БИБЛИОТЕКА
«Конструирование и технология электронных средств»

В.Н. Гриднев, Г.Н. Гриднева

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана

КОМПЛЕКТ

учебно-методических комплексов дисциплин по направлению подготовки бакалавров и магистров 211 000

«КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

БИБЛИОТЕКА «КОНСТРУИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

В двадцати пяти книгах

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ И НАДЕЖНОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
2. УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
3. СЕРТИФИКАЦИЯ И ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
4. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ИНФОРМАТИКА
5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
7. **ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ**
8. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
9. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
10. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКИ
11. СХЕМОТЕХНИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
12. КОНСТРУКТОРСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
13. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ
14. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
15. ЛАЗЕРНЫЕ И ОПТИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
16. АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
17. СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ В КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
18. КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ БАЗЫ ДАННЫХ
19. СИСТЕМЫ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
20. ТРИЗ В КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
21. ПРИЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ АЛГОРИТМОВ И ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ ЛОГИКИ
22. АРХИТЕКТУРА И СИСТЕМОТЕХНИКА ЭВС, КОМПЛЕКСОВ И СИСТЕМ
23. СИСТЕМНОЕ ПРОГРАММИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМЫХ СИСТЕМ
24. ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ И ТЕХНОЛОГИИ
25. УПРАВЛЕНИЕ ПРОЕКТАМИ В КОНСТРУКТОРСКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

В.Н. Гриднев, Г.Н. Гриднева

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Учебно-методический комплекс
по направлению подготовки бакалавров и магистров 211 000
«Конструирование и технология электронных средств»

Под редакцией заслуженного деятеля науки РФ,
члена-корреспондента РАН, профессора
В.А. Шахнова

Допущено учебно-методическим объединением вузов
по университетскому политехническому образованию
в качестве учебного пособия для студентов
высших учебных заведений,
обучающихся по направлению 211 000
«Конструирование и технология электронных средств»

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ
им. Н.Э. Баумана

Москва 2014

УДК 681.321
ББК 32.971
Г82

Рецензенты:

кафедра «Информационные технологии конструирования радиотехнических устройств» Московского авиационного института (зав. кафедрой, профессор *А.В. Назаров*);

кафедра «Электроника и информатика» Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского (зав. кафедрой, профессор *С.Б. Беневоленский*)

Гриднев В. Н.

Г82 Проектирование коммутационных структур электронных средств : учеб. пособие / В.Н. Гриднев, Г.Н. Гриднева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 344 с. : ил. (Библиотека «Конструирование и технология электронных средств» : в 25 кн. Кн. 7).

ISBN 978-5-7038-4075-7 (кн. 7)

Методические материалы содержат нормативную базу дисциплины, рекомендации по организации и проведению лекций, практических занятий, семинаров, лабораторных работ, указания по выполнению домашнего задания, перечень учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, типовых плакатов и другие дидактические материалы для работы профессорско-преподавательского состава по данной дисциплине.

Для студентов, аспирантов и преподавателей высших технических учебных заведений по направлению подготовки бакалавров и магистров 211 000 «Конструирование и технология электронных средств», а также всех, занимающихся вопросами проектирования электронных систем различного назначения.

УДК 681.321
ББК 32.971

© Гриднев В.Н.
Гриднева Г.Н., 2014
© Оформление. Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014

ISBN 978-5-7038-4075-7 (кн. 7)

ПРЕДИСЛОВИЕ

Направление подготовки бакалавров и магистров «Конструирование и технология электронных средств» (211 000) утверждено приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 22.12.2009 г. № 789.

Конструкция (лат. *constructio* – строение, устройство, построение, план, взаимное расположение частей; англ. – *construction*; нем. – *die Konstruktion*; фр. – *construction*).

Технология (греч. *techne* – искусство, мастерство + *logos* – понятие, учение; англ. – *technology*; нем. – *die Technologie*; фр. – *technologie*).

Под *конструкцией* электронных средств (ЭС) понимается совокупность элементов и деталей с различными физическими свойствами и формами, находящимися в определенной пространственной, механической, тепловой, электромагнитной и энергетической взаимосвязи. Эта взаимосвязь определяется системотехнической, схемотехнической, конструкторской и технологической документацией и обеспечивает выполнение электронной аппаратурой (ЭА) заданных функций с необходимой точностью и надежностью в условиях воздействия на нее различных факторов: эксплуатационных, производственных, социальных.

Технология производства, или технологический процесс, – основная часть производственного процесса, заключающаяся в выполнении определенных действий, направленных на изменение исходных свойств объекта производства (в нашем случае ЭА) и достижение им определенного состояния, соответствующего технической документации.

Конструирование и технология производства являются, с одной стороны, отдельными частями сложного процесса разработки ЭА, а с другой — не могут выполняться в отдельности, без учета взаимосвязей между собой и с другими этапами разработки. Являясь эта-

пами общего процесса «разработка–производства–эксплуатация–утилизация» (жизненного цикла изделия), как конструирование, так и технология определяют в конечном итоге общие потребительские свойства ЭА.

Область профессиональной деятельности подготовки бакалавров и магистров по данному направлению включает все этапы жизненного цикла изделий электронной техники: исследование, проектирование и конструирование, технологию производства, сквозное управление качеством, эксплуатацию и утилизацию электронных средств различного назначения, в том числе информационных систем сопровождения жизненного цикла изделий электронной техники, отвечающих целям их функционирования, требованиям надежности, эргодизайна, условиям эксплуатации, компьютерного сопровождения жизненного цикла изделий и экономическим показателям.

Объектами профессиональной деятельности по направлению подготовки «Конструирование и технология электронных средств» (211 000) являются: радиоэлектронные средства, электронно-вычислительные средства, средства телекоммуникаций, наноэлектронные и электронные средства, конструкторско-технологическая информатика, технологические процессы (ТП) производства электронных средств, технологические материалы и технологическое оборудование для производства электронных средств, технологическая, конструкторская, программная и эксплуатационная документация, методы и средства контроля, настройки и испытания электронных средств, а также методы обеспечения качества при производстве электронных средств, методы конструирования электронных средств, методы разработки технологических процессов, системы автоматизированного проектирования и компоненты *CALS*-технологий.

Направление подготовки предусматривает следующие основные профили:

№	Номер профиля	Наименование профиля
1	2	3
1	211 001	Проектирование и технология электронно-вычислительных средств
2	211 002	Проектирование и технология радиоэлектронных средств
3	211 003	Конструирование и технология микроволновых средств
4	211 004	Конструирование и технология наноэлектронных средств

1	2	3
5	211 005	Технология электронных средств
6	211 006	Информационные технологии проектирования радиоэлектронных средств
7	211 007	Информационные технологии проектирования электронно-вычислительных средств
8	211 008	Информационные технологии проектирования СВЧ-устройств
9	211 009	Информационные радиоэлектронные средства
10	211 010	Информационные навигационные средства и системы

Развитие и широкое внедрение информационных технологий для проектирования различных изделий дает возможность разработчику ЭС использовать принципиально новые инструменты и подходы. Это отражается на сокращении сроков разработки, улучшении технических и экономических показателей создаваемой электронной аппаратуры.

На базе представленных учебно-методических комплексов (УМК) создана вариативная система маршрутного междисциплинарного обучения студентов, разработаны электронные версии УМК дисциплин на основе *Web*-версии, соответствующей стандарту *SCORM* 2004, 3*rd edition* (*http*://*nanolab*.*iu*4.*bmstu*.*ru*).

Глубокую благодарность авторы выражают рецензентам: А.В. Назарову – профессору, заведующему кафедрой «Информационные технологии конструирования радиотехнических устройств» Московского авиационного института и С.Б. Беневоленскому – профессору, заведующему кафедрой Российского государственного технологического университета им. К.Э. Циолковского, чьи замечания способствовали улучшению содержания УМК.

Авторы будут признательны читателям за все замечания по содержанию УМК, которые следует направлять по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., МГТУ им. Н.Э. Баумана.

В.А. Шахнов

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

БНК	–	базовая несущая конструкция
ГПК	–	гибкий печатный кабель
ГПП	–	гибкая печатная плата
ГПС	–	гибкая производственная система
ДПП	–	двусторонняя печатная плата
ЖПМ	–	жидкая паяльная маска
ИМС	–	интегральная микросхема
ИСО	–	Международная организация по стандартизации
ИЭТ	–	изделие электронной техники
КМО	–	компонент, монтируемый в отверстия
КМП	–	компонент, монтируемый на поверхности
КП	–	контактная площадка
КПК	–	концевые печатные контакты
КС	–	коммутационные структуры
МПП	–	многослойная печатная плата
ОПП	–	односторонняя печатная плата
ОТК	–	отдел технического контроля
ПП	–	печатная плата
РНО	–	регулировочные и настроечные операции
РПП	–	рельефная печатная плата
САПР	–	системы автоматизированного проектирования
СПФ	–	сухой пленочный фоторезист
ТКД	–	технологический классификатор деталей
ТП	–	технологический процесс
ТПП	–	технологическая подготовка производства
ТУ	–	технические условия
ТХМ	–	тонкослойное химическое меднение
ТЭЗ	–	типовой элемент замены
УМК	–	учебно-методический комплекс
УНП	–	универсально-наладочное приспособление
УСП	–	универсально-сборочное приспособление
ЧПУ	–	числовое программное управление

ЭА – электронная аппаратура
ЭВС – электронно-вычислительная система
ЭК – электронный компонент
ЭМ – электронный модуль
ЭС – электронные средства

ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУРСА

Агрегатирование – метод конструирования и эксплуатации изделий, основанный на функциональной и геометрической взаимозаменяемости их основных узлов и агрегатов.

Брак – это дефектная единица продукции, т. е. продукция, имеющая хотя бы один дефект.

Вспомогательный переход – законченная часть технологической операции, которая не сопровождается изменением формы или состояния заготовки, но необходима для выполнения технологического перехода, например установка заготовки, её закрепление и т. д.

Вспомогательный ход – законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки без изменения формы, размеров, шероховатости или свойств заготовки.

Временный ТП – это технологический процесс, который применяется при изготовлении пробных изделий на имеющемся на предприятии оборудовании.

Групповой ТП – это технологический процесс на технологически подобные изделия для мелкосерийного, многономенклатурного производства.

Деталь – изделие, изготовленное из однородного по наименованию и марке материала без применения сборочных операций, например: ось, клемма, рама и т. д.

Дефект – каждое отдельное несоответствие продукции требованиям, установленным нормативно-технической документацией.

Знак соответствия – зарегистрированный в установленном порядке знак, который по правилам, установленным в данной системе сертификации, подтверждает соответствие маркированной им продукции установленным требованиям.

Единичное производство – это производство, которое характеризуется единичным или малым объемом выпускаемых изделий, процесс изготовления которых не повторяется или повторяется че-

рез неопределенные промежутки времени, характеризуется применением универсального, переналаживаемого оборудования и высококвалифицированного персонала, высокой себестоимостью продукции и низкой производительностью.

Единичный ТП – это технологический процесс только на определенное изделие, как правило, используется при массовом производстве.

Изделие – любой предмет или набор предметов производства, подлежащих изготовлению на предприятии, т. е. изделие – это продукт конечной стадии производства, изделием может быть деталь, сборочная единица, комплекс и комплект, применительно к ЭА под изделием понимается как сама электронная аппаратура, так и все составляющие её элементы и детали.

Испытание – определение или исследование одной или нескольких характеристик изделия под воздействием совокупности физических, химических, природных или эксплуатационных факторов и условий.

Качество – совокупность свойств и характеристик продукции, обусловливающих её пригодность удовлетворять определенные потребности в соответствии с её назначением (ИСО 9000:2000).

Комплекс – два или более изделия, не соединенных на предприятии-изготовителе сборочными операциями, но предназначенные для выполнения взаимосвязанных эксплуатационных функций. Каждое изделие в комплексе имеет свое назначение, например: вычислительный комплекс, радиолокационный комплекс и т. д.

Комплект – два или более изделия, не соединенные на предприятии-изготовителе сборочными операциями и представляющие собой набор изделий, имеющих единое эксплуатационное назначение вспомогательного характера, например: комплект измерительной аппаратуры, комплект запасных частей и т. д.

Контроль – это процесс определения и оценки информации об отклонениях действительных значений от заданных или их совпадении и результатах анализа.

Маршрутный ТП – это ТП, который определяет порядок (маршрут) следования операций, их вид и наименование, оборудование и оснастку для выполнения операций, трудоемкость выполнения операций и квалификацию работников, для мелкосерийного производства достаточно разработки маршрутной технологии, при этом все параметры разработки заносятся в маршрутные карты.

Маршрутно-операционный ТП – применяется, когда на отдельные наиболее сложные операции маршрутной технологии разрабатывается операционная технология.

Массовое производство – это производство одинаковых изделий в течение длительного периода времени; характерным является закрепление за одним рабочим местом одной операции, требующей использования рабочих невысокой квалификации или исключения из процесса рабочих и замены их роботами и робототехническими комплексами. Используется поточный принцип изготовления продукции с использованием автоматических линий, цехов и даже автоматических заводов. Оборудование и оснастка, как правило, специальное, дорогое и высокопроизводительное. Производство микросхем и электрорадиоэлементов следует отнести к массовому типу производства.

Нормативный документ – документ, устанавливающий правила, общие принципы или характеристики, касающиеся различных видов деятельности или их результатов.

Операция – законченная часть ТП, которая выполняется непрерывно на одном рабочем месте.

Операционный ТП – это ТП для средне- и крупносерийного или массового производств, при этом каждая операция разрабатывается подробно. На операционном ТП окончательно выбирают оборудование и оснастку, выбирают или рассчитывают технологические режимы, операцию дробят на технологические переходы – используют принцип дифференциации и концентрации технологических переходов при выполнении операции, дают эскиз операции с установочными базами и настроечными размерами, рассчитывают операционное время $t_{\text{оп}}$ и окончательно устанавливают норму штучного времени $T_{\text{шт}}$, данные разработки заносят в операционные карты.

Параметрическая стандартизация основана на упорядочении объектов стандартизации при помощи составления параметрических рядов характеристик продукции, процессов, классификаторов и т. п.

Переход – законченная часть операции, которая выполняется с использованием одного и того же инструмента при одних и тех же режимах.

Перспективный ТП – это технологический процесс для производства изделия по новой технологии или при модернизации старых предприятий.

Прием – совокупность отдельных движений в процессе выполнения работы или подготовки к ней (пуск станка, выключение и т. п.).

Позиция – каждое новое положение заготовки относительно инструментов при неизменном её закреплении в приспособлении, например несколько позиций имеет поворотное многопозиционное приспособление.

Правила – документ, устанавливающий обязательные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

Проектный ТП – это технологический процесс на начальной стадии проектирования, имеющий много вариантов.

Производственный процесс – совокупность действий рабочих и орудий производства, в результате которых исходные материалы, полуфабрикаты и компоненты превращаются в готовую продукцию (платы, ячейки, блоки и т. п.), соответствующую своему назначению, к основному производственному прогрессу относят изготовление продукции, предусмотренной заказчиком, к вспомогательному – складирование, транспортировку, ремонт, энерго- и водоснабжение и др.

Проход – часть перехода, заключающаяся в снятии одного слоя материала с обрабатываемой поверхности.

Рабочий ход – законченная часть перехода, состоящая из однократного перемещения инструмента относительно заготовки, сопровождаемого изменением формы, размеров, шероховатости или свойств заготовки.

Рабочее место – часть производственной площади, оснащенной основным технологическим и вспомогательным оборудованием и средствами, закрепленными за рабочим для выполнения операции.

Рабочий ТП – это технологический процесс, выбираемый для реализации на производстве.

Ритм выпуска (производительность) – обратная величина по отношению к такту, т. е. число изделий, выпускаемых в единицу времени.

Ревизия (*проверка*) – проверка, осуществляемая контролером, которая должна соответствовать содержанию карты контроля.

Регламент – документ, содержащий обязательные правовые нормы, принятый органом власти.

Рекомендации – документ, содержащий добровольные для применения организационно-технические и (или) общетехнические положения, порядки, методы выполнения работ.

Руководство – лицо или группа работников, осуществляющих направление деятельности и управление организацией на высшем уровне.

Самопроверка (*самоконтроль*) – персональная проверка и контроль оператором с применением методов, установленных технологической картой на операцию, а также с использованием предусмотренных измерительных средств с соблюдением заданной периодичности проверки.

Сборочная единица – изделие, составные части которого подлежат соединению на предприятии-изготовителе с применением сборочных операций (свинчивание, сварка, пайка, склеивание), например: ячейка, типовой элемент замены (ТЭЗ), разъем, узел, блок и т. д.

Свойством называется объективная способность продукции, которая может проявляться при её создании, эксплуатации и потреблении.

Серийное производство – это производство, которое характеризуется изготовлением изделий периодически повторяющимися партиями, сериями. В зависимости от количества изделий в партии различают мелкосерийное, среднесерийное (серийное), крупносерийное производство, выпуск партий – еженедельный, ежемесячный, ежеквартальный. Для серийного производства характерно использование специализированного и автоматизированного оборудования и оснастки, особенно станков с числовым программным управлением (ЧПУ), в ряде случаев, особенно при крупносерийном производстве, используют специальное и автоматическое оборудование, для многономенклатурного серийного производства экономически выгодным становится использование гибких производственных систем (ГПС), для которых используют автоматизированную систему технологической подготовки производства (АСТПП) и автоматизированную систему управления технологическими процессами (АСУТП). Производство электронной аппаратуры различного назначения имеет серийный характер. В серийном производстве рабочие имеют среднюю и высокую квалификацию, а производительность труда выше, чем при единичном производстве.

Симплификация – процесс простого сокращения количества типов или других разновидностей изделий до количества, технически и экономически необходимого для удовлетворения потребностей.

Система – совокупность взаимосвязанных и взаимодействующих элементов.

Система «*ДЖИТ*» (*just in time* – производство точно в срок) – комплекс управленческих действий, ориентированный на ноль запасов, ноль отказов, ноль дефектов.

Способ (*форма*, *схема*) *сертификации* – определенная совокупность действий, официально принимаемая (устанавливаемая) в качестве доказательства соответствия продукции заданным требованиям (далее – схема сертификации).

Стандарт – нормативно-технический документ по стандартизации, устанавливающий комплекс правил, норм, требований к объекту стандартизации и утвержденный компетентным органом.

Стандартизация – установление и применение правил с целью упорядочения деятельности в определенных областях на пользу и при участии всех заинтересованных сторон, в частности для достижения всеобщей оптимальной экономии при соблюдении функциональных условий и требований техники безопасности.

Стандартный ТП – это технологический процесс, обязательный для применения в отрасли, например методики испытания электронно-вычислительной аппаратуры.

Такт выпуска – интервал времени, через который производится выпуск изделий.

Технический контроль – проверка соответствия объекта установленным техническим требованиям.

Технический регламент – регламент, содержащий технические требования либо непосредственно, либо путем ссылки на стандарты, технические условия или кодекс установившейся практики, либо путем включения в себя содержания этих документов.

Технический уровень продукции – относительная характеристика качества продукции.

Технологический процесс – часть производственного процесса, непосредственно связанная с превращением предмета труда в готовую продукцию. Технологический процесс делится на операции, а операции – на установы, позиции, технологические переходы, ходы, приемы.

Технологическая операция – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими над одним или несколькими совместно обрабатываемыми или собираемыми изделиями.

Технологический переход (переход) – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством применяемо-

го инструмента и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

Типовой ТП – это технологический процесс на конструктивно подобные изделия, например на изготовление печатных плат.

Унификация – действия, направленные на сведение к технически и экономически обоснованному рациональному минимуму неоправданного многообразия различных изделий, деталей, узлов, технологических процессов и документации.

Установы, *или установка*, – часть технологической операции, выполняемая при неизменном закреплении обрабатываемой заготовки (заготовок) или собираемой сборочной единицы.

Холостой ход – то же, что и вспомогательный ход для станков-автоматов.

1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ

1.1. ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Коммутационные структуры (КС) – специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями ЭВС.

Коммутационные структуры используются на всех уровнях электронных модулей: соединения внутри интегральных микросхем (металлизация; рис. 1.1), соединения между различными изделиями электронной техники (ИЭТ) (печатные платы; рис. 1.2), соединения между блоками электронной аппаратуры (кабели, шлейфы; рис. 1.3) и др. Они бывают внутри- и межмодульными, внутри- и межъячеечными, внутри- и межблочными и т. п., что обусловливает их конструктивное исполнение.

Коммутационные структуры для электронно-вычислительных систем (ЭВС) должны обладать:

- минимальным активным и индуктивным сопротивлением;
- однородным по длине структуры волновым сопротивлением;
- минимальным полем вокруг линии при протекании по ней тока;
- способностью передавать сигналы в широком диапазоне частот, токов и напряжений.

Удовлетворить всем вышеперечисленным требованиям, используя какой-либо один тип коммутационных структур, не представляется возможным. Поэтому применяются разнообразные типы КС в зависимости от функциональных особенностей как самих КС, так и аппаратуры.

Выбор конструктивно-технологического варианта исполнения соединений – важная и сложная задача, в значительной степени влияющая на качество проектируемой аппаратуры.

На рис. 1.4 представлены геометрические параметры некоторых видов коммутационных структур.

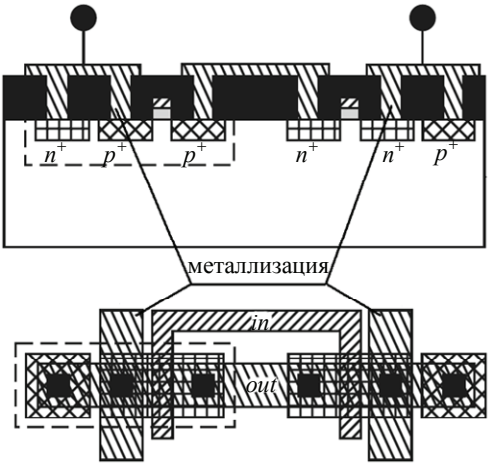


Рис. 1.1. Металлизация в интегральных микросхемах

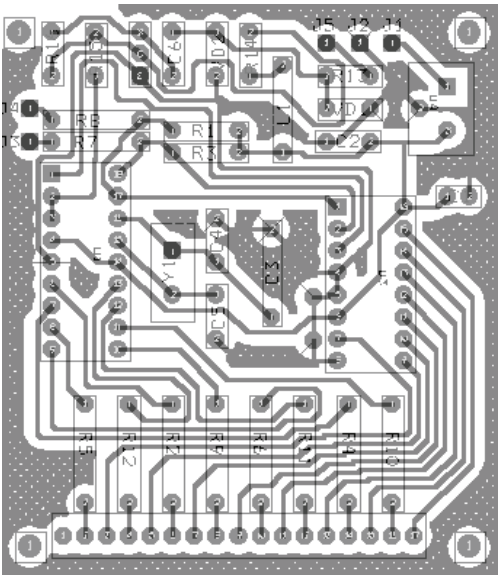


Рис. 1.2. Печатная плата

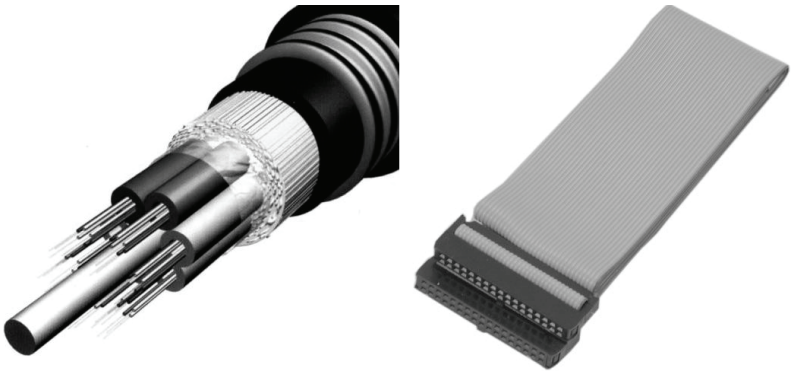


Рис. 1.3. Кабель (слева) и шлейф (справа)

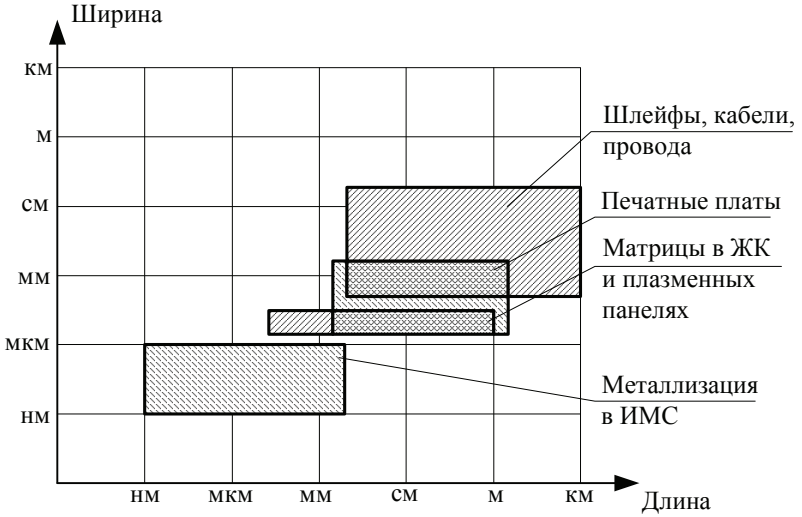


Рис. 1.4. Геометрические параметры некоторых видов коммутационных структур

В настоящее время увеличивающаяся сложность электронной аппаратуры и её миниатюризация ведут к смещению геометрических размеров коммутационных структур в микро- и нанообласти. Это требует постоянного увеличения разрешающей способности технологического оборудования, а также разработки новых видов технологий и модернизации уже существующих.

Несмотря на сложность перехода к наноразмерам, их реализация открывает широкие перспективы в технологии коммутационных

структур. Уменьшение размеров электрических связей приводит к снижению затухания и искажения сигнала. Уменьшение ширины печатных проводников позволяет увеличить плотность монтажа и точность изготовления печатных плат.

Так, например, размеры минимального элемента в интегральных микросхемах приближаются к 32 нм, активно ведется разработка технологии производства печатных плат с шириной проводников 75 и 50 мкм.

В данном пособии рассматриваются основные виды коммутационных структур, технологии их производства и перспективы использования.

1.2. КОНСТРУКТИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ (ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ)

1.2.1. Понятие печатного монтажа

Печатный монтаж – способ монтажа электронных модулей (ЭМ) аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников. Проводники размещены на диэлектрическом основании и образуют проводящий рисунок. Основание конечных размеров с проводящим рисунком и необходимыми отверстиями является печатной платой (рис. 1.5).

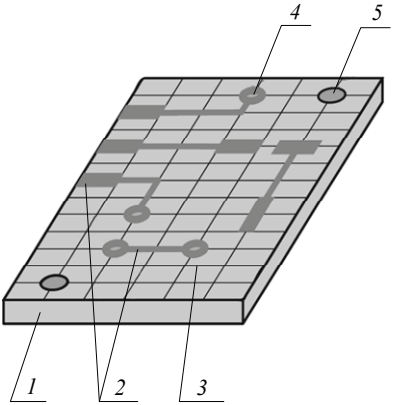


Рис. 1.5. Схема печатной платы:
1 – основание печатной платы; *2* – проводящий рисунок; *3* – непроводящий рисунок; *4* – металлизированное отверстие; *5* – конструкционное отверстие

Основной материал проводящего рисунка – медь в виде фольги или осажденного на диэлектрик слоя. В качестве материалов диэлектрического основания печатной платы (ПП) применяются: стеклотекстолиты различных марок, гетинакс, полиимид, лавсан, фторопласт, керамика.

Проводящий рисунок ПП состоит из различных элементов:

- сигнальные проводники шириной t, видимой в плане (рис. 1.6, *а*);
- шины земли $t_{шз}$ и питания $t_{шп}$ (рис. 1.6, *б*);
- контактные площадки различных типов (рис. 1.6, *в*);
- экраны и экранные сетки (рис. 1.6, *г*, *д*);
- металлизированные отверстия (рис. 1.6, *е*).

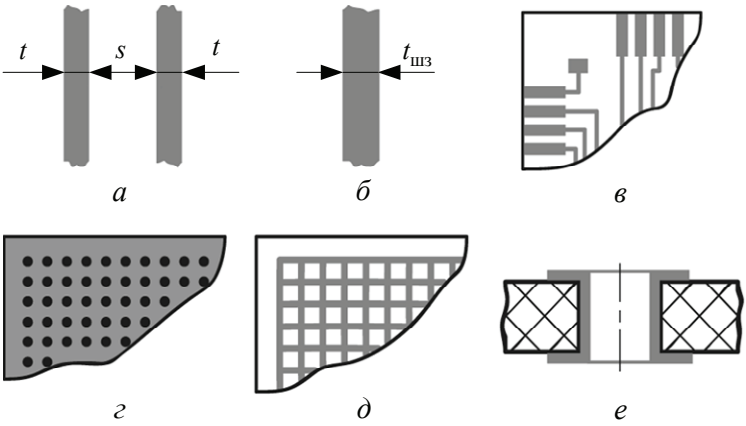


Рис. 1.6. Элементы проводящего рисунка ПП:
а – сигнальные проводники; *б* – шина земли (питания); *в* – концевые печатные контакты (КПК) – печатный разъем; *г* – экран; *д* – экранная сетка; *е* – металлизированное отверстие

Ширина t сигнальных проводников определяется токовой нагрузкой, зависит от прочности сцепления меди с диэлектриком и задается в соответствии с выбранным классом точности ПП. Расстояние s между параллельно проложенными проводниками задается равным их ширине. Параметр t/s – основной для заданного класса точности ПП. Ширина шин земли и питания больше ширины сигнальных проводников.

Все элементы проводящего рисунка ПП, лежащие в одной плоскости, образуют проводящий слой. Если ПП состоит из нескольких

проводящих слоев, то их электрически соединяют с помощью металлизированных отверстий (рис. 1.6, *е*) с осажденным на их стенки слоем меди. Взаимовлияние печатных проводников (индуктивное, емкостное) компенсируют экранами, экранными слоями и взаимно перпендикулярной прокладкой сигнальных цепей на различных слоях ПП.

Контактные площадки (КП) проводящего рисунка ПП предназначены для надежного электрического соединения выводов навесных компонентов, монтируемых на плате (рис. 1.7), с печатным монтажом.

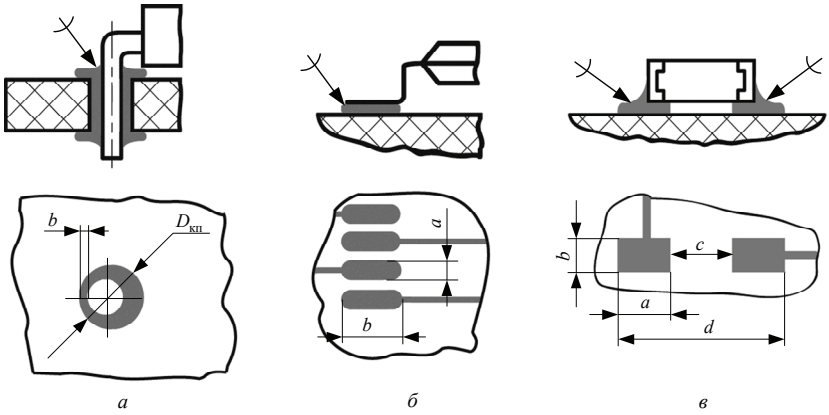


Рис. 1.7. Типы контактных площадок в проводящем рисунке ПП: *а* – в зоне монтажных или переходных отверстий; *б* – для соединения планарных выводов ИМС с печатным монтажом; *в* – для соединения компонентов, монтируемых на поверхности основания ПП, с печатным монтажом

Круглые КП (рис. 1.7, *а*) должны быть соосны с монтажным отверстием под выводы компонентов, монтируемых в отверстие (КМО), а их диаметр $D_{кп}$ должен обеспечивать качество галтелей припоя и целостность площадки (b – гарантированный поясок, определяемый классом точности ПП). Величина $D_{кп}$ компенсирует погрешности несоосности отверстия и КП.

Геометрия планарных КП (рис. 1.7, *б*, *в*) определяется геометрией корпусов и выводов ИМС и других компонентов, монтируемых на поверхность основания ПП (КМП). Их размеры должны быть достаточны для образования качественных галтелей припоя по периметру планарного вывода или корпуса КМП.

По характеру размещения и геометрии КП в зоне проводящего рисунка можно предварительно судить о типе устанавливаемого на ПП компонента (рис. 1.8).

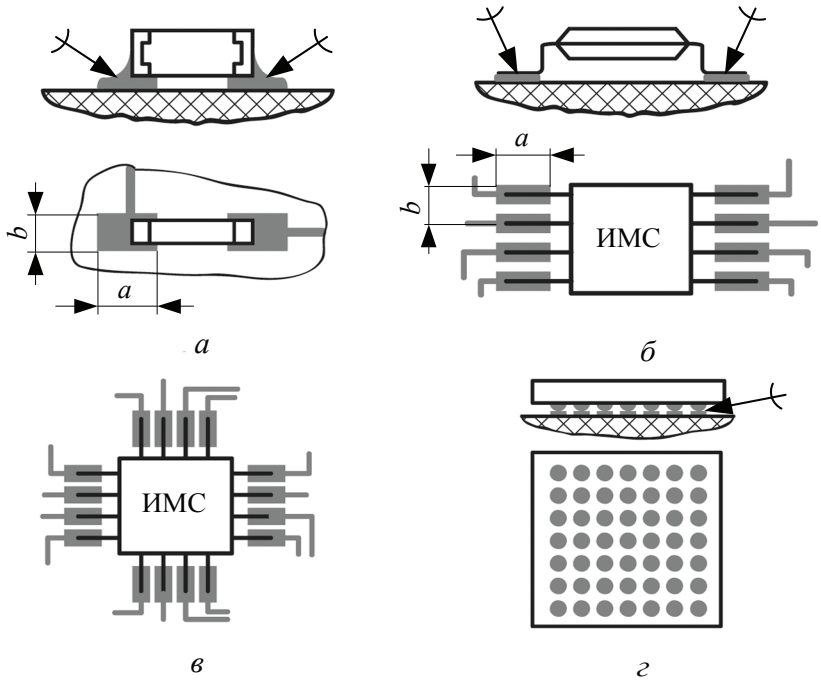


Рис. 1.8. Характер расположения КП проводящего рисунка:
а – для монтажа чип-компонентов; *б* – для монтажа ИМС с двусторонним расположением планарных выводов; *в* – для монтажа ИМС с четырехсторонним расположением планарных выводов; *г* – для монтажа ИМС с матричным расположением шариковых выводов

Металлизированные монтажные и переходные отверстия (рис. 1.9) также являются элементом проводящего рисунка, который выполнен в объеме основания путем осаждения меди на стенки отверстий. При этом необходим надежный электрический переход от плоской к цилиндрической части проводящего рисунка. Надежность соединения снижается в многослойных печатных платах (МПП). Отсюда необходимость в высоком качестве стенок просверленных отверстий и в подготовке их под осаждение меди.

Координатная сетка (рис. 1.10) определяет положение всех конструктивных элементов ПП:

- прокладка сигнальных проводников и шин по линиям сетки, параллельно или под определенными углами (90°, 60°, 45°, 30°) к сетке;
- размещение отверстий в узлах сетки;
- размещение КП в узлах сетки.

Координатная сетка наносится на рабочем чертеже ПП с указанием шага ($t_c = 2{,}5;\ 1{,}25;\ 0{,}625;\ 0{,}5$). Как правило, шаг сетки согласуют с шагом выводов ИМС. На изготовленной ПП шаг сетки не нанесен.

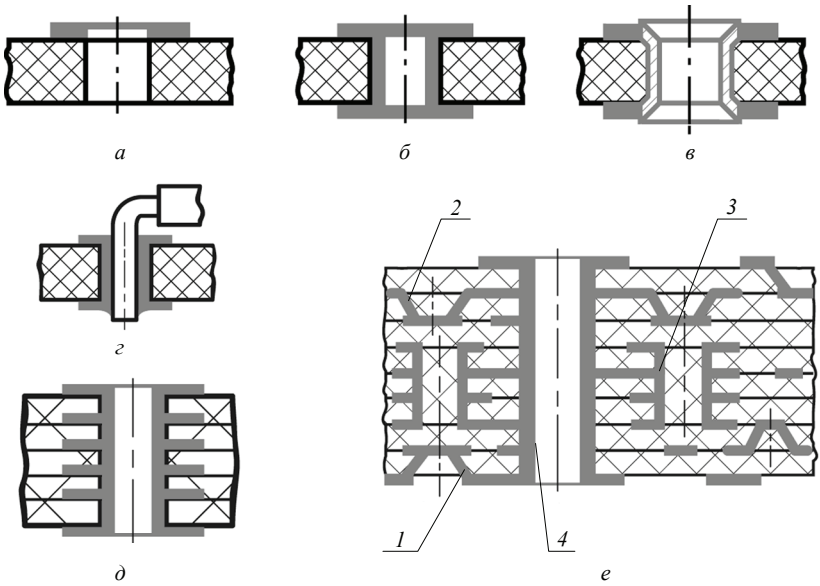


Рис. 1.9. Виды основных отверстий ПП:
а – неметаллизированное монтажное в односторонней ПП (ОПП);
б – металлизированное переходное в двусторонней ПП (ДПП);
в – пистонированное переходное в ДПП; *г* – металлизированное монтажное в ДПП; *д* – сквозное, металлизированное в МПП; *е* – отверстия в МПП с высокой плотностью проводящего рисунка: *1* – глухой микропереход; *2* – скрытый глухой микропереход; *3* – внутреннее скрытое переходное отверстие; *4* – сквозное металлизированное отверстие

Технологическое поле (рис. 1.11) является важным конструктивным элементом заготовки ПП. Ширина поля 20–30 мм по периметру заготовки. В нем размещают два базовых отверстия для ориентации заготовки на операции сверления монтажных отверстий, для взаимной ориентации заготовки и фотошаблона с рисун-

ком печатной схемы. В технологическом поле присутствуют реперные знаки для определения точного положения заготовки на некоторых технологических операциях. Поле является звеном электрической цепи при гальваническом осаждении меди на проводящий рисунок ПП. Предусмотрена удаляемая часть поля (тест-купон) для контроля качества металлизированных отверстий. После окончания ТП поле удаляется.

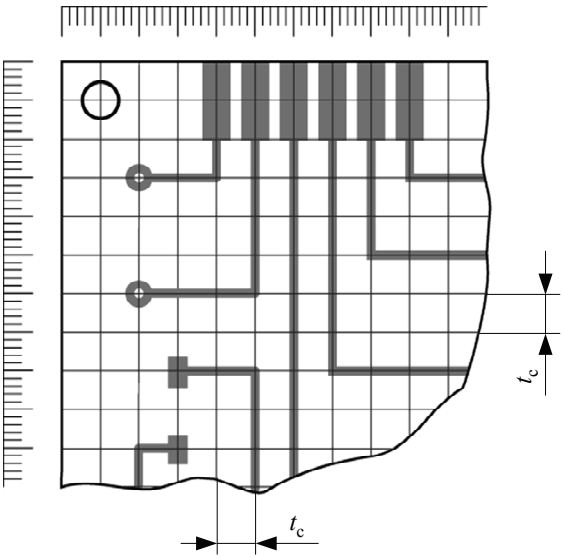


Рис. 1.10. Координатная сетка

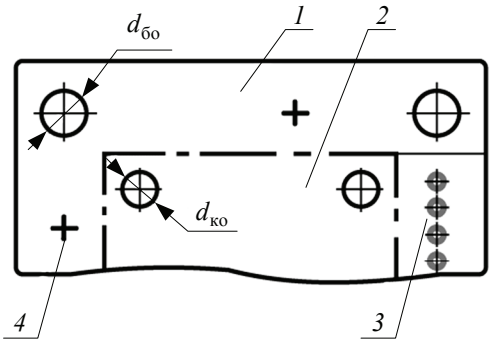


Рис. 1.11. Технологическое поле заготовки ПП:
1 – поле по периметру заготовки; *2* – рабочее поле ПП; *3* – тест-купон; *4* – реперный знак; $d_{ко}$ – диаметр контактных отверстий; $d_{бо}$ – диаметр базовых отверстий

Исходными материалами для изготовления ПП служат *фольгированные диэлектрики* (рис. 1.12, *а*, *б*) и *нефольгированные диэлектрики* (рис. 1.12, *в*).

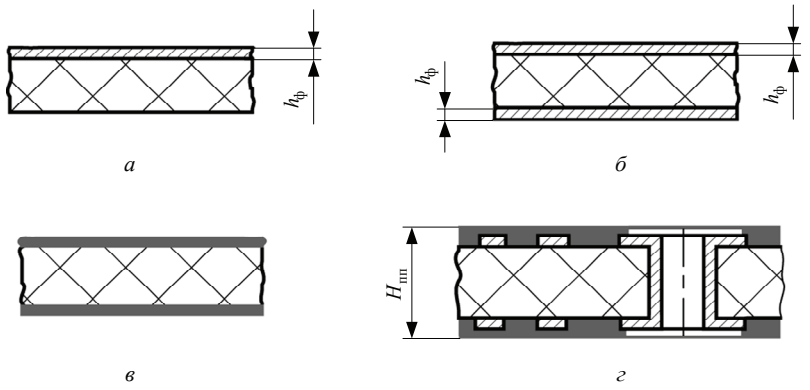


Рис. 1.12. Схемы состояния материалов ПП:
а – односторонне фольгированный диэлектрик; *б* – двусторонне фольгированный диэлектрик; *в* – нефольгированный диэлектрик с адгезионным слоем; *г* – двусторонняя ПП с паяльной маской

Фольга толщиной 5; 18; 20; 35; 50; 70 мкм приклеивается к диэлектрику заводом-изготовителем, что гарантирует прочность сцепления проводящего рисунка с основанием ПП при её изготовлении и эксплуатации в составе электронного модуля. Толщина материала заготовки учитывает толщину диэлектрика и фольги ($h_ф$).

Если заготовка – нефольгированный диэлектрик (рис. 1.12, *в*), то проводящий рисунок удерживает адгезионный слой, полученный соответствующей химической подготовкой поверхности. Изготовленную ПП покрывают паяльной маской (рис. 1.12, *г*), которая и определяет конечную толщину платы $H_{пп}$.

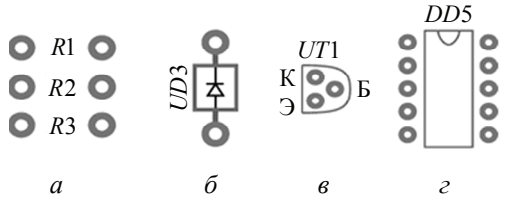


Рис. 1.13. Маркировка мест установки навесных компонентов на монтажной стороне ПП:
а – резисторы; *б* – диоды; *в* – транзисторы; *г* – ИМС

Для удобства монтажа на плате навесных компонентов на монтажную сторону сеткографией наносят маркировку типов ИЭТ, знаки ориентации диодов, транзисторов и ИМС (рис. 1.13).

Разработаны требования к информации, содержащейся на рабочем чертеже ПП. В настоящее время проект ПП представляют в электронном виде, а на предприятии-изготовителе корректируют трассировку и адаптируют конструкцию платы к действующему производству.

1.2.2. Классы точности и плотности печатного монтажа

Конструктор задает класс точности (см. табл. 1.1) на рабочем чертеже ПП. Принятый на предприятии технологический процесс изготовления ПП должен обеспечить заданный класс точности. В процессе трассировки осуществляется прокладка сигнальных печатных проводников в габаритах рабочего поля платы при наличии всех элементов проводящего рисунка (контактные площадки, шины земли и питания, КПК, экраны) и конструкционных элементов ПП (геометрия наружного контура, конструкционные отверстия, пазы и окна, крепежные отверстия).

Таблица 1.1

Параметры ПП согласно классам точности

Условное обозначение параметра ПП	Номинальное значение параметров для классов точности, мм				
	1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс	5-й класс
t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
$\gamma = d_{\text{мо}}/H_{\text{пп}}$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
δt, мм	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; –0,03

Примечание: t – минимальная ширина сигнального проводника; s – минимальное расстояние между проводниками или любыми элементами проводящего рисунка; b – минимальная ширина круглой контактной площадки (гарантированный поясок, определяющий её целостность); γ – отношение диаметра наименьшего металлизированного отверстия $d_{\text{мо}}$ к толщине ПП $H_{\text{пп}}$; δt – допуск на ширину проводника, контактной площадки или любого другого элемента проводящего рисунка.

При прокладывании проводников (рис. 1.14) между соседними круглыми (*а*) и планарными (*б*) контактными площадками, между контактной площадкой и краем ПП (*в*), между двумя неметаллизированными отверстиями (*г*) возникают так называемые «узкие места», требующие минимальных значений t/s, соответствующих заданному классу точности. Необходим также расчет узких мест с учетом технологических возможностей выбранного метода изготовления проводящего рисунка.

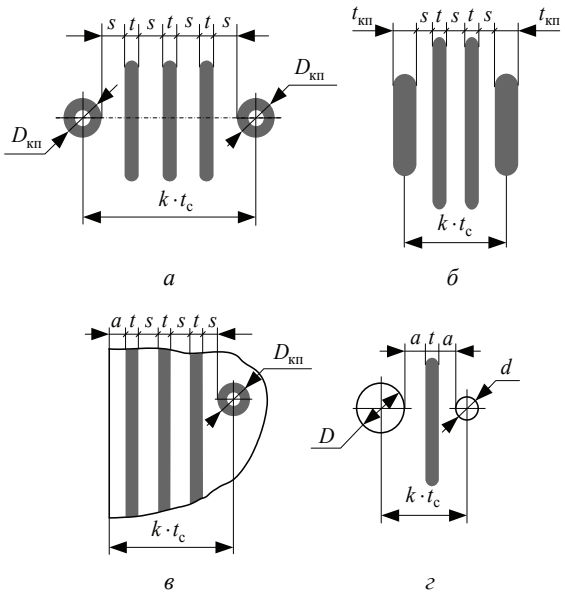


Рис. 1.14. Узкие места проводящего рисунка ПП:
а – между соседними круглыми КП; *б* – между планарными КП; *в* – между КП и краем ПП; *г* – между двумя неметаллизированными отверстиями

Расчет предусматривает определение минимально возможного количества сигнальных проводников, прокладываемых в узком месте при заданном классе точности (t/s), известных размерах контактных площадок $(D_{кп}, t_{кп})$, известных диаметрах неметаллизированных отверстий (D, d), минимально допустимом расстоянии $a \geq H_{пп}$ от проводника до края платы. При этом должно соблюдаться правило размещения конструктивных элементов ПП на расстояниях, кратных шагу координатной сетки: $k \cdot t_c$.

В связи с переходом на технологию поверхностного монтажа, уменьшением геометрических размеров КМП, увеличением количества выводов ИМС и уменьшением шага между выводами (типы корпусов *QFP*, *PLCC*, *SOJ*, *BGA*) в отечественных стандартах можно ожидать более высоких классов точности с параметрами $t/s = 0{,}075;\ 0{,}05$.

Уместно привести зарубежные уровни точности ПП, существующие в настоящее время.

Таблица 1.2 иллюстрирует необходимость корреляции уровня точности проводящего рисунка с шагом координатной сетки.

Таблица 1.2

Согласование параметров t/s и t_c для зарубежных уровней точности ПП

Уровень точности	0	1	2	3	4	5
t/s, мм	0,2	0,15	0,1	0,075	0,05	0,025
t_c (наружные слои), мм	1,25	0,625	0,625	0,5	0,5	0,25

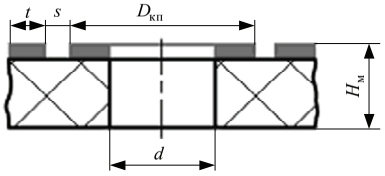
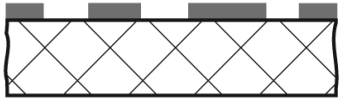
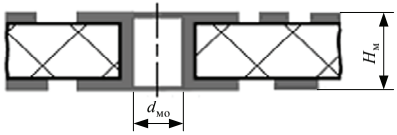
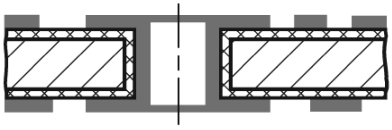
1.3. ТИПЫ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ И ИХ КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

В табл. 1.3 приведены некоторые типы ПП и их конструктивно-технологические особенности.

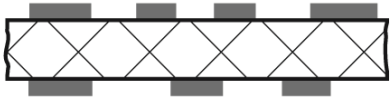
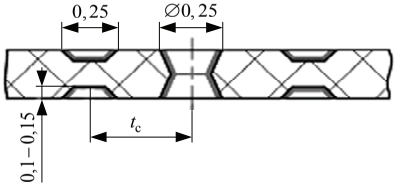
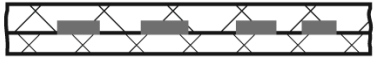
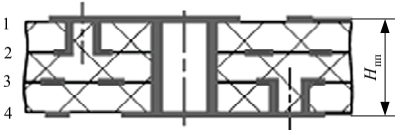
Односторонние печатные платы с неметаллизированными монтажными отверстиями применяются для схемотехнически простой аппаратуры и при макетировании электронных устройств. ОПП (табл. 1.3, п. 1) изготавливаются на односторонне фольгированных диэлектриках (типа СФ-1, ГФ-1 и других), имеют низкую плотность (1-й класс, табл. 1.1) проводящего рисунка и большие диаметры контактных площадок $D_{кп}$ в зоне монтажных отверстий. Такие площадки обеспечивают достаточно надежные контактные соединения при пайке штыревых выводов КМО с проводящим рисунком платы. На монтажной стороне ПП (противоположной стороне с проводящим слоем), как правило, наносят маркировку типов устанавливаемых компонентов и знаки их ориентации (рис. 1.13).

Таблица 1.3

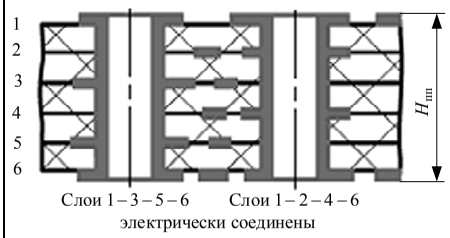
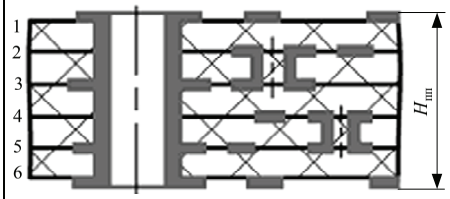
Типы печатных плат

Наименование печатной платы	Поперечный разрез ПП (эскиз)	Конструктивно-технологические особенности	Толщина исходного материала
1	2	3	4
1. Односторонняя с монтажными отверстиями		Проводящий рисунок выполнен на одной стороне фольгированного основания. Монтажные отверстия (*d*) не металлизированы	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
2. ОПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП. При малой толщине основания может быть внутренним слоем МПП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
3. Двусторонняя на диэлектрическом основании		Проводящий рисунок выполнен на двух сторонах фольгированного основания и электрически соединен металлизированными отверстиями. Предназначена для монтажа КМО и КМП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
4. ДПП на металлическом основании		Проводящий рисунок выполнен на металлическом основании (Д16), покрытом слоем диэлектрика. Д16 обеспечивает теплоотвод и прочность	Зависит от толщины основания

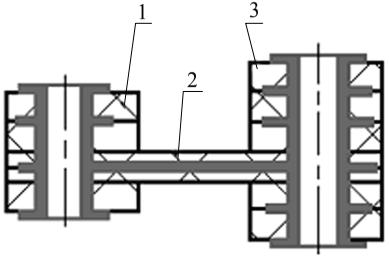
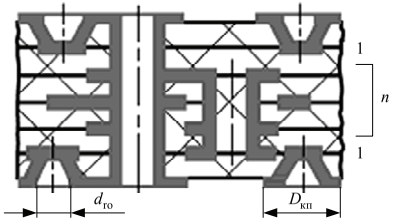
Продолжение табл. 1.3

1	2	3	4
5. ДПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП. Может быть внутренним слоем МПП	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35
6. Гибкая печатная плата		Выполнена на тонком эластичном фольгированном основании, может быть изогнута с определенным радиусом	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5
7. Рельефная печатная плата		Проводящий рисунок выполнен в объеме нефольгированного диэлектрика с двух сторон основания и электрически связан металлизированными отверстиями	0,8; 1,0; 1,5; 2,0
8. Гибкий печатный кабель-шлейф		Содержит параллельно проложенные печатные проводники. Соединяет относительно подвижные модули ЭВС. Может быть изогнут с $r = 3{,}0$ мм	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3
9. МПП попарного прессования		Содержит четыре слоя с коммутацией 2–1–4–3 с помощью металлизированных переходных отверстий. Предназначена для монтажа КМП	$H_{\text{пп}}$ определяется толщиной исходных заготовок и клеящей прокладки

Продолжение табл. 1.3

1	2	3	4
10. МПП с металлизацией сквозных отверстий		Количество слоев теоретически не ограничено. Металлизированные отверстия электрически связывают слои, имеющие в зоне отверстия контактные площадки (1–3–5–6; 1–2–4–6)	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок
11. МПП с металлизацией сквозных отверстий и внутренними межслойными переходами		Количество слоев теоретически не ограничено. Внутренние переходы (2–3; 4–5) сокращают длину сигнальных цепей	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок
12. МПП послойного наращивания на полиимидной или керамической основе		Последовательное создание проводящего рисунка слоев и их коммутация (1–2–3–4–5) с помощью металлизированных переходных отверстий. Высокая плотность проводящего рисунка. Не более пяти слоев	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок

Окончание табл. 1.3

1	2	3	4
13. Гибко-жесткая печатная плата		В единой конструкции объединены жесткие МПП (1, 3), связанные электрически ГПК (2). ГПК опрессован в составе слоев МПП (1, 3)	–
14. МПП с наращиваемыми наружными слоями (структуры *HDI*): структура 1–*n*–1		Основа платы – *n* слоев, полученных методом металлизации сквозных отверстий. Структуры *HDI* получены наращиванием одного, двух или трех слоев на наружных слоях МПП. Слои имеют высокую плотность проводящего рисунка. Глухие, скрытые и внутренние микропереходы. МПП позволяют электрически соединить современные ИМС с большим количеством выводов и малым шагом между ними	$H_{пп}$ определяется количеством слоев

Основными операциями в ТП изготовления ОПП являются: удаление фольги с пробельных мест с образованием проводящего печатного рисунка и сверление монтажных отверстий.

ОПП без монтажных отверстий (табл. 1.3, п. 2) применяются для коммутации КМП или в качестве внутренних проводящих слоев в составе многослойных печатных плат. ТП изготовления таких плат упрощается в связи с отсутствием монтажных отверстий, а проводящий рисунок может быть выполнен по любому классу точности (см. табл. 1.1).

Двусторонние печатные платы на диэлектрическом основании (табл. 1.3, п. 3) широко применяются в электронных модулях ЭВС различного назначения. Проводящий рисунок любых классов точности (см. табл. 1.1) размещается с двух сторон диэлектрического основания. Стороны электрически соединены с помощью металлизированных отверстий, которые могут быть как переходными, так и монтажными. Отсюда возможность монтажа на плате с двух сторон как КМО, так и КМП, что делает её универсальной.

ДПП могут быть изготовлены на двусторонне фольгированном основании (СФ-2, ГФ-2, СТФ-2) путем удаления фольги с пробельных мест и осаждения меди на стенки отверстий в виде слоя металлизации в объеме основания. ТП изготовления ДПП является типовым и считается наиболее трудоемким в производстве ПП.

Прецизионные ДПП (4-й, 5-й класс, табл. 1.1) могут быть изготовлены и на нефольгированном диэлектрике (типа СТЭК) с осаждением меди на поверхности и в объеме основания. Следует отметить, что ДПП на тонком основании с металлизированными переходными отверстиями могут применяться в составе внутренних слоев МПП с внутренними межслойными переходами.

ДПП на металлическом основании (табл. 1.3, п. 4) применяются в ЭВС с большой рассеиваемой мощностью и служат не только для монтажа и коммутации навесных компонентов, но и для отвода выделяемого ими тепла. Основанием платы является металлическая пластина (дюраль, медь, сталь), покрытая слоем диэлектрика, на поверхности и в объеме которой выполнен проводящий рисунок. ТП изготовления этих плат усложняется необходимостью нанесения на металлическое основание слоя диэлектрика (эпоксидный, керамический) с гарантированным покрытием стенок просверленных переходных отверстий. Если переходных отверстий нет, то ТП упрощается.

ДПП на диэлектрическом основании без металлизированных отверстий (табл. 1.3, п. 5) может быть выполнена как на фольгированном, так и на нефольгированном диэлектриках. Предназначена для монтажа КМП, но чаще всего при тонком основании (0,1–0,35 мм) может применяться в составе внутренних слоев МПП.

Гибкие печатные платы (ГПП) всех классов точности изготавливаются на тонком (0,1–0,5 мм) и эластичном фольгированном и нефольгированном основании. Они могут быть сконструированы в виде ОПП, ДПП (табл. 1.3, п. 6) и МПП и установлены с навесным монтажом в модуле ЭВС с ограниченным пространственным объемом. Для ГПП характерны монтажные и переходные отверстия малого диаметра (0,2–0,5 мм), получаемые лазерным сверлением или травлением.

В электронных модулях специальных ЭВС применяются **рельефные печатные платы** (РПП), разработанные отечественными инженерами (табл. 1.3, п. 7). Для их изготовления используют нефольгированный диэлектрик (СТАМ, СТЭК), в объеме которого выполнен проводящий рисунок (проводники и металлизированные переходные отверстия). Отверстия не имеют контактных площадок, их диаметры соизмеримы с шириной сигнальных проводников (0,25 мм), а образующие стенок – две встречные конические поверхности с общей осью. Это позволяет увеличить плотность печатного монтажа и использовать малый шаг трассировки ($t_{\text{с}} = 0{,}625$; 0,5; 0,4; 0,3 мм). Таким образом, двусторонняя рельефная плата становится эквивалентной 8–12-слойной МПП. Однако при этом усложняется технология образования рельефа (фрезерование, сверление с двух сторон) в объеме нефольгированного основания ($H_{\text{пп}} = 0{,}5 \div 1{,}5$ мм).

Гибкий печатный кабель (ГПК) представляет собой ленточный печатный провод (шлейф) с однорядным (табл. 1.3, п. 8), двухрядным и трехрядным расположением параллельно проложенных печатных проводников. Основа ГПК – односторонне фольгированный диэлектрик (ПФ-1) с защитной полиимидной пленкой. ГПК с установленными на концах соединителями (разъемами) коммутирует относительно подвижные блоки ЭВС и требует проведения электрических расчетов: активного и волнового сопротивления печатных проводников, емкости и индуктивности их единицы длины, времени задержки прохождения сигнала.

Многослойные печатные платы представляют собой структуры из проводящих и изолирующих слоев с различными способа-

ми электрического соединения проводящих рисунков. В составе проводящих слоев могут быть: сигнальные слои, слои земли и питания, экранные слои, а также монтажные слои (наружные) для коммутации навесных компонентов.

МПП попарного прессования (табл. 1.3, п. 9) имеет четыре проводящих слоя, электрически связанных по схеме 2–1–4–3 с помощью переходных металлизированных отверстий. Эта плата по конструкции и технологии изготовления наименее трудоемка из плат семейства МПП. Изготавливается из двух двусторонне фольгированных заготовок (СФ-2) с получением проводящего рисунка вначале на внутренних слоях 2 и 3, а после их склеивания (прессования) – на наружных слоях 1 и 4 с одновременной металлизацией сквозных отверстий.

Характерными внешними признаками МПП попарного прессования являются: большое количество переходных глухих отверстий 2–1 и 3–4, заполняемых эпоксидной смолой при прессовании, и малое количество (20–30) сквозных отверстий 1–4. Кроме того, по сравнению с ДПП значительно возрастает количество зон перехода от слоя металлизации отверстий к фольге контактных площадок. Возможен также разрыв контактных переходов глухих отверстий под действием тангенциальных сил от перемещения смолы. Отсюда меньшая электрическая надежность МПП попарного прессования по сравнению с ДПП на диэлектрическом основании (табл. 1.3, п. 3). Рассмотренная МПП не является универсальной и предназначена для монтажа КМП и ИМС с планарными выводами.

МПП с металлизацией сквозных отверстий (табл. 1.3, п. 10) является основным несущим элементом электронных модулей современных ЭВС, обеспечивает высокую плотность печатного и навесного монтажа, служит для навесного монтажа как КМП, так и КМО. В МПП чередуются проводящие и диэлектрические слои, в классическом варианте конструкции слои электрически связаны последовательно и в том случае, если в зоне металлизированного отверстия предусмотрена контактная площадка, связывающая металлизацию с проводящим рисунком слоя.

В структуре МПП объединены сигнальные слои с ортогональным расположением проводников, слои земли и питания, экраны и экранные сетки, наружные монтажные слои. Оптимальное количество слоев – 6–12, хотя теоретически возможно и большее количество слоев.

В МПП с внутренними межслойными переходами (табл. 1.3, п. 11) ближайшие слои могут быть электрически соединены внутренними скрытыми металлизированными переходными отверстиями. В такой конструкции сокращается длина сигнальных цепей и уменьшается влияние индуктивных и емкостных наводок.

Исходными материалами рассматриваемых МПП являются односторонне фольгированные (ФТС-1, FR4-1) и двусторонне фольгированные (ФТС-2, FR4-2) диэлектрики, а также склеивающие диэлектрические прокладки (препрег). Вначале проводящий рисунок получают на внутренних слоях, а после прессования (склеивания) слоев получают металлизированные сквозные отверстия и проводящий рисунок наружных слоев.

В производстве МПП с металлизацией сквозных отверстий (табл. 1.3, пп. 10, 11) возникают проблемы: совмещение заготовок слоев перед операцией прессования (контактные площадки в зоне каждого сквозного отверстия должны быть соосны); минимизация коробления слоев (отсюда возможное смещение контактных площадок) в процессе их прессования под действием давления и температуры.

Первая проблема решается разработанными схемами, оснасткой и технологией взаимной ориентации слоев. Решение второй проблемы требует применения в прессуемом пакете только односторонне или только двусторонне фольгированных заготовок, четного количества слоев, симметрии поперечного сечения МПП и равномерности распределения меди внутри каждого слоя. Эту же цель преследует применение в качестве наружного слоя чистой фольги, устанавливаемой в пакете перед прессованием на прокладку из препрега.

Современная практика производства МПП показывает, что толщина медной фольги внутренних слоев ($h_{\text{ф}} = 35$ мкм) должна быть больше, чем наружных ($h_{\text{ф}} = 9; 18$ мкм). Толстая фольга имеет большую площадь торцевого контакта со слоем металлизации отверстий.

Несмотря на указанные конструкторско-технологические решения, электрические соединения слоев МПП с металлизацией сквозных отверстий менее надежны, чем ДПП и МПП попарного прессования.

В **МПП послойного наращивания** (табл. 1.3, п. 12) проводящие слои соединены последовательно с помощью сплошь заполненных медью металлизированных отверстий. Фольгу первого

слоя соединяют (склеивают) с нефольгированным перфорированным диэлектриком, гальванически наращивают медь в отверстиях и на противоположной стороне диэлектрика получают проводящий рисунок второго слоя. Далее все операции повторяют. Проводящий рисунок на первом слое выполняют на заключительном этапе изготовления МПП, так как фольга обеспечивает электрическую связь слоев на гальванических операциях. Надежность электрического соединения слоев МПП наивысшая по сравнению с другими. Однако число слоев ограничено возрастающей трудоемкостью изготовления МПП и многократно повторяющимися технологическими воздействиями на исходные материалы (химико-гальванические операции, склеивание слоев, травление меди, химико-механическая подготовка поверхностей).

Гибко-жесткая печатная плата (ГЖПП) состоит из двух жестких участков в виде МПП и гибкого участка (шлейфа), электрически их соединяющего (табл. 1.3, п. 13). Концы шлейфа опрессованы в структуре МПП и электрически связаны с проводящим рисунком плат с помощью металлизированных отверстий. Навесной монтаж выполняется на жестких участках ГЖПП, а шлейф изготовлен на фольгированном полиимиде с защитой проводников диэлектрической пленкой. Шлейф позволяет расположить жесткие участки на разных уровнях и обеспечить им относительную подвижность.

МПП с наращиваемыми наружными слоями (табл. 1.3, п. 14) с высокой плотностью проводящего рисунка на одном, двух или трех верхних слоях (структура *HDI – High Density Interconnections*) находят всё большее применение. Это связано с дальнейшей миниатюризацией ЭМ ЭВС, уменьшением размеров чип-КМП, применением ИМС с шагом менее 0,625 мм, увеличением количества выводов ИМС и их четырехсторонним расположением (типоразмеры *QFP*, *LQFP*), применением ИМС с матричными шариковыми выводами (*BGA*, *CSP*).

В качестве основы (сердцевины) таких МПП применяются ДПП (табл. 1.3, п. 3) или МПП с металлизацией сквозных отверстий (табл. 1.3, п. 11), на внешние поверхности которых наращивается жидкое покрытие или напрессовываются один (1–*n*–1) или два (2–*n*–2) слоя с созданием высокой плотности проводящего рисунка ($t/s = 0{,}100$ и менее), с глухими и скрытыми металлизированными микропереходами ($d_{\text{по}} = 0{,}12$; 0,1; 0,09 мм). В качестве материалов

наращиваемых слоев применяются фоточувствительные (фотопроявляемые) диэлектрики на основе эпоксидных смол, фольгированный и нефольгированный полиимиды. Переходные отверстия указанных диаметров получают лазерным сверлением или травлением диэлектрика.

1.4. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

1.4.1. Способы получения рисунка печатной платы

Большинство промышленных методов изготовления ПП (химический, комбинированный позитивный, электрохимический, фотоаддитивный и тентинг методы) включает два основных этапа: получение рисунка схемы и придание ему проводящих свойств (проводящий рисунок). На рис. 1.15 предлагается системный подход к анализу способов получения рисунка и проводящего рисунка ПП для дальнейшего синтеза их в том или ином методе изготовления платы.

Зная способы получения рисунка и проводящего рисунка, их разрешающую способность, уровень механизации, можно выбрать один из известных методов изготовления ПП или синтезировать новый метод для заданного класса точности ПП и объема выпуска. Рассмотрим технологию способов получения рисунка печатной схемы (рис. 1.15, 1.16).

Фотографический способ (рис. 1.16, *а*). Сущность способа – перенос изображения печатной схемы с инструмента (фотошаблона) на заготовку ПП, поверхность которой покрыта светочувствительным слоем фоторезиста. Экспонирование осуществляется методом контактной печати, т. е. фотошаблон без зазора совмещен с заготовкой ПП. Заготовку и фотошаблон ориентируют друг относительно друга с помощью базовых отверстий и штырей приспособления. В этом случае с фотошаблона на заготовку переносится изображение реперных знаков, относительно которых на заготовке получают пробивкой или сверлением базовые отверстия для использования их на последующих операциях, например при сверлении монтажных отверстий. Засвеченные участки фоторезиста проявляют и задубливают. На поверхности заготовки ПП образу-

ется позитивная маска при использовании негативного фотошаблона, и наоборот. Точность воспроизведения рисунка ($\pm 0,03$ мм) определяется точностью фотошаблона ($\delta = (\pm 0,005) \div (\pm 0,01)$) и погрешностями при экспонировании (дифракция) и задубливании (размытие границ) изображения. В качестве светочувствительного слоя используют сухой пленочный фоторезист (СПФ) толщиной 20; 40; 60 мкм, наносимый механически на тщательно подготовленную (промывка, травление) поверхность заготовки.

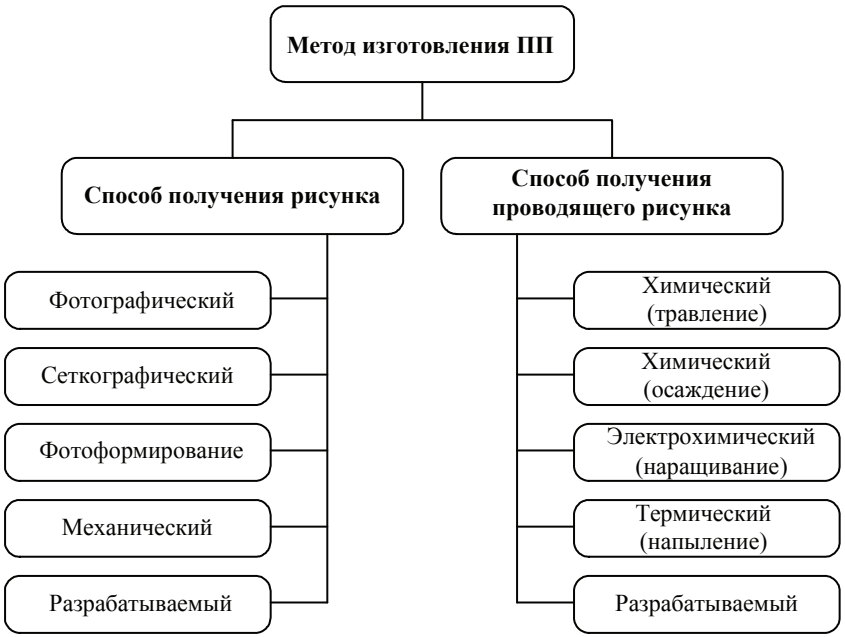


Рис. 1.15. Структурная схема к анализу и синтезу методов изготовления ПП

Сеткографический способ (рис. 1.16, *б*). Сущность способа – перенос изображения печатной схемы с инструмента (сетчатого трафарета) на заготовку ПП путем продавливания краски. В исходном состоянии трафарет находится на небольшом расстоянии от поверхности заготовки, а в зоне продавливания краски соприкасается с ней. Продавливание краски осуществляется специальным шпателем (ракелем), перемещаемым вручную или автоматически вдоль поверхности трафарета. В результате продавливания на поверхности заготовки образуется маска из краски, которую

сушат на воздухе или в камере. Точность воспроизведения рисунка ($\pm 0{,}1$ мм) зависит от точности линий на сетчатом трафарете ($\delta = (\pm 0{,}01) \div (\pm 0{,}07)$), материала сетки (шелк, нейлон, металл) и размера её ячеек; свойств краски (основа: винил, масляная краска, целлюлозные и асфальтовые лаки); подтекания краски (вязкость) и смазывания (оттенения) изображения. Заготовку ПП ориентируют с помощью базовых отверстий на штифтах, а сетчатый трафарет – на раме устройства трафаретной печати.

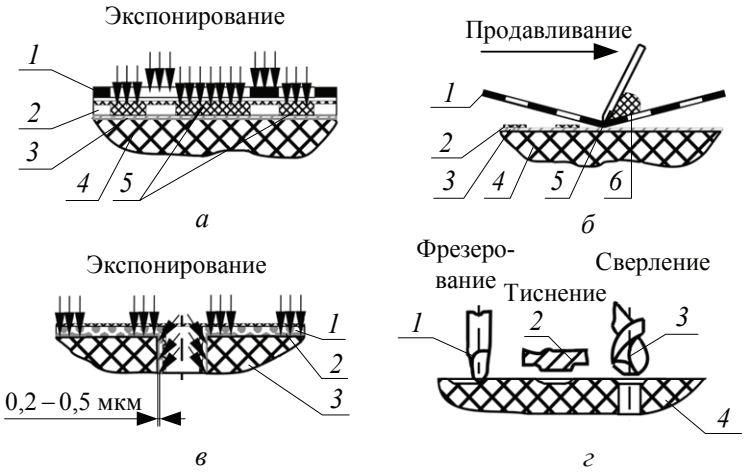


Рис. 1.16. Схемы способов получения рисунка:
а – фотографический способ (*1* – фотошаблон; *2* – фоторезист; *3* – медная фольга; *4* – основание ПП; *5* – маска (экспонированные участки фоторезиста));
б – сеткографический способ (*1* – сетчатый трафарет; *2* – маска из краски; *3* – медная фольга; *4* – основание ПП; *5* – ракель; *6* – запас краски);
в – способ фотоформирования (*1* – водный раствор солей металлов; *2* – тонкий (0,2–0,5 мкм) проводящий рисунок; *3* – основание ПП – нефольгированный диэлектрик);
г – механический способ (*1* – фреза; *2* – пуансон; *3* – сверло; *4* – основание ПП – нефольгированный диэлектрик)

Способ фотоформирования (рис. 1.16, *в*). Сущность способа – восстановление под действием УФ-излучения на поверхности нефольгированного основания заготовки ПП ионов металлов из водных растворов солей металлов на базе фотохимической реакции. В результате образуется рисунок в виде металлической пленки толщиной 0,2–0,5 мкм. При экспонировании металлическая пленка

может быть получена и на стенках металлизируемых отверстий. После химической подготовки поверхности нефольгированного диэлектрика с поверхностным адгезионным слоем на нее наносят водный раствор солей металлов и высушивают его. В результате экспонирования рисунка с помощью фотошаблона или лучом лазера на поверхности диэлектрика и в отверстиях восстанавливаются ионы металла, прочно сцепленные с подложкой. Для способа фотоформирования характерна высокая разрешающая способность изображения, так как толщина светочувствительного слоя чрезвычайно мала.

Механический способ (рис. 1.16, *г*). Сущность способа – получение рисунка печатной схемы в объеме диэлектрического основания ПП путем механического или термического воздействия на материал. Технологически отработанным методом механического воздействия является фрезерование нефольгированного диэлектрика с образованием рельефа ($\delta = \pm 0,05$). Монтажные и переходные отверстия получают сверлением с двух противоположных сторон заготовки ПП. При этом соосность отверстий должна находиться в пределах 0,1 мм. В качестве инструментов применяют твердосплавные резцы (фрезы) с трехгранной, полукруглой и лопаточной заточкой и твердосплавные сверла. В качестве оборудования используют сверлильные станки с ЧПУ с числом шпинделей от одного до четырех. Необходима высокая точность базовых отверстий заготовок ПП. При ширине рельефных проводников 0,125–0,127 мм возможна прокладка их с шагом $t_c = 0,25$ мм. Переходные отверстия должны находиться в пределах ширины рельефного проводника. Менее распространен метод выдавливания (тиснения) рельефа в диэлектрическом основании. Рисунок рельефа на плате-пуансоне получают лазерным фрезерованием на оборудовании с ЧПУ. Перед тиснением рельефа диэлектрическую заготовку подогревают. При лазерном «фрезеровании» рельефа на основании ПП применяют оборудование с ЧПУ, погрешность линий не превышает 0,01 мм, а погрешность по глубине – 0,008 мм.

1.4.2. Способы получения проводящего рисунка печатной платы

Химический способ – травление (рис. 1.17, *а*). Сущность способа – удаление (травление) меди в зоне непроводящего рисунка

(пробельных мест) печатной схемы. При этом проводящий рисунок должен быть защищен маской из фоторезиста, краски или металлорезиста (олово, олово–свинец). При травлении меди в зоне пробельных мест удаляется фольга и слой предварительной металлизации (если он был нанесен на заготовку ПП). Травление – сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором растворы на основе хлористого железа ($FeCl_3$), хлорной меди ($CuCl_2$) или персульфата аммония $[(NH_4)_2S_2O_8]$ служат окислителями (табл. 1.4).

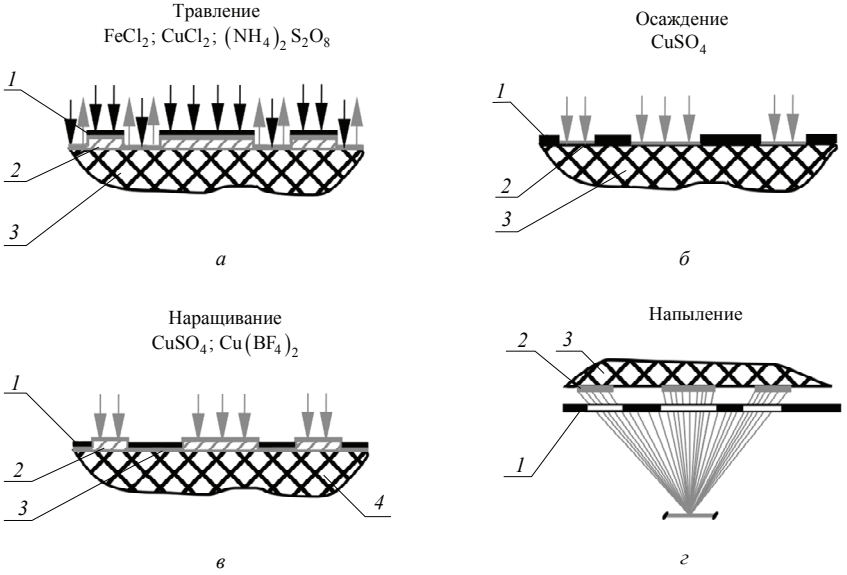


Рис. 1.17. Схемы способов получения проводящего рисунка:
а – травление медной фольги (*1* – маска; *2* – проводящий рисунок – фольга; *3* – основание ПП);
б – химическое осаждение меди (*1* – маска; *2* – проводящий рисунок из осажденной меди; *3* – основание ПП);
в – гальваническое наращивание меди в зонах проводящего рисунка (*1* – маска; *2* – проводящий рисунок – осажденная медь; *3* – слой предварительного меднения; *4* – основание ПП);
г – термическое вакуумное напыление меди (*1* – трафарет; *2* – проводящий рисунок; *3* – диэлектрическое основание ПП)

Геометрия проводящего рисунка зависит от стойкости защитной маски, характеристик травильного раствора и скорости травления (точность воспроизведения $\pm 0,01$). Травление сопровождается боковым подтравливанием проводящего рисунка, глубина ко-

торого соизмерима с толщиной слоя меди, удаляемой с пробельных мест. Величина подтравливания зависит и от способа подачи в рабочую зону травильного раствора: погружение в раствор, струйное травление. В производстве отдают предпочтение установкам струйного травления.

Таблица 1.4

Реакции травления

Реакция	Описание реакции
$2FeCl_3 + Cu \rightarrow CuCl_2 + 2FeCl_2$	Обеспечивает высокую и равномерную скорость травления со степенью насыщения медью 50–60 г/л, непригоден при наличии маски из металлорезиста
$CuCl_2 + Cu \rightarrow Cu_2Cl_2$	Дешев, легко регенерируется; имеет степень насыщенности медью 120–150 г/л
$(NH_4)_2S_2O_8 + Cu \rightarrow CuSO_4 + (NH_4)_2SO_4$	Применяется для травления меди в случае защиты проводящего рисунка металлорезистом (олово, олово–свинец), легко регенерируется

Химический способ – осаждение (рис. 1.17, *б*). Сущность способа – осаждение меди на диэлектрик в зоне проводящего рисунка в качестве подслоя для последующего гальванического наращивания меди или в качестве основного слоя путем толстослойного химического меднения. Медь, осажденная в качестве подслоя, имеет толщину 0,25–1,0 мкм (возможно до 2,0–3,0 мкм) и служит для подсоединения заготовки ПП к катоду электролитической ванны при последующем гальваническом наращивании. Химическое осаждение происходит из раствора на основе сернокислой меди ($CuSO_4$) со скоростью 1–2 мкм/ч вследствие восстановления ионов двухвалентной меди на активированной поверхности диэлектрика. Активация диэлектрика осуществляется в совмещенном растворе двухлористого олова ($SnCl_2$) – сенсибилизация – и двухлористого палладия ($PdCl_2$) – активация. Раствор содержит также соляную кислоту (HCl) и хлористый калий (KCl). Толстослойное химическое меднение требует увеличения скорости осаждения (2 мкм/ч и более) и применения системы автоматического управления процессом. Геометрия проводящего рисунка при химическом осаждении меди зависит от стойкости маски и её толщины. При тонкой маске возможно боковое разращивание осаждаемой меди.

Электрохимический способ – наращивание (рис. 1.17, *в*). Сущность способа – увеличение толщины предварительно осажденного слоя химической меди, а также образование проводящего рисунка схемы с толщиной меди в металлизируемых отверстиях не менее 25 мкм. Гальваническим осаждением наносят металлорезист (олово – 3–5 мкм, олово–свинец – 8–20 мкм) для защиты проводящего рисунка при травлении меди с пробельных мест. К этому способу прибегают для создания на проводящем рисунке (например, в зоне печатных контактов) специальных покрытий (палладий, золото, родий и т. п.).

Медь осаждают, используя аноды из соответствующего металла и электролиты на основе сернокислой меди $CuSO_4$ (хорошая рассеивающая способность, пластичный осадок) и борфтористой меди $[Cu(BF_4)_2]$. Скорость осаждения составляет 60 мкм/ч. Металлорезист осаждают из электролита на основе борфтористого олова и свинца $[Sn(BF_4)_2; Pb(BF_4)_2]$.

