



**А.П. Достанко**  
**В.Л. Ланин**  
**А.А. Хмыль**  
**П.П. Ануфриев**

# **ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**



**А.П. Достанко**  
**В.П. Панин**  
**А.А. Хмыль**  
**П.П. Януфриев**

# **ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА**

Под общей редакцией академика А. П. Достанко

Утверждено Министерством образования  
Республики Беларусь в качестве учебника  
для студентов специальности "Проектирование  
и производство радиоэлектронных средств"  
высших учебных заведений



Минск  
"Вышэйшая школа"  
2002

УДК 621.396.6.002:658.512.011.56(075.8)  
ББК 32.844я73  
Т38

А. П. Достанко  
В. Л. Ланин  
А. А. Хмыль  
Л. П. Ануфриев

**Рецензенты:**

кафедра КиТРЭС Полоцкого государственного университета;  
заведующий лабораторией Института электроники  
Национальной академии наук Беларуси кандидат  
технических наук *В. П. Мельников*

**Технология** радиоэлектронных устройств и автоматиза-  
Т 38 ция производства: Учебник / А. П. Достанко, В. Л. Ланин,  
А. А. Хмыль, Л. П. Ануфриев; Под общ. ред. А. П. Достан-  
ко. — Мн.: Выш. шк., 2002. — 415 с.: ил.

ISBN 985-06-0500-6.

Рассмотрены общие принципы проектирования, моделирования и автоматизации технологических процессов, технологическое оборудование, основы автоматизации производства, автоматизированные системы управления технологическими процессами. Описаны физико-технологические основы процессов сборки, монтажа и защиты электронной аппаратуры от климатических воздействий.

Для студентов специальностей «Проектирование и производство РЭС», «Проектирование и технология ЭВС», «Электронно-оптическое аппаратостроение» высших учебных заведений, а также аспирантов и инженерно-технических работников.

УДК 621.396.6.002:658.512.011.56(075.8)

ББК 32.844я73

ISBN 985-06-0500-6

© Достанко А. П., Ланин В. Л., Хмыль А. А.,  
Ануфриев Л. П., 2002

© Издательство «Высшая школа», 2002

## ПРЕДИСЛОВИЕ

**Технология** — это наука, которая изучает основные закономерности, действующие в процессе производства, и использует их для получения изделий требуемого качества, заданного количества и номенклатуры при минимальных материальных, энергетических и трудовых затратах. Технология (от греческого *techne* — умение, мастерство, *logos* — наука) — это наука о мастерстве.

**Предмет дисциплины** — технология сборки, монтажа, настройки и регулировки радиоэлектронной аппаратуры, а также оборудование и средства автоматизации производства.

**Цель преподавания дисциплины** — изучение технологических систем производства, включая методы проектирования и управления оптимальными технологическими процессами с применением микропроцессоров и микроЭВМ, обеспечивающих интенсификацию и эффективность производства, высокое качество изготавливаемой продукции, изучение средств автоматизации, в том числе гибких производственных систем, методов моделирования, оптимизации, анализа и синтеза технологических систем производства.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать физико-технологические основы процессов сборки и монтажа, контроля, регулировки электронной аппаратуры, методику их проектирования и оптимизации с применением ЭВМ, принципы организации, построения и управления технологическими системами производства в условиях ГАП с применением микро- и миниЭВМ, уметь разрабатывать и внедрять новые технологические процессы автоматизированного производства с использованием промышленных роботов и микропроцессорных систем, уметь проектировать технологические планировки ГПМ, участков ГАП с применением микропроцессорных систем управления.

Учебник обобщает достижения современной отечественной и зарубежной технологии и состоит из 17 глав, в которых описываются технологические системы производства, принципы их проектирования, оценки точности и надежности, моделирования и оптимизации.

С позиции конструктивно-технологического анализа дана оценка поколений электронной аппаратуры и технологичности конструкций. Подробно рассмотрены вопросы проектирования производственных процессов, анализа производственных погрешностей изделий и оценки технологической точности их изготовления, основы функционирования технологических систем и методика их моделирования. Уделено внимание вопросам технологического мониторинга, моделирования систем массового обслуживания и статистического моделирования сборочных процессов.

Значительное место отведено физико-технологическим основам процессов и оборудованию для производства коммутационных плат, намоточных изделий, сборки и монтажа блоков, контроля, регулировки, тренировки и герметизации аппаратуры. Систематизированы технологии электрических и механических соединений при сборке электронной аппаратуры, групповой пайки блоков, внутри- и межблочного монтажа, методы и средства технической диагностики, применяемое технологическое и контрольно-испытательное оборудование.

Рассмотрены вопросы автоматизации производства, гибкие производственные системы, автоматизированные системы управления и проектирования технологических процессов, автоматические линии, робототехнологические комплексы и гибкие производственные модули в производстве радиоэлектронной аппаратуры.

Изложение материала основано на опыте преподавания авторами дисциплины "Технология РЭУ и автоматизация производства" в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в течение 25 лет на кафедрах "Технология РЭА", "Современные электронные технологии", "Электронная техника и технология".

Материал между авторами распределен следующим образом: гл. 1 написали совместно В.Л. Ланин и А.А. Хмыль, гл. 2—5 — А.А. Хмыль, предисловие, гл. 6, 7, 9, 10, 12, 15—17 — В.Л. Ланин, гл. 14 — совместно А.П. Достанко и Л.П. Ануфриев.

Авторы считают своим приятным долгом выразить признательность рецензентам: к.т.н., В.П. Мельникову (Институт электроники Национальной академии наук Беларуси), зав. кафедрой, к.т.н., доценту Ю.Г. Грозбергу (Полоцкий государственный университет).

Все отзывы и пожелания просим направлять по адресу: 220013, Минск, ул. П. Бровки 6, БГУИР, кафедра "Электронная техника и технология".

*A*

*в*

*т*

*о*

*р*

*ы*

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЗУ – автоматическое загрузочное устройство	ЕСПД - Единая система программной документации
АИГ – алюмоиттриевый гранат	ЕСТД - Единая система технологической документации
АКИЯ – автоматизированная контрольно-измерительная ячейка	ЕСТПП - Единая система технологической подготовки производства
АЛ – автоматическая линия	ЕС ЭВМ – Единая система ЭВМ
АМ – амплитудная модуляция	ЗРУ – загрузочно-разгрузочное производство
АОЯ – автоматическая обрабатывающая ячейка	ЗУ – запоминающее устройство
АПЧ – автоматическая подстройка частоты	ИК – инфракрасный
АПЧГ – автоматическая подстройка частоты гетеродина	ИМС – интегральная микросхема
АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства	ИПК – интегрированный производственный комплекс
АСУ – автоматизированная система управления	ИЭТ – изделия электронной техники
АСУП – автоматизированная система управления производством	КВ – короткие волны
АТК – автоматизированный технологический комплекс	КД – конструкторская документация
АТЯ – автоматическая транспортная ячейка	КК – комплектовочная карта
АЦП – аналого-цифровой преобразователь	КП – коммутационные платы
АЯС – автоматическая ячейка склада	КПД – коэффициент полезного действия
БД – банк данных	КПМ – компонент поверхностного монтажа
БИС – большая интегральная схема	КЭ – коммутационный элемент
БНК – базовая несущая конструкция	МаБИС – матричная большая интегральная схема
ВКУ – видеоконтрольное устройство	МК – маршрутная карта
ВМ – ведомость материалов	МКМ – многокристальный модуль
ВО – ведомость оснастки	МКП – многослойная керамическая плата
ВОП – ведомость операций контроля	ММ – микромодуль
ГАП – гибкое автоматическое производство	МОП – металл-оксид-полупроводник
ГКНТ – Государственный комитет по науке и технологиям	МПП – многослойная печатная плата
ГПК – гибкий печатный кабель	МСБ – микросборка
ГПМ – гибкий производственный модуль	МЭА – микроэлектронная аппаратура
ГПП – гибкая печатная плата	НПО – научно-производственное объединение
ГПС – гибкая производственная система	Оже – метод электронной спектроскопии
ГСС – генератор стандартных сигналов	ОК – операционная карта
ДВ – длинные волны	ОКГ – оптический квантовый генератор
ДПП – двусторонняя печатная плата	ОМ – объемный модуль
ДСЕ – детали и сборочные единицы	ОПП – односторонняя печатная плата
ЕСКД – Единая система конструкторской документации	ОС – обратная связь
	ОСТ – отраслевой стандарт
	ПАВ – поверхностно-акустические волны
	ПВС – поливиниловый спирт
	ПВЦ – поливинилциннамат
	ПЛ – полосковые линии

ПНЧ – преобразователь низкой частоты  
ПП – печатная плата  
ППП – полупроводниковый прибор  
ПР – промышленный робот  
ПФЭ – полный факторный эксперимент  
ПЧ – промежуточная частота  
ПЭВМ – персональная ЭВМ  
РТК – робототехнологический комплекс  
РТЛ – робототехнологическая линия  
РТМ – руководящий технический материал  
РЭА – радиоэлектронная аппаратура  
РЭМ – растровый электронный микроскоп  
РЭС – радиоэлектронное средство  
САПР – система автоматизированного проектирования  
САР – система автоматической регулировки  
СБИС – сверхбольшие интегральные схемы  
СВ – средние волны  
СВЧ – сверхвысокая частота  
СМО – система массового обслуживания  
СМРК – submodule радиоканала  
СОП – система оптимизации программ  
СТЗ – система технического зрения  
СТО – система технического оснащения  
ТБ – технологическое бюро  
ТД – технологическая документация  
ТЗС – термозвуковая сварка  
ТК – технологический классификатор  
ТКС – термокомпрессионная сварка  
ТКУ – тканое коммутационное устройство  
ТИ – технологическая инструкция  
ТЛ – титульный лист комплекта ТД  
ТП – технологический процесс  
ТПП – технологическая подготовка производства  
ТС – технологическая система  
ТУ – технические условия  
ТЭЗ – типовой элемент замены  
ТЭС – типовой элемент сборки  
УЗ – ультразвуковой  
УНЧ – усилитель низкой частоты  
УПТ – усилитель постоянного тока  
УПЧИ – усилитель промежуточной частоты изображения  
УФ – ультрафиолетовый  
ФЯ – функциональная ячейка  
ЦКОП – центральный композиционный ортогональный план  
ЦКП – центральный композиционный план  
ЧМ – частотная модуляция  
ЧПУ – числовое программное управление  
ЭА – электронная аппаратура  
ЭВМ – электронно-вычислительная машина  
ЭВП – электровакуумный прибор  
ЭЛТ – электронно-лучевая трубка  
ЭРЭ – электрорадиоэлемент

# 1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## 1.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Современная *электронная аппаратура* (ЭА) представляет собой сложный комплекс технических устройств, объединенных общим управлением и предназначенных для автоматического приема, преобразования, обработки и передачи информации в соответствии с заданным алгоритмом. С конструктивно-технологической точки зрения ЭА — это совокупность механических деталей, активных и пассивных электрорадиоэлементов (ЭРЭ), интегральных микросхем (ИМС), объединенных в функционально законченные сборочные единицы, и их модульная компоновка. Базовые конструкции аппаратуры имеют несколько уровней модульности, предусматривающих объединение простых модулей в более сложные. По мере развития ЭА элементная база и состав модулей изменяются, изменяется и технология их изготовления. Это удобно проследить, рассматривая поколения выпускаемой ЭА (рис.1.1).

Первое поколение (20—50-е гг.) характеризовалось использованием электровакуумных приборов (ЭВП), электромеханических коммутационных элементов (КЭ) и объемных ЭРЭ. В качестве начального уровня использовался *объемный модуль* (ОМ), под которым подразумевалась часть схемы, выполняющая определенную функцию (формирование, усиление, преобразование сигнала) и имеющая законченное конструктивное оформление. Электрическое соединение ЭРЭ на всех уровнях осуществлялось вручную с применением проводного (объемного) монтажа. Аппаратура имела большие габариты и массу, низкую надежность, высокую трудоемкость сборки, низкую плотность монтажа (не более 2—5 соед/см<sup>3</sup>), потребляла большое количество электроэнергии (1—100 кВт).

При дальнейшем развитии ЭА возникло противоречие между стремлением конструкторов повысить плотность монтажа и большой мощностью, рассеиваемой ЭВП, которое разрешилось созданием новой элементной базы — полупроводниковых приборов (ППП).

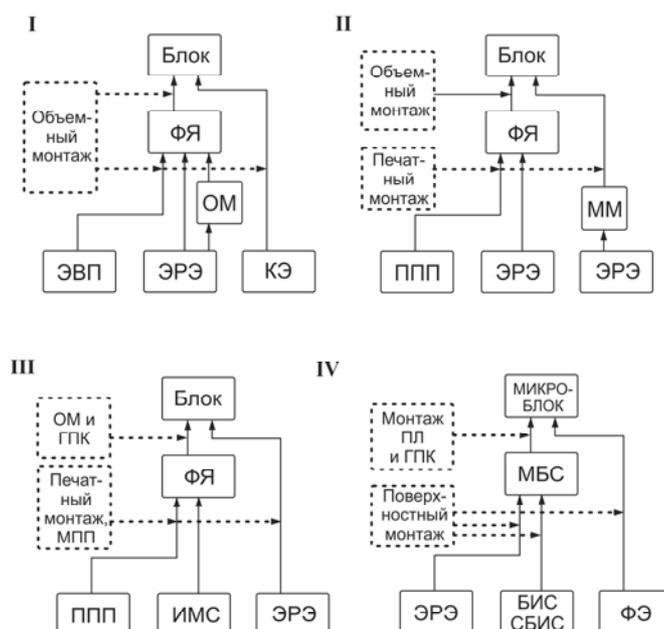


Рис.1.1. Структурные схемы поколений ЭА

Второе поколение (50—60-е гг.) характеризовалось широким применением дискретных ППП, микромодулей из объемных ЭРЭ, внедрением печатных плат (ПП) на этапе сборки функциональных ячеек. Межблочные соединения выполнялись жгутовым монтажом. Плотность монтажа увеличилась в 10 раз и составила 15—20 соед/см<sup>2</sup>, в 10 раз увеличилась производительность процессов сборки за счет групповой пайки волной припоя, объем функциональных ячеек уменьшился в 20—25 раз, потребляемая мощность — в 10—20 раз.

Третье поколение (70-е гг.) характеризовалось использованием интегральных элементов и созданием типовых элементов сборки (ТЭС), которые отличались упорядоченным расположением элементов, что позволило использовать их механизированную установку на платы (рис. 1.2, а). ИМС стала модулем первого уровня, а плотность упаковки достигла 500 элем/см<sup>2</sup>.

Вначале превалировали аналоговые ИМС на основе биполярных транзисторов. Начиная с 1975 г. большее распространение получили цифровые ИМС на основе МОП-структур (металл—оксид—проводник), которые обладали существенными преимуществами по возможности миниатюризации, энергопотреблению и высокому проценту выхода годных изделий. Объем блоков уменьшился в 20 раз, потребление мощности — в 15 раз, а производительность труда увеличилась в 3—5 раз по сравнению со вторым поколением ЭА.

Для монтажа функциональных ячеек (ФЯ) стали применяться многослойные печатные платы (МПП), а внутриблочный монтаж проводили с помощью коммутационных печатных плат (КПП) и гибких печатных кабелей (ГПК). Межблочные соединения выполнялись методом накрутки с помощью эффективного полуавтоматического и автоматического оборудования. Это позволило достигнуть высокой идентичности и надежности аппаратуры, и снизить ее себестоимость, широко применять автоматизацию производства.

В дальнейшем возникло новое противоречие: степень интеграции элементов в одном кристалле достигла 10<sup>5</sup> элементов, а габариты блоков оставались значительными из-за громоздких функциональных, коммутационных и других элементов.

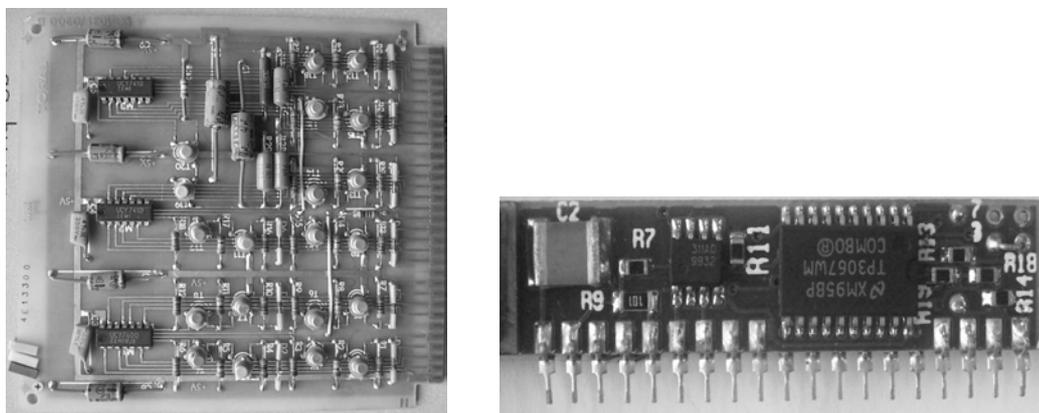


Рис.1.2. Типовой элемент сборки (а) и микромодуль (б)

Четвертое поколение (80-е гг.) характеризовалось использованием микроблоков и микромодулей, которые содержали микросборки частного применения, бескорпусные ИМС, большие и сверхбольшие интегральные микросхемы (БИС и СБИС), акусто- и оптоэлектронные приборы, а также безвыводные поверхностно-монтажные ЭРЭ и ИМС (рис. 1.2.,б).

Основной конструктивной единицей оставался ТЭС, но для его изготовления использовались методы поверхностного монтажа, внутриблочный монтаж полосковыми линиями (ПЛ) и ГПК. Плотность монтажа увеличилась, объем монтажа уменьшился в 20 раз, потребляемая мощность — в 50 раз, производительность труда увеличилась в 40—50 раз по сравнению со вторым поколением.

Совершенствование элементов памяти на полупроводниковых структурах для внутренних запоминающих устройств (ЗУ) позволило в едином технологическом цикле на одной подложке создавать не только матрицы памяти, но и схемы управления ЗУ. Таким образом были созданы *микромикропроцессоры* — устройства обработки цифровой информации, состоящие из памяти, операционной и управляющей частей. Быстродействие электронных приборов по сравнению со вторым поколением возросло на два порядка, что привело к расширению их функциональных возможностей в обработке информации (1 Гбит/с).

Многие виды СБИС, например анализаторы и синтезаторы речи, ЗУ, удовлетворяли требованиям обработки больших объемов данных, свойственных эре информации. Так, в 90-х гг. до 50 % всего работающего населения США и 35—40 % в Западной Европе и Японии было занято в сфере информации. Успехи в развитии технологии СБИС как ключевого элемента систем обработки информации оказали глубокое влияние на всю мировую экономику.

Пятое поколение (90-е гг.) характеризуется использованием многокристалльных модулей (МКМ), сверхпроводниковых схем и элементов, вхождением в молекулярную электронику. Это требовало создания новых материалов, сверхчистых и безлюдных технологий. Повышение степени интеграции изменило состав и структуру конструктивных уровней компоновки ЭА: увеличилась сложность элементной базы, уменьшилось число уровней, снизилась сложность конструкции, устройств, т. е. микроэлектронные изделия заняли уровни более высокой функциональной сложности.

В XXI в. темпы внедрения инноваций в микроэлектронику будут еще выше. Так, программа развития национальной полупроводниковой промышленности США (National Technology Roadmap for Semiconductors) в 2001 г. предусматривает переход на топологический размер 0,15 мкм, плотность элементов достигнет  $10 \cdot 10^6/\text{см}^2$ , алюминиевая металлизация будет заменена на медную.

Анализ развития ЭА позволяет не только установить особенности современной аппаратуры, но и наметить перспективные пути развития технологии ее производства. К конструктивно-технологическим особенностям ЭА относятся:

- постепенное усложнение и переход от аппаратов к сложным комплексам и системам;
- прогрессирующая микроминиатюризация изделий;
- модульная компоновка из функционально законченных схем и блоков;
- изготовление отдельных модулей и последующая их сборка в более сложные единицы;
- автоматизация проектирования, изготовления и управления производством.

Таким образом, микроминиатюризация и повышение степени интеграции определяют комплексный подход к разработке ЭА, включающий во взаимосвязи решение системно-, схмотехнических и конструкторско-технологических вопросов.

## 1.2. СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К ТЕХНОЛОГИИ И ИЕРАРХИЧЕСКИЕ УРОВНИ ПРОИЗВОДСТВА

Производственный процесс изготовления ЭА состоит из большого количества технологических операций, реализуемых на различном оборудовании. Отдельные станки объединяются в линии изготовления деталей, ЭРЭ, сборки. Работа станков, линий и процесс в целом характеризуется частичной или полной синхронизацией и взаимозависимостью выполнения режимов. Поэтому производственный процесс можно отнести к сложным системам, а для его анализа необходимо использовать системный подход. Процессы, используемые в производстве ЭА, классифицируют на 5 групп.

1. Производство элементной базы, в том числе ЭРЭ, функциональных элементов (ФЭ), микросборок (МСБ) и ИМС, для которого характерны: высокий уровень технологичности и автоматизации, массовый тип производства, тщательность разработки конструкции, высокая надежность и низкая стоимость. Дальнейшее развитие элементной базы будет идти по пути разработки новых материалов, ужесточения требований к их параметрам, уменьшения дефектов подложек, повышения точности и автоматизации контроля параметров, использования ЭВМ на стадии проектирования и управления всеми процессами.

2. Изготовление элементов несущих конструкций (штамповка, литье, прессование, точение, фрезерование, электрофизические методы обработки и др.), которые заимствованы из других отраслей и приспособлены для производства ЭА. Совершенствование осуществляется по пути унификации как конструкторских, так и технологических решений, широкого использования безотходных и программно-управляемых технологий и гибких модулей программно-управляемого оборудования.

3. Изготовление функциональных элементов — ЗУ, линий задержки и фильтров на поверхностно-акустических волнах (ПАВ), которое характеризуется широким применением интегральной технологии, высокой идентичностью параметров, высокими требованиями к оборудованию и его производительности. Перспективными направлениями развития ФЭ и их технологии являются: использование новых материалов и явлений, повышение точности изготовления, снижение массогабаритных показателей.

4. Сборка, монтаж и герметизация ЭА, трудоемкость которых составляет до 50—80 % общих затрат производства. Эти процессы имеют низкий уровень автоматизации и механизации, широкую номенклатуру технологического оснащения, большую долю ручного труда. Для снижения длительности производственного цикла осуществляется параллельная сборка модулей различных уровней, сочетание на одной линии сборки и герметизации, комплексная автоматизация. Основными направлениями их совершенствования являются: повышение плотности компоновки навесных элементов на ПП, плотности печатного монтажа за счет применения МПП на керамических и полиимидных основаниях; широкое использование бескорпусных ЭРЭ, перспективной технологии поверхностного монтажа, применение автоматизированного оборудования; разработка новых методов сборки и монтажа модулей второго и последующих уровней; оптимизация количества операций промежуточного контроля по экономическим критериям; разработка мер по технологическому обеспечению надежности электрических соединений.

5. Контроль, регулировка и испытания ЭА, характеризуемые применением высококвалифицированной рабочей силы, специальной измерительной аппаратуры. От качества выполнения этих процессов во многом зависит надежность выпускаемой аппаратуры. Предварительный контроль и регулировка функциональных параметров отдельных модулей позволяют сократить время настройки аппаратуры в целом. Перспективным является широкое использование контролирующей и диагностирующей аппаратуры с применением микропроцессорных комплектов, повышение гибкости их работы и снижение трудозатрат.

Качество и надежность ЭА, а также экономическая эффективность ее производства обеспечиваются с учетом особенностей всех групп процессов. С позиций системного подхода производство ЭА — это сложная динамическая система, в которой в единый комплекс объединены оборудование, средства контроля и управления, вспомогательные и транспортные устройства, обрабатывающий инструмент или среды, находящиеся в постоянном движении и изменении, объекты производства (заготовки, полуфабрикаты, сборочные единицы, готовые изделия) и, наконец, люди, осуществляющие процесс и управляющие им. Указанную сложную динамическую систему называют *технологической системой* (ТС).

Как любую сложную систему, ТС характеризуют следующие признаки:

- возможность разбиения на множество подсистем, объединенных общей целью функционирования;

- взаимодействие системы и внешней среды;
- функционирование в условиях воздействия случайных факторов;
- сложные информационные связи между элементами и подсистемами;
- наличие иерархической структуры.

Иерархическая структура ТС означает возможность разбиения системы на подсистемы нижних уровней. С другой стороны, ТС как сложная система входит составной частью в систему отрасли. В настоящее время технологические проблемы решаются на четырех уровнях (рис. 1.3):

- 1) в масштабах республики (Государственный комитет по науке и технологиям — ГКНТ);
- 2) в масштабах отрасли (Министерство промышленности);
- 3) в масштабах предприятия (ПО или НПО);
- 4) в подсистемах предприятия (цех, участок).

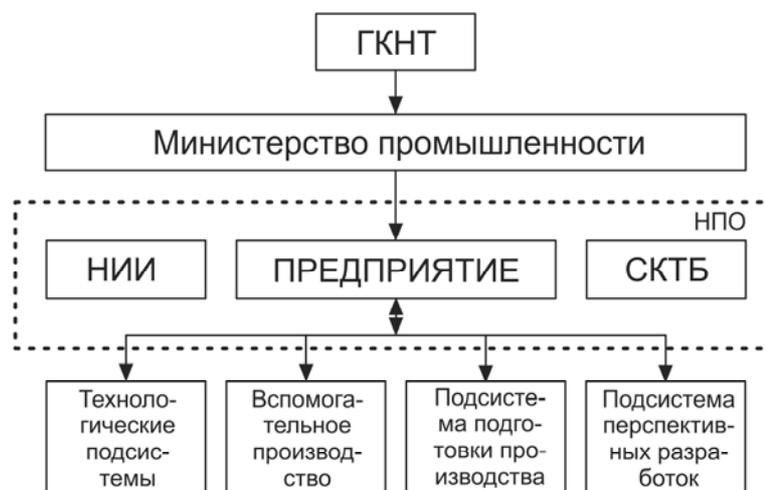


Рис. 1.3. Иерархические уровни организации технологии ЭА

На первом уровне основными задачами являются:

- разработка и реализация государственной политики в сфере науки и технологий;
- координация деятельности министерств и других органов управления в сфере научно-технической деятельности;
- проведение государственной политики в сфере международного научно-технического сотрудничества;
- организационно-методическое регулирование развития науки и техники;
- повышение эффективности использования научно-технического потенциала республики;
- контроль за исполнением законодательства в области науки и технологий, а также за использованием бюджетных средств, выделяемых на развитие науки.

Республиканским аналитико-информационным центром, обеспечивающим организацию научно-технической деятельности и создание информационного фонда новых технологий, является БелИСА.

На втором уровне решаются следующие задачи:

- разработка перспективных направлений научно-технического прогресса;
- определение номенклатуры и программ выпуска изделий в форме госзаказа;
- определение поставщиков комплектующих деталей и материалов;

- разработка типовых технологических процессов в виде отраслевых стандартов (ОСТ);
- разработка унифицированного технологического оборудования и оснастки;
- подготовка инженерно-технических кадров для отрасли в системе вузов, колледжей и техникумов;
- информационно-издательская деятельность (журналы, сборники, реклама).

На третьем уровне (на уровне предприятия) осуществляется:

- маркетинг;
- оперативное планирование и управление текущим производством;
- техническая подготовка производства новых изделий;
- приобретение и освоение нового технологического оборудования;
- материально-техническое снабжение и сбыт продукции;
- разработка и изготовление специализированного оснащения;
- разработка единичных и групповых ТП в виде стандартов предприятия (СТП);
- подготовка квалифицированных кадров в системе профтехобразования.

На четвертом уровне решаются задачи, специализированные по видам работ: изготовление деталей, сборка, монтаж, контроль, настройка, испытания и др.

Рассмотрим основные задачи технологии на современном этапе.

1. Обеспечение конкурентоспособности изделий, которое может быть достигнуто путем улучшения потребительских свойств изделий, а также снижением затрат на их изготовление. Интегральная оценка качества изделия учитывает отношение потребительских свойств к величине затрат:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^m P_i}{Z_n + Z_c},$$

где  $P_i$  — совокупность потребительских свойств;  $Z_n$ ,  $Z_c$  — затраты на производство изделия и сервисное обслуживание соответственно.

Покупатель предпочитает то изделие, в котором достигнут максимум полезного эффекта на единицу затрат. Конкурентоспособность отвечает условию  $I_1/I_2 \geq 1$ , где  $I_1$ ,  $I_2$  — интегральная оценка качества изделий 1 и 2.

2. Достижение высокого качества изделий в условиях дефицита материалов, энергоресурсов и высокой стоимости рабочей силы. Эта задача решается: снижением материалоемкости изделий, переходом на более дешевые и технологичные материалы; применением энергосберегающих технологий, использующих электрофизические методы обработки, порошковую металлургию, новые технологии формообразования; уменьшением числа рабочих, занятых тяжелым неквалифицированным или ручным трудом путем механизации и автоматизации производства.

3. Дальнейшая микроминиатюризация аппаратуры, связанная с освоением быстродействующих СБИС на арсенид-галлиевых структурах, многокристальных модулей, микросхем частного применения для радиовещательных приемников и телевизоров, акусто- и оптоэлектронных приборов, которая ставит новые проблемы:

- разработку и внедрение новых процессов сборки и монтажа аппаратуры из бескорпусных ИМС и чиповых

элементов на керамических многослойных платах (монтаж на поверхность (SMT), монтаж матричных БИС (МаБИС), имеющих до 200 выводов с шагом 0,625 и 0,312 мм);

- освоение технологических процессов производства типовых элементов сборки (ТЭС) на коммутационных

платах с использованием новых материалов (полиимидной пленки, керамических подложек и т. д.);

- разработку и внедрение в производство гибких производственных систем (ГПС), включающих программ-

но-управляемое оборудование, роботы-манипуляторы, микропроцессорные средства управления, а также локальные сети ЭВМ, что позволит перейти к безлюдной технологии, обеспечить гибкую переналадку при смене объектов производства и создать условия для внедрения автоматизированных технологических комплексов (АТК).

Спад производства в электронной промышленности в последние годы был вызван следующими причинами: сокращением объемов выпуска продукции специального назначения; потерей рынков сбыта в странах СНГ; неконтролируемой экспансией продукции высоких технологий из стран Запада; отсутствием инвестиций и поддержки предприятий со стороны государства.

Создание новых технологий должно обеспечить существенное улучшение качественных характеристик изделий, особенно бытовой радиоаппаратуры, ее конкурентоспособность на мировом рынке, а также дать социальный эффект, который заключается в улучшении условий труда, повышении безопасности производства, устранении тяжелого неквалифицированного и ручного труда, улучшении экологической чистоты окружающей среды.

### 1.3. СТРУКТУРА ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ПРОЦЕССА, ВИДЫ И ТИПЫ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

*Производственный процесс* — это совокупность действий, в результате которых сырье, материалы и полуфабрикаты, поступающие на предприятие, превращаются в готовое изделие. Он делится на основной и вспомогательный. *Основной* производственный процесс — это изготовление продукции, определяемой госзаказом и договорами с другими предприятиями, *вспомогательный* — ремонт оборудования, транспортирование объектов производства, изготовление оснастки, инструментов, электроснабжение.

*Технологический процесс* (ГОСТ 3.1109—82) — часть производственного процесса, представляющая собой комплекс действий исполнителей и оборудования, направленных непосредственно на преобразование материалов и комплектующих изделий в готовое изделие. ТП состоит из операций, установов, позиций, переходов (рис. 1.4).

*Операция* — законченная часть ТП, выполняемая на одном рабочем месте одним или несколькими рабочими при неизменном технологическом оборудовании. С изменением вида оборудования вводится новая операция. Технологическая операция является основной единицей производственного планирования и учета. На основе операций оценивается трудоемкость изготовления изделий и устанавливаются нормы времени и расценки, определяется требуемое количество рабочих, оборудования, приспособлений и инструмента, себестоимость, ведется календарное планирование производства и осуществляется контроль качества изделий.

В условиях автоматизированного производства под операцией следует понимать законченную часть ТП, выполняемую непрерывно на автоматической линии, которая состоит из нескольких единиц технологического оборудования, связанных автоматически действующими транспортно-загрузочными устройствами. При гибком автоматизированном производстве непрерывность выполнения операции может нарушаться, например, направлением собранного полуфабриката, электронного узла на промежуточный склад-накопитель в периоды между отдельными позициями, выполняемыми на разных технологических модулях.

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

*Установ* — часть операции, выполняемая при одном закреплении изделия.

*Позиция* — фиксированное положение, занимаемое неизменно закрепленной обрабатываемой заготовкой или собираемой сборочной единицей совместно с приспособлением относительно инструмента или неподвижной части оборудования для выполнения определенной части операции.

*Переход* — законченная часть операции, которая характеризуется постоянством инструмента, оснастки, режимов обработки, поверхности детали. Переход делится на рабочий ход и вспомогательный. *Рабочий ход* обеспечивает изменение характеристик обрабатываемой детали, *вспомогательный* — возврат рабочего органа в исходное положение.



Рис. 1.4. Структура производственного процесса

*Длительность производственного цикла*  $T_{ц}$  — это время между запуском в производство и окончанием изготовления партии изделий, которое зависит от сочетания операций. При последовательном сочетании

$$T_{ц} = N T_S = N \sum_{i=1}^n T_{шт i},$$

где  $N$  — количество изделий в партии;  $T_S$  — время прохождения всех операций одним изделием;  $T_{шт i}$  — штучное время  $i$ -й операции.

При параллельном сочетании каждое изделие переходит на следующую операцию, не ожидая, пока остальные изделия этой партии пройдут данную операцию, тогда

$$T_{ц} = T_S + (N - 1) T_{\max},$$

где  $T_{\max}$  — длительность максимальной по времени операции.

При смешанном способе сочетания операций

$$T_{ц} = N T_S = \sum_{i=1}^{k-1} t_{см} + N T_{шт.к},$$

где  $t_{см}$  — смещение во времени между началами двух последовательно идущих операций:

$$t_{см} = T_{шт i} + (N - 1) T_{шт i+1}, \text{ если } T_{шт i} > T_{шт i+1};$$

$$t_{см} = T_{шт i}, \text{ если } T_{шт i} \leq T_{шт i+1};$$

$T_{шт.к}$  — норма штучного времени конечной операции.

**Пример.** Изделие собирают в результате выполнения семи сборочных операций, нормы штучного времени которых составляют:  $T_{шт.1} = 4$  мин,  $T_{шт.2} = 6$  мин,  $T_{шт.3} = 5$  мин,  $T_{шт.4} = 4$  мин,  $T_{шт.5} = 3$  мин,  $T_{шт.6} = 4$  мин,  $T_{шт.7} = 5$  мин. Определить, при каком способе организации процесса сборки будет быстрее изготовлена партия, состоящая из 300 изделий.

**Решение.** При последовательном варианте сборки  $T_{ц.посл} = 300 \cdot 31 = 9300$  мин = 155 нормо-ч, при параллельном варианте  $T_{ц.пар} = 31 + 299 \cdot 6 = 1825$  мин = 30,4 нормо-ч, при смешанном варианте определяем смещения между началами смежных операций:  $t_{см.12} = 4$  мин,  $t_{см.23} = 6 + 299 \cdot 4 = 1501$  мин,  $t_{см.34} = 5 + 299 \cdot 4 = 1201$  мин,  $t_{см.45} = 4 + 299 \cdot 3 = 901$  мин,  $t_{см.56} = 3$  мин,  $t_{см.67} = 4$  мин, тогда  $T_{ц.смеш} = 3614 + 300 \cdot 5 = 5114$  мин = 85,2 нормо-ч. Быстрее всего будет изготовлена партия изделий при параллельном сочетании операций, однако при этом необходима организация параллельных рабочих мест по шести операциям. Поэтому наиболее эффективен смешанный вариант сборки.

Различают технологический и производственный циклы изготовления изделий.

*Технологический цикл* — это минимальное суммарное время, необходимое для прохождения одной партии изделий по маршруту изготовления от первой операции до последней. Он складывается из длительности операций с учетом времени на загрузку-выгрузку.

*Производственный цикл* — это фактическое время изготовления изделий в условиях реального производства. Он складывается из технологического цикла и длительности вспомогательных операций: транспортирования партий, контроля качества, времени пролеживания между операциями.

Оптимально, если производственный цикл равен двум технологическим. Так, в японских компаниях технологический цикл изготовления кристалла 64К составляет 3 сут. при трехсменной работе, а производственный — 6 сут. (в США — 40 сут.). Чем короче цикл изготовления, тем выше выход годных изделий.

Согласно ГОСТ 14.002—83 Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП), все ТП по степени универсальности и применяемости подразделяются на единичные и унифицированные.

*Единичный ТП* — это ТП, который разработан для изготовления изделия одного наименования независимо от программы выпуска. *Унифицированный ТП* разрабатывается для группы изделий, имеющих определенные признаки общности. К унифицированным относятся групповые и типовые ТП. *Типовые ТП* разрабатываются для группы изделий, объединенных на основе признаков конструктивно-технологической общности, и характеризуются единством содержания и последовательности большинства технологических операций и переходов для объектов всей группы. *Групповой ТП* отличается от типового тем, что разрабатывается для группы изделий более широкой номенклатуры, которые могут не иметь геометрического подобия. Они объединяются в группу по наличию признаков технологической общности, заключающейся в общности технологической наладки на ту или иную операцию для последующей совместной обработки. Типовые и групповые процессы приведены в отраслевых и государственных стандартах.

При разработке унифицированных ТП все детали и сборочные единицы предварительно классифицируют по признакам конструктивной и технологической общности, используя конструкторские и технологические классификаторы и ЭВМ. Для каждого из систематизированных классов деталей и сборочных единиц разрабатывается единый унифицированный ТП, по которому может быть изготовлено любое изделие этого класса. Следовательно, унификация ТП совместно с унификацией изделий позволяет привести в систему существующие ТП, значительно сократить сроки и затраты на технологическую подготовку производства, поставить на научную основу разработку новых ТП, автоматизировать проектирование ТП, внедрить передовые и экономичные методы труда и технологическое оснащение. Типовые ТП эффективны в условиях крупносерийного и массового, групповые — в условиях мелкосерийного и серийного производства.

По основному назначению ТП разделяются на рабочие и перспективные. *Рабочий ТП* выполняется по рабочей технологической и конструкторской документации, *перспективный ТП* соответствует современным

достижениям науки и техники, но методы и средства его осуществления на данном предприятии предстоит освоить.

В зависимости от типа производства разработанный ТП может быть представлен с различной степенью детализации: маршрутный, маршрутно-операционный, операционный. *Маршрутный ТП* — процесс, выполняемый по документации, в которой содержание операций излагается без указания переходов и детализации режимов обработки. В *маршрутно-операционном* и *операционном ТП* содержание соответственно отдельных (наиболее сложных) или всех операций конкретизируется с указанием содержания переходов и режимов обработки.

ТП реализуется с помощью универсального и специального технологического оснащения (СТО), к которому в соответствии с ГОСТ 14.301—85 относятся оборудование, оснастка и средства механизации и автоматизации.

*Технологическим оборудованием* называют орудия производства, в которых для выполнения определенной части ТП размещаются материалы или заготовки, средства воздействия на них, технологическая оснастка и, при необходимости, источники энергии. *Технологическая оснастка* представляет собой орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части ТП, например штампы, пресс-формы, сборочные головки и др. *Средства механизации* — это орудия производства, в которых ручной труд человека частично или полностью заменен машинным с сохранением участия человека в управлении. *Средства автоматизации* — это орудия производства, в которых функция управления передана машинам и приборам.

Тип производства определяет не только степень детализации разработанного ТП, но и организационно-технические и экономические показатели. Под *типом производства* понимается классификационная категория, определяемая по признакам широты номенклатуры, регулярности, стабильности и объема выпуска изделия. В зависимости от номенклатуры, регулярности и объема выпуска (ГОСТ 14.004—84) производство подразделяется на три типа: единичное, серийное и массовое. Одной из основных характеристик типа производства является коэффициент закрепления операций, который равен отношению количества выполняемых операций  $O$  к числу рабочих мест  $P$ :

$$K_{з.о} = O/P .$$

*Единичное производство* характеризуется широкой номенклатурой изготавливаемых изделий и малым объемом их выпуска. Для *серийного производства* характерна ограниченная номенклатура изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями при сравнительно большом объеме выпуска. В зависимости от количества изделий в партии и значения  $K_{з.о}$  серийное производство может быть *мелкосерийным* и *крупносерийным*. Наиболее характерные признаки типов производства приведены в табл. 1.1.

Для производства ЭА характерно изменение серийности производства: изготовление элементов и функциональных электронных модулей следует рассматривать как крупносерийное или массовое производство, а окончательную сборку и настройку всего изделия — как мелкосерийное, что необходимо учитывать при проектировании ТП и организации производства. Чем больше серия выпускаемых изделий и меньше их номенклатура, тем большее число операций включает разрабатываемый ТП.

Если ТП состоит из укрупненных операций, содержащих большое количество переходов, то такой процесс называется *концентрированным*. Он характеризуется высокой квалификацией рабочих, универсальностью оборудования и оснастки, упрощением нормирования, но большой длительностью цикла изготовления изделия.

Табл. 1.1. Характеристика типов производства

Показатель ТП	Тип производства			
	мелкосерийное	Серийное	крупносерийное	массовое
Объем партии $N$ , тыс.шт.	1—10	10—100	100—1000	>1000
$K_{3.0}$	$20 < K_{3.0} < 40$	$10 < K_{3.0} < 20$	$1 < K_{3.0} < 10$	$K_{3.0} \leq 1$
Номенклатура изделий	Очень широкая	Широкая	Ограниченная	Узкая
Регулярность выпуска	Нет	Периодические партии		Непрерывный выпуск
Технологическое оснащение	Универсальное	Специализированное		Специальное
Квалификация рабочих	Высокая	Средняя		Низкая
Специализация рабочих мест	Отсутствует	На выполнение нескольких операций		На каждой операции
Степень деталлизации процесса	Маршрутный	Маршрутно-операционный	Операционный	Операционный

*Массовое производство* отличается узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени. При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое располагается по ходу технологического процесса и во многих случаях связывается транспортными устройствами и конвейерами с постами промежуточного автоматизированного контроля, а также промежуточными складами — накопителями деталей и сборочных единиц, снабженными роботами-манипуляторами, широко применяются автоматические линии и автоматизированные производственные системы, управляемые ЭВМ.

Требуемая точность достигается методами автоматического получения размеров на настроенном оборудовании при обеспечении взаимозаменяемости обрабатываемых заготовок и сборок. Только в отдельных случаях применяется селективная сборка, обеспечивающая групповую взаимозаменяемость.

Средняя квалификация рабочих в современном массовом производстве ниже, чем в единичном, так как на автоматизированном оборудовании могут работать рабочие-операторы сравнительно низкой квалификации.

#### 1.4. СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА И ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Научно-технический прогресс в современных условиях характеризуется частой сменой объектов производства, которые являются сложными комплексами, насчитывающими десятки тысяч элементов и деталей. Освоение новых образцов изделий, повышение их технических характеристик, обеспечение высокого качества на уровне лучших мировых образцов и экономической эффективности, уменьшение сроков освоения новых изделий непосредственно связаны с технологической подготовкой производства.

*Технологическая подготовка производства (ТПП)* — это совокупность организационно-технических мероприятий и инженерно-технических работ, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделий заданного уровня качества при установленных сроках, объемах выпуска и затратах. Для постановки на производство новых изделий на каждую тысячу деталей требуется свыше 15 тыс. единиц различной технической документации и до 5 тыс. различных видов оснастки и инструмента. Выполняют эту работу проектно-конструкторские и технологические службы предприятия, цехи машиностроительного производства и аналогичные службы предприятий-смежников.

ТПП решает следующие основные задачи (рис. 1.5): обеспечение технологичности конструкции изделий; разработка технологического процесса (маршрутно-операционного, операционного); проектирование СТО; управление процессом ТПП.



Рис. 1.5. Структурная схема ТПП

Значительный вклад в решение проблемы сокращения сроков подготовки производства внесла Единая система технологической подготовки производства, которая обобщила и регламентировала (в стандартах) с научных и методических позиций передовые инженерные решения в области ТПП. Достижению этой же цели способствует применение экономико-математических методов и средств вычислительной техники.

ЕСТПП — установленная государственными стандартами система организации и управления процессом ТПП, предусматривающая широкое применение прогрессивных унифицированных ТП, стандартной технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ. Система предусматривает решение следующих основных задач:

- обеспечение технологичности конструкции изделия;
- разработка технологических процессов;
- конструирование средств технологического оснащения;
- отладка и внедрение ТП и средств технологического оснащения;
- организация линий, участков и цехов основного производства;
- организация ТПП на базе типовой схемы и типовых положений, а также ее совершенствование;
- управление процессом ТПП во взаимосвязи с другими функциональными подсистемами автоматизированной системы управления производством (АСУП).

ЕСТПП связана с другими системами стандартов и нормативных документов (рис. 1.6).

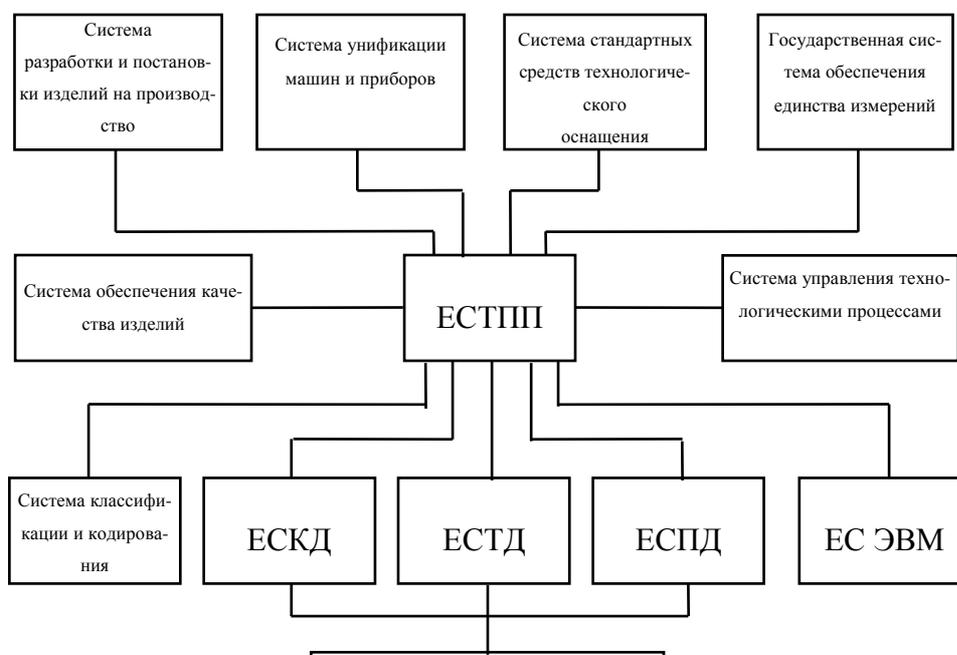


Рис.1.6 Связи ЕСТПП с другими системами стандартов

Повышение качества принимаемых технологических решений может быть достигнуто лишь за счет технико-экономического обоснования путем рассмотрения большого числа вариантов и выбора наилучшего. Это возможно в рамках автоматизации ТПП новых изделий.

*Автоматизированная система ТПП (АСТПП)* — это человеко-машинная система ТПП, в основу которой положен комплекс экономико-математических методов и моделей, организационных форм, электронно-вычислительной и организационной техники с соответствующим оборудованием и программно-математическим обеспечением.

Разработка ТП осуществляется на основе ЕСТПП, которая в свою очередь включает комплекс работ, связанных с технической готовностью предприятия к выпуску нового изделия заданной программы и номенклатуры. Исходные данные для разработки ТП:

- технические условия (ТУ) на изделие;
- комплект конструкторской документации (КД) на изделие;
- программа выпуска изделия ( $N$ , шт.);
- плановые сроки освоения производства ( $T_{пл}$ );
- отраслевые, внутризаводские типовые ТП, руководящие технические материалы (РТМ);
- технологические классификаторы деталей, каталоги оборудования и оснастки;
- материальные и трудовые нормативы.

Проектирование ТП в соответствии с ГОСТ 14.301—83 включает ряд этапов (рис. 1.7).

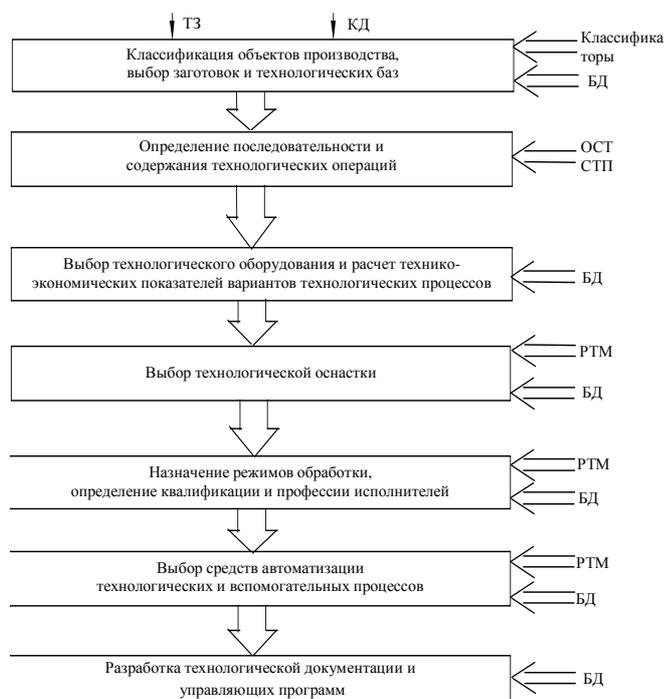


Рис. 1.7. Порядок проектирования ТП

1. Классификация объектов производства, выбор заготовок, сортамента и т. д. Для детали важно определить соотношение длины и диаметра ( $L/d$ ). Если  $L/d = 1$ , то детали равноразмерные (кодируются 1), если  $L/d > 1$ , то детали стержневые (кодируются 2).

соответствии с классификатором ЕСКД установлено 100 классов изделий. Каждый класс содержит сетку подклассов и групп, классификационные таблицы подгрупп и видов. Обозначение классификационного кода строится следующим образом:

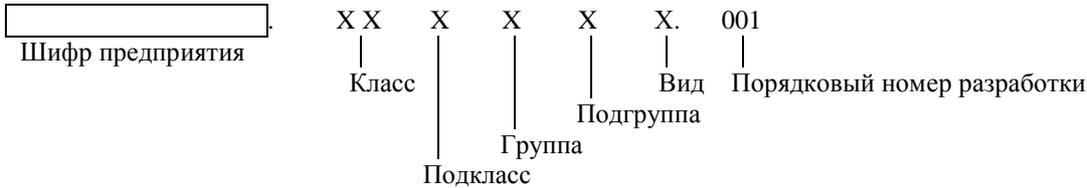


Рис.1.8. Обозначение классификации кода

Технологическая классификация построена как многоаспектная и является продолжением и дополнением классификации деталей по конструктивным признакам. В технологическом классификаторе (ТК) устанавливается 14-значная структура технологического кода детали, составленного из двух частей: кода классификационных группировок основных признаков (постоянная часть) и кода классификационных группировок признаков, определяющих вид детали (переменная часть). Таким образом, структура полного конструкторско-технологического кода детали, составленного из обозначения и технологического кода, имеет следующий вид:

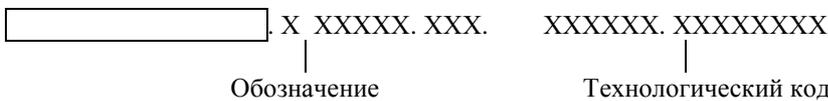


Рис.1.9. Структура полного конструкторско -технологического кода детали

2. Выбор технологических баз и способов фиксации деталей. Технологические базы используются в процессе изготовления для определения положения заготовки или детали при обработке относительно инструмента. При базировании соблюдают основные правила: единство конструкторских, технологических и измерительных баз; постоянство баз, т. е. использование одной и той же базы для обработки наибольшего числа поверхностей. При выборе схемы базирования детали прежде всего решают вопрос о том, каких степеней свободы должна лишиться деталь, соприкасаясь с установочными элементами приспособления, какие перемещения и повороты не отразятся на выдерживаемых размерах. Базой должна быть поверхность, от которой размер задается с наименьшим допуском.

3. Анализ типовых ТП и определение последовательности и содержания операций данного ТП (маршрут обработки или сборки). На основе анализа типовых ТП сборки блоков (ОСТ 4ГО.054.267) и перспективных ТП по научно-технической литературе разрабатывают 2 — 3 варианта маршрутной технологии, руководствуясь следующим:

- в поточном производстве разбивка процесса на операции определяется тактом выпуска, причем время выполнения каждой операции должно быть равно или кратно такту;

- предшествующие операции не должны затруднять выполнение последующих;
- на каждом рабочем месте должна выполняться однородная и технологически законченная работа;
- после наиболее ответственных операций, а также после регулировки или наладки предусматривают контрольные операции.

4. Выбор технологического оборудования для двух либо трех вариантов ТП и расчет оптимального варианта по технико-экономическим показателям (см. § 1.5).

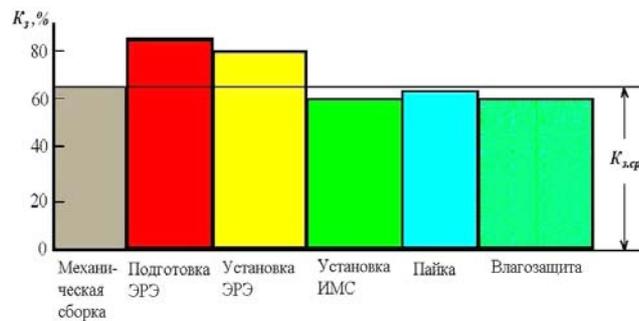


Рис.1.10. График загрузки оборудования

5. Выбор средств технологического оснащения или проектирование специализированной оснастки в соответствии с РТМ, базами данных (БД).

6. Расчет режимов обработки, нормирование операций ТП, определение среднего коэффициента загрузки оборудования:

$$K_z = t_o / t_{шт}$$

где  $t_o$ ,  $t_{шт}$  — основное и штучное время работы.

Для наглядного представления о средней загрузке оборудования на линии или участке строят графики загрузки (рис. 1.7). По горизонтальной оси графика записывают модели технологического оборудования по операциям процесса, по вертикали откладывают значения коэффициента загрузки в процентах, а также указывают среднее значение коэффициента загрузки оборудования на линии, нормативные значения которого зависят от типа производства: в массовом  $0,65 < K_{z,ср} < 0,75$ , серийном  $0,75 < K_{z,ср} < 0,85$ , мелкосерийном  $0,8 < K_{z,ср} < 0,9$ . При низких значениях коэффициента загрузки рекомендуется загружать оборудование сборочными единицами других партий блоков.

Коэффициент использования оборудования по основному (технологическому) времени определяется как отношение основного времени  $T_o$  к штучному  $T_{шт}$  для массового типа производства или штучно-калькуляционному  $T_{шт.к}$  для серийного производства:

$$K_o = T_o / T_{шт.к}$$

7. Определение квалификации и профессий исполнителей по характеру выполняемой работы.

8. Выбор средств автоматизации ТП и внутрицехового транспортирования. В массовом и крупносерийном производстве применяют конвейеры различных типов, которые автоматически транспортируют изделия в места складирования. В серийном производстве используют робототехнологические комплексы (РТК) или линии (РТЛ).

9. Организация производственного участка и составление технологических планировок. В выбранном масштабе (1:50, 1:100) делают планировку будущего участка без оборудования. При этом обязательно указы-

вают перегородки, окна, двери, колонны, вентиляционные шахты, силовые щиты энергоснабжения, противопожарные средства.

При определении места каждого производственного участка необходимо учитывать в первую очередь технологические, санитарно-гигиенические (отдаленность производственных участков от бытовых помещений), противопожарные требования и требования по взрывобезопасности (категорию помещений).

На отдельном листе в соответствии с масштабом рисуют (в плане) оборудование и рабочие места в рассчитанном количестве, затем вырезают и накладывают на планировку. Группируя оборудование и рабочие места, методом аппликаций подбирают подходящий вариант технологической планировки.

Планировку можно признать качественной, если учтены следующие требования:

- технологический поток изготовления изделий последовательный;
- все транспортно-погрузочные и складские работы входят в общий технологический поток;
- транспортно-складские работы максимально механизированы и автоматизированы;
- планировка обеспечивает сохранность материальных ценностей, а также возможность учета деталей, полуфабрикатов, готовых узлов и изделий;
- использовано перспективное и технологическое оборудование;
- капитальные затраты являются оптимальными, а окупаемость оборудования укладывается в нормативы.

10. Оформление ТД на разработанный ТП в виде комплекта документов. При серийном производстве и маршрутно-операционном типе ТП комплект ТД включает:

- 1) титульный лист (ГОСТ 3.1105—74);
- 2) ведомость технологических документов (ГОСТ 3.1122—84, формы 4 и 4а);
- 3) комплектовочную карту (ГОСТ 3.1123—84, формы 6 и 6а);
- 4) маршрутные карты (ГОСТ 3.1118—82, формы 1 и 1а);
- 5) ведомость оснастки (ГОСТ 3.1122—84, формы 2 и 2а);
- 6) ведомость операции контроля (ГОСТ 3.1105—74, форма 3).

При крупносерийном или массовом производстве и операционном типе ТП комплект ТД включает:

- 1) титульный лист (ГОСТ 3.1104—81);
- 2) ведомость технологических документов (ГОСТ 3.1122—84, формы 4 и 4а);
- 3) комплектовочную карту (ГОСТ 3.1123—84, формы 6 и 6а);
- 4) маршрутные карты (ГОСТ 3.1118—82, формы 2 и 2а);
- 5) операционную карту сборки (ГОСТ 3.1407—82, формы 3 и 3а или 2 и 2а);
- 6) карту эскизов (ГОСТ 3.1105—84, формы 7 и 7а);
- 7) ведомость оснастки (ГОСТ 3.1122—84, формы 3 и 3а);
- 8) операционную карту контроля (ГОСТ 3.1502—74).

## 1.5. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

При выборе оптимального варианта ТП используют технико-экономические критерии — экономичность и производительность. Экономичным считается процесс, который при заданных условиях обеспечивает минимальную технологическую себестоимость. Производительность соответствует наименьшим затратам живого труда и обеспечивает быстрый выпуск продукции в плановые сроки.

Технологическая себестоимость изготовления партии изделия

$$C = A N + B, \quad (1.1)$$

где  $A$  — текущие затраты на одно изделие;  $N$  — программа выпуска, шт.;  $B$  — единовременные затраты на программу.

Текущие затраты складываются из следующих составляющих:

$$A = M + 3 + П,$$

где  $M$  — затраты на основные материалы;  $3$  — заработная плата производственных рабочих;  $П$  — расходы на эксплуатацию оснастки и оборудования.

Затраты на основные материалы рассчитываются с учетом возвратных отходов:

$$M = \sum_{i=1}^N m_i q_i - \sum_{j=1}^N m_j q_j,$$

где  $N$  — программа выпуска;  $m_i$  — масса  $i$ -го материала в изделии;  $q_i$  — стоимость этого материала;  $m_j$  — масса отходов  $j$ -го материала;  $q_j$  — стоимость этих отходов.

Заработная плата производственных рабочих

$$3 = \sum_{i=1}^M K_{3.п} T_{шт i} S_i,$$

где  $M$  — число операций;  $K_{3.п}$  — коэффициент к заработной плате;  $T_{шт i}$  — штучное время выполнения  $i$ -й операций, нормо-ч;  $S_i$  — часовая тарифная ставка рабочего по данной операции.

Коэффициент к заработной плате определяется так:

$$K_{3.п} = K_1 K_2 K_3,$$

где  $K_1 = P/m$  — коэффициент многостаночного обслуживания;  $P$  — число рабочих;  $m$  — число станков, которые обслуживает один рабочий;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий перевыполнение нормы (1,1—1,2);  $K_3$  — коэффициент, связанный с дополнительной оплатой, включающей отчисления на социальное страхование, отпуска и т.д. (1,3—1,5).

Расходы на эксплуатацию оборудования  $П$  берутся в процентах к основной заработной плате рабочих и включают затраты на вспомогательные материалы, электроэнергию, амортизацию оборудования, текущий ремонт.

Единовременные затраты  $B$  складываются из двух статей: заработной платы наладчиков  $З_н$  и затрат на основное технологическое оборудование  $C_o$ :

$$B = З_н + C_o,$$

$$C_o = \sum_{i=1}^k C_i K_i,$$

где  $k$  — количество единиц оборудования;  $C_i$  — стоимость единицы оборудования;  $K_i$  — коэффициент амортизации.

Коэффициент амортизации зависит от сложности технологического оснащения и составляет: 1,0 — 2,0 для простого, 0,7 — 0,8 для средней сложности, 0,4 — 0,5 для сложного оснащения.

Заработная плата наладчиков технологического оборудования

$$З_н = \sum_{i=1}^k K_{3.п} T_{п.з i} S_{н i} H,$$

где  $k$  — количество наладчиков;  $T_{п.з i}$  — подготовительно-заключительное время по данной операции;  $S_{н i}$  — часовая тарифная ставка наладчика;  $H$  — число наладок оборудования.

Уравнение технологической себестоимости единичной операции единицы продукции

$$C_{оп} = A + B / N.$$

Эту зависимость можно представить в виде гиперболы, асимптотически приближающейся к оси  $N$ , и выделить в ней три участка (рис. 1.11): мелкосерийное, серийное, крупносерийное и массовое производство. Наиболее сильно программа выпуска влияет на технологическую себестоимость в мелкосерийном производстве.

Для выбора оптимального варианта ТП по себестоимости строят, используя уравнение (1.1), графические зависимости себестоимости годовой программы по двум вариантам (рис. 1.12):

$$\left. \begin{aligned} C_1 &= A_1 N + B_1, \\ C_2 &= A_2 N + B_2, \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

где  $A_1 = \operatorname{tg} \alpha_1$  — постоянные текущие затраты, в данном случае  $A_1 > A_2$ ,  $B_2 > B_1$ .

Для нахождения  $N_{\text{кр}}$ , при котором себестоимость по обоим вариантам равны:  $C_1 = C_2$ , решим систему уравнений (1.2):

$$A_1 N_{\text{кр}} + B_1 = A_2 N_{\text{кр}} + B_2,$$

откуда  $N_{\text{кр}} = (B_2 - B_1) / (A_1 - A_2)$ .

Логический смысл сравнения вариантов заключается в том, что для варианта с большим уровнем автоматизации единовременные затраты будут выше по причине высокой стоимости оборудования, но текущие затраты меньше вследствие повышения производительности и снижения квалификации рабочих. Таким образом, если заданная программа меньше  $N_{\text{кр}}$ , то выбираем I вариант ТП, если программа выпуска больше  $N_{\text{кр}}$ , то выбираем II вариант.

Для выбора оптимального варианта ТП по производительности рассчитываем производительность труда по каждому из вариантов. *Производительность* — количество изделий, которое изготовлено за единицу времени (час, смену):

$$Q = \frac{\Phi_{\text{д}}}{\sum_{i=1}^n T_{\text{шт } i}},$$

где  $\Phi_{\text{д}}$  — действительный фонд времени за плановый период;  $n$  — количество операций ТП;  $T_{\text{шт } i}$  — трудоемкость  $i$ -й операции.

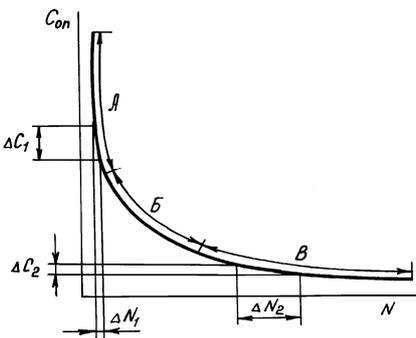


Рис. 1.11. Зависимость технологической себестоимости

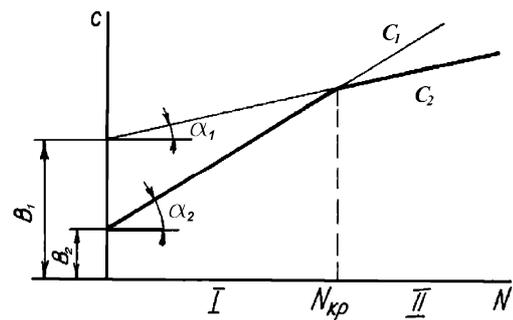


Рис. 1.12. Сравнение двух вариантов ТП по себестоимости от программы выпуска

При расчетах производительности труда необходимо различать штучно-калькуляционное и штучное время выполнения операции. *Штучно-калькуляционное время*

$$T_{шт.к} = T_{шт} + T_{п.з} / N,$$

где  $T_{п.з}$  — подготовительно-заключительное время, которое затрачивается на ознакомление с чертежами, получение инструмента, на подготовку и наладку оборудования, оно затрачивается на всю программу выпуска.

*Штучное время*, затрачивается на каждое изделие,

$$T_{шт} = T_{осн} + T_{всп} + T_{обсл} + T_{пер},$$

где  $T_{осн}$  — основное время работы оборудования;  $T_{всп}$  — вспомогательное время на установку и снятие детали;  $T_{обсл}$  — время обслуживания и замены инструмента;  $T_{пер}$  — время регламентированных перерывов в работе.

Для сборочно-монтажного производства  $T_{осн}$  и  $T_{всп}$  объединяют в оперативное время  $T_{оп}$ , а  $T_{обсл} + T_{пер}$  составляют дополнительное время, его задают в процентах от оперативного в виде коэффициентов. Согласно ОСТ 4ГО.050.012 "Нормирование сборочно-монтажных работ в производстве РЭА",

$$T_{шт} = T_{оп} K_1 \left( \frac{K_2 + K_3}{100} + 1 \right),$$

где  $K_1$  — коэффициент, зависящий от сложности аппаратуры и типа производства;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий подготовительно-заключительное время и время обслуживания в процентах от оперативного;  $K_3$  — коэффициент, учитывающий долю времени на перерывы в работе в процентах к оперативному времени и зависящий от сложности выполняемой работы и условий труда.

Значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  выбирают по табл. 1.2 в зависимости от типа производства,  $K_3$  — по табл. 1.3.

Табл. 1.2. Значения коэффициентов  $K_1$  и  $K_2$  в зависимости от типа производства

Тип производства	$K_1$ для аппаратуры			$K_2$ , %
	2-го поколения	3-го поколения	4-го поколения	
Индивидуальное	1,3	1,8	2,0	10
Мелкосерийное	1,2	1,5	1,8	9,6
Серийное	1,0	1,2	1,5	7,6
Крупносерийное	0,75	0,9	1,12	5,4
Массовое	0,70	0,85	1,05	3,7

Табл. 1.3. Значения коэффициента  $K_3$  в зависимости от условий работы

Характер работ	$K_3$ , %
Простые:	
Легкие	3
Средние	5
в неблагоприятных условиях	6
в тяжелых условиях	9
с большим зрительным напряжением	12
Тяжелые или в особо неблагоприятных условиях	16
Особо тяжелые и в неблагоприятных условиях	20

Для выбора оптимального варианта ТП составляют два уравнения для вычисления суммарного штучно-калькуляционного времени сравниваемых вариантов в соответствии с технической нормой:

$$\sum_{i=1}^m T_{шт.кi} = \sum_{i=1}^m T_{штi} + \sum_{i=1}^m T_{п.зi} / N, \quad \sum_{i=1}^n T_{шт.кi} = \sum_{i=1}^n T_{штi} + \sum_{i=1}^n T_{п.зi} / N,$$

где  $m, n$  — число операций по вариантам. Тогда критический размер партии изделий

$$N_{кр} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{п.зi} - \sum_{i=1}^n T_{п.зi}}{\sum_{i=1}^n T_{штi} - \sum_{i=1}^m T_{штi}}$$

Если вариант ТП отличается большим уровнем автоматизации, то ему соответствует большее суммарное подготовительно-заключительное время вследствие сложности подготовки оборудования и одновременно меньшее суммарное штучное время.

Ориентировочно подготовительно-заключительное время на всю годовую программу

$$T_{п.з} = T_{п.з.см} C D_p,$$

где  $T_{п.з.см}$  — сменная норма подготовительно-заключительного времени;  $C$  — количество смен;  $D_p$  — количество рабочих дней в плановый период.

Сменная норма подготовительно-заключительного времени определяется инструкцией по эксплуатации и выражает готовность оборудования на начало ТП (табл.1.4).

Табл. 1.4. Укрупненные нормы подготовительно-заключительного времени

Тип оборудования	$T_{п.з.см}$ , мин
Простая оснастка	1—5
Оснастка средней сложности (с пневмо- или электроприводом)	10—15
Сложная технологическая и регулировочная оснастка	15—30
Полуавтоматы	15—25
Сложное автоматическое оборудование	20—30
Микропроцессорное оборудование, управляемые роботы	30—40
Установки волновой пайки	50—60

Норму выработки рассчитывают для различных промежутков времени (час, смена и т.д.) в зависимости от типа производства. В серийном производстве сменная норма

$$H_{см} = (T_{см} - T_{п.з}) / T_{шт}, \quad (1.31)$$

где  $T_{см}$  — длительность смены (8 ч = 480 мин).

В массовом производстве при наличии наладчика и подаче деталей, сборочных единиц и материалов на рабочие места

$$H_{см} = T_{см} / T_{шт}.$$

При сборке на конвейерных линиях

$$H_{см} = \frac{\Phi_{см}}{T_{оп}} = \frac{T_{см} - (T_{обс} + T_{пер})}{T_o + T_b}.$$

**Пример.** Определить сменную норму выработки на поточной линии сборки, если время выполнения всех сборочных операций 20 мин, обслуживание линии 12 мин, перерыв 8 мин. **Решение.** Находим:  $H_{см} = \frac{480 - (12 + 8)}{20} = 23$  шт.

## 1.6. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ

*Сборка* представляет собой совокупность технологических операций механического соединения деталей, ЭРЭ и ИМС в изделии или его части, выполняемых в определенной последовательности для обеспечения заданного их расположения и взаимодействия. Выбор последовательности операций сборочного процесса зависит от конструкции изделия и организации процесса сборки.

*Монтажом* называется ТП электрического соединения ЭРЭ изделия в соответствии с принципиальной электрической или электромонтажной схемой. Монтаж выполняется с помощью печатных, проводных или тканых плат, одиночных проводников, жгутов и кабелей. Основу сборочно-монтажных работ составляют процессы формирования электрических и механических соединений.

Сборка по принципу *концентрации операций* заключается в том, что на одном рабочем месте производится весь комплекс работ по изготовлению изделия или его части. При этом повышается точность сборки, упрощается процесс нормирования. Однако большая длительность цикла сборки, трудоемкость механизации сложных сборочно-монтажных операций ограничивают применение такой формы рамками единичного и мелкосерийного производства.

*Дифференцированная сборка* предполагает расчленение сборочно-монтажных работ на ряд последовательных простых операций. Это позволяет легче механизировать и автоматизировать работы, использовать рабочих низкой квалификации. Сборка по принципу дифференциации операций эффективна в условиях серийного и массового производства. Однако чрезмерное дробление операций приводит к возрастанию потерь вспомогательного времени на транспортирование, увеличению производственных площадей, повышению утомляемости рабочих при выполнении несложных однообразных действий.

*Параллельность сборки* — одновременное выполнение частей или всего технологического процесса — приводит к сокращению производственного цикла. Использование этого принципа обусловлено конструкциями ЭА, степенью их расчленения на сборочные единицы. Наибольшими возможностями с технологической точки зрения обладают два вида обеспечения параллельности процессов: изготовление и сборка на многопредметных поточных линиях одновременно нескольких изделий; совмещение на автоматизированных поточных линиях изготовления деталей с их сборкой.

*Непрерывность сборки* предусматривает сокращение или полное устранение меж- или внутриоперационных перерывов, что достигается рациональным выбором ТП, соединением операций изготовления деталей с их сборкой, включением в ТП операций влагозащиты, контроля и регулировки.

*Пропорциональность* в организации ТП — это примерно одинаковая производительность на каждом рабочем месте, линии, участке, в цехе, что приводит к полному использованию имеющегося оборудования, производственных площадей и равномерному выпуску изделий, улучшает рациональное деление конструкции на сборочные единицы и унифицированность ее элементов.

*Ритмичность* предполагает выпуск в равные промежутки времени одинакового или возрастающего количества продукции за счет использования типовых и групповых процессов, их унификации и предварительной синхронизации операций.

Сборку ЭА проводят в три этапа. На первом этапе (механическая сборка):

- выполняют неразъемные соединения деталей и сборочных единиц с шасси, рамой, платой (сваркой, пайкой, развальцовкой, склеиванием и т. д.);
- устанавливают крепежные детали (угольники, кронштейны, лепестки и т. д.);
- выполняют разъемные соединения частей блоков;

- закрепляют крупногабаритные (трансформаторы питания и т. д.) элементы собственным крепежом.

На втором этапе (электрический монтаж):

- выполняют заготовительные операции (подготовку проводов, жгутов, кабелей, выводов ЭРЭ);
- устанавливают навесные ЭРЭ и микросхемы на платы;
- выполняют электрические соединения (монтаж) в соответствии с электрической принципиальной или электромонтажной схемой;
  - ведут межблочные соединения (жгутами, разъемами);
  - контролируют качество монтажа.

На третьем этапе (общая сборка изделия):

- собирают шасси и переднюю панель;
- устанавливают кожухи, закрепляют регулировочные элементы, ручки;
- контролируют качество сборки и маркируют изделия;
- выполняют регулировочно-настроечные работы.

По технологическим схемам сборки изделия выявляют число основных сборочных операций, определяют такт или ритм выпуска изделия:

$$T_{\text{в}} = \frac{60 \Phi_{\text{д}}}{N} \text{ (мин / шт.) .}$$

Проектирование ТП сборочно-монтажных работ состоит из следующих этапов:

- 1) разработка технологической схемы сборки изделия, расчет коэффициента сборности и показателя расчлененности сборки;
- 2) выбор типа сборочного процесса, анализ типовых ТП и составление маршрута сборки;
- 3) выбор технологического оборудования, нормирование двух либо трех вариантов ТП и расчет оптимального варианта по технико-экономическим показателям;
- 4) выбор средств технологического оснащения и специализированной оснастки;
- 5) расчет режимов выполнения операций и коэффициентов загрузки оборудования;
- 6) определение квалификации и профессий исполнителей;
- 7) выбор средств автоматизации и механизации внутрицехового транспортирования;
- 8) организация производственного участка и составление планировки;
- 9) оформление комплекта ТД на разработанный ТП.

*Сборка* — это совокупность операций, в результате которых детали соединяются в сборочные единицы, блоки, стойки, системы и изделия. Простейшим сборочно-монтажным элементом является *деталь*, которая, согласно ГОСТ 2101—68, характеризуется отсутствием разъемных и неразъемных соединений.

*Сборочная единица* является более сложным сборочно-монтажным элементом, состоящим из двух или более деталей, соединенных разъемным либо неразъемным соединением. Характерным признаком сборочной единицы является возможность ее сборки отдельно от других сборочных единиц.

Технологическая схема сборки изделия является одним из основных документов, составляемых при разработке ТП сборки. Расчленение изделия на сборочные элементы проводят в соответствии со схемой сборочного состава, при разработке которой руководствуются следующими принципами:

- схема составляется независимо от программы выпуска изделия на основе сборочных чертежей, электрической и кинематической схем изделия;
- сборочные единицы образуются при условии независимости их сборки, транспортирования и контроля;

- минимальное число деталей, необходимое для образования сборочной единицы первой ступени сборки, должно быть равно двум;
- минимальное число деталей, присоединяемых к сборочной единице данной группы для образования сборочного элемента следующей ступени, должно быть равно единице;
- схема сборочного состава строится при условии образования наибольшего числа сборочных единиц;
- схема должна обладать свойством непрерывности, т. е. каждая последующая ступень сборки не может быть осуществлена без предыдущей.

Включение в схему сборочного состава технологических указаний превращает ее в технологическую схему сборки. Для изделий широко применяются схемы сборки «веерного» типа (рис. 1.12, а), на которой стрелками показано направление сборки деталей и сборочных единиц. Достоинством схемы является ее простота и наглядность, но она не отражает последовательности сборки во времени.

Схема сборки с базовой деталью (рис. 1.12, б) устанавливает временную последовательность сборочного процесса. При такой сборке необходимо выделить базовый элемент, т. е. базовую деталь или сборочную единицу, в качестве которой обычно выбирают ту деталь, поверхности которой будут впоследствии использованы при установке в готовое изделие. В большинстве случаев базовой деталью служит плата, панель, шасси и другие элементы несущих конструкций изделия. Направление движения деталей и сборочных единиц на схеме показывается стрелками, а прямая линия, соединяющая базовую деталь и изделие, называется *главной осью сборки*. Точки пересечения осей сборки, в которые подаются детали или сборочные единицы, обозначаются, как элементы сборочных операций, например: Сб.1-1, Сб.1-2 и т. д., а точки пересечения вспомогательной оси с главной — как операции: Сб.1, Сб.2 и т. д.

При построении технологической схемы сборки каждую деталь или сборочную единицу изображают в виде прямоугольника (рис. 1.13, а), в котором указывают позицию детали по спецификации к сборочному чертежу (1), ее наименование (2) и обозначение (3) согласно КД, а также количество деталей (4), подаваемых на одну операцию сборки. Размеры прямоугольника рекомендуются 50×15 мм. Допускается изображение нормализованных или стандартных крепежных деталей в виде круга диаметром 15 мм, в котором указывают позицию по спецификации и количество деталей (рис. 1.13, б).

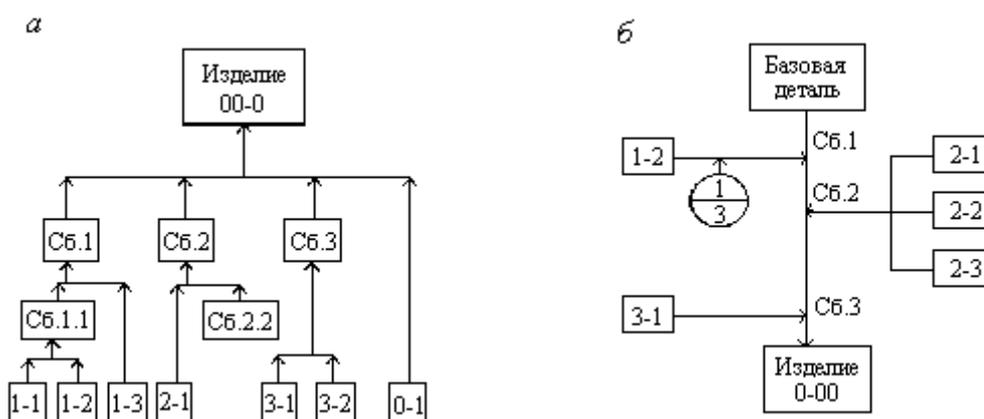


Рис.1.12. Схемы сборки: а – «веерного» тип; б – с базовой деталью

Технологические указания по выполнению сборочных операций или электрического монтажа помещают в прямоугольник, ограниченный штриховой линией, а место их выполнения указывают наклонной стрелкой, направленной в точку пересечения осей сборки. Так на технологических схемах сборки оговаривают характер

выполнения неразъемных соединений, например сварку, пайку, склеивание, запрессовку и т. д.; материал, применяемый при сборке; характер операций монтажа элементов (волной припоя, электропаяльником и т. д.); характер операций влагозащиты изделия, контроля и маркировки (рис. 1.14).

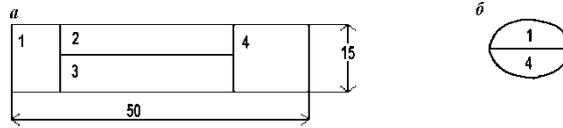


Рис. 1.13. Условные обозначения:  
а – деталей и сборочных единиц; б – крепежа

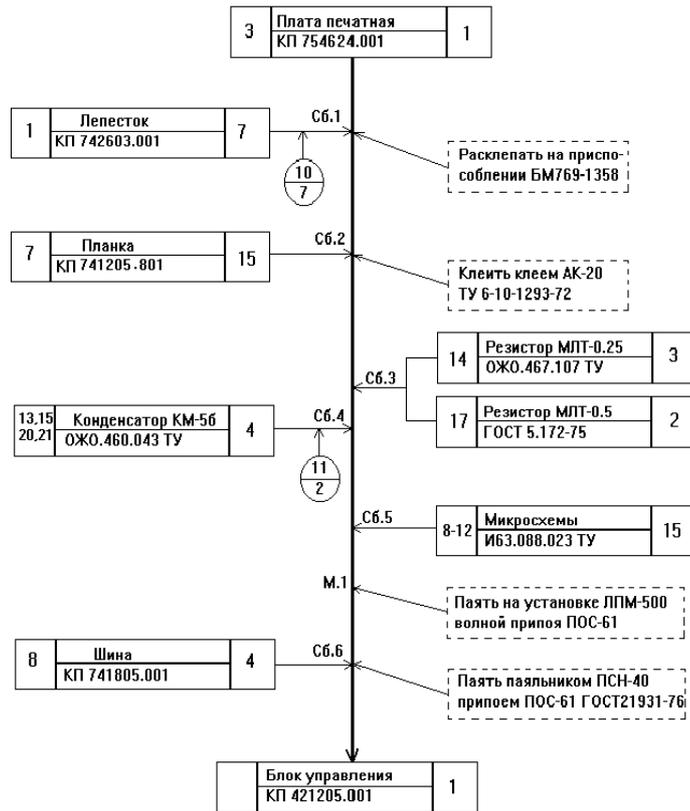


Рис. 1.14. Технологическая схема сборки блока с базовой деталью

После построения схемы сборки рассчитывают следующие коэффициенты:

1) среднюю полноту сборочного состава (количество сборочных единиц на каждой ступени сборки):

$$E_{\text{ср}} = E / (i - 1),$$

где  $E$  — общее количество сборочных единиц в схеме сборочного состава:  $E = \sum_{i=1}^{i-1} m_i$ ;  $m_i$  — число групп, подгрупп, сборочных единиц;  $i$  — показатель степени сложности сборочного состава, равный количеству ступеней сборки изделия;

2) показатель расчлененности данного процесса сборки:

$$M = n / E,$$

где  $n$  — число рабочих операций, определенных для конкретных условий производства (при  $M < 1$  ТП концентрирован, при  $M > 1$  дифференцирован);

3) коэффициент средней точности сборочных работ:

$$K_{\text{ср.сб}} = k q / E ,$$

где  $k$  — показатель качества точности;  $q$  — число сборочных единиц данного качества точности;

4) коэффициент сборности изделия:

$$K_{\text{сб}} = E / (E + D) ,$$

где  $E$  — количество сборочных единиц;  $D$  — количество деталей.

