позволяет выявить неучтенные в процессе разработки факторы и оценить приемлемость предложенного варианта ПУ с точки зрения технологичности. Эту оценку следует включить в раздел «**Выводы и заключение**».

Комплексную оценку качества разработки ПП целесообразно провести по следующим показателям [3]:

- технологические характеристики;
- топологические характеристики и контролепригодность;
- механические и тепловые характеристики;
- электрические и эксплуатационные характеристики.

3.7.1 Анализ по технологическим характеристикам

Оценить технологичность печатной платы несложно, ответив на следующие вопросы:

1. Имеет ли плата прямоугольную форму?
2. Стандартизованы ли размеры сторон платы?
3. Не превышает ли соотношение сторон платы технологических ограничений?
4. Совместимы ли размеры платы с применяемым технологическим оборудованием?
5. Имеется ли возможность применения групповых методов сборки?

6. Имеется ли возможность применения групповых методов пайки?
7. Соблюдена ли идентичность установочных размеров однотипных ЭРЭ?
8. Установлены ли элементы параллельно краям платы, однотипные элементы – параллельно друг другу?
9. Указана ли в документации группа жесткости?
10. Применено ли покрытие для защиты проводников?
11. Применено ли покрытие для защиты печатного узла?

3.7.2 Анализ по топологическим характеристикам и контролепригодности

Правильность топологического проектирования достаточно полно характеризуется положительными ответами на следующие вопросы:

1. Отстоят ли проводники от края платы на необходимое расстояние?
2. Все ли проводники отстоят от мест крепления платы на требуемое расстояние?
3. Расположены ли проводники параллельно сторонам платы, а на противоположных сторонах – перпендикулярно друг другу?
4. Равномерно ли расположены проводники по площади платы?
5. Имеют ли проводники одинаковую ширину?
6. Имеются ли резкие перегибы проводников?
7. Выходят ли более трех проводников из одной контактной площадки под углом менее 15° ?
8. Сформированы ли вырезы в проводящем рисунке у широких проводников и в экранах?
9. Превышает ли диаметр контактной площадки ширину подходящего к ней проводника?
10. Сформированы ли контактные площадки в широких проводниках?
11. Сформированы ли контактные площадки для контроля печатной платы?
12. Равномерна ли плотность компоновки по площади платы?
13. Имеется ли на плате резервная зона для последующих изменений в размещении ЭРЭ при модификации схемы?
14. Обеспечен ли доступ к внутренним подстроечным элементам?
15. Имеется ли доступ к компонентам для их замены?
16. Обеспечен ли легкий доступ к подстроечным элементам, расположенным на плате после установки ее в прибор?
17. Имеется ли маркировка десятичной характеристики платы?
18. Имеется ли маркировка печатного узла?
19. Имеется ли маркировка номера платы?
20. Имеется ли маркировка наименования платы?

21. Имеется ли маркировка даты изготовления платы?
22. Имеется ли маркировка позиционных обозначений ЭРЭ?
23. Имеется ли маркировка выходных контактных площадок?
24. Имеется ли маркировка мест установки ЭРЭ?
25. Имеется ли маркировка ЭРЭ?
26. Обладает ли маркировка необходимыми характеристиками (легко-читаемость, однозначность, контрастность, долговечность и т.д.)?
27. Имеются ли на плате знаки, удостоверяющие качество?

3.7.3 Анализ по механическим и тепловым характеристикам

Микроминиатюризация радиоэлектронных средств и использование ее в широком диапазоне условий эксплуатации предполагает обязательный анализ по механическим и тепловым характеристикам. Ответы на следующие вопросы помогут устранить имеющиеся недоработки в проектируемой ПП.

1. Предусмотрено ли механическое крепление платы?
2. Предусмотрена ли установка платы по направляющим в разъемных вариантах компоновки блока?
3. Применены ли конструктивные способы облегчения сборно-разборных работ в разъемных вариантах компоновки блока?
4. Закреплены ли механически элементы большой массы или больших габаритов?
5. Применены ли фиксирующие прокладки или другие конструктивные элементы при вариантах установки ЭРЭ, предусматривающих зазор между платой и корпусом ЭРЭ?
6. Соблюдены ли условия рационального размещения термочувствительных элементов схемы относительно тепловыделяющих?
7. Соблюдены ли условия рационального размещения тепловыделяющих элементов схемы с учетом ориентации платы в блоке?
8. Применены ли дополнительные способы отвода тепла от тепловыделяющих элементов?

3.7.4 Анализ по электрическим и эксплуатационным характеристикам

Оценку качества по электрическим и эксплуатационным характеристикам можно сделать, ответив на следующие вопросы:

1. Соответствует ли материал основания частотному диапазону и рабочим напряжениям?
2. Оптимальны ли пути прохождения сигналов?
3. Разделена ли система заземления?

4. Исключены ли или уменьшены паразитные связи?
5. Устранено ли влияние опасных воздействий, способных вызвать ухудшение изоляции или коррозию проводников?
6. Применены ли конструктивно-технологические способы, исключающие касание корпусов ЭРЭ между собой?
7. Предусмотрены ли конструктивные способы, обеспечивающие многократную замену ЭРЭ?
8. Являются ли все детали и узлы доступными в визуальном и физическом отношении для монтажа, демонтажа и обслуживания?
9. Доступны ли все органы регулировки, когда устройство установлено в рабочем положении?
10. Установлены ли детали непосредственно на плате или они расположены друг над другом?
11. Требуются ли электромонтажные работы при демонтаже платы?
12. Смонтированы ли элементы так, что при замене одного из них не требуется снятие другого?
13. Имеются ли контактные площадки для пайки внешних проводников, расположенные не по контуру платы?
14. Соблюдена ли однозначность установки ЭРЭ на плату?
15. Имеется ли доступ ко всем контрольным точкам, когда блок установлен соответствующим образом?
16. Имеется ли возможность подключения к цифровым интегральным схемам адаптера или логического тестера?
17. Предусмотрена ли возможность подключения к печатному узлу контрольно-измерительной аппаратуры?

4 ПРИМЕР ТОПОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОГО УЗЛА УСИЛИТЕЛЯ

4.1 Частное техническое задание

Основанием для проектирования служит частное техническое задание на разработку ПУ усилителя. При этом исходными данными являются:

1. Схема электрическая принципиальная усилителя (рисунок 4.1), перечень элементов (таблица 4.1).