Геометрия проводящего рисунка при наращивании меди и металлорезиста зависит от стойкости маски в электролитах, её толщины, а также толщины осаждаемого металла. При тонкой маске возможно боковое разращивание металла. Точность воспроизведения рисунка – $(\pm 0,01) \div (\pm 0,05)$.

Термический способ – напыление (рис. 1.17, *г*). Сущность способа – осаждение меди на диэлектрик в зоне проводящего рисунка путем напыления через трафарет. Медь испаряется из тигля в условиях вакуума. Процесс ведется в вакуумной установке.

1.4.3. Химический метод изготовления печатных плат

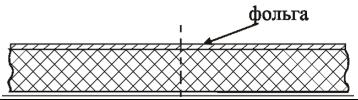
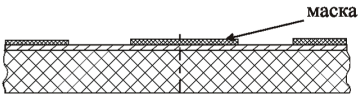
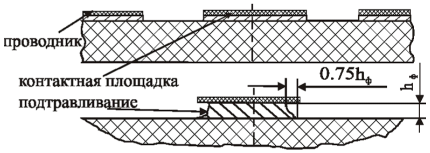
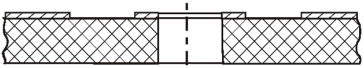
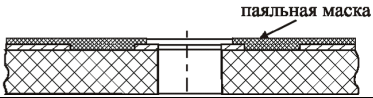
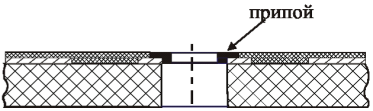
Химический метод (табл. 1.5). Применяется в тех случаях, когда исходными материалами являются фольгированные диэлектрики (ГФ, СФ, СТФ, ФТС, FR и другие). В аббревиатуре отечественных материалов буква «Ф» означает «фольгированный». Пример марки материала: СФ-1-35, где СФ – стеклотекстолит фольгированный; 1 – одностороннее фольгированный; толщина фольги – $h_ф = 35$ мкм.

Сущность химического метода (субтрактивный метод – *subtratio* (лат.) – «отнимать, вычитать») – образование проводящего рисунка путем удаления (травления) фольги в зонах, образующих непрово-

дящий рисунок, т. е. в зонах пробельных мест (табл. 1.5, этап 3). При этом будущий проводящий рисунок защищает маска из фоторезиста, нанесенного фотоспособом (рис. 1.16, *а*), или из краски, нанесенной сеткографическим способом (рис. 1.16, *б*).

Таблица 1.5

Химический метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа фольгированного диэлектрика на заготовки ПП. Химико-механическая очистка поверхности	Односторонне фольгированная заготовка конечных размеров 
2	Получение рисунка фотографическим (фоторезист) или сеткографическим (краска) способом	На поверхность фольги заготовки нанесен позитивный рисунок печатной схемы 
3	Химическое травление фольги на пробельных местах печатной схемы. Воздействие сопровождается подтравливанием фольги под маской	Фольга удалена в местах, не закрытых маской, с образованием проводящего рисунка печатной схемы 
4	Химико-механическое удаление маски. Сверление монтажных отверстий в зоне контактных площадок проводящего рисунка	В заготовке для односторонней печатной платы выполнены монтажные отверстия 
5	Нанесение, сушка и экспонирование рисунка паяльной маски (контактные площадки открыты для пайки)	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской (кроме мест пайки навесных компонентов) 
6	Флюсование и горячее лужение мест пайки, не закрытых паяльной маской. Окончательная промывка готовой печатной платы	На контактные площадки нанесен припой 

Для травления применяют травители на основе хлорного железа ($FeCl_3$), хлорной меди ($CuCl_2$), персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$ и некоторые другие травители.

В зависимости от травителя и условий травления (температура, насыщенность медью) скорость травления колеблется в пределах 20–35 мкм/мин. Качество травления характеризуется величиной бокового подтравливания проводящего рисунка, которое составляет $0{,}75\,h_ф$ при струйном травлении.

Подтравливание следует учитывать при расчете узких мест и определении геометрии рисунка на фотошаблонах:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1{,}5h_ф;\;\; D_{\min} = D_{1\min} + 1{,}5h_ф, \qquad (1.1)$$

где $t_{1\min}$ – исходная минимальная ширина сигнального проводника, заданная классом точности ПП или получающаяся на основании электрического расчета печатной схемы; $D_{1\min}$ – минимально допустимый диаметр круглой контактной площадки в зоне монтажного или переходного отверстия.

При дальнейшем уменьшении $t_{1\min}$ и $D_{1\min}$ следует учитывать фактор прочности сцепления фольги, приклеенной к диэлектрику, при механических, химических и температурных воздействиях.

Области применения химического метода – изготовление ОПП с монтажными неметаллизированными отверстиями и без монтажных отверстий, слоев МПП без межслойных переходов, ГПК и гибких шлейфов, гибко-жестких ПП.

1.4.4. Комбинированный позитивный метод изготовления печатных плат

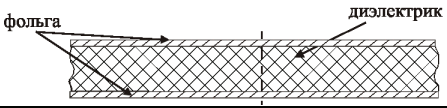
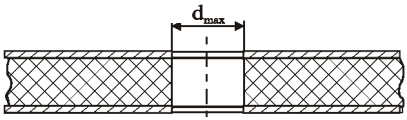
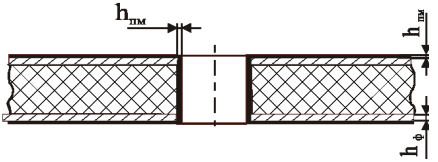
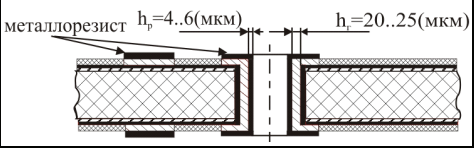
Комбинированный позитивный метод (табл. 1.6) разработан для изготовления ПП на двусторонне фольгированных диэлектриках (СФ-2-50, ГФ-2, ФТС-2, СТФ-2 и других). Наличие в ДПП металлизированных отверстий требует сочетания операций: *удаление меди* с пробельных мест двух проводящих слоев и *осаждение меди* на стенки металлизируемых отверстий. Отсюда название метода – *комбинированный*.

В отличие от химического метода, монтажные или переходные отверстия ДПП получают до образования проводящего рисунка на слоях (табл. 1.6, этап 2).

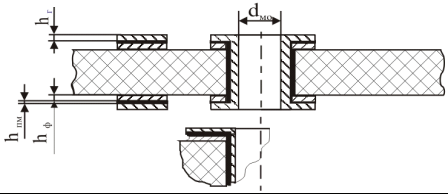
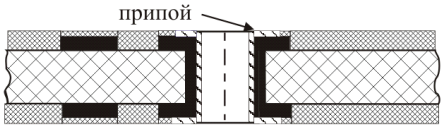
При предварительной металлизации отверстий слой $h_{пм} = 5 \div 7$ мкм химико-гальванически осаждается на всех поверхностях заготовки (табл. 1.6, этап 3). Однако этой толщины недостаточно для надежного электрического соединения слоев ДПП металлизированными отверстиями.

Таблица 1.6

Комбинированный позитивный метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	2	3
1	Раскрой и разделение листа фольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Химико-механическая очистка поверхностей заготовки	Двусторонне фольгированная заготовка конечных размеров 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Подготовка отверстий под металлизацию	Заготовка с просверленными монтажными и переходными отверстиями 
3	Подготовка стенок отверстий и активация поверхностей под осаждение меди. Химическая или прямая металлизация с последующей гальванической затяжкой ($h_{пм} = 5 \div 7$ мм)	Стенки отверстий и поверхность фольги покрыты слоем предварительного меднения $h_{пм}$ 
4	На фольгу ламинированием нанесен сухой пленочный фоторезист. Рисунок экспонирован с позитивного фотошаблона, проявлен и задублен	На поверхностях фольги заготовки образован негативный рисунок печатной схемы
5	Гальваническое наращивание меди на стенках отверстий ($h_г$) и в зонах проводящего рисунка на поверхности фольги. Гальваническое осаждение металлорезиста Sn на проводящий рисунок ($h_р$)	В зонах, не закрытых СПФ, нанесен слой меди $h_г$ и слой металлорезиста (олово) $h_р$ 

Окончание табл. 1.6

1	2	3
6	Удаление фоторезистивной маски. Травление меди ($h_ф + h_{пм}$) с пробельных мест. Травление металлорезиста (Sn) на проводящем рисунке	Проводящий рисунок выполнен в объеме и на поверхности диэлектрического основания 
7	Нанесение, сушка и экспонирование рисунка жидкой паяльной маски (контактные площадки открыты для пайки выводов навесных компонентов)	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской (кроме мест пайки навесных компонентов). Примечание: проводящий рисунок изображен без разделения слоев меди
8	Флюсование и горячее лужение мест пайки, не закрытых паяльной маской. Окончательная промывка готовой платы	На контактные площадки проводящего рисунка и на стенки отверстий нанесен припой 

Примечание: СПФ толщиной 20; 40; 60 мкм препятствует разращиванию проводящего рисунка при гальваническом осаждении меди. При травлении меди с пробельных мест происходит подтравливание проводящего рисунка на величину $h_ф + h_{пм}$.

На этапе 5 (табл. 1.6) осуществляется гальваническое наращивание меди в отверстиях ($h_г = 20 \div 25$ мкм) и на всех участках проводящего рисунка слоев. При этом пробельные места защищают маской из фоторезиста (сухой пленочный фоторезист, $h_{фр} = 20; 40; 60$ мкм) или краски ($h_{кр} = 10$ мкм). На фольгированных поверхностях заготовки образуется негативный рисунок (табл. 1.6, этап 4). Следовательно, для его получения необходим позитивный фотошаблон или сетчатый трафарет. Отсюда полное название метода – *комбинированный позитивный метод*.

Для того чтобы защищать проводящий рисунок ДПП при травлении слоя ($h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}$) с пробельных мест (табл. 1.6, этап 6), его закрывают путем гальванического осаждения металлорезиста (олово Sn или олово–свинец Sn–Pb) – этап 5 (табл. 1.6). Если металлорезист олово ($h_{\text{р}} = 3 \div 5$ мкм), то после травления меди его также удаляют травлением. Паяемость проводящего рисунка обеспечивается нанесением паяльной маски (табл. 1.6, этап 7) и горячим лужением открытых мест пайки (табл. 1.6, этап 8).

Если металлорезист олово–свинец ($h_{\text{р}} = 10 \div 20$ мкм), то его оставляют на проводящем рисунке ДПП, а после травления меди с пробельных мест оплавляют. При этом паяльная маска наносится поверх оплавленного сплава олово–свинец.

При анализе геометрии проводящего рисунка ДПП учитывают явление разращивания проводников и других элементов печатного рисунка при гальваническом осаждении меди и металлорезиста ($h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$) и явление подтравливания слоя ($h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}$) при удалении (травлении) меди с пробельных мест.

Если маска из краски или тонкого СПФ, то учитывается подтравливание и разращивание:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1{,}5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}; \tag{1.2}$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1{,}5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}. \tag{1.3}$$

Если маска из толстого СПФ ($h_{\text{СПФ}} = 40; 60$ мкм), то разращивание отсутствует и учитывается только подтравливание:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1{,}5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right); \tag{1.4}$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1{,}5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right). \tag{1.5}$$

Таким образом, при необходимости изготовления ДПП 4-го и 5-го классов точности не следует применять сеткографический способ нанесения рисунка, а также следует использовать тонкофольгированный диэлектрик СФ-2-9, СФ-2-18 и СТПА-5 ($h_{\text{ф}} = 9; 18; 5$ мкм соответственно).

Комбинированный позитивный метод – типовой и наиболее распространенный в производстве ПП. Он применяется для изготовления ДПП различных классов точности, внутренних слоев МПП с металлизированными переходными отверстиями, наружных сло-

ев МПП с металлизацией сквозных отверстий и гибких ПП с металлизированными отверстиями.

1.4.5. Тентинг-метод изготовления печатных плат

Тентинг-метод (табл. 1.7) разработан как менее трудоемкий для производства ДПП на двусторонне фольгированных диэлектриках. Основная его особенность – защита проводящего рисунка при травлении меди с пробельных мест не слоем металлорезиста (Sn, Sn–Pb), а слоем фоторезиста, который в зоне металлизированных отверстий образует тент (завеску). Технология комбинированного метода при этом видоизменяется (см. табл. 1.6).

Сразу после предварительной металлизации ($h_{\text{пм}}$) следует гальваническое наращивание меди ($h_{\text{г}}$ до 35 мкм) в отверстиях и на поверхности фольги. Затем проводящий рисунок защищают с применением СПФ ($h_{\text{фр}} = 40; 60$ мкм), экспонируя его с негативного фотошаблона, а медь с пробельных мест удаляют травлением $CuCl_2$, который хорошо поддается регенерации и утилизации. При этом для сохранения прочности завесок несколько увеличивают диаметры контактных площадок и увеличивают толщину применяемого фоторезиста (до 60 мкм). В тентинг-методе разращивание проводящего рисунка отсутствует, а подтравливание снижает его точность:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}} + h_{\text{г}}\right); \qquad (1.6)$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}} + h_{\text{г}}\right), \qquad (1.7)$$

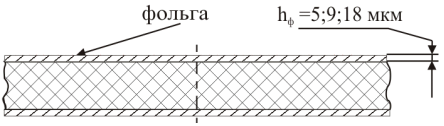
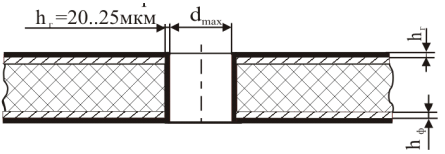
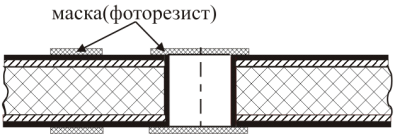
поэтому целесообразно применять тонкофольгированные диэлектрики ($h_{\text{ф}} = 5; 9; 18$ мкм).

Тентинг-метод хорошо сочетается с технологией прямой металлизации диэлектрика в отверстиях, когда на стадии активации исключают химическое осаждение меди и сразу переходят к гальваническому осаждению. Паяемость ПП, изготовленных тентинг-методом, обеспечивают нанесением паяльной маски и горячим лужением мест, не закрытых ею.

Для изготовления прецизионных ПП применяются аддитивные (*additio* (лат.) – «присоединять, прибавлять») методы, реализуемые на нефольгированных диэлектриках. Рассмотрим вначале полуаддитивный (электрохимический) метод.

Таблица 1.7

Тентинг-метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа тонкофольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Химико-механическая очистка поверхностей заготовки	Двусторонне фольгированная заготовка конечных размеров 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Химическая или прямая металлизация, гальваническое наращивание Cu до заданной толщины в отверстиях и на поверхности фольги	Заготовка с переходными отверстиями металлизирована гальваническим осаждением меди Cu в объеме и на поверхности 
3	Нанесение рисунка фотоспособом с применением СПФ с негативного фотошаблона	На заготовке позитивный рисунок схемы. Отверстия закрыты завесками (тентами) из СПФ от проникновения травильных растворов 
4	Травление $h_г$ и $h_ф$ с пробельных мест, удаление маски из СПФ, нанесение паяльной маски, горячее лужение проводящего рисунка	Заготовка закрыта паяльной маской, места пайки подвергнуты горячему лужению

Примечание: тонкая фольга и минимальная толщина гальванически осажденной меди уменьшает величину подтравливания проводящего рисунка печатной платы. Отверстия полностью металлизированы до нанесения рисунка. Металлорезист не применяется. Завески (тенты) из СПФ защищают отверстия и КП от действия травильного раствора.

1.4.6. Электрохимический метод изготовления печатных плат

В **электрохимическом методе** (табл. 1.8) на нефольгированную заготовку с просверленными отверстиями путем активации, химиче-

ского осаждения ($h_{\text{хм}} \cong 1$ мкм) и гальванической затяжки (до 5–7 мкм) наносят слой предварительного меднения ($h_{\text{пм}}$). Толщина слоя достаточна для дальнейшего гальванического наращивания меди на проводящий рисунок (табл. 1.8, этап 4) и осаждения металлорезиста (Sn). Толстая маска сухого пленочного фоторезиста (табл. 1.8, этап 3) препятствует разращиванию меди, а при травлении слоя $h_{\text{пм}}$ с пробельных мест подтравливание незначительно:

$$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}}; \tag{1.8}$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}}. \tag{1.9}$$

Все эти технологические условия позволяют получить проводящий рисунок 4-го и 5-го классов точности и даже точнее.

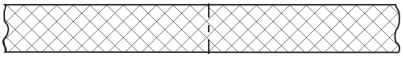
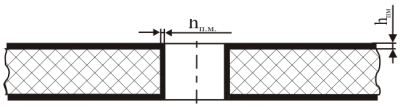
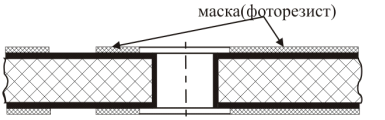
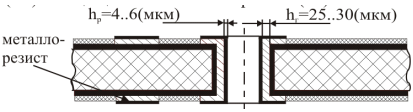
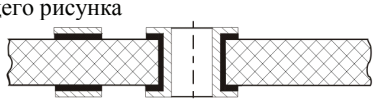
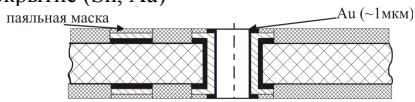
Таким образом, электрохимический (полуаддитивный) метод предусматривает предварительное меднение ($h_{\text{пм}}$) всей заготовки в объеме (отверстия) и на поверхности диэлектрика путем химико-гальванического осаждения меди. Слой металлизации служит катодом при дальнейшем гальваническом наращивании меди во всех зонах проводящего рисунка. После достижения заданной расчетной толщины Cu слой предварительного меднения ($h_{\text{пм}}$) удаляют с пробельных мест травлением (отсюда название – «полуаддитивный»).

Фотоаддитивный метод разработан для изготовлении ПП на нефольгированном диэлектрике (табл. 1.9). В нефольгированной диэлектрической заготовке (материал СТЭК) сверлят монтажные и переходные отверстия. На заготовку наносят раствор, содержащий соли металлов (Cu, Ag) и обладающий фотосвойствами. Нанесенный и высушенный раствор экспонируют УФ-излучением через негативный фотошаблон. При ультрафиолетовом облучении из раствора на диэлектрике осаждаются ионы металлов, образуя тончайшую металлическую пленку. При одновременном экспонировании с двух сторон заготовки металлическая пленка образуется и на стенках отверстий. Следует при этом учитывать отношение $d_{\text{мо}} / H_{\text{пп}}$.

На диэлектрическом основании образуется тончайший металлический рисунок печатной схемы. Обеспечить толщину проводящего рисунка позволяет его толстослойное химическое меднение. Применение гальванического наращивания меди невозможно, так как все компоненты рисунка не соединены в единую электрическую цепь.

Таблица 1.8

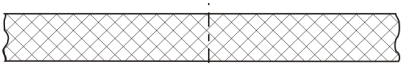
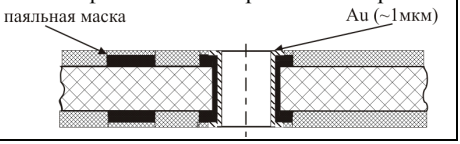
Электрохимический (полуаддитивный) метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа нефольгированного диэлектрика на заготовки ДПП. Химико-механическая очистка поверхностей заготовки	Заготовка конечных размеров из нефольгированного диэлектрика 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ, активация (Sn) и сенсибилизация (Pd) диэлектрика. Химическая металлизация (Cu) и гальваническая затяжка ($h_{\text{ПМ}} = 5 \div 7$ мкм) медью	Заготовка с просверленными монтажными и переходными отверстиями металлизирована в объеме (стенки отверстий) и на поверхности слоем предварительного меднения ($h_{\text{ПМ}}$) 
3	Нанесение СПФ на металлизированную заготовку. Рисунок экспонирован с позитивного фотошаблона, проявлен и задублен	На заготовку нанесен негативный рисунок печатной схемы 
4	Гальваническое наращивание меди $h_{\text{Г}}$ в зонах проводящего рисунка (сплошной слой $h_{\text{ПМ}}$ на диэлектрическом основании – катод). Гальваническое осаждение металлорезиста (Sn)	Проводящий рисунок доведен до оптимальной толщины (Cu) и защищен слоем металлорезиста (Sn) 
5	Удаление фоторезистивной маски, травление $h_{\text{ПМ}} = 5 \div 7$ мкм с пробельных мест, травление металлорезиста (Sn)	Слой предварительного меднения ($h_{\text{ПМ}}$) удален с пробельных мест диэлектрического основания. Металлорезист удален с проводящего рисунка 
6	Нанесение жидкой паяльной маски, сушка и экспонирование рисунка. Иммерсионное покрытие мест пайки на проводящем рисунке	Проводящий рисунок закрыт паяльной маской. На места пайки выводов навесных компонентов нанесено иммерсионное покрытие (Sn, Au) 

Примечание. Разращиванию проводящего рисунка препятствует толстая маска СПФ. Удаление с пробельных мест тонкого слоя $h_{\text{пм}} = 5 \div 7$ мкм дает минимальное подтравливание проводящего рисунка. Тонкое иммерсионное покрытие сохраняет геометрию контактных площадок, что обеспечивает высокое качество пайки выводов ИМС с малым шагом. Метод обеспечивает точность проводящего рисунка $t/s = 0{,}1$ и менее.

Таблица 1.9

Фотоаддитивный метод изготовления ПП

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой и разделение листа нефольгированного диэлектрика на заготовки. Очистка поверхности заготовки	Заготовка конечных размеров из нефольгированного диэлектрика 
2	Сверление отверстий на станке с ЧПУ. Нанесение фотоактивируемого катализатора. Экспонирование и активация с образованием тонкого металлического рисунка	Заготовка с отверстиями, все поверхности которой покрыты фотоактивируемым катализатором.
3	Тонкослойное химическое меднение (ТХМ) проводящего рисунка. Отмывка заготовки от технологических растворов и неактивированного катализатора. Нанесение паяльной маски и иммерсионного покрытия	Проводящий рисунок заданной толщины закрыт паяльной маской. В местах пайки нанесено финишное иммерсионное покрытие 

Примечание. Применение метода для изготовления ПП высоких классов точности и плотности проводящего рисунка. Недостаток: длительный контакт диэлектрика с раствором ТХМ в связи с продолжительностью операции химического меднения.

Процесс изготовления платы (например, ДПП) заканчивается нанесением паяльной маски и иммерсионным осаждением соответствующих металлов в местах пайки навесных компонентов и проводящего рисунка.

Основное преимущество фотоаддитивного метода – получение ПП 4-го, 5-го классов точности.

Если пробельные места рисунка закрыты фоторезистивной маской, то разращивание $h_{\text{тхм}}$ отсутствует:

$$t_{\min} = t_{1\min}; \tag{1.10}$$

$$D_{\min} = D_{1\min}. \tag{1.11}$$

Если маски нет, то происходит разращивание проводящего рисунка:

$$t_{\min} = t_{1\min} + h_{\text{тхм}}; \tag{1.12}$$

$$D_{\min} = D_{1\min} + h_{\text{тхм}}. \tag{1.13}$$

Так как фотоаддитивный метод реализуется на нефольгированных диэлектриках, то в ТП изготовления отсутствует операция травления проводящего рисунка, что обеспечивает более высокую геометрическую точность.

Выше были изложены основные этапы базовых (типовых) методов изготовления ПП: химический, комбинированный позитивный, электрохимический, фотоаддитивный и тентинг методы.

1.5. ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ТИПОВ ПП

ОПП с неметаллизированными отверстиями (табл. 1.3, п. 1) имеют невысокий класс точности, а большие диаметры контактных площадок ($D_{\text{кп}}$) препятствуют плотной прокладке проводников. Основной метод их изготовления – химический (табл. 1.5) с нанесением рисунка печатной схемы фото- и сеткографическим способом (рис. 1.16, *а*, *б*).

Опытные и макетные ОПП имеют ограниченное количество отверстий, которые целесообразно сверлить по разметке. В центре круглой КП размещается метка ($d_{\text{м}} = 1{,}0$), перенесенная с фотошаблона или сетчатого трафарета на этапе получения рисунка печатной схемы. Оператор визуально или с помощью оптического наведения ориентирует сверло по центру КП. Возможное смещение центра отверстия относительно центра КП ($\delta_{\text{отв}} = \pm 0{,}5$) компенсируют увеличением $D_{\text{кп}}$.

Применяя химический метод для изготовления ОПП, следует учитывать явление бокового подтравливания проводящего рисунка под маской (фоторезист, краска) на величину $1{,}5h_{\text{ф}}$ при струйном травлении.

Для обеспечения паяемости проводящего рисунка ОПП в местах коммутации с выводами навесных компонентов на ПП наносят паяльную маску, оставляя открытыми места пайки. Затем ПП подвергают горячему лужению припоем (табл. 1.5, этапы 5 и 6).

При изготовлении ОПП можно защитить проводящий рисунок позитивной маской из металлорезиста (Sn–Pb). Его осаждают гальванически (слой фольги – катод), предварительно защитив пробельные места фоторезистом или краской. Металлорезист надежно защищает проводящий рисунок при травлении фольги с пробельных мест, а после оплавления обеспечивает её паяемость. Недостаток – увеличенный расход металлорезиста, который приходится осаждать на весь проводящий рисунок, а не только в местах пайки навесных компонентов.

ОПП без монтажных отверстий (табл. 1.3, п. 2) также изготавливают химическим методом (табл. 1.5). Отсутствие отверстий упрощает ТП и позволяет задать плотность проводящего рисунка по 4-му и 5-му классу точности (табл. 1.1) при условии применения маски из фоторезиста и минимально возможной толщине фольги. Если ОПП предназначена для монтажа компонентов, монтируемых на поверхность, то её закрывают паяльной маской и подвергают горячему лужению места пайки (КП) навесных компонентов.

Если ОПП является внутренним слоем МПП, то после получения проводящего рисунка травлением (табл. 1.5, этап 3) слой готовят (химико-механическая очистка) к операции прессования в составе пакета слоев МПП.

ДПП на диэлектрическом основании (табл. 1.3, п. 3), как правило, имеет металлизированные отверстия, электрически соединяющие обе стороны двусторонне фольгированной заготовки. При её изготовлении необходимо травлением фольги получить проводящий рисунок печатной схемы на обеих сторонах заготовки и электрически соединить обе стороны с помощью металлизированных переходных отверстий.

Для изготовления таких ДПП применятся комбинированный позитивный метод (табл. 1.6). Вначале в технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия, с помощью которых её ориентируют на столе сверлильного станка с ЧПУ. Сверление переходных отверстий по разметке (см. ОПП) не может быть применено, так как на обеих сторонах заготовки отсутствует какой-либо рисунок. Станок по программе позволяет получить в заданных ко-

ординатах любое количество отверстий, в том числе и различных диаметров путем автоматической замены сверл в процессе цикла сверления. Диэлектрические стенки отверстий не могут обеспечить электрическую связь двух сторон заготовки ДПП и должны быть металлизированы (табл. 1.6, этап 3).

Диэлектрик в отверстиях активируют и проводят предварительное меднение ($h_{\text{пм}}$) химико-гальваническим способом или прямую металлизацию с последующей гальванической затяжкой. Слой $h_{\text{пм}}$ имеет толщину 5–7 мкм и достаточен для дальнейшего гальванического наращивания меди в отверстиях и на всех других участках проводящего рисунка. При этом маска из СПФ, закрывающая пробельные места, должна быть достаточно толстой ($h_{\text{фр}} = 40,60$ мкм), чтобы препятствовать разращиванию гальванически осаждаемой меди ($h_{\text{г}} = 20 \div 25$ мкм) и металлорезиста ($h_{\text{р}} = 3 \div 5$ мкм).

Окончательно проводящий рисунок ДПП получают травлением меди с пробельных мест (слой $h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}$). Чем тоньше фольга диэлектрика ($h_{\text{ф}} = 5; 9; 12; 18$ мкм), тем меньше боковое подтравливание и точнее геометрия проводящего рисунка.

Таким образом, минимизация разращивания и подтравливания меди, обеспечение стойкости СПФ в процессе травления меди позволяют с помощью комбинированного позитивного метода получить ДПП 4-го и 5-го классов точности.

В ЭВС специального назначения применяются **ДПП на металлическом основании** (табл. 1.3, п. 4). Перед созданием проводящего рисунка основание ДПП должно быть заизолировано.

Металлическое основание с предварительно просверленными монтажными и переходными отверстиями изолируют нанесением слоя диэлектрика в виде эпоксидного или керамического покрытия. При этом диаметр отверстий и толщина основания ДПП должны обеспечить надежное покрытие стенок отверстий. Это условие ограничивает возможность получения на металлическом основании проводящего рисунка высоких классов точности.

Изолированное основание ДПП представляет собой нефольгированную диэлектрическую заготовку, проводящий рисунок которой может быть получен электрохимическим методом (табл. 1.8). На изолирующий слой химико-гальваническим способом осаждают слой $h_{\text{пм}}$, который в ходе ТП выполняет роль катода при галь-

ваническом наращивании меди в отверстиях и в других местах проводящего рисунка. При удалении слоя $h_{\text{пм}}$ с пробельных мест подтравливание минимально ($1{,}5h_{\text{пм}}$). Отсюда большая точность проводящего рисунка. Паяемость печатного монтажа ДПП на металлическом основании обеспечивается горячим лужением после нанесения паяльной маски.

ДПП без монтажных отверстий (табл. 1.3, п. 5) изготавливается на двусторонне фольгированном основании (СФ-2, FR4-2) химическим методом (табл. 1.5). Основная задача – точная взаимная ориентация двух фотошаблонов относительно друг друга и заготовки ДПП. Она решается с помощью реперных знаков, базовых отверстий и штифтов – кнопок на этапе экспонирования рисунков.

Отсутствие металлизированных отверстий позволяет увеличить плотность проводящего рисунка, а при тонкой фольге уменьшить боковое подтравливание и тем самым получить ДПП 3–5-го классов точности. Комплект типового оборудования для маршрута производства ДПП представлен на рис. 1.18 (*www.ostec-group.ru*).

Гибкие печатные платы (табл. 1.3, п. 6) могут быть односторонними, двусторонними и многослойными. Они обладают статической и динамической гибкостью и применяются практически во всех видах современных ЭВС. ГПП позволяют осуществить трехмерную компоновку электронных модулей с одновременным уменьшением количества жестких разъемов-соединителей.

Основным материалом для изготовления ГПП является односторонне фольгированный (ПФ-1) и двусторонне фольгированный (ПФ-2) полиимид толщиной 0,05; 0,1 мм, обладающий гибкостью в диапазоне температур от –200 до +300ºС, размерной стабильностью и химической стойкостью (исключение – травится в горячей щелочи).

Односторонняя ГПП изготавливается химическим методом (табл. 1.5), а двусторонняя – комбинированным позитивным методом (табл. 1.6) с металлизацией отверстий. Многослойная ГПП состоит из нескольких проводящих слоев, изготовленных на тонком полиимидном основании и соединенных прессованием с применением, например, акрилового адгезива, свойства которого хорошо сочетаются со свойствами полиимидной пленки.

Наружные проводящие слои ГПП защищают полиимидным покрытием, не снижающим их устойчивость к перегибам. Фоточувствительные свойства покрытия позволяют выполнить в нем окна доступа к контактным площадкам проводящего рисунка и металлизированным отверстиям. Паяемость КП обеспечивается нанесением различ-

ных покрытий, длительно сохраняющих способность к смачиванию припоем. К ним относятся: иммерсионное серебро (ImmAg), иммерсионное олово (ImmSn), горячее лужение (*HASL*-процесс) и другие.

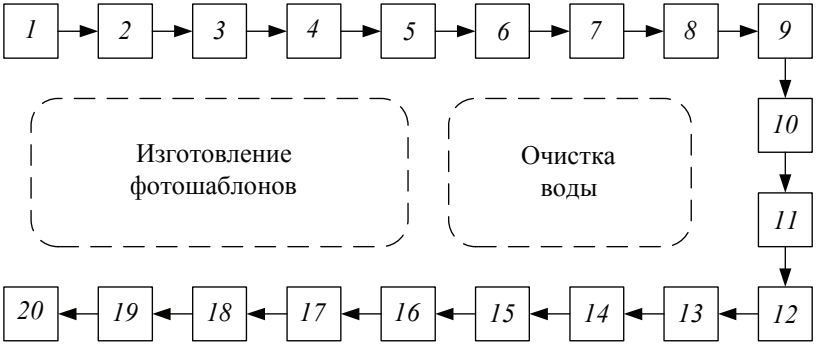
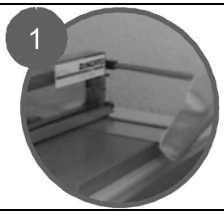
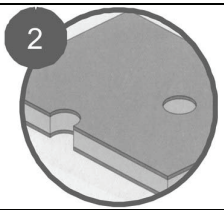
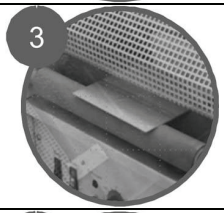
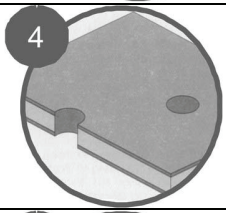
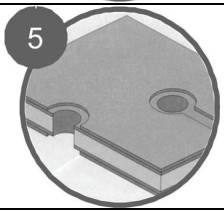
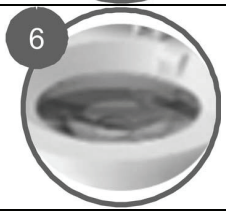


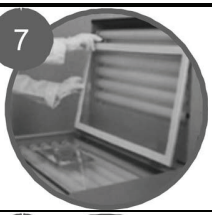
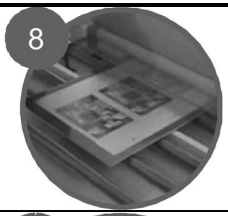
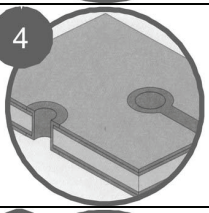
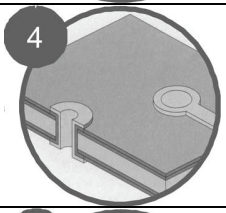
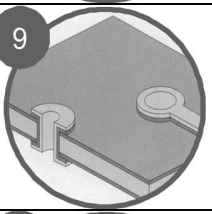
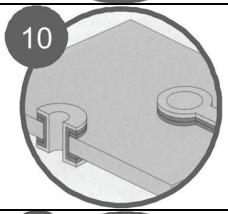
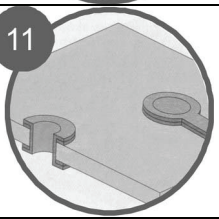
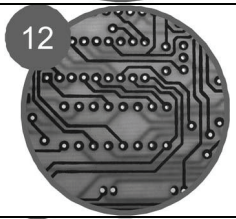
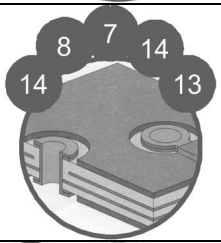
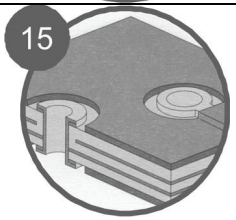
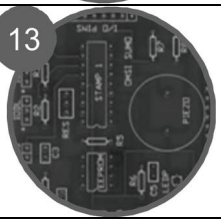
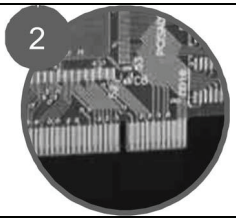
Рис. 1.18. Комплект типового оборудования для маршрута производства ДПП (*www.ostec-group.ru*)

Таблица 1.10

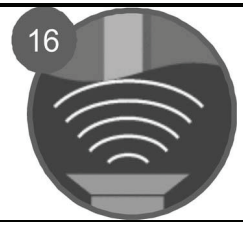
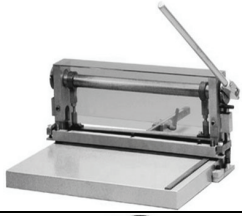
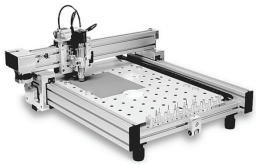
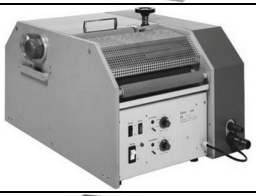
К рисунку 1.18

Название	Иллюстрация	Название	Иллюстрация
1	2	3	4
Наименование операций			
1. Нарезка заготовок		2. Сверление сквозных отверстий	
3. Зачистка поверхностей		4. Прямая металлизация сквозных отверстий	
5. Ламинирование фоторезиста		6. Базирование фотошаблона	

Продолжение табл. 1.10

1	2	3	4
7. Экспонирование фоторезиста		8. Проявление фоторезиста	
9. Гальваническое меднение сквозных отверстий		10. Осаждение металлорезиста	
11. Удаление фоторезиста		12. Травление рисунка	
13. Удаление металлорезиста		14. Контроль вытравленного рисунка	
15. Нанесение композиции для маски, сушка, экспонирование, проявление, термодубление		16. Нанесение финишных покрытий	
17. Маркировка		18. Фрезерование сложного контура	

Продолжение табл. 1.10

1	2	3	4
19. Финишная отмывка плат от технологических загрязнений		20. Контроль по признакам внешнего вида	
Соответствующее наименование оборудования			
1. Гильотинные ножницы *NE-CUT*		2. Сверлильно-фрезерный станок *Bungard CCD/ATC*	
3. Зачистная машина *RBM300 BLS*		4. Установка металлизации *COMPACTA L40 ABC 2 Cu*	
5. Ламинатор *RLM 419p*		6. Лампа-лупа *LAMP-ZOOM 8066-1C-8D*	
7. Установка двустороннего экспонирования вакуумная *HELLAS*		8. Установка *JET-34D*	
9. Установка *JET-34D*		10. Установка *JET-34D*	

Продолжение табл. 1.10

1	2	3	4
11. Установка *JET-34D*		12. Стереоувеличитель *Mantis Elite*	
13. Ручная установка трафаретной печати *LSP-6070HP*		14. Сушильный шкаф *Source*	
15. Установка металлизации *COMPACTA L30 ABC*		16. Ванна УЗ отмывки *S-Power*	

Блок «Изготовление фотошаблонов»

Прорисовка фотошаблона | Проявление и фиксация фотоматериалов | Контроль и ретушь фотошаблонов

Фотоплоттер *FilmStar* | Кюветы (ванны травления) *EG02* | Стереоувеличитель *Mantis Elite*

Окончание табл. 1.10

Блок «Очистка воды»	
Очистка водопроводной воды	Очистка стоков
Водоочистная установка *Bungard IONEX B*	Водоочистная установка *Bungard IONEX B*

Гибкие печатные кабели (шлейфы) представляют собой параллельно проложенные печатные проводники, размещенные на гибком диэлектрическом основании и закрытые диэлектрической покровной пленкой (табл. 1.3, п. 8). ГПК изготавливаются на фольгированном полиимиде ПФ-1 толщиной 75; 125 мкм ($h_{\text{ф}} = 35$ мкм) химическим методом. При этом на всех технологических операциях (получение заготовок: химико-механическая очистка, нанесение рисунка, травление меди и др.) приходится учитывать гибкость и деформируемость исходного материала. Применяются жесткие подложки-спутники или усовершенствуются конструкции известных технологических установок для обработки гибкой заготовки.

В **рельефных печатных платах** проводящий рисунок выполнен в объеме диэлектрического основания (табл. 1.3, п. 7), поэтому для их изготовления применяется нефольгированный диэлектрик СТАМ, СТЭК. Способ получения рисунка печатной платы – механический (рис. 1.16, *г*) – фрезерование трас проводников и сверление переходных отверстий, диаметр которых ($d = 0,25$) не превышает ширину профрезерованных канавок ($t = 0,25$).

Метод получения проводящего рисунка РПП – электрохимический (табл. 1.8). После фрезерования и сверления нефольгированной заготовки на станке с ЧПУ её подвергают абразивной обработке, которая удаляет стружку, загрязнения и придает диэлектрику

равномерный микрорельеф. Далее заготовка подвергается химико-гальваническому меднению, в результате которого на всех поверхностях основания образуется слой меди ($h_{\text{пм}}$) толщиной 5–7 мкм (возможна толщина до 15 мкм)

Плоские пробельные места заготовки закрывают маской из типографской краски (накатывается офсетным способом) или из СПФ (наносится ламинированием с экспонированием рисунка с фотошаблона). При этом остаются открытыми трассы проводников и переходные отверстия, в зонах которых гальванически наращивается слой меди заданной толщины и слой металлорезиста. Слой $h_{\text{пм}}$ обеспечивает токоподвод ко всем элементам проводящего рисунка.

Техпроцесс изготовления РПП заканчивается удалением маски, травлением $h_{\text{пм}}$ с пробельных мест и оплавлением металлорезиста. Если оплавленный металлорезист заполняет переходные отверстия, то увеличивается прочность сцепления рельефного проводника с поверхностью канавки диэлектрика («эффект заклепки»).

При разработке конструкции **МПП попарного прессования** (табл. 1.3, п. 9) учитывалась возможность применения известных типовых методов изготовления ПП и, в частности, ДПП на фольгированном диэлектрическом основании (табл. 1.3, п. 4).

Четырехслойную МПП получают с помощью двух фольгированных заготовок из СФ-2 с образованием проводящего рисунка вначале на внутренних слоях, а затем на наружных слоях (табл. 1.11).

Электрическая связь слоев обеспечивается с помощью металлизированных отверстий 1–4. Так как проводящие рисунки слоев получают травлением фольги с пробельных мест, а металлизированные отверстия – осаждением меди, то применяются комбинированные методы изготовления ПП.

Внутренние слои 2 и 3 изготавливаются комбинированным негативным методом с применением негативных фотошаблонов, а гальваническое осаждение меди обеспечивается фольгой наружных слоев 1 и 4, включенных в электрическую цепь гальванической ванны с присоединением электродов в зоне технологического поля заготовки.

Проводящий рисунок наружных слоев 1 и 4 изготавливается комбинированным позитивным методом (табл. 1.6) с гальванической металлизацией сквозных отверстий.

Химико-гальваническая металлизация сквозных отверстий МПП попарного прессования приводит к большой толщине меди на на-

ружных слоях (слой фольги плюс дважды осажденный гальванически слой меди). Велико боковое подтравливание проводящего рисунка наружных слоев, что не позволяет получить высокий класс точности ПП по параметру t/s. Возникают также проблемы обеспечения сплошности паяльной маски из-за большой толщины меди (100–130 мкм) на наружных слоях МПП.

Таблица 1.11

Изготовление МПП попарного прессования

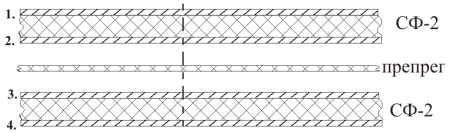
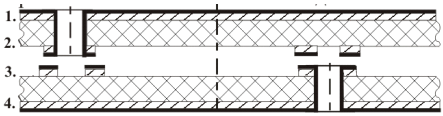
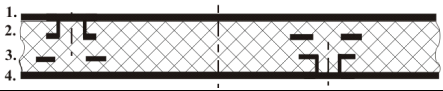
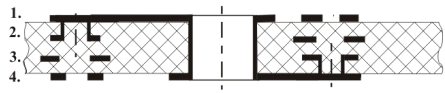
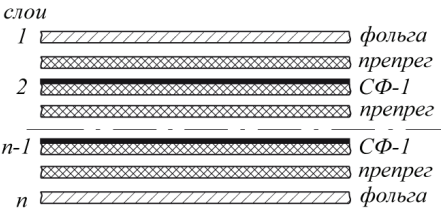
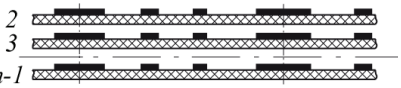
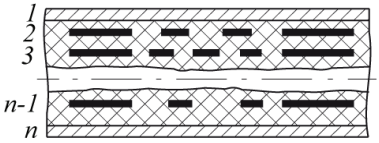
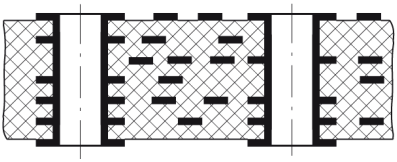
Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой фольгированного диэлектрика (СФ-2) на заготовки с технологическими полями, раскрой препрега. Химико-механическая подготовка поверхности фольги. Обеспечение условий хранения заготовок препрега (в холодильнике)	Две двусторонне фольгированные заготовки, диэлектрическая прокладка 
2	Получение проводящего рисунка на внутренних слоях 2 и 3 со сверлением и металлизацией переходных отверстий комбинированным негативным методом	Проводящий рисунок на слоях 2 и 3, стенки переходных отверстий и сплошная фольга слоев 1 и 4 закрыты слоем гальванически осажденной Cu 
3	Сборка заготовок 1–2 и 3–4 в пакет с установкой прокладки-препрега. Прессование пакета под действием давления (p, кг/см^2) и температуры (T, ºС). Химико-механическая обработка наружных слоев 1 и 4	Монолитная заготовка – аналог заготовки ДПП. Переходные отверстия 1–2 и 4–3 заполнены эпоксидной смолой препрега. Примечание: проводящий рисунок изображен без разделения слоев меди 
4	Получение проводящего рисунка наружных (1 и 4) слоев и сквозных металлизированных отверстий комбинированным позитивным методом по технологии ДПП. Удаление технологического поля с контролем качества металлизации отверстий по тест-купонам	Монолитная 4-слойная МПП с большим количеством переходных (1–2, 4–3) отверстий и относительно небольшим числом сквозных (1–4) отверстий. Предназначена для монтажа КМП (ИМС с планарными выводами, ЧИП-компоненты). Наносится паяльная маска 

Таблица 1.12

Изготовление МПП без внутренних межслойных переходов методом металлизации сквозных отверстий

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой односторонне фольгированных заготовок, препрега и медной фольги	Необходимое количество заготовок слоев МПП с технологическими полями 
2	Получение проводящего рисунка внутренних слоев МПП химическим методом (см. табл. 1.5)	Наличие проводящего рисунка с контактными площадками в зоне будущих сквозных отверстий на каждом слое, знаков ориентации слоев 
3	Сборка заготовок слоев МПП в пакет. Прессование пакета под действием давления и температуры. Обеспечение точности совмещения слоев по знакам ориентации	Монолитная двусторонне фольгированная заготовка  Слои 1 и *n* не имеют проводящего рисунка
4	Получение проводящего рисунка на наружных слоях (1 и *n*), сверление и металлизация сквозных отверстий комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.6), который является типовой технологией изготовления ДПП на диэлектрическом основании. Контроль качества металлизации отверстий. Нанесение паяльной маски	Готовая МПП с точным совмещением контактных площадок в зоне каждого металлизированного отверстия  Упрощенный (стандартный) проводящий рисунок на наружных слоях. Слои земли, питания, сигнальные и экранные – внутри МПП. Паяльная маска на наружных слоях

МПП с металлизацией сквозных отверстий получили наибольшее распространение в производстве ЭМ 1-го уровня. В клас-

сической (базовой) конструкции МПП (табл. 1.3, п. 10) металлизированные отверстия электрически соединяют проводящие рисунки всех слоев при наличии в каждом слое в зоне металлизированного отверстия контактной площадки, к которой подходит печатный проводник. При наличии в МПП 10 слоев и, например, 1000 сквозных отверстий образуется 10 000 зон контакта в виде цилиндрических поясков перехода слоя металлизации отверстия к плоской контактной площадке проводящего рисунка каждого слоя. Таким образом, электрические соединения образуются только в зоне сквозных металлизированных отверстий (табл. 1.12), а их большое количество уменьшает электрическую надежность межслойных соединений.

ТП рассматриваемой МПП состоит из этапов (рис. 1.19): получение проводящего рисунка на внутренних слоях; сборка слоев в пакет и прессование его с образованием монолитной МПП; получение проводящего рисунка на внешних слоях с металлизацией сквозных отверстий (табл. 1.12).

Проводящий рисунок на внутренних слоях МПП при отсутствии внутренних межслойных переходов (табл. 1.3, п. 10) получают на односторонне фольгированном диэлектрике химическим методом (табл. 1.5). После химико-механической обработки слои собирают в пакет с установкой между ними слоев стеклоткани (препрега), пропитанной эпоксидной смолой, находящейся в состоянии неполного отверждения. Толщина слоев препрега должна быть в два раза больше толщины слоя меди проводящего рисунка внутренних слоев, что гарантирует надежное заполнение смолой всех пустот в процессе прессования пакета.

Учитывая анизотропные свойства стеклоткани, меньшее растяжение по нитям основы и большее по нитям утка, требуется взаимноперпендикулярная ориентация слоев препрега и заготовок с проводящим рисунком. Это позволяет уменьшить деформацию пакета после прессования. Этому же способствуют близкие по величине площади покрытия медью в проводящем рисунке внутренних слоев и применение заготовок фольги для наружных слоев МПП с установкой их на прокладку из препрега (табл. 1.12, этап 1).

Таким образом, после операции прессования пакета получается как бы двусторонне фольгированная заготовка, аналогичная заготовке ДПП (табл. 1.12, этап 3). Дальнейшее изготовление МПП целесообразно проводить по технологии комбинированного позитивного метода (табл. 1.6).

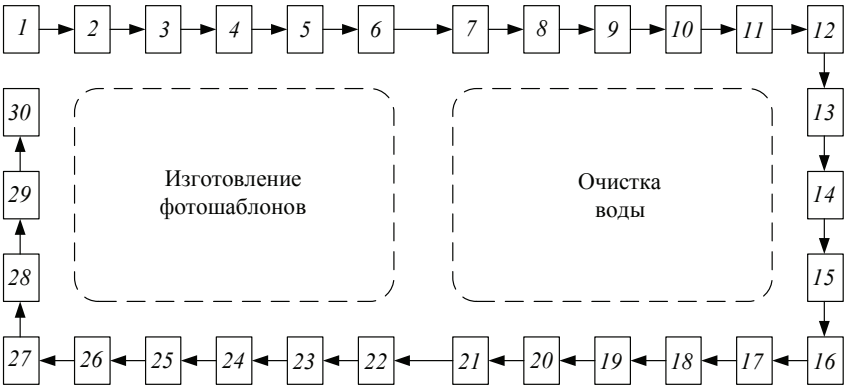
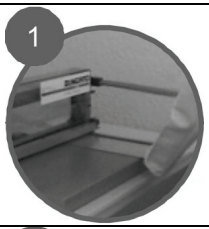
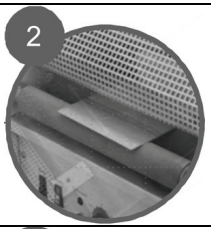
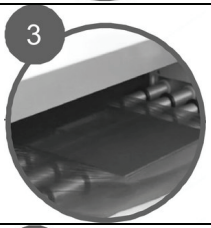
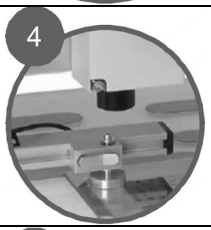
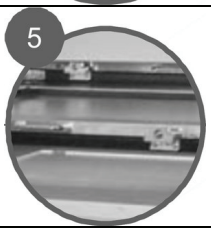
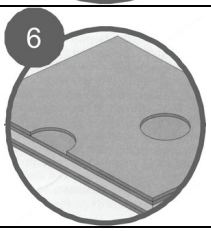


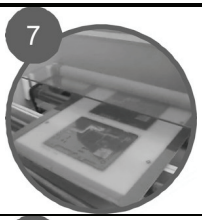
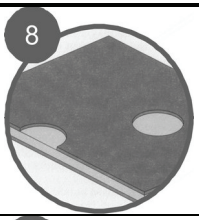
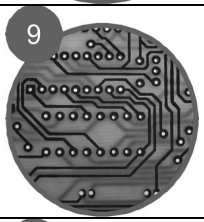
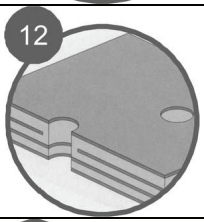
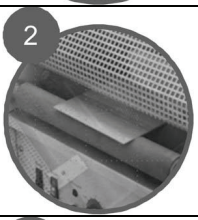
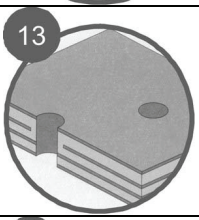
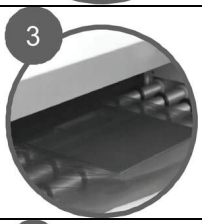
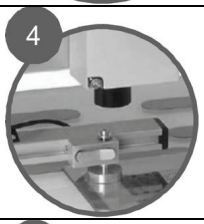
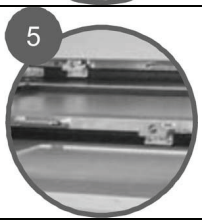
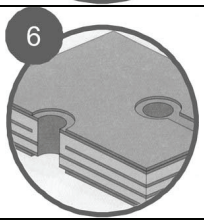
Рис. 1.19. Комплект типового оборудования для маршрута производства МПП (*www.ostec-group.ru*)

Таблица 1.13

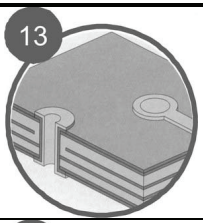
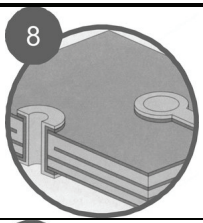
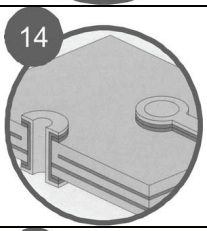
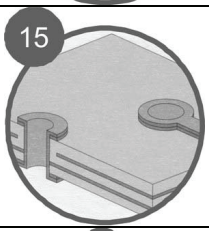
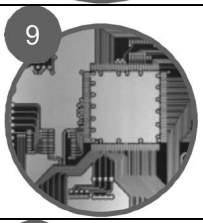
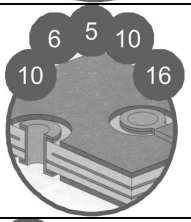
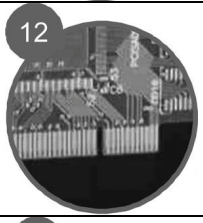
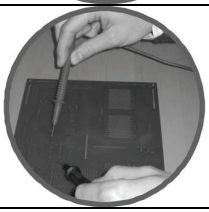
К рисунку 1.19

Название	Иллюстрация	Название	Иллюстрация
1	2	3	4
Наименование операций			
1. Нарезка заготовок		2. Зачистка поверхностей	
3. Ламинирование фоторезиста		4. Базирование фотошаблона	
5. Экспонирование фоторезиста		6. Проявление фоторезиста	

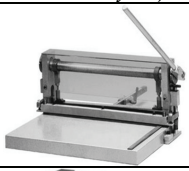
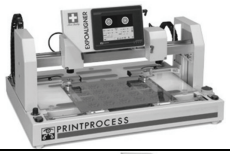
Продолжение табл. 1.13

1	2	3	4
7. Травление по фоторезисту		8. Удаление фоторезиста	
9. Контроль вытравленного рисунка		10. Сушка слоев	
11. Прессование слоев МПП		12. Сверление сквозных отверстий	
13. Зачистка поверхностей		14. Прямая металлизация сквозных отверстий	
15. Ламинирование фоторезиста		16. Базирование фотошаблона	
17. Экспонирование фоторезиста		18. Проявление фоторезиста	

Продолжение табл. 1.13

1	2	3	4
19. Гальваническое меднение сквозных отверстий, осаждение металлорезиста		20. Удаление фоторезиста	
21. Травление рисунка		22. Удаление металлорезиста	
23. Контроль вытравленного рисунка		24. Нанесение композиции для маски, сушка, экспонирование, проявление, термодублирование	
25. Нанесение финишных аокрытий		26. Маркировка	
27. Фрезерование сложного контура		28. Финишная отмывка плат от технологических загрязнений	
29. Контроль по признакам внешнего вида		30. Электрический контроль на обрыв цепей и короткое замыкание	

Продолжение табл. 1.13

1	2	3	4
Соответствующее наименование оборудования			
1. Гильотинные ножницы *NE-CUT*		2. Зачистная машина *RBM300 BLS*	
3. Ламинатор *RLM 419p*		4. Установка автоматического совмещения *Expo-Aligner*	
5. Установка экспонирования *SEM M8K2*		6. Конвейерная установка *DL 500*	
7. Конвейерная установка *DL 500*		8. Конвейерная установка *DL 500*	
9. Стереоувеличитель *Mantis Elite*		10. Сушильный шкаф *Source*	
11. Пресс *RMP210*		12. Сверлильно-фрезерный станок *CNC-1*	
13. Установка металлизации *COMPACTA L40 ABC 2 Cu*		14. Конвейерная установка *DL 500*	

Окончание табл. 1.13

1	2	3	4
15. Установка *JET-34D*		16. Ручная установка трафаретной печати *LSP-6070HP*	
17. Установка металлизации *COMPACTA L30 ABC*		18. Ванна УЗ отмывки *S-Power*	
Блок «Изготовление фотошаблонов»			
Прорисовка фотошаблона Фотоплоттер *FilmStar* 	Проявление и фиксация фотоматериалов Кюветы (ванны травления) *EG02* 	Контроль и ретушь фотошаблонов Стереоувеличитель *Mantis Elite* 	
Блок «Очистка воды»			
Очистка водопроводной воды Водоочистная установка *Bungard IONEX B*		Очистка стоков Водоочистная установка *Bungard IONEX B*	

Операция сверления сквозных переходных отверстий в пакете МПП требует особого внимания, минимальные диаметры отверстий находятся в пределах 0,2–0,6 мм, а в процессе сверления твердосплавные сверла с 4-гранной заточкой преодолевают сопротивление материалов: медная фольга ($h_{\text{ф}} = 9; 18; 20; 35; 50$ мкм), стеклоткань (переплетенные с различной плотностью нити основы и утка), отвержденная эпоксидная смола препрега и диэлектрика внутренних слоев. При этом прохождение сверлом указанных материалов повторяется в соответствии с количеством слоев и заготовок МПП в обрабатываемом пакете.

Просверленные отверстия имеют характерные дефекты:

- заусенцы на входе и выходе сверла из пакета и отслоение фольги;
- наволакивание смолы на стенки отверстия из-за нагрева зоны сверления до 350ºС;
- «гвоздевой эффект» – развальцовка торцов контактных площадок внутренних слоев МПП;
- смещение оси отверстия от заданной координаты на входе и выходе сверла.

Дефекты устраняются при подготовке и в процессе операции сверления или последующей очисткой отверстий в ходе технологической операции, входящей в ТП изготовления МПП. Чтобы уменьшить величину заусенцев, снизу в пакете плат размещают лист прессованного картона, а сверху, после установки пакета на столе сверлильного станка, – лист тонкой металлической фольги. Просверленная фольга выполняет роль направляющей втулки, препятствующей уходу сверла при сверлении пакета заготовок. Центрирование сверл может быть обеспечено и применением специальных направляющих втулок с усилием прижима их в зоне отверстия в пределах 1,5–2,0 МПа.

Наволакивание смолы и «гвоздевой эффект» минимизируют специальными заточками режущих кромок сверл, соблюдением диапазона подач рабочего ($s = 0,02 \div 0,05$ мм/об.) и обратного хода (ускоренное извлечение) инструмента, работой только острозаточенными сверлами (период стойкости – 1000–1200 отверстий). Температуру сверл уменьшают с помощью направленного воздушного охлаждения.

Так как полностью исключить наволакивание смолы на торцы просверленных контактных площадок внутренних слоев МПП не представляется возможным, то в технологический процесс изготовления введена операция очистки просверленных сквозных отверстий.

Известно несколько способов очистки: подтравливание в смеси серной и плавиковой кислот; перманганатная обработка; плазмохимическая и гидроабразивная очистка. Промышленное применение нашли перманганатная обработка и плазмохимическая очистка.

Перманганатная очистка проводится на конвейерных линиях струйной обработки с растворением смолы в щелочном растворе перманганата калия при температуре 70ºС. В состав линии входят также ванны кондиционирования, восстановления и промывки.

Для *плазмохимической очистки* необходимо специальное стационарное вакуумное оборудование, в котором под действием высокочастотного электрического поля образуется плазма (газы – кислород, фреон), растворяющая смолу в отверстиях платы. Процесс сухой, экологически безвредный, однако достаточно дорогой, так как связан с применением и доставкой указанных газов. Сухое плазменное травление обеспечивает хорошую адгезию меди осаждаемой в отверстиях МПП.

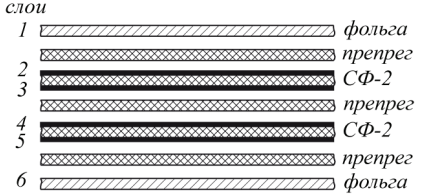
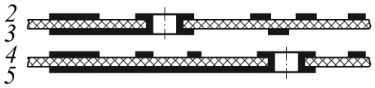
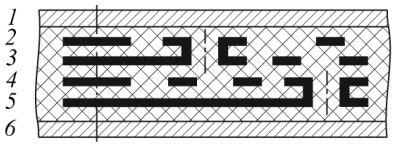
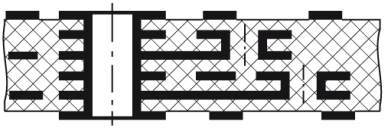
Отличие технологии изготовления **МПП с внутренними межслойными переходами** (табл. 1.3, п. 11) заключается только в том, что для изготовления внутренних слоев применяют двусторонне фольгированный диэлектрик (табл. 1.14) с образованием проводящего рисунка и металлизацией внутренних переходных отверстий комбинированным позитивным методом (табл. 1.6).

В **МПП послойного наращивания** (табл. 1.3, п. 12) все проводящие слои (не более пяти) электрически соединены последовательно с помощью сплошь металлизированных переходных отверстий. Исходными заготовками для изготовления такой платы являются: лист медной фольги стандартной толщины (первый слой) и лист перфорированного диэлектрика: стеклоткань, полиимидная пленка (табл. 1.15, этап 1). Отверстия в диэлектрике могут быть получены травлением, пробивкой, прожиганием лазерным лучом или сверлением. Фольгу и перфорированный диэлектрик приклеивают друг к другу, затем из отверстий химико-механически удаляют остатки клея и гальванически наращивают в отверстиях слой меди. Сплошная фольга первого слоя служит катодом.

Осажденная в переходных отверстиях медь должна выступать над поверхностью диэлектрика (табл. 1.15, этап 2). Выступающую часть столбиков меди выравнивают шлифованием до уровня плоскости слоя диэлектрика. Эта операция трудоемка и плохо механизирована.

Таблица 1.14

Изготовление МПП с внутренними межслойными переходами методом металлизации сквозных отверстий

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой двусторонне фольгированных заготовок, препрега и медной фольги	Необходимое количество заготовок слоев МПП с технологическими полями 
2	Получение проводящего рисунка внутренних слоев МПП комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.6)	Проводящий рисунок слоев 2–3 и 4–5 соединен металлизированными переходными отверстиями. Наличие знаков ориентации слоев 
3	Сборка заготовок слоев МПП в пакет. Прессование пакета под действием давления и температуры. Обеспечение точности совмещения слоев по знакам ориентации	Монолитная двусторонне фольгированная заготовка  Слои 1 и 6 не имеют проводящего рисунка. Внутренние межслойные переходы заполнены смолой препрега
4	Получение проводящего рисунка на наружных слоях (1 и 6), сверление и металлизация сквозных отверстий комбинированным позитивным методом (см. табл. 1.6) по технологии ДПП. Контроль качества металлизации отверстий. Нанесение паяльной маски	Готовая МПП с точным совмещением контактных площадок в зоне сквозных металлизированных отверстий  Межслойные переходы сокращают длину сигнальных цепей проводящего рисунка. Внутренние слои: сигнальные цепи, шины земли, питания, экраны (экранная сетка). Паяльная маска на наружных слоях

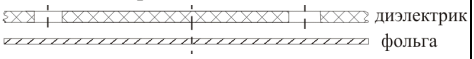
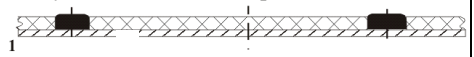
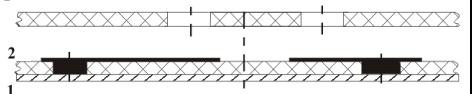
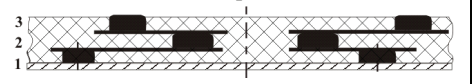
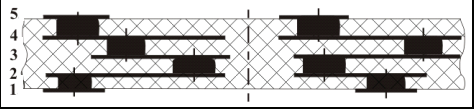
Проводящий рисунок следующего слоя получают электрохимическим методом (табл. 1.8) путем осаждения слоя $h_{\text{пм}}$, гальва-

нического наращивания проводящего рисунка и травления $h_{\text{пм}}$ с пробельных мест. Для получения последующих слоев перечисленные выше операции повторяются (приклеивание перфорированного диэлектрика и т. д.).

Проводящий рисунок в фольге первого слоя получают на последнем этапе изготовления платы химическим методом (табл. 1.15, этап 5).

Таблица 1.15

Изготовление МПП послойного наращивания

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Раскрой медной фольги нефольгированного диэлектрика. Перфорирование диэлектрика	Слой медной фольги и слой перфорированного диэлектрика 
2	Склеивание фольги и диэлектрика, удаление клея из отверстий в диэлектрике, гальваническое наращивание меди в отверстиях (слой фольги – катод)	Отверстия в диэлектрике заполнены сплошным слоем гальванически осажденной меди, выступающей за диэлектрик 
3	Химико-механическое вытравливание поверхности диэлектрика. Получение проводящего рисунка слоя 2 электрохимическим методом (табл. 1.8). Подготовка следующего слоя перфорированного диэлектрика	Слой фольги 1 остается сплошным, на слое 2 образован проводящий рисунок, следующий слой диэлектрика перфорирован 
4	Приклеивание перфорированного диэлектрика к пакету слоев 1 и 2. Гальваническое наращивание меди в отверстиях очередного слоя диэлектрика. Далее повторение операций наращивания последующих проводящих слоев	Образование следующих проводящих слоев. Слой фольги 1 выполняет роль катода на гальванических операциях 
5	Создание проводящего рисунка на слое фольги 1. Удаление технологического поля, нанесение паяльной маски	МПП со сплошными металлизированными межслойными переходами, обеспечивающими надежное соединение слоев 

Таким образом, МПП послойного наращивания имеет высокую надежность электрического соединения слоев с помощью сплошь металлизированных переходных отверстий, обеспечивает возможность получения межслойных соединений в любом свободном месте монтажного поля платы и, как следствие, высокую плотность печатного монтажа.

Недостаток данной МПП – только последовательное изготовление проводящих слоев, наличие операции очистки переходных отверстий после операций приклеивания и шлифования диэлектрика с выступающими медными столбиками. МПП предназначены только для монтажа компонентов (КМП), монтируемых на поверхность платы, и может быть применена для изготовления ЭВС высокой надежности (бортовая аппаратура).

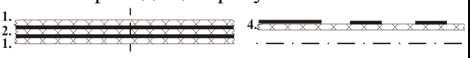
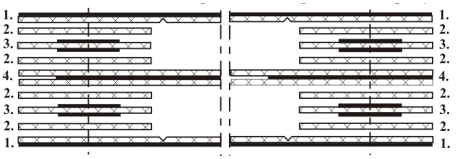
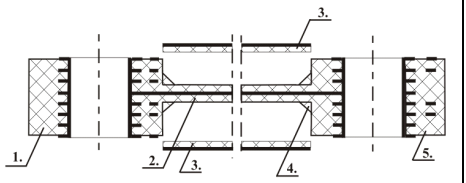
Гибко-жесткая ПП (табл. 1.3, п. 13) представляет собой два или несколько жестких участков, электрически и конструктивно соединенных между собой гибкими печатными проводниками (шлейфами). В электронном модуле второго уровня жесткие участки (модули первого уровня) с навесными компонентами могут размещаться на разных уровнях в дву- и трехмерном пространстве за счет гибкости токоведущих шлейфов. В составе ГЖПП отсутствуют внутренние соединители-разъемы, так как гибкие токоведущие шины опрессованы вместе со слоями жестких участков и электрически соединены с ними с помощью сквозных металлизированных отверстий.

Наличие в плате гибких и жестких участков требует применения большей номенклатуры исходных конструкционных материалов по сравнению с материалами ОПП, ДПП и МПП. Так, проводящий рисунок гибких участков платы изготавливают из односторонне фольгированного ($h_{ф} = 18; 35$ мкм) полиимида химическим методом. Гибкие участки могут состоять из нескольких слоев, соединяемых в монолит прессованием с применением акрилового или полиимидного адгезива.

В состав пакета перед прессованием вводят покровную пленку, герметично с двух сторон защищающую гибкую часть платы (табл. 1.16, этап 2). Толщина слоя адгезива покровной пленки должна быть оптимальной, чтобы опрессовать проводящий рисунок без воздушных включений. Для толщины проводящего рисунка 18 мкм достаточно 25 мкм адгезива, для 35 мкм – 50 мкм адгезива. Покровную пленку наносят на гибкую часть платы до сборки и прессования её в составе пакета жестких участков (табл. 1.16, этап 3).

Таблица 1.16

Изготовление гибко-жестких печатных плат

Этап ТП	Технологическое воздействие на материал	Характерные признаки состояния материала, эскиз заготовки
1	Получение заготовки из гибкого фольгированного полиимида 2, полиимидной покровной пленки 1 с адгезивом, препрега 3, ламината 4 или фольгированного диэлектрика для внутренних слоев жесткой части ПП и ужесточителя	Заготовки всех слоев, входящих в состав ГЖПП
2	Получение проводящего рисунка на гибкой части ПП и на заготовках слоев жесткой части химическим методом. Опрессовка гибкой части покровной пленкой с двух сторон	1–2–1 – гибкая часть ПП с проводящим рисунком и герметичным покрытием; 4 – заготовки внутренних слоев жесткой части с проводящим рисунком 
3	Сборка слоев ГЖПП в пакет со взаимной ориентацией по реперным знакам или базовым отверстиям. Установка в пакет пластин жесткости 1 с прорезями (канавками) препрега 2, жестких слоев с проводящим рисунком 3, гибкой части платы 4. Прессование пакета (*p*, *T*)	Заготовки всех слоев ГЖПП собраны в пакет с обеспечением взаимной ориентации проводящих рисунков 
4	Сверление и металлизация сквозных отверстий в жестких частях ПП с одновременным получением проводящего рисунка на наружных слоях ПП. Освобождение гибкой части ПП от ужесточителя путем вскрытия окон по прорезям. Нанесение силиконовых валиков на стыках гибкой и жесткой частей ПП	Гибко-жесткая ПП с освобожденной от ужесточителя гибкой частью; 1 и 5 – жесткая часть, 2 – гибкая часть, 3 – удаляемый ужесточитель, 4 – силиконовый валик 

Для жестких участков ГЖПП применяют фольгированный стеклотекстолит аналогичный материалам ДПП и МПП. Структура жестких участков соответствует структуре МПП с металлизацией сквозных отверстий. Поэтому проводящий рисунок внутренних слоев при отсутствии межслойных переходов получают химическим методом (табл. 1.5).

Опрессованную гибкую часть платы и заготовки слоев жестких участков собирают в пакет с установкой между заготовками слоев препрега, который после прессования обеспечит монолитную структуру ГЖПП.

Количество слоев жестких частей платы должно быть одинаково, чтобы избежать разновысотности собранного пакета и обеспечить равные условия прессования (табл. 1.16, этап 3) всех участков платы.

Взаимная ориентация проводящих рисунков слоев платы (и в частности соосность контактных площадок) осуществляется с помощью реперных знаков, точное расположение которых перенесено с фотошаблонов слоев. Эта промышленно применяемая система ориентации без базовых отверстий называется *MAS-LAM* и обеспечивает точность совмещения до 5 мкм.

Наличие в собранном пакете гибкой части из тонкого фольгированного полиимида с тонкой покровной пленкой может привести к смещению проводящего рисунка шлейфа при сборке и прессовании. Поэтому в состав пакета включены два наружных слоя ужесточителя (табл. 1.16, этап 3), изготовленных из фольгированного диэлектрика. Для того чтобы обеспечить гибкость шлейфа готовой платы, в ужесточителе необходимы окна над её гибким участком. В связи с этим в нужных местах до сборки в ужесточителе на внутренней стороне, обращенной к пакету, прорезают канавки.

На окончательной стадии изготовления платы канавки прорезают на внешней стороне ужесточителя и, вскрыв окно, удаляют жесткий участок, освобождая гибкую часть платы (табл. 1.16, этап 4).

В ГЖПП возникают дополнительные трудности при сверлении и металлизации сквозных отверстий в жесткой многослойной части платы. В отличие от обычных МПП приходится сверлить и материалы гибкой части: фольгированный полиимид, полиимид покровных пленок, слои адгезива. Кроме «гвоздевого эффекта», при прохождении сверлом слоев фольги (расплющивание торцев контактных площадок) аналогичный эффект возникает в результате деформации и смещения пленки полиимида в сторону адгезивного слоя. К наволакиванию эпоксидной смолы добавляется наволакивание адгезива на стенки просверленных отверстий.

Эффективным методом очистки отверстий от наволакивания смолы и адгезива является плазмохимическая очистка в среде ионизированных газов (кислород, фреон). Плазма растворяет слои

наволакивания на стенках отверстий и подтравливает материалы диэлектриков на глубину 5–10 мкм, оголяя торцы контактных площадок внутренних слоев. Подтравливание увеличивает площадь контакта слоя металлизации отверстий с контактными площадками проводящего рисунка. Недостатком метода очистки является необходимость удаления продуктов растворения из отверстий малого диаметра (0,2–0,6 мм).

На последнем этапе изготовления ГЖПП получают проводящий рисунок на наружных слоях жестких участков с одновременной металлизацией сквозных отверстий. Это обеспечивает типовой комбинированный позитивный метод (см. табл. 1.6). При этом качество металлизированных отверстий определяет надежность гибко-жесткой платы как коммутационной структуры, позволяющей электрически соединить модули 1-го уровня (жесткие участки ГЖПП с навесным монтажом) в трехмерном пространстве ЭВС, не прибегая к традиционным разъемам.

Передовые производства и фирмы переходят от предварительной химико-гальванической металлизации отверстий к технологии прямой металлизации. Диспергированный на поверхности диэлектриков (стеклоткань, полиимид, адгезив) палладий электропроводен и образует тонкую сплошную пленку, на поверхность которой гальванически наращивается слой меди заданной толщины (технология *System-S* фирмы *I-Kem International*).

ГЖПП не технологичны для горячего лужения с помощью *HASL*-процесса мест пайки проводящего рисунка с навесными компонентами. Гибкие участки мешают погружению платы в горячий припой и снятию его излишков пневмоножами при извлечении платы из ванны с припоем. Поэтому на поверхности проводящего рисунка, предназначенные для пайки, наносят покрытия, обладающие способностью к смачиванию припоем и длительно её сохраняющие. Это может быть гальванически осажденный и оплавленный металлорезист (SnPb) и иммерсионные покрытия: NiAu, NiPd, NiPdAu, ImmAg и другие. Толщина иммерсионных покрытий не превышает одного микрометра.

Рассмотренные вопросы технологии гибко-жестких плат иллюстрируют сложность и трудоемкость их изготовления и необходимость применения большой номенклатуры различных материалов. Однако их применение в модулях ЭВС позволяет упростить традиционную компоновку аппаратуры и снизить трудоемкость монтажа.

1.6. ОПТИЧЕСКИЕ КОММУТАЦИИ И ПРОВОДЯЩИЕ СРЕДЫ

1.6.1. Основные понятия волоконной оптики

Оптоволокно – это стеклянная или пластиковая нить, используемая для переноса света внутри себя за счет явления полного внутреннего отражения. Волоконная оптика – раздел приборостроения, описывающий такие волокна. Оптоволокна используются в оптоволоконной связи, которая позволяет передавать цифровую информацию на большие расстояния и с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Оптическое волокно играет ту же роль, что и медный провод, используемый для передачи различной информации (телефонные линии, компьютерные сети и др.). Однако, в отличие от медного провода, по оптоволокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях.

Наиболее важными преимуществами волоконной оптики являются:

1. *Широкая полоса пропускания*. Волоконная оптика может работать в диапазоне до 1 ТГц, что в сотни раз больше максимальной полосы пропускания медных проводников. Более широкая полоса пропускания оптических систем обусловливает более высокую скорость передачи информации в линии. Полоса пропускания волоконной оптики допускает мультиплексирование различных сигналов (аудио, видео, передачу данных и др.).
2. *Низкие потери*. Потери (затухание) определяют расстояние, на которое может передаваться сигнал. В медных проводниках затухание увеличивается с ростом частоты модуляции – чем больше частота сигнала, тем больше потери. В оптическом же кабеле затухание не зависит от частоты и остается постоянным в определенном диапазоне частот вплоть до очень высоких.
3. *Нечувствительность к электромагнитным полям*. В отличие от медных проводников, оптоволокно не излучает и не воспринимает электромагнитные волны. Важнейшим результатом нечувствительности оптического волокна к наводкам от электромагнитного излучения является то, что световые сигналы не ис-

кажаются под их влиянием. Эта особенность дает возможность прокладки оптоволоконных линий передач вблизи высоковольтных без необходимости использования специальной защиты.

4. *Малый вес*. Оптическое волокно весит значительно меньше медного проводника. В основном это связано с тем, что оптоволоконные линии имеют полосу пропускания намного шире, чем медные, и, как следствие, необходимо меньше линий для передачи одного и того же количества информации. Также стекло (основной компонент оптоволоконных проводников) имеет значительно меньший вес, чем медь. Этот параметр является одним из важнейших в таких областях, как автомобиле- и самолетостроение.
5. *Малый размер*. Оптический кабель меньше по размеру, чем его медный аналог. Типичный диаметр оптического волокна – 125 мкм. Кроме того, достаточно часто одно оптическое волокно может заменить несколько медных проводников.
6. *Безопасность*. Оптоволокно является диэлектриком и не проводит электрический ток. Его использование безопасно с точки зрения искро- и пожаробезопасности. Более того, волоконно-оптический кабель может использоваться в опасных местах, в которых из соображений безопасности ранее вообще не применялись кабели (топливные баки и др.).
7. *Секретность*. Оптическое волокно является сверхбезопасной средой для передачи информации. Оно не излучает волны, которые могут быть перехвачены специализированным оборудованием. Кроме того, подключение к оптоволоконному проводнику крайне затруднено и требует специальных инструментов и микроскопа.

Все перечисленные выше особенности делают оптические волокна наиболее перспективными для коммутационных структур. В настоящее время оптические коммутационные структуры только начинают развиваться, в то время как коммутационные структуры при помощи медных кабелей близки к своим теоретическим пределам.

В действительности не все оптические кабели имеют низкие потери и широкую полосу пропускания. В тех случаях, когда потери и высокие скорости не являются критическими (например, в автомобилестроении), достаточно хорошо работают более дешевые оптические линии на основе полимерных волокон.

Однако стоит заметить, что оптические коммуникации не лишены ряда недостатков. Как правило, они являются основными

факторами, обусловливающими ограниченное применение оптоволоконных коммуникаций. Некоторые из них перечислены ниже:

1. *Хрупкость*. Основным материалом для изготовления оптического волокна является стекло. Как известно, этот материал очень хрупок. Это не означает, что оптоволокно не может быть изогнуто, однако допустимые углы изгиба намного меньше, чем у металлических проводников. Также наличие изгибов увеличивает потери при передаче сигнала.
2. *Трудности в обслуживании*. В отличие от медных проводников, микротрещины в оптоволокне приводят к резкому ухудшению его параметров. Из-за того что оптоволокно имеет очень маленький диаметр (сердцевина волокна имеет диаметр от 8 до 100 мкм), обнаружение изломов и дефектов является сложной и длительной процедурой.
3. *Сложность сопряжения волокон*. Для соединения медных линий передач используется пайка либо (в редких случаях) сварка. Как правило, это достаточно простая процедура, не требующая специализированного оборудования. Сопряжение же оптических волокон является трудоемкой процедурой, требующей применения специальных микроскопов и инструментов. От точности сопряжения и полировки концов сопрягаемых частей напрямую зависят потери в оптоволокне.
4. *Использование дополнительного оборудования*. Использование оптоволоконного кабеля требует специальных оптических приемников и передатчиков, преобразующих световые сигналы в электрические и обратно, что порой существенно увеличивает стоимость сети в целом.