Правильно составленная схема сборочного состава позволяет установить рациональный порядок комплектования сборочных единиц и изделия в процессе сборки.

**Пример.** Для технологической схемы сборки блока управления (см. рис. 1.14) рассчитать показатели сборки.

**Решение.** Общее число сборочных единиц по всем ступеням (операциям) сборки  $E = \sum_{i=1}^{7-1} m_i = 6$ . Средняя полнота сборки

$E_{\text{ср}} = 6/6 = 1$ . Показатель расчлененности сборки  $M = 7/6 = 1,16 > 1$ . Коэффициент сборности блока  $K_{\text{сб}} = 6/(6+26) = 0,19$ ; где  $D=(7+15+4)=26$ .

## 1.7. РАЗРАБОТКА И ОФОРМЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

Единые правила выполнения, оформления, комплектации и обращения технологической документации установлены комплексом стандартов Единой системы технологической документации (ЕСТД), которые распределены по следующим классификационным группам:

- 0—основные положения;
- 1—основополагающие стандарты;
- 2—классификация и обозначение технологических документов (ТД);
- 3—правила учета применяемости изделий и технологической оснастки;
- 4—правила оформления ТД на процессы, специализированные по видам работ;
- 5—правила оформления ТД на испытания и контроль;
- 6—вспомогательное производство, правила оформления ТД;
- 7,8—для последующих стандартов;
- 9—нормативное хозяйство.

Согласно ГОСТ 3.1102—81, на этапе “эскизного и технического проекта КД ТД соответствует предварительному проекту с присвоением литеры “П”, рабочей документации на стадии опытного образца присваивается литера “О”, на стадии установочной серии — литера “А”, массового или серийного производства — литеры “Б”.

К ТД относятся графические и текстовые документы, назначение и содержание которых приведены в табл.1.5. Технологическая документация разрабатывается в виде комплекта документов. Виды ТД устанавливает ГОСТ 3.1102—81, состав, формы и правила оформления информационных блоков основной надписи — ГОСТ 3.1103—82, общие требования к документам, формам и бланкам — ГОСТ 3.1104—81, термины и определения основных понятий — ГОСТ 3.1109—82.

Документы заполняются в основном с применением печатающих устройств (ГОСТ 2.004—88) шрифтом 11 pt. Наименование разделов и подразделов записывают в виде заголовков и подзаголовков и при необходимости подчеркивают. Под заголовками и между разделами следует оставлять 1—2 свободные строки. Запись данных следует производить в технологической последовательности выполнения операций, переходов, приемов работ, физических и химических процессов.

Операции нумеруют числами ряда арифметической прогрессии (5, 10, 15 и т. д.). Допускается к числам добавлять слева нули. Переходы нумеруют числами натурального ряда (1, 2, 3 и т. д.) в пределах данной операции. Установы нумеруют прописными буквами русского алфавита (А, Б, В и т. д.). Размерные характеристики и обозначение обрабатываемых поверхностей указывают арабскими цифрами. Для обозначения позиций и осей допускается применять римские цифры.

Табл. 1.5. Виды и назначение основных технологических документов

Вид документа	Содержание и назначение документа
Маршрутная карта (МК)	Описание ТП изготовления изделия по всем операциям в технологической последовательности с указанием данных об оборудовании, оснастке, материальных и трудовых нормативах
Технологическая инструкция (ТИ)	Описание приемов работы или ТП, правил эксплуатации средств технологического оснащения, физических и химических явлений, происходящих на отдельных операциях
Карта эскизов (КЭ)	Эскизы, схемы и таблицы, необходимые для выполнения ТП, операции или перехода
Комплектовочная карта (КК)	Данные о деталях, сборочных единицах и материалах, входящих в комплект собираемого изделия
Ведомость материалов (ВМ)	Данные о заготовках, нормах расхода материала
Ведомость оснастки (ВО)	Перечень технологической оснастки и инструментов, необходимых для выполнения данного ТП
Ведомость технологических документов (ВД)	Состав и комплектность ТД, необходимых для изготовления изделия
Операционная карта (ОК)	Описание технологической операции с указанием переходов, данных о технологическом оборудовании, оснастке, инструментах и режимах обработки
Ведомость операции (ВОП)	Описание и перечень всех операций технологического контроля, выполненных в одном цехе в технологической последовательности, с указанием данных о контрольной оснастке, инструментах и требований к контролируемым параметрам изделия

Допускается применять сокращенную запись наименований и обозначений, если в документе записаны коды или полные наименования и обозначения этих данных. Например, при последовательном применении инструмента одного кода и наименования в нескольких переходах одной операции полную информацию указывают только для перехода, где он впервые применяется. В следующем переходе записывают: "То же", далее — кавычки. При применении инструмента одного кода и наименования в разных переходах одной операции, не следующих друг за другом, в переходе, где впервые был применен данный инструмент, допускается указывать номера последующих переходов, например "ШЦ 11-250-0,05 (для переходов 3, 5, 8)". При этом, записывая соответствующую информацию в этих переходах, дают ссылку, например "см. переход 1".

*Титульный лист* (ТЛ) является первым листом комплекта технологических документов и заполняется на формах 1—4 в соответствии с ГОСТ 3.1105—84. Форму 2 применяют для документов с горизонтальным расположением поля подшивки. В основной надписи, располагаемой в верхней правой части ТЛ, указывают наименование и обозначение изделия по конструкторскому документу, технологический код процесса, литеру, соответствующую этапу разработки, количество листов. Ниже указывают наименование министерства, организации-разработчика. Еще ниже указывают должности и фамилии лиц, согласовавших комплект документов (слева) и утвердивших документ (справа).

Далее прописными буквами записывают: "КОМПЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ" или "КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ", ниже строчными — название ТП. Ниже слева указывают должность и подпись лиц, подтверждающих согласование комплекта документов с подразделениями предприятия, справа — подписи ответственных за разработку комплекта документов. В нижней части ТЛ указывают номер акта и дату внедрения ТП в производство, например: АКТ N 14-87 от 15.05.2001.

*Маршрутная карта* (МК) является одним из важнейших технологических документов комплекта, его составной и неотъемлемой частью и имеет ряд форм. Выбор и установление области применения соответствующих форм МК зависит от разрабатываемых видов технологических процессов, назначения и формы в составе комплекта ТД и применяемых методов проектирования. Формы и правила оформления МК устанавливает ГОСТ 3.1118—82. При маршрутном и маршрутно-операционном описании ТП МК является одним из основных документов, в котором описывается весь процесс в технологической последовательности выполнения операций. При операционном описании ТП МК выполняет роль свободного документа, в котором указывается адресная информация (номер участка, рабочего места, операции), наименование операции, перечень документов, применяемых при выполнении операции, технологическое оборудование и трудозатраты.

Для изложения ТП в МК используют способ заполнения, при котором информацию вносят построчно несколькими типами строк. Каждому типу строки соответствует свой символ. Служебные символы условно выражают состав информации, размещаемой в графах данного типа строки документа, и предназначены для обработки содержащейся информации средствами механизации и автоматизации. В качестве обозначения служебных символов приняты буквы русского алфавита, которые отражают определенные виды информации и проставляются перед номером строки (табл. 1.6).

Табл. 1.6. Содержание символов, используемых для описания МК

Обозначение	Содержание информации, вносимой в графы МК, расположенные в строке
А	Номер цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция; номер, код и наименование операции; обозначение документов, применяемых при выполнении операции
Б	Код, наименование операции, трудозатраты
В, Г, Д, Е	Информация по символам А и Б для форм с вертикальным расположением поля подшивки
К	Комплектация изделия составными частями с указанием наименований и обозначений деталей и сборочных единиц
М	Применяемый материал, исходная заготовка, вспомогательные материалы, коды единицы величины, единицы нормирования, количество на изделие и нормы расхода
О	Содержание операции (перехода)
Т	Применяемая технологическая оснастка
Л, Н	Комплектация изделия для форм с вертикальным расположением поля подшивки

На строках, расположенных ниже граф, в которых указаны их наименования и обозначения, служебные символы проставляет разработчик с учетом выбранного им способа заполнения документов.

Запись на строках, имеющих символ О, следует выполнять в технологической последовательности по всей длине строки с возможностью переноса, при необходимости, информации на следующие строки. При операционном описании ТП номер проставляют в начале строки. Информацию на строках с символом Т записывают в такой последовательности: приспособления, вспомогательный, режущий, слесарно-монтажный, специальный инструмент, средства измерения. Запись выполняют по всей длине строки, разделяя каждый вид инструмента знаком ";". Количество одновременно применяемых единиц технологической оснастки указывают после кода (обозначения), заключая в скобки, например БГУИ.ХХХХХХ.ХХХ (5), приспособление для гибки. Графы маршрутных карт заполняют в соответствии с табл. 1.7.

При заполнении МК и ОК руководствуются следующими правилами и требованиями:

- именовать операции кратко, без возможности других толкований, начиная с отглагольного существительного (например: "Установка ЭРЭ на печатные платы", "Пайка бескорпусных микросборок на печатные платы", "Контроль блока");

- переходы формулировать глаголами в повелительном наклонении (например: "Извлечь деталь из тары", "Закрепить ручку согласно чертежу", ), т. е. построение фразы при формулировании перехода должно обращать внимание исполнителя в первую очередь на главное действие, а затем указываются предметы и действия, посредством которых достигается основная цель;

- все операции, включая регулировочные и контрольные, вносить в ТД в порядке их выполнения.

Табл. 1.7. Кодирование информации в графах маршрутной карты

Служебные символы	Условное обозначение	Содержание информации в графе
MO1	—	Наименование, сортамент, размер и марка материала, обозначение стандарта, ТУ
MO2	КОД	Код материала по классификатору
MO2	ЕВ	Код единицы величины (массы, длины, площади детали, заготовки, материала) по классификатору
MO2	МД	Масса детали по КД
MO2	ЕН	Единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала или норма времени, 1, 10, 100, 1000
MO2	Н.расх.	Норма расхода материала
MO2	КИМ	Коэффициент использования материала
MO2, MO3	Код заготовки	Код заготовки по классификатору. Допускается указывать вид заготовки (отливка, прокат и т. д.)
MO2, MO3	Профиль и размеры	Профиль и размеры исходной заготовки, например: лист 1x100x1000
MO2, MO3	КД	Количество деталей, изготавливаемых из одной заготовки
MO2, MO3	МЗ	Масса заготовки
А, В	Цех, уч., РМ	Номера (коды) цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция
А, В	Опер.	Номер операции в технологической последовательности изготовления или ремонта изделия (включая контроль и перемещение): 005; 010; 015 и т. д.
А, В	Код, наименование операции	Код операции по технологическому классификатору, наименование операции
А, Г	Обозначение документа	Обозначение документа, инструкций по охране труда, применяемых при выполнении данной операции
Б, Д	Код, наименование	Код оборудования по классификатору, краткое наименование
Б, Е	СМ	Степень механизации (код)
Б, Е	Профиль	Код профессии по классификатору ОК ПДТР
Б, Е	Р	Разряд работы, необходимый для выполнения операций
Б, Е	УТ	Код условий труда по классификатору ОК ПДТО и код вида нормы
Б, Е	КР	Количество исполнителей, занятых при выполнении операции
Б, Е	КОИД	Количество одновременно обрабатываемых деталей (сборочных единиц) при выполнении одной операции, при перемещении объема грузовой единицы — количество деталей в таре
Б, Е	ОП	Объем производственной партии в штуках
Б, Е	Кпп	Коэффициент штучного времени при многостаночном обслуживании, зависящий от числа обслуживаемых станков, например: М, равного 1,2,3,4,5, соответственно 1;0,65; 0,48;0,39;0,35
Б, Е	Тп.з.	Норма подготовительно-заключительного времени на операцию
Б, Е	Тшт.	Норма штучного времени на операцию
К, Л, М	Наименование дет., сб.ед.	Наименование деталей, сборочных единиц, материалов детали, применяемых при выполнении операции
К, Н, М	ОПП	Обозначение подразделения (склада, кладовой), откуда поступают комплектующие детали
К, Н, М	Кп	Количество деталей, сборочных единиц, применяемых при сборке изделия
К, Н, М	Н.расх.	Норма расхода материалов

						БГУИ.01188.00001		7	1						
						БГУИ.406124.001	—	БГУИ.10188.00001							
						Модуль контроллера			0						
					В	Цех	Уч	PM	Опер	Код, наименование операции					
					Г	Обозначение документа									
					Д	Код оборудования				Наименование, модель оборудования					
					Е	СМ	Проф.	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тп.з.	Тшт.
					Л/М	Наименование детали, сборочной единицы или материала									
					Н/М	Обозначение, код			ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.расх		
					01										
					В02	1 005 <b>0200 Входной контроль элементов</b>									
					Г03	БГУИ.60102.00012, ИОТ при контроле плат, микросхем и радиоэлементов									
					Д04	Стол рабочий ОМ-1971									
					Е05	03	12920	3		1	1	5	11,21		
					06										
					В07	2 010 <b>8879 Комплектование</b>									
					Г08	БГУИ.30188.00010, ИОТ при комплектовании, упаковке и распаковке изделий									
					Д09	Стол рабочий ОМ-1971									
					Е10	03	12837	2	1	1	1	1,0	5	5,0	
					Т11	ГГ 7879 – 4053 Тара технологическая									
					12										
					В13	3 015 <b>8531 Формовка и обрезка выводов ЭРЭ</b>									
					Г14	БГУИ.25185.00014, ИОТ для слесаря-сборщика радиоаппаратуры									
					Д15	Стол рабочий СМ-3									
					Е16	03	18596	3	1	1	1	1,0	10	13,25	
					Т17	ГГ 1420-4023 Приспособление для формовки и обрезки									
					18										
					В19	5 020 <b>8870 Установка и пайка резисторов</b>									
					Г20	БГУИ.25188.00012, ИОТ для слесаря-сборщика радиоаппаратуры									
					Д21	Стол рабочий СМ-3									
					Е22	03	14544	4	1	1	1	1,0	5	5,56	
					О23	Установить и паять припоем ПОС-61 ГОСТ 21931-76 резисторы R50...R65,									
					24	R72...R76 на плату согласно чертежа									
					Т25	Кусачки монтажные ГОСТ 24244-87									
					Т26	Паяльник ПВНРС 65-42									
					27										
					28										
Дубл.	Взам.	Подл.								Разраб.	Егоров И.В.				
										Проверил	Бондарик В.М.				
										Т. Контроль					
										Согл. БМН					
			Изм	Лист	№ докум.	Подп.	Дата		Н. контр.	Сидоров А.Н.					
				МК											

## 1.8. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

*Технологичность* — это совокупность свойств конструкции, которые проявляются в оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени при изготовлении, эксплуатации и ремонте изделия. Различают производственную, эксплуатационную, ремонтную технологичность при техническом обслуживании, технологичность конструкции детали и сборочной единицы, а также технологичность конструкции по процессу изготовления, форме поверхности, размерам и материалам. К качественным характеристикам технологичности конструкции относят взаимозаменяемость, регулируемость, контролепригодность и инструментальную доступность конструкции (рис. 1.15).

Стандарты ЕСТП предусматривают обязательную отработку конструкций на технологичность на всех стадиях их создания, что направлено на повышение производительности труда, снижение затрат и сокращение времени на проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении необходимого качества изделия.

Основные показатели технологичности определяются стандартами ЕСТПП.



Рис. 1.15. Классификация показателей технологичности

1. Трудоемкость изготовления изделия

$$T_{\text{и}} = \sum_{i=1}^n T_i \text{ (нормо-ч),}$$

где  $n$  — количество операций;  $T_i$  — трудоемкость  $i$ -й операции.

2. Себестоимость технологическая

$$C_{\text{т}} = C_{\text{м}} + C_{\text{з}} + C_{\text{ин}} + C_{\text{о}} \text{ (р.),}$$

где  $C_{\text{м}}$  — стоимость затрат на сырье и материалы;  $C_{\text{з}}$  — зарплата производственных рабочих;  $C_{\text{ин}}$  — стоимость инструмента и оснастки;  $C_{\text{о}}$  — расходы на амортизацию и эксплуатацию оборудования.

3. Уровень технологичности конструкции по трудоемкости

$$K_{\text{у.т}} = T_{\text{и}} / T_{\text{б.и}},$$

где  $T_{\text{б.и}}$  — трудоемкость базового варианта изделия.

4. Уровень технологичности по себестоимости

$$K_{\text{у.с}} = C_{\text{т}} / C_{\text{б.и}},$$

где  $C_{\text{б.и}}$  — себестоимость базового варианта изделия.

Дополнительные технические показатели технологичности:

коэффициент унификации

$$K_{\text{у}} = (E_{\text{у}} + D_{\text{у}}) / (E + D),$$

где  $E_{\text{у}}, D_{\text{у}}$  — число унифицированных сборочных единиц и деталей соответственно;  $E, D$  — общее число сборочных единиц и деталей соответственно;

коэффициент применимости типовых ТП

$$K_{\text{ТП}} = T_{\text{ТП}} / T_{\text{и}},$$

где  $T_{\text{ТП}}$  — трудоемкость операций, которые выполняются по типовым ТП;

коэффициент автоматизации и механизации

$$K_{\text{м.а}} = T_{\text{м.а}} / T_{\text{и}},$$

где  $T_{\text{м.а}}$  — трудоемкость операций, выполненных на автоматическом и полуавтоматическом оборудовании.

Базовые показатели технологичности блоков РЭА установлены стандартом ОСТПП ОСТ 4ГО.091.219—81 "Методы количественной оценки технологичности конструкций изделий РЭА", который определяет состав основных частных показателей технологичности, содержит методику расчета базовых показателей и нормативы для оценки технологичности различных классов блоков РЭА. Показатели технологичности разделяются на конструкторские и технологические (табл. 1.8).

Стандарт предусматривает проведение количественного анализа конструкции изделий на технологичность в два этапа:

1) анализ разработанных ранее базовых конструкций (изделий-аналогов) с целью установления базовых показателей и уровня технологичности для сопоставления и оценки уровня технологичности вновь разрабатываемых изделий;

2) анализ вновь разрабатываемых конструкций по стадиям проектирования с установлением их уровня технологичности.

Табл. 1.8. Конструкторские и технологические показатели технологичности

Показатели технологичности (коэффициенты)	Обозначение
<i>Конструкторские</i>	
Применяемости деталей	$K_{\text{п.д}}$
Применяемости электрорадиоэлементов	$K_{\text{п.ЭРЭ}}$
Применяемости сборочных единиц	$K_{\text{п.е}}$
Повторяемости деталей и сборочных единиц	$K_{\text{пов.д.е}}$
Повторяемости ЭРЭ	$K_{\text{пов.ЭРЭ}}$
Повторяемости микросхем и микросборок	$K_{\text{пов.мс}}$
Повторяемости печатных плат	$K_{\text{пов.ПП}}$
Повторяемости материалов	$K_{\text{пов.м}}$
Использования микросхем и микросборок	$K_{\text{исп.мс}}$
Установочных размеров (шагов) ЭРЭ	$K_{\text{у.р}}$
Сложности печатных плат	$K_{\text{с.ПП}}$
Освоенности деталей	$K_{\text{осв}}$
Сложности сборки	$K_{\text{с.сб}}$
Сборности	$K_{\text{сб}}$
Точности обработки	$K_{\text{тч}}$
<i>Технологические</i>	
Автоматизации и механизации подготовки ЭРЭ к монтажу	$K_{\text{м.п. ЭРЭ}}$
Автоматизации и механизации монтажа изделия	$K_{\text{а.м}}$
Автоматизации и механизации операций контроля и настройки	$K_{\text{м.к.н}}$
Применения типовых ТП	$K_{\text{ТП}}$
Прогрессивности формообразования деталей	$K_{\text{ф}}$
Сложности обработки	$K_{\text{с.обр}}$
Использования материалов	$K_{\text{и.м}}$

Согласно ОСТ 4ГО.091.219—81, все блоки по технологичности делятся на четыре основные группы: электронные, радиотехнические, электромеханические, коммутационные. Для каждого типа блоков из общего состава определяется семь показателей технологичности, оказывающих наибольшее влияние, каждый из которых имеет свою весовую характеристику  $\varphi_i$ , определяемую в зависимости от порядкового номера частного показателя (табл. 1.9) и рассчитываемую по формуле

$$\varphi_i = q / 2^{q-1},$$

где  $q$  — порядковый номер ранжированной последовательности частных показателей.

Табл. 1.9. Весовые характеристики

$q$	$\varphi_i$	$Q$	$\varphi_i$
1	1,0	5	0,3
2	1,0	6	0,2
3	0,8	7	0,1
4	0,5		

Комплексный показатель технологичности находится в пределах  $0 < K \leq 1$  и определяется так:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^7 K_i \varphi_i}{\sum_{i=1}^7 \varphi_i}.$$

К электронным устройствам и блокам относятся логические и аналоговые блоки оперативной памяти, блоки автоматизированных систем управления и электронно-вычислительной техники, где число ИМС больше или равно числу ЭРЭ. Состав показателей технологичности для них в ранжированной последовательности приведен в табл. 1.10.

Коэффициент применения микросхем и микросборок

$$K_{\text{мс}} = H_{\text{э.мс}} / (H_{\text{э.мс}} + H_{\text{ИЭТ}}),$$

где  $H_{\text{э.мс}}$  — общее число дискретных элементов, замененных микросхемами и микросборками;  $H_{\text{ИЭТ}}$  — общее число ИЭТ, не вошедших в микросхемы. К ИЭТ относят резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, разъемы, реле и другие элементы.

Коэффициент автоматизации и механизации монтажа

$$K_{\text{а.м}} = H_{\text{а.м}} / H_{\text{м}},$$

где  $H_{\text{а.м}}$  — количество монтажных соединений ИЭТ, которые предусматривается осуществить автоматизированным или механизированным способом. Для блоков на ПП механизация относится к установке ИЭТ и последующей пайке волной припоя;  $H_{\text{м}}$  — общее количество монтажных соединений, для разъемов, реле, микросхем и ЭРЭ определяется по количеству выводов.

Табл. 1.10. Показатели технологичности электронных устройств

$q_i$	Коэффициенты	Обозначение	$\varphi_i$
1	Применения микросхем и микросборок	$K_{\text{мс}}$	1,0
2	Автоматизации и механизации монтажа	$K_{\text{а.м}}$	1,0
3	Автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу	$K_{\text{м.п. ИЭТ}}$	0,8
4	Автоматизации и механизации регулировки и контроля	$K_{\text{а.р.к}}$	0,5
5	Повторяемости ИЭТ	$K_{\text{пов. ИЭТ}}$	0,3
6	Применения типовых ТП	$K_{\text{ТП}}$	0,2
7	Прогрессивности формообразования деталей	$K_{\text{ф}}$	0,1

Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу

$$K_{\text{м.п. ИЭТ}} = H_{\text{м.п. ИЭТ}} / H_{\text{п. ИЭТ}},$$

где  $H_{\text{м.п. ИЭТ}}$  — количество ИЭТ, шт., подготовка выводов которых осуществляется с помощью полуавтоматов и автоматов; в их число включаются ИЭТ, не требующие специальной подготовки (патроны, реле, разъемы и

т.д.);  $H_{п. ИЭТ}$  — общее число ИЭТ, которые должны подготавливаться к монтажу в соответствии с требованиями КД.

Коэффициент автоматизации и механизации регулировки и контроля

$$K_{а.р.к} = H_{а.р.к} / H_{р.к},$$

где  $H_{а.р.к}$  — число операций контроля и настройки, выполняемых на полуавтоматических и автоматических стендах;  $H_{р.к}$  — общее количество операций регулировки и контроля. Две операции — визуальный контроль и электрический — являются обязательными. Если в конструкции имеются регулировочные элементы (катушки индуктивности с подстроечными сердечниками), то количество операций регулировки увеличивается пропорционально числу этих элементов.

Коэффициент повторяемости ИЭТ

$$K_{пов. ИЭТ} = 1 - (H_{т.ор. ИЭТ} / H_{т. ИЭТ}),$$

где  $H_{т.ор. ИЭТ}$  — количество типоразмеров оригинальных ИЭТ в РЭС. К оригинальным относятся ИЭТ, разработанные и изготовленные впервые по ТУ; типоразмер определяется компоновочным размером и стандартом на элемент;  $H_{т. ИЭТ}$  — общее количество типоразмеров.

Коэффициент применения типовых ТП

$$K_{ТП} = (D_{ТП} + E_{ТП}) / (D + E),$$

где  $D_{ТП}$ ,  $E_{ТП}$  — число деталей и сборочных единиц, изготавливаемых с применением типовых и групповых ТП;  $D$ ,  $E$  — общее число деталей и сборочных единиц, кроме крепежа.

Коэффициент прогрессивности формообразования деталей

$$K_{ф} = D_{пр} / D,$$

где  $D_{пр}$  — число деталей, изготовленных по прогрессивным ТП (штамповка, прессование из пластмасс, литье, порошковая металлургия и т. д.);  $D$  — общее число деталей (без учета нормализованного крепежа).

К радиотехническим устройствам относятся приемно-усилительные приборы и блоки, источники питания, генераторы сигналов, телевизионные блоки и т. д. Состав показателей технологичности приведен в табл. 1.11.

Коэффициент освоенности деталей и сборочных единиц (ДСЕ)

$$K_{осв} = D_{т.з} / D_{т},$$

где  $D_{т.з}$  — количество типоразмеров заимствованных ДСЕ, ранее освоенных на предприятии;  $D_{т}$  — общее количество типоразмеров ДСЕ.

Табл. 1.11. Показатели технологичности радиотехнических устройств

$q_i$	Коэффициенты	Обозначение	$\varphi_i$
1	Автоматизации и механизации монтажа	$K_{а.м}$	1,0
2	Автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу	$K_{м.п. ИЭТ}$	1,0
3	Освоенности ДСЕ	$K_{осв}$	0,8
4	Применения микросхем и микросборок	$K_{мс}$	0,5
5	Повторяемости ПП	$K_{пов. ПП}$	0,3
6	Применения типовых ТП	$K_{ТП}$	0,2
7	Автоматизации и механизации регулировки и контроля	$K_{а.р.к}$	0,1

Коэффициент повторяемости печатных плат

$$K_{пов. ПП} = 1 - (D_{т. ПП} / D_{ПП}),$$

где  $D_{т, ПП}$  — число типоразмеров печатных плат в изделии;  $D_{ПП}$  — общее число ПП.

К *электромеханическим устройствам* относятся механизмы привода, отсчетные устройства, кодовые преобразователи и т. д. Состав показателей технологичности приведен в табл. 1.12.

Коэффициент точности обработки

$$K_{тч} = 1 - D_{тч} / D ,$$

где  $D_{тч}$  — число деталей (без учета стандартных и крепежных), качество размеров которых не выше 10. Точность резьбовых поверхностей при расчете не учитывается.

Коэффициент сложности обработки

$$K_{с.о} = 1 - D_{м} / D ,$$

где  $D_{м}$  — число деталей, включая заимствованные и стандартные, требующих обработки снятием стружки;  $D$  — общее число деталей.

Табл. 1.12. Показатели технологичности электромеханических устройств

$q_i$	Коэффициенты	Обозначение	$\phi_i$
1	Точности обработки	$K_{тч}$	1,0
2	Прогрессивности формообразования деталей	$K_{ф}$	1,0
3	Сложности обработки	$K_{с.о}$	0,8
4	Повторяемости деталей и сборочных единиц	$K_{пов. ДСЕ}$	0,5
5	Параллельности сборки	$K_{п.сб}$	0,3
6	Сложности сборки	$K_{с.сб}$	0,2
7	Использования материалов	$K_{и.м}$	0,1

Коэффициент повторяемости деталей и сборочных единиц

$$K_{пов. ДСЕ} = 1 - \frac{D_{т} - E_{т}}{D + E} ,$$

где  $D_{т}$ ,  $E_{т}$  — общее число типоразмеров деталей и сборочных единиц без учета нормализованного крепежа;  $D$ ,  $E$  — общее число типоразмеров деталей и сборочных единиц.

Коэффициент параллельности сборки  $K_{п.сб} = E_{п.сб} / E ,$

где  $E_{п.сб}$  — число сборочных единиц, допускающих параллельную сборку;  $E$  — общее число сборочных единиц.

Коэффициент сложности сборки  $K_{с.сб} = 1 - E_{т.сл} / E_{т} ,$

где  $E_{т.сл}$  — число типоразмеров сборочных единиц, входящих в изделие и требующих регулировки и подгонки.

Коэффициент использования материалов  $K_{и.м} = M / M_{к.м} ,$

где  $M$  — масса изделия без учета комплектующих изделий и тары:  $M = M_{ie} + M_{ид}$ ;  $M_{ie}$  — масса  $i$ -й сборочной единицы;  $M_{ид}$  — масса  $i$ -й детали, являющейся составной частью изделия;  $M_{к.м}$  — масса конструкционного материала.

К *коммутационным устройствам* относятся соединительные, распределительные блоки, коммутаторы и т.п. Состав показателей технологичности приведен в табл. 1.13.

Коэффициент повторяемости материалов  $K_{пов.м} = 1 - D_{м.м} / D_{т} ,$

где  $D_{м.м}$  — число маркосортаментов материалов, применяемых в изделии (под маркосортаментом понимается сочетание марки материала и профиля его поставки);  $D_{т}$  — количество типоразмеров оригинальных деталей.

Табл. 1.13. Показатели технологичности коммутационных устройств

$q_i$	Коэффициенты	Обозначение	$\varphi_i$
1	Повторяемости материалов	$K_{пов.м}$	1,0
2	Сложности сборки	$K_{с.сб}$	1,0
3	Точности обработки	$K_{тч}$	0,8
4	Прогрессивности формообразования деталей	$K_{ф}$	0,5
5	Использования материалов	$K_{и.м}$	0,3

Нормативные значения комплексных показателей технологичности конструкций изделий ЭА зависят от стадии разработки рабочей документации (табл. 1.14).

Табл. 1.14. Нормативные значения показателей технологичности

Класс устройств	Разработка рабочей документации	Доработка рабочей документации	
		установочной серии	установившегося серийного производства
Радиотехнические	0,60 — 0,75	0,70 — 0,80	0,75 — 0,85
Электронные	0,40 — 0,70	0,45 — 0,75	0,50 — 0,80
Коммутационные	0,35 — 0,55	0,50 — 0,70	0,55 — 0,75
Электромеханические	0,30 — 0,55	0,40 — 0,60	0,45 — 0,65

Для повышения технологичности конструкций необходимо выполнение следующих мероприятий:

- повышение унификации, конструкторской и функциональной взаимозаменяемости деталей и сборочных единиц;
- расширение использования ИМС, микросборок, функциональных элементов;
- увеличение сборности конструкции за счет использования базовых несущих конструкций;
- увеличение количества деталей, изготовленных прогрессивными способами формообразования, обоснование выбора качеств точности, шероховатости поверхности, установочных и технологических баз;
- рациональная компоновка элементов, что обеспечивает автоматизированную установку и монтаж;
- минимизация числа подстроечных и регулировочных элементов;
- автоматизация подготовки элементов к монтажу;
- совершенствование ТП монтажа;
- механизация и автоматизация операций контроля и настройки;
- применение прогрессивных методов формообразования деталей.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Конструктивно-технологические особенности, характерные для поколений ЭА.
2. Основные задачи технологии ЭА на современном этапе.
3. Технологический процесс, его структура, виды и типы ТП.
4. Основные задачи, решаемые при проектировании ТП.
5. Как осуществить выбор оптимального варианта ТП?
6. Технологические схемы сборки, их разновидности и порядок проектирования.
7. Основные виды технологических документов и порядок их оформления.
8. Оценка технологичности конструкций блоков ЭА.

## 2. ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 2.1. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОГРЕШНОСТИ И ЗАКОНЫ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ

Производственные погрешности выходных параметров изделий следует рассматривать как следствие влияния нестабильности ТП изготовления деталей, ЭРЭ, а также технологических операций сборки и монтажа, герметизации, термотренировки и др. Под *производственными погрешностями* понимают отклонения параметров изделий от номинальных данных, указанных в ТУ на изделие.

Различают два вида производственных погрешностей: случайные и систематические. Погрешность называют *случайной*, если она принимает различные значения под влиянием случайных факторов, поэтому определить заранее точное значение для каждого момента времени невозможно. *Систематической* называется такая погрешность, которая в процессе исследований остается постоянной или же изменяется по определенному закону. Кроме случайных и систематических погрешностей на практике встречаются грубые ошибки ("промахи"), зависящие от грубых ошибок оператора, технолога и т. д. Влияние таких погрешностей не учитывается при построении модели, но принимаются меры по их предупреждению.

В производстве все погрешности проявляются в совокупности и вызываются в основном следующими факторами:

- погрешностями в работе технологического оборудования, обусловленными дефектами электрических, механических и оптических систем;
- износом рабочего инструмента, отклонениями его от требуемой конфигурации;
- недостаточной жесткостью, нарушением конфигурации приспособлений и технологической оснастки, неправильной установкой в оборудовании;
- неоднородностью электрофизических, механических и прочих свойств материалов и заготовок деталей;
- субъективными ошибками оператора при настройке оборудования и поддержании режимов его работы;
- метрологическими ошибками в результате неточности измерительных средств при контроле параметров изделия.

Как правило, в ТП изготовления изделий действует совокупность частных случайных погрешностей. В том случае, если: число случайных факторов и параметры вызванных ими частных погрешностей не изменяются во времени; среди частных погрешностей нет доминирующих, т. е. все случайные факторы по своему влиянию на общую погрешность составляют величины одного порядка; все случайные факторы взаимно независимы, что имеет место при автоматически работающем оборудовании, погрешности подчиняются нормальному закону распределения Гаусса:

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-M(x))^2}{2\sigma^2}},$$

где  $y(x)$  — плотность распределения;  $x$  — отклонение от центра группирования;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение.

Площадь под кривой Гаусса составляет 100 % всех значений случайной величины. При этом односигмовые границы соответствуют точкам перегиба кривой Гаусса с площадью 68,26 %, или 2/3 наблюдаемых значений, двухсигмовые — 95,44 %, трехсигмовые — 99,73 % всех площадей.

Кривая распределения имеет колоколообразную форму. Максимальная ордината кривой соответствует точке  $x=M(x)$ . При  $x$ , стремящемся к бесконечности, кривая асимптотически приближается к оси абсцисс (рис. 2.1).

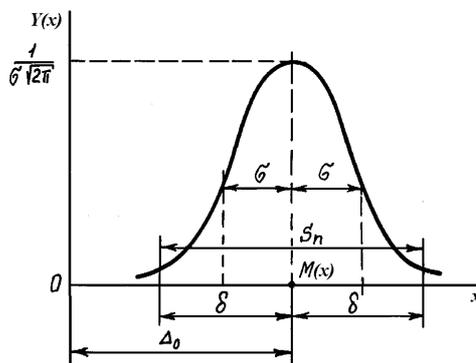


Рис. 2.1. Распределение нормального закона

Параметрами нормального закона распределения являются математическое ожидание, среднее квадратичное отклонение, половина поля допуска, поле рассеяния.

Математическое ожидание случайной величины для дискретных чисел

$$M(x) = \sum_{i=1}^k x_i \frac{m_i}{N},$$

где  $k$  — число интервалов ряда распределения;  $m_i/N$  — частота значений.

Для отображения дискретных изменений значений параметра  $x$  строится гистограмма и полигон распределения. Для этого по оси абсцисс откладывают отрезки, соответствующие ширине интервала  $c$ , а по оси ординат — частоту  $m_i$ , т. е. число значений, попавших в данный интервал (рис. 2.2). Обычно принимают, что число интервалов

$$k = 5 \lg N,$$

где  $N$  — число значений, а ширина интервала

$$c = (x_{\max} - x_{\min}) / k,$$

где  $x_{\min}$ ,  $x_{\max}$  — соответственно минимальное и максимальное значения параметра.

Для непрерывных случайных чисел математическое ожидание

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x y(x) dx.$$

Среднеквадратичное отклонение:

для дискретных чисел 
$$\sigma(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k (x_i - M(x))^2 m_i / N},$$

для непрерывных чисел 
$$\sigma(x) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} (x - M(x))^2 y(x) dx}.$$

Половина поля допуска на параметр  $\delta = 3\sigma$ . Полное поле рассеяния при уровне вероятности 0,9973  $S_n = 2\delta = 6\sigma$ . Отношение среднеквадратичного отклонения к математическому ожиданию, выраженное в процентах, есть коэффициент вариации  $K_v = \sigma_x / M(x)$ . Будучи безразмерным, он удобен для сравнения.

Для обеспечения заданного допуска в условиях производства необходимо, чтобы поле рассеяния производственных погрешностей не выходило за рамки поля допуска. Отсюда следует основное требование к настройке технологического оборудования:  $S_n \leq 2\delta(TУ)$ .

Настроенность ТП определяют с помощью коэффициента технологической точности  $T$  и коэффициента смещения от середины поля допуска  $E$ :

$$T = \frac{2\delta(TУ)}{S_n} = \frac{\delta(TУ)}{\delta}, \quad E = \frac{M(x) - B_{cp}(TУ)}{\delta(TУ)},$$

где  $B_{cp}(TУ)$ ,  $\delta(TУ)$  — номинальное значение параметра и половина поля допуска по ТУ.

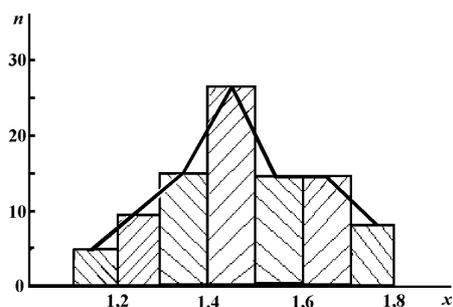


Рис. 2.2. Гистограмма и полигон распределения

Технологический процесс считается настроенным при  $T > 0,95$  и  $E < 0,05$ , в этом случае брак не превысит 1%. В электронике традиционная воспроизводимость на уровне допуска  $3\sigma$  уже не удовлетворяет современным требованиям, т. е. область дефектности 0,27% означает 2700 бракованных приборов на 1 млн. единиц продукции. Согласно стандарту по обеспечению качества Международной организации по стандартизации — ИСО 9000, воспроизводимость рекомендуется между границами  $6\sigma$ , это 0,002 дефекта на 1 млн. изделий.

Нормальному закону распределения в производстве ИМС подчиняются процессы нанесения резистивных и диэлектрических слоев одноступенчатых МОП-структур, толщина фоторезиста, наносимого центрифугированием на партию подложек, и др. При анализе производственных погрешностей неизбежно возникает расхождение между теоретической кривой распределения и статистическим распределением в виде полигона. Чтобы определить соответствие распределения статистических погрешностей нормальному закону, используют критерий согласия Пирсона ( $\chi^2$ ), который представляет собой вероятность того, что случайная величина  $\chi^2$  принимает значение, большее заданного:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left( \frac{n'_i - n_i}{n'_i} \right)^2,$$

где  $n_i$ ,  $n'_i$  — практические и теоретические частоты распределения.

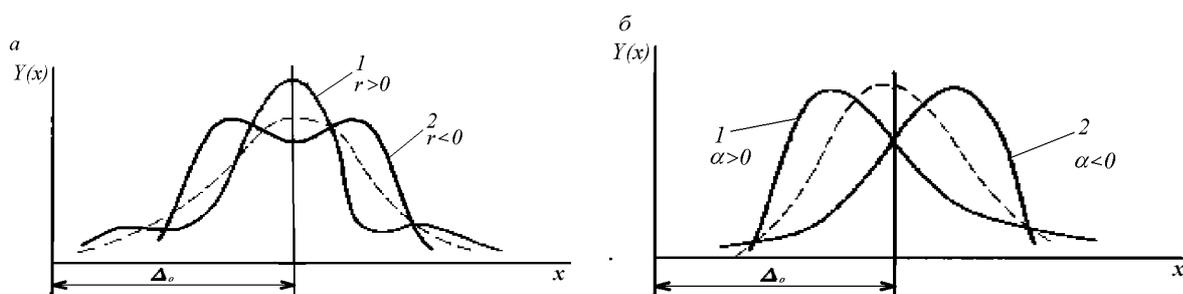


Рис. 2.3. Кривые распределения обобщенного закона типа А:  
а — с положительной ( $\tau > 0$ ) и отрицательной ( $\tau < 0$ ) крутостью;

б – с положительной ( $\alpha > 0$ ) и отрицательной ( $\alpha < 0$ ) косоустью;

Для распределения  $P(\chi^2)$  составлены таблицы, дающие возможность по значению  $\chi^2$  и числу степеней свободы  $l$  найти вероятность того, что  $\chi^2$  превзойдет заданное значение. Число степеней свободы равно:

$$l = k' - f - 1,$$

где  $k'$  — число объединенных ( $n_i > 5$ ) интервалов;  $f$  — число параметров закона распределения.

Границей между случайным и существенным расхождениями является 5 %-й уровень значимости, т. е. при  $P(\chi^2) > 0,05$  расхождение является случайным и предполагаемый закон распределения достоверно описывает опытные данные. В противном случае расхождение признается существенным и для описания статистических данных выбирается другой закон распределения. При использовании критерия  $P(\chi^2)$  число данных выборки должно быть больше 30.

При малом числе наблюдений точечная оценка статистических характеристик в значительной мере случайна и колеблется от выборки к выборке. Поэтому для каждой статистической характеристики следует указывать точность оценки, которая содержится в доверительном интервале. Доверительный интервал для математического ожидания

$$\bar{x} - \alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}} \leq M(x) \leq \bar{x} + \alpha \frac{\sigma}{\sqrt{N}},$$

где  $\alpha$  — коэффициент, зависящий от принятой вероятности, при  $P=0,95$   $\alpha=1,96$ ;  $N$  — объем выборки;  $M(x)$  — среднее арифметическое значение параметра.

Если распределение производственных погрешностей значительно отличается от нормального, то оно описывается обобщенным законом типа А

$$Y_A(x) = y(x) - \frac{r_3}{6} y'''(x) + \frac{r_4 - 3}{24} y^{IV}(x),$$

где  $y(x)$  — плотность распределения нормального закона;  $r_3, r_4$  — основные моменты 3-го и 4-го порядка;  $y'''(x), y^{IV}(x)$  — производные 3-го и 4-го порядка.

Обобщенный закон распределения типа А (рис. 2.3) наряду со средним значением  $M(x)$ , среднеквадратичным отклонением  $\sigma$  характеризуется мерой крутости  $\tau$  и мерой косоусти  $\alpha$ :

$$\tau = r_3 - 3 \quad \alpha = r_3.$$

Для обобщенного закона типа А

$$S_n = t \sigma,$$

где  $t$  — безразмерная дробь, которая определяется по таблицам математической статистики в зависимости от значения и знака эксцесса  $\tau$ .

Обобщенный закон типа А наиболее часто встречается в производстве гибридных пленочных ИМС. Так, погрешности параметров тонкопленочных резисторов и конденсаторов, измеренные за сравнительно большой период их производства, подчиняются этому закону. Примером может служить также смешивание изделий из разных партий, изменение настройки оборудования в технологическом процессе.

Для расчета параметров закона распределения используются понятия моментов, которые бывают начальными, центральными и основными. *Начальным моментом* ряда распределения порядка  $h$  называется сумма произведений отклонений случайной величины  $x_i$  относительно условного начала  $a_0$  в степени  $h$  на соответствующую частоту:

$$\gamma_h = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - a_0)^h}{c} n_i}{N}.$$

Центральным моментом порядка  $h$  называется сумма произведений отклонений случайной величины  $x_i$  от носителя среднего значения  $M(x)$  в степени  $h$  на соответствующую частоту:

$$\mu_h = \sum_{i=1}^k \frac{(x_i - M(x))^h}{c} \frac{n_i}{N}.$$

При  $c = 1$  и  $h = 1$   $\gamma_1 = M(x)$ , при  $h = 2$   $\mu_2 = \sigma^2$ .

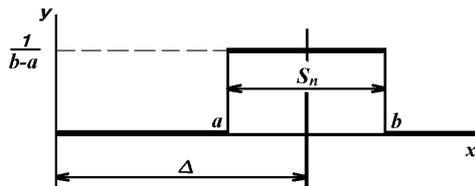


Рис. 2.4. Равновероятностное распределение

Основным моментом порядка  $h$  называется частное от деления центрального момента соответствующего порядка на среднеквадратичное отклонение в степени  $h$ :

$$r_h = \mu_h / \sigma^h.$$

При резко доминирующей систематической погрешности, которая равномерно изменяется во времени (например, износ инструмента), для описания погрешностей применяют равновероятностный закон вероятности, который имеет вид

$$y(x) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < a, \\ 1/(b-a) & \text{при } a \leq x \leq b, \\ 0 & \text{при } x > b, \end{cases}$$

где  $a, b$  — границы изменения значений систематической погрешности (рис. 2.4).

Математическое ожидание  $M(x) = (a+b)/2$ . Дисперсия  $D(x) = (b-a)^2/12$ . Полное поле рассеяния погрешности  $S_n = 3,464\sigma$ .

## 2.2. МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для анализа производственных погрешностей применяют два метода: статистический и аналитический. *Статистический метод* основан на обработке достаточно большого количества наблюдений с помощью правил математической статистики. Он позволяет определять суммарную технологическую погрешность, которая возникает в результате взаимодействия ряда факторов, но не дает возможности выявить причины ее возникновения.

*Аналитический метод* основан на выявлении функциональных зависимостей между производственными погрешностями и причинами их возникновения аналитическим или экспериментальным путем. Эти методы на практике сочетаются, дополняя друг друга. Так появились расчетно-статистический, корреляционный и другие методы анализа производственных погрешностей изготовления деталей и сборочных единиц.

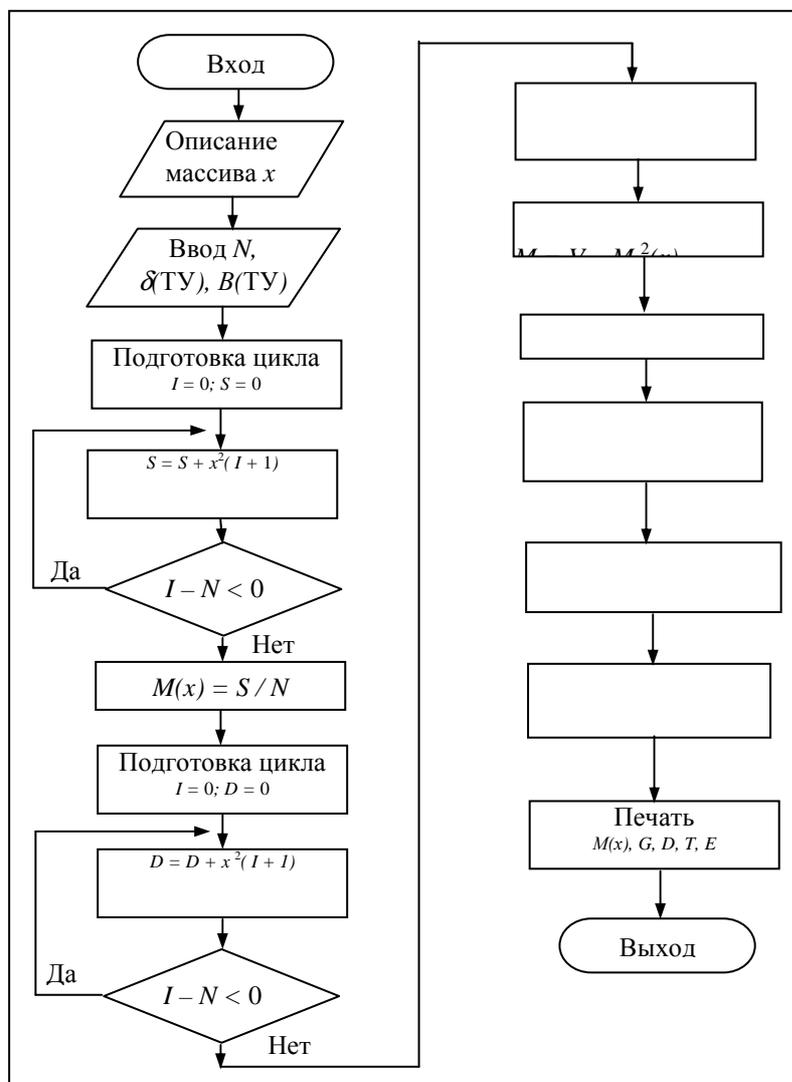


Рис. 2.5. Алгоритм расчета технологической точности изготовления

Статистический метод проводится в три этапа.

На первом этапе выбирается объект исследования, определяется объем экспериментальных данных, назначаются средства технического контроля. Основным требованием, предъявляемым к объекту исследования, является однородность экспериментальных данных. Объем данных определяется в зависимости от допустимой ошибки при их анализе. Выборки могут быть малыми ( $10 \leq n < 30$ ), большими ( $30 \leq n < 100$ ) и представительными ( $100 \leq n \leq 300$ ). Измерительные средства должны быть такими, чтобы полная предельная погрешность метода измерения не превышала 10 % от допуска на параметр.

На втором этапе проводится непосредственное наблюдение и измерение параметров и заполняются протоколы испытаний. Полученные данные для удобства вычисления характеристик ряда распределения разбивают на интервалы.

На третьем этапе по известным формулам рассчитывают  $M(x)$ ,  $\sigma_x$ ,  $\delta$ ,  $S_n$ ,  $T$ ,  $E$  и в конечном итоге определяют настроенность ТП.

Для автоматизации расчетно-статистического метода используют ПЭВМ, производя одновременную обработку массива чисел функции  $y(x)$  без разбивки его на интервалы. Алгоритм расчета технологической точности изготовления изделий приведен на рис. 2.5.

Аналитический метод анализа производственных погрешностей применяется в тех случаях, когда имеется аналитическое выражение, связывающее выходной параметр блока или устройства с параметрами входящих в

него элементов конструкции или параметрами ТП. Для оценки влияния погрешностей параметров отдельных деталей на величину производственной погрешности выходного параметра сборочных единиц используют выражение выходного параметра в общем виде:

$$\Pi = q_1, q_2, q_3, \dots, q_k, \quad (2.1)$$

где  $\Pi$  — выходной параметр сборочной единицы;  $q_i$  — параметры деталей.

После дифференцирования выражения (2.1) и замены дифференциалов конечными приращениями получим

$$\Delta\Pi = \sum_{i=1}^k \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \Delta q_i, \quad (2.2)$$

где  $k$  — количество элементов, участвующих в сборке изделия.

Но на практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями параметров, а относительными. Для этого уравнение (2.2) разделим на уравнение (2.1) и, произведя некоторые преобразования, получим

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \sum_{i=1}^k A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (2.3)$$

где  $A_i$  — коэффициент влияния  $i$ -го параметра на погрешность выходного параметра:

$$A_i = \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \frac{q_i}{\Pi}.$$

Используя уравнение (2.3), можно однозначно определить производственную погрешность выходного параметра при заданных погрешностях параметров элементов, если известны значения  $A_i$ . Для расчета коэффициентов влияния широко используют расчетный и статистические методы (малых приращений, корреляционный, планирования эксперимента и регрессионного анализа). Определив тем или иным способом значения коэффициентов влияния, вычисляют средние значения  $M$  и  $\delta$  относительной погрешности выходного параметра по формулам:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \quad \delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}.$$

Эти уравнения справедливы в том случае, если распределение производственных погрешностей параметров отдельных элементов подчиняется нормальному закону и симметрично относительно среднего значения. Но в результате действия доминирующих факторов, смешивания партий, выборки практические кривые распределения отклоняются относительно значений, заложенных в ТУ на элементы. Количественно эти отклонения оцениваются коэффициентами относительной асимметрии  $b_i$  и рассеяния  $K_i$ :

$$b_i = \frac{M(x_i) - M(x_i)(\text{ТУ})}{\delta_i(\text{ТУ})}, \quad K_i = \frac{S_{ni}}{2\delta(\text{ТУ})},$$

где  $\delta_i(\text{ТУ})$  — половина поля допуска на параметр, определяемая по ТУ;  $S_{ni}$  — величина поля рассеяния параметра, определяемая экспериментально.

Для вычисления величин  $b_i$  и  $K_i$  используют статистический метод анализа производственных погрешностей, основанный на обработке большого количества однородного экспериментального материала. В результате обработки определяют закон распределения производственных погрешностей (с помощью критерия Пирсона или Колмогорова) и его параметры. Используя значения величин  $b_i$  и  $K_i$ , вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i b_i M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \quad \delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 K_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}.$$

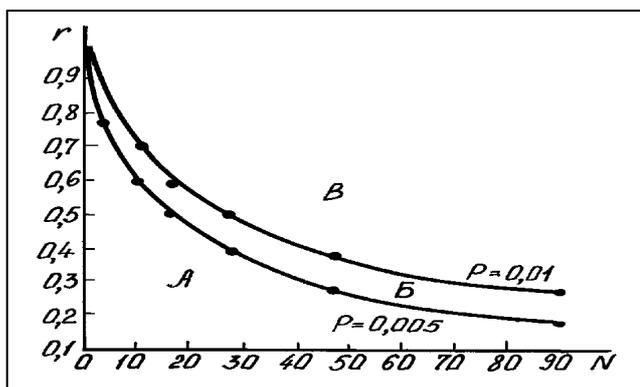


Рис. 2.6. Номограмма для проверки достоверности коэффициентов корреляции:  
*A* – незначимый; *B* – значимый; *B* – весьма значимый

Если выходной параметр связан с влияющими параметрами дробной линейной рациональной или иррациональной функцией:

$$\Pi = Q / H ,$$

где  $Q = Q(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i)$ ,  $H = H(q_1, q_2, q_3, \dots, q_i)$  — многочлены, у которых показатель степени  $i$ -го параметра может быть больше единицы, то коэффициенты влияния могут быть определены по формуле

$$A = \frac{m Q(q_i)}{Q} - \frac{n H(q_i)}{H} ,$$

где  $m$  — показатель степени параметра  $q_i$  в числителе;  $n$  — показатель степени параметра  $q_i$  в знаменателе;  $Q(q_i)$ ,  $H(q_i)$  — части многочленов, в которые входит параметр  $q_i$ .

Анализ производственных погрешностей параметров элементов показывает, что между некоторыми из них на разных этапах изготовления существуют взаимные связи, которые могут быть статистическими. Более простым и практически важным случаем статистической зависимости является корреляционная зависимость, которая выражается в том, что при изменении одного параметра ( $x$ ), второй ( $y$ ) изменяет свое математическое ожидание.

Наличие корреляционных связей можно объяснить конструктивными факторами, а также особенностями ТП изготовления. Так, корреляционные связи имеют место между параметрами электронных ламп ( $S$  и  $r_i$ ), катушек индуктивности ( $L$  и  $R$ ), подстроечных конденсаторов ( $C_{\min}$  и  $C_{\max}$ ), транзисторов ( $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ) и др. Корреляционная связь характеризуется формой и теснотой связи. Численными характеристиками тесноты связи являются следующие: при линейной зависимости — коэффициент корреляции  $r$ , при нелинейной — корреляционное отношение  $\xi$ . Значение коэффициента корреляции может изменяться от  $-1$  до  $+1$  и определяется как

$$r = \frac{\gamma_{11} - M(x)M(y)}{\sigma_x \sigma_y} ,$$

где  $\gamma_{11}$  — начальный момент связи:  $\gamma_{11} = \sum_{i=1}^N x_i y_i / N$ .

Среднеквадратичное отклонение  $\sigma_r = (1 - r^2) / \sqrt{N}$ .

Линейные уравнения регрессии:

$$x - M(x) = p_{x/y}(M(y) - y), y - M(y) = p_{y/x}(M(x) - x) ,$$

где коэффициенты регрессии  $p_{x/y} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ ,  $p_{y/x} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}$ .



Технологический процесс производства функциональных блоков и изделий можно представить в виде структурной схемы, состоящей из ряда технологических операций (ТО): формирующих, преобразующих и пассивных (рис. 2.8). На вход первого формирующего звена поступают серии компонентов и деталей со своими параметрами  $x_1, x_2, \dots, x_n$ .

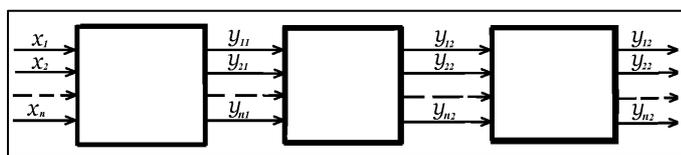


Рис. 2.8. Схема многооперационного технологического процесса

На выходе его из совокупности этих параметров образуются новые показатели  $y_{11}, y_{21}, \dots, y_{j1}$ , которые после преобразующего звена принимают значения  $y_{12}, y_{22}, \dots, y_{in}$  и т. д.

Основная задача анализа точности ТП состоит в том, чтобы определить количественные показатели влияния технологических операций по результатам изменения входных и выходных характеристик блоков. Различают функциональную и технологическую точность выходных параметров блоков и изделий.

*Функциональная точность* определяется как требуемая точность, обеспечивающая нормальное функционирование изделия согласно ТУ, и задается допуском. Обычно функциональная точность аппаратуры задана, а функциональная точность блоков и сборочных единиц рассчитывается исходя из соотношения

$$\delta N(\text{ТУ}) \leq f(\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_i, \dots),$$

где  $\delta N(\text{ТУ})$  — половина поля допуска на выходной параметр изделия по ТУ;  $\delta_i$  — половина поля допуска на выходной параметр  $i$ -го блока.

Полная устойчивость ТП означает, что все изменения параметров изделия укладываются в поле допуска по ТУ. Но так как ТП не могут быть абсолютно устойчивыми, то кривые распределения параметров могут иметь вид, отличный от нормального закона распределения.

Для оценки устойчивости ТП применяют *метод точностных диаграмм*, основанный на построении кривых распределения производственных погрешностей изучаемого параметра во времени. По оси абсцисс откладывают равные промежутки времени, по истечении которых небольшие партии изделий (25 — 30 шт.) подвергают статистическому анализу. По оси ординат откладывают вычисленные для каждой группы значения среднего арифметического  $\bar{x}_i$ , среднеквадратичного отклонения  $\sigma_i$  и предельных отклонений  $S_{ni}$ . Соединяя последовательно точки, получают временную функцию изменения параметра изделия (рис. 2.9).

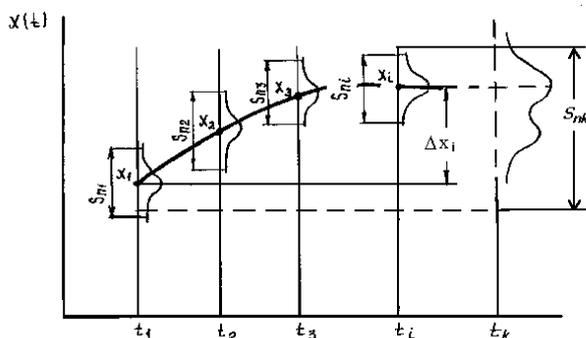


Рис. 2.9. Точностная диаграмма ТП

По точностной диаграмме можно выявить влияние систематических погрешностей на точность изготовления изделия и определить устойчивость ТП. Степень устойчивости процесса определяется коэффициентом  $T_y$ :

$$T_y = \sigma_i / \sigma_s ,$$

где  $\sigma_i$  — среднее квадратичное отклонение в данный момент  $t_1, t_2, \dots, t_i$ ;  $\sigma_s$  — общее среднее квадратичное отклонение. Процесс остается устойчивым, если  $T_y > 0,95$ , а  $\Delta \bar{x}_i \rightarrow 0$ .

Дополнительными характеристиками устойчивости процесса являются число наладок  $H$  за наблюдаемый период времени  $t$  и коэффициент длительности периода между наладками, который характеризует способность процесса длительно сохранять нормальное функционирование без наладок:  $T_H = t / H$ .

*Технологическая точность* — это реально существующая точность выходных параметров функциональных блоков в процессе их изготовления при выбранном варианте технологии. Для определения технологической точности используют статистические методы. Однако в этом случае трудно получить полностью изоморфную модель процесса, поскольку увеличение объема испытаний связано с увеличением затрат времени, средств и материальных ресурсов. Поэтому для правильного расчета технологической точности необходимо математическое описание каждой из рассматриваемых операций, т. е. математическая модель каждой технологической операции.

## 2.4. РАСЧЕТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ТЕОРИИ СЛУЧАЙНЫХ ФУНКЦИЙ

Теория случайных функций позволяет установить функциональную зависимость между двумя величинами, одна из которых — независимая переменная величина, другая — зависимая случайная. Случайной называется функция, которая в результате опыта может принять тот или иной вид (реализацию), заранее неизвестный. Случайная функция совмещает в себе черты случайной величины и функции. Если зафиксировать значение аргумента  $t$ , функция превращается в обычную случайную величину. В результате каждого опыта она превращается в обычную функцию. В качестве аргумента в теории случайных функций используют чаще всего время  $t$ .

В отличие от числовых характеристик случайных величин, представляющих собой определенные числа, характеристики случайных функций представляют собой не числа, а функции, основными из которых являются математическое ожидание, дисперсия и корреляционная функция.

Предположим, что в результате опытов получено  $n$  реализаций независимой функции (рис. 2.10). Выходной параметр в этом случае также является случайной величиной. Математическое ожидание выходного параметра в любой момент времени  $t$  следует представить как некоторую функцию в сечениях  $t_1, t_2, \dots, t_k$ :

$$\left. \begin{aligned} \bar{X}(t_1) &= \sum_{i=1}^n x_i(t_1) / n, \\ \bar{X}(t_2) &= \sum_{i=1}^n x_i(t_2) / n, \\ \bar{X}(t_3) &= \sum_{i=1}^n x_i(t_3) / n, \end{aligned} \right\}$$

где  $n$  — общее число функциональных блоков;  $x_i$  — выходной параметр функционального блока.

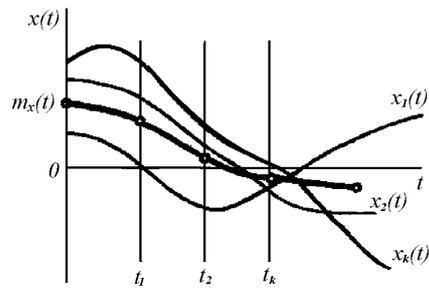


Рис. 2.10. Реализация случайных функций  $x(t)$  и  $m_x(t)$

Следовательно, математическое ожидание случайной величины в общем случае зависит от выбранного сечения и представляет собой функцию:  $M(x(t)) = m_x(t)$ . Для фиксированного сечения  $t_k$  математическое ожидание

$$m_x(t_k) = \bar{x}(t_k) = \sum_{i=1}^n x_i(t_k) / n.$$

Таким образом, математическое ожидание случайной функции есть некоторая функция, около которой различным образом варьируются конкретные реализации случайной функции. *Дисперсией случайной функции  $x(t)$*  называется функция  $D_x(t)$ , значение которой для каждого  $t$  равно дисперсии соответствующего сечения случайной функции:  $D_x(t) = D(x(t))$ .

$$\text{Среднеквадратичное отклонение случайной функции } \sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}.$$

*Корреляционной функцией случайной функции  $x(t)$*  называется неслучайная функция двух аргументов  $K_x(t_k, t_l)$ , которая при каждой паре значений  $t_k$  и  $t_l$  равна:

$$K_x(t_k, t_l) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i(t_k) - m_x(t_k))(x_i(t_l) - m_x(t_l))}{n - 1},$$

где  $t_k, t_l$  — независимые переменные, определяющие сечения, для которых вычисляется корреляционная функция.

Во многих случаях вместо корреляционной функции  $K_x(t_k, t_l)$  пользуются нормированной корреляционной функцией

$$r_x(t_k, t_l) = \frac{K_x(t_k, t_l)}{\sigma_x(t_k) \sigma_x(t_l)},$$

которая представляет собой коэффициент корреляции величин  $x(t_k), x(t_l)$ . В этом случае дисперсия является частным случаем корреляционной функции при  $t_k = t_l$ :  $K_x(t_k, t_l) = D_x(t)$ .

Метод случайных функций используется для определения выходных параметров функциональных блоков (коэффициент усиления — для УНЧ, длительности импульса — для формирователя импульсов) в дискретные моменты времени  $t_1, t_2, \dots, t_n$  (например, после пайки, заливки, термотренировки, при воздействии отрицательных и положительных температур и т. д.). При этом определяются коэффициенты корреляции между операциями, а также математические ожидания и дисперсии выходной функции.

## 2.5. МЕТОДЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗАДАННОЙ ТОЧНОСТИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

В технологии применяются следующие методы обеспечения заданной точности выходных параметров функциональных блоков: полной, неполной, групповой взаимозаменяемости, подгонки, регулировки.

Суть метода полной взаимозаменяемости заключается в том, что требуемая точность выходных параметров функциональных блоков достигается включением в схему элементов с достаточно узкими допусками на их параметры без какого-либо дополнительного подбора или подгонки. Допуски на параметры элементов рассчитывают путем решения системы уравнений, в которых известными величинами являются производственные допуски на выходные параметры:

$$\left. \begin{aligned} \delta \left( \frac{\Delta \Pi_1}{\Pi_1} \right)_{\text{ТУ}} &\geq \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 K_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right)}, \\ \dots & \\ \delta \left( \frac{\Delta \Pi_l}{\Pi_l} \right)_{\text{ТУ}} &\geq \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 K_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right)}. \end{aligned} \right\}$$

Практическим критерием обеспечения полной взаимозаменяемости считается условие, когда в пределах поля допуска на выходной параметр содержится 99,73 % всех отклонений параметров элементов. Достоинства метода: простота достижения требуемой точности, отсутствие подгоночных и регулировочных операций, замена вышедших из строя элементов без подгоночных операций, широкое кооперирование предприятий по изготовлению отдельных взаимозаменяемых (унифицированных) элементов и сборочных единиц.

Границы применения метода полной взаимозаменяемости определяются экономическими показателями, в частности себестоимостью изготовления изделия (рис. 2.11). По мере ужесточения допуска ТП усложняется, требуется дополнительное и дорогостоящее оборудование, что снижает рентабельность метода.

Суть метода неполной взаимозаменяемости заключается в том, что требуемая точность выходных параметров достигается путем установки более широких допусков на параметры схемных элементов. В результате погрешность выходных параметров может выйти за пределы заданного допуска, однако при этом процент брака невелик и дополнительные затраты на его исправление меньше, чем затраты на изготовление деталей с более жесткими допусками на их параметры (рис. 2.12).

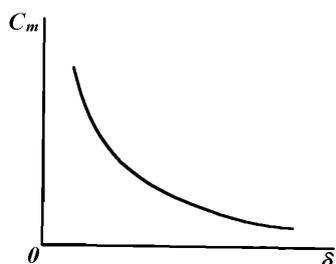


Рис. 2.11. Зависимость себестоимости изготовления изделия от допуска на параметр

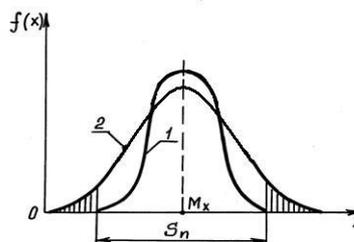


Рис. 2.12. Распределение погрешностей в пределах поля допуска при полной (1) и неполной (2) взаимозаменяемости

Расчет допусков выходных параметров проводится по формуле

$$\delta \left( \frac{\Delta \Pi_l}{\Pi_l} \right)_{\text{ТУ}} \geq \frac{1}{k_s} \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 K_i^2 \delta^2 \left( \frac{\Delta q_i}{q_i} \right)},$$

где  $k_s$  — коэффициент относительного рассеяния выходных параметров, который для нормального закона распределения погрешностей зависит от допустимого брака (табл. 2.1).

Табл. 2.1. Значения коэффициента относительного рассеяния

Процент брака	0,27	0,5	1,0	1,5	2,0	5	10
$k_s$	1,0	1,05	1,11	1,17	1,21	1,33	1,44

Основным преимуществом метода является использование более широких, экономически выгодных допусков на параметры деталей. Недостаток — необходимость дополнительных рабочих мест на исправление брака.

*Метод групповой взаимозаменяемости* заключается в том, что требуемая точность выходных параметров блоков достигается включением в изделие деталей с узкими допусками на их параметры, полученных в результате отбора из одной партии. Отбору подвергаются те элементы, погрешности которых сильнее всего влияют на производственные погрешности выходных параметров изделий. Расчет допусков на производственные погрешности параметров элементов проводится в два этапа. Вначале полагают, что погрешности сильно влияющих элементов равны нулю:

$$\delta\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) = \delta\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right) = 0,$$

и определяют допуск на выходной параметр без учета этих элементов, который будет меньше заданного при широких, экономически оправданных допусках на параметры остальных элементов:

$$\delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right) \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{k-2} A_i^2 K_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}.$$

Затем методом подбора определяют допуски на параметры сильно влияющих элементов:

$$\delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right)_{\text{ТУ}} - \delta\left(\frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i}\right) \geq \sqrt{A_1^2 K_1^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) + A_2^2 K_2^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)}.$$

Преимуществом метода является возможность получения повышенной точности параметров блоков ЭА при достаточно широких допусках на основную массу элементов. Дополнительные расходы, связанные с селекцией нескольких элементов, окупаются за счет экономии при изготовлении элементов с более широкими допусками.

*Метод подгонки* состоит в том, что требуемая точность выходных параметров блоков достигается подгонкой параметров одного или нескольких элементов. Введением такого элемента в схему обеспечивают частичную или полную компенсацию производственных погрешностей выходного параметра. В качестве компенсирующего выбирают элемент, погрешность параметра которого оказывает наиболее сильное влияние на выходные параметры изделия, так называемое "замыкающее" звено.

При расчете размерной сборочной цепи уравнение для замыкающего звена цепи имеет вид

$$Z = Y(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_k),$$

где  $A_i$  — составляющие размеры.

Учитывая, что допуск равен разнице между наибольшим и наименьшим значениями размера, и используя дифференциальное исчисление, получаем уравнение для допуска замыкающего звена:

$$dZ = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial Z}{\partial A_i} \right| dA_i.$$

Среднеквадратичное отклонение размера замыкающего звена

$$\sigma_S = \frac{1}{k_s} \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 \delta_i^2},$$

где  $k_s$  — коэффициент относительного рассеяния замыкающего звена;  $\delta_i$  — допуск на  $i$ -е звено.

Из условия компенсации излишнего отклонения выходного параметра при широких допусках на элементы схемы определяют предельные отклонения значений параметров замыкающего (компенсирующего) звена:

$$2\delta_k \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right) = 2\delta \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right)_{\text{расч}} - 2\delta \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right)_{\text{ТУ}},$$

$$\delta \left( \frac{\Delta q_k}{q_k} \right) = \sqrt{\frac{\delta_k^2 (\Delta \Pi_i / \Pi_i)}{B_k^2}}.$$

При групповых методах подгонки точность составляет  $\pm 5\%$ , при индивидуальных  $\pm 1\%$ . Групповую подгонку осуществляют перерезанием коммутационных проводников в секциях тонкопленочных резисторов, индивидуальную — изменением толщины резистора (механическим путем, электрохимическим анодированием, лазерным или ионным лучом).

Основным преимуществом метода подгонки является возможность получения высокой точности изделий при экономически оправданных допусках на параметры влияющих элементов. Недостаток — необходимость дополнительных работ, связанных с измерением и подгонкой компенсирующего элемента.

*Метода регулировки* заключается в том, что требуемая точность выходных параметров изделий достигается путем изменения значения параметра специального регулировочного элемента. Наличие элемента с переменным параметром позволяет получать необходимую точность не только в период изготовления, но и при эксплуатации прибора, а также дает возможность достижения требуемой точности выходных параметров изделий при широких допусках на параметры влияющих элементов.

К недостаткам метода регулировки следует отнести снижение надежности аппаратуры, так как надежность регулировочных элементов значительно ниже надежности элементов с постоянными параметрами вследствие необходимости фиксации положения, трудностей влагозащиты и т. д., а также усложнения ТП регулировочными операциями.

## 2.6. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Под *надежностью ТП* понимают его способность обеспечивать изготовление изделий в полном соответствии с технической документацией.

Надежность ТП — это вероятность того, что изготавливаемое изделие будет годным:

$$H = N_{\text{г}} / N_{\text{общ}},$$

где  $N_{\text{г}}$  — число годных изделий;  $N_{\text{общ}}$  — общее число изделий:  $N_{\text{общ}} = N_{\text{г}} + N_{\text{г/д}} + N_{\text{д/г}} + N_{\text{д}}$ ;  $N_{\text{г/д}}$ ,  $N_{\text{д/г}}$  — число годных изделий, признанных дефектными, и наоборот, из-за несовершенства выходного контроля;  $N_{\text{д}}$  — число дефектных изделий.

Если изготовление изделия состоит из трех фаз (входного контроля, ТП и выходного контроля), то надежность производственного процесса состоит из трех составляющих:

$$H_{\text{пр}} = H_1 H_2 H_3,$$

где  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  — надежность входного контроля, ТП и выходного контроля соответственно.

Технологический процесс состоит из ряда технологических операций, поэтому его надежность равна произведению надежностей операций:

$$H_2 = \prod_{i=1}^k H_i,$$

где  $k$  — число операций;  $H_i$  — надежность  $i$ -й операции.

Показателем надежности является вероятность появления на выходе процесса, состоящего из  $k$  операций,  $m$  дефектных изделий:

$$P_{1,\dots,k}(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda},$$

где  $\lambda$  — математическое ожидание числа дефектных изделий.

Нормально организованный процесс характеризуется малым количеством дефектных изделий, т. е.  $m$  мало.

При  $m = 1$

$$P_{1,\dots,k}(1) = \lambda e^{-\lambda}.$$

Разложением функции  $e$  в ряд Маклорена можно получить, ограничиваясь первым членом разложения  $P(1) \approx \lambda$ . Среднее количество дефектных изделий на выходе ТП определяют по эмпирической формуле:

$$\lambda = ak^z,$$

где  $a$  — коэффициент, зависящий от ритма производства;  $k$  — количество операций;  $z$  — экспериментально определяемый параметр.

Кроме того, значение  $\lambda$  может быть определено статистическим путем. Так, например, при сборке блока УПЧ  $\lambda = 0,0023k^{1,425}$ .

Вероятность появления брака на одном рабочем месте сборщика или монтажника

$$P_{\text{оп}} = \lambda / k,$$

где  $\lambda$  — среднее число дефектов, допускаемых оператором на рабочем месте;  $k$  — число операций. Тогда вероятность выхода годных изделий с этого рабочего места, т. е. вероятность данной технологической операции,  $H_{\text{оп}} = 1 - P_{\text{оп}}$ .

Даже при хорошо организованном контроле ТП всегда остается вероятность попадания дефектных изделий в готовую продукцию, что снижает показатели надежности процесса. Одним из путей повышения количественных показателей надежности выпускаемых изделий, широко применяемых при изготовлении ЭА, является отбраковка потенциально ненадежных изделий путем их технологической тренировки.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Законы распределения производственных погрешностей и их параметры.
2. Какой ТП считается настроенным?
3. Методика анализа производственных погрешностей.
4. Как построить точностную диаграмму и оценить устойчивость многооперационного ТП?
5. Методы обеспечения заданной точности ТП.

### 3 ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

#### 3.1. МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ

Для современных ТП производства ЭА характерно:

- наличие значительного числа разнообразных факторов, влияющих на ТП;
- большое число внутренних связей между параметрами ТП и их сложное взаимное влияние;
- наличие нескольких конкурирующих направлений процессов, имеющих различные выходные данные;
- воздействие на ТП большого числа внешних неконтролируемых и неуправляемых факторов, играющих роль возмущений.

Изучение и оптимизация таких сложных ТП невозможны без применения современных методик моделирования процессов на ЭВМ.

Современная *технологическая система* (ТС) — это совокупность взаимосвязанных потоков энергии, материалов и информации, действующая как единое целое, в которой осуществляется определенная последовательность ТП. Совокупность физико-химических процессов внутри ТС можно рассматривать как преобразование вводимых потоков энергии и вещества (рис. 3.1). Для обеспечения требуемых физико-химических превращений в ходе выполнения ТП этими потоками необходимо управлять.

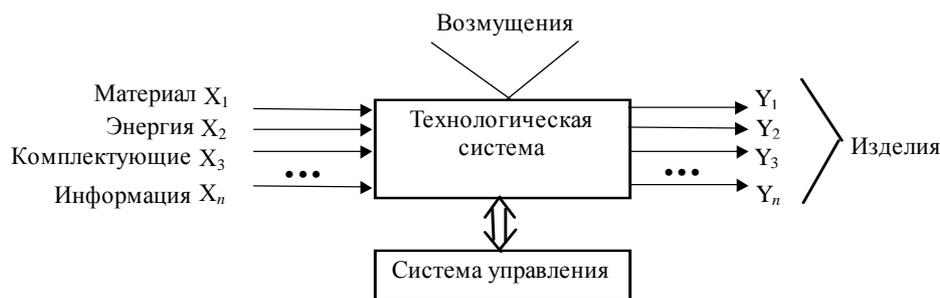


Рис. 3.1. Схема сложной технологической системы

Технологическим системам свойственны признаки больших систем:

- наличие общей цели функционирования (выпуск продукции);
- большое количество элементов системы и параметров, характеризующих ее функционирование;
- сложность поведения ввиду большого числа взаимосвязей ее составляющих;
- воздействие внешних неконтролируемых и неуправляемых факторов.

В связи с этим изучение технологических систем, их анализ и синтез проводятся на моделях.

*Модель* — упрощенная система, отражающая отдельные наиболее важные стороны и ограничения изучаемого процесса. Процесс моделирования должен удовлетворять следующим требованиям:

- эксперимент на модели должен быть проще, экономичнее и оперативнее, чем на объекте;
- по результатам испытания модели должно быть получено аналитическое выражение для расчета параметров объекта.

Применяют два вида моделирования: физический и математический.

*Физическое моделирование* предполагает воспроизведение объекта в ином, уменьшенном, масштабе и сопровождается анализом особенностей и линейных размеров. Для него характерно постоянство критериев подобия модели и объекта. *Подобие* — это условие, при котором возможен количественный перенос результатов

эксперимента с модели на оригинал. Физическое моделирование широко применяется при конструировании, а для анализа сложных ТП производства ЭА его применение затруднительно.

*Математическое моделирование* — метод качественного и (или) количественного описания процесса с помощью математических моделей, которые в зависимости от характера изучаемых явлений делятся на детерминированные и стохастические. *Детерминированными* называются такие модели, которые однозначно предсказывают поведение системы в данных условиях. Они обычно строятся без использования статистических вероятностных распределений. *Стохастические*, или *вероятностные*, модели строятся с использованием теории вероятности и математической статистики и однозначно описывают поведение системы. В зависимости от сложности процессов при их изучении могут использоваться изоморфные или гомоморфные модели. Первые характеризуются полным поэлементным соответствием между ней и реальной системой или процессом, вторые соответствуют лишь крупным частям реальной системы.

Математические модели могут быть аналитическими и имитационными. При составлении *аналитических моделей* процессы функционирования элементов сложной системы записываются в виде функциональных соотношений. Аналитическая модель может быть использована одним из следующих способов:

- 1) аналитически, когда получают в общем виде явные зависимости для искомых величин;
- 2) численно, когда для решения уравнений применяют методы вычислительной техники, чтобы получить числовые результаты при конкретных начальных данных;
- 3) качественно, когда, не имея решений в явном виде, можно определить некоторые свойства системы, например устойчивость и т.д.

При использовании *имитационных моделей*, в отличие от аналитических, в ЭВМ воспроизводится текущее функционирование ТС в некотором масштабе времени. Эксперимент позволяет учитывать влияние большого числа случайных и детерминированных факторов, дает возможность проводить активный эксперимент с помощью целенаправленных изменений параметров модели на некотором множестве реализации. Одно из основных достоинств имитационных моделей — возможность моделирования в тех случаях, когда аналитические модели либо отсутствуют, либо не дают практически надежных результатов.

Стратегия построения математической модели включает следующие этапы (рис. 3.2):

- формулирование целей оптимизации параметров ТП, что включает выбор количественных и качественных критериев оптимизации (целевых функций) и их ограничений;
- выбор вида математической модели с учетом особенностей процесса (детерминированный, стохастический) и создание алгоритма дискретного или нелинейного программирования на ЭВМ;
- математическое моделирование с обработкой данных на ЭВМ;
- проверка адекватности математической модели исследуемому процессу с целью определения того, насколько правомерны принятые допущения.



Рис. 3.2. Стратегия построения математической модели

При необходимости математическая модель корректируется и используется для оптимизации ТП.

Процесс функционирования сложной системы представляется как совокупность действий ее элементов, подчиненных единой цели. Качество работы сложной системы оценивается с помощью показателей эффективности.

Под *показателем эффективности* сложной системы понимают такую числовую характеристику, которая оценивает степень приспособленности системы к выполнению основной цели. В качестве показателей эффективности ТС принимают производительность:

$$Q = N_{\text{ср}} / T_{\text{пл}},$$

где  $N_{\text{ср}}$  — среднее число изделий;  $T_{\text{пл}}$  — плановый период времени.