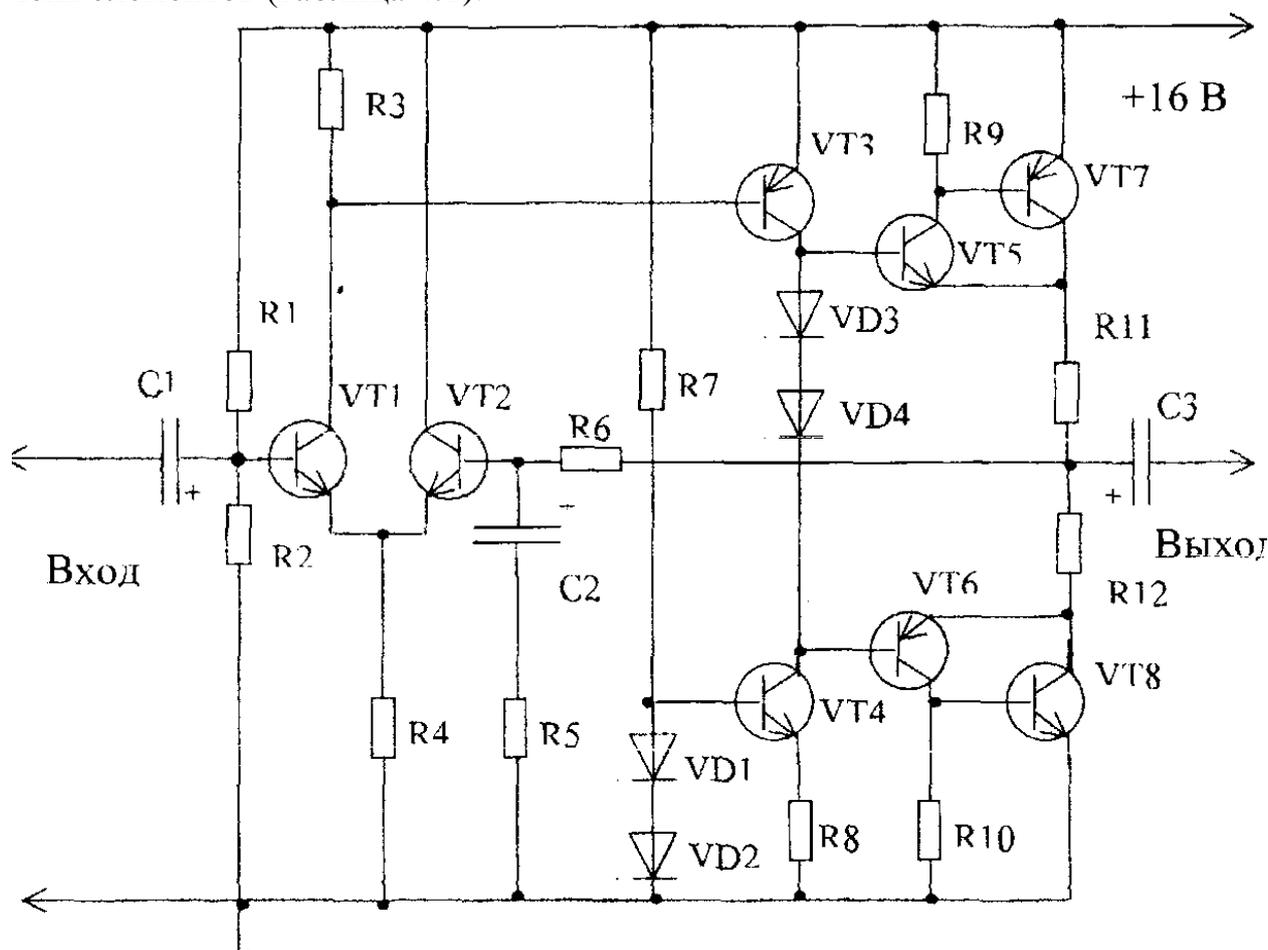


Рисунок 4.1 – Схема электрическая принципиальная усилителя

Таблица 4.1 – Перечень электрорадиоэлементов

Поз. обозначение	Наименование	Кол., шт.
	Конденсаторы	
<i>C1</i>	К50-16-10мкФ-16В	1
<i>C2</i>	К50-16-50мкФ-16В	1
<i>C3</i>	К50-16-2000мкФ-16В	1

Окончание таблицы 4.1

Поз. обозначение	Наименование	Кол., шт.
Резисторы		
<i>R1</i>	МЛТ-0.125-47 кОм±5%	1
<i>R2</i>	МЛТ-0.125-51 кОм±5%	1
<i>R3</i>	МЛТ-0.125-8.2 кОм±5%	1
<i>R4</i>	МЛТ-0.125-2.2 кОм±5%	1
<i>R5</i>	МЛТ-0.125-1 кОм±5%	1
<i>R6</i>	МЛТ-0.125-10 кОм±5%	1
<i>R7</i>	МЛТ-0.125-5,6 кОм±5%	1
<i>R8</i>	МЛТ-0.125-330 Ом±5%	1
<i>R9, R10</i>	МЛТ-0.125-100 Ом±5%	2
<i>R11, R12</i>	0.1 Ом±5%	2
Диоды		
<i>VD1-VD4</i>	КД522А	4
Транзисторы		
<i>VT1</i>	КТ3102А	1
<i>VT2</i>	КТ342Б	1
<i>VT3</i>	КТ361Д	1
<i>VT4</i>	К1608А	1
<i>VT5</i>	КТ815А	1
<i>VT6</i>	КТ814А	1
<i>VT7</i>	КТ816А	1
<i>VT8</i>	КТ817А	1

2. Усилитель низкочастотный и относится к бытовой аппаратуре.

3. Условия эксплуатации – 1 группа по ГОСТ 11478-88.

4. Печатный узел функционирует в составе блока. Температура воздуха внутри блока составляет +54 °С (естественная конвекция), а температура стенок блока оставляет +49 °С.

5. Усилитель должен быть реализован на одной печатной плате. Габаритные размеры – не более 60×100 мм. Тип основания – жесткий.

6. Крепление печатной платы – винтовое (М2).

7. Расположение платы: в рабочем положении – горизонтальное.

8. Подключение внешних цепей – разъемное.

9. Габаритно-установочные размеры резисторов *R11, R12* – аналогичны резистору МЛТ-2.

10. Производство – серийное.

4.2 Анализ частного технического задания на проектирование печатного узла

4.2.1 Общие положения

Так как усилитель относится к бытовой аппаратуре, то все конструктивно-технологические решения принимаем исходя из минимизации стоимости готового изделия.

После проведения анализа ЧТЗ (см. подраздел 2.1) необходимо выбрать тип и технологию изготовления печатной платы (субтрактивная, аддитивная и т.д.) и способ нанесения защитной маски (фотохимический, офсетный и т.д.) для более корректного вычисления элементов печатного рисунка.

В соответствие с ГОСТ 23751-86 «Платы печатные. Основные параметры конструкции» выделены 5 классов точности (см. таблицу 2.5), устанавливающие все ограничения на элементы печатных плат, обусловленные существующими технологическими процессами.

Проектируемый усилитель не имеет в своем составе ИМС и характеризуется низкой плотностью монтажа, поэтому его следует отнести к 1-му классу точности (см. подраздел 2.4).

Для простейшей бытовой, дешевой и невосстанавливаемой аппаратуры целесообразно избрать моносхемный метод конструирования, при котором вся электрическая схема изделия располагается на одной печатной плате. Метод отличает повышенная плоскостность компоновки, малое количество крепежных деталей, отсутствие межплатных соединений.

Исходя из сказанного, выбираем субтрактивную технологию, основанную на травлении фольгированного диэлектрика. При необходимости металлизации отверстий может быть применен комбинированный позитивный метод изготовления ПП. Так как производство серийное, то метод нанесения защитной маски – сеточный.

Условия эксплуатации по 1 группе ГОСТ 11478-88 соответствуют следующим климатическим воздействиям окружающей среды категории исполнения УХЛ 4.2 по ГОСТ 15150-69:

- температура окружающей среды: нижняя – плюс 10 °С; верхняя – плюс 35 °С;
- относительная влажность 80 % при 25 °С;
- давление нормальное 64.0...106.7 кПа (630...800 мм рт. ст.).

В соответствие с таблицей 2.5 (см. подраздел 2.6) выбираем для ПП первую группу жесткости, характеризующуюся следующими воздействующими факторами:

- температура окружающей среды: –25 °С...+55 °С;
- относительная влажность 75% при 35 °С;
- давление нормальное 64.0...106.7 кПа (630...800 мм рт. ст.).

Поскольку транзисторы КТ816А (VT7) и КТ817А (VT8) без радиатора могут рассеять максимально 1 Вт [42, 43], а реально на них выделяется больше, то необходимо предусмотреть установку радиаторов.

Максимальное значение напряжений между элементами печатного рисунка не может превышать 16 В (напряжение питания).

Ток в выходной цепи (транзисторы VT7, VT8, резисторы R11, R12, конденсатор C3) определяем исходя из прикидочного расчета схемы. Амплитуда выходного напряжения составляет 8 В, нагрузка – 8 Ом, соответственно максимальный выходной ток равен 1 А. Токи в остальных цепях не превышают десятков миллиампер.