Все эти недостатки не позволяют оптоволоконным линиям связи вытеснить привычные медные. Однако стоимость оптоволоконных линий постоянно снижается, а необходимость в высокоскоростных коммуникациях увеличивается. Это делает оптические линии связи незаменимыми в системах, требующих передачи данных с высокой скоростью на большие дистанции и с малым числом ошибок. В настоящее время основными сферами применения оптоволоконных линий передач являются телефония и компьютерные сети. Это обусловлено высокой скоростью передачи данных и широкой полосы пропускания.

Для сравнения, медный кабель диаметром 4,5 дюйма может передавать 40 300 двусторонних разговоров на короткие расстояния.

Волоконно-оптический кабель диаметром 0,5 дюйма, содержащий 144 волокна, обеспечивает 24 192 разговора на каждую волоконно-оптическую пару, т. е. около 1,75 миллионов звонков на весь кабель в целом. Таким образом, емкость волоконно-оптического кабеля существенно превосходит емкость коаксиального, несмотря на то что его диаметр почти в 10 раз меньше.

Высокое быстродействие и нечувствительность к электромагнитным помехам дают оптоволоконным линиям передач широкое применение в компьютерных сетях. Применяют оптоволоконный кабель только в сетях с топологией «звезда» и «кольцо». Никаких проблем согласования и заземления в данном случае не существует. Кабель обеспечивает идеальную гальваническую развязку компьютеров сети.

Также оптоволокно применяется в отраслях, где критичны масса и помехозащищенность. Например, автомобиле- и авиастроение широко используют оптические кабели для соединения бортового оборудования. В данном случае высокая скорость передачи данных не требуется, поэтому используется в основном пластиковое оптическое волокно. Данный тип коммуникаций используется для передачи информации в условиях сильных электромагнитных помех. В частности, допускается прокладка оптических кабелей вместе с высоковольтными линиями электропередач.

Как и в случае с коммуникациями медным кабелем, сигнал в оптоволоконных линиях мультиплексируется. В частности, для оптоволоконных систем это технология спектрального уплотнения *WDM* (*Wavelength Division Multiplexing*), позволяющая одновременно передавать по оптоволокну несколько сигналов с различной длиной волны. У спектрального уплотнения есть один принципиальный недостаток: для усиления и коммутации оптический сигнал сначала преобразуется в электрический, а затем – обратно в оптический. Это усложняет и удорожает построение магистральных сетей. Однако в настоящее время имеется ряд наработок для решения данной проблемы. Одна из них – использование усилителей на основе оптоволокна, легированного эрбием (*EDFA*), что дает возможность передавать данные по оптическим сетям на расстояние больше тысячи километров.

Постоянно растущие тактовые частоты процессоров и периферии требуют более высокоскоростных линий для передачи информации. Здесь уже требуется повышение скорости соединения не целых сетей или отдельных компьютеров, а межсоединений в са-

мом устройстве. Сейчас разрабатывается и внедряется новая технология оптических межсоединений и встроенных оптических волноводов на печатных платах для быстродействующих устройств. Данная технология позволит решить проблемы, связанные с ростом частоты передачи данных свыше 10 ГГц и перехода на скорость передачи в несколько терабит в секунду. Применение оптоэлектроники в этих областях должно существенно повысить вычислительную мощность.

1.6.2. Оптическое волокно

Оптическое волокно – это диэлектрическая структура, по которой распространяется оптический сигнал. Как правило, волокно используется в виде кабеля, т. е. окружено защитной оболочкой, предохраняющей его от механических повреждений и воздействий окружающей среды.

Оптическое волокно имеет два концентрических слоя – ядро (сердцевина) и оптическая оболочка. Внутреннее ядро предназначено для переноса светового сигнала. Окружающая его оптическая оболочка имеет отличный от ядра показатель преломления и обеспечивает полное внутреннее отражение света в ядро. Характерные величины показателей преломления – 1,47 для ядра и 1,46 для оптической оболочки.

Волокна имеют дополнительную защитную оболочку вокруг оптической. Она представляет собой один или несколько слоев полимера и предохраняет сердцевину и оптическую оболочку от внешних воздействий. Защитная оболочка не влияет на процесс распространения света по волокну.

Свет удерживается внутри сердцевины и распространяется по зигзагообразной траектории вдоль оси волокна вследствие эффекта полного внутреннего отражения при условии

$$\sin\alpha \le \sqrt{n_1^2 - n_2^2}, \qquad (1.14)$$

где α – угол падения; n_1 и n_2 – показатели преломления сердцевины и оптической оболочки соответственно.

На рис. 1.20 представлена схема распространения света по волокну. Свет инжектируется внутрь волокна под углом больше критического к границе сердцевина/оптическая оболочка и испытывает полное внутреннее отражение на этой границе. Поскольку углы

падения и отражения совпадают, то свет и в дальнейшем будет отражаться от границы. Таким образом, луч света будет двигаться зигзагообразно вдоль волокна.

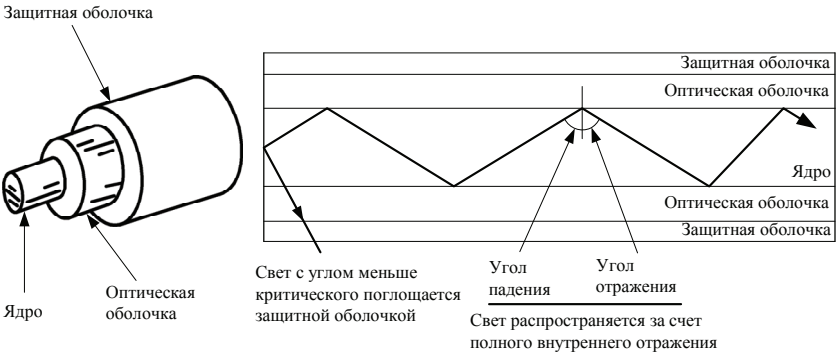


Рис. 1.20. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне

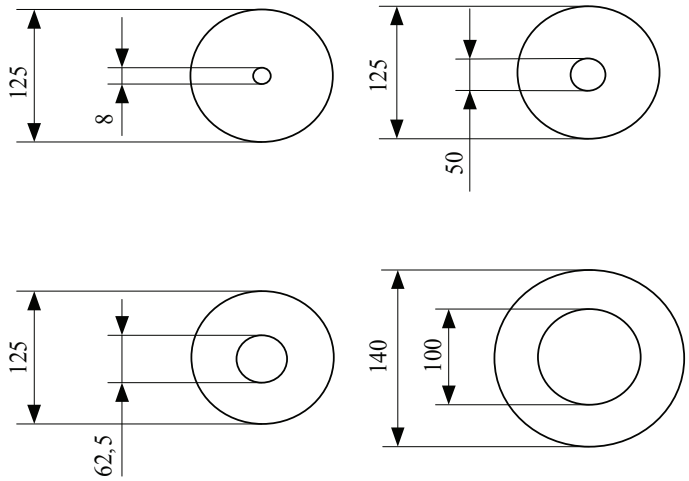


Рис. 1.21. Типичные диаметры сердцевины и оптической оболочки (размеры указаны в микрометрах)

Внутреннее отражение служит основой для распространения света вдоль обычного оптического волокна. При этом учитываются только меридианные лучи, проходящие через центральную ось волокна после каждого отражения. Другие лучи, называемые асимметричными, движутся вдоль волокна, не проходя через его

центральную ось. Траектория асимметричных лучей представляет собой спираль, накручивающуюся вокруг центральной оси. Асимметричные лучи, как правило, игнорируются в анализе большинства волоконно-оптических процессов.

Волокна сами по себе имеют чрезвычайно малый диаметр. На рис. 1.21 представлены поперечные сечения и диаметры для сердцевины и оптической оболочки четырех наиболее распространенных видов волокон.

1.6.3. Классификация оптических волокон

Оптические волокна в зависимости от области применения, требуемых характеристик и стоимости изготавливаются из различных материалов:

1. *Стеклянные волокна*. Данный тип волокон имеет стеклянную сердцевину и стеклянную оболочку и обладает наилучшими характеристиками из всех, однако это волокно является самым дорогостоящим. Стекло, используемое в данном типе волокон, состоит из сверхчистого диоксида кремния или плавленого кварца. Для получения требуемого показателя преломления в стекло добавляют различные примеси. Для увеличения показателя в стекло добавляется германий и фосфор, а для уменьшения – бор и фтор. Также в стекле присутствуют другие примеси, ухудшающие характеристики волокна (в основном группы OH).
2. *Стеклянные волокна с полимерной оптической оболочкой*. Являются промежуточным вариантом. Они имеют не столь хорошие характеристики как волокна со стеклянной оптической оболочкой, однако являются вполне приемлемыми. В отличие от стеклянных волокон, не имеют дополнительной защитной оболочки.
3. *Полимерные волокна*. Имеют полимерную сердцевину и полимерную оптическую оболочку, а также самые худшие характеристики из всех. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным. Также не имеют защитной оболочки.

Также оптические волокна могут быть классифицированы по показателю преломления сердцевины и модовой структуре света.

На рис. 1.22 показаны три основные особенности волокон в соответствии с этой классификацией:

1. Различие входного и выходного импульсов. Уменьшение амплитуды импульса связано с затуханием его мощности, а расширение – с конечной полосой пропускания волокна и ограниченной информационной емкостью.
2. Траектория лучей, возникающих при распространении света.
3. Распределение значений показателей преломления в сердцевине и оптической оболочке для различных типов волокон.

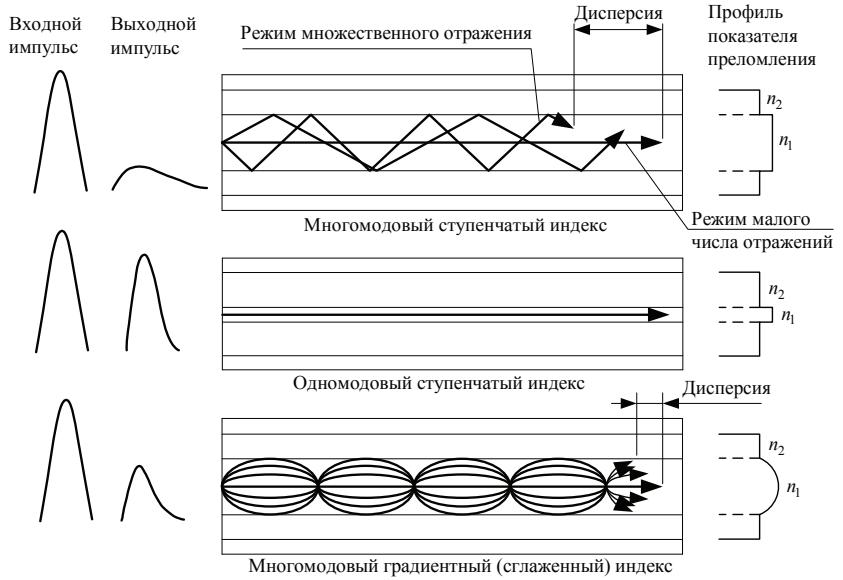


Рис. 1.22. Типы распространения света в волокне

Мода – математическое или физическое понятие, связанное с процессом распространения электромагнитных волн в среде. Под модой можно понимать вид траектории, вдоль которой может распространяться свет. Количество мод в волокне может быть в районе от одной до сотен тысяч. Их количество зависит от размеров и свойств волокна.

Профиль показателя преломления отображает соотношение между показателями сердцевины и оптической оболочки. Существуют два основных вида профиля – ступенчатый и градиентный.

Волокно со *ступенчатым* профилем имеет сердцевину с однородным показателем преломления на любом расстоянии от центра.

На границе сердцевины и оптической оболочки показатель преломления резко изменяется.

В волокнах со *сглаженным* профилем показатель преломления плавно изменяется. Он максимален в центре сердцевины и уменьшается по мере приближения к границе с оптической оболочкой. Резкого скачка показателей на границе не наблюдается.

Руководствуясь данной классификацией, все оптические волокна можно разделить на три основных типа:

1. *Многомодовое волокно со ступенчатым индексом* (рис. 1.23). Является наиболее простым типом волокон.

Разные моды затрачивают различное время на прохождение одного и того же отрезка волокна. Луч, направленный параллельно оси световода, проходит меньшее расстояние, чем луч, распространяющийся по ломаной траектории. Как следствие, лучи достигнут конца сердечника в разные моменты времени. В результате этого световой импульс «расплывается» (расширяется) во времени. Это явление называется *модовой дисперсией* и выражается максимальной разностью времен распространения мод.

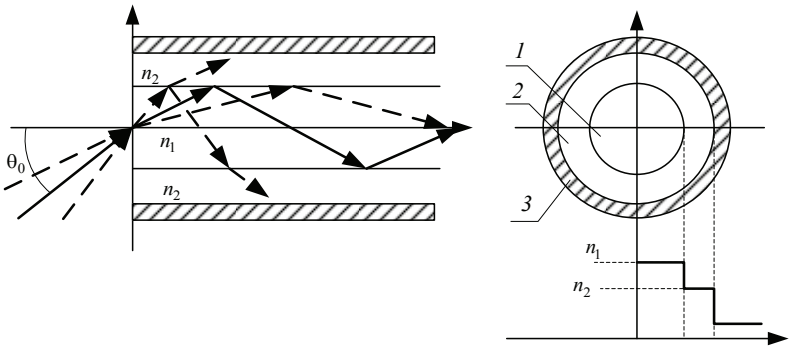


Рис. 1.23. Волокно со ступенчатым показателем преломления:
1 – сердцевина; *2* – оптическая оболочка; *3* – защитная оболочка

2. *Многомодовое волокно со сглаженным индексом* (рис. 1.24).

В этом типе волокон ядро состоит из множества слоев, показатели преломления которых уменьшаются при удалении от центральной оси. Каждый слой ядра отражает световой луч. В отличие от волокна со ступенчатым индексом преломления, здесь свет более плавно испытывает отражение от каждого слоя сердцевины

(см. рис. 1.24). При этом траектория движения светового луча по волокну приобретает синусоидальную форму (см. рис. 1.22).

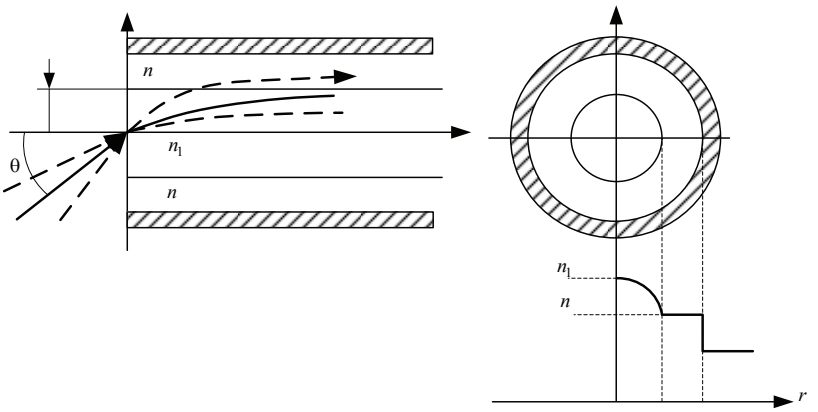


Рис. 1.24. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления

Использование сглаженного профиля показателя преломления приводит к значительному уменьшению модовой дисперсии. Однако полностью устранить межмодовую дисперсию в многомодовом волокне не удается, что объясняется как несовершенством профиля показателя преломления, так и наличием спиральных мод, возникающих вследствие осевой симметрии оптоволокна.

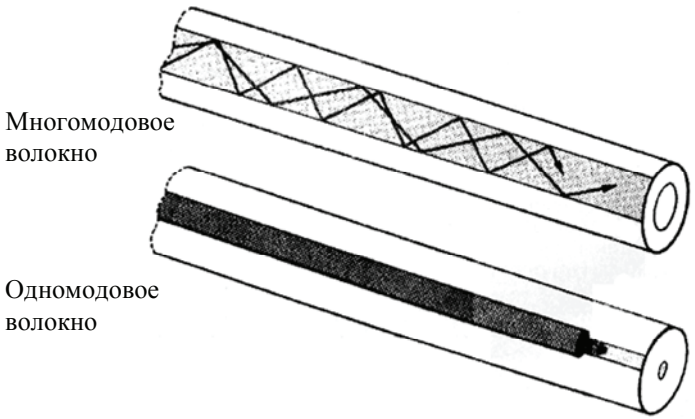


Рис. 1.25. Оптическая мощность в многомодовом и одномодовом волокне

3. *Одномодовое волокно со ступенчатым индексом*. Как видно из названия, одномодовое волокно способно передавать лишь одну моду. Явление межмодовой дисперсии в таком волокне отсутствует, а ширина полосы пропускания ограничивается молекулярной дисперсией.

Одномодовое волокно имеет малый диаметр сердцевины – от 5 до 10 мкм. Для работы с этим типов волокон используются лазерные источники излучения с длинами волн 1300 и 1550 нм при ширине спектра в несколько нанометров.

Существует различие в распространении излучения в одномодовом и многомодовом волокне. Некоторая часть электромагнитной энергии переносится в оптической оболочке (рис. 1.25). Эта особенность обусловливает повышенные требования к прозрачности и качеству в целом оптической оболочки волокна. Кроме того, диаметр светового пучка, вводимого в волокно, превышает его диаметр.

1.6.4. Основные параметры оптоволокна

К основным параметрам оптоволокна относятся.

Дисперсия. Дисперсия ограничивает такие важные характеристики волокна, как ширину полосы пропускания и информационную емкость. Наличие дисперсии вынуждает снижать скорость передачи информации. Существуют три вида дисперсии:

1. *Модовая дисперсия*. Присуща только многомодовым волокнам. Возникает в результате того, что лучи в волокне отражаются под различными углами и, следовательно, проходят разный путь. Типичное значение задержки сигнала для стеклянных волокон – порядка 4–5 нс/км.
2. *Материальная дисперсия* возникает в волокнах всех видов в результате того, что волны различной длины проходят через определенные материалы с различными скоростями.
3. *Волноводная дисперсия*. Имеет значение в основном для одномодовых волокон. Обусловлена тем, что оптическая энергия движется как по сердцевине, так и по оптической оболочке, которые имеют различные показателя преломления. Из-за этого скорости распространения в сердцевине и оптической оболочке различаются.

На рис. 1.26 показана зависимость хроматической дисперсии от длины волны. Из рисунка видно, что в области ниже 1300 нм более длинные волны движутся быстрее коротких. Для длин волн более 1300 нм имеет место обратная ситуация – более длинные волны движутся медленнее коротких.

Хроматическая дисперсия является основным видом дисперсии в одномодовых системах.

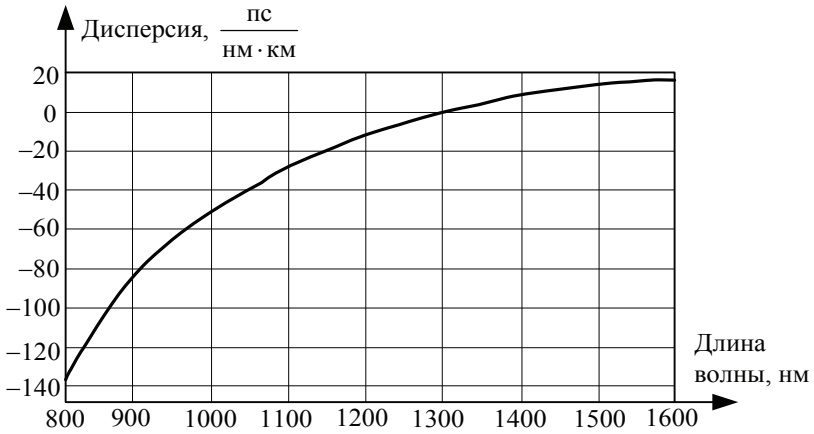


Рис. 1.26. Зависимость хроматической дисперсии от длины волны

Затухание – потеря оптической энергии по мере движения света по волокну. Оптический сигнал, распространяясь по волоконно-оптической линии, испытывает потери (уменьшение мощности) вследствие поглощения и рассеивания света в волокне из-за взаимодействия с веществами сердцевины и оболочки. Поглощение связано с возбуждением в материале световода электронных переходов и резонансов. В результате этого увеличивается тепловая энергия, накапливаемая в оптическом волокне. Поглощение зависит как от свойств материала, из которого изготавливается оптоволокно, так и от длины волны источника света. Измеряется в дБ/км. Имеет разброс от 300 дБ/км для полимерных волокон до 0,2 дБ/км для одномодовых волокон. Затухание зависит от длины волны. В материале существует несколько областей с пониженным затуханием, которые называются *окнами прозрачности*, в которых функционируют оптические линии связи (рис. 1.27).

Снижение потерь в волокне требует, чтобы источник света работал в области длин волн с наименьшим затуханием.

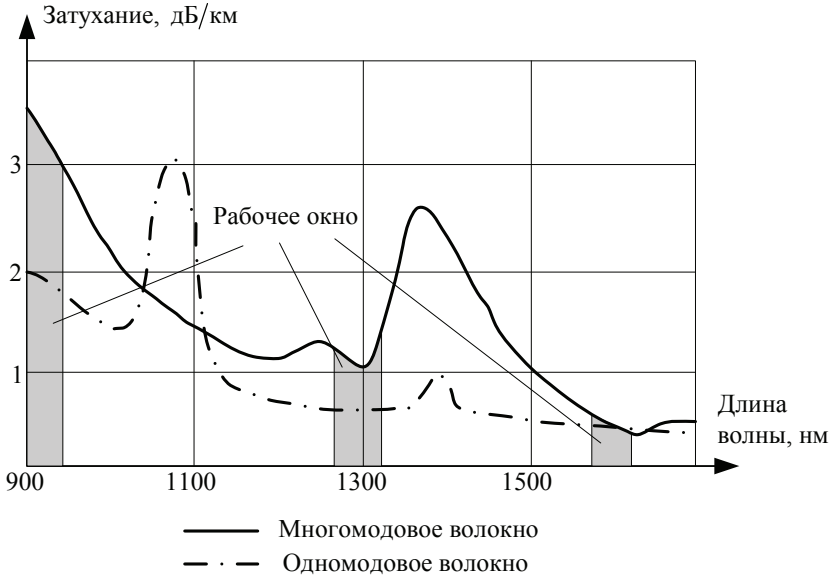


Рис. 1.27. Зависимость затухания от длины волны

Важнейшей особенностью затухания в оптическом волокне является его независимость от частоты модуляции внутри полосы пропускания. Для сравнения, в медных кабелях затухание увеличивается с частотой сигнала.

Числовая апертура. Числовой апертурой (*NA*) называется способность волокна собирать лучи. Только лучи, которые инжектируются в волокно под углами больше критического, смогут распространяться вдоль него. *NA* зависит от свойств материалов волокна и определяется показателями преломления сердцевины и оптической оболочки:

$$NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}. \qquad (1.15)$$

NA является безразмерной величиной. Чем меньше значение *NA*, тем меньше мод проводит оптическое волокно.

Прочность волокна. Предел прочности характеризует способность волокна противостоять натяжению или изгибу без повреждения.

Основная причина, обусловливающая хрупкость волокна, – наличие микротрещин на поверхности и дефектов внутри самого во-

локна. При этом трещины на поверхности являются более существенными. Расширяющиеся дефекты приводят к обрыву волокна.

Радиус изгиба. Достаточно резкий изгиб может разорвать волокно. Поэтому все волокна имеют минимальный радиус изгиба.

Изгибы в волокне приводят к увеличению затухания (это связано с изменением углов падения в местах изгиба, некоторые из мод падают под углами меньше критического и покидают волокно), а также уменьшению предела прочности волокна на разрыв.

Обычно минимальный радиус кривизны равен пяти диаметрам кабеля.

1.6.5. Конструкция волоконно-оптического кабеля

На рис. 1.28 представлены основные компоненты волоконно-оптического кабеля.

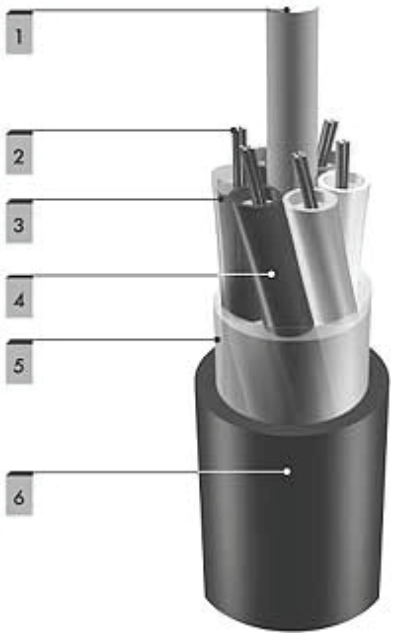


Рис. 1.28. Конструкция волоконно-оптического кабеля:
1 – центральный силовой элемент – стеклопластиковый пруток;
2 – оптическое волокно; *3* – внутримодульный гидрофобный заполнитель;
4 – оптический модуль; 5 – промежуточная оболочка из полиэтилена;
6 – защитная оболочка

Конструкция кабелей может быть достаточно разнообразной, но общими являются следующие компоненты:

- оптическое волокно;
- внутримодульный гидрофобный заполнитель, который обеспечивает герметизацию волокна от влаги;
- оптический модуль представляет собой полимерную оболочку, расположенную поверх оптической; основная задача модуля – защита волокна от механических и температурных воздействий;
- центральный силовой элемент – повышает механическую прочность кабеля, принимая на себя растягивающие напряжения;
- защитная оболочка – обеспечивает защиту от трения, коррозии, химических воздействий и др.

1.6.6. Печатные платы с оптоволоконными проводниками

Современные процессоры работают на частотах порядка 2–4 ГГц. В действительности же быстродействие КМОП-логики, на основе которой в настоящее время изготавливаются все интегральные микросхемы, составляет порядка 10 ГГц. Основная проблема заключается не в том, что микросхемы не способны работать на таких частотах, а в передаче сигналов между этими микросхемами. Особенно чувствительными являются соединения между процессорами и оперативной памятью.

Дело в том, что при повышении частоты передачи сигнала по медным проводникам резко возрастают потери и появляются искажения сигнала. В результате увеличивается число ошибок при работе. Было показано, что потери на печатных платах стандарта *FR*-4 (*Flame Resistance* 4) с медной разводкой быстро растут при частотах свыше 1 ГГц; при этом ухудшается отношение сигнал/шум и появляются ошибки в синхронизации. Кроме того, перекрестные помехи ограничивают плотность разводки.

Использование оптических линий связи для высокоскоростных шин может решить данную проблему. Высокоскоростные оптические каналы длиной до 10 см между микросхемами имеют ряд преимуществ по сравнению с медными. У них меньшие потери при большей полосе пропускания; кроме того, они не подвержены

перекрестным электромагнитным помехам. В настоящее время ведутся работы по внедрению подобного типа коммутационных структур в печатные платы.

На рис. 1.29 представлены возможные варианты построения систем на основе оптических соединений.

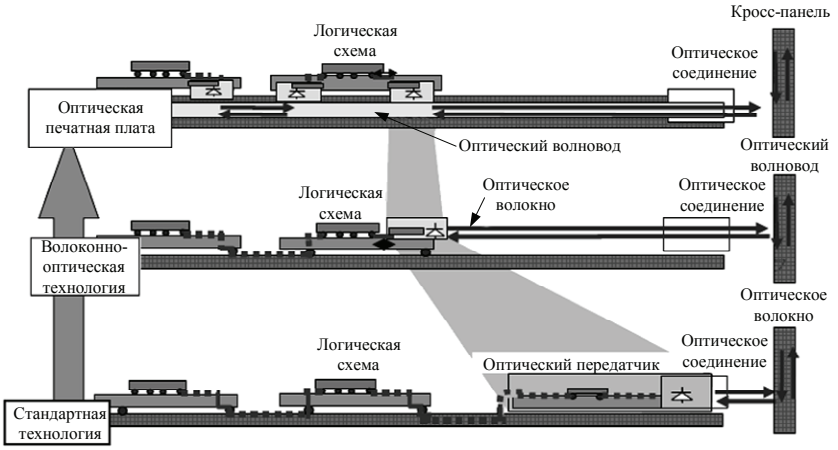


Рис. 1.29. Варианты систем на основе оптических соединений

Для передачи оптических сигналов по печатным платам фирма *IBM* разработала технологию, основанную на полимерных многомодовых волноводах размера 50×50 мкм. При этом для коротких расстояний при внутрисистемной связи модовая дисперсия не ограничивает скорости передачи сигналов до ожидаемого уровня 20 Гбит/с.

1.7. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ МОНТАЖ МОДУЛЕЙ МИКРО- И НАНОСИСТЕМ НА ОСНОВЕ МКС

1.7.1. Понятие электрических соединений

Под **электрическими соединениями** понимают линии передач и электрические контакты, служащие для передачи сигналов и электрической энергии между ИМС, ЭРЭ, модулями, образующими ЭА. Электрические соединения бывают внутри- и межмодульными, внутри- и межъячеечными, внутри- и межблочными и т. д., что обусловливает их конструктивное исполнение.

Электромонтажные работы – это совокупность операций и технологических процессов электрического монтажа.

Электрический монтаж – получение электрических соединений и межсоединений с помощью конструкционных соединений и различных видов монтажа.

В ЭА используются временные, постоянные и полупостоянные электрические контакты. К временным следует отнести разъемное соединение, к постоянным – сварку, полупостоянным – паяное соединение, соединение склеиванием, соединение накруткой.

1. **Разъемные соединения** (рис. 1.30) обеспечивают быструю установку и удаление элементов конструкции и используются для повышения ремонтопригодности аппаратуры. Также разъемные соединения применяют в модульной аппаратуре для соединения различных частей схемы, находящихся, как правило, на отдельных печатных платах.

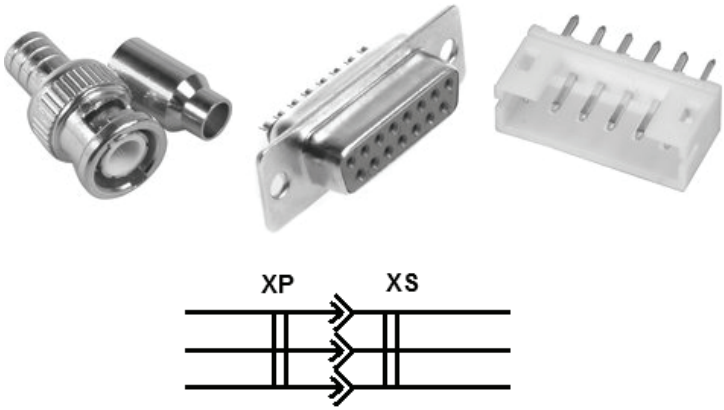


Рис. 1.30. Внешний вид и схематическое обозначение некоторых разъемов

2. **Соединение пайкой** (рис. 1.31) – технологическая операция, применяемая для получения неразъемного соединения деталей из различных материалов путем введения между этими деталями расплавленного материала (припоя), имеющего более низкую температуру плавления, чем материал (материалы) соединяемых деталей.

Пайка бывает низкотемпературная (до 450°С) и высокотемпературная. Соответственно, припои бывают легкоплавкие и тугоплавкие. Низкотемпературная пайка характерна в основном для приборостроения, тогда как высокотемпературная – для машиностроения.

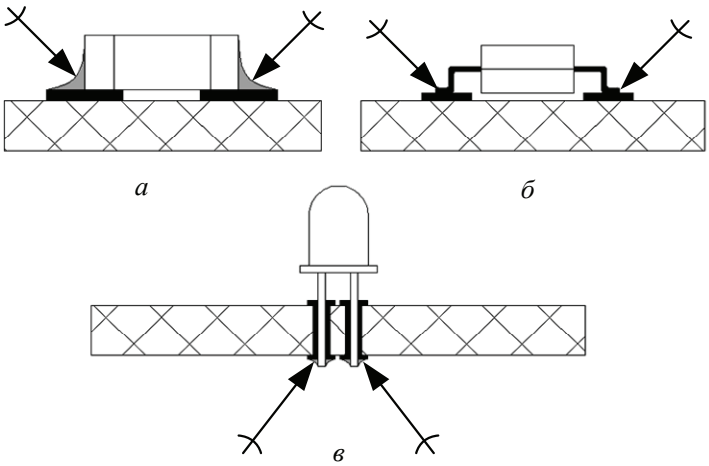


Рис. 1.31. Виды соединения пайкой:
а – пайка *SMD*-компонента с выводами на корпусе;
б – пайка *SMD*-компонента с планарными выводами;
в – пайка КМО-компонента со штыревыми выводами

3. **Соединение сваркой** – процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместном действии того и другого.

Сварочное соединение обладает высокой механической прочностью, способностью выдерживать циклические температурные воздействия, обеспечивает высокую плотность монтажа и рекомендуется для применения при разработке микроминиатюрной аппаратуры.

В приборостроении редко используется газовая или токовая сварка. Чаще всего используют более безопасный метод – ультразвуковая сварка. Сварка осуществляется сближением атомов свариваемых изделий на расстояние действия межатомных сил за счет энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в материалы. Ультразвуковая сварка характеризуется рядом положительных качеств, что, несмотря на высокую стоимость оборудования, обусловливает её применение в производстве микросхем (сварка проводников с контактными площадками), прецизионных изделий, сварке металлов разных типов и металлов с неметаллами.

4. **Электропроводящие клеи** (контактолы) применяют при создании монтажных соединений в тех случаях, когда другие методы оказываются неэффективными: в труднодоступных местах, при ремонте, при низкой термостойкости компонентов. Особенно широко используют контактолы при изготовлении гибридных ИС, микросборок и присоединении их подложек к корпусам микроблоков.

Контактолы изготавливают на основе эпоксидных смол, полиуретана, силикона и неорганических соединений. В качестве наполнителя используют мелкодисперсный (порядка 1–2 мкм) порошок золота, серебра, палладия, никеля, меди, алюминия или графита. Наибольшей электропроводностью обладают клеи на основе серебра и золота.

Свойства электропроводящих клеев зависят не только от типа наполнителя, но и от его концентрации. Чем больше наполнителя, тем меньше сопротивление клея. Однако увеличение концентрации наполнителя ведет к ухудшению механических свойств соединения.

1.7.2. Выводной монтаж на коммутационных структурах

При выводном монтаже на МКС используются компоненты, монтируемые в отверстия. К данному типу относятся такие компоненты, как мощные резисторы и транзисторы, интегральные микросхемы в *DIP*-корпусах, переменные резисторы, электролитические конденсаторы большой емкости и другие (рис. 1.32).

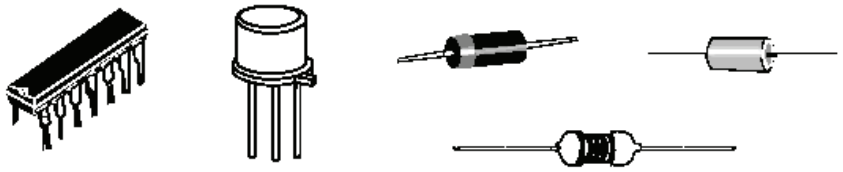


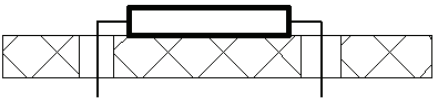
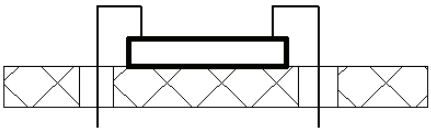
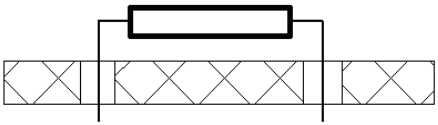
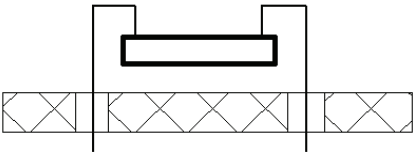
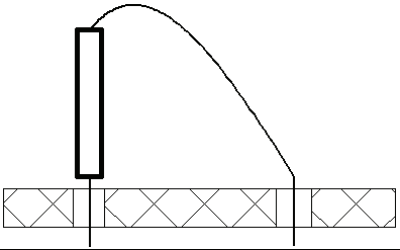
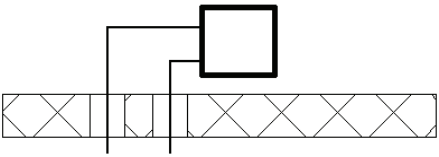
Рис. 1.32. Компоненты, монтируемые в отверстия

Технология выводного монтажа появилась раньше поверхностного. Затем с развитием последней данная технология применяется все реже. Однако существуют области производства электронной аппаратуры, где выводной монтаж применяется до сих пор: производство вторичных источников питания, аппаратуры, подвергающейся негативным физическим воздействиям (вибрация, удары), и др.

Практически все КМО требуют формовки выводов в зависимости от варианта установки на плату (табл. 1.17).

Таблица 1.17

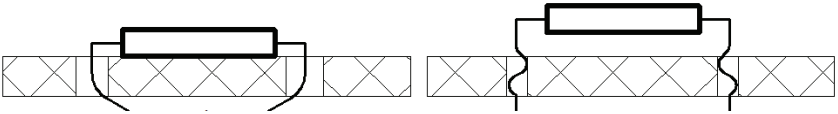
Варианты установки КМО на плату

Название	Иллюстрация	Примечание
Установка с П-образной формовкой выводов без зазора		Печатные проводники под корпусом или отсутствуют, или закрыты паяльной маской
Установка без зазора с формовкой выводов на 180°		Используется только в случае достаточно длинных выводов КМО
Установка с П-образной формовкой выводов с зазором		Зазор образуют установкой технологической прокладки или специальной формовкой выводов
Установка с зазором с формовкой выводов на 180°		----------///----------
Вертикальная установка с зазором		Увеличивается плотность монтажа, однако также увеличивается высота печатной платы в сборе
Установка под углом		Чаще всего используется для установки элементов на теплоотводы

При установке элементов на плату без зазора чаще всего используется метод формовки выводов подгибкой (рис. 1.33, *а*). Сначала происходит П-образная формовка выводов компонента. Далее

выводы обрезаются до необходимой длины, и компонент вставляется в отверстия в печатной плате. После этого выводы компонента подгибаются навстречу друг другу при помощи специального автомата или вручную. В результате данной операции компонент оказывается достаточно прочно установленным на печатной плате во время пайки.

В случае установки элементов на плату с зазором предыдущий вариант формовки не подходит, так как не позволяет зафиксировать компонент по оси Z. При данном типе установки компонентов используется метод формовки выводов в «зиг-замок» (рис. 1.33, *б*). Выводы элемента входят в монтажные отверстия с небольшим натягом и надежно фиксируют компонент по всем трем осям координат. Недостатком этого метода является необходимость обеспечения высокой точности формовки выводов.



а *б*

Рис. 1.33. Варианты формовки выводов:
а – подгибкой; *б* – в «зиг-замок»

Вариант фиксации выводов пружинением (рис. 1.34) в основном используется в случае применения микросхем в *DIP*-корпусе. Перед установкой плоские выводы должны быть отрихтованы, иначе возможна ненадежная фиксация.

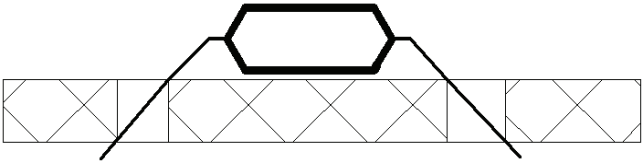


Рис. 1.34. Фиксация выводов пружинением

1.7.3. Пайка выводов

Пайка волной припоя применяется только для пайки компонентов в отверстиях плат (традиционная технология), хотя теоретически с её помощью можно производить пайку поверхностно

монтируемых компонентов с несложной конструкцией корпусов, устанавливаемых на одной из сторон ПП.

Процесс пайки прост. Платы, установленные на транспортере, подвергаются предварительному нагреву, исключающему тепловой удар на этапе пайки. Далее плата проходит последовательно над двумя волнами – флюса и припоя. Сама волна, её форма и динамические характеристики являются наиболее важными параметрами оборудования для пайки. С помощью сопла можно менять форму волны. Также могут варьироваться направление и скорость движения потока припоя, достигающего платы, но они должны быть одинаковы по всей ширине волны. Регулируется и угол наклона транспортера для плат.

Некоторые установки для пайки оборудуются специальным воздушным ножом, который обеспечивает уменьшение количества перемычек припоя. Нож располагается сразу же за участком прохождения волны припоя и включается в работу, когда припой находится еще в расплавленном состоянии на ПП. Узкий поток нагретого воздуха, движущийся с высокой скоростью, уносит с собой излишки припоя, тем самым разрушая перемычки и способствуя удалению излишков припоя.

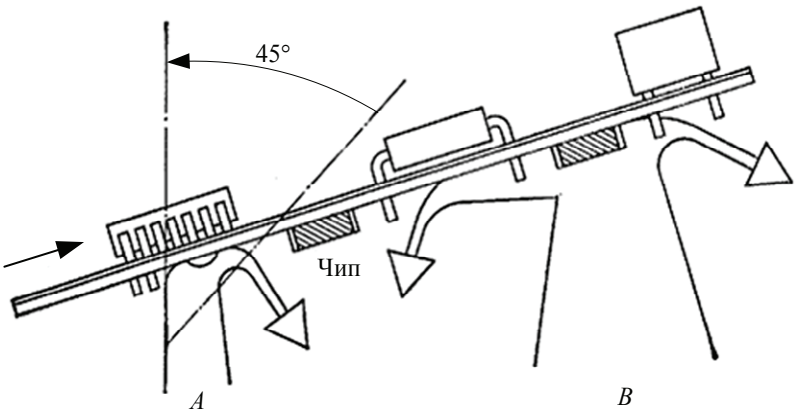


Рис. 1.35. Схема процесса пайки двойной волной припоя:
A – первая волна; *B* – вторая Т-образная волна

Для улучшения процесса пайки внедряют вторую волну припоя (рис. 1.35). Первая волна делается турбулентной и узкой, она исходит из сопла под большим давлением. Турбулентность и высокое давление потока припоя исключают формирование полостей

с газообразными продуктами разложения флюса. Однако турбулентная волна всё же образует перемычки припоя, которые разрушаются второй, более пологой ламинарной волной с малой скоростью истечения. Вторая волна обладает очищающей способностью и устраняет перемычки припоя, а также завершает формирование галтелей.

Для обеспечения эффективности пайки все параметры каждой волны должны быть регулируемыми. Поэтому установки для пайки двойной волной должны иметь отдельные насосы, сопла, а также блоки управления для каждой волны.

Селективная пайка применяется в том случае, когда на плате установлено небольшое число КМО, а следовательно, применение пайки волной нецелесообразно или невозможно. Применение данной технологии позволяет производить установку *SMD*-компонентов на паяльную пасту с её дальнейшим оплавлением в конвекционной печи, а затем паять навесные компоненты в системе селективной пайки. Это обеспечивает более высокое качество пайки поверхностно-монтируемых компонентов, чем групповая пайка компонентов в установке пайки двойной волной припоя, особенно при высокой плотности монтажа на плате. К тому же *SMD*-компоненты не погружаются в волну припоя и не подвергаются дополнительному термическому воздействию. Следовательно, с применением систем селективной пайки миниволной припоя сохраняются технологии пайки как поверхностно-монтируемых компонентов, так и компонентов, установленных в отверстия, обеспечивая тем самым высокое качество изделий.

Основной конструктив установки для пайки волной – мощная стальная рама. В данном блоке все оси жестко зафиксированы для каждого модуля (конвейер, зона предварительного нагрева, блок флюсования и блок пайки). Такое жесткое выравнивание по осям обеспечивает высокую точность в позиционировании и надежности работы машины и удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к селективной пайке.

Плата перемещается над модулем предварительного нагрева для исключения теплового удара при пайке. После этого механизм захвата берет плату и перемещает её через устройство флюсования в модуль пайки. В то время как происходит процесс пайки, следующая ПП уже находится в зоне предварительного нагрева, поэтому время прохождения зоны предварительного нагрева не влияет на общее время производительности.

Для достижения наиболее короткого времени рабочего цикла процесс флюсования может выполняться отдельно стоящим внешним координатным модулем флюсования. Совместно с процессом пайки погружением, применение данного модуля флюсования сокращает длительность времени рабочего цикла и не превышает 20 с даже для сложных ПП с высокой плотностью монтажа.

Сопло для селективной пайки аналогично соплу для пайки волной, однако имеет значительно меньшие размеры (рис. 1.35). При работе насадки могут меняться в зависимости от предназначения.

Производительность установок для селективной пайки значительно ниже, чем у установок для пайки волной. Это обусловливается необходимостью пропаивать каждый вывод компонента и скоростью осуществления данной пайки.

Для увеличения производительности используют специализированные насадки для групповой пайки сразу всех штыревых выводов на плате. Однако данный метод требует применения дорогостоящих насадок, которые изготавливаются специально для каждой печатной платы. Поэтому этот метод имеет смысл применять для крупносерийного производства.

Ручная пайка применяется в основном для опытного производства либо ремонта электронной аппаратуры. Данный вид пайки осуществляется при помощи специальных паяльников, имеющих сменные жала.

Перед пайкой контакты флюсуют в нейтральном или кислотном флюсе. Затем прижимают контакты друг к другу и смачивают разогретым припоем. Возможно также использование трубчатого припоя с флюсом, что значительно ускоряет процесс пайки.

Производительность данного метода пайки крайне низкая, однако имеет наименьший процент брака, что обусловливает его применение в единичном производстве.

1.7.4. Поверхностный монтаж на коммутационных структурах

Технологию поверхностного монтажа печатных плат также называют ТМП (технология монтажа на поверхность), *SMT* (*Surface Mount Technology*) и *SMD*-технология (от *Surface Mounted Device* – прибор, монтируемый на поверхность). Она является наиболее распространенным на сегодняшний день методом конструирования и сборки электронных узлов на печатных платах. Основным её

отличием от «традиционной» технологии монтажа в отверстия является то, что компоненты монтируются на поверхность печатной платы, однако преимущества технологии поверхностного монтажа печатных плат проявляются благодаря комплексу особенностей элементной базы, методов конструирования и технологических приемов изготовления печатных узлов.

Технология поверхностного монтажа по сравнению с технологией монтажа в отверстия обладает рядом преимуществ как в конструкторском, так и в технологическом аспекте:

1. *Снижение габаритов и массы печатных узлов*. Элементная база, применяемая в технологии поверхностного монтажа, имеет значительно меньшие размеры по сравнению с компонентами, монтируемыми в отверстия. Как известно, бóльшую часть массы и габаритов микросхемы составляет отнюдь не кристалл, а корпус и выводы. Размеры корпуса продиктованы в основном расположением выводов (могут существовать и другие факторы, например требования по теплоотводу, но они значительно реже являются определяющими). Поверхностный монтаж позволяет применять компоненты с существенно меньшим шагом выводов благодаря отсутствию отверстий в плате. Поперечные сечения выводов могут быть также меньше, поскольку выводы формуются на предприятии-изготовителе компонентов и не подвергаются существенным механическим воздействиям от разупаковки до установки на плату. Кроме того, эта технология позволяет применять корпуса компонентов с контактными поверхностями, заменяющими выводы.

   Современная технология поверхностного монтажа позволяет устанавливать компоненты с обеих сторон печатной платы, что уменьшает площадь платы и, как следствие, габариты печатного узла.
2. *Улучшение электрических характеристик*. За счет уменьшения длины выводов и более плотной компоновки значительно улучшается качество передачи слабых и высокочастотных сигналов.
3. *Повышение технологичности*. Это преимущество является, пожалуй, основным, позволившим поверхностному монтажу получить широкое распространение. Отсутствие необходимости подготовки выводов перед монтажом и установки выводов в отверстия, фиксация компонентов паяльной пастой или клеем, самовыравнивание компонентов при пайке – всё это позволяет применять автоматическое технологическое оборудование с про-

изводительностью, недостижимой при соответствующей стоимости и сложности технических решений при монтаже в отверстия. Применение технологии групповой пайки значительно снижает трудоемкость операции пайки по сравнению с ручной или селективной пайкой и позволяет экономить материалы по сравнению с пайкой волной.

4. *Повышение ремонтопригодности*. Современное ремонтное оборудование позволяет снимать и устанавливать компоненты без повреждений даже при большом количестве выводов. При монтаже в отверстия эта операция является более сложной из-за необходимости равномерного прогрева достаточно теплоемких паяных соединений. При поверхностном монтаже теплоемкость соединений меньше, а нагрев может осуществляться по поверхности горячим воздухом или азотом. Тем не менее некоторые современные компоненты для поверхностного монтажа являются настолько сложными, что их замена требует специального оборудования.
5. *Снижение себестоимости*. Уменьшение площади печатных плат, меньшее количество материалов, используемых в компонентах, автоматизированная сборка – всё это при прочих равных условиях позволяет существенно снизить себестоимость изделия при серийном производстве.

Паяльная паста используется в технологии поверхностного монтажа в качестве материала, обеспечивающего образование паяных соединений между контактными площадками печатной платы и выводами поверхностно-монтируемых электронных компонентов (ЭК). Это является одним из отличий данной технологии от традиционных, где использовался припой. Одним из важнейших достоинств пасты является её многофункциональность и технологичность применения: помимо основного назначения в качестве припоя, она одновременно является флюсом, а также фиксирует компоненты при их установке на ПП. Применение паст позволяет значительно автоматизировать процесс нанесения. Правильный выбор пасты, соблюдение определенной технологии при подготовке её к применению и предписанных производителем условий хранения – немаловажные факторы в обеспечении качества сборки электронного модуля.

Паяльная паста представляет собой густую, вязкую массу, состоящую из смеси порошкообразного припоя и флюса-связки. Флюсовая составляющая пасты содержит канифоль или синтетические

смолы, активаторы, добавки для контроля вязкости, стабилизаторы и растворители.

По размеру частиц припоя пасты подразделяются на 6 типов, согласно стандарту IPC/EIA J-STD-005 (табл. 1.18).

Таблица 1.18

Подразделение паст на типы

Тип	Размер частиц припоя, мкм. Параметры по стандарту IPC/EIA J-STD-005						Обозначение сетки по ASTM B-214
	Не более по AED, чем:	Менее 1% имеют больший AED, чем:	Минимум 80% имеют AED в диапазоне:	Максимум 10% имеют меньший AED, чем:	Средний AED частиц	Отношение *S*/*V*	
1	160	150	150–75	20	н.д.	н.д.	–100/+200
2	80	75	75–45	20	60	1,00	–200/+325
3	50	45	45–25	20	35	1,71	–325/+500
4	40	38	38–20	20	31	1,93	–400/+500(635)
5	30	25	25–15	15	18	3,33	–500/+635
6	20	15	15–5	5	н.д.	н.д.	–635

Содержание припоя. Содержание металла в пасте определяет толщину оплавленного припоя, осадку и растекание пасты и указывается в % по массе. Более высокое содержание металла ведет к увеличению толщины соединения после оплавления. Следует иметь в виду, что высота оплавленного припоя отличается от толщины нанесенного слоя пасты и может колебаться от 50% начальной толщины при 90% содержании металла до 25% при 75% содержании металла, что необходимо учитывать при обеспечении требуемого объема паяного соединения. Типичное значение содержания металла для паяльных паст – от 80 до 90%. Значения у верхнего предела указанного диапазона характерны для паст, предназначенных для трафаретной печати, у нижнего – для нанесения дозированием.

Паяльная паста наносится на КП платы через специальную оснастку – **трафарет**. Рисунок окон (апертур) трафарета соответствует рисунку размещения КП. Трафарету принадлежит основная роль в формировании отпечатка пасты правильной толщины и формы на КП с требуемой точностью.

Нанесение пасты на ПП производится с помощью ручного, полуавтоматического и автоматического оборудования двумя основными методами – трафаретной печатью и дозированием. Трафаретная печать является наиболее распространенным методом

нанесения пасты в серийном производстве. Паста наносится путем продавливания через апертуры в трафарете специальным инструментом – ракелем – при его горизонтальном перемещении по поверхности трафарета (рис. 1.36).

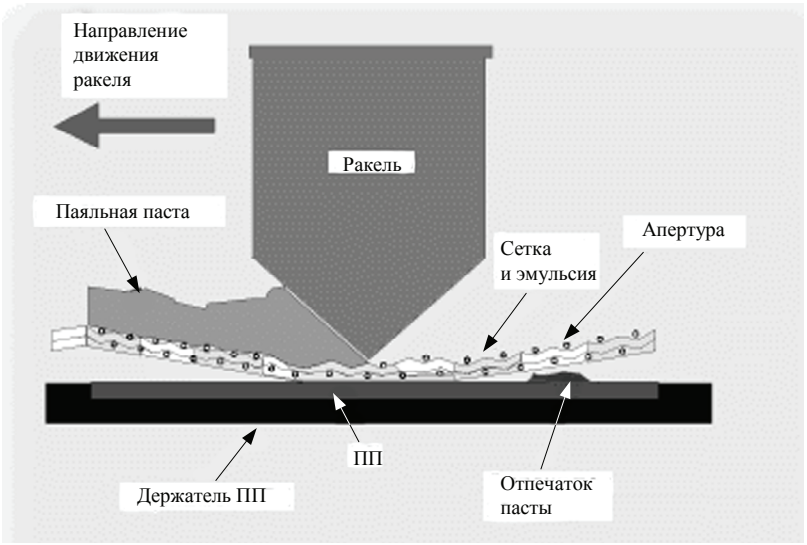


Рис. 1.36. Процесс нанесения пасты трафаретной печатью

Установка компонентов осуществляется:

- по программе на автоматах установки из стандартных упаковок, в которых компоненты поставляются заводом-изготовителем;
- при единичном и мелкосерийном производстве может применяться ручная установка с помощью вакуумного пинцета или манипулятора;
- автоматизированная установка на полуавтомате (манипуляторе с указателем места установки компонента по программе).

Производительность при ручной установке может составлять несколько сотен компонентов в час в зависимости от квалификации сборщика и сложности платы. При полуавтоматической установке производительность лежит в пределах примерно 400–700 компонентов в час.

Производительность при применении автомата в значительной степени зависит от типа автомата, сложности платы и оптимальности программы установки. Типичная производительность автома-

тов начального уровня лежит в пределах 1500–5000 компонентов в час. Типичная производительность серийных автоматов составляет 10–50 тыс. компонентов в час.

В современном оборудовании захват компонентов осуществляется вакуумной головкой. Для захвата тяжелых компонентов применяются специальные насадки. Разработчики компонентов для обеспечения возможности вакуумного захвата создают сбалансированные компоненты с определенным центром масс.

Пайка оплавлением – процесс оплавления припоя, содержащегося в паяльной пасте, выполняется в печах путем нагрева печатной платы с компонентами. Нагрев может осуществляться различными способами: *инфракрасный* (ИК), *конвекционный нагрев* и *нагрев в паровой фазе*. Наиболее широкое распространение получил конвекционный нагрев.

1. *ИК-нагрев* осуществляется ИК-лампами. Основным недостатком ИК-метода является зависимость температуры от степени черноты нагреваемой поверхности, в результате чего корпуса компонентов часто нагреваются до бóльших температур, чем паста. Из-за неравномерности нагрева данный метод в настоящее время самостоятельно практически не применяется. В некотором оборудовании ИК-метод используется в комбинации с конвекцией.
2. *Конвективная пайка* осуществляется с помощью потоков горячего воздуха или азота. Печи, предназначенные для серийного производства, позволяют получить достаточно равномерный нагрев. Возможность применения азота позволяет получать более качественные паяные соединения.
3. *Пайка в паровой фазе* осуществляется путем передачи тепла от испаренного теплоносителя. Данный метод является самым безопасным для изделия, но и самым дорогим.

Пайка оплавлением выполняется путем изменения температуры по заданному закону, называемому температурным профилем пайки (рис. 1.37). Типичный профиль состоит из постепенного нагрева с заданной скоростью до температуры предварительного нагрева (первый фронт), выдержки (первая ступень), нагрева до так называемой пиковой температуры (второй фронт), превышающей температуру плавления припоя, небольшой выдержки (вторая ступень) и охлаждения с заданной скоростью.

Фронты температурного профиля должны иметь определенный наклон, что необходимо для снижения теплового удара. Наклон фронта определяется свойствами паяльной пасты, требованиями,

предъявляемыми изготовителями компонентов, и конструкцией платы. Если нагрев оказывается слишком быстрым, это может привести к повреждению платы или компонентов, а также неоптимальной работе паяльной пасты. Если нагрев слишком медленный, это необоснованно удлиняет операционный цикл пайки. Типичные значения скорости нагрева лежат в пределах от 2 до 3ºС/с.

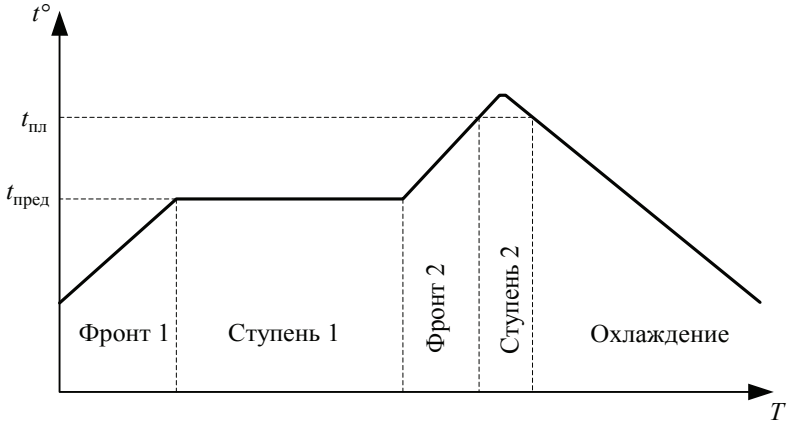


Рис. 1.37. Типичный температурный профиль пайки

Первая ступень необходима для прогрева платы и компонентов, удаления из них влаги, активации флюса и частичного удаления органических наполнителей, содержащихся в паяльной пасте (высушивание пасты). Температура ступени зависит в основном от типа пасты и, как правило, лежит в пределах 100–150ºС.

Вторая ступень представляет собой собственно пайку. В этой части профиля осуществляется испарение большей части органических составляющих, включая флюс, и оплавление припойных шариков. Пиковая температура и время выдержки при температуре выше точки плавления припоя зависят от многих факторов и выбираются, как правило, для каждого изделия индивидуально. Пониженные температура и время выдержки могут привести к отсутствию плавления припоя, повышенные – к повреждению компонентов платы, а также вскипанию флюса, что приводит к разбрызгиванию припоя с образованием дефектов. Разность между максимальной и минимальной допустимыми пиковыми температурами называется окном процесса. Охлаждение, так же как и нагрев, должно производиться с заданной скоростью.

Достижение профиля осуществляется одним из двух способов: либо плата помещается в камеру печи, температура в которой изменяется по заданному закону (камерные печи), либо плата продвигается на конвейере через несколько камер (зон) печи с постоянными температурами (конвейерные печи). Число зон в конвейерных печах определяется требуемыми наклонами фронтов, температурами и скоростью охлаждения. В современных печах, предназначенных для бессвинцовой пайки, число зон, как правило, находится в пределах 7–10. Конвейерные печи более дорогие, но позволяют обеспечить лучшую управляемость процесса и высокую производительность, поэтому камерные печи применяются только в единичном и мелкосерийном производстве.

После операции пайки, в зависимости от типа применяемой пасты, плата может подвергаться отмывке и сушке.

1.8. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА ЭС

1.8.1. Понятия производственного и технологического процессов

Технологический процесс определяет последовательность выполняемых действий при обработке или сборке, вид выбранной заготовки или материала, используемое оборудование и инструмент, технологические режимы. ТП сборки описывает последовательность действий при сборке как механических, так и электронных узлов изделия (рис. 1.38).

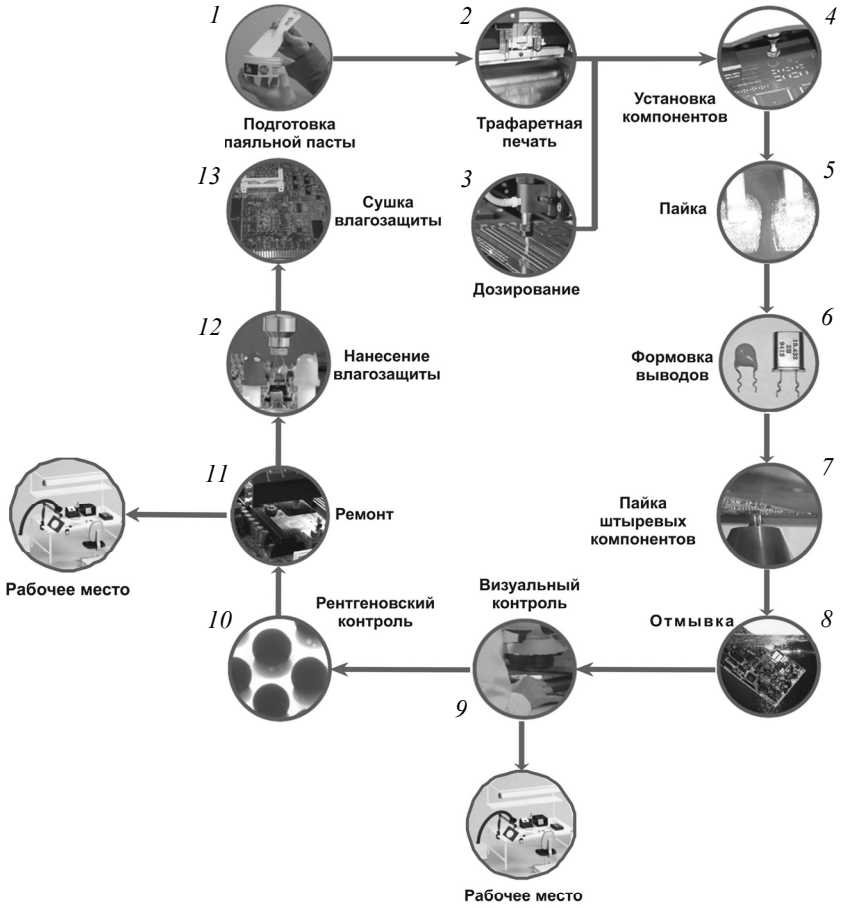
Производственный процесс (ПрП) – это совокупность целенаправленных действий всего персонала предприятия по созданию готовой продукции. Технологический процесс является частью производственного.

При неавтоматизированной подготовке производства технологические процессы разрабатываются непосредственно в виде комплектов технологической документации. При использовании автоматизированных систем технологической подготовки производства создаваемые описания технологических процессов размещаются в компьютерной базе данных, а соответствующая документация становится лишь отображением внутреннего представления ТП во внешнюю сферу. Хранящиеся в базе данных ТП являются основ-

ным источником информации для решения задач автоматизированного управления технологической подготовкой производства. При этом разработка ТП выполняется с помощью специальных систем автоматизированного проектирования ТП (САПР ТП).

Одну из важнейших ролей при проектировании индивидуальных ТП играют групповые ТП. Они являются элементом рационально организованного группового производства.

Рис. 1.38. Обобщенный типовой технологический процесс сборки ЭА (*www.ostec-group.ru*)



Окончание рис. 1.38

В групповом производстве изготавливаемые изделия объединяются в группы по признакам конструктивной и технологической общности. Это дает возможность унифицировать процессы их изготовления, сократить общее время подготовки производства и повысить её эффективность. Для объединения изделий в группы применяются специальные классификаторы, а после отнесения изделия в ту или иную группу ему присваивается соответствующий классификационный код. В отечественной промышленности принята унифицированная система классификации и кодирования изделий по конструкторским признакам, которая устанавливается

стандартами ЕСКД. Для целей ТПП используется технологический классификатор деталей (ТКД), который является логическим продолжением классификатора ЕСКД.

Кроме технологических операций, в состав ТП включают ряд необходимых для его осуществления вспомогательных операций (транспортных, контрольных, маркировочных и т. п.).

Технологический переход – законченная часть технологической операции, характеризуемая постоянством режимов применяемых инструментов и поверхностей, образуемых обработкой или соединяемых при сборке.

Прием – это законченная совокупность действий человека, применяемых при выполнении перехода или его части и объединенных одним целевым назначением.

Групповой ТП – это ТП изготовления группы изделий с общими технологическими признаками. Групповой ТП характеризуется общим используемым оборудованием, средствами технологического оснащения и наладки. Таким образом, применение групповых ТП способствует унификации процессов подготовки производства и самого производства.

Последовательность этапов разработки ЭА и стадий выпуска конструкторской документации определяется государственными стандартами, устанавливающими несколько этапов разработки конструкторской документации на изделия всех отраслей промышленности:

1. **Техническое задание** (ТЗ) устанавливает основное назначение, технические характеристики, показатели качества и технико-экономические требования, предъявляемые к разрабатываемому изделию.
2. **Техническое предложение** – совокупность конструкторских документов, содержащих техническое и технико-экономическое обоснование целесообразности разработки изделия (на основании анализа технического задания заказчика и различных вариантов возможной реализации изделия, сравнительной оценки решений с учетом конструктивных и эксплуатационных особенностей разрабатываемого и существующих изделий, а также патентных материалов).
3. **Эскизный проект** – совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные конструктивные решения, дающие общее представление об устройстве и принципе дейст-

вия изделия, а также данные, определяющие назначение и основные параметры разрабатываемого изделия.

4. **Технический проект** – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения, дающие полное представление об устройстве разрабатываемого изделия, и исходные данные для разработки рабочей документации.
5. **Разработка рабочей документации** – совокупность конструкторских документов, предназначенных для изготовления и испытания опытного образца (опытной партии) изделия.

1.8.2. Качественная и количественная оценка технологичности

Технологичность конструкции является основным критерием, определяющим пригодность аппаратуры к промышленному выпуску. Под технологичностью конструкции понимают совокупность её свойств, проявляемых в возможности оптимальных затрат труда, средств, материалов и времени при технической подготовке производства, изготовлении, эксплуатации и ремонте по сравнению с соответствующими показателями конструкций изделий того же назначения при обеспечении заданных показателей качества.

Оценка технологичности изделия подразделяется на качественную и количественную.

Качественная оценка технологичности:

1. Оценка по конструктивным особенностям ячейки, таким как тип монтажа (односторонний, двусторонний). Позволяет оценить эффективность использования места на печатной плате, количество операций при монтаже элементов и т. д.
2. Оценка вида монтажа (КМП, КМО, КМП + КМО). Позволяет оценить необходимость использования того или иного вида пайки (волной, оплавлением, селективной, ручной).
3. Оценка возможности фиксации элементов на плате. Позволяет оценить необходимость использования дополнительных операций (приклеивания, формовка выводов), материалов (клеи и др.) и оборудования (установка для подгибки выводов, формирования зиг-замка и др.).
4. Возможность применения групповых методов пайки: волной, оплавлением (паяльная паста), погружением, в паровой фазе, селективная, ручная. Позволяет оценить время, необходимое

для пайки элементов на печатную плату, и необходимость того или иного оборудования.

5. Автоматизация установки элементов и контроля правильности установки и качества пайки. Позволяет оценить время установки элементов, а также трудоемкость выходного контроля ячеек.

Количественная оценка технологичности:

1. Коэффициент использования микросхем и микросборок:

$$K_{\text{ИМС}} = \frac{N_{\text{ИМС}}}{N_{\text{ИМС}} + N_{\text{ИЭТ}}}, \tag{1.16}$$

где $N_{\text{ИМС}}$ – количество интегральных микросхем; $N_{\text{ИЭТ}}$ – количество других элементов.

2. Коэффициент механизации и автоматизации монтажа:

$$K_{\text{ам}} = \frac{N_{\text{ам}}}{N_{\text{об}}}, \tag{1.17}$$

где $N_{\text{ам}}$ – количество контактных соединений, полученных автоматизированным монтажом; $N_{\text{об}}$ – общее количество контактных соединений.

3. Коэффициент механизации подготовки элементов к монтажу:

$$K_{\text{мп}} = \frac{N_{\text{а}}}{N_{\text{мп}}}, \tag{1.18}$$

где $N_{\text{а}}$ – количество элементов, выводы которых формуются автоматизированными методами; $N_{\text{мп}}$ – количество элементов, требующих формовки выводов.

4. Коэффициент механизации контроля и настройки:

$$K_{\text{мкн}} = \frac{N_{\text{окн}}}{N_{\text{общ}}}, \tag{1.19}$$

где $N_{\text{окн}}$ – количество операций механизированного контроля-настройки; $N_{\text{общ}}$ – общее количество операций.

5. Коэффициент повторяемости ИЭТ:

$$K_{\text{пов}} = 1 - \frac{N_{\text{т ИЭТ}}}{N_{\text{ИЭТ}}}, \tag{1.20}$$

где $N_{\text{т ИЭТ}}$ – количество типов ИЭТ.

6. Коэффициент применяемости ИЭТ:

$$K_{\text{пр}} = 1 - \frac{N_{\text{ор ИЭТ}}}{N_{\text{ИЭТ}}}, \tag{1.21}$$

где $N_{\text{ор ИЭТ}}$ – число оригинальных ИЭТ (не применяемых промышленно, а специально спроектированных для данного прибора).

7. Коэффициент прогрессивности формообразования деталей:

$$K_{\text{ф}} = \frac{D_{\text{пр}}}{D_{\text{общ}}}, \tag{1.22}$$

где $D_{\text{пр}}$ – количество деталей, изготовленных прогрессивными методами (штамповка, керамика, пластмасса, литье под давлением); $D_{\text{общ}}$ – общее число деталей.

8. Комплексный показатель технологичности. Вычисляется на основе предыдущих по формуле

$$K = \frac{\sum_{i=1}^{7} K_i \Psi_i}{\sum_{i=1}^{7} \Psi_i}, \tag{1.23}$$

где K_i – показатель технологичности; Ψ_i – функция, нормирующая весовую значимость коэффициента.

Значения функции Ψ для каждого из показателей технологичности представлены в табл. 1.19.

Таблица 1.19

Значения функции Ψ для показателей технологичности

Ψ_1	Ψ_2	Ψ_3	Ψ_4	Ψ_5	Ψ_6	Ψ_7
1	1	0,8	0,5	0,3	0,2	0,1

Типовые значения комплексного показателя технологичности представлены в табл. 1.20.

Оценка технологичности конструкции заключается в определении соответствия расчетного комплексного показателя технологичности изделия нормативному комплексному показателю технологичности.

Таблица 1.20

Типовые значения комплексного показателя технологичности

Вид изделия	Нормативный комплексный показатель технологичности, $K_н$		
	Опытный образец	Установочная серия	Серийное производство
Электронные блоки	0,4–0,7	0,45–0,75	0,50–0,80
Радиотехнические блоки	0,4–0,6	0,75–0,80	0,80–0,85
Электромеханические блоки	0,3–0,5	0,40–0,55	0,45–0,60

1.8.3. Основные положения теории базирования

Базирование – придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

Тело в пространстве имеет 6 степеней свободы: перемещение вдоль осей X, Y, Z, а также вращение вокруг каждой из этих осей (рис. 1.39).

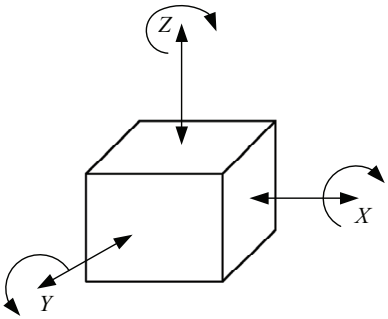


Рис. 1.39. Степени свободы тела

Согласно теоретической механике, требуемое положение или движение твердого тела относительно выбранной системы координат достигается наложением геометрических или кинематических связей (рис. 1.40). Если тело должно иметь определенное количество степеней свободы, то соответствующее число связей снимается.

Наложение двусторонних геометрических связей достигается соприкосновением поверхностей тела с поверхностями других тел,

к которым оно присоединяется, и приложением сил или моментов для обеспечения контакта между ними.

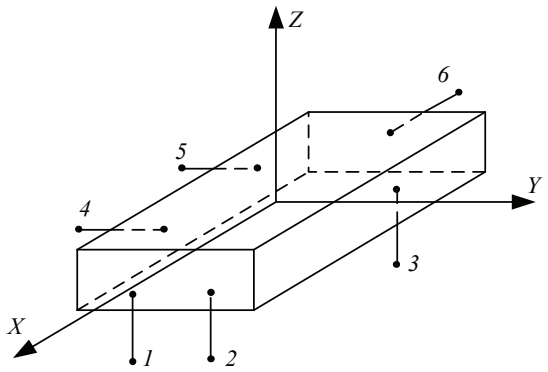


Рис. 1.40. Наложение связей на тело

База – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования.

Шесть связей, лишающих тело движения в шести направлениях, могут быть созданы контактом соединяемых тел в шести точках. Считается, что наложение необходимых связей достигается контактом тел по поверхностям, а наличие связей символизируется опорными точками.

Базы подразделяют на:

Конструкторская база – база, используемая для определения положения детали или сборочной единицы в изделии.

Основная база – конструкторская база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения её положения в изделии.

Вспомогательная база – конструкторская база, принадлежащая данной детали или сборочной единице и используемая для определения положения присоединяемого к ним изделия.

Технологическая база – база, используемая для определения положения заготовки или изделия в процессе изготовления.

Опорная точка (рис. 1.41) – символ одной из связей заготовки или изделия с избранной системой координат.

Комплект баз – совокупность трех баз, образующих систему координат заготовки или изделия.

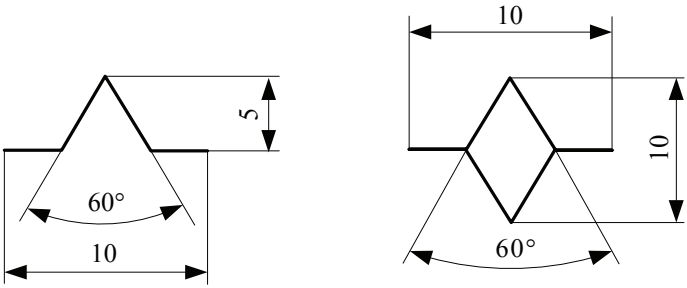


Рис. 1.41. Изображение опорной точки на чертеже (вид спереди – слева, вид сверху – справа)

Схема базирования – схема расположения опорных точек на базах заготовки или изделия.

Все опорные точки на схеме базирования изображают условными знаками и указывают цифру, означающую количество степеней свободы, которых лишает данная база. Число проекций заготовки или изделия на схеме базирования должно быть достаточным для четкого представления о размещении опорных точек.

Схемы базирования некоторых ИЭТ и их геометрических аналогов представлены в табл. 1.21.

Погрешность базирования – это отклонение фактического положения заготовки или изделия при базировании от требуемого.

Различают допустимую $[\varepsilon_б]$ и действительную $\varepsilon_{б\,действ}$ (расчетную) погрешности базирования. При практических расчетах допустимое значение поля рассеивания размеров, порождаемое погрешностями базирования $[\varepsilon_б]$, определяют по упрощенной формуле

$$[\varepsilon_б] = T - \Delta, \tag{1.24}$$

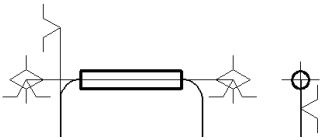
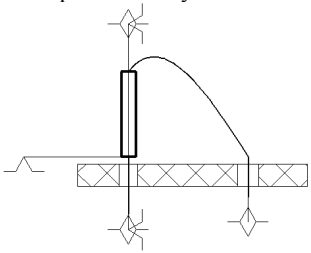
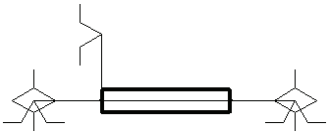
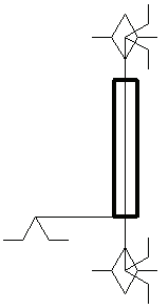
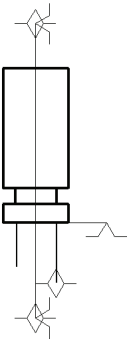
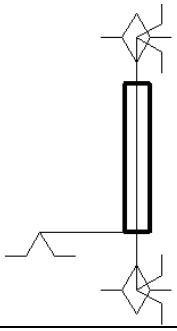
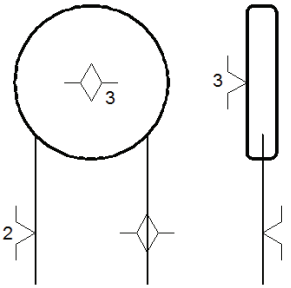
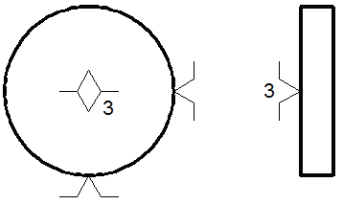
где T – поле допуска, проставленного на операционном чертеже детали; Δ – точность обработки, которая получается при выполнении данной операции без учета погрешности базирования.

Расчет действительных значений погрешности базирования сводится к решению соответствующих геометрических задач.

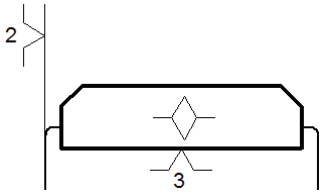
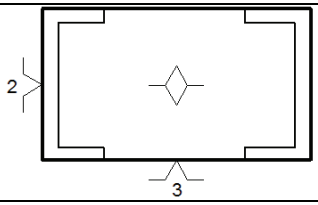
Исходной базой называется элемент заготовки, который связан с обрабатываемой поверхностью размером или требованием (параллельности, соосности и т. д.), которые нужно обеспечить при выполнении данной операции.

Таблица 1.21

Схемы базирования некоторых ИЭТ
и их геометрических аналогов

Тип ИЭТ	Схема базирования ИЭТ	Схема базирования геометрического аналога
1	2	3
Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели с осевыми выводами	Горизонтальная установка  Вертикальная установка 	Валик  
Электролитические конденсаторы		Валик 
Дисковые конденсаторы		Диск 

Окончание табл. 1.21

1	2	3
Микросхемы различных типов в прямоугольных корпусах		Параллелепипед
ЧИП КМП		

Если при намеченной схеме базирования геометрически обеспечивается неизменное положение исходной базы у всех заготовок, то действительная погрешность базирования отсутствует ($\varepsilon_{\text{б действ}} = 0$). В соответствии с этим действительную погрешность базирования можно рассматривать как погрешность, порождаемую колебаниями в положении исходной базы.

При определении действительного значения поля рассеивания погрешностей базирования нужно исходить из допусков по «базисным размерам», т. е. тем размерам заготовки, от которых зависит положение исходной базы при данном способе установки.

1.8.4. Разработка маршрутного ТП сборки

Разработка маршрутного ТП сборки ячейки электронного устройства основывается на типовом ТП сборки электронных модулей 1-го уровня, который состоит из следующих операций:

- комплектация ИЭТ;
- подготовка ИЭТ к монтажу на ПП;
- установка ИЭТ на ПП;
- пайка ИЭТ или другой способ получения контактных соединений;
- контроль качества собранной ячейки.

Способы комплектации ИЭТ зависят от их типов и состояния поставки фирмами-изготовителями: фирменная упаковка, транспор-

тировочная тара, технологическая тара, кассеты-питатели. В мелкосерийном производстве ИЭТ извлекают из упаковки различных типов и комплектуют по типономиналам в технологическую тару (коробки или ячейки). Входной контроль ИЭТ не проводится в соответствии с гарантиями фирмы-поставщика. Исключение – ИМС для специальных электронных устройств. Возможен выборочный контроль: из партии в 500 шт. КМП выбирают 10 шт. для контроля параметра и 3 шт. для контроля паяемости.

Подготовка ИЭТ к монтажу заключается в формовке, обрезке и лужении выводов большей части КМО. КМП не требуют подготовки выводов к монтажу, за исключением некоторых ИМС с планарными выводами. Подготовка выводов ИЭТ осуществляется на монтажном столе, оснащенном соответствующими приспособлениями и инструментами, или на рабочем месте монтажника. Подготовленные ИЭТ снова размещаются в технологическую тару.

Установка ИЭТ на ПП состоит из поиска места установки на ПП, поиска ИЭТ соответствующего типономинала, собственно установки и фиксации ИЭТ на ПП. В качестве способов фиксации ИЭТ применяются: подгибка выводов, подпайка выводов, приклеивание корпуса ИЭТ к ПП, фиксация за счет пружинения выводов или формовки их в зиг-замок. В простейшем случае возможно удерживание установленного ИЭТ с одновременной пайкой выводов, что более трудоемко, чем предварительная установка ИЭТ и последующая пайка всех выводов.

Пайка – основной способ получения контактных соединений при сборке и монтаже ячеек.

Контроль качества ячеек ведется:

- после установки ИЭТ (КМО и КМП) на плату (установка в соответствии с маркировкой на ПП, ориентация ИЭТ по ключу и полярности, смещение КМП относительно КП);
- после пайки ИЭТ (по характеру галтелей припоя, его количеству и отражательной способности);
- на рабочем месте функционального контроля или установках функционального контроля.

В промышленном производстве электронных устройств собранная ячейка размещается в корпусе устройства, в конструктиве модуля 2-го уровня или подвергается автономной защите и герметизации от внешних воздействий.