Показатели эффективности ТС зависят как от параметров системы  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ , так и от параметров, характеризующих воздействие внешней среды,  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ :

$$Q = f(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m).$$

Экономические показатели эффективности  $\Pi_t$  связаны со стоимостью продукции  $C_t$  в оптовых ценах, произведенной за время  $t$ , себестоимостью  $C_t$  и капитальными вложениями  $K$ :

$$\Pi_t = \Phi(C_t, C_t, K).$$

Прибыль  $\Pi_t$  за время  $t$  и чистая прибыль  $\Pi$  определяются по формулам:

$$\Pi_t = C_t - C_t, \quad \Pi = C_t - C_t - E_n K,$$

где  $E_n$  — нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений.

Для современных ТС важнейшее значение имеет надежность функционирования. По мере усложнения систем становится более сложной и оценка их надежности. К сложной системе неприменимы такие показатели надежности, как вероятность безотказной работы, среднее время наработки на отказ, поскольку они констатируют лишь сам факт отказа и не позволяют получить представление о влиянии отказа на конечный эффект функционирования системы. В сложных системах надежность оценивается как приспособленность системы к выполнению своих функций.

Пусть величина  $R_n$  является показателем эффективности некоторой сложной системы, тогда величина  $\Delta R_n$  показывает, насколько снижается эффективность системы за счет возможных отказов ее элементов по сравнению с эффективностью идеально надежной системы  $R_0$ :  $\Delta R_n = R_0 - R_n$ .

Повысить функциональную надежность и точность ТС можно двумя способами:

1) увеличением надежности функциональных элементов, что связано с использованием новых физических принципов, повышением чистоты материалов, более высокой технологической дисциплиной производства;

2) улучшением организации системы путем синтеза надежной системы из малонадежных элементов. Этот способ связан с использованием избыточности разного вида: резервирования (при обрыве (рис. 3.3, а) или замыканий в элементах (рис. 3.3, б) система будет оставаться работоспособной, хотя параметр эффективности изменится), дублирования (рис. 3.3, в) или утробения и мажоритарного выбора результата (рис. 3.3, г).

Вероятность безотказного функционирования ТС можно оценить по формуле

$$P(t) = \prod_{i=1}^m (1 - (1 - P_{xi})(1 - P_k)),$$

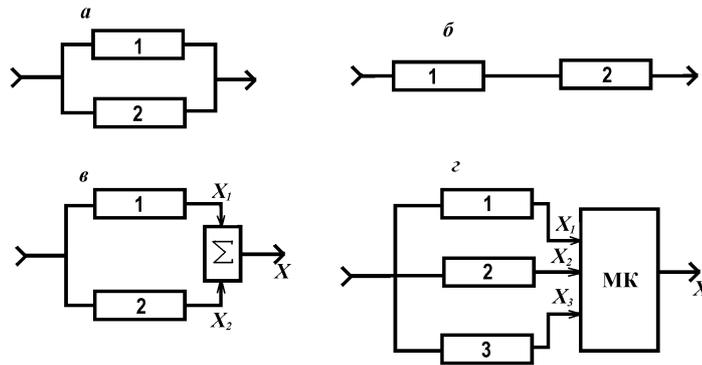


Рис. 3.3. Резервирование элементов ТС

где  $m$  — число элементов;  $P_{xi}$  — вероятность нахождения параметра элемента в пределах допустимого значения;  $P_k$  — вероятность контроля (для неконтролируемых параметров  $P_k = 0$ , при абсолютно надежном контроле  $P_k=1$ ).

При решении вопросов надежности сложных систем учитывают также профилактические мероприятия, возможность восстановления отказавших элементов.

Управлению в сложных системах принадлежит исключительная роль, поэтому качество управления является одной из наиболее важных характеристик функционирования системы. Оно зависит от состава управляющих устройств, качества алгоритмов управления, частоты циклов управления. Качество управления характеризуется величиной  $\Delta R_{упр}$ , которая показывает, насколько снижается эффективность сложной системы при использовании варианта управления  $A$  по сравнению с эффективностью, управляемой по варианту  $B$ :  $\Delta R_{упр} = R_{упр}^A - R_{упр}^B$ .

Процесс функционирования любой сложной системы подвержен влиянию случайных факторов, связанных с внутренними состояниями системы и воздействиями окружающей среды. Поэтому помехозащищенность ТС должна быть достаточно высокой, чтобы обеспечить ее нормальное функционирование. Внутренние помехи проявляются в виде изменений свойств параметров элементов:

$$\alpha_i = \alpha_{i0} + \Delta\alpha_i,$$

где  $\Delta\alpha_i$  — изменение параметров, вызванные действием помех.

Внешние помехи проявляются в отклонениях от нормы в результате воздействий на сложную систему внешней среды:  $v_i = v_{i0} + \Delta v_i$ , тогда показатель эффективности системы при действии на нее внутренних и внешних помех

$$R_{пом} = R(\alpha'_1, \alpha'_2, \dots, \alpha'_n; \beta'_1, \beta'_2, \dots, \beta'_n),$$

а разность  $\Delta R_{пом} = R_0 - R_{пом}$  является показателем помехозащищенности системы.

*Устойчивостью функционирования* сложной системы называется способность системы сохранять свои функции в условиях действия возмущений. Обычно рассматривают область устойчивости на множестве действующих внешних и внутренних факторов.

*Сложностью  $S$  системы*, состоящей из множества элементов со сложностью  $S_i$  (где  $i = \overline{1, N}$ ), называется величина

$$S = \sum_{i=1}^N S_i k_i,$$

где  $k_i$  — число элементов  $i$ -го типа, входящих в систему.



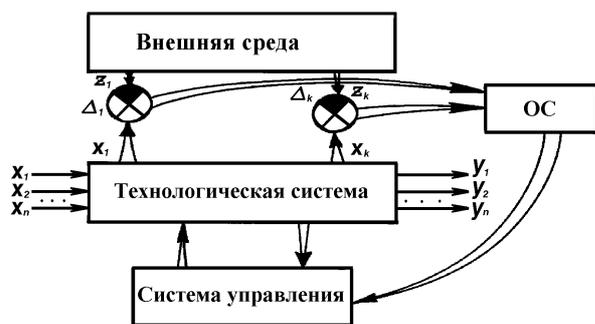


Рис. 3.4. Взаимодействие ТС и внешней среды

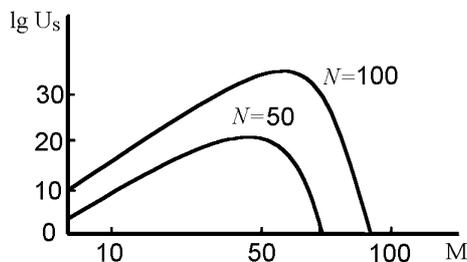


Рис. 3.5. Зависимость гибкости системы от количества ограничений ( $N$  – число переменных,  $M$  – число наложенных связей)

### 3.3. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ

Прогресс в области производства ЭА приводит к возрастанию роли контроля и управления в ТС. Это связано с тем, что из-за увеличения числа взаимосвязанных компонентов ТС и ужесточения требований к их режимам возрастает разнообразие возможных нарушений в протекании ТП, поэтому недостаточно полный, недостоверный или неоперативный контроль, а следовательно, и неоптимальное управление неизбежно приведут к снижению качества и эффективности таких производств. Большие мощности, огромная производительность и высокая стоимость производства ЭА определяют значительные экономические потери из-за неоптимальности контроля и управления ТС.

Особенно высоки требования к качеству и эффективности систем контроля и управления в гибких ТС с безлюдными технологиями. Здесь наряду с возрастанием значений указанных выше факторов добавляются как требования быстрого автоматизированного или автоматического перехода на новые режимы, так и важнейшее требование автоматического обеспечения безаварийности этих процессов.

Эффективное управление возможно лишь при наличии необходимого количества достоверных сведений об управляемом объекте, поэтому одной из важнейших составных частей гибкой ТС является система исчерпывающе полного оперативного контроля за подготовкой, перестройкой, проведением ТП и за состоянием ТС в целом, который осуществляется системой *технологического мониторинга* (monitor — надзирающий, предупреждающий).

Определение состояния технологического объекта может выполняться с различными целями и в соответствии с этими целями может быть связано с разной степенью детализации. Всевозможные частные задачи технологического мониторинга можно систематизировать в соответствии с диаграммой моделей и объектов теории вероятностей и математической статистики (рис. 3.6), выделив определенное число классов типовых задач.

1. Проверка кондиционности ТС. Она осуществляется по результатам измерения обобщенного технологического фактора в присутствии помех и дрейфа параметров с учетом априорной информации. Это обеспечивает минимум потерь от ошибочных решений или иного заданного критерия качества решения. Таким образом, описание состояния проверяемого технологического объекта проводится в форме случайного события с двумя исходами: объект кондиционен или не кондиционен.



Рис. 3.6. Модели и типовые задачи мониторинга ТС

2. Распознавание конечного числа возможных состояний ТС. Предполагается, что испытываемая ТС может находиться в одном из конечного числа режимов, причем любое ее состояние относится лишь к одному из указанных режимов, других не может быть. По результатам измерения (см. п. 1) необходимо принять одну из гипотез о нахождении испытываемой ТС в одном из наилучших режимов (в смысле минимума потерь). Здесь описание состояния проверяемого технологического объекта проводится в форме случайного события с конечным числом исходов.

3. Измерение технологических факторов. По результатам прямого или косвенного наблюдения технологических факторов в присутствии помех и дрейфа параметров с учетом априорной информации необходимо получить оценку истинных значений контролируемых технологических факторов наилучшим образом в смысле минимума потерь от неизбежных ошибок или иного заданного критерия качества. Здесь состояние проверяемого технологического объекта представляется векторной случайной величиной с бесконечным множеством значений.

4. Фильтрация технологических факторов. По результатам прямого или косвенного наблюдения технологических факторов (см. п. 3) воспроизводят оценку истинных функциональных зависимостей контролируемых технологических факторов от пространственных координат и времени лучшим образом в смысле минимума потерь от ошибочных искажений истинного вида воспроизводимых функциональных зависимостей или в смысле иного заданного критерия качества. При этом состояние проверяемого технологического объекта описывается в форме случайного векторнозначного пространственно-временного поля с бесконечным набором реализаций.

5. Диагностика ТС. Она предполагает автоматизированное определение количества, мест возникновения и идентификацию типов неисправностей. При этом состояние проверяемой системы представляется сложной комбинацией случайного числа случайных событий из конечного набора событий с конечным в свою очередь числом исходов.

Выделение указанных пяти классов типовых частных задач технологического мониторинга связано с содержанием необходимых окончательных решений о проверяемой ТС. В реальных условиях обычно необходимы различные совокупности частных типовых задач, например проверка кондиционности с измерением или

фильтрацией технологических факторов, с обнаружением и локализацией неисправностей и т. п. По результатам автоматического или автоматизированного решения отдельных частных задач или их необходимых совокупностей могут быть выработаны соответствующие управляющие воздействия.

Полная задача мониторинга гибких ТС является комплексной и содержит как частные случаи указанные выше типовые задачи. Оптимальные алгоритмы технологического мониторинга весьма громоздки и содержат большое число разнообразных операций над обобщенными технологическими факторами. Такие сложные алгоритмы практически невыполнимы в реальном масштабе времени традиционными однопроцессорными ЭВМ. Прогресс в микроэлектронике и микропроцессорной технике, создание гибких мультимикропроцессорных вычислительных сред открывают новые возможности и приводят к актуальности практического освоения оптимальных полных мониторинговых систем.

Все указанные типовые задачи распознавания состояний технологических объектов по определению есть задачи принятия решения в условиях неопределенности. В математической статистике детально разработаны методы и правила выбора решений на основе выборочного наблюдения, применимые и для распознавания состояний технологических объектов. Суть этих методов состоит в том, что, во-первых, на основе анализа измеренных значений технологических факторов определяется соответствующая этим конкретным данным степень правдоподобия каждого из возможных решений, во-вторых, с учетом фактических и необходимых по условиям задачи степеней правдоподобия из множества возможных решений выбирается единственное, которое и принимается за истинное.

Для определения степени правдоподобия возможных решений используются априорные условные вероятностные описания наблюдаемых технологических факторов, т. е. заранее, до опыта определенные условные плотности вероятности подлежащих наблюдению факторов, соответствующие каждому из различаемых состояний технологического объекта. Различные правила выбора решения приводят к определенным вероятностям ошибок и, следовательно, к разным значениям средних потерь от ошибочных решений. Правило принятия решений, которое обеспечивает наименьшие средние потери от ошибок, принято считать оптимальным в смысле минимума средних потерь или оптимальным по критерию Байеса. В тех случаях, когда потери от различных ошибок определить сложно, наилучшими считают правила, при которых решения наиболее правдоподобны. Такие правила называют оптимальными по критерию максимума правдоподобия. Эти два указанных критерия оптимальности правил принятия решений наиболее распространены, однако существуют и другие критерии.

### 3.4. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТС

Прогнозирование качества отличается от расчета системы тем, что решается вероятностная задача, в которой поведение сложной системы в будущем определяется лишь с той или иной степенью достоверности, и оценивается вероятность нахождения системы в определенном состоянии при различных условиях функционирования. Особую актуальность имеет прогнозирование надежности функционирования ТС. Применительно к надежности задача прогнозирования сводится в основном к предсказанию вероятности безотказной работы  $P(t)$  в зависимости от возможных режимов ТП и условий функционирования системы. Качество прогноза в большой степени зависит от источника информации о надежности отдельных элементов системы и о процессах потери ими работоспособности. Для прогнозирования в общем случае применяются разнообразные методы с использованием моделирования, аналитических расчетов, статистической информации, экспертных оценок, аналогий, теоретико-информационного, логического анализа и др.

Обычно прогнозирование, связанное с применением математического аппарата (элементы численного ана-

лиза и теории случайных функций), является аналитическим. Специфика прогнозирования надежности заключается в том, что при оценке вероятности безотказной работы  $P(t)$  эту функцию в общем случае нельзя экстраполировать. Если она определена на каком-то участке времени  $t$ , то за его пределами ничего о функции  $P(t)$  сказать нельзя. Поэтому основным методом прогнозирования надежности сложной системы является оценка изменения выходных параметров во времени при различных входных данных, на основании чего можно сделать вывод о показателях надежности при различных возможных ситуациях и условиях функционирования системы. Для этого прогнозируется поведение:

- всей генеральной совокупности рассматриваемых ТС, т. е. учитываются вариации исходных характеристик систем и возможных условий их функционирования (рис. 3.7, область I);
- конкретной ТС, т. е. начальные параметры системы становятся неслучайными величинами, а режимы и условия функционирования ТС могут изменяться в определенном диапазоне, при этом область состояний (рис. 3.7, область II) сужается;
- конкретной ТС в определенных условиях функционирования при постоянных режимах ТП. В этом случае необходимо выявить реализацию случайного процесса (рис. 3.7, область III), которая соответствует заданным условиям функционирования.

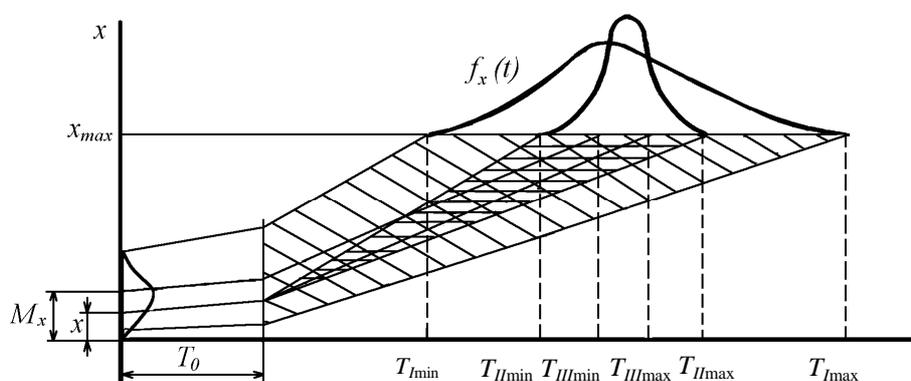


Рис. 3.7. Изменение выходных параметров ТС во времени

Таким образом, если в первых двух случаях необходимо предсказать возможную область существования выходных параметров и оценить вероятность их нахождения в каждой зоне данной области, то в третьем случае отсутствует неопределенность в условиях функционирования ТС и прогноз связан лишь с выявлением тех закономерностей, которые описывают изменение выходного параметра системы во времени.

Точность прогнозирования зависит от того, насколько принятая схема потери работоспособности ТС отражает объективную действительность и насколько достоверны сведения о режимах и условиях функционирования системы, а также о ее начальных параметрах.

Прогнозирование можно вести и на стадии проектирования ТС, если имеются ТУ, конструктивные данные о ее элементах, известны возможные условия эксплуатации. При наличии опытного образца системы можно получить ее начальные характеристики, а при эксплуатации — информацию о потере работоспособности ТС при различных условиях. На этом этапе возможна наибольшая неопределенность в оценке возможных состояний системы.

### 3.5. УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМОЙ

Управление ТС — это комплекс мероприятий, обеспечивающих повышение эффективности производства в соответствии с выбранным критериями оптимальности при заданных технологических, экономических и дру-

гих производственных ограничениях. Комплекс мероприятий состоит из сбора, обработки и анализа информации о ТП и осуществления на основе этой информации контроля и регулирования ТС с помощью средств автоматизации и методов организации и управления производством с использованием ЭВМ.

Основными критериями эффективности управления при этом являются повышение производительности труда, улучшение условий труда и культуры производства. Управление ТС осуществляется на уровне отдельного станка, агрегата, группы станков, участка, цеха, производства, предприятия, объединения. Объемы работ по управлению ТС на каждом уровне зависят от многих причин и могут колебаться в значительных пределах. Например, чем выше уровень механизации и автоматизации ТП, тем меньше непосредственное участие человека в управлении процессом, тем больше операций может выполнить рабочий-оператор. Одна из основных задач технологов — правильное распределение объемов работ по управлению ТС между рабочими-операторами и уровнями производственной структуры (рабочее место, участок, цех и т. д.).

*Алгоритмизация* — это процесс получения и формулирования алгоритма управления, представляющий собой совокупность предписаний, выполнение которых приводит к решению поставленной задачи. Отличительными особенностями алгоритмов управления ТС являются: тесная временная связь с управляемым ТП; хранение рабочих программ, реализующих алгоритмы управления, в основной (оперативной) памяти управляющей ЭВМ для обеспечения доступа к ним в любой произвольный момент времени; превышение удельного веса логических операций над удельным весом арифметических операций; разделение алгоритмов на функциональные части; реализация алгоритмов управления ТС в режиме разделения времени.

Учет временного фактора в алгоритмах управления (их первая особенность) сводится к необходимости фиксации времени приема информации в систему, времени выдачи сообщений оператором для формирования управляющих воздействий, прогнозирования состояния ТП и т. п. Необходимо также обеспечить своевременную обработку сигналов ЭВМ, связанной с управляемым ТП.

Из второй особенности алгоритмов управления ТС следуют жесткие требования к объему памяти, необходимой для реализации алгоритмов. Третья особенность алгоритма управления ТС обусловлена тем, что ТП в большинстве случаев управляются на основе решений, принимаемых по результатам сопоставления различных событий, сравнения значений параметров объекта управления, проверки выполнения различных условий и ограничений. Четвертая особенность позволяет создавать общий алгоритм, представляющий собой определенную последовательность отдельных алгоритмов. Для учета пятой особенности алгоритмов управления необходимо разрабатывать операционные системы реального времени и планировать очередность загрузки модулей, реализующих алгоритмы решений задач управления ТС и их выполнение в зависимости от приоритетов.

Алгоритмы управления ТС могут быть реализованы двумя принципиально различными способами: *программным* и *аппаратным*. Программный способ более универсален, поскольку при изменении алгоритма приходится изменять только программу. В то же время он обладает меньшим быстродействием. Аппаратный способ узко специализирован, и при необходимости смены алгоритма приходится заменять всю схему управления. Возможен и комбинированный способ, когда алгоритм реализуется частично аппаратным и частично программными способами.

Под программно-математическим обеспечением управления ТС понимается совокупность программ регулярного применения, предназначенная для выполнения следующих функций: обеспечения нормальной эксплуатации технических средств системы, обеспечения эффективной разработки рабочих программ обработки информации и решения задач управления, организации вычислительных процессов в ЭВМ. Структура программно-математического обеспечения управления ТС представлена на рис. 3.8.



Рис 3.8. Структура программно-математического обеспечения управления ТС

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные показатели сложных технологических систем.
2. Описание процесса функционирования технологических систем и взаимодействия с окружающей средой.
3. Задачи технологического мониторинга.
4. Прогнозирование поведения и управления технологической системой.

## 4. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

### 4.1. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Сложность современной ЭА и технологических процессов ее производства резко увеличивает стоимость и длительность экспериментальных исследований. Поэтому появилась необходимость моделирования ТП с использованием пассивных и активных экспериментов.

*Пассивный эксперимент* сводится к отбору и обработке данных, полученных в результате пассивного наблюдения за ТП в производственных условиях. Для анализа и обработки полученных данных в основном используют *регрессионный анализ*, в результате которого определяют степень взаимосвязи изучаемых переменных величин и по значению коэффициента регрессии судят о степени влияния. Применение этого метода правомерно, если:

- результаты наблюдений  $y_1, y_2, \dots, y_N$  — независимые нормально распределенные случайные величины;
- факторы  $x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_N$  измеряются с пренебрежительно малой ошибкой по сравнению с ошибкой в определении  $y$  и некоррелированы друг с другом;
- дисперсии  $S_1^2, S_2^2, \dots, S_N^2$  однородны.

При регрессионном анализе определяется функциональная зависимость среднего значения  $y$  от  $x$ :

$$M(y(x)) = f(x, \alpha, \beta, \gamma, \dots),$$

где  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  — неизвестные параметры.

Наиболее простым случаем является линейная регрессия, когда функция  $f(x)$  линейна относительно  $x$ . Тогда уравнение регрессии, связывающее искомую функцию с одним параметром, имеет вид

$$y = b_0 + b_1 x.$$

Для определения параметров модели находят значения коэффициентов  $b_0, b_1$  путем решения системы уравнений:

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= b_0 + b_1 x_{11}, \\ y_2 &= b_0 + b_1 x_{12} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

В случае разброса результатов под действием случайных факторов для нахождения коэффициентов используется метод наименьших квадратов:

$$F = \sum_{k=1}^N (y_k - y)^2 \rightarrow \min,$$

или для простейшей модели  $F = \sum_{k=1}^N (y_k - b_0 - b_1 x_{1k})^2 \rightarrow \min$ .

По значениям коэффициентов в уравнении регрессии можно судить о степени их влияния на выходной параметр. В случае большого числа факторов уравнение принимает вид

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i + \dots + b_n x_n.$$

Коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$  в уравнении (4.1) можно определить так:

$$b_0 = K_{xy} / D_x; \quad b_1 = M(y) - b_0 M(x), \quad (4.2)$$

где

$$M_x = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / N, M_y = \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) / N, \quad (4.3)$$

$$K_{xy} = \left( \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))(y_i - M(y)) / N \right), \quad (4.4)$$

$$D_{xy} = \left( \sum_{i=1}^n (x_i - M(x))^2 / N \right). \quad (4.5)$$

Линейная зависимость, связывающая  $x$  и  $y$ , имеет вид

$$y = \frac{K_{xy}}{D_x} + \left( M(y) - \frac{K_{xy}}{D_x} M(x) \right) x.$$

**Пример.** Температура жала паяльника зависит от напряжения нагревателя (табл. 4.1).

Табл. 4.1. Температура жала паяльника

Напряжение питания, В	32	36	38	40	42	46	48
Температура, °С	225	240	250	255	260	270	280

В результате расчета по формулам (4.2) — (4.5) получено уравнение регрессии следующего вида:  $T = 122,6 + 3,27U$ . При  $U = 40$  В расчетная температура жала 253,4 °С.

Преимущество пассивного эксперимента состоит в том, что при его применении нет необходимости тратить время и средства на постановку опыта. Однако такой эксперимент имеет существенные недостатки, ограничивающие его применение для оптимизации ТП. Во-первых, интервалы варьирования технологическими факторами обычно малы, поэтому изменения выходной величины будут в большей степени зависеть от воздействия неконтролируемых случайных возмущений. Во-вторых, при пассивном эксперименте в производственных условиях часто не рассматриваются факторы, оказывающие существенное влияние на процесс, из-за невозможности их измерения или регистрации.

## 4.2. ПОЛНЫЙ ФАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

От перечисленных выше недостатков свободен *активный эксперимент*, который ставится по заранее разработанному плану. К основным преимуществам активного эксперимента можно отнести:

- четкую логическую схему проведения всего процесса исследования;
- сокращение объема экспериментальных исследований, повышение надежности интерпретации полученных результатов;
- формализацию процесса построения модели и возможность ее оптимизации.

Одним из активных методов планирования экстремальных экспериментов является *полный факторный эксперимент* (ПФЭ), при котором модель процесса представляет полином:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j} b_{ij} x_i x_j.$$

Центр плана, т. е. точка, в окрестностях которой ставится серия опытов, выбирается на основе априорных сведений о процессе. Для удобства обработки результатов опыта вводится кодирование независимых входных факторов  $X_i$ :

$$X_i = (x_i - x_{0i}) / \Delta x_i,$$

где  $x_i$  — натуральное значение фактора;  $x_{0i}$  — базовый, или начальный, уровень  $i$ -го фактора;  $\Delta x_i$  — шаг варьирования по  $i$ -му фактору.

Для независимых факторов, имеющих два уровня, верхний обозначают  $+1$ , нижний  $-1$ . В ПФЭ реализуются все возможные сочетания уровней факторов. Если число уровней каждого фактора равно двум (верхний и нижний), то общее число опытов  $N = 2^k$ , где  $k$  — число факторов. Для простоты записи кодированных значений факторов  $+1$  и  $-1$  единицы опускают. Условия эксперимента записывают в виде матрицы планирования эксперимента, где строки соответствуют различным опытам, а столбцы — значениям факторов. Условная переменная  $X_0$ , которая в процессе опыта имеет значение  $+1$ , вводится для удобства вычислений.

ПФЭ обладает тремя важными свойствами:

- симметричностью относительно центра эксперимента, т. е. алгебраическая сумма элементов вектор-столбцов каждого фактора равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0,$$

где  $i$  — номер опыта;  $j$  — номер фактора ( $j = \overline{1, k}$ );

- условием нормировки, когда сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов как следствие того, что значения факторов в матрице задаются равными  $-1$  и  $+1$ :

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}^2 = N;$$

- ортогональностью матрицы, т. е. сумма почленных произведений любых двух факторов-столбцов матрицы равна нулю:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} X_{ui} = 0, \quad u = \overline{0, k}.$$

После выполнения ПФЭ осуществляют независимую оценку коэффициентов полинома:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N y_i}{N}, \quad b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i y_i}{N}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i \neq j}^N x_i x_j y_i}{N},$$

где  $\bar{y}_i$  — среднее значение выходного параметра по результатам параллельных опытов.

Далее определяют дисперсии среднего арифметического в каждой строке матрицы, которые должны быть однородны:

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2,$$

где  $m$  — количество параллельных опытов.

Если одна дисперсия значительно превышает остальные, можно воспользоваться *критерием Кохрена*. Этот критерий пригоден, когда число опытов во всех точках одинаково. При этом рассчитывают дисперсии в каждой горизонтальной строке матрицы  $S_i^2$ , а затем из всех дисперсий выбирают наибольшую  $S_{\max}^2$ , рассчитывают критерий Кохрена

$$G = S_{\max}^2 \{y\} / \sum_{i=1}^N S_i^2$$

и сравнивают с табличным значением в зависимости от выбранного уровня вероятности  $P$  (табл. 4.2). Если табличное значение критерия больше, чем рассчитанное, то дисперсии однородны. Дисперсия всего эксперимента

$$S^2(\bar{y}) = (\sum_{i=1}^N S_i^2) / N.$$

Табл. 4.2. Значения критерия Кохрена для  $P = 0,05$

G	N						
	1	2	3	4	5	6	7
2	0,9958	0,9750	0,9392	0,9057	0,8772	0,8332	0,7880
3	0,9669	0,8709	0,7977	0,7457	0,7071	0,6530	0,6025
4	0,9065	0,7674	0,6841	0,6287	0,5895	0,5365	0,4884

При ортогональном планировании дисперсии ошибок определения каждого из коэффициентов равны между собой:

$$\sigma^2\{b_i\} = S^2\{\bar{y}_i\} / N.$$

Оценка достоверности коэффициентов регрессии производится с помощью критерия Стьюдента ( $t$ ). Если  $b_i < t_{\text{табл}} \sigma(b_i)$ , то коэффициент считается незначимым. Значения критерия Стьюдента определяются в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = N(m-1)$  и выбранного уровня значимости (табл.4.3).

Табл. 4.3. Квантили распределения Стьюдента  $t_{\text{табл}}$

$f$	$P=0,05$	$P=0,01$
8	2,31	3,36
12	2,18	3,05
16	2,12	2,92
24	2,06	2,80
30	2,04	2,75

Для оценки адекватности полученной математической модели, т. е. достаточно полного качественного и количественного описания процесса, используют критерий Фишера ( $F$ ). Для этого оценивают дисперсию адекватности:

$$\sigma_{\text{ад}}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N \left( \bar{y}_i - \hat{y}_i \right)^2,$$

где  $d$  — число членов в уравнении регрессии, за исключением  $b_0$ ;  $\hat{y}_i$  — значение выходного параметра, полученное расчетным путем из математической модели.

Затем находят  $F$  - критерий:

$$F = \sigma_{\text{ад}}^2 / S^2\left(\hat{y}\right).$$

Если  $F < F_{\text{табл}}$ , то модель признается адекватной. Значение  $F_{\text{табл}}$  выбирается в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = N-d$  и  $f_2 = N(m-1)$  (табл.4.4).

Табл. 4.4. Значения  $F_{0,05}$  (верхние значения) и  $F_{0,01}$  (нижние значения)

$f_2$	$f_1$				
	4	5	6	7	8
10	3,48	3,33	3,22	3,14	3,07
	5,99	5,64	5,39	5,20	5,06
20	2,87	2,71	2,60	2,51	2,45
	4,43	4,10	3,87	3,70	3,56

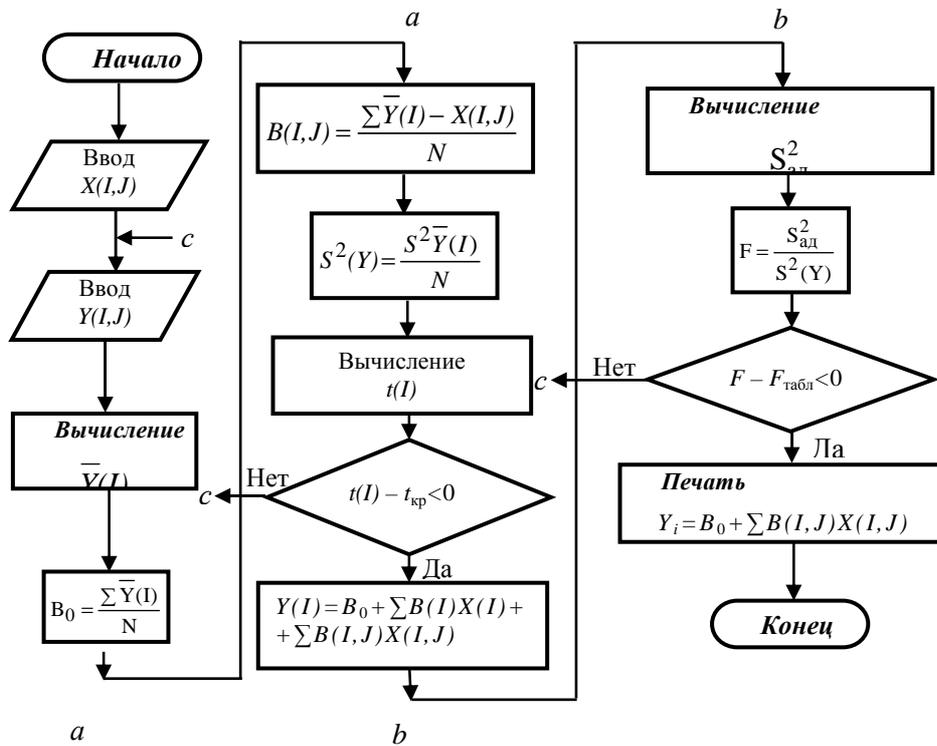


Рис. 4.1. Алгоритм получения математической модели на ЭВМ

Если условие не выполняется, то модель считается неадекватной. Для получения адекватной модели необходимо сузить интервалы варьирования, увеличить количество параллельных опытов  $m$  и повторить ПФЭ. Для ускорения процессов вычисления статистических характеристик используется ЭВМ. Алгоритм получения математической модели по стандартной подпрограмме приведен на рис. 4.1.

После проведения ПФЭ и обработки результатов дальнейшие действия должны сводиться к нахождению оптимальных сочетаний факторов, чтобы приблизить данный процесс к оптимальному. На первом этапе по коэффициентам в уравнении регрессии судят о том, как сильно и в каком направлении влияет каждый фактор на параметр оптимизации. Увеличение фактора при положительном коэффициенте увеличивает значение функции  $y$ , увеличение факторов при отрицательном коэффициенте уменьшает значение функции. Абсолютные значения коэффициентов возрастают с увеличением интервалов варьирования.

Далее анализируются эффекты взаимодействия. Если эффект взаимодействия двух факторов имеет положительный знак, то для увеличения значения функции  $y$  требуется одновременное увеличение или уменьшение значений факторов, а для уменьшения значения  $y$  значения факторов должны одновременно изменяться в разных направлениях.

Графическая интерпретация уравнения регрессии осуществляется на плоскости  $x_1, x_2$  при  $x_3 = \text{const}$ . На втором этапе переходят к оптимизации математической модели различными методами.

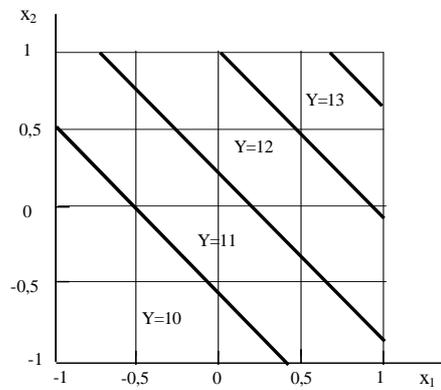


Рис. 4.2. Поверхность отклика функции

**Пример.** Рассмотрим ПФЭ процесса УЗ-микросварки проволочных алюминиевых выводов толщиной 35 мкм к контактным площадкам, покрытым гальваническим сплавом Ni—In с целью замены золотого покрытия. Критерий оптимизации — прочность микросварного соединения на разрыв  $P$ , сН. В качестве независимых технологических факторов были выбраны:  $x_1$  — электрическая мощность на выходе УЗ-генератора ( $P$ , Вт);  $x_2$  — время УЗ-сварки ( $t$ , с);  $x_3$  — статическая нагрузка на УЗ-инструмент ( $F$ , г). Начальные условия эксперимента и матрица планирования приведены в табл. 4.5.

Табл. 4.5. Начальные условия и матрица планирования процесса УЗ-микросварки

Значения факторов					$x_1, P$	$x_2, t$	$x_3, F$			
Основной уровень $x_i$					0,20	0,20	20			
Интервал варьирования $\Delta x_i$					0,05	0,05	5			
Верхний уровень (+1)					0,25	0,25	25			
Нижний уровень (-1)					0,15	0,15	15			
Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1 x_2$	$x_2 x_3$	$x_1 x_3$	$x_1 x_2 x_3$	$\bar{y}_i$	$s_i^2 \{y\}$
1	+	-	-	-	+	+	+	-	5,29	0,65
2	+	+	-	-	-	+	-	+	7,90	0,76
3	+	-	+	-	-	-	+	+	7,70	1,06
4	+	+	+	-	+	-	-	-	9,43	1,81
5	+	-	-	+	+	-	+	+	9,00	1,92
6	+	+	-	+	-	-	-	-	11,33	2,20
7	+	-	+	+	-	+	+	-	12,16	3,45
8	+	+	+	+	+	+	-	+	15,74	3,81

После математической обработки данных получаем полином (уравнение регрессии):

$$y = 9,81 + 1,42x_1 + 1,27x_2 + 2,21x_3 + 0,05x_1x_2 + 0,18x_2x_3 + 0,44x_1x_3 - 0,26x_1x_2x_3.$$

Так как  $f_1 = 8(3-1) = 16$ , то при уровне значимости 0,05  $t_{\text{табл}} = 2,12$ , а  $b_{\text{кр}} = t_{\text{кр}} \sigma\{b_i\} = 2,12 \cdot 0,495 = 1,02$ . После исключения незначимых членов получаем искомое уравнение регрессии:  $y = 9,81 + 1,42x_1 + 1,27x_2 + 2,21x_3$ .

В примере для 5%-го уровня значимости и  $f_1 = 5$ ,  $f_2 = 16$ ,  $F_{\text{табл}} = 4,6$ ,  $F_{\text{расч}} = 4,05 < F_{\text{табл}}$ . Таким образом, полученная модель является адекватной. Графическая интерпретация уравнения регрессии осуществляется на плоскости  $x_1, x_2$  при  $x_3 = \text{const} = 0,5$  (рис. 4.2).

### 4.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Задача оптимизации сводится к нахождению таких условий проведения ТП, при которых критерий оптимизации достигает экстремума. Функцию  $y = \varphi(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , связывающую критерий оптимизации с входными параметрами, варьируемыми при исследовании, принято называть *функцией отклика*, а геометрическое изображение функции отклика в факторном пространстве — *поверхностью отклика*. Экстремальное значение отклика достигается многократным последовательным продвижением в факторном пространстве несколькими методами.

1. *Метод Гаусса—Зайделя.* Последовательное продвижение осуществляется путем поочередного варьирования каждым фактором до достижения частного экстремума целевой функции. В каждой серии опытов изменяется только переменная  $x_i$ , остальные остаются неизменными. Изображающая точка перемещается попеременно вдоль каждой из координатной осей  $x_i$  ( $i = \overline{1, k}$ ) факторного пространства. Переход к новой  $(i+1)$ -й координате осуществляется при достижении частного экстремума целевой функции  $y(x)$  по предыдущей координате, т. е. в точке  $x_{N+1}$ , где  $dy(x_{N+1})/dx_i = 0$  (рис. 4.3, а).

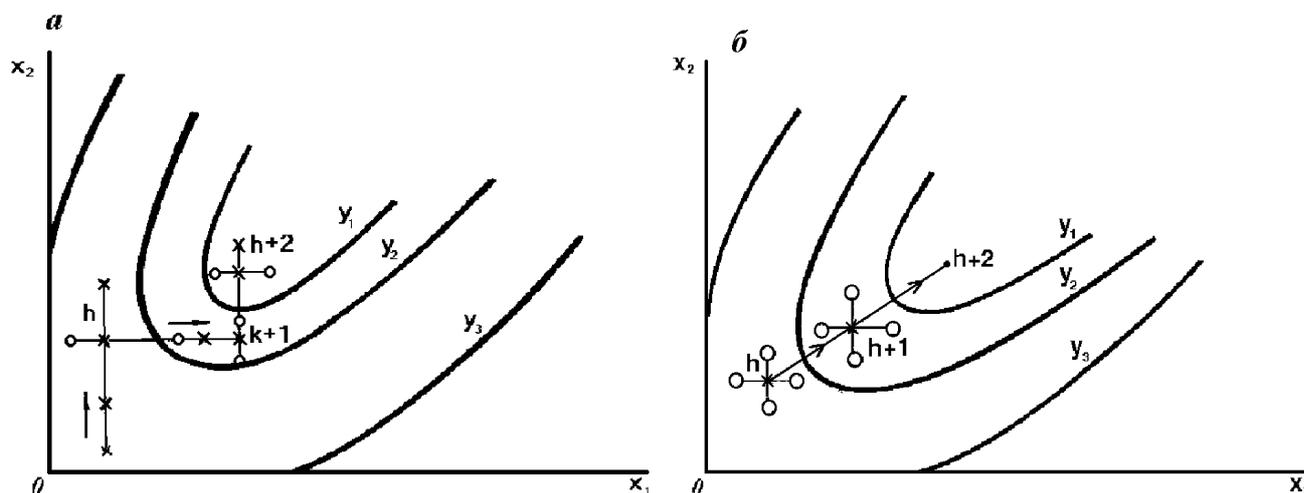


Рис. 4.3. Движение в факторном пространстве в методах Гаусса-Зайделя (а) и градиента (б)

Направление движения вдоль  $(i+1)$ -й координатной оси выбирается обычно по результатам двух пробных экспериментов в окрестностях точки частного экстремума по предыдущей переменной. Поиск экстремума прекращается в точке, движение из которой в любом направлении не приводит к увеличению значения выходного параметра. При увеличении количества независимых переменных до 5—6 применение метода Гаусса—Зайделя для оптимизации ТП становится малоэффективным в силу увеличения числа экспериментов.

2. *Метод градиента.* При оптимизации градиентным методом движение совершается в направлении наибольшего изменения целевой функции, причем направление движения корректируется после каждого рабочего шага. Поскольку координатами вектора

$$\text{grad } y(x) = \left( \frac{\partial y}{\partial x_1}; \frac{\partial y}{\partial x_2}; \dots; \frac{\partial y}{\partial x_k} \right)$$

служат коэффициенты при линейных членах уравнения регрессии  $b_1, b_2, \dots, b_k$ , их можно определить по результатам нескольких пробных экспериментов в окрестностях исходной точки. В этом случае приращение целевой функции  $y$ , соответствующее приращению  $x_i$ , можно считать пропорциональным значению частной производной:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} = b_i \quad (i = \overline{1, k}).$$

После нахождения составляющих градиента выполняется рабочий шаг по направлению к экстремуму (рис. 4.3, б):

$$x_{N+1} = x_N + c_{\text{ш}} \text{grad } y(x_N),$$

где  $\rho_{ш}$  — параметр рабочего шага, который выбирают в зависимости от его номера  $h$  или расстояния от оптимума  $\gamma$ :  $\rho_{ш} = \rho / (h \gamma)$ , где  $\rho$  — const;  $h$  — номер шага;  $0 < \gamma < 0,5$  ( $\gamma = 0,25$ ).

Показателем выхода в область оптимума является малое значение модуля градиента ( $\text{grad } y(x) = 0$ ), т. е. все коэффициенты  $b_i$  становятся незначимыми или равными нулю. В градиентном методе важен выбор шага. При слишком малом шаге требуется большое количество экспериментов, а если размер шага велик, то можно "проскочить" оптимум.

3. *Метод крутого восхождения (Бокса—Уилсона)*. Этот метод объединяет характерные элементы методов Гаусса—Зайделя и градиента. Так, шаговое движение при этом методе осуществляется в направлении наибольшего изменения функции (в направлении градиента), но в отличие от метода градиента корректировка направления движения производится не после каждого шага, а после достижения частного экстремума целевой функции, как при методе Гаусса—Зайделя. Практически поиск оптимума методом крутого восхождения выполняется следующим образом:

1) вблизи исходной точки  $x_0$  проводится эксперимент для определения  $\text{grad } y(x_0)$ , результаты эксперимента подвергаются статистическому анализу, определяются коэффициенты  $b_i$  уравнения;

2) вычисляется произведение  $b_i \Delta x_i$ , где  $\Delta x_i$  — шаг варьирования параметра  $x_i$  при исследовании поверхности отклика в окрестностях исходной точки. Фактор, для которого произведение будет максимальным, принимается за базовый  $\delta_0 \Delta x_0$ ;

3) для базового фактора выбирается шаг движения  $\lambda_0$  по направлению к оптимуму, после этого вычисляются размеры шагов при крутом восхождении по остальным переменным процесса; при движении к оптимуму по градиенту все исследуемые параметры должны изменяться пропорционально коэффициентам наклона поверхности отклика  $b_i$ :

$$\lambda_i = \frac{b_i \Delta k_i}{b_0 \Delta k_0};$$

4) проводятся "мысленные" опыты, которые заключаются в вычислении по уравнению

$$y(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k$$

значений целевой функции в точках факторного пространства, лежащих на пути к экстремуму; при этом  $i$ -я координата  $n$ -й точки

$$x_{n+1} = x_n + h \frac{\lambda_i}{\Delta x_i},$$

где  $h = \overline{1, m}$ ;  $i = \overline{1, k}$ ;  $\lambda_i = b_i \Delta x_i = b_i + \frac{\Delta x_i}{n}$ . Прогнозируемое значение выходного параметра

$$y_{пр} = b_0 + h \sum b_i \frac{\lambda_i}{\Delta x_i};$$

5) поскольку каждый цикл крутого восхождения приближает к поверхности отклика с большой крутизной, рекомендуется для каждой последующей серии опытов выбирать шаг меньший, чем в предыдущей;

б) эксперимент прекращается, когда все или почти все коэффициенты  $b_i$  уравнения получаются незначимыми или равными нулю, что говорит о выходе в область экстремума целевой функции.

**Пример.** Реализация крутого восхождения для оптимизации математической модели процесса УЗ-микросварки проволочных выводов интегральных микросхем в виде  $y = 9,81 + 1,42x_1 + 1,27x_2 + 2,21x_3$ .

Определяем шаг варьирования:  $\Delta i = \Delta x_i / 10$ .

Шаг движения  $\lambda_i = b_i \Delta i$ . Тогда  $\lambda_1 = 0,005 \cdot 1,42 = 0,007$ ,  $\lambda_2 = 0,005 \cdot 1,27 = 0,006$ ,  $\lambda_3 = 0,5 \cdot 2,21 = 1,105$ .

Находим значения факторов  $x$  в начале опыта:

$$\begin{aligned}x'_1 &= x_1^{\text{ном}} + \Delta x_1 b_1 = 0,15 + (0,005 \cdot 1,42) = 0,157, \\x'_2 &= x_2^{\text{ном}} + \Delta x_2 b_2 = 0,15 + (0,005 \cdot 1,27) = 0,156, \\x'_3 &= x_3^{\text{ном}} + \Delta x_3 b_3 = 10 + (0,5 \cdot 2,21) = 11,1.\end{aligned}$$

Начинаем "крутое восхождение" в сторону увеличения переменных  $x_1, x_2, x_3$ , которые выбираем на уровне  $-1$ . Проводим "мысленные опыты", результаты которых заносим в табл. 4.6.

Табл. 4.6. Реализация "крутого восхождения"

Характеристики фактора и номера опыта	Выходные факторы			Расчетное $\tilde{y}$	Экспериментальные $\bar{y}$
	$x_1$ (P, Вт)	$x_2$ (t, с)	$x_3$ (F, сН)		
Коэффициент $b_i$	1,42	1,27	2,21	—	—
Шаг варьирования $\Delta i$	0,005	0,005	0,5	—	—
Начальная точка:	0,15	0,15	10	—	—
в первом опыте	0,157	0,156	11,1	10,93	10,45
во втором опыте	0,164	0,162	12,2	12,04	11,60
в третьем опыте	0,171	0,168	13,3	13,16	12,42
в четвертом опыте	0,178	0,174	14,4	14,28	14,00
в пятом опыте	0,185	0,180	15,5	15,40	12,20
в шестом опыте	0,192	0,186	16,6	16,52	10,30

Наибольшее усилие отрыва  $P = 14,00$  сН в четвертом опыте. Оно подтверждается экспериментальными данными. В пятом опыте экспериментальное значение не подтверждается расчетным, поэтому "восхождение" прекращаем. Далее переходим к исследованию функции в стационарной области.

Шаговое движение к экстремуму продолжается до тех пор, пока не будет достигнута "почти стационарная" область, которая не может быть описана линейным выражением. Здесь сильнее проявляется взаимодействие факторов, характеризуемых коэффициентами при квадратичных членах полинома, поэтому ее обычно удается описать с достаточной точностью с помощью полинома второго порядка:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{ij} b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2.$$

Для вычисления полинома второго порядка число уровней должно быть, как минимум, три, т. е. на единицу больше степени полинома. Однако применение ПФЭ типа  $3^k$  нерационально вследствие резкого увеличения объема экспериментов. Сократить их численность можно, используя так называемые *центральные композиционные планы* (ЦКП). Их особенностью является добавление нескольких специально спланированных экспериментальных точек к матрице ПФЭ для получения плана второго порядка. При  $k$  факторах общее число опытов ЦКП

$$N = 2^k + 2k + m_0,$$

где  $2k$  — "звездные" точки;  $m_0$  — число опытов в центре плана.

Таким образом к линейной модели добавляются так называемые "звездные" точки с координатами  $(0, \alpha)$ , лежащие на сфере диаметром  $2\alpha$  (рис. 4.4), и опыты в центре плана. Бокс и Уилсон предложили выбирать плечо  $\alpha$  и количество центральных точек ( $m_0=1$ ) так, чтобы план второго порядка оставался ортогональным (ЦКОП). При  $k = 3$  он содержит всего 15 опытов, тогда как при ПФЭ  $3^3 = 27$ . В силу ортогональности плана все коэффициенты определяются независимо друг от друга:

$$b_i = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N x_i^2}, \quad b_{ij} = \frac{\sum_{i=1}^N x_i x_j \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N (x_i x_j)^2}, \quad b_{ii} = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2 / N) \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^N (x_i^2 - \sum_{i=1}^N x_i^2 / N)^2}. \quad (4.6)$$

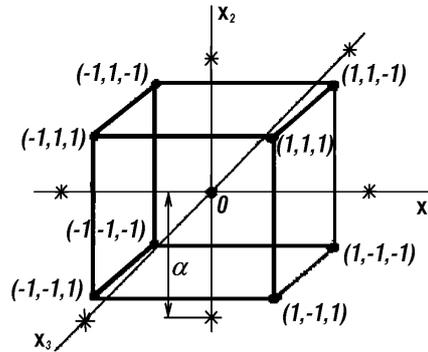


Рис. 4.4. Координационная решетка ЦКОП

В отличие от линейного полинома при ортогональном планировании второго порядка оценки коэффициентов полинома находятся с неодинаковыми дисперсиями  $\sigma^2\{b_i\} = \sigma^2\{b_{ij}\}$  по уравнению (4.6), а дисперсия при квадратичных членах уравнения регрессии — по формуле

$$\sigma^2\{b_{ii}\} = \frac{S^2(\bar{y})}{\sum_{i=1}^N \left( x_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N x_i^2}{N} \right)^2 \right)}.$$

Так же, как и при получении линейной модели, обработка результатов при реализации ЦКОП предполагает статистические проверки гипотез воспроизводимости результатов экспериментов, значимости коэффициентов и адекватности моделей.

Полученная модель второго порядка используется для нахождения оптимальных технологических режимов. Для этого модель методами аналитической геометрии приводится к канонической форме. При преобразовании прежде всего освобождаются от линейных членов путем переноса начала координат в точку  $O$ , соответствующую  $B_0$ , затем от эффектов взаимодействия путем поворота осей координат вокруг точки  $O$  (см. рис. 4.4).

Для двух независимых переменных уравнение в канонической форме имеет вид

$$Y - Y_{01} = B_{11}^2 (x_1')^2 + B_{22}^2 (x_2')^2.$$

Поверхность отклика в зависимости от вида уравнения может быть трех типов. Если коэффициенты  $B_{11}$  и  $B_{22}$  имеют одинаковые знаки, то поверхность отклика — эллиптический параболоид, центр которого — искомый экстремум (рис. 4.5, а). В этом случае для нахождения оптимальной точки можно воспользоваться и не приведенным уравнением второго порядка, для чего приравниваются нулю значения частных производных  $\partial Y / \partial x_i = b_i + 2b_{ij} + b_{ij}x_j = 0$  и решается система уравнений. При разных знаках  $B_{11}$  и  $B_{22}$  поверхность отклика относится к типу минимакса, или "седла". Для нахождения оптимальных технологических режимов нужно двигаться по благоприятному крылу "седла". Если один из коэффициентов  $B_{ij}$  равен нулю, то поверхность отклика имеет форму нарастающего возвышения (рис. 4.5, б). Для отыскания оптимума следует двигаться по гребню, пока это допускают возможности ТП.

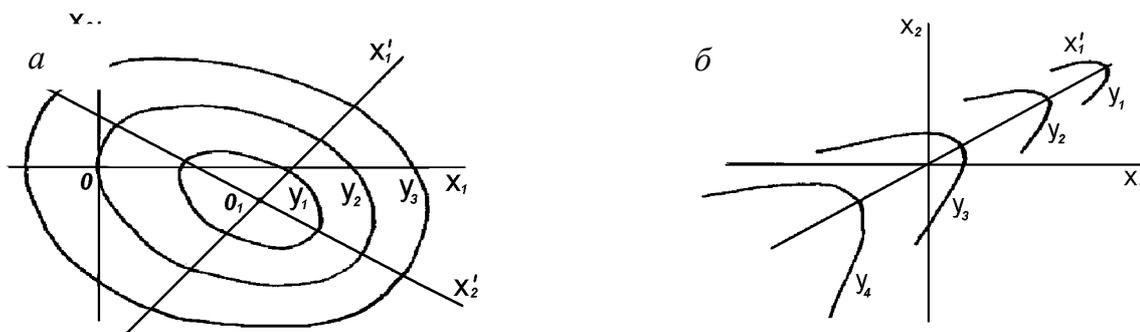


Рис. 4.5. Поверхности отклика функций:  
а – эллиптическая; б – типа нарастающего возвышения

**Пример.** Начальные условия эксперимента и матрица ЦКОП приведены в табл. 4.7. В результате обработки экспериментальных данных на ПЭВМ получили уравнение регрессии следующего вида:

$$y = 12,57 + 0,8x_1 + 0,53x_2 + 0,09x_3 - 0,33x_1x_2 + 0,55x_1x_3 + 0,06x_2x_3 + 1,07x_1x_2x_3 - 1,79x_1^2 - 1,13x_2^2 - 1,86x_3^2.$$

Для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы  $f_1 = N(m-1) = 15(4-1) = 45$  критерий Стьюдента  $t = 2,0$ . С учетом проверки значимости коэффициентов полинома по критерию Стьюдента уравнение приобретает вид

$$y = 12,57 + 0,53x_2 - 0,33x_1x_2 + 0,55x_1x_3 + 1,07x_1x_2x_3 - 1,79x_1^2 - 1,13x_2^2 - 1,86x_3^2.$$

Проверка полученной модели на адекватность с помощью  $F$ -критерия Фишера для уровня значимости 0,05 и числа степеней свободы  $f_1 = N - \alpha = 15 - 8 = 7$ ,  $f_2 = N(m-1) = 15(4-1) = 45$  показала, что  $F_p = \frac{S_{ад}^2(\bar{y})}{S^2(y)} = 1,16 < 2,63 = F_{табл}$ .

Таким образом, полученная модель адекватно описывает экспериментальные данные.

Для построения поверхности отклика составляем определитель:

$$\begin{vmatrix} -1,79 - \lambda & -0,165 & 0,275 \\ -0,165 & -1,13 - \lambda & 0 \\ 0,275 & 0 & -1,86 - \lambda \end{vmatrix} = 0.$$

Решая определитель, получаем кубическое уравнение:  $\lambda^3 + 4,78\lambda^2 + 4,75\lambda + 3,627 = 0$ .

Используя стандартную программу расчета на ПЭВМ, находим корни уравнения:  $\lambda_1 = -1,089$ ,  $\lambda_2 = -1,517$ ,  $\lambda_3 = -2,120$ . Уравнение поверхности отклика в каноническом виде имеет вид

$$-\left(\frac{x_1}{0,293}\right)^2 + \left(\frac{x_2}{0,354}\right)^2 + \left(\frac{x_3}{0,411}\right)^2 = 1.$$

Графическая поверхность отклика имеет форму эллипсоида, полуоси которого:  $a = 0,293$ ,  $b = 0,354$ ,  $c = 0,411$ .

Табл. 4.7. Матрица центрального композиционного ортогонального плана

Значения факторов				$x_1$	$x_2$	$x_3$				
Основной уровень $x_i$				0,13	0,125	5				
Интервал варьирования $\Delta x_i$				0,01	0,025	2				
Верхний уровень (+1)				0,14	0,150	7				
Нижний уровень (-1)				0,12	0,100	3				
Номер опыта	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1^2$	$x_2^2$	$x_3^2$	$\bar{y}$	$S^2(y)$	
1	+	+	+	+	+	+	+	13,74	0,62	
2	+	+	-	+	+	+	+	12,83	0,08	
3	+	-	+	+	+	+	+	12,75	0,57	
4	+	-	-	+	+	+	+	11,30	0,37	
5	+	+	+	-	+	+	+	12,00	0,39	
6	+	+	-	-	+	+	+	12,04	0,71	
7	+	-	+	-	+	+	+	13,94	0,77	
8	+	-	-	-	+	+	+	12,00	0,46	

9	+	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0	0	12,22	0,07
10	+	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0	0	12,00	0,21
11	+	0	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0	13,83	0,74
12	+	0	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$	0	12,45	0,004
13	+	0	0	$+\alpha$	0	0	$\alpha^2$	12,30	0,03
14	+	0	0	$-\alpha$	0	0	$\alpha^2$	11,72	0,58
15	+	0	0	0	0	0	0	12,10	0,13

Анализ модели второго порядка показывает, что линейные члены (кроме  $x_2$ ) практически незначимы, увеличились коэффициенты двойного и даже тройного взаимодействия факторов ( $x_1, x_2, x_3$ ), коэффициенты при квадратичных членах уравнения значимы. Это свидетельствует о достижении области оптимума исследуемой функции. Анализ поверхности отклика может определить диапазон оптимальных значений технологических параметров УЗ-микросварки (рис.4.6).

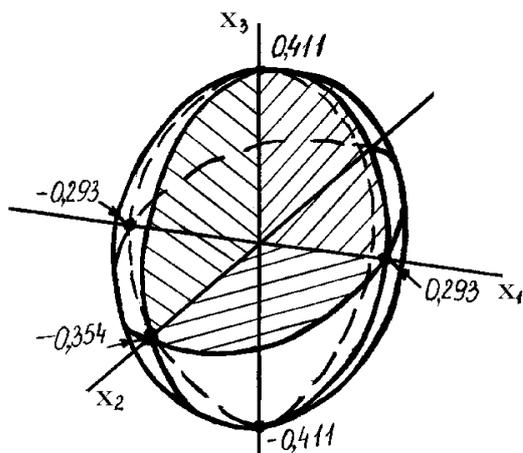


Рис. 4.6. Поверхность отклика функции

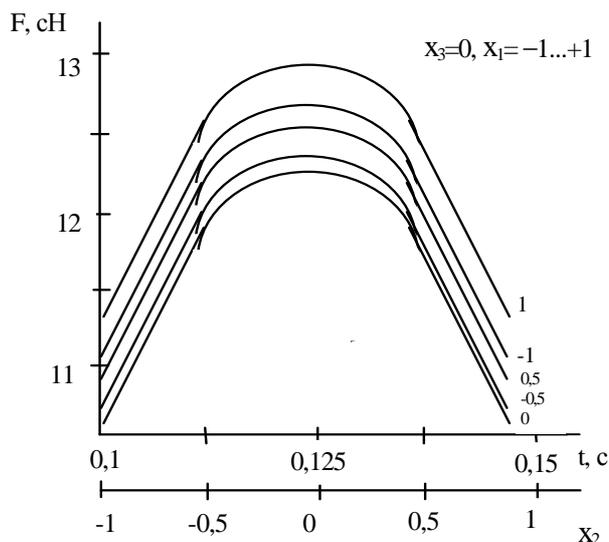


Рис.4.7. Зависимости прочности микросварных соединений от времени сварки

Для нахождения оптимальных значений технологических параметров УЗ-микросварки решили систему уравнений второго порядка. Для этого установили значение  $x_3 = 0$  и приравняли нулю производные оставшегося уравнения  $Y = 12,4 + 0,165x_1 + 0,53x_2 - 1,79x_1^2 - 1,13x_2^2$ :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial Y}{\partial x_1} &= 0,165 - 3,58x_1 = 0, \\ \frac{\partial Y}{\partial x_2} &= 0,53 - 2,26x_2 = 0. \end{aligned} \right\}$$

Решив систему уравнений относительно  $x_1$  и  $x_2$ , получили  $x_1 = 0,046$ ,  $x_2 = 0,234$ , а оптимум функции соответствует 12,6 сН. В целях выяснения однофакторных зависимостей в исследуемой области факторного пространства сделаны сечения соответствующих поверхностей отклика (рис. 4.7). Максимальные значения прочности получены при  $x_1 = 1$  и  $x_2 = -0,5; +0,5$ .

#### 4.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

Система массового обслуживания (СМО) — математическая модель, разработанная для описания сложных систем обслуживания, включая производственные процессы, связь, транспорт и т. д. Примером технологической СМО является сборочный конвейер, который имеет определенное число рабочих мест и средств обслуживания, называемых каналами.

В СМО каждая заявка или требование помимо момента поступления, характеризуется рядом непрерывных  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$  и дискретных  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$  параметров. Такую заявку можно рассматривать как случайный вектор. Последовательность заявок есть поток случайных векторов, основные характеристики которого следующие:

- *ординарность*, означающая, что в каждый момент времени в систему поступает не более одной заявки;
- *стационарность* — вероятность поступления в систему за интервал времени определенного количества заявок зависит от длительности интервалов;
- *отсутствие последствия* — количество заявок, поступивших в систему за данный интервал, не зависит от числа заявок, поступивших ранее.

Заявки в простейшем потоке распределены в соответствии с законом распределения вероятностей Пуассона. Вероятность поступления в систему заявок за интервал  $t$

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{-\lambda t},$$

где  $k$  — количество требований,  $k = 0, 1, 2, \dots$

Общим способом математического описания потока заявок является задание моментов их поступления  $t_1, t_2, \dots, t_i$ . Распределение интервалов времени между двумя смежными заявками описывается экспоненциальным законом:

$$P(\tau > \theta) = e^{-\lambda \theta},$$

где  $P(\tau > \theta)$  — вероятность того, что интервал времени  $\tau$  между двумя любыми последовательно поступившими заявками будет больше времени  $\theta$ .

Считают, что каждый из каналов может находиться в одном из двух возможных состояний: "занят" (если он обслуживает заявки) и "свободен". При этом в системе возникают ситуации, когда либо образуется очередь заявок в ожидании обслуживания, либо происходит простой каналов обслуживания. Основной целью моделирования является уменьшение потерь из-за простоя в очереди.

Пусть в СМО поступает в среднем  $k$  заявок в единицу времени. Продолжительность обслуживания — это случайная величина с показательным законом распределения:

$$P(\xi > \theta) = e^{-\mu \theta},$$

где  $P(\xi > \theta)$  — вероятность того, что время обслуживания больше заданной величины  $\theta$ ;  $\mu$  — среднее число обслуживаний в единицу времени.

Тогда  $\xi$  — среднее число заявок, обслуживаемых каналом в единицу времени:  $\xi = k/t$ ,  $n$  — количество каналов,  $\lambda$  — интенсивность потока заявок. Приняты следующие допущения: приоритета в обслуживании нет, взаимопомощь каналов отсутствует, группового поступления заявок нет.

Средняя плотность потока заявок  $\lambda_1 = \lambda/n$ , приведенная плотность потока заявок за среднее время обслуживания  $\alpha = \lambda_1/\xi$ .

Операционные характеристики  $n$ -канальной системы с неограниченным ожиданием:

коэффициент загрузки канала  $K_3 = \alpha/n$ ;

среднее число заявок, простаивающих в очереди,

$$m_{оч} = \frac{\alpha^{n+1}}{n!(1-\alpha/2)^2} P_0,$$

где  $P_0$  — вероятность поступления в систему требований:

$$P_0 = \frac{1}{\sum_{k=0}^n \frac{\alpha_n^k}{k!} + \frac{\alpha_n^k}{k!} \frac{\alpha_n}{n-\alpha_n}};$$

среднее число заявок в системе  $m = m_{оч} + \alpha$ ;

среднее время ожидания заявки в системе  $t = m_{оч} / \lambda_1$ .

**Пример.** Необходимо рассчитать операционные характеристики СМО на примере сборочного конвейера, обслуживаемого в первом случае рабочими с тележками, во втором — транспортным роботом (рис. 4.8), при следующих условиях: количество рабочих мест на конвейере  $k = 40$ ; интенсивность потока заявок  $\lambda = 200$  ед/ч; 1-й вариант — пять одноканальных систем, 2-й вариант — одна пятиканальная система; число заявок, обслуживаемых каналом в единицу времени,  $\xi_1 = 10$  и  $\xi_2 = 20$  соответственно.

Сравнительный анализ параметров СМО (табл. 4.8) показывает, что характеристики пятиканальной системы обслуживания лучше, чем одноканальной, так как время ожидания заявки уменьшается в два раза.

Табл. 4.8. Характеристики СМО

Параметры	Вариант	
	первый	второй
Средняя плотность потока заявок $\lambda_i$	40	40
Приведенная плотность потока заявок на среднее время обслуживания $\alpha$	4	2
Коэффициент загрузки канала $K_3$	0,9	0,4
Коэффициент простоя $K_n = 1 - K_3$	0,1	0,6
Среднее число простаивающих в очереди заявок $m_{оч}$	0,4	0,2
Среднее время ожидания заявки в системе $t$	0,01	0,005

Эффективность использования автоматизированных установок пайки и лужения волной припоя связана с необходимостью количественной оценки проявления характерных дефектов пайки, например непропаев. Оценку вероятности непропаев можно получить, рассматривая процесс пайки на установке как многоканальную СМО с отказами (рис. 4.9). Для этого необходимы следующие предположения:

- $\tau_n$  — время заполнения припоем зазоров (необходимое время пайки) как время обслуживания заявки;
- $\tau_\phi$  — фактическое время пайки;
- канал обслуживания — часть волны припоя, которая проходит место соединения за время, соответствующее среднему времени пайки  $\tau_{ср}$ ;
- число каналов обслуживания  $n \leq \tau_\phi / \tau_n$ ;
- среднее время пребывания в канале обслуживания  $\tau_\phi = \tau_n / n!$ .

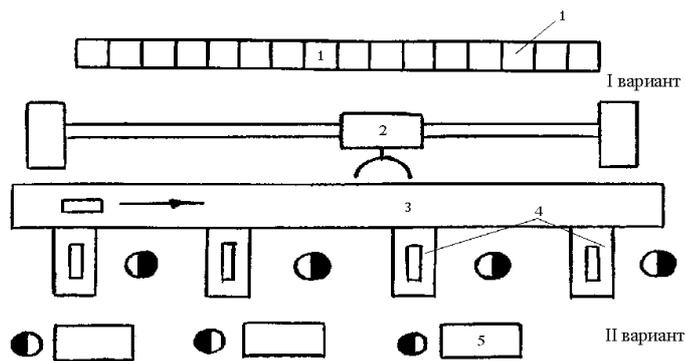


Рис. 4.8. Схема вариантов обслуживания сборочного конвейера:  
 1 — автоматизированный склад; 2 — транспортный робот;  
 3 — конвейер; 4 — рабочие места; 5 — транспортная тележка

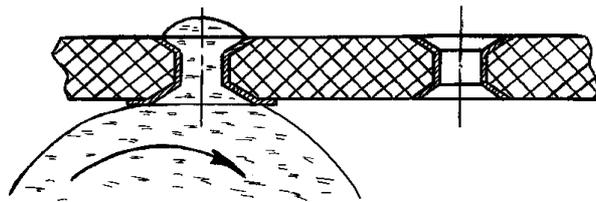


Рис 4.9. СМО для волновой пайки

Если для конкретного места соединения  $\tau_{\phi} < \tau_{\pi}$ , то зазор не заполняется припоем и это считается отказом в системе обслуживания. Вероятность непропаев  $P_{\pi}$  — это вероятность отказов в СМО:

$$P_{\text{он}} = \left( \frac{\tau_{\phi}}{\tau_{\pi}} \frac{n!}{(n-1)!} + \frac{\tau_{\phi}^2}{\tau_{\pi}^2} \frac{n!}{(n-2)!} + \dots + \frac{\tau_{\phi}^n}{\tau_{\pi}^n} \frac{n!}{n!} \right)^{-1}.$$

**Пример.** При пайке печатных плат с металлизированными отверстиями волной припоя ПОС 61 температура пайки 235 °С, флюс ФКСН, среднее фактическое время пайки  $\tau_{\phi} = 3,5$  с,  $\tau_{\pi}$  включает время нагрева, время на гистерезис смачивания и время на подъем припоя и составляет 1 с.

**Решение.** Определяем число каналов:  $n = 3,5/1,0 = 3,5$ , принимаем  $n=3$ . Вычисляем среднее время пребывания соединения в канале обслуживания:  $\phi_{\text{р}} = 3,5/(1 \cdot 2 \cdot 3) \approx 0,6$  с. Получаем  $P_{\pi} = 0,043$ , или 4,3 %. Среднее фактическое число непропаев составляет около 5 %.

#### 4.5. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

При исследовании сложных систем, к которым относятся ТП, методом статистического моделирования на ЭВМ необходимо: составить содержательное описание процесса; построить формализованную схему процесса; составить моделирующий алгоритм; выбрать методики получения числовых результатов и использовать их для анализа и синтеза ТС.

Содержательное описание в словесном выражении концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементов исследуемого процесса, о степени и характере их взаимодействия, о месте и значении каждого элемента в общем процессе функционирования рассматриваемой реальной системы. Содержательное описание может быть составлено в результате обстоятельного изучения процесса при проведении натурного эксперимента на реально существующей аппаратуре, оборудовании и фиксации количественных характеристик их работы. В тех случаях, когда соответствующие аппаратура и оборудование реально не существуют, а имеются только в виде проектов, для составления содержательного описания процесса используют накопленный опыт и результаты наблюдения за процессами функционирования аналогичных систем с учетом особенностей исследуемой системы.

Помимо сведений, непосредственно характеризующих процесс, в содержательное описание включаются дополнительные материалы: 1) постановка задачи в виде четкого изложения идеи предполагаемого исследования, перечня зависимостей, подлежащих оценке по результатам моделирования; 2) числовые значения известных характеристик и параметров процесса в виде таблиц и графиков; 3) начальные условия.

Формализованная схема сложных процессов, когда трудно осуществить переход от содержательного описания к математической модели, разрабатывается совместно технологами и математиками. Для построения формализованной схемы необходимо выбрать показатели процесса, установить систему параметров, характеризующих процесс, строго определить все зависимости между показателями и параметрами процесса с учетом тех факторов, которые принимаются во внимание при формализации. На этом этапе дается точная математическая

формулировка задачи исследования. К формализованной схеме прилагается систематизированная и уточненная совокупность всех исходных данных, известных параметров и начальных условий.

Формализация широкого круга производственных процессов сопровождается учетом следующих основных групп факторов: случайных возмущений, случаев появления брака, режима занятости элементов производственного оборудования, надежности оборудования, а также различных состояний, требующих прекращения работы (наладка станков, замена инструмента и т. д.), которые относятся к случайным объектам.

Современным производственным процессам свойственна частичная или полная синхронизация, которая может нарушаться под действием дестабилизирующих факторов. Вследствие этого образуются очереди изделий или происходит простой станков. Они не остаются неизменными, а интенсивно флуктуируют, создавая динамичный режим занятости элементов производственного оборудования. Для математического описания режима занятости оборудования применяются методы теории массового обслуживания. События, связанные с ненадежностью оборудования, рассматриваются как случайные события. Аналогичные математические схемы применяются для случаев выхода производственного оборудования из рабочего состояния (износ инструмента, разладка станков и т. д.).

Для преобразования формализованной схемы в математическую модель необходимо, воспользовавшись математическими схемами, записать в аналитической форме все соотношения, которые еще не были записаны, выразить логические условия в виде системы неравенств, а также придать аналитическую форму всем другим сведениям, содержащимся в формализованной схеме. При моделировании ТП на ЭВМ числовой материал используется не в первоначальном виде, а в форме аппроксимирующих выражений, удобных для вычислений. Например, вместо таблиц частот для значений случайных величин используются аналитические выражения функций плотности распределения типичных законов (нормального, равномерностного, показательного и т. д.), которые с достаточной точностью представляют упомянутые частоты. Многие таблицы и графики заменяются интерполяционными полиномами и т. д. Замены такого рода не влияют существенно на точность математического описания процесса, но позволяют сделать математическую модель удобной для дальнейшего использования.

Для моделирования на ЭВМ любого процесса, заданного с помощью математической модели, необходимо построить моделирующий алгоритм. Желательно записывать его в таком виде, который бы наглядно отражал особенности структуры процесса. Поэтому моделирующий алгоритм представляется в виде операторной схемы, содержащей последовательность операторов, каждый из которых изображает достаточно большую группу элементарных операций. Операторная форма представления алгоритма не учитывает особенностей системы команд ЭВМ, которые будут учтены при построении развернутых схем счета для воспроизведения отдельных операторов при программировании задачи.

Вся совокупность операторов, составляющих моделирующий алгоритм, делится на три группы: основные, вспомогательные, служебные. К *основным* относятся операторы, используемые для имитации отдельных элементов исследуемого процесса и взаимодействия, т. е. описывают процессы функционирования реальных элементов системы с учетом воздействий внешней среды. В отличие от них *вспомогательные операторы* не имитируют элементарные акты процесса, а производят вычисления тех параметров и показателей, которые необходимы для работы основных операторов. *Служебные операторы* обеспечивают взаимодействие основных и вспомогательных операторов при моделировании процесса в автоматическом режиме и синхронизацию работы алгоритма, производя фиксацию величин, являющихся результатами моделирования, а также их обработку.

Для изображения операторных схем алгоритмов удобно пользоваться операторами двух принципиально различных классов — арифметическими и логическими. *Арифметические операторы* обозначаются  $A_{31}$ , т. е.

оператор № 31. Передача управления данному оператору обозначается номером того оператора, от которого передается управление, записываемым сверху слева от символа данного оператора. Запись  $^{10,16}A_{18}$  означает, что оператор  $A_{18}$  получает управление от операторов № 10 и № 16. Принципиальным свойством любого арифметического оператора является то, что после выполнения соответствующих операций независимо от результатов расчета производится переход к какому-нибудь одному определенному оператору.

*Логические операторы* предназначены для проверки справедливости заданных условий и выработки признаков, обозначающих результат проверки. Управление в логическом операторе передается одному из двух операторов алгоритма, в зависимости от значения признака, вырабатываемого логическим оператором. Он обозначается  $P_{22}^{\uparrow 35}$ , что означает, что логический оператор № 22 передает управление оператору № 35, если условие, проверяемое  $P_{22}$ , выполнено, или же оператору № 12, если оно не выполнено.

При моделировании сложных систем используются нижеследующие типы операторов.

1. Вычислительные операторы, которые являются арифметическими операторами и обозначаются  $A_i$ .
2. Операторы формирования реализаций случайных процессов  $\Phi_i$  для имитации действия различных случайных факторов, сопровождающих исследуемый процесс. Исходным материалом для формирования в ЭВМ реализаций, несущих в себе элемент случайности, обычно служат случайные числа. Их можно получать различными способами: введением специальных таблиц случайных чисел и выбором из них отдельных чисел по мере надобности; выработкой случайных чисел в самой машине по особым программам. Операторы  $\Phi_i$  решают задачу преобразования случайных чисел стандартного вида в реализации случайных процессов с заданными свойствами.

3. Операторы формирования неслучайных величин  $F_i$ , которые полностью повторяют либо в каком-то смысле имитируют работу вычислительных и управляющих средств реального оборудования.

4. Счетчики, обозначаемые  $K_i$  и подсчитывающие количество различных объектов, обладающих заданными свойствами, например количество деталей, прошедших обработку, количество свободных или занятых станков, количество доброкачественных или бракованных изделий и др. Результаты, выдаваемые счетчиком, являются исходными данными для логических служебных операторов, обеспечивающих синхронизацию моделирующего алгоритма.

Для разнообразных ТП трудно представить единый набор конкретных правил и готовых математических схем для формализации. Поэтому удобно расчленить процесс на элементарные акты, которые имеют достаточно простые математические схемы, и построить математическое описание их взаимодействия для создания единого процесса. Такими элементарными актами являются операции. Но в статистическом моделировании используют не реальные операции, а абстрактные, как преобразователи, определяющие изменение значений параметров изделий. Типичными абстрактными операциями являются операции обработки, сборки и управления.

Под *абстрактной операцией обработки* понимают такой элементарный акт производственного процесса, в результате которого меняется значение хотя бы одного из параметров полуфабриката. К таким операциям относят обработку резанием, штамповку, т. е. операции, связанные с изменением размеров и положения в пространстве (повороты, транспортирование), сообщение дополнительного признака (окрашен, проверен) и т. д. Независимо от реальной структуры и назначения любой комплекс производственного оборудования будем для краткости называть станком. Для построения математического описания операции обработки необходимо установить соотношения параметров, характеризующих взаимодействие станка и полуфабриката в процессе обработки.

Пусть момент начала операции обозначается  $t^h$ , а ее длительность —  $\tau^{оп}$ . В рассматриваемой задаче нам известны значения всех параметров  $\alpha_{ik}$  полуфабриката как непрерывных, так и дискретных для моментов времени

$t \leq t^H$ , т. е. до операции. Требуется определить значение  $\alpha_{Пк}$  параметров полуфабриката для моментов времени  $t \geq t^K$ , где величина

$$t^K = t^H + \Phi^{оп}$$

является моментом окончания операции обработки. Поэтому первой частью математического описания операции обработки должно быть соотношение

$$\bar{\alpha}_{Пк} = f(\bar{\alpha}_{11}, \bar{\alpha}_{12}, \dots, \bar{\alpha}_{1m}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m)$$

для всех  $k = \overline{1, n}$ , где  $\beta_m$  — некоторые параметры, характеризующие станок.

В ряде случаев приходится считаться с тем обстоятельством, что  $\alpha_{Пк}$  представляют собой случайные величины. Случайными могут оказаться параметры станка  $\beta_m$ , да и сама функция  $\alpha_{Пк}$  флуктуирует случайно при выполнении операции. Поэтому пользуются соотношением

$$\bar{\alpha}_{Пк} = \alpha_{Пк}^0 \pm \delta_{\alpha_{Пк}},$$

где  $\delta_{\alpha_{Пк}}$  — случайные отклонения величины  $\alpha_{Пк}$  от некоторого неслучайного значения  $\alpha_{Пк}^0$ , заданные соответствующими законами распределения.

Однако последнее не исчерпывает математического описания операции обработки. К нему необходимо добавить зависимости, определяющие режим функционирования станка во времени. Помимо  $t^H$  и  $t^K$  введем следующие величины:  $t_j^H$  — момент поступления  $j$ -го экземпляра полуфабриката к станку;  $\tau^r$  — время, затрачиваемое на подготовку станка к выполнению следующей операции, а также момент готовности станка к выполнению операции:

$$t^r = t^K + \tau^r.$$

Существует класс процессов, не имеющих централизованного управления производственных циклов во времени. В этом случае операция может начаться в любой момент, если только выполнены необходимые для этого условия: станок готов к работе и к нему поступил очередной полуфабрикат. Если дополнительные простои исключить, то условие начала операции будет иметь вид

$$t_j^H = \begin{cases} t_j^H, & \text{если } t_{j-1}^K + \Phi_{j-1}^r \leq t_j^H, \\ t_{j-1}^K + \Phi_{j-1}^r, & \text{если } t_{j-1}^K + \tau_{j-1}^r \geq t_j^H. \end{cases}$$

Любые дополнительные простои могут быть обобщены и включены в  $\tau^r$ .

При обработке деталей на автоматических линиях режим работы станков жестко синхронизирован и операция обработки может начаться только в моменты времени, кратные  $\tau^r$  — длительности такта. Операция также может начаться, если станок готов к работе и уже поступил очередной полуфабрикат, т. е.

$$\left. \begin{aligned} t^K + \tau^r &\geq t^H, \\ t_0 + k\tau^r &< t^K + \tau^r \leq t_0 + (k+1)\tau^r. \end{aligned} \right\}$$

Исходя из этого можно записать:

$$t^H = t_0 + (k^* + 1)\tau^r,$$

где  $t_0$  — начало отсчета времени;  $k^* = \overline{0, n}$ .

Под *абстрактной операцией сборки* понимают такой элементарный акт производственного процесса над совокупностью полуфабрикатов (один ведущий и несколько ведомых), в результате которого изменяется значе-

ние хотя бы одного из параметров ведущего полуфабриката (за счет присоединения к нему ведомых), а соответствующие ведомые полуфабрикаты прекращают свое существование.

Пусть в сборке участвуют ведущий полуфабрикат и  $n$  деталей. Параметры их до момента сборки  $t \leq t^H$  обозначим для ведущего полуфабриката  $\alpha_j$ , а для ведомых  $\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ik}$ . В результате операции сборки получим новую единицу с новыми значениями параметров  $\Pi_j$ . Тогда зависимость параметров изделия после сборки можно представить в виде

$$\Pi_j = f(\alpha_j, \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{ik}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m).$$

Рассмотрим также некоторые параметры, характеризующие операцию сборки.

1. Момент начала операции  $t^H$  связан с моментом  $t_j^H$  поступления на сборку ведущего полуфабриката и моментами  $t_{i1}^H, t_{i2}^H, \dots, t_{in}^H$  поступления ведомых деталей уравнением

$$t_j^H = \max\{t_j^H, t_{i1}^H, t_{i2}^H, \dots, t_{in}^H, t_{j-1}^k + \Phi_{j-1}^r\}.$$

Если сборка начинается по мере поступления деталей или по мере готовности оборудования, то этот случай сводится к предыдущему. При этом достаточно процесс расчленить на несколько последовательно выполняемых операций.

Если операция сборки синхронизирована с тактом выпуска продукции, то

$$t_j^H = t_0 + (k^* + 1)\tau^T,$$

где  $t_0$  — начало отсчета;  $\tau^T$  — длительность ритма сборки.