Проектируемый усилитель относится к низкочастотным РЭС.

Коэффициент усиления (отношение уровня выходного сигнала к уровню входного) не очень большой (порядка 160). На основании этого делаем вывод, что экранирование не обязательно, однако входные и выходные цепи желательно разнести на максимальное расстояние.

Следующим этапом определяем габаритно-установочные размеры ЭРЭ и выбираем варианты установки ЭРЭ (см. подразделы 2.9, 2.14) по ОСТ 4.010.030-81.

Выбор производим с учетом следующего. Так как сложность усилителя невелика, то ориентируемся на одностороннюю печатную плату. В этом случае навесные элементы устанавливаются на поверхность платы со стороны, противоположной стороне пайки, без дополнительной изоляции (см. подраздел 2.2).

Так как разрабатываемый усилитель относится к бытовой аппаратуре, где механические нагрузки невелики, то дополнительного механического крепления ЭРЭ (установка подставок, крепежных скоб, приклеивания) не требуется. В случае отсутствия в стандарте вариантов установки конкретных электрорадиоэлементов, вариант установки выбираем аналогичный однотипным по конструкции ЭРЭ.

Проанализируем элементную базу.

Резисторы типа МЛТ являются устаревшими, и в настоящее время промышленность их уже не выпускает. Эквивалентной заменой могут быть резисторы типа С1-4 с углеродным проводящим слоем, предназначенные для работы в цепях постоянного, переменного и импульсного тока. Вид этих резисторов представлен на рисунке 4.2, а размеры (в зависимости от допустимой рассеиваемой мощности) приведены в таблице 4.2.

Резисторы R1-R12 устанавливаем по варианту **Ia** (рисунок 4.3).

Значения конструктивных и установочных параметров для конкретных типоразмеров ЭРЭ заносим в сводную таблицу 4.4.

Вид применяемых алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов К50-16 с однонаправленными проволочными выводами приведен на рисунке 4.4 [45], а их размеры (в зависимости от емкости) приведены в таблице 4.3.

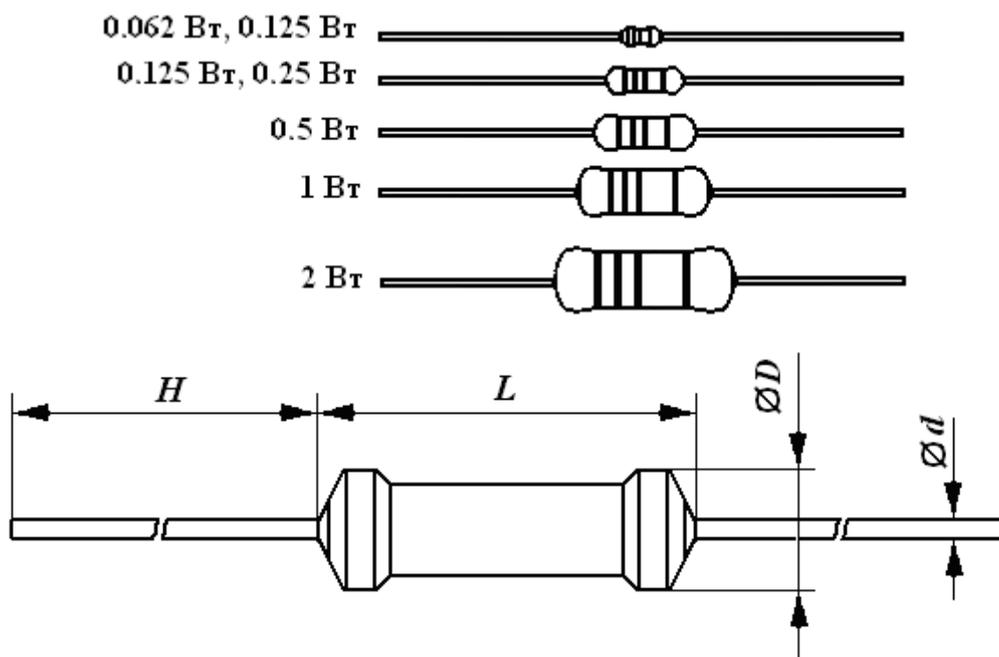


Рисунок 4.2 – Постоянные углеродные резисторы типа С1-4

Таблица 4.2 – Справочные размеры постоянных углеродных резисторов типа С1-4

Тип	Размеры, (мм)				Мах. рабочее напряжение, В
	L	D	H	d	
C1-4-0.62 Вт	3.2	1.5	28	0.48	200
C1-4-0.125 Вт mini	3.2	1.5	28	0.48	250
C1-4-0.125 Вт	6.0	2.3	28	0.60	250
C1-4-0.25 Вт mini	3.2	1.5	28	0.48	250
C1-4-0.25 Вт	6.0	2.3	28	0.60	250
C1-4-0.5 Вт	9.0	3.2	28	0.60	350
C1-4-1 Вт	11.0	4.5	35	0.80	500
C1-4-2 Вт	15.0	5.0	35	0.80	500

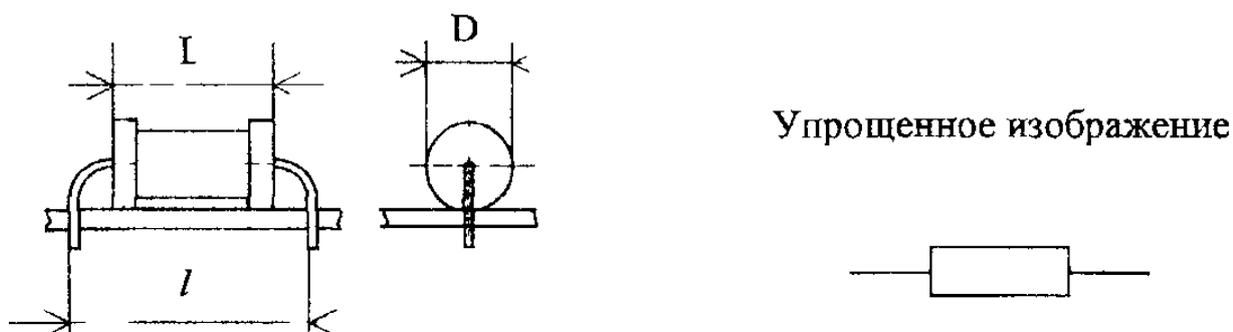


Рисунок 4.3 – Вариант установки резисторов

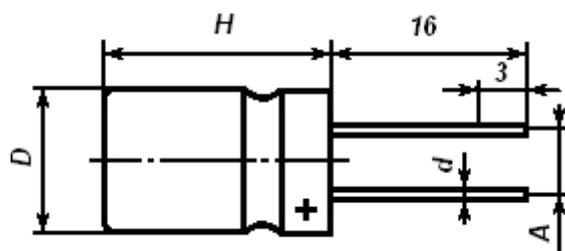


Рисунок 4.4 – Вид алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов К50-16

Таблица 4.3 – Справочные размеры применяемых алюминиевых оксидно-электролитических конденсаторов К50-16

Наименование	Номинальное напряжение, В	Номинальная емкость, мкФ	Размеры, мм				Масса, г, не более
			D	H	A	d	
К50-16-10мкФ-16В	16	10	6	13	2.5	0.5	0.8
К50-16-50мкФ-16В		50	7.5	15	2.5	0.5	1.7
К50-16-2000 мкФ-16В		2000	18	45	7.5	0.8	25

Конденсаторы $C1-C3$ (К50-16) устанавливаем по варианту **Пв** (рисунок 4.5).