1.8.5. Разработка операционного ТП сборки

Операционный ТП сборки ячейки разрабатывается на основе схемы сборки с базовой деталью (рис. 1.42). Схема наглядно иллюстрирует последовательность установки ИЭТ на ПП и действия, сопровождающие этот процесс.

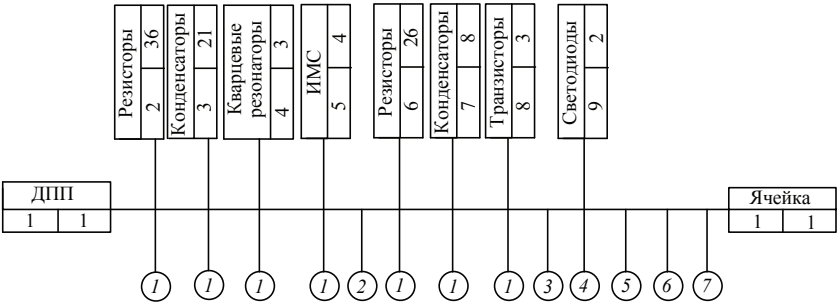


Рис. 1.42. Схема сборки ячейки с базовой деталью:
1 – установка на паяльную пасту; *2* – переворот печатной платы; *3* – оплавление в ИК-печи; *4* – установка с фиксацией в зиг-замок; *5* – пайка вручную установленных элементов с осевыми выводами; *6* – проверка качества паяных соединений; *7* – контроль функционирования, настройка

На схеме в прямоугольниках размещаются наименования ИЭТ, позиционные обозначения их на сборочном чертеже ячейки и количество устанавливаемых ИЭТ. По одну сторону линии, соединяющей базовую деталь (ДПП) и сборочную единицу (ячейка), располагаются прямоугольники принятой последовательности установки ИЭТ и сборочных единиц; по другую сторону – порядковые номера технологических действий или операций. Повторяющиеся действия обозначают одной и той же цифрой. Расшифровка цифр приводится рядом с рисунком схемы сборки.

Для действующего мелкосерийного производства электронных модулей 1-го уровня с элементами со штыревыми выводами характерны операции, приведенные в табл. 1.22.

При определении состава операций, переходов и их трудоемкости учитывается:

- количество комплектующих ИЭТ;
- количество ИЭТ, не требующих подготовки выводов;
- количество ИЭТ, требующих подготовки выводов;
- количество контактных соединений, получаемых пайкой или каким-либо другим методом.

Таблица 1.22

Наименование и содержание операций этапов ТП электронных модулей 1-го уровня с элементами со штыревыми выводами

№ операции	Наименование этапа ТП	Наименование и содержание операций ТП
1	2	3
05–15	Подготовка ПП к монтажу	05. Контрольная: входной контроль ПП (дата изготовления, отсутствие механических повреждений, отслоений металлизации, расслоений диэлектрика). Проверка коробления и паяемости платы. 10. Расконсервация: удаление защитного лака, промывка в спирто-бензиновой или спирто-хладоновой смеси. 15. Сушка: осуществляется в термостате при $T = 60 \div 70$°C; $t = 3 \div 4$ ч
20–35	Подготовка ИЭТ (ЭРЭ, ИМС) к монтажу	20. Комплектация: комплектование ИЭТ, сборочных единиц, деталей пространственной компоновки, прокладки, изоляционных трубок, объемных проводников, вспомогательных материалов. 25. Подготовительная: обрезка, зачистка, рихтовка, формовка, лужение выводов. 30. Подготовительная: защищает от статического электричества. 35. Лужение объемных проводов и перемычек
40–55	Установка ИЭТ на ПП	40. Сборочная: установка ИЭТ и деталей, закрепляемых трубчатыми заклепками с развальцовкой. 45. Сборочная: установка ИЭТ с закреплением на ПП приклеиванием (подготовка поверхностей, нанесение клея, установка ИЭТ, сушка). 55. Электромонтажная: установка ИЭТ на ПП согласно выбранному варианту, подгибка выводов, обрезка в пределах площадки КП, подпайка выводов для фиксации ИЭТ
60–85	Получение контактных соединений пайкой волной припоя	60. Подготовительная: защита мест незадействованных контактных соединений, переходных, металлизированных отверстий (лента ПВХ, латекс, паяльная маска – наносится при изготовлении ПП). 65. Контрольная: проверка правильности установки ИЭТ согласно сборочному чертежу. 70. Пайка волной: установка ячейки в технологическую раму, флюсование, сушка флюса и пайка осуществляются по ходу движения конвейера, снятие ячейки с конвейера. 75. Промывка ячейки в спирто-хладоновой смеси. 80. Сушка в термостате ($T = 60 \div 70$°C; $t = 3 \div 4$ ч).

Окончание табл. 1.22

1	2	3
		85. Электромонтажная: удаление защитных покрытий (паяльная маска остается), контроль качества контактных соединений, исправление дефектов вручную
90	Получение контактных соединений пайкой вручную	90. Нанесение флюса на места пайки, пайка паяльной станцией с контролем температуры и времени пайки, использование теплоотводов при пайке ИМС, контроль соединений, промывка и сушка
95–105	Изготовление жгутов и кабелей	95. Подготовительная: нарезка объемных проводов заданной длины; разделка концов провода (снятие изоляции, лужение проводника, наложение бандажа, заделка экрана); установка и обжатие наконечников. 100. Вязка жгута: раскладка проводов на шаблоне, маркировка концов проводов, вязка проводов в жгут, контроль. 105. Электромонтажная: распайка концов провода на контактах вилок и колодок разъемов, контроль
110–145	Сборка и монтаж ячейки после пайки волной	110. Сборочная: установка ИЭТ, деталей и сборочных единиц, требующих механического крепления на ПП; размещение объемных проводов (жгуты, перемычки). 115. Электромонтажная: флюсование, пайка и контроль вновь установленных ИЭТ и проводов. 120. Маркировка и сушка (60°С – 3 ч; 20°С – 24 ч). 140. Нанесение покрытия и сушка (60°С – 3 ч; 20°С – 24 ч). 145. Сборочная: установка негерметичных ЭРЭ и электровакуумных приборов, окончательная сборка ячейки, стопорение крепежных элементов
150–160	Регулировка и контроль	150. Настройка: настроить ячейку согласно ТУ. 155. Электромонтажная: электромонтаж после настройки, окончательная пайка настроенных элементов, промывка и защита лаком мест пайки. 160. Контрольная: визуальный контроль монтажа ячейки на соответствие чертежу, контроль электрических параметров, укладка в тару и упаковка

Примечания:

1. Диапазон номеров операций (05–10 и т. д.) представляет возможность их дробления и введения дополнительных операций, не нарушая общую структуру и последовательность этапов ТП.
2. При разработке ТП сборки и монтажа конкретной ячейки учитывают следующее:
   1) поверхность ПП может быть защищена паяльной маской, которая не удаляется и сохраняется на период сборки и в процессе эксплуатации;
   2) при комплектовании навесные элементы размещают в таре согласно их номиналам и последовательности установки;
   3) часть ИЭТ не требует подготовительных операций (25–35).

Операционный ТП оформляется в виде операционной карты (табл. 1.23).

Таблица 1.23

Операционный ТП

№ операции, перехода	Наименование операции и перехода	Время			Оборудование, оснастка
		перехода	$\Sigma T_{\text{пер}}$	$T_{\text{шт}}$	

При составлении операционного ТП используют результаты хронометража операций и переходов, полученные в ходе изучения и анализа действующего производства электронных устройств. Время некоторых сборочных операций для мелкосерийного производства ЭА приведено в табл. 1.24.

Операционный эскиз – технологический документ, предназначенный для рабочего и контролера. На эскизе указываются поверхности обработки, размеры и технические требования, которые должны быть выдержаны при выполнении операции. Эскиз фиксирует внимание рабочего на технических требованиях, предъявляемых при выполнении операции.

Операционный эскиз является документом, который по своему назначению и содержанию заменяет рабочему, выполняющему данную операцию, рабочий чертеж детали.

Таблица 1.24

Время некоторых сборочных операций для мелкосерийного производства ЭА

Операция и переходы	Время, с	Примечания
1	2	3
Комплектация ИЭТ		
Поиск ИЭТ нужного номинала	30	При упаковке в лентах отсчет ведут из расчета $N_{\text{ЭИТ}}$ на L мм длины ленты. Дорогостоящие ИЭТ отсчитывают поштучно
Отсчет требуемого количества ИЭТ	10 (10 шт.)	
Размещение в технологической таре по номиналам	6–10	
Маркировка тары	3	
Лужение выводов КМО		
Извлечение из тары	2	Температура припоя выше температуры его плавления и составляет 370–380°С
Лужение погружением в припой	1–2	
Охлаждение луженых выводов	10	
Возврат в тару	2	

Продолжение табл. 1.24

1	2	3
Формовка выводов КМО		Сложная формовка требует применения специальных приспособлений, сокращающих время формовки на 1 шт. ИЭТ
Извлечение из тары (10 шт.)	3–5	
Подбор приспособления и формовочных инструментов	2–5	
Формовка:		
Вручную (фиксация, гибка, возврат в тару) (10 шт.)	15	
Вручную круглогубцами (1 шт.)	5	
На формовочном приспособлении (1 шт.)	5	
Установка КМО на ПП		Характер подгибки выводов зависит от типа установки (с зазором, без зазора и др.)
Поиск и извлечение элемента из технологической тары	2	
Поиск места и установка элемента:		
Резисторы	1,5	
Конденсаторы, транзисторы, диоды	2	
Колодки разъемов	7	
Подгибка выводов (1 шт.)	3	
Обрезка выводов (1 шт.)	1,5	
Визуальный контроль правильности установки (1 КМО)	1,5	
Пайка выводов КМО паяльником		Если КМО установлены и зафиксированы на ПП, то целесообразно флюсовать и паять сразу все выводы с противоположной стороны
Выбор выводов КМО	1–2	
Флюсование выводов	2	
Пайка выводов	1–2	
Контроль качества пайки	2	
Пайка выводов КМО волной припоя		В установках пайки волной скорость движения транспортера регулируется в пределах 0–6 м/мин. Температура припоя $260 \pm 0{,}5$°C
Установка ПП с КМО в держателе кассеты	20	
Установка кассеты на транспортер	4–5	
Пайка волной в процессе движения транспортера	180–240	
Охлаждение платы	30	
Снятие платы с транспортера	30	
Нанесение припойной пасты на ПП при монтаже КМП		Паста наносится одним непрерывным движением ракеля относительно поверхности трафарета. ПП с нанесенной пастой хранится в положении, препятствующем размазыванию последней
Выбор трафарета	5	
Установка ПП в приспособление с корректировкой положения трафарета и платы	5–10	
Нанесение пасты на ракель	5	
Нанесение пасты на ПП продавливанием через трафарет	5–10	
Извлечение платы	2	
Контроль качества нанесения пасты	5	

Окончание табл. 1.24

1	2	3
Установка КМП на ПП вручную		Разработаны конструкции технологических устройств, снижающих трудоемкость ручной установки КМП. Не путать с автоматами, производительность которых на 1–2 порядка выше ручной установки КМП
Поиск компонента	3	
Поиск места установки	3	
Установка	3	
Визуальный контроль	1	
Оплавление припойной пасты		Скорость конвейера печи оплавления ~30 см/мин. Наличие 4 температурных зон: 1 – 140°С; 2 – 155°С; 3 – 244°С; 4 – 270°С
Установка платы с КМП в печь	3	
Оплавление в печи с непрерывным перемещением конвейера	350–370	
Охлаждение платы	60	
Визуальный контроль качества пайки	10	
Установка КМП на ПП вручную с фиксацией приклеиванием		КМП, приклеенные к поверхности ПП, можно паять волной припоя со стороны установленных компонентов. Керамические корпуса КМП предохраняют их от перегрева. ИМС, монтируемые на поверхность ПП, паять волной припоя не рекомендуется из-за малого шага выводов (0,5–0,625) и опасности перегрева
Нанесение клея на ПП:		
Выбор трафарета	5	
Подготовка клея (после хранения в холодильнике)	5	
Нанесение клея на ракель	5	
Нанесение клея на ПП	5	
Извлечение платы из приспособления	2	
Визуальный контроль	5	
Установка КМП на ПП	10	
Отверждение клея в печи:		
Установка ПП в печь	3	
Отверждение	720	
Охлаждение	60	
Извлечение ПП и контроль	10	

При оформлении операционных эскизов необходимо руководствоваться следующими положениями:

1. На главной проекции заготовка должна быть показана в положении, которое она имеет, если на нее смотреть со стороны рабочего места.
2. Операционные эскизы допускается вычерчивать в произвольном масштабе (желательно в одном для каждой операции данного процесса) с соблюдением пропорций.
3. Число дополнительных проекций, сечений, разрезов должно быть достаточным, чтобы показать все поверхности и их размеры, которые должны быть обработаны и получены на данной операции.

Пример операционного эскиза (рис. 1.43). Монтажная операция: установка резисторов на ПП с подгибкой выводов. Спецификация операционного эскиза дана в табл. 1.25. Оборудование – стол монтажный, инструмент для установки, подгибки и пайки выводов.

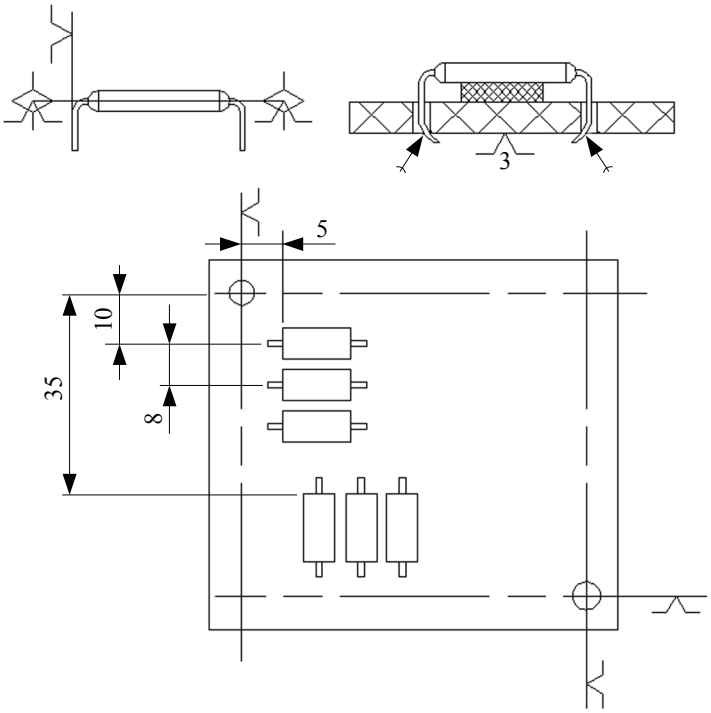


Рис. 1.43. Операционный эскиз

Таблица 1.25

Спецификация операционного эскиза

№ п/п	Наименование перехода	Время, с		
		$T_{пер}$	$\Sigma T_{пер}$	$T_{шт}$
1	Установка ПП на стол	5	27	
2	Найти резистор нужного номинала	2		
3	Найти место установки резистора	1,5		
4	Найти и установить прокладку, обеспечивающую зазор между резистором и ПП	5		
5	Установить резистор	1,5		
6	Подогнуть выводы резистора	6		
7	Припаять выводы резистора	4		
8	Удалить прокладку	2		

Повторить все переходы для остальных резисторов. Определить время $T_{шт}$ операции 01.

1.8.6. Проектирование технологической оснастки

Применительно к ТП сборки и монтажа, контроля и регулировки ЭА основным видом технологической оснастки является приспособление. По назначению приспособления делятся на:

- станочные, предназначенные для установки и закрепления деталей (комплектов) в определенном положении относительно рабочих органов (например, укладочных головок) станка;
- приспособления для установки и закрепления рабочего сборочно-монтажного инструмента;
- сборочные;
- контрольные.

По степени специализации приспособления могут быть:

- универсальными, для групповой обработки (сборки) различных деталей как в условиях единичного, так и серийного производства ЭА;
- специализированными, для обработки (сборки) однотипных деталей путем использования сменных или дополнительных устройств;
- универсально-наладочными (УНП) и универсально-сборочными приспособлениями (УСП);
- специальными, для выполнения определенной операции обработки (сборки) конкретной детали (сборочной единицы) в условиях крупносерийного и массового производства ЭА.

По технологическому назначению приспособления делятся по типам технологического оборудования, для которых они предназначены (для механосборки, сборочные, монтажные).

Применение приспособлений дает ряд преимуществ: повышается качество и точность собираемых узлов; обеспечивается правильное взаимное положение собираемых деталей; сокращается вспомогательное время, затрачиваемое на установку, выверку и закрепление собираемых деталей; расширяются технологические возможности оборудования; облегчается труд рабочих вследствие механизации и автоматизации установки и закрепления деталей; появляется возможность групповой сборки на станке одновременно нескольких деталей.

Основными требованиями, предъявляемыми к приспособлениям, являются: технологичность; обеспечение заданной точности сборки (монтажа); удобство в эксплуатации и безопасность в работе.

Последовательность проектирования технологической оснастки. На стадии проектирования ТПП ЭА оснащение ТП необходимой оснасткой сводится к выбору её из числа имеющейся универсальной или к проектированию специальной. В том случае, когда реализация ТП сборки и монтажа, контроля, регулировки ЭА не может быть осуществлена с применением только стандартной оснастки, возникает необходимость в проектировании специальной технологической оснастки.

Наибольший эффект в процессе проектирования достигается при использовании принципов унификации типовых элементов конструкции технологической оснастки, в первую очередь таких, как:

- зажимные элементы – детали и механизмы оснастки, удерживающие обрабатываемые на установочных элементах оснастки заготовки от смещений и вибраций, возникающих под действием внешних сил;
- установочные элементы – детали и механизмы оснастки, обеспечивающие правильное и однообразное расположение собираемых деталей и сборочных единиц ЭА относительно инструмента;
- направляющие элементы – детали оснастки, связывающие положение рабочего инструмента при сборке изделия с установочными элементами оснастки;
- дополнительные элементы – детали и механизмы оснастки, служащие для изменения положения собираемого изделия, устанавливаемого в оснастке;
- корпуса приспособлений – детали, объединяющие все указанные выше элементы или их часть.

Проектирование специальной технологической оснастки может носить характер доработки – частичного дополнения и изменения существующей универсальной, групповой переналаживаемой оснастки или характер нового оригинального проектирования.

В основу проектирования положен принцип первоочередного максимального использования стандартной, нормализованной и унифицированной оснастки безо всякой её переработки. Если непосредственное использование этой оснастки невозможно, то проверяется возможность использования её с некоторой доработкой, которая, не

изменяя в основном конструкцию оснастки, приспосабливает её к конкретным особенностям сборочной единицы ЭА.

Исходными данными при проектировании оснастки являются:

1) рабочий чертеж детали (сборочной единицы) с техническими условиями;
2) принципиальная схема конструкции, в которой указаны способ базирования и закрепления детали (сборочной единицы);
3) технологические карты всего ТП изготовления детали (сборочной единицы);
4) программа выпуска деталей (сборочных единиц);
5) указания технолога по выбору типа приспособлений, применяемых на предприятии;
6) паспортные данные станка, на котором производится операция.

Проектирование оснастки осуществляется в два этапа: сначала разрабатывают схему приспособления, где технолог в соответствии с операцией процесса указывает базы, выбирает положение установочных элементов, указывает точки приложения сил, возникающих в процессе обработки (сборки), и их направление, а затем выполняет конструктивное оформление и расчеты элементов приспособлений и компоновки приспособления в целом.

Проектирование ТП изготовления оснастки и выбор технологического оборудования (универсального, автоматического), приспособлений и инструмента для изготовления технологической оснастки осуществляется технологами. Производственная деятельность по проектированию оснастки отнимает большие трудовые ресурсы, связанные со значительными материальными и стоимостными затратами, является традиционно узким звеном в цикле работ по запуску в производство новой электронной аппаратуры. В таких условиях большее значение приобретают вопросы совершенствования процессов проектирования и изготовления оснастки за счет автоматизации этих процессов.

1.8.7. Контроль и испытания коммутационных структур

Одним из важнейших этапов производства МКС является контроль и диагностика (рис. 1.44). Применяются следующие основные методы:

- *электрический*: МКС проверяется на целостность проводников, наличие короткого замыкания между проводниками, качество изоляции;

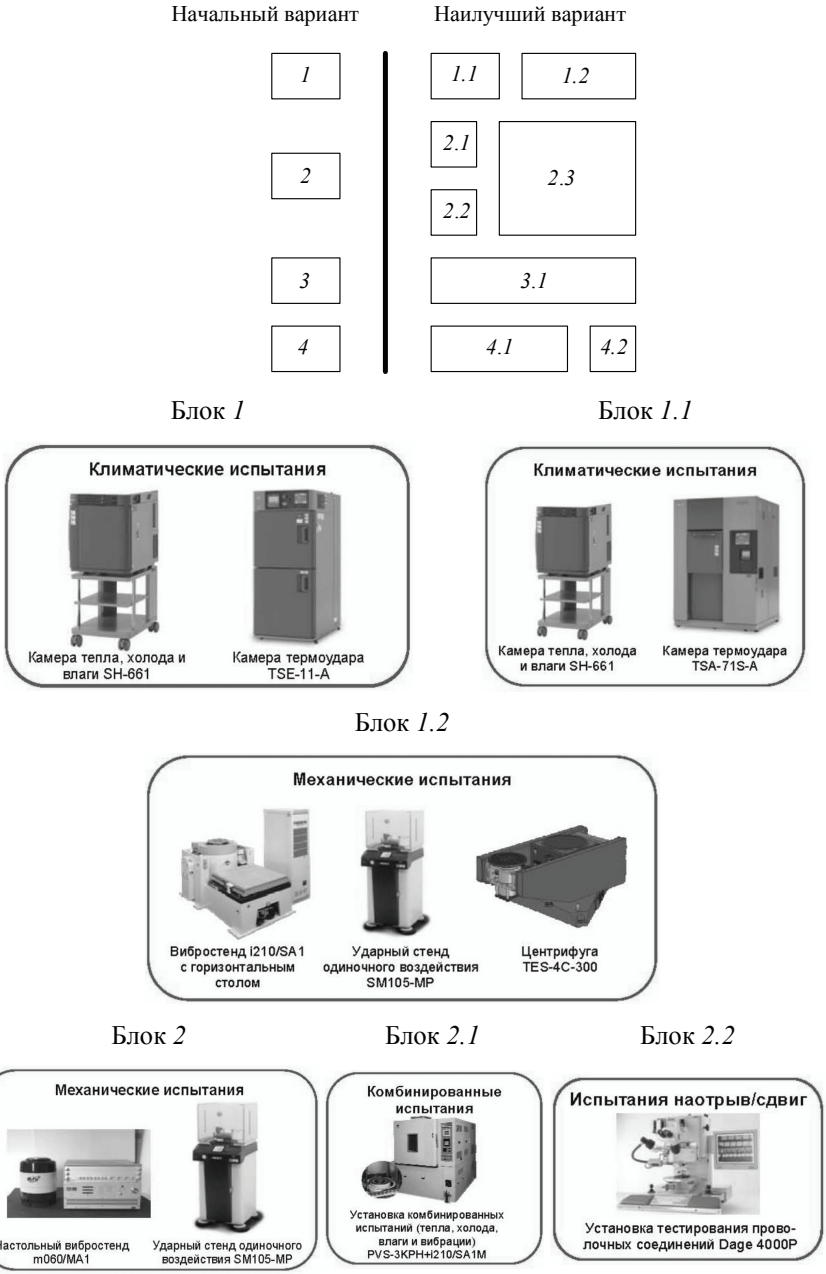


Рис. 1.44. Варианты оснащения участка контроля и испытаний ЭА (*www.ostec-group.ru*)

Блок *2.3*

Блок *3*

Блок *4*

Блок *3.1*

Блок *4.1*

Блок *4.2*

Окончание рис. 1.44

- *оптический*: позволяет обнаружить такие дефекты, как: проколы, царапины, выступы на проводниках; неточности в размещении контактных площадок и проводников; неточность размеров контактных площадок и проводников; подтравливание, дефекты металлизации и др.;
- *рентгеновский*: применяется для поиска свищей слоев; при базировании слоев МКС для определения места сверления базового отверстия нижнего слоя; для контроля качества просверленных отверстий и их металлизации.

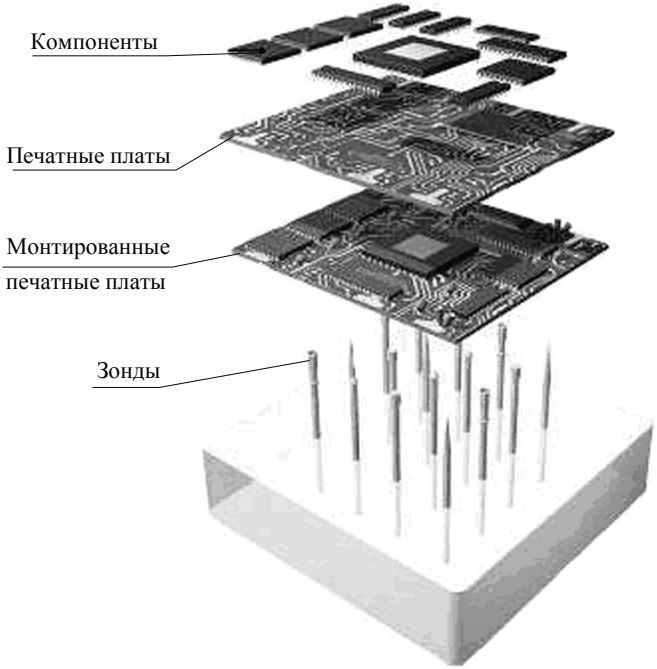


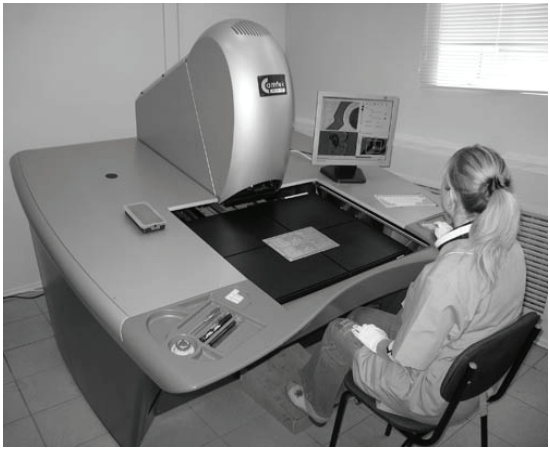
Рис. 1.45. Электрический контроль МКС
при помощи поля подпружиненных контактов

Для электрического тестирования применяют различные анализаторы производственных дефектов, в которых контактирование осуществляется следующими способами:

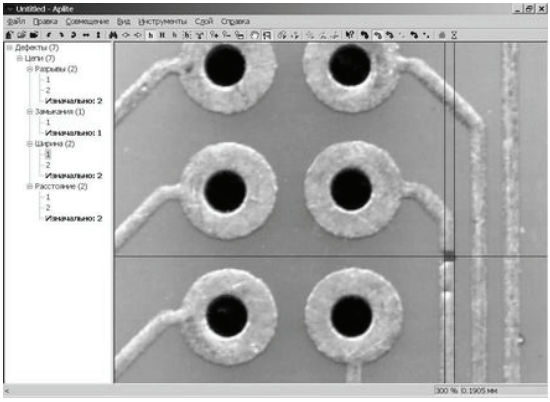
- через односторонний или двусторонний тестовый адаптер (поле подпружиненных контактов);
- при помощи пробниковой системы с подвижными пробниками (летучий пробник);

- с использованием вакуумных, кассетных и пневматических адаптеров;
- большим количеством разъемов.

Вариант использования специализированных адаптеров (рис. 1.45) целесообразен для крупносерийного и массового производства. Используемые адаптеры не универсальны и изготавливаются под конкретную МКС. Данных способ характеризуется высокой производительностью, так как имеется возможность одновременной проверки всех цепей.



а



б

Рис. 1.46. Оптический контроль МКС: установка контроля (*а*) и система технического зрения (*б*)

Оптический контроль (рис. 1.46) позволяет не только определить наличие таких дефектов, как разрыв, короткое замыкание, но и дефектов, которые не приводят непосредственно к потере электрического контакта (смещение контактных площадок, утончение или утолщение проводников и др.). Скорость контроля автоматических оптических систем сравнима с контролем летучим пробником.

Рентгеновский контроль (рис. 1.47) коммутационных структур применяется в случае использования дорогостоящих компонентов, имеющих мелкий шаг выводов. К таким компонентам можно отнести микросхемы в *BGA* и μ*BGA* корпусах.

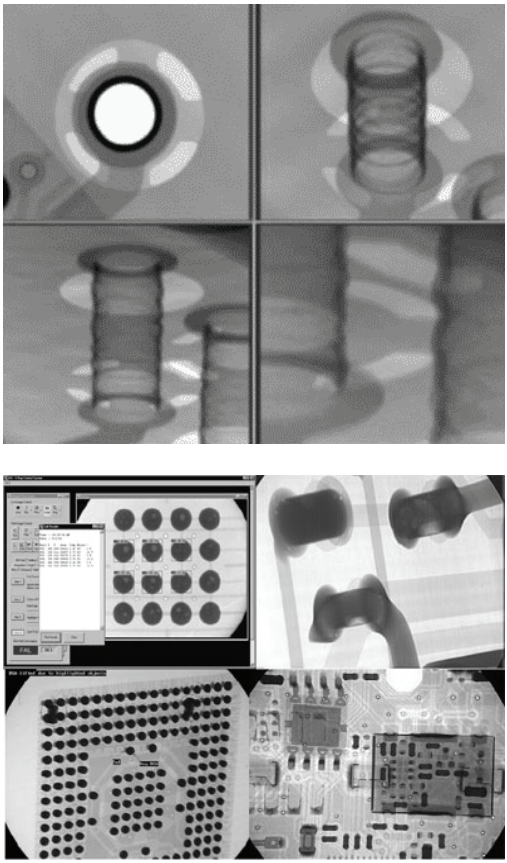


Рис. 1.47. Рентгеновский контроль МКС

Также рентгеновский контроль позволяет «увидеть» переходные отверстия и внутренние слои МКС. Универсальное оборудо-

вание рентгеновского контроля позволяет без изготовления специальной оснастки провести диагностику и локализацию наиболее часто встречающихся дефектов:

- ♦ отклонение диаметров переходных отверстий и смещение слоев;
- ♦ качество металлизации переходных отверстий.

Возможности современных систем рентгеновской инспекции позволяют получить для анализа дефектов металлизации переходных отверстий качественные изображения под углом к объекту (до 70°) при максимальном (до 1500 крат) увеличении с разрешением лучше 1 мкм.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ

2.1. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 1. РАСЧЕТ УЗКИХ МЕСТ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ПРИ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДАХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

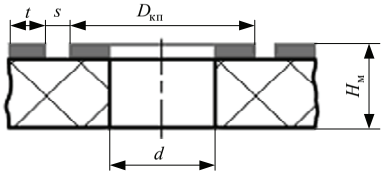
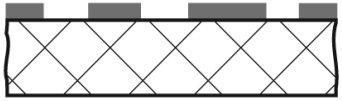
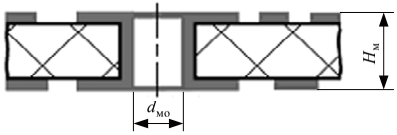
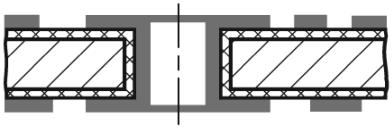
2.1.1. Конструктивные особенности печатных плат

В настоящее время применяются следующие типы (табл. 2.1) печатных плат: односторонние, двусторонние, многослойные и гибкие печатные платы. ПП делятся на группы: с межслойными соединениями, обеспечиваемыми в процессе изготовления послойным наращиванием, попарным прессованием, металлизацией сквозных отверстий; без межслойных соединений, определяемых конструкцией платы в виде открытых контактных площадок и выступающих выводов.

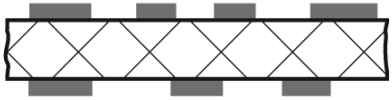
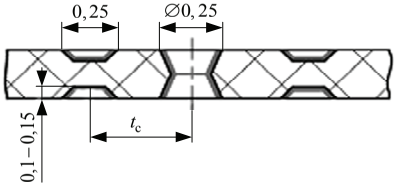
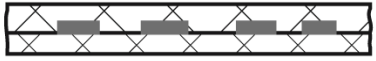
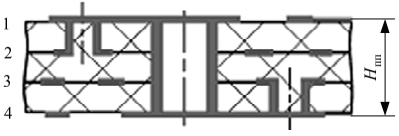
В зависимости от механических требований и метода изготовления номинальный размер толщины ПП следует выбирать равным 0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0. Толщина МПП определяется количеством слоев, прокладок и технологией их склеивания. Суммарная толщина склеивающих прокладок между смежными слоями должна быть не менее двух толщин проводников, располагающихся на внутренних слоях. Предельные отклонения толщины ОПП и ДПП определяются допуском на материал платы и толщину гальванических покрытий.

Таблица 2.1

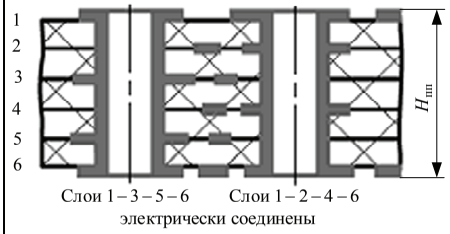
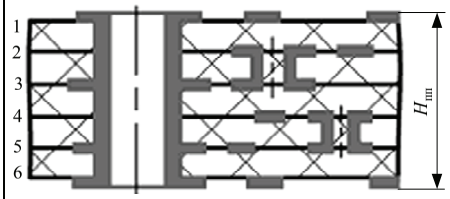
Типы печатных плат

Наименование печатной платы	Поперечный разрез ПП (эскиз)	Конструктивно-технологические особенности	Толщина исходного материала, мм
1	2	3	4
1. ОПП с монтажными отверстиями		Проводящий рисунок выполнен на одной стороне фольгированного основания. Монтажные отверстия (*d*) не металлизированы	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
2. ОПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП. При малой толщине основания может быть внутренним слоем МПП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
3. ДПП на диэлектрическом основании		Проводящий рисунок выполнен на двух сторонах фольгированного основания и электрически соединен металлизированными отверстиями. Предназначена для монтажа КМО и КМП	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0
4. ДПП на металлическом основании		Проводящий рисунок выполнен на металлическом основании (Д16), покрытом слоем диэлектрика. Д16 обеспечивает теплоотвод и прочность	Зависит от толщины основания

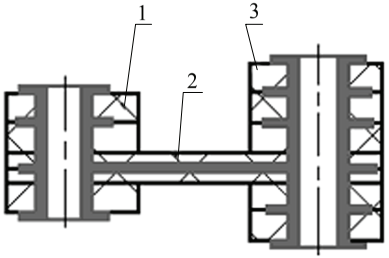
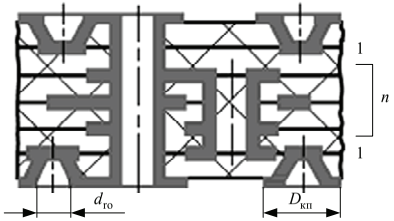
Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4
5. ДПП без монтажных отверстий		Выполнена на фольгированном основании и предназначена для монтажа КМП. Может быть внутренним слоем МПП	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35
6. Гибкая печатная плата		Выполнена на тонком эластичном фольгированном основании, может быть изогнута с определенным радиусом	0,1; 0,12; 0,13; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,35; 0,5
7. Рельефная печатная плата		Проводящий рисунок выполнен в объеме нефольгированного диэлектрика с двух сторон основания и электрически связан металлизированными отверстиями	0,8; 1,0; 1,5; 2,0
8. Гибкий печатный кабель-шлейф		Содержит параллельно проложенные печатные проводники. Соединяет относительно подвижные модули ЭВС. Может быть изогнут с $r = 3{,}0$ мм	0,05; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3
9. МПП попарного прессования		Содержит четыре слоя с коммутацией 2–1–4–3 с помощью металлизированных переходных отверстий. Предназначена для монтажа КМП	$H_{\text{пп}}$ определяется толщиной исходных заготовок и клеящей прокладки

Продолжение табл. 2.1

1	2	3	4
10. МПП с металлизацией сквозных отверстий		Количество слоев теоретически не ограничено. Металлизированные отверстия электрически связывают слои, имеющие в зоне отверстия контактные площадки (1–3–5–6; 1–2–4–6)	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок
11. МПП с металлизацией сквозных отверстий и внутренними межслойными переходами		Количество слоев теоретически не ограничено. Внутренние переходы (2–3; 4–5) сокращают длину сигнальных цепей	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок
12. МПП послойного наращивания на полиимидной или керамической основе		Последовательное создание проводящего рисунка слоев и их коммутация (1–2–3–4–5) с помощью металлизированных переходных отверстий. Высокая плотность проводящего рисунка. Не более пяти слоев	$H_{пп}$ определяется количеством слоев и прокладок

Окончание табл. 2.1

1	2	3	4
13. Гибко-жесткая печатная плата		В единой конструкции объединены жесткие МПП (1, 3), связанные электрически ГПК (2). ГПК опрессован в составе слоев МПП (1, 3)	–
14. МПП с наращиваемыми наружными слоями (структуры *HDI*): структура 1–*n*–1		Основа платы – *n* слоев, полученных методом металлизации сквозных отверстий. Структуры *HDI* получены наращиванием одного, двух или трех слоев на наружных слоях МПП. Слои имеют высокую плотность проводящего рисунка. Глухие, скрытые и внутренние микропереходы. МПП позволяют электрически соединить современные ИМС с большим количеством выводов и малым шагом между ними	$H_{пп}$ определяется количеством слоев

Предельные отклонения толщины МПП составляют: 0,15 мм – при толщине платы до 1 мм включительно; ±0,20 мм – при толщине – 1–2 мм; ±0,30 мм – при толщине 2–3 мм.

Центры монтажных отверстий должны располагаться в узлах координатной сетки, шаг которой по ГОСТ 10317-72 равен 0,5 мм. Диаметры монтажных и переходных металлизированных отверстий в зависимости от диаметра вывода навесного элемента выбирают равными 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,3; 1,5; 1,8; 2,0 мм. Разница между диаметром вывода и диаметром металлизированного отверстия рекомендуется не более 0,4 мм – для выводов диаметром 0,4; 0,6; 0,8 мм; 0,6 мм – для выводов диаметром 1,0; 1,2; 1,5; 1,7 мм.

Металлизированные отверстия на двусторонних ПП, а также на наружных слоях МПП со стороны фольги должны иметь контактные площадки. На внутренних слоях МПП контактные площадки должны быть у отверстий, электрически связанных с проводниками слоя. КП рекомендуется выполнять круглой или прямоугольной формы. Металлизированные отверстия должны выполняться без зенковки. Неметаллизированные отверстия односторонних печатных плат выполняются с зенковкой со стороны, обратной расположению рисунка печатного монтажа.

Печатные проводники рекомендуется выполнять одинаковой ширины на всем их протяжении. В узких местах, например между двумя соседними монтажными отверстиями, следует сужать проводники до минимально допустимых значений и прокладывать их перпендикулярно оси, соединяющей центры отверстий. Оси проводников рекомендуется совмещать с линиями координатной сетки. Элементы проводящего рисунка следует располагать от края платы, неметаллизированного отверстия, паза и других конструктивных элементов на расстоянии, равном номинальной толщине платы, для плат толщиной менее 1 мм.

Все изготавливаемые ПП соответствуют так называемым классам точности, определяющим параметры элементов проводящего рисунка. То, по какому классу точности будет изготовлена ПП, зависит от комплекса технологических возможностей производства. Зависимость минимальных значений основных геометрических параметров ПП от класса точности приведена в табл. 2.2. Максимальные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий указаны в табл. 2.3.

В качестве материалов ПП применяют фольгированные и нефольгированные диэлектрики (табл. 2.3), прокладочную стеклоткань и электроизоляционную пленку для защиты ГПК. Нефольгирован-

ные диэлектрики, например СТЭФ-1-2ЛК, имеют на поверхности адгезивный слой толщиной 50–100 мкм (эпоксикаучуковая композиция) для обеспечения достаточной прочности сцепления с основанием осаждаемого слоя химической меди.

Таблица 2.2

Зависимость минимальных значений основных геометрических параметров ПП от класса точности

Наименование элемента печатного монтажа	Обозначение эл-та	Размеры элементов, мм				
		1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс	5-й класс
Ширина проводника	t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояния между проводниками, контактными площадками, проводником и КП, проводником и металлизированным отверстием	s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
Расстояние от края просверленного отверстия до края контактной площадки	$b_м$	0,3	0,20	0,10	0,05	0,025
Отношение диаметра металлизированного отверстия к толщине платы	γ	0,4	0,4	0,33	0,25	0,20
Допуск на ширину элементов проводящего рисунка	δt	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; –0,03

Таблица 2.3

Максимальные отклонения диаметров монтажных и переходных отверстий

Диаметр отверстия, мм	Наличие металлизации	Предельные отклонения диаметра $d_{но}$, мм, для классов точности				
		1-й класс	2-й класс	3-й класс	4-й класс	5-й класс
До 1,0 вкл.	без металлизации	±0,10	±0,10	±0,05	±0,05	±0,05
	с металлизацией без оплавления	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15	0; –0,10	0; –0,10	0; –0,075
	с металлизацией с оплавлением	+0,05; –0,18	+0,05; –0,12	0; –0,13	0; –0,13	0; –0,13
Свыше 1,0	без металлизации	±0,15	±0,15	±0,10	±0,10	±0,10
	с металлизацией без оплавления	+0,10; –0,20	+0,10; –0,20	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15	+0,05; –0,15
	с металлизацией с оплавлением	+0,10; –0,23	+0,10; –0,23	+0,05; –0,18	+0,05; –0,18	+0,03; –0,18

Следует отметить, что разработка новых методов изготовления ПП потребовала создания новых диэлектрических материалов. Например, нефольгированный диэлектрик с введенным катализатором и адгезивным слоем применяется для аддитивного метода, нефольгированный диэлектрик, покрываемый светочувствительной эмульсией водных растворов солей металлов, – для метода фотоформирования. Освоен промышленный выпуск материала слофадит-диэлектрика, покрытого с двух сторон тонким слоем фольги (5 мкм) и предназначенного для изготовления ДПП электрохимическим (полуаддитивным) методом.

2.1.2. Методы изготовления печатных плат

Методы изготовления печатных плат, нашедшие промышленное применение, основаны на сочетании способов получения рисунка печатного монтажа и способов получения токопроводящего слоя (рис. 2.1).

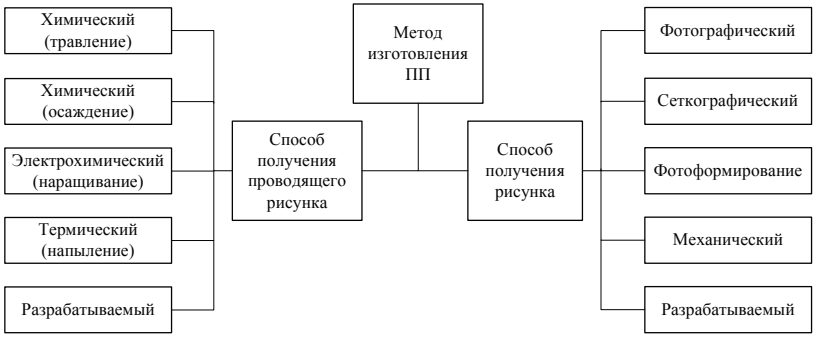


Рис. 2.1. Методы изготовления печатных плат

Фотографический и сеткографический способы получения рисунка совершенствуются с точки зрения повышения разрешающей способности, стойкости защитной маски к действию агрессивных сред и снижения трудоемкости. Кроме традиционных способов получения токопроводящего слоя: химического травления фольги и химико-гальванического осаждения меди, нашел применение способ химического осаждения меди на нефольгированный диэлектрик.

В ОСТе 2.ГО.010.209 приняты четыре метода изготовления ПП. Химический метод изготовления травлением фольги с незащищенных мест применяется для ОПП, ГПК и внутренних слоев МПП.

Комбинированный позитивный метод, основанный на сочетании химико-гальванического способа металлизации отверстий, контактных площадок и проводников со способом химического травления фольги с пробельных мест, применяется для ДПП и МПП различных классов точности. Электрохимический (полуаддитивный) метод изготовления путем химико-гальванического предварительного меднения отверстий и поверхности нефольгированного диэлектрика, гальванического наращивания токопроводящих участков и химического травления слоя предварительного меднения с пробельных мест применяется для изготовления ПП 4-го и 5-го классов точности. Для изготовления МПП рекомендуется метод металлизации сквозных отверстий. При этом печатный монтаж на внутренних слоях получают химическим методом, а на внешних – комбинированным позитивным методом. Материалы, применяемые для изготовления печатных плат, приведены в табл. 2.4.

В классификации (рис. 2.1) приведены аддитивный метод и метод фотоформирования, не включенные в ОСТ 4.ГО.010.209, но являющиеся перспективными для производства ПП. Аддитивный метод – химическое осаждение меди в зоне токопроводящих участков на нефольгированный диэлектрик с введенным катализатором и адгезивным слоем. Метод фотоформирования – восстановление поверхности нефольгированного диэлектрика из водных растворов солей металлов и ионов, образующих рисунок толщиной 0,2–0,5 мкм, и последующее химическое осаждение слоя меди. Различные модификации метода связаны с различными способами формирования рисунка – фотоосаждение металлов, проявление и восстановление ионов, формирование лучом лазера, фотоформинг.

Для сравнения в табл. 2.5 приведены основные этапы изготовления ПП различными методами (методы изготовления МПП не рассматриваются). Анализируя последовательность операций, следует отметить, что монтажные отверстия сверлят до нанесения рисунка печатного монтажа (исключение – химический метод). Это требует применения сверлильных станков с программным управлением и точного базирования заготовок плат на станке.

Наиболее трудоемким является комбинированный позитивный и электрохимический методы. Предварительную химико-гальваническую металлизацию проводят в отверстиях и на поверхности ПП, а гальваническую металлизацию (наращивание) – только на токопроводящих участках (отверстия, КП, проводники). В комбинированном позитивном и электрохимическом методах печатный

монтаж перед травлением меди с пробельных мест защищают гальванически осажденным металлорезистом (олово–свинец), который затем оплавляют.

Таблица 2.4

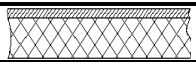
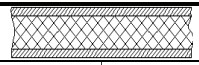
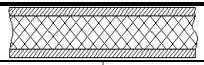
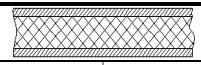
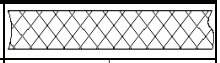
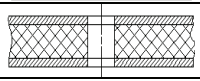
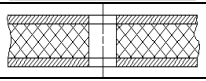
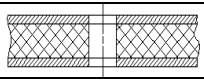
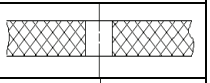
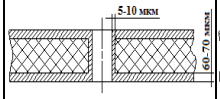
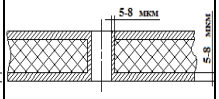
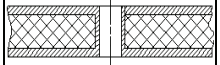
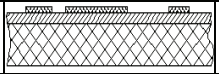
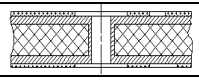
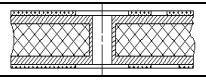
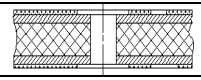
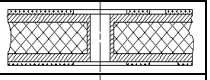
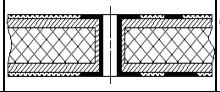
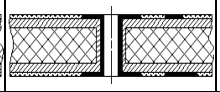
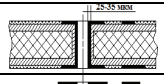
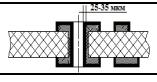
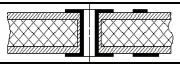
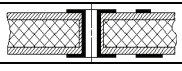
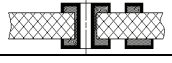
Материалы, применяемые для изготовления печатных плат

Наименование материала	Марка материала	Толщина		Область применения материала
		фольги, мкм	материала с фольгой, мм	
Гетинакс фольгированный	ГФ-1-35	35	1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП, ДПП
	ГФ-2-35		1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
Стеклотекстолит фольгированный	СФ-1(2)-35	35	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	ОПП, ДПП
	СФ-1(2)-50	50	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
	СФ-1Н(2Н)-50	50	0,8; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0	
Стеклотекстолит нефольгированный	СТЭФ-1-2ЛК	–	1,0; 1,5	ДПП, изготовленные эл.-хим. метод.
Слофадит	ТУ 19-136–79	5	1,0; 1,5	
Стеклотекстолит теплостойкий фольгированный	СТФ-1(2)	35	0,13; 0,15; 0,20; 0,25; 0,35; 0,50; 0,80; 1,00; 1,5; 2,00; 2,50; 3,00	ДПП, МПП, ГПП
Стеклотекстолит фольгированный травящийся	ФТС-1-20А(20АО)	20	0,08; 0,15	МПП, ГПП
	ФТС-2-20А(20АО)	20	0,18; 0,27; 0,50	
	ФТС-1-35А(35АО)	35	0,10; 0,12; 0,19	
	ФТС-2-35А(35АО)	35	0,14; 0,23; 0,50	
Диэлектрик фольгированный тонкий	ДФО-2	35	0,25; 0,35	ГПП
Диэлектрик гибкий фольгированный	ФДЛ	35	0,06; 0,07; 0,10	ГПК
		50	0,08; 0,09; 0,12	
	ФДФ-3МС-1	20	0,12	
Стеклоткань прокладочная	СПТ-3	–	0,025; 0,060	МПП

Нанесение рисунка на заготовку с просверленными монтажными отверстиями требует применения сухого пленочного фоторезиста при фотохимическом способе или сеткографического способа получения рисунка (жидкий фоторезист неприемлем). Для совмещения рисунка контактных площадок с центрами монтажных отверстий необходимо точное базирование фотошаблона (трафарета) относительно заготовки платы.

Таблица 2.5

Основные этапы изготовления ПП различными методами

Наименование метода	Методы изготовления печатных плат				
	химический	комбинирован. позитивный	электрохимич. полуаддитивный	аддитивный	Фотоформирование
Получение заготовки					
Получение монтажных отверстий					
Химико-гальваническая металлизация отверстий и поверхности платы					 нанесение светочувст. раст-ра солей металлов
Нанесение рисунка					
Гальваническая металлизация токопроводящих участков. Осаждение металлорезиста					усиление рисунка схемы
Химическая металлизация токопроводящих участков					
Удаление защитной маски					
Травление меди с пробельных мест	удаление маски, сверление отверстий	оплавл. металлорезиста	оплавл. металлорезиста		

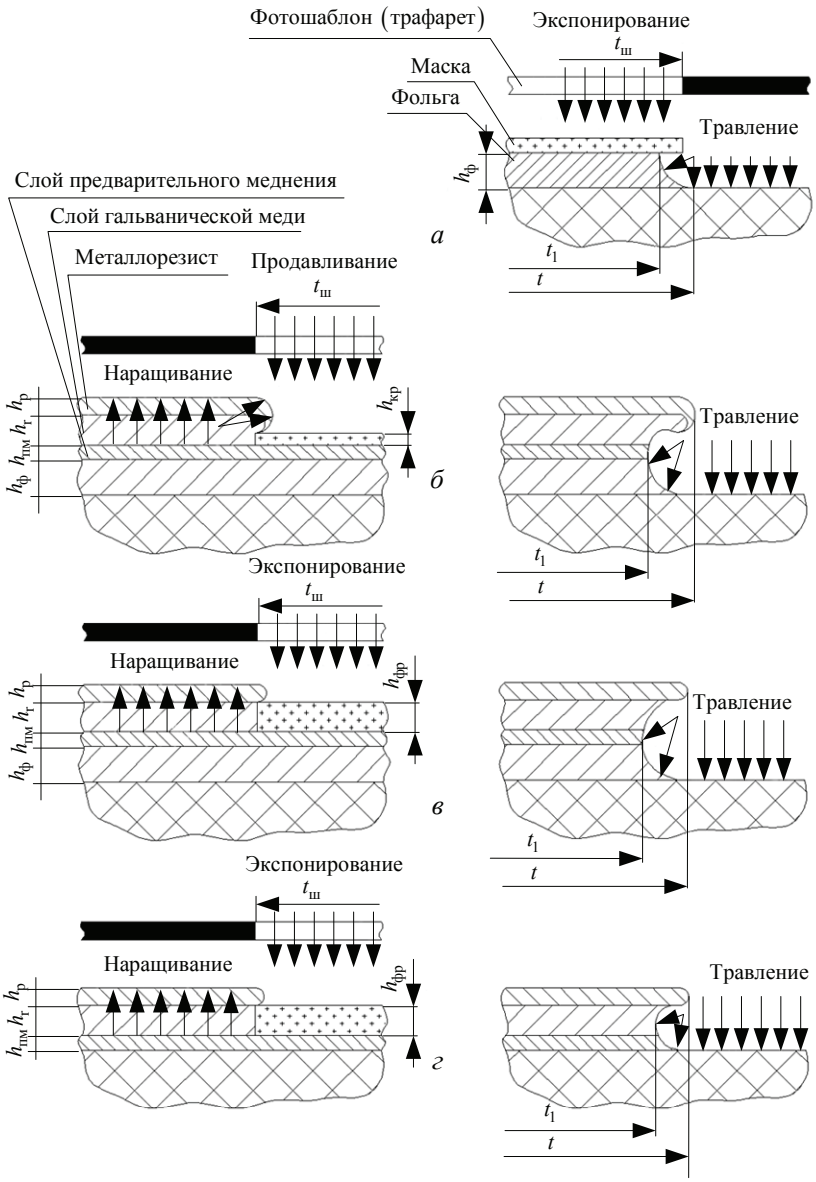


Рис. 2.2. Изменение параметров печатного монтажа (проводника): при химическом методе (*а*), комбинированном позитивном с сеткографическим (*б*) и фотохимическим (*в*) способами получения рисунка, электрохимическом методе (*г*) с фотохимическим способом получения рисунка

По количеству основных этапов аддитивный метод и метод фотоформирования близки к химическому методу изготовления ОПП. Если сравнить трудоемкость методов изготовления ДПП и принять трудоемкость комбинированного позитивного метода за 100%, то трудоемкость электрохимического метода составит 90%, аддитивного метода – ≈ 70%, а метода фотоформирования – ≈ 60%.

Геометрические параметры и точность печатного монтажа непосредственно зависят от метода изготовления (рис. 2.2). При химическом и гальваническом способах осаждения меди происходит увеличение размеров токопроводящих участков за счет разращивания. Если пробельные места защищены краской (толщина 5–7 мкм), то разращивание будет большим и примерно соизмеримо с толщиной осаждаемого слоя меди. Если пробельные места защищены сухими пленочными фоторезистами (толщина 40–60 мкм), то разращивание осаждаемой меди будет минимальным. Травление меди с пробельных мест сопровождается подтравливанием токопроводящих участков на величину, соизмеримую с глубиной травления. Подтравливание уменьшает эффективные размеры проводников и контактных площадок. При электрохимическом методе изготовления величина подтравливания меньше, чем при комбинированном позитивном, так как слой меди в пробельных местах имеет толщину 5–8 мкм (получен химико-гальванической металлизацией нефольгированного диэлектрика или применением материала слофадит с толщиной фольги 5 мкм).

При химическом способе осаждения токопроводящего слоя на нефольгированный диэлектрик подтравливание отсутствует, а разращивание зависит от стойкости маски в щелочной среде ванны меднения (аддитивный метод) и исходной геометрии активированных участков диэлектрика в методе фотоформирования.

Производственный опыт показывает, что комбинированный позитивный метод позволяет получить, например, минимальную ширину проводников до 0,2 мм, электрохимический метод – до 0,1 мм, метод фотоформирования – до 0,05 мм. Следует также учитывать, что при гальваническом осаждении толщина слоя меди в отверстиях меньше, чем на поверхности, а на периферии платы больше, чем в центре платы. Поэтому принимают, что толщина гальванической меди в отверстиях в центре ПП должна быть не менее 25 мкм.

2.1.3. Особенности некоторых операций технологического процесса изготовления печатных плат

1. Металлизация печатных проводников и отверстий.

Химическое осаждение меди. Цель этой операции – получить электропроводный слой меди для обеспечения возможности последующей гальванической металлизации отверстий. Химическое меднение диэлектрика осуществляется за счет восстановления на его поверхности меди из растворов её солей. При этом поверхность диэлектрика должна обладать каталитическими свойствами по отношению к реакции восстановления. Такие свойства диэлектрик приобретает после операции активирования – осаждения на его поверхности частиц металлов-катализаторов последующего химического меднения.

В производстве печатных плат широко распространен метод сенсактивирования – активирования с предварительной сенсибилизацией. Чаще всего для сенсибилизации используют растворы двухвалентного олова, а также применяют соединения Ge, Fe, Ti.

Для производства печатных плат применяют следующий раствор сенсибилизации: $SnCl_2$ – 10–100 г/л; HCl – 10–30 мл/л. Присоединение $SnCl_2$ к поверхности происходит не в растворе сенсибилизирования, а при промывке поверхности водой ($T = 18 \div 25°C$; $t = 2 \div 5$ мин):

$$SnCl_2 + H_2O \rightarrow Sn(OH)\downarrow + H^+ + Cl^-.$$

Результат сенсибилизации – осаждение на поверхности диэлектрика солей двухвалентного олова $Sn(OH)Cl$ или других соединений, служащих катализатором в реакции восстановления металла-активатора.

Сенсибилизацию можно также проводить обработкой в красителях, например в метиленовом синем, анилиновом синем, с последующей обработкой в восстановителе $Na_2S_2O_4$ (гидросульфит) и промывкой.

Активирование осуществляют обработкой сенсибилизированной поверхности растворами соединений каталитически активных металлов Pd, Pt, Au, Ag. Растворы могут быть кислыми или ще-

лочными. Металл в них находится в виде простого или комплексного соединения. При взаимодействии с сенсибилизатором на поверхности платы оседают коллоидные или малорастворимые соединения металла-катализатора. Для химического меднения печатных плат распространены два раствора активирования:

1) $PdCl_2$ – 0,8–1 г/л; HCl – 1–2 г/л ($T = 20°C$; $t = 1 \div 2$ мин);
2) $PdCl_2$ – 4 г/л; NH_4OH – 250–350 мл/л; Трилон Б – 12 г/л ($T = 18 \div 25°C$; $t = 3 \div 5$ мин).

Первый раствор – кислый, второй – щелочной. При активировании диэлектрика в кислом растворе скорость химического меднения значительно выше. Однако при концентрации кислоты в растворе более 15% возможен подтрав внутреннего окисленного слоя фольги.

В последнее время широкое распространение получало совмещенное сенсактивирование в растворах, содержащих соли двухвалентного олова и двухвалентного палладия. На поверхности диэлектрика, обработанного в таком растворе, образуется коллоидная частица, включающая $Sn(OH)Cl$ и $PdCl_2$. При последующей обработке поверхности в растворе $(NH_4)HF_2$ образуется металлический палладий – катализатор последующего меднения. Для успешной металлизации диэлектрика необходимо, чтобы в процессе активирования на квадратном миллиметре поверхности детали образовалось 10–15 частиц палладия диаметром ≈ 50 нм.

Химическое меднение печатных плат производится в растворах, содержащих соль двухвалентной меди (обычно $CuSO_4$), восстановитель, комплексообразователи меди, вещества, поддерживающие pH раствора, различные добавки. Хороший восстановитель, используемый для химического меднения, – формалин. При восстановлении им меди обеспечивается автокаталитический процесс, т. е. катализатором процесса является сама медь, что препятствует прекращению роста пленки меди по мере покрытия ею центров кристаллизации (частиц палладия) и самопроизвольному восстановлению меди из $CuSO_4$ в объеме раствора. Автокатализ при восстановлении меди гипофосфитом, гидразином, гидросульфитом выражен гораздо слабее.

Химическое меднение требует тщательного соблюдения режимов и концентраций. Этот процесс обладает следующими недостатками: все растворы разового действия и имеют низкую плот-

ность загрузки (< 2 дм^2/л); растворы очень нестабильны и требуют тщательной отработки процесса. Химически осажденная медь обладает очень низким качеством. Её удельное сопротивление значительно превышает сопротивление чистой меди. Гальваническая медь плохо сцепляется с химической. Требуется механическая зачистка поверхности перед гальваническим меднением. Скорость химического осаждения меди ~ 0,5 мкм/ч, толщина слоя меди на печатных платах составляет 0,3–0,5 мкм.

Гальваническое осаждение меди производят для получения основного слоя металла-проводника. При этом плата с нанесенным слоем химической меди является катодом, а анодом – массивная медная пластина. Гальваническое меднение печатных плат предназначено обеспечивать толщину слоя меди в отверстиях не менее 25 мкм, равномерный по толщине слой меди на поверхности платы. Для этого необходима высокая рассеивающая способность электролита, прочное сцепление гальванической меди с фольгой и химической медью.

Наиболее распространенные в производстве ПП – сульфатные, фторборатные, фторсиликатные и пирофосфатные электролиты меднения. Сернокислый электролит, состоящий из $CuSO_4$ и H_2SO_4, обладает самой низкой рассеивающей способностью, дает крупнозернистые осадки меди.

Лучшими свойствами обладают электролиты (табл. 2.6).

Таблица 2.6

Свойства электролитов

Электролит	Компоненты	Концентрация, г/л	Плотность тока, А/дм^2	pH	Температура, °С
Фторборатный	$Cu(BF_4)_2$	230	2–4	0,5–1,5	18–25
	HBF_4	5–15			
	H_3BO_3	15–40			
Фторсиликатный	$CuSiF_6$	280–370	5–7	1,7–2,2	18–25
	H_2SiF_6	10–15			
Пирофосфатный	$CuSO_4 \cdot 5H_2O$	30–38	1,0–1,5	7,5–9	45–60
	$K_4P_2O_7 \cdot 10H_2O$	400–450			
	NH_4OH (25%)	12–15			
	Лимонная кислота	10–15			

В этих электролитах компоненты $CuSO_4$, $Cu(BF_4)_2$, $CuSiF_6$ являются растворителями анодов и способствуют получению ионов Cu^{2+}, разряжающихся на катоде. Фторборатная кислота H_3BO_3 увеличивает проводимость электролита и способствует образованию мелкокристаллического осадка. Аналогичное действие оказывает фторсиликатная кислота H_2SiF_6. Осаждение меди из фторборатных электролитов происходит с высокой скоростью. Выход по току (катодный и анодный) приближается к 100%. Электролит фторсиликатный по свойствам приблизительно аналогичен фторборатному, однако требует большей плотности тока. При этом выход по току несколько снижается.

Пирофосфатные электролиты позволяют получить наиболее высокое качество меди. При плотности тока $I = 1,0 \div 1,5$ А/дм^2 выход по току – 100%. Аммиак ускоряет растворение анодов и способствует образованию мелкокристаллического осадка. Лимонная кислота адсорбируется на выступах микрорельефа катода и препятствует росту губчатых дендритов. Скорость осаждения меди из пирофосфатного электролита ~ 13 мкм/ч.

Типичные дефекты химически осажденных пленок меди:

1) низкая прочность сцепления осажденной меди с фольгой вследствие плохого качества очистки фольги и нарушения режимов гальванического процесса;
2) наличие крупнозернистых шероховатых участков на поверхности покрытия вследствие присутствия органических веществ в электролите, адсорбирующихся поверхностью;
3) неравномерность по толщине слоя осажденной меди вследствие малой рассеивающей способности электролита;
4) наличие проколов в слое в отверстиях вследствие низкого качества химического меднения.

Для защиты поверхности токопроводящих участков при травлении меди с пробельных мест, а также для обеспечения условий пайки выводов ЭРЭ печатный монтаж покрывают металлорезистом Sn–Pb (15–20 мкм). Металлорезист, содержащий Sn 50–65% и Pb 50–35%, осаждается в фторборатном электролите. Для получения покрытия Sn–Pb, соответствующего сплаву ПОС-61 (температура плавления сплава должна быть 210°С, чтобы не повредить плату), необходимо поддерживать в электролите отношение $Sn : Pb = (2,0 \div 2,5) : 1$. На поверхности металлорезиста Sn–Pb не должно быть сульфатов и окислов. Для их удаления применяют

осветление в растворе, содержащем HCl (17 г/л), $SnCl_2$ (20 г/л), тиомочевину (до 1 г/л). После осаждения металлорезист оплавляют.

При производстве печатных плат с печатными разъемами (ламелями) в качестве материала покрытия ламелей применяют палладий. Если плата не была покрыта серебром перед палладированием, необходимо гальванически нанести подслой никеля (3–6 мкм) для лучшего сцепления палладия с основанием. Эта операция осуществляется в обычном сернокислом электролите. Палладирование проводится в аммиакатных электролитах. Толщина покрытий из палладия составляет 1–2 мкм. Такие покрытия обладают высокой твердостью и износостойкостью, не тускнеют на воздухе до 400°С.

Травление меди. Эта операция служит для удаления меди с пробельных мест и получения элементов печатного монтажа. Технологический процесс травления меди на печатных платах состоит из следующих операций: щелочное обезжиривание поверхности; декапирование в 20% растворе соляной кислоты; травление меди в соответствующих растворах; нейтрализация после травления; сушка обдувом воздуха.

После каждой операции следует процесс промывки водой. Проводники из меди перед травлением могут быть защищены фоторезистом или металлорезистом Ag; Au; Sn–Pb; Sn–Ni.

Для травления меди в производстве печатных плат применяют следующие растворы – на основе хлорного железа $FeCl_3$, хлорной меди $CuCl_2$, персульфата аммония $(NH_4)_2S_2O_8$, хромовосерной кислоты.

Растворы на основе $FeCl_3$ и $CuCl_2$ не применяются в случае использования металлорезиста Sn–Pb.

Растворы на основе $CuCl_2$ более перспективные, так как имеют следующие преимущества: предел насыщения раствора ионами Cu^{2+} примерно в 3 раза выше, чем у $FeCl_3$ (150–180 г/л для $CuCl_2$ и 50–60 г/л для $FeCl_3$); высокая и постоянная скорость травления меди; легкость отмывки плат после травления (после обработки в $FeCl_3$ образуются нерастворимые соединения типа $FeO \cdot Fe(OH)_2$, что требует дополнительного декапирования, а осадки гидроокиси меди снимаются промывкой в щелочи).

Для травления фольги на платах, покрытых оловянно-свинцовым припоем, могут применяться растворы хромовосерной кислоты. Широко применяется в этом случае травление меди персульфатом

аммония. Эти растворы создают на поверхности ПОС нерастворимые пленки сульфида свинца, предотвращающие растворение сплава.

Основные требования к процессу травления меди с печатных плат – обеспечение равномерного травления и минимального бокового подтрава элементов печатного монтажа. Выполнение этих требований обеспечивается выбором правильного раствора и метода травления. Так, травление меди в растворах на основе хлорного железа или хлорной меди сопровождается боковым подтравом, величина которого в два раза меньше, чем при травлении в растворе на основе персульфата аммония. Для обеспечения равномерности травления всей поверхности печатной платы применяют струйный метод травления, при котором платы, расположенные на конвейере, равномерно перемещаются под струями травителя, причем расположение сопел, формирующих струи, обеспечивает попадание одинакового количества свежего травителя на каждый элементарный участок платы.

Сверление монтажных отверстий. От качества выполнения этой операции зависит сплошность и электрическая прочность печатного монтажа. К просверленным отверстиям предъявляются следующие требования:

- стенки отверстий должны быть гладкими без заусенцев, смятия и расслаивания диэлектрика;
- оси отверстий должны быть перпендикулярны поверхности платы;
- отверстия должны быть строго цилиндрическими;
- не допускается наличия в отверстиях следов инструмента, смазки;
- отверстия не должны выходить за пределы контактных площадок.

Эти требования обеспечиваются выбором соответствующих инструмента, оборудования, режимов обработки.

Сверление отверстий в печатных платах осуществляют спиральными твердосплавными сверлами, выполненными с высокой точностью. Процесс проводят без применения СОЖ во избежание загрязнения диэлектрика. Стойкость сверл – 2000–5000 отверстий. Для сверления платы собирают в пакет и фиксируют по базовым отверстиям. Толщина пакета не должна превышать 4 мм. Под нижнюю плату пакета помещают подкладку из гетинакса или оргстекла толщиной 1,5 мм, предотвращающую образование заусенцев при выходе сверла из пакета и поломку сверл. В качестве оборудования наиболее перспективно применение многошпиндельных

сверлильных станков с программным управлением. Они должны удовлетворять следующим основным требованиям:

- ♦ размер поля обработки – 250–300 мм;
- ♦ точность позиционирования инструмента – не менее чем ± 0,05 мм;
- ♦ плавная регулировка частоты вращения шпинделей (от 5000 до 70 000 об./мин) и подачи (от 0,02 до 0,5 об./мин);
- ♦ наличие пневматического устройства для удаления стружки.

Вследствие некачественного сверления на платах возникают следующие дефекты:

1) наличие неметаллизированных участков в отверстиях вследствие неровностей стенок отверстия, в которых скапливаются пузырьки воздуха, препятствующие осаждению меди на этих участках; наличие загрязнений участков отверстий, которые в дальнейшем удаляются вместе с осажденной на них медью;
2) уменьшение диаметра отверстий вследствие наличия заусенцев, на которые осаждается избыточное количество меди;
3) отслаивание проводников и контактных площадок вследствие снятия диэлектрика при высокой плотности отверстий. Смятый диэлектрик при металлизации впитывает химические реактивы и воду, которые могут подтравливать внутренний слой фольги. Насыщение диэлектрика ионами примесей снижает его сопротивление и приводит к образованию коротких замыканий между соседними отверстиями;
4) смещение отверстий вследствие изгиба сверла, неправильной его заточки, высокой скорости подачи, сверления слишком толстого пакета плат, люфтов в патроне, шпинделе. При смещении отверстий возможен их выход за пределы контактных площадок на одной из сторон платы.

В табл. 2.7 приведены все основные операции технологических процессов изготовления двусторонних печатных плат различными методами. Операции даны в технологической последовательности.

2.1.4. Методика расчета геометрических параметров печатного монтажа с учетом технологических ограничений

Методика приведена в ОСТе 4.ГО.010.209 и предназначена для расчета элементов печатного монтажа ОПП и слоев МПП, изготовляемых химическим методом, ДПП, изготовляемых комбинированным позитивным и электрохимическим методом и методом металлизации сквозных отверстий для МПП.

Таблица 2.7

Основные операции технологических процессов изготовления двусторонних печатных плат

Основные технологические операции	Метод изготовления ДПП					
	комбинированный позитивный	комбиниров. позит. с печатными разъемами	полуаддитивный		аддитивный	метод фотоформирования
			на диэлектрике	на металлич. основании		
Нарезка заготовок	+	+	+	+	+	+
Образование базовых отверстий	+	+	+	+	+	+
Образование монтажных отверстий	+	+	+	+	+	+
Нанесение диэлектр. покрытий	–	–	–	+	–	–
Активация поверхности	–	–	+	+	–	+
Химическая металлизация	+	+	+	+	–	–
Гальваническая металлизация	+	+	+	+	–	–
Фотосенсибилизация	–	–	–	–	–	+
Получение рисунка схемы	+	+	+	+	+	+
Усиление рисунка схемы	–	–	–	–	–	+
Термообработка	–	–	–	–	+	–
Активация поверхности	–	–	–	–	+	–
Химическая металлизация	–	–	–	–	+	+
Гальваническая металлизация	+	+	+	+	–	–
Нанесение металлорезиста	+	+	+	+	–	–
Удаление маски	+	+	+	+	+	–
Термообработка	–	–	+	–	+	+
Травление меди	+	+	+	+	–	–
Снятие металлорезиста с контактами	–	+	–	–	–	–
Палладирование печатного разъема	–	+	–	–	–	–
Оплавление металлорезиста	+	+	+	+	–	–
Обработка по контуру	+	+	+	+	+	+
Маркировка	+	+	+	+	+	+
Нанесение защитного покрытия	+	+	+	+	+	+
Окончательный контроль	+	+	+	+	+	+

Методика расчета предусматривает базовый способ изготовления ОПП, ДПП, ГПК и МПП, а также способы А и Б изготовления внутренних слоев МПП при автоматизированном сверлении монтажных и переходных отверстий:

- способ А: отверстия выполняют на фотошаблонах и на заготовках слоев, а совмещение их производится при помощи фиксирующих элементов;

- способ Б: базовые отверстия на слоях выполняются после получения печатного монтажа относительно перекрестий (элементов рисунка), а совмещение слоев проводится на базовых штырях пресс-формы, перед прессованием слоев в МПП.

Рассчитываются диаметры контактных площадок D, ширина проводников t, минимальные расстояния между элементами печатного монтажа и расстояния, необходимые для прокладки n-го количества проводников между другими элементами платы. В расчетах учитываются условия и технологические факторы различных методов изготовления ПП.

Предельные значения технологических параметров (табл. 2.8) получены в результате анализа производственных данных и экспериментальных исследований точности отдельных операций. Максимальные значения параметров соответствуют применению оборудования и оснастки низкой точности, средние значения – применению оборудования высокой точности. Минимальные значения учитываются для перспективного оборудования и оснастки. В производственных условиях расчет элементов печатного монтажа ведут по производственно-технологическим показателям предприятия-разработчика. При выполнении домашнего задания следует ориентировать студентов на максимальные и средние значения коэффициентов. Основные формулы для расчета приведены в табл. 2.9.

Расчет диаметра контактных площадок ведется из условия сохранения целостности контактной площадки (отсутствие разрыва) при сверлении плат. Учитываются явления подтравливания и разращивания проводящего слоя, погрешности относительного расположения отверстия и контактной площадки (рис. 2.3).

Расчет следует начинать с определения минимального эффективного диаметра контактной площадки по формуле

$$D_{1\min} = 2\left(b_{\text{м}} + \frac{d_{\max}}{2} + \delta_{\text{отв}} + \delta_{\text{кп}} \right).$$

Наименование и величина каждой составляющей в приведенной и последующих формулах даны в табл. 2.9.

При расчете минимального эффективного диаметра контактной площадки $D_{1\min}$ принимают величину $b_{\text{м}}$ в соответствии с рассматриваемым классом платы (см. табл. 2.2). Максимальный диаметр монтажного отверстия определяется по формуле $d_{\max} = d_{\text{св}} + \Delta d$, где Δd определяется точностью изготовления сверла и его биением.

Таблица 2.8

Предельные значения технологических параметров

Наименование коэффициента	Обозначение	Величина
Толщина предварительно осажденной меди, мм	$h_{пм}$	0,005–0,008
Толщина наращенной гальванической меди, мм	$h_{г}$	0,05–0,06
Толщина металлического резиста, мм	$h_{р}$	0,02
Погрешность расположения отверстия относительно координатной сетки, обусловленная точностью сверлильного станка, мм	$\delta_{о}$	0,02–0,10
Погрешность базирования плат на сверлильном станке, мм	$\delta_{б}$	0,01–0,03
Погрешность расположения контактной площадки относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_{ш}$	0,02–0,08
Погрешность расположения проводника относительно координатной сетки на фотошаблоне, мм	$\delta_{ш\,t}$	0,03–0,06
Погрешность расположения печатных элементов при экспонировании на слое, мм	$\delta_{э}$	0,01–0,03
Погрешность расположения контактной площадки на слое из-за нестабильности его линейных размеров, % от толщины	$\delta_{м}$	0–0,10
Погрешность расположения базовых отверстий на заготовке, мм	$\delta_{з}$	0,01–0,03
Погрешность положения базовых отверстий в фотошаблоне, мм	$\delta_{п}$	0,01–0,05
Погрешность положения контактной площадки на слое, обусловленная точностью пробивки базовых отверстий, мм	$\delta_{пр}$	0,03–0,05
Погрешность положения контактной площадки, обусловленная точностью изготовления штырей пресс-формы, мм	$\delta_{пф}$	0,02–0,05
Погрешность диаметра отверстия после сверления, мм	Δd	0,01–0,03
Погрешность изготовления окна фотошаблона, мм	$\Delta D_{ш}$	0,01–0,03
Погрешность на изготовление линии на фотошаблоне, мм	$\Delta t_{ш}$	0,03–0,06
Погрешность диаметра контактной площадки фотокопии при экспонировании рисунка, мм	$\Delta Э$	0,01–0,03

Примечание: δ – погрешность расположения; Δ – погрешность размеров.

Таблица 2.9

Основные формулы для расчета диаметра контактных площадок (D), ширины проводников (t) и соответствующих размеров шаблонов $(D_{ш}, t_{ш})$ при различных методах изготовления печатного монтажа и с учетом технологических факторов

Обозначение	Химический метод	Комбинированный позитивный метод с получением рисунка:		Электрохимический (полуаддитивный) метод с получением рисунка:	
		фотохимическим способом	сеточно-графическим способом	фотохимическим способом	сеточно-графическим способом
D_{min}	$D_{l\,min} + 1,5h_{ф}$	$D_{l\,min} + 1,5\left(h_{ф} + h_{пм}\right) + h_{р}$	$D_{l\,min} + 1,5\left(h_{ф} + h_{пм}\right) + h_{г} + h_{р}$	$D_{l\,min} + 1,5h_{пм} + h_{р}$	$D_{l\,min} + 1,5h_{пм} + h_{г} + h_{р}$
t_{min}	$t_{l\,min} + 1,5h_{ф}$	$t_{l\,min} + 1,5\left(h_{ф} + h_{пм}\right) + h_{р}$	$t_{l\,min} + 1,5\left(h_{ф} + h_{пм}\right) + h_{г} + h_{р}$	$t_{l\,min} + 1,5h_{пм} + h_{р}$	$t_{l\,min} + 1,5h_{пм} + h_{г} + h_{р}$
$D_{ш\,min}$	$D_{min} + \Delta Э$	$D_{min} - h_{р}$	$D_{min} - \left(h_{г} + h_{р}\right)$	$D_{min} - h_{р}$	$D_{min} - \left(h_{г} + h_{р}\right)$
$t_{ш\,min}$	$t_{min} + \Delta Э$	$t_{min} - h_{р}$	$t_{min} - \left(h_{г} + h_{р}\right)$	$t_{min} - h_{р}$	$t_{min} - \left(h_{г} + h_{р}\right)$
$D_{ш\,max}$	$D_{ш\,min} + D_{ш}$	$D_{ш\,min} + \Delta D_{ш}$	$D_{ш\,min} + \Delta D_{ш}$	$D_{ш\,min} + \Delta D_{ш}$	$D_{ш\,min} + \Delta D_{ш}$
$t_{ш\,max}$	$t_{ш\,min} + t_{ш}$	$t_{ш\,min} + \Delta t_{ш}$	$t_{ш\,min} + \Delta t_{ш}$	$t_{ш\,min} + \Delta t_{ш}$	$t_{ш\,min} + \Delta t_{ш}$
D_{max}	$D_{ш\,max} + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_{р} + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_{г} + h_{р} + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_{р} + \Delta Э$	$D_{ш\,max} + h_{г} + h_{р} + \Delta Э$
t_{max}	$t_{ш\,max} + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_{р} + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_{г} + h_{р} + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_{р} + \Delta Э$	$t_{ш\,max} + h_{г} + h_{р} + \Delta Э$

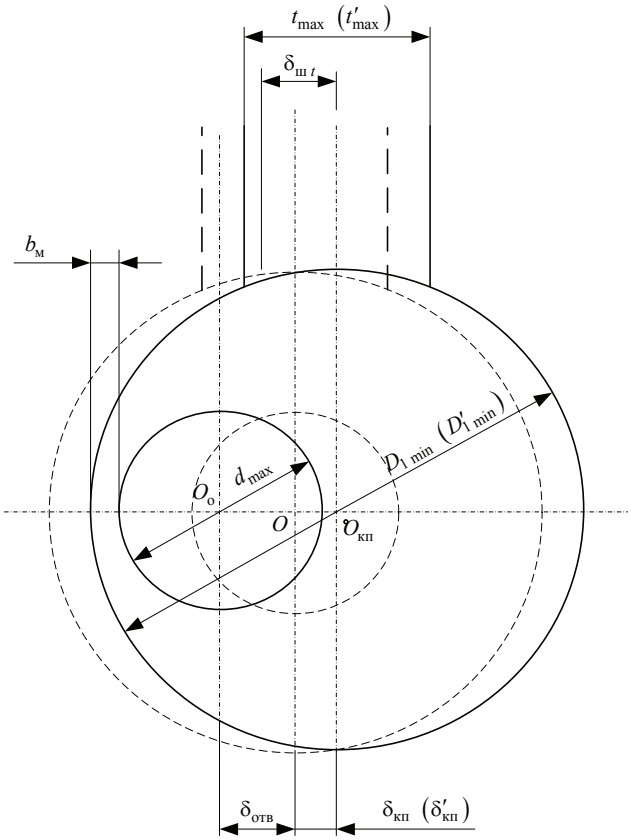


Рис. 2.3. Схема смещения контактной площадки и отверстия в ПП

Далее рассчитывают $d_{св} = d_{м\,отв} + (0{,}1 \div 0{,}15)$. При этом $d_{м\,отв}$ выбирают из ряда, рекомендуемого ОСТом, и с учетом собираемости со штыревыми выводами ЭРЭ и ИС. Следует отметить, что коэффициент 0,1÷0,15 – величина усреднения и учитывает минимально допустимую толщину слоя гальванической меди 25 мкм, слой металлорезиста, усадку отверстия после сверления, а также возможный разброс толщины при гальваническом осаждении меди и металлорезиста.