2. Длительность операции сборки  $\tau^{оп}$  можно представить в виде суммы длительностей последовательных этапов: установки детали на ведущем полуфабрикате  $\tau^y$ , крепления (пайки) деталей  $\tau^{кп}$  и регулировки сборочной единицы  $\tau^{рег}$ :

$$\tau^{оп} = \tau^y + \tau^{кп} + \tau^{рег}.$$

3. Время  $\tau^r$ , затрачиваемое на подготовку сборочного агрегата к следующей операции, является случайной величиной с экспоненциальным законом распределения:

$$f(\tau^r) = \lambda_r e^{-\lambda_r \tau^r},$$

где  $\lambda_r = 1/T^r$  — среднее количество подготовок за единицу времени,  $ч^{-1}$ .

4. Длительность ритма сборки  $\tau^T$  — детерминированная неслучайная величина.

5. Момент времени готовности агрегата к выполнению следующей операции

$$t_j^r = t_{j-1}^k + \tau_{j-1}^r.$$

6. Плотность распределения вероятности времени выхода из строя оборудования описывается функцией

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t},$$

где  $\lambda$  — среднее число отказов за единицу времени;  $t$  — время.

Можно также пользоваться средним временем безотказной работы  $T_{ср}$ . Для экспоненциального распределения  $T_{ср} = 1/\lambda$ .

7. Вероятность брака из-за износа оборудования

$$P^{бп} = P_0^{бп} + v(t - t^{нп})^s,$$

где  $P_0^{бп}$  — вероятность брака после наладки;  $v, s$  — константы;  $t^{нп}$  — момент последней наладки.

В результате *операций управления* выбирается информация, необходимая для согласования работы отдельных элементов производственного комплекса. Примерами операций управления является регулирование скорости производственного процесса, усилий, температуры, распределения полуфабрикатов между параллельно работающими станками, выработка признаков или возобновление подачи полуфабрикатов к станкам в зависимости от длины очереди, некоторые мероприятия, связанные с контролем производственного процесса и качества продукции. Эту информацию удобно представить в виде поправок  $\Delta\beta_m$  к параметрам производственного оборудования. В общем случае соотношение для  $\Delta\beta_m$  можно записать в виде

$$\Delta\beta_{mi} = f(\alpha_{1i}, \beta_{m,i-1}, \alpha_{\Pi i}),$$

где  $\alpha_{1i}$ ,  $\alpha_{\Pi i}$  — параметры полуфабриката, связанные с  $i$ -м эталоном производственного процесса соответственно до начала акта и после его окончания.

Построение моделирующего алгоритма операции сборки начинается с описания формализованной схемы. Пусть операцией сборки предусматривается присоединение к ведущему полуфабрикату  $n$  деталей. Если в необходимый момент времени соответствующая деталь имеется, то операция сборки продолжается. Если деталь отсутствует, то операция сборки срывается. Деталь, взятая для присоединения к сборочной единице, подвергается проверке за время  $\tau^{\text{пр}}$ . Она может оказаться бракованной с вероятностью  $P^{\text{бр}}$  и в этом случае заменяется другой деталью, если такая имеется. Операция сборки может продолжаться лишь ограниченное время. Если операция в норму времени не укладывается, то происходит срыв операции сборки. После окончания операции сборки и получения готового изделия или срыва операции сборки происходит переход к сборке последующего изделия. Процесс продолжается до тех пор, пока  $t_j^{\text{н}} < T$ , где  $t_j^{\text{н}}$  — момент поступления на сборку очередного ведущего полуфабриката;  $T$  — период функционирования процесса.

Для моделирования данную операцию сборки (которую в дальнейшем будем называть *составной операцией сборки*) разобьем на совокупность операций с номерами  $1, 2, \dots, n$ . Каждая  $i$ -я операция, полученная при разбиении, заключается в присоединении к сборочной единице лишь одной детали. Длительность  $i$ -й операции для  $j$ -го узла обозначим  $\tau_{ij}^{\text{об}}$ , а момент ее окончания —  $t_{ij}^{\text{к}}$ . Если к моменту  $t_{ij}^{\text{к}}$  данная операция не закончена, то происходит срыв процесса и  $j$ -я сборочная единица исключается из рассмотрения.

Операторная схема моделирующего алгоритма для составной операции сборки имеет вид

$${}^8 \Phi_1 P_{2 \downarrow 21} {}^{2,18,20} P_{3 \downarrow 9} \Phi_4 K_5 K_6 F_7 F_8 {}^3 F_9 {}^{9,14} P_{10}^{\uparrow 12} {}^{10,17} K_{11}^{19} {}^{10} K_{12} \Phi_{13} P_{14}^{\uparrow 10} \Phi_{15} A_{16} P_{17 \downarrow 11} K_{18}^3 {}^{11} F_{19} K_{20}^3 {}^2 A_{21} Y_{22}$$

Суть работы моделирующего алгоритма (рис. 4.10) состоит в следующем. Оператор  $\Phi_1$  формирует момент поступления на сборку ведущего полуфабриката  $t_j^{\text{н}}$ . Величина  $t_j^{\text{н}}$  сравнивается с моментом окончания сборочных процессов  $T$  (оператор  $P_2$ ). Если  $t_j^{\text{н}} < T$ , то моделирование продолжается. В противном случае считается, что время работы истекло, и управление передается оператору  $A_{21}$  для обработки полученных результатов моделирования. Оператор  $P_3$  проверяет выполнение условия  $i > n$ . Пусть  $i > n$ . Это значит, что сборка данного изделия закончена. Тогда осуществляется переход к новой сборочной единице (оператор  $F_8$ ) с последующим формированием выходного параметра  $\Pi_j$  (оператор  $\Phi_4$ ), подсчетом количества готовых изделий (оператор  $K_5$ ), определением номера следующего ведущего полуфабриката, т. е. новой сборочной единицы (оператор  $K_6$ ) и формированием начала сборки  $i = 1$  (оператор  $F_7$ ).

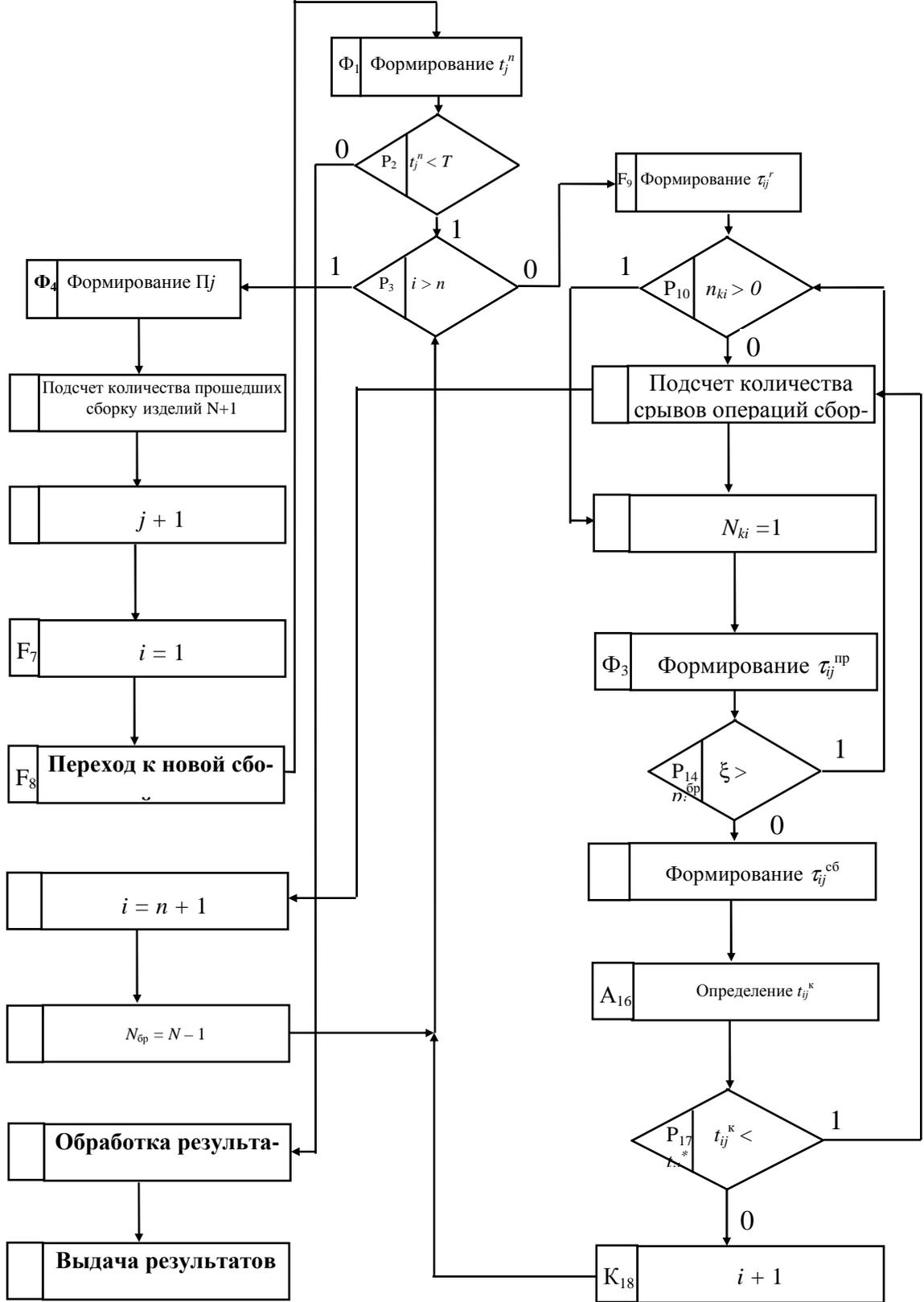


Рис. 4.10. Моделирующий алгоритм операции сборки

Если же условие, проверяемое оператором  $P_3$ , оказывается невыполнимым, то сборка изделия не закончилась, и переходим к оператору  $\Phi_9$  для формирования  $\tau_{ij}^r$  — времени подготовки оборудования к очередной сборочной операции. Оператор  $P_{10}$  проверяет, имеется ли  $k$ -я деталь, необходимая для  $i$ -й операции сборки ( $n_{ki} > 0$ ). Если детали нет (не поступила с участка обработки), то происходит срыв сборки (как  $i$ -й сборочной операции, так и  $j$ -го изделия в целом) и управление передается оператору  $K_{11}$  для подсчета количества срывов, а затем оператору  $F_{19}$ .

Оператор  $F_{19}$  формирует значение  $i = n + 1$  (т. е. имитирует конец сборки), оператор  $K_{20}$  вычитает единицу из количества готовых изделий для компенсации действия оператора  $K_5$ , и управление передается оператору  $P_3$ . Поскольку  $i > n$  то условно сборка закончена и работа алгоритма будет продолжаться по знакомой цепи  $P_3\Phi_4K_5K_6F_7F_8\Phi_1$ .

Теперь будем считать, что детали для сборки имеются, т.е.  $n_{ki} > 0$  (оператор  $P_{10}$ ). Оператор  $K_{12}$  вычитает единицу из  $n_{ki}$  (деталь взята для проверки), а оператор  $\Phi_{13}$  формирует длительность проверки  $\tau_{ij}^{np}$ . Затем по жребию (оператор  $P_{14}$ ) определяется качество детали. Если деталь бракованная, то возвращаемся к оператору  $P_{10}$ , с помощью которого выбирается новая деталь. Если деталь годная, то сборка продолжается: оператор  $\Phi_{15}$  формирует длительность сборки  $\tau_{ij}^{cb}$ , а оператор  $A_{16}$  определяет момент ее окончания  $t_{ij}^k$ . Если  $t_{ij}^k < t_{ij}^*$  (оператор  $P_{17}$ ), то осуществляется переход к оператору  $K_{18}$ , который определяет номер следующей операции ( $i+1$ ), а затем к  $P_3$ . Если это условие не выполнено, то происходит срыв сборки (оператор  $K_{11}$ ).

Часто приходится сравнивать  $t_{ij}^*$  не с  $t_{ij}^k$ , свойственным  $i$ -й операции, а с  $t_j^k$  — моментом окончания составной операции сборки. В этом случае в качестве  $t_j^k$  можно взять наибольшее  $t_{ij}^k$  и несколько изменить алгоритм. Вместо оператора  $P_{17}$  необходимо поставить оператор, обеспечивающий запоминание  $t_j^k$ , и оператор сравнения  $\max\{t_{ij}^k\}$  с  $t_{ij}^*$ , а после оператора  $P_3$  ввести оператор, выбирающий  $\max\{t_{ij}^k\}$ .

Моделирование ТП сборки электронного модуля на печатной плате проводится в описанной ниже последовательности.

1. На основании ОСТ 4 ГО.054.264-267 операция сборки расчленяется на  $n$  операций с одинаковой по возможности длительностью. При расчете длительности учитываются все переходы, связанные с операцией (формовка выводов, установка ЭРЭ, пайка и т. д.).

2. Расчетные значения принимаются за математическое ожидание длительности операции сборки  $M(\tau_{ij}^{cb})$ . Ориентировочно оценивается масса изделия  $\Pi_j$ , и полученное значение принимается за математическое ожидание массы изделия  $M(\Pi_j)$ . Такие же действия совершаются по отношению к остальным свойствам изделия.

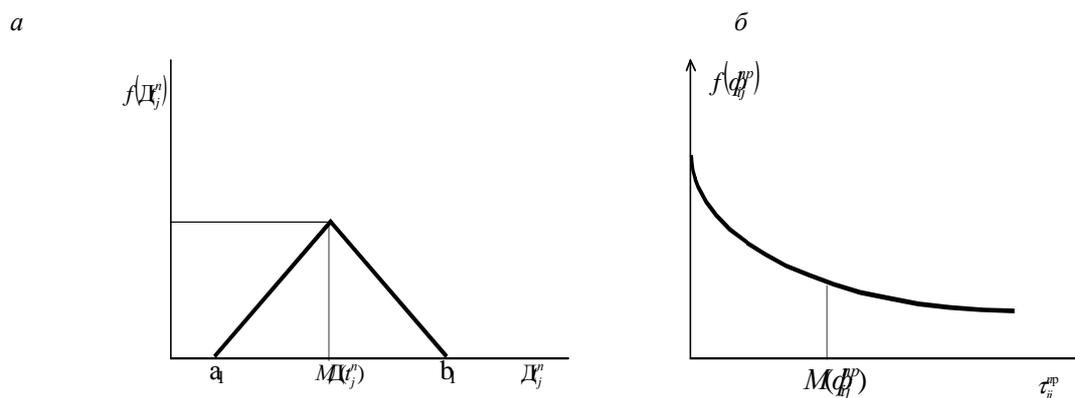


Рис. 4.11. Законы распределения случайных величин: а – треугольный; б – экспоненциальный

3. Экспериментально устанавливаются законы распределения случайных величин:

- плотность распределения интервалов между моментами поступления ведущего полуфабриката  $\Delta t_j^n$  подчиняется треугольному закону (рис. 4.11, а):

$$f(\Delta t_j^n) = \begin{cases} K(\Delta t_j^n - a_1), & \text{если } a_1 \leq \Delta t_j^n \leq \frac{b_1 + a_1}{2}, \\ -K(\Delta t_j^n - b_1), & \text{если } \frac{b_1 + a_1}{2} \leq \Delta t_j^n \leq b_1, \\ 0, & \text{если } \Delta t_j^n < a_1 \text{ или } \Delta t_j^n > b_1, \end{cases}$$

где  $K = \frac{4}{(b_1 - a_1)^2}$ ; математическое ожидание и дисперсия определяются по следующим формулам:

$$M(\Delta t_j^n) = \frac{a_1 + b_1}{2}, \quad \sigma^2 = \frac{1}{24}(b_1 - a_1)^2;$$

- плотность распределения длительности проверки качества детали  $\tau_{ij}^{np}$  подчиняется экспоненциальному закону (рис. 4.11, б):

$$f(\tau_{ij}^{np}) = \lambda_{np} e^{-\lambda_{np} \tau_{ij}^{np}},$$

где  $\lambda_{np}$  — среднее число проверок качества детали за единицу времени:  $\lambda_{np} = 1/M(\tau_{ij}^{np})$ ;  $M(\tau_{ij}^{np})$  — математическое ожидание времени проверки;

- плотность распределения длительности операции сборки  $\tau_{ij}^{сб}$  подчиняется нормальному закону:

$$f(\tau_{ij}^{сб}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma} e^{-\frac{(\tau_{ij}^{сб} - \tau_0)^2}{2\sigma^2}},$$

где  $\tau_0$  — математическое ожидание длительности сборки  $i$ -й операции  $\tau_0 = M(\tau_{ij}^{сб})$ ;

- плотность распределения одного из параметров изделия — массы  $\Pi_j$  — подчиняется равномерностному закону распределения:

$$f(\Pi_j) = \begin{cases} \frac{1}{b_2 - a_2}, & \text{если } a_2 \leq \Pi_j \leq b_2, \\ 0, & \text{если } \Pi_j < a_2; \Pi_j > b_2; \end{cases}$$

математическое ожидание для этого закона  $M(\Pi_j) = (a_2 + b_2)/2$ .

4. Выбираются на основании опытных данных следующие величины:

- относительные допуски на интервалы поступления ведущего полуфабриката:

$$\frac{M(\Delta t_j^n) - a_1}{M(\Delta t_j^n)} = \frac{b_1 - M(\Delta t_j^n)}{M(\Delta t_j^n)} = 1; 2; \dots; 10 (\%),$$

где  $a_1, b_1$  — границы изменения параметра;

- продолжительность подготовки к операции:  $\tau_{ij}^r = 1; 2; 3; 4; 5$  (с); выбранное значение принимается за математическое ожидание;

- интенсивность проверки качества деталей:  $\lambda_{np} = 0, 2; \dots; 0, 5$  (с<sup>-1</sup>);

- относительное среднеквадратичное отклонение продолжительности сборки:

$$\sigma_{\tau_{ij}^{сб}} / M(\tau_{ij}^{сб}) = 2; 4; 6; 8; \dots; 20 (\%);$$

- относительные допуски массы изделия:

$$\frac{M(\Pi_j) - a_2}{M(\Pi_j)} = \frac{b_2 - M(\Pi_j)}{M(\Pi_j)} = 2; 4; 6; \dots; 20 (\%),$$

где  $a_2, b_2$  — границы изменения параметра;

- вероятности бракованных деталей  $P_{kij}^{бр}$  для транзисторов, диодов и интегральных схем — 0,5; 1,0; 2,5 %, а для резисторов и конденсаторов — 0,1; 0,2; 0,3 %.

5. Рассчитывается ритм сборки:

$$\tau^r = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n M(\tau_{ij}^{сб}) + \sum_{i=1}^n M(\tau_{ij}^r) + \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{n_{ki}} M(\tau_{kij}^{пп}) \right).$$

Данное значение ритма принимается за математическое ожидание продолжительности интервалов между поступлениями ведущего полуфабриката  $M(\Delta t_j^n)$ .

6. Рассчитываются:

- количество деталей каждого типа, необходимое для сборки за смену

$$n_{ki}^* = \frac{T}{M(\Delta t_j^n)};$$

- начало операции сборки сборочной единицы

$$t_{ij}^n = \begin{cases} t_{i-1,j}^k, & \text{если } t_{i,j-1}^k < t_{i-1,j}^k, \\ t_{i,j-1}^k, & \text{если } t_{i,j-1}^k \geq t_{i-1,j}^k; \end{cases}$$

- конец  $i$ -й операции сборки

$$t_{ij}^k = t_j^n + \left( \tau_{ij}^r + \sum_{k=1}^{n_{ki}} \tau_{kij}^{пп} + \tau_{ij}^{сб} \right);$$

- конец сборки сборочной единицы

$$t_j^k = t_j^n + \sum_{i=1}^n \left( \tau_{ij}^r + \sum_{k=1}^{n_{ki}} \tau_{kij}^{пп} + \tau_{ij}^{сб} \right);$$

- предельное значение момента сборки  $i$ -й операции

$$t_{ij}^* = t_j^n + 1,1 \left( M(\tau_{ij}^r) + \sum_{k=1}^{n_{ki}} M(\tau_{kij}^{пп}) + M(\tau_{ij}^{сб}) \right);$$

- предельное значение момента сборки  $j$ -й сборочной единицы

$$t_j^* = t_j^n + 1,1 \sum_{i=1}^n \left( M(\tau_{ij}^r) + \sum_{k=1}^{n_{ki}} M(\tau_{kij}^{пп}) + M(\tau_{ij}^{сб}) \right).$$

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Моделирование процессов с помощью регрессионного анализа.
2. Методика моделирования ТП с применением ПФЭ.
3. Методы оптимизации ТП.
4. Моделирование процессов ЦКОП.

## 5. ТЕХНОЛОГИЯ КОММУТАЦИОННЫХ ПЛАТ

### 5.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К ПЛАТАМ И ПЕЧАТНОМУ МОНТАЖУ

*Печатные платы* — это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников в виде участков металлизированного покрытия, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи. Они получили широкое распространение в производстве модулей, ячеек и блоков ЭА.

*Печатным монтажом* называется совокупность плоских проводников, нанесенных на изоляционное основание и обеспечивающих требуемое соединение элементов в электрической цепи. Применение печатного монтажа по сравнению с объемным позволяет:

- увеличить плотность монтажных соединений и обеспечить миниатюризацию изделий;
- обеспечить унификацию и стандартизацию конструктивных и технологических решений;
- увеличить надежность за счет резкого сокращения числа паяных соединений в изделии;
- гарантировать стабильность электрических характеристик;
- улучшить вибропрочность, теплоотдачу и стойкость к климатическим воздействиям;
- автоматизировать операции сборки и монтажа ЭА, уменьшить трудоемкость и снизить стоимость изделия.

К недостаткам печатного монтажа следует отнести сложность внесения изменений в конструкцию изделия, ограниченную ремонтпригодность, повышенный расход цветных металлов.

Элементами ПП являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. Они должны соответствовать требованиям ГОСТ 23752—86 и отраслевых стандартов.

Диэлектрическое основание ПП или МПП должно быть однородным по цвету, монолитным по структуре и не иметь внутренних пузырей и раковин, посторонних включений, сколов, трещин и расслоений. Допускаются отдельные вкрапления металла, царапины, следы от удаления одиночных невытравленных участков, точечное и контурное просветление, проявление структуры материала, которые не ухудшают электрических параметров ПП и не уменьшают минимально допустимых расстояний между элементами проводящего рисунка.

Проводящий рисунок должен быть четким, с ровными краями, без вздутий, отслоений, подтравливаний, разрывов, темных пятен, следов инструмента и остатков технологических материалов. Допускаются: отдельные местные протравы не более 5 точек на 1 дм<sup>2</sup> при условии, что оставшаяся ширина проводника соответствует минимально допустимой по чертежу; риски глубиной не более 25 мкм и длиной до 6 мм; отслоение проводника в одном месте на длине не более 4 мм; остатки металлизации на пробельных участках, не уменьшающие допустимых расстояний между элементами.

Для повышения коррозионной стойкости и улучшения паяемости на поверхность проводящего рисунка наносят электролитическое покрытие, которое должно быть сплошным, без разрывов, отслоений и подгаров. В отдельных случаях допускаются: участки без покрытия площадью не более 2 мм<sup>2</sup> на проводник, но не более 5 на плате; местные наросты высотой не более 0,2 мм; потемнение и неоднородность покрытия, не ухудшающие паяемость; отсутствие покрытия на торцах проводников.

Монтажные и фиксирующие отверстия должны быть расположены в соответствии с требованиями чертежа и иметь допустимые отклонения, определяемые классом точности ПП. Для повышения надежности паяных соединений внутреннюю поверхность монтажных отверстий покрывают слоем меди толщиной не менее 25 мкм.

Покрытие должно быть сплошным, без включений, пластичным, с мелкокристаллической структурой и прочно сцепленным с диэлектрическим основанием. Оно должно выдерживать токовую нагрузку  $25 \text{ А/мм}^2$  в течение 3с при нагрузке на контакты 1,0—1,5 Н и четыре (для МПП — три) перепайки выводов без изменения внешнего вида, подгаров и отслоений.

*Контактные площадки* представляют собой участки металлического покрытия, которые соединяют печатные проводники с металлизацией монтажных отверстий. Их площадь должна быть такой, чтобы не было разрывов при сверлении и остался гарантийный поясok меди шириной не менее 50 мкм. Разрывы контактных площадок не допускаются, так как при этом уменьшается токонесущая способность проводников и адгезия к диэлектрику. Допускается частичное отслоение отдельных (до 2 %) контактных площадок вне зоны проводников и их ремонт с помощью эпоксидного клея. Контактные площадки монтажных отверстий должны равномерно смачиваться припоем за время 3—5 с и выдерживать не менее трех (МПП — двух) перепаяк без расслоения диэлектрика, вздутий и отслаивания.

В процессе производства происходит деформация ПП, которая приводит к их изгибу и скручиванию, затрудняющим последующую сборку. Величина деформации определяется механической прочностью фольгированных диэлектриков, характером напряженного состояния после травли фольги, правильностью режимов нагрева и охлаждения.

На платах толщиной 0,8 мм и менее деформация не контролируется, при толщинах 1,5—3 мм деформация на 100 мм длины не должна превышать: для МПП 0,4—0,5 мм, для ДПП на стеклотекстолите 0,6—0,9, на гетинаксе 0,6—1,5 мм. При воздействии на ПП повышенной температуры (260—290 °С) в течение 10 с не должно наблюдаться разрывов проводящего покрытия, отслоения от диэлектрического основания.

ТП изготовления ПП не должен ухудшать электрофизических и механических свойств применяемых конструкционных материалов. Сопротивление изоляции между двумя рядом расположенными элементами ПП при минимальном расстоянии между ними 0,2—0,4 мм не должно быть для стеклотекстолита меньше: 10 000 МОм при нормальных климатических условиях (температура  $(25 \pm 1)$  °С, относительная влажность  $(65 \pm 15)$  %, атмосферное давление 96—104 кПа); 1000 МОм после воздействия (2 ч) температуры  $(60 \pm 2)$  °С и 300 МОм после воздействия (2 ч) температуры  $(85 \pm 2)$  °С; 20 МОм после пребывания в течение 4 сут в камере с относительной влажностью  $93 \pm 3$  % при температуре  $40 \pm 2$  °С, 5 МОм после 10 сут и 1 МОм после 21 сут; восстановление первоначального значения сопротивления изоляции должно происходить в течение суток.

Электрическая прочность изоляции при том же расстоянии между элементами проводящего рисунка не нарушается при напряжениях: 700 В в нормальных условиях; 500 В после воздействия относительной влажности  $93 \pm 3$  % при температуре  $40 \pm 2$  °С в течение 2 сут; 350 и 150 В после воздействия пониженного давления (53,6 и 0,67 кПа соответственно). Для внутренних слоев МПП указанные значения испытательного напряжения увеличиваются на 15 %.

Плотность монтажа определяется шириной проводников и расстоянием между ними. В соответствии с ГОСТ 23751—86 для ПП установлено пять классов плотности монтажа, допускающих минимальную ширину и зазоры между проводниками: 0,75; 0,45; 0,25; 0,15; 0,10 мм.

Трассировку рисунка схемы проводят по координатной сетке с шагом по ГОСТ 10317—77 2,5 и 1,25 мм, а также 0,625 мм. Минимальные диаметры отверстий, расположенных в узлах координатной сетки, зависят от максимального диаметра вывода навесного элемента ( $d_{\text{выв}}$ ), наличия металлизации и толщины платы.

Высокие конструктивно-технологические требования предъявляются к печатному монтажу блоков ЭВМ, где увеличение производительности ЭВМ находится в непосредственной зависимости от возможностей сокращения длины связей между логическими элементами, так называемой конструктивной задержкой сигнала. Это

достигается более плотной компоновкой ИМС на плате и прогрессирующим повышением плотности печатного монтажа.

## 5.2. КЛАССИФИКАЦИЯ ПЛАТ И МЕТОДОВ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

В настоящее время разработано большое число конструктивно-технологических разновидностей коммутационных плат (КП). В зависимости от числа проводящих слоев КП разделяются на односторонние (ОПП), двусторонние (ДПП), многослойные (МПП), по конструктивному исполнению — на жесткие и гибкие платы (ГПП), а также платы с проводным монтажом (рис. 5.1).

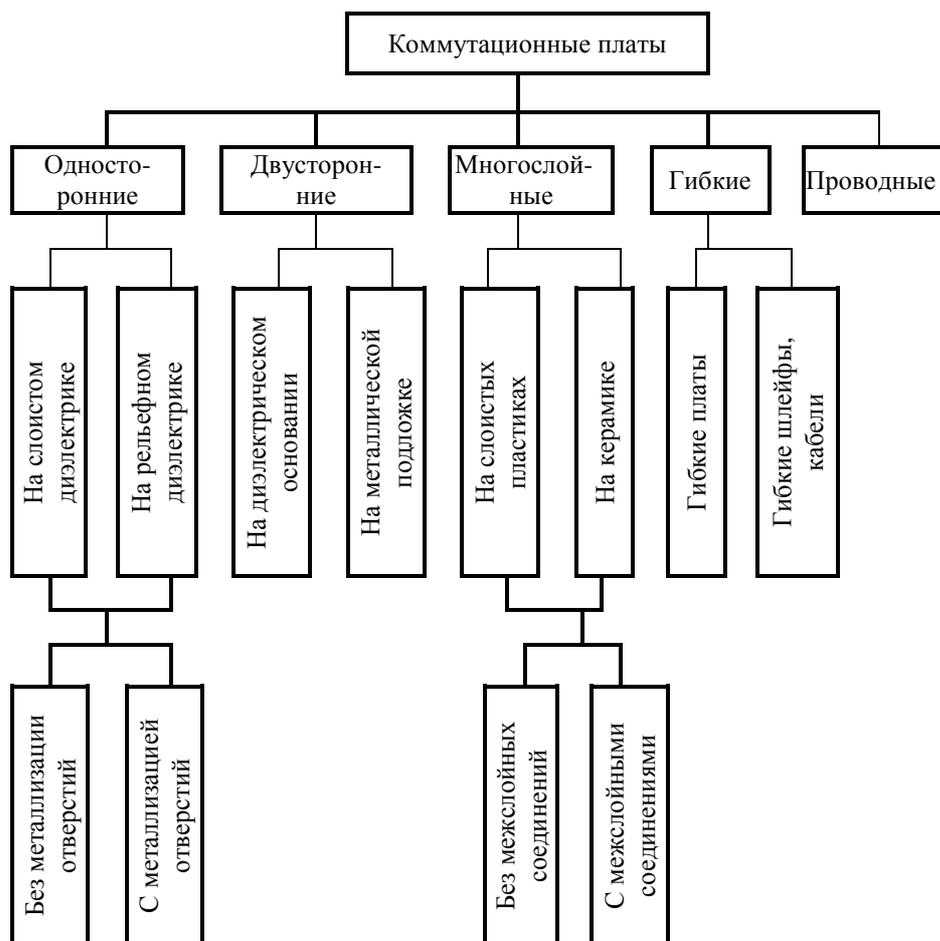


Рис. 5.1. Классификация коммутационных плат

ОПП выполняются на слоистом прессованном или рельефном литом основании без металлизации (рис. 5.2, а) или с металлизацией (рис. 5.2, б) отверстий. Платы на слоистом диэлектрике просты по конструкции и экономичны в изготовлении. Их применяют в бытовой РЭА, блоках питания, устройствах техники связи. Высокую технологичность и нагревостойкость имеют рельефные литые платы, на одной стороне которых расположен печатный монтаж, а на другой — объемные элементы. Более надежны в эксплуатации платы с металлизированными отверстиями.

ДПП имеют проводящий рисунок на обеих сторонах диэлектрического (рис. 5.2, в) или металлического (рис. 5.2, г) основания, а необходимые соединения выполняются с помощью металлизированных отверстий. Такие платы позволяют реализовать более сложные схемы, обладают повышенной плотностью монтажа и надежностью соединений, имеют лучший теплоотвод, однако требуют нанесения изоляционного покрытия и сложны

в изготовлении. Расположение элементов печатного монтажа на металлическом основании позволяет решить проблему теплоотвода в мощной радиопередающей аппаратуре. ДПП используются в системах управления и автоматического регулирования, ЭВМ, измерительной технике.

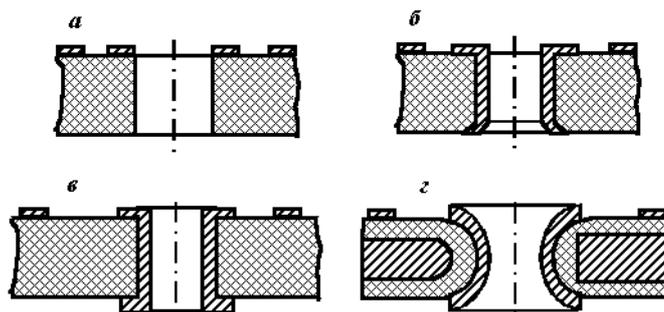


Рис. 5.2. Конструктивные варианты ОПП и ДПП

МПП состоят из чередующихся слоев изоляционного материала и проводящего рисунка, соединенных клеящими прокладками в монолитную структуру путем прессования (рис. 5.2, д). Электрическая связь между проводящими слоями выполняется перемычками, печатными элементами или химико-гальванической металлизацией. По сравнению с ОПП и ДПП МПП характеризуются повышенной плотностью монтажа и надежностью, устойчивостью к механическим и климатическим воздействиям, уменьшением размеров конструкции и сокращением количества контактов. Соотношение трудоемкости изготовления плат ОПП : ДПП : МПП = 1 : 4 : 20. Большая трудоемкость изготовления, высокая точность рисунка и совмещения отдельных слоев, низкая ремонтпригодность и сложность технологического оборудования, а также высокая стоимость позволяют применять МПП для тщательно отработанных конструкций электронно-вычислительной, авиационной и космической аппаратуры.

ГПП выполняются конструктивно как ОПП и ДПП, но на эластичном основании, и применяются для конструкций, подвергаемых вибрациям, изгибам, или когда плате после установки ЭРЭ необходимо придать компактную изогнутую форму. Разновидностью ГПП являются гибкие печатные кабели (ГПК), которые состоят из одного или нескольких слоев толщиной 0,06—0,3 мм с печатными проводниками и применяются для межблочного монтажа.

Проводные платы представляют собой диэлектрическое основание, на котором выполняют печатный монтаж или его отдельные элементы (контактные площадки, шины питания и заземления), а необходимые электрические соединения проводят изолированными проводами диаметром 0,1—0,2 мм. Трехслойная проводная плата эквивалентна по плотности монтажа восьмислойной МПП. Проводные платы нашли применение на этапах макетирования, разработки опытных образцов, в мелкосерийном производстве, когда проектирование и изготовление МПП неэкономично.

Методы изготовления плат разделяют на три группы: субтрактивные, аддитивные и последовательного наращивания (рис. 5.3). В *субтрактивных* методах (от лат. substratio — отнимание) проводящий рисунок образуется путем удаления фольги с незащищенных участков поверхности. Для этого на медную фольгу диэлектрика наносится рисунок схемы, а незащищенные участки фольги стравливаются. Дополнительная химико-гальваническая металлизация монтажных отверстий позволяет получать двусторонние платы комбинированными методами. К недостаткам субтрактивного химического метода относятся значительный расход меди и наличие бокового подтравливания элементов печатных проводников, что уменьшает адгезию фольги к основанию.

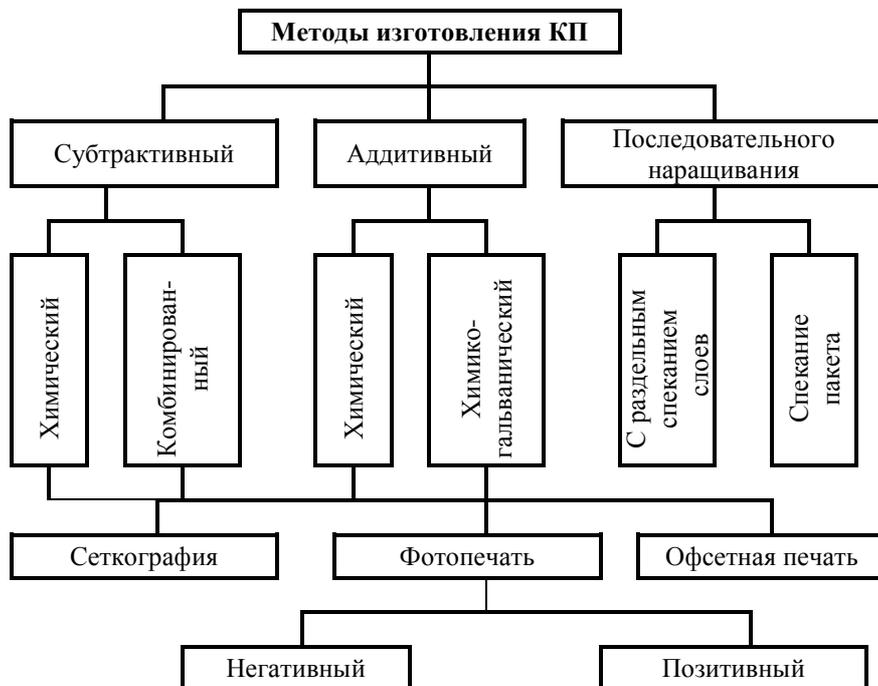


Рис. 5.3. Методы изготовления КП и нанесения рисунка

Указанного недостатка лишен *аддитивный* (от лат. *additio* — прибавление) метод изготовления ПП, основанный на избирательном осаждении химической меди на нефольгированный диэлектрик. При этом используют диэлектрик с введенным в его состав катализатором и адгезивным слоем на поверхности. Платы, изготовленные аддитивным методом, имеют высокую разрешающую способность (проводники шириной до 0,1 мм), затраты на производство таких плат снижаются на 30 % по сравнению с субтрактивными методами, экономятся медь, химикаты для травления и улучшается экологическая обстановка на предприятиях. Аддитивный метод имеет более высокую надежность, так как проводники и металлизация отверстий получают в едином химико-гальваническом процессе, устраняется подтравливание элементов печатного монтажа. Однако применение аддитивного метода в массовом производстве ограничено низкой производительностью процесса химической металлизации, интенсивным воздействием электролитов на диэлектрик, недостаточной адгезией проводников.

При *полуаддитивном*, или химико-гальваническом, методе на диэлектрическом основании сплошной токопроводящий слой получают химическим осаждением, а затем усиливают его до необходимой толщины в местах расположения печатных проводников и контактных площадок электрохимическим методом. В этом случае достигается лучшая адгезия рисунка ПП к диэлектрику (прочность на отрыв в 1,5 выше, чем у аддитивного). Толщина меди получается одинаковой на всех участках плат и в металлизированных отверстиях.

*Метод последовательного наращивания* применяют при формировании многослойной структуры на керамической плате, состоящей из чередующихся изоляционных и проводящих слоев. В изоляционных слоях в местах создания межслойных переходов выполняют окна, через которые при нанесении следующего проводящего слоя формируется электрическое межслойное соединение. При использовании толстопленочной технологии изоляционные и проводящие составы наносят путем трафаретной печати и затем вжигают. Преимущества этого метода — высокая надежность плат, большая гибкость при изменениях схемы, незначительные затраты на оборудование. Недостатки — наличие операции вжигания, невысокая производительность процесса.

Базовыми ТП в производстве ПП являются: нанесение рисунка схемы на основание; получение рисунка схемы (травление, электрохимическая металлизация); механическая обработка плат (сверление, пробивка отверстий); защита печатных проводников для обеспечения пайки; контроль параметров печатных проводников.

### 5.3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПЛАТ

Физико-механические свойства материалов должны удовлетворять установленным ТУ и обеспечивать качественное изготовление ПП в соответствии с типовыми ТП. Для изготовления плат применяют слоистые пластики — фольгированные диэлектрики, плакированные электролитической медной фольгой толщиной 5, 20, 35, 50, 70 и 105 мкм с чистотой меди не менее 99,5 %, шероховатостью поверхности не менее 0,4—0,5 мкм, которые поставляются в виде листов размерами 500×700 мм и толщиной 0,06—3 мм. Слоистые пластики должны обладать высокой химической и термической стойкостью, влагопоглощением не более 0,2—0,8 %, выдерживать термоудар (260 °С) в течение 5—20 с. Поверхностное сопротивление диэлектриков при 40 °С и относительной влажности 93 % в течение 4 сут должно быть не менее  $10^4$  МОм. Удельное объемное сопротивление диэлектрика — не менее  $5 \cdot 10^{11}$  Ом·см. Прочность сцепления фольги с основанием (полоска шириной 3 мм) — от 12 до 15 МПа. Термостойкость материала при температуре 110—150 °С — 1000 ч.

В качестве основы в слоистых пластиках используют *гетинакс*, представляющий собой спрессованные слои электроизоляционной бумаги, пропитанные фенольной смолой, стеклотекстолиты — спрессованные слои стеклоткани, пропитанные эпоксифенольной смолой и другие материалы (табл. 5.1).

Гетинакс, обладая удовлетворительными электроизоляционными свойствами в нормальных климатически условиях, хорошей обрабатываемостью и низкой стоимостью, нашел применение в производстве бытовой РЭА. Для ПП эксплуатируемых в сложных климатических условиях с широким диапазоном рабочих температур (–60 ... +180 °С) в составе электронно-вычислительной аппаратуры, техники связи, измерительной техники, применяют более дорогие стеклотекстолиты. Они отличаются широким диапазоном рабочих температур, низким (0,2—0,8 %) водопоглощением, высокими значениями объемного и поверхностного сопротивлений, стойкостью к короблению. Недостатки — возможность отслаивания фольги при термоударах, наволакивание смолы при сверлении отверстий. Повышение огнестойкости диэлектриков (ГПФ, ГПФВ, СПНФ, СТНФ), используемых в блоках питания, достигается введением в их состав антипиренов (например, тетрабромдифенилопропана).

Для изготовления фольгированных диэлектриков используется в основном электролитическая медная фольга, одна сторона которой должна иметь гладкую поверхность (не ниже восьмого класса чистоты) для обеспечения точного воспроизведения печатной схемы, а другая должна быть шероховатой с высотой микронеровностей не менее 3 мкм для хорошей адгезии к диэлектрику. Для этого фольгу подвергают оксидированию электрохимическим путем в растворе едкого натра. Фольгирование диэлектриков осуществляют прессованием при температуре 160—180 °С и давлении 5—15 МПа.

Керамические материалы характеризуются высокой механической прочностью, которая незначительно изменяется в диапазоне температур 20—700 °С, стабильностью электрических и геометрических параметров, низкими (до 0,2 %) водопоглощением и газовой выделением при нагреве в вакууме, однако являются хрупкими и имеют высокую стоимость.

В качестве металлической основы плат используют сталь и алюминий. На стальных основаниях изолирование токоподводящих участков осуществляют с помощью специальных эмалей, в состав которых входят оксиды магния, кальция, кремния, бора, алюминия или их смеси, связка (поливинилхлорид, поливинилацетат или метилметакрилат) и пластификатор. Пленку наносят на основание путем прокатки между вальцами с последующим вжиганием. Изолирующий слой на поверхности алюминия получают анодным оксидированием толщиной

от нескольких десятков до сотен микрометров с сопротивлением изоляции  $10^4$ — $10^6$  МОм. Теплопроводность анодированного алюминия 200 Вт/(м·К), а стали — 40 Вт/(м·К).

Табл. 5.1. Основные материалы для изготовления плат

Материал	Марка	Толщина		Область Применения
		фольги, мкм	материала, мм	
<b>Гетинакс:</b>				
фольгированный	ГФ-1(2)	35;50	1—3	ОПП
огнестойкий	ГПФ-2-50Г	50	1—3	ДПП
влагостойкий	ГОФВ-2-35	35	1—3	ДПП
<b>Стеклотекстолит:</b>				
фольгированный	СФ-1(2)-35(50)	35;50	0,8—3	ОПП, ДПП
огнестойкий	СФО-1(2)	35	0,8—3	ОПП, ДПП
теплостойкий	СТФ-1(2)-18(35)	18;35	0,1—3	ОПП, ДПП
травящийся	ФТС-1(2)-18А	18;35	0,08—0,5	МПП, ДПП
с адгезионным слоем	СТЭК	—	1,0—1,5	ДПП
с тонкой фольгой	СТПА-1	5	0,1—3	ОПП, ДПП
<b>Фольгированный диэлектрик:</b>				
тонкий	ФДТ-1	50	0,5	МПП
для МПП	ФДМ-1(2)	35	0,2—0,35	МПП
для микроэлектроники	ФДМЭ-1(2)	35	0,1—0,3	МПП
<b>Стеклоткань прокладочная</b>				
	СП-1-0,0025	—	0,0025	МПП
	СП-2-0,1	—	0,1	МПП
	СП-3-0,06	—	0,06	МПП
<b>Лавсан фольгированный</b>				
	ЛФ-1	35	0,05	ГПК
	ЛФ-2	50	0,1	ГПК
<b>Фторопласт:</b>				
фольгированный	ФФ-4	50	1,5—3	ДПП
армированный	ФАФ-4Д	50	0,5—3	ГПК
<b>Полиимид фольгированный</b>				
	ПФ-1	35	0,05	ГПП
	ПФ-2	50	0,1	ГПК
Сталь эмалированная	—	—	1—5	ДПП
Алюминий анодированный	—	—	0,5—3	ДПП, ГИМС
Керамика алюмооксидная	—	—	2—4	ДПП, МПП

В качестве основы для ПП СВЧ-диапазона используют неполярные (фторопласт, полиэтилен, полипропилен) и полярные (полистирол, полифениленоксид) полимеры. Для изготовления микроплат и микросборок СВЧ-диапазона применяют также керамические материалы, имеющие стабильные электрические характеристики и геометрические параметры.

Полиимидная пленка используется для изготовления гибких плат, обладающих высокой прочностью на растяжение, химической стойкостью, несгораемостью. Она имеет наиболее высокую среди полимеров температурную устойчивость, так как не теряет гибкости от температур жидкого азота до температур эвтектической пайки кремния с золотом (400 °С). Кроме того, она характеризуется низким газовыделением в вакууме, радиационной стойкостью, отсутствием наволакивания при сверлении. Недостатки — повышенное водопоглощение и высокая стоимость.

#### 5.4. ФОРМИРОВАНИЕ РИСУНКА СХЕМЫ

Нанесение рисунка схемы или защитного рельефа требуемой конфигурации необходимо при осуществлении процессов металлизации и травления. Рисунок должен иметь четкие границы с точным воспроизведением тонких линий, быть стойким к травильным растворам, не загрязнять платы и электролиты, легко сниматься после выполнения своих функций. Перенос рисунка печатного монтажа на фольгированный диэлектрик осуществляют методами сеткографии, офсетной печати и фотопечати. Выбор метода зависит от конструкции платы, требуемой точности и плотности монтажа, серийности производства.

*Сеткографический метод* нанесения рисунка схемы наиболее рентабелен для массового и крупносерийного производства плат при минимальной ширине проводников и расстоянии между ними  $\geq 0,5$  мм, с точностью воспроизведения изображения  $\pm 0,1$  мм. Суть заключается в нанесении на плату специальной кислотостойкой краски путем продавливания ее резиновой лопаткой (ракелем) через сетчатый трафарет, в котором необходимый рисунок образован открытыми ячейками сетки (рис. 5.4).

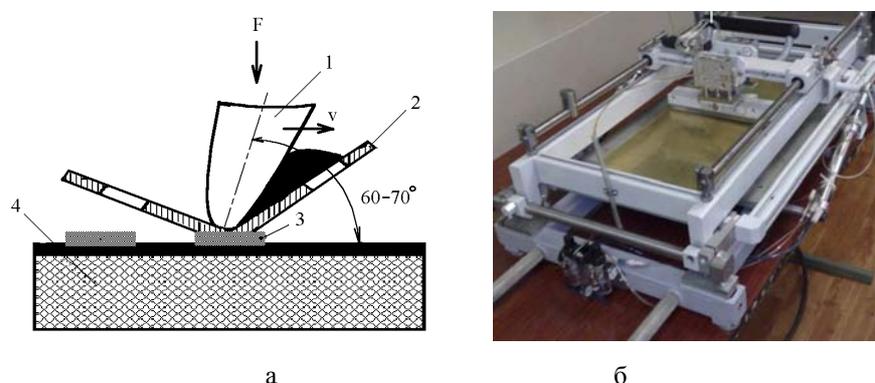


Рис. 5.4. Схема (а) и полуавтомат (б) трафаретной печати:  
1 – ракель; 2 – трафарет; 3 – краска; 4 – основание

Для изготовления трафарета используют металлические сетки из нержавеющей стали с толщиной проволоки 30—50 мкм и частотой плетения 60—160 нитей на 1 см, металлизированного нейлонового волокна, имеющего лучшую эластичность, с толщиной нити 40 мкм и частотой плетения до 200 нитей на 1 см, а также из полиэфирных волокон и капрона. Одним из недостатков сеток является их растяжение при многократном использовании. Самой большой стойкостью обладают сетки из нержавеющей стали (до 20 тыс. отпечатков), металлизированных пластмасс (12 тыс.), полиэфирных волокон (до 10 тыс.), капрона (5 тыс.).

Изображение на сетке получают с помощью экспонирования жидкого или сухого (пленочного) фоторезиста, после проявления которого образуются открытые (свободные от рисунка) ячейки сетки. Трафарет в сеткографической раме устанавливают с зазором 0,5—2 мм от поверхности платы так, чтобы контакт сетки с поверхностью платы был только в зоне нажатия на сетку ракелем. Ракель представляет собой прямоугольную заточенную полосу резины, установленную по отношению к подложке под углом 60—70°.

Для получения рисунка ПП используют термоотверждающиеся краски СТ 3,5; СТ 3,12, которые сушат либо в термошкафу при температуре 60 °С в течение 40 мин, либо на воздухе в течение 6 ч, что удлиняет процесс сеткографии. Более технологичными являются фотополимерные композиции ЭП-918 и ФКП-ТЗ с УФ-отверждением в течение 10—15 с, что является решающим фактором при автоматизации процесса. При однократном нанесении покрытие зеленого цвета имеет толщину 15—25 мкм, воспроизводит рисунок с шириной линий и зазорами до 0,25 мм, выдерживает погружение в расплав припоя ПОС 61 при температуре 260 °С в течение до 10 с, воздействие спиртобензиновой смеси до 5 мин и термоциклирование в интервале температур от –

60 до +120 °С. После нанесения рисунка плату просушивают при температуре 60 °С в течение 5—8 мин, контролируют качество и при необходимости подвергают ретуши. Удаление защитной маски после травления или металлизации осуществляют химическим методом в 5 %-м растворе едкого натра в течение 10—20 с.

Для трафаретной печати используют полуавтоматическое и автоматическое оборудование, отличающееся форматом печати и производительностью (табл. 5.2). Автоматические линии трафаретной печати фирм Chemcut (США), Resco (Италия) имеют автоматические системы подачи и установки плат, движения ракеля и подачи резиста. Для сушки резиста применяют ИК-печи туннельного типа.

Офсетная печать применяется для крупносерийного производства ПП при малой номенклатуре схем. Разрешающая способность 0,5—1 мм, точность изображения составляет  $\pm 0,2$  мм. Суть метода состоит в том, что в клише, несущее изображение схемы (печатные проводники, контактные площадки), закатывается краска. Затем она снимается офсетным валиком, покрытым резиной, переносится на изоляционное основание и подвергается сушке. Клише и плата располагаются друг за другом на основании машины для офсетной печати (рис. 5.5).

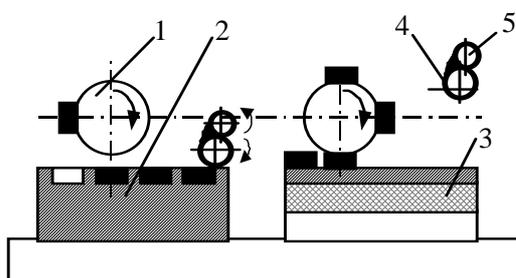


Рис. 5.5. Схема офсетной печати:  
1 – офсетный валик; 2 – клише; 3 – плата;  
4 – валик для нанесения краски; 5 – прижимной валик

Табл. 5.2. Оборудование для трафаретной печати

Тип оборудования	Марка	Формат печати, мм	Производительность, оттисков/ч
Автомат шелкографический	АШ-2 (СССР)	380×220	600
Полуавтомат трафаретной печати	ПТП-400 (Беларусь)	400×280	800
Трафаретная печатная машина	ПТ-2 (СССР)	430×200	900
Полуавтомат	Minimatik (Швеция)	300×500	1000
Полуавтомат	Beltron (Германия)	500×700	1000
Автоматическая линия	Chemcut (США)	500×700	1000
	Resco (Италия)	510×760	1000
Автомат	Astromat (Италия)	650×650	550

Точность печати и резкость контуров определяются параллельностью валика и основания, типом и консистенцией краски. С помощью одного клише можно выполнить неограниченное число оттисков. Производительность метода ограничена длительностью колебательного цикла (нанесение краски — перенос) и не превышает 200—300 оттисков в час. Недостатки метода: длительность процесса изготовления клише, сложность изменения рисунка схемы, трудность получения беспористых слоев, высокая стоимость оборудования.

*Фотографический метод* нанесения рисунка позволяет получать минимальную ширину проводников и расстояния между ними 0,1—0,15 мм с точностью воспроизведения до 0,01 мм. С экономической точки зрения этот способ менее рентабельный, но позволяет получать максимальную разрешающую способность рисунка и поэтому применяется в мелкосерийном и серийном производстве при изготовлении плат высокой плотности и точности. Способ основан на использовании светочувствительных композиций, называемых *фоторезистами*,

которые должны обладать: высокой чувствительностью; высокой разрешающей способностью; однородным по всей поверхности беспористым слоем с высокой адгезией к материалу платы; устойчивостью к химическим воздействиям; простотой приготовления, надежностью и безопасностью применения.

Фоторезисты разделяются на негативные и позитивные. *Негативные фоторезисты* под действием излучения образуют защитные участки рельефа в результате фотополимеризации и задубливания. Освещенные участки перестают растворяться и остаются на поверхности подложки. *Позитивные фоторезисты* передают рисунок фотошаблона без изменений. При световой обработке экспонированные участки разрушаются и вымываются.

Для получения рисунка схемы при использовании негативного фоторезиста экспонирование производят через негатив, позитивного — через позитив. Позитивные фоторезисты имеют более высокую разрешающую способность, что объясняется различиями в поглощении излучения фоточувствительным слоем. На разрешающую способность слоя влияют дифракционное огибание света на краю непрозрачного элемента шаблона и отражение света от подложки (рис. 5.6, а).

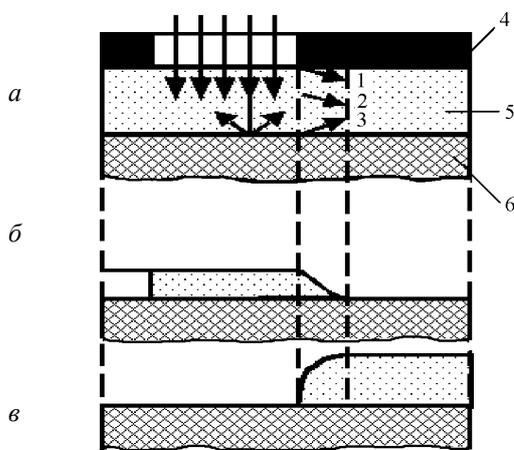


Рис. 5.6. Экспонирование светочувствительного слоя:

1 – дифракция; 2 – рассеяние; 3 – отражение (а); негативный фоторезист (б); позитивный фоторезист (в);  
4 – шаблон; 5 – резист; 6 – подложка

В негативном фоторезисте дифракция не играет заметной роли, поскольку шаблон плотно прижат к резисту, но в результате отражения вокруг защитных участков появляется ореол, который снижает разрешающую способность (рис. 5.6, б). В слое позитивного резиста под влиянием дифракции разрушится и вымоется при проявлении только верхняя область резиста под непрозрачными участками фотошаблона, что мало скажется на защитных свойствах слоя. Свет, отраженный от подложки, может вызвать некоторое разрушение прилегающей к ней области, но проявитель эту область не вымывает, так как под действием адгезионных сил слой опустится вниз, вновь образуя четкий край изображения без ореола (рис. 5.6, в).

В настоящее время в промышленности используются жидкие и сухие (пленочные) фоторезисты (табл. 5.3). *Жидкие фоторезисты* — коллоидные растворы синтетических полимеров, в частности поливинилового спирта (ПВС). Наличие гидроксильной группы ОН в каждом звене цепи определяет высокую гигроскопичность и полярность поливинилового спирта. При добавлении к водному раствору ПВС бихромата аммония происходит "очувствление" последнего. Фоторезист на основе ПВС наносят на предварительно подготовленную поверхность платы путем окунания заготовки, поливом с последующим центрифугированием. Затем слой фоторезиста сушат в термошкафу с циркуляцией воздуха при температуре 40 °С в течение 30—40 мин. После экспонирования осуществляется проявление фоторезиста в теплой воде. Для повышения химической стойкости фо-

торезиста на основе ПВС применяют химическое дублирование рисунка ПП в растворе хромового ангидрида, а затем термическое дублирование при температуре 120 °С в течение 45—50 мин. Раздубливание (снятие) фоторезиста проводят в течение 3—6 с в растворе следующего состава: 200—250 г/л щавелевой кислоты, 50—80 г/л хлористого натрия, до 1000 мл воды при температуре 20 °С.

Достоинства фоторезиста на основе ПВС — низкие токсичность и пожароопасность, проявление с помощью воды. К недостаткам его относят эффект темнового дублирования (поэтому срок хранения заготовок с нанесенным фоторезистом не должен превышать 3—6 ч), низкую кислото- и щелочеустойчивость, трудность автоматизации процесса получения рисунка, трудоемкость приготовления резиста, низкую чувствительность.

Улучшение свойств жидких фоторезистов (устранение дублирования, повышение кислотостойкости) достигается в фоторезисте на основе циннамата. Светочувствительным компонентом фоторезиста этого типа является поливинилциннамат (ПВЦ) — продукт взаимодействия поливинилового спирта и хлорангидрида коричной кислоты. Разрешающая способность его примерно 500 лин/мм, проявление осуществляется в органических растворителях — трихлорэтаноле, толуоле, хлорбензоле. Для интенсификации процесса проявления и удаления фоторезиста ПВЦ используют ультразвуковые колебания. Диффузия в УЗ-поле сильно ускоряется за счет акустических микропотоков, а образующиеся кавитационные пузырьки при захлопывании отрывают участки фоторезиста от платы. Время проявления сокращается до 10 с, т. е. в 5—8 раз по сравнению с обычной технологией. К недостаткам фоторезиста ПВЦ относятся его высокая стоимость, использование токсичных органических растворителей. Поэтому резисты ПВЦ не нашли широкого применения в изготовлении ПП, а используются главным образом при изготовлении ИМС.

Фоторезисты на основе диазосоединений применяют в основном как позитивные. Светочувствительность диазосоединений обусловлена наличием в нем групп, состоящих из двух атомов азота  $N_2$  (рис. 5.7). Сушка слоя фоторезиста проводится в две стадии: при температуре 20 °С в течение 15—20 мин для испарения легколетучих компонентов; в термостате с циркуляцией воздуха при температуре 80 °С в течение 30—40 мин. Проявителями являются растворы тринатрийфосфата, соды, слабых щелочей. Фоторезисты ФП-383, ФН-11 на основе диазосоединений имеют разрешающую способность 350—400 лин/мм, высокую химическую стойкость, однако имеют высокую стоимость.

Сухие пленочные фоторезисты марки Riston впервые разработаны в 1968 г. фирмой Du Pont (США) и имеют толщину 18 мкм (красный цвет), 45 мкм (голубой) и 72 мкм (рубиновый). Сухой пленочный фоторезист марки СПФ-2 выпускается с 1975 г. толщиной 20, 40 и 60 мкм и представляет собой полимер на основе полиметилметакрилата 2 (рис. 5.8), расположенный между полиэтиленовой 3 и лавсановой 1 пленками толщиной 25 мкм каждая. В СНГ выпускаются следующие типы сухих пленочных фоторезистов: проявляемые в органических веществах — СПФ-2, СПФ-АС-1, СРФ-П; водно-щелочные — СПФ-ВЩ2, ТФПК; повышенной надежности — СПФ-ПНЩ; защитные — СПФ3-ВЩ.

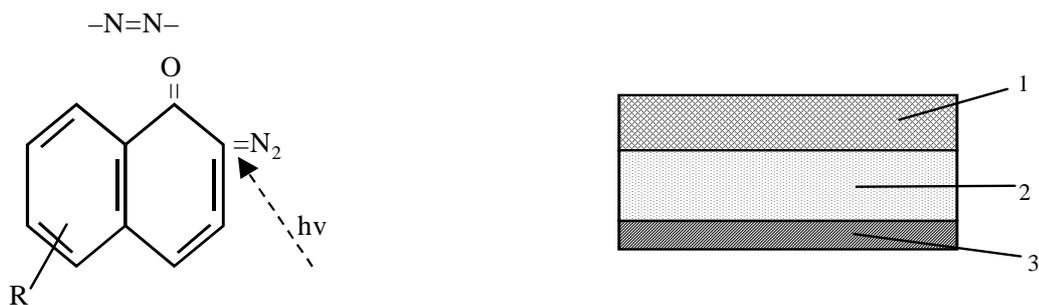


Рис. 5.8. Структура сухого фоторезиста

Табл. 5.3. Основные характеристики фоторезистов

Тип и марка фоторезиста	Разрешающая способность, лин/мм	Спектральная чувствительность, нм	Проявитель	Сниматель фоторезиста	Срок хранения заготовки
Негативные жидкие:					
ПВС	40—50	350—420	Вода 40 °С	Гидрооксид калия — 30 — 50 г/л	3—5 ч
ПВЦ	500	350—410	Трихлорэтилен — 70 %, толуол — 30 %	Хлористый метилен — 75 %, трихлорэтилен — 25 %	1 год
Позитивные, ФП-383	350—400	480	Тринарийфосфат — 5 %	Ацетон	1 год
Сухие негативные:					
СПФ-2	100—150	350	Метилхлороформ	Хлористый метилен	6 мес.
СПФ-АС-1	100—150	320—400	То же	То же	6 мес.
СПФ-ВЦ	100—150	320—400	2 %-й раствор Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	Гидрооксид калия — 50 — 100 г/л	6 мес.
СПФ-3-ВЦ	150—200	320—400	То же	То же	6 мес.
Riston (США)	120—150	350	Трихлорэтан	Хлористый метилен	1 год

Перед накаткой на поверхность основания ПП защитная пленка из полиэтилена удаляется и сухой фоторезист наносится на плату валиковым методом (плакирование, ламинирование) при нагреве до 100 °С со скоростью до 1 м/мин с помощью специального устройства, называемого ламинатором. Сухой резист полимеризуется под действием ультрафиолетового излучения, максимум его спектральной чувствительности находится в области 350 нм, поэтому для экспонирования используют ртутные лампы. Проявление осуществляется в машинах струйного типа в растворах метилхлорида, диметилформамида.

СПФ-2 — сухой пленочный фоторезист, аналогичный по свойствам фоторезисту Riston, допускает обработку как в кислых, так и в щелочных средах и используется при всех методах изготовления ДПП. При его применении необходима герметизация оборудования для проявления. СПФ-ВЦ обладает более высокой разрешающей способностью (100 — 150 мкм), стоек в кислой среде, обрабатывается в щелочных растворах. В состав фоторезиста ТФПК (в полимеризующую композицию) входит метакриловая кислота, улучшающая эксплуатационные характеристики. Для него не требуется термообработка защитного рельефа перед нанесением гальванопокрытия. СПФ-АС-1 позволяет получать рисунок ПП как по субтрактивной, так и по аддитивной технологии, поскольку он стоек и в кислых, и в щелочных средах. Для улучшения адгезии светочувствительного слоя к медной подложке в состав композиции введен бензотриазол.

Применение сухого фоторезиста значительно упрощает процесс изготовления ПП, увеличивает процент выхода годных изделий с 60 до 90 %. При этом: исключаются операции сушки, дубления и ретуширования, а также загрязнения, нестабильность слоев; обеспечивается защита металлизированных отверстий от затекания фоторезиста; достигается высокая автоматизация процесса изготовления ПП и контроля изображения.

Установка для нанесения сухого пленочного фоторезиста — ламинатор (рис. 5.9) — состоит из валиков 2, подающих плату 6 и прижимающих фоторезист к поверхности заготовок, валиков 3 и 4 для снятия защитной полиэтиленовой пленки, бобины с фоторезистом 5, нагревателя 1 с терморегулятором. Скорость движения заготовки платы достигает 0,1 м/с, температура нагревателя 105±5 °С. Конструкция установки АРСМ 3.289.006 НПО "Ратон" (Беларусь) обеспечивает постоянное усилие прижатия независимо от зазора, устанавливаемого между валиками-нагревателями. Максимальная ширина заготовки ПП 560 мм. Особенностью накатывания яв-

ляется опасность попадания пыли под слой фоторезиста, поэтому установка должна работать в гермозоне. Накатанная пленка фоторезиста выдерживается не менее 30 мин перед экспонированием для завершения усадочных процессов, которые могут вызвать искажение рисунка и уменьшить адгезию.

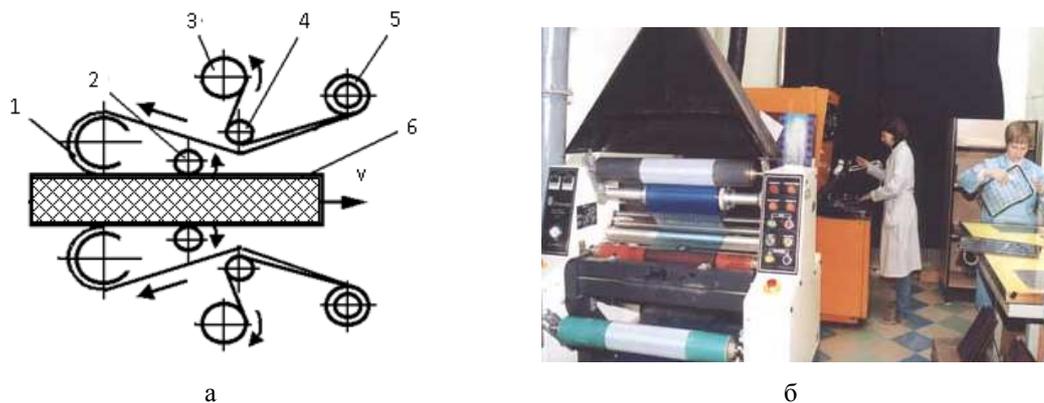


Рис. 5.9. Схема (а) и внешний вид (б) ламинатора

Проявление рисунка осуществляется в результате химического и металлического воздействия метилхлороформа. За оптимальное время проявления принимается время, в 1,5 раза большее, чем необходимо для полного удаления незадублированного СПФ. Качество операции проявления зависит от пяти факторов: времени проявления, температуры проявления, давления проявителя в камере, загрязнения проявителя, степени окончательной промывки. По мере накопления в проявителе растворенного фоторезиста скорость проявления замедляется. После проявления плату необходимо отмыть водой до полного удаления остатков растворителя. Продолжительность операции проявления СПФ-2 при температуре проявителя 14—18 °С, давлении раствора в камерах 0,15 МПа и скорости движения конвейера 2,2 м/мин составляет 40—42 с.

Удаление и проявление фоторезиста осуществляется в машинах струйного типа (ГГМЗ.254.001, АРСМЗ.249.000) в хлористом метиле. Это сильный растворитель, поэтому операция снятия фоторезиста должна выполняться быстро (за 20—30 с). В установках предусматривается замкнутый цикл использования растворителей, после орошения плат растворители поступают в дистиллятор, а затем чистые растворители переключаются на повторное использование.

Экспонирование фоторезиста предназначено для инициирования в нем фотохимических реакций и проводится в установках, имеющих источники света (сканирующие или неподвижные) и работающие в ультрафиолетовой области. Для плотного прилегания фотошаблонов к заготовкам плат используют рамы, где создается разрежение. Установка экспонирования СКЦИ.442152.0001 НПО "Ратон" при рабочем поле загрузочных рам 600×600 мм обеспечивает производительность 15 плат/ч. Время экспозиции ртутной лампой ДРШ-1000 1—5 мин. После экспонирования для завершения темновой фотохимической реакции необходима выдержка при комнатной температуре в течение 30 мин перед удалением лавсановой защитной пленки.

Недостатки сухого фоторезиста — необходимость приложения механического усилия при накатке, что недопустимо для ситалловых подложек, проблема утилизации твердых и жидких отходов. На каждые 1000 м<sup>2</sup> материала образуется до 40 кг твердых и 21 кг жидких отходов, утилизация которых является экологической проблемой.

Для получения проводящего рисунка на изоляционном основании как сеткографическим, так и фотохимическим способом необходимо применять фотошаблоны, представляющие собой графическое изображение рисунка в масштабе 1:1 на фотопластинках или фотопленке. Фотошаблоны выполняют в позитивном изображении

при наращивании проводящих участков на лентах и в негативном изображении, когда проводящие участки получают травлением меди с пробельных мест.

Геометрическая точность и качество рисунка ПП обеспечиваются в первую очередь точностью и качеством фотошаблона, который должен иметь:

- контрастное черно-белое изображение элементов с четкими и ровными границами при оптической плотности черных полей не менее 2,5 ед., прозрачных участков не более 0,2 ед., измеренной на денситомере типаДФЭ-10;
- минимальные дефекты изображения (темные точки на пробельных местах, прозрачные точки на черных полях), которые не превышают 10—30 мкм;
- точность элементов выполнения рисунка  $\pm 0,025$  мм.

В большей степени перечисленным требованиям удовлетворяют сверхконтрастные фотопластинки и пленки "Микрат-Н" (СССР), фотопластинки типа ФТ-41П (СССР), РТ-100 (Япония) и Agfalit (Германия).

В настоящее время применяются два основных способа получения фотошаблонов: фотографирование их с фотооригиналов и вычерчивание световым лучом на фотопленке с помощью координатографов с программным управлением либо лазерным лучом. При изготовлении фотооригиналов рисунок ПП выполняют в увеличенном масштабе (10:1, 4:1, 2:1) на малоусадочном материала путем вычерчивания, изготовления аппликаций или резания по эмали. Способ аппликации предусматривает наклеивание заранее подготовленных стандартных элементов на прозрачную основу (лавсан, стекло и др.). Первый способ характеризуется низкой точностью и большой трудоемкостью, поэтому используется в основном для макетных образцов плат.

Резание по эмали применяют для ПП с высокой плотностью монтажа. Для этого полированное листовое стекло покрывают непрозрачным слоем эмали, а вырезание рисунка схемы осуществляют на координатографе с ручным управлением. Точность получения рисунка 0,03—0,05 мм.

Изготовленный фотооригинал фотографируют с необходимым уменьшением на высококонтрастную фотопластину с помощью фоторепродукционных полиграфических камер типа ПП-12, ЭМ-513, Klimsch (Германия) и получают фотошаблоны, которые могут быть контрольными и рабочими. Для тиражирования и изготовления рабочих, одиночных, а также групповых фотошаблонов применяют метод контактной печати с негативной копии контрольного фотошаблона. Операция выполняется на мультипликаторе модели АРСМ 3.843.000 с точностью  $\pm 0,02$  мм.

Недостатки такого метода — большая трудоемкость получения фотооригинала, требующего высококвалифицированного труда, и трудность равномерного освещения фотооригиналов значительной площади, что снижает качество фотошаблонов.

Возрастающая сложность и плотность рисунка ПП, необходимость увеличения производительности труда привели к разработке метода изготовления фотошаблонов сканирующим лучом непосредственно на фотопленке. Для изготовления фотошаблона световым лучом разработаны координатографы с программным управлением. С переходом на машинное проектирование плат необходимость вычерчивания чертежа отпадает, так как полученная с ЭВМ перфолента с координатами проводников вводится в считывающее устройство координатографа, на котором автоматически выполняется фотошаблон.

Координатограф (рис. 5.10) состоит из вакуумного стола 8, на котором закрепляют фотопленку, фотоголовки и блока управления 1. Стол перемещается с высокой точностью в двух взаимно перпендикулярных направлениях с помощью прецизионных ходовых винтов 9 и 3, которые приводятся во вращение шаговыми двигателями 2 и 10. Фотоголовка включает осветитель 4, фокусирующую систему 5, круговую диафрагму 6 и фотозатвор 7. Диафрагма имеет набор отверстий (25—70), оформляющих определенный элемент рисунка ПП, и закреп-

пляется на валу шагового двигателя. В соответствии с программой работы сигналы от блока управления подаются на шаговые двигатели привода стола, диафрагмы и на осветитель. Современные координатографы (табл. 5.4) снабжаются системами автоматического поддержания постоянного светового режима, вывода из ЭВМ информации о фотошаблонах на пленку в масштабах 1:2; 1:1; 2:1; 4:1.

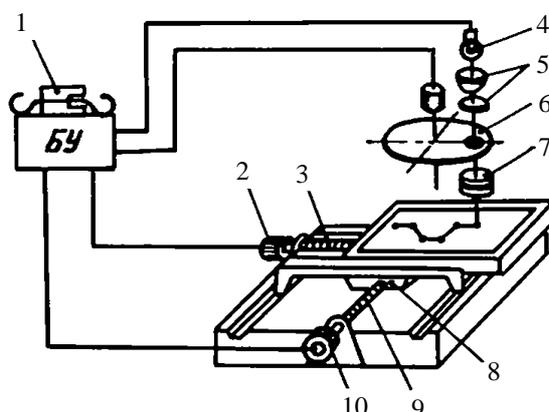


Рис. 5.10. Схема координатографа

Табл. 5.4. Основные технические характеристики координатографов

Модель	Размеры рабочего поля, мм	Точность позиционирования, мм	Максимальная скорость перемещения, м/мин	Ширина линии, мм	Шаг перемещения, мм
“Минск-2005” (СССР)	500×600	±0,03	3	0,2—5	0,025
КПА-1200 (СССР)	1200×1200	±0,05	6	0,2—4	0,025
723 (Gerber Scientific, США)	865×1120	±0,01	5	0,1—4	0,025
201 (Ariston, Германия)	865×1120	±0,015	9,4	0,1—4	0,025
“Минск-2010МГ” (Беларусь)	500×600	±0,006	9	0,1—2,5	0,025

## 5.5. ТРАВЛЕНИЕ МЕДИ С ПРОБЕЛЬНЫХ МЕСТ

*Травление меди* — сложный окислительно-восстановительный процесс, в котором окислителем является травильный раствор, переводящий медь из металлического состояния в ионное. Выбор травильных растворов зависит от следующих факторов: типа применяемого резиста; типа оборудования, обеспечивающего высокую производительность и экологическую защищенность процесса травления; допустимой величины коэффициента подтравливания; оптимальной скорости травления.

Промышленность использует травильные растворы на основе хлорного железа, персульфата аммония, хлорной меди, смеси хромового ангидрида и серной кислоты, перекиси водорода, хлорита натрия (щелочные растворы). Выбор травильного раствора определяется типом применяемого резиста (табл. 5.5), скоростью травления, величиной бокового подтравливания, сложностью оборудования, возможностью регенерации и экономичностью всех стадий процесса.

Табл. 5.5. Совместимость травителей и применяемых резистов

Основной компонент травителя	Резист						
	Трафаретная краска	Фоторезист	Sn—Pb	Sn	Au, Au—Ni	Ni, Sn—Ni	Ag
Хлорное железо	+	+	—	—	+	—	+
Персульфат аммония	+	+	×	—	+	—	+

Хлорная медь	+	+1	-	-	+	+	+
Перекись водорода	+	+	×	×	+	+	+
Хромовая кислота	+	+	×	+	+	-	+
Хлорит натрия	+2	+2	+	+	+	+	+
Хлорное железо и хлорная медь	+	+	-	-	+	-	+

**Примечание.** В таблице приняты следующие обозначения: + — не взаимодействует с травителем; — — взаимодействует с образованием растворимых соединений; × — взаимодействует с образованием нерастворимых соединений, удаляемых впоследствии осветлением; 1 — кроме фоторезиста на основе ПВС; 2 — кроме резистов, удаляемых щелочью.

Скорость травления оказывает существенное влияние на качество формируемых элементов ПП. При малых скоростях время травления увеличивается, что приводит к ухудшению диэлектрических свойств основания и увеличению бокового подтравливания. Оно возникает вследствие того, что травитель также взаимодействует с боковой поверхностью проводников. Вследствие этого уменьшается их токонесущая способность и прочность сцепления с диэлектриком. Величина подтравливания характеризуется коэффициентом, представляющим собой отношение глубины травления  $h$  к боковому подтравливанию  $c$  (рис. 5.11):

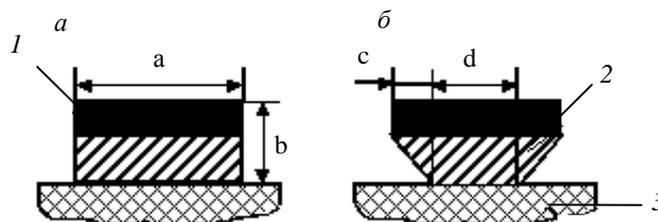
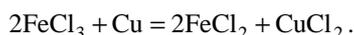


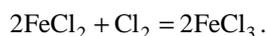
Рис. 5.11. Формы поперечного сечения проводников до (а) и после травления (б):  
1 — резист; 2 — проводник; 3 — основание платы

Наибольшее применение получили травильные растворы на основе хлорного железа (плотностью 1,36 — 1,42 г/см<sup>3</sup>) благодаря высокой и равномерной скорости травления, малой величине бокового подтравливания, низкой токсичности. Состав: 500 г/л FeCl<sub>3</sub>, 4—6 % HCl; режимы травления:  $T = 35—50$  °С, перемешивание. Растворение меди идет по реакции

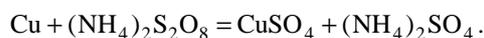


Скорость травления в свежем растворе до 40 мкм/мин, затем снижается до 5 мкм/мин. Недостатки — большое подтравливание, непригодность для металлических резистов типа Sn—Pb, сложность утилизации, трудность отмывки осадка на платах, высокая стоимость.

Технология регенерации хлорного железа достаточно сложна. Сначала из электролита удаляется медь путем контактного осаждения на стальные стружки. После этого вводится окислитель для перевода Fe<sup>2+</sup> в Fe<sup>3+</sup> и проводится корректировка содержания FeCl<sub>3</sub> до требуемого количества. Регенерацию осуществляют также продувкой газообразным хлором:



Травильный раствор на основе персульфата аммония легко готовится, дешевле хлорного железа на 30 — 40 %, не взаимодействует с металлическим резистом. Этот раствор является основным при травлении ПП, проводники которых защищены сплавом олово—свинец. Процесс травления описывается уравнением

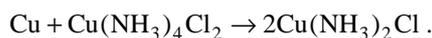


Состав и режимы травителя: 200—300 г/л (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>8</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 60 г/л,  $T = (50—55)$  °С.

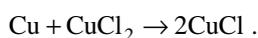
Реакция сопровождается выделением теплоты, что вызывает необходимость стабилизации температурного режима. При травлении происходит большое боковое подтравливание медных проводников. К недостаткам относятся также небольшая допустимая концентрация меди в растворе (35—40 кг/м<sup>3</sup>), образование смеси ядовитых газов и зубчатого края проводников, невысокая скорость травления (2,5 мкм/мин).

Регенерация осуществляется путем охлаждения травильного раствора. При этом CuSO<sub>4</sub> и (NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> выпадают в осадок и отфильтровываются.

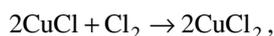
Предпочтительными для ПП с металлическими резистами являются медно-аммонийные растворы травления, в состав которых входят CuCl<sub>2</sub>, NH<sub>4</sub>Cl, NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>, (NH<sub>3</sub>)<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> и аммиак NH<sub>3</sub>, pH раствора составляет 9,0—9,5. Травление описывается реакцией



Травильный раствор на основе хлорной меди в 20 раз дешевле хлорного железа, характеризуется легкостью отмывки, простотой приготовления, возможностью регенерации, стабильными параметрами травления. Процесс травления описывается реакцией



Состав травителя и режимы: 150 г/л CuCl<sub>2</sub>, 5 % HCl, T = 40—60 °С. Недостатки: не применяется для резистов из сплава олово—свинец и блестящего лужения. Регенерация осуществляется либо продувкой газообразным хлором, что является экологически вредным процессом:



либо введением окислителя — перекиси водорода:



Травильный раствор на основе хромового ангидрида и серной кислоты применяют для травления ПП, покрытых сплавом Sn—Ni, Sn—Pb или золотом. Хотя этот раствор является сильным окислителем, он не оказывает влияния на припой из-за образования нерастворимого сульфата свинца. Процесс травления описывается реакцией



Травление в растворе на основе перекиси водорода с добавками кислот, главным образом соляной или серной, протекает с большой и постоянной скоростью, без кристаллизации и выпадения осадка. Процесс легко поддается автоматизации, раствор на 60 % дешевле хлорного железа. Процесс травления описывается реакцией

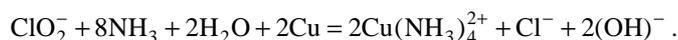


Получаемая соль CuSO<sub>4</sub> является химически чистым веществом и используется для технических целей. Недостатки — необходимость точного контроля состава ванны вследствие взрывоопасности водорода и химическое разрушение металлических частей оборудования.

Травление в щелочных растворах хлоритов происходит по уравнению



В ионном виде



Состав: NaClO<sub>2</sub> (30 %) — 150 мл/л, NH<sub>4</sub>OH (28 %) — 125 мл/л, NH<sub>4</sub>HCO<sub>3</sub> — 150 кг/м<sup>3</sup>.