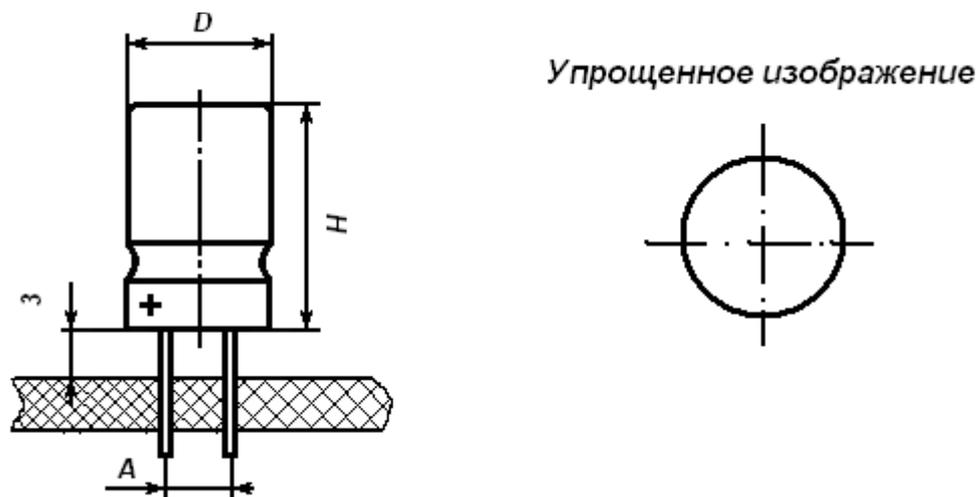


Рисунок 4.5 – Вариант установки конденсаторов К50-16

Диоды $VD1-VD4$ (КД 522) устанавливаем по варианту **Иа** (рисунок 4.6), там же приведены и их справочные размеры.

Справочные размеры транзисторов $VT1$ (КТ3102), $VT2$ (КТ342) приведены на рисунке 4.7. Устанавливаем их по варианту **Вб** (рисунок 4.8), но без электроизоляционных прокладок, так как считаем, что механические нагрузки невелики.

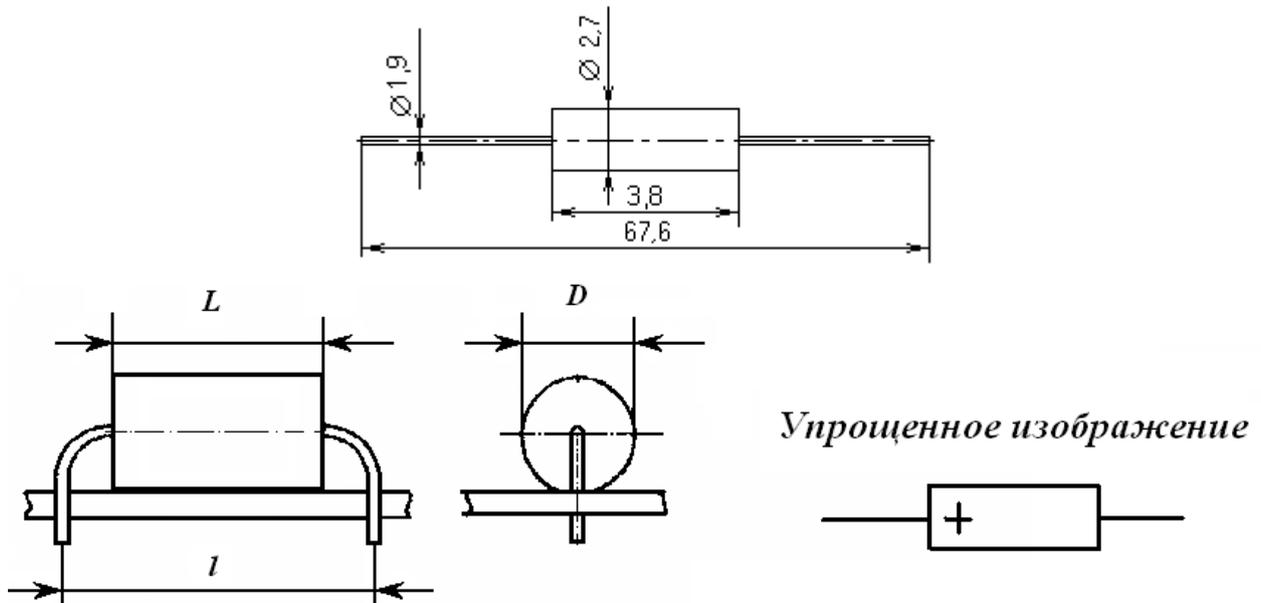


Рисунок 4.6 – Размеры и вариант установки диодов $VD1$ - $VD4$ (КД 522А)

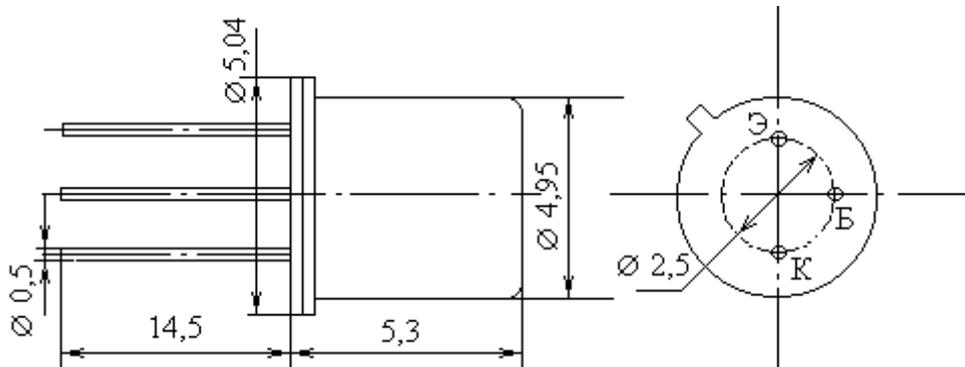


Рисунок 4.7 – Размеры транзисторов $КТ3102А$ и $КТ342Б$



Рисунок 4.8 – Вариант установки транзисторов $VT1$ ($КТ3102А$) и $VT2$ ($КТ342Б$)

Справочные размеры транзистора $VT3$ ($КТ361Б$) приведены на рисунке 4.9. Здесь же приведен и вариант его установки **Пв**.