Возможно смещение центра монтажного отверстия $\delta_{отв}$ относительно координатной сетки (рис. 2.3) после сверления вследствие неточности сверлильного станка и погрешности базирования

платы на станке. Оно определяется как $\delta_{отв} = \delta_о + \delta_б$. Смещение центра контактной площадки $\delta_{кп}$ (рис. 2.3) зависит от точности расположения её рисунка на шаблоне, погрешности экспонирования, погрешностей расположения базовых отверстий в фотошаблоне и заготовке платы и определяется по формуле

$$\delta_{кп} = \delta_ш + \delta_э + \frac{1}{2}\left(\delta_п + \delta_з\right).$$

При расчете $\delta_{кп}$ для внутренних слоев МПП, изготавливаемых по способу А, в приведенной контактной формуле добавляется член $\delta_м$, учитывающий смещение контактной площадки на слое вследствие линейной деформации материала. При толщине материала $H_м = 0,1 \div 0,2$ мм – $\delta_м = 0,05\% H_м$; при $H_м = 0,2 \div 0,25$ мм – $\delta_м = 0,03\% H_м$; при $H_м = 0,5$ мм и более – $\delta_м = 0$.

При изготовлении слоев МПП по способу Б:

$$\delta'_{кп} = \delta_ш + \delta_э + \delta_п + \delta_{пр} + \delta_{пф}/2.$$

Расчет ширины проводников ведется из условия сохранения достаточной прочности сцепления проводника с диэлектриком, зависящей от адгезионных свойств материала основания и гальваностойкости фольги. Минимальная эффективная ширина проводника $t_{1\min}$ определена экспериментально и равна 0,14 мм для плат 1-го, 2-го, 3-го классов и 0,08 мм для 4-го и 5-го классов точности.

При выполнении домашнего задания $t_{1\min}$ следует выбирать из табл. 2.2 в соответствии с заданным классом точности платы.

В зависимости от метода изготовления ПП и, следовательно, толщины слоя меди на поверхности диэлектрика перед травлением его с пробельных мест величина подтравливания будет разной (см. рис. 2.2). Коэффициент 1,5 в формулах расчета минимальных размеров диаметров контактных площадок и ширины проводников (табл. 2.9) отражает особенность струйного направленного травления, обеспечивающего боковое подтравливание несколько меньше, чем величина травления по глубине. В формулах учитывается и величина разращивания при осаждении гальванической меди и металлорезиста. Если металлорезистом является оплавляемый сплав олово–свинец, то разращивание $h_р$ устраняется последующим оплавлением $\left(h_р = 0\right)$.

Максимальные размеры контактных площадок и проводников зависят от точности изготовления фотошаблона и погрешности экспонирования (см. табл. 2.9). В формулах расчета $D_{\max}$ и $t_{\max}$ учитывается разращивание гальванической меди и металлорезиста при наличии на поверхности платы маски из краски (сеткографический способ). Если маска выполнена на основе сухого пленочного фоторезиста, то разращивание отсутствует (или минимально), что и учитывается при расчетах (см. рис. 2.2).

Зная $D_{\max}$ и $t_{\max}$, можно выполнить расчет минимальных расстояний между элементами печатного монтажа, например между проводником и контактной площадкой:

$$S_{\min} = l - \left[\left(\frac{D_{\max}}{2} + \delta_{\text{ш}} \right) + \left(\frac{t_{\max}}{2} + \delta_{\text{шт}} \right) \right],$$

где l – расстояние между центрами рассматриваемых элементов; между двумя контактными площадками:

$$S_{\min} = l - \left(D_{\max} + 2\delta_{\text{ш}} \right);$$

между двумя проводниками:

$$S_{\min} = l - \left(t_{\max} + 2\delta_{\text{шт}} \right).$$

Расчет узких мест ведут с точки зрения возможности прокладки n-го количества проводников между элементами печатного монтажа и конструктивными элементами печатной платы (табл. 2.10).

2.1.5. Порядок выполнения домашнего задания

Содержание варианта домашнего задания (табл. 2.11–2.12) включает схему конструкции печатной платы, задаваемой типом платы (I, II, III, IV); класс платы (1, 2, 3, 4, 5), минимальное расстояние между соседними монтажными отверстиями (1,25; 2,5; 3,75; 5,0), диаметр металлизированного монтажного отверстия (0,6; 0,8; 1,0; 1,3), способ получения рисунка печатного монтажа (фотохимический, сеткографический). Шифр варианта задания прописывается в виде «III–2–2,5–0,8 (СГ)» и означает: плата III типа, 2-го класса, минимальное расстояние между монтажными отверстиями 2,5 мм, диаметр отверстий 0,8 мм, при получении рисунка использовать сеткографический способ.

Таблица 2.10

Формулы для расчета узких мест

Минимальное расстояние для прокладки проводников	Расчетная формула
Между двумя контактными площадками	$l_{\min} = \left(\frac{D_{1\max} + D_{2\max}}{2} + 2\delta_{\text{кп}}\right) + \left(t_{\min} + 2\delta_{\text{шт}}\right)n + S_{\min}\left(n-1\right)$
Между двумя неметаллизированными отверстиями	$l_{\min} = \left(\frac{d_{1\max} + d_{2\max}}{2} + 2\delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{\text{шт}}\right)n + S_{\min}\left(n-1\right) + 2a$
Между контактной площадкой и неметаллизированным отверстием	$l_{\min} = \left(\frac{D_{\max}}{2} + \delta_{\text{кп}}\right) + \left(\frac{d_{\max}}{2} + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{\text{шт}}\right)n + S_{\min}n + a$
Между контактной площадкой и краем платы	$l_{\min} = \left(\frac{D_{\max}}{2} + \delta_{\text{кп}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{\text{шт}}\right)n + S_{\min}n + a$
Между неметаллизированным отверстием и краем платы	$l_{\min} = \left(\frac{d_{\max}}{2} + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{\text{шт}}\right)n + S_{\min}\left(n-1\right) + 2a$

Примечания:

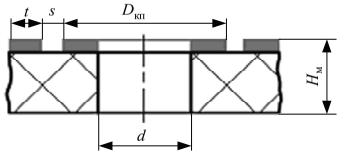
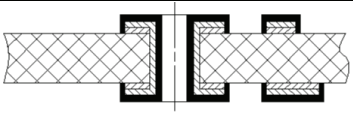
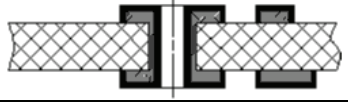
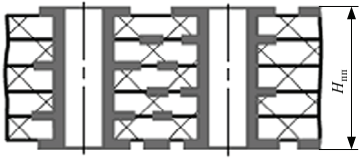
1. Формулы приведены для ДПП и наружных слоев МПП.
2. Для расчета ОПП и внутренних слоев МПП подставляются значения $D_{1\max}$, $D_{2\max}$, $t_{\max}$.
3. $S_{\min}$ определяется расчетным путем или выбирается из табл. 2.2.
4. Расстояние a от края платы, выреза, неметаллизированного отверстия до элементов печатного монтажа берут равным номинальной толщине платы, а для плат толщиной менее 1 мм и ГПК a должно быть не менее 1 мм.

Задание предусматривает:

- ♦ определение типа платы по схеме её конструкции;
- ♦ выбор метода изготовления платы;
- ♦ выбор материала платы, расчет толщины платы по коэффициенту γ и выбор ближайшего значения толщины из ряда, рекомендуемого ОСТом;
- ♦ расчет размеров D и t элементов печатного монтажа с учетом технологических коэффициентов;

Таблица 2.11

Методика расчета диаметра контактных площадок (D), ширины проводников (t) и соответствующих размеров шаблонов $(D_{ш}, t_{ш})$ при различных методах изготовления печатного монтажа и с учетом технологических факторов

Конструкция печатной платы		Класс платы	Расстояние между монтажными отверстиями	Диаметр металлизированных монтажных отверстий	Способ получения рисунка печатного монтажа
Схема конструкции	Обозначение				
	I	1, 2, 3	1,25–2,5	0,6–0,8	Сеткографический (СГ)
			3,75–5,0	1,0–1,3	Фотохимический (ФХ)
	II	1, 2, 3, 4	1,25–2,5	0,6–0,8	СГ
			3,75–5,0	1,0–1,3	ФХ
	III	1, 2, 3, 4, 5	1,25–2,5	0,6–0,8	СГ
			3,75–5,0	1,0–1,3	ФХ
	IV	1, 2, 3, 4, 5	1,25–2,5	0,6–0,8	СГ
			3,75–5,0	1,0–1,3	ФХ

- расчет числа проводников, которые можно провести между соседними монтажными отверстиями (или расчет минимального расстояния между отверстиями, позволяющего провести один проводник);
- расчет других узких мест (табл. 2.10);
- вычерчивание узких мест с изображением всех геометрических параметров печатного монтажа, полученных расчетным путем;
- выбор последовательности основных операций технологического процесса изготовления печатной платы;
- вычерчивание эскизов основных операций с изменением геометрического рисунка элементов печатного монтажа.

Таблица 2.12

Варианты домашнего задания

№ задания	1	2	3	4	5
1	I	1	1,25	0,6	ФХ
2	II	3	5,0	1,3	СГ
3	III	5	2,5	0,8	ФХ
4	IV	2	3,75	1,3	СГ
5	IV	4	1,25	1,0	ФХ
6	III	1	5,0	0,8	СГ
7	II	3	2,5	1,3	ФХ
8	I	5	3,75	0,6	СГ
9	I	2	1,25	1,0	ФХ
10	II	4	5,0	0,6	СГ
11	III	1	2,5	0,8	ФХ
12	IV	3	3,75	1,3	СГ
13	IV	5	1,25	1,0	ФХ
14	III	2	5,0	1,3	СГ
15	II	4	2,5	0,8	ФХ
16	I	1	3,75	0,6	СГ
17	I	3	1,25	1,0	ФХ
18	II	5	5,0	1,3	СГ
19	III	2	2,5	0,6	ФХ
20	IV	4	3,75	1,3	СГ
21	IV	1	1,25	0,8	ФХ
22	III	3	5,0	1,0	СГ
23	II	5	2,5	1,3	ФХ
24	I	2	3,75	0,8	СГ
25	I	4	1,25	0,6	ФХ

Примечание: 1 – конструкция платы; 2 – класс точности платы; 3 – минимальное расстояние между соседними контактными отверстиями, мм; 4 – диаметр металлизированных монтажных отверстий, мм; 5 – способ получения рисунка печатного монтажа.

Задание оформляется на листах формата А4. Материал излагается в последовательности, указанной выше. При выборе метода изготовления, расчетных формул, значений технологических коэффициентов даются соответствующие пояснения. Полученные результаты обсуждаются. Выполненное задание подлежит защите у консультанта.

2.2. ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ № 2. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТП СБОРКИ ЯЧЕЕК ЭЛЕКТРОННЫХ МОДУЛЕЙ

2.2.1. Исходные данные

Исходными данными для выполнения домашнего задания являются:

- разработанная конструкция ПП (ОПП или ДПП);
- конструктивная компоновка ячейки;
- перечень и конструктивные особенности изделий электронной техники, входящих в состав устройства.

Для выбранного типа ПП и заданного класса точности проводящего рисунка указывается метод изготовления платы (химический, комбинированный позитивный или какой-либо другой).

Расчетным путем уточняются:

- диаметры монтажных отверстий $d_{\text{МО}}$ при известных размерах выводов компонентов, монтируемых в отверстия;
- диаметры контактных площадок $D_{\text{КП}}$ для КМО при наличии гарантированного пояска b и с учетом погрешностей сверления отверстия и экспонирования рисунка ПП;
- ширина сигнальных проводников с учетом класса точности, технологических ограничений и наличия узких мест проводящего рисунка (см. ДЗ, 5-й семестр).

Размеры КП для компонентов, монтируемых на поверхности, выбираются из справочной литературы в зависимости от типа корпуса КМП и размера планарных выводов ИМС.

Для удобства изложения материала и контроля достоверности полученных результатов конструктивно-технологические параметры ИЭТ сводятся в табл. 2.13.

Таблица 2.13

Анализ ИЭТ, устанавливаемых на ПП

Тип и позиционное обозначение ИЭТ	Эскиз варианта установки и размеры корпуса ИЭТ	Характеристика варианта установки и способ фиксации на ПП	Характеристика ИЭТ				Количество ИЭТ на ПП	Примечания
			Размеры, мм			Кол-во выводов		
			$d_в$	a	b			

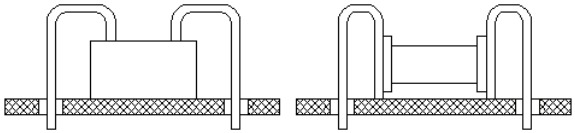
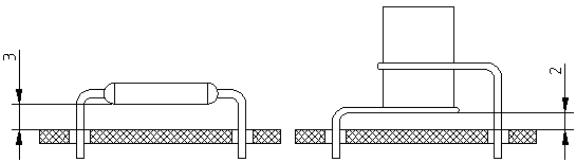
Варианты установки КМО могут быть выбраны из рекомендуемых отраслевым стандартом (табл. 2.14), а КМП – из табл. 2.15.

Информация, находящаяся в таблицах, используется при разработке:

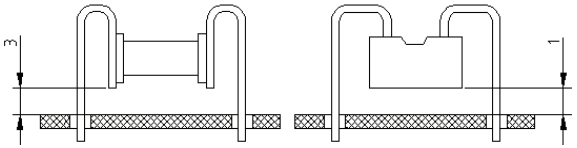
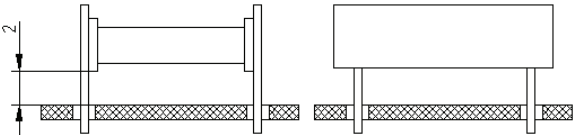
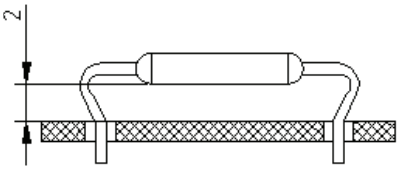
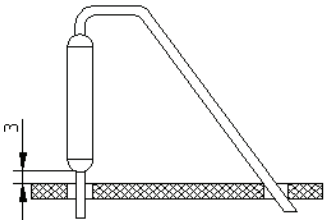
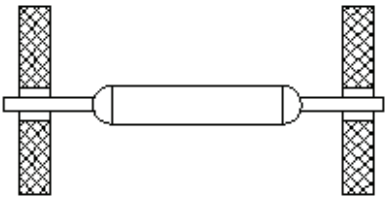
- схемы сборки электронного устройства;
- операционного ТП с перечнем переходов для монтажа ИЭТ каждого типа;
- выбора способов фиксации ИЭТ на ПП;
- выбора способов пайки ИЭТ, установленных на ПП;
- расчета технологичности устройства по базовым показателям.

Таблица 2.14

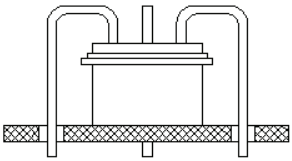
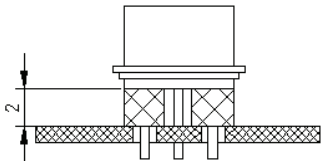
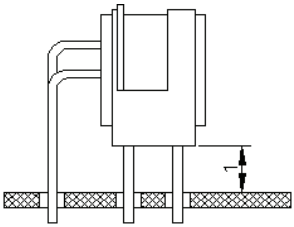
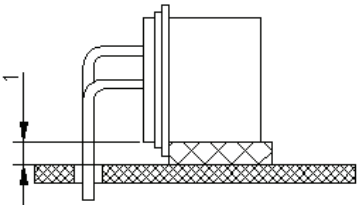
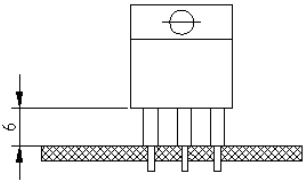
Варианты установки ИЭТ и ИМС на печатные платы

№ варианта	Характеристика варианта	Эскиз и особенности варианта установки
1	2	3
1	Установка резисторов, конденсаторов и транзисторов без зазора	1а – формовка выводов с изгибом на 90°  1б – формовка выводов с изгибом на 180°
2	Установка резисторов, конденсаторов и транзисторов с зазором от ПП 1–3 мм	 2а – формовка выводов с изгибом на 90°

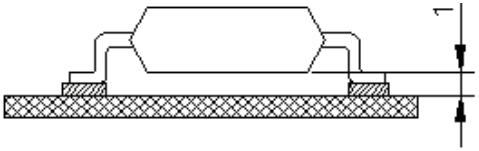
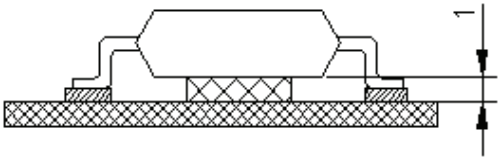
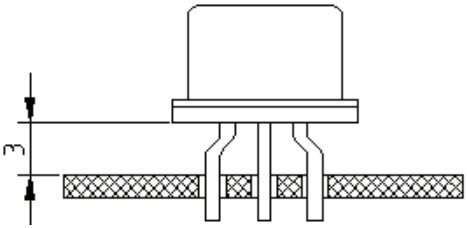
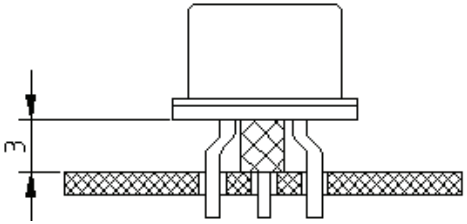
Продолжение табл. 2.14

1	2	3
2	Установка резисторов, конденсаторов и транзисторов с зазором от ПП 1–3 мм	 2б – формовка выводов с изгибом на 180°
		 2в – без формовки (изгиба) выводов
		 2г – сложная формовка выводов при несовпадении длины корпуса и межосевого расстояния монтажных отверстий
3	Установка резисторов, конденсаторов вертикально	 Сложная формовка одного из выводов, вариант позволяет увеличить плотность монтажа элементов на ПП
4	Установка элементов при межплатном монтаже	 Без формовки выводов или с формовкой по месту установки (вариант нетехнологичен, применяется в редких случаях)

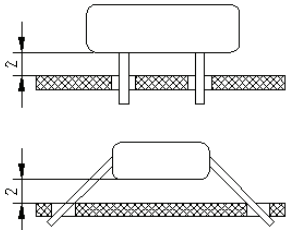
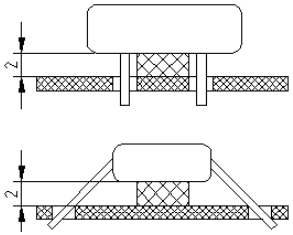
Продолжение табл. 2.14

1	2	3
5	Установка транзисторов в круглых корпусах	 5а – формовка выводов с изгибом на 180°, приклейка корпуса к ПП
		 5б – без формовки (изгиба) выводов, установка на изоляционную втулку с приклеиванием к корпусу и ПП
		 5в – закрепление корпуса в механическом пружинящем держателе, формовка выводов с изгибом на 90°
		 5г – закрепление приклеиванием на диэлектрической подставке, формовка выводов с изгибом на 90°
6	Установка ИЭТ в корпусе КТ-28	 Установка с зазором; зазор обеспечивается конструкцией выводов. Фиксация подгибкой или подпайкой

Продолжение табл. 2.14

1	2	3
7	Установка микросхем в корпусах 4-го и 5-го типа	 7а – установка без зазора при наличии электроизоляционной защиты печатных проводников, формовка выводов ИМС
		 7б – установка с зазором от ПП, формовка выводов ИМС
		 7в – установка на изоляционную или теплоотводящую прокладку с приклеиванием, формовка выводов ИМС
8	Установка микросхем в корпусах 3-го типа	 8а – установка с зазором от ПП, формовка выводов ИМС
		 8б – установка на изоляционную прокладку с приклеиванием, формовка выводов ИМС

Окончание табл. 2.14

1	2	3
9	Установка микросхем и микросборок в корпусах 1-го и 2-го типа	 9а – установка с зазором от ПП, без формовки, с рихтовкой и обрезкой выводов
		 9б – установка на изоляционную или теплоотводящую прокладку с приклеиванием, рихтовкой и обрезкой выводов

Примечания:

1. Анализ вариантов установки ИЭТ необходим для оценки технологичности изучаемого или проектируемого ЭМ. Установка элементов с зазором или без зазора относительно ПП требует их фиксации, особенно при групповой пайке волной припоя. Некоторые варианты предусматривают сложную формовку выводов ИЭТ, для которой необходимы специальные инструменты или приспособления формовки.
2. Применение изоляционных или теплоотводящих прокладок требует введения дополнительных операций в технологический процесс сборки ячеек. При механической фиксации корпусов навесных элементов в конструкции ячеек проявляются детали пространственной компоновки (втулки, пластины, радиаторы, винты, гайки), снижающие технологичность ячейки.

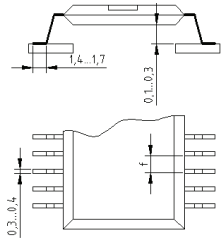
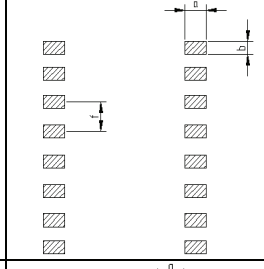
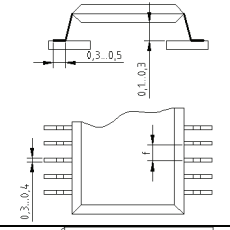
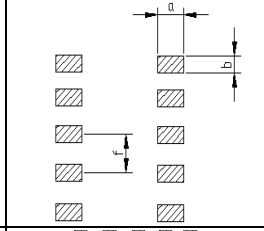
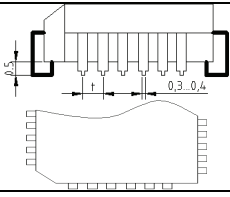
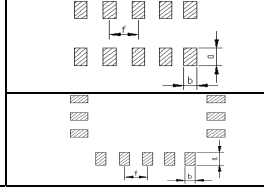
2.2.2. Разработка маршрутного ТП сборки

Разработка маршрутного ТП сборки ячейки электронного устройства основывается на типовом ТП сборки электронных модулей 1-го уровня, который состоит из следующих операций:

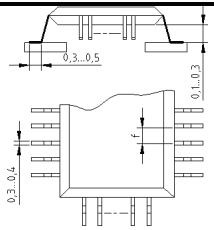
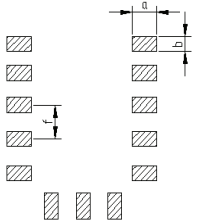
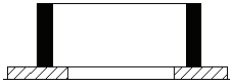
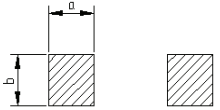
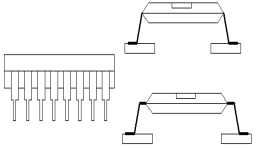
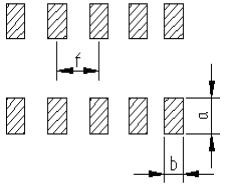
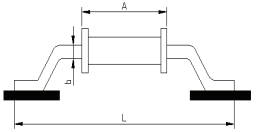
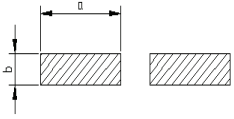
- комплектация ИЭТ;
- подготовка ИЭТ к монтажу на ПП;

Таблица 2.15

Схемы установки компонентов, монтируемых на поверхность печатных плат

Наименование и характеристика ИЭТ	Схемы установки ИЭТ на ПП	Схема посадочных мест на ПП	Размер				Типы ИЭТ	
							отечеств.	импортные
1	2	3	4	5	6	7	8	9
ИМС с удлиненными планарными выводами			*f*	*a*	*b*		–	–
			1,25	2	0,8	отеч.	402	SO
			1,25	2,3	0,8	импорт.	4112	SSO
			0,75	2,4	0,45		4119	SOP
			0,65	2,15	0,3		411	
			1,27	2,5	0,6		4122	
			0,8	2	0,5		4138	
ИМС с планарными выводами (*L*-выводы)			*f*	*a*	*b*			
			1,27	1,2	0,7			SOT
			0,65	1,6	0,4			TSOT
			0,3	1,6	0,17			
			0,63	1,8	0,35			
			0,5	1,6	0,3			
ИМС с подогнутыми выводами (*J*-выводы)			*f*	*a*	*b*			
			1,27	2,2	0,6			PLCC
			1,27	2,2	0,6			
			1,27	1,55	0,6			

Окончание табл. 2.15

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ИМС с четырехсторонним расположением планарных выводов			*f*	*a*	*b*			–
			0,635	1,8	0,35			SQFP
			0,3	1,6	0,17			CQFP
			0,5	1,6	0,3			PQFP
			0,8	1,8	0,4			
			1,27	2,4	0,65			
Дискретные чип-элементы				0,5	0,6			SOD, 0402
				1,5	4			1206, 1812
				3,2	3,2			2012
ИМС в *DIP*-корпусах			*f*	*a*	*b*		–	–
			2,5	2,2	1,2		2104	
							2107	
							2140	
							2127	
ИЭТ с осевыми выводами			*d*	*a*	*b*		резисторы	
			0,5				конденсаторы	
			1,0				диоды	
							дроссели	

Примечание. Размеры посадочных мест для конкретного ИЭТ следует выбирать из справочной литературы.

- установка ИЭТ на ПП;
- пайка ИЭТ или другой способ получения контактных соединений;
- контроль качества собранной ячейки.

Способы комплектации ИЭТ зависят от их типов и состояния поставки фирмами-изготовителями: фирменная упаковка, транспортировочная тара, технологическая тара, кассеты-питатели. В мелкосерийном производстве ИЭТ извлекают из упаковки различных типов и комплектуют по типономиналам в технологическую тару (коробки или ячейки). Входной контроль ИЭТ не проводится в соответствии с гарантиями фирмы-поставщика. Исключение – ИМС для специальных электронных устройств. Возможен выборочный контроль: из партии в 500 шт. КМП на контроль параметра идет 10 шт., а на контроль паяемости – 3 шт.

Подготовка ИЭТ к монтажу заключается в формовке, обрезке и лужении выводов большей части КМО. КМП не требуют подготовки выводов к монтажу, за исключением некоторых ИМС с планарными выводами. Подготовка выводов ИЭТ осуществляется на монтажном столе, оснащенном соответствующими приспособлениями и инструментами, или на рабочем месте монтажника. Подготовленные ИЭТ снова размещаются в технологическую тару.

Установка ИЭТ на ПП состоит из поиска места установки на ПП, поиска ИЭТ соответствующего типономинала, собственно установки и фиксации ИЭТ на ПП. В качестве способов фиксации ИЭТ применяются: подгибка выводов, подпайка выводов, приклеивание корпуса ИЭТ к ПП, фиксация за счет пружинения выводов или формовки их в зиг-замок. В простейшем случае возможно удерживание установленного ИЭТ с одновременной пайкой выводов, что более трудоемко, чем предварительная установка ИЭТ и последующая пайка всех выводов.

Пайка – основной способ получения контактных соединений при сборке и монтаже ячеек. Применяются следующие способы пайки:

- пайка паяльниками с различными конфигурациями жала, с применением трубчатых припоев, с регулированием температуры с помощью паяльных станций;
- пайка волной припоя (параболической, λ-волной, двухкаскадной волной). Применяется при монтаже КМО и КМП, если корпуса последних приклеены к поверхности ПП;

- ♦ конвекционная пайка в специальных конвейерных печах с предварительным нанесением на контактные площадки проводящего рисунка ПП припойной пасты с помощью трафаретной печати.

Контроль качества ячеек ведется:

- ♦ после установки ИЭТ (КМО и КМП) на плату (установка в соответствии с маркировкой на ПП, ориентация ИЭТ по ключу и полярности, смещение КМП относительно КП);
- ♦ после пайки ИЭТ (по характеру галтелей припоя, его количеству и отражательной способности);
- ♦ на рабочем месте функционального контроля или установках функционального контроля.

В промышленном производстве электронных устройств собранная ячейка размещается в корпусе устройства, в конструктиве модуля 2-го уровня или подвергается автономной защите и герметизации от внешних воздействий.

В комплексном задании эти задачи решаются в ходе выполнения конструкторского курсового проекта на 8-м семестре обучения.

2.2.3. Разработка операционного ТП сборки

Операционный ТП сборки ячейки разрабатывается на основе схемы сборки с базовой деталью (рис. 2.4). Схема наглядно иллюстрирует последовательность установки ИЭТ на ПП и действия, сопровождающие этот процесс.

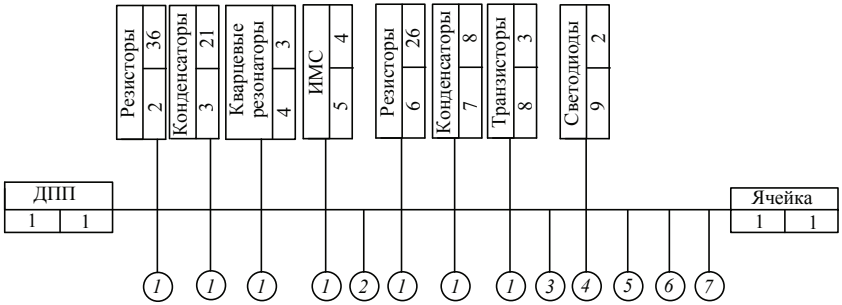


Рис. 2.4. Схема сборки ячейки с базовой деталью:
1 – установка на паяльную пасту; *2* – переворот печатной платы; *3* – оплавление в ИК-печи; *4* – установка с фиксацией в зиг-замок; *5* – пайка вручную установленных элементов с осевыми выводами; *6* – проверка качества паяных соединений; *7* – контроль функционирования, настройка

Таблица 2.16

Наименование и содержание операций этапов ТП электронных модулей 1-го уровня с элементами со штыревыми выводами

№ операции	Наименование этапа ТП	Наименование и содержание операций ТП
1	2	3
05–15	Подготовка ПП к монтажу	05. Контрольная: входной контроль ПП (дата изготовления, отсутствие механических повреждений, отслоений металлизации, расслоений диэлектрика). Проверка коробления и паяемости платы. 10. Расконсервация: удаление защитного лака, промывка в спирто-бензиновой или спирто-хладоновой смеси. 15. Сушка: осуществляется в термостате при $T = 60 \div 70$°C; $t = 3 \div 4$ ч
20–35	Подготовка ИЭТ (ЭРЭ, ИМС) к монтажу	20. Комплектация: комплектование ИЭТ, сборочных единиц, деталей пространственной компоновки, прокладки, изоляционных трубок, объемных проводников, вспомогательных материалов. 25. Подготовительная: обрезка, зачистка, рихтовка, формовка, лужение выводов. 30. Подготовительная: защищает от статического электричества. 35. Лужение объемных проводов и перемычек
40–55	Установка ИЭТ на ПП	40. Сборочная: установка ИЭТ и деталей, закрепляемых трубчатыми заклепками с развальцовкой. 45. Сборочная: установка ИЭТ с закреплением на ПП приклеиванием (подготовка поверхностей, нанесение клея, установка ИЭТ, сушка). 55. Электромонтажная: установка ИЭТ на ПП согласно выбранному варианту, подгибка выводов, обрезка в пределах площадки КП, подпайка выводов для фиксации ИЭТ
60–85	Получение контактных соединений пайкой волной припоя	60. Подготовительная: защита мест незадействованных контактных соединений, переходных, металлизированных отверстий (лента ПВХ, латекс, паяльная маска – наносится при изготовлении ПП). 65. Контрольная: проверка правильности установки ИЭТ согласно сборочному чертежу. 70. Пайка волной: установка ячейки в технологическую раму, флюсование, сушка флюса и пайка осуществляются по ходу движения конвейера, снятие ячейки с конвейера. 75. Промывка ячейки в спирто-хладоновой смеси. 80. Сушка в термостате ($T = 60 \div 70$°C; $t = 3 \div 4$ ч)

Окончание табл. 2.16

1	2	3
		85. Электромонтажная: удаление защитных покрытий (паяльная маска остается), контроль качества контактных соединений, исправление дефектов вручную
90	Получение контактных соединений пайкой вручную	90. Нанесение флюса на места пайки, пайка паяльной станцией с контролем температуры и времени пайки, использование теплоотводов при пайке ИМС, контроль соединений, промывка и сушка
95–105	Изготовление жгутов и кабелей	95. Подготовительная: нарезка объемных проводов заданной длины; разделка концов провода (снятие изоляции, лужение проводника, наложение бандажа, заделка экрана); установка и обжатие наконечников. 100. Вязка жгута: раскладка проводов на шаблоне, маркировка концов проводов, вязка проводов в жгут, контроль. 105. Электромонтажная: распайка концов провода на контактах вилок и колодок разъемов, контроль
110–145	Сборка и монтаж ячейки после пайки волной	110. Сборочная: установка ИЭТ, деталей и сборочных единиц, требующих механического крепления на ПП; размещение объемных проводов (жгуты, перемычки). 115. Электромонтажная: флюсование, пайка и контроль вновь установленных ИЭТ и проводов. 120. Маркировка и сушка (60°С – 3 ч; 20°С – 24 ч). 140. Нанесение покрытия и сушка (60°С – 3 ч; 20°С – 24 ч). 145. Сборочная: установка негерметичных ЭРЭ и электровакуумных приборов, окончательная сборка ячейки, стопорение крепежных элементов
150–160	Регулировка и контроль	150. Настройка: настроить ячейку согласно ТУ. 155. Электромонтажная: электромонтаж после настройки, окончательная пайка настроенных элементов, промывка и защита лаком мест пайки. 160. Контрольная: визуальный контроль монтажа ячейки на соответствие чертежу, контроль электрических параметров, укладка в тару и упаковка

Примечания:

1. Диапазон номеров операций (05–10 и т. д.) представляет возможность их дробления и введения дополнительных операций, не нарушая общую структуру и последовательность этапов ТП.
2. При разработке ТП сборки и монтажа конкретной ячейки учитывают следующее:
   1) поверхность ПП может быть защищена паяльной маской, которая не удаляется и сохраняется на период сборки и в процессе эксплуатации;
   2) при комплектовании навесные элементы размещают в таре согласно их номиналам и последовательности установки;
   3) часть ИЭТ не требует подготовительных операций (25–35).

На схеме в прямоугольниках размещаются наименования ИЭТ, позиционные обозначения их на сборочном чертеже ячейки и количество устанавливаемых ИЭТ. По одну сторону линии, соединяющей базовую деталь (ДПП) и сборочную единицу (ячейка), располагаются прямоугольники принятой последовательности установки ИЭТ и сборочных единиц; по другую сторону – порядковые номера технологических действий или операций. Повторяющиеся действия обозначают одной и той же цифрой. Расшифровка цифр приводится рядом с рисунком схемы сборки.

Для действующего мелкосерийного производства электронных модулей 1-го уровня с элементами со штыревыми выводами характерны операции, приведенные в табл. 2.16. Схемы формовки приведены на рис. 2.5, а схемы подгибки выводов — на рис. 2.6.

В ходе выполнения комплексного задания студент разрабатывает операционный ТП на основе схемы сборки (см. рис. 2.4) и с учетом конструктивно-технологических особенностей устанавливаемых на ПП ИЭТ (см. табл. 2.14 и 2.15). Операционный ТП оформляется в виде операционной карты (табл. 2.17).

Таблица 2.17

Операционный ТП

№ операции, перехода	Наименование операции и перехода	Время			Оборудование, оснастка
		перехода	$\Sigma T_{\text{пер}}$	$T_{\text{шт}}$	

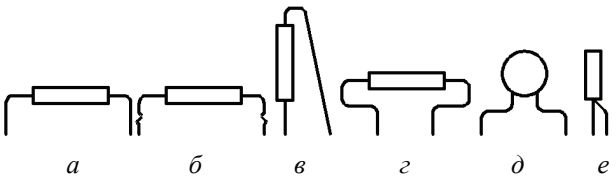


Рис. 2.5. Схемы формовки некоторых КМО:
а – П-образная; *б* – в зиг-замок; *в* – при вертикальной установке;
г – сложная формовка в случае расположения монтажных отверстий под корпусом КМО; *д* – формовка некоторых конденсаторов;
е – формовка транзисторов в пластмассовых корпусах

При составлении операционного ТП используют результаты хронометража операций и переходов, полученные в ходе изучения и анализа действующего производства электронных устройств.

Время некоторых сборочных операций для мелкосерийного производства ЭА приведено в табл. 2.18.

При определении состава операций, переходов и их трудоемкости учитываются:

- количество комплектующих ИЭТ;
- количество ИЭТ, не требующих подготовки выводов;
- количество ИЭТ, требующих подготовки выводов;
- количество контактных соединений, получаемых пайкой или каким-либо другим методом.

Таблица 2.18

Время некоторых сборочных операций для мелкосерийного производства ЭА

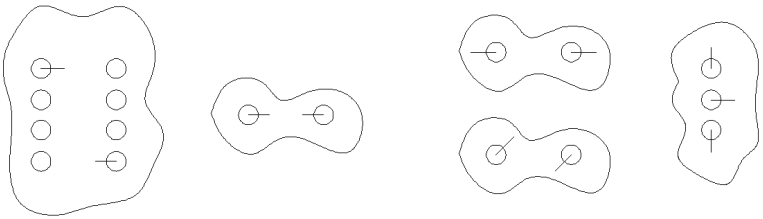
Операция и переходы	Время, с	Примечания
1	2	3
Комплектация ИЭТ		При упаковке в лентах отсчет ведут из расчета $N_{ЭИТ}$ на L мм длины ленты. Дорогостоящие ИЭТ отсчитывают поштучно
Поиск ИЭТ нужного номинала	30	
Отсчет требуемого количества ИЭТ	10 (10 шт.)	
Размещение в технологической таре по номиналам	6–10	
Маркировка тары	3	
Лужение выводов КМО		Температура припоя выше температуры его плавления и составляет 370–380°С
Извлечение из тары	2	
Лужение погружением в припой	1–2	
Охлаждение луженых выводов	10	
Возврат в тару	2	
Формовка выводов КМО		Сложная формовка требует применения специальных приспособлений, сокращающих время формовки на 1 шт. ИЭТ
Извлечение из тары (10 шт.)	3–5	
Подбор приспособления и формовочных инструментов	2–5	
Формовка:		
Вручную (фиксация, гибка, возврат в тару) (10 шт.)	15	
Вручную круглогубцами (1 шт.)	5	
На формовочном приспособлении (1 шт.)	5	
Установка КМО на ПП		Характер подгибки выводов зависит от типа установки (с зазором, без зазора и др.)
Поиск и извлечение элемента из технологической тары	2	
Поиск места и установка элемента:		
Резисторы	1,5	
Конденсаторы, транзисторы, диоды	2	
Колодки разъемов	7	
Подгибка выводов (1 шт.)	3	
Обрезка выводов (1 шт.)	1,5	
Визуальный контроль правильности установки (1 КМО)	1,5	

Продолжение табл. 2.18

1	2	3
Пайка выводов КМО паяльником		Если КМО установлены и зафиксированы на ПП, то целесообразно флюсовать и паять сразу все выводы с противоположной стороны
Выбор выводов КМО	1–2	
Флюсование выводов	2	
Пайка выводов	1–2	
Контроль качества пайки	2	
Пайка выводов КМО волной припоя		В установках пайки волной скорость движения транспортера регулируется в пределах 0–6 м/мин. Температура припоя 260 ± 0,5°С
Установка ПП с КМО в держателе кассеты	20	
Установка кассеты на транспортер	4–5	
Пайка волной в процессе движения транспортера	180–240	
Охлаждение платы	30	
Снятие платы с транспортера	30	
Нанесение припойной пасты на ПП при монтаже КМП		Паста наносится одним непрерывным движением ракеля относительно поверхности трафарета. ПП с нанесенной пастой хранится в положении, препятствующем размазыванию последней
Выбор трафарета	5	
Установка ПП в приспособление с корректировкой положения трафарета и платы	5–10	
Нанесение пасты на ракель	5	
Нанесение пасты на ПП продавливанием через трафарет	5–10	
Извлечение платы	2	
Контроль качества нанесения пасты	5	
Установка КМП на ПП вручную		Разработаны конструкции технологических устройств, снижающих трудоемкость ручной установки КМП. Не путать с автоматами, производительность которых на 1–2 порядка выше ручной установки КМП
Поиск компонента	3	
Поиск места установки	3	
Установка	3	
Визуальный контроль	1	
Оплавление припойной пасты		Скорость конвейера печи оплавления ~30 см/мин. Наличие 4 температурных зон: 1 – 140°С; 2 – 155°С; 3 – 244°С; 4 – 270°С
Установка платы с КМП в печь	3	
Оплавление в печи с непрерывным перемещением конвейера	350–370	
Охлаждение платы	60	
Визуальный контроль качества пайки	10	

Окончание табл. 2.18

1	2	3
Установка КМП на ПП вручную с фиксацией приклеиванием		КМП, приклеенные к поверхности ПП, можно паять волной припоя со стороны установленных компонентов. Керамические корпуса КМП предохраняют их от перегрева. ИМС, монтируемые на поверхность ПП, паять волной припоя не рекомендуется из-за малого шага выводов (0,5–0,625) и опасности перегрева
Нанесение клея на ПП:		
Выбор трафарета	5	
Подготовка клея (после хранения в холодильнике)	5	
Нанесение клея на ракель	5	
Нанесение клея на ПП	5	
Извлечение платы из приспособления	2	
Визуальный контроль	5	
Установка КМП на ПП	10	
Отверждение клея в печи:		
Установка ПП в печь	3	
Отверждение	720	
Охлаждение	60	
Извлечение ПП и контроль	10	



а *б* *в* *г*

Рис. 2.6. Схемы, иллюстрирующие характер подгибки выводов КМО, установленных на противоположной стороне ПП:
а – диагональная подгибка многовыводных КМО; *б* – подгибка выводов резисторов, диодов, предохранителей; *в* – подгибка выводов конденсаторов; *г* – подгибка выводов транзисторов

2.2.4. Разработка операционного эскиза сборки ячейки электронного устройства

Операционный эскиз – технологический документ, предназначенный для рабочего и контролера. На эскизе указываются поверхности обработки, размеры и технические требования, которые должны быть выдержаны при выполнении операции. Эскиз фиксирует внимание рабочего на технических требованиях, предъявляемых при выполнении операции.

Операционный эскиз является документом, который по своему назначению и содержанию заменяет рабочему, выполняющему данную операцию, рабочий чертеж детали.

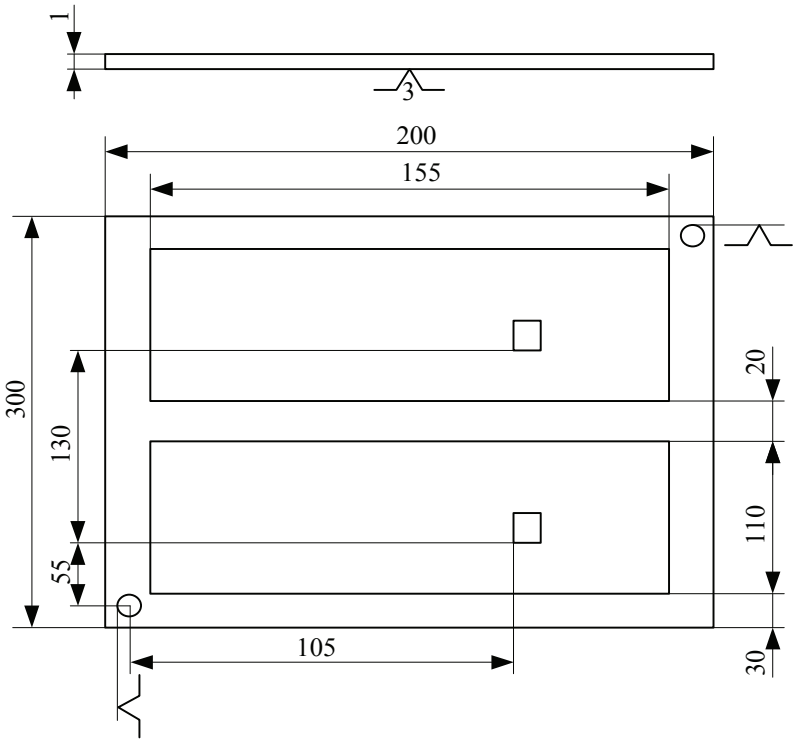


Рис. 2.7. Схема базирования групповой ПП при монтаже навесных ИЭТ (показаны места установки ИМС с ориентацией по ключу и координаты относительно базовых отверстий групповой заготовки)

Так как объем выпуска устройства в комплексном задании 6-го семестра еще не задан, то принимаем, что сборка ячейки ведется на одном рабочем месте монтажника с установкой и пайкой всех элементов ИЭТ и креплением других навесных деталей согласно разработанной схеме сборки с базовой деталью (см. рис. 2.4).

Взаимную ориентацию ПП и устанавливаемых ИЭТ определяют схемы базирования, которые приобретают решающее значение при автоматической установке компонентов. Поэтому на операционном эскизе необходимо изобразить схему базирования платы

или групповой платы (рис. 2.7) и в виде таблицы дать схемы базирования основных типов ИЭТ, отождествляя их с базированием различных геометрических тел (см. табл. 2.19).

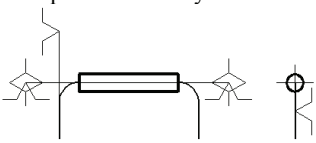
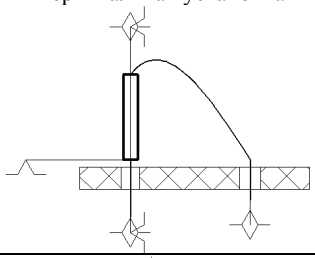
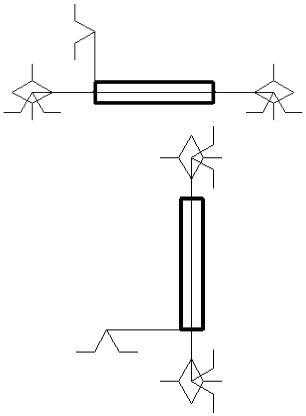
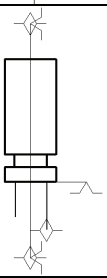
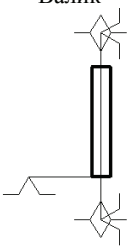
На операционном эскизе схематично указать контуры установленных ИЭТ, выделив цветом, цифрами или условными обозначениями последовательность установки согласно разработанной схеме сборки с базовой деталью (см. рис. 2.4).

При оформлении операционных эскизов необходимо руководствоваться следующими положениями:

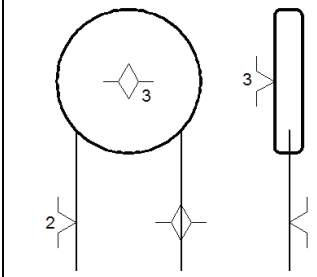
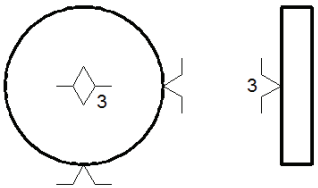
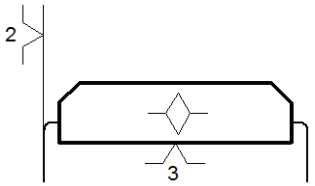
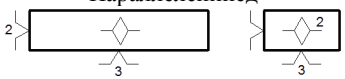
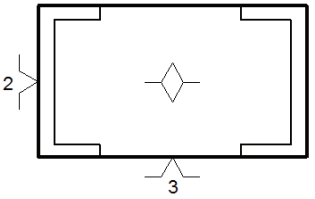
1. На главной проекции заготовка должна быть показана в положении, которое она имеет, если на нее смотреть со стороны рабочего места.

Таблица 2.19

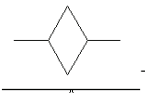
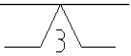
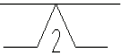
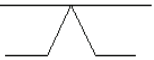
Ориентация ИЭТ при установке на ПП в сборочных операциях

Тип ИЭТ	Схема базирования ИЭТ	Схема базирования геометрического аналога
1	2	3
Резисторы, конденсаторы, диоды, дроссели с осевыми выводами	Горизонтальная установка  Вертикальная установка 	Валик 
Электролитические конденсаторы		Валик 

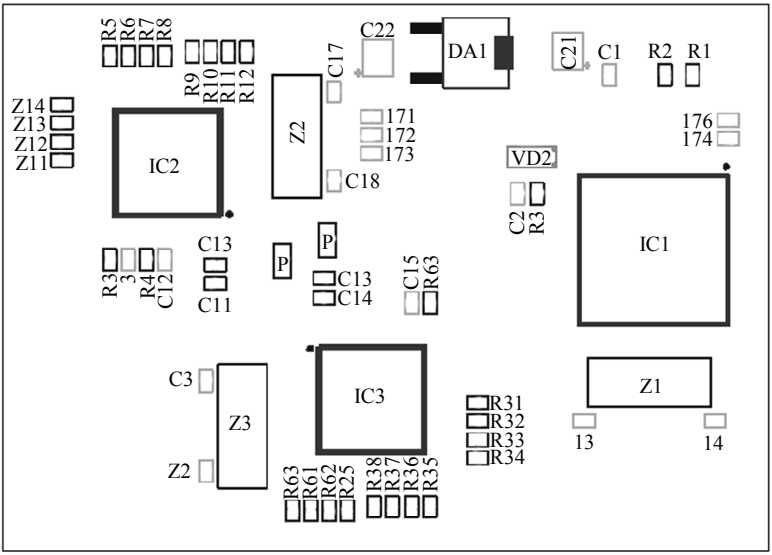
Окончание табл. 2.19

1	2	3
Дисковые конденсаторы		Диск 
Микросхемы различных типов в прямоугольных корпусах		Параллелепипед 
ЧИП КМП		

Примечания:

1. Условные обозначения:
   - ♦ – проекция опорной точки;
   - ♦  – проекция опорной точки;
   - ♦  – установочная технологическая база – лишает ИЭТ трех степеней свободы;
   - ♦  – направляющая технологическая база – лишает ИЭТ двух степеней свободы;
   - ♦  – опорная технологическая база – лишает ИЭТ одной степени свободы.
2. В случае наличия других конфигураций корпусов ИЭТ подобрать другой аналог и разработать собственную схему базирования, учитывая необходимость лишения ИЭТ шести степеней свободы.

2. Операционные эскизы допускается вычерчивать в произвольном масштабе (желательно в одном для каждой операции данного процесса) с соблюдением пропорций.
3. Число дополнительных проекций, сечений, разрезов должно быть достаточным, чтобы показать все поверхности и их размеры, которые должны быть обработаны и получены на данной операции (рис. 2.8).



Микросхемы

Конденсаторы

Резисторы

Кварцевые резонаторы

Светодиод с осевыми выводами

Порядок установки ИЭТ на печатную плату:

Рис. 2.8. Операционный эскиз

Пример операционного эскиза (рис. 2.9).

01. Монтажная операция: установка резисторов на ПП с подгибкой выводов. Спецификация операционного эскиза дана в табл. 2.20. Стол монтажный, инструмент для установки, подгибки и пайки выводов.

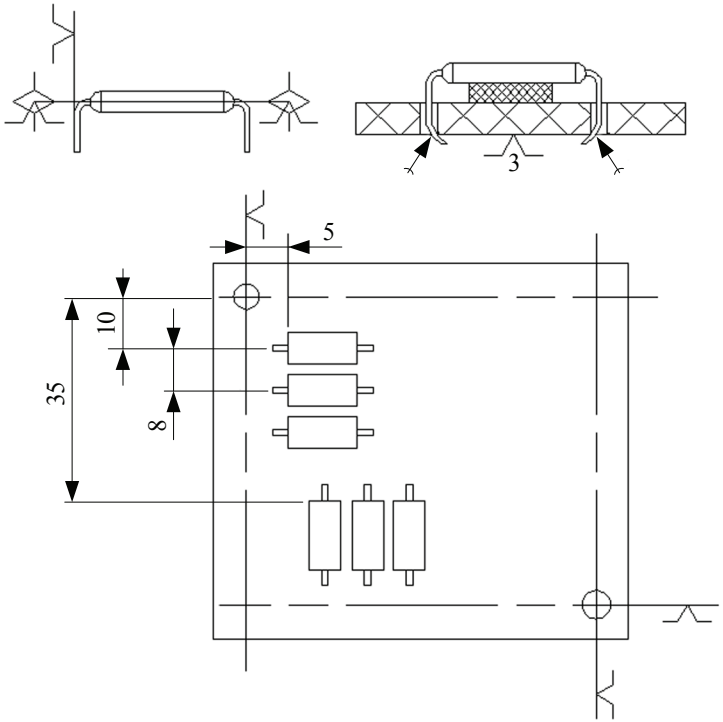


Рис. 2.9. Схема монтажа элементов

Таблица 2.20

Спецификация операционного эскиза

№ п/п	Наименование перехода	Время, с		
		$T_{пер}$	$\Sigma T_{пер}$	$T_{шт}$
1	Установка ПП на стол	5	27	
2	Найти резистор нужного номинала	2		
3	Найти место установки резистора	1,5		
4	Найти и установить прокладку, обеспечивающую зазор между резистором и ПП	5		
5	Установить резистор	1,5		
6	Подогнуть выводы резистора	6		
7	Припаять выводы резистора	4		
8	Удалить прокладку	2		

Повторить все переходы для остальных резисторов. Определить время $T_{шт}$ операции 01.

2.2.5. Разработка операционного ТП для серийного производства электронных модулей

На конструкторско-технологической практике (после 6-го семестра) преподаватель задает объем выпуска (N шт./год) электронного устройства, предполагая его серийное производство. При заданном следует определить такт выпуска:

$$T_{\text{в}} = \frac{\Phi_{\text{д}} \cdot 60}{N}, \text{ мин/шт.}$$

В данной формуле $\Phi_{\text{д}}$ – действительный годовой фонд времени равный 2070 ч при односменной работе. $T_{\text{в}}$ строго регламентирует время каждой операции сборки (подготовка, установка, пайка, контроль ИЭТ). Возникает необходимость проведения сборки и монтажа на нескольких рабочих местах в отрезках времени, не превышающих время $T_{\text{в}}$. Если штучное время операции $T_{\text{шт}} > T_{\text{в}}$, то разрабатываются или приобретаются средства механизации операции или принимается решение об использовании автоматизированного сборочного монтажного оборудования. Если $T_{\text{шт}} \ll T_{\text{в}}$, то возможно объединение нескольких операций на одном рабочем месте. Для каждого рабочего места разрабатывается свой операционный эскиз.

В учебных целях при выполнении курсовой работы по технологии сборки устройства студент на листе формата А1 приводит не более 8–12 операционных эскизов, наглядно иллюстрирующих всю технологию сборки модуля.

Каждый эскиз должен содержать:

- название операции и её порядковый номер;
- название оборудования или средств технологического оснащения данной операции;
- схемы взаимной ориентации базовой детали (ПП), устанавливаемых ИЭТ или других деталей (схемы базирования с условными обозначениями баз и опорных точек (рис. 2.7, табл. 2.19));
- схему размещения всех установленных на данной операции ИЭТ на поверхности ПП с указанием координат и шага установки;
- схемы рабочих частей инструментов, обеспечивающих монтаж (подгибку, подпайку, развальцовку и др.);

- таблицу переходов данной операции с указанием их времени, или таблицу операций с переходами, выполненных на данном рабочем месте;
- суммарное время выполнения всей операции.

На эскизе схемы базирования ИЭТ и других деталей могут быть выполнены в увеличенном масштабе, а схемы размещения ИЭТ на ПП в уменьшенном, но пропорциональном масштабе.

Определив масштаб и содержание операционного эскиза, на листе формата А1 разместить основные операционные эскизы ТП сборки модуля. Лист формата А1 должен иметь один общий штамп и название «ТП сборки ячейки».

В пояснительной записке следует привести эскизы всех операций сборки с подробным описанием технологии и расчетом штучного времени.

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

3.1. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Аннотация. В данной работе рассматривается распространенный в промышленности комбинированный позитивный метод изготовления печатных плат. Кратко излагаются основные этапы метода с графическими иллюстрациями, изменения состояния исходного материала заготовки. В процессе выполнения работы предлагается измерение геометрических параметров на образцах ДПП и изучение дефектов проводящего рисунка на фотографиях ДПП.

Цель работы: изучение промышленной технологии комбинированного позитивного метода изготовления двусторонних печатных плат.

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомиться с ТП изготовления плат комбинированным позитивным методом (табл. 3.1, 3.2).
2. Изучить характерные дефекты рисунка печатной платы.
3. Исследовать ширину проводников ДПП после некоторых операций ТП путем статистической обработки измерений (опытные образцы).
4. Ответить на предложенные контрольные вопросы.

Комбинированный позитивный метод применяют для изготовления ДПП различных классов точности (при ширине проводни-

ков $t = 0{,}45;\ 0{,}25;\ 0{,}15$), а также наружных слоев МПП с металлизацией сквозных отверстий и МПП попарного прессования.

Платы имеют проводящий рисунок в виде печатных проводников на двух сторонах диэлектрического основания (СФ, *FR*) и в объеме диэлектрика в виде металлизированных отверстий, электрически соединяющих обе стороны.

Сущность метода состоит в том, что проводники (сигнальные цепи), шины земли и питания, контактные площадки различных типов, ламели печатных разъемов получают путем *удаления* (*травления*) *фольги* (Cu) с пробельных мест обеих сторон заготовки ДПП, а металлизированные отверстия – путем сверления и *осаждения* на их стенки токопроводящего слоя из металла (Cu).

Геометрия проводящего рисунка печатной схемы обеспечивается с помощью позитивных фотошаблонов. Отсюда принятое название метода – **комбинированный позитивный**.

Коротко рассмотрим основные этапы технологического процесса комбинированного позитивного метода изготовления ДПП (табл. 3.1).

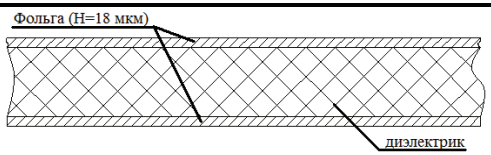
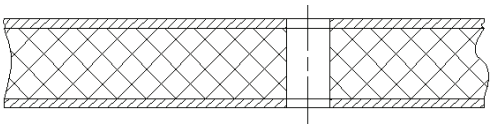
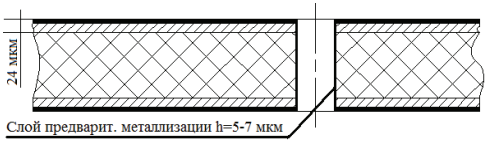
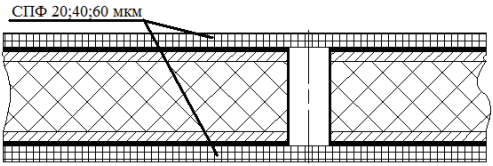
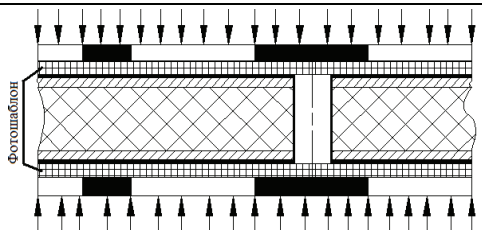
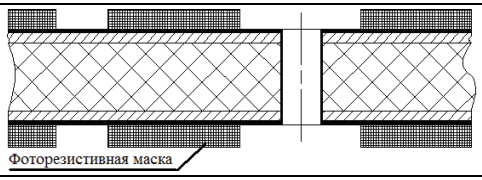
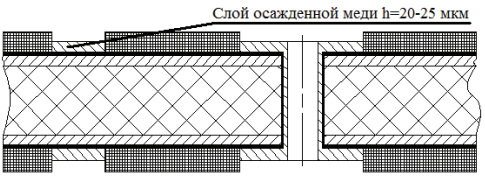
Получение заготовки. Исходным материалом является лист фольгированного с двух сторон диэлектрика. Медная фольга различной толщины ($h_{\text{ф}} = 5;\ 18;\ 20;\ 35;\ 50$ мкм) приклеена к диэлектрическому основанию (СФ) заводом-изготовителем материала.

Основной метод получения заготовок ДПП – резка листа на гильотинных или дисковых ножницах с раскроем на полосы, а полос – на заготовки. Размеры заготовки определяются её типом: одинарная (для изготовления одной ДПП) или групповая (для изготовления нескольких ДПП); шириной технологического поля (20–30 мм) по периметру и между отдельными платами групповой заготовки (5–10 мм) и принятым на предприятии оптимальным соотношением длины и ширины заготовки.

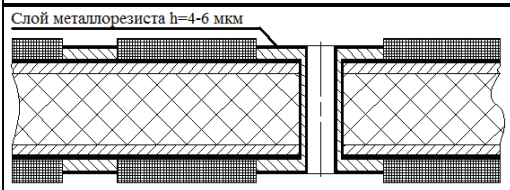
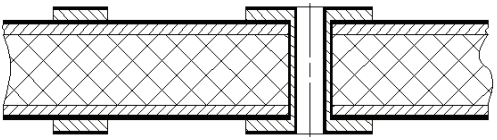
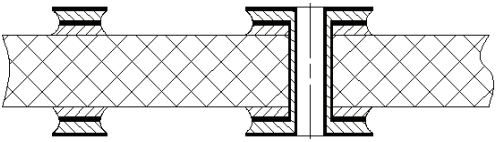
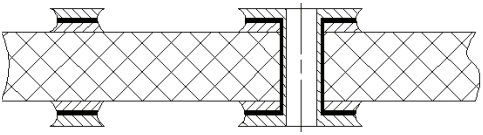
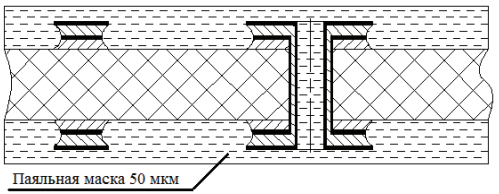
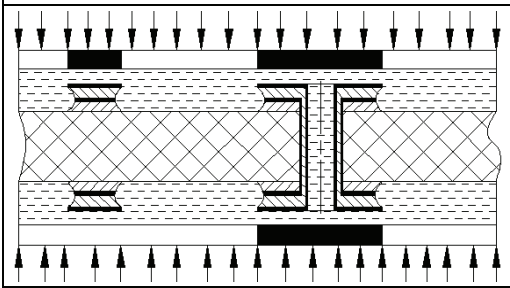
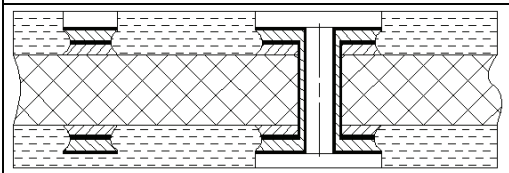
Сверление переходных и монтажных отверстий. В наружном технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия. Базовые отверстия получают на специальном станке, собрав несколько заготовок (обычно от 2 до 6) в пакет, затем сверлят и, не меняя установа пакета, штифтуют. Штифты служат для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с числовым программным управлением. Для сверления применяют специальные одно-, двух- и четырехшпиндельные станки с точностью позиционирования в пределах $\pm(0{,}001–0{,}005)$ мм.

Таблица 3.1

Эскизы изменений состояния исходного материала

Эскиз	Операция	Оборудование
1	2	3
	1. Получение заготовки	Гильотинные ножницы
	2. Сверление переходных и монтажных отверстий	Специальный станок с ЧПУ и автоматической сменой инструмента
	3. Предварительная металлизация отверстий	Линия химико-гальванической обработки
	4. Получение рисунка схемы. 4.1. Ламинирование фоторезиста (СПФ)	Ламинатор
	4.2. Экспонирование рисунка с фотошаблона	Установка экспонирования
	4.3. Проявление рисунка с образованием фоторезистивной маски	Установка химической обработки с удалением незасвеченных участков
	5. Гальваническое осаждение. 5.1. Осаждение меди (Cu)	Линия химико-гальванической обработки

Продолжение табл. 3.1

1	2	3
	5.2. Осаждение олова (Sn) – металлорезиста	---//---
	6. Удаление фоторезистивной маски	Модульная линия конвейерного типа
	7. Травление. 7.1. Травление с пробельных мест	Установка струйного травления
	7.2. Травление олова с проводящего рисунка	
	8. Нанесение жидкой паяльной маски. 8.1. Нанесение и сушка	Установка для нанесения паяльной маски сеткографическим способом. Термошкаф
	8.2. Экспонирование	Установка экспонирования
	8.3. Проявление рисунка	Установка химической обработки

Окончание табл. 3.1

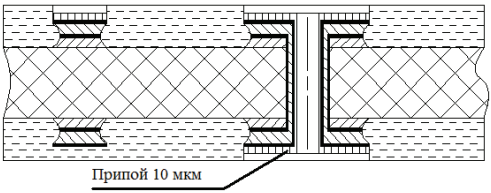
1	2	3
	9. Горячее лужение. 9.1. Флюсование. 9.2. Горячее лужение проводящего рисунка	Установка для нанесения флюса. Установка для горячего лужения

Таблица 3.2

Операции предварительного меднения стенок отверстий заготовки ДПП

Наименование операции	Реактив и характер воздействия	Режимы	
		время	температура
Обезжиривание	Кондиционер DS 270. Нейтрализация отрицательного и придание положительного заряда	7 мин	65°C
Промывка	Вода: струйная; проточная	 30 с 1 мин	 20°C 20°C
Активирование	Предактиватор DS 400 Активатор DS 500 Образование трехметаллического покрытия (Pd, Sn, Me)	 ~2 мин 7 мин	 70°C 42°C
Промывка	Вода	2 мин	20°C
Интенсификация	Ускоритель DS 650 Образование мономолекулярной металлической пленки	7 мин	45°C
Промывка	Вода: струйная	30 с	20°C
Декапирование	10% раствор серной кислоты	50 с	18–25°C
Промывка	Вода	2 мин	20°C
Гальваническая затяжка	Электролит / $CuSO_4$, N_2SO_4, хлориды, добавка J-Plate Cu 400	~8 мин	18–25°C
Промывка	Вода	~1 мин	20°C
Сушка	Горячий воздух	~8 мин	100–120°C
Реактивы DS предложены фирмой-разработчиком системы прямой металлизации *SYSTEM-S*			

Предварительная металлизация отверстий. Стенки просверленных отверстий имеют дефекты в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией, химическую обработку

растворами на основе соляной и серной кислот, комбинированную химико-механическую обработку, плазмохимическое травление.

Типовой ТП предварительной металлизации диэлектрика предусматривает сенсибилизацию (адсорбция олова Sn^{2+}), активацию (образование сверхтонкого слоя палладия Pd), химическое ($h_{мх} = 1 \div 2$ мкм) и гальваническое меднение ($h_{пм}$ до 5–7 мкм).

В настоящее время типовой ТП уступает место прямой металлизации диэлектрика на основе трехметаллического катализатора (Pd, Sn, Me). На стенках отверстий образуется металлическая пленка (Pd, Sn, Me) толщиной 60–80 Å с хорошей адгезией и высокой проводимостью. Прямая металлизация завершается гальванической затяжкой медью до $h_{пм} = 5 \div 7$ мкм. Приведенная выше табл. 3.2 иллюстрирует состав и длительность операций прямой металлизации, что позволяет организовать ТП предварительной металлизации отверстий на модульной линии автооператорного типа с автоматическим переносом заготовки в вертикальные ванны в соответствии с последовательностью операций ТП. Следует отметить, что одновременно медь осаждается и на фольгированные поверхности заготовок.

Получение рисунка схемы. Рисунок печатной схемы на заготовке ДПП может быть получен фотографическим способом (инструменты – фоторезист, фотошаблон) или сеткографическим способом (краска, сетчатый трафарет). Рассмотрим фотоспособ, который обеспечивает большую точность проводящего рисунка, однако отличается большей трудоемкостью по сравнению с сеткографическим способом.

Изображение схемы получают с помощью сухого пленочного фоторезиста путем экспонирования его с инструмента – позитивного фотошаблона на заготовку и проявления. Экспонированные и проявленные участки фоторезиста прочно удерживаются на пробельных местах заготовки, оставляя открытыми все зоны будущего проводящего рисунка.

СПФ представляет собой трехслойную структуру (лавсановая основа – СПФ – полиэтиленовая защитная пленка) и наносится с двух сторон на заготовку с помощью валкового ламинатора. Адгезия обеспечивается предварительной химико-механической обработкой заготовки, подогревом (5 минут, 100°С) в термошкафу, ламинированием (скорость 1,2–1,8 м/мин) с прижимом валков, нагретых до 115–120°С, и термостабилизацией ламинированной заготовки (20°С, 20 мин).

Заготовки (2–4 шт.), ламинированные СПФ, размещают на столе установки экспонирования, совмещая каждую с фотошаблоном с помощью кнопок и базовых отверстий, полученных в технологическом поле перед операцией сверления монтажных отверстий.

Использование базовых отверстий на операциях сверления и экспонирования рисунка позволяет с достаточной точностью обеспечить совмещение центров контактных площадок с центрами монтажных и переходных отверстий ДПП.

Для проявления рисунка схемы применяют механизированную модульную линию конвейерного типа, в которой загружаемые вручную заготовки проходят модули проявления (струйная подача проявителя Na_2CO_3), промывки и сушки. Качество проявленного рисунка контролируют визуально или при небольшом увеличении.

Гальваническое осаждение меди (Cu) в отверстиях и одновременно в остальных зонах проводящего рисунка (пробельные места закрыты фоторезистивной маской) выполняют на программируемой линии предварительного меднения. На этой же линии гальванически осаждают на проводящий рисунок олово (5–10 мкм) – металлорезист. Контроль качества рисунка – визуальный.

Травление меди с пробельных мест осуществляется после удаления заготовки фоторезистивной маски на модульной линии конвейерного типа с ручной загрузкой. Роликовый конвейер перемещает заготовки через модули травления ($CuCl_2$), кислой промывки (HCl), каскадной промывки водой, модуль визуального промежуточного наблюдения, модуль снятия металлорезиста (травление олова с проводящего рисунка) и сушки. Химические растворы и воды подаются в рабочие зоны модулей распылением под давлением с воздействием на обе стороны заготовок ДПП. Операция завершается визуальным или оптическим контролем состояния проводящего рисунка.

Нанесение паяльной маски. Паяльная маска защищает полученный проводящий рисунок ДПП от внешних воздействий, оставляя открытыми места пайки навесных элементов, т. е. зоны контактных соединений с печатным монтажом. Применяют сухие и жидкие паяльные маски (ЖПМ). Последние обладают более высокой разрешающей способностью.

ЖПМ наносят на заготовку ДПП сеткографическим способом, высушивают ($T = 85°C$), экспонируют и проявляют. Окончательные защитные свойства ЖПМ приобретают в сушильном шкафу при $T = 150°C$ ($t = 60$ мин). Геометрию рисунка паяльной маски контролируют визуально при соответствующем увеличении.

Горячее лужение осуществляют на специальной установке путем погружения и выдержки (около 6 с) заготовки в вертикальном положении в расплавленном припое (Sn – 63%, Pb – 37%), находящемся при температуре около 235°С. Сбрасывание излишков припоя и выравнивание толщины слоя лужения до 5–8 мкм осуществляется ножами – форсунками, подающими горячий (200°С) сжатый воздух с двух сторон извлекаемой из ванны заготовки.

Непосредственно перед горячим лужением на заготовку наносят водорастворимый флюс, а после лужения остатки его удаляют на установке отмывки конвейерного типа.

Оптический контроль качества проводящего рисунка ДПП позволяет выявить видимые дефекты печатной схемы. При двухкоординатном передвижении оператором стола с закрепленной заготовкой оптическая система установки контроля регистрирует контролируемые участки платы, увеличивает их и сравнивает с данными бездефектного изображения ДПП.

Обнаруженные дефекты запоминаются, а по окончании контроля выводятся в виде изображений на мониторе, предоставляя оператору информацию для принятия решений. Некоторые дефекты оператор может немедленно удалить вручную.

Автоматический электроконтроль позволяет выявить короткие замыкания и разрыва в проводящем рисунке ДПП. Четыре специальных щупа установки со скоростью 800 точек в минуту по программе тестирования обходят все электрические цепи платы. При этом контролируемый в данный момент участок отображается на экране монитора, а обнаруженные несоответствия с предварительно проконтролированной тест-платой вносятся в специальный чек со штрих-кодом. Считывая штрих-код, легко определить место разрыва или короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Почему метод изготовления ДПП на фольгированном диэлектрике назван комбинированным позитивным методом?
2. Каково назначение в ДПП металлизированных отверстий?
3. Как определяют размеры заготовок ДПП?
4. Что представляет из себя сухой пленочный фоторезист?
5. Какова роль металлорезиста в производстве ДПП?
6. Роль паяльной маски?

7. На каких операциях возможны изменения геометрии рисунка печатной схемы на плате?
8. На каких операциях и с какой целью используют базовые отверстия, выполненные в технологическом поле заготовки ДПП?
9. Укажите способы контроля геометрии проводящего рисунка в технологии ДПП.
10. Как проверить толщину и качество слоя металлизации в отверстиях ДПП?

3.2. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПЕРЕХОДНЫХ ОТВЕРСТИЙ ПП

Цель работы: ознакомление с процессом металлизации переходных и монтажных отверстий в печатных платах, технологией «глухих» микропереходов, изучение возможных дефектов при изготовлении.

Сквозные отверстия являются неотъемлемой частью структуры печатных плат. Данные отверстия могут служить для соединения элементов проводящего рисунка на разных слоях ПП (переходные отверстия), для обеспечения установки выводных элементов (монтажные отверстия), а также для крепления печатной платы в корпусе прибора или установки на плату объемных элементов конструкции, таких как радиаторы, экраны и т. п. (крепежные отверстия). Отверстия ПП могут быть металлизированными и неметаллизированными. В данной работе будут рассматриваться металлизированные отверстия.

Одним из наиболее популярных методов производства печатных плат с металлизированными отверстиями является комбинированный позитивный метод. В отличие от химического метода, монтажные или переходные отверстия получают до образования проводящего рисунка на слоях при помощи сверления.

Стенки просверленных отверстий имеют дефекты (рис. 3.1) в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией, химическую обработку растворами на основе соляной и серной кислот, комбинированную химико-механическую обработку, а также плазмохимическое травление.

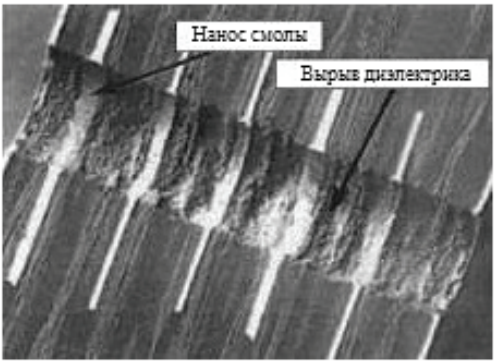
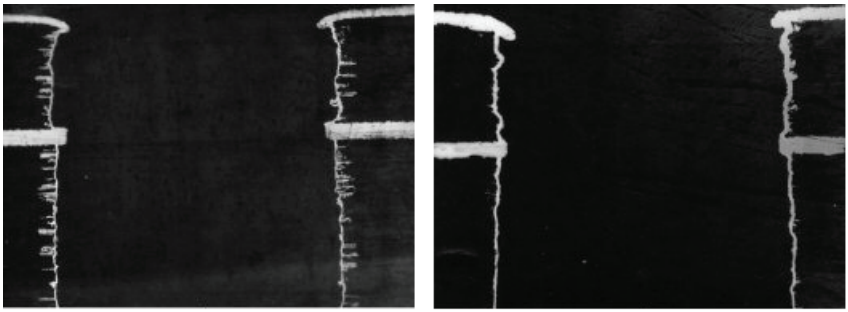


Рис. 3.1. Дефекты на стенках отверстия после сверления



а *б*

Рис. 3.2. Фрагмент шлифта переходного отверстия:
а – металлизированного без дополнительной обработки стенок;
б – металлизированного после химической обработки стенок

Как видно на рис. 3.2, при попытке металлизировать просверленные отверстия без дополнительной обработки появляются различные дефекты. Проникновение меди в трещины (рис. 3.2, *а*) может привести к замыванию металлизированного отверстия и расположенных рядом проводников, особенно при высокой плотности разводки. Также наличие неровностей и наплывов смолы может привести к отсутствию контакта и, как следствие, браку при производстве печатной платы.

После очистки отверстий следует операция *химического меднения* диэлектрика. Данная операция осуществляется за счет восстановления на его поверхности меди из растворов её солей. При этом поверхность диэлектрика должна обладать каталитическими свой-

ствами по отношению к реакции восстановления. Такие свойства диэлектрик приобретает после операции активирования – осаждения на его поверхности частиц металлов-катализаторов последующего химического меднения.

В производстве печатных плат широко распространен метод сенсактивирования – активирования с предварительной сенсибилизацией. Чаще всего для сенсибилизации используют растворы двухвалентного олова, а также применяют соединения Ge, Fe, Ti.

Результат сенсибилизации – осаждение на поверхности диэлектрика солей двухвалентного олова $Sn(OH)Cl$ или других соединений, служащих катализатором в реакции восстановления металла-активатора.

Сенсибилизацию можно также проводить обработкой в красителях, например метиленовом синем, анилиновом синем, с последующей обработкой в восстановителе $Na_2S_2O_4$ (гидросульфит) и промывкой.

Активирование осуществляют обработкой сенсибилизированной поверхности растворами соединений каталитически активных металлов Pd, Pt, Au, Ag. Растворы могут быть кислыми или щелочными. При активировании диэлектрика в кислом растворе скорость химического меднения значительно выше. Однако при концентрации кислоты в растворе более 15% возможен подтрав внутреннего окисленного слоя фольги. Металл в растворах находится в виде простого или комплексного соединения. При взаимодействии с сенсибилизатором на поверхности платы оседают коллоидные или малорастворимые соединения металла-катализатора.

При предварительной металлизации отверстий слой меди толщиной $h_{\text{пм}} = 5 \div 7$ мкм (рис. 3.3) осаждается на всех поверхностях заготовки. Однако этой толщины недостаточно для надежного электрического соединения слоев металлизированными отверстиями.

Химическое меднение требует тщательного соблюдения режимов и концентраций. Этот процесс обладает следующими недостатками: все растворы разового действия и имеют низкую плотность загрузки; растворы очень нестабильны и требуют тщательной отработки процесса. Химически осажденная медь обладает очень низким качеством. Её удельное сопротивление значительно превышает сопротивление чистой меди.

Гальваническое осаждение меди производят для получения основного слоя металла-проводника. Осаждение меди на плату про-

исходит в ванне с электролитом под действием электрического тока. При этом плата с нанесенным слоем химической меди является катодом, а анодом – массивная медная пластина. Гальваническое меднение печатных плат предназначено обеспечивать толщину слоя меди в отверстиях не менее 25 мкм, равномерный по толщине слой меди на поверхности платы. Для этого необходима высокая рассеивающая способность электролита, прочное сцепление гальванической меди с фольгой и химической медью. Скорость наращивания меди значительно выше, чем при химическом меднении, и составляет порядка 13 мкм/ч.

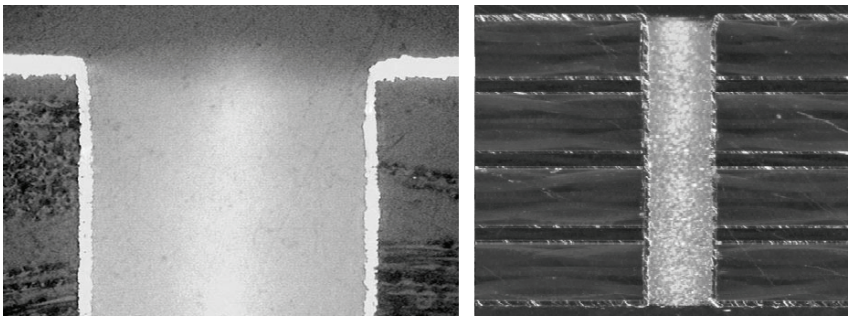


Рис. 3.3. Шлиф сквозного отверстия после операции предварительной металлизации

На рис. 3.4 приведен шлиф металлизированного отверстия после гальванического осаждения. Толщина слоя меди составляет порядка 25–30 мкм в отверстии и 40–50 мкм на поверхности платы.