Раствор характеризуется высокой скоростью травления при 50 °С, отсутствием осадка в ванне и на платах, высоким допустимым содержанием меди в растворе (до 200 кг/м<sup>3</sup>), однако весьма неустойчив, склонен к само-

произвольному разложению со взрывом, поэтому необходимо тщательно контролировать состав ванн и обеспечивать надежную вытяжную вентиляцию на рабочем месте. Окислитель не поддается регенерации.

Процесс травления организуется таким образом, чтобы химическое воздействие травителя на травящийся материал осуществлялось в оптимальном режиме. Травильные установки должны обеспечивать: температурную стабильность процесса; перемещение заготовки и подачу травителя в зону обработки; аэрацию (разбрызгивание) травителя; удаление травителя, промывку, нейтрализацию и сушку плат; непрерывный процесс при массовом производстве. Различают травильные установки, работающие по принципу погружения, центрифугирования и разбрызгивания. Более производительны установки с разбрызгиванием травильного раствора на одну или обе стороны плат (рис. 5.12). Платы с помощью транспортного устройства перемещаются из одной технологической зоны в другую.

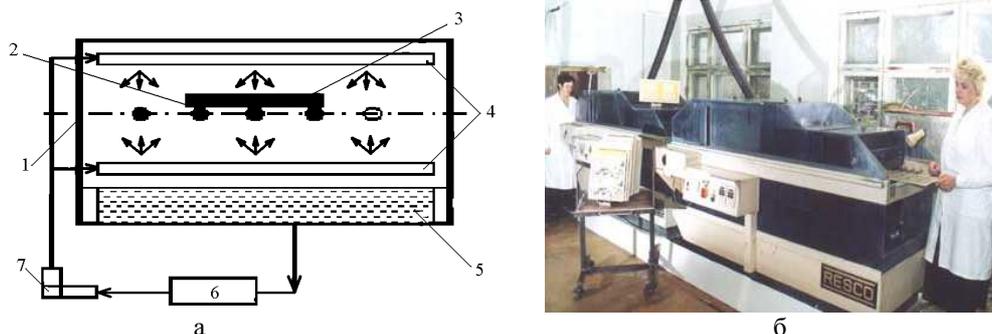
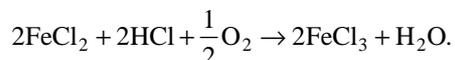


Рис. 5.12. Схема (а) и внешний вид установки струйного травления:  
1 – ванна; 2 – транспортер; 3 – заготовка, 4 – разбрызгиватель;  
5 – травитель; 6 – регенератор; 7 – насос

Давление в форсунках находится в пределах 0,1—0,5 МПа, а струя подается либо перпендикулярно к поверхности платы, либо под небольшим углом. Постоянное обновление окислителя в зоне обработки и удаление продуктов реакции обеспечивают высокую производительность, а соответствующая траектория струи — незначительное боковое подтравливание. Линии компонуются из модулей травления, промывки, сушки и регенерации. Автоматические модульные линии оснащаются устройствами для контроля кислотности раствора, температуры и давления в форсунках.

Скорость травления возрастает в два раза по сравнению с персульфатными растворами. Недостаток — высокая летучесть аммиака из раствора. В травильных установках струйного типа, в которых струи раствора постоянно соприкасаются с воздухом, происходит саморегенерация раствора при его достаточной кислотности:



Это позволяет поддерживать коэффициент использования хлорного железа в пределах 50—55 %.

Полуавтоматическая линия травления «Печать-1» имеет следующие характеристики: производительность — 16 м<sup>2</sup>/ч, размеры обрабатываемых плат — 500×500 мм, температура травильного раствора — 35—50 °С, число качаний коллекторов с форсунками — 27 в минуту, скорость конвейера — 0,2—2 м/мин, мощность источников питания — 10 кВт, габаритные размеры — 4230×1160×1330 мм.

Линия травления рисунка печатных плат КПМ 1.240.000 состоит из трех модулей: травления, промывки и сушки с регулируемой скоростью транспортного конвейера 0,2—2 м/мин. Травление меди осуществляется раствором, подаваемым через форсунки, совершающие 27—30 качаний в минуту. Травящий раствор работает в замкнутом цикле и очищается фильтром. Производительность до 16 м<sup>2</sup>/ч.

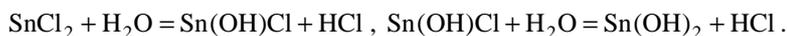
Во Франции в 1970 г. запатентован электрохимический способ травления, который осуществляется в струе электролита, причем анодом служит медная фольга платы. Скорость травления возрастает в 2—3 раза, однако широкое применение электрохимического травления сдерживается неравномерностью удаления металла с поверхности платы, что приводит к образованию невытравленных островков. Индивидуальный токоподвод и совмещение электрохимического процесса с химическим не обеспечивают его эффективность. Полностью реализовать преимущества электрохимического метода позволяют подвижные носители заряда, которые принимают заряд с анода и переносят его на поверхность меди, переводя последнюю в ионную форму. В качестве подвижных носителей используют взвешенный активированный уголь с содержанием в растворе 15—30 % и размером частиц 10—50 мкм. Электрохимическое травление сводит к минимуму боковое подтравливание токопроводящих дорожек и контактных площадок, обеспечивает разрешающую способность, равную 70—100 мкм.

## 5.6. ХИМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ МЕТАЛЛИЗАЦИЯ

Химическая металлизация ПП используется в качестве подслоя для нанесения основного слоя токопроводящего рисунка гальваническим способом при субтрактивном полуаддитивном методе или основного слоя при изготовлении плат аддитивным методом. Толщина слоя химической меди должна составлять 0,25—1,0 мкм, покрытие должно быть однородным, пластичным, хорошо сцепленным с диэлектриком.

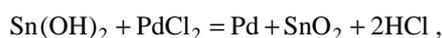
Для придания диэлектрику способности к металлизации проводят такие подготовительные операции, как сенсбилизация и активация поверхности.

*Сенсбилизация* (от лат. sensibilis — чувствительный) поверхности имеет целью формирование на поверхности диэлектрика пленки ионов двухвалентного олова  $\text{Sn}^{2+}$ , являющихся восстановителем для ионов активатора металлизации. Платы обрабатывают в растворе двуххлористого олова и соляной кислоты с соотношением 1:4 в течение 5—7 мин и промывают в деионизованной воде. Образование гидроксида олова происходит по реакциям:

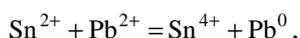


Электронно-микроскопические исследования показали, что гидроксид двухвалентного олова адсорбируется в виде отдельных участков размером порядка 10 нм, на расстоянии 20—30 нм друг от друга, так, что ею покрывается вся поверхность диэлектрика. Гидроксид двухвалентного олова обладает сильными восстановительными свойствами. Активация поверхности диэлектрика проводится в растворах солей благородных металлов, преимущественно палладия, и способствует последующему осаждению меди. Активирующий раствор имеет следующий состав: 3,5—4,0 г/л  $\text{PdCl}_2$ , 10—20 мл/л  $\text{HCl}$ , остальное — вода, а процесс осуществляют при температуре 40—50 °С (pH = 3,5—0,5) в течение 5—7 мин.

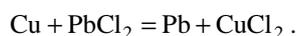
Реакция восстановления палладия на диэлектрике



в ионном виде



на торцах контактных площадок



На поверхности изоляционного материала вследствие адсорбции и восстановления палладия образуется тонкая сетка частиц размером порядка 10 нм. Связь частиц палладия с подложкой определяется их внедрением в поры диэлектрика, а также образованием ковалентных связей между металлом и материалом подложки. Для

хорошего сцепления необходимо, чтобы на поверхности диэлектрика было не менее  $1 \cdot 10^{-6}$  кг/см<sup>2</sup> палладия. Пленка палладия, образующаяся на торцах контактных площадок, является нежелательной, так как приводит к снижению прочности химически осажденной меди в результате образования гидридов палладия при захватывании палладием водорода. Кроме того, это приводит к образованию высокого и неравномерного переходного электрического сопротивления.

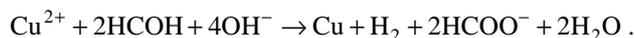
Для устранения контактного выделения палладия применяют либо предварительное оксидирование медных торцов контактных площадок, либо совмещенные растворы для активации диэлектрика следующего состава (г/л): 0,8—1,0 PbCl<sub>2</sub>, 40—70 SnCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 150—200 HCl, 140—150 KCl.

Совмещенный активатор содержит коллоидные растворы, в которые входят соли палладия и олова. При обработке плат в этом растворе в течение 5—10 мин выделение палладия на торцах контактных площадок значительно меньше.

*Химическое осаждение меди* — окислительно-восстановительный процесс, который происходит вследствие восстановления ионов двухвалентной меди на активированных поверхностях из ее комплексных солей. Основными компонентами раствора химического меднения являются:

- 15—20 г/л сернокислой меди CuSO<sub>4</sub> — источника катионов Cu<sup>2+</sup>;
- 2—4 г/л солей никеля NiCl<sub>2</sub> для большей прочности сцепления меди с диэлектриком;
- 10—15 г/л щелочи NaOH для создания pH = 10—13;
- 2—4 г/л Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> для увеличения скорости химического меднения и как буферная добавка;
- 4—16 г/л восстановителя — 33 %-го раствора формалина (СНОН);
- комплексобразователь — калий виннокислый как стабилизатор раствора — 50—60 г/л.

При введении формалина в раствор реакция восстановления меди при комнатной температуре становится автокаталитической. Процесс химического меднения представляет собой сумму электрохимических реакций катодного восстановления металла и анодного окисления восстановителя. Основная катодная реакция восстановления меди выражается уравнением



Анодная реакция заключается в окислении формалина при pH = 12—13 и потенциале + 0,80 В. Время осаждения подслоя меди толщиной 0,5 мкм при температуре 20 °С составляет 15—20 мин. Для облегчения удаления водорода и лучшего омывания раствором отверстий малого диаметра процесс ведется с плавным покачиванием плат (8—10 качаний в минуту при амплитуде 50—100 мм).

Для повышения качества металлизации ПП в серийном производстве применяют специальное технологическое оборудование, которое обеспечивает поддержание температуры с точностью  $\pm 1$  °С и состава растворов, повышает производительность труда в 10 раз, снижает стоимость металлизации на 20—30 % по сравнению с ручным трудом.

Для химической металлизации ПП используют автоматические линии типа АГ-38, АГ-42, оснащенные набором ванн необходимого размера и автооператором (рис. 5.13). В соответствии с заданной программой подвески с платами перемещаются автооператорами, управляемым командоаппаратом. Длина линии по ходу автооператоров — 10 м, габаритные размеры плат — 250×250 мм, производительность составляет 30 шт/ч.

Линия химической металлизации МЦ 104.131 имеет гибкую систему управления автооператором, механизм покачивания подвесок грузоподъемностью до 500 кг. Количество одновременно загружаемых заготовок в ванне — 132, темп выхода подвесок с линии — 12 шт/мин, из автооператоров — 3 шт/мин, производительность линии 660 плат в час, что в 2 раза выше производительности линии АГ-42.



Рис. 5.13. Автоматическая линия АГ-38

Основными проблемами химической металлизации являются низкая производительность, сложность процесса, использование драгоценных металлов. Поэтому разрабатываются процессы термохимической беспалладиевой металлизации в растворе следующего состава: 130—170 г/л кальция фосфорноватисто-кислого, 200—250 г/л меди сернокислой пентаводной, 6—10 г/л гипофосфита аммония, 200—300 мл/л аммиака (25%-го). После обработки платы выдерживают в термощкафу при температуре 100—150 °С в течение 8—10 мин, в результате чего происходит термическое разложение комплексной соли гипофосфита меди на поверхности платы и в отверстиях, приводящая к образованию электропроводящего покрытия.

Гальваническую металлизацию в производстве ППП применяют: для образования проводящего рисунка схемы с толщиной меди в отверстиях не менее 25 мкм; для предварительного увеличения тонкого слоя химической меди до толщины 5—8 мкм с целью последующего формирования рисунка схемы; для нанесения металлического резиста, например олово—свинец, толщиной 10—20 мкм либо специальных покрытий золотом, серебром толщиной 2—5 мкм.

Гальванический метод нанесения металлических покрытий был изобретен в 1837 г. в России электротехником Б.С.Якоби и заключается в том, что деталь, подлежащая покрытию, помещается в электролитно-водный раствор солей металла в качестве катода, а анодом является осаждаемый металл (медь). Необходимые для восстановления электроны поступают от внешнего источника постоянного тока. Под действием напряжения ионы металла движутся к катоду, присоединяют электроны и осаждаются на нем как нейтральные атомы (рис. 5.14).

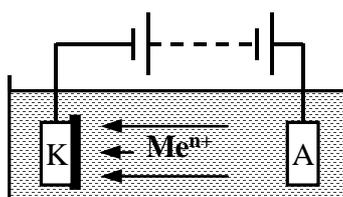
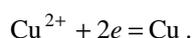


Рис. 5.14. Схема гальванической металлизации

Понятия "анод" (от греч. anodos — движение вверх, восхождение) и "катод" (от греч. kathodos — ход вниз, возвращение) были введены М. Фарадеем для обозначения направлений движения частиц, выделенных на электродах. Реакция восстановления меди



Количественно процессы гальванической металлизации описываются первым законом Фарадея, согласно которому, масса выделяемого вещества при электролизе пропорциональна прошедшему количеству электричества  $It$ :

$$m = k It ,$$

где  $k$  — теоретический электрохимический эквивалент, пропорциональный молярной массе  $M$  и обратно пропорциональный химической валентности металла  $n$  (второй закон Фарадея):  $k = M / (F n)$ ;  $F$  — постоянная Фарадея:  $F \approx 96\,500$  г/А·с.

Для двухвалентной меди  $k = 1,186$  г/(А·с), однако на практике теоретическое значение электрохимического эквивалента не достигается из-за побочных процессов, например осаждения водорода. Поэтому второй, не менее важной, характеристикой процесса гальванической металлизации является выход металла по току:

$$\eta = \frac{M}{M_p} \cdot 100\% .$$

Время для нанесения покрытия заданной толщиной  $\delta$ , считая, что масса

$$M = \rho_m S_k \delta$$

(где  $\rho_m$  — плотность металла;  $S_k$  — площадь катода), определяется так:

$$t = \frac{\rho_m S_k \delta}{k I \eta_k} .$$

Для предварительной металлизации (затяжки) отраслевыми стандартами рекомендуются борфтористоводородные и серноокислые электролиты меднения. Первый состоит из: 230—250 г/л борфтористой меди  $\text{Cu}(\text{BF}_4)_2$  — источника ионов; 5—15 г/л борфтористоводородной кислоты  $\text{HBF}_4$ , вводимой для повышения электропроводности электролита; 15—40 г/л борной кислоты  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , необходимой для стабилизации электролита. Процесс ведут при температуре  $(20 \pm 5)$  °С, катодной плотности тока 3—4 А/дм<sup>2</sup>, скорости осаждения 20—30 мкм/ч.

Достоинства электролита — большая концентрация меди, высокая скорость ее осаждения, покрытие получается более мелкокристаллическое, чем из серноокислого электролита. Недостаток — высокая агрессивность электролита.

Лучшей рассеивающей способностью характеризуется серноокислый электролит с комплексной добавкой следующего состава: 60—70 г/л серноокислой меди; 150—180 г/л серной кислоты; 0,03—0,06 г/л хлористого натрия; 1—3 мл/л комплексной добавки (трилон Б).

Электролитический сплав олово—свинец должен иметь состав, приближающийся к эвтектическому, что обеспечивает в дальнейшем его оплавление при минимальной температуре и хорошую паяемость ПП. Это достигается определенным процентным содержанием олова и свинца в электролите, строгим поддержанием режима осаждения.

Осаждение покрытия олово—свинец ведут в борфтористоводородном электролите следующего состава: 13—15 г/л  $\text{Sn}^{2+}$ , 8—10 г/л  $\text{Pb}^{2+}$ , 250—300 г/л  $\text{HBF}_4$ , 20—30 г/л  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , 3—5 г/л комплексных добавок. Аноды изготавливают из сплава, содержащего 61 % олова и 39 % свинца. Процесс осаждения ведут при температуре  $(20 \pm 5)$  °С, плотности тока 1—2 А/дм<sup>2</sup>, скорость осаждения при этом составляет 1 мкм/мин.

В качестве оборудования используют автооператорную и управляемую ЭВМ линию АГ-44 или универсальные лабораторные установки типа УПУГ-1, УПУГ-2, имеющие ванны с автоматическими регуляторами температуры и пневматическими механизмами для покачивания штанг.

Для улучшения паяемости гальваническое покрытие сплавом олово—свинец оплавляют, используя установки с ИК-нагревом НПО "Ратон". Установка состоит из верхнего и нижнего блоков отражателей, между которыми проходит конвейер. ИК-лампы, установленные в фокусе эллиптического отражателя, фокусируют световой поток на поверхность плат, в результате сплав олово—свинец оплавляется и приобретает структуру металлургического сплава. Температура зоны предварительного нагрева составляет 200 °С, а зоны оплавления — 500 °С  $\pm 5$  %. Скорость движения конвейера 0,05—0,5 м/мин, потребляемая мощность 51,5 кВт.

## 5.7. МЕХАНИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ПЛАТ

В производстве ПП до 60 % трудозатрат приходится на механическую обработку, которая включает:

- получение заготовок путем резки листового материала и раскроя листа либо штамповкой;
- формирование контура платы фрезерованием;
- выполнение отверстий в плате сверлением либо штамповкой.

В серийном и мелкосерийном производстве для резки листового материала применяют *гильотинные ножницы*, которые состоят из подвижного и неподвижного ножей, изготовленных из инструментальной стали У8А, прижима разрезаемых материалов и упора, регулирующего ширину заготовок. Геометрические параметры режущей части подвижного ножа: передний угол 0—5°, задний 10—15°, для неподвижного ножа задний и передний углы равны 0°. Параллельные ножи устанавливаются с минимальным зазором 0,02—0,03 мм по всей длине (рис. 5.15, а). Недостатки оборудования — низкая производительность, возможность образования сколов на краях заготовок.

В серийном и крупносерийном производстве материал разрезают с помощью одно- и многоножевых *роликовых ножниц*, в которых ножи изготовлены из металлокерамического твердого сплава ВК8М. Ножи устанавливаются с зазором 0,01—0,03 мм и вращают навстречу друг другу со скоростью 2—10 м/мин (рис. 5.15, б). Для получения заданной ширины заготовки ножницы снабжены регулируемыми упорами. Образующуюся пыль отсасывают с помощью промышленных пылесосов. Кинематическая скорость резания достигает 24 м/мин, максимальная ширина разрезаемого материала 1300 мм, потребляемая мощность 3 кВт.

Размеры заготовок из слоистых пластиков определяют по формулам:

$$A_3 = A_n + 2H, \quad B_3 = B_n + 2H,$$

где  $A_3, B_3$  — длина и ширина заготовки;  $A_n, B_n$  — длина и ширина платы по рабочему чертежу;  $H$  — ширина технического поля.

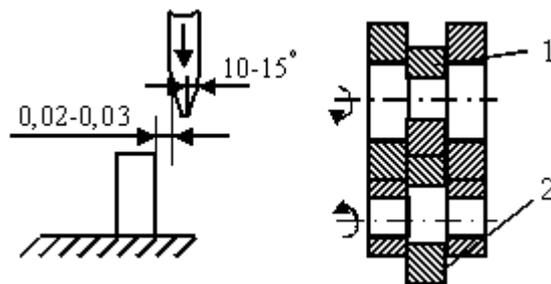


Рис. 5.15. Схема резания гильотинными (а) и роликовыми (б) ножницами

Платы малых габаритных размеров изготавливают из групповой заготовки, площадь которой

$$S_3 = \sum_{i=1}^n (A_{ni} + 2H)(B_{ni} + 2H),$$

где  $n$  — количество плат;  $A_{ni}, B_{ni}$  — длина и ширина  $i$ -й платы.

Ширина технологического поля для ОПП и ДПП не должна превышать 10 мм, для МПП — 30 мм.

В крупносерийном и массовом производстве раскрой стандартных листов фольгированного диэлектрика (обычно 500×700 мм) выполняют штамповкой в специальных штампах на эксцентриковых прессах с одновременной пробивкой базовых отверстий на технологическом поле. Вырубные детали оснастки (матрицу и пуансон) изготавливают из металлокерамических твердых сплавов типа ВК-15 и ВК-20.

Усилие штамповки определяют по формуле

$$P_{шт} = P_{проб} + P_{приж} + P_{прот} + P_{сьем},$$

где  $P_{проб}$  — усилие вырубки-пробивки;  $P_{приж}$  — усилие прижима;  $P_{прот}$  — усилие проталкивания;  $P_{сьем}$  — усилие съема детали с пуансона.

Усилие вырубки-пробивки

$$P_{проб} = K_1 L \delta \tau_{ср},$$

где  $K_1$  — коэффициент, зависящий от состояния режущих кромок пуансона (1,1—1,3);  $L$  — периметр среза;  $\delta$  — толщина материала;  $\tau_{ср}$  — сопротивление материала срезу, Па.

Усилие прижима сосредоточивается как можно ближе к поверхности среза для исключения сколов:

$$P_{приж} = 4p \delta,$$

где  $p$  — удельное давление прижима; при  $\delta$  до 1,5 мм  $p = (10—15)$  МПа, при  $\delta$  до 3 мм  $p = (15—20)$  МПа.

Усилие проталкивания детали

$$P_{прот} = K_2 P_{проб} h / S,$$

где  $K_2$  — коэффициент, зависящий от зазора между матрицей и пуансоном (0,05—0,08);  $h$  — высота матрицы.

Усилие съема детали

$$P_{сьем} = K_3 P_{проб},$$

где  $K_3$  — коэффициент, зависящий от толщины материала и типа штампа; при  $\delta=1,0$  мм  $K_3=0,02—0,04$ , при  $\delta=3,0$  мм  $K_3=0,06—0,12$ .

**Пример.** Для СФ-2-35-1.0  $\tau_{ср}=90$  МПа, для платы размером 100×50 мм усилие пробивки 50 кН, усилие прижима 5 кН. Суммарное усилие штамповки 50+5+3+1,5 ≈ 60 кН. Выбираем однокривошипный пресс простого действия модели К2122 с усилием 100 кН.

Исполнительные размеры матрицы  $D_m$  и пуансона  $D_n$  определяют по уравнениям:

$$D_m = (D_n - \delta_1) + \delta_m, \quad D_n = (D_m - \delta_1 - \Delta_1) - \delta_n,$$

где  $D_m, D_n$  — диаметры матрицы и пуансона соответственно;  $D_n$  — номинальный диаметр пробиваемого отверстия;  $\delta_1$  — допуск на размер отверстия;  $\Delta_1$  — зазор между матрицей и пуансоном; при  $\delta$  до 1,5 мм  $\Delta_1 = 0,02—0,05$  мм, при  $\delta$  до 3,0 мм  $\Delta_1 = 0,06—0,09$  мм;  $\delta_m, \delta_n$  — допуски на изготовление режущей части матрицы и пуансона, которые соответствуют 10-му качеству точности.

Обработка плат по контуру (снятие технологического припуска) осуществляется фрезерованием на специализированных фрезерных станках, работающих по контуру, или на многошпиндельных станках с программным управлением. Такой способ отличается высокой производительностью, допускает обработку плат в пакете по 6—10 шт., дает хорошее качество кромок и точность размеров в пределах  $\pm 0,025$  мм. В качестве инструмента используются алмазные дисковые фрезы или твердосплавные фрезы диаметром 3—8 мм.

Фрезерные станки с программным управлением имеют 2—5 шпинделей, вращающихся со скоростью до 60 000 об/мин, устройство для автоматической смены фрез, защитные скафандры для ограждения оператора от пыли и стружки (табл. 5.6).

Табл. 5.6. Технические характеристики фрезерных станков

Параметры	Модель 6720П (СССР)	Модель 7Б (Poul Dasier, США)
Производительность, плат/ч	1000	1800
Размеры поля фрезерования, мм	500×300	362×620
Скорость резания, м/мин	200—600	500—1000
Подача, мм на зуб фрезы	0,05—0,16	0,05—0,08

Для получения монтажных отверстий в ПП применяют пробивку на специальных штампах и сверление.

*Пробивку* используют в тех случаях, если отверстия в дальнейшем не подвергаются металлизации. Для улучшения качества отверстий применяют прижим заготовки с помощью прокладки из картона, которая предохраняет пуансоны от налипания на них стружки. Уменьшению усилия пробивки и повышению чистоты среза способствует предварительный подогрев заготовок до 80—100 °С со скоростью подогрева 5—8 °С/мин.

Недостатки: возможны разрывы фольги, затягивание проводников внутренних слоев МПП в отверстия, расплющивание торцов контактных площадок.

*Сверление отверстий* обеспечивает необходимое качество операции и ее высокую точность. Сверление в платах из гетинакса и текстолита обычно производят сверлами из быстрорежущей стали Р18. Для стеклотекстолита вследствие его высокого абразивного воздействия и низкой теплопроводности стойкость сверл из стали Р18 оказывается низкой, поэтому применяют сверла из твердых сплавов ВК6М.

К сверлам для обработки отверстий ПП предъявляют следующие требования:

- диаметр сверл должен быть на 0,1—0,15 мм больше диаметра металлизированного отверстия для компенсации некоторой упругости диэлектрика и толщины металлизации в отверстии;
- рабочая часть сверл должна иметь обратную конусность в пределах 0,02—0,03 мм для уменьшения трения в процессе обработки;
- радиальное биение рабочей части относительно хвостовика не должно превышать 0,02 мм;
- несимметричность режущих кромок относительно оси сверла должно составлять не более 0,02 мм, а осевое биение кромок, проверяемое на их середине, — не более 0,01—0,02 мм;
- поверхности стенок и спиральных канавок должны быть полированными для предотвращения налипания смолы в процессе сверления;
- оптимальный угол при вершине сверл должен составлять 122—130°, угол спинки зуба — 30—35°, угол крутизны спирали — 25—30° (рис. 5.16);
- оптимальная скорость резания твердосплавными сверлами составляет 25—50 м/мин;
- стойкость сверла — 2000 — 4000 отверстий, после чего оно перетачивается и очищается от налипших связующих веществ материала платы; твердосплавные сверла допускают 5—6 переточек.

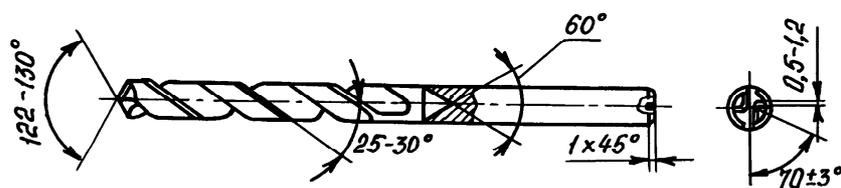


Рис. 5.16. Сверло для печатных плат

Диаметр сверла рассчитывается по уравнению

$$D_c = D_0 + 0,7 (\Delta_1 + \Delta_2),$$

где  $D_0$  — диаметр отверстия;  $\Delta_1$  — предельно допустимое отклонение диаметра отверстия, ( $\pm 0,05$  мм);  $\Delta_2$  — допустимое уменьшение диаметра после охлаждения заготовки (5 % от толщины платы), мм.

В качестве оборудования для сверления отверстий в ПП применяются многшпиндельные станки с программным управлением, имеющие автоматизированный привод по двум координатам. К таким станкам предъя-

являются следующие требования: жесткость конструкции; точность и высокая скорость позиционирования; максимальное число оборотов шпинделя; высокие скорости хода шпинделя.

Применение в сверлильных станках вместо традиционных чугунных станин гранитных обеспечивает вибропоглощение, снижает температурные деформации. Оптимальное число оборотов шпинделя лежит в диапазоне 45 000—120 000 об/мин. Скорость обратного хода достигает 25 м/мин. В станках современного типа применяют автоматическую смену сверл по программе, управление от мини-ЭВМ или микропроцессора (табл. 5.7).

Основные проблемы при сверлении отверстий в платах — повышение долговечности сверл, борьба с наволакиванием размягченной смолы на сверла и на медные кромки отверстий, препятствующим последующей металлизации отверстий. Для борьбы с этим явлением предложены: применение охлаждающих сред (воды, водяного тумана, сжатого воздуха) в зоне сверления; сверление под водой (технически трудно осуществимо); гидроабразивная очистка поверхности отверстий после сверления.

Табл. 5.7. Технические характеристики сверлильных станков с программным управлением

Параметр	СФ-4 (СССР)	Alpha-Z (США)	ABL-2м (Schmoll, Германия)	AFIG (Micromat, Швейцария)
Число шпинделей	4	5	2—6	1—2
Поле сверления, мм	500×300	630×630	500×500	470×610
Частота вращения шпинделя, 10 <sup>3</sup> об/мин	60	90	60	90
Максимальное число двойных ходов в минуту	100	200	300	350
Точность позиционирования, мм	±0,01	±0,005	±0,005	±0,01

*Гидроабразивная обработка* с использованием шлифовальных микропорошков используется при подготовке поверхности платы к проведению технологического процесса (для зачистки поверхности фольгированного диэлектрика). Механизированную механическую подготовку проводят также крацеванием вращающимися капроновыми или нейлоновыми щетками, на которые подаются струи абразивной суспензии. Заготовка при этом перемещается с помощью конвейера со скоростью 0,5 — 1,0 м/мин. Обрабатываются заготовки с минимальными размерами 100×100 мм и максимальными 500×500 мм. Расход воздуха при полной нагрузке 13 м<sup>3</sup>/мин, потребляемая мощность 1,6 кВт.

Установка гидроабразивной зачистки поверхности фольгированного диэлектрика от оксидной пленки и отверстий от заусенцев, наволакиваемой смолы и стружки типа АРСМ 3.190.000 облегчает последующую операцию подтравливания диэлектрика, позволяет исключить ручной труд. Абразивный материал — микропорошок М40 — подается с помощью 21 форсунки под давлением сжатого воздуха. Для повышения равномерности форсунки покачиваются на угол 20—40° с числом качаний 35 — 60 в минуту.

Для формирования переходных отверстий, вырезки пазов, разделения керамических коммутационных плат используется автоматизированная лазерная установка СТ-403 НПО "Спектр" (Беларусь), имеющая рабочее поле координатного стола 150×150 мм, погрешность позиционирования ±10 мкм. Размеры отверстий составляют 130±20 мкм, производительность 600 тыс. отверстий в час. Длина волны лазерного излучения 1,06 мкм, длительность импульса 200—1000 мкс, максимальная энергия 10 Дж.

## 5.8. ТЕХНОЛОГИЯ ОДНОСТОРОННИХ И ДВУСТОРОННИХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Односторонние ПП изготавливают как негативным, так и позитивным методом, используя односторонний фольгированный диэлектрик. Технологический процесс по негативному методу включает следующие операции (рис. 5.17):

- подготовка поверхности заготовки: механическая и химическая очистка поверхности от оксидов, остатков смазки и других загрязнений;
- обезжиривание при 45—60 °С в растворах следующего состава: 30—35 г/л тринатрийфосфата ( $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ), 30—35 г/л кальцинированной соды ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ), 3—5 г/л моющего средства "Прогресс";
- промывка в проточной холодной воде;
- активирование в 20—25 %-м растворе  $\text{HCl}$  при температуре 20 °С в течение 0,2—0,3 мин;
- промывка в холодной и горячей воде;
- сушка поверхности заготовки;
- нанесение защитного рисунка схемы сеткографическим или фотоспособом;
- травление незащищенных участков металлической фольги;
- удаление резиста химическим путем;
- пробивка или сверление отверстий; *1*
- нанесение защитного покрытия на плату.

Для облегчения монтажа навесных элементов со стороны их установки на плату наносят маркировку, для ограничения растекания припоя по печатным проводникам — защитные маски для пайки. Для защиты от влияния окружающей среды после изготовления платы покрывают защитным лаком.

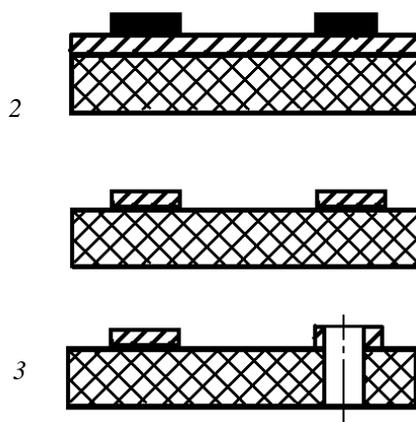


Рис. 5.17. Схема технологического процесса изготовления ОПП:  
*1* – нанесение защитного рисунка; *2* – получение проводников; *3* – выполнение отверстий

При позитивном методе после нанесения защитного рисунка гальванически осаждают покрытие, устойчивое к травлению (сплав олово—свинец, серебро), затем сверлят отверстия и осуществляют травление рисунка. Процесс получения ПП субтрактивным химическим методом наименее трудоемок, легко механизуется, обеспечивает высокую разрешающую способность при производительности до 1000 плат/ч. Недостаток — наличие бокового подтравливания элементов проводящего рисунка. Область применения — бытовая РЭА, техника связи, блоки питания.

Двусторонние ПП с переходными электрическими соединениями изготавливают комбинированными негативным или позитивным методами. При *комбинированном негативном методе* экспонирование осуществляют с фотонегатива, проводящий рисунок схемы получают травлением меди с пробельных мест, сверлят отверстия, затем выполняют металлизацию отверстий электрохимическим методом (рис. 5.18).

Технологический процесс включает следующие операции:

- получение контура заготовки (штамповка, резка роликовыми ножницами);
- подготовка поверхности заготовки;
- нанесение негативного рисунка схемы, ретуширование;
- травление металлической фольги с пробельных мест;
- нанесение защитной пленки лака для защиты всей поверхности платы от химического меднения краскораспылителем и подсушивание при температуре 50—60 °С (цапонлак, бакелитовый лак, клей АК-20);
- сверление отверстий;
- химическое меднение;
- снятие защитного слоя лака;
- гальваническое меднение отверстий;
- снятие фоторезиста;
- покрытие проводников припоем ПОСВ 33 для обеспечения их паяемости.

К преимуществам метода относятся освоенность процесса производства и широкая номенклатура травителей. Недостатки — возможность срыва контактных площадок при сверлении, необходимость специальных контактирующих приспособлений при металлизации отверстий, вредное воздействие химических растворов на платы, большая величина подтравливания.

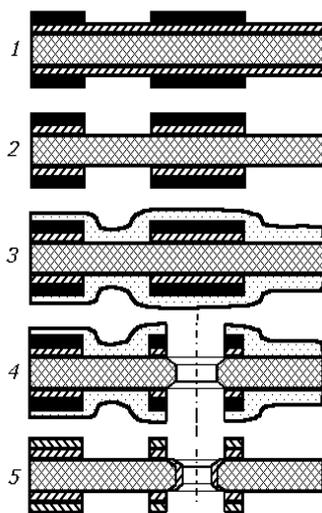


Рис. 5.18. Схема процесса изготовления ДПП комбинированным негативным методом:  
1 – нанесение защитного рельефа; 2 – травление меди; 3 – нанесение лака;  
4 – сверление и зенкование отверстий; 5 – металлизация отверстий

При комбинированном позитивном методе выполняются следующие операции (рис. 5.19):

- получение контура заготовки и подготовка ее поверхности;
- нанесение позитивного рисунка схемы;
- нанесение защитного слоя лака (нитроклей АК-20, эмаль ХСЭ, ХСЛ и др.) для предохранения от воздействия химически активных растворов при химической металлизации (количество слоев 2—3, нанесение окунанием, поливом или с помощью краскораспылителей, сушка в сушильных печах в течение 20—40 мин при температуре 60—80 С);
- сверление отверстий в плате;

- химическое меднение отверстий слоем толщиной 1—2 мкм со скоростью 20—30 мкм/ч;
- гальваническое меднение толщиной 25—30 мкм;
- удаление защитного слоя лака;
- нанесение металлического резиста для защиты проводников и отверстий от травления (серебрение толщиной 10—12 мкм, гальваническое покрытие сплавами Sn—Pb, Sn—Bi, ПОСВ33 толщиной 20—25 мкм);
- удаление фоторезиста;
- травление пробельных мест;
- оплавление металлического резиста (необходимо для удаления припоя из отверстий и улучшения паяемости покрытия);
- контроль платы, маркировка.

Гальванически нанесенный металлический резист из сплава Sn—Pb имеет пористую структуру, быстро окисляется, теряет способность к пайке. Для устранения этих недостатков проводят оплавление резиста либо с помощью ИК-излучения, либо в нагретой жидкости (глицерине) или газе. В результате покрытие приобретает структуру металлургического сплава и хорошую паяемость.

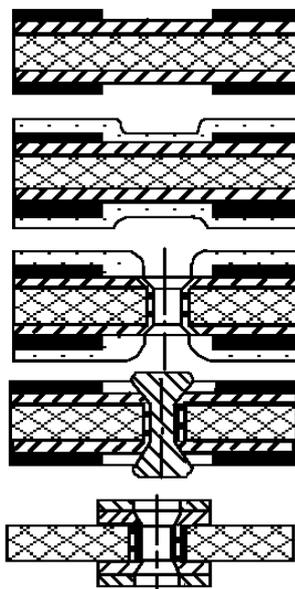


Рис. 5.19. Схема процесса изготовления ДПП комбинированным позитивным методом:  
 1 – нанесение защитного рельефа; 2 – нанесение лака; 3 – сверление и металлизация отверстий;  
 4 – нанесение металлического резиста; 5 – травление и оплавление резиста

В связи с повышением требований к качеству плат используют аддитивные методы, которые устраняют такие недостатки субтрактивных, как подтравливание проводников, неравномерная толщина металлизации отверстий, большой расход медной фольги и травильных растворов.

При *аддитивном методе* изготовления ДПП используют нефольгированный диэлектрик с введенным в него катализатором Pd:Sn = 1:3. Технологический процесс включает следующие операции (рис. 5.20):

- подготовка поверхности диэлектрика (очистка);
- нанесение адгезива путем погружения платы в композицию на основе нитрильного каучука толщиной 20—30 мкм либо полимера АБС-2 и вытягивания из раствора полимера со скоростью 20—100 мм/мин с последующей сушкой при температуре 130—140 °С в течение 1,5—2 ч;
- сверление и очистка отверстий в плате;

- нанесение защитного негативного рисунка схемы, обладающего повышенной стойкостью к высокощелочному составу ванны химического меднения;
- подтравливание поверхностей диэлектрика, открытых для нанесения меди, в растворе фторборатной или хромовой кислоты для улучшения адгезии проводников к подложке;
- химическое меднение в течение 8—16 ч;
- удаление защитного резиста;
- создание неметаллизированных отверстий;
- нанесение маски для пайки трафаретной печатью;
- лужение проводников и металлизированных отверстий в плате.

Процесс нанесения толстослойной (25—35 мкм) химической меди требует специального оборудования, оснащенного системами дозирования добавок в ванну, непрерывной фильтрации раствора. Во время меднения выделяется водород, поэтому необходимо непрерывное покачивание плат со скоростью 5—10 качаний в минуту при длине хода до 50—100 мм, а также применение ЭВМ для автоматического поддержания концентрации растворов, pH, температуры и уровня раствора в ваннах.

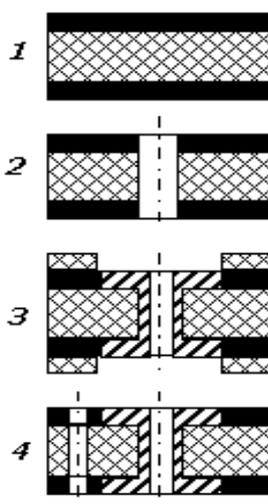


Рис. 5.20. Схема процесса изготовления ДПП аддитивным методом:  
 1 – нанесение адгезива; 2 – сверление отверстий; 3 – химическое меднение;  
 4 – сверление металлизированных отверстий

Применение аддитивного метода ограничено его невысокой производительностью, трудностью получения хорошей адгезии проводников с основой, интенсивным воздействием растворов на диэлектрик.

При *полуаддитивном методе* изготовления ДПП используется нефольгированный диэлектрик без введенного катализатора, поэтому обязательными являются операции сенсibilизации и активации. Процесс включает следующие операции (рис. 5.21):

- подготовка поверхности диэлектрика и нанесение адгезива;
- сверление и очистка отверстий;
- сенсibilизация и активация всей поверхности;
- химическое меднение слоем толщиной 2—3 мкм для трафаретной печати и 4—6 мкм для фотопечати;
- создание защитного рисунка схемы;
- гальваническое меднение (усиление меди);
- удаление резиста и травление;
- создание неметаллизированных отверстий;

- нанесение маски для пайки и лужение печатных проводников.

В настоящее время химическое меднение ведут на периодических токах: импульсных, реверсных и произвольной формы, что улучшает микрорельеф покрытий, снижает внутренние напряжения и сокращает время осаждения.

При изготовлении ДПП методом травления фольгированного диэлектрика требуется до 40 операций с использованием драгоценных металлов (хлористого палладия) и токсичных травящих растворов. Ширина проводников и расстояние между ними — около 0,2—0,3 мм, причем уменьшение размеров снижает прочность сцепления с подложкой. Разработана технология *рельефных ПП*, свободная от перечисленных выше недостатков. Подложка платы изготавливается путем литья или прямого прессования из реактопласта типа ДСВ2-Р-2Н, при этом формируются переходные отверстия, конструктивные элементы, а также углубления для проводников (рис. 5.22). Матрицу для пресс-формы получают путем глубокого химического травления. Для создания платы больших размеров и малой толщины необходима терморихтовка. Затем поверхности придается шероховатость с одновременным удалением облоя и притуплением острых кромок отверстий.

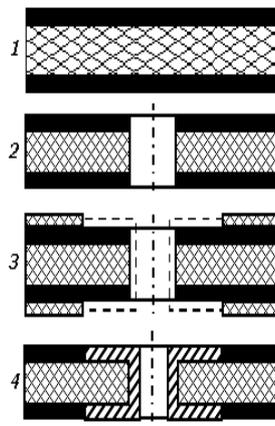


Рис. 5.21. Схема процесса изготовления печатных плат полуаддитивным методом:  
1 – нанесение адгезива; 2 – сверление отверстий; 3 – подготовка поверхности и нанесение защитного рельефа; 4 – гальваническая металлизация

На установке магнетронного распыления на обе стороны подложки наносится медный слой с соответствующим подслоем, покрывающий внутренние поверхности отверстий. Далее слой наращивается гальванически до 25 мкм. Затем подложка шлифуется на глубину, превышающую толщину нанесенного слоя. Несошлифованная медь в рельефе и образует рисунок проводников, которые облуживаются сплавом олово—свинец.

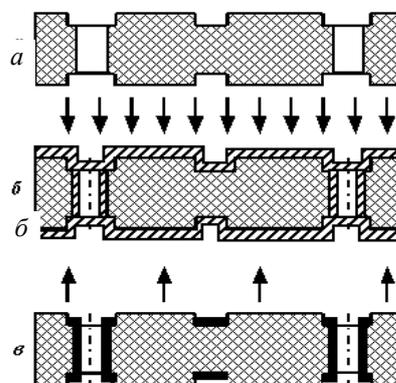


Рис. 5.22. Схема технологического процесса получения рельефных плат:  
а – штамповка; б – напыление; в – шлифование

Преимущества метода: минимальная ширина проводников 0—1мм; прочность сцепления с подложкой в 2 раза выше по сравнению с аддитивным методом; сокращение производственных площадей в 3 раза; улучшение условий труда, уменьшение загрязнения окружающей среды. Недостаток — сложность внесения изменений в рисунок платы.

## 5.9. ТЕХНОЛОГИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Развитие современной радиоэлектроники характеризуется широким применением микросхем различной сложности (ИМС, БИС и СБИС) в качестве основных компонентов ЭА. Сложность и большая функциональная плотность современной аппаратуры потребовала огромного числа коммутационных соединений, которые можно осуществить, только используя многослойный печатный монтаж.

С 60-х гг. для всей электроники характерно обращение к цифровой обработке сигналов. Как следствие прогресса в этой области, постоянно растет скорость обработки электрических сигналов в единицу времени и плотность компоновки элементов в единице объема. Это предъявляет в качестве основных требования к системе монтажа максимальные помехозащищенность и плотность проводников.

Проблема помехозащищенности давно являлась наиболее важной в технике передачи информации. Собственные помехи системы обусловлены взаимным воздействием внутренних проводников путем емкостной и (или) индуктивной связи. Внешние помехи возникают за счет электромагнитного воздействия системы электропитания, цепей ввода и вывода сигналов. Использование МПП позволяет в 10 раз уменьшить электромагнитные помехи за счет печатных экранов.

*Многослойная печатная плата* состоит из ряда склеенных печатных слоев, в которых находятся сигнальные проводники, переходные отверстия, экраны, шины питания, контактные площадки или выступы для присоединения выводов элементов. Сохраняя все достоинства печатного монтажа, МПП имеют дополнительные преимущества:

- более высокая удельная плотность печатных проводников и контактных площадок (20 и более слоев);
- уменьшение длины проводников, что обеспечивает значительное повышение быстродействия (например, скорость обработки данных в ЭВМ);
- возможность экранирования цепей переменного тока;
- более высокая стабильность параметров печатных проводников под воздействием внешних условий.

Недостатки МПП:

- более жесткие допуски на размеры по сравнению с ОПП и ДПП;
- большая трудоемкость проектирования и изготовления;
- применение специального технологического оборудования;
- тщательный контроль всех операций;
- высокая стоимость и низкая ремонтпригодность.

В настоящее время МПП нашли применение для изготовления панелей ЭВМ, объединяющих конструктивно ИМС, ЭРЭ и коммутационные элементы, а также в космической и авиационной аппаратуре. Основные способы получения МПП классифицируют по методу создания электрических межслойных соединений (рис. 5.23).

В первой группе методов электрическая связь между проводниками, расположенными на различных слоях платы, осуществляется с помощью механических деталей: штифтов, заклепок, пистонов, упругих лепестков. МПП изготавливается из нескольких ДПП путем прессования, в отверстия вставляются предварительно облуженные

женные штифты, которые затем под действием электрического тока, проходящего через штифт, разогреваются, образуя с помощью припоя электрическое соединение с печатными проводниками (рис. 5.24, а). В отверстия могут вставляться также заклепки, пистоны, которые облуживаются по торцам и развальцовываются (рис. 5.24, б). Соединения могут осуществляться по соприкасающимся фланцам пистонов, а также путем соединения предварительно отбортованных контактных площадок пистоном, что уменьшает размеры пакета (рис. 5.24, в). Эти методы весьма трудоемки, плохо поддаются автоматизации и не обеспечивают высокого качества межслойных соединений.

Метод выступающих выводов характеризуется тем, что при его осуществлении межслойные соединения образуются за счет выводов, выполненных из полосок медной фольги, выступающих с каждого печатного слоя и проходящих через перфорированные отверстия в диэлектрических межслойных прокладках. Выводы отгибаются на наружную сторону МПП и закрепляются пайкой в специальных колодках. Метод включает следующие операции (рис. 5.25):



Рис.5.23. Основные способы получения МПП

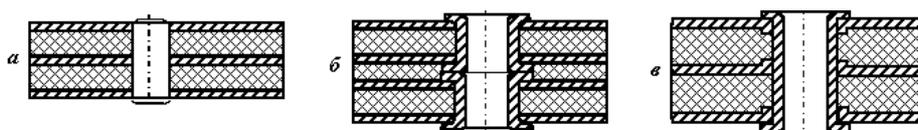


Рис. 5.24. Соединения с помощью штифта (а), пистонов, соприкасающихся по фланцам (б) и предварительно отбортованных контактных площадок (в)

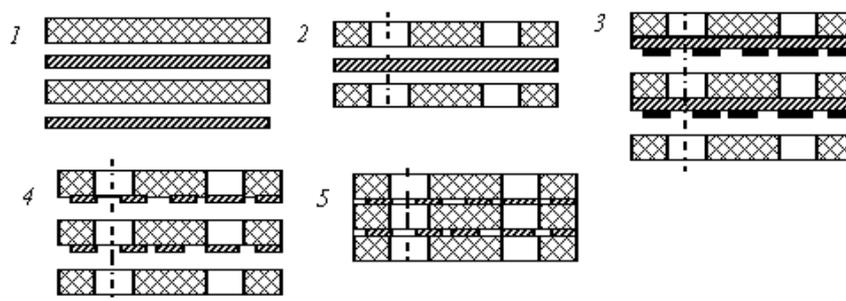


Рис. 5.25. Стадии формирования МПП методом выступающих выводов:  
1 – нарезка заготовок; 2 – перфорирование диэлектрика; 3 – нанесение рисунка на слой;  
4 – травление меди; 5 – прессование пакета

- изготовление заготовок из стеклоткани и медной фольги (нарезка в размер);
- перфорирование стеклоткани;
- склеивание заготовок перфорированного диэлектрика с медной фольгой;
- получение защитного рисунка схемы отдельных слоев;
- травление меди с пробельных мест;
- прессование пакета МПП;
- отгибка выводов на колодки и закрепление их;
- облуживание поверхности выводов, механическая обработка платы по контуру;
- контроль, маркировка.

При данном методе используется более толстая медная фольга (до 80 мкм), платы допускают установку только ИМС с планарными выводами. Количество слоев не превышает 20. Преимущества метода — высокая жесткость и надежность межслойных соединений, недостатки — сложность механизации процесса разводки выступающих выводов и их закрепления на плате, а также установки навесных элементов.

*Метод открытых контактных площадок* основан на создании электрических межслойных соединений с помощью выводов навесных элементов или перемычек через технологические отверстия, обеспечивающие доступ к контактным площадкам, и включает следующие операции (рис. 5.26):

- получение заготовок фольгированного материала;
- нанесение защитного рисунка схемы на каждый слой;
- травление меди с пробельных мест и удаление резиста;
- пробивка отверстий в слоях;
- прессование пакета МПП;
- облуживание контактных площадок, выполнение электрических соединений.

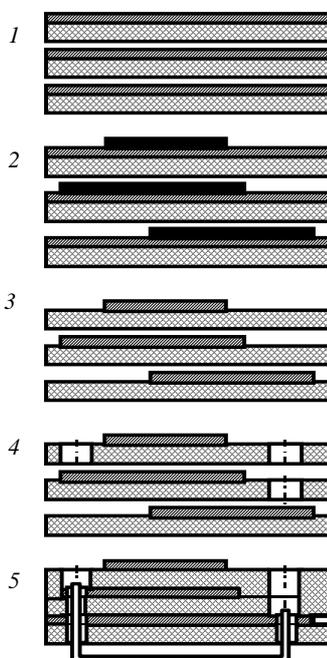


Рис. 5.26. Стадии формирования МПП методом открытых контактных площадок:  
 1 – получение заготовок; 2 – нанесение защитного рельефа на слой; 3 – травление меди;  
 4 – пробивка отверстий; 5 – прессование пакета и выполнение соединений

В слоях вырубаются отверстия: для штыревых выводов круглые, для планарных прямоугольные. Для увеличения площади контакта диаметр площадок делают больше диаметра отверстий. МПП являются ремонтпригодными, так как допускается перепайка выводов ЭРЭ. Количество слоев — до 12.

Недостатки метода: возможность попадания клея на контактные площадки при склеивании слоев и трудоемкость его удаления скальпелем; трудность автоматизации процесса пайки выводов в углублениях; отсутствие электрической связи между слоями; низкая плотность монтажных соединений.

*Метод металлизации сквозных отверстий* характеризуется тем, что собирают пакет из отдельных слоев фольгированного диэлектрика (внешних — одностороннего, внутренних — с готовыми печатными схемами) и межслойных склеивающихся прокладок, пакет прессуют, а межслойные соединения выполняют путем металлизации сквозных отверстий. Технологический процесс включает следующие операции (рис. 5.27):

- получение заготовок фольгированного диэлектрика и межслойных склеивающихся прокладок;
- получение рисунка печатной схемы внутренних слоев фотохимическим способом аналогично ДПП;
- пресование пакета МПП при температуре 160—180 °С и давлении 2—5 МПа;
- сверление отверстий в пакете;
- получение защитного рисунка схемы наружных слоев фотоспособом;
- нанесение слоя лака;
- подтравливание диэлектрика в отверстиях в смеси серной и плавиковой кислот в соотношении 4:1 при температуре (60±5) °С в течение 10—30 с. При этом растворяется смола стеклопластиков и стеклоткань склеивающихся прокладок устранения следов наволакивания смолы, обнажения контактных площадок и увеличения площади контактирования;

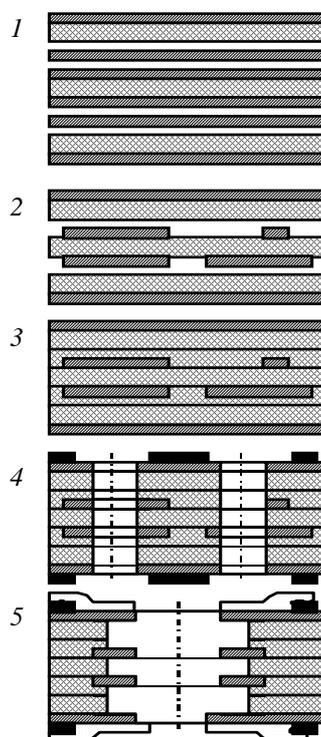


Рис. 5.27. Стадии формирования МПП методом металлизации сквозных отверстий:

- 1 – получение заготовок; 2 – нанесение рисунка на внутренних слоях; 3 – пресование пакета;  
4 – сверление отверстий; 5 – подтравливание диэлектрика

- химическое меднение сквозных отверстий;

- удаление слоя лака;
- гальваническое меднение отверстий и контактных площадок до толщины 25—30 мкм в отверстиях;
- нанесение металлического резиста гальваническим путем (сплавы Sn—Pb, Sn—Ni);
- удаление защитного слоя рисунка и травление меди с пробельных мест;
- осветление (оплавление) металлического резиста;
- механическая обработка МПП (снятие технологического припуска);
- контроль и маркировка.

Качество МПП, изготовленных методом металлизации сквозных отверстий, в значительной мере зависит от надежности межслойных соединений — торцов контактных площадок с металлизированными отверстиями. Надежное соединение образуется при удалении со стенок отверстий пленки эпоксидной смолы, наволакиваемой при сверлении. Наиболее распространенный способ очистки отверстий перед металлизацией — химическое подтравливание диэлектрика стенок отверстий. Для этого используются растворы кислот или их смеси, однако смеси кислот склонны проявлять продукты травления в порах диэлектрика. За рубежом наибольшее распространение получил способ травления диэлектрика не в смеси кислот, а сначала в серной, а затем в плавиковой. При повышении температуры раствора с 30 до 60 °С глубина подтравливания диэлектрика увеличивается от 2—5 до 40—50 мкм, а при увеличении времени воздействия травящего раствора с 1 до 5 мин глубина подтравливания растет от 25—50 до 100—120 мкм.

В связи с тем, что для подтравливания используются агрессивные растворы (смесь горячих концентрированных кислот), требующие постоянного контроля и последующей нейтрализации обработанных заготовок, был предложен способ сухого плазменного травления. Он обеспечивает хорошую адгезию меди в отверстиях, короткий цикл обработки и отсутствие побочных эффектов. В качестве реагента используется низкотемпературная плазма из смеси газов, например кислорода и фреона при температуре 50—350 °С и давлении 0,13—260 ГПа. Плазма содержит свободные радикалы (до 90) и ионы (1 %). Рекомендуется перед травлением предварительный подогрев плат до 50—70 °С. Плазма превращает эпоксидную смолу в летучее вещество, легко удаляемое из отверстий. Никаких промывок и сушки при плазменном методе не требуется. Этот процесс сухой и полностью автоматизирован. При обработке каждая МПП помещается в пространство между двумя параллельно расположенными алюминиевыми пластинами—электродами. Электроды имеют отверстия, совпадающие с отверстиями в МПП.

Метод металлизации сквозных отверстий является основным и наиболее перспективным в производстве МПП, так как не имеет ограничения количества слоев, легко поддается автоматизации и обеспечивает наибольшую плотность печатного монтажа. Он позволяет изготавливать МПП, пригодные для размещения на них элементов с планарными и штыревыми выводами. Более 80 % всех МПП, производимых в мире, изготавливается этим методом.

*Метод попарного прессования* характеризуется тем, что внутренние слои МПП изготавливаются на одной стороне заготовки из двустороннего фольгированного диэлектрика, межслойные соединения — путем химико-гальванической металлизации отверстий в заготовках, полученные слои прессуются, а рисунок на наружных сторонах платы выполняется комбинированным позитивным методом.

В конструкции МПП нет прямой электрической связи между внутренними слоями многослойной структуры, она осуществляется через внешние слои. Сложность переходов не дает возможности получить высокую плотность печатного монтажа. Число слоев МПП — не более четырех. Технологический процесс включает следующие операции (рис. 5.28):

- получение заготовок;
- нанесение защитного рисунка схемы внутренних слоев;
- травление меди с пробельных мест и удаление защитного рисунка;
- выполнение межслойных электрических соединений между внутренними и наружными слоями химико-гальванической металлизацией;
- прессование пакета МПП (металлизированные отверстия переходов заполняются смолой во избежание их разрушения при травлении);
- сверление отверстий и нанесение защитного рисунка схемы наружных слоев;
- химическое меднение сквозных отверстий;
- гальваническое меднение и нанесение металлического резиста;
- травление меди на наружных слоях;
- осветление металлического резиста;
- механическая обработка;
- контроль, маркировка.

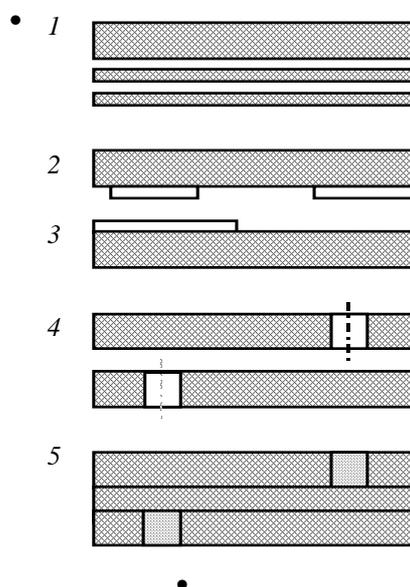


Рис. 5.28. Стадии формирования МПП методом попарного прессования:  
 1 – получение заготовок; 2 – получение рисунка на внутренних слоях;  
 3 – выполнение межслойных переходов; 4 – прессование пакета

Попарным прессованием изготавливаются МПП, на которых размещаются навесные элементы с планарными и штыревыми выводами. Недостатки метода — низкая производительность, невозможность получения большого числа слоев и высокой плотности печатного монтажа.

*Метод послойного наращивания* характеризуется тем, что при его осуществлении межслойные соединения выполняют сплошными медными переходами (столбиками меди), расположенными в местах контактных площадок. Технологический процесс включает следующие операции (рис. 5.29):

- получение заготовок стеклоткани и фольги;
- перфорирование диэлектрика;
- наклеивание перфорированной заготовки диэлектрика на фольгу;
- гальваническая металлизация отверстия и химико-гальваническая металлизация второй наружной поверхности заготовки;

- нанесение защитного рисунка схемы и травление меди;
- гальваническое наращивание меди в отверстиях и химико-гальваническая металлизация наружной поверхности диэлектрика;
- травление меди с пробельных мест;
- получение многослойной структуры путем многократного повторения операций химико-гальванической металлизации и травления;
- напрессовывание диэлектрика;
- получение защитного рисунка печатного монтажа наружного слоя;
- травление меди с пробельных мест и облуживание припоем;
- механическая обработка;
- контроль и маркировка.



Рис. 5.29. Стадии формирования МПП методом послойного наращивания

Послойным наращиванием получают МПП, на которых размещают только навесные элементы с планарными выводами. Недостатком данного метода является нетехнологичность конструкции, так как нельзя использовать фольгированные диэлектрики и необходимо вести последовательный цикл изготовления многослойной структуры. Стоимость изготовления МПП высокая. Достоинства метода — возможность получения большого числа слоев (5 и более) и самые надежные межслойные контактные соединения. Результаты качественного сравнения МПП, изготовленных различными методами, приведены в табл. 5.8.

К базовым технологическим процессам получения МПП относятся прессование пакета, механическая обработка и контроль. Прессование пакета МПП является одним из самых важных процессов изготовления МПП, так как от качества его выполнения зависят электрические и механические характеристики готовой МПП. Технологический процесс прессования состоит из следующих операций: подготовка поверхности слоев перед прессованием; совмещение отдельных слоев МПП по базовым отверстиям и сборка пакета; прессование пакета.

Табл. 5.8. Сравнительная характеристика методов при изготовлении МПП

Показатель	Метод изготовления					
	механическими деталями	попарным прессованием	открытых контактных площадок	выступающих выводов	послойного наращивания	металлизацией сквозных отверстий
Количество слоев	6	4	12	5	15	20
Плотность печатного монтажа	Н	С	Н	С	С	В

Надежность межслойных соединений	Н	С	В	В	В	С
Стойкость к внешним воздействиям	С	С	С	В	В	С
Ремонтопригодность	Н	Н	В	С	С	Н
Технологическая себестоимость	В	С	С	В	В	С

**Примечание.** Н — низкая; С — средняя; В — высокая.

Для подготовки поверхности слоев к прессованию применяют механическую зачистку абразивами, обезжиривание поверхности органическими растворителями и легкое декапирование фольги. При прессовании экранов с большими участками фольги ее поверхность оксидируют для лучшей адгезии при склеивании. Текстура наполнителя (прокладок из стеклоткани) должна быть равномерно пропитана смолой, иначе при травлении химические растворы проникают в свободные полости и снижают тем самым сопротивление изоляции.

Совмещение отдельных слоев МПП по базовым отверстиям осуществляют в специальном приспособлении (рис. 5.30), состоящем из верхней 1 и нижней плит 5, изготовленных из стали. Толщина плит составляет 15—20 мм и зависит от габаритов изготавливаемой платы. Плиты шлифуют по обеим плоскостям, направляющие колонки 2 обеспечивают их полную параллельность. В торцах плит выполняют отверстия для термодпар 4. Габаритные размеры нижней плиты должны быть больше прокладочных листов на 30—50 мм с каждой стороны по периметру, так как при прессовании возможно вытекание значительного количества смолы. Фиксирующие штыри 3 располагают через 100—150 мм по периметру платы в пределах технологического поля.

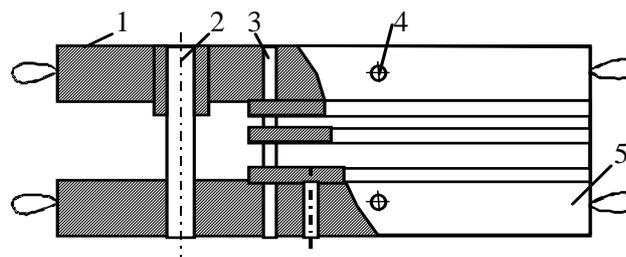


Рис. 5.30. Приспособление для прессования пакета МПП: 1 — верхняя плита; 2 — отверстие для термодпары; 3 — фиксирующий палец; 4 — направляющая колонка; 5 — нижняя плита

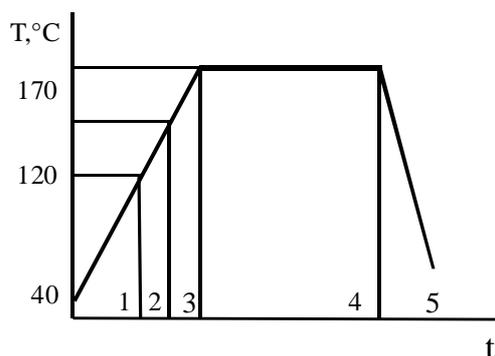


Рис. 5.31. Режим прессования пакета МПП: 1 — жидкость; 2 — гель; 3 — полимеризованная смола; 4 — давление; 5 — охлаждение

Для прессования МПП используют специализированные многоярусные гидравлические прессы, оборудованные системами нагрева, охлаждения плит и поддержания температуры с точностью  $\pm 3$  °С, регуляторами подачи давления с точностью порядка 3 %. Нагрев плит прессы осуществляют либо перегретым паром, либо

электричеством. Для ускоренного охлаждения в плиты встраивают коллекторы для подачи проточной водопроводной воды.

На качество прессования существенно влияет текучесть смолы и время ее полимеризации. Основным фактором в процессе прессования является правильно выбранный момент приложения максимального давления. Если создать давление до начала полимеризации смолы, то значительное ее количество будет выдавлено, а если после полимеризации, то получается плохая проклейка слоев, что приводит к расслоению. При большой скорости возрастания температуры основные реакции отверждения проходят быстро, продукт получается хрупким, неоднородным, со значительными внутренними напряжениями. С уменьшением скорости нагрева механические свойства диэлектрика улучшаются.

Сборку пакета МПП осуществляют в режимах "холодного" и "горячего" прессования. При первом режиме пресс-форму с МПП помещают между холодными плитами пресса, в котором происходит ее последующий нагрев до необходимой температуры со скоростью 15 °С/мин. На первой стадии прессования создают незначительное давление на пакет (0,15—0,2 МПа), а когда смола загустевает при температуре 130—140 °С, давление поднимают до 5—8 МПа. Окончательное отверждение продолжается в течение 40 мин, затем плиты пресса быстро охлаждают водой и, когда температура в пакете снизится до 40 °С, пресс раскрывают и извлекают готовый пакет (рис. 5.31). При "горячем" прессовании плиты нагревают до 160—170 °С, это ускоряет процесс прессования, дальнейший нагрев ведут со скоростью 15—50 °С/мин.

Для снятия напряжений, возникающих в пакете в процессе прессования и вызывающих затем коробление платы, после обрезки облоя МПП подвергают дополнительной тепловой обработке. Для этого ее наглухо зажимают между двумя жесткими пластинами и помещают на 30—40 мин в термошкаф при температуре 120—130 °С, затем оставляют в печи до медленного остывания.

Установленные режимы прессования требуют постоянной корректировки в зависимости от изменения технологических свойств склеивающихся прокладок стеклоткани. Поэтому стеклоткань периодически проверяют на содержание связующей смолы, ее текучести, времени полимеризации. Для более точного контроля времени приложения максимального давления при прессовании пакета измеряют электрическое сопротивление связующей смолы с помощью датчика, представляющего собой электроды в форме гребенки, полученной на фольгированном диэлектрике. Электрическое сопротивление падает с  $10^5$  МОм до 1 МОм в момент полного расплавления смолы, а затем растет в процессе ее полимеризации.

Для прессования МПП применяют специализированные многоярусные гидравлические прессы, оборудованные системами нагрева и охлаждения плит, устройствами для регулирования технологических режимов. Прессы обеспечивают плоскостность и параллельность плит в пределах 0,1 мм, время нагрева плит до рабочей температуры 20 мин, точность поддержания температуры на их плоскости  $\pm 3$  °С, давления  $\pm 3$  %. Повышение производительности прессования достигается на автоматических линиях (например, модель S75 MRT -372C-X-X-G фирмы Pasadena Hydraulics, США), в которых по заданной программе пресс-формы с обрабатываемыми пакетами МПП пневматическим автооператором перемещаются из позиции загрузки в нагретые плиты гидравлического пресса. Плиты сжимают пакеты в пресс-формах при низком давлении в течение заданного времени, а затем автоматически переключаются на высокое давление. В позицию загрузки устанавливается следующая партия пресс-форм. После выдержки заданного таймером времени полимеризации связующей смолы в пакетах МПП горячие и холодные плиты размыкаются, а автооператор перемещает прошедшие стадию полимеризации пакеты из горячих плит пресса в холодные для их остывания при заданном давлении. Одновременно на позицию прессования подается следующая пресс-форма из позиции загрузки, после чего плиты зажимаются и цикл повторяется.

## 5.10. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОВОДНЫХ ПЛАТ

Применение МПП экономически оправдано лишь в серийном и крупносерийном производстве ЭА. В мелкосерийном производстве на этапе разработки опытных образцов применяются другие методы, основанные на оптимальном сочетании печатного и объемного монтажа. Характерными особенностями таких комбинированных методов являются использование ДПП, имеющих шины земли и питания, контактные площадки под навесные ЭРЭ и ИМС, металлизированные переходные и монтажные отверстия. Монтаж остальных электрических цепей осуществляют путем раскладки проводов на одной из плоскостей платы и создания контактных соединений с элементами ДПП путем сварки или пайки.

Таким образом, имея стандартную конструкцию ДПП, изготовленную комбинированным позитивным методом, с помощью проводного монтажа получают конструкцию, аналогичную 8- или 9-слойной МПП. При этом отпадает необходимость изготовления большого числа фотошаблонов, применения прессования и других операций, характерных для МПП, что значительно сокращает цикл изготовления конструкции.

К комбинированным методам монтажа относятся: многопроводной упорядоченный фиксируемыми проводами, многопроводной неупорядоченный, стежковый неупорядоченный.

*Многопроводной монтаж фиксируемыми проводами* заключается в упорядоченном прокладывании изолированных проводов на поверхности ДПП, закреплении их в слое адгезива и соединении с печатным монтажом с помощью металлизированных монтажных отверстий. Метод разработан фирмой Kollmorgen Corporation (США) и называется Multiwire. Материалом для изготовления многопроводных плат служит фольгированный диэлектрик, на поверхности которого субтрактивным методом получают печатный монтаж. На обезжиренные поверхности плат наносят адгезионный слой, состоящий из прокладочной стеклоткани СПТ-3-0.025 и клея ВК-32-200. Для монтажа применяют провод диаметром 0,1—0,2 мм в высокопрочной полиимидной изоляции (ПНЭТ-имид). Частичное отверждение адгезива осуществляется прессованием при температуре 90—100 °С и давлении 0,5 МПа.

Укладку монтажного провода осуществляют с помощью специальной головки, оснащенной ультразвуковым прижимом 1, ножом-отсекателем 2, трубкой 3 для подачи провода (рис. 5.32). Наконечник прижима спрофилирован таким образом, что в процессе укладки удерживает провод 4, утапливая его в адгезив 5, на поверхности платы 6 на 0,5 диаметра.

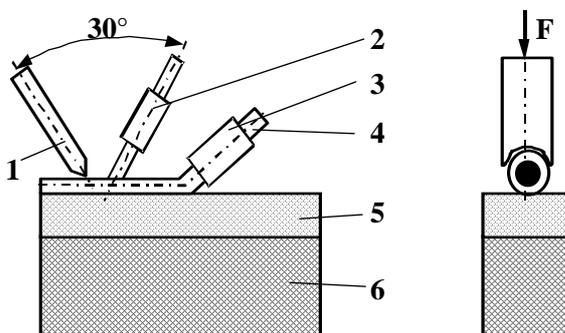


Рис. 5.32. Схема укладки монтажного провода

Технологические режимы укладки провода: частота УЗК 44—45 кГц, амплитуда 10 мкм, давление 16—18 кПа. УЗ-колебания обеспечивают размягчение адгезива и утапливание в него провода. После окончания трассировки провода головка останавливается и провод отрезается ножом. Полное погружение проводников в

слой адгезива и окончательное отверждение последнего происходит в результате прессования при температуре 180 С под давлением 1,0—1,5 МПа.

Плата с закрепленными в адгезиве монтажными проводами подается на операцию сверления. Монтажные отверстия сверлятся по программе таким образом, чтобы проводник в плате располагался по оси симметрии отверстия. Практически реализуется шаг координатной сетки 0,625 мм. В результате сверления возможно наволакивание диэлектрических материалов на торцы проводов. Поэтому необходима операция гидроабразивной очистки отверстий, которая проводится особо тщательно, так как вскрытая площадь при сверлении торцов монтажного провода достаточно мала.

Для укладки проводников в адгезив используется отечественная установка с программным управлением от перфоленты (рис. 5.33). Скорость координатных перемещений составляет 5,0 м/мин, точность позиционирования  $\pm 0,5$  мм, потребляемая мощность 1,5 кВт. Максимальные размеры платы 500×600 мм, поворот раскладывающей головки до 90°, ультразвуковой генератор УЗГ-3-0.4 мощностью 400 Вт.

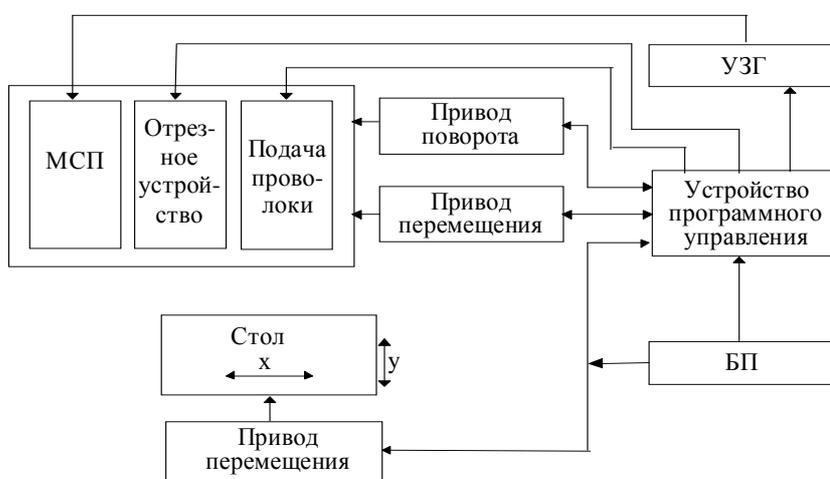


Рис. 5.33. Схема установки для трассировки проводов

Операцией, определяющей надежность электрического соединения проводного и печатного монтажа, является химико-гальваническая металлизация отверстий. Если на наружных слоях платы печатный монтаж не предусмотрен, то ее перед сверлением и металлизацией защищают технологическим лаком. Если печатный монтаж необходим, то применяют полуаддитивный метод (рис. 5.34).

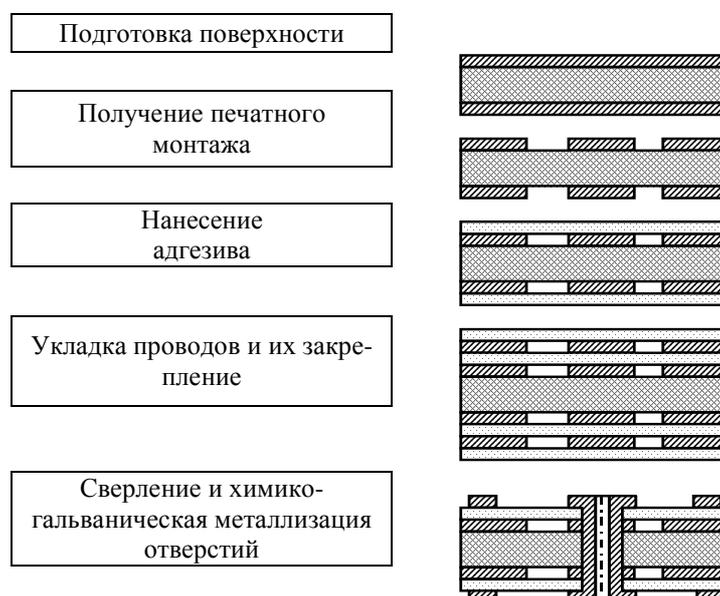


Рис. 5.34. Схема технологического процесса изготовления многопроводной платы

На одной стороне многопроводной платы можно разместить несколько слоев проводного монтажа, чередуя нанесение адгезива и раскладку проводов. Существенные недостатки метода — невысокая надежность монтажных соединений провода с металлизированными отверстиями, необходимость применения адгезива, высокая трудоемкость монтажа. Достоинства метода — высокая точность двустороннего монтажа с пересечением проводов, оперативное внесение изменений в монтаж, автоматизация трассировки проводов.

Для повышения надежности межслойных соединений разработан вариант многопроводного метода, отличающийся тем, что соединения объемных проводов и печатного монтажа осуществляются путем пайки проводов к монтажным площадкам, так как адгезионный слой наносится через трафарет и не закрывает отверстия и контактные площадки. Пайка выполняется монтажной головкой с программным управлением, ее производительность 300—400 точек в час. Метод экономичен при производстве плат в количестве 500—1000 шт/год.

Суть *многопроводного неупорядоченного монтажа незакрепленными проводами* заключается в произвольном прокладывании изолированных монтажных проводов на поверхности ДПП и образовании контактных соединений с печатным монтажом путем пайки или сварки. К этим методам относятся методы Tiers (пайкой) и Stitch-Wire (сваркой соединений), разработанные фирмами США. В отличие от метода Multiwire провода 1 (рис. 5.35) не приклеиваются к основанию платы 2, а остаются свободными и соединяются с монтажными площадками 4 указанными выше методами. В отверстия плат могут монтироваться элементы 3.

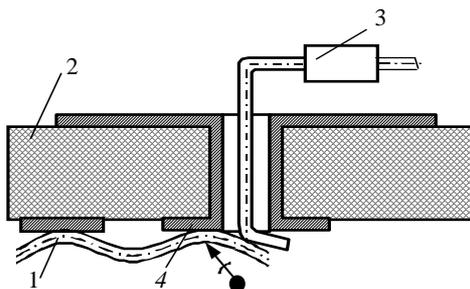


Рис. 5.35. Схема проводного монтажа незакрепленными проводами

Достоинства метода — простота изготовления, ремонтпригодность, автоматизация трассировки и пайки проводников, высокая точность монтажа. Недостатки — односторонняя установка ЭРЭ и ИМС, необходимость дополнительных контактных площадок, большая степень свободы монтажных проводов.

Для изготовления специальной ЭА, устойчивой к ударам и вибрациям, применяется метод Stitch-Wire, в котором монтажные соединения выполняются сваркой. Это потребовало внесения в конструкцию платы некоторых специальных элементов. Так, для монтажа применяется одножильный никелевый провод диаметром 0,25 мм во фторопластовой изоляции, а контактные площадки выполнены из нержавеющей стали, что обеспечивает необходимую точность и коррозионную стойкость контактного соединения. С этой целью на диэлектрическую основу с обеих сторон наносят фольгу из нержавеющей стали толщиной 76 мкм, на которой с внутренней стороны нанесен слой меди толщиной 35—50 мкм, а с наружной — тонкий слой никеля. Медное покрытие под стальными монтажными площадками выполняет функции теплоотвода (рис. 5.36). Разводка соединений осуществляется методом параллельного электрода с подачей импульса тока длительностью 2,5 мс. В процессе сварки провод 2 подается через трубчатый электрод 3 и прижимается к монтажной площадке с некоторым усилием. Под давлением происходит удаление изоляции, сплющивание провода и образование контакта. Нижний элект-

трод 1 подводится к монтажной площадке с противоположной стороны. При кратковременном импульсе выделение теплоты невелико, что не оказывает влияния на прочность сцепления фольги с основанием платы.

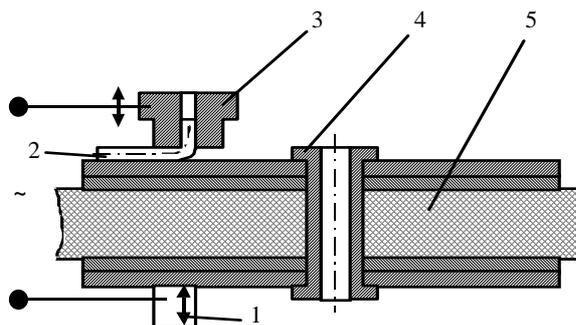


Рис. 5.36. Схема сварки монтажных проводов:

1,3 – электроды; 2 – провод; 4 – монтажная площадка; 5 – плата

*Стежковый монтаж* заключается в прокладывании изолированных проводов по кратчайшим расстояниям по поверхности ДПП и в монтажных отверстиях с образованием петель и последующим подпаиванием их к контактными площадкам платы. Процесс осуществляется на станках с ЧПУ, а в качестве инструмента применяют иглу из нержавеющей стали, которая имеет внутренний диаметр, превышающий диаметр провода ПЭВТЛК 0,1—0,2 мм на 0,08—0,1 мм, а также скос с углом заточки 50—75°, длину 25—35 мм.

Игла, проходя через монтажное отверстие, прокалывает пакет резиновых прокладок, которые задерживают провод при обратном ходе иглы (рис. 5.37, а). После трассировки резиновые прокладки стягивают с петель и проводят их лужение групповым методом в ванне припоя при температуре  $350 \pm 10$  °С в течение 5—6 с (рис. 5.37, б). Кабельная бумага предохраняет поверхность ДПП при лужении и удаляется после выполнения операции. Подгибку и пайку петель на контактные площадки (рис. 5.37, в) осуществляют вручную паяльником или на станках с ЧПУ.

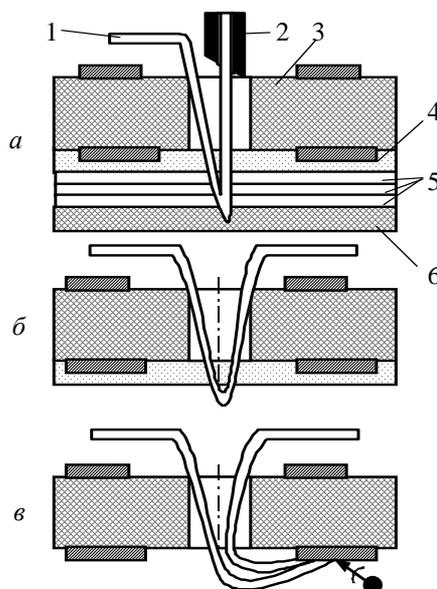


Рис. 5.37. Схема стежкового монтажа:

1 – провод; 2 – игла; 3 – плата; 4 – кабельная бумага; 5 – пакет резиновых прокладок; 6 – защитная пластина

Установка "Аракс" имеет координатный стол, перемещающийся с шагом  $\pm 0,025$  мм и максимальной скоростью 10 мм/с. Она позволяет вести стежковый монтаж на платах размерами 350×450 мм. Достоинства метода — снижение трудоемкости в 2—3 раза по сравнению с методами изготовления МПП, сокращение времени выпуска конструкторской документации с 30 дней для 6—8-слойной МПП до 5—6 дней, брак не превышает 5 %.