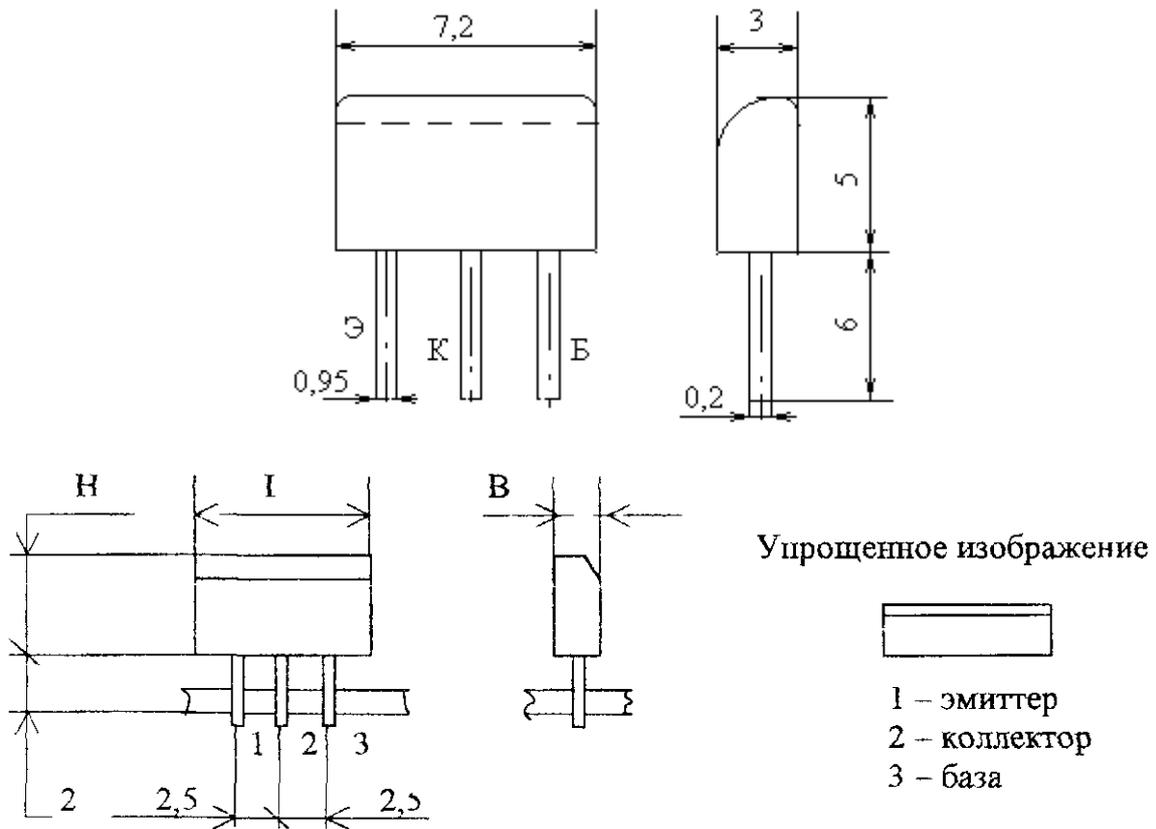


Рисунок 4.9 – Размеры и вариант установки транзистора VT3 (КТ361Д)

Справочные размеры транзистора VT4 (КТ608) приведены на рисунке 4.10. На этом же рисунке показан его вариант установки ВБ, но без электроизоляционной прокладки.

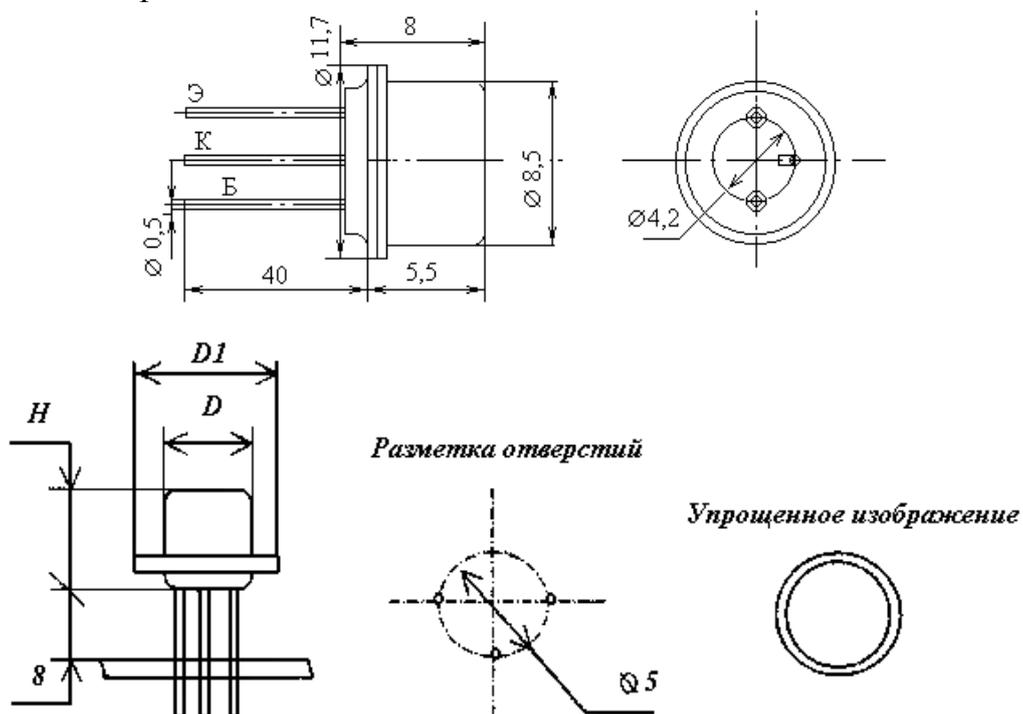


Рисунок 4.10 - Размеры и вариант установки транзистора VT4 (КТ608А)

На рисунке 4.11 приведены справочные размеры транзисторов КТ814, КТ815, КТ816 и КТ817, имеющие одинаковые корпуса.

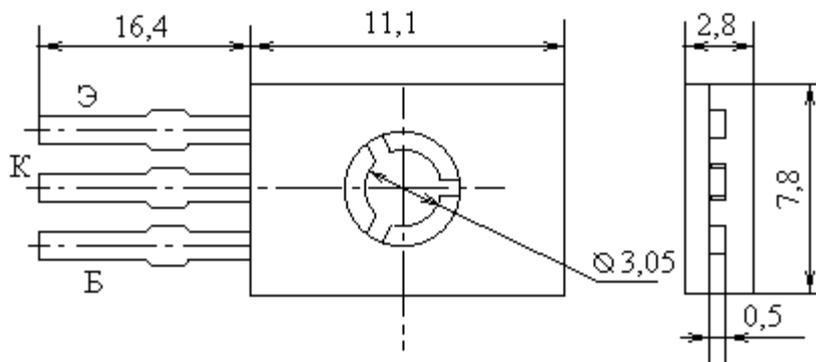


Рисунок 4.11 – Размеры транзисторов КТ814 - КТ817

Транзисторы VT5 (КТ815), VT6 (КТ814) устанавливаем по варианту **Пв** (рисунок 4.12).

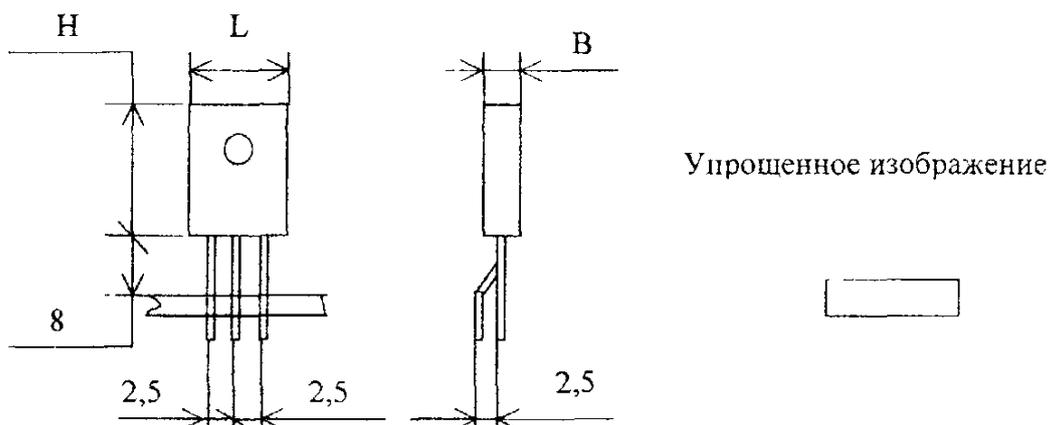


Рисунок 4.12 – Вариант установки транзисторов VT5, VT6

Транзисторы VT7 (КТ817), VT8 (КТ816) устанавливаем по варианту **Пв** (рисунок 4.13).