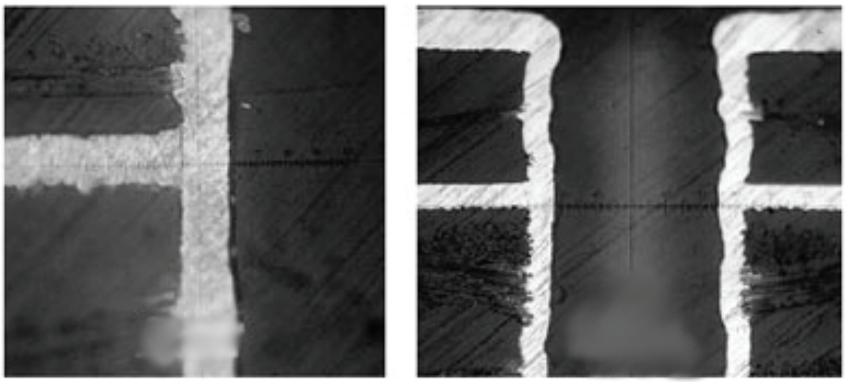


Рис. 3.4. Шлиф сквозного отверстия после операции гальванического осаждения меди

Для защиты поверхности токопроводящих участков при травлении меди с пробельных мест, а также для обеспечения условий пайки выводов ИЭТ печатный монтаж покрывают металлорезистом Sn–Pb (15–20 мкм). Металлорезист, содержащий Sn 50–65% и Pb 50–35%, осаждается в фторборатном электролите. Для получения покрытия Sn–Pb, соответствующего сплаву ПОС-61 (температура плавления сплава должна быть 210°С, чтобы не повредить плату), необходимо поддерживать в электролите отношение $\mathrm{Sn}:\mathrm{Pb}=(2{,}0\div 2{,}5):1$. На поверхности металлорезиста Sn–Pb не должно быть сульфатов и окислов. Для их удаления применяют осветление в растворе, содержащем HCl (17 г/л), $SnCl_2$ (20 г/л). После осаждения металлорезист оплавляют. «Глухие», или «слепые», отверстия (рис. 3.5) соединяют наружный слой с одним или несколькими внутренними.

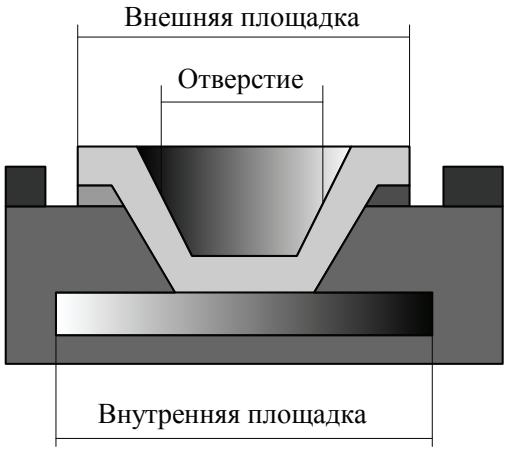


Рис. 3.5. Структура «глухого» микроотверстия

Обычно такой тип отверстий применяется в печатных платах 5-го и более классов точности с большой плотностью проводящего рисунка. Чаще всего это могут быть портативные приборы либо приборы с микросхемами в корпусах *BGA* с мелким шагом выводов. Существует несколько способов получения данного типа отверстий. Рассмотрим некоторые из них.

Химическое травление. Использование полиимидных пленок для наращивания слоев МПП позволяет вытравливать в них глухие отверстия в крепких горячих щелочах. Для этого первоначально

в соответствующих местах вытравливаются окна в фольге, которая в данном случае играет роль маски. Этот групповой метод оформления отверстий, естественно, обладает высокой производительностью. Но отсутствие соответствующих установок со струйной обработкой горячими щелочами вынуждает использовать погружное травление, что влечет за собой нежелательное подтравливание диэлектрика под фольгой. Тем не менее при отсутствии соответствующего оснащения травление отверстий остается одним из наиболее популярных способов выполнения «глухих» отверстий.

Лазерное сверление. Предлагается ряд совершенно новых решений для микросверления, основанного на использовании мощных лазеров. Лазерные системы позволяют сверлить сотни отверстий в секунду диаметром от 0,05 до 0,2 мм. Активная среда Cu–Br-лазера, излучающего на длинах волн 511 и 578 нм, или Nd:YAG-лазера с длиной волны на третьей гармонике 355 нм специально выбрана для хорошего поглощения энергии излучения медью в ультрафиолетовой области спектра (рис. 3.7). Необходимость использования таких систем обосновывается большим количеством микроотверстий в платах с высокой плотностью межсоединений (*MLB–HDI*). Плотность размещения таких отверстий в *MLB–HDI*-платах достигает 10 тыс./дм^2. Для сверления комбинации фольги и диэлектрика приходится варьировать мощностью лазера так, что сверление фольги производится при плотности энергии 4 Дж/см^2, диэлектрической подложки – 0,1 Дж/см^2 (рис. 3.6).

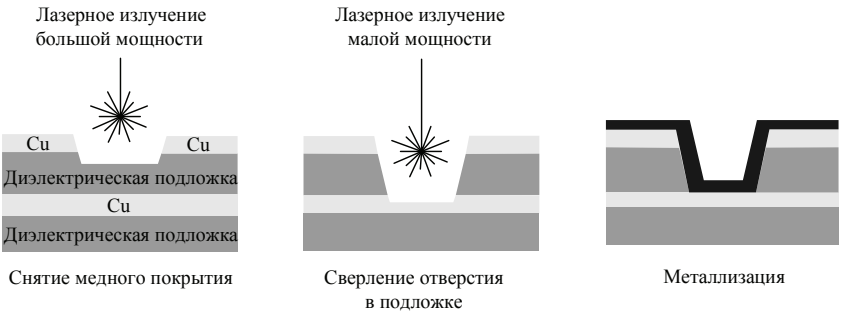
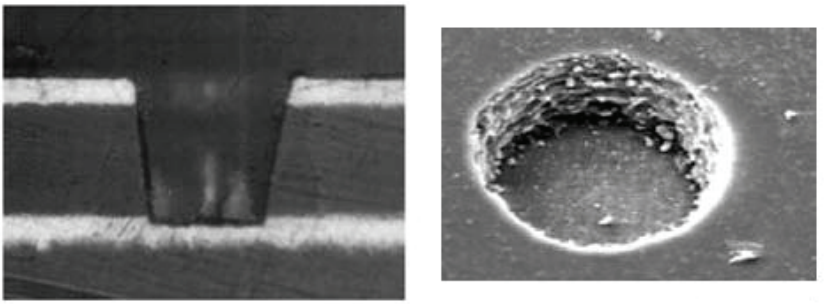


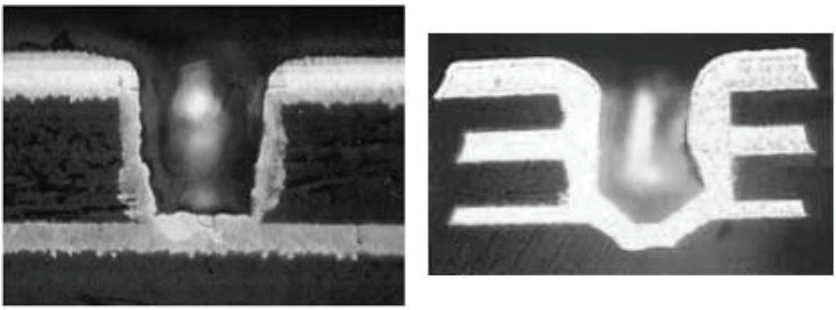
Рис. 3.6. Последовательность операций лазерного сверления «глухих» отверстий

При достаточно малых диаметрах «глухих» отверстий и в случаях, если они используются для межсоединений слоев МПП, ис-

пользуется полная металлизация, т. е. отверстие полностью заполняется медью. Также это позволяет в 2 раза увеличить плотность межсоединений, так как в этом случае их можно располагать друг над другом, а не со сдвигом в сторону на один шаг, как если бы «глухие» отверстия не были заполнены металлом.



а



б

Рис. 3.7. Микрошлифы «глухих» отверстий:
а – после лазерного сверления; *б* – после металлизации

Контрольные вопросы

1. Назовите основные этапы металлизации отверстий. Коротко опишите каждый из них.
2. Для чего используются «глухие» переходные отверстия?
3. Какие существуют методы получения «глухих» отверстий?
4. Назовите основные дефекты при металлизации отверстий и с чем они связаны.

3.3. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3. ИЗУЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ И ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА ПП

Цель работы: ознакомление с промышленным оборудованием для производства печатных плат.

В данной работе рассматриваются основные технологические этапы и оборудование для производства печатных плат комбинированным позитивным методом (рис. 3.8).

Примечание. Лабораторная работа проводится на действующем производстве (перед выполнением лабораторной работы изучить сайты и видеофильмы о базовых предприятиях: ОАО «НИЦЭВТ», Московский центр *SPARC*-технологий, концерн «Алмаз–Антей», ООО «МНПО «Спектр», ОАО «Связьинжиниринг» (м. Каширская), ОАО «Альтоника» (г. Зеленоград), конструкторское бюро «Корунд-М» и др.).

Рассмотрим каждый из этапов более подробно.

Получение заготовки. Исходным материалом для печатной платы является лист фольгированного с двух сторон диэлектрика (обычно стеклотекстолита). Основной метод получения заготовок ДПП – резка листа на гильотинных или дисковых ножницах с раскроем на полосы, а полос – на заготовки. Размеры заготовки определяются её типом: одинарная (для изготовления одной ДПП) или групповая (для изготовления нескольких ДПП); шириной технологического поля (20–30 мм) по периметру и между отдельными платами групповой заготовки (5–10 мм) и принятым на предприятии оптимальным соотношением длины и ширины заготовки. Позиционирование листа стеклотекстолита при резке осуществляется при помощи направляющих. Сам станок располагается на массивной станине для минимизации вибраций и большей устойчивости.

Сверление переходных и монтажных отверстий. В наружном технологическом поле заготовки сверлят два базовых отверстия. Базовые отверстия получают на специальном станке, собрав несколько заготовок (обычно от 2 до 6) в пакет, затем сверлят и, не меняя установа пакета, штифтуют. Штифты служат для базирования пакета заготовок на столе сверлильного станка с числовым программным управлением. Для сверления применяют специальные одно-, двух- и четырехшпиндельные станки с точностью позиционирования в пределах $\pm(0{,}001–0{,}005)$ мм. Сверление проис-

ходит по заранее заданной программе. При необходимости в процессе работы станка автоматически меняются сверла из специального магазина.

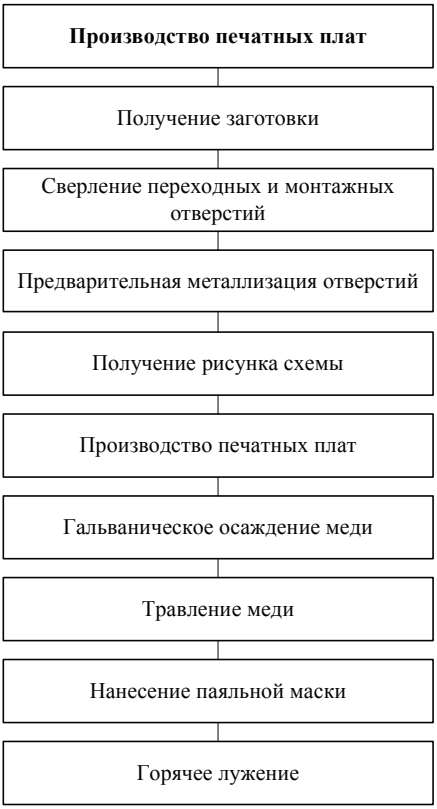


Рис. 3.8. Основные этапы при производстве печатных плат комбинированным позитивным методом

Предварительная металлизация отверстий. Стенки просверленных отверстий имеют дефекты в виде наволакивания смолы, неравномерного микрорельефа и заусенцев, которые должны быть устранены перед металлизацией. Для этого применяют: механическую обработку абразивной суспензией, химическую обработку растворами на основе соляной и серной кислот, комбинированную химико-механическую обработку, плазмохимическое травление. Типовой ТП предварительной металлизации диэлектрика предусматривает сенсибилизацию (адсорбция олова Sn^{2+}), активацию

(образование сверхтонкого слоя палладия Pd), химическое меднение ($h_{\text{хм}} = 1 \div 2$ мкм) и гальваническое меднение ($h_{\text{пм}}$ до 5–7 мкм).

В настоящее время все чаще используется метод прямой металлизации диэлектрика на основе катализатора из трех металлов (Pd, Sn, Me). На стенках отверстий образуется металлическая пленка (Pd, Sn, Me) толщиной 60–80 Å с хорошей адгезией и высокой проводимостью. Прямая металлизация завершается гальванической затяжкой медью до $h_{\text{пм}} = 5 \div 7$ мкм. ТП предварительной металлизации отверстий организуется на модульной линии автооператорного типа с автоматическим переносом заготовки в вертикальные ванны в соответствии с последовательностью операций ТП. Следует отметить, что одновременно медь осаждается и на фольгированные поверхности заготовок. Линия состоит из нескольких расположенных друг за другом ванн с растворами, используемыми для предварительной металлизации. Автооператор помещает прикрепленную к нему заготовку в каждую из ванн и выдерживает её в течение определенного времени. Данные операции производятся под управлением программы.

Получение рисунка схемы. Изображение схемы получают с помощью сухого пленочного фоторезиста путем экспонирования его с инструмента – позитивного фотошаблона на заготовку и проявления. Экспонированные и проявленные участки фоторезиста прочно удерживаются на пробельных местах заготовки, оставляя открытыми все зоны будущего проводящего рисунка.

СПФ представляет собой трехслойную структуру (лавсановая основа – СПФ – полиэтиленовая защитная пленка) и наносится с двух сторон на заготовку с помощью валкового ламинатора (рис. 3.9). Адгезия обеспечивается предварительной химико-механической обработкой заготовки, подогревом (5 минут, 100°С) в термошкафу, ламинированием (скорость 1,2–1,8 м/мин) с прижимом валков, нагретых до 115–120°С, и термостабилизацией ламинированной заготовки (20°С, 20 мин).

Заготовки (2–4 шт.), ламинированные СПФ, размещают на столе установки экспонирования, совмещая каждую с фотошаблоном с помощью кнопок и базовых отверстий, полученных в технологическом поле перед операцией сверления монтажных отверстий.

Использование базовых отверстий на операциях сверления и экспонирования рисунка позволяет с достаточной точностью обеспечить совмещение центров контактных площадок с центрами монтажных и переходных отверстий ДПП.

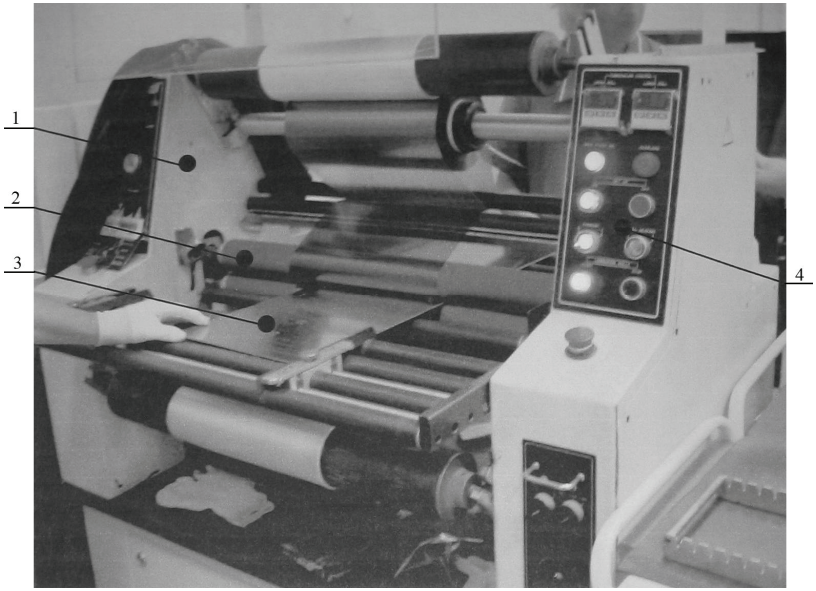


Рис. 3.9. Валковый ламинатор:
1 – станина; *2* – валики ламинирования;
3 – заготовка; *4* – пульт управления

Для проявления рисунка схемы применяют механизированную модульную линию конвейерного типа (рис. 3.21), в которой загружаемые вручную заготовки проходят модули проявления (струйная подача проявителя Na_2CO_3), промывки и сушки. Качество проявленного рисунка контролируют визуально или при небольшом увеличении.

Гальваническое осаждение меди (Cu) в отверстиях и одновременно в остальных зонах проводящего рисунка (пробельные места закрыты фоторезистивной маской) выполняют на программируемой линии предварительного меднения. Осаждение меди происходит в специальных растворах (электролитах). На этой же линии гальванически осаждают на проводящий рисунок олово (5–10 мкм) – металлорезист. Контроль качества рисунка – визуальный.

Травление меди с пробельных мест (рис. 3.10) осуществляется после удаления заготовки фоторезистивной маски на модульной линии конвейерного типа с ручной загрузкой.

Роликовый конвейер перемещает заготовки через модули травления ($CuCl_2$), кислой промывки (HCl), каскадной промывки

водой, модуль визуального промежуточного наблюдения, модуль снятия металлорезиста (травление олова с проводящего рисунка) и сушки.

Химические растворы и вода подаются в рабочие зоны модулей распылением под давлением с воздействием на обе стороны заготовок ДПП. Операция завершается визуальным или оптическим контролем состояния проводящего рисунка.

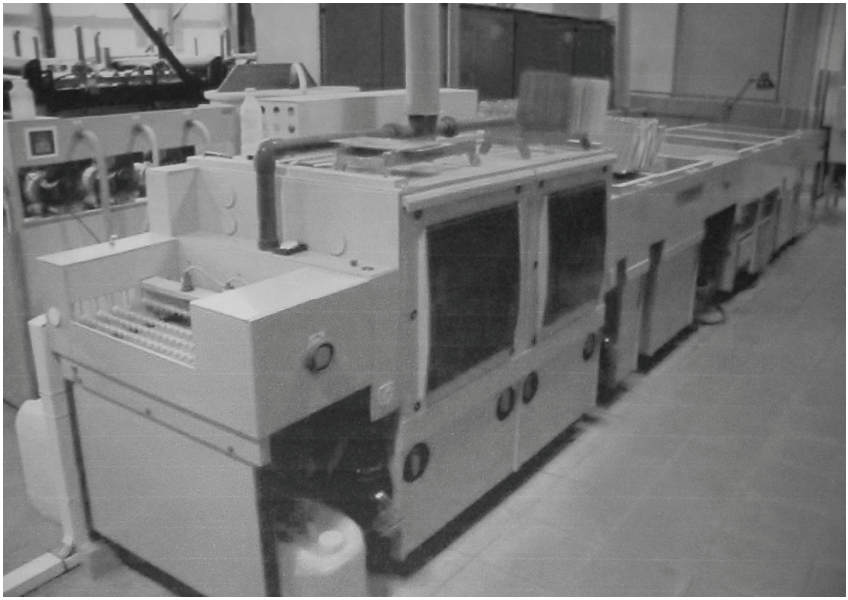


Рис. 3.10. Линия струйного травления

Нанесение паяльной маски. Паяльная маска защищает полученный проводящий рисунок ДПП от внешних воздействий, оставляя открытыми места пайки навесных элементов, т. е. зоны контактных соединений с печатным монтажом. Применяют сухие и жидкие паяльные маски, последние обладают более высокой разрешающей способностью.

ЖПМ наносят на заготовку ДПП сеткографическим способом (рис. 3.11), высушивают ($T = 85$°C), экспонируют и проявляют. Окончательные защитные свойства ЖПМ приобретают в сушильном шкафу при $T = 150$°C ($t = 60$ мин).

Геометрию рисунка паяльной маски контролируют визуально при соответствующем увеличении. Дефекты при нанесении паяль-

ной маски могут привести к плохой паяемости платы или отсутствию контакта с навесными элементами.

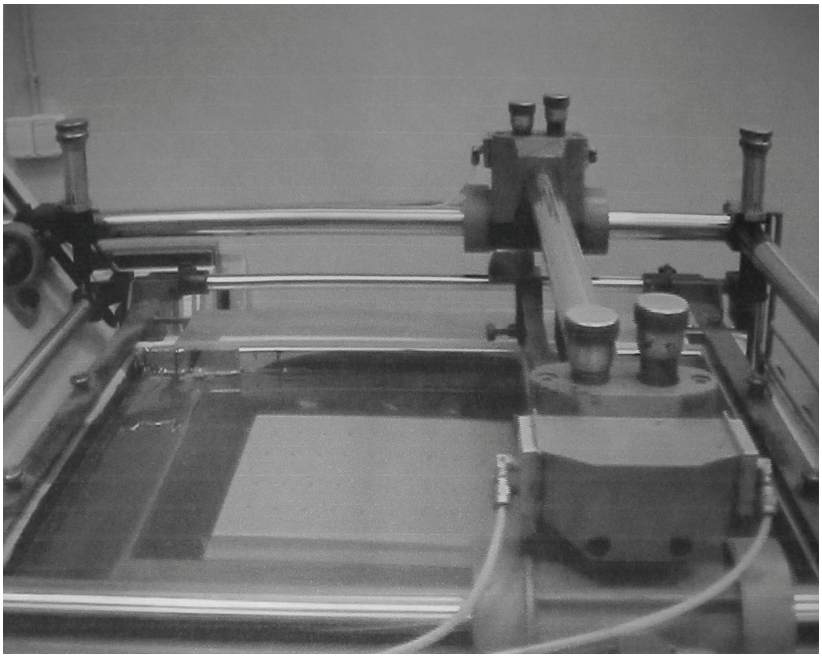


Рис. 3.11. Сеткографическая установка нанесения жидкой паяльной маски. Стадия продавливания состава ЖПМ

Горячее лужение осуществляют на специальной установке путем погружения и выдержки (около 6 с) заготовки в вертикальном положении в расплавленном припое (Sn – 63%, Pb – 37%), находящемся при температуре около 235°С. Сбрасывание излишков припоя и выравнивание толщины слоя лужения до 5–8 мкм осуществляется ножами-форсунками, подающими горячий (200°С) сжатый воздух с двух сторон извлекаемой из ванны заготовки.

Непосредственно перед горячим лужением на заготовку наносят водорастворимый флюс, а после лужения остатки его удаляют на установке отмывки конвейерного типа.

Изготовленные печатные платы подвергают выборочному (при больших объемах партии) или сплошному (мелкосерийное или опытное производство) выходному контролю. Существует два основных вида контроля – оптический и электрический. Рассмотрим каждый из них подробнее.

1. **Оптический контроль качества** проводящего рисунка ДПП позволяет выявить видимые дефекты (проколы, царапины, выступы на проводниках; неточности в размещении контактных площадок и проводников; неточность размеров контактных площадок и проводников; подтравливание, дефекты металлизации и др.) печатной схемы. При двухкоординатном передвижении оператором стола с закрепленной заготовкой оптическая система установки контроля (рис. 3.12) регистрирует контролируемые участки платы, увеличивает их и сравнивает с данными бездефектного изображения ДПП.

Обнаруженные дефекты запоминаются, а по окончании контроля выводятся в виде изображений на мониторе, предоставляя оператору информацию для принятия решений. Некоторые дефекты оператор может немедленно удалить вручную.

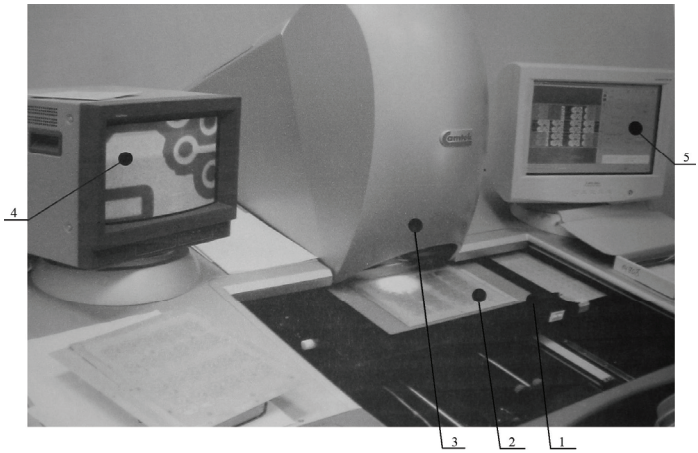


Рис. 3.12. Установка оптического контроля:
1 – двухкоординатный стол; *2* – контролируемая заготовка ПП;
3 – оптическая система; *4* – монитор увеличенных изображений дефектов;
5 – монитор управления операцией контроля

Автоматический электроконтроль позволяет выявить короткие замыкания и разрыва в проводящем рисунке ДПП. Четыре специальных щупа установки со скоростью 800 точек в минуту по программе тестирования обходят все электрические цепи платы. При этом контролируемый в данный момент участок отображается на экране монитора, а обнаруженные несоответствия с предварительно проконтролированной тест-платой вносятся в специальный чек со штрих-кодом. Считывая штрих-код, легко определить место разрыва или короткого замыкания.

Контрольные вопросы

1. Каким образом получают заготовки печатных плат при производстве?
2. Для чего нужны базовые отверстия в технологическом поле?
3. Для чего используется сухой пленочный фоторезист и как его наносят?
4. Каким образом происходит гальваническое осаждение меди?
5. Какие существуют виды паяльных масок?
6. Как происходит снятие излишков припоя с печатной платы после горячего лужения?
7. В чем отличия оптического и электрического контроля?

3.4. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4. ИЗУЧЕНИЕ ОПЕРАЦИЙ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА КМП

Цель работы: изучить конструкционные особенности, основы программирования установок поверхностного монтажа элементов, а также основные факторы, влияющие на их производительность.

Введение. Установка автоматического поверхностного монтажа является сложным аппаратно-программным комплексом, имеющим в своем составе различные конструктивные элементы (рис. 3.13). Несмотря на все многообразие фирм-производителей и моделей установок автоматического поверхностного монтажа, все они состоят из типовых конструктивных элементов, отличающихся лишь различной функциональностью и спецификой исполнения.

Типовая установка автоматического поверхностного монтажа (рис. 3.14) в своей основе имеет массивную несущую конструкцию, на которую монтируется система приводов, приводящих в движение блок установочных головок (автооператор), к которым подведен вакуум от вакуумной системы. Печатная плата находится в зоне монтажа, и на нее монтируются компоненты из различных источников: матричных поддонов, кассет с лентами и труб-склиз, – для которых предназначены различные насадки из магазина. Подробнее о конструктивных составляющих вы ознакомитесь в соответствующих разделах методического пособия.

Существуют также компактные установки поверхностного монтажа, которые могут быть размещены не на полу производст-

венного помещения, а на столах или любых других горизонтальных поверхностях. В этом случае в основании располагаются массивные металлические пластины, задача которых – снизить вибрации, передающиеся как от другого оборудования, так и от работы собственных двигателей.

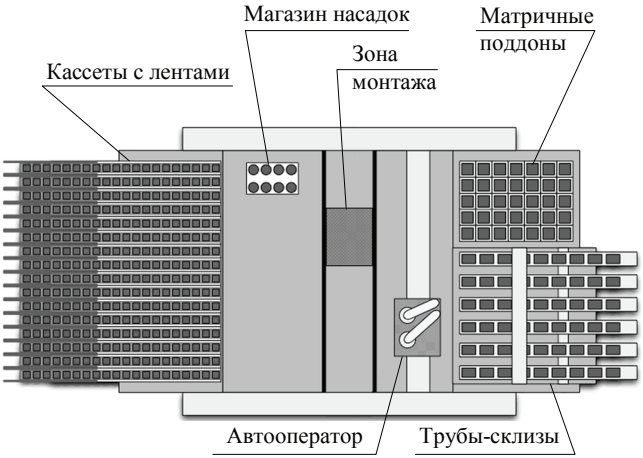


Рис. 3.13. Эскиз структуры установки автоматического поверхностного монтажа

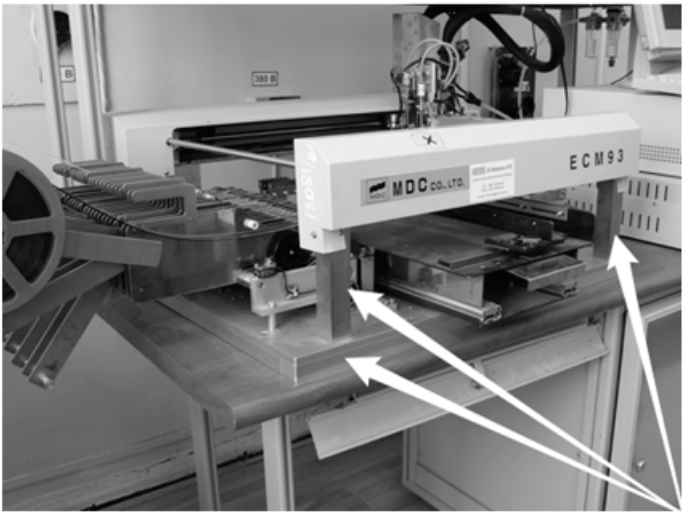


Рис. 3.14. Установка поверхностного монтажа (стрелками отмечены элементы несущей конструкции)

Система приводов. В системе приводов используются реверсируемые шаговые двигатели с малыми значениями угловой и люфтовой погрешности, также используются муфты для соединения выходного вала двигателя с ходовым винтом для полного исключения люфтов. Для обеспечения линейного перемещения используется передача «винт–гайка» с большим передаточным отношением. На поперечной перекладине расположен двигатель, осуществляющий перемещение блока установочных головок в поперечном направлении.

Диапазон перемещений системы приводов обеспечивает вывод блока установочных головок не только в зону установки компонентов, но также в зону отбраковки, зону питателей, зону смены насадок и зону стоянки блока головок, когда установка выключена.

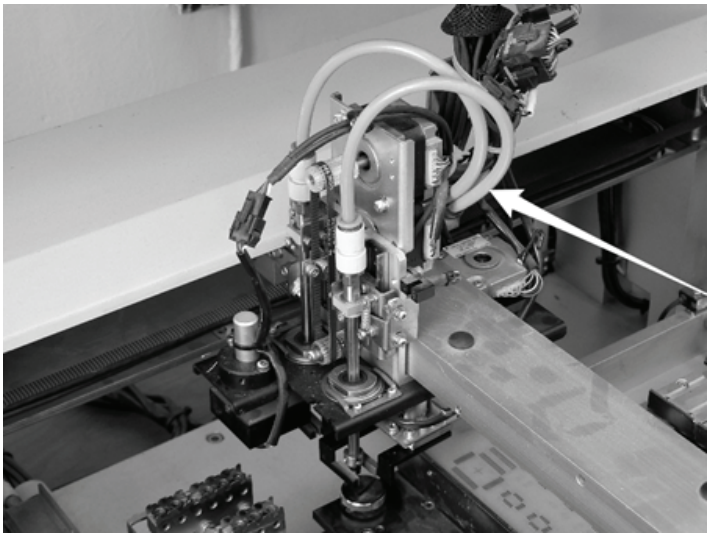


Рис. 3.15. Элементы вакуумной системы (стрелкой показаны трубки подвода вакуума к установочным головкам)

Вакуумная система. Вакуумная система используется для осуществления захвата компонентов и вывода их на место установки (рис. 3.15). Выбор в пользу вакуумной системы захвата перед механической системой заключается в критичном отношении механической системы к линейным размерам захватываемых компонентов – весьма затруднительно спроектировать захват, способный работать с компонентами, наибольший линейный размер которых менее одного миллиметра.

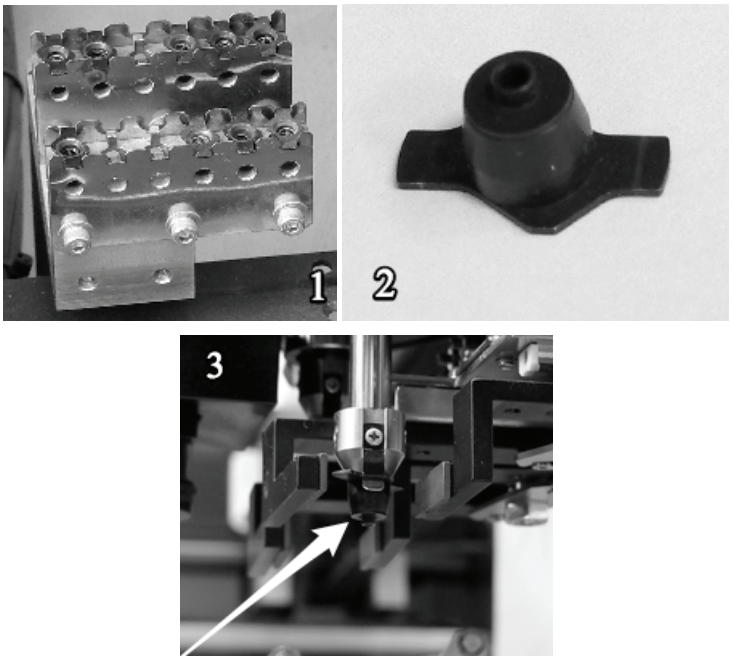


Рис. 3.16. Сменные насадки:
1 – магазин сменных насадок; *2* – сменная насадка; *3* – установочная головка с установленной насадкой (стрелкой показана сменная насадка)

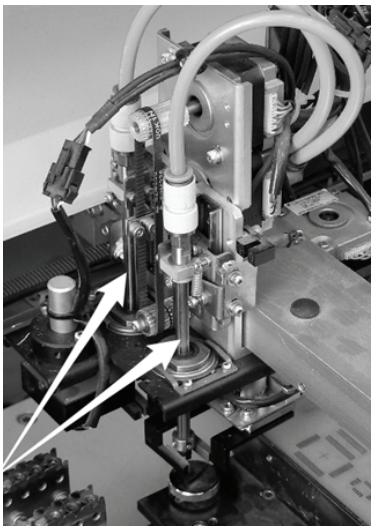


Рис. 3.17. Блок установочных головок

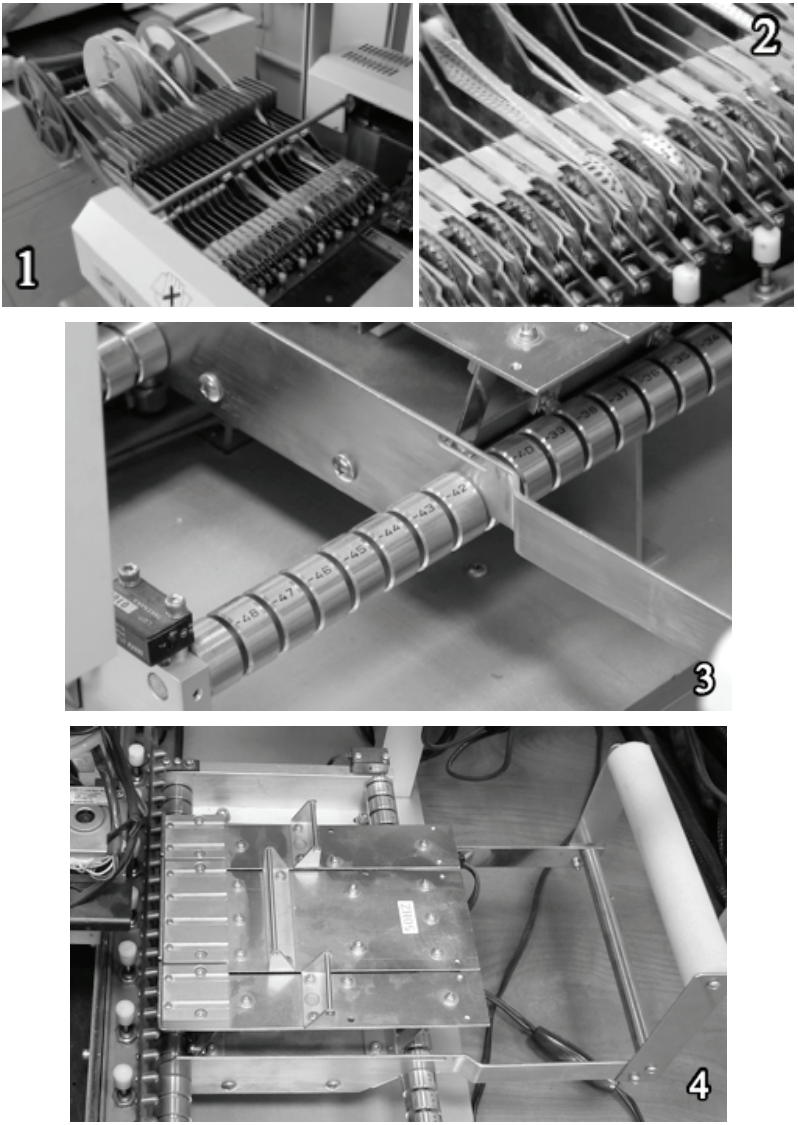


Рис. 3.18. Питатели:
1, *2* – общий вид на блок питателей; *3* – пазы для установки питателей с нумерацией, *4* – вибростол

Блок установочных головок. Главный инструмент для установки компонентов обладает набором установочных головок, что позволяет устанавливать несколько компонентов за один проход

без обращения к секции питателей; есть возможность «горячей» замены насадок из магазина – до 12 запасных насадок под разные типы корпусов и линейные размеры компонентов (рис. 3.16, 3.17).

Блок установочных головок выполняет наведение на компонент в блоке питателей, захват компонента, проверку положения и угла доворота при установке, выход на позицию установки, непосредственно установку; также возможны операции выхода в зону отбраковки и сброс всех компонентов.

Доворот компонентов осуществляется одним двигателем посредством ременной передачи, охватывающей сразу все насадки: сначала поворачивается первый устанавливаемый компонент и производится его установка на плату, затем блок выходит на позицию установки второго компонента и поворачивает его, и т. д. В процессе работы установка автоматически производит профилактическую продувку насадок от различных загрязнений (капли припойной пасты, пыль).

Устройства подачи компонентов (питатели). Для подачи компонентов используются специальные механические устройства – питатели. Питатель имеет крепление для установки бобин с компонентами, механизмом пошаговой подачи компонентов в зону забора с автоматическим снятием защитной пленки с ленты (рис. 3.18).

Типовой автомат оперирует несколькими десятками питателей непосредственно, причем не обязательно, чтобы каждый питатель содержал уникальные компоненты: для уменьшения количества смен питателей в автомат устанавливаются дублирующие питатели.

Контрольные вопросы

1. Перечислите основные конструктивные элементы установки поверхностного монтажа и дайте их краткую характеристику.
2. Почему компрессорный агрегат не является составной частью установки?
3. Исходя из каких соображений выбирается насадка для установочной головки?
4. Перечислите основные этапы монтажа печатной платы.

! Вариативная часть лабораторного практикума включает лабораторные работы №№ 5–8, которые выполняются по отдельным методикам, исходя из профиля комплексного задания.

3.5. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5. РАЗРАБОТКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ СХЕМЫ ЭМ С ПОМОЩЬЮ СТАНДАРТНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА

Цель работы: получить навыки вычерчивания принципиальной схемы.

Задачи работы:

- изучить правила и методику вычерчивания условно-графических обозначений (УГО) компонентов;
- вычертить компонент и внести его в библиотеку;
- присвоить каждому компоненту позиционное обозначение, номинал и тип посадочного места;
- начертить принципиальную схему.

3.6. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6. РАЗВОДКА ПРОВОДЯЩЕГО РИСУНКА ПП НА БАЗЕ СТАНДАРТНОГО ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОГО ПАКЕТА

Цель работы: получить навыки разводки заданной схемы на заданной площади и выполнить трассировку проводящего рисунка.

Задачи работы:

- изучить правила и методику вычерчивания УГО компонентов и посадочных мест;
- распределить УГО компонентов и посадочные места в зоне монтажного поля ПП;
- создать проводники на слоях ПП, переходные отверстия и вычертить проводящий рисунок ПП;
- полученную разводку ПП скорректировать вручную.

3.7. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7. АДАПТАЦИЯ ЭЛЕКТРОННОГО ПРОЕКТА ЭМ К УСЛОВИЯМ ПРОИЗВОДСТВА НА БАЗЕ СТАНДАРТНОГО МАШИННОГО ПАКЕТА

Цель работы: изучить машинный пакет и адаптировать проект ЭМ к производству.

Задачи работы:

- провести корректировку узких мест проводящего рисунка ПП при заданной площади и классе точности;
- разработать групповой фотошаблон для экспонирования рисунков слоев, паяльной маски, маркировки шелкографией и изготовления трафарета для нанесения паяльной пасты.

3.8. ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МАШИННОГО ПАКЕТА ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Цель работы: разработка программ для оборудования с ЧПУ.

Задачи работы:

- изучить методику разработки программ для технологического оборудования с ЧПУ для производства ПП;
- разработать программы для сверления отверстий в заготовках ПП; фрезерования контура ПП, скрайбирования прямолинейных участков контура ПП; электрического контроля проводящего рисунка;
- графически проверить траектории перемещения инструментов оборудования с ЧПУ.

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

4.1. ЗАДАНИЕ НА КУРСОВУЮ РАБОТУ

Темы для выполнения курсовой работы (КР) выдают после VI семестра в период прохождения первой части распределенной конструкторско-технологической практики (первая часть – 4 недели непрерывно летом, вторая часть – один день в неделю в течение VII–VIII семестров).

Объектами проектирования являются модули и блоки ЭС опытной или макетной разработки. В качестве темы могут быть взяты ЭМ собственной разработки студента. Для отработки практической части студент имеет возможность использовать ресурсы центра цифрового проектирования (*FAB-LAB*) или ресурсы макетного производства по месту прохождения практики.

Задание на КР является комплексным и предусматривает:

- конструкторско-технологический анализ ЭМ;
- проектирование маршрутного и операционного ТП сборки ЭМ;
- анализ влияния различных факторов на качество параметров деталей или сборочной единицы;
- проектирование операционного ТП с подробной разработкой отдельных операций с обоснованием выбора оборудования и расчетом технологической себестоимости;
- системный анализ и оптимизацию ТП;
- проектирование технологической оснастки.

Результаты КР являются основой для выполнения технологической части квалификационной работы бакалавра.

КР по объему включает: 2 листа чертежей формата А1 (1-й лист – основные операционные эскизы ТП, схема сборки ЭМ; 2-й лист – сборочные чертежи технологической оснастки, 3D-модель оснастки) и 30–40 страниц пояснительной записки формата А4 (шрифт *Times New Roman*, размер 14 пт., одинарный интервал).

Начало – 2-я неделя VII семестра.

Защита КП проводится на 14-й неделе VII семестра.

Студент должен выполнить следующие объемы работ:

- 25% (5–7-я недели) – проектирование маршрутного ТП для заданного объема выпуска ЭМ; выбор оборудования;
- 50% (8–10-я недели) – проектирование операционного ТП с разработкой схем базирования, выбором инструментов, расчетом режимов обработки, расчетом переходов и выбором структур операций;
- 75% (11–12-я недели) – проектирование технологической оснастки (сборочные чертежи);
- 100% (12–14-я недели) – разработка основных операционных эскизов, расчет технологической себестоимости, оформление КР.

Типовое содержание курсовой работы приведено в табл. 4.1, оно конкретизируется руководителем и утверждается в задании и календарном плане.

Таблица 4.1

Типовое содержание курсовой работы

Стр.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ

ВВЕДЕНИЕ

1 ОБЩЕТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ <наименование>

1.1 Анализ задания на проектирование <наименование>

1.2 Анализ результатов схемотехнического проектирования <наименование>

1.2.1 Анализ электрической функциональной и/или структурной схемы <наименование>

1.2.2 Анализ элементной базы <наименование>

1.2.3 Анализ принципа работы <наименование>

1.3 Анализ конструкции модуля <наименование>
1.3.1 Анализ компоновки <наименование>
1.3.2 Анализ и обоснование конструкционных материалов и покрытий
1.3.3 Анализ условий эксплуатации <наименование>
1.4 Постановка задачи технологического проектирования <наименование>
Выводы

2 ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ <наименование>
2.1 Конструкторско-технологический анализ <наименование>
2.1.1 Определение типа производства <наименование>
2.1.2 Анализ технологичности средства с учетом типа производства
2.1.3 Расчет конструкторско-технологических параметров печатного монтажа с проверкой по постоянному и переменному току
2.1.4 Рекомендации к разработке технологического процесса производства <наименование>
2.2 Разработка технологического процесса <наименование>
2.2.1 Анализ типовых технологических процессов <наименование>
2.2.2 Разработка технологического процесса сборки <наименование>
2.2.3 Технологические расчеты по обоснованию разрабатываемого технологического процесса <наименование>
Выводы

3 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ <наименование>
3.1 Анализ существующей технологической оснастки и рекомендации по применению стандартного технологического оснащения <наименование>
3.2 Разработка недостающего технологического оснащения <наименование>
3.3 Конструкторско-технологический расчет технологического оснащения <наименование>
3.4 Анализ пространственной модели оснастки <наименование>
Выводы

4 ИССЛЕДОВАНИЯ РЕЖИМОВ (ХАРАКТЕРИСТИК) <наименование>
4.1 Структура и состав экспериментального стенда <наименование>
4.1.1 Анализ существующих средств контроля (настройки, испытаний)

4.1.2 Разработка электрической схемы средства контроля (настройки)
4.1.3 Разработка конструкции средства контроля (настройки, испытания)
4.2 Разработка программы испытаний и экспериментальных исследований <наименование>
4.3 Разработка методик испытаний и экспериментальных исследований <наименование>
4.4 Оценка результатов испытаний и экспериментальных исследований <наименование>
Выводы

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

4.2. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

4.2.1. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РАЗРАБОТКЕ ВВЕДЕНИЯ

Актуальность (от позднелат. *actualis* – фактически существующий, настоящий, современный) – важность, значительность чего-либо для настоящего момента, современность, злободневность.

В данной части введения приводится обоснование актуальности темы, по которой проводится исследование [9, 15]. Оно характеризует её востребованность и важность для решения определенной проблемы (задачи, вопроса).

Вначале формулируется объект исследования и предмет исследования.

Объектом исследований данной работы является системная плата ультразвукового тестера УК1401 (производство фирмы «Акустические контрольные системы»). Назначение данного прибора – измерение скорости и времени распространения продольных ультразвуковых волн в некоторых материалах с целью выявления несоответствия структуры материала образцу (ввиду наличия пористостей, полостей, трещин и других неоднородностей).

Исходными данными для организации производственного техпроцесса являются трассировка системной платы, перечень элементов, используемых для монтажа, а также объем выпуска $N = 1000$ шт./год.

Далее проводится краткий обзор аналогичных работ, необходимо рассмотреть, что уже реализовано, а что нет, какие стоят проблемы в настоящее время, по какой причине темы данных исследований назрели именно сейчас, в данный момент, почему они не были раскрыты ранее, что этому препятствовало. Также необходимо выявить, насколько выбор данной темы обусловлен развитием науки, накоплением новых методов исследования и сведений, недостатками в уже осуществленных исследованиях, использованием новых методов исследования, необходимостью проведения исследования в новых экономических условиях и т. д.

Так как согласно стандартам ссылки на литературу [9] должны указываться первый раз последовательно [10, 16, 20], то рекомендуется именно во введении сделать последовательный краткий обзор всей литературы из списка использованных источников. Это позволит в дальнейшем в основной части работы не следить за порядком списка цитирования. Список литературы должен включать работы авторов из разных стран, как классические, так и современные работы. Уровень самоцитирования не должен превышать 20%.

На страницах 1–2 должны быть представлены Фамилия И.О. (страна, место работы) основных ученых, чьи работы внесли значительный вклад в исследуемую предметную область с краткой характеристикой полученных ими результатов.

При упоминании компаний первый раз необходимо давать в круглых скобках название их сайта (*www.google.com*). При упоминании программного обеспечения должны быть указаны в круглых скобках версия используемого ПО, год выпуска, параметры лицензии.

В актуальности вводятся также основные понятия и термины предметной области в их общепринятой классической трактовке. Не рекомендуется использовать во введении графические иллюстрации и таблицы, это приведет к необходимости их дальнейшей сквозной нумерации по всей работе. В больших по объему работах стандартами предусматривается возможность вложенной нумерации X.Y (X – номер главы, Y – номер объекта в главе), что значительно упрощает редактирование документа. При необходимости ссылок на графические материалы или таблицы во введении их рекомендуется включать в приложения к работе.

Объем обоснования актуальности темы доложен быть и не очень кратким, и не слишком развернутым (3–4 страницы). Актуальность исследования представляет собой основной вопрос, кото-

рый исследователь должен поставить себе еще до начала работы над проектом. Если тема исследования не актуальна, то выполнение работы не будет иметь никакого смысла и практического применения. Актуальность темы – это степень важности исследования в данной ситуации и в данный отрезок времени для решения определенных задач, вопросов и проблем.

По результатам обоснования актуальности рекомендуется дать описание карт противоречий предметной области и указать на пути их разрешения.

В завершении обоснования актуальности приводится четкая и краткая (в один абзац) формулировка постановки проблемы, на решение которой направлено исследование. Решение существующей проблемы должно связываться с теоретической и практической необходимостью, т. е. исследователь, обращаясь к определенной проблеме, должен иметь четкое представление о том, на какие теоретические и практические вопросы дадут ответы результаты его исследований. Кроме этого, исследование должно базироваться не только на классических работах, но и учитывать современный уровень научных знаний, а тема проекта должна иметь практическое значение для жизни государства, его социально-экономического развития (возможны ссылки на госпрограммы, ФЦП, доклады руководителей и т. п.).

После формулировки проблемы исследований определяется цель исследований.

Цель работы (один абзац – одна цель).

Постановка цели крайне важна, необходимо избегать формулировки цели слишком узко и неубедительно. В определении цели разработки должен быть раскрыт смысл всей работы, обозначен конкретный результат (задайте себе вопрос – а заплатят ли за такую работу, если ответите – нет, то еще раз подумайте о формулировке цели).

Нередко цель исследования представляется как обобщение практического опыта. Получается, что разработка как бы содержит функции практических работников, в то время как работа должна содержать обобщения, выводы, оценки, разработку теории вопроса на основе изучения и обобщения практического опыта.

Цель разработки должна быть одна. Нельзя представлять её во множественном числе. В таком случае речь идет уже не о цели, а о задачах исследования.

Следует подчеркнуть, что разработка должна подчинить всю работу цели, отразить то, что способствует раскрытию темы, при

подготовке любой части проекта постоянно иметь в виду цель всего проекта, отбрасывая то, что не связано с её достижением.

Для достижения поставленной цели в работе решен следующий **комплекс задач**.

При формулировании задач проекта необходимо четко представлять этапы и на каждый из них ставить четко сформулированную задачу. При формулировки задач используются обороты: «раскрыть сущность», «сформулировать и обосновать», «выявить факторы», «рассмотреть», «проанализировать», «изучить», «разработать», «определить место». В конце формулировки задач рекомендуется указать цель решения задачи. Кроме того, необходимо помнить, что сформулированные задачи определяют название и содержание основных глав и параграфов проекта (т. е. они должны коррелировать с содержанием). Решаемые задачи оформляются перечислением, каждая новая задача с новой строки после дефиса.

Методы исследований. В этом разделе характеризуется в нескольких предложениях теоретическая и методологическая база проекта, в которой приводятся перечень рассматриваемых научных направлений, а также характеризуются используемые в проекте научные и проектные методы.

Указывается методологическая основа проекта, под которой понимается совокупность методов научного познания, используемых в работе для достижения цели. В тексте необходимо подробно обосновать каждый применяемый метод, что подтверждает способность к правильному выбору методов, что и определяет достоверность результатов исследования. Все методы, используемые в научном познании, можно разделить на общенаучные и специальные. К общенаучным относятся методы, используемые во всех областях науки, это обобщение, дедукция, абстрагирование, эксперимент и др.

Используемые источники. Если работа базируется на значительных ранее опубликованных результатах исследований авторского коллектива и других авторов, часть которых включена в материалы данных исследований как базовые, то в данном разделе приводится краткий обзор используемых источников и представленных в них результатов.

Научная новизна является основным признаком исследовательской работы. В проектных работах часто выделяют проектную новизну. Научная новизна может быть сформулирована в одном

предложении. К примеру, автор мог разработать методику, позволяющую решить проблему, не разрешимую ранее. В рамках проектных работ автор реализовал известных способ с помощью новых конструкторско-технологических решений и т. п. Научная новизна – это то, что позволяет автору сказать, что такого ранее не было. Простой констатации о новизне недостаточно, необходимо, чтобы в формулировке звучало: «отличающаяся тем, что…», «впервые получено…» или «доказано, что…», «проанализировано…, что позволяет в отличие от…» и т. д. Формулировка научной новизны должна быть увязана с темой проекта и включать в себя её часть. Компоненты новизны оформляются перечислением, каждый новый компонент идет с новой строки после дефиса.

Достоверность полученных результатов. В этом разделе из одного-двух предложений перечисляются конкретные результаты проекта (расчеты динамики, сравнения, оценки и т. д.), подтверждающие полученные в ходе проекта результаты. Крайне желательно приводить количественные оценки результатов. Если имеется экспериментальное подтверждение результатов, то указать, где и какие результаты получены в количественном представлении. В задании на курсовую работу указываются значения параметров и функционала, который требуется достигнуть в рамках проекта. В данном разделе должно быть показано, какие показатели достигнуты и с какими допущениями.

Научная значимость результатов проекта должна показать вклад автора в развитие научных представлений в той или иной области научных знаний, раскрывать сущность и механизмы развития процессов, служить базой для дальнейших научных исследований.

Положения, выносимые на защиту (для проектов, предполагающих защиту), являются подтвержденными составными частями научной гипотезы. Основные положения фактически являются научными результатами, полученными в ходе исследований, но имеющие отличия от ранее выполненных работ, т. е. имеющие научную новизну. Это могут быть: установленные закономерности, методики, позволяющие получить новые знания, способы и т. д. То есть научные положения в утвердительной форме подтверждают предвидение автора, его гипотезу по результатам выполненных исследований. Последнее научное положение или основной научный вывод по работе должен быть созвучен с темой исследований и подтверждать как актуальность, так и правильность постановки

цели и задач исследования. Положения формулируются в виде научных утверждений: «методика формализации процедур генерационного синтеза ЭС на основе фреймовых семантических сетей обеспечивает получение новых технических решений». Защищаемые положения оформляются перечислением, каждое новое положение указано с новой строки после дефиса.

Практическая значимость полученных результатов. В этом разделе приводятся сведения как о практических конкретных свойствах разработки (желательно давать количественные оценки), так и о фактическом использовании или возможности и месте использования результатов работы (желательно с указанием конкретных областей использования и организаций), причем в связи с тем, что разработка является новой как в научном, так и в прикладном аспекте, возможность её применения должна быть показана и в той и в иной областях.

Реализация результатов. Если имеется внедрение результатов, то указывается, какие конкретные результаты и где внедрены, что это дало, с количественными оценками результатов внедрения. Если результаты получены в рамках выполнения контрактов, НИОКР, то в данном разделе указываются соответствующие параметры договоров.

Апробация работы. В разделе указывается, на каких общественных научных и практических мероприятиях проходило обсуждение результатов исследований (публичные защиты, научные семинары, общественные слушания, выставки, симпозиумы, конференции, конгрессы и т. п.).

Публикации. В разделе указывается количество монографий, статей в научных журналах, сборниках научных трудов, опубликованных тезисах выступлений на конференциях.

Структура и объем работы. В разделе приводятся сведения о структуре работы (введение, количество глав, заключение, наличие приложений), а также объем работы, количество рисунков и таблиц, приложения с указанием их количества.

4.2.2. Рекомендации по разработке раздела «Технологическое проектирование»

Курсовая работа должна представлять собой технический проект, связанный с решением отдельных, частных задач, определяе-

мых особенностями подготовки по направлению 211 000 «Конструирование и технология электронных средств».

КР представляется на защиту в виде сброшюрованной рукописи. КР является самостоятельной и логически завершенной практической разработкой, связанной с решением задач прикладного характера, являющихся, как правило, частью научно-исследовательских работ и опытно-конструкторских работ, выполняемых выпускающей кафедрой или базовым предприятий.

В **основной части** расчетно-пояснительной записки (РПЗ) в главе 1 приводится **анализ объекта производства**:

«Ультразвуковой тестер УК1401 предназначен для измерений времени и скорости распространения продольных ультразвуковых волн в твердых материалах при поверхностном прозвучивании на фиксированной базе с целью определения прочности и целостности материалов и конструкций. Такие оценки основаны на корреляции скорости распространения ультразвуковых волн в материале с его физико-механическими характеристиками и физическим состоянием. Область применения представлена следующим списком:

- ♦ определение прочности бетона по скорости ультразвука согласно ГОСТ 17624-87 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности»;
- ♦ определение прочности бетона в эксплуатируемых сооружениях в сочетании с методом «отрыв со сколом»;
- ♦ оценка несущей способности бетонных опор и столбов из центрифугированного бетона через отношение скоростей распространения ультразвука в направлениях вдоль и поперек оси опоры;
- ♦ поиск приповерхностных дефектов в бетонных сооружениях по аномальному уменьшению скорости или увеличению времени распространения ультразвука в дефектном месте по сравнению с областями без дефектов;
- ♦ оценка пористости и трещиноватости горных пород, степени анизотропии и текстуры композитных материалов;
- ♦ оценка сходства или различия упругих свойств материалов или образцов одного материала друг от друга, а также возраста материала при условии изменения его свойств от времени».

После схемотехнического и конструкторского анализа объекта производства осуществляется трассировка печатной платы. Согласно трассировке плата четырехслойная, размеры дорожек, уз-

ких мест и контактных площадок соответствуют V классу точности. Поэтому изготовление рисунка ПП будет осуществляться методом комбинированного позитива. Структура слоев ПП представлена на рис. 4.1.

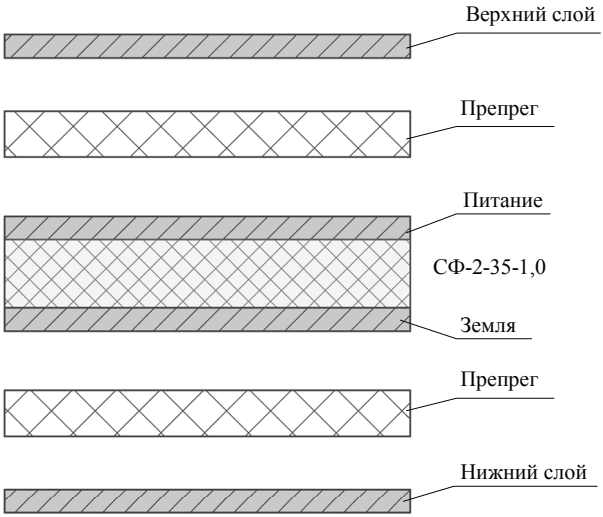


Рис. 4.1. Структура слоев МПП

Вначале изготовляется внутренний слой МПП, на котором размещены цепи земли и питания, методом комбинированного позитива. В качестве заготовки используется двусторонний фольгированный диэлектрик толщиной 1 мм (СФ-2-35-1,0). После формирования внутреннего слоя МПП производится создание внешнего слоя, отделенного от внутреннего препрегом: производится спекание с помощью препрега внутреннего слоя МПП с медной фольгой толщиной 18 мкм. Таким образом, получаем заготовку типа ДПП, для которой методом комбинированного позитива производим формирование рисунка внешних слоев. Толщина полученной четырехслойной ПП составит 1,5 мм. Далее производится нанесение паяльной маски, лужение контактных площадок и нанесение слоя шелкографии.

Для организации техпроцесса целесообразно использовать групповую заготовку. Требуемая ПП в количестве 6 плат умещается на стандартной области для групповых заготовок площадью 200×300 мм^2. Групповые шаблоны разводки всех слоев, паяльных масок и шелкографии представлены в приложении.

Предварительное описание техпроцесса. Исходными данными для организации производственного техпроцесса являются: трассировка системной платы, спроектированная в системе *P-CAD*; перечень элементов, используемых для монтажа, а также объем выпуска $N = 1000$ шт./год. Данный вид производства относится к мелкосерийному и будет реализован с применением ручной сборки, что предполагает наличие монтажной схемы и перечня элементов для монтажа (см. приложение).

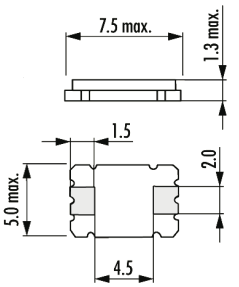
Для организации производства необходимо провести предварительный анализ состава компонентов монтажа, продумать маршрутный ТП, операционный ТП, составить схему сборки ячейки, а также провести анализ объема выпуска для определения числа рабочих мест, необходимых для обеспечения заданного объема выпуска. Помимо этого проведем расчет комплексного показателя технологичности для разработанного техпроцесса.

После проведенных анализов и расчетов выберем подходящее оборудование и оснастку, требуемые для мелкосерийного производства системных плат прибора.

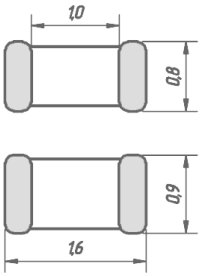
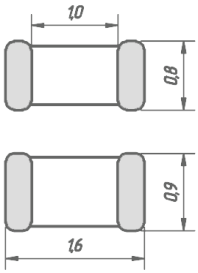
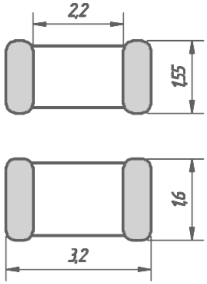
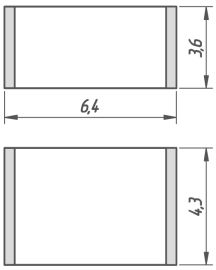
Анализ состава компонентов. Исходными данными для анализа состава компонентов является перечень элементов монтажа. Все компоненты разобьем по типономиналам. Данные о типе корпусов компонентов, номиналах, количестве единиц, числе выводов и геометрии компонентов сведены и представлены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

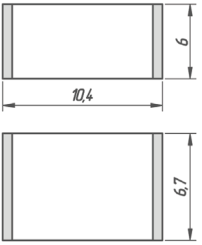
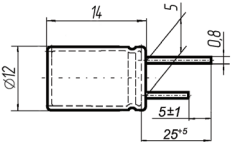
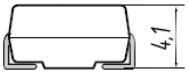
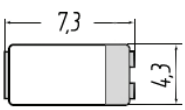
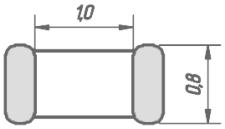
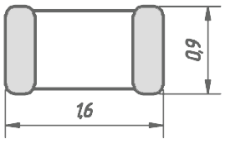
Состав компонентов монтажа

№	Обозначение	Наименование	Размеры	Число выводов элемента	Число элем.	Общее число выводов
1	2	3	4	5	6	7
Кварцевый резонатор						
1	BQ3	Q-10,0-JXE75/1-12-50		2	1	2

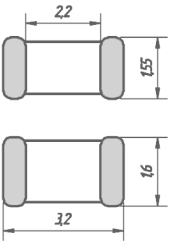
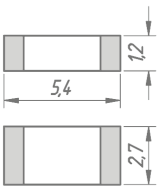
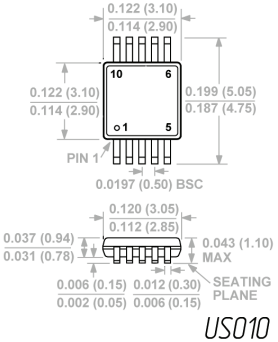
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
Конденсаторы						
2	C1, C2, C4, C5, C8, C9, C11, C12, C14–C19, C30–C34, C41, C42, C44–C46, C50, C51, C53, C57, C58, C60–C72, C76–C80, C83, C84, C85	C0603 50V 0,1uF		2	50	100
3	C20, C21, C22, C23, C24, C25, C28, C29	0603 50V 1500pF		2	8	16
4	C26, C27, C73, C74	0603 50V 22pF		2	4	8
5	C43	0603 50V 270pF		2	1	2
6	C75	0603 50V 0,01uF		2	1	2
7	C39	1206 10V 10uF		2	1	2
8	C47	2416 400V 0,015uF		2	1	2

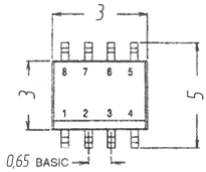
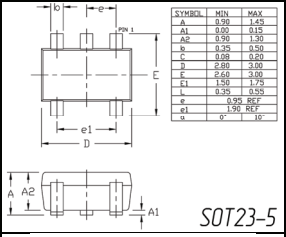
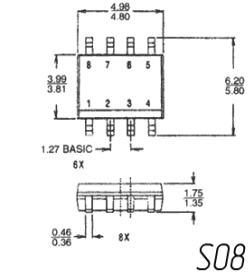
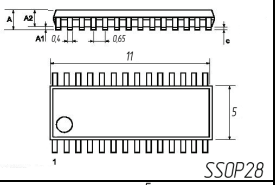
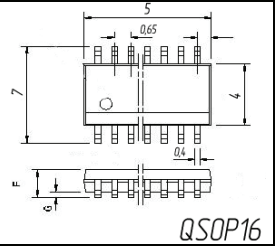
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
9	C82	3925 400V 0,1uF		2	1	2
10	C81	2,2uF x 450V		2	1	2
11	C3, C10, C40, C59	CPD 10V 220uF Tantal D		2	4	8
12	C6, C13, C35, C48, C54	CPD 6.3V 470uF Tantal D		2	5	10
Резисторы						
13	R10, R11, R12, R14, R15	R0603 1% 30K		2	5	10
14	R13	R0603 1% 10K		2	1	2
15	R16	R0603 5% 2K		2	1	2
16	R17, R18, R19, R20, R21, R22, R23, R24	R0603 1% 2K		2	8	16
17	R25, R26, R35	R0603 5% 51		2	3	6
18	R27, R28, R29, R32, R33, R51, R52, R53, R54, R57, R58, R59, R63, R68, R69, R72, R75	R0603 5% 10K		2	17	34
19	R30, R31, R61	R0603 5% 5,1K		2	3	6

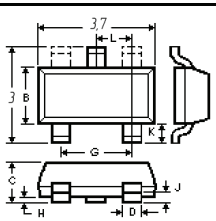
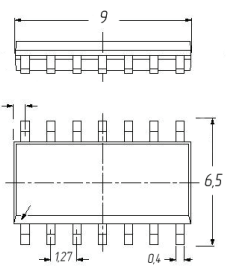
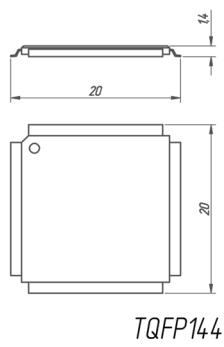
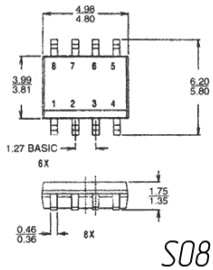
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
20	R34	R0603 5% 30		2	1	2
21	R8, R44, R47	R0603 5% 1M		2	3	6
22	R46, R45	R0603 5% 100		2	2	4
23	R55, R56, R70, R71, R78	R0603 5% 100K		2	5	10
24	R60	R0603 5% 0		2	1	2
25	R62, R73, R76	R0603 5% 3K		2	3	6
26	R77, R74	R0603 5% 10		2	2	4
27	R36	R1206 5% 100K		2	1	2
28	R39, R40, R41, R42	R1206 5% 10M		2	4	8
29	R43	R1206 5% 150K		2	1	2
30	R37	R2010 5% 51K		2	1	2
31	R38	R2010 5% 300		2	1	2
Микросхемы аналоговые						
32	DA4	AD5312-BRM		10	1	10

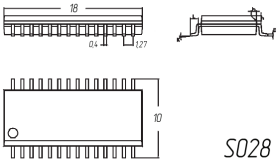
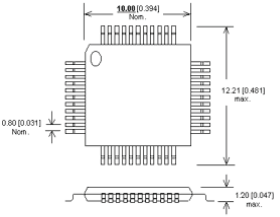
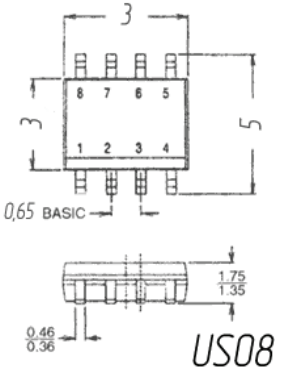
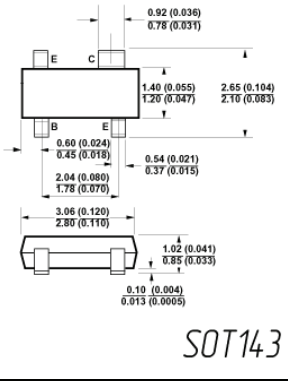
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
33	DA5	MAX4163-EUA		8	1	8
34	DA12	TC1121-EUA		8	1	8
35	DA6, DA16	MAX4162-EUK-T		5	2	10
36	DA7	MAX4181-ESA		4	1	4
37	DA8, DA9	HFA1135IB		4	2	8
38	DA13	MAX320-ESA		4	1	4
39	DA14	MAX630-ESA		4	1	4
40	DA15	MAX319-ESA		4	1	4
41	DA10	ADS930E		28	1	28
42	DA17, DA11	MAX1672-EEE		16	2	32

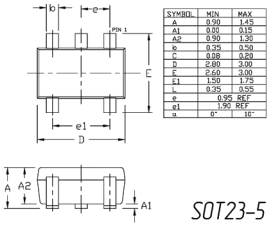
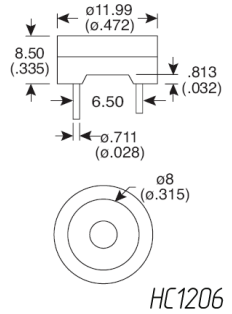
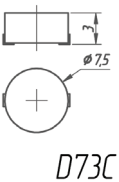
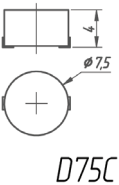
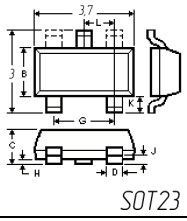
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
43	DA18	TC1047-AVNBTR		3	1	3
44	DA19	TCM809-MENB		3	1	3
Микросхемы цифровые						
45	DD1	CD4013BM		14	1	14
46	DD5	74HC14D		14	1	14
47	DD8	74AC04D		14	1	14
48	DD2	XCS20-3TQ144I		144	1	144
49	DD3	XC17S20-VO8I		8	1	8

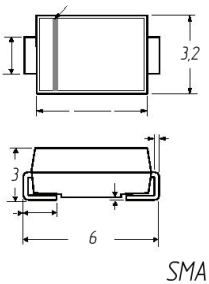
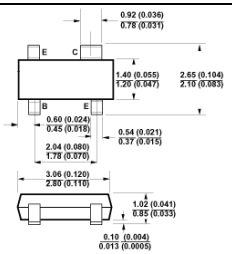
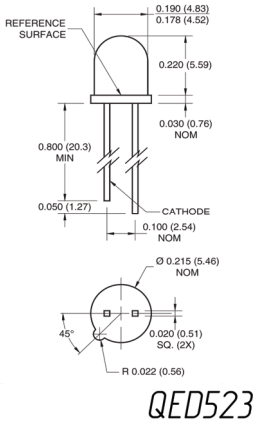
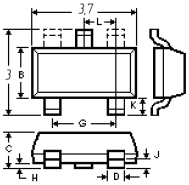
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
50	DD4	IS62C256-70UI		28	1	28
51	DD6	PIC16F877-20I/PQ		44	1	44
52	DD7	24LC256 I/SM		8	1	8
53	DD9	MAX6816-EUS		4	1	4

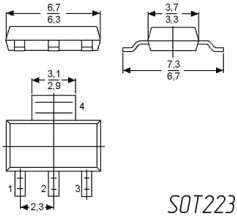
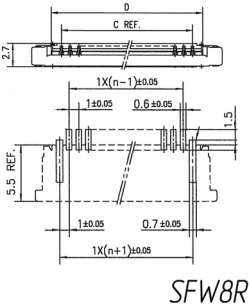
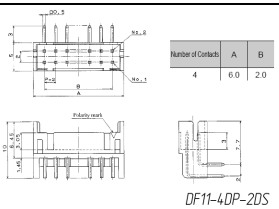
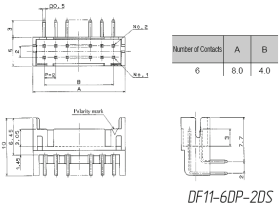
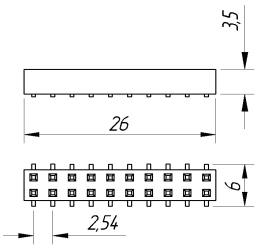
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
54	DD10	SN74LVC-1G04DBVR		5	1	5
Зуммер						
55	HA1	254-12GP		2	1	2
Дроссели						
56	L5, L1	SMD D73C 10UH		2	2	4
57	L2, L3, L4	SMD D75C 100UH		2	3	6
Диоды						
58	VD6, VD1	ZHCS1000-TA sot23		3	2	6
59	VD7, VD2	BAV99 sot23		3	2	6

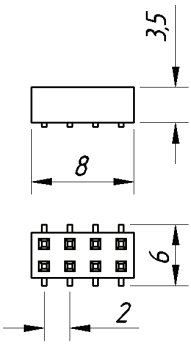
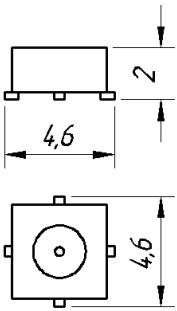
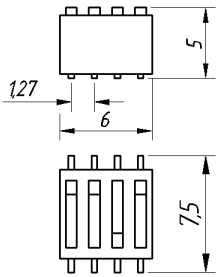
Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
60	VD3, VD4	US1M-13 sma		2	2	4
61	VD5	BAS28-E6327		4	1	4
62	VD8	QED523		2	1	2
Транзисторы						
63	VT1	FMMT-717TA sot23 npn		3	1	3
64	VT2	FMMT617 sot23 npn		3	1	3
65	VT5, VT6	BC850C sot23		3	2	6
66	VT7	BCR148		3	1	3

Продолжение табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
67	VT3	FZT958TA		4	1	4
68	VT4	ZVN0545-GTA		4	1	4
Разъемы						
69	X1	SFW8R-2STE1LF		10	1	10
70	X2	DF11-4DP-2DS		4	1	4
71	X4	DF11-6DP-2DS		6	1	6
72	X5	HLE-110-02-G-DV-A		20	1	20

Окончание табл. 4.2

1	2	3	4	5	6	7
73	X6	MOLEX 87340-0824		8	1	8
74	X7	AMP 1055690-1		4	1	4
75	SW1	TDA04-H0SB1		8	1	8

По результатам анализа состава компонентов монтажа выявлено 75 различных номиналов элементов. Остальные статистические данные сведены в табл. 4.3.

Также проведем анализ состава компонентов, расположенных на верхней и нижней стороне платы. Поскольку, как видно из табл. 4.3, КМО всего 5, то анализ состава будем вести только для КМП. Полученные данные представлены в табл. 4.4 и 4.5.

Таблица 4.3

Статистические данные

Название компонента	Число КМП	Число выводов КМП	Число КМО	Число выводов КМО
Кварцевый резонатор	1	2	–	–
Конденсаторы	76	152	1	2
Резисторы	64	128	–	–
Микросхемы аналоговые	16	126	–	–
Микросхемы цифровые	10	283	–	–
Зуммер	–	–	1	2
Дроссели	5	10	–	–
Диоды	7	20	1	2
Транзисторы	7	23	–	–
Разъемы	5	50	2	10
Всего	191	794	5	16

Таблица 4.4

Число КМП на верхней стороне платы

Название компонента	Состав	Количество
Кварцевый резонатор	BQ3	1
Конденсаторы	C14–C34, C41–C47, C50, C51, C57, C58, C61, C63–C80, C84, C85	53
Резисторы	R8–R24, R27–R47, R51–R56, R61–R63, R68–R78	58
Микросхемы аналоговые	DA4–DA10, DA13–DA16, DA18	12
Микросхемы цифровые	DD1, DD3, DD5–DD10	8
Диоды	VD2, VD5, VD7	3
Транзисторы	VT1, VT2, VT4–VT7	6
Разъемы	X5, X6	2
Всего		143

Таблица 4.5

Число КМП на нижней стороне платы

Название компонента	Состав	Количество
Конденсаторы	C1–C6, C8–C13, C35, C39, C40, C48, C53, C54, C59, C60, C62, C82, C83	23
Резисторы	R25, R26, R57–R60	6
Микросхемы аналоговые	DA11, DA12, DA17, DA19	4
Микросхемы цифровые	DD2, DD4	2
Дроссели	L1–L5	5
Диоды	VD1, VD3, VD4, VD6	4
Транзисторы	VT3	1
Разъемы	X1, X7	2
Переключатели	SW1	1
Всего		48

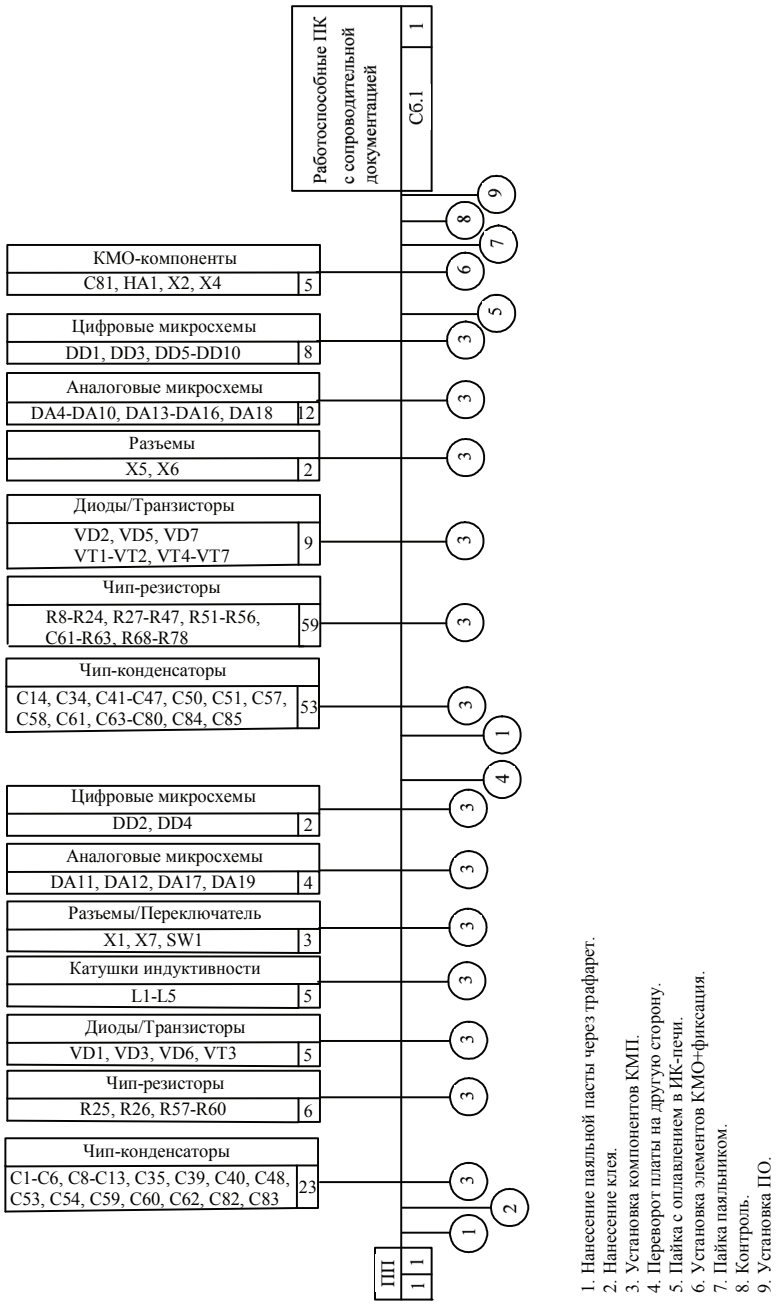


Рис. 4.2. Схема сборки ячейки с базовой деталью

Схема сборки ячейки. Схема сборки ячейки с базовой деталью представлена на рис. 4.2.