Несмотря на то что отдельные операции стежкового монтажа автоматизированы, в целом производительность процесса невелика, так как каждая операция требует продолжительного ручного труда при сборке и разборке различных приспособлений.

Дальнейшим развитием проводного монтажа явилась разработка плат третьего поколения без печатного монтажа. Основанием таких плат является лист толщиной 0,5—2 мм из проводящего материала (стали, алюминиевого сплава и т. д.), который выполняет роль теплоотвода от микросхем и является шиной с нулевым потенциалом. В основании платы выполнены пазы, заполненные эластичным материалом, через который пропущены тонкие изолированные провода марки ПЭВТЛК (рис. 5.38). Между пазами установлены на теплопроводный клей микросхемы с планарными и штыревыми выводами с шагом 2,5; 1,25 и 1 мм, а также другие ЭРЭ.

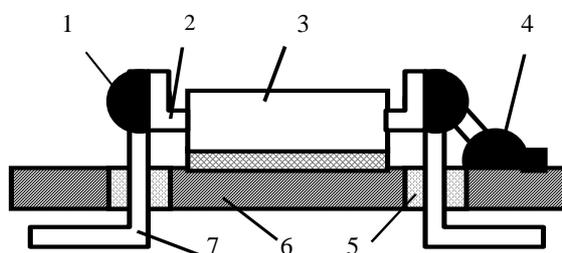


Рис. 5.38. Фрагмент конструкции теплопроводящей платы проводного монтажа:

1 – паяное соединение; 2 – вывод; 3 – элемент; 4 – контактная площадка; 5 – диэлектрический материал; 6 – проводящее основание; 7 – провод

Преимущества плат с теплоотводом перед МПП:

- улучшение теплоотвода в 2—3 раза;
- увеличение надежности работы, так как снижение температуры корпуса ИМС на 10 °С увеличивает надежность ее работы в 1,5—2 раза;
- повышение быстродействия из-за высокой тактовой частоты (65—100 МГц) благодаря мощным шинам питания и хорошей электрической развязке ИМС по питанию;
- отсутствие выброса химических стоков, содержащих тяжелые металлы (медь, никель, свинец, железо и др.), что в 20 раз экологически менее опасно;
- снижение затрат на разработку плат в 2 раза, производственных площадей в 5 раз.

Новым направлением в технике монтажа является применение *тканых коммутационных устройств* (ТКУ), представляющих собой тканый материал, изготовленный из электропроводящих и диэлектрических нитей, с закрепленными на нем ЭРЭ и ИМС. В общем виде ТКУ (рис. 5.39) представляет собой однослойное или многослойное изоляционное поле 1, изготовленное из диэлектрических нитей. С двух сторон поля во взаимно перпендикулярных направлениях по координатам  $x$  и  $y$  проложены электропроводящие нити 2 и 3, которые на наружной поверхности в заданных точках образуют монтажные узлы 4, выполняющие электрические соединения между отдельными электропроводящими нитями. На наружной поверхности поля сформированы контактные площадки 6, петли 5, служащие для присоединения выводов ЭРЭ, и удлиненные выводы 7, необходимые для подсоединения к разъемам.

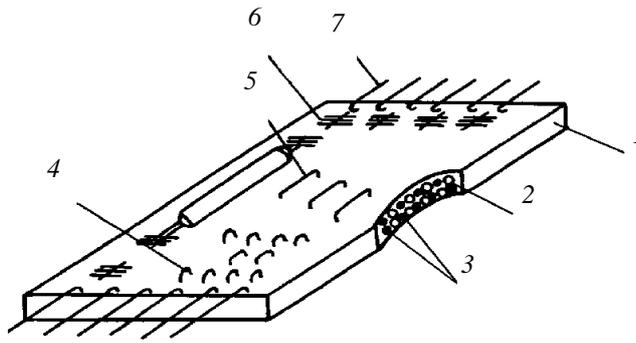


Рис. 5.39. Тканое коммутационное устройство

ТКУ изготавливаются на ткацких автоматах, дополнительно снабженных механизмами подачи и натяжения электропроводящих и диэлектрических нитей, а также петлеобразования. После изготовления ТКУ им придают жесткость. Применяются следующие способы фиксации тканой структуры:

- тепловая обработка продувкой горячим воздухом или паром с температурой 180—220 °С для размягчения термопластичных тканей и последующей фиксации структуры;
- оплавление исходного материала тканей для герметизации кромок, отверстий, контактных площадок;
- компаундирование путем заливки сеточной структуры пластмассами с целью повышения механической жесткости и прочности ТКУ;
- пластифицирование — заливка структуры составами на основе кремнийорганических каучуков для придания гибкости, эластичности, химической стойкости и повышения климатической стойкости;
- формование — тепловой нагрев ткани с целью придания ей определенной пространственной формы и ее стабилизации.

Соединение электрических проводников в контактных узлах и присоединение навесных ЭРЭ осуществляются контактной микросваркой. ТКУ имеют электрическое сопротивление проводящих нитей не более 0,1 Ом, прочность изоляции до 1000 В, электрическое сопротивление изоляции 10—12 МОм, температурный диапазон –50...+65 °С, затухание 110—120 дБ, электрическую емкость между электропроводящими нитями 33—38 пФ.

Функционально ТКУ подразделяются на четыре группы: конструктивы, платы, кабели и соединители (рис. 5.40). Каждая структура может быть одно- или многослойной с двухкоординатным, внутримодульным, внутриблочным или межблочным расположением нитей. Особенности технологии позволяют получать как гибкие и эластичные, так и жесткие коммутационные устройства плоской или объемной формы.

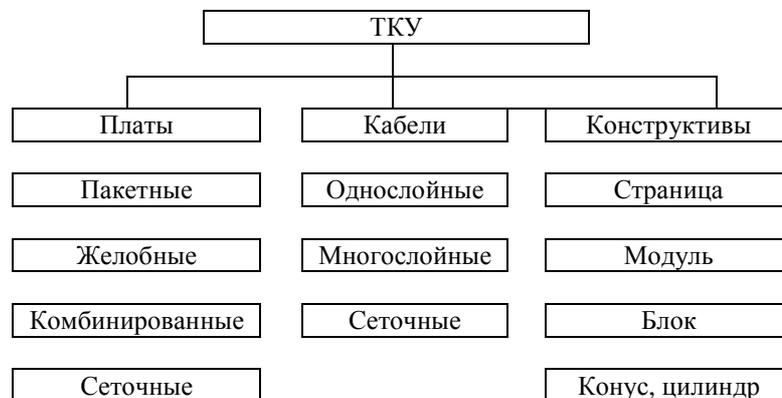


Рис. 5.40. Классификация ТКУ

С экономической точки зрения производство ТКУ при существующем уровне развития текстильной промышленности в 5—6 раз дешевле по сравнению с печатным и проводным монтажом за счет того, что трудоемкость снижается в 5—6 раз, затраты на материалы — в 7, а на оборудование — в 5 раз. Экономятся цветные и дорогостоящие металлы, химреактивы и т. д. ТКУ имеют высокую гибкость формы, что позволяет формировать блоки заданной конфигурации и значительно меньшей массы. ТКУ имеют высокую надежность в условиях повышенных механических и климатических воздействий. К недостаткам метода относятся невысокая точность изготовления коммутационных полей, трудоемкость присоединения элементов и низкая ремонтопригодность.

### 5.11. ПЛАТЫ МИКРОЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

Дальнейшая микроминиатюризация электронной аппаратуры основана на широком использовании бескорпусных ИМС и микросборок частного применения, что ведет к существенному улучшению массогабаритных характеристик, теплообмена и повышению надежности изделий. Применение бескорпусных ИМС привело к созданию новых методов конструирования, потребовало дальнейшего совершенствования технологии коммутационных плат и внедрения методов микроэлектроники в производство ЭА. Современное конструктивно-технологическое построение ЭА позволило выделить несколько уровней электрических соединений, каждый из которых имеет свои специфические особенности сборки и монтажа: соединение ИМС и БИС на пассивной подложке гибридных ИМС и БИС, соединение гибридных ИМС и БИС на коммутационных платах ячеек, соединения между ячейками в блоке, соединения между блоками в аппаратуре. Таким образом, выделилась новая конструктивно-технологическая общность — *микроэлектронная аппаратура (МЭА)*.

Наиболее распространенными методами коммутации функциональных модулей МЭА являются многослойные печатные платы, толстопленочная многослойная разводка, разводка на многослойной керамике, толстопленочная многослойная разводка на жестких и гибких платах. Для повышения плотности монтажа используют полуаддитивную и аддитивную технологию формирования слоев, а в субтрактивных процессах переходят на тонкую (9 мкм) и сверхтонкую (5 мкм) фольгу. Это позволяет исключать или уменьшать боковое подтравливание линий и изготавливать слои МПП с шириной токопроводящих дорожек 125—250 мкм.

*Толстопленочная многослойная разводка* выполняется путем последовательного нанесения на жесткую диэлектрическую подложку проводящих и диэлектрических паст методом трафаретной печати и последующего их вжигания. Коммутационные платы могут достигать размеров 100×120 мм, а изготавливают их на керамических основаниях из оксида алюминия (поликор, 22ХС) или оксида бериллия (брокерит). Разработанные токопроводящие пасты на основе золота, серебра, никеля или сплавов платина—серебро—золото, палладий—золото, палладий—серебро, палладий—медь—серебро обеспечивают удельное сопротивление 0,005—0,1 Ом/мм<sup>2</sup>. Для межслойной изоляции применяют пасты пленочной технологии.

Необходимость улучшения теплоотвода от мощных радиоэлементов и ИМС при работе в условиях повышенных температур способствовала появлению МПП с разводкой слоев на жестких металлических основаниях. В качестве материала основы используется алюминий, сталь, ковар (сплав железа с никелем и кобальтом), титан, которые покрываются смолой, эмалью или легкоплавким стеклом. Самым экономичным материалом из этой группы является сталь с нанесенной пленкой эмали, в состав которой входят оксиды магния, кальция, кремния, бора, бериллия, алюминия или их смеси, связка (поливинилхлорид, поливинилацетат, метилметакрилат) и пластификатор. Пленка соединяется с основанием путем прокатки между вальцами с последующим спеканием. Таким образом можно создавать многослойные структуры с различными механическими и электрическими характеристиками.

Изолирующий слой на поверхности алюминия получают нанесением эпоксидной смолы или анодным оксидированием. Варьируя состав электролита и режим электролиза, формируют оксидные пленки толщиной от нескольких десятков до сотен микрон с удельным сопротивлением  $10^9$ — $10^{10}$  Ом·м. Проводящие слои и монтажные переходы осуществляют химико-гальванической металлизацией. Недостатком ПП на металле является снижение быстродействия из-за сильной связи сигнальных проводников с металлическим основанием.

Высокие механическая прочность, химическая стойкость и объемное сопротивление ( $10^{12}$ — $10^{15}$  Ом·см), низкие водопоглощение (0—0,02 %) и газовыделение при нагреве привели к созданию многослойных коммутационных плат на керамической подложке путем прессования, литьем под давлением или отливкой пленок. Процесс получения плат из керамических пленок позволяет снижать их шероховатость до 0,02—0,1 мкм, разнотолщинность до  $\pm(0,01$ — $0,05)$  мм и расширять технологические возможности при изготовлении МПП. Он состоит в следующем. Мелкоизмельченное сырье (песок кварцевый, марганец углекислый, окисла хрома, глинозем) тщательно смешивают с технологической связкой, состоящей из поливинилбутираля, дибутилфталата, этилового спирта, и загружают в литьевую машину. Под действием собственного веса керамическая масса равномерно истекает через фильеру и попадает на подложку из полиэтилентерефталата толщиной 30—100 мкм и шириной 120 мм, которая со скоростью 0,6 м/мин разматывается из рулона. Между фильерой и подложкой по всей ее ширине устанавливается одинаковый зазор 0,15—0,2 мм, который определяет толщину заготовки. После отливки керамическую пленку разрезают на отрезки длиной 150—200 мм, собирают в пакеты и уплотняют, пропуская через вальцы. Заготовки вырубают на гидравлическом прессе, пробивают монтажные отверстия, либо используют в сыром виде и либо обжигают в печи сначала при температуре 1100 °С в течение часа, а затем при температуре 1600 °С в течение 24 ч. Полученные пластины шлифуют алмазными кругами для обеспечения разнотолщинности не более 25 мкм, относительного отклонения от плоскопараллельности не более 10 %, высоты микронеровностей 0,1—0,5 мкм. Размеры керамических ПП не превышают 150×150 мм.

Существуют два варианта получения *многослойных керамических плат* (МКП). По первому варианту проводят раздельное спекание слоев, последовательно наращиваемых на готовую керамическую подложку, металлизированную по толсто пленочной технологии. Процесс обеспечивает получение МКП с числом слоев до 10. Для металлизации отверстий применяется та же проводящая паста, что и для создания проводников. Заполнение отверстий пастой происходит либо за счет ее всасывания посредством вакуума, либо путем прессования между двумя слоями. По второму варианту сначала изготавливают листы из пластифицированной керамики с отверстиями для межслойных переходов. На них по толсто пленочной технологии наносят рисунок слоя токопроводящими пастами, выполняют переходы с одного слоя на другой, затем из листов составляют пакет и совместно спекают (рис. 5.41). Метод позволяет изготавливать МКП с числом слоев до 20—30 с минимальной шириной проводников 0,4 мм и диаметром переходных отверстий 0,15 мм. Недостатком этого метода является 17—20 %-й разброс геометрических размеров плат от партии к партии из-за большой усадки керамики при обжиге, что препятствует автоматической сборке и тестовому функциональному контролю.

*Многослойная разводка на гибких полимерных платах* является одним из перспективнейших направлений в области монтажа МЭА, так как позволяет принимать форму корпуса любой конфигурации, обеспечивает малые толщины и массу, ударопрочность. Она эффективна при создании межячеечной и межблочной коммутации. Для ее изготовления используется полиэфирная, фторопластовая или полиэтиленовая пленка, обладающая высокими удельным объемным и поверхностным сопротивлением, низкой диэлектрической проницаемостью, хорошей теплопроводностью, радиационной стойкостью, минимальным газовыделением в вакууме. Но эти пленки плохо травятся, обладают низкой рабочей температурой, большой усадкой. Этих недостатков лишена поли-

имиидная пленка, которая наряду с высокой прочностью на растяжение и термостойкостью (400 °С) хорошо травится в сильных щелочах.

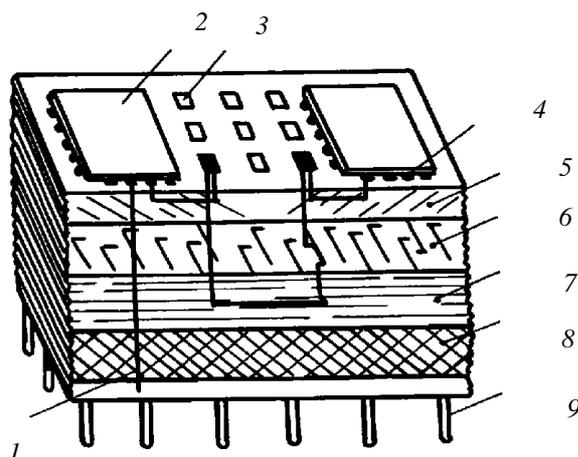


Рис. 5.41. Многослойная керамическая плата:  
1 – цепи питания; 2 – БИС; 3 – контактная площадка;  
4 – столбик припоя; 5 – 8 – слои; 9 – выводы

Получают гибкие МПП по субтрактивной, полуаддитивной и аддитивной технологии. Переход с одного слоя на другой осуществляют химико-гальванической металлизацией. Технологический процесс изготовления слоев МКП на полиимиидной пленке осуществляется по двум вариантам: на вакуумно-металлизированной и химически-металлизированной основе. Для первого процесса принята следующая технологическая цепочка: вакуумная металлизация — обезжиривание — сушка — декапирование — промывка — гальваническое меднение — никелирование — нанесение сплава олово—висмут. Второй процесс включает травление диэлектрика в растворе щелочи для придания шероховатости и повышения адгезии металлизации, сенсбилизацию в растворе  $\text{SnCl}_2$ , сушку, экспонирование через фотошаблон, активирование в растворе  $\text{PdCl}_2$ , химическую и (при необходимости) электрохимическую металлизацию.

МКП на полиимиидной пленке формируются на базе двусторонних гибких коммутационных плат. Гибкие платы из полиимида имеют толщину 25—50 мкм. Материалу наряду с высокой прочностью на растяжение, хорошими изоляционными свойствами, химической стойкостью, несгораемостью присущи свойства, которые делают его незаменимым в процессах, связанных с вакуумным осаждением пленок и фототравлением. Это прежде всего наиболее высокая среди полимеров температурная устойчивость (он не теряет гибкость при температурах жидкого азота и в то же время выдерживает температуры эвтектической пайки кремния с золотом до 400 °С), отсутствие существенных газовыделений в вакууме при температуре 250 °С, высокая радиационная устойчивость и, наконец, способность к равномерному травлению в сильных щелочах.

К недостаткам полиимиидных пленок можно отнести несколько повышенное водопоглощение и относительно высокую стоимость их производства, которая, однако, не столь существенна для изделий МЭА ввиду малой массы потребляемого материала. На рис. 5.42 представлена схема изготовления двухуровневой коммутации на основе полиимиидной пленки. Вначале с помощью двустороннего фототравления за один цикл формируются отверстия диаметром 20—30 мкм и диаметром 50—70 мкм на пленке толщиной 50 мкм в количестве нескольких тысяч на площади 60×48 мкм и нескольких десятков тысяч на площади 100×100 и 150×150 мм. При двустороннем фототравлении полиимида достигается благоприятная для вакуумной металлизации конусообразная форма отверстий, а проколы в пленке фоторезиста не вызывают появления лишних отверстий (травление на этих участках происходит приблизительно на половину толщины платы).

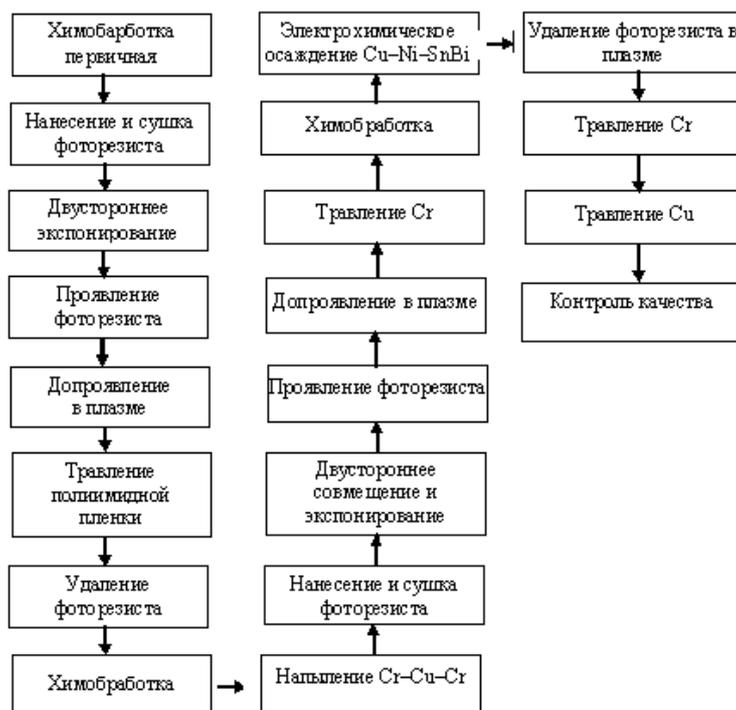


Рис. 5.42. Схема изготовления двухуровневой коммутации на полиимидной пленке

Вакуумная металлизация полиимида слоем Cr—Cu толщиной 1—2 мкм позволяют достигать большей равномерности, воспроизводимости и силы сцепления с подложкой, чем другие способы. После избирательного усиления металлизации слоем гальванической меди с защитным покрытием из электрохимических сплавов олово—висмут, олово—никель или олово—свинец получается двусторонняя коммутационная плата, которая обладает высокой надежностью мест пересечений и переходов. Для защиты слоев меди и обеспечения качественной пайки и сварки на контактных площадках гибких схем проводится электрохимическое осаждение олова с присадками висмута или свинца (3—5 мкм), никеля (1—2 мкм) и золота (1—2 мкм).

Установка гибких коммутационных плат на жесткое основание может быть выполнена различными способами в зависимости от выбранной конструкции микросборок и ячеек. Наиболее простым способом является приклейка гибкой двуслойной платы на жесткое основание с контактными площадками для соединения через фигурные изоляционные прокладки из полиимида, причем соединение с контактными площадками производится путем пайки через переходные металлизированные отверстия в двуслойных платах — там, где они не изолированы полиимидными прокладками. Усилие разрушения паяного соединения составляет в среднем 0,5 Н для отверстия 70 мкм и 2,3 Н для отверстия диаметром 250 мкм. Пайка в вакууме позволяет обеспечивать наиболее воспроизводимые условия протекания группового процесса, так как в этом случае нет необходимости ограничивать время пайки из-за окисления жидкого припоя. Этот фактор является в данном случае чрезвычайно важным ввиду того, что пайка происходит на развитой поверхности с регулярным расположением соединений. Кроме того, снижение парциального давления кислорода в камере пайки способствует диссоциации оксидов и, следовательно, улучшению смачивания отверстий припоем.

В ТП изготовления двусторонних коммутационных плат, несмотря на его прототу, имеется ряд особенностей, которые определяют в конечном итоге специфику получения качественных плат. К ним необходимо отнести следующие: качество исходной полиимидной пленки; активацию поверхности, без которой хорошее контактное взаимодействие с вакуумосаженным слоем металла невозможно; обеспечение равномерности травле-

ния до десятков тысяч отверстий в пленке; точное совмещение рисунка отверстий с рисунком коммутации на обеих сторонах несмотря на усадку пленки; гарантированную металлизацию переходных отверстий.

## 5.12. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ДИАГНОСТИКА ПЛАТ

С развитием и усложнением конструкций ПП и МПП возрастает сложность ТП, а также потребность в более эффективных методах и средствах контроля. Основными мерами повышения качества ПП и МПП являются: организация входного контроля материалов, межоперационный контроль, выходной контроль качества изделий. Весьма важным является тщательный контроль наиболее ответственных операций ТП (травление, металлизация, склеивание и др.), которые оказывают влияние на все остальные операции, а также автоматизация процесса контроля. Классификацию методов контроля можно провести по следующим признакам:

- 1) по физической сути метода — оптический, рентгеновский, тепловой, электрофизический, электрический, радиотехнический, металлографический, радиационный, ультразвуковой;
- 2) по видам связи с контролируемым объектом — контактные, бесконтактные;
- 3) по характеру воздействия на платы — разрушающие, неразрушающие;
- 4) по степени определения дефектов: явных дефектов — контроль работоспособности; скрытых — диагностический, прогнозирующий.

*Оптический метод* контроля прост и нагляден, имеет высокую разрешающую способность. Недостаток его в субъективности и низкой производительности. Используются микроскопы МБС-2, МИИ-4, МРР-2р, а также растровый электронный микроскоп МРЭМИ-2 с увеличением в 200—1000 раз, приборы визуального контроля ПВК-1 с увеличением в 4—50 раз (рис. 5.43,а). Для входного и выходного контроля применяют телевизионные установки контроля печатных плат КПП-1 и микрообъектов УКМ-1 с увеличением в 10 и 100 раз и разрешающей способностью 12 и 63 лин/мм соответственно. При этом могут определяться виды дефектов, указанные в табл.5.9.

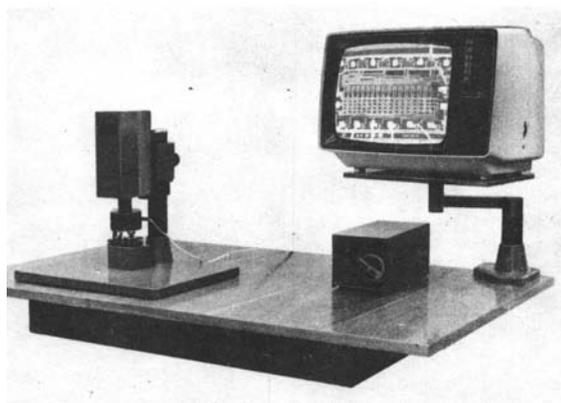
Табл. 5.9. Дефекты печатных плат

Вид дефекта	Причины
Короткое замыкание между проводниками и контактными площадками	Сдвиг внутренних слоев при прессовании, попадание раствора химического меднения в зазоры
Разрыв проводников	Глубокие царапины на поверхности до обработки, подтравливание, внутренние механические напряжения в МПП
Отсутствие контакта между печатными проводниками слоев и металлизированными отводами	Плохая подготовка к химической металлизации, малая площадь контактирования
Выход окружности отверстия за пределы контактной площадки	Плохая точность при сверлении, смещение координат
Расслоение	Некачественный компаунд, несоблюдение режимов прессования
Понижение сопротивления изоляции	Проникновение в межслойные соединения влаги, растворов, плохое совмещение слоев

*Рентгеновский метод* применяется для контроля токопроводящих цепей МПП и подразделяется на рентгенотелевизионный, стереорентгенографии и томографии. Наибольшее распространение получил рентгенотелевизионный метод с использованием рентгенотелевизионных микроскопов МТР-1, МТР-3, МТР-4 с увеличением в 20—60 раз и размером допустимого пятна 0,2—0,3 мм.



а



б

Рис. 5.43. Прибор визуального контроля ПВК-1(а) и установка УКМ-1 (б)

Суть метода заключается в том, что пучок рентгеновских лучей, проходя через исследуемую ПП или МПП, образует теневое изображение объекта в рентгеновских лучах, которое проецируется на мишень видикона. Видикон преобразует энергию рентгеновских лучей в электрические телевизионные сигналы, которые после усиления используются для получения изображения на экране кинескопа. Увеличение размеров изображения происходит чисто телевизионным путем за счет увеличения размера раstra при переходе от сканирования на мишени видикона к раstrу на экране кинескопа (рис. 5.44). Данный способ позволяет выявлять характер, вид и местонахождение дефектов. Однако он обладает недостаточной разрешающей способностью для МПП и низкой производительностью контроля.

Стереорентгенография применяется при выявлении разрывов печатных проводников после прессования и в готовой плате. С помощью стереорентгеномикроскопа, регулируя относительное положение объекта и пленки, выборочно фокусируют изображение печатной плоскости и очерчивают месторасположение дефекта. Данный способ не нашел широкого применения из-за низких чувствительности и производительности.

Томография заключается в проецировании предмета в рентгеновских лучах на чувствительную мишень при непрерывном движении источника рентгеновского излучения по мишени (рис. 5.45). Печатная плата и пленка синхронно вращаются вокруг параллельных осей, расположенных в одной плоскости с источником. Все точки в изображаемой плоскости имеют четкое изображение и остаются неподвижными, а точки других плоскостей описывают на пленке окружности и "размазываются". Способ универсален и обладает возможностью контроля межслойных изображений, его применяют для послойного контроля токопроводящих цепей МПП.

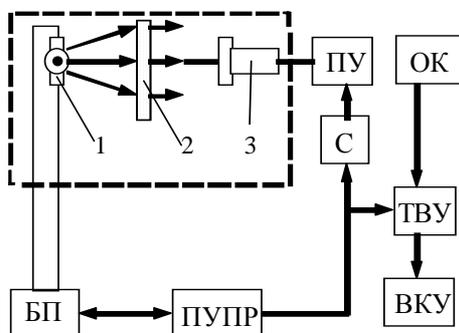


Рис. 5.44. Схема рентгеновотелевизионной установки:

1 – источник рентгеновского излучения; 2 – исследуемая плата; 3 – мишень видикона;

ПУ – пульт управления; С – синхронизатор; ОК – оконечный усилитель;

ВКУ – видеоконтрольное устройство; ТВУ – телевизионное устройство; БП – блок питания

*Тепловой контроль* токопроводящих цепей МПП основан на измерении градиента температуры в местах локализации дефекта при нагреве, который осуществляется за счет пропускания тока через контролируемую цепь. Тепловое излучение воспринимается с помощью видикона, в качестве измерительного устройства используют инфракрасный сканирующий микроскоп или тепловизор, которые позволяют рассматривать тепловую картину объекта на экране электронно-лучевой трубки. С помощью данного метода можно обнаружить следующие дефекты печатного монтажа: пористость металлизации, короткое замыкание, утонение (подтравливание) проводников, пониженное сопротивление изоляции.

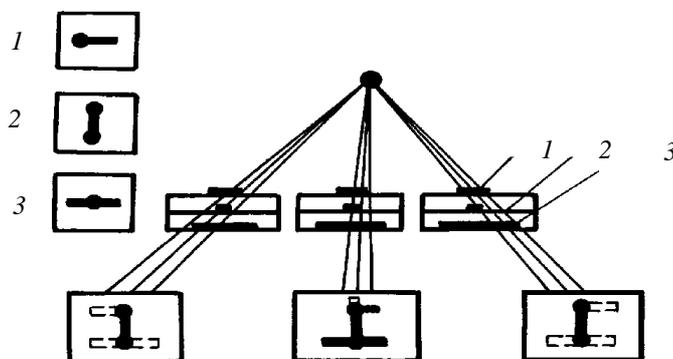


Рис. 5.45. Схема томографии:  
1 – 3 – проводники, расположенные в различных слоях

Отечественные тепловизоры типа ТВ-03 позволяют получать на экране изображение объекта размером 30×30 мм, выбирать интересующий участок, увеличивать в 3 раза с разрешением по линейным размерам 0,8 мм и по температуре 0,5 °С. Тепловые дефектоскопы выделяют дефекты на глубине 1,0—1,5 мм.

*Электрофизический контроль* основан на пропускании тока большой силы через токопроводящие цепи платы. Мощность источника тока выбирается такой, что разогрев дефектного участка цепи вызывает его расплавление, а нагрев доброкачественной цепи не вызывает никаких последствий. В качестве средств контроля используют генератор стабилизирующих импульсов тока амплитудой до 30 А, длительностью 5 мс, работающий на нагрузку 0,6—1,8 Ом. Электрофизический контроль прост и легко может быть автоматизирован. Его недостатком является то, что может вызвать дефект токопроводящей цепи платы, а также низкая информативность, что ограничивает широкое применение данного метода.

*Электрический контроль* основан на проверке целостности электрических проводников и металлизированных переходов ПП и МПП и может быть контактным или бесконтактным (с помощью электронного луча). Контактный контроль позволяет измерять сопротивление ПП и металлизированных переходов в МПП посредством 4-зондовой схемы. Омическое сопротивление металлизированного отверстия измеряют между противоположными сторонами платы. Контактные зонды размещают в пределах контактной площадки (рис. 5.46). Это объясняется повышенной плотностью тока в месте точечного контактирования токового зонда. Размещение зондов на противоположных краях контактной площадки обеспечивает высокую воспроизводимость результатов измерений.

Для измерения малых сопротивлений используются микроомметры и миллиомметры М-246, Е6-12, Е6-6 с 4-зондовой схемой контактирования, с помощью которой через металлизацию пропускается переменный ток силой 100 мА. Падение напряжения между верхним и нижним концентрическими кольцами металлизации отверстия передается на трансформатор с коэффициентом трансформации 1:100 и вольтметр с высоким входным сопротивлением.

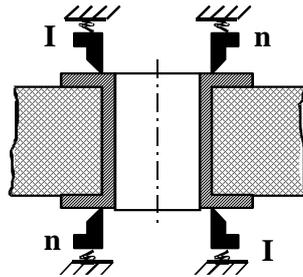


Рис. 5.46. Схема четырехзондового контактирования

Недостатки метода: отсчет сопротивления может быть неточным, так как зонды не могут обеспечить равномерного распределения тока; сопротивление зависит от переходного сопротивления контактного штыря в месте контакта (погрешность  $\pm 10\%$  на 1 мм;  $\pm 20\%$  на 0,6 мм); необходимое переходное сопротивление 0,1 Ом между штырем и металлизированным отверстием обеспечивается давлением, создаваемым пружиной контакта.

*Радиационный контроль* основан на использовании обратного  $\beta$ -излучения. В качестве исследуемого параметра используют коэффициент обратного рассеивания  $\eta = f(z)$ , где  $z$  — атомный номер материала рассеивателя. Для измерения используют прибор, состоящий из источника излучения и счетчика Гейгера (радиометра) (рис. 5.47). В зависимости от измеряемой толщины металлического покрытия платы будет изменяться поток  $\beta$ -излучения. Точность измерения не превышает 10 % и зависит от качества эталона и времени отсчета. Недостатки метода: низкая производительность (30 с на 1 отверстие), особые меры по технике безопасности при работе с радиоактивными веществами.

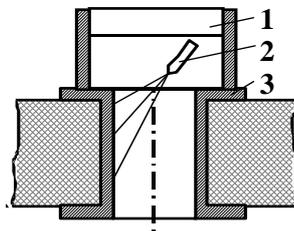


Рис. 5.47. Схема радиационного контроля

Радиотехнические методы контроля используются для контроля волнового сопротивления, токопроводящих цепей МПП и микрополосковых плат с применением стандартных приборов для измерения емкости и индуктивности. Они не выявляют дефектов.

*Ультразвуковые методы* контроля основываются на способности УЗ-колебаний распространяться в твердом теле прямолинейно и отражаться от границ дефектов, имеющих различную плотность для акустических волн. Для излучения и приема колебаний используются пьезоэлектрические преобразователи. УЗ-метод позволяет контролировать плоские, линейные и точечные дефекты в виде расслоений, трещин. Разрешающая способность метода может достигать 10 мкм. Используются импульсные УЗ-дефектоскопы типа УДМ-2 и УД-10 А.

Так как МПП содержит большое количество цепей, металлизированных отверстий (до 400), то ручные методы контроля весьма трудоемки и не гарантируют точность результатов контроля, при серийном выпуске они просто непригодны. Автоматизация выходного контроля МПП является составной частью системы машинного проектирования и изготовления МПП. Автоматизация осуществляется путем применения универсальных стан- дов с программным управлением. Они позволяют осуществлять в полуавтоматическом режиме выходной кон-

троль электрических параметров МПП: целостность печатных проводников платы, электрическое сопротивление изоляции, электрическую прочность изоляции по принципу "годен-негоден" по предельным значениям параметров.

Универсальный стенд (рис. 5.48,а) состоит из устройства контактирования, стойки функциональных блоков и пульта управления. Устройство контактирования обеспечивает одновременное подсоединение всех видов цепей проверяемой МПП к специальным контактным штырям. Коммутатор точек контроля осуществляет необходимое количество комбинаций опроса контролируемых точек. Программа контроля МПП, записанная на перфоленте, считывается с помощью фотоэлектрического устройства и поступает на блок управления. При подаче на блок управления сигнала управления "Сброс" стенд приводится в исходное состояние. Сигнал "Пуск" вырабатывает команду "Старт", которая включает транспортер. Блок управления после поступления сигналов "Цепь" или "КЗ цепи", "Пробой", "Изоляция" с блока автоматического контроля и отбраковки выдает команды на блок выходных усилителей, а от него — на коммутатор точек контроля, блок питания и блок индикации. Информация может быть выведена на печать с координатами контролируемых точек.

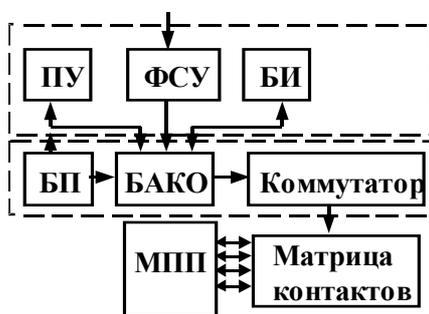


Рис. 5.48. Схема универсального стенда с программным управлением (а) и испытательная станция (б) для контроля электронных сборок

Универсальный стенд позволяет контролировать электрические параметры МПП, которые имеют габаритные размеры 140×150 мм, шаг координатной сетки 2,5 мм, диаметр выходных отверстий 0,6—0,8 мм, число контролируемых точек 1500. Время контроля платы составляет 5—7 мин.

Универсальные стенды относятся к "медленным" устройствам контроля, так как используют электромеханические реле, что увеличивает габариты и стоимость установки. Перспективны "быстрые" устройства контроля с полупроводниковыми коммутаторами, герконовыми реле. Фирма Siemens AG (Германия) изготовила автоматические испытательные станции (рис. 5.49) в виде настольных приборов с управлением от микроЭВМ производительностью 2500 плат/ч и временем контроля от 1 до 30 с.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные конструктивно-технологические требования к ПП.
2. Классификация коммутационных плат и методов их изготовления.
3. Материалы для изготовления плат и их свойства.
4. Формирование рисунка печатного монтажа.
5. Выбор травителей для ПП.
6. Процессы химической и электрохимической металлизации.
7. Комбинированные методы изготовления ДПП.

8. Методы изготовления МПП.

## 6. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НАМОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

### 6.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ НАМОТОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Намоткой* называется технологический процесс укладки провода по определенному закону и его закрепления на каркасе для получения заданной индуктивности обмоток трансформаторов, дросселей, реле, контуров и других функциональных элементов ЭА. Намоточные изделия имеют следующие электрические параметры: индуктивность  $L$ , мГн; добротность  $Q = \omega L R_L$ ; собственная емкость  $C_L$ , пФ; сопротивление  $R_L$ , которое зависит от диаметра провода и технологии намотки. Конструктивными параметрами являются: шаг намотки  $p$ ; диаметр провода без изоляции  $d$  и в изоляции  $d_{из}$ ; диаметр каркаса  $d_k$ ; расстояние между витками  $A$ ; угол укладки провода  $\varphi$ ; средний диаметр намотки  $d_{ср}$ .

Обмотки, наматываемые на каркасы, разделяются на две группы — однослойные и многослойные. *Однослойные* характеризуются малой собственной емкостью, простотой изготовления и наматываются с шагом  $d_{из}$ ,  $d_{из}+A$ ,  $d+A$ . Они подразделяются на простые рядовые, прогрессивные, бифилярные и тороидальные. *Простая рядовая обмотка* характеризуется малой собственной емкостью и наматывается вплотную виток к витку с шагом  $p=d_{из}$  или  $p=d_{из}+A$  и применяется для высокочастотных контуров, реостатов и т. д. (рис. 6.1).

Сопротивление обмотки

$$R = \frac{4\rho}{\pi} \frac{L}{d_{ср}^2},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление провода;  $L$  — длина намотки.

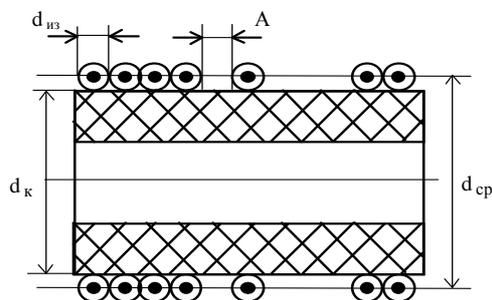


Рис. 6.1. Схема укладки однослойной обмотки

*Прогрессивная обмотка* характеризуется изменяющимся по определенному закону шагом ( $p_1 < p_2 < p_3 < \dots < p_k$ ) и применяется для контуров ВЧ-передатчиков, где требуется минимальная собственная емкость.

*Бифилярная обмотка* отличается тем, что не имеет индуктивности, так как токи в соседних витках проходят навстречу друг другу и их магнитные поля взаимно уничтожаются. Она применяется для проволочных сопротивлений, шаг намотки  $p=2d_{из}$  (рис. 6.2).

*Тороидальная обмотка* характеризуется отсутствием внешнего магнитного поля и применяется в магнитных усилителях, трансформаторах, дросселях. По внутреннему диаметру тороида укладывают провод с шагом  $p_1=d_{из}$ , а по внешнему — с шагом  $p_2=d_{из}+A$  или произвольно (рис. 6.3, а).

Сопротивление обмотки определяется по уравнению

$$R = R_b l_b \frac{\pi d_{ср}}{p},$$

где  $R_{\text{в}}$  — сопротивление витка;  $l_{\text{в}}$  — длина витка:  $l_{\text{в}} = 2h + 2b + \pi d$ .

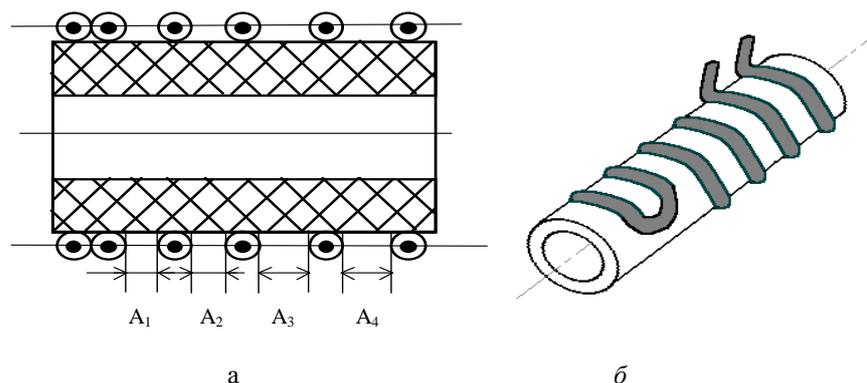


Рис. 6.2. Прогрессивная (а) и бифилярная (б) обмотки

*Многослойные обмотки* разделяются на рядовые, секционированные, бифилярные, галетные, спиральные, пирамидальные, универсальные, перекрестные и тороидальные. Обмотки характеризуются повышенной разностью потенциалов между витками, расположенными в соседних рядах обмотки, большими собственной емкостью и индуктивностью. Для уменьшения собственной емкости обмотки выполняют секционированными, универсальными и перекрестными.

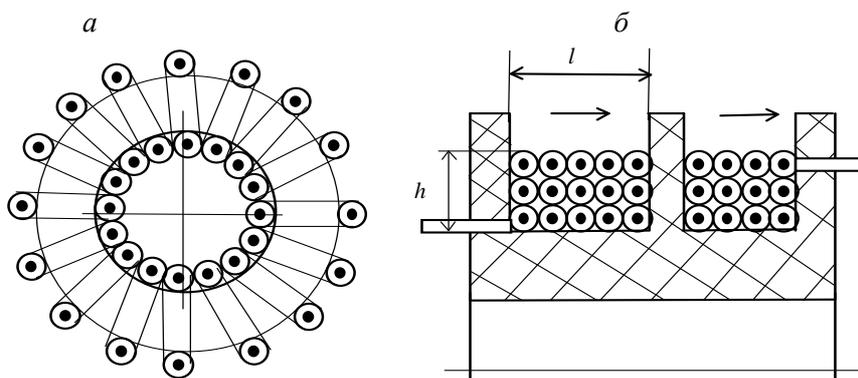


Рис. 6.3. Тороидальная (а) и секционированная (б) обмотки

*Рядовая* многослойная обмотка имеет большие индуктивность и собственную емкость, повышенную разность потенциалов между витками и пониженный срок службы. Применяется для низкочастотных и силовых трансформаторов, реле, резисторов и дросселей.

*Секционированная* многослойная обмотка позволяет снижать разность потенциалов между витками, уменьшать собственную емкость. Она может быть индукционной и безындукционной. Намотка осуществляется путем укладки провода в отдельные секции при различном направлении вращения шпинделя намоточного станка. Число рядов в каждой секции нечетное, чтобы начало и конец провода располагались у противоположных торцов каркаса (рис. 6.3, б). Применяется для намотки контуров ДВ- и СВ-диапазона, дросселей и т. д. Плотность обмотки определяется коэффициентом заполнения обмоточного пространства  $K$ :

$$K = N S / (h l),$$

где  $N$  — число витков;  $S$  — площадь сечения провода без изоляции;  $h, l$  — соответственно высота и ширина обмотки.

*Пирамидальная обмотка* характеризуется тем, что при одном и том же напряжении между выводами пробивное напряжение между витками, лежащими в соседних слоях, намного ниже, чем в рядовой многослойной.

Поэтому она применяется в высоковольтных трансформаторах, дросселях и контурах переключающих устройств (рис. 6.4, а). Напряжение между витками рассчитывается по уравнению

$$U = E (S + 1) / N ,$$

где  $E$  — напряжение между выводами;  $S$  — число рядов провода;  $N$  — число слоев.

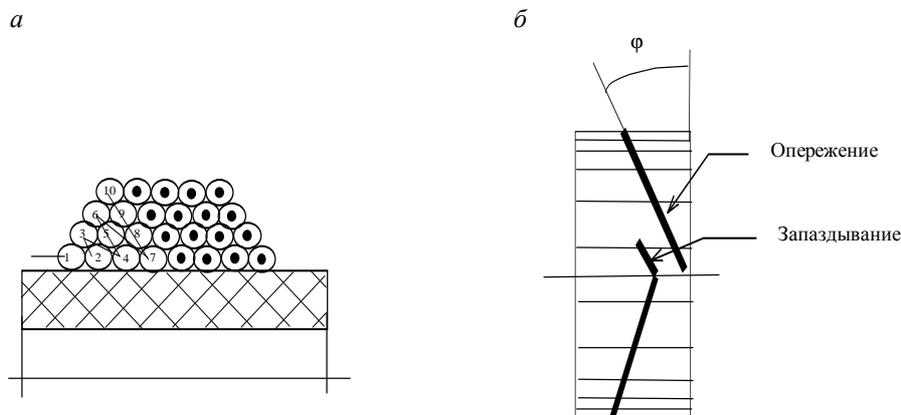


Рис. 6.4. Пирамидальная (а) и универсальная (б) обмотки

*Универсальная обмотка* отличается тем, что провод укладывается на каркас под некоторым углом к плоскости намотки с двумя или несколькими перегибами на торцах за каждый оборот. Перекрещивание каждого последующего витка с предыдущим позволяет получать механически прочную обмотку с диаметром, значительно превышающим ширину намотки и малой собственной емкостью. Емкость тем меньше, чем больше угол укладки  $\varphi$  (рис. 6.4, б). Укладка выполняется с опережением, когда новый виток ложится впереди предыдущего, и с запаздыванием, когда он ложится позади предыдущего.

*Перекрестная обмотка* является разновидностью универсальной и отличается тем, что имеет два перегиба. Такая укладка позволяет при всех преимуществах универсальной обмотки получать большую индуктивность. *Спиральная обмотка* представляет собой плоскую спираль, приклеенную к изоляционному основанию. *Галетная обмотка* отличается отсутствием каркаса и выполняется на специальных оправках, которые после закрепления витков удаляются. Она применяется в отклоняющих системах электронно-лучевых трубок.

## 6.2. МАТЕРИАЛЫ ПРОВОДОВ, КАРКАСОВ И ИЗОЛИРУЮЩИХ ПРОКЛАДOK

Обмоточные провода можно разделить на пять основных групп по виду изоляции: пленками эмалей; из хлопчатобумажного, шелкового или синтетического волокна; с комбинированной изоляцией; со стеклянной изоляцией; без изоляции.

К проводам первой группы относятся:

- медные провода ПЭЛ (эмаль лакостойкая), выдерживающие нагрев до 100 °С и плотность тока до 2,5 А/мм<sup>2</sup>; ПЭТ (эмаль теплостойкая), выдерживающие кратковременный нагрев до 300 °С; ПЭВ (эмаль высокопрочная) с пробивным напряжением до 600 В и температурой нагрева до 350 °С; ПЭТВ (полиэтилентетрафталатная лаковая изоляция) с повышенной химической и термической стойкостью и возможностью длительной работы при температуре 260 °С при воздействии кислот и щелочей; ПЭВТЛ (эмалированный, высокочастотный, лудящийся), который может длительно работать при 150 °С и пробивном напряжении 60—100 В; изоляция из полиуретанового лака, являющегося флюсующим веществом, позволяет расплавлять их без лужения;

- провода из высокоомных сплавов марок ПЭК (константовый эмалированный), ПЭМТ (манганиновый), ПЭНХ (нихромовый).

К проводам второй группы относятся:

- медные провода марок ПБО (изолирующая обмотка из хлопчатобумажной пряжи в один слой), ПБД (изоляция хлопчатобумажной пряжей в два слоя), ПШО, ПШБ (шелковая обмотка в один или два слоя).

К проводам третьей группы относятся:

- медные провода марок ПЭЛБО с лакостойкой эмалевой и однослойной бумажной изоляцией, ПЭЛШО с шелковой изоляцией;

- ЛЭШО-10-0,07 (литцентрат с эмалевым покрытием и обмоткой из шелковой пряжи в один слой, число проводов 10, диаметр 0,07 мм), предназначенные для высокочастотных катушек колебательных контуров, ПЭЛШКД (изолированный лакостойкой эмалью и обмоткой шелка в два слоя);

- провода из сплавов высокого сопротивления: ПЭШОК (константовый, изолированный эмалью с одним слоем шелковой обмотки), ПЭШОМТ, ПЭШОНХ (соответственно манганиновый и нихромовый), ПЭВНХ (эмалированный высокопрочной эмалью, нихромовый).

К проводам четвертой группы относятся медные провода в стеклянной, стекловолоконистой и дельта-асбестовой изоляции: ПСД, ПСДТ, ПЭТСО, имеющие повышенную теплостойкость до 200 °С.

Для обмоток, предназначенных для работы в условиях повышенной влажности, высокой температуры, в агрессивных средах применяют провод, изолированный фторопластом: ПИФЭ-1, ПИФЭ-2. Особо тонкие провода (микропровода) изолируются сплошной стеклянной изоляцией, обладающей повышенной термо-, влаго- и химической стойкостью, а также пробивным напряжением не менее 1000 В.

Помимо обмоточного провода, катушка индуктивности содержит такие конструктивные элементы, как каркас, выводы, магнитный сердечник, экран и его крепление. Для катушек с тороидальными, броневыми и чашкообразными сердечниками тип и размер сердечника определяют геометрические размеры катушек. Сердечники изготавливаются из карбонильного железа или феррита и могут быть: цилиндрическими с резьбой (СЦП), цилиндрическими гладкими (СЦГ), чашкообразными (Ч), броневыми из феррита (Б), броневыми из карбонильного железа (СБ) с замкнутой (СБа) и разомкнутой (СБб) магнитной цепью.

Для ВЧ-контуров уменьшение потерь достигается применением ребристых каркасов из пластмассы, а для высокостабильных катушек, работающих при повышенных температурах, — каркасов из керамики. Конструкция экрана предусматривает изготовление его методом вытяжки или штамповки из алюминия. Экраны обычно имеют форму цилиндров или прямоугольников без резких граней. Для изоляции слоев обмотки применяют прокладки из кабельной, конденсаторной бумаги, изоляционную ленту из лакоткани и т. п.

### 6.3. ОБОРУДОВАНИЕ И ТИПОВЫЕ ПРОЦЕССЫ НАМОТКИ

Намотка изделий производится на специальных *намоточных станках*, конструкция которых должна обеспечивать: вращение каркаса, равномерное перемещение провода относительно обмотки по всей ее ширине, натяжение провода в пределах упругих деформаций. Поскольку удельный вес намоточных работ высок (до 20—30 % общей трудоемкости изготовления изделий), к конструкциям станков предъявляют требование высокой производительности, которая обеспечивается скоростью наматывания, автоматической раскладкой изоляции, активным контролем электрических параметров обмотки. Намоточные станки классифицируют по ряду признаков.

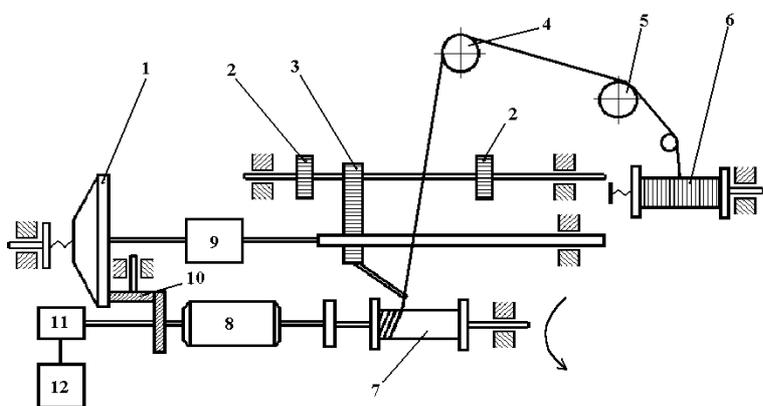
По способу наматывания выделяются станки: открытого типа, кольцевого, пазового, специально-го наматывания. Первый тип — станки для намотки на каркасы, имеющие форму поверхности тел вращения круглого или прямоугольного сечения. Второй тип — станки, в которых каркас вращается вокруг своей оси, а провод — вокруг оси поперечного сечения каркаса (намотка на тороиды). Третий тип — станки для намотки провода в наружные или внутренние пазы каркасов—пакетов якорей, роторов либо статоров. Четвертый тип — станки для наматывания кадровых и строчных катушек, отклоняющих систем телевизионных трубок.

По способу формирования обмотки выделяются станки прямого и отдельного наматывания. В первом случае изготовление обмотки происходит по схеме "катушка — приемный каркас", во втором — "катушка — промежуточный элемент (шпуля) — каркас". По этой схеме работают станки кольцевого наматывания и частично пазового.

По способу образования витка станки делятся на бесчелночные и челночные. В бесчелночных станках виток образуется за счет вращения каркаса (главное движение), а шаг намотки — вследствие осевого перемещения провода (вспомогательное движение). В челночных станках намотка происходит за счет вращательного движения челнока (главное движение) и вспомогательного движения каркаса.

По количеству наматываемых обмоток выделяются одноместные и многоместные станки, а по расположению оси наматываемого каркаса — горизонтальные и наклонные.

Станок типа СРН - 05У предназначен для наматывания провода диаметром 0,05—0,5 мм на два каркаса одновременно со скоростью до 1000 об/мин и состоит из следующих механизмов: электропривода, вращения каркаса, натяжения провода, укладки провода, питателя-стойки для закрепления бобины, тормозного устройства, счетчика витков, станины и устройства управления (рис. 6.5). Электроприводом служит электродвигатель 8 типа УЛ-062, вал используется в качестве шпинделя станка, на который закрепляется каркас 7 катушки. Регулировка скорости вращения шпинделя осуществляется путем изменения напряжения питания электродвигателя вариатором однофазным типа РНО-250-05 с помощью ножного управления.



а б  
Рис. 6.5. Кинематическая схема (а) и внешний вид (б) намоточного станка

Механизм укладки провода состоит из каретки 3 с укладчиком, которая перемещается по ходовому винту на расстоянии 3—150 мм. На винте закреплен диск 1, связанный через резиновый ролик с валом электродвигателя. Плавная регулировка шага намотки в пределах 0,05—0,55 мм осуществляется изменением передаточного соотношения между диском и роликом 10. Реверс вращения ходового винта осуществляется двусторонней дисковой муфтой 9, переключаемой электромагнитами, срабатывающими от микровыключателей 2, ограничивающих раскладку, а также при ручном нажатии клавиш на панели управления.

Счетчик *12* получает вращение от электродвигателя *8* через редуктор *11* с передаточным отношением 1:10. Станок имеет два натяжных устройства, в которых усилие натяжения регулируется винтом фетрового ролика *4* и винтом тормозного ролика *5*. Под действием этих усилий происходит прижим шек фетрового ролика к проволоке с силой 0,2—1 Н. Разметка провода осуществляется безынерционно с неподвижной бобины *6* или с вращающейся бобины при закреплении ее на оправке в центрах.

Операция наматывания включает время набора шпинделем заданной скорости вращения  $t_1$ , время наматывания обмотки  $t_2$ , время первого уменьшения скорости вращения  $t_3$ , время домотки катушки  $t_4$ , время торможения  $t_5$  (рис. 6.6). В типовой ТП входят подготовительная и контрольная операции, присоединение выводов.

Цикловая производительность намоточного станка

$$Q = 60/T_{\text{ц}} \text{ (шт/ч),}$$

где  $T_{\text{ц}}$  — продолжительность рабочего цикла наматывания, мин:  $T_{\text{ц}} = t_{\text{в.н}} + t_{\text{н}} + t_{\text{в.к}}$ ;  $t_{\text{н}}$  — время намотки;  $t_{\text{в.н}}$ ,  $t_{\text{в.к}}$  — вспомогательное время, необходимое для закрепления катушки, провода, выводов обмотки, прокладки изоляции и т. д.

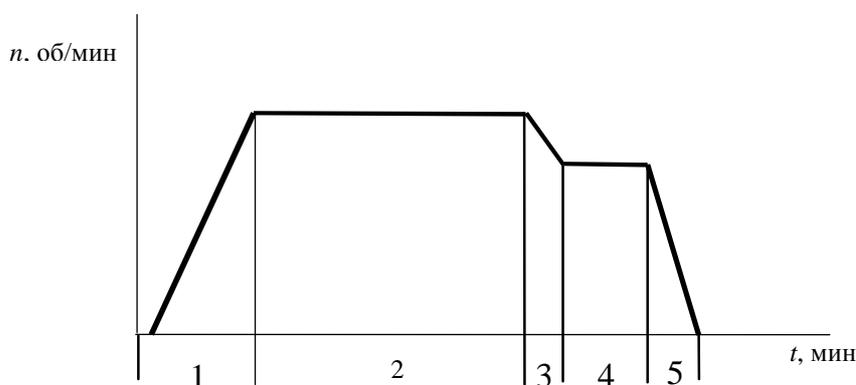


Рис. 6.6. График процесса наматывания катушек

Подготовительная операция состоит из настройки станка, закрепления каркаса, провода, установления усилия натяжения, шага раскладки. Присоединение выводов осуществляется путем снятия изоляции с проводов, закрепления их на токосъемниках каркаса и пайки. Контрольная операция включает проверку индуктивности, добротности, отсутствия короткозамкнутых витков, внешнего вида.

Одной из самых сложных и трудоемких операций является удаление изоляции с обмоточных проводов. Применяют механические, химические, термохимические методы удаления изоляции. В первом случае эмалевую изоляцию с проводов ПЭЛ, ПЭВ и ПЭТ удаляют шлифовальной шкуркой, шабером, что сопровождается нарушением размеров и повреждением провода, изменением его диаметра. Метод применяется для проводов диаметром более 0,2 мм. Химический метод заключается в погружении проводов в муравьиную кислоту на 1—2 мин и последующем протирании их салфеткой. Он характеризуется большой трудоемкостью и длительностью процесса удаления изоляции, который вреден для здоровья рабочих. Термомеханический метод применяют для проводов диаметром 0,1 мм и менее, а также многожильных проводов типа ПЭЛШО, ЛЭШО. Он заключается в нагреве провода в верхней части пламени спиртовой горелки, обжиге изоляции, погружении в спирт с последующей протиркой бязью. Его недостатки — трудность механизации, большая трудоемкость, вредные условия труда. Термохимический метод снятия изоляции заключается в погружении проводов в расплав солей (хлористый калий) при температуре 700—800 °С на 1—2 с, промывке в жидкости, растворяющей соль в течение 1—2 с, и очистке ветошью. Метод может быть механизирован, однако отличается повышенной вредностью. Поэтому в промышленности разработаны способы присоединения изолированных проводов без предваритель-

ного удаления изоляции с целью повышения производительности труда, экономии времени и материалов, повышения плотности монтажа и снижения переходного сопротивления контактного соединения.

Для присоединения изолированных проводов (в том числе и микропроводов диаметром от 0,02 до 0,35 мм) в лаковой либо эмалевой изоляции применяют сварку или пайку, а изоляцию разрушают механическим способом нагретым электродом, дугоплазменным или комбинированными методами.

При механическом разрушении изоляции на проводе ее продавливают заостренным электродом контактной сварочной машины, через электроды и соединяемые детали пропускают импульс сварочного тока, обеспечивающий расплавление или выжигание изоляции и сварку. Суть сварки и пайки с разрушением изоляции на проводах нагретым электродом состоит в том, что изолированный провод прижимается V-образным нагреваемым электродом к привариваемой детали. Изоляция выжигается за счет пропуска импульса электрического тока длительностью 0,02—0,05 с. Для получения паяного соединения одна из соединяемых деталей должна быть покрыта припоем.

При дугоплазменном удалении изоляции и последующей сварке концы проводов вводят в зону горения. Они оплавляются, образуя сварное соединение на концах в виде круглого шарика. Изоляция на проводах при этом сгорает до места их крепления зажимами. Преимуществом способа является простота процесса, однако он характеризуется высокими температурами нагрева деталей. Применяют его для крепления проводов к пластинам.

Для намотки тороидальных намоток используются челночные станки, в которых образование витка обмотки осуществляется с помощью вращающегося челнока, выполненного в виде незамкнутого кольца. Съемную шпулю с необходимым запасом провода закрепляют на торцевой части челнока и подтормаживают пружиной для создания натяжения провода. При вращении челнока 2 провод, закрепленный одним концом на каркасе 1, сматывается со шпули 4 и через направляющий ролик 3 укладывается с определенным шагом на каркасе (рис. 6.7). По этой схеме работают станки модели СНТ-12 для круговой и секционной намотки тороидальных обмоток на кольца с внутренним отверстием диаметром 12 мм проводом диаметром 0,15—0,4 мм со скоростью до 300 витков в минуту.

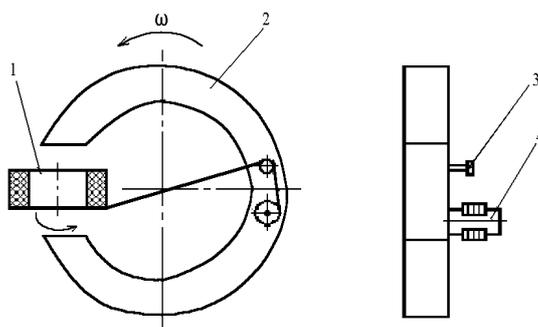


Рис. 6.7. Схема кольцевого наматывания

#### 6.4. ТОРМОЗНЫЕ УСТРОЙСТВА

*Тормозные устройства* обеспечивают необходимое усилие натяжения провода при намотке. При фрикционном торможении провод проходит между губками, прижатием которых создается сила натяжения. Губки выполняют из фетра, фторопласта, поролона и других материалов, которые создают малую инерцию и легко регулируют напряжение. Метод применяется для проводов диаметром более 0,10 мм при скорости наматывания до

300 витков в минуту. Недостатки метода — возможность нарушения изоляции, быстрый износ губок при высоких скоростях наматывания.

При торможении промежуточным роликом с ленточным тормозом провод охватывает его несколькими витками и вращает без проскальзывания. Тормоз может быть ленточным (рис. 6.8, а), колодочным (рис. 6.8, б), пневматическим (рис. 6.8, в), электромагнитным (рис. 6.8, г). Фрикционное торможение наматываемой катушки осуществляется колодочным или ленточным тормозом. Преимущества — отсутствие скольжения провода, постоянство натяжения при скорости наматывания до 300 витков в минуту. Применяются тормозные устройства, состоящие из трех роликов, натяжение регулируется за счет перемещения среднего ролика. Полиспастные системы торможения обеспечивают большой диапазон регулируемого натяжения.

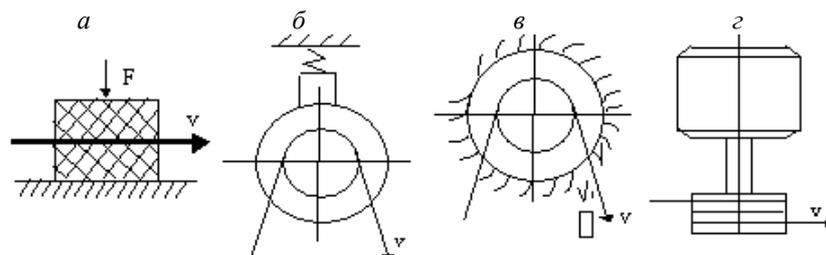


Рис. 6.8. Виды тормозов

Пневматическое торможение применяют для очень тонких проводников диаметром до 0,02 мм, а с малоинерционным кольцом — для проводов большого диаметра при скорости наматывания до 2000 витков в минуту. Пневматическое торможение может осуществляться турбинкой, создающей момент, направленный противоположно направлению наматывания.

Электромагнитное торможение осуществляется за счет создания электромагнитной муфты или электродвигателем момента, направленного в сторону, противоположную направлению наматывания. Оно применяется при скорости наматывания до 6000 витков в минуту, для проводов диаметром 0,03—0,1 мм. К недостаткам метода следует отнести сложность изготовления устройства и его наладки.

## 6.5. ИЗМЕРЕНИЕ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА

Высокая точность изготовления современных намоточных изделий требует стабильности силы натяжения провода в процессе наматывания с отклонением не более 10 % от заданной и надежных средств контроля.

*Механические приборы* просты по устройству, дешевы и удобны в эксплуатации, однако вследствие большой инерционности подвижной системы применяются при скорости наматывания 300—400 витков в минуту. Для измерения натяжения провод 1 (рис. 6.9, а) заправляется через подающие 2 и воспринимающий 3 ролики. С роликом 3 соединена стрелка 5, которая отклоняется под действием усилия натяжения. Пружина 4 возвращает стрелку на шкале в исходное положение.

*Оптико-механические приборы* в качестве преобразователя используют консольную балку, на которой закреплены зеркало и воспринимающий ролик. Под действием усилия натяжения балка прогибается, и луч света, падающий от источника на зеркало, смещается, что регистрируется на экране. Несмотря на высокое качество метод обладает малой чувствительностью и имеет большие габариты.

*Тензометрические приборы* используют в качестве преобразующего элемента тензодатчики, наклеенные на балку 4, на конце которой закреплен воспринимающий ролик 3 (рис. 6.9, б). Провод 1 с помощью подающих роликов 2 образует петлю, и при его натяжении происходит отклонение ролика 3. Для измерения натяжения используется мостовая схема с двумя тензодатчиками 5, включенными в разные плечи моста, что увеличивает

чувствительность, улучшает линейность характеристики, позволяет значительно уменьшать влияние температуры на величину выходного сигнала. По сравнению с предыдущими приборами имеют следующие преимущества: простота конструкции, небольшие размеры, высокая чувствительность. Их недостатками являются малая величина выходного сигнала и необходимость применения тензоусилителя.

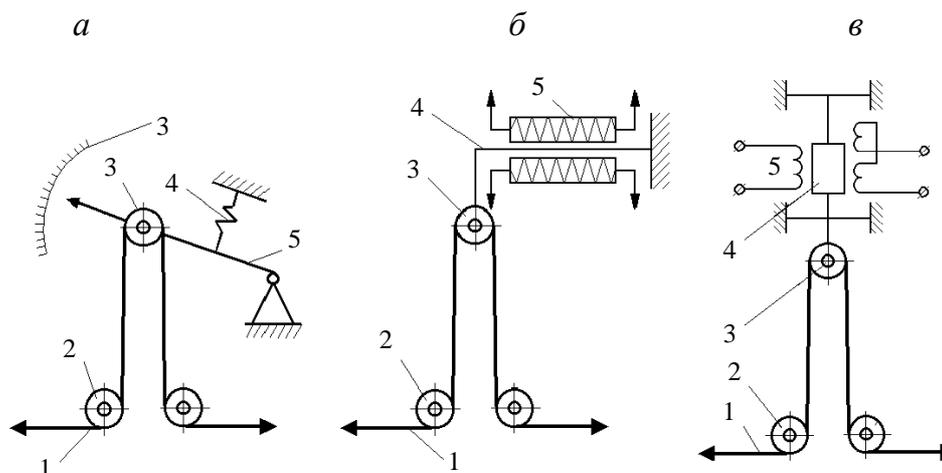


Рис.6.9. Схемы приборов для измерения натяжения провода

Наряду с тензометрическими приборами применяются *индуктивные* (рис. 6.9, в), основанные на изменении реактивного сопротивления катушки путем перемещения магнитного сердечника 4, и емкостные, реагирующие на изменение зазора между обкладками конденсатора. Индуктивные приборы обладают высокой чувствительностью, почти не подвержены воздействию помех, однако имеют малую полосу пропускания. Емкостные измерители высоко чувствительны, однако неустойчивы в работе, подвержены воздействию помех и внешней среды.

## 6.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ КОНТРОЛЯ

Внутренние обрывы в обмотках, намотанных проводом диаметром более 0,1 мм, контролируют автоматически в процессе изготовления катушек. Каркас 5 устанавливают на шпиндель 3 станка, конец провода 1 присоединяют к контактному кольцу 2 с токопроводящей щеткой 4 (рис. 6.10).

Нижний конец провода б питающей катушки 9 присоединяют к контактному кольцу 8, к которому через щетку 7 подводится ток от выпрямителя через реостат. При наличии контакта между выводами 1 и б цепь электромагнита замыкается и стрелка амперметра А отклоняется. При обрыве провода электрическая цепь разомкнется, электромагнит ЭМ замкнет контакт К, загорится сигнальная лампочка Л.

Для больших скоростей наматывания применяют бесконтактный контроль обрыва провода с помощью устройства, состоящего из фотодатчика, регистрирующего скорость вращения бобины с проводом (рис. 6.11). К торцу бобины 2 прикреплен легкий перфорированный диск 4, по одну сторону которого располагается источник светового потока (лампочка 6,3 В), а по другую — фотосопротивление типа ФСК-2. Световой поток, падая на фотосопротивление, создает напряжение переменной частоты, которое подается на электронный усилитель. При обрыве провода, наматываемого на каркас катушки, скорость вращения бобины резко снижается, пропорционально уменьшается освещенность фотосопротивления, что уменьшает переменное напряжение, подаваемое на вход усилителя. В результате этого система управления отключает электродвигатель.

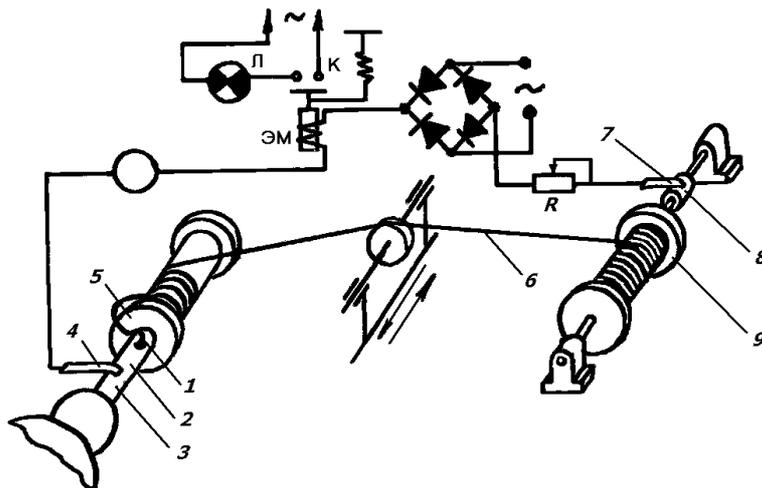


Рис. 6.10. Схема устройства для автоматического контроля обрыва провода

Для контроля количества витков и отсутствия короткозамкнутых витков используют устройство, содержащее сердечник 1, эталонную обмотку L2 и обмотку возбуждения L3, питаемую от генератора (рис. 6.12). При подключении испытуемой катушки L1 к прибору в ней наводится ЭДС. При равенстве витков в эталонной и проверяемой катушках равны ЭДС, наводимые в обмотках, а при наличии короткозамкнутых витков снижается добротность, появляется разностный ток.

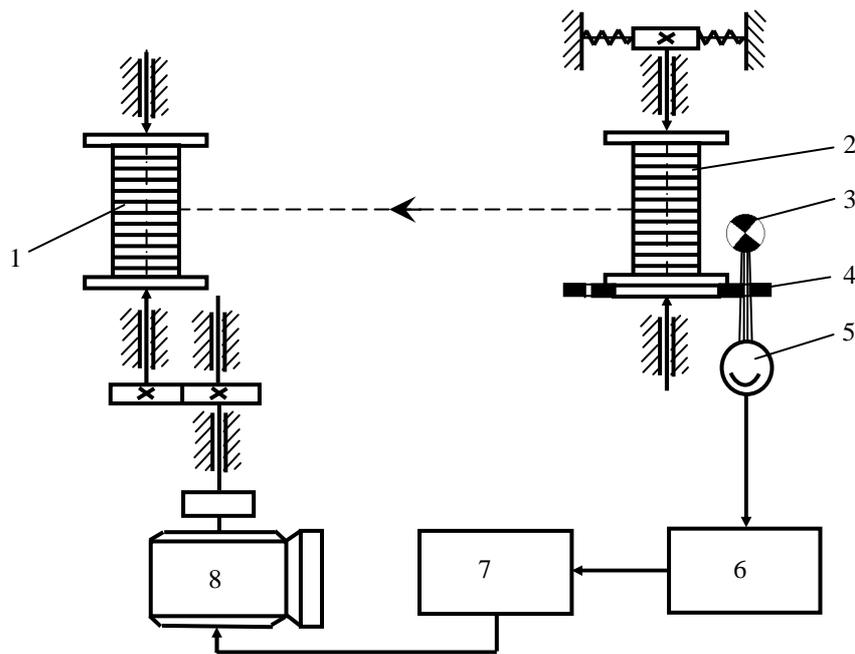


Рис. 6.11. Оптико-механический прибор для контроля обрыва провода:

- 1 – наматываемая катушка; 2 – bobина; 3 – лампа;
- 4 – перфорированный диск; 5 – фотосопротивление;
- 6 – усилитель; 7 – система управления приводом; 8 – двигатель

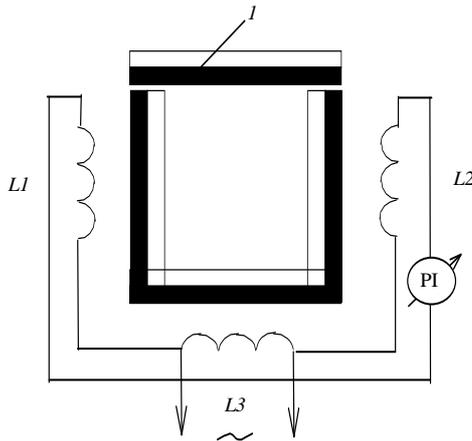


Рис. 6.12. Схема проверки намоточных изделий

### 6.7. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО УСИЛИЯ НАТЯЖЕНИЯ ПРОВОДА ПРИ НАМОТКЕ

Сопротивление обмоток зависит от ряда факторов: натяжения провода, скорости наматывания, формы и размеров каркаса. Сопротивление провода круглого сечения рассчитывается по уравнению

$$R = \rho \frac{4l}{\pi d^2},$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление материала провода;  $l$  — длина провода;  $d$  — диаметр провода.

При серийном изготовлении обмоток все величины, входящие в уравнение, переменны и погрешность сопротивления можно найти, взяв дифференциал от  $R$ :

$$dR = \frac{4l}{\pi d^2} d\rho + \frac{4\rho}{\pi d^2} dl - \frac{8\rho l}{\pi d^3} d(d).$$

Для относительной погрешности сопротивления провода справедливо выражение

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} - 2 \frac{d(d)}{d}.$$

Относительная погрешность  $d\rho/\rho$  вызвана несоответствием действительного значения  $\rho_d$  ее стандартному значению  $\rho_{ст}$ :

$$\delta R_\rho = \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\rho_{ст} - \rho_d}{\rho_{ст}}.$$

Погрешности  $dl/l$  и  $d(d)/d$  обусловлены удлинением провода в процессе его намотки, колебаниями диаметра провода и зависят от формы и диаметра каркаса, скорости наматывания (рис. 6.13).

Для каждого диаметра провода оптимальное усилие натяжения при наматывании определяется по номограмме в зависимости от требуемой точности изготовления. Поскольку наматывание провода на каркас производится с некоторым натяжением, то под действием приложенного усилия провод удлиняется и его сопротивление увеличивается. Это увеличение сопротивления складывается из следующих составляющих:

$\delta R_f$  — увеличение сопротивления провода (на 1—3 %) за счет изгиба по форме каркаса (зависит от  $d_k$ ,  $d_{пр}$ );

$\delta R_c$  — относительное увеличение сопротивления провода в зависимости от скорости наматывания (1—2 %);

$\delta R_n$  — относительное увеличение сопротивления провода в зависимости от натяжения  $F$  (2—3 %);

$\delta R_{\Pi}$  — относительное увеличение сопротивления провода, определяемое разбросом диаметров (1—3 %).

Погрешность сопротивления провода, обусловленная допуском на диаметр токопроводящей жилы,  $\delta R_d = -2 d(d)/d$ . Таким образом, изменение сопротивления провода изменяется не только в зависимости от допуска на диаметр, но и от номинального диаметра. Согласно ГОСТ 2112—82, установлены следующие допуски в зависимости от диаметра медной проволоки:  $\pm 0,003$  ( $d$  до 0,1 мм),  $\pm 0,05$  ( $d = 0,1—0,25$  мм),  $\pm 0,01$  ( $d = 0,26—1,0$  мм).

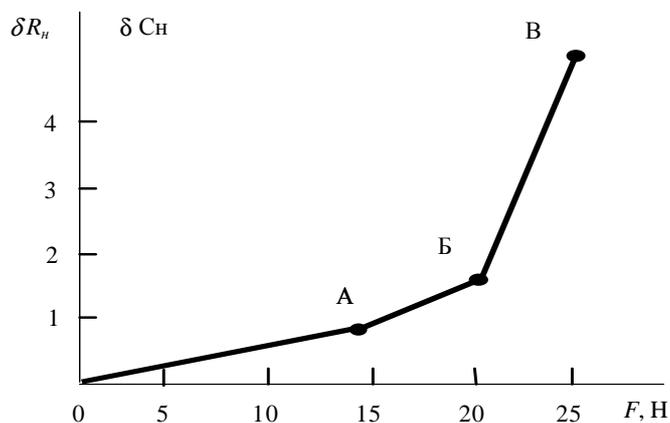


Рис. 6.13. Диаграмма растяжения медного провода марки ПЭЛ диаметром 0,35 мм

Однако при наматывании сопротивление провода  $\delta R_{\Pi}$  зависит не только от рассмотренных факторов, но и от диаметра каркаса  $D_k$ , диаметра провода и скорости наматывания. Таким образом, допуск на сопротивление обмотки должен быть больше суммы погрешностей, возникающих в процессе наматывания:

$$\Delta R \geq dR + dR_r + dR_c + dR_n + dR_{\Pi}.$$

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Конструктивно-технологические особенности намоточных изделий.
2. Намоточные провода и их свойства.
3. Оборудование для намотки.
4. Регулировка и измерение натяжения провода.
5. Выбор оптимального усилия натяжения провода при намотке.

## 7. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

### 7.1. МЕТОДЫ СОЗДАНИЯ МОНТАЖНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В производстве современной ЭА операции сборки и монтажа занимают значительный объем. Их трудоемкость составляет на данный период 50—70 % общей трудоемкости изготовления изделий. Микроминиатюризация компонентов и функционально сложных электронных устройств в значительной степени повышает плотность упаковки элементов в единице объема. Так, создание сверхбольших интегральных схем (СБИС) позволило достичь плотности упаковки  $10^6$ — $10^7$  1/см<sup>3</sup>, что является физическим пределом в настоящее время. Но методы монтажа ЭА не обеспечивают достижения такой высокой плотности упаковки во всем объеме изделия. Если в блоках на печатных платах аппаратуры второго поколения плотность монтажа составляет 10—15 соединений на 1 см<sup>2</sup>, то в аппаратуре третьего поколения 40—50. В современных многослойных коммутационных платах на керамической подложке минимальная ширина линий и зазоров между ними уменьшена до 0,2—0,4 мкм, а минимальный диаметр переходных отверстий — до 0,1 мкм, что позволило достичь плотности монтажных соединений 100—150 на 1 см<sup>2</sup>, а в многокристальных модулях на подложке из полиамида — до 200 на 1 см<sup>2</sup>.

Прогрессирующая микроминиатюризация компонентов, применение поверхностного монтажа вызывают необходимость разработки перспективной технологии монтажных соединений, которая для создания ЭА с высокой надежностью внутриблочных и межблочных соединений. Традиционные процессы монтажа не обеспечивают необходимой производительности и высокого процента выхода годных изделий. Низкий уровень автоматизации процессов, применение ручного труда на отдельных операциях не способствуют высокому качеству соединений. Статистические данные показывают, что 50—80 % всех отказов в аппаратуре происходит вследствие дефектов монтажных соединений, причем обнаружение и исправление отказа на этапе сборки блока обходится в 1000 раз дешевле, чем при испытаниях аппаратуры.

Для разработки новых, более эффективных процессов, монтажа ЭА необходимы: углубленное изучение физико-химических основ формирования соединений, рациональный выбор методов активации, применение новых материалов и автоматизированного оборудования со встроенными системами контроля.

Основные требования, предъявляемые к электрическим соединениям при монтаже ЭА:

- минимальное электрическое переходное сопротивление в зоне контакта;
- механическая прочность, близкая к прочности соединяемых материалов;
- стабильность электрических и механических параметров во времени при внешних воздействиях;
- высокая надежность и долговечность в заданных условиях эксплуатации;
- экономичность и производительность процесса создания;
- легкость и достоверность контроля качества.

Низкое электрическое переходное сопротивление и высокая механическая стабильность соединений достигаются за счет сил атомной связи, при которой атомы контактирующих металлов, оставаясь в узлах кристаллической решетки, отдают со своих внешних оболочек электроны, коллективизируемые в виде электронного газа. Для возникновения металлической связи необходимо атомы металлов сблизить до расстояния 1—10 нм и ввести энергию в зону соединения. Энергия может быть введена посредством нагрева, давления или трения. При нагреве с ростом температуры увеличивается подвижность атомов, а с появлением жидкой фазы значительно возрастает скорость диффузии.

Давление необходимо для сближения взаимодействующих металлических поверхностей на расстояния, при которых действуют силы Ван-дер-Ваальса. При степени деформации больше 50 % благодаря диффузии возни-

кает металлическая связь. При перемещении механических поверхностей относительно друг друга в процессе трения в месте соприкосновения макровыступов поверхности создаются высокие удельные давления, которые приводят к пластическому течению или расплавлению металла.

Серьезным препятствием для контактирования являются жировые пленки и химические оксиды на поверхности соединяемых металлов. Удаление этих пленок химическими (флюсованием, обезжириванием) или физическими (ультразвуком, плазменной очисткой) методами является неотъемлемой частью процесса образования соединения.