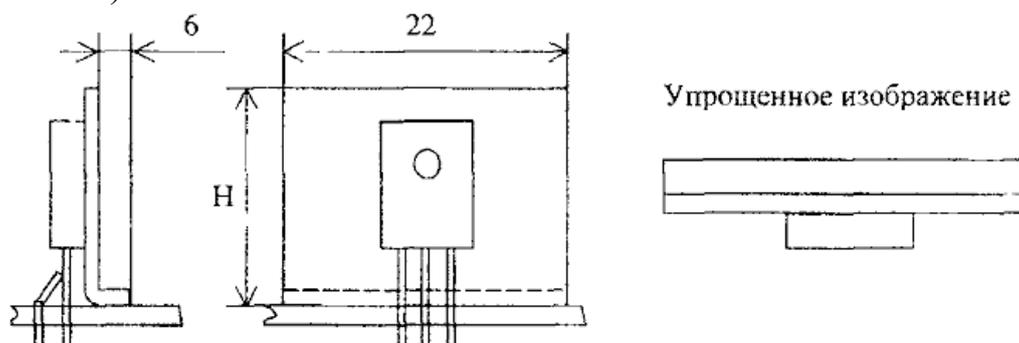


Рисунок 4.13 – Вариант установки транзисторов VT7, VT8

Поскольку было определено, что транзисторы VT7 и VT6 необходимо устанавливать на радиаторы, то выбираем радиатор в виде пластины шириной 22 мм. Площадь радиатора можно варьировать, изменяя его высоту.

Габаритные и установочные размеры электрорадиоэлементов (таблица 4.4) определены в ОСТ4.010.030-81.

Таблица 4.4 – Габаритно-установочные размеры ЭРЭ

Тип ЭРЭ, позиционное обозначение	Габаритные и установочные размеры, мм						Площадь, мм ² <i>S</i>
	<i>D</i>	<i>DI(L)</i>	<i>H</i>	<i>B</i>	<i>l</i>	<i>d</i>	
Конденсатор <i>C1</i> К50-16-10мкФ-16В	7.0	-	14.0	-	3.75	0.6	38.5
Конденсатор <i>C2</i> К50-16-50мкФ-16В	8.5	-	16.0	-	3.75	0.6	56.7
Конденсатор <i>C3</i> К50-16-2000мкФ-16В	19.0	-	46.0	-	8.75	0.9	283.4
Резисторы <i>R1-R10</i> С1-4-0.125	2.0	8.0	-	-	10.0	0.6	20.0 (200.0)
Резисторы <i>R11-R12</i> С1-4-2	8.6	16.5	-	-	22.5	1.1	193.5 (387.0)
Диоды <i>VD1-VD4</i> КД522А	1.9	3.8	-	-	12.5	0.59	23.8 (95.2)
Транзисторы <i>VT1</i> КТ3102А, <i>VT2</i> КТ 342Б	5.84	4.35	5.3			0.5	26.8 (53.6)
Транзистор <i>VT3</i> КТ361Д	-	7.2	5.0	3.0	-	0.8	21.6
Транзистор <i>VT4</i> КТ 608А	11.7	9.0	8.0	-	-	0.6	107.4
Транзисторы <i>VT5</i> КТ815А, <i>VT6</i> КТ814А, <i>VT7</i> КТ816А, <i>VT8</i> КТ817А	-	7.8	11.1	2.8		0.88	33.1 (132.4)
Радиатор	-	22	-	6	-	-	132 (264)

В соответствие с данными таблицы 4.4 суммарная площадь, занимаемая электрорадиоэлементами равна 1613 мм². Согласно выражению (2.2) (см. подраздел 2.11) определяем площадь монтажной зоны:

$$S_p = \frac{1613}{k_3},$$

где k_3 – коэффициент заполнения печатной платы.

Поскольку бытовые РЭС характеризуются относительно малым коэффициентом заполнения, его величину выбираем равной $k_3 = 0.7$. С учетом сказанного получаем:

$$S_p = 2304 \text{ мм}^2.$$

Выбираем геометрические размеры печатной платы, полагаем длину и ширину монтажной зоны одинаковой:

$$L = \sqrt{S_p} \approx 48 \text{ мм}.$$

Учитывая, что расстояние между краем печатной платы и центром крепежного отверстия должно составлять не менее 5 мм и ширина краевого поля для разъемных соединителей составляет как минимум 15 мм (см. таблицу 2.11), полная ширина краевого поля равна примерно 40 мм. В итоге получаем следующие размеры платы: длина – 88 мм, ширина – 48 мм. Приводим в соответствие со стандартным рядом (см. таблицу 2.12) в сторону увеличения, так как при расчетах не учитывалось наличие радиатора. Таким образом, ширина печатной платы – 50 мм, длина – 100 мм. После проведения топологического проектирования размеры платы могут быть скорректированы с учетом рекомендаций, изложенных в подразделе 2.11.

Материал основания ПП выбирается исходя из следующих соображений (см. подраздел 2.10). Поскольку усилитель является низкочастотным, рабочие напряжений электрического тока малы (не превышают 16 В), климатические внешние воздействия нежесткие, то в качестве материала основания можно выбрать как фольгированный гетинакс, так и стеклотекстолит (см. таблицы 2.9, 2.10). Учитывая меньшее коробление, лучшую обрабатываемость, возможность металлизации отверстий и широкое распространение, выбираем фольгированный стеклотекстолит марки СФ.

Согласно ЧТЗ основание ПП должно быть жестким. С другой стороны особых требований по механическим воздействиям не предъявляется. Учитывая небольшие габариты платы, выбираем толщину основания 1.0 мм.

Толщину фольги предварительно определяем 35 мкм. Если в результате энергетических расчетов ее будет не достаточно, то возможно увеличение до 50 мкм.

Поскольку аппаратура бытовая, выбираем класс точности 2, который характеризует простоту, надежность, малую стоимость ПП и пригодность к серийному производству (см. подраздел 2.4, таблицу 2.5). По таблице 2.6 определяем геометрические параметры элементов печатного рисунка для выбранного класса точности (таблица 4.5).

Шаг координатной сетки выбираем 1.25 мм, что позволит избежать специальной формовки выводов, так как расстояние между выводами конденсаторов кратно указанному размеру (см. таблицу 4.4).

Следующим этапом проводим расчет параметров элементов печатного рисунка (диаметров отверстий и контактных площадок, ширины печатных проводников, расстояний между печатными элементами) исходя из класса точности ПП и других ограничений. Допуски на диаметры отверстий выбира-

ем с учетом оплавления, так как для лучшей паяемости и защиты печатных проводников в условиях серийного производства обязательно наносится дополнительное покрытие (см. подраздел 2.12). При выборе диаметров отверстий учитываем возможность применения автоматизированной сборки, так как производство серийное.

Таблица 4.5 – Минимально допустимые геометрические параметры для второго класса точности

Параметр	Значение
Ширина проводника t , мм	0.45
Расстояние между проводниками S , мм	0.45
Ширина гарантийного пояса b , мм	0.20
Относительная толщина платы J , мм	0.40

Определяем наличие металлизации в отверстиях. Металлизацию наносят, как правило, на переходные отверстия. Монтажные отверстия для разрабатываемого усилителя можно не металлизировать, так как специальные требования по надежности и механическим воздействиям в ЧТЗ не предъявляются. Возможно применение металлизированных отверстий для монтажа транзисторов $VT8$, $VT9$, потому что выходные транзисторы в усилителях низкой частоты наиболее часто выходят из строя.

Минимальный диаметр d_{\min} металлизированного отверстия зависит от класса точности и толщины платы (см. подраздел 2.12.1):

$$d_{\min} = J \cdot H,$$

где J – относительная толщина ПП (выбирается по таблице 2.6); H – толщина платы с учетом фольги.

$$d_{\min} = 0.4 \cdot 1.07 = 0.43 \text{ мм.}$$

С учетом допуска $\Delta d = 0.1$ мм (см. таблицу 2.14) по формуле (2.5) диаметр переходного отверстия:

$$d_{\text{пер}} = J \cdot H + |\Delta d| = 0.43 + 0.1 = 0.53 \text{ мм.}$$

Диаметры монтажных отверстий $d_{\text{отв}}$ проектируются с учетом обязательного гарантированного зазора между диаметром вывода и диаметром монтажного отверстия (см. подраздел 2.12). Численные значения диаметров монтажных отверстий определяем по формуле (2.6):

$$d_{\text{монт}} = d_{\text{выв}} + |\Delta d| + r,$$

где $d_{\text{выв}}$ – диаметр (для прямоугольных выводов – размер по наибольшей стороне) вывода ЭРЭ (см. таблицу 4.4); $r = (0.1 \dots 0.4 \text{ мм})$ – гарантированный зазор между диаметром монтажного отверстия и выводом ЭРЭ.