4. Разработка маршрутного ТП. Маршрутный техпроцесс сборки ячейки представлен в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Маршрутный ТП сборки ячейки

№ операции	Наименование	Оборудование
1	Комплектация компонентов	Стол монтажника
2	Нанесение паяльной пасты на нижнюю сторону ПП	Стол монтажника. Используется трафарет и ракель
3	Нанесение клея на нижнюю сторону	Стол монтажника. Используется дозатор
4	Установка КМП на нижнюю сторону	Стол монтажника. Используется манипулятор
5	Переворот платы	Стол монтажника
6	Нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону ПП	Стол монтажника. Используется трафарет и ракель
7	Установка КМП на верхнюю сторону ПП	Стол монтажника. Используется манипулятор
8	Пайка оплавлением	ИК-печь
9	Установка КМО с фиксацией	Стол монтажника
10	Пайка паяльником	Стол монтажника. Паяльник
11	Контроль	Установка для автоматической оптической инспекции (АОИ)
12	Установка ПО	ПК, программатор

Разработка операционного ТП включает описание всех операций по сборке ячейки в прямой последовательности. Для каждой операции назначим время её выполнения. Полученные данные представим в табл. 4.7.

Таблица 4.7

Операционный ТП сборки ячейки

Операция	Число операций	Время одной операции, с	Суммарное время, мин
1	2	3	4
1. Комплектация компонентов			
1.1. Маркировка тар по типономиналам	75	20	25
1.2. Поиск кассеты, паллеты с необходимым номиналом	75	30	37,5

Продолжение табл. 4.6

1	2	3	4
1.3. Распределение элементов в тару в количестве $N = 1000 \cdot m/n$, где m – число элементов одного номинала; n – число рабочих	75	60	75
1.4. Суммарное значение			137,5
2. Нанесение паяльной пасты на нижнюю сторону ПП			
2.1. Установка ПП	1	30	0,5
2.2. Установка трафарета	1	30	0,5
2.3. Нанесение паяльной пасты ракелем	1	10	0,167
2.4. Снятие трафарета с ПП	1	10	0,167
2.5. Визуальный контроль	1	180	3
2.6. Суммарное значение			4,34
3. Нанесение клея на нижнюю сторону			
3.1. Приготовить двухкомпонентный клей	1	120	2
3.2. Набрать клей дозатором	1	10	0,167
3.3. Нанесение капли клея на место посадки компонента	6×53 = 318	3	15,9
3.4. Визуальный контроль	1	30	0,5
3.5. Суммарное значение			18,27
4. Установка КМП на нижнюю сторону			
4.1. Открыть тару с необходимым порядковым номером	70	10	11,67
4.2. Достать элемент из тары	6×53 = 318	3	15,9
4.3. Найти место установки компонента	6×53 = 318	10	53
4.4. Установить компонент	6×53 = 318	5	26,5
4.5. Визуальный контроль	1	180	3
4.6. Суммарное значение			110,07
5. Переворот платы			
5.1. Перевернуть плату на другую сторону	1	10	0,167
5.2. Суммарное значение			0,167
6. Нанесение паяльной пасты на верхнюю сторону ПП			
6.1. Установка ПП	1	30	0,5
6.2. Установка трафарета	1	30	0,5
6.3. Нанесение паяльной пасты ракелем	1	10	0,167
6.4. Снятие трафарета с ПП	1	10	0,167
6.5. Визуальный контроль	1	180	3
6.6. Суммарное значение			4,34
7. Установка КМП на верхнюю сторону ПП			
7.1. Достать элемент из тары	6×143 = 858	3	42,9
7.2. Найти место установки компонента	6×143 = 858	10	143
7.3. Установить компонент	6×143 = 858	5	71,5

Окончание табл. 4.6

1	2	3	4
7.4. Визуальный контроль	1	180	3
7.5. Суммарное значение			260,4
8. Пайка оплавлением			
8.1. Установка ПП на транспортер	1	30	0,5
8.2. Пайка оплавлением в ИК-печи	1	300	5
8.3. Извлечение ПП из печи	1	30	0,5
8.4. Визуальный контроль	1	180	3
8.5. Суммарное значение			9
9. Установка КМО с фиксацией			
9.1. Открыть тару с необходимым порядковым номером	5	10	0,83
9.2. Достать элемент из тары	6×5 = 30	3	1,5
9.3. Формовка выводов	6×5 = 30	30	15
9.4. Найти место установки компонента	6×5 = 30	10	5
9.5. Установить компонент	6×5 = 30	5	2,5
9.6. Визуальный контроль	1	60	1
9.7. Суммарное значение			25,83
10. Пайка паяльником			
10.1. Перевернуть ПП на монтажную сторону	1	10	0,167
10.2. Флюсование	6×16 = 96	3	4,8
10.3. Паять ПОС-61	6×16 = 96	3	4,8
10.4. Отмыть флюс с места пайки	6	20	2
10.5. Визуальный контроль	6	10	1
10.6. Суммарное значение			12,77
11. Контроль			
11.1. Уст. ПП на стенд АОИ	1	10	0,167
11.2. Контроль АОИ	1	60	1
11.3. Снять ПП со стенда АОИ	1	10	0,167
11.4. Установить ПП на стенд функционального контроля	1	10	0,167
11.5. Функциональный контроль	1	60	1
11.6. Снять ПП с установки	1	10	0,167
11.7. Визуальный контроль	1	180	3
11.8. Суммарное значение			5,67
12. Установка ПО			
12.1. Подключить ПП к ПК	6	10	1
12.2. Прошить ПП	6	180	18
12.3. Отключить ПП от ПК	6	10	1
12.4. Суммарное значение			20

Проиллюстрируем операции техпроцесса. Операция комплектации компонентов представлена на рис. 4.3.

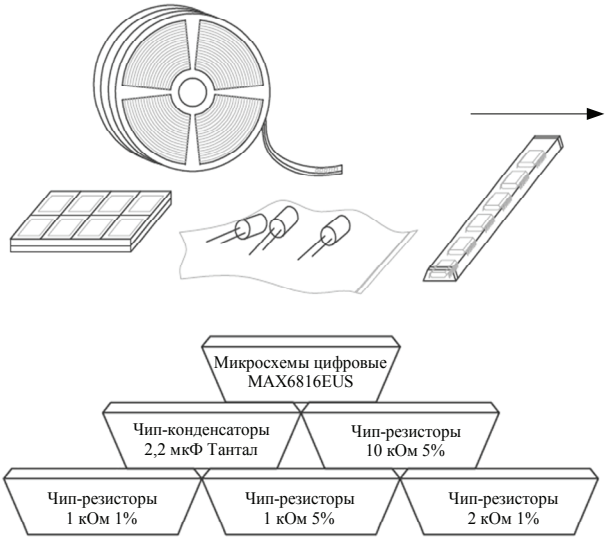


Рис. 4.3. Комплектация компонентов

Далее покажем операцию нанесения паяльной пасты через трафарет (рис. 4.4).

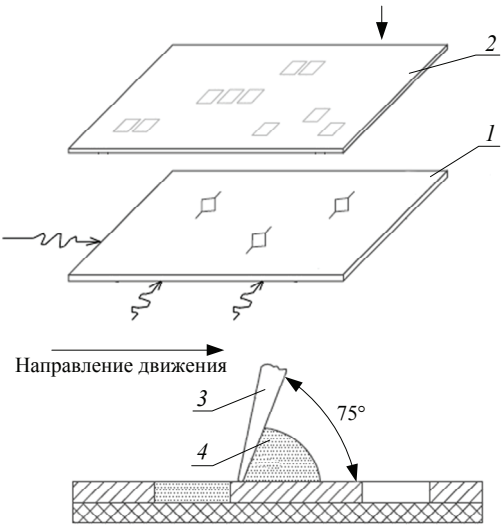


Рис. 4.4. Нанесение паяльной пасты через трафарет на нижнюю сторону ПП:
1 – печатная плата; *2* – трафарет; *3* – ракель; *4* – паяльная паста

Далее на рис. 4.5 представлена операция нанесения клея. Для чего двухкомпонентный клей размешивается в таре в количестве на одну рабочую смену. Клей набирается дозатором, и после этого производится нанесение клея на ПП.

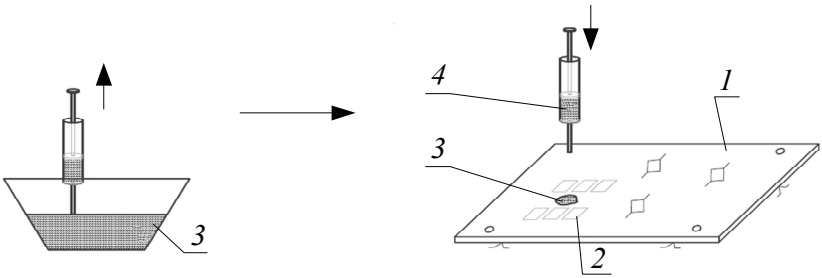


Рис. 4.5. Нанесение клея на нижнюю сторону ПП:
1 – печатная плата; *2* – контактная площадка с паяльной пастой;
3 – двухкомпонентный клей; *4* – дозатор

Операция установки компонентов представлена на рис. 4.6. Операция установки требует использования манипулятора, поскольку есть элементы с шагом вывода 0,5 мм, установка которых без манипулятора была бы затруднительна.

Применение манипулятора относится к полуавтоматизированному процессу, поскольку есть возможность запоминания координат установки элементов.

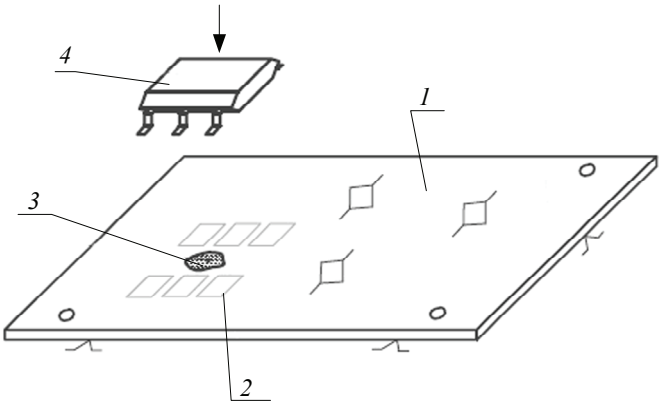


Рис. 4.6. Установка компонентов на нижнюю сторону ПП:
1 – печатная плата; *2* – контактная площадка с паяльной пастой;
3 – двухкомпонентный клей; *4* – устанавливаемый компонент

Покажем операцию пайки оплавлением в ИК-печи. Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции. Это единственный из механизмов теплопередачи, обеспечивающий передачу тепловой энергии по всему объему монтируемого устройства. Остальные механизмы теплопередачи обеспечивают передачу тепловой энергии только поверхности монтируемого изделия.

В процессе пайки ИК-излучением скорость нагрева регулируется изменением мощности каждого излучателя и скорости движения конвейера с ПП (для печей туннельного типа). Процесс показан на рис. 4.7.

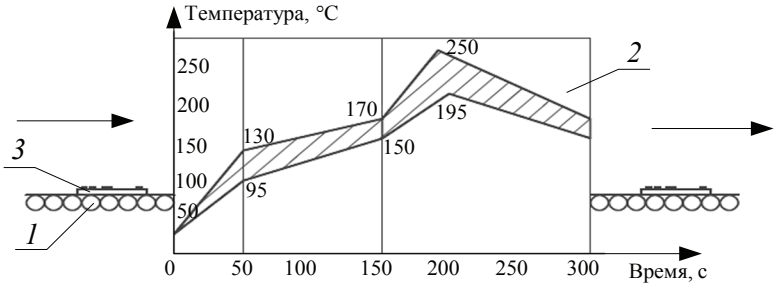


Рис. 4.7. Процесс пайки оплавлением в ИК-печи:
1 – транспортер; *2* – инфракрасная печь; *3* – ячейка

Операция установки элементов КМО показана на рис. 4.8. Установка элементов выполняется с фиксацией КМО на ПП.

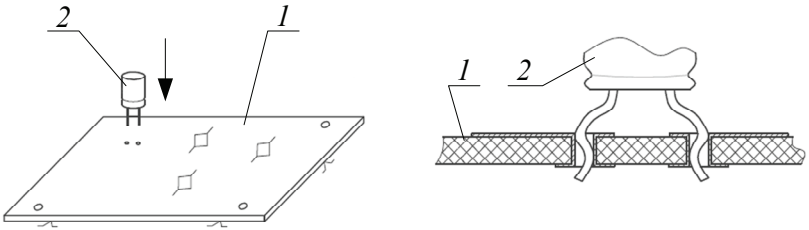


Рис. 4.8. Установка КМО-элементов на ПП:
1 – печатная плата; *2* – установленный компонент

Далее на рис. 4.9 показана операция пайки паяльником элементов КМО.

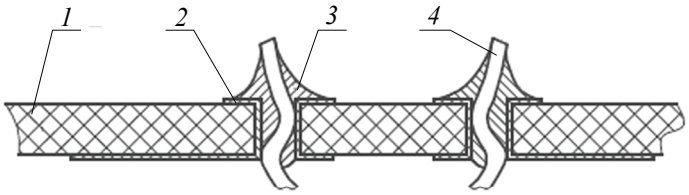
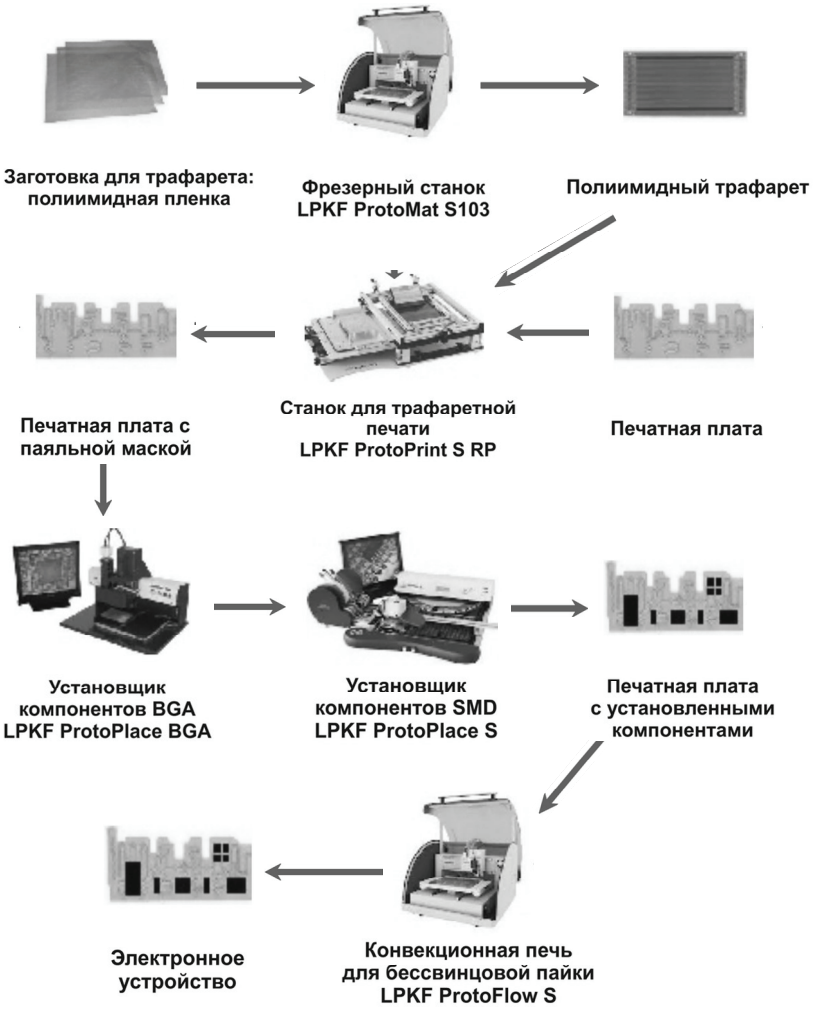


Рис. 4.9. Пайка паяльником:
1 – печатная плата; *2* – контактная площадка;
3 – галтели припоя ПОС-61; *4* – вывод элемента

Рис. 4.10. Комплекс оборудования прототипирования печатных плат



Окончание рис. 4.10

Основным недостатком пайки ИК-нагревом является то, что количество энергии излучения, поглощаемой компонентами и платами, зависит от поглощающей способности материалов, из которых они изготовлены. Поэтому в пределах монтируемого устройства нагрев осуществляется неравномерно. Пайка кристаллоносителей без выводов или с *J*-образными выводами может оказаться невозможной в установках с ИК-нагревом, если компонент непрозрачен для ИК-излучения.

Для изготовления макета печатной платы опытного образца ЭМ может быть использован комплекс лабораторного производственного оборудования *LPKF* (*www.lpkf.ru*) (см. рис. 4.10).

Завершающим этапом технологического проектирования является оптимизация производственного процесса по интегральным (время, стоимость) и дифференциальным (комплексный показатель технологичности и др.) критериям. Она может осуществляться с использованием методов структурно-функциональной декомпозиции, например с использованием методик *IDEF*.

Расчет комплексного показателя технологичности ячейки предполагает использование следующей формулы:

$$K_{\text{к}} = \frac{\sum K_i \cdot \varphi_i}{\sum \varphi_i}, \tag{4.1}$$

где $K_{\text{к}}$ – комплексный показатель технологичности модуля; K_i – i-й коэффициент технологичности модуля; φ_i – весовая значимость этого коэффициента.

Перечень показателей технологичности и коэффициентов весовой значимости для каждого показателя, определяющих значение комплексного показателя технологичности согласно формуле (4.1), представлен в табл. 4.8.

Рассчитаем последовательно все i-е коэффициенты технологичности:

1. *Коэффициент конструкторско-технологической компоновки*. Данный коэффициент выбирается по таблице в зависимости от расположения элементов КМП и КМО на сторонах платы (табл. 4.9).

В нашем случае имеет место 9-й уровень конструкторско-технологической компоновки:

$$K_{\text{КТК}} = 0,2.$$

2. *Коэффициент состава навесных компонентов*:

$$K_{\text{СНК}} = K_{\text{СНК}}^{\text{КМП}} + K_{\text{СНК}}^{\text{КМО}}, \tag{4.2}$$

где $K_{\text{СНК}}^{\text{КМП}}$ – коэффициент состава КМП; $K_{\text{СНК}}^{\text{КМО}}$ – коэффициент состава КМО.

Коэффициент состава КМП рассчитывается по формуле

$$K_{\text{СНК}}^{\text{КМП}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}}}{k_{\text{ТИП}}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{k} \left(k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}} \cdot \frac{N_{\text{КМП}\,i}^{\text{ур}}}{N_{\text{НК}}} \right) \right), \tag{4.3}$$

где $k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}}$ – коэффициент i-го уровня технологичности КМП, выбирается из табл. 4.10; $N_{\text{КМП}\,i}^{\text{ур}}$ – количество КМП на ПП (с обеих сторон) i-го уровня; k – количество уровней технологичности КМП; $k_{\text{ТИП}}$ – количество уровней технологичности КМП;

$$N_{\text{НК}} = N_{\text{КМП}} + N_{\text{КМО}};$$

$N_{\text{КМП}}$ – количество компонентов поверхностного монтажа; $N_{\text{КМО}}$ – количество компонентов, монтируемых в отверстия.

Таблица 4.8

Перечень базовых показателей ЭМ 1-го уровня современных конструкций

№ п/п	Наименование базового показателя	Обозначение	Основные признаки и качественные уровни показателя	Весовая значимость φ_i
1	Коэффициент конструктивно-технологической компоновки	$K_{\text{КТК}}$	Характер размещения навесных компонентов на ПП: односторонний или двусторонний монтаж, поверхностный монтаж, монтаж в отверстия или смешанный монтаж	1
2	Коэффициент состава навесных компонентов	$K_{\text{СНК}}$	Оценка ЭМ по составу монтируемых НК с двух сторон: КМО, КМП	0,9
3	Коэффициент механизации и автоматизации монтажа	$K_{\text{АМ}}$	Оценивает возможность автоматизации монтажа (установка и пайка) НК	0,4
4	Коэффициент механизации и автоматизации контроля	$K_{\text{АК}}$	Оценивает возможность автоматизации операций контроля (контроль правильности установки НК, контроль пайки и функциональный контроль)	0,3
5	Коэффициент плотности монтажа навесных компонентов	$K_{\text{ПМ}}$	Оценивается плотность монтажа на *TOP*- и *BOT*-сторонах ПП	0,2

Для нашей ячейки можно выделить три уровня КМП.

Количество КМП, распределенных по уровням, представлено в табл. 4.11.

Таблица 4.9

Классификация уровней конструктивно-технологической компоновки электронных модулей

Уровень	Наименование уровня	Условное обозначение	Характерные признаки компоновки ЭМ	$K_{КТК}$
1	2	3	4	5
1	Односторонний поверхностный монтаж	КМП	Электронные компоненты поверхностного монтажа (КМП) размещены и распаяны на поверхности одной стороны ПП	1,0
2	Двусторонний поверхностный монтаж	КМП / КМП	Электронные компоненты КМП размещены и распаяны с двух сторон на монтажных поверхностях ПП	0,9
3	Односторонний монтаж в монтажные отверстия	КМО	Электронные компоненты с осевыми или штыревыми выводами (КМО) размещены на одной (монтажной) стороне ПП и распаяны в монтажных отверстиях с противоположной стороны ПП	0,8
4	Двусторонний раздельный монтаж компонентов	КМП / КМО	КМП размещены и распаяны на одной стороне ПП. КМО размещены на противоположной стороне ПП, а распаяны в отверстиях со стороны КМП	0,7
5	Односторонний смешанный монтаж компонентов	КМП + КМО	КМП и КМО размещены на одной стороне ПП. КМП распаяны на монтажной стороне, а КМО – на противоположной стороне ПП	0,6
6	Двусторонний монтаж компонентов в монтажные отверстия	КМО / КМО	КМО размещены с двух сторон ПП и распаяны в монтажных отверстиях. Сторона распайки противоположна монтажной стороне	0,5
7	Двусторонний монтаж со смешанным и раздельным (КМП) размещением компонентов	КМО + КМП / КМП	КМП и КМО размещены на одной стороне ПП с распайкой КМП на нее же. Распайка КМО, размещение и распайка КМП (4.2) на противоположной стороне	0,4

Окончание табл. 4.9

1	2	3	4	5
8	Двусторонний монтаж со смешанным и раздельным (КМО) размещением компонентов	$\frac{\text{КМО} + \text{КМП}}{\text{КМО}}$	КМП и КМО размещены на одной стороне ПП с распайкой КМП и выводов КМО противоположной стороны. КМО размещены на противоположной стороне, а их выводы распаяны на стороне смешанного монтажа	0,3
9	Двусторонний смешанный монтаж компонентов	$\frac{\text{КМО} + \text{КМП}}{\text{КМО} + \text{КМП}}$	На обеих сторонах ПП осуществлен смешанный монтаж компонентов с распайкой как на поверхности монтажных сторон, так и в монтажных отверстиях	0,2

Таблица 4.10

Уровни КМП

Уровень	Описание КМП	Коэффициент
1	Чип-компоненты более 1,5×1,0 мм	1
2	Чип-компоненты цилиндрической формы	0,8
3	Чип-компоненты менее 1,5×1,0 мм	0,7
4	ИМС, шаг более 0,65 мм, форма вывода – «крыло чайки»	0,45
5	ИМС, шаг более 0,65 мм	0,4
6	ИМС, шаг менее 0,65 мм, форма вывода – «крыло чайки»	0,3
7	ИМС, шаг менее 0,65 мм	0,25
8	ИМС с шариковыми выводами	0,1

Таблица 4.11

Уровни КМП для рассматриваемого модуля

№ уровня	$k^{\text{ур}}_{\text{СНК}\,i}$	$N^{\text{ур}}_{\text{КМП}\,i}$
1	1	167
4	0,45	23
6	0,3	1

Таким образом, воспользовавшись формулой (4.3), находим значение коэффициента состава КМП:

$$N_{\text{НК}} = N_{\text{КМП}} + N_{\text{КМО}} = 191 + 5 = 196;$$

$$K^{\text{КМП}}_{\text{СНК}} = 0,529.$$

Далее найдем коэффициент состава КМО по следующей формуле:

$$K_{\text{СНК}}^{\text{КМО}} = \frac{\sum_{i=1}^{k} k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}}}{k_{\text{ТИП}}} \cdot \left(\sum_{i=1}^{k} \left(k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}} \cdot \frac{N_{\text{КМО}\,i}^{\text{ур}}}{N_{\text{НК}}} \right) \right), \qquad (4.4)$$

где $k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}}$ – коэффициент i-го уровня технологичности КМО (выбирается из табл. 4.12); $N_{\text{КМО}\,i}^{\text{ур}}$ – количество КМО на ПП (с обеих сторон) i-го уровня; $N_{\text{КМО}}$ – общее количество КМО на ПП (с обеих сторон).

Таблица 4.12

Уровни КМО

Уровень	Описание КМО	Сложность монтажа	Коэффициент
1	КМО с осевыми и радиальными выводами	Требуется формовка, обрезка и лужение выводов, а также фиксация КМО на ПП	1
2	Многовыводные КМО, микросхемы в *DIP*-корпусах, панели для микросхем, разъемы, клеммы и слоты	Не требуется формовка выводов. Требуется рихтовка, обрезка и лужение выводов, а также фиксация КМО на ПП	0,5
3	Нестандартные КМО сложной формы	Требуется формовка, обрезка и лужение выводов, а также фиксация КМО на ПП	0,1

Для нашего модуля можно выделить два уровня КМО, данные по которым представлены в табл. 4.13.

Таблица 4.13

Уровни КМО для рассматриваемого модуля

№ уровня	$k_{\text{СНК}\,i}^{\text{ур}}$	$N_{\text{КМО}\,i}^{\text{ур}}$
1	1	3
2	0,5	2

Расчет коэффициента состава КМП согласно формуле (4.4) приводит к следующему значению:

$$K_{\text{СНК}}^{\text{КМО}} = 0,015.$$

В итоге получаем следующее значение коэффициента состава навесных компонентов, подсчитанное согласно формуле (4.2):

$$K_{\text{СНК}} = 0,529 + 0,015 = 0,544.$$

3. *Коэффициент механизации и автоматизации монтажа*:

$$K_{\text{АМ}} = \frac{N_{\text{АМ НК}}}{N_{\text{НК}}}, \tag{4.5}$$

где $N_{\text{АМ НК}}$ – число компонентов, монтируемых автоматически.

Таким образом, вычисляем по формуле (4.5):

$$K_{\text{АМ}} = \frac{191}{196} = 0,974.$$

4. *Коэффициент механизации и автоматизации контроля*:

$$K_{\text{АК}} = \frac{N_{\text{АОК}}}{N_{\text{ОК}}}, \tag{4.6}$$

где $N_{\text{АОК}}$ – количество автоматизированных и механизированных операций контроля; $N_{\text{ОК}}$ – общее количество возможных операций контроля (*Mount Control*, *Reflow Control*, *Functional Control*), $N_{\text{ОК}} = 3$.

Техпроцесс сборки модуля предполагает использование в качестве автоматизированных средств контроля автоматическую оптическую инспекцию и установку для проведения функционального контроля:

$$K_{\text{АК}} = 2/3 = 0,667.$$

5. *Коэффициент плотности монтажа навесных компонентов*:

$$K_{\text{ПМК}} = 1 - \frac{K_{\text{ОП}}}{500}, \tag{4.7}$$

где $K_{\text{ОП}}$ – коэффициент относительной плотности монтажа:

$$K_{\text{ОП}} = \frac{N_{\text{НК}}}{S_{\text{ПП}}}, \tag{4.8}$$

где $N_{\text{НК}}$ – число компонентов, расположенных на одной стороне ПП; $S_{\text{ПП}}$ – площадь поверхности ПП, дм^2.

Расчет будем вести для наименее технологичной стороны ПП, соответственно, для содержащей большее число компонентов. Таким образом,

$$N_{\text{НК}} = 143.$$

Площадь поверхности ПП найдем исходя из геометрии, приведенной на рис. 4.11.

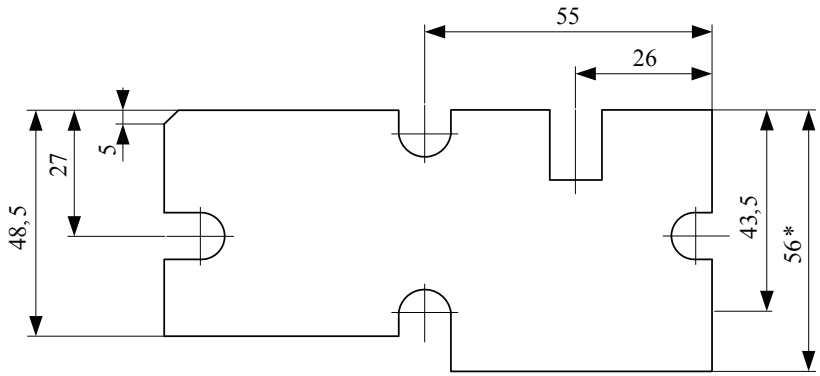


Рис. 4.11. Геометрия ПП

По результатам расчетов было получено следующее значение площади поверхности ПП:

$$S_{\text{ПП}} = 0,458 \text{ дм}^2,$$

откуда получаем, что

$$K_{\text{ОП}} = \frac{143}{0,458} = 312.$$

Теперь, подставляя значение коэффициента относительной плотности в формулу (4.7), находим значение коэффициента плотности монтажа навесных компонентов:

$$K_{\text{ПМК}} = 1 - \frac{312}{500} = 0,376.$$

Для нахождения комплексного показателя технологичности воспользуемся формулой (4.1):

$$K_{\text{к}} = \frac{0,2 \cdot 1 + 0,544 \cdot 0,9 + 0,974 \cdot 0,4 + 0,677 \cdot 0,3 + 0,376 \cdot 0,2}{1 + 0,9 + 0,4 + 0,3 + 0,2} =$$

$$= 1,355/2,8 = 0,484.$$

Анализ объема выпуска. Исходным параметром для анализа является заданный объем выпуска $N = 1000$ шт./год. По результатам данных операционного ТП можем посчитать штучное время изготовления одной групповой заготовки:

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{о}} + T_{\text{в}} + T_{\text{то}} + T_{\text{пер}},$$

где $T_{\text{о}}$ – основное время выполнения технологической операции; $T_{\text{в}}$ – вспомогательное время, затрачиваемое на управление оборудованием, установку и съем заготовки, контрольные операции; сумма $T_{\text{о}}$ и $T_{\text{в}}$ образует оперативное время $T_{\text{оп}}$; $T_{\text{то}}$ – время технического и организационного обслуживания рабочего места (3–5% от $T_{\text{оп}}$); $T_{\text{пер}}$ – время перерывов на отдых и естественные надобности рабочего (2–3% от $T_{\text{оп}}$):

$$T_{\text{оп}} = 472,2 \text{ мин} = 7,87 \text{ ч};$$

$$T_{\text{шт}} = T_{\text{оп}} + (5 \div 8\%) T_{\text{оп}} = 496 \text{ мин} = 8,26 \text{ ч}.$$

Таким образом, один рабочий может изготовить один модуль, укладываясь в полный рабочий день. Требуемое количество групповых заготовок – 167, поэтому потребуется 167 дней работы для обеспечения заданного объема выпуска, что укладывается в число рабочих дней в году. Этот факт позволяет набирать специалистов с малым стажем работы, что позволит сократить затраты на выплату заработной платы сотрудникам.

Хотя для обеспечения заданного объема выпуска достаточно одного рабочего места, возможен вариант с использованием двух рабочих мест для гарантии более качественной работы сотрудников. Качество работы будет достигаться за счет распределения задач и обязанностей между персоналом.

4.2.3. Рекомендации по разработке оборудования и оснастки

Для обеспечения техпроцесса сборки ячейки по результатам анализа объема выпуска понадобится 1–2 рабочих места. Соответственно, необходимо оснастить указанное число рабочих мест требуемым для работы оборудованием и оснасткой. В качестве оборудования необходимы ИК-печь для пайки оплавлением, установка для проведения автоматической оптической инспекции, стенд для проведения функционального контроля, персональные компьютеры и программаторы для организации установки программного обеспечения на платы, микроскоп для визуального контроля и выявления дефектов.

В качестве оснастки необходимы инструменты для распаковки компонентов, тары для распределения компонентов, трафареты для нанесения паяльной пасты, тары для размешивания клея, дозаторы, манипуляторы для установки компонентов, формующая оснастка, паяльные станции, пинцеты и вакуумные захваты для перемешивания компонентов, инструменты для разделения групповых заготовок и работы с расходными материалами и др.

Предметом разработки в рамках курсовой работы могут являться программы, созданные с использованием специализированных систем технологического САПР (*CAM*-350 и т. п.), например программа сверления отверстий в печатной плате для станка-автомата, программа размещения КМП для установки поверхностного монтажа и т. п.

4.2.4. Рекомендации по экспериментальным исследованиям, функциональному контролю и испытаниям

Подробно вопросы по функциональному контролю и испытаниям рассмотрены в [9]. Регулировка и настройка – необходимые операции в общем технологическом цикле производства ЭА. Они должны обеспечить заданные параметры ЭА при наименьших затратах и устранить все неисправности, допущенные при сборке. Под регулировочными и настроечными операциями (РНО) понимают комплекс работ по доведению параметров ЭА до величин, соответствующих требованиям технических условий (ТУ) и нормалей. Целью РНО является получение такого разброса параметров, который гарантирует эффективное функционирование аппаратуры в условиях эксплуатации.

Проведение РНО необходимо, чтобы устранить погрешности изготовления деталей, элементов и сборки узлов, причем как вынужденных, так и предопределенных заранее. Причиной появления предопределенных погрешностей является искусственное завышение допусков на отдельные параметры в целях уменьшения себестоимости изделий или невозможности реализации требуемой точности.

Работы, выполняемые на РНО, включают настройку различных резонансных систем, сопряжение электрических, кинематических параметров отдельных узлов и всей аппаратуры в целом, установку определенных режимов отдельных блоков, узлов, подгонку не-

которых элементов и т. д. Характер и объем РНО определяются видом и объемом производства, оснащенностью ТП.

Как этап производства РНО составляют в общем ТП ряд операций, не изменяющих схему и конструкцию изделия, а лишь компенсирующих неточность изготовления и сборки элементов ЭА собственного производства, а также комплектующих элементов. За счет такой компенсации достигается согласование входных и выходных параметров узлов и всех параметров изделия до оптимального значения, удовлетворяющего требованиям ТУ.

Если исключить РНО из ТП невозможно, то естественна постановка задачи минимизации затрат труда и времени. Общие пути решения такого рода задач известны – отработка методики выполнения РНО, их автоматизация, схемотехнические и конструктивные решения, сокращающие затраты на РНО.

Различают *эксплуатационную* и *заводскую* регулировку. При опытном производстве процесс регулировки может сопровождаться частичным изменением схемы и конструкции образца. В серийном производстве процесс регулировки разбивают на ряд простых операций, кроме того, выполняют предварительную регулировку отдельных сборочных единиц. Это позволяет сократить трудоемкость работ, оснастить процесс регулировки специальными приборами. При регулировке иногда допускается методом подбора устанавливать заранее предусмотренные схемой резисторы, конденсаторы и другие элементы. Подбор электронных, полупроводниковых, механических приборов для получения оптимальных параметров в серийном производстве не допускается. В массовом производстве регулировочные работы разбивают на мелкие операции, предусматривающие получение одного или нескольких связанных друг с другом параметров с применением минимального количества приборов и инструментов. Замена установленных элементов исключается. Регулировку проводят на специализированных установках.

Регулировку ЭА осуществляют двумя методами:

1) по измерительным приборам;
2) сравнением настраиваемого изделия с образцом или эталоном (метод электрического копирования).

В серийном и массовом производстве чаще применяют метод электрического копирования, позволяющий уменьшать допуски на выпускаемую ЭА при использовании более простой измерительной аппаратуры.

Технологический процесс регулировки ЭА разбивают на ряд этапов.

На *первом этапе* изделие подвергают тряске на вибрационном стенде для удаления посторонних предметов и выявления имеющихся неплотных соединений.

На *втором этапе* проверяют правильность монтажа. Для этого предварительно составляют карты или таблицы, охватывающие все цепи проверяемого устройства.

На *третьем этапе* проверяют режимы работы микросхем (МС), полупроводниковых приборов по электрокалибровочным картам. Проверку режимов начинают с источников питания.

На *четвертом этапе* проверяют функционирование устройства в целом и регулировку для получения заданных характеристик по ТУ.

Виды и перечень документации, необходимой для проведения регулировочных работ, определяются программой выпуска и сложностью изделия. В единичном производстве регулировку можно проводить по электрической схеме с учетом требований ТУ. Для регулировки сложных изделий и в массовом производстве создают документацию, исключающую ошибки и сокращающую трудоемкость выполняемых работ.

Правильность электрического монтажа проверяют по электрокалибровочным картам, которые составляют для напряжений и токов, и выполняют их в виде таблиц или чертежей.

При регулировке простых устройств и в массовом производстве используются технологические карты, в которых указаны методика и порядок регулировки, измерительная аппаратура, инструмент и т. д.

Наиболее часто для регулировочных работ используют технологическую инструкцию, которая содержит описание рабочего места, перечень измерительной и регулировочной аппаратуры, приспособлений и инструмента, методику процесса регулировки и его последовательность, характерные неисправности и способы их обнаружения и устранения, порядок сдачи отрегулированного узла и указания по технике безопасности.

Порядок оформления технологических карт и технологических инструкций определяет ГОСТ (ЕСТД. Правила оформления документов общего назначения).

Характеристикой качества РНО могут служить функции распределения погрешностей регулировки изделий или распределения их параметров с учетом установленного поля допуска. Уста-

новлены некоторые закономерности формирования выходных параметров в зависимости от особенностей электрических схем. Только небольшую часть распределений выходных параметров можно считать нормальными. Реальные распределения выходных параметров отличаются между собой и от нормальных главным образом из-за асимметричности и островершинности. Эти качественные характеристики распределений, оцениваемые коэффициентами асимметрии и эксцесса, использованы в качестве критериев при анализе электрических схем и выполнении РНО с учетом получаемых распределений.

Под качеством ЭА понимают совокупность свойств, определяющих способность изделий удовлетворять заданным требованиям потребителя. Качество ЭА обусловливает их конструктивные, технологические, экономические, эргономические и другие параметры. Качество как свойство закладывается в процессе разработки и изготовления ЭА, а объективно оценивается в процессе эксплуатации. Однако получаемая при этом информация является, во-первых, недостаточной, поскольку не все параметры ЭА, необходимые для оценки качества, измеряются в условиях эксплуатации, а во-вторых, запоздалой, так как на изготовление ЭА уже затрачены большие средства. Эта проблема усугубляется по мере дальнейшей микроминиатюризации ЭА, когда целые блоки выполняются в виде интегральных микросхем (ИС), которые являются неремонтопригодными.

Одним из методов оценки качества служат теоретические расчеты. Однако расчетные оценки нуждаются в экспериментальном подтверждении, так как исходные данные и модели являются приближенными. С развитием микроминиатюризации и усложнением ЭА создание адекватных моделей становится проблематичным. В этой связи существенный объем информации о качестве ЭА получают путем контроля их параметров и проведения испытаний на всех этапах, начиная с разработки нормативно-технической документации (НТД) и кончая анализом рекламаций и заключений потребителя о качестве готовых изделий.

Согласно Государственному стандарту (ЕСТПП. Виды процессов контроля) устанавливаются следующие виды технологических процессов технологического контроля:

- по унификации (единичный, унифицированный);
- по освоению процесса (рабочий, перспективный);

- по степени регламентации действий, устанавливаемых в документации (маршрутный, операционный, маршрутно-операционный).

Принадлежность процесса к единичному или унифицированному определяется количеством наименований объектов контроля, охватываемых процессом (один или группа однотипных или разнотипных объектов контроля).

Единичный процесс контроля применяют для изделий одного наименования, типоразмера и исполнения, а также для технологических процессов одного содержания независимо от типа производства.

Унифицированный процесс контроля в зависимости от общности конструктивных и технологических контролируемых признаков объектов бывает типовым и унифицированным.

Унифицированный типовой процесс контроля используют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке рабочего процесса контроля; как базу для разработки стандартов на типовые процессы контроля.

Унифицированный групповой процесс контроля применяют: в качестве рабочего процесса контроля при наличии в документации описания всех операций; как информационную основу при разработке группового рабочего процесса контроля.

Рабочий процесс контроля используется для конкретных объектов в соответствии с требованиями рабочей технической документации.

Перспективный процесс контроля разрабатывается как информационная основа для рабочих процессов контроля при переоснащении производства и рассчитан на применение более совершенных методов контроля, более производительных и экономически эффективных средств контроля и на изменение принципов организации технического контроля.

Применение маршрутного, операционного или маршрутно-операционного процесса контроля устанавливается в отраслевых стандартах или в стандартах предприятия.

Государственный стандарт устанавливает следующие объекты контроля: материал, полуфабрикат, заготовка, деталь, сборочная единица, комплекс, комплект, технологический процесс.

При контроле материала, полуфабриката, заготовки и детали в состав контролируемых объектов включены: марка материала

(кроме объекта деталь), геометрические и физико-химические параметры, внешние и внутренние дефекты, клейма (кроме объекта материал). Для сборочной единицы, комплекса и комплекта предусмотрен контроль геометрических и функциональных параметров, внешних и внутренних дефектов и клейм, а для технологического процесса – контроль качественных и количественных характеристик. Следует также подвергать проверке упаковку, комплектность, консервацию и сопроводительную документацию, если это предусмотрено ТУ.

При контроле технологических процессов допускается проверка параметров вспомогательных материалов, средств технологического оснащения, в том числе средств контроля, технологической дисциплины, точности и стабильности ТП, характеристики внешних условий. По усмотрению разработчика допускается контролировать другие признаки (эргономические, эстетические и т. д.).

Процессы контроля должны обеспечивать решение задач, установленных для входного, операционного и приемочного контроля, и охватывать весь ТП и его результаты, предотвращать попадание дефектных заготовок и изделий на последующие этапы изготовления.

При входном контроле решают задачи проверки соответствия качества материалов, полуфабрикатов, заготовок, комплектующих деталей и сборочных единиц требованиям, установленным в стандартах, ТУ, договорах о поставках. Входной контроль на предприятии-потребителе осуществляет специальное подразделение.

При операционном контроле решают задачи проверки соответствия контролируемых признаков деталей и сборочных единиц в процессе изготовления предъявляемым к ним требованиям, а также выявляют количественные и качественные характеристики ТП. Операционный контроль осуществляет исполнитель операции (рабочий, бригадир, испытатель), руководитель участка (мастер, старший мастер), контролер или мастер отдела технического контроля.

При приемочном контроле решают задачи проверки соответствия качества готовых изделий требованиям, установленным в нормативно-технической документации, в том числе комплектность, упаковку и консервацию изделий, её пригодность к транспортированию и использованию. Приемочный контроль осуществляют контролер, мастер ОТК и (при необходимости) представитель заказчика.

Процессы контроля подразделяют на четыре категории, применяемые по усмотрению предприятия. По полноте охвата контроле-

ром любая категория контроля подразделяется на сплошной и выборочный контроль, а по связи с объектом контроля – на непрерывный, периодический и летучий.

Сплошной контроль применяют в условиях особо высоких требований к уровню качества изделий, у которых абсолютно недопустим пропуск дефектов в дальнейшее производство или эксплуатацию.

Выборочный контроль применяют для изделий, когда их количество достаточно для получения выборок с установленным риском поставщика и потребителя, при большой трудоемкости контроля, а также при контроле, связанном с разрушением изделий, и на операциях, выполняемых на автоматических и поточных линиях. Как правило, пользуются статистическими методами контроля.

Непрерывный контроль применяют для проверки ТП в случаях их нестабильности и необходимости постоянного обеспечения определенных количественных и качественных характеристик. Как правило, используют автоматические или полуавтоматические средства контроля.

Периодический контроль (сплошной или выборочный) применяют для проверки изделий и ТП при установившемся производстве и стабильных ТП.

Летучий контроль (только выборочный) применяют для малоответственных изделий и ТП.

Государственный стандарт (ЕСТПП. Правила разработки процессов контроля) устанавливает основные положения и этапы разработки процессов и операций технического контроля, а также задачи на этапах их разработки при технологической подготовке производства.

Технический контроль (ТК) является неотъемлемой составной частью ТП изготовления изделия и разрабатывается в виде процесса ТК, операции ТК. Под техническим контролем понимается совокупность технологических операций ТК, выполняемых при изготовлении изделия и его составной части. Процессы ТК разрабатываются для входного контроля материалов, заготовок, полуфабрикатов, а также комплектующих деталей и сборочных единиц; операционного контроля деталей и сборочных единиц; приемочного контроля изделий.

Операции ТК разрабатывают для входного контроля несложных объектов, операционного контроля ТП или обрабатываемой

заготовки после завершения определенной технологической операции. Процессы (операции) ТК разрабатывают вместе с ТП изготовления изделия с обеспечением необходимой взаимосвязи и взаимодействия между ними. Уровень автоматизации и механизации процессов (операций) ТК должен отвечать требованиям ТП изготовления изделия, условиям и типу производства.

При разработке процессов (операций) ТК необходимо обеспечить единство конструкторских, технологических и измерительных баз. Операции ТК должны предусматривать получение информации для регулирования ТП, а также обеспечивать предупреждение с заданной вероятностью пропуска дефектных материалов, заготовок, полуфабрикатов, деталей и сборочных единиц для последующего изготовления изделия. Процессы (операции) ТК должны соответствовать требованиям техники безопасности и промышленной санитарии, а также Государственным стандартам и согласовываться с отделом технического контроля.

Порядок разработки процессов (операций) ТК включает 17 этапов [9]:

1) анализ задания на разработку процесса (операции) ТК;
2) классификация объектов контроля;
3) выбор объектов контроля;
4) группирование объектов контроля по метрологическим признакам;
5) группирование объектов контроля;
6) количественная оценка групп изделий (объектов контроля);
7) выбор действующего типового, группового процесса ТК или поиск аналога единичного процесса ТК;
8) составление технологического маршрута процесса ТК;
9) выбор контролируемых параметров;
10) разработка технологических операций ТК;
11) определение объема контроля;
12) выбор схем контроля;
13) выбор метода контроля;
14) выбор средств контроля;
15) расчет точности, производительности и экономической эффективности вариантов процессов (операций) ТК;
16) оформление документации на процессы (операции) ТК;
17) разработка документации результатов контроля.

Задачи, решаемые на каждом этапе, и основные документы, обеспечивающие решение этих задач, изложены в ГОСТе. Необ-

ходимость каждого этапа, состав задач и последовательность их решения определяются разработчиком процесса ТК в зависимости от условий производства или устанавливаются стандартами предприятия.

Нормативно-технические документы на ТК в общем случае включают стандарты «Технический контроль. Термины и определения», «Средства контроля. Термины и определения», «Правила разработки процессов (операций) технического контроля», «Правила выбора средств контроля»; классификатор объектов контроля; классификатор технологических операций технического контроля; методику выбора объектов контроля; методику размещения постов контроля по технологическому процессу изготовления и ремонта изделий; методику выбора контролируемых параметров; методику выбора схемы контроля; методику выбора метода контроля; стандарты типовых процессов (операций) технического контроля.

Испытания ЭА представляют собой экспериментальное определение при различных воздействиях количественных и качественных характеристик изделий при их функционировании. При этом как сами испытываемые изделия, так и воздействия могут быть смоделированы. Цели испытаний различны на различных этапах проектирования и изготовления ЭА. К основным целям испытания, общим для всех видов ЭА, можно отнести: выбор оптимальных конструктивно-технологических решений при создании новых изделий; доводку изделий до необходимого уровня качества; объективную оценку качества изделий при их постановке на производство, в процессе производства и при техническом обслуживании; гарантирование качества изделий при международном товарообмене.

Испытания служат эффективным средством повышения качества, так как позволяют выявить: недостатки конструкции и технологии изготовления ЭА, приводящие к срыву выполнения заданных функций в условиях эксплуатации; отклонения от выбранной конструкции или принятой технологии, допущенные в производстве; скрытые случайные дефекты материалов и элементов конструкции, не поддающиеся обнаружению существующими методами технического контроля; резервы повышения качества и надежности разрабатываемого конструктивно-технологического варианта изделия. По результатам испытаний изделий в производстве разработчик ЭА устанавливает причины снижения качества. Если эти причины установить не удается, совершенствуют методы и средства контроля изделий и ТП их изготовления.

Для повышения качества выпускаемой ЭА на конечных операциях ТП их изготовления проводят предварительные испытания, позволяющие выявить изделия со скрытыми дефектами. Режимы этих испытаний выбирают такими, чтобы они обеспечивали отказы изделий, содержащих скрытые дефекты, и в то же время не вырабатывали ресурса тех изделий, которые не содержат дефектов, вызывающих при эксплуатации отказы. Эти испытания часто называют технологическими тренировками (термотоковая тренировка, электротренировка, тренировка термоциклами и др.).

Программа и методы проведения испытаний определяются конкретным видом и назначением ЭА, а также условиями эксплуатации. Для контроля качества и приемки изделий устанавливают основные категории контрольных испытаний, оговоренные в ТУ: приемо-сдаточные, периодические и типовые.

Каждая категория испытаний может включать несколько видов испытаний (электрические, механические, климатические, на надежность и др.) и видов контроля (визуальный, инструментальный и др.). В зависимости от особенностей эксплуатации и назначения изделий, а также специфики их производства некоторые виды испытаний выделяют в отдельные категории испытаний (на надежность – безотказность, долговечность, сохраняемость и др.). Виды испытаний и контроля, последовательность проведения, проверяемые параметры и их значения устанавливаются в ТУ (стандартах, программах, методиках и др.).

Во время испытаний применяют сплошной или выборочный контроль по ТУ и плану контроля. Результаты испытаний считаются отрицательными, если обнаружено несоответствие изделия хотя бы одному требованию ТУ для проводимой категории испытаний. Применяемые средства испытаний, измерения и контроля, а также методики измерений должны соответствовать требованиям метрологического обеспечения. Запрещается использовать средства испытаний, не прошедших метрологическую аттестацию.

Основным организационно-методическим документом при испытаниях ЭА является программа испытаний. Она регламентирует цели испытаний, объем и методику проводимых исследований; порядок, условия, место и сроки проведения испытаний; ответственность за обеспечение и проведение испытаний; ответственность за оформление протоколов и отчетов.

В рамках курсовой работы могут быть разработаны указанные выше документы и приведены результаты механических и клима-

тических испытаний, испытаний на электромагнитную совместимость и т. п. Результат четвертой главы – доказательство, что затребованные в ТЗ параметры объекта проектирования и реализующего его производственного процесса обеспечивают соответствие требований при указанных условиях эксплуатации.

4.2.5. Рекомендации по оформлению результатов проектирования

В заключении перечисляются основные требования из технического задания и указывается, какие конкретные количественные показатели этих требований достигнуты в рамках проекта. Заключение не может содержать общих фраз, только конкретные (желательно количественные) показатели проекта. Если фраза из заключения может быть без изменения перенесена в другой проект аналогичной тематики, значит она неправильная, её надо конкретизировать. Например:

«В процессе выполнения данной курсовой работы был разработан техпроцесс производства системной платы ультразвукового тестера УК1401. Для заданного объема выпуска (указывается значение) был произведен анализ исходных данных (трассировки схемы, перечня компонентов) и составлены схема сборки электронного модуля с базовой деталью (конкретные показатели схемы сборки), операционный (приводятся характеристики) и маршрутный техпроцессы (приводятся характеристики).

Также был произведен расчет комплексного показателя технологичности (приводятся значения) и сделан анализ объема выпуска (приводятся значения), в соответствии с которым рассчитано требуемое количество рабочих мест (приводятся значения), а также выбрано необходимое оборудование и спроектирована оснастка для производства электронного модуля (приводятся характеристики)».

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

5.1. НОРМАТИВНАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

В данном разделе представлены материалы, являющиеся нормативными документами по дисциплине. Приведен учебно-методический комплекс по дисциплине, а также её примерная базовая учебная программа.

5.1.1. Учебно-методический комплекс по дисциплине

ТЕХНОЛОГИИ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
Направление подготовки бакалавров и магистров 211 000 «Конструирование и технология электронных средств»
Кафедра ИУ-4
Доцент, канд. техн. наук Гриднев Владимир Николаевич Доцент, канд. техн. наук Гриднева Галина Николаевна тел. (499)263–65–53
Основная цель дисциплины: ознакомить и обучить студентов современным конструкциям и технологиям получения коммутационных структур различного назначения, применяемых в наноинженерии; сформировать у студентов интерес к данной области науки и техники и устойчивую мотивацию к самообразованию.
Планируемые результаты изучения дисциплины 1. Получение знаний о существующих и разрабатываемых в настоящее время коммутационных структурах, методах и технологиях их изготовления, направлениях миниатюризации структур, применяемом оборудовании.

2. Формирование знаний, умений и навыков по следующим направлениям:

- конструирование и технология коммутационных структур в электронных модулях 1-го уровня;
- коммутационные структуры в жидкокристаллических и наноплазменных модулях (дисплеях);
- оптоволоконные коммутационные структуры;
- технологические процессы и оборудование в производстве коммутационных структур различных типов;
- развитие коммутационных структур и приближение их к нанометрическим размерам.

В результате изучения дисциплины приобретаются следующие профессиональные знания, умения и навыки:

1) знания:

- коммутационных структур (печатных плат) различных типов на жестком и гибком основании для электрической связи компонентов электронных модулей;
- коммутационных структур в жидкокристаллических и наноплазменных электронных модулях;
- оптоволоконных коммутационных структур в электронных модулях;
- полупроводниковых коммутационных структур в электронных модулях нулевого уровня;

2) умения:

- проектировать коммутационные структуры различных типов;
- рассчитывать электрические параметры различных коммутационных структур с учетом помех и потерь передаваемых сигналов;
- проектировать ТП изготовления коммутационных структур различных типов;
- качественно и количественно оценивать технологичность коммутационной структуры;

3) навыки:

- разработки операционных ТП для заданного объема выпуска коммутационной структуры;
- расчета режимов технологических операций производства структур различных типов;
- выбора технологического оборудования и расчета его загрузки;

- конструирования и расчета коммутационных структур различных типов.

Место дисциплины в учебном плане специальности

Дисциплина способствует формированию навыков конструкторско-технологического проектирования объектов наноинженерии, и в частности коммутационных структур различных типов, и применению их в курсовом и дипломном проектировании.

Дисциплина требует применения знаний, умений и навыков, полученных ранее в курсах «Физика»; «Химия»; «Теоретическая механика»; «Инженерная и машинная графика»; «Вычислительная техника и информационные технологии»; «Технология конструкционных материалов»; «Материаловедение»; «Основы конструирования приборов»; «Проектирование ЭВС»; «Микросхемотехника»; «Технология приборостроения в наноинженерии».

Дисциплина входит в комплекс специальных дисциплин, осуществляющих конструкторско-технологическую подготовку будущих специалистов по направлению «Наноинженерия».

Структура дисциплины

Вводная лекция.

Особенности проводящего рисунка ПП различных типов.

Классы точности и плотности печатного монтажа. Виды узких мест проводящего рисунка и их геометрический расчет.

Конструкторско-технологические особенности односторонних и двусторонних печатных плат. Материалы, области применения ПП. Конструктивно-технологические особенности многослойных печатных плат с металлизацией сквозных отверстий. Конструкционные материалы. МПП послойного наращивания, попарного прессования, с открытыми контактными площадками, МПП с технологией достраиваемых слоев с открытыми и «глухими» микропереходами с высокой плотностью проводящего рисунка.

Гибкие печатные платы, гибкие печатные кабели, гибко-жесткие ПП, рельефные ПП. Особенности конструкций и области применения.

Особенности конструирования ПП различных типов. Разработка чертежа ПП и технологических требований к ПП.

Способы получения рисунка ПП: фотографический, сеткографический, способ фотоформирования, механический. Физические схе-

мы и технология реализации каждого способа, разрешающая способность, геометрическая точность рисунка печатной схемы. Способы получения проводящего рисунка ПП: химический – травление Cu (фольга) с пробельных мест, химический – осаждение Cu в зонах проводящего рисунка, электрохимический – наращивание Cu в зонах проводящего рисунка, термический – напыление Cu в зонах проводящего рисунка. Прямая металлизация диэлектрика в переходных отверстиях.

Физические схемы и технология реализации каждого способа. Геометрическая точность проводящего рисунка. Явления подтравливания и разращивания проводящего рисунка в зависимости от применяемых материалов и длительности операций. Геометрический расчет точности проводящего рисунка.

Химический метод изготовления ПП с защитой проводящего рисунка фото- или сеткографическим способом или маской Sn–Pb при травлении фольги с пробельных мест. Технология метода, геометрия проводящего рисунка. Области применения: ОПП, внутренние слои МПП.

Комбинированный позитивный метод и тентинг-метод с образованием проводящего рисунка на поверхности и в объеме (металлизированные отверстия), фольгированного диэлектрика. Технология методов, геометрия проводящего рисунка. Возможности изготовления ДПП 4-го и 5-го классов точности. Области применения: ДПП и наружные слои МПП с металлизацией сквозных отверстий.

Электрохимический и фотоаддитивный методы изготовления ПП на нефольгированном диэлектрике. Технология методов и целесообразность их применения для изготовления ПП высоких классов точности. Применение электрохимического метода для изготовления рельефных ПП с проводящим рисунком в объеме диэлектрического основания.

Промышленное оборудование для механической обработки исходного материала и заготовок ПП: раскрой и резка диэлектриков, координатное сверление и штифтование пакетов заготовок, сверление монтажных и переходных отверстий на станках с ЧПУ, химико-механическая подготовка поверхности фольги, удаление технологических полей заготовок скрайбированием и фрезерованием.

Оборудование для получения рисунка печатной схемы: нанесение сухого пленочного фоторезиста, экспонирование с фотошаблона; проявление и закрепление рисунка; удаление СПФ с пробельных мест.

Химико-гальванические линии автооператорного и конвейерного типа: предварительная металлизация отверстий, гальваническое на-

ращивание Cu и металлорезиста в зонах проводящего рисунка; травление Cu с пробельных мест; удаление фоторезистивной маски; нанесение иммерсионных покрытий. Оборудование для нанесения паяльной маски, горячего лужения, электрического и оптического контроля целостности проводящего рисунка.

Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий: классические структуры МПП без внутренних и с внутренними межслойными переходами. Типовые методы изготовления проводящего рисунка на внутренних и наружных слоях (химический и комбинированный позитивный методы). Особенности совмещения слоев по базовому (*pin-lam*) и безбазовому (*mass-lam*) методам. Технология и условия прессования пакетов МПП.

Структуры современных МПП с ламинатом на наружных слоях, с фольгой на наружных слоях; структуры 1–*n*–1, 2–*n*–2 с наращиваемыми наружными слоями по технологии *HDI* (*High Density Interconnections*). Технология получения «глухих» и скрытых микропереходных отверстий. Перспектива развития конструкций и технологий ПП.

Пространственная компоновка электронных модулей 1-го, 2-го и 3-го уровней. Базовые детали, базовые несущие конструкции (БНК). Виды монтажа: печатный, навесной, проводной на ПП, ленточными кабелями, жгутовой. Виды контактных соединений: пайкой, сваркой, склеиванием, накруткой, механическое соединение.

Навесные компоненты, монтируемые в отверстия и на поверхность. Варианты установки КМО и КМП на ПП: без зазора, с зазором, на прокладку, на теплоотвод. Способы фиксации компонентов на ПП: подпайкой, подгибкой выводов, с зиг-замком, приклеиванием.

Технология сборки ЭМ на КМО: поставка, кассетирование, подготовка выводов, установка, пайка.

Способы установки КМО на ПП: вручную, со световой индикацией, механизированно по шаблону, автоматизированно (схемы установки, производительность).

Способы пайки КМО: вручную, волной припоя, селективная пайка. Влияние формы волны припоя на качество пайки.

Технология сборки ЭМ на КМП: поставка, кассетирование, нанесение паяльной пасты, установка, пайка.

Установка КМП: селективная, механизированная и автоматизированная (схемы, производительность).

Паяльные пасты: состав, свойства, способы нанесения, оплавление. Термопрофили туннельных печей оплавления. Обеспечение ка-

чества пайки КМП: дозирование паяльной пасты, точность установки КМП, характерные дефекты при монтаже КМП.

Технология монтажа накруткой: схема контактных соединений, особенности монтажного поля, провода и инструменты, механизация монтажа.

Технология монтажа ленточными кабелями: виды ленточных проводов, способы снятия изоляции, способы получения контактных соединений при монтаже разъемов.

Технология жгутового монтажа: типы монтажных проводов, технология снятия изоляции, раскладка проводов на шаблоне, маркировка проводов, вязка жгутов.

Технология встраиваемых компонентов при монтаже ЭМ 1-го уровня: типы компонентов, конструктивные особенности ПП для встраивания компонентов.

Современные тенденции конструктивно-технологического развития электронных модулей ЭВС.

Анализ исходных данных: принципиальная схема, топология ПП, сборочный чертеж ЭМ, варианты установки ИЭТ на ПП.

Проектирование принципиальной схемы ЭМ и схемы разводки ПП на базе машинных пакетов и других средств программного обеспечения.

Анализ и расчет технологичности ЭМ: состав и весовая значимость базовых показателей технологичности, Принцип сочетания количественных и качественных показателей технологичности.

Методы анализа и расчета технологичности. Система коэффициентов.

Коэффициент конструктивно-технологической компоновки ЭМ (Кктк). Уровни Кктк при различных компоновках КМО, КМП и смешанном монтаже. Присвоение значимости различным конструктивным компоновкам ЭМ.

Коэффициент состава компонентов (Кснк). Оценка уровней технологичности в зависимости от установки КМО и КМП разных типов (чип-КМП, чип-диоды, ИМС с различным шагом выводов, с *J*-выводами и шариковыми выводами.

Разработка схемы сборки ЭМ с базовой деталью. Правила разработки схемы сборки: размещение устанавливаемых компонентов и деталей, указание технологических действий, размещение на схеме сборочных единиц, входящих в состав ЭМ.

Разработка маршрутного ТП сборки ЭМ на базе схемы сборки. Выбор оборудования и оснастки на основе расчета такта выпуска $Тв = Фд \cdot 60/N$ [мин/шт.].

Проектирование операционного ТП: состав штучного времени операции. Понятие о технологических переходах. Примеры технологических переходов на различных сборочных операциях. Определение времени переходов.

Разработка структур операций и минимизация времени переходов. Примеры структур операций.

Разработка операционного эскиза с изменением состояния базовой и устанавливаемых деталей. Таблица и время технологических переходов. Схемы базирования собираемых деталей.

Некоторые сведения из теории базирования: о степенях свободы, виды технологических баз и их условные обозначения, погрешность базирования и погрешность установки, расчет точности сборочной операции.

Оценка эффективности сборки ЭМ. Расчет, хронометраж и выбор структур операций по методике MTV. Выбор варианта операции по технологической себестоимости.

Комплексная разработка сборочно-монтажного производства: анализ номенклатуры собираемых объектов, объемов и периодичности их выпуска. Состав оборудования и принципы построения прототипных сборочно-монтажных производств.

Разработка планировки сборочно-монтажного производства: перемещения материальных и информационных потоков, заготовительные и сборочно-монтажные участки. Компоновка сборочно-монтажных линий, заготовительных участков и участков складирования.

Вопросы проектирования технологической оснастки: схема изменения состояния собираемого объекта, технологические инструменты и их перемещения, кинематическая схема приспособления.

Конструктивная компоновка приспособления: корпусные детали, закрепление инструментов, размещение элементов привода инструментов.

Кинематические и точностные расчеты приспособлений. Выбор материалов основных деталей и их термообработки.

Практические занятия и лабораторные работы

5-й семестр:

1. Лабораторная работа № 1. Исследование геометрических параметров проводящего рисунка коммутационных структур.

2. Лабораторная работа № 2. Исследование качества переходных отверстий ПП.

3. Лабораторная работа № 3. Изучение операций и оборудования для промышленного производства ПП.

4. Лабораторная работа № 4. Изучение операций поверхностного монтажа КМП.

6-й семестр:

1. Лабораторная работа № 1. Разработка принципиальной схемы ЭМ с помощью САПР.

2. Лабораторная работа № 2. Разводка проводящего рисунка ПП на базе стандартного вычислительного пакета.

3. Лабораторная работа № 3. Адаптация электронного проекта ЭМ к условиям производства на базе стандартного машинного пакета.

4. Лабораторная работа № 4. Практическое применение машинного пакета для программирования технологического оборудования.

Организация учебных занятий по дисциплине

Дисциплина построена по модульному принципу, изучение модулей завершается выполнением студентами контрольных мероприятий. Отдельные вопросы предлагаются для самостоятельного ознакомления.

Все практические занятия по курсу проходят в специализированной лабораторной аудитории, оборудованной всеми необходимыми техническими средствами – установка поверхностного монтажа, фрезеровочно-сверлильный станок с ЧПУ, установка для пайки оплавлением и др.

По всему объему курса разработаны мультимедийные презентации, которые используются при проведении лекционных и практических занятий.

Семестры – 5-й (экзамен), 6-й (зачет), 7-й (диф. зачет).

Методическое обеспечение

Основная литература

1. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация : учебное пособие для вузов / В.Г. Алексеев, В.Н. Гриднев и др. – М. : Высшая школа, 1984. – 392 стр., ил.
2. *Медведев А*. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.
3. *Леухин В.Н*. Основы конструирования и технологии производства РЭС : учебное пособие. – Йошкар-Ола : МарГУ, 2006. – 344 с.

4. Технологии в производстве электроники. Часть I. Справочник по производству печатных плат / Под ред. П. Семенова. – М. : ООО Группа ИТД, 2007. – 586 с., ил.
5. *Пирогова Е.В*. Проектирование и технология печатных плат : учебник. – М. : Форум, ИНФРА-М, 2005. – 560 с. (Высшее образование.)
6. *Гриднев В.Н*. Конспект лекций по дисциплине «Технология электронных средств».

Дополнительная литература

7. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. В двух книгах. Книга 1. – М. : Техносфера, 2011.
8. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. В двух книгах. Книга 2. – М. : Техносфера, 2011.
9. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. 2-изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М. : ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.

Мультимедийные и интерактивные средства, электронные учебники

Для информационно-методического обеспечения курса разработан интерактивный портал, находящийся по адресу *http*://*nano-lab.iu*4.*bmstu.ru*/.

На портале в электронном виде размещены методические материалы для лекций и подготовки к лабораторным работам, а также самостоятельного изучения разделов курса. Представлены дополнительные справочные материалы, библиотека литературы и глоссарий терминов.

Объем. Всего 204 ч, в том числе лекций – 68 ч, лабораторных работ (практических семинаров) – 34 ч, самостоятельная проработка курса, подготовка к контрольным мероприятиям – 51 ч, курсовая работа – 51 ч.

Приложения (на *CD*-диске)

- Конспект лекций по курсу.
- Билеты по курсу.
- Примеры ДЗ.
- Дополнительные методические материалы.

5.1.2. Примерная базовая программа дисциплины

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Утверждаю
Первый проректор –
проректор по учебной работе
МГТУ им. Н.Э. Баумана
_____ _____
«___» _____ 2014 г.

Регистрационный номер: ___

Программа учебной дисциплины

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Автор(ы): В.Н. Гриднев, Г.Н. Гриднева
Кафедра «Проектирование и технология производства электронной аппаратуры»

Виды занятий	Объем по семестрам, ч				
	Всего	5-й семестр 17 недель	6-й семестр 17 недель	7-й семестр 17 недель	8-й семестр 17 недель
Лекции	102	68	34		
Семинары	17	17		кр	
Лабораторные работы	34	17	17		
Практические занятия					
Самостоятельная работа	68	34	34	практика	
Трудоемкость, ч	221	136	85		
Трудоемкость, зачетные единицы*	7	5	3		
Оценка знаний, зачет**/экзамен		экзамен	зачет		
Трудоемкость экзамена***, ауд/сам/ ч					

Примечания: * – трудоемкость в зачетных единицах соответствует учебному плану; ** – зачет по дисциплине и трудоемкость курсовых проектов (работ) входят в трудоемкость дисциплины; *** – один семестровый экзамен выражается одной зачетной единицей.

Москва, 2014 г.

Программа учебной дисциплины составлена для студентов, обучающихся по основной образовательной программе МГТУ им. Н.Э. Баумана:

Шифр направления/ специальности	Индекс выпускающей кафедры	Наименование направления
2110000062	ИУ-4	бакалавр
2110000068	ИУ-4	магистр

Раздел 1. Общая характеристика дисциплины

1.1. Цель преподавания дисциплины состоит в содействии формированию технологической подготовки студентов в области производства электронных модулей электронно-вычислительных средств различного применения, а также в содействии формированию знаний, умений и навыков в области конструирования и изготовления модулей всех уровней сложности.

1.2. Задачами преподавания дисциплины являются:

- формирование общих представлений и знаний в области;
- изучение технологии изготовления печатных плат различных типов;
- приобретение навыков проектирования ПП;
- изучение технологии электромонтажных работ в производстве ЭМ различных уровней;
- проектирование операций и ТП сборки ЭМ первого уровня;
- разработка маршрутных и операционных ТП сборки.

В области воспитания личности задачей дисциплины является комплекс мероприятий, направленных на формирование целеустремленности, организованности, трудолюбия, ответственности, самостоятельности, гражданственности, приверженности этическим ценностям, добросовестности, доброжелательности, коммуникабельности, профессиональной подготовленности к выполнению работ, определяемых квалификацией, способности к позитивно-критическому восприятию новой информации, к приращению общих и профессиональных знаний, к выдвижению новых конкурентоспособных идей, к решению нестандартных задач и нахождению новых методов решения традиционных задач, к использованию знаний для практической реализации новшеств, готовности к дополнительной ответственности и дополнительным нагрузкам, укреплению нравственности, развитию общекультурных потреб-

ностей, творческих способностей, социальной адаптации, коммуникативности и толерантности.

1.3. Место дисциплины в структуре ООП.

Дисциплина входит в профессиональный цикл ООП бакалавриата. Изучение дисциплины предполагает предварительное освоение следующих дисциплин учебного плана:

1. Математический анализ (модуль «Дифференциальное исчисление функций одного переменного»).
2. Аналитическая геометрия (модули «Векторная алгебра», «Матрицы и системы линейных алгебраических уравнений»).
3. Интегралы и дифференциальные уравнения.
4. Линейная алгебра и функции многих переменных.
5. Теория вероятности и математическая статистика.
6. Информатика.
7. Физика (модули «Физические основы термодинамики», «Электричество и магнетизм», «Электромагнитные волны и оптика», «Основы квантовой теории», «Физика твердого тела»).
8. Химия (модули «Строение вещества», «Общие закономерности протекания химических процессов», «Химические и электрохимические процессы в растворах», «Химия элементов»).
9. Физико-химические основы электронных технологий.
10. Теоретическая механика.
11. Материаловедение.
12. Инженерная и компьютерная графика.
13. Технология конструкционных материалов.
14. Технология приборостроения.
15. Основы конструирования приборов.
16. Основы аналого-цифровой схемотехники.
17. Теоретические основы электроники.

Освоение данной дисциплины необходимо как предшествующее для следующих дисциплин ООП:

- автоматизация проектирования и конструирования ЭС;
- проектирование источников питания;
- конструкторско-технологические базы данных;
- управление качеством в производстве ЭС;
- автоматизация производства ЭС;
- конструкторское проектирование ЭС;
- системы функционального моделирования.

После освоения данной учебной дисциплины студент подготовлен для прохождения конструкторско-технологических практик

после 6-го семестра и на 7-м семестре, а также для проведения научно-исследовательских работ в 5–8-м семестрах и выполнению квалификационной работы бакалавра.

Раздел 2. Требования к результатам освоения содержания дисциплины

После освоения дисциплины студент должен приобрести знания, умения и владения, соответствующие компетенциям ООП.

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование элементов следующих компетенций в соответствии с ОС МГТУ им. Н.Э. Баумана по данному направлению.

Познавательные компетенции (П):

- способность воспринимать математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания, умение самостоятельно приобретать и применять их при решении базовых профессиональных и социальных задач (П-1);
- культура мышления, способность выстраивать логику рассуждений и высказываний, основанных на интерпретации соответствующих данных (П-2);
- способность анализировать и оценивать уровни своих компетенций в сочетании с готовностью к непрерывному образованию, в том числе обучению в магистратуре, переобучению и самообучению, профессиональной мобильности (П-3);
- свободное владение русским языком как средством делового общения и обмена научно-технической информацией (П-4);
- владение по крайней мере одним из иностранных языков на уровне социального и профессионального общения (П-5);
- способность к поиску, хранению, переработке и трансляции информации посредством современных компьютерных технологий, в том числе в глобальных компьютерных сетях (П-6);
- способность анализировать профессиональную информацию, выделять в ней главное, структурировать, оформлять и представлять в виде реферативных обзоров (П-7).

Творческие компетенции (Т):

- способность выявлять, формулировать, преобразовывать поставленную задачу и принимать верные решения на основе имеющихся знаний и навыков (Т-1);
- способность к самостоятельному выбору способа решения проблемы из альтернативных вариантов на основе выявления и устранения противоречий в системе (Т-2);

- способность к переносу знаний из одной области в другую для генерации идей (Т-3);
- способность решать нестандартные задачи, в том числе за пределами профессионального поля деятельности (Т-4).

Социально-личностные компетенции (СЛ):

- способность строить в коллективе конструктивные отношения, эффективно работать в творческих группах, создавать в коллективе отношения сотрудничества, использовать методы конструктивного решения конфликтных ситуаций, в том числе в мультикультурной профессиональной среде (СЛ-1);
- способность соблюдать общепринятые в социальном межкультурном взаимодействии нормы морали и права, уважать историческое наследие и культурные традиции, толерантно воспринимать социальные и культурные различия (СЛ-2);
- готовность участвовать в принятии групповых решений, разрешать конфликты ненасильственно, участвовать в поддержании и улучшении демократических институтов (СЛ-3);
- владение культурой безопасности, экологическим сознанием и риск-ориентированным мышлением, при котором вопросы безопасности и сохранения окружающей среды рассматриваются в качестве важнейших приоритетов в жизни и деятельности (СЛ-4);
- способность формировать и отстаивать свою гражданскую позицию на основе патриотизма, осознания социальной значимости своей будущей профессии, устойчивой мотивации к профессиональной деятельности, ощущения принадлежности к выдающимся научно-педагогическим школам Университета и приверженности корпоративным ценностям ИМТУ–МВТУ–МГТУ им. Н.Э. Баумана (СЛ-5);
- готовность к самостоятельной работе, владение методами достижения высокой работоспособности и обеспечения эффективности своих действий, владение приемами защиты от эмоциональной перегрузки (СЛ-6).

Общепрофессиональные компетенции (ОП):

- способность выполнять и редактировать изображения и чертежи при подготовке конструкторско-технологической документации с использованием методов начертательной геометрии и инженерной графики, в том числе на базе современных систем автоматизации проектирования (ОП-1);

- готовность проводить расчеты, оценку функциональных возможностей и проектировать наиболее распространенные детали и узлы машин, механизмов, приборов (ОП-2);
- способность использовать методы и средства метрологии для измерения физических величин, проводить сертификацию средств измерения, использовать стандарты и другие нормативные документы при оценке, контроле качества и сертификации продукции (ОП-3);
- способность анализировать, рассчитывать и моделировать электрические и магнитные цепи, электротехнические и электронные устройства, электроизмерительные приборы для решения профессиональных задач (ОП-4);
- способность использовать в профессиональной деятельности принципы современных промышленных технологий, сведения о материалах и способах их получения и обработки (ОП-5);
- способность поддерживать комфортное состояние среды обитания в зонах трудовой деятельности человека, идентифицировать негативные воздействия среды обитания, разрабатывать и реализовывать меры защиты производственного персонала, населения и среды обитания от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий (ОП-6).

Компетенции в проектно-конструкторской деятельности (ПР):

- способность проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектов (ПР-1);
- способность осуществлять сбор и анализ исходных данных для обоснованного выбора, расчета и проектирования элементов технологического оборудования различного функционального назначения с использованием средств автоматизации проектирования (ПР-2);
- способность разрабатывать проектную и техническую документацию, оформлять законченные проектно-конструкторские работы (ПР-3);
- готовность осуществлять контроль соответствия разрабатываемых проектов и технической документации стандартам, техническим условиям и другим нормативным документам (ПР-4).

Компетенции в производственно-технологической деятельности (ПТ):

- готовность внедрять результаты разработок в производство (ПТ-1);

- способность выполнять работы по технологической подготовке производства материалов и изделий электронной техники (ПТ-2);
- способность готовить документацию и участвовать в работе системы менеджмента качества на предприятии (ПТ-3);
- готовность организовывать метрологическое обеспечение производства материалов и изделий электронной техники (ПТ-4);
- способность осуществлять контроль соблюдения экологической безопасности (ПТ-5);
- владение основными методами защиты производственного персонала и населения от возможных последствий аварий, катастроф, стихийных бедствий (ПТ-6).

Компетенции в научно-исследовательской деятельности (НИ):

- способность собирать, анализировать и систематизировать отечественную и зарубежную научно-техническую информацию по профессиональной тематике (НИ-1);
- способность владеть основными приемами планирования, обработки и представления экспериментальных данных (НИ-2);
- способность применять физические и математические модели технологических процессов и оборудования для производства изделий электронной и микросистемной техники, микро- и наноэлектроники, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (НИ-3);
- способность обоснованно выбирать и реализовывать на практике эффективную методику экспериментального исследования параметров технологических процессов и оборудования для производства изделий электронной и микросистемной техники, микро- и наноэлектроники, а также использовать стандартные программные средства их компьютерного моделирования (НИ-4);
- готовность анализировать и систематизировать результаты исследований, представлять материалы в виде научных отчетов, публикаций, презентаций (НИ-5).

Компетенции в организационно-управленческой деятельности (ОУ):

- способность организовывать работу малых групп исполнителей (ОУ-1);
- готовность участвовать в разработке организационно-технической документации (графиков работ, инструкций, планов,

смет) установленной отчетности по утвержденным формам (ОУ-2);

- способность выполнять задания в области сертификации технических средств, систем, процессов, оборудования и материалов (ОУ-3);
- способность владеть методами профилактики производственного травматизма, профессиональных заболеваний, предотвращения экологических нарушений (ОУ-4).

Профильно-специализированные компетенции (ПК):

- готовность учитывать современные тенденции развития электроники, измерительной и вычислительной техники, информационных технологий в своей профессиональной деятельности (ПК-3);
- способность владеть основными приемами обработки и представления экспериментальных данных (ПК-5);
- способность собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию (ПК-6);
- способность владеть инженерной графикой и применять современные программные средства выполнения чертежей и подготовки конструкторско-технологической документации (ПК-7);
- способность проводить предварительное технико-экономическое обоснование проектов конструкций электронных средств (ПК-8);
- готовность осуществлять сбор и анализ исходных данных для расчета и проектирования деталей, узлов и модулей ЭС (ПК-10);
- способность разрабатывать проектную и техническую документацию в соответствии с техническим заданием, используя средства автоматизации проектирования (ПК-11, ПК-12);
- способность участвовать в выполнении работ по технологической подготовке производства (ПК-15);
- готовность организовывать метрологическое обеспечение производства ЭС (ПК-17);
- способность моделировать объекты и процессы, используя стандартные пакеты автоматизированного проектирования (ПК-20);
- готовность проводить эксперименты по заданной методике, анализировать результаты, составлять отчеты, создавать

презентации по результатам выполненной работы, оформлять результаты в виде статей и докладов (ПК-21, ПК-22);
- ♦ готовность участвовать в разработке технической документации и установленной отчетности (ПК-25);
- ♦ готовность к монтажу, настройке, испытанию и сдаче в эксплуатацию модулей ЭС (ПК-28);
- ♦ готовность к монтажу, настройке, испытанию и внедрению технологического оборудования (ПК-29);
- ♦ готовность использовать методы автоматизированного конструкторско-технологического проектирования (ПК-33);
- ♦ готовность разрабатывать инструкции по ремонту, настройке и испытанию ЭС и эксплуатации технологического оборудования (ПК-38).

Раздел 3. Структура дисциплины

3.1. Структура дисциплины в пятом семестре.

№	Трудоемкость в зачетных ед.	Часы		Контрольные мероприятия	Рейтинг	
		общ.	ауд.		макс.	мин.
Семестр 5	3	136	102	М1, М2, экзамен	100	60

Модуль 1. Технологии коммутационных структур ЭС.
Модуль 2. Технология сборки электронных модулей.

График выполнения контрольных мероприятий*																			
Сентябрь				Октябрь					Ноябрь				Декабрь				Январь			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23
									М1					М2						

* Примечание: экзамен (60–69 – удовлетворительно, 70–84 – хорошо, 85–100 – отлично).