Методы создания электрических соединений основаны на непосредственном контактировании соединяемых материалов и использовании промежуточных материалов в зоне соединения (рис. 7.1). Непосредственное контактирование соединяемых материалов осуществляют под воздействием давления (холодная сварка, накрутка, обжимка), теплоты и давления (различные методы сварки), давления и физического воздействия (УЗ-сварка). Соединения с промежуточными материалами в виде присадок припоя (пайка) или токопроводящего клея (склеивание) выполняют под действием давления и теплоты.

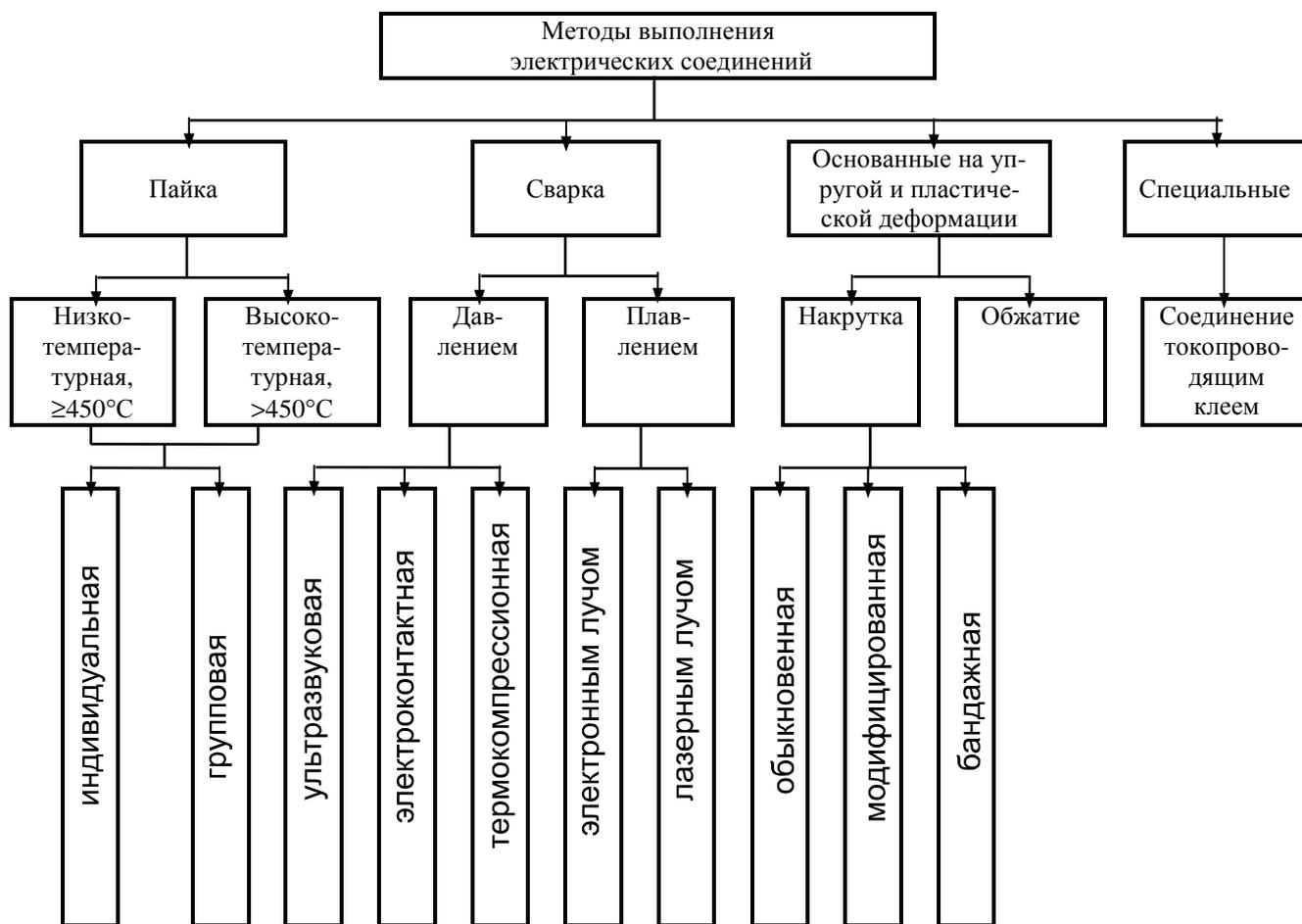


Рис. 7.1. Классификация методов выполнения электрических соединений

Наиболее важным показателем электрических соединений является *переходное электрическое (контактное) сопротивление*. Если сравнить падение напряжение в трех случаях: в сплошном проводнике на участке *AB* (рис. 7.2), в зоне контакта двух соединенных непосредственно друг с другом материалов и в зоне контакта через промежуточный материал, то окажется, что оно будет различным.

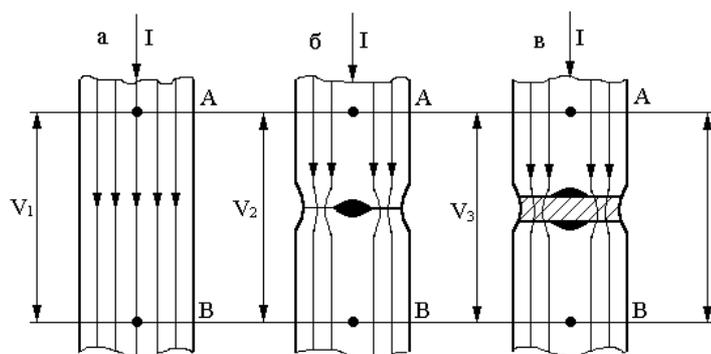


Рис. 7.2. Схема измерения падения напряжения в зоне контакта:  
*a* - сплошной проводник, *б* - непосредственное контактирование,  
*в* - соединение через промежуточный материал

Для сплошного проводника электрическое сопротивление постоянному току  $R_v$ , определяется на основании известного закона Ома. Для двух соединенных металлических проводников одинакового сечения и материала электрическое сопротивление контакта

$$R_k = R_v + R_{\text{пер}},$$

где  $R_{\text{пер}}$  — переходное электрическое сопротивление. В этом случае гомогенную связь между материалами нарушают различные поверхностные неровности и оксидные пленки в месте контакта и переходное сопротивление складывается из сопротивления оксидных пленок  $R_{\text{п}}$  и сопротивления сужению  $R_c$ :

$$R_{\text{пер}} = R_{\text{п}} + R_c.$$

Сопротивление сужению возникает вследствие неровности поверхности контакта, наличия дефектов в зоне контакта и стягивание линий тока:

$$R_c = \rho / S_k,$$

где  $\rho$  — удельное сопротивление;  $S_k$  — площадь поверхности контактирования.

Сопротивление оксидных пленок можно определить так:

$$R_{\text{п}} = \rho_{\text{п}} h / S_k,$$

где  $\rho_{\text{п}}$  — удельное сопротивление поверхностных пленок;  $h$  — толщина пленок.

Для электрического соединения через промежуточный материал контактное сопротивление складывается из следующих составляющих:

$$R_k = R_v + 2R_{\text{пер}} + R_{\text{м}},$$

где  $R_{\text{м}}$  — электрическое сопротивление слоя промежуточного материала.

Поскольку отношение удельных электрических сопротивлений оловянно-свинцовых припоев и медного проводника  $\delta = \rho_{\text{пр}} / \rho_{\text{м}} = 8-10$ , то контактное сопротивление паяного соединения выше, чем соединения с непосредственным контактированием. С учетом этого расчет паяного соединения на токовую нагрузку проводится в наиболее "тяжелом" варианте, т. е. считается, что весь ток проходит через припой. Для круглых деталей, соединяемых встык при  $D_2 > D_1$  (рис. 7.3, *a*), диаметр припоя в соединении рассчитывается так:

$$D_{\text{пр}} = \sqrt{\delta} D_1,$$

где  $D_1$  — диаметр соединяемого проводника.

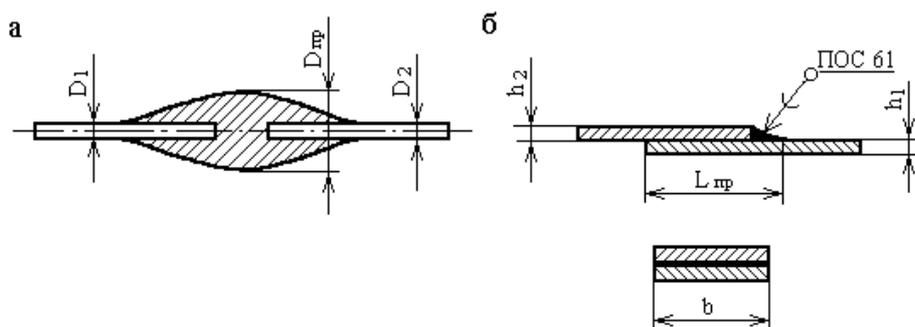


Рис. 7.3. Соединения пайкой: а – стыковое, б – нахлесточное

Расчет механической прочности паяного соединения выполняют по сечению наиболее "слабой" детали. В паяном соединении такое сечение проходит по припою. Механическая прочность спая  $P$  определяется следующим образом:

$$P = \sigma_{\text{в}} S_{\text{пр}},$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  — предел прочности припоя при растяжении;  $S_{\text{пр}}$  — площадь поперечного сечения припоя, которое для нахлесточного соединения (рис. 7.3, б) равно  $L_{\text{пр}} b$ ;  $b$  — ширина нахлеста.

Сравнительная характеристика параметров электрических соединений, выполненных различными методами, приведена в табл. 7.1.

Табл. 7.1. Параметры электрических соединений

Вид соединения	Переходное сопротивление $R_{\text{пер}}$ , мОм	Прочность $P$ , МПа	Интенсивность отказов $1 \cdot 10^{-9}$ , ч <sup>-1</sup>	Тепловое сопротивление $R_{\text{т}}$ , °С/Вт
Сварка	0,01—1	100—500	0,1—3,0	0,001
Накрутка	1—2	60—80	0,2—0,5	0,0005
Пайка	2—5	40—50	1—10	0,002
Обжимка	1—10	20—50	2—5	0,001
Токопроводящим клеем	(1—10) Ом·м	5—10	50	5,0

Паяные электрические соединения нашли самое широкое применение при монтаже ЭА благодаря следующим достоинствам: низкому и стабильному электрическому сопротивлению, широкой номенклатуре соединяемых металлов, легкости автоматизации, контроля и ремонта. Недостатки паяных соединений связаны с высокой стоимостью используемых цветных металлов, необходимостью удаления остатков флюса, низкой термостойкостью.

Сварные электрические соединения по сравнению с паяными имеют следующие преимущества: более высокая механическая прочность, отсутствие присадочного материала, меньшая площадь контакта. К недостаткам следует отнести: критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, сложность группового контактирования и ремонта.

Электрические соединения, основанные на пластической деформации элементов в холодном состоянии (накрутка и обжимка), характеризуются высокой механической прочностью, низким переходным электрическим сопротивлением, легкостью механизации, экономичностью и надежностью при эксплуатации. К недостатками относятся: необходимость специальных контактирующих элементов, увеличенная площадь контакта.

*Накрутка* — это соединение оголенного провода со штыревым выводом, имеющим острые кромки, путем навивки провода на вывод с определенным усилием. При этом кромки штыря, частично деформируясь, врезаются в провод, разрушая на нем оксидную пленку и образуя газонепроницаемое соединение. Концентрация на-

пряжений в зоне контакта и значительное давление (до 15—20 МПа) обуславливают взаимную диффузию металлов, что способствует повышению надежности соединений.

*Обжимка* представляет собой способ образования контактного соединения под действием сильной пластической деформации соединяемых элементов. Вследствие холодной текучести контактирующих поверхностей между соединяемыми материалами образуется газо- и вибростойкое соединение.

*Токопроводящие клеи* в отличие от припоев отверждаются при более низких температурах, что не вызывает изменения структуры соединяемых материалов. Токопроводящие клеи — контактолы — относятся к гетерогенным структурам, в которых связующим являются различные смолы, а наполнителем — порошки серебра, золота, палладия, никеля, меди, графита. Основную массу таких клеев приготавливают на основе эпоксидных, уретановых, силиконовых композиций.

Контактолы применяются при монтаже ЭА в тех случаях, когда пайка невозможна, так как нагрев ведет к повреждению термочувствительных компонентов, а также в труднодоступных местах сборочных единиц и блоков (например, для присоединения кристаллов и подложек ИМС к корпусам, при ремонте печатных плат, при заземлении компонентов, в СВЧ-устройствах). Контактолы имеют низкое удельное объемное электрическое сопротивление и стабильные электрические свойства при эксплуатации в жестких климатических условиях. Клеи типа К-8, К-12 применяются для соединения палладиевых, серебряных и медных поверхностей; К-16, К-17 — покрытых припоем ПОС 61 и ПСрОС3-58, ТПК-3 — диэлектрических и металлических поверхностей. Недостатками данного вида соединений являются высокое электрическое сопротивление контакта, низкие термостойкость и надежность.

Для посадки кристаллов ИМС на основания используют токопроводящие пасты. При автоматизированной сборке кристаллов больших размеров токопроводящие пасты обеспечивают высокую производительность, низкую стоимость, невысокую температуру процесса.

Токопроводящая композиция на основе клея ВК-32-200 содержит 30—35 % никелевого порошка с размером частиц менее 10 мкм и 0,3—0,45 % порошка монокристаллического кремния с размером частиц 0,5—2 мкм. Удельное объемное сопротивление композиции составляет  $(1,5—2) \cdot 10^4$  Ом·см, предел прочности соединений на разрыв 10—15 МПа. Недостатком данной композиции является изменение ее прочностных свойств при последующих операциях (термокомпрессионная разварка выводов), а также сложность поддержания однородного состава в процессе приклеивания. Лучшие характеристики имеют токопроводящие композиции с металлическим наполнителем — порошком серебра. Так, композиция Ablebond 84 фирмы Ablestik имеет удельное сопротивление  $1 \cdot 10^{-4}$  Ом·см, предел прочности соединений на разрыв — до 26 МПа.

## 7.2. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ПРОЦЕССА ПАЙКИ

*Пайкой* называется процесс соединения материалов в твердом состоянии путем введения в зазор легкоплавкого металла — припоя, взаимодействующего с основными материалами и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва. Из определения следует, что:

- пайка происходит при температурах, существенно меньших температур плавления соединяемых материалов, что уменьшает их перегрев;
- возможно соединение как металлических, так и неметаллических материалов;
- в зоне контакта должен образовываться промежуточный слой, состоящий из припоя и продуктов его взаимодействия с паяемыми материалами.

Для образования качественного паяного соединения необходимо: подготовить поверхности соединяемых деталей; активировать материалы и припой; удалить оксидные пленки в зоне контакта; обеспечить взаимодействие на межфазной границе раздела; создать условия для кристаллизации жидкой металлической прослойки.

Подготовка поверхностей деталей к пайке включает механическую, химическую или электрохимическую очистки от оксидов, загрязнений органического и минерального происхождения, а также нанесение покрытий, улучшающих условия пайки или повышающих прочность и коррозионную стойкость паяных соединений.

Удаление продуктов коррозии и оксидных пленок механическим способом производят с помощью режущего инструмента (напильника, шлифовального круга, шабера), а также наждачной бумаги, проволочной сетки. Для повышения производительности при обработке протяженных или сложнопрофилированных изделий применяют гидроабразивную очистку с помощью струи жидкости или вращающихся щеток из синтетического материала с добавлением в моющий состав абразивных частиц. Образование шероховатой поверхности после механической обработки способствует увеличению растекания припоя, так как риски на поверхности являются мельчайшими капиллярами.

Удаление поверхностных пленок, препятствующих смачиванию расплавленным припоем, осуществляется как химическими, так и электрохимическими способами. Химическое обезжиривание деталей проводят в 5 % - м растворе щелочи или в органических растворителях (ацетон, бензин, спирт, четыреххлористый углерод), спиртобензиновых и спиртофреоновых смесях путем протирки, погружения, распыления, обработки в паровой фазе или ультразвуковой ванне.

Для ультразвукового обезжиривания используют ванны УЗВ-0,1, УЗВ-0,25, УЗВ-0,4, работающие на частотах 18—22 кГц в докавитационном режиме, который обеспечивает получение интенсивных микропотоков в моющей жидкости, что гарантирует высокое качество очистки мелких деталей и ускоряет процесс в 5—10 раз.

Толстые слои оксидных пленок удаляют травлением в растворах кислот или щелочей. Состав раствора определяется видом металла, толщиной оксидной пленки и требуемой скоростью травления. Электрохимическое травление ускоряет процесс растворения оксидных пленок и проводится при плотности тока 2—5 А/дм<sup>2</sup>. После травления детали тщательно промывают в нейтрализующих растворах.

Очищенные детали необходимо немедленно направлять на сборку и пайку, так как паяемость меди сохраняется 3—5 сут, а серебра 10—15 сут. Поэтому для обеспечения межоперационного хранения деталей и компонентов ЭА на их поверхности наносят металлические покрытия, которые улучшают процесс смачивания припоем и сохраняют паяемость в течение длительного времени. В качестве таких покрытий используют легкоплавкие припои (ПОС 61, ПОСВ 33 и др.), сплавы олова с висмутом или никелем, золото, серебро, палладий и другие металлы, которые наносят погружением в расплав, гальваническим или термовакуумным осаждением, а также плакированием. При первом методе погружение производят в расплавы припоев после предварительного флюсования. Гальванические покрытия благородными металлами наносят толщиной 3—6 мкм, остальными — 6—9 мкм. Пленки, полученные термовакуумным осаждением, отличаются высокой равномерностью, отсутствием окисления покрытия, однако имеют малую толщину (0,1—1,0 мкм). Плакирование осуществляется совместной прокаткой паяемого металла и металла покрытия; при этом обеспечивается равномерная толщина покрытия (100—150 мкм). После выполнения подготовительных операций или межоперационного хранения контролируется пригодность деталей к пайке путем оценки паяемости.

Активация паяемых поверхностей необходима для физико-химического взаимодействия атомов основного металла и припоя. При этом с поверхности взаимодействующих металлов должны быть удалены оксидные пленки, а атомы должны достичь требуемого уровня энергии активации.



Рис.7.4. Классификация способов нагрева при пайке

При температуре пайки, когда все атомы возбуждены, скорость реакции взаимодействия определяется уравнением

$$\frac{dN}{dT} = (N_o - N) \gamma e^{-Q/(k T_n)},$$

где  $N_o$  — число контактирующих атомов на поверхности основного металла;  $N$  — число атомов, вступивших в химическую связь;  $\gamma$  — частота собственных колебаний атомов (для металлов  $1 \cdot 10^{13} \text{ с}^{-1}$ );  $Q$  — энергия активации для образования химической связи;  $k$  — постоянная Больцмана ( $1,381 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$ );  $T_n$  — температура пайки, К.

Проинтегрировав последнее уравнение при  $T_n = \text{const}$ , и следующих начальных и конечных условиях:  $t = 0, N = 0, t = t_n, N = N_n$ , получим время пайки, в течение которого прореагирует  $N_n$  атомов металла:

$$t_n = -\frac{1}{\gamma} \ln \left( 1 - \frac{N_n}{N_o} \right) e^{-Q/(k T_n)^2}.$$

Следовательно, тепловая энергия активации  $Q$  оказывает решающее влияние на скорость взаимодействия атомов основного металла и припоя. Поскольку главным фактором образования паяного соединения является тепловая активация паяемых поверхностей, то способ нагрева определяет классификацию методов пайки (рис.7.4).

Существуют три способа переноса энергии в форме теплоты: теплопроводностью, конвекцией и излучением. Перенос теплоты при пайке паяльником осуществляется за счет теплопроводности паяльного жала, которое служит аккумулятором теплоты, выделяемой нагревателем. Взаимосвязь температуры жала  $T_{ж}$  и нагревателя  $T_n$  следующая:

$$T_{ж} = \frac{T_n}{\text{ch}(m L)},$$

где  $\text{ch}$  — косинус гиперболический;  $m = \pm \sqrt{\alpha \Pi / (\lambda S)}$ ;  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи с поверхности жала;  $\Pi$  — периметр поперечного сечения жала;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности стержня;  $S$  — площадь поперечного сечения;  $L$  — длина жала.

Скорость нагрева паяльником зависит от температуры жала и количества теплоты, аккумулированного жалом (4—8 кДж). Удельная мощность, выделяемая в зоне пайки деталей паяльником, не превышает  $1 \cdot 10^4 \text{ Вт/м}^2$ .

Пайка расплавленным припоем осуществляется путем контакта паяемых деталей с обширной поверхностью расплава, аккумулирующего значительно большее количество теплоты, чем паяльник, поэтому удельная мощность при этом достигает  $10^6 \text{ Вт/м}^2$ , что сокращает время пайки.

При газопламенном нагреве пламя горелки является конвективным теплообменным источником нагрева. Удельный тепловой поток

$$g = \alpha (T_{пл} - T_d),$$

где  $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи между пламенем горелки и нагреваемым материалом детали;  $T_{пл}$  — температура пламени;  $T_d$  — температура детали.

Для газопламенной пайки, сварки, резки мелких деталей с высокой температурой плавления применяют аппараты с водородной микрогорелкой, в основу работы которых положен принцип электролиза воды электрическим током. Аппарат представляет собой настольный переносной прибор, состоящий из электролизера, смесителей, дополнительного смесителя, панели управления, горелки. Для увеличения проводимости в дистиллированную воду добавляют химически чистый едкий калий. В результате прохождения электрического тока из раствора выделяются водород и кислород. В смесителе после прохождения через водный затвор смесь насыщается парами бензина (спирта или ацетона) и поступает в горелку. Управление электролизом воды осуществляется с помощью электронного регулятора мощности. Горелка формирует необходимый факел пламени и снабжается быстросъемными наконечниками. При газопламенном нагреве возможен пережог деталей, окисление припоя вследствие неравномерности температурного поля в зоне нагрева.

Более перспективны бесконтактные способы нагрева паяемых деталей различными видами излучений. При пайке излучением высокой частоты (ВЧ) в деталях индуцируются токи, которые проходят главным образом в поверхностном слое толщиной  $\delta$  и разогревают детали до необходимой температуры. Глубина проникновения токов ВЧ

$$\delta = 503 \sqrt{\rho / (\mu f)},$$

где  $\rho$ ,  $\mu$  — соответственно удельное электрическое сопротивление и магнитная проницаемость металла;  $f$  — частота тока.

Поскольку глубина проникновения зависит от частоты, то для толстостенных деталей (2—5 мм) применяют низкочастотный нагрев (66 кГц), для тонкостенных — ВЧ-нагрев (440; 1760 кГц). Скорость нагрева пропорциональна  $\sqrt{\rho \mu}$ , удельная мощность в зоне нагрева составляет  $10^6$ — $10^8$  Вт/м<sup>2</sup>.

Технологической оснасткой при ВЧ-пайке является индуктор, представляющий собой катушку из нескольких витков полой медной трубки, по которой в процессе нагрева интенсивно прокачивается охлаждающая жидкость — вода. Витки индуктора располагаются вблизи нагреваемых деталей (рис. 7.5), при этом КПД нагрева

$$\eta = \frac{1}{1 + 7,25 \sqrt{\rho_1 / (\mu \rho_2)}},$$

где  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — удельные электрические сопротивления индуктора и детали соответственно.

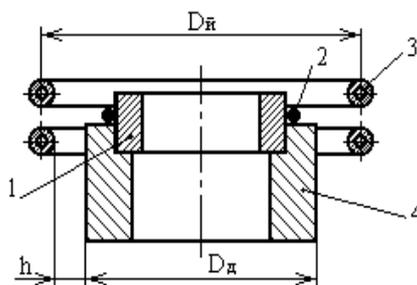


Рис. 7.5. Схема нагрева токами ВЧ:  
1, 4 — детали; 2 — припой; 3 — индуктор;  $D_n$ ,  $D_d$  — диаметр индуктора и детали

КПД индуктора тем выше, чем большие значения  $\rho_2$  и  $\mu$  для нагреваемого металла (для сталей  $\eta = 0,7—0,8$ ; для медных сплавов  $0,5—0,6$ ). Мощность, выделяемая при высокочастотном нагреве в детали, рассчитывается по формуле

$$P_d = \frac{V_{эф}^2 \cos \varphi \eta}{n^2 R_d},$$

где  $V_{эф}$  — эффективное напряжение на индукторе;  $\cos \varphi$  — коэффициент мощности, зависящий от расстояния  $\eta$  и магнитной проницаемости  $\mu$ ;  $n$  — число витков индуктора;  $R_d$  — электрическое сопротивление детали.

При заданной номинальной мощности ВЧ-установки, постоянных значениях коэффициента мощности, КПД нагрева и числа витков индуктора, которое ограничено размерами зоны нагрева, повышение эффективности ВЧ-нагрева может быть достигнуто за счет снижения электрического сопротивления изделия, определяемого по формуле

$$R_d = \frac{2\pi L_n}{b} \sqrt{\rho^2 \mu f},$$

где  $L_n$  — средняя длина зоны нагрева;  $b$  — ширина зоны нагрева.

Эффективность нагрева повышается, если в зоне нагрева образовать электрический короткозамкнутый контур с малым удельным электрическим сопротивлением, расположенный вдоль паяемого соединения и выполненный в виде локального покрытия (медного, серебряного) толщиной  $20—30$  мкм либо специальной оправки.

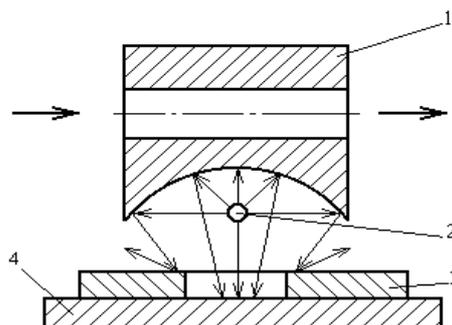


Рис. 7.6. Схема ИК-нагрева:  
1 – рефлектор; 2 – ИК-лампа; 3 – маска; 4 – деталь

Воздействие СВЧ-излучения мощностью  $5—10$  Вт на атмосферу рабочего газа (аргона) приводит к его ионизации, что дает возможность получать плазменный стержень тлеющего разряда диаметром  $0,1—10$  мм с температурой до  $1000$  °С. СВЧ-излучение от магнетронного генератора непрерывного действия мощностью  $5—10$  Вт возбуждают в волноводно-коаксиальном тракте, в который подают аргон с небольшой добавкой водорода со скоростью  $1—5$  л/мин. С помощью плазменного стержня практически безынерционно можно вести пайку планарных выводов микросхем к контактными площадкам плат. Недостатком метода является значительный градиент температур как по длине стержня, так и в радиальном направлении.

Инфракрасное (ИК) излучение применяют для бесконтактного нагрева деталей в различных средах: на воздухе, в контролируемой атмосфере, в вакууме. Зависимость интенсивности излучения  $I$  от температуры и длины волны источника устанавливает закон Планка:

$$I = \frac{C_1}{\lambda^5} \left( e^{C_2/(\lambda T)} - 1 \right)^{-1},$$

где  $C_1, C_2$  — постоянные Планка:  $C_1 = 0,374 \cdot 10^{-5}$  Вт,  $C_2 = 1,439 \cdot 10^{-2}$  м·К;  $\lambda$  — длина волны излучения;  $T$  — абсолютная температура.

Инфракрасное тепловое излучение находится в диапазоне длин волн 0,76—1000 мкм, однако наибольшая эффективность (75 %) приходится на коротковолновый поддиапазон 0,75—3,0 мкм. Падающее на паяемую поверхность ИК-излучение вследствие поглощения незначительно проникает вглубь металла, частично отражаясь от его поверхности. Отражательная способность гладких поверхностей чистых металлов зависит от их удельного электрического сопротивления и температуры поверхности:

$$\epsilon = 1 + 0,1 \rho T .$$

Для полированных поверхностей из серебра, алюминия коэффициент отражения составляет 95 %, поэтому они используются для изготовления рефлекторов ИК-установок. Неотраженная часть излучения поглощается рефлектором, и в установках предусматривают его водяное или воздушное охлаждение (рис. 7.6).

В качестве источников ИК-энергии используются галогенные кварцевые лампы мощностью 500—2000 Вт. Галогенные (йодные, галоидные) лампы изготавливаются из кварцевого стекла и имеют вольфрамовую спираль с рабочей температурой порядка 3000 °С и сроком службы 2000—5000 ч.

В процессах пайки широкое применение получили два вида ИК-нагрева: локальный сфокусированный и прецизионный рассеянный. Для локального нагрева целесообразны отражатели эллиптической формы, фокусирующие излучение источника, помещенного в ближнем фокусе рефлектора, на объект нагрева в дальнем фокусе (рис. 7.7, а). Для прецизионного нагрева используют параболические (рис. 7.7, б) либо овально-цилиндрические с сопловыми насадками рефлекторы (рис. 7.7, в).

Суммарный поток энергии от параболического рефлектора

$$E_{\text{общ}} = E_{\text{пр}} + E_{\text{отр}} ,$$

где  $E_{\text{пр}}, E_{\text{отр}}$  — прямое от источника и отраженное от рефлектора излучение соответственно.

Поскольку профиль параболического рефлектора описывается уравнением

$$x^2 = y/(2l) ,$$

где  $l/2$  — расстояние от лампы до рефлектора, то прямое излучение в плоскости, перпендикулярной к оси лампы

$$E_{\text{пр}} = \frac{I R}{\pi h} ,$$

где  $I$  — интенсивность излучения источника, Вт/м<sup>2</sup>;  $R$  — радиус источника;  $h$  — расстояние до объекта.

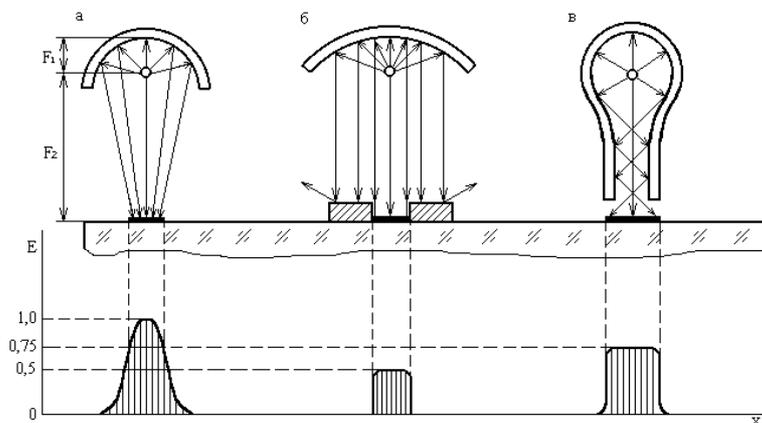


Рис. 7.7 Типы отражателей ИК-излучения

Излучение, отраженное рефлектором, определяется выражением

$$E_{\text{отр}} = \frac{2k I R}{\pi l},$$

где  $k$  — коэффициент отражения.

При длине волны  $\lambda_{\text{max}} = 1,1$  мкм спектральная интенсивность излучения достигает 50—60 Вт/(ср·мкм), где ср—стерадиан, а облученность равна  $(1,0—1,4) \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

К достоинствам пайки ИК-излучением следует отнести: бесконтактный подвод энергии к паяемым деталям, точную регулировку времени и температуры нагрева, локальность нагрева в зоне пайки. Недостатки процесса — затруднение при флюсовой пайке, так как испаряющийся флюс загрязняет лампы и рефлекторы, отсутствие серийно выпускаемого оборудования.

Оптическое излучение в диапазоне длин волн 0,7—10,6 мкм, генерируемое различными типами лазеров, является удобным, надежным и экономичным видом бесконтактного нагрева. В технологии пайки используют лазерные установки, основным элементом которых является *оптический квантовый генератор* (ОКГ), создающий мощный импульс монохроматического когерентного излучения. Пайка лазерным излучением не требует вакуума и позволяет соединять изделия из разнотолщинных элементов. В процессах пайки используют как непрерывное, так и импульсное лазерное излучение.

Процессы пайки ЭРЭ и микросхем на печатные платы с помощью лазерного излучения, получаемого от твердотельного ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) мощностью до 125 Вт с  $\lambda = 1,06$  мкм, отличаются высокой производительностью. Средняя плотность потока излучения в случае круглой формы луча с гауссовой кривой распределения определяется следующим образом:

$$p = 1,36 \frac{P}{VD},$$

где  $P$  — падающая мощность излучения;  $V$  — скорость перемещения платы;  $D$  — диаметр луча на плате.

Для качественной пайки выводов микросхем к контактным площадкам печатных плат необходимо, чтобы плотность потока излучения составляла 1,95—2,0 Дж/мм<sup>2</sup>. Перемещение печатной платы со скоростью 8 мм/с обеспечивает производительность процесса 400—440 паяк в минуту. Процесс пайки может быть легко автоматизирован путем применения координатного стола и системы ЧПУ, осуществляющей управление столом и мощностью излучения. Лазерное излучение не влияет на электроизоляционные свойства диэлектриков, если средняя плотность потока не превышает 3,4 и 2,8 Дж/мм<sup>2</sup> для материалов СФ-2-50 и ФТС соответственно.

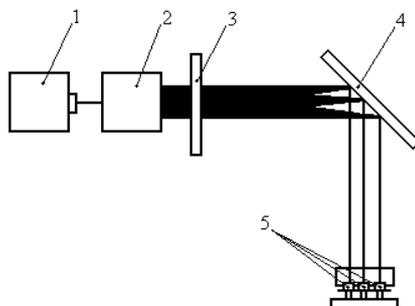


Рис. 7.8. Схема лазерной пайки

Для низкотемпературной пайки за рубежом используют установки многоточечной пайки с голографическим делением луча (рис. 7.8). В этом случае луч лазера, генерируемый ОКГ  $I$ , с помощью телецентрической оптики

2 сначала расширяется до значительного диаметра, а затем направляется как плоскопараллельный поток на голограмму 3.

Отражаясь от плоского зеркала 4, лучи направляются на участки пайки 5 с высокой степенью локальности. Для каждого процесса пайки необходима специальная голограмма, содержащая информацию о том, на какое количество элементарных лучей должен быть разложен пучок и в каких точках сфокусирован каждый из них.

Для пайки легкоплавкими припоями изделий электронной техники достаточна мощность 5 Вт, выделяемая в зоне протекания процесса. Одним импульсом промышленного лазера мощностью 20—50 Вт можно осуществлять пайку одновременно в нескольких точках. При использовании лазерных установок целесообразно применять в качестве припоев покрытия, которые, оплавляясь, образуют соединения.

В обычном состоянии поверхность металлов покрыта оксидными пленками. Нагрев основного металла и расплавленного припоя приводит к тому, что их активность снижается вследствие взаимодействия с кислородом воздуха и ростом оксидных пленок на поверхности. Удаление оксидных пленок в процессе пайки является необходимым условием получения качественных паяных соединений. Классификация способов удаления оксидных пленок приведена на рис. 7.9.

Константа равновесия реакции окисления металла  $K_p$  зависит от давления паров кислорода в окружающей среде при данной температуре:

$$K_p = \frac{P_{Me}^n P_{O_2}^{m/2}}{P_{MeO_n}}$$

где  $P_{Me}$ ,  $P_{O_2}$ ,  $P_{MeO_n}$  — давление паров металла, кислорода и оксида соответственно.

Уменьшив парциальное давление кислорода и увеличив температуру среды, можно сместить равновесие реакции в сторону разложения (диссоциации) оксида. Однако полное разложение оксидов металла (например, олова, меди) происходит при очень низком давлении ( $10^{-6}$ — $10^{-8}$  Па) и температуре 600—700 °С.

При нагреве металлов в активных (восстановительных) газовых средах, в качестве которых используют азотно-водородную смесь или добавку оксида углерода, происходит восстановление оксидов металлов активными компонентами газовых сред по реакциям:

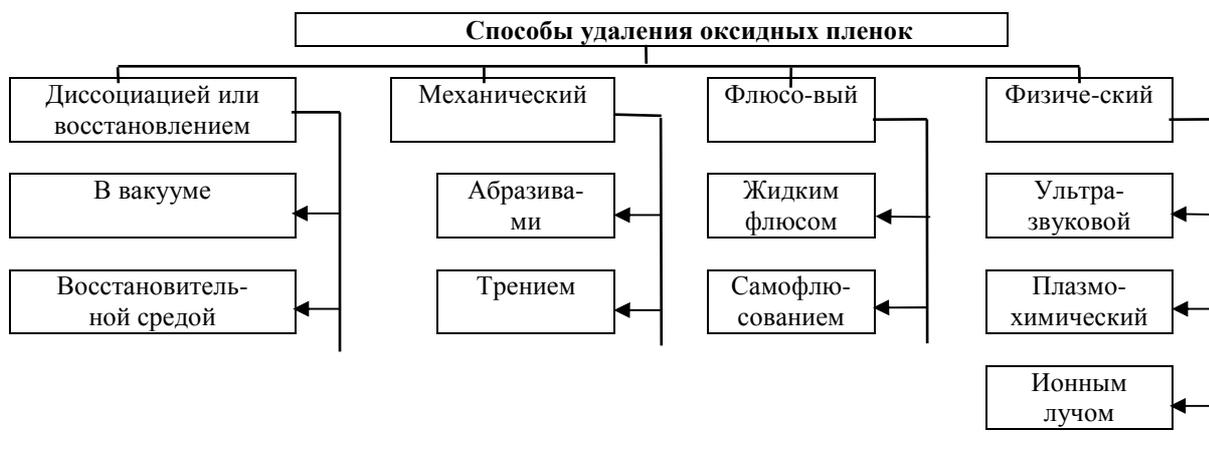
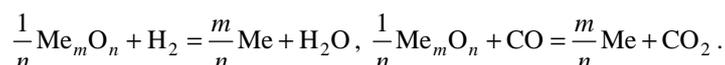


Рис. 7.9. Классификация способов удаления оксидных пленок

Недостатком такого процесса является взаимодействие водорода с расплавленным припоем, что приводит в ряде случаев к появлению водородной хрупкости, образованию пор, трещин и других дефектов.

Суть *механического удаления* оксидных пленок с паяемой поверхности заключается в их разрушении под слоем жидкого припоя с помощью режущего или абразивного инструмента, при этом припой защищает паяемую поверхность от воздействия кислорода воздуха и вступает с ней в физический контакт. В качестве режущего и абразивного инструмента используют металлические щетки, сетки, а в качестве материалов — порошки из твердых материалов, асбест, вводимые в припой в мелкоизмельченном виде. Недостатки метода — низкая производительность, неравномерность удаления оксидных пленок, загрязнение припоя частицами абразива.

Самым распространенным способом удаления оксидов в процессе пайки является *флюсование*. Флюс как химический реагент имеет два основных назначения: очистить поверхность металла от оксидов; уменьшить поверхностное натяжение припоя и угол смачивания. Типичные представители активных флюсов содержат в качестве растворителя воду или спирты, активаторами являются неорганические и органические кислоты либо их соли, например соляная или фосфорная кислота, неорганические соли ( $ZnCl_2$ ,  $NH_3Cl$ ,  $SnCl_2$ ,  $CuCl$  и др.).

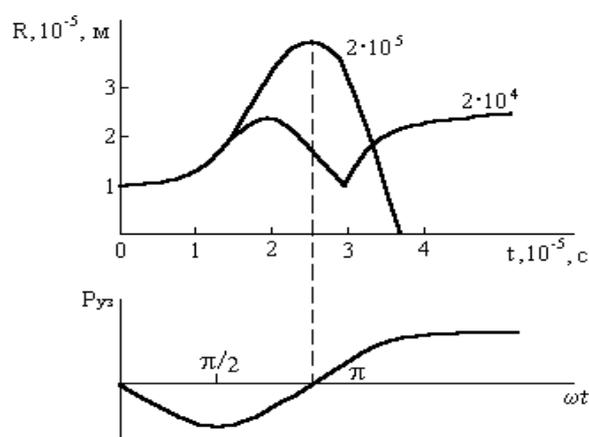


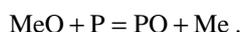
Рис.7.10. Динамика кавитационной полости в расплаве припоя

При взаимодействии хлористого цинка и воды образуется соляная кислота, которая растворяет оксиды на поверхности металла:



В результате образуется хлористая медь, которую ввиду ее хорошей растворимости в воде необходимо удалять с поверхности детали. Поскольку флюс на основе хлористого цинка обладает высокой активностью, его остатки оказывают коррозионное воздействие и должны тщательно удаляться.

*Самофлюсование* заключается в том, что в состав припоев вводят раскислители (бор, фосфор, литий, калий, натрий), обладающие восстановительными свойствами:



Примером являются припои систем  $Cu-P$ ,  $Cu-Mn-Ni-B$  (ВПр4), которые используются при пайке сталей в нейтральных газовых средах или вакууме.

*Ультразвуковое удаление* оксидных пленок основано на введении упругих механических колебаний частотой 18—45 кГц в расплавленный припой и создании в нем кавитации, а также ряда сопутствующих явлений: звукового давления, микро- и макропотоков. *Кавитацией* называется явление возникновения, развития и захлопывания газовых полостей в жидкой среде. Реальные жидкости и расплавы содержат нерастворимые примеси, на поверхности которых в трещинах и углублениях могут находиться нерастворенные пузырьки газа размером  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  м. При введении в расплав УЗ-колебаний интенсивностью  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup> эти зародыши кавитации начи-

нают пульсировать с частотой колебаний. Их количество увеличивается за счет образования разрывов в жидкой среде при интенсивностях ультразвука более  $2 \cdot 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>.

Динамика развития кавитационной полости размером  $1 \cdot 10^{-5}$  м в ультразвуковом поле при различных интенсивностях ультразвука показана на рис. 7.10. При захлопывании пузырька сконцентрированная в ничтожно малом объеме кинетическая энергия трансформируется частично в силовой импульс и частично в тепловую энергию. Из центра захлопнувшегося пузырька распространяется ударная сферическая волна, давление в которой на расстоянии, равном  $10R_0$  (по расчетным данным), составляет 150 Па, а температура — 1000 °С и выше. Захлопывание кавитационных полостей и создание микропотоков в расплавленном припое приводят к удалению оксидных пленок с поверхности металла, что позволяет осуществлять пайку и лужение труднопаяемых металлов: алюминия, магния и никеля, тугоплавких металлов и сплавов на их основе.

При распространении УЗ-волн наряду с переменным ультразвуковым давлением  $P_{УЗ}$  возникает однонаправленное давление звукового излучения — радиальное давление, которое проявляется при падении волны на препятствие и на поверхности "жидкость — газ" создает вспучивание или фонтанирование жидкости:

$$P_r = (1 + k) I / c ,$$

где  $k$  — коэффициент отражения;  $I$  — интенсивность звукового давления:  $I = \rho c \omega^2 A^2 / 2$ ;  $\rho$  — плотность среды;  $c$  — скорость звука в среде;  $\omega$  — угловая частота;  $A$  — амплитуда колебаний.

Генерация упругих механических колебаний УЗ-частоты осуществляется магнитострикционными и пьезоэлектрическими преобразователями с частотой колебаний 22 и 44 кГц и амплитудой колебаний 10—25 мкм. Преобразователи встраиваются в ванны и паяльники, излучающие поверхности которых изготавливаются из кавитационно-стойких материалов (нержавеющие стали, титановые сплавы). Электрическая мощность установок для УЗ-пайки не превышает 0,4—2,5 кВт. Время пайки или лужения составляет 5—10 с, скорость перемещения излучателя паяльника  $(0,8—1,6) \cdot 10^{-2}$  м/с, а оптимальный зазор между торцом излучателя и паяемой поверхностью 0,2—3,0 мм (рис. 7.11).

С помощью УЗ-металлизации удастся соединять непаяемые материалы — керамику, стекло, ферриты и др. Однако это требует специальных припоев, объективного контроля режимов процесса (амплитуды и частоты колебаний), а также специальных мер против повышенного окисления припоя.

*Плазмохимический способ* заключается в использовании энергии потока ускоренных ионов активных газов, получаемых в вакууме при ионно-плазменном или магнетронном распылении. Воздействие ионного луча на поверхность металла приводит к испарению оксидной пленки в зоне обработки. Недостатком является необходимость высокого вакуума, сложного технологического оборудования, что ограничивает применение метода.

Взаимодействие на границе "основной металл — жидкий припой" связано с процессами смачивания и растекания припоя по паяемой поверхности. Процесс смачивания основного металла припоем состоит в замене межатомных связей, возникших между металлами в твердой фазе, на металлическую связь атомов на границе раздела между ними.

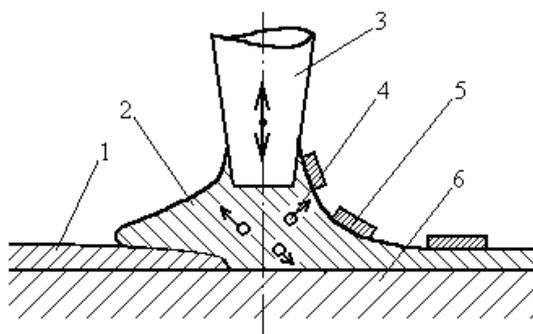


Рис. 7.11. Схема ультразвуковой пайки:  
1 – окисел; 2 – припой; 3 – излучатель паяльника;  
4 – кавитационный пузырек; 5 – шлак; 6 – металл

При этом взаимодействие сил поверхностного натяжения определяет контактный угол смачивания  $\theta$  (рис. 7.12). Условию равновесия капли на поверхности отвечает минимум свободной поверхностной энергии  $E_{\text{п}}$ , под которой понимают избыток энергии поверхностных атомов вследствие несбалансированности сил связи в решетке. При этом изменение поверхностной энергии описывается уравнением Юнга:

$$\frac{dE}{dS} = \delta_{1,3} - \delta_{2,3} - \delta_{1,2} \cos \theta = 0, \quad (7.1)$$

Из выражения (7.1) следует, что

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{1,2}}. \quad (7.2)$$

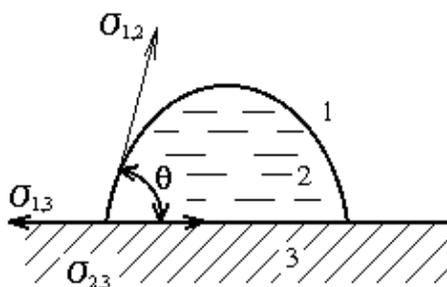


Рис. 7.12. Схема равновесия сил  
поверхностного натяжения:  
1 – газ; 2 – припой; 3 – основной металл

Величина  $\cos \theta$  служит параметром для количественной оценки степени смачивания:

- 1) полное смачивание при  $\cos \theta = 1$ ,  $\theta = 0$ ;
- 2) ограниченное смачивание при  $0 < \cos \theta \leq 1$  ( $0 \leq \theta \leq 90^\circ$ ,  $\sigma_{2,3} \leq \sigma_{1,3}$ );
- 3) несмачивание при  $-1 \leq \cos \theta < 0$  ( $90^\circ \leq \theta < 180^\circ$ ,  $\sigma_{2,3} > \sigma_{1,3}$ )

Работа сил адгезии  $W_a$  связана с образованием межфазной границы с энергией  $\sigma_{2,3}$  вместо единичных поверхностей с энергиями  $\sigma_{1,2}$  и  $\sigma_{1,3}$ :

$$W_a = \sigma_{1,2} + \sigma_{1,3} + \sigma_{2,3}. \quad (7.3)$$

Для преодоления сил сцепления частиц внутри самой жидкости (сил когезии) необходимо затратить работу сил когезии по образованию двух единичных поверхностей жидкости с энергиями  $\sigma_{1,2}$ , т. е.

$$W_k = 2\sigma_{1,2}. \quad (7.4)$$

С учетом выражений (7.1) и (7.4) можно формулу (7.2) привести к виду

$$\cos \theta = \frac{2W_a - W_k}{W_k}.$$

Жидкие металлы и сплавы обладают более высоким поверхностным натяжением, чем неметаллические жидкости. Так, для припоя типа ПОС 61  $\sigma_{1,2} = 0,5 \text{ Н/м}$ , что на порядок превышает поверхностное натяжение воды. В этом случае образование связи под действием сил Ван-дер-Ваальса не может обеспечить смачивание. Для выполнения при пайке условия смачивания на межфазной границе должны образовываться высокоэнергетические межатомные связи химической природы с большой работой сил адгезии  $W_a$  (металлические, металлоковалентные и др.). Реальные пути улучшения смачивания заключаются в применении защитных газовых сред (снижение  $\sigma_{1,2}$ ) и более тщательной очистке контактирующих поверхностей твердой и жидкой фаз от оксидных пленок (снижение  $\sigma_{2,3}$ ).

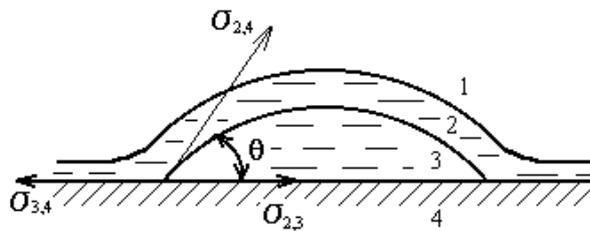


Рис. 7.13. Схема равновесия сил поверхностного натяжения во флюсовой среде:  
1 – газ; 2 – флюс; 3 – припой; 4 – основной металл

При рассмотрении условий равновесия системы "припой—основной металл" во флюсовой среде (рис. 7.13) вместо  $\sigma_{1,2}$  вводят  $\sigma_{2,4}$  (межфазное натяжение на границе "флюс—основной металл"). При этом  $\sigma_{2,4} < \sigma_{1,2}$ ,  $\sigma_{3,4} < \sigma_{1,3}$ , а уравнение для краевого угла имеет вид

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{3,4} - \sigma_{2,3}}{\sigma_{2,4}}.$$

Для реализации условия смачивания в данном случае необходимо вытеснение припоем прореагировавшего флюса по мере удаления оксидной пленки с поверхности основного металла, что выполняется при  $\sigma_{2,3} < \sigma_{3,4}$ . При достаточном химическом сродстве компонентов основного металла и припоя энергия  $\sigma_{2,3}$  мала, а работа  $W_a$  велика. В этом случае реализуется второе условие смачивания:  $W_a > \sigma_{2,4}$ .

Растекание припоя по поверхности основного металла происходит в результате взаимодействия сил поверхностного натяжения и сопровождается сближением жидкой и твердой фаз. Коэффициент растекания определяется из отношения работ сил адгезии и когезии:

$$K_p = \frac{W_a}{W_k} = \frac{(1 + \cos \theta)}{2}.$$

При  $\cos \theta = 1$ , коэффициент растекания равен 1.

При смачивании и растекании припой заполняет зазоры между соединяемыми деталями, образуя мениски вблизи вертикальных стенок и проявляя тем самым капиллярные свойства. Разность давлений, действующих на искривленную поверхность жидкости, называют *капиллярным давлением*  $p_k$ , которое определяется уравнением Лапласа:

$$p_k = p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right), \quad (7.5)$$

где  $p_1, p_2$  — давление жидкости для выпуклой и вогнутой поверхностей соответственно;  $R_1, R_2$  — радиусы кривизны рассматриваемого элемента поверхности.

Для выпуклой поверхности  $P_k$  считают положительным и направленным внутрь жидкости, для вогнутой поверхности  $P_k$  отрицательно и направлено наружу от поверхности жидкости. При малом диаметре  $D$  капилляра свободная поверхность жидкости имеет форму сферы (рис. 7.14) радиусом

$$R = \frac{D}{2 \cos \theta}.$$

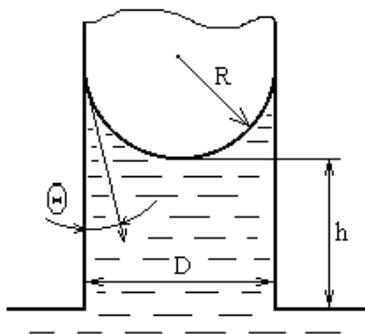


Рис. 7.14. Схема подъема жидкости в капилляре

Подставив значение радиуса мениска в уравнение (7.5), получим

$$p_1 - p_2 = \sigma_{1,2} \left( \frac{2 \cos \theta}{D} + \frac{2 \cos \theta}{D} \right) = 4 \frac{\sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (7.6)$$

Разность давлений  $p_1 - p_2$  уравнивается столбом расплавленного припоя высотой  $h$ :

$$h \rho g = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D}. \quad (7.7)$$

Из уравнений (7.6) и (7.7) видно, что высота подъема припоя в капилляре круглого сечения прямо пропорциональна его поверхностному натяжению и смачивающей способности и обратно пропорциональна диаметру капилляра и плотности припоя:

$$h = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D \rho g}.$$

Отличие расплавов припоев от обычных жидкостей состоит в том, что жидкий припой представляет собой систему, состоящую из нескольких компонентов, и в процессе его растекания происходит физико-химическое взаимодействие компонентов и основного металла, дополнительное растворение элементов основного металла в припое, взаимодействие с газовыми и флюсующими средами. При вытеснении припоем флюса из капилляра высота подъема припоя будет определяться выражением

$$h_1 = \frac{4 \sigma_{1,2} \cos \theta}{D g (\rho_{\text{пр}} - \rho_{\text{ф}})}.$$

В горизонтальном капилляре шириной  $h$  для припоя с вязкостью  $\eta$  время затекания  $t$  на длину капилляра  $l$  определяется следующим образом:

$$t = \frac{6 \eta L^2}{\sigma_{2,3} \cos \theta h}.$$

На втором этапе физико-химического взаимодействия припоя и основного металла основную роль играют процессы диффузии. Теоретически процесс диффузии при постоянной температуре и стационарном во времени потоке вещества описывается первым уравнением Фика:

$$m = -D \frac{\partial C}{\partial x},$$

где  $m$  — количество диффундирующего вещества;  $D$  — коэффициент диффузии;  $C$  — концентрация вещества;  $x$  — координата. Минус указывает на то, что процесс диффузии идет в направлении уменьшения концентрации вещества.

В реальных условиях скорость диффузии — величина переменная во времени, поэтому процесс диффузии описывается вторым уравнением Фика:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2},$$

где  $\partial C/\partial t$  — скорость изменения концентрации диффундирующего вещества.

Коэффициент диффузии зависит от температуры:

$$D = D_0 e^{-Q/(RT)},$$

где  $D_0$  — коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки;  $Q$  — энергия активации диффузии;  $R$  — универсальная газовая постоянная  $R = 8,31$  кДж/(кмоль·град);  $T$  — абсолютная температура.

Для практических целей решение второго уравнения Фика имеет вид

$$C_x = C_0 \left( 1 - \Phi \left( \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right),$$

где  $C_x$  — концентрация диффундирующего вещества на глубине  $x$  от поверхности;  $C_0$  — концентрация элемента на поверхности;  $\Phi$  — интеграл функции ошибок Гаусса.

На скорость процесса диффузии помимо температуры оказывает влияние состояние металла. Наклеп, сопровождающийся искажением кристаллической решетки и появлением вакансий, увеличивает диффузию по границам зерен и вдоль дислокации, что приводит к увеличению диффузионной зоны. Диффузионные процессы при пайке позволяют увеличить механическую прочность соединений, однако образование интерметаллидных соединений в спае типа  $\text{Cu}_3\text{Sn}$ ,  $\text{AuSn}_2$  при глубокой взаимной диффузии компонентов вызывает снижение прочности паяных соединений (рис. 7.15).

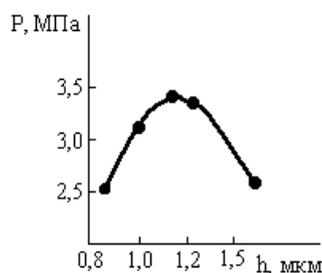


Рис. 7.15. Зависимость прочности паяных соединений от ширины диффузионной зоны

Процесс кристаллизации при пайке сопровождается затвердеванием жидкой металлической прослойки расплавленного металла, находящегося в зазоре. При этом изменение энтропии системы  $\Delta S$  равно разности энтропий жидкого и твердого состояний:

$$\Delta S = S_{\text{ж}} - S_{\text{т}} = \frac{Q_{\text{пл}}}{T_{\text{к}}},$$

где  $Q_{\text{пл}}$  — скрытая теплота плавления;  $T_{\text{к}}$  — температура кристаллизации.

Основными особенностями кристаллизации при пайке являются:

- неравновесность процесса, т. е. отсутствие выравнивания состава в жидкой фазе, что приводит к выделению в паяном шве наряду с легкоплавкими тугоплавких фаз повышенной хрупкости;
- влияние основного металла, которое проявляется в эпитаксиально-ориентированной кристаллизации зерен припоя вблизи поверхности основного металла;
- ярко выраженная ликвация в паяном шве — появление зональных неоднородностей, дендритных образований, отличающихся меньшей прочностью;
- зависимость характера кристаллизации от объема припоя в зазоре.

Для получения надежных паяных соединений применяют эвтектические припои с узкой зоной кристаллизации, а также уменьшают время кристаллизации, что способствует получению мелкозернистой структуры спая. В результате физико-химического взаимодействия припоя и основного металла образуется паяное соединение с определенной структурой. Паянный шов включает зону сплавления (припой) и образовавшиеся диффузионные зоны на границе между припоем и основным металлом (рис. 7.16).

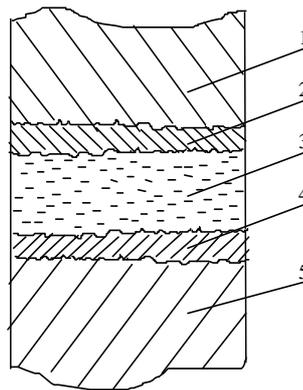


Рис. 7.16. Структура паяного соединения:  
1,5 — соединяемые детали; 2,4 — зоны диффузии; 3 — припой

Конечная структура и состав паяного соединения зависят от природы взаимодействующих металлов, их химического родства, времени и температуры пайки. Различают следующие спаи:

- *бездиффузионный*, в котором существующими методами анализа не удается обнаружить зоны диффузии; такой спай образуется между металлами со слабым химическим родством, низким коэффициентом взаимной диффузии, малым временем пайки и ограниченной температурой (например, соединение Fe—Sn);
- *растворно-диффузионный*, в котором реагирующие компоненты образуют твердые растворы или промежуточные фазы (интерметаллиды, например Au—Sn, Ag—Sn и др.);
- *контактно-реакционный*, который возникает при контакте металла с полупроводником; в результате образуется эвтектический сплав с низкой температурой плавления (Au—Si).

### 7.3. ПРИПОИ, ФЛЮСЫ, ПАСТЫ

*Припои* предназначены для горячего облуживания поверхностей и образования паяного соединения деталей при сборке и монтаже конструкций ЭА и должны удовлетворять следующим требованиям: высокая механиче-

ская прочность в заданных условиях эксплуатации, высокие электропроводность и теплопроводность, герметичность, стойкость против коррозии, жидкотекучесть при температуре пайки, хорошее смачивание основного металла, малый температурный интервал кристаллизации.

По температуре плавления припой подразделяются на следующие группы (ГОСТ 17349—71): особолегкоплавкие,  $T_{пл} \leq 145$  °С; легкоплавкие,  $145$  °С  $< T_{пл} \leq 450$  °С; среднеплавкие,  $450$  °С  $< T_{пл} \leq 1100$  °С; высокоплавкие,  $T_{пл} > 1100$  °С. Прежнее деление (низкотемпературные,  $T_{пл} < 450$  °С, и высокотемпературные) устарело. В производстве ЭА используются припой первых трех групп. Основную группу легкоплавких припоев составляют оловянно-свинцовые припой системы Pb—Sn (рис. 7.17).

Наименьшей температурой плавления (183 °С) обладает эвтектический сплав (61 % Sn и 39 % Pb). Выше линии солидуса при концентрации Sn в расплаве от 0 до 20 % образуется богатый свинцом  $\alpha$ -твердый раствор, который содержит нерастворимые частицы свинца, а при концентрации Sn от 69 до 97,5 % — богатый оловом  $\beta$ -твердый раствор. Состав, температуры плавления и области применения оловянно-свинцовых припоев приведены в табл. 7.2.

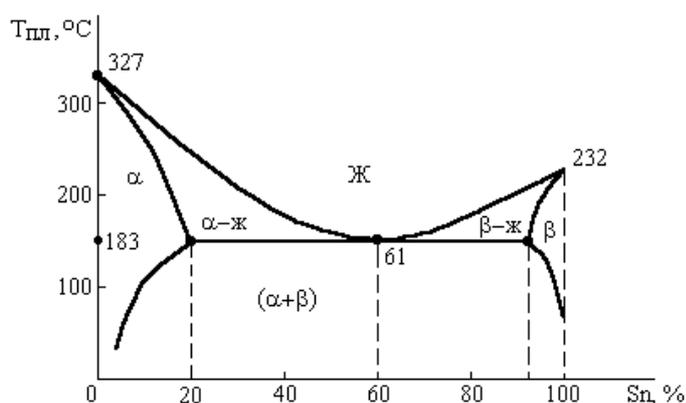


Рис. 7.17. Диаграмма состояния системы Sn—Pb

Табл. 7.2. Характеристики оловянно-свинцовых припоев

Марка припоя	Состав, % (остальное свинец)	Температура плавления, °С	Область применения
ПОС 30	Олово 29—30, сурьма 1,5—2,0	183—256	Пайка и лужение меди и ее сплавов, углеродистых сталей
ПОС 40	Олово 39—40, сурьма 1,5—2,0	183—235	Пайка деталей из медных сплавов, сталей
ПОС 61	Олово 59—61, сурьма до 0,8	183	Пайка монтажная, лужение выводов ЭРЭ и ИМС
ПОС 61М	Олово 59—61, сурьма до 0,8, медь 1,5—2	183—185	Пайка паяльником монтажных соединений
ПОС 63	Олово 63±0,5, примеси 0,15	183—185	Пайка волной припоя МПП
ПОС 90	Олово 90	183—222	Пайка деталей по серебряным и золотым покрытиям

Недостатками припоев системы Sn—Pb является их разупрочнение и ползучесть при температурах выше 100—150 °С. Припой ПОС 30, ПОС 40 имеют большую прочность, но и более широкие температурные интервалы кристаллизации, что снижает производительность процессов пайки.

Путем введения легирующих добавок в систему Sn—Pb получают припои, отличающиеся повышенной механической прочностью (Sb), пониженной температурой плавления (Bi, Cd, In), повышенной электропроводностью (Ag), пригодностью к УЗ-пайке (Zn), пайке полупроводниковых приборов (In, Au, Ga) и др. (табл. 7.3).

Табл. 7.3. Характеристики специальных припоев

Марка припоя	Состав, %, (остальное — свинец)	Температура плавления, °С	Область применения
<i>Повышенной прочности</i>			
ПОС 4-6	Олово 4—3, сурьма 5—6	245—265	Пайка медных сплавов с повышенной прочностью
ПОССу 10-2	Олово 8—10, сурьма 2—3	268—285	Пайка медных и никелевых сплавов с повышенной прочностью
<i>Особолегкоплавкие</i>			
ПОСК 50-18	Олово 50, кадмий 18	142—145	Пайка чувствительных к перегреву элементов, серебряных покрытий
ПОСВ 33	Олово 33, висмут 33	120—130	Лужение печатных плат
ПОСВ 50 (сплав Розе)	Олово 25, висмут 50	90—92	Лужение ПП и МПП
ПОСВ 50К (сплав Вуда)	Олово 12,5, кадмий 12,5, висмут 50	66—70	Пайка предохранителей
ПОИ 50	Олово 50, индий 50	117	Пайка подложек ГИС, БГИС, феррита, керамики
<i>Серебросодержащие</i>			
ПСр 45	Серебро 45, медь 30, цинк 25	660—725	Пайка изделий из меди и стали при повышенных статических и вибрационных нагрузках
ПСр 2,5	Олово 5, серебро 2,5	295—305	Пайка медных волноводов с гальваническим серебряным покрытием
ПСр 1,5	Олово 15, серебро 1,5	265—270	Пайка и лужение ЭРЭ, работающих при температуре до 200 °С
ПОССр 2	Олово 60, серебро 2	169—173	Пайка и лужение по серебряным покрытиям
<i>Для УЗ-пайки</i>			
П150А	Олово 40, цинк 3,5, кадмий 56	150—165	Пайка и лужение деталей из керамики и ферритов с применением ультразвука
ПОЦ 10 (П200А)	Олово 90, цинк 10	199—210	
ПОЦ 80 (П250А)	Олово 80, цинк 20	200—250	Пайка алюминиевых, титановых сплавов с применением ультразвука
П300А	Кадмий 40, цинк 60	266—310	
<i>Для пайки полупроводниковых приборов</i>			
ПОС 3л3	Олово 60, золото 3,0	180-215	Пайка полупроводниковых приборов
ПГлМ 65	Галлий 65, медь 34—36	50	Пайка термочувствительных элементов с самоупрочнением

Выбор марки припоя определяется требуемой механической прочностью и электропроводностью соединений, максимально допустимой температурой пайки, типом основного металла и технологического покрытия, а также технико-экономическими и технологическими требованиями. Наиболее распространенным припоем для монтажной пайки является оловянно-свинцовый припой ПОС 61, который отличается низкой температурой плавления, узким интервалом кристаллизации, хорошей жидкотекучестью и низким электросопротивлением. Эти факторы способствуют применению групповых методов пайки с высокой производительностью.

Обогащенный медью припой ПОС 61М предназначен в основном для ручной пайки, так как в нем замедляется эрозия паяльного медного жала. При объемном монтаже, в частности пайке штепсельных, высокочастот-

ных и коаксиальных разъемов, кабелей, требующих повышенного нагрева, используют малооловянистые припои ПОС 40, ПОС 30. Пайку и лужение термочувствительных элементов ведут особолегкоплавкими припоями ПОСК 50, ПОСВ 50, ПОСВ 33. Пайку деталей с покрытиями, содержащими серебро, золото, индий, палладий, проводят припоями, в состав которых входят эти элементы.

Припои выпускают в виде литой (рис. 7.18, а) или прессованной (рис. 7.18, б) проволоки, в которой каждое зерно припоя окружено канифолью, при общем ее содержании 0,8—1,2 % (по массе), а также заполненной флюсом одно- (рис. 7.18, в), трех- (рис. 7.18, г) или пятиканальной трубки. Применение трубчатого припоя при ручной пайке сокращает на 30—40 % расход припоя из-за более оптимального дозирования.

Для успешного проведения операции пайки применяют *флюсы*, которые должны удовлетворять следующим требованиям:

- температура плавления — не выше температуры плавления припоя;
- полностью растворять оксиды основного металла, но не образовывать с ним трудноудаляемых химических соединений;

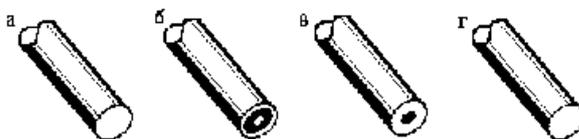


Рис. 7.18. Структура трубчатых припоев

- остатки флюса должны легко удаляться с поверхности основного металла после пайки и не вызывать коррозии паяного соединения;

- флюс и продукты его разложения при выполнении пайки не должны выделять удушливых или вредных газов, т. е. флюс должен быть термически стабилен в заданном интервале температур.

В зависимости от температурного интервала активности флюсы подразделяются на низко- и высокотемпературные. Основными параметрами флюсов являются: химическая активность; термическая стабильность; температурный интервал флюсования  $\Delta T_{\text{ф}}=(T_{\text{а}}-T_{\text{п.ф}})$ , где  $T_{\text{а}}$  — температура активации;  $T_{\text{п.ф}}$  — температура потери флюсоующих свойств; активность растекания (оценивается коэффициентом растекания припоя).

Основные типы флюсов для монтажной и конструкционной пайки приведены в табл. 7.4.

Смолодержащие флюсы на основе канифоли имеют органическое происхождение. С химической точки зрения канифоль является нелетучей фракцией смолистых веществ хвойных деревьев, в ее состав входят абие-тиновая и пимаровая кислоты, которые при температуре 225—300 °С растворяют тонкие оксидные пленки на меди и олове. К достоинствам флюсов на основе канифоли относятся нетоксичность, отсутствие коррозионного действия, длительная сохраняемость. Недостатки — малая активность, трудность удаления смолистых остатков, вредность, поэтому пары канифоли необходимо удалять с рабочего места путем вентиляции.

Для повышения активности флюсов в их состав вводят активирующие добавки: анилин  $\text{C}_6\text{H}_5\text{NH}_2$ , гидразин, триэтанолламин  $\text{N}(\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH})_3$ , диэтиламин солянокислый  $(\text{C}_2\text{H}_5)_2\text{NH}_4\text{HCl}$ , а также органические кислоты: салициловая, адипиновая, щавелевая, лимонная, молочная и др. При этом необходимо, чтобы в температурном интервале пайки добавки со щелочными свойствами (триэтанолламин) нейтрализовали остатки веществ, имеющих кислотные свойства (салициловая кислота, диэтиламин солянокислый и др.).

Смолодержащие флюсы удаляются последовательной трехкратной промывкой в смеси (1:1) бензина и этилового спирта при 20 °С, спирто-фреоновой смесью или УЗ-обработкой. Водорастворимые флюсы удаляются струйной промывкой в горячей проточной воде с последующей протиркой щетками.

Табл. 7.4. Характеристики флюсов для пайки в производстве ЭА

Марка флюса	Химический состав, % (остальное — этиленовый спирт)	Активность на меди при 260 °С	Область применения
<i>Некоррозионные смолосодержащие</i>			
ФКСп	Канифоль сосновая 10—40	1,0	Пайка и лужение ЭРЭ, ИМС в изделиях специального назначения, $\Delta T_{\text{ф}}=200\text{—}300\text{ }^{\circ}\text{C}$
ФКТ	Канифоль сосновая 10—40, тетрабромид-дипентен до 0,1	1,2	
ФПЭт	Смола полиэфирная ПН-9 (ПН-56) 20—30, этилацетат 70	1,5	Монтажная пайка, консервация деталей $\Delta T_{\text{ф}}=200\text{—}400\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Коррозионные смолосодержащие активированные</i>			
ФКТС	Канифоль сосновая 15—30, салициловая кислота 3,0—3,5, триэтаноламин 1,0—1,5	1,2	Монтажная пайка при условии полного удаления остатков флюса, $\Delta T_{\text{ф}}=200\text{—}300\text{ }^{\circ}\text{C}$
ЛТИ 120	Канифоль сосновая 20—25, диэтиламин солянокислый 3—5, триэтаноламин 1—2	2,0	Пайка и лужение элементов в изделиях широкого потребления при полном удалении остатков
<i>Водорастворимые</i>			
ФТБ	Бензойная кислота 4,0—4,5, триэтаноламин 1,0—1,5	1,1	Механизированная и ручная пайка ЭРЭ в изделиях бытовой ЭА, $\Delta T_{\text{ф}}=225\text{—}325\text{ }^{\circ}\text{C}$
ФТС	Кислота салициловая 4,0—4,5, триэтаноламин 1,0—1,5	1,2	
ФГСп	Гидразин солянокислый 2—4	1,5	Пайка и лужение деталей бытовой ЭА
ФДФс	Диэтиламин солянокислый 20—25, кислота ортофосфорная 20—25, этиленгликоль — остальное	2,5	Пайка деталей из черных и цветных металлов и сплавов при полном удалении остатков, $\Delta T_{\text{ф}}=180\text{—}310\text{ }^{\circ}\text{C}$
<i>Высокотемпературные</i>			
200	Борный ангидрид 70—62, бура 17—21, кальций фтористый 13—17	5,1	Пайка меди и ее сплавов, сталей, $\Delta T_{\text{ф}}=650\text{—}670\text{ }^{\circ}\text{C}$
34 А	Хлористый калий — 50, хлористый литий — 32, фтористый натрий — 10, хлористый цинк — 8	5,0 на АМц	Пайка алюминиевых и титановых сплавов, $\Delta T_{\text{ф}}=415\text{—}435\text{ }^{\circ}\text{C}$
Ф370А	Калий хлористый 51—46, хлористый литий 36—39, натрий фтористый 4—5, кадмий хлористый 9—10	9,2 на АМц	Пайка алюминиевых и титановых сплавов, $\Delta T_{\text{ф}}=360\text{—}380\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для высокотемпературной пайки используют буру — обезвоженный тетраборнокислый натрий  $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$ . Наиболее низкие температуры плавления среди боратных флюсов имеют системы  $\text{B}_2\text{O}_3\text{—N}_2\text{O} \cdot (\text{B}_2\text{O}_3)_2$ , содержащие 15—20 % борного ангидрида (570—650 °С). Для пайки алюминиевых и магниевых сплавов применяют легкоплавкую эвтектику солей  $\text{KCl—LiCl—NaCl}$ , которая обеспечивает хорошую жидкотекучесть при температуре 450—500 °С. Такие флюсы обладают высокой химической активностью, поэтому их остатки после пайки должны удаляться особенно тщательно.

Технология поверхностного монтажа обусловила широкое применение припойных (паяльных) паст, представляющих собой механическую смесь порошка припоя, связующего вещества, флюса и некоторых других

компонентов. В настоящее время это один из наиболее перспективных, удобных и гибких способов дозирования паяльных материалов в условиях автоматизированного производства.

Припойная паста обеспечивает значительную (до 30—50 %) экономию припоя благодаря точному дозированию, а клеящие свойства позволяют использовать ее для фиксации элементов перед пайкой. Основным компонентом пасты является порошок припоя (75—95 % по массе) в виде сферических частиц диаметром 10—150 мкм, получаемых УЗ-распылением жидкого припоя. В качестве связующих веществ используют органические смолы или их смеси. Кроме них в пасту вводят разбавители, пластификаторы, тиксотропные вещества. Последние препятствуют оседанию частиц припоя при хранении, повышают разрешающую способность пасты, обеспечивают заданный диапазон вязкости.

Для распыления припоя применяют УЗ-установки на магнитострикционных (рис. 7.19) или пьезоэлектрических преобразователях. Получают порошки припоев ПОС 61, ПОИн 52, ПОСК 50-18 с размером сферических частиц 10—160 мкм, в которых содержание кислорода по массе из за распыления в среде инертного газа не превышает  $5 \cdot 10^{-2} \%$ . Средний размер распыляемых частиц определяется так:

$$d = 0,3 \sqrt[3]{\frac{8 \pi \sigma}{\rho f^2}},$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения припоя;  $\rho$  — плотность припоя;  $f$  — частота УЗ-колебаний.

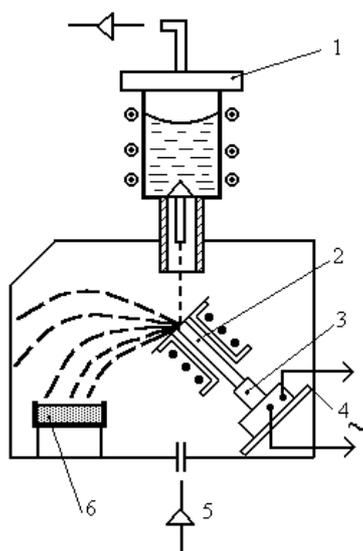


Рис. 7.19 Схема установки УЗ-распыления припоя:

- 1 – подача расплава; 2 – резонатор;
- 3 – ступенчатый волновод-концентратор;
- 4 – преобразователь; 5 – подача газа; 6 – тара

Промышленность ряда стран выпускает припойные пасты, различающиеся маркой припоя, составом флюса и другими свойствами (табл. 7.5).

Табл. 7.5. Характеристики припойных паст

Марка пасты	Тип припоя	Флюсы	Температурный интервал, °С
ПП1-180	ПОС 61	Активированная канифоль	220—250
ППЛ-06-61	ПОС 61	То же	220—250
ПП1-40	ПОСК 50—18	»	170—180
SC3301 (Heraeus, Германия)	Sn — 63 %, Pb — 37 %	Производные органических кислот	210—235
SC6004 (Heraeus, Германия)	Sn — 48 %, In — 52 %	То же	145—170

#### 7.4. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИНДИВИДУАЛЬНОЙ ПАЙКИ

Индивидуальная пайка применяется при монтаже блоков в условиях мелкосерийного производства, а также во всех случаях ремонтных работ. ТП индивидуальной пайки состоит из следующих операций: фиксации соединяемых элементов, нанесения дозированного количества флюса и припоя, нагрева места пайки до заданной температуры и выдержки в течение фиксированного времени, охлаждения соединения без перемещения паяемых деталей, очистки и контроля качества соединения.

Для обеспечения надежности паяных соединений предусматривают:

- механическое закрепление элементов и монтажных проводников на контактных лепестках и гнездах при объемном монтаже;
- выбор оптимальных зазоров в конструкции паяных соединений между поверхностями монтажных элементов.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями такие зазоры определяются по формуле

$$d = d_{\text{отв}} - d_{\text{в}} \geq 0,2 - 0,3,$$

где  $d_{\text{отв}}$  — диаметр металлизированного отверстия;  $d_{\text{в}}$  — диаметр вывода ЭРЭ.

Основные типы монтажных соединений в производстве ЭА показаны на рис. 7.20. Пайка выводов *1* в неметаллизированные отверстия печатных плат *2* (рис. 7.20, *а*) отличается тем, что припой *3* не полностью заполняет монтажное отверстие. Вследствие этого снижается механическая прочность соединения, повышается вероятность отслоения контактных площадок *4*. Соединение с полным пропаем металлизированного отверстия (рис. 7.20, *б*) получается при рациональном выборе зазора и большом времени пайки в условиях хорошей смачиваемости металлизированного отверстия. Соединение, показанное на рис. 7.20, *в*, формируется при точном совмещении вывода с контактной площадкой (фиксация элемента).

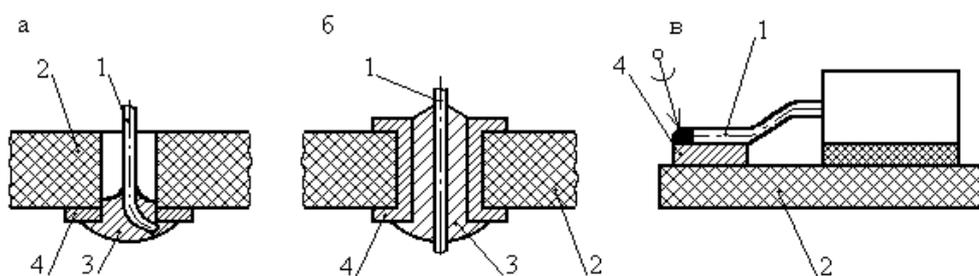


Рис. 7.20. Типы монтажных соединений

Температура пайки выбирается из условия наилучшей смачиваемости припоем паяемых деталей и отсутствия значительного теплового воздействия на паяемые элементы. Практически она на 20—50 °С выше температуры плавления припоя. Как видно из графической зависимости (рис. 7.21), на участке *А* смачивание недостаточное, *С* — максимальное, *В* — оптимальное (не вызывает перегрева припоя и паяемых материалов).

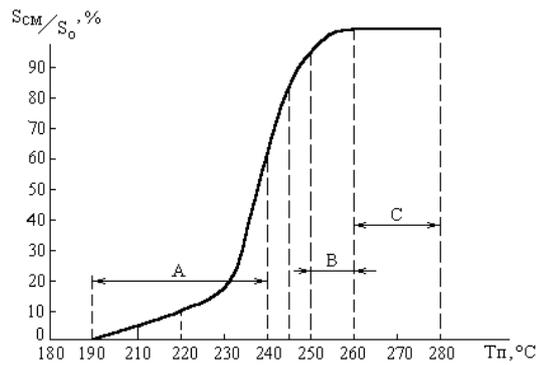


Рис.7.21. Зависимость площади смачивания от температуры припоя

Требуемый температурный режим при индивидуальной пайке обеспечивается теплофизическими характеристиками применяемого паяльника:

- температурой рабочего конца жала;
- степенью стабильности этой температуры, обусловленной динамикой теплового баланса между теплопоглощением паяемых деталей, теплопроводностью нагревателя и теплосодержанием паяльного жала;
- мощностью нагревателя и термическим КПД паяльника, определяющими интенсивность теплового потока в паяемые детали.

В технологии ЭА поддержание на заданном уровне температуры жала паяльника является весьма важной задачей, поскольку при формировании электромонтажных соединений на печатных платах с использованием микросхем, полупроводниковых приборов и функциональных элементов, термочувствительных и критичных к нагреву, возможны выход из строя дорогих и дефицитных элементов, снижение надежности изделия. Особенно критична к температурному режиму ручная пайка паяльником, которая имеет следующие параметры: температура жала паяльника 280—320 °С, время пайки не более 3 с. Однако из-за интенсивной теплоотдачи сначала в припой, набираемый на жало, а затем в паяемые элементы температура рабочей части жала паяльника снижается на 30—110 °С и может выйти из оптимального температурного интервала пайки (рис. 7.22).

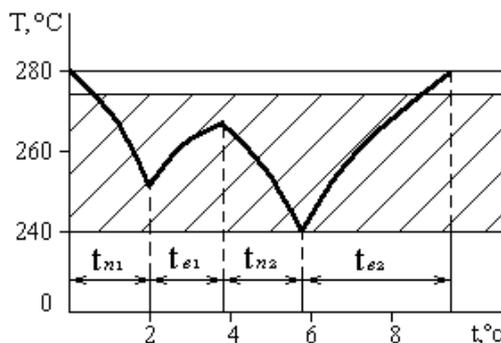


Рис. 7.22. Термический цикл пайки паяльником

Соотношение времени пайки и продолжительности пауз между пайками должно обеспечить восстановление рабочей температуры паяльного жала. Длительность восстановления зависит от теплопроводности жала, его длины, эффективной мощности нагревателя и степени охлаждения при пайке. Рекомендуемые мощности паяльников: для пайки ИМС и термочувствительных ЭРЭ 4, 6, 12, 18 Вт, для печатного монтажа 25, 30, 35, 40, 50, 60 Вт, для объемного монтажа 50, 60, 75, 90, 100, 120 Вт.