Варьирование гарантированного зазора производим для уменьшения типоразмеров монтажных отверстий при условии осуществления автоматизированной сборки. Для транзисторов $VT1$, $VT2$ диаметр монтажного отверстия вычисляем по формуле (2.7), так как их диаметр вывода меньше рассчитанного диаметра металлизированного отверстия. Результаты вычислений округля-

ем до рекомендуемых значений (см. подраздел 2.12.4) и заносим в таблицу 4.6.

Таблица 4.6 – Значения диаметров отверстий и контактных площадок

ЭРЭ, позиционное обозначение	Диаметр, мм			Наличие металлизации
	вывода, $d_{\text{ВЫВ}}$	отверстия, $d_{\text{МОНТ}}$	КП, $d_{\text{КП}}$	
Конденсаторы $C1, C2$	0.6	0.9	3.0	Нет
Конденсатор $C3$	0.9	1.3	3.0	Нет
Резисторы $R1-R10$	0.6	0.9	3.0	Нет
Резисторы $R11-R12$	1.1	1.5	3.0	Нет
Диоды $VD1-VD4$	0.59	0.9	3.0	Нет
Транзисторы $VT1, VT2$	0.5	0.9	3.0	Нет
Транзистор $VT3$	0.8	1.3	3.0	Нет
Транзистор $VT4$	0.6	0.9	3.0	Нет
Транзисторы $VT5, VT6$	0.88	1.3	3.0	Нет
Транзисторы $VT7, VT8$	0.88	1.5	3.0	Есть
Переходное отверстие	-	0.9	3.0	Есть
Крепежные отверстия	M2	2.4	-	Нет

В соответствие с таблицей 2.15 (см. подраздел 2.12.3) для винтов M2 (с учетом выбранного допуска ± 0.2) диаметры крепежных отверстий равны 2.4 мм и диаметр резервной зоны для них составляет 7 мм.

Форму контактной площадки выбираем круглую, как наиболее распространенную для монтажа выводов в отверстие. Расчет проводим по методике приведенной в подразделе 2.12.6. Определяем минимальный эффективный диаметр контактной площадки по формуле:

$$D_{i.\text{эфф}} = 2 \left(b + \frac{d_{\text{МОНТ}}}{2} + T_d + T_D \right),$$

где $d_{\text{МОНТ}}$ – диаметр монтажного отверстия с учетом допуска и гарантированного зазора; b – ширина гарантийного пояса (см. таблицу 4.5); T_d и T_D – позиционные допуски расположения осей отверстий и центров контактных площадок (таблицы 2.16, 2.17), соответственно.

Для максимального монтажного отверстия ($d_{\text{МОНТ}} = 1.5$ мм, см. таблицу 4.6) эффективный диаметр контактной площадки (см. подраздел 2.12.6):

$$D_{i.\text{эфф}} = 2 \left(0.2 + \frac{1.5}{2} + 0.15 + 0.25 \right) = 2.7 \text{ мм}.$$

С учетом выбранных способов изготовления печатной платы и толщины фольги 35 мкм (для комбинированного позитивного метода толщину проводящего слоя увеличиваем на 20 мкм) вычисляем минимальный диаметр контактной площадки.

Для субтрактивной технологии по формуле (2.11):

$$D_{\min} = D_{i\text{эфф}} + 1.5H_{\text{пр}} = 2.75 \text{ мм.}$$

Для комбинированного позитивного метода по формуле (2.12):

$$D_{\min} = D_{i\text{эфф}} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.03 = 2.86 \text{ мм.}$$

Округляем полученное значение до 3 мм и вычисляем площади контактных площадок для минимального и максимального диаметров монтажных и переходных отверстий (0.9 и 1.5 мм, см. таблицу 4.6) с целью проверки возможности применения данного значения для всех монтажных и переходных отверстий. Для диаметра 0.9 мм площадь контактной площадки составляет 6.43 мм², а для диаметра 1.5 мм – 3.94 мм². Такие значения соответствуют требованиям, приведенным в подразделе 2.12.6. Кроме того, диаметр контактной площадки 3 мм рекомендован ОСТ 4.070.010-78 «Платы печатные под автоматическую установку элементов. Конструкция и основные размеры» для монтажных отверстий диаметром до 1.5 мм.

Расчет ширины печатных проводников проводится по методике, рассмотренной в подразделе 2.12.7. Исходя из выбранного класса точности (см. таблицу 4.5) ширина проводника $t_{d \min}$ равна 0.45 мм. С учетом подтравы проводящего слоя и выбранных технологий изготовления по выражениям (2.14) и (2.16) определяем эффективную ширину печатного проводника.

Для субтрактивной технологии:

$$t_{\min} = t_{d \min} + 1.5H_{\text{пр}} = 0.59 \text{ мм.}$$

Для комбинированного позитивного метода:

$$t_{\min} = t_{d \min} + 1.5H_{\text{пр}} + 0.08 = 0.67 \text{ мм.}$$

По рисунку 2.19 определяем, что нагрузочная способность по току при нагреве на 10 °С для проводника шириной 0.59 мм и толщиной 35 мкм составляет более 1 А, а для проводника шириной 0.67 мм и толщиной 50 мкм составляет более 2 А.

Плотность протекающего тока для проводников выходных цепей (ток равен 1 А) составляет 92 А/мм² и 74 А/мм², соответственно, для вычисленных выше параметров проводников. Эти значения ниже допустимых плотностей тока, указанных в таблице 2.19.

Проверяем проводники цепей питания на допустимое падение напряжения. В соответствии с рекомендациями (см. подраздел 2.12.7) оно не должно превышать 10 %. Расчет проводим для цепи с максимальным током 1 А. По таблице 2.19 определяем удельное сопротивление печатных проводников. Для проводника шириной 0.31 мм и толщиной 35 мкм (субтрактивный метод изготовления ПП) удельное сопротивление составляет примерно 1.62 Ом/м, а для проводника шириной 0.27 мм и толщиной 50 мкм (комбинированный позитивный способ) – 1.34 Ом/м. Длину проводников цепей питания выбираем равной 100 мм (максимальный размер ПП). Соответственно, значения сопротивлений составят 0.16 и 0.13 Ом. Легко показать, что максимальное падение напряжения не превысит 1% при субтрактивном способе изготовления ПП и 0.8 % при комбинированном способе изготовления печатного рисунка.

Следующим шагом вычислим минимальное расстояние между элементами печатного рисунка, исходя из выбранного класса точности (таблица 4.3). Номинальное значение расстояния S (таблица 4.3) равно 0.45 мм. В узких местах возможно занижение этого значения на величину положительного отклонения Δt ширины печатного элемента (см. таблицу 2.14). Для второго класса точности $\Delta t = 0.15$ мм. Значит, для узких мест минимальное расстояние между элементами печатного рисунка $S_{\min} = 0.3$ мм.

Пробивное напряжение между элементами проводящего рисунка, расположенными в одном слое, для заданных расстояния, материала основания ПП и условий эксплуатации составляет 50 В (см. таблицу 2.17). Следовательно, дополнительных мер по обеспечению электрической прочности (покрытие диэлектрическими лаками, увеличение номинального значения параметра S) принимать не надо.

Для проведения следующих этапов топологического проектирования электрическую схему разрабатываемого усилителя загружаем в систему *P-CAD* [20 - 40] и в ней выполняем следующие основные операции:

1. Создаем при помощи программы *Library Executive* геометрические модели компонентов.