3.2. Структура дисциплины в 6-м семестре.

№	Трудоемкость в зачетных ед.	Часы		Контрольные мероприятия	Рейтинг	
		общ.	ауд.		макс.	мин.
Семестр 6	2,5 (+1,5)	85 (+51)	51	М1, М2, зачет	100	60

Примечание: «+» – трудоемкость курсовой работы в 7-м семестре

Модуль 1. Технологическая оценка электронного модуля 1-го уровня.

Модуль 2. Проектирование технологического процесса сборки ЭС.

График выполнения контрольных мероприятий*																			
Февраль				Март				Апрель					Май					Июнь	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17				
6	13	20	27	6	13	20	27	3	10	17	24	31	1	8	15	22	29	5	12	19
						М1										М2				

Зачет (60 баллов и более).

* Примечание: все контрольные мероприятия должны быть сданы не менее чем на минимальную пороговую рейтинговую оценку.

Раздел 4. Содержание дисциплины

4.1. Виды учебной работы.

Виды учебной работы	Объем по семестрам, ч				
		бакалавр			
	Всего	5-й сем.	6-й сем.	6–7-й сем.	7-й сем.
Лекции	102	68	34	–	–
Семинары	17	17	–	–	–
Лабораторные работы	34	17	17	–	–
Практические занятия	0				
Самостоятельная работа	68	34	34		
самостоятельная проработка курса лекций		18	14		
домашнее задание	26	10	16	–	–
рубежный контроль	10	6	4		
практика	108	–	–	54	54
курсовая работа	51	–	–	–	51
Итого в часах	380	136	85	108	51
Итого в зачетных единицах*	10,8	3,5	2,3	3	1,4
Проверка знаний		экзамен	зачет	диф. зачет	диф. зачет

* Примечание: зачетные единицы в соответствии с учебным планом и рабочими годовыми учебными планами («отрезками»).

4.2. Содержание дисциплины в 5-м семестре.

4.2.1. Содержание лекционных занятий.

Модуль 1. Технологии коммутационных структур ЭС.

1–2. Вводная лекция.

Особенности проводящих сред коммутационных структур различных типов. Классы точности и плотности печатного монтажа. Виды узких мест проводящего рисунка и их геометрический расчет.

3–4. Конструкторско-технологические особенности односторонних и двусторонних печатных плат. Материалы, области применения ПП. Конструктивно-технологические особенности многослойных печатных плат с металлизацией сквозных отверстий. Конструкционные материалы. МПП послойного наращивания, попарного прессования, с открытыми контактными площадками, МПП с технологией достраиваемых слоев с открытыми и «глухими» микропереходами с высокой плотностью проводящего рисунка.

5–6. Гибкие печатные платы, гибкие печатные кабели, гибкожесткие ПП, рельефные ПП. Особенности конструкций и области применения.

Особенности конструирования ПП различных типов. Разработка чертежа ПП и технологических требований к ПП.

7–8. Способы получения рисунка ПП: фотографический, сеткографический, способ фотоформирования, механический. Физические схемы и технология реализации каждого способа, разрешающая способность, геометрическая точность рисунка печатной схемы. Способы получения проводящего рисунка ПП: химический – травление Cu (фольги) с пробельных мест, химический – осаждение Cu в зонах проводящего рисунка, электрохимический – наращивание Cu в зонах проводящего рисунка, термический – напыление Cu в зонах проводящего рисунка. Прямая металлизация диэлектрика в переходных отверстиях.

9–10. Физические схемы и технология реализации каждого способа. Геометрическая точность проводящего рисунка. Явления подтравливания и разращивания проводящего рисунка в зависимости от применяемых материалов и длительности операций. Геометрический расчет точности проводящего рисунка.

Химический метод изготовления ПП с защитой проводящего рисунка фото- или сеткографическим способом или маской Sn–Pb при травлении фольги с пробельных мест. Технология метода, геометрия проводящего рисунка. Области применения: ОПП, внутренние слои МПП.

11–12. Комбинированный позитивный метод и тентинг-метод с образованием проводящего рисунка на поверхности и в объеме (металлизированные отверстия) фольгированного диэлектрика. Технология методов, геометрия проводящего рисунка. Возможности изготовления ДПП 4-го и 5-го классов точности. Области применения: ДПП и наружные слои МПП с металлизацией сквозных отверстий.

Электрохимический и фотоаддитивный методы изготовления ПП на нефольгированном диэлектрике. Технология методов и целесообразность их применения для изготовления ПП высоких классов точности. Применение электрохимического метода для изготовления рельефных ПП с проводящим рисунком в объеме диэлектрического основания.

13–14. Промышленное оборудование для механической обработки исходного материала и заготовок ПП: раскрой и резка диэлектриков, координатное сверление и штифтование пакетов заготовок, сверление монтажных и переходных отверстий на станках с ЧПУ, химико-механическая подготовка поверхности фольги, удаление технологических полей заготовок скрайбированием и фрезерованием.

15–16. Оборудование для получения рисунка печатной схемы: нанесение сухого пленочного фоторезиста, экспонирование с фотошаблона; проявление и закрепление рисунка; удаление СПФ с пробельных мест.

Химико-гальванические линии автооператорного и конвейерного типа: предварительная металлизация отверстий, гальваническое наращивание Cu и металлорезиста в зонах проводящего рисунка; травление Cu с пробельных мест; удаление фоторезистивной маски; нанесение иммерсионных покрытий. Оборудование для нанесения паяльной маски, горячего лужения, электрического и оптического контроля целостности проводящего рисунка.

17–18. Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий: классические структуры МПП без внутренних и с внутренними межслойными переходами. Типовые методы изготовления проводящего рисунка на внутренних и наружных слоях (химический и комбинированный позитивный методы). Особенности совмещения слоев по базовому (*pin-lam*) и безбазовому (*mass-lam*) методам. Технология и условия прессования пакетов МПП.

19–20. Структуры современных МПП с ламинатом на наружных слоях, с фольгой на наружных слоях; структуры 1–*n*–1, 2–*n*–2 с наращиваемыми наружными слоями по технологии *HDI* (*High Density Interconnections*). Технология получения глухих и скрытых микропереходных отверстий. Перспектива развития конструкций и технологий ПП.

Модуль 2. Технология сборки электронных модулей 1-го уровня.

1. Пространственная компоновка электронных модулей 1-го, 2-го и 3-го уровней. Базовые детали, базовые несущие конструк-

ции. Виды монтажа: печатный, навесной, проводной на ПП, ленточными кабелями, жгутовой. Виды контактных соединений: пайкой, сваркой, склеиванием, накруткой, механическое соединение.

2. Навесные компоненты, монтируемые в отверстия и на поверхность. Варианты установки КМО и КМП на ПП: без зазора, с зазором, на прокладку, на теплоотвод. Способы фиксации компонентов на ПП: подпайкой, подгибкой выводов, с зиг-замком, приклеиванием.

3. Технология сборки ЭМ на КМО: поставка, кассетирование, подготовка выводов, установка, пайка.

Способы установки КМО на ПП: вручную, со световой индикацией, механизированно по шаблону, автоматизированно (схемы установки, производительность).

4. Способы пайки КМО: вручную, волной припоя, селективная пайка. Влияние формы волны припоя на качество пайки.

5. Технология сборки ЭМ на КМП: поставка, кассетирование, нанесение паяльной пасты, установка, пайка.

Установка КМП: селективная, механизированная и автоматизированная (схемы, производительность).

6. Паяльные пасты: состав, свойства, способы нанесения, оплавление. Термопрофили туннельных печей оплавления. Обеспечение качества пайки КМП: дозирование паяльной пасты, точность установки КМП, характерные дефекты при монтаже КМП.

7. Технология монтажа накруткой: схема контактных соединений, особенности монтажного поля, провода и инструменты, механизация монтажа.

8. Технология монтажа ленточными кабелями: виды ленточных проводов, способы снятия изоляции, способы получения контактных соединений при монтаже разъемов.

9. Технология жгутового монтажа: типы монтажных проводов, технология снятия изоляции, раскладка проводов на шаблоне, маркировка проводов, вязка жгутов.

10. Технология встраиваемых компонентов при монтаже ЭМ 1-го уровня: типы компонентов, конструктивные особенности ПП для встраивания компонентов. Современные тенденции конструктивно-технологического развития электронных модулей ЭВС.

11–14. Итоговые лекции (16–17 неделя).

4.2.2. Практические занятия в 5-м семестре (семинары, упражнения, занятия в компьютерном классе, деловые игры и т. п.).

№	Тема занятия	Минимальная рейтинговая оценка	Минимальный зачетный балл	Максимальная рейтинговая оценка
Модуль 1 (2–11-я неделя)				
1	Конструктивно-технологический анализ ПП	0	1	3
2	Методика расчета узких мест ПП	0	1	3
3	Проектирование ТП изготовления ПП	0	1	3
4	Методика выполнения домашнего задания по расчету узких мест	0	1	3
5	Ознакомление с технологическим оборудованием по производству ПП	0	1	3
Модуль 2 (12–16-я неделя)				
6	Рубежный контроль по разделу «технология ПП»	0	1	3
7	Ознакомление с технологическим оборудованием сборки ЭМ	0	1	3
8	Рубежный контроль по разделу «Сборка ЭМ»	0	2	6
Итого:			8	24

4.2.3. Содержание практических занятий в 5-м семестре.

1. *Конструктивно-технологический анализ ПП.*

Каждый студент получает промышленно изготовленный образец ПП и должен письменно изложить его конструктивно-технологические характеристики: тип ПП, класс точности, особенности проводящего рисунка, наличие всех видов отверстий и их диаметры, отношение *d*мо/*H*пп, наличие и величина гарантированных поясков «*b*» в зоне круглых контактных площадок, особенности наружного контура ПП; по конфигурации и расположению посадочных мест прогнозировать типы устанавливаемых навесных компонентов.

2. *Методика расчета узких мест ПП.*

Рассматриваются узкие места проводящего рисунка ПП. Приводятся формулы геометрического расчета узких мест. Излагаются способы компенсации узких мест и способы их корректировки. На выданном образце ПП студент находит и эскизирует узкие места проводящего рисунка.

Допускается использование любых справочных материалов.

3. *Проектирование ТП изготовления ПП.*

Для промышленно изготовленного образца определяются его конструктивно-технологические параметры. Студент обосновывает: выбор метода изготовления, способа получения рисунка и проводящего рисунка ПП. Разрабатывается эскиз заготовки ПП и схемы базирования на операциях: сверление базовых и монтажных отверстий, перенос рисунка с фотошаблона, автоматизированного электроконтроля, удаление технологического поля. Разрабатывается маршрутный ТП изготовления ПП выбранным методом. Допускается использование любых справочных материалов.

4. *Методика выполнения домашнего задания по расчету узких мест.*

Задается тип ПП, класс точности ПП, диаметры монтажных или переходных отверстий, минимальное расстояние между элементами проводящего рисунка в узких местах.

Проводится расчет геометрии проводящего рисунка (ширина проводников, диаметры КП) для заданного типа ПП, класса точности и выбранного метода изготовления с учетом возможных технологических погрешностей (точности сверления, погрешностей переноса рисунка с фотошаблона, разращивания и подтравливания проводящего рисунка). Определяется количество сигнальных проводников, прокладываемых в зоне узкого места.

Вычерчиваются эскизы узких мест с расчетными размерами проводящего рисунка и расчетным количеством проложенных сигнальных проводников.

Приводится перечень операций изготовления ПП.

5. *Ознакомление с технологическим оборудованием по производству ПП.*

Семинар-экскурсия проводится на предприятии ЦПТА (Центр прогрессивных технологий и аппаратуры). Студенты знакомятся с оборудованием для получения заготовок и удаления технологического поля ПП; станками с ЧПУ для сверления отверстий; сверлами малых размеров, их заточкой и настройкой; гальванической линией металлизации отверстий и проводящего рисунка ПП; оборудованием для получения рисунка печатной схемы; конвейерными линиями: проявления и удаления фоторезиста, травления меди с пробельных мест, осаждения иммерсионных покрытий; установками оптического и электрического контроля проводящего рисунка.

6. *Рубежный контроль по разделу* «*Технология ПП*».

Проводится по билетам с 4 вопросами, требующими понимания всех разделов, присутствия на всех лекциях и семинарах, самостоятельного выполнения домашнего задания, прохождения всех

лабораторных работ и участия в семинаре-экскурсии. Предлагаются упрощенные вопросы, ответы на которые не требуют длительной внеаудиторной подготовки. Использование литературы и любых справочных материалов исключается.

7. *Ознакомление с технологическим оборудованием сборки ЭМ*.

Проводится в виде семинара-экскурсии на предприятии, выпускающем ЭВС различного назначения. Студенты знакомятся с механизированным и автоматизированным оборудованием для сборки и монтажа ЭМ первого уровня: автоматические установки нанесения паяльной пасты, автоматы установки КМП на ПП, автоматы контроля качества монтажа, установки автоматизированной селективной пайки выводов КМО; комплексные автоматические линии сборки ЭМ. Предлагается ознакомление с оборудованием для изготовления кабелей различного типа, применяемых в ЭВС, оборудованием для настройки и регулировки ЭМ, оборудованием для климатических испытаний.

8. *Рубежный контроль по разделу* «*Сборка ЭМ*».

Предлагается проанализировать компоновку ЭМ и состав ИЭТ с определением уровня коэффициента конструктивно-технологической компоновки (Кктк). Следует оценить уровни технологичности ЭМ при различном составе навесных компонентов (Кснк) и плотность монтажа компонентов.

4.2.4. Лабораторные работы в 5-м семестре.

№	Наименование лабораторной работы	Минимальная рейтинговая оценка	Минимальный зачетный балл	Максимальная рейтинговая оценка
Модуль 1, модуль 2				
1	Исследование геометрии проводящего рисунка ДПП	0	1	3
2	Исследование качества металлизированных отверстий ПП	0	1	3
3	Изучение операций и оборудования для промышленного производства ПП	0	1	3
4	Изучение операций поверхностного монтажа КМП и качества монтажа	0	1	3
Итого:		0	4	12

4.2.5. Содержание лабораторных работ в 5-м семестре.

1. Исследование геометрии проводящего рисунка ДПП.

Цель работы: изучение комбинированного позитивного метода изготовления ПП.

Задачи работы:

- подробно изучить все этапы и основные операции метода;
- ознакомиться с технологическим оборудованием, работа которого представлена на видеофильме с анимационными фрагментами;
- исследовать геометрию проводящего рисунка на лабораторных образцах ПП под микроскопом;
- ознакомиться с дефектами проводящего рисунка, обнаруженными на производственных образцах ПП и приводимыми в описании работы.

2. Исследование качества металлизированных отверстий ПП.

Цель работы: изучить технологию сверления и технологию металлизации монтажных и переходных отверстий ПП, электрически соединяющих проводящие слои ПП.

Задачи работы:

- просмотреть учебные видеофильмы: технология сверления и металлизации отверстий, заточка сверл;
- изучить под микроскопом геометрию режущих лезвий сверл малого диаметра ($d_{\text{св}} = 0,2 \div 2,0$ мм);
- приобрести навык изображения режущей части сверла;
- исследовать под микроскопом шлифы отверстий после сверления и различных стадий металлизации отверстий.

3. Изучение операций и оборудования для промышленного производства ПП.

Цель работы – ознакомление с действующим производством ПП.

Задачи работы:

- изучить конструкторско-технологические особенности отдельных видов промышленного оборудования в условиях действующего производства;
- механическая обработка исходных материалов и заготовок ПП; сверление отверстий на станках с ЧПУ; гальванические линии осаждения меди и металлорезиста; конвейерные линии обработки заготовок, установки оптического и электрического контроля проводящего рисунка ПП;
- оценить уровень механизации и автоматизации операций в мелкосерийном производстве ПП;
- классифицировать технологическое оборудование.

4. Изучение операций поверхностного монтажа КМП и качества монтажа.

Цель работы: изучение основных операций поверхностного монтажа и технологического оборудования начального уровня.

Задачи работы:

- ♦ исследовать качество монтажа КМП на образцах модулей с заведомо внесенными дефектами установки и пайки КМП;
- ♦ просмотреть учебный видеофильм по технологии поверхностного монтажа.

4.2.6. Самостоятельная работа в 5-м семестре. Содержание, сроки, оценка работы.

№ п/п	Содержание работы	Исходные материалы	Неделя	Вид отчетности	Рейтинговая оценка	
					min	max
1	Конструкторско-технологический анализ промышленного образца ПП: тип ПП, класс точности, особенности проводящего рисунка, виды отверстий (ПП выдается преподавателем)	Конспект лекций, дидактические аудиторные стенды (ауд. 278), литература по технологии ПП	2	Отчет по вопросам контрольной № 1	1	3
2	Разработка маршрутного ТП изготовления промышленного образца ПП: разработка групповой заготовки, выбор методов получения рисунка и проводящего рисунка, выбор схем базирования заготовки на основных операциях ТП (ПП выдается преподавателем)	Конспект лекций, дидактические аудиторные стенды (ауд. 278)	4	Отчет по вопросам контрольной № 2	1	3
3	Выполнение домашнего задания по расчету узких мест проводящего рисунка для ОПП и ДПП заданной точности	Конспект лекций, методические указания по выполнению ДЗ	6–7	Выполненное ДЗ	1	3
4	Ознакомление с промышленным оборудованием по производству ПП	Действующее мелкосерийное производство ПП на производственных базах, видеофильмы	10	Обязательное участие в экскурсии	1	3
5	Подготовка к рубежному контролю по всему содержанию модуля 1	Конспект лекций, лаб. работы, экскурсия, домашнее задание	11	Письменные ответы на вопросы контроля	1	3

4.3. Содержание дисциплины в 6-м семестре.

4.3.1. Содержание лекционных занятий.

Модуль 1. Анализ и технологическая оценка ЭМ 1-го уровня.

1. Анализ исходных данных: принципиальная схема, топология ПП, сборочный чертеж ЭМ, варианты установки ИЭТ на ПП.

2. Проектирование принципиальной схемы ЭМ и схемы разводки ПП на базе машинных пакетов и других средств программного обеспечения.

3. Анализ и расчет технологичности ЭМ: состав и весовая значимость базовых показателей технологичности, принцип сочетания количественных и качественных показателей технологичности.

4. Методы анализа и расчета технологичности. Система коэффициентов.

5. Коэффициент конструктивно-технологической компоновки ЭМ (Ккткт). Уровни Ккткт при различных компоновках КМО, КМП и смешанном монтаже. Присвоение значимости различным конструктивным компоновкам ЭМ.

6. Коэффициент состава компонентов (Кснк). Оценка уровней технологичности в зависимости от установки КМО и КМП разных типов (чип-КМП, чип-диоды, ИМС с различным шагом выводов, с *J*-выводами и шариковыми выводами).

Модуль 2. Проектирование ТП сборки ЭС.

1. Разработка схемы сборки ЭМ с базовой деталью. Правила разработки схемы сборки: размещение устанавливаемых компонентов и деталей, указание технологических действий, размещение на схеме сборочных единиц, входящих в состав ЭМ.

2. Разработка маршрутного ТП сборки ЭМ на базе схемы сборки. Выбор оборудования и оснастки на основе расчета такта выпуска $Тв=Фд \cdot 60/N$ [мин/шт.].

Проектирование операционного ТП: состав штучного времени операции. Понятие о технологических переходах. Примеры технологических переходов на различных сборочных операциях. Определение времени переходов.

Разработка структур операций и минимизация времени переходов. Примеры структур операций.

3. Разработка операционного эскиза с изменением состояния базовой и устанавливаемых деталей. Таблица и время технологических переходов. Схемы базирования собираемых деталей.

4. Некоторые сведения из теории базирования: о степенях свободы, виды технологических баз и их условные обозначения, по-

грешность базирования и погрешность установки, расчет точности сборочной операции.

5. Оценка эффективности сборки ЭМ. Расчет, хронометраж и выбор структур операций по методике MTV. Выбор варианта операции по технологической себестоимости $C_т = A + B/N$.

6. Комплексная разработка сборочно-монтажного производства: анализ номенклатуры собираемых объектов, объемов и периодичности их выпуска. Состав оборудования и принципы построения прототипных сборочно-монтажных производств.

7. Разработка планировки сборочно-монтажного производства: перемещения материальных и информационных потоков, заготовительные и сборочно-монтажные участки. Компоновка сборочно-монтажных линий, заготовительных участков и участков складирования.

8. Вопросы проектирования технологической оснастки: схема изменения состояния собираемого объекта, технологические инструменты и их перемещения, кинематическая схема приспособления.

9. Конструктивная компоновка приспособления: корпусные детали, закрепление инструментов, размещение элементов привода инструментов. Кинематические и точностные расчеты приспособлений. Выбор материалов основных деталей и их термообработки.

4.3.2. Лабораторные работы в 6-м семестре.

№	Наименование лабораторной работы	Минимальная рейтинговая оценка	Минимальный зачетный балл	Максимальная рейтинговая оценка
Модуль 1 / Модуль 2				
1	Разработка принципиальной схемы ЭМ на базе машинного пакета	0	1	3
2	Разводка проводящего рисунка ПП на базе машинного пакета	0	1	3
3	Адаптация электронного проекта ЭМ к условиям производства на базе машинного пакта. Корректировка геометрии узких мест проводящего рисунка. Разработка группового фотошаблона	0	2	6
4	Практическое применение машинного программного пакета для технологического оборудования в производстве ПП	0	1	3
Итого:		0	5	15

4.3.3. Содержание лабораторных работ в 6-м семестре.

1. Разработка принципиальной схемы ЭМ с помощью стандартного вычислительного пакета.

Цель работы: получить навыки вычерчивания принципиальной схемы.

Задачи работы:

- изучить правила и методику вычерчивания УГО компонентов;
- вычертить компонент и внести его в библиотеку;
- присвоить каждому компоненту позиционное обозначение, номинал и тип посадочного места;
- вычертить принципиальную схему.

2. Разводка проводящего рисунка ПП на базе стандартного вычислительного пакета.

Цель работы: получить навыки разводки заданной схемы на заданной площади и выполнить трассировку проводящего рисунка.

Задачи работы:

- изучить правила и методику вычерчивания УГО компонентов и посадочных мест;
- распределить УГО компоненты и посадочные места в зоне монтажного поля ПП;
- создать проводники на слоях ПП, переходные отверстия и вычертить проводящий рисунок ПП;
- полученную разводку ПП скорректировать вручную.

3. Адаптация электронного проекта ЭМ к условиям производства на базе стандартного машинного пакета.

Цель работы: изучить машинный пакет и адаптировать проект ЭМ к производству.

Задачи работы:

- провести корректировку узких мест проводящего рисунка ПП при заданной площади и классе точности;
- разработать групповой фотошаблон для экспонирования рисунков слоев, паяльной маски, маркировки шелкографией и изготовления трафарета для нанесения паяльной пасты.

4. Практическое применение машинного пакета для программирования технологического оборудования.

Цель работы: разработка программ для оборудования с ЧПУ.

Задачи работы:

- изучить методику разработки программ для технологического оборудования с ЧПУ для производства ПП;

- ♦ разработать программы для сверления отверстий в заготовках ПП; фрезерования контура ПП, скрайбирования прямолинейных участков контура ПП; электрического контроля проводящего рисунка;
- ♦ графически проверить траектории перемещения инструментов оборудования с ЧПУ.

4.3.4. Самостоятельная работа в шестом семестре основана на выполнении комплексного домашнего задания (трудоемкость – 40 ч, выдача – 5-я неделя, срок сдачи – 14-я неделя, рейтинговая оценка: min – 10 баллов, max – 30 баллов).

Содержание домашнего задания.

Задается принципиальная схема электронного устройства (ЭМ 1-го уровня) и размеры монтажного поля.

Производится подбор навесных компонентов, посадочных мест и разводка проводящего рисунка ПП.

Разрабатывается чертеж ПП, сборочный чертеж ЭМ и спецификация.

Производится анализ вариантов установки навесных компонентов на ПП.

Оценивается технологичность ЭМ по базовым показателям.

Разрабатывается схема сборки ЭМ и маршрутный ТП применительно к единичному производству.

Разрабатывается операционный эскиз сборки ЭМ с выбором схем базирования ПП и навесных компонентов.

Разрабатывается групповой фотошаблон, программа сверления монтажных отверстий, программа фрезерования контура ПП и программа электроконтроля проводящего рисунка.

Последовательность выполнения (календарный план) домашнего задания.

№ п/п	Содержание работы	Исходные материалы	Неделя	Вид отчетности	Рейтинговая оценка	
					min	max
1	2	3	4	5	6	7
1	Выдача задания на 6-м семестре (принципиальная схема ЭМ). Вычерчивание схемы в пакете *Schematic*	Принципиальная схема, лекции по схемотехнике, пакет *Schematic*, литература	2	Принципиальная схема ЭМ и её описание	1	3
2	Разводка проводящего рисунка ЭМ в САПР *Altium Designer* или *PCAD*	Описание пакета, состав навесных компонентов, посадочные места	3	Разведенная схема проводящего рисунка ЭМ	1	3

1	2	3	4	5	6	7
3	Проектирование конструкции ПП и конструкции ЭМ	Конспект лекций, разводка проводящего рисунка, навесные компоненты	4	Чертеж ПП, чертеж ЭМ	1	3
4	Адаптация ПП к производству	Чертеж ПП, пакеты *Altium Designer*, *CAM*350, конспект лекций	7	Групповой фотошаблон, программа сверления отверстий, программа обработки контура ПП	1	3
5	Разработка схемы сборки ЭМ	Конспект лекций, чертеж ЭМ и спецификация компонентов	7	Схема сборки с базовой деталью, маршрутный ТП	1	3
6	Разработка операционного эскиза сборки ЭМ	Конспект лекций, маршрутный ТП	8	Чертеж операционного эскиза	1	3
7	Оформление домашнего задания	Выполненные этапы 1–6 в ходе семестра	10–12	Скомпонованное и оформленное ДЗ		

Раздел 5. Результаты освоения дисциплины. Рейтинговая система контроля освоения дисциплины

5.1. Состав рейтинговой системы контроля освоения дисциплины в 5-м семестре.

№	Мероприятие	Рейтинговая оценка, min	Зачетный балл, min	Рейтинговая оценка, max
Модуль 1 (10-я неделя). Модуль 2 (14-я неделя)				
1	Контрольная работа № 1	0	4	5
2	Контрольная работа № 2	0	10	20
3	Домашнее задание по ПП	0	10	20
4	Лабораторные работы (или экскурсии)	0	5	15
5	Рубежный контроль	0	30	40
Итого:			59	100

5.2. Состав рейтинговой системы контроля освоения дисциплины в 6-м семестре.

№	Мероприятие	Рейтинговая оценка, min	Зачетный балл, min	Рейтинговая оценка max
Модуль 1 (7-я неделя). Модуль 2 (14-я неделя)				
1	Лабораторные работы	0	5	15
2	Вычерчивание принципиальной схемы ЭМ	0	5	10
3	Разводка проводящего рисунка	0	5	10
4	Разработка чертежа (эскиза) ПП и сборочного чертежа ЭМ	0	30	45
5	Разработка схемы сборки	0	5	10
6	Разработка операционного эскиза сборки ЭМ	0	5	10
Итого:			55	100

5.3. Знания, умения и навыки, приобретенные студентами по дисциплине в 5-м семестре.

Название модуля	Результаты изучения модуля	Наименование компетенции или части компетенции
1	2	3
Модуль 1. Технологии коммутационных структур ЭС	*Знать*:	
	конструкторско-технологические особенности ПП различных типов и тенденции их развития	ПК-11
	технологию промышленных методов изготовления ПП и технологическое оборудование	ПК-15
	Уметь:	
	спроектировать ТП изготовления ПП заданного класса точности с выбором технологического оборудования	ПК-11
	провести разводку проводящего рисунка ПП, рассчитать узкие места и адаптировать плату к условиям промышленного производства	ПК-20
	Иметь навыки:	
	разработки ТП изготовления ПП для заданного объема выпуска изделия	ПК-5
	расчета узких мест проводящего рисунка ПП и корректировки их геометрии	ПК-6
	исследования геометрии проводящего рисунка и металлизированных отверстий ПП на промышленно изготовленных образцах	ПК-22
	разводки проводящего рисунка ПП с применением современных программных средств	ПК-6

1	2	3
Модуль 2. Технология сборки электронных модулей	*Знать*:	
	конструктивно-технологические особенности ЭМ первого уровня, ТП сборки ЭМ и сборочно-монтажное оборудование	ПК-32
	теоретические основы сборки ЭМ	ПК-25
	Уметь:	
	разработать маршрутный и операционный ТП сборки ЭМ первого уровня	ПК-12
	качественно и количественно оценить технологичность ЭМ	ПК-32
	разработать операционный эскиз сборки ЭМ со схемами базирования ПП и устанавливаемых компонентов, перечнем переходов и временем их выполнения	ПК-15
	разработать ТЗ на проектирование технологической оснастки для сборки ЭМ	ПК-25
	Иметь навыки:	
	исследования качества поверхностного монтажа ЭМ на образцах с заведомо внесенными дефектами	ПК-25
	чтения сборочных чертежей ЭМ всех уровней	ПК-25
	проектирования простейших приспособлений и оснастки для изготовления и сборки ЭМ	ПК-5

5.4. Знания, умения и навыки, приобретенные студентом по дисциплине в 6-м семестре.

Название модуля	Результаты изучения модуля	Наименование компетенции или части компетенции
1	2	3
Модуль 1. Технологическая оценка ЭМ 1-го уровня	*Знать*:	
	методику расчета технологичности модулей ЭВС	ПК-12
	теорию базирования деталей на операциях изготовления и сборки	ПК-12
	правила разработки и оформления операционных эскизов	ПК-5
	Уметь:	
	рассчитывать технологичность ЭМ по известным методикам	ПК-32
	рассчитывать штучное время технологической операции сборки	ПК-12
	рассчитывать точность базирования деталей на сборочных операциях	ПК-12

1	2	3
	Иметь навыки:	
	исследования технологических операций сборки ЭМ	ПК-5
	чтения сборочных чертежей	ПК-25
	проектирования простейших приспособлений и оснастки для сборки ЭМ	ПК-5
Модуль 2. Проектирование ТП сборки ЭС	*Знать*:	
	теоретические основы сборки	ПК-15
	технологию сборочно-монтажных операций	ПК-32
	Уметь:	
	разрабатывать ТП сборки ЭМ различных уровней	ПК-15
	разрабатывать операционный эскиз сборочной операции	ПК-25
	Иметь навыки:	
	выбора операций и оборудования для сборки ЭМ	ПК-32
	исследования отдельных сборочных операций	ПК-32

Раздел 6. Образовательные технологии

При реализации учебной работы по дисциплине использованы:

- мультимедийные технологии для наглядной подачи материала (видео, презентации, фото);
- дистанционный обмен информацией и консультации по Интернету.

В соответствии с требованиями СОС ВПО по направлению подготовки 211 000 «Конструирование и технология электронных средств» реализация компетентного подхода предусматривает широкое использование в учебном процессе активных и интерактивных форм проведения занятий (компьютерных симуляций, деловых игр, разбор конкретных ситуаций, тренинги) в сочетании с внеаудиторной работой с целью формирования и развития профессиональных навыков обучающихся.

Удельный вес занятий, проводимых в интерактивных формах, определяется главной целью (миссией) программы, особенностью контингента обучающихся и содержанием конкретных дисциплин, и в целом в учебном процессе они составляют около 70% аудиторных занятий.

При реализации программы дисциплины использованы интерактивные и вычислительные ресурсы видеотеки по направлению подготовки 211 000 «Конструирование и технология электронных средств» (*http://video.iu4.bmstu.ru*) и электронной библиотеки МГТУ им. Н.Э. Баумана (*library.bmstu.ru/*).

Раздел 7. Учебно-методические материалы

7.1. Основная литература

1. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация : учебное пособие для вузов / В.Г. Алексеев, В.Н. Гриднев и др. – М. : Высшая школа, 1984. – 392 с., ил.
2. *Медведев А*. Печатные платы. Конструкции и материалы. – М. : Техносфера, 2005. – 304 с.
3. *Леухин В.Н*. Основы конструирования и технологии производства РЭС : учебное пособие. – Йошкар-Ола : МарГУ, 2006. – 344 с.
4. Технологии в производстве электроники. Часть I. Справочник по производству печатных плат / Под ред. П. Семенова. – М. : ООО Группа ИТД, 2007. – 586 с., ил.
5. *Пирогова Е.В*. Проектирование и технология печатных плат : учебник. – М. : Форум, ИНФРА-М, 2005. – 560 с. (Высшее образование.)
6. *Гриднев В.Н*. Конспект лекций по дисциплине «Технология электронных средств».

7.2. Дополнительная литература

7. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. В двух книгах. Книга 1. – М. : Техносфера, 2011.
8. Печатные платы: Справочник / Под ред. К.Ф. Кумбза. В двух книгах. Книга 2. – М. : Техносфера, 2011.
9. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. 2-изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М. : ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.

Раздел 8. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Для выполнения практических работ на семинарах, лабораторных работ и домашних заданий используется инфраструктура лаборатории «Конструкторско-технологического проектирования» и лаборатории «САПР».

Для демонстрации на лекциях используются следующие пособия:

1. Плакаты и слайды с изображением структурных и принципиальных электрических схем цифровых устройств и схем запоминающих устройств.

2. Все лекции сопровождаются мультимедийными презентациями с ноутбука через проектор. Лекции проводятся в специализированной мультимедийной аудитории.

№	Наименование	Описание
Оборудование лаборатории «Конструкторско-технологического проектирования»		
1	Станции визуальной инспекции монтажа ЭУ *Mantis*	Стереоскопическая станция визуальной инспекции фирмы *Mantis* (инв. № 135000901)
2	Микроскоп с видеокамерой	Микроскоп для визуального контроля печатных плат (инв. № 135000500)
3	Микроскоп Биолан	Микроскоп для визуального контроля печатных плат (инв. № 135000497)
4	Телевизионный микроскоп	Микроскоп для автоматизированного визуального контроля печатных плат (инв. № 1000152503)
5	Установка поверхностного монтажа ЕМС	Автоматическая среднепроизводительная установка поверхностного монтажа (инв. № 135000902)
6	Печь оплавления	Пятисекционная печь оплавления для плат с поверхностным монтажом (инв. № 132001120)
7	Гравировально-фрезерный станок	Прецизионный гравировально-фрезерный станок для производства одно- и двусторонних печатных плат методом фрезерования (инв. № 1100032399)
Оборудование лаборатории «САПР»		
1	ПЭВМ с конфигурацией	*DEPO Neos* 430*MN E*2200/1*Gb DDR*667/*T*160*G*/*DVD+RW*/*KBs*/*Mo*/*CARE*3
2	Программное обеспечение	Комплексы автоматизированной подготовки управляющих программ для станков с ЧПУ

5.2. СТРУКТУРА И СОСТАВ ФОНДОВ ОЦЕНОЧНЫХ СРЕДСТВ ПО ДИСЦИПЛИНЕ

Фонды оценочных средств по дисциплине представляют собой:

1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий.
2. Варианты экзаменационных билетов.

5.2.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий

1. Дать схему конструкции ПП (поперечный разрез), указать особенности конструктивных элементов, материал и области применения ПП:

- ♦ МПП с металлизацией сквозных отверстий;
- ♦ МПП с металлизацией сквозных отверстий и межслойными переходами;
- ♦ МПП с наращиваемыми наружными слоями структур 1–*n*–1, 2–*n*–2;
- ♦ МПП попарного прессования;
- ♦ МПП послойного наращивания;
- ♦ ДПП на фольгированном диэлектрическом основании;
- ♦ ДПП на нефольгированном диэлектрическом основании;
- ♦ ДПП на металлическом основании;
- ♦ гибко-жесткая ПП;
- ♦ ОПП на фольгированном основании;
- ♦ ОПП с металлизированными монтажными отверстиями;
- ♦ рельефные ПП.

2. Схема групповой заготовки ПП, размеры и назначение технологических полей.
3. Схемы базирования групповых заготовок ПП на различных технологических операциях.
4. Понятие «узкое место» проводящего рисунка ПП, схемы узких мест.
5. Виды отверстий в ПП различных конструкций.
6. Понятие о классе точности ПП и основные параметры, определяющие класс точности.
7. Перечислить основные элементы проводящего рисунка ПП.
8. Фотошаблоны и сетчатые трафареты – конструктивные особенности.
9. Привести эскизы последовательных изменений исходного состояния материала ПП, изготовленных по технологии:
   - ♦ химического метода;
   - ♦ комбинированного позитивного метода;
   - ♦ электрохимического метода;
   - ♦ фотоаддитивного метода;
   - ♦ метода металлизации сквозных отверстий (МПП);
   - ♦ метода попарного прессования (МПП);
   - ♦ метода открытых контактных площадок (МПП);
   - ♦ метода наращивания наружных слоев (МПП структуры 1–*n*–1, 2–*n*–2);
   - ♦ рельефных ПП;

- ДПП на металлическом основании;
- тентинг-метода.

10. Схема и технология получения рисунка ПП:
    - фотографическим способом;
    - сеткографическим способом;
    - способом фотоформирования;
    - механическим способом.
11. Схема и технология получения проводящего рисунка ПП:
    - химическим способом – травление;
    - химическим способом – осаждение;
    - электрохимическим способом – наращивание;
    - термическим способом – напыление.
12. Указать физический смысл членов формулы, область и условия её применения:

$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{ф}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{ф}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + h_{\text{хм}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + h_{\text{хм}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right)$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right)$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}} + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}} + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5\left(h_{\text{ф}} + h_{\text{пм}}\right) + h_{\text{г}}$
$t_{\min} = t_{1\min}$	$D_{\min} = D_{1\min}$
$t_{\min} = t_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}} + h_{\text{р}}$	$D_{\min} = D_{1\min} + 1,5h_{\text{пм}} + h_{\text{р}}$
$t_{\min} = t_{1\min} + \Delta t_{\text{ш}} + \Delta\text{Э}$	$D_{\min} = D_{1\min} + \Delta D_{\text{ш}} + \Delta\text{Э}$
	$D_{\min} = 2\left(b + d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}} + \delta_{\text{кп}}\right)$
$l_{\min} = \left(D_{\max} + 2\delta_{\text{кп}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\ \text{ш}}\right)n + s\left(n+1\right)$	
$l_{\min} = \left(D_{\max}/2 + \delta_{\text{кп}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\ \text{ш}}\right)n + s\cdot n + a$	
$l_{\min} = \left(D_{\max}/2 + \delta_{\text{кп}}\right) + \left(d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\ \text{ш}}\right)n + s\cdot n + a$	
$l_{\min} = \left(d_{\max}/2 + \delta_{\text{отв}}\right) + \left(t_{\max} + 2\delta_{t\ \text{ш}}\right)n + s\left(n-1\right) + 2a$	

13. Назвать и расшифровать материал, указать область его применения в производстве ПП:

СФ-1(2)-35(50)	$CuSO_4$
ГФ-1(2)-35(50)	$CuCl_2$
ФТС-1(2)-18(35)	$PdCl_2$
FR4	$FeCl_3$
Сплав Розе (Sn–Bi–Pb)	H_2SO_4 HF
ВК6; ВК8	$Sn(BF_4)_2$
СПФ	$Pb(BF_4)_2$
СПТ	$SnCl_2$
СТЭК, СТПА-5	$(NH_4)_2S_2O_8$
Полиимид	$Cu(BF_4)_2$
	HCl

5.2.2. Варианты экзаменационных билетов

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 1

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Электрохимический метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, области применения.
2. Технология получения рисунка ПП способом фотоформирования.
3. Расчет t_{min} для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 2

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Комбинированный позитивный метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, область применения.
2. Способы обеспечения паяемости проводящего рисунка ПП.
3. Расчет $t_{\min}$ для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением сеткографии.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 3

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Химический метод изготовления ПП с применением маски из металлорезиста: операции, точность, материалы.
2. Способы базирования заготовок на различных операциях производства ПП.
3. Расчет $t_{\min}$ для электрохимического метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 4

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Химический метод изготовления ПП: основные операции, точность, материалы заготовок, области применения.
2. Виды механической обработки в технологии ПП: операции, инструменты, оборудование, точность.
3. Расчет $t_{\min}$ для фотоаддитивного метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 5

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Технология изготовления ДПП на металлическом основании.
2. Получение и обеспечение качества металлизированных отверстий ПП.
3. Расчет $t_{\min}$ для фотоаддитивного метода изготовления с маской из СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 6

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Технология изготовления ДПП на тонкофольгированном диэлектрике.
2. Анализ способов получения различных видов отверстий ПП: схема, точность.
3. Определение $t_{\min}$ при расчете узких мест проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 7

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Технология тентинг-метода получения ДПП.
2. Технология получения рисунка ПП фотоспособом: схема, операции, точность, применение.
3. Роль паяльной маски при оценке геометрии проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 8

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Фотоаддитивный метод изготовления ПП: операции, точность, материалы, области применения.
2. Виды конструкционных материалов для изготовления ПП.
3. Расчет $D_{\min}$ для фотоаддитивного метода изготовления ПП с маской из СПФ.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 9

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Технология изготовления МПП методом металлизации сквозных отверстий.
2. Термический способ получения рисунка ПП: схема, точность, применение.
3. Расчет $D_{\min}$ для фотоаддитивного метода изготовления ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 10

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Промышленные способы получения проводящего рисунка ПП: технология, точность, применение.
2. Исходные материалы для изготовления ПП и их рациональное использование.
3. Параметры, определяющие классы точности и плотности проводящего рисунка.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 11

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Разработка ТП изготовления ДПП 4-го класса точности ($t = 0{,}15$).
2. Изготовление и применение фотошаблонов в производстве ПП.
3. Расчет $t_{\min}$ для рельефной ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 12

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Изготовление МПП структуры 2–*n*–2.
2. Электрохимический способ (наращивание) получения проводящего рисунка ПП: схема, точность, применение.
3. Расчет узкого места проводящего рисунка между контактной площадкой и краем ПП.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 13

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Изготовление МПП структуры 1–*n*–1.
2. Химический способ (осаждение) получения проводящего рисунка ПП: схема, точность, применение.
3. Рассчитать для известного размера вывода КМП ($d_{\text{в}}$) максимальный диаметр просверленного отверстия ($d_{\max}$).

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана

ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЙ БИЛЕТ № 14

по курсу «Проектирование коммутационных структур электронных средств»

1. Технология изготовления МПП с открытыми контактными площадками.
2. Расчет $D_{\min}$ для комбинированного позитивного метода изготовления ПП с применением СПФ.
3. Технология получения рисунка ПП сеткографическим способом: схема, операции, точность, применение.

Утверждаю В.А. Шахнов

Билет рассмотрен и утвержден на заседании кафедры «__» _____ 20__ г.

5.3. СПЕЦИФИКАЦИЯ УЧЕБНЫХ ВИДЕО- И АУДИОМАТЕРИАЛОВ, СЛАЙДОВ, ЭСКИЗОВ ПЛАКАТОВ И ДРУГИХ ДИДАКТИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

5.3.1. СПЕЦИФИКАЦИЯ СЛАЙДОВ – КОНСПЕКТОВ ЛЕКЦИЙ

Название раздела	Число слайдов
1. Введение в технологию коммутационных структур	**12**
Виды коммутационных структур и их конструкторско-технологические особенности. Геометрия и электрические параметры структур и их применение в электронных модулях ЭВС. Классификация коммутационных структур по назначению, физико-механическим параметрам, геометрическим параметрам и возможности перехода к наноразмерам	
2. Коммутационные структуры на жестких и гибких носителях – печатные платы	**14**
Конструктивно-технологические особенности коммутационных структур микроуровня. Элементы проводящего рисунка. Классы точности и плотности проводящего рисунка. Расчет геометрических парамет-	

ров. Типы коммутационных структур: односторонние, двусторонние и многослойные. Многослойные структуры с наращиваемыми наружными слоями. Материалы: фольгированные и нефольгированные диэлектрики, тонкие диэлектрические пленки, адгезивные материалы, фотопроявляемые диэлектрики, проводящие материалы: фольга, осаждаемые слои, иммерсионные покрытия. Способы получения рисунка коммутационных структур: фотографический, сеткографический, фотоформирование, механический. Физические схемы и технологии реализации способов. Геометрическая точность рисунка. Способы получения проводящего рисунка структур: химический – травление, химический – осаждение, электрохимический – наращивание. Промышленные методы изготовления односторонних и двусторонних коммутационных структур: химический метод, комбинированный позитивный метод, тентинг-метод, электрохимический метод, фотоаддитивный метод. Геометрия проводящего рисунка. Области применения. Оборудование. Промышленные методы изготовления многослойных коммутационных структур: метод металлизации сквозных отверстий, метод попарного прессования, метод послойного наращивания, метод открытых контактных площадок. Технология *HDI* (*High Density Interconnections*). Совмещение слоев МКС. Гибко-жесткие коммутационные структуры. Назначение и применение. Технология производства. Особенности	
3. Коммутационные структуры в жидкокристаллических и плазменных панелях	**4**
Конструкционные особенности жидкокристаллических панелей. Технология изготовления прозрачных электродов адресной матрицы. Коммутация тонкопленочных транзисторов. Конструкционные особенности плазменных панелей. Способы получения проводящих электродов	
4. Оптоволоконные коммутационные структуры	**19**
Оптические коммуникации и проводящие среды. Преимущества и недостатки в сравнении с металлическими. Перспективы использования. Оптическое волокно. Классификация. Основные параметры. Конструкционные особенности. Технология изготовления. Печатные платы с оптоволоконными проводниками	
5. Электрический монтаж модулей	**26**
Контактные соединения. Анализ контактных соединений, полученных пайкой, сваркой, склеиванием, с помощью разъемов и др. Виды монтажа: печатный, проводной на МКС, навесной на МКС, монтаж накруткой, жгутовой, монтаж плоским ленточным кабелем. Проводной монтаж на МКС. Технология раскладки проводов. Способы получения контактных соединений. Технологичность и сравнительная оценка. Навесной монтаж на МКС. Основные этапы и операции. Подготовка элементов к монтажу. Способы установки элементов. Пайка выводов: пайка волной, селективная, ручная. Технологичность и сравнительная оценка. Технология поверхностного монтажа компонентов. Конструктивно-технологические особенности КМП. Требования к печатным платам. Нанесение паяльной пасты и клеящих составов. Установка КМП: ручная, автоматическая. Технологичность и сравнительная оценка.	

Проводной монтаж ЭМ высших уровней. Монтаж ленточными соединителями и жгутами. Способы получения контактных соединений	
6. Технологическая подготовка производства	**24**
Основы проектирования ТП. Основные этапы разработки ТП. Методика анализа конструкций ЭМ. Технологичность узлов и деталей. Качественная и количественная оценка технологичности. Способы повышения технологичности. Разработка ТП. Методика разработки схем сборки микро- и наносистем с базовой деталью. Составление маршрутных ТП. Выбор оборудования и средств технологического оснащения. Проектирование технологических операций. Разработка структуры операции и последовательности переходов. Основные положения теории базирования. Схемы базирования и установки деталей. Расчет погрешностей базирования при сборке. Точность технологических операций. Расчет допустимых погрешностей. Экономическая и технологическая эффективность операций. Технологическая документация. Операционные эскизы и их оформление. Операционные карты. Проектирование технологической оснастки. Технологические приспособления. Методика расчета сборочно-монтажных приспособлений. Разработка последовательности переходов. Особенности операций с наноразмерными допусками и размерными рядами. Конструирование приспособлений. Контроль и диагностика МКС. Визуальный контроль. Электрический контроль. Рентгеновский контроль	

5.3.2. Пример оформления дидактических материалов по лекциям

В разделе приведен типовой пример оформления дидактического материала по дисциплине «Проектирование коммутационных структур электронных средств» – конспект материалов лекций, содержащих основные определения, теоретические основы физических принципов, а также примеры. Методологически курс лекций строится на основе оптимального соотношения теоретических и прикладных вопросов с реализацией проектных методов обучения. Структура материала отличается реализацией блочно-вариативной концепции и внедрением проектных методов подготовки.

Текст лекции, её длительность, язык и насыщенность фактами и аргументами должны учитывать возрастной и социальный состав аудитории [9, 31]. Не рекомендуется писать весь материал лекции дословно. При подготовке текста особенное внимание рекомендуется уделять его началу и окончанию. Начало не должно быть слишком затянутым, не надо начинать с общих, всем известных фраз. Необходимо сразу заинтересовать слушателей, задеть, что называется, за «живое», показать связь предмета лекции с реальными, известными из повседневной жизни событиями и объектами.

КОММУТАЦИОННЫЕ МИКРО- И НАНОСТРУКТУРЫ

Цель курса: ознакомить и обучить студентов конструкциям и технологиям получения коммутационных структур различного назначения.

Решаемые задачи: в данном курсе решаются задачи теоретической и практической подготовки студентов современным методам производства коммутационных структур

Программа курса: зачет

Лекции: 34 часа

Семинары: 34 часа

Домашние задания: Расчет узких мест проводящего рисунка ПП. Выдача – 9 неделя, сдача – 15 неделя.

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭС» http://nanotech.iu4.bmstu.ru

МГТУ им.Н.Э. Баумана

ВВЕДЕНИЕ В ТЕХНОЛОГИЮ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР

Коммутационные структуры – специальным образом сформированные проводящие среды, предназначенные для коммутации и передачи сигналов между различными модулями и субмодулями ЭВС.

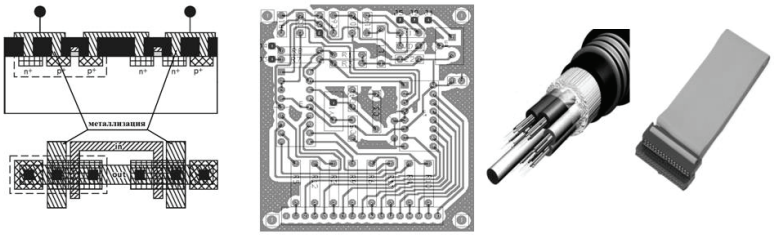


Рис.1. Некоторые виды коммутационных структур:

металлизация на ИМС (слева), печатная плата (середина), кабель и шлейф (справа).

Кафедра ИУ4 «Проектирование и технология производства ЭС» http://nanotech.iu4.bmstu.ru

МГТУ им.Н.Э. Баумана

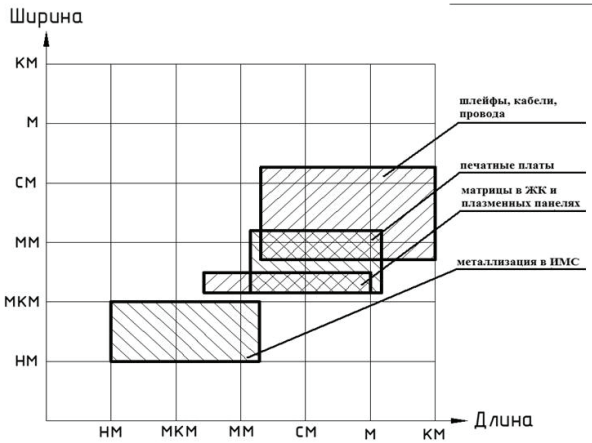


Рис.2. Геометрические параметры некоторых видов коммутационных структур.

Геометрия и электрические параметры коммутационных структур.

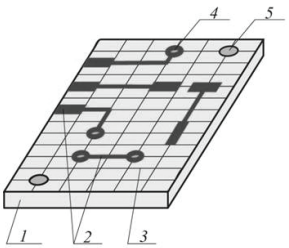


Рис. 3. Схема печатной платы:
1 – основание ПП; 2 – проводящий рисунок; 3 – непроводящий рисунок; 4 – металлизированное отверстие; 5 – конструкционное отверстие

Печатный монтаж – способ монтажа электронных модулей (ЭМ) аппаратуры, при котором электрические соединения выполнены с помощью печатных проводников. Проводники размещены на диэлектрическом основании и образуют проводящий рисунок. Основание конечных размеров с проводящим рисунком и необходимыми отверстиями является печатной платой

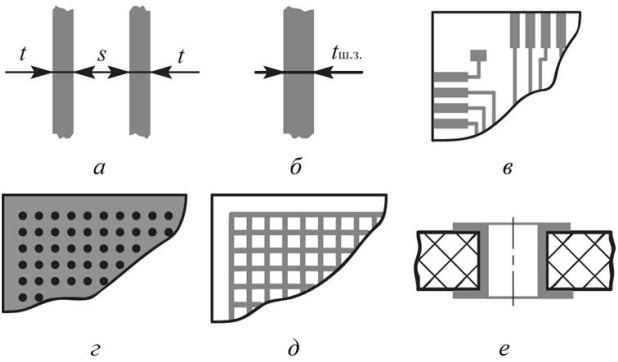


Рис. 4. Элементы проводящего рисунка ПП:
а – сигнальные проводники; б – шина земли (питания); в – концевые печатные контакты (КПК) – печатный разъем; г – экран; д – экранная сетка; е – металлизированное отверстие

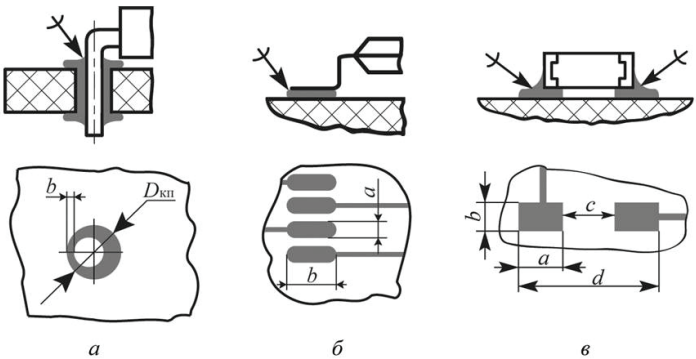


Рис. 5. Типы контактных площадок (КП) в проводящем рисунке ПП:
а – в зоне монтажных или переходных отверстий; б – для соединения планарных выводов ИМС с печатным монтажом; в – для соединения компонентов, монтируемых на поверхности основания ПП (КМП) с печатным монтажом

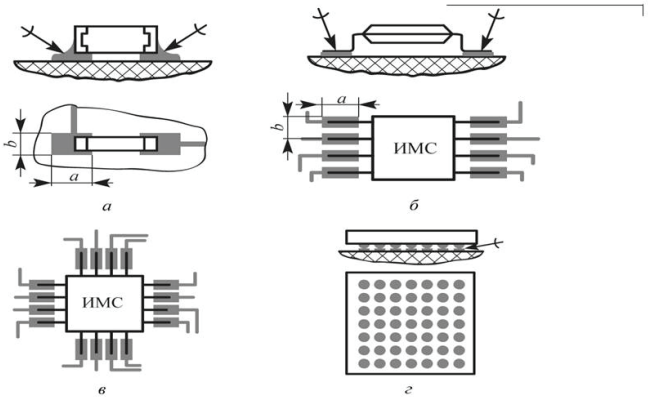


Рис. 6. Характер расположения КП проводящего рисунка:
а – для монтажа чип-компонентов; б – для монтажа ИМС с двухсторонним расположением планарных выводов; в – для монтажа ИМС с четырехсторонним расположением планарных выводов; г – для монтажа ИМС с матричным расположением шариковых выводов

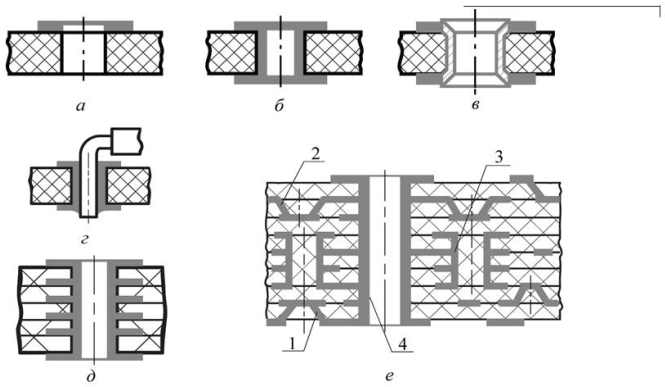


Рис. 7. Виды основных отверстий ПП:
а – неметаллизированное монтажное в ОПП; б – металлизированное переходное в ДПП; в – пистонированое переходное в ДПП; г – металлизированное монтажное в ДПП; д – сквозное, металлизированное в МПП; е – отверстия в МПП с высокой плотностью проводящего рисунка (1 – глухой микропереход, 2 – скрытый глухой микропереход, 3 – внутреннее скрытое переходное отверстие, 4 – сквозное металлизированное отверстие)

Коммутационные структуры на жестких и гибких носителях – печатные платы

Цель лекции: *рассмотрение разделов: классы точности и плотности проводящего рисунка, типы коммутационных структур (односторонние, двухсторонние и многослойные), многослойные структуры с наращиваемыми наружными слоями, материалы, способы получения рисунка коммутационных структур, способы получения проводящего рисунка структур, промышленные методы изготовления коммутационных структур.*

Классы точности и плотности печатного монтажа.

Условное обозначение параметра ПП	Номинальное значение параметров для классов точности, [мм]				
	1 класс	2 класс	3 класс	4 класс	5 класс
t	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
s	0,75	0,45	0,25	0,15	0,10
b	0,30	0,20	0,10	0,05	0,025
$\gamma = \frac{d_{мд}}{H_{пп}}$	0,40	0,40	0,33	0,25	0,20
δt [мм]	±0,15	±0,10	±0,05	±0,03	0; -0,03

Где: t - минимальная ширина сигнального проводника,

s - минимальное расстояние между проводниками или любыми элементами проводящего рисунка,

b - минимальная ширина круглой контактной площадки (гарантированный поясок, определяющий ее целостность),

γ - отношение диаметра наименьшего металлизированного отверстия (dм.о.) к толщине ПП (Нпп),

δt - допуск на ширину проводника, контактной площадки или любого другого элемента проводящего рисунка.

Коммутационные структуры в жидкокристаллических и плазменных панелях

Цель лекции: *изучение конструкционных особенностей жидкокристаллических и плазменных панелей, технологии изготовления прозрачных электродов адресной матрицы, коммутации тонкопленочных транзисторов.*

Жидкокристаллический монитор (также Жидкокристаллический дисплей, ЖКД, ЖК-монитор, LCD, плоский индикатор) — плоскоэкранный дисплей на основе жидких кристаллов. Используются для отображения информации с цифровых устройств.

Каждый пиксель ЖК-дисплея состоит из слоя молекул между двумя прозрачными электродами из пленки окислов индия и олова, и двух поляризационных фильтров, плоскости поляризации которых (как правило) перпендикулярны (рис.1). В отсутствие жидких кристаллов свет, пропускаемый первым фильтром, практически полностью блокируется вторым.

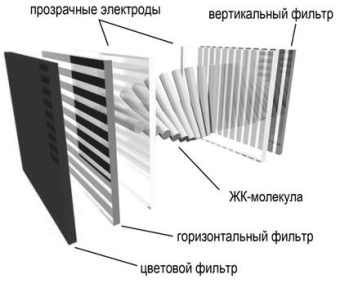


Рис. 1. Субпиксель цветного ЖК-дисплея

Оптоволоконные коммутационные структуры

Цель лекции: *изучение оптических коммуникаций и проводящих сред, оптического волокна, классификации, оновных параметров, конструкционных особенностей, технологии изготовления.*

Оптоволокно — это стеклянная или пластиковая нить, используемая для переноса света внутри себя посредством полного внутреннего отражения. Волоконная оптика — раздел приборостроения, описывающий такие волокна.

Оптоволокна используются в оптоволоконной связи, которая позволяет передавать цифровую информацию на большие расстояния и с более высокой скоростью передачи данных, чем в электронных средствах связи. Оптическое волокно играет ту же роль что и медный провод используемый для передачи различной информации (телефонные линии, компьютерные сети и др.). Однако, в отличие от медного провода, по оптоволокну переносится свет, а не электрический сигнал. В связи с этим появляется множество преимуществ, что позволяет использовать оптическое волокно как несущую среду в различных областях.

Оптическое волокно - это диэлектрическая структура, по которой распространяется оптический сигнал. Как правило, волокно используется в виде кабеля, т.е. окружено защитной оболочкой, предохраняющей его от механических повреждений и воздействий окружающей среды.

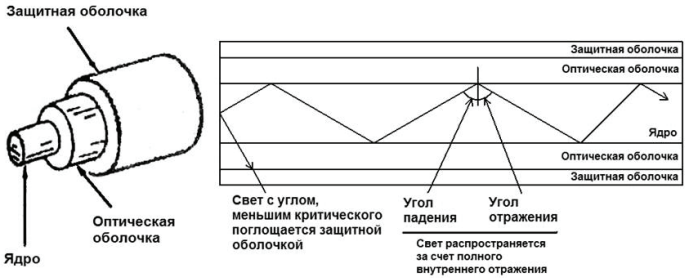


Рис. 2. Полное внутреннее отражение в оптическом волокне.

Классификация оптических волокон

• **Стеклянные волокна**. Данный тип волокон имеет стеклянное ядро и стеклянную оболочку. Данный тип волокон обладает наилучшими характеристиками из всех, однако это волокно является самым дорогостоящим. Стекло, используемое в данном типе волокон состоит из сверхчистого диоксида кремния или плавленого кварца. Для получения требуемого показателя преломления в стекло добавляют различные примеси. Для увеличения показателя в стекло добавляется германий и фосфор, а для уменьшения – бор и фтор. Также в стекле присутствуют другие примеси, ухудшающие характеристики волокна (в основном мельчайшие капли воды).

• **Стеклянные волокна с пластиковой оптической оболочкой**. Являются промежуточным вариантом. Они имеют не столь хорошие характеристики как волокна со стеклянной оптической оболочкой однако являются вполне приемлемыми. В отличие от стеклянных волокон не имеют дополнительной защитной оболочки.

• **Полимерные волокна**. Имеют пластиковое ядро и пластиковую оптическую оболочку. Имеют самые худшие характеристики из всех. Однако низкая себестоимость и простота использования делают их привлекательными там, где требования к величинам затухания и полосе пропускания не столь высоки. Электромагнитная невосприимчивость и секретность передачи информации по пластиковым волокнам делают их применение оправданным. Также не имеют защитной оболочки.

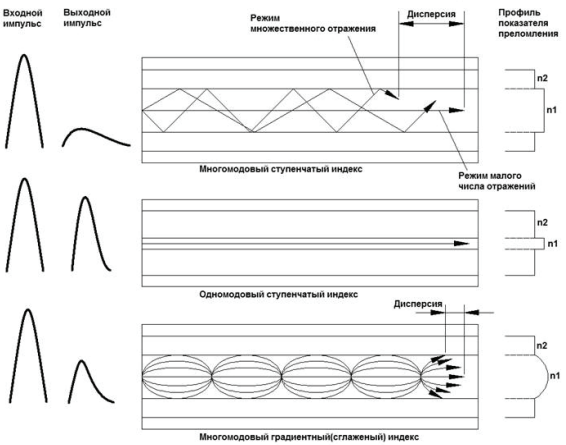


Рис. 4. Типы распространения света в волокне.

• Одномодовое волокно со ступенчатым индексом. Как видно из названия одномодовое волокно способно передавать лишь одну моду. Явление межмодовой дисперсии в таком волокне отсутствует, а ширина полосы пропускания ограничивается молекулярной дисперсией.

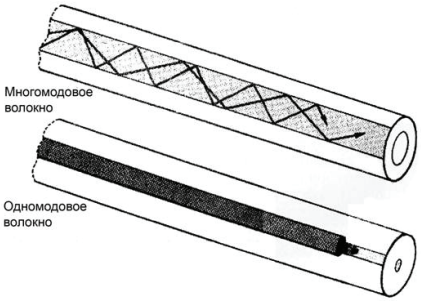


Рис. 7. Распределение оптической мощности в многомодовом и одномодовом волокне.

• Многомодовое волокно со ступенчатым индексом. Является наиболее простым типом волокон.

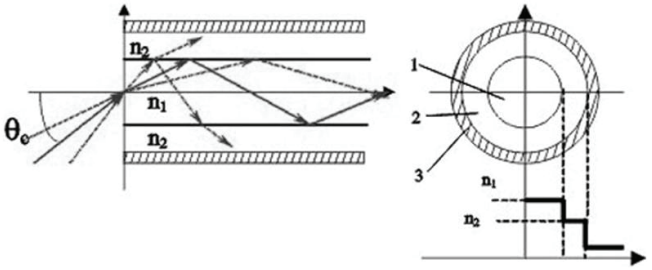


Рис. 5. Волокно со ступенчатым показателем преломления.
(1-ядро, 2-оптическая оболочка, 3-защитная оболочка)

• Многомодовое волокно со сглаженным индексом.

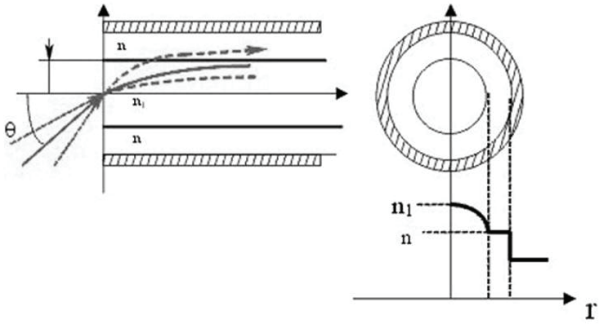


Рис. 6. Многомодовое волокно с градиентным профилем показателя преломления.

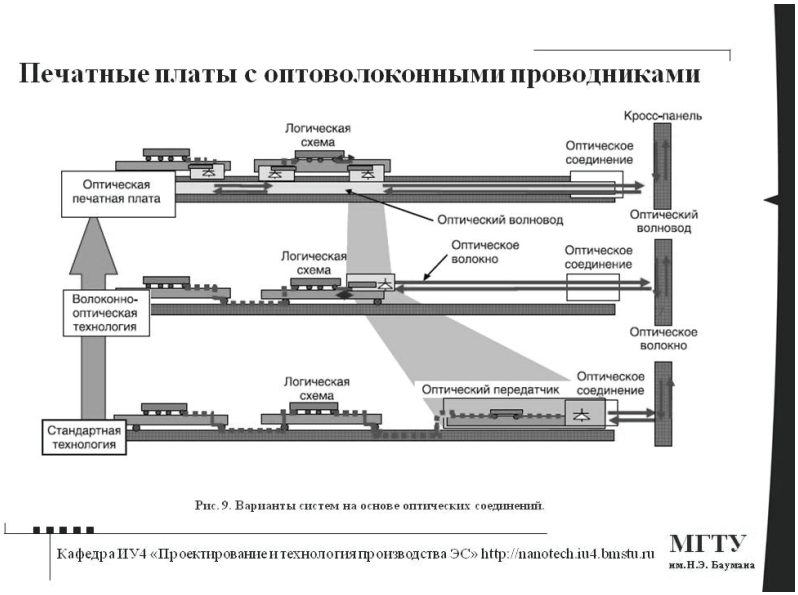


Рис. 9. Варианты систем на основе оптических соединений.

При выступлении необходимо стремиться избегать всяческих канцеляризмов, сорных слов типа «значит», «так сказать» и т. д., жаргонных выражений. При получасовом выступлении возможно использование 2–3 цитат и 5 округленных цифр.

Психологи отмечают, что внимание аудитории к лектору постепенно начинает снижаться уже через 15 минут после начала. В связи с этим не рекомендуется слишком затягивать свое выступление.

Установлено, что восприятие материала возрастает при комплексности воздействия на органы чувств человека. Поэтому желательно демонстрировать на лекции цветные слайды, видеофильмы, образцы, красочные плакаты и т. п.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Руководствуясь единой концепцией создания учебных пособий и методических материалов в рамках библиотеки «Конструирование и технология электронных средств», разработан комплект учебно-методического обеспечения по дисциплине «Проектирование коммутационных структур электронных средств», входящей в комплекс дисциплин подготовки бакалавров по направлению подготовки 211 000 «Конструирование и технология электронных средств».

Представленные методические материалы по дисциплине содержат её нормативную базу, рекомендации по организации и проведению лекционных и лабораторных занятий, перечень слайдов, типовых плакатов и других дидактических материалов, необходимых профессорско-преподавательскому составу для её преподавания.

В основу методических материалов по дисциплине «Проектирование коммутационных структур электронных средств» положен курс, читаемый авторами на факультете «Информатика и системы управления» в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Материалы учебно-методического комплекса разработаны с привлечением и в кооперации с центром перспективных технологий и аппаратуры (ЦПТА), ООО «Альтоника», МНПО «Спектр», ООО «Электрон-сервис-технология», «Связь-Инжиниринг» и другими предприятиями и соответствуют программам подготовки специалистов, реализуемым в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Структура и состав учебно-методического обеспечения соответствует требованиям Федеральных законов № 3266-1 от 10.07.1992 «Об образовании» (с изменениями и дополнениями) и № 125-ФЗ от 22.08.1996 «О высшем и послевузовском профессиональном образовании» (с изменениями и дополнениями), а также типовому положению «Об образовательном учреждении высшего профессионального образования (высшем учебном заведении)», утвержденному Постановлением Правительства РФ № 71 от 14 февраля 2008 г.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Законников В.П., Родионов Е.М.* Методические указания к курсовому проектированию по технологии приборостроения. Ч. 3 / Под ред. В.Н. Гриднева. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1979.
2. *Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И., Филин Г.В.* Технология ЭВА, оборудование и автоматизация : учеб. пособие для студентов вузов специальности «Конструирование и производство ЭВА». – М. : Радио и связь, 1984.
3. *Артемьев Б.В.* Стабилизация спектра и потока зондирующего излучения для рентгеновской толщинометрии // Контроль. Диагностика. – 2003. – № 5. – С. 14–15.
4. *Артемьев Б.В., Владимиров Л.В., Козлов А.А.* Высокостабильные детекторы рентгеновского излучения, гетерогенные ионизационные камеры в медицинской и промышленной рентгеновской диагностике // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 3. – С. 73–78.
5. *Артемьев Б.В., Гусев Е.А., Потапов В.Н.* О выборе параметров источника тормозного излучения и роли рассеянного излучения при томографическом контроле // Дефектоскопия. – 1991. – № 9. – С. 36–44.
6. *Артемьев Б.В., Шубочкин А.Е.* Рентгеновская толщинометрия // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 2. – С. 24–31.
7. *Балухто А.Н., Бурый Е.В., Власов А.И.* [и др.] Нейрокомпьютеры в системах обработки изображений : Кн. 7 / Под ред. А.И. Галушкина, Ю.В. Гуляева. – М. : Радиотехника, 2003. – 192 с.: ил. (Нейрокомпьютеры и их применение).
8. *Билибин К.И.* Основы проектирования приспособлений : учебное пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 52 с.
9. *Билибин К.И., Власов А.И., Журавлева Л.В.* [и др.] Конструкторско-технологическое проектирование электронной аппаратуры : учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. / Под общ. ред. В.А. Шахнова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 568 с.: ил.
10. *Билибин К.И., Гриднев В.Н.* Проектирование маршрутных и операционных технологических процессов в технологии приборостроения. – М. : Изд-во МВТУ им. Н.Э. Баумана, 1987.

11. *Билибин К.И., Гриднев В.Н., Кузин А.П.* Проектирование технологической оснастки для сборки модулей ЭВА первого уровня : метод. указания к курсовому проектированию по курсам: «Технология приборостроения и производства ЭВА и РЭА». – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1988. – 34 с.
12. *Власов А.И.* Системный анализ технологических процессов производства сложных технических систем с использованием визуальных моделей // Международный научно-исследовательский журнал. – 2013. – № 10-2. – С. 17–26.
13. *Власов А.И., Гриднев В.Н., Константинов П., Юдин А.В.* Нейросетевые методы дефектоскопии печатных плат // Электронные компоненты. – 2004. – № 8. – С. 148–155.
14. *Власов А.И., Елсуков К.А., Косолапов И.А.* Оптическая микроскопия : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 184 с.: ил. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн. Кн. 12.)
15. *Власов А.И., Елсуков К.А., Косолапов И.А.* Электронная микроскопия : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – 168 с.: ил. (Библиотека «Наноинженерия»: в 17 кн. Кн. 11.)
16. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы. 2-е изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М. : ООО «Волоконно-оптическая техника», 2005. – 576 с.
17. *Гриднев В.Н., Малов А.Н., Яншин А.А.* Технология элементов ЭВА : учеб. пособие для студентов специальности «Конструирование и производство электронно-вычислительной аппаратуры» / Под ред. А.Н. Малова. – М., 1978.
18. *Гриднев В.Н., Сергеева М.Д., Чебова А.И.* Линейные модели распознавания тепловизионных изображений неисправностей электронных ячеек // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 8. – С. 57–66.
19. *Гриднев В.Н., Скворцов К.Ф.* Методические указания к домашнему заданию по курсу ТПС и ТП ЭВА / Под ред. О.Д. Парфенова. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1981.
20. *Джональд Дж. Стерлинг.* Волоконная оптика. Техническое руководство. – М. : Изд-во «ЛОРИ», 2001. – 288 с.: ил.
21. *Захаржевский С.Б., Курносенко А.Е.* Расчет изделий электроники на механические и тепловые воздействия в САПР *Creo* : учеб. пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. – 56 с.: ил.
22. *Ивченко В.Г.* Конструирование и технология ЭВМ. Конспект лекций. – Таганрог, 2001.
23. *Камышная Э.Н., Маркелов В.В., Соловьев В.В.* Конструкторско-технологические расчеты электронной аппаратуры : учебное пособие. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. – 165 с.

24. *Клюев В.В., Артемьев Б.В.* О развитии неразрушающего контроля и технической диагностики в России // Контроль. Диагностика. – 2014. – № 3. – С. 45–60.
25. *Клюев В.В., Кузелев Н.Р., Артемьев Б.В.* Сессия научного совета РАН по автоматизированным системам диагностики и испытаний // Контроль. Диагностика. – 2013. – № 6. – С. 72–80.
26. *Маркелов В.В., Власов А.И., Камышная Э.Н.* Системный анализ процесса управления качеством изделий электронной техники // Надежность и качество сложных систем. – 2014. – № 1 (5). – С. 35–42.
27. *Панфилова С.П., Червинский А.С., Власов А.И., Гриднев В.Н.* Бесконтактный тепловой контроль изделий электронной техники // Производство электроники: технологии, оборудование материалы. – 2007. – № 3. – С. 25–32.
28. *Панфилова С.П., Червинский А.С., Власов А.И., Гриднев В.Н.* Бесконтактный тепловой контроль электронно-вычислительных средств // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2007. – № 6. – С. 1–9.
29. *Пирогова Е.В.* Проектирование и технология печатных плат : учебник. – М. : Форум; ИНФРА-М, 2005. – 560 с.
30. *Тупик В.А.* Технология и организация производства радиоэлектронной аппаратуры : учебное пособие. – СПб. : Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2004. – 144 с.: ил.
31. *Умберто Эко*. Как написать дипломную работу. – КДУ, 2003.
32. *Чеканов А.Н.* Расчеты и обеспечение надежности электронной аппаратуры : учебное пособие. – М. : Кнорус, 2012. – 440 с.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ 5
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ 8
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ КУРСА 10
1. КОНСПЕКТ ЛЕКЦИЙ 17
1.1. Введение в технологию коммутационных структур 17
1.2. Конструктивные элементы печатных плат (термины и определения) 20
1.2.1. Понятие печатного монтажа 20
1.2.2. Классы точности и плотности печатного монтажа 27
1.3. Типы печатных плат и их конструктивные особенности 29
1.4. Методы изготовления печатных плат 39
1.4.1. Способы получения рисунка печатной платы 39
1.4.2. Способы получения проводящего рисунка печатной платы 42
1.4.3. Химический метод изготовления печатных плат 45
1.4.4. Комбинированный позитивный метод изготовления печатных плат 47
1.4.5. Тентинг-метод изготовления печатных плат 51
1.4.6. Электрохимический метод изготовления печатных плат 52
1.5. Технологии изготовления некоторых типов ПП 56
1.6. Оптические коммуникации и проводящие среды 82
1.6.1. Основные понятия волоконной оптики 82
1.6.2. Оптическое волокно 86
1.6.3. Классификация оптических волокон 88
1.6.4. Основные параметры оптоволокна 92
1.6.5. Конструкция волоконно-оптического кабеля 95
1.6.6. Печатные платы с оптоволоконными проводниками 96

1.7. Электрический монтаж модулей микро- и наносистем на основе МКС 97
1.7.1. Понятие электрических соединений 97
1.7.2. Выводной монтаж на коммутационных структурах 100
1.7.3. Пайка выводов 102
1.7.4. Поверхностный монтаж на коммутационных структурах 105
1.8. Технологическая подготовка производства ЭС 112
1.8.1. Понятия производственного и технологического процессов 112
1.8.2. Качественная и количественная оценка технологичности 116
1.8.3. Основные положения теории базирования 119
1.8.4. Разработка маршрутного ТП сборки 123
1.8.5. Разработка операционного ТП сборки 125
1.8.6. Проектирование технологической оснастки 132
1.8.7. Контроль и испытания коммутационных структур 134
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ДОМАШНЕГО ЗАДАНИЯ 141
2.1. Домашнее задание № 1. Расчет узких мест коммутационных структур при различных методах изготовления коммутационных структур 141
2.1.1. Конструктивные особенности печатных плат 141
2.1.2. Методы изготовления печатных плат 148
2.1.3. Особенности некоторых операций технологического процесса изготовления печатных плат 154
2.1.4. Методика расчета геометрических параметров печатного монтажа с учетом технологических ограничений 160
2.1.5. Порядок выполнения домашнего задания 167
2.2. Домашнее задание № 2. Проектирование ТП сборки ячеек электронных модулей 171
2.2.1. Исходные данные 171
2.2.2. Разработка маршрутного ТП сборки 176
2.2.3. Разработка операционного ТП сборки 180
2.2.4. Разработка операционного эскиза сборки ячейки электронного устройства 186
2.2.5. Разработка операционного ТП для серийного производства электронных модулей 192

3. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ 194

3.1. Лабораторная работа № 1. Исследование геометрических параметров проводящего рисунка коммутационных структур 194

3.2. Лабораторная работа № 2. Исследование качества переходных отверстий ПП 202

3.3. Лабораторная работа № 3. Изучение операций и оборудования для промышленного производства ПП 209

3.4. Лабораторная работа № 4. Изучение операций поверхностного монтажа КМП 216

3.5. Лабораторная работа № 5. Разработка принципиальной схемы ЭМ с помощью стандартного вычислительного пакета 222

3.6. Лабораторная работа № 6. Разводка проводящего рисунка ПП на базе стандартного вычислительного пакета 222

3.7. Лабораторная работа № 7. Адаптация электронного проекта ЭМ к условиям производства на базе стандартного машинного пакета 223

3.8. Лабораторная работа № 8. Практическое применение машинного пакета для программирования технологического оборудования 223

4. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ 224

4.1. Задание на курсовую работу 224

4.2. Рекомендации по выполнению курсовой работы 227

4.2.1. Рекомендации по разработке введения 227

4.2.2. Рекомендации по разработке раздела «Технологическое проектирование» 232

4.2.3. Рекомендации по разработке оборудования и оснастки 263

4.2.4. Рекомендации по экспериментальным исследованиям, функциональному контролю и испытаниям 264

4.2.5. Рекомендации по оформлению результатов проектирования 274

5. МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ 275
5.1. Нормативная документация по дисциплине 275
5.1.1. Учебно-методический комплекс по дисциплине 275
5.1.2. Примерная базовая программа дисциплины 284
5.2. Структура и состав фондов оценочных средств по дисциплине 311
5.2.1. Перечень вопросов для рейтинговых и контрольных мероприятий 311
5.2.2. Варианты экзаменационных билетов 314
5.3. Спецификация учебных видео- и аудиоматериалов, слайдов, эскизов плакатов и других дидактических материалов 321
5.3.1. Спецификация слайдов – конспектов лекций 321
5.3.2. Пример оформления дидактических материалов по лекциям 323
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 335
ЛИТЕРАТУРА 336

Учебно-методический комплекс
по направлению подготовки бакалавров и магистров 211 000
«Конструирование и технология электронных средств»

Владимир Николаевич Гриднев
Галина Николаевна Гриднева

ПРОЕКТИРОВАНИЕ КОММУТАЦИОННЫХ СТРУКТУР ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

Редактор *К.Ю. Савинченко*
Технические редакторы *М.Р. Фишер*, *А.Л. Репкин*, *К.Ю. Савинченко*
Корректор *Т.В. Тимофеева*
Дизайн обложки *М.Р. Фишер*

Оригинал-макет подготовлен
в редакционно-издательском отделе КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана.
Тел. 8-4842-57-31-87

Подписано в печать . Формат 60×90/16. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 21,5. Тираж экз. Заказ №

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.
E-mail: press@bmstu.ru
http://www.press.bmstu.ru

Отпечатано в типографии МГТУ им. Н.Э. Баумана
105005, Москва, 2-я Бауманская, 5.
Тел.: 8-499-263-62-01