2. При помощи редактора печатных плат *P-CAD PCB* разрабатываем эскиз печатной платы, на который наносим монтажные отверстия, дополнительные надписи, а также выполняем ряд установок, таких как параметры сетки, размеры проводников, размеры и стиль контактных площадок, зазоры между элементами печатного рисунка и т.п.

3. Выполняем процесс ручного размещения ЭРЭ на поле печатной платы.

В результате размещения корректируем размер по длинной стороне ПП до значения 85 мм. Это удовлетворяет требованию к соотношению сторон (не более чем 3:1) и условию, что при длине стороны до 100 мм размер должен быть кратен 2.5 мм.

После пробной трассировки печатного узла в системе *P-CAD* было скорректировано размещение ЭРЭ на ПП и продолжено топологическое проектирование печатного узла, а именно:

1. Выравнивались ЭРЭ на печатной плате по определенным точкам привязки.

2. Минимизировались длины связей между элементами.

3. Выполнялась настройка трассировщика.

4. Осуществлялось проектирование топологии печатной платы.

После ручной корректировки была получена окончательная топология печатной платы.

В завершение разработки топологии проверялась ПП усилителя на соответствие принципиальной схеме.

Учитывая, что усилитель относится к низкочастотным и класс точности печатной платы невысок, то не проводим анализа по электромагнитной сов-

местимости, а также не рассматриваем механический режим работы печатного узла, так как в ЧТЗ требования к механическим характеристикам не заданы.

Таким образом, процесс разработки печатного узла можно считать завершенным и можно переходить к следующему этапу – разработке конструкторской документации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Козлов В.Г., Бацула А.П., Кобрин Ю.П. Основы проектирования электронных средств. Общие вопросы проектирования. Учеб. пособие для студентов специальности 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». – Томск, ТУСУР, 2005. – 150 с.

2. Алексеев В.П., Коблов Н.Н., Хрулев Г.М. Современные технологии автоматизации проектирования РЭА специального назначения. Томск: Изд-во Института оптики атмосферы СО РАН, 2003. – 134 с.: ил.

3. Кофанов Ю.Н., Сарафанов А.В., Трегубов С.И. Автоматизация проектирования РЭС. Топологическое проектирование печатных плат: Учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 2002. – 220 с.

4. Разработка и оформление конструкторской документации радиоэлектронной аппаратуры: Справочник / Э.Т. Романычева, А.К. Иванова, А.С. Куликов и др.; Под ред. Э.Т. Романычевой. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 448 с.

5. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. – М.: Высш. шк., 1990. – 432 с.: ил.

6. Савельев М.В. Конструкторско-технологическое обеспечение производства ЭВМ: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 2002. – 319 с.; ил.

7. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1998. – 448 с.: ил.

8. Троян Ф.Д. Основы проектирования электронной аппаратуры: Учеб. пособие/ Ф.Д. Троян, В.М. Хасин, А.И. Пугач. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 134 с.

9. Гелль П.П., Иванов-Осипович Н.К. Конструирование и микроминиатюризация РЭА. – Л.: Энергоатомиздат, 1984. – 536 с.

10. Парфенов Е.М. и др. Проектирование конструкций радиоэлектронной аппаратуры: Учеб. пособие для вузов/ Е.М. Парфенов, Э.Н. Камышная, В.П. Усачев. – М.: Радио и связь, 1989. – 272 с.: ил.

11. Фрумкин Г.Д. Расчет и конструирование радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Высш. шк., 1985. – 287 с., ил.

12. Дульнев Г.Н., Семяшкин Э.М. Теплообмен в радиоэлектронных аппаратах. – М.: Энергия, 1968. – 359 с.

13. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Советское радио, 1976. – 230 с.

14. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов/ И.П. Бушминский, О.Ш. Даутов, А.П. Достанко и др.; Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.; ил.

15. Разевиг В.Д. Система схемотехнического моделирования Micro-CAP V. – М.: Солон-Пресс, 1997. – 273 с.; ил.

16. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003, 496 с.; ил.

17. Дэвид Мюррей. SolidWorks. – М.: ЛОРИ, 2003. – 604 с.; ил.

18. Алямовский А.А. и др. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 800 с.; ил.

19. Кудрявцев Е.М. КОМПАС-3D V7. Наиболее полное руководство. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 664с.; ил.

20. Стешенко В.Б. EDA. Практика проектирования радиоэлектронных устройств. – СПб.; БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.; ил.

21. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.; ил.

22. Лопаткин А.В. P-CAD 2004. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.; ил.

23. Лопаткин А.В. Проектирование печатных плат в системе P-CAD 2002. Учебное пособие для практических занятий. – Нижний Новгород, НГТУ, 2002. – 190 с.

24. Мактас М.Я. Восемь уроков по P-CAD 2002. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 224 с.; ил.

25. Разевиг В.Д. Проектирование печатных плат в P-CAD 2002. – М.: Солон-Р, 2002.

26. Саврушев Э.Ц. P-CAD для Windows. Система проектирования печатных плат. Практ. Пособие. – М.: Издательство ЭКОМ, 2002. – 320 с.; ил.

27. Кобрин Ю.П. Знакомство с системой автоматизированного проектирования печатных плат *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 18 с.

28. Кобрин Ю.П. Организация и ведение библиотек электрорадиоэлементов в *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 27 с.

29. Кобрин Ю.П. Команды менеджера библиотек *P-CAD 2002 Library Executive*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 5 с.

30. Кобрин Ю.П. Создание условных графических обозначений электрорадиоэлементов средствами редактора *P-CAD 2002 Symbol Editor*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 45 с.

31. Кобрин Ю.П. Команды графического редактора *P-CAD 2002 Symbol Editor*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 14 с.

32. Кобрин Ю.П. Разработка посадочных мест на печатной плате для монтажа конструктивных элементов в *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 78 с.
33. Кобрин Ю.П. Команды графического редактора *P-CAD 2002 Pattern Editor*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 15 с.
34. Кобрин Ю.П. Создание компонентов радиоэлектронных средств с помощью программы работы с библиотеками *P-CAD 2002 Library Executive*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 30 с.
35. Кобрин Ю.П. Создание электрических схем графическим редактором *P-CAD 2002 Schematics*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 46 с.
36. Кобрин Ю.П. Команды графического редактора *P-CAD 2002 Schematics*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 19 с.
37. Кобрин Ю.П. Диалоговое размещение электрорадиоэлементов в *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 48 с.
38. Кобрин Ю.П. Ручная и интерактивная трассировки проводников печатных плат в *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 51 с.
39. Кобрин Ю.П. Автоматическая трассировка проводников печатных плат в *P-CAD 2002*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 35 с.
40. Кобрин Ю.П. Команды графического редактора *P-CAD 2002 PCB*. – Томск, ТУСУР, 2006. – 24 с.
41. ОС ТУСУР 6.1-97. Образовательный стандарт ВУЗа. Работы студенческие учебные и выпускные квалификационные. Общие требования и правила оформления. – Томск, ТУСУР, 1997. – 40 с.
42. Полупроводниковые приборы: Транзисторы. Справочник. – /В.А. Аронов, А.В. Баюков, А.А. Зайцев и др. Под общ. ред. Н.Н. Горюнова. – М.: Энергоиздат, 1982. – 904 с.
43. Справочник по полупроводниковым приборам. Лавриненко В.Ю. – Киев, Техника, 1977. – 376 с.
44. Полупроводниковые приборы. Диоды высокочастотные, импульсные, оптоэлектронные приборы: Справочник. – / А.Б. Гитцевич, А.А. Зайцев, В.В. Мокряков и др.: Под ред. А.В. Голомедова. – М.: КУБК-а, 1994. – 592 с.
45. Справочник по электрическим конденсаторам / М.Н. Дьяконов, В.И. Карабанов, В.И. Присняков и др.; Под общ. ред. И.И. Четверикова и В.Ф. Смирнова. – М.: Радио и связь, 1983. – 576 с.; ил.