КПД паяльников имеет в настоящее время тенденцию к повышению от 35 до 55 % в связи с применением внутреннего обогрева жала вместо внешнего. Напряжение питания нагревателя выбирается равным 24, 36, 42 В, а в бытовых паяльниках — 220 В.

Стабилизация температуры рабочего жала паяльников достигается несколькими способами:

- тиристорным терморегулятором, состоящим из датчика температуры, закрепляемого в паяльном жале на расстоянии 30—40 мм от рабочего торца и схемы управления. Точность регулирования температуры непосредственно в датчике достигает  $\pm 2^\circ\text{C}$ , однако на рабочем конце жала она достигает  $\pm 5\text{—}10^\circ\text{C}$  за счет инерционности теплового поля (прибор "Термит");
- нагревателем с переменным электросопротивлением, зависящим от температуры. Например, в монтажном паяльнике фирмы Philips (Германия) нагревательный элемент состоит из агломерата свинца и бария, сопротивление которого возрастает в сотни раз при нагревании выше точки Кюри, в результате чего сила тока снижается и паяльник остывает, а после охлаждения ниже точки Кюри процесс развивается в обратном порядке;
- использованием магнитного датчика (рис. 7.23), изменяющего свои свойства при нагреве выше точки Кюри, в результате чего в паяльнике фирмы Weller (США) происходит отключение нагревателя;
- использованием массивного паяльного жала и близким расположением нагревателя.

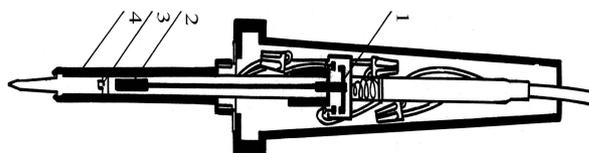


Рис. 7.23. Паяльник фирмы Weller с термостабилизацией: 1 – включатель; 2 – постоянный магнит; 3 – датчик; 4 – нагреватель

Паяльные жала характеризуются следующими геометрическими параметрами: длиной, диаметром, формами загиба жала и заточки рабочего конца. Длина жала зависит от пространственного расположения паяных соединений и может быть от 10 мм (микропаяльники) до 30—50 мм (паяльники для объемного монтажа). Диаметр жала должен в 15—25 раз превышать диаметр проводника и выбирается из ряда предпочтительных диаметров: 0,5; 0,8; 1,5; 3; 5; 8; 10 мм.

Форма загиба жала выбирается в зависимости от глубины монтажа и интенсивности тепловой нагрузки, а также пространственного расположения паяемых соединений (табл. 7.6, рис. 7.24).

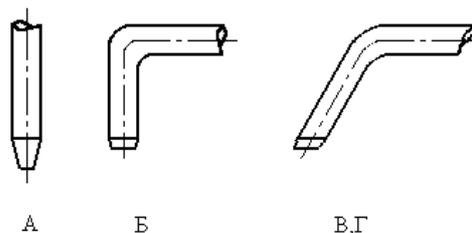


Рис. 7.24. Формы загиба паяльных жал

Табл. 7.6. Унифицированный ряд загиба паяльных жал

Индекс жала	Угол загиба, град.	Характеристика применения		
		Глубина монтажа	Интенсивность нагрузки	Расположение соединений
А	0	Большая	Любая	Разнотипное
Б	90	Средняя	Средняя	Однотипное
В	120	Небольшая	То же	Многообразие пространственного положения
Г	135	То же	Высокая	

Форма заточки жала зависит от плотности монтажа, размеров контактных площадок, интенсивности тепловой нагрузки (рис. 7.25, табл. 7.7).

Табл. 7.7. Унифицированный ряд заточки паяльных жал

Номер заточки	Конфигурация жала	L, мм	Характеристика применения		
			Плотность монтажа	Размер контактных площадок	Интенсивность тепловой нагрузки
1	Две рабочие плоскости	2	Высокая	Небольшой	Небольшая
2	То же	4	То же	Средний	Средняя
3	То же	6	Средняя	Большой	Высокая
4	Одна рабочая плоскость	5	Высокая	Средний	Средняя
5	Три рабочие плоскости	3	Средняя	Средний	То же
6	Увеличенная поверхность	до 1	Высокая	Небольшой	»

Для унификации паяльных жал введены следующие их обозначения из трех знаков: первый определяет диаметр жала, второй (буква) — угол загиба жала, последний (цифра) — номер заточки, например 8Б6, 5А4 и т. д.

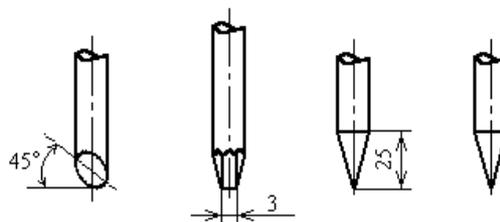


Рис. 7.25. Формы заточки паяльных жал

Эрозионная стойкость жала паяльника определяет его долговечность. Обычное медное жало из-за интенсивного растворения в припое после 1000 паяк теряет форму и нуждается в заточке. Для защиты жала применяют гальваническое покрытие никелем толщиной 90—100 мкм, что удлинит срок службы жала примерно вдвое. Перспективное решение проблемы — применение порошковых спеченных сплавов медь—вольфрам. Повышенная термо- и износостойкость вольфрама удачно сочетается с хорошей теплопроводностью меди. Гарантированная пористость материала улучшает смачивание жала припоем.

Паяльник фирмы Weller для ремонтно-монтажных работ имеет: время нагрева жала до температуры 270 °С — 6 с; встроенную подсветку зоны пайки; время работы от кадмиевой батарейки — около 10 ч; три сменных жала диаметрами 0,8; 1,5; 2,5 мм и длиной 63 мм; удобный дизайн, обеспечивающий включение питания нажатием кнопки непосредственно перед выполнением пайки. Эта фирма выпускает устройства типа HEAT-A-DIP для распайки ИМС и ремонта электронных блоков на печатных платах, имеющие сменные насадки для ИМС с различным количеством выводов и экстракторы для демонтажа ИМС с печатных плат.

Фирма Pace Inc. (США) выпустила микропортативный прибор МР-1 для припаивания и распаявания элементов (рис. 7.26), предназначенный для ремонтных работ в различных условиях и работающий от сети 220 В или 12-вольтовой батареи. Время нагрева паяльника — 1 мин, обеспечивается надежный контроль температуры наконечника паяльника.

Ряд зарубежных фирм выпускает паяльные станции, состоящие из стабилизированного блока питания, паяльника с набором сменных жал и вакуумного отсоса припоя из зоны пайки, представляющего собой конструкцию типа медицинского шприца с пружиной.

## 7.5. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПАЯНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Процессы контроля при монтаже ЭА включают: проверку соединяемых материалов на паяемость, контроль технологических режимов пайки, оценку качества соединений.

*Паяемость* характеризует способность паяемого материала вступать в физико-химическое взаимодействие с расплавленным припоем и образовывать надежное паяное соединение. Паяемость зависит от физико-химической природы металлов, способа и режимов пайки, флюсующих сред, условий подготовки паяемых поверхностей.

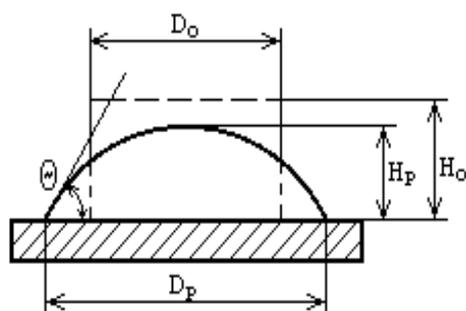


Рис. 7.27. Схема растекания капли припоя

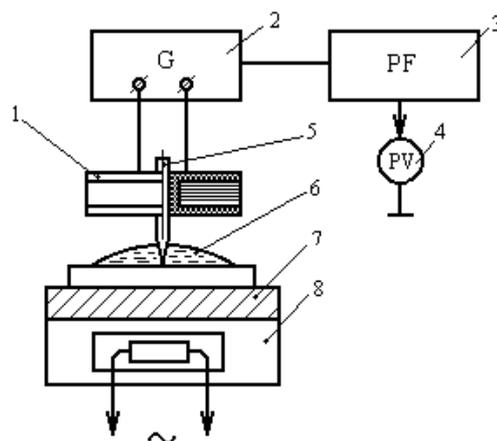


Рис. 7.28. Схема прибора для измерения высоты капли растекшегося припоя

Поскольку для образования спая необходимо и достаточно смачивания поверхности основного металла расплавом припоя, это гарантирует с физической стороны процесса паяемость, а с технологической условие соблюдения режимов процесса пайки. Паяемость металлов оценивают несколькими методами:

- 1) замером площади растекания припоя и определением коэффициента растекания  $K_p$ :

$$K_p = S_p / S_0,$$

где  $S_0, S_p$  — площади дозы припоя до и после растекания соответственно (рис. 7.27);

- 2) определением  $K_p$  по высоте капли растекшегося припоя:

$$K_p = \frac{(H_0 - H_p)}{H_0},$$

где  $H_0, H_p$  — высота капли припоя до и после растекания;

- 3) краевым углом смачивания  $\theta$ ;
- 4) по высоте или времени подъема припоя в капиллярном зазоре;

5) по усилию, действующему на образец металла, погружаемого в припой.

Высота капли до растекания находится из условия несмачивания поверхности:

$$H_0 = \sqrt{\frac{2 \sigma_{1,2} (1 - \cos \theta)}{\rho g}},$$

где  $\rho$  — плотность припоя;  $g$  — ускорение свободного падения.

Для измерения высоты капли припоя после растекания разработан прибор, в основу которого положен принцип бесконтактного измерения высоты капли с помощью индуктивного преобразователя (рис. 7.28). Он содержит индуктивный преобразователь 1, высокочастотный генератор 2, измеритель частоты 3 и регистрирующий прибор 4. В осевом отверстии катушки индуктивного преобразователя жестко закреплена игла 5 из материала, смачиваемого припоем 6. Игла устанавливается на исследуемую поверхность образца 7, длина иглы должна превышать высоту капли припоя при полной несмачиваемости исследуемого материала. Для расплавления навески припоя используют нагреватель 8.

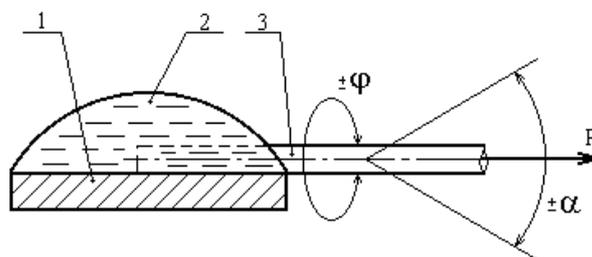


Рис. 7.29. Схема приложения знакопеременных нагрузок:  
1 – основа; 2 – припой; 3 – вывод

Перед началом испытаний в центре образца размещают навеску припоя дозированной массы 250 мг и дозированный объем флюса (0,01 мл). Включают нагреватель и устанавливают на заданном уровне температуру испытаний. С помощью секундомера фиксируют начало и конец растекания капли припоя, определяют частоту по показаниям прибора и, применяя построенную для данного материала номограмму, находят высоту капли растекшегося припоя, а затем коэффициент растекания припоя.

По критерию паяемости все многообразие современных паяемых материалов различной физико-химической природы можно классифицировать на следующие основные группы: легкопаяемые, среднепаяемые, труднопаяемые и непаяемые (табл. 7.8).

Табл. 7.8. Классификация материалов по паяемости

Группа материалов	Материалы	$K_p$	$\theta$ , град.
Легкопаяемые	Олово, золото, серебро, медь и их сплавы	0,97 — 0,80	0—12
Среднепаяемые	Бронза, латунь, никель, цинк, стали малоуглеродистые	0,82 — 0,60	5—20
Труднопаяемые	Нержавеющая сталь, магний, алюминий, титан, молибден, тантал	0,60 — 0,50	20—40
Непаяемые	Керамика, стеклокерамика, ферриты, полупроводники	—	120—160

Контроль качества предусматривает следующие виды оценки паяных соединений:

- по внешнему виду с использованием эталона паяного соединения при 100 %-м контроле;
- прочности соединений на отрыв при выборочном контроле на образцах-свидетелях;

- переходного сопротивления контакта выборочно для различных проводников;
- надежности соединения путем определения интенсивности отказов в течение заданного срока испытаний.

Определение качества паяных соединений по внешнему виду проводится путем их осмотра с помощью бинокулярного микроскопа МБС-9 при увеличении в 8—56 раз. При этом соединения с гладкой блестящей поверхностью без трещин и следов перегрева, с полностью заполненным зазором между паяемыми деталями, при угле смачивания 5—10° считаются высококачественными. Одновременно отмечаются такие дефекты, как холодный непрогретый слой, избыток или недостаток припоя, короткозамыкающее паяное соединение.

Критериями оценки прочности паяных соединений являются: усилие отрыва, устойчивость соединений при воздействии знакопеременных нагрузок и вибропрочность. Оценку прочности на отрыв дают по среднему значению усилия отрыва, которое для паяного соединения меди припоем ПОС 61 при оптимальных режимах составляет не менее 30 МПа. Устойчивость паяного соединения к воздействию знакопеременных нагрузок характеризуют средним числом циклов кручения на угол  $\varphi = \pm 0,75$  град/мм, средним числом цикла изгиба вывода на угол  $\alpha = \pm 10^\circ$  относительно платы с частотой 50—100 циклов в минуту при одновременном воздействии осевой нагрузки  $P$ , равной 0,1—0,5, усилия статического разрыва припоя (рис. 7.29).

Вибропрочность оценивают интервалом времени, в течение которого паяные соединения противостоят разрушению под действием вибрации с частотой 50—2000 Гц и ускорения, соответствующего максимальному ускорению при нормальной эксплуатации аппаратуры.

Для изучения структуры припоя готовят металлографические шлифы, которые исследуют с помощью микроскопов МИМ-7, ММР-2Р. Во время испытаний обращают внимание на то, что надежному паяному соединению соответствует мелкокристаллическая плотная структура припоя, что свидетельствует об оптимальных режимах процесса пайки и охлаждения. Путем химического травления микрошлифов паяных соединений выявляют наличие диффузионной зоны между припоем и основным металлом, в зависимости от ее ширины судят о качестве соединения. При нагреве происходит глубокая взаимная диффузия основного металла и припоя, частичное растворение (эрозия) металла в припое, что приводит к образованию в нем интерметаллидов, снижающих прочность соединения.

При недостаточном нагреве глубина диффузии чрезвычайно мала, прочность чисто адгезионного спая не обеспечивает требуемой надежности соединения. Исследования прочности на разрыв паяных соединений выводов из меди припоем ПОС 61 показывают, что достаточная прочность обеспечивается при ширине диффузионной зоны 0,8—1,2 мкм. Переходное сопротивление паяного соединения рассчитывается по падению напряжения между двумя точками, расположенными на расстояниях  $x$  и  $y$  от границы раздела соединяемых металлов, по уравнению

$$R_{\Pi} = \frac{U}{I} - R_x - R_y,$$

где  $U$  — измеренное напряжение;  $I$  — сила тока, проходящего через соединение;  $R_x$ ,  $R_y$  — сопротивления участков  $x$  и  $y$  (рис. 7.30).

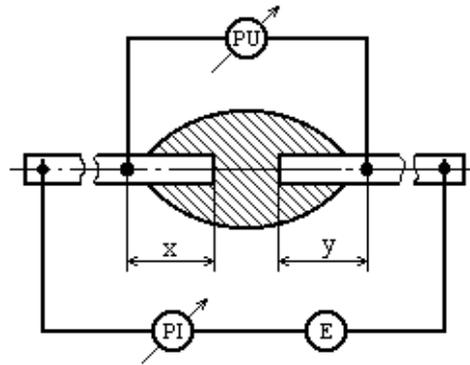


Рис. 7.30. Схема измерения переходного сопротивления

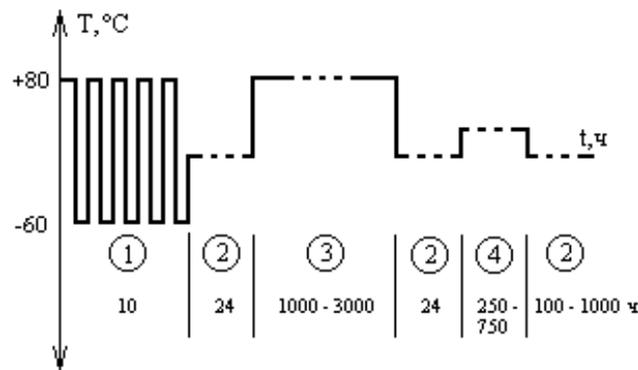


Рис. 7.31. График испытаний на надежность:

1 – термоциклирование; 2 – нормальные условия; 3 – нагрев до 80°C; 4 – тропическая влажность

Измерения проводят при постоянном токе, так как при переменном токе возникает поверхностный эффект, увеличивающий погрешность. Переходное сопротивление надежного паяного соединения не превышает 2—3 мОм.

Интенсивность отказов позволяет количественно оценить надежность паяных соединений и показывает, какая доля паяных соединений, работающих в момент времени  $t$ , выходит из строя в единицу времени после момента  $t$ :

$$\lambda(t) = f(t)/P(t),$$

где  $f(t)$  — плотность вероятности времени безотказной работы;  $P(t)$  — вероятность безотказной работы.

За критерий отказа при испытаниях на надежность принимается полный обрыв соединения или увеличение падения напряжения на нем на один порядок. Примерный временной график проведения испытаний паяных соединений на надежность (рис. 7.31) включает термоциклирование от +80 до -60 °C с длительностью цикла 1 ч, отстой в нормальных условиях, нагрев до 80 °C и выдержку в атмосфере тропической влажности (98 % при 40 °C). Надежными считаются паяные соединения, для которых суммарная интенсивность отказов  $\leq 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$ .

Дефекты в паяных соединениях (поры, раковины, трещины) могут быть обнаружены с помощью телевизионно-рентгеновского микроскопа МТР-3 либо ультразвуковым дефектоскопом. Ультразвуковой контроль основан на изменении структуры акустического поля частотой 0,5—25 МГц при наличии в паяном соединении дефектов, отражающих УЗ-колебания. Универсальные УЗ-дефектоскопы типа УДМ-1М позволяют обнаруживать и определять раковины, трещины, поры, расслоение и другие дефекты в паяных соединениях.

Определенная часть дефектов, иногда до 60 % общего числа, может быть выявлена методом модуляции электрического сигнала. Он основан на свойстве дефектов паяных соединений служить модуляторами сигнала.

Контрольная аппаратура включает генератор с регулируемым переменным напряжением частотой 10—100 Гц, блок индикатора, состоящий из двухкаскадного предварительного усилителя, детектора, указателя уровня, фильтра-пробки, настроенного на фиксированную частоту (например, 3,2 кГц), двухкаскадного усилителя, осциллографа или громкоговорителя.

После настройки генератора на частоту фильтра-пробки контролируемую схему подвергают вибрациям, при этом любое изменение омического сопротивления соединения вызывает появление электрического сигнала другой частоты, отличной от частоты генератора.

Одним из перспективных методов объективного контроля паяных соединений является оценка распределения температурных полей в электронном модуле. При его использовании контролируемую плату подключают к источнику питания и генератору импульсов фиксированной частоты. После установления теплового равновесия плату со стороны паек сканируют инфракрасным датчиком, соединенным с тепловизором, который позволяет воспроизводить распределение температур по поверхности исследуемого изделия. Прибор обнаруживает зоны локальных перегревов, соответствующие дефектным паяным соединениям, которые имеют температуру на 1—5 °С выше номинальной. В качестве датчика используют фотоболометры и другие ИК-детекторы. Тепловизор ТВ-03 (СССР) имеет температурное разрешение 0,2 °С в диапазоне измеряемых температур 25—300 °С.

Повышение качества контроля паяных соединений достигается путем применения лазерной системы контроля дефектов (рис. 7.32).

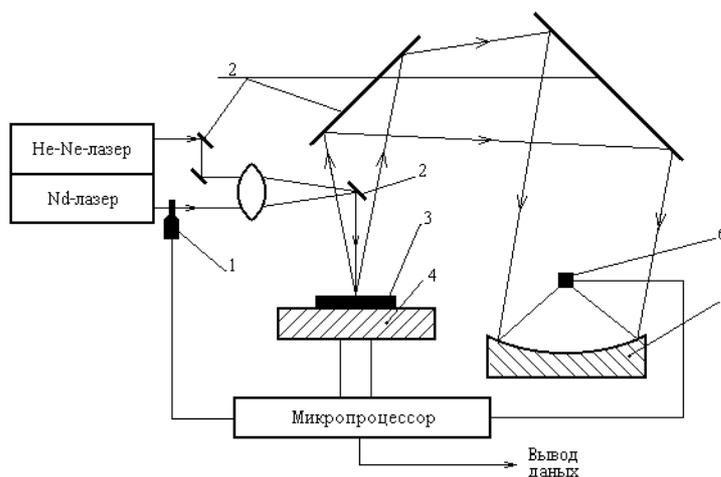


Рис. 7.32. Схема лазерного контроля паяных соединений

С помощью гелий-неонового лазера устанавливают точное местоположение контролируемого элемента 3 в прямоугольной системе координат передвижного столика 4. Контролирующие лучи генерирует мощный неодимовый лазер, который работает в области инфракрасного излучения. Длительность процесса тестирования задает микропроцессор, управляя шторкой 1. Если пайка качественная, ее поверхность блестящая и однородная, то луч света, управляемый системой зеркал 2, полностью не отражается. Если структура пайки крупнокристаллическая, то она начинает поглощать энергию луча, нагревается и сама является вторичным источником инфракрасного излучения. Собранное в линзах 6 и отраженное зеркалом излучение воспринимается ИК-датчиком 5, сигнал с которого анализируется с помощью микропроцессора и подается на осциллограф в виде термограммы. С помощью лазерного контроля обнаруживаются такие дефектные соединения, как раковины, внутренние включения, поскольку они имеют меньшую массу и нагреваются по этой причине быстрее, чем сплошные паяные соединения. Разогрев паяного соединения с помощью Nd-лазера выходной мощностью 6 Вт

происходит за 50 мс. На установке Laser Inspect фирмы Vanzetti Systems (США) удается контролировать около десяти паяных соединений в секунду, которые расположены на расстоянии 1,25 мм друг от друга.

Если в дополнение к лазерной установке предусмотреть ультразвуковой контроль, то можно определить и те дефекты, которые не могут быть обнаружены с помощью лазера. Автоматизированный контроль паяных соединений с комбинированной лазерно-ультразвуковой системой позволяет увеличить производительность контроля паяных соединений печатных плат, для чего микропроцессору задается программа расположения соединений на плате.

## 7.6. ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ СОДЕРЖАНИЕ СВАРКИ

*Сваркой* называют процесс получения неразъемных соединений материалов с помощью металлической фазы либо контактированием в твердой фазе под действием давления, теплоты или их сочетаний. Процесс образования сварного соединения состоит из четырех стадий: образования физического контакта между соединяемыми поверхностями, активации контактных поверхностей, объемного развития взаимодействия, кристаллизации.

На первой стадии контактируемые материалы сближаются на расстояние порядка 10—100 нм, между ними образуется физический контакт путем увеличения числа и размеров пятен схватывания по мере сминания гребешков микронеровностей. В этот период начинают действовать физические силы взаимодействия Ван-дер-Ваальса, контактная поверхность пластически деформированного металла активируется вследствие выхода дислокаций, что создает условия возникновения в контакте слабых химических связей.

На второй стадии начинается образование соединения за счет введения дополнительной энергии в зону контакта усиление активационных процессов на контактируемых поверхностях. В зоне, где энергия активации суммируется с энергией упругих напряжений (обычно в местах упругих искажений кристаллической решетки, дислокаций), возникает активный центр (очаг схватывания). Для активации поверхностей используют различные виды энергии: тепловую, деформации, ультразвуковую и др. При тепловой активации за счет плавления и растекания жидкой фазы увеличивается площадь контакта вокруг каждого активного центра. Отдельные контактные пятна сливаются в более крупные очаги схватывания. Решающую роль при этом играют квантовые процессы электронного взаимодействия, происходит коллективизация валентных электронов положительными ионами обеих фаз, т. е. образование металлической связи в очаге схватывания.

Активирование энергией деформации приводит к очистке сопрягаемых поверхностей в зоне контакта от оксидных и адсорбционных пленок, а также к размножению и выходу дислокаций на контактную поверхность и увеличению числа активных центров. При воздействии УЗ-колебаний наблюдается упрочнение поверхностных слоев в зоне сварки, что приводит к деформированию более глубоких слоев твердого тела с одновременным интенсивным тепловыделением, вызванным трением сжатых контактных поверхностей. В результате деформация увеличивается в большем объеме металла, разрастаются мостики схватывания.

На третьей стадии процесса развивается взаимодействие соединяемых материалов как в плоскости, так и в объеме зоны контакта, заканчивающееся слиянием очагов схватывания, что является необходимым условием возникновения прочных химических связей между материалами. Но оно может оказаться недостаточным для получения прочного сварного соединения, если к этому моменту не произойдет релаксация напряжений. Увеличение времени сварки усиливает гетеродиффузию, что может упрочнить соединение при образовании твердых растворов замещения либо разупрочнить при образовании хрупких интерметаллидных фаз. Стадии процесса сварки можно рассмотреть на кинетической кривой изменения прочности сварного соединения (рис. 7.33).

Длительность стадии *A* образования физического контакта определяется уравнением

$$t_A = \frac{\varepsilon (e^c (1 - 1/\varepsilon))^m}{V_\phi},$$

где  $\varepsilon$  — относительная деформация:  $\varepsilon = a/h_{\max}$ ;  $a$  — величина сближения поверхностей;  $h_{\max}$  — максимальная высота микровыступов;  $c$  — коэффициент, учитывающий форму микронеровностей:  $c = 0,3 - 0,7$ ;  $m$  — коэффициент:  $m = 3 - 5$ ;  $V_\phi$  — скорость пластической деформации в момент достижения физического контакта.

При сварке разнородных металлов можно предположить, что физический контакт будет образовываться за счет более пластичного материала, поэтому длительность развития этого контакта будет зависеть в основном от скорости ползучести. Высота микронеровностей и их геометрия зависят от вида обработки: при грубых видах типа точения или фрезерования отношение микровыступа к его высоте составляет 20—50, а при полировке — 100—200. При этом высота микронеровностей изменяется от 50 до 0,01 мкм соответственно. Приняв условно форму микровыступа в виде конуса, получим, что скорость пластической деформации

$$V_\phi = \frac{l_k + l_o}{l_k t},$$

где  $l_o$  — длина основания микровыступа;  $l_k/2$  — длина образующей конуса;  $t$  — время сглаживания.

Длину образующей конуса можно определить из геометрии микровыступа:

$$\frac{l_k}{2} = \frac{h_o}{2} \sqrt{n^2 + n},$$

где  $h_o$  — высота микровыступа;  $n = l_o/h_o$  — чистота обработки (для 5-го класса  $n = 10$ , для 7-го — 20, для 8-го — 30).

Длительность стадии *B* активации контактных поверхностей

$$t_B = \frac{1}{2\gamma} e^{\frac{E_a}{kT}} e^{-\alpha\tau},$$

где  $\gamma$  — коэффициент, зависящий от типа взаимодействующих материалов;  $E_a$  — энергия активации;  $k$  — постоянная Больцмана:  $k = 1,381 \cdot 10^{-23}$  Дж/К;  $T$  — температура в зоне взаимодействия;  $\alpha$  — коэффициент (для полупроводников  $\alpha = 3,4$ );  $\tau$  — контактное касательное напряжение.

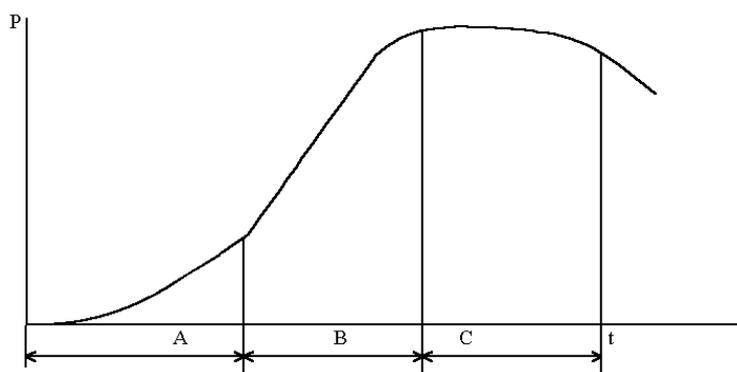


Рис. 7.33. Зависимость прочности соединения от длительности сварки

При сварке металлов с полупроводниками (кремнием, германием)  $E_a$  составляет 2—3 эВ, длительность стадии активации — единицы секунд. При сварке однородных металлов в условиях высоких скоростей пластической деформации длительность периода активации мала ( $t_B \leq 10^{-3}$  с).

Анализ зависимости прочности соединения от времени сварки показывает, что быстрый рост прочности происходит на стадиях *A* и *B*, в течение которых генерируется избыточное количество дефектов. Для стадии установившейся ползучести *C* характерен определенный баланс между количеством дефектов (вакансий и дислокаций), при этом выход дефектов в зону реакции ограничен, что замедляет рост прочности на этом этапе.

На стадии *C* взаимодействие развивается на активных центрах, распространяясь в плоскости контакта и соединяясь, образуют очаги взаимодействия. Длительность стадии определяется формулой

$$t_C = \frac{r^2}{\beta^2 D_0 (1 - \cos(\pi r_0 / (2r)))} e^{E_p / (kT)},$$

где  $r$  — радиус взаимодействия в плоскости контакта;  $\beta$  — коэффициент, зависящий от рода материала;  $D_0$  — предэкспоненциальный множитель;  $r_0$  — радиус начала очага взаимодействия;  $E_p$  — энергия релаксации напряжений.

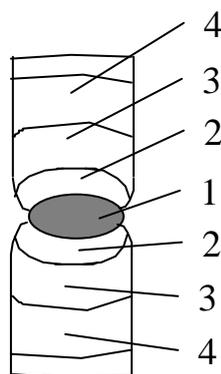


Рис. 7.35. Структура сварного соединения:  
1 – ядро; 2 – граница раздела;  
3 – зона легирования;  
4 – зона термического влияния

Таким образом, необходимым условием образования сварного соединения является активирование поверхности менее пластичного из свариваемых материалов. Наиболее распространены следующие способы активации (рис. 7.34):

- тепловой энергией (*T*-процессы);
- тепловой энергией и специальной атмосферой (*T, A* - процессы);
- энергией деформации давлением (*P*- процессы);
- тепловой и деформационной энергией (*P, T*-процессы);
- ультразвуковой энергией (*P, F* - процессы);
- энергией деформации ползучести (*P, T, t, A* - процессы).

Характерная особенность сварного соединения, полученного плавлением, — зональная структура (рис. 7.35). Первая зона — литое ядро, которое представляет собой закристаллизовавшуюся жидкую фазу. Вторая зона — граница раздела между соединяемыми фазами (0,30—1,0 мкм). Третья зона — приконтактная, она имеет размеры в несколько десятков мкм — это область диффузионного легирования. Последняя зона — зона термического влияния, обусловленная неравномерным нагревом деталей (10—100 мкм).

При других методах сварки структура соединения может отличаться от описанного выше. При сварке давлением за счет глубокой пластической деформации, при которой разрушаются и выдавливаются в стороны оксидные пленки и другие загрязнения, пограничные зерна измельчаются и сближаются. Между ними возникают

межкристаллитные силы взаимодействия. Вследствие неодинаковой текучести металлов и проявления сил трения пограничные зерна частично перемалываются. Граница между металлами исчезает, а по мере протекания процесса диффузии растет диффузионная область.

При сварке УЗ-колебаниями между соединяемыми поверхностями деталей возникают силы трения, под действием которых происходит местный разогрев поверхностных слоев металла. Вследствие интенсивной знакопеременной деформации металл переходит в высокопластическое состояние, что приводит к резкому измельчению зерна и развитию дефектов в кристаллитах. Металлы в зоне деформации нагреваются до температур, близких к температуре рекристаллизации. Однако из-за относительно низкой температуры и ограниченного времени процесс диффузии не успевает завершиться, поэтому структура соединения близка к структуре металлов при сварке давлением.

## 7.7. МОНТАЖНАЯ МИКРОСВАРКА

Монтажная микросварка применяется при монтаже кристаллов ИМС с помощью золотых и алюминиевых выводов. Процесс УЗ-микросварки основывается на введении механических колебаний УЗ-частоты в зону соединения, что приводит к пластической деформации приконтактной зоны, разрушению и удалению поверхностных пленок с созданием атомно-чистых (ювенильных) поверхностей, что интенсифицирует процесс образования активных центров и тем самым приводит к образованию прочного сварного соединения без большой пластической деформации свариваемых деталей.

Наиболее часто применяются продольные колебания частотой 66 кГц, вводимые в зону сварки с помощью волноводной системы (рис. 7.36), состоящей из преобразователя 1, акустического трансформатора 2, концентратора 3. Колебания от рабочего инструмента 4 сообщаются проволочному выводу 5, совмещенному с контактной площадкой 6, расположенном на акустической опоре 7. Волноводная система крепится в узле колебаний держателем 8.

Режим сварки на заданной частоте характеризуется следующими параметрами:

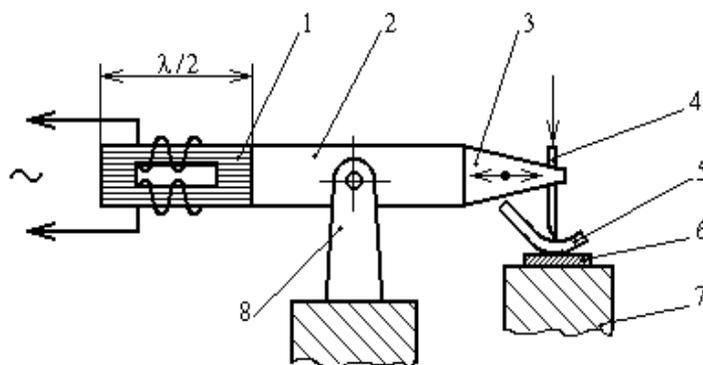


Рис. 7.36 Схема ультразвуковой микросварки

1) энергией ультразвуковых колебаний  $E$ :

$$E = A F t,$$

где  $A$  — амплитуда колебаний (2—5 мкм);  $F$  — частота колебаний;  $t$  — время микросварки. Увеличение времени сварки повышает прочность сварного соединения за счет роста суммарной площади очагов схватывания

до определенного предела, увеличение времени более 3—5 с приводит к усталостному разрушению соединения;

2) акустической мощностью  $P_{ак}$ , вводимой в сварочную зону, которая связана с электрической мощностью  $P$ , подводимой к преобразователю, соотношением

$$P = \frac{P_{ак}}{\eta_m} + P_0,$$

где  $\eta_m$  — механический КПД преобразователя (0,5—0,7 для магнитострикционных, 0,8—0,9 для пьезоэлектрических);  $P_0$  — мощность потерь на подмагничивание;

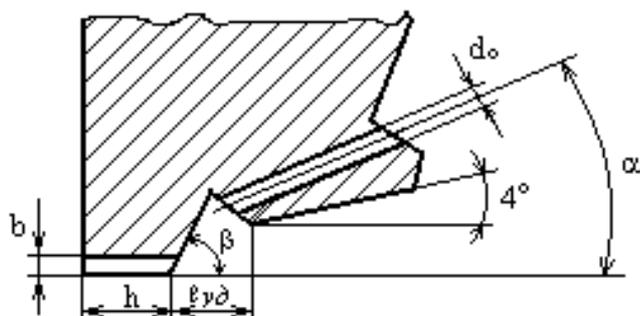


Рис. 7.37. Рабочая часть инструмента для УЗ-микросварки

3) контактным усилием сжатия  $F$ , которое зависит от толщины свариваемых элементов и подводимой мощности. При недостаточном усилии сжатия не достигается необходимое сцепление между инструментом и деталью, так как происходит проскальзывание инструмента по детали. Увеличение усилия сжатия приводит к чрезмерной деформации сварной точки и снижению прочности соединения. Оптимальная степень обжатия вывода выбирается в соответствии с коэффициентом деформации 0,5—0,6:

$$K_d = \frac{d_{пр} - H_d}{d_{пр}},$$

где  $d_{пр}$  — диаметр проводника;  $H_d$  — высота деформированной зоны;

4) формой рабочей части инструмента, которая выбирается из соображения, что длина деформируемого при сварке проводника должна быть равной 2—3 диаметрам проводника. Повышению прочности способствует небольшой паз в центре рабочей части вдоль свариваемой проволоки.

Функциональные особенности конструктивных элементов инструмента при УЗ-микросварке заключаются в следующем (рис. 7.37):

- диаметр направляющего отверстия выбирается из условия устранения возможности забивки его материалом привариваемой проволоки:

$$d_0 \geq 1,5 d_{пр};$$

- угол наклона направляющего отверстия определяется условиями перемещения инструмента на вторую сварку, зависит от высоты и длины проволочной перемычки:

$$\alpha = \arctg(h/\gamma),$$

где  $h$  — высота проволочной петли;  $\gamma$  — перемещение стола. Оптимальная величина угла  $\alpha$  составляет 30°;

- длина рабочей части инструмента  $L$  определяет длину деформируемой при сварке проволоки и выбирается из соотношения  $L = 2 d_{пр}$ ; оптимальное значение  $L$  составляет 0,1 мм для проволоки диаметром 27 мкм и 0,2 мм для проволоки диаметром 60 мкм;

- глубина продольного паза  $b$  зависит от коэффициента деформации  $k_d = 0,6$ :

$$b = (0,01 — 0,05) \text{ мм};$$

- удаление выхода отверстия от задней кромки рабочей площади инструмента должно обеспечивать симметрию петли проволочной перемычки:  $l_{уд} = 8 d_{пр}$ ;

- угол наклона задней кромки рабочей площадки  $\beta$  должен обеспечивать подрезку проволоки после второй сварки без остаточных напряжений в ней. Оптимальная величина угла  $\beta$  составляет  $60^\circ$ .

Для присоединения внахлест проволоки из алюминиевых сплавов УЗ-микросваркой используют капилляры из твердых сплавов типа ВК-20 с упрочненной рабочей поверхностью типа КУТ32 - 27 - 95 - 15, где КУТ — капилляр для УЗ- и термозвуковой сварки, 27 — диаметр проволоки, 95 — размер  $L$ , 15 — размер  $R$ .

Анализ факторов, влияющих на качество и надежность микросварных соединений, показывает, что все технологические параметры УЗ-микросварки оказываются настолько тесно связанными, что неудачный выбор одного из них изменяет ранее установленные значения других. Поэтому для обеспечения высокого качества и воспроизводимости ультразвуковой сварки важны: обеспечение заданной микрогеометрии поверхности контактных площадок; оптимизация технологических параметров УЗ-микросварки методом математического моделирования; разработка новых способов микросварки с активацией процесса физико-химического взаимодействия контактирующих металлов.

УЗ-микросварка позволяет соединять без значительного нагрева самые разнообразные металлы (алюминий, медь, никель, золото, серебро), а также металлы с полупроводниковыми материалами. Выполнение проволочного соединения контактной площадки на кристалле с траверсой корпуса требует наряду со сварочными операциями действий по совмещению инструмента с местом сварки на кристалле и корпусе схемы.

В 80-х гг. создана полностью автоматизированная установка УЗ-микросварки ЭМ-4020, имеющая управляющую микроЭВМ "Электроника-60", что резко увеличило производительность до 12 500 сварок в час. Новое поколение установок, к которому относится ЭМ-4060, построено с применением линейных шаговых двигателей и системы технического зрения, что обеспечивает наивысшую производительность от 18 до 30 тыс. сварок в час (табл. 7.9).

Табл. 7.9. Характеристика установок УЗ-микросварки

Параметры	ЭМ-4020б	ЭМ-4060	Мод. 1484 (США)
Производительность, сварок/ч	14 000	16 000	18 000
Диаметр проволоки, мкм	27—60	25—40	20—60
Размеры рабочего поля стола, мм	25×25	30×30	101×51
Точность позиционирования, мкм	25	20	3,2
Усилие сжатия, Н	0,2—1,2	0,2—1,2	0,2—0,25
Тип сварочного соединения	Внахлестку	Встык-внахлестку	Термозвук, золотым шариком

В новых моделях автоматов (ЭМ-4060П и ЭМ-4020П) для присоединения выводов ИМС используется единая стойка управления, состоящая из однотипных блоков управления, распознавания и питания ультразвуковых генераторов (УЗГ), а также прецизионные загрузочно-разгрузочные устройства (ЗРУ) и оптико-телевизионные системы.

Система технического зрения (СТЗ) позволяет распознавать и определять положение кристаллов и траверс. Положение корпуса определяется по одной траверсе при совмещении только по линейным координатам и по двум траверсам при совмещении по линейным координатам и углу. СТЗ может определять положение каждой траверсы индивидуально.

Усовершенствованная УЗ-система автоматов характеризуется следующими особенностями. Предусмотрена непрерывная автоматическая подстройка частоты (АПЧ) в полосе не менее 5 кГц с погрешностью отслеживания частоты резонанса ультразвукового преобразователя (УЗП) не более 20 Гц и времени захвата не более 20 мс. Встроенная модернизированная система контроля функционирования и компенсации ошибок АПЧ позволяет вдвое (по сравнению с ЭМ-4020б) уменьшить максимальную длительность компенсации ошибок АПЧ (время модуляции), увеличить устойчивость АПЧ и обеспечить заблаговременную сигнализацию об отказе системы.

В УЗ-системе имеется датчик, сигнализирующий о создании требуемого акустического контакта между инструментом и соединяемыми деталями и позволяющий не только определять позицию сварки по координате Z, но и увеличивать воспроизводимость качества соединений. Подача УЗ-колебаний на инструмент (дежурного сигнала) в промежутках между сварками снижает трение между инструментом и проволокой при формировании петли, облегчает отделение инструмента от сформированного соединения. Встроенное устройство контроля сварочных систем, программно и аппаратно поддержанное управляющей системой установки, позволяет осуществлять функциональное диагностирование УЗ-системы и непрерывное наблюдение за ходом процесса формирования каждого сварного соединения и на этой основе осуществлять 100%-й контроль качества при сборке ИМС любого типа в любом корпусе.

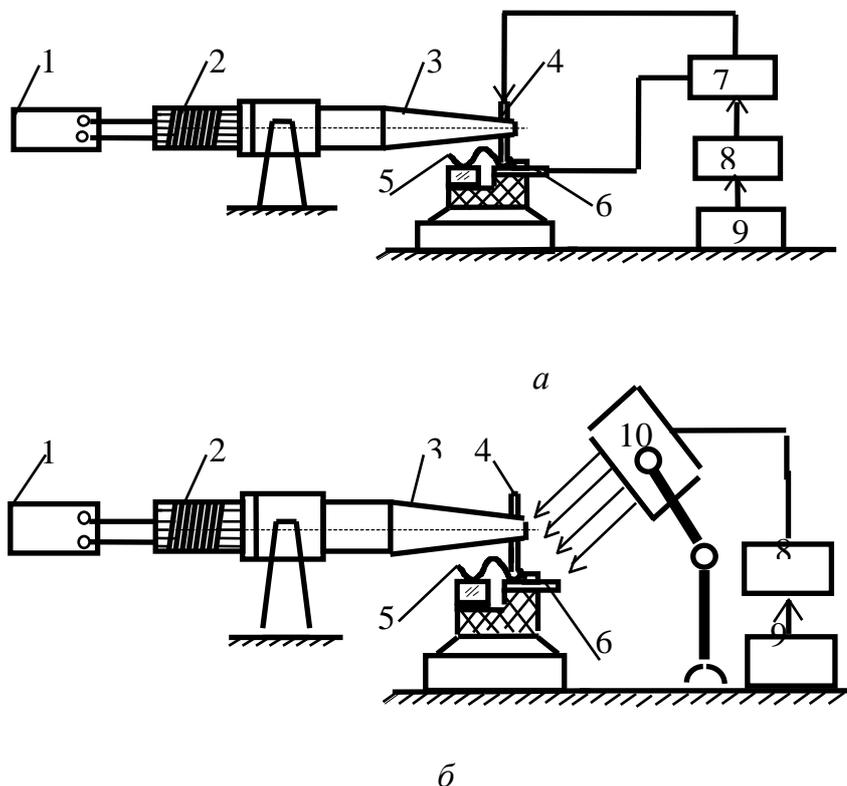


Рис. 7.38. Схемы УЗ-микросварки с токовой активацией (а) и ИК-активацией (б):

- 1 – генератор УЗ-колебаний; 2 – преобразователь; 3 – волновод; 4 – инструмент;  
5 – проволока; 6 – контактная площадка; 7 – устройство токовой активации;

Для повышения качества и надежности микросварных соединений применяют различные методы активации: электрическим током и ИК-излучением. Импульс электрического тока пропускают через оба соединяемых элемента в направлении, обеспечивающем электроперенос диффузионно-подвижного металла в соединении (рис. 7.38, а). Поскольку в соединении Al—Ni алюминий обладает большим коэффициентом диффузии, чем никель, электрический ток через соединение стимулирует диффузионное взаимодействие в процессе микросварки,

что приводит к образованию интерметаллидов  $Al_3Ni$ , имеющих повышенную прочность, и вызывает увеличение надежности микросварного соединения.

ИК-подогрев соединяемых элементов при УЗ-микросварке снижает до минимума эффект проскальзывания проволочного вывода, увеличивает его пластичность, степень деформации и фактическую площадь контакта вывода с контактной площадкой (рис. 7.38, б). Кроме того, тепловая активация соединения до температур, не превышающих температуру рекристаллизации металлов, участвующих в соединении, ускоряет диффузионные процессы в зоне контакта, что в итоге способствует увеличению прочности микросварных соединений и повышению надежности изделий.

*Термозвуковая сварка (ТЗС)* находит все возрастающее применение при сборке изделий микроэлектроники. В ТЗС соединения формируются в результате совместного действия температуры, энергии ультразвуковых колебаний сварочного инструмента и усилия нагружения инструмента. Данный способ сварки как бы объединяет отдельные качества термокомпрессионной и УЗ-сварки, обеспечивает высокое качество соединения при существенном смягчении режимов сварки, прежде всего температуры. ТЗС используется в первую очередь при автоматизированной сборке приборов, критичных к температурам свыше 200—250 °С. Применим этот способ сварки и для сборки толстопленочных ГИС. Качественные, устойчивые к повышенным температурам (150 °С) и термоциклированию (100 циклов; -55...+150 °С) соединения золотой проволоки с медными печатными проводниками получаются ТЗС при температуре подложки 105—200 °С. Практически ТЗС начинают широко применять и для сборки ИМС и БИС массовых серий с целью смягчения режимов и снижения критичности сварочного процесса к колебаниям качества соединяемых материалов.

Из всех видов сварки, применяемых в производстве изделий микроэлектроники, ТЗС является наиболее сложной в реализации, но отличается большой гибкостью в выборе режимов, а поэтому весьма перспективна для автоматизированной сборки. Использование при ТЗС ультразвуковой энергии наряду со снижением температуры обусловило ряд преимуществ: увеличение скорости, относительная легкость установления приемлемых режимов, улучшение свариваемости более широкой номенклатуры материалов соединяемых поверхностей. Важным достоинством ТЗС по сравнению с УЗС является меньшая критичность к жесткости конструктивных элементов корпуса.

*Термокомпрессионной сваркой (ТКС)* называют микросварку давлением в твердой фазе элементов, нагреваемых от постороннего источника теплоты, с локальной пластической деформацией в зоне сварки. Различают термокомпрессионную микросварку с общим, импульсным, косвенным и комбинированным нагревом.

Основными параметрами режима термокомпрессии являются: усилие сжатия соединяемых элементов  $F$ , температура нагрева инструмента  $T$ , длительность выдержки под давлением  $t$ .

Выбор усилия сжатия  $F$  определяется допустимой деформацией присоединяемого проводника, которая для золотой проволоки составляет 50—70 %, алюминиевой — 60—80 %. Температура нагрева не должна превышать температуру образования эвтектики соединяемых материалов и находится в пределах 250—450 °С. Длительность выдержки выбирается в зависимости от сочетаний свариваемых материалов в диапазоне 1—10 для достижения максимальной прочности соединения.

Для сварки применяют золотую проволоку диаметром 30 мкм, которую обезжиривают в спирте и отжигают в течение 5 мин при температуре 600 °С. ТКС проводится внахлест (клином) (рис. 7.39, а) или встык, с образованием шарика (рис. 7.39, б). Шарик из золотой проволоки образуется в пламени водородной горелки или электрическим разрядом. Диаметр шарика составляет 1,5—2 диаметра проволоки. Правильная форма шарика и отсутствие оксидов на его поверхности улучшают качество соединений.

Для ТКС рекомендуются рубиновые капилляры, имеющие более высокие износостойкость рабочих поверхностей, коррозионную стойкость и чистоту поверхности (рис. 7.40). Обозначение капилляра: КТ51-25-150-2-30 (КТ — капилляр для термокомпрессионной сварки, 25 — диаметр проволоки, 150 — диаметр  $D$ , 30 — размер  $R$ ). Наибольшая прочность соединений достигается при использовании инструмента сложной формы: с ребром жесткости или типа "рыбий глаз" (рис. 7.41).

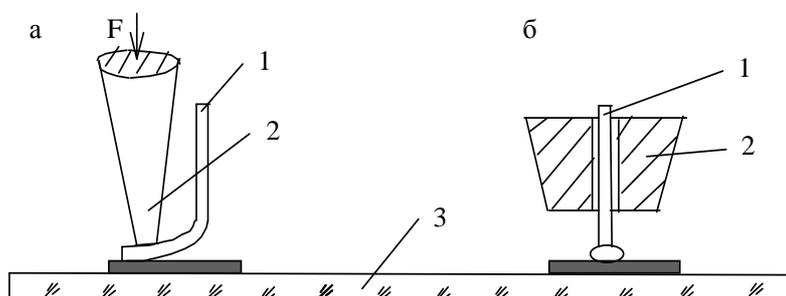


Рис. 7.39. Схемы термокомпрессионной сварки:  
1 — проволока; 2 — инструмент; 3 — подложка

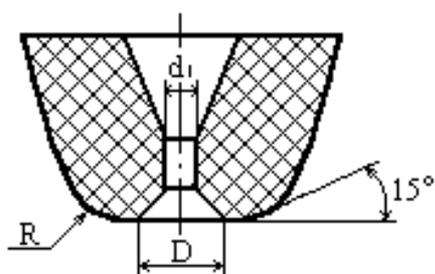


Рис. 7.40. Капилляр для термокомпрессионной сварки

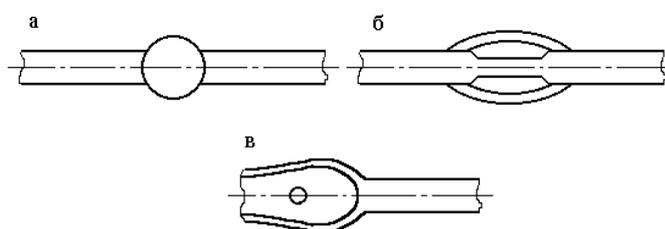


Рис. 7.41. Типы термокомпрессионных соединений:  
а — обычное; б — с ребрами жесткости; в — типа "рыбий глаз"

После сварки в процессе электротренировки возможно появление интерметаллидов  $Au_xAl_y$ : пурпурного  $AuAl_2$ , затем рыжего, а через некоторое время фазы черного цвета, имеющих низкую прочность и высокое электрическое сопротивление. Скорость процесса разрушения соединения возрастает при повышении температуры. Расчеты показывают, что при температуре 100 °С падение прочности вдвое произойдет через 10 сут, а следующее падение прочности вдвое — через 7 лет.

Повышения качества ТКС добиваются подачей в зону сварки осушенного защитного газа (аргона, азота, формирующего газа) и снижением температуры. Для ТКС используется современное автоматическое оборудование (табл. 7.10).

Преимущества ТКС заключаются в следующем: возможность сварки прецизионных элементов с минимальной толщиной до 5 мкм, не критичность к небольшим изменениям ( $\pm 10\%$ ) параметров режима сварки, возможность групповой технологии контактирования. К недостаткам следует отнести: небольшое число хорошо свариваемых материалов, ограничение толщин свариваемых элементов до 0,13 мм, сильную зависимость качества соединений от состояния свариваемых поверхностей, необходимость подогрева деталей до 350—400 °С, увели-

ченное значение переходного сопротивления контактов, возможность образования интерметаллидов, ухудшающих качество и надежность соединения.

Табл. 7.10. Характеристика установок термокомпрессионной сварки

Параметры	ЭМ-490	ЭМ-4030	ЭМ-4060	Hitachi (Япония)
Диаметр вывода, мкм	20—60	20—60	20—60	20—60
Способ соединения	Встык, внахлестку	Внахлестку	Встык, внахлестку	Встык
Температура нагрева, °С	250—400	250—450	250—450	До 450
Контактное усилие, Н	0,4—3	0,4—3	0,4—3	0,3—2,5
Время сварки, с	0,05—0,3	0,4—3,6	0,04—0,3	0,05—4,0
Производительность, сварок/ч	12 500	300	10 000	18 000

Сварка расщепленным (сдвоенным) электродом применяется в технологии электрического монтажа, в частности при получении контактных соединений планарных выводов ИМС и ЭРЭ с контактными площадками плат, плоских ленточных проводов с выводами печатных разъемов и др. Метод пригоден для сварки таких материалов, как медь, серебро, золото, алюминий, никель толщиной 0,03—0,5 мм. Подготовка свариваемых поверхностей заключается в предварительном отжиге материалов для снятия внутренних напряжений и увеличения пластичности, обезжиривании поверхностей химическими растворами. Сварка выполняется электродом, изготовленным из вольфрама или молибдена в виде двух токопроводящих частей, разделенных зазором  $h = 0,02—0,25$  мм, либо с помощью диэлектрической прокладки (рис. 7.42).

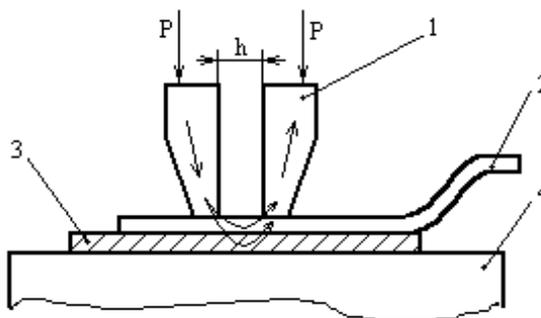


Рис. 7.42. Схема сварки расщепленным электродом:  
1 – электроды; 2 – вывод ИМС;  
3 – плата; 4 – контактная площадка

Сварку осуществляют одним или несколькими импульсами конденсаторного разряда с различной длительностью, мощностью и интервалами между импульсами. Усилие прижима электродов при сварке 0,2—1,5 Н создается в момент нагрева до максимальной температуры и снимается до окончания действия импульса тока. При этом ИМС и ПП получают незначительную термическую нагрузку. Сварку проводят на установках типа "Контакт-3А" (производительностью 250 сварок в час), ЭМ-425А, ЭМ-220, ЭМ-441 (800—2300 сварок в час) при длительности сварочного импульса 0,02—0,8 с.

К недостаткам рассмотренного способа относятся необходимость никелирования плат и золочения выводов ИМС, точное позиционирование выводов, трудность группового контактирования, более высокая стоимость по сравнению с пайкой.

Лазерную микросварку используют для проводов в полиуретановой изоляции, коваровых и никелевых выводов радиоэлементов с контактными площадками, плат, проволочных выводов ИМС внахлестку, проволоки ма-

лых диаметров из золота, меди, алюминия с напыленными на керамику, стекло, ситалл металлическими слоями и т. п. Преимущества лазерного излучения:

- высокая локализация мощности в зоне нагрева (до  $1000 \text{ МВт/м}^2$ );
- безынерционность воздействия, что позволяет вести нагрев импульсами малой длительности (1—10 мс) и очень точно дозировать энергию излучения;
- очень малая зона термического влияния (0,03—0,25 мм) при минимальном диаметре пятна нагрева 0,01 мм;
- не требуется вакуум, работа может выполняться в атмосфере любого состава;
- возможны соединения материалов с существенными различиями оптических, теплофизических и механических свойств;
- легкость автоматизации путем применения микропроцессоров и транспортных систем.

Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ), которые по агрегатному состоянию рабочего вещества подразделяются на газовые, жидкостные и твердотельные. В зависимости от способов возбуждения рабочего вещества ОКГ работают с оптической либо химической накачкой в непрерывном или импульсном режиме, а также в режиме синхронизации модуляции.

ОКГ на неодимовом стекле и рубине имеют высокую удельную мощность (до  $10\,000 \text{ МВт/м}^2$ ), однако их применение ограничено из-за низких эффективности и частоты следования импульсов. ОКГ на алюмоиттриевом гранате (АИГ) имеют рабочую длину волны 1,06 мкм и обеспечивают удельную мощность до  $1000 \text{ МВт/м}^2$  в сочетании с высокой частотой следования импульсов (до 20 Гц) благодаря низкому порогу накачки и хорошей теплопроводности рабочего вещества. Газовый лазер на  $\text{CO}_2$  работает с еще большей эффективностью как в непрерывном, так и в импульсном режиме, однако его излучение длиной волны 10,6 мкм хорошо отражается металлами.

Алюмоиттриевый гранат — монокристаллический материал, выращенный с ориентацией по кристаллографической оси  $\langle 100 \rangle$ . Он представляет собой соединение  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и отличается очень высокой теплопроводностью ( $0,13 \text{ Вт/см} \cdot \text{К}$ ), малым коэффициентом теплового расширения ( $6,96 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ ), высокой механической прочностью (175 МПа), а также малым порогом возбуждения. Для генерации излучения в состав АИГ вводятся активизирующие ионы трехвалентного неодима — элемента из группы лантанидов — в количестве 0,5—1 %.

Мощность лазерного излучения 125 Вт достигается благодаря использованию двух активных элементов в излучателе. Коэффициент пропускания выходного зеркала (до 20 %) является оптимальным и обеспечивает максимальную мощность лазерного излучения при номинальной силе тока, проходящего через лампу накачки. Активный элемент и лампа накачки размещаются в непосредственной близости друг от друга и помещаются в отражатель, повышающий долю энергии светового излучения лампы (рис. 7.43).

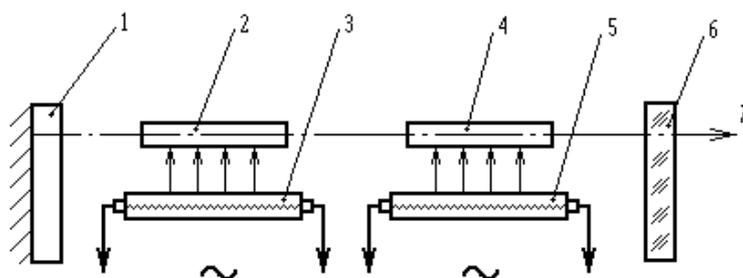


Рис. 7.43. Схема лазерного излучателя:

1 — глухое зеркало; 2 — отражатель; 3 — активный элемент; 4 — лампа накачки; 5 — выходное зеркало

Основным элементом излучателя является квантрон, в состав которого входят активный элемент, отражатель, корпус, штуцера охлаждения, фланцы и втулки крепления. Отражатель представляет собой моноблок из легированного европием кварцевого стекла в форме эллиптического цилиндра с полированной боковой поверхностью, покрытой слоем серебра. На внешний слой моноблока нанесено защитное покрытие из меди и никеля.

Кварцевое стекло отражателя с легирующими добавками не пропускает вредное для активного элемента ультрафиолетовое излучение лампы накачки, что позволяет использовать во внутреннем контуре системы охлаждения лазера дистиллированную воду без каких-либо фильтрующих добавок и тем самым значительно повышает эксплуатационные свойства лазера. Благодаря эллиптической форме отражателя распределение энергии накачки по сечению активного элемента имеет максимум в центральной части, что увеличивает эффективность генерации излучения.

Активный элемент типа ГП 6,3х100 выполнен в виде круглого стержня диаметром 6,3 мм и длиной 100 мм, изготовлен из монокристалла АИГ, активированного трехвалентными ионами неодима. Резонатор излучателя образован двумя зеркалами с многослойными диэлектрическими отражающими покрытиями. Основу зеркал составляют подложки, имеющие вид шайб диаметром 40 мм, толщиной 4 мм, изготовленные из стекла КУ-1. Выходное зеркало имеет коэффициент пропускания  $20 \pm 2$  %, а глухое — не менее 0,2 %. Изменение положения поверхности зеркала относительно оси лазерного излучения (юстировку) осуществляют путем поворота юстировочных винтов.

Система охлаждения лазера — жидкостная двухконтурная с теплообменным устройством типа "вода—вода" и термостабилизацией охлаждающей жидкости, циркулирующей по замкнутому контуру с помощью жидкостного насоса. Наряду с хорошими теплофизическими характеристиками, доступностью и безопасностью охлаждающая вода имеет высокие стабильные коэффициенты пропускания излучения, оптической накачки и способностью отфильтровывать инфракрасную часть спектра. Во внутреннем контуре используют только дистиллированную воду.

Средняя мощность излучения в импульсе

$$P = E / t ,$$

где  $E$  — энергия излучения;  $t$  — длительность импульса.

При непрерывном излучении лазера длительность воздействия

$$t = d / v ,$$

где  $d$  — диаметр луча;  $v$  — скорость сканирования платы относительно луча. Тогда средняя мощность излучения  $P = E v / d$ , а средняя плотность мощности излучения для луча круглой формы  $q = 1,27 E v / d$ .

Для оценки мощности лазерного излучения используют измеритель средней мощности и энергии импульсов ОКГ ИМО-2, имеющий погрешность 10 %.

Промышленность выпускает ряд автоматов лазерной сварки и пайки с программным управлением на базе лазера ЛТН-102А: для сварки — установки типа "Квант-10", "Квант-12" с энергией излучения до 15 Дж и частотой 60 импульсов в секунду, для пайки — ПЛП-2, "Квант-50", "Квант-52" производительностью до 330 соединений в минуту и мощностью излучения 125 Вт.

К недостаткам лазерного излучения как активирующего фактора при пайке и сварке относятся: сложность технологического оборудования; нестабильность лазерного излучения во времени; особые требования техники безопасности; возможность термической деструкции диэлектрического основания печатной платы из-за значительного поглощения лазерного излучения этими материалами; большая энергоемкость, малый КПД (около 1

%) ; повышенные требования к точности изготовления плат; необходимость точного совмещения платы с фокальной плоскостью лазера.

При монтажной микросварке не допускаются следующие дефекты: обрыв проволочного вывода и пересечение выводов; утончение вывода более  $1/4$  диаметра; расстояние между привариваемыми проволоками меньше трех диаметров проволоки; высота петли более 0,3 мм над уровнем кристалла; сильное натяжение, изгиб проволочного провода, приводящий к соприкосновению его с кристаллом; длина свободных концов проволоки более одного диаметра в соединении с контактными площадками кристалла и более трех диаметров — с траверсами; смещение сварных соединений за пределы контура траверсы.

## 7.8. НАКРУТКА И ОБЖИМКА

Монтаж *накруткой*, предназначенный для получения электрических соединений одножильных проводов со штыревыми выводами разъемов, был разработан в США в 1952 г. фирмой Bell Lab's и широко применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам ЭВМ. Монтаж накруткой исключает применение припоев и флюсов, ускоряет процесс межблочного монтажа, повышает надежность соединений по сравнению с паяными, создает возможность автоматизации межблочного монтажа.

Контактное соединение накруткой — соединение неизолированного одножильного провода со штыревым выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивается на вывод с определенным усилием (рис. 7.44). При этом кромки штыря, частично деформируясь, врезаются в провод, разрушая на нем оксидную пленку, и образуют газонепроницаемое соединение. Концентрация напряжений в зонах контакта и среднее давление порядка 170 МПа обуславливают взаимную диффузию металлов, что способствует повышению надежности соединений. Срок службы соединений при нормальных климатических условиях 15—20 лет.

Соединение накруткой должно иметь минимальное переходное сопротивление (не более 1—3 мОм), сумму площадей контактных точек больше площади поперечного сечения провода во избежание местного перегрева при прохождении тока.

Перечисленные требования обеспечиваются выбором материала штыревого вывода, конструкции соединения, технологических режимов. Материал штыревого вывода должен обладать прочностью и упругостью, чтобы противостоять усилию скручивания, а также высокой электропроводностью. Лучшими материалами, имеющими высокий модуль упругости, низкое остаточное напряжение и коэффициент линейного теплового расширения, близкий к коэффициенту медного провода, являются бериллиевая, фосфористая и кремнистая бронзы (например, Бр.Б2 содержит в среднем 2 % бериллия, Бр. КМц3-1 — до 3 % кремния, отличается высокой коррозионной стойкостью и заменяет дорогостоящую бериллиевую бронзу). Формы поперечного сечения выводов под накрутку приведены на рис. 7.45.

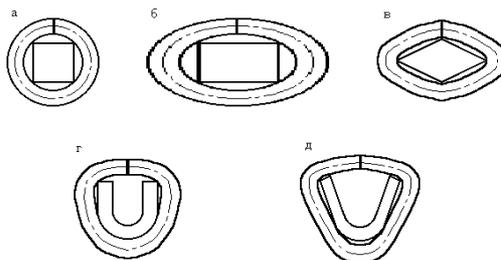


Рис. 7.45. Формы поперечного сечения выводов:  
а — квадратная; б — прямоугольная;

$\epsilon$  – ромбовидная;  $\zeta$  – U-образная;  
 $\delta$  – V-образная

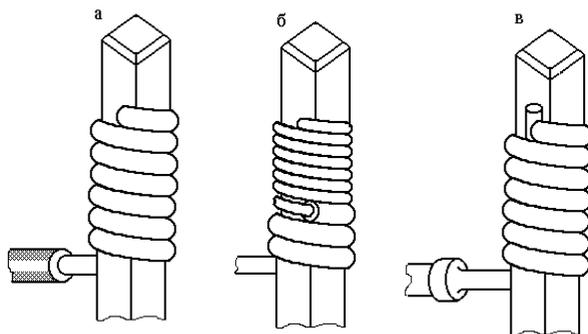


Рис. 7.46. Виды соединений накруткой:

$a$  – обычное;  $б$  – модифицированное;  
 $в$  – бандажное

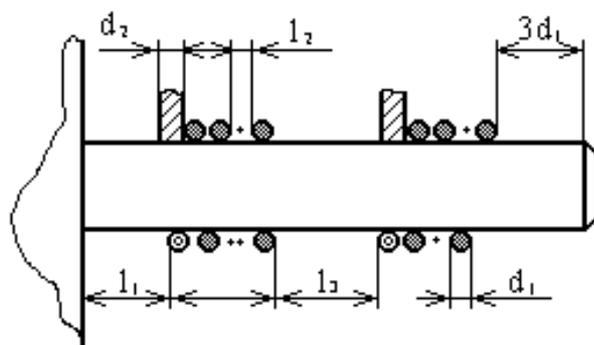


Рис. 7.47. Схема для расчета длины вывода

Наибольшее распространение получили штыри квадратной и прямоугольной формы; U- и V-образные штыри обладают большей упругостью и применяются при рабочих температурах до 180 °С, когда снижение напряжения в проводах компенсируется силой упругости штырей и позволяет сохранять электрические и механические параметры соединений. Для защиты поверхностей штыревых выводов от коррозии, а также для снижения переходного контактного сопротивления применяют следующие покрытия штырей: гальваническое золочение (3—6 мкм), серебрение (6—9 мкм), лужение (олово или олово — свинец толщиной 35—40 мкм).

При расчете числа витков следует учитывать, что выводы квадратной, прямоугольной и ромбовидной форм сечения имеют по 4 точки контактирования на виток, V-образной и треугольной — 3, U-образной — 2,5. Две первые и две последние точки не дают надежного соединения, поэтому их не учитывают при расчетах.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное, модифицированное и бандажное (рис. 7.46).

*Обычное соединение* получают путем накрутки на штырь неизолированного участка (4—8 витков) одножильного провода. *Модифицированное соединение* имеет дополнительно 1—2 витка провода в изоляции, что уменьшает концентрацию напряжений в точке касания провода первого витка и уменьшает вероятность обрыва при вибрациях. *Бандажное соединение* используют для крепления многожильного провода или вывода ЭРЭ к штырю путем накрутки нескольких витков бандажного провода на параллельно расположенный вывод и бандажуемый элемент (провод, вывод, шина и т. д.). Для всех видов соединений накруткой необходимо плотное

прижатие витков друг к другу, не допускается выход конца первого витка за пределы соединения, что увеличивает опасность случайной развилки. При монтаже накруткой на каждом выводе рекомендуется выполнять не более трех соединений. Учитывая конструктивные особенности соединений накруткой (рис. 7.47), длину вывода можно рассчитать по следующей формуле:

$$L = (n_1 d_1 + (n_2 + 1) d_2 + (n_1 + n_2) l_2) N + l_1 + (N - 1) l_3 + 3 d_1,$$

где  $n_1, n_2$  — число неизолированных и изолированных витков провода;  $d_1, d_2$  — диаметры неизолированных и изолированных проводов;  $l_1$  — расстояние между первым витком и основанием (1 мм);  $l_2$  — расстояние между витками;  $l_3$  — расстояние между соединениями;  $N$  — число соединений на выводе.

Контактное соединение накруткой получают с помощью специального инструмента — электрифицированного пистолета для накрутки. Основным элементом, обеспечивающим формирование соединения, является валик, имеющий два отверстия: центральное для размещения штыря и боковое ступенчатое для размещения неизолированного и изолированного участков монтажного провода (рис. 7.48). На торце валика выполнена проточка, форма которой определяет качество соединения. На валик в осевом направлении действует пружина, от упругих свойств которой зависит однородность и плотность навивки провода. Сила  $P$  давления валика на провод формирует витки соединения и при оптимальном значении (5—30 Н) обеспечивает их плотное прилегание друг к другу.

С помощью монтажного пистолета типа НП-4В при наличии предварительно заготовленных проводов монтажник может выполнить до 50—80 соединений в час. При этом основная часть времени уходит на поиск очередного места соединения, выбор переключки соответствующей длины и т. д.

При ручном монтаже конец провода со снятой на рекомендуемую длину изоляцией сначала вставляют в канавку концевой части навивочного валика до тех пор, пока края изоляционной оболочки провода не натолкнутся на края канавки. После этого его загибают вокруг втулки так, чтобы он не закрывал среднее отверстие концевой части, и придерживают. Затем инструмент насаживают на предназначенный для соединения штырь так, чтобы он прошел в среднее отверстие концевой части, и включают привод.

При накрутке ось отверстия в направляющей втулке, воспринимающего штырь, должна находиться точно на одной линии с продольной осью штыря. Нужно следить также за тем, чтобы у первого витка соединения провод не развернулся вокруг собственной оси, так как иначе в этом месте возникает концентрация напряжения и провод может порваться.

Если на одном и том же штыре необходимо изготовить несколько соединений, то накрутку начинают у закрепленного конца штыря так, чтобы край дула инструмента слегка касался поверхности крепления штыря (или находился бы от нее на расстоянии 1—2 мм). Второе и третье соединения выполняются аналогично, но здесь концевая часть упирается в готовое соединение. Время собственно накрутки составляет около 1 с, продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на штырь, включение, навивка, остановка, снятие инструмента) занимает около 2,5 с. Качество соединения практически не зависит от навыка оператора, так как время накрутки провода весьма мало.

Для повышения производительности монтажа накруткой применяют полуавтоматы типа АА-53 (рис. 7.49) где автоматизирован поиск координаты очередного соединения и переключки соответствующей длины. При этом на монтажном столе по координатам  $x$  и  $y$  перемещается инструментодержатель, а программа соединений вводится с перфоленты в устройство управления. Система световой индикации ячеек облегчает монтажнику поиск соответствующей переключки. Производительность монтажа на таких установках увеличивается до 200—500 соединений в час, а число ошибок сокращается до 0,01 % от числа соединений.

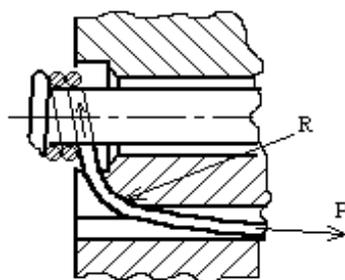


Рис. 7.48. Схема образования соединения накруткой.

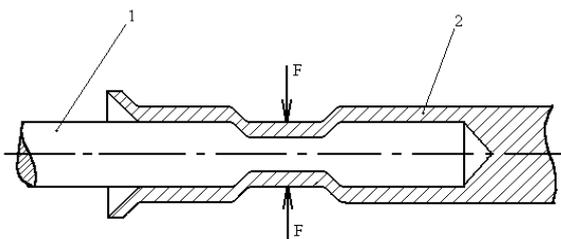


Рис. 7.50. Соединение обжимкой

*Обжимкой* называют способ постоянного соединения, которое осуществляется посредством сильной пластической деформации соединяемых поверхностей и разъединяется только с разрушением. Суть метода состоит в том, что провод 1 помещают в хвостовую часть соединительного элемента 2, имеющего форму втулки, и обжимают (рис. 7.50).

Благодаря высокому удельному давлению соединяемые металлы подвергаются значительной пластической деформации, и вследствие холодной текучести контактирующих поверхностей между соединенными материалами возникает интенсивный молекулярный контакт. После пластической деформации под действием остаточной упругой деформации соединяемые поверхности сжимаются с определенной силой. Такое соединение обладает высокой проводимостью, газостойкостью, теплостойкостью и вибростойкостью.

Выбирать материал, размеры проводов и элементов для соединения нужно так, чтобы после окончания операции обжатия сила натяжения провода была больше, чем релаксация элемента. Вследствие ослабления внутренней напряженности материалов это давление несколько уменьшается, но оставшегося усилия достаточно для поддержания надежного контакта с высокой проводимостью. Релаксация может быть механического или технического происхождения (вибрация, быстрое изменение температуры).

Поскольку размер деформации элемента можно принимать за близкий к постоянному, необходимое для деформации усилие находится в непосредственной взаимосвязи с размерами пластической деформации. Из этого следует, что соединения, изготовленные в одинаковых условиях, полностью одинаковы, поэтому можно заранее предусмотреть необходимый для соединения материал, инструмент, требуемое усилие, а также величину деформации. Соединения легко выполняются и проверяются с помощью того же инструмента.

Механическое соединение считается годным тогда, когда его прочность на растяжение меньше, чем прочность на разрыв. Если изолированный провод порвется под влиянием нагрузки на растяжение, то этот разрыв трудно обнаружить под изоляционной оболочкой провода. Большое усилие обжатия более выгодно, так как при этом соединение имеет более низкое переходное сопротивление. Таким образом, переходное сопротивление и прочность на растяжение соединения зависят от величины деформации, а величина деформации — от размеров основных материалов, участвующих в соединении металлов.

Механическая прочность соединения характеризуется силой  $F_B$ , необходимой для вытягивания провода при разрушении соединения, которая зависит от силы сжатия  $F$  (рис. 7.51). Из рисунка видно, что с возрастанием силы сжатия, а также по мере снижения отношения  $h/D_0$  (где  $h$  — размер деформации;  $D_0$  — начальный диаметр элемента) сила вытягивания возрастает только до определенного значения. Если сила сжатия превышает оптимальное значение, то сила вытягивания уменьшается.

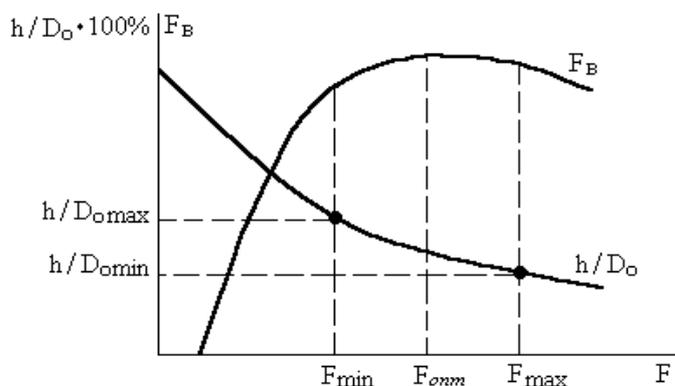


Рис. 7.51. Рабочая диаграмма деформации

Большая сила сжатия может вызвать трещины, повреждения и явиться причиной сильного сокращения поперечного сечения. Малая сила сжатия приводит к соединению с зазорами в поперечном сечении, что неблагоприятно сказывается на их прочности и электропроводности. Таким образом, целесообразно выбирать силу сжатия, т. е. размеры деформации, между величинами  $F_{min}$  и  $F_{max}$ , т. е.  $h/D_{0max}$  и  $h/D_{0min}$ .

Относительная проводимость соединения  $G_{отн}$  может быть вычислена по проводимости соединения  $G_r$  и проводимости провода  $G_n$ :  $G_{отн} = (G_r / G_n) \cdot 100\%$ . Эта величина имеет тенденцию к возрастанию с ростом силы сжатия. Если при обжатии провода заняли свое место внутри обжимающего элемента и их плотность достигла определенной степени (около  $F_{nmax}$ ), то с дальнейшим увеличением силы давления (и деформации) относительная проводимость соединения уже не увеличивается. Максимум этой кривой обычно не совпадает с  $F_{nopt}$ .

Обжимка давно применяется в силовоточной электротехнической аппаратуре для непаяного соединения кабельных наконечников, в электронике она начала применяться последние 10—15 лет. Площадь эффективной контактной поверхности должна составлять 200—400 % площади сечения соединяемых проводов. В качестве материалов втулок используется медь, бронза с гальваническим защитным покрытием. Обжимку выполняют с помощью пистолетов, имеющих производительность до 500 соединений в час, или полуавтоматов (до 2000 соединений в час) и работающих на сжатом воздухе. Прочность соединений определяется силой вытягивания, которая для провода диаметром 0,5 мм равна приблизительно 80 Н.

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Классификация методов выполнения электрических соединений и их основные параметры.
2. Сравнительная характеристика способов нагрева при пайке.
3. Смачивание, растекание и диффузия в процессах пайки.
4. Основные типы припоев и флюсов.
5. Инструменты для пайки.
6. Физико-технологические процессы при сварке.
7. Методы монтажной микросварки.
8. Методы и оборудование холодного монтажа.

## 8. ТЕХНОЛОГИЯ РАЗЪЕМНЫХ И НЕРАЗЪЕМНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

### 8.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ И ОБЛАСТИ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

При изготовлении ЭА наряду с электрическими широко используются механические соединения, которые разделяются на две группы: разъемные и неразъемные. *Разъемные соединения* допускают полную разборку изделия на детали без разрушения их целостности, что позволяет быстро заменять детали и сборочные единицы в условиях эксплуатации. Резьбовые соединения в общем объеме занимают наибольший удельный вес (до 51 %), но характеризуются высокой стоимостью и трудоемкостью. К ним относятся резьбовое, байонетное, штифтовое, шплинтовое и др. Соединение считается *неразъемным*, если его разборка сопровождается разрушением материалов или деталей, с помощью которых оно осуществлено. Неразъемные соединения выполняют пайкой, сваркой, расклепыванием, развальцовкой, запрессовкой, склеиванием и т. д. (рис. 8.1). Расклепывание применяют для конструкций, работающих при высоких температурах и давлениях, для прочных соединений неметаллических деталей с металлами. Недостатками клепаного соединения являются: отсутствие герметичности шва, ослабление материала в месте соединения, концентрация и неравномерное распределение напряжений, возникновение в соединениях значительных деформаций, которые искажают взаимное положение деталей. Это вызывает необходимость в повышении требований к жесткости используемых приспособлений.

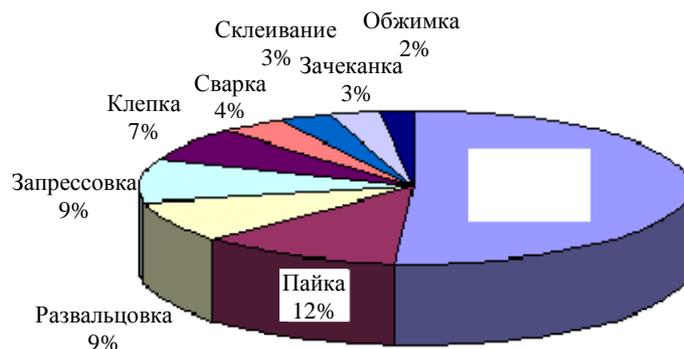


Рис. 8.1. Соотношение видов механических соединений

Пайка и сварка конструкционных деталей имеют те же физико-химические особенности, достоинства и недостатки, что и при выполнении монтажных соединений. Некоторые отличия заключаются в технологии: подготовке деталей, выборе материалов, режимах и оборудовании.

Склеивание применяют для соединения материалов в самых различных сочетаниях. Клеевые соединения обладают высокой долговечностью, коррозионной стойкостью, теплоизолирующими, звукопоглощающими, демпфирующими свойствами, герметичностью. Склеивание отличается простотой, низкой себестоимостью сборки, легко может быть переведено на поточное производство. В настоящее время широко применяют комбинированные методы неразъемных соединений — клеесварные и клееклепаные. К недостаткам клеевых соединений следует отнести сравнительно низкую стойкость при повышенных температурах, пониженную прочность при неравномерном отрыве, дефицитность, а также токсичность многих составляющих клеевых композиций.

### 8.2. РАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

При механической сборке применяются следующие виды разъемных соединений: резьбовые (до 90 %), штифтовые, шплинтовые, байонентные. Резьбовые соединения выполняются с использованием винтов, болтов, резьбовых шпилек, самонарезающих шурупов и применяются для установки наиболее тяжелых крупногабаритных деталей и сборочных единиц (трансформаторов, дросселей, переключателей, приборов). Основным видом резьб является метрическая М2—М6. Для предохранения поверхностей деталей от повреждений под гайки, головки болтов и винтов подкладывают шайбы (рис. 8.2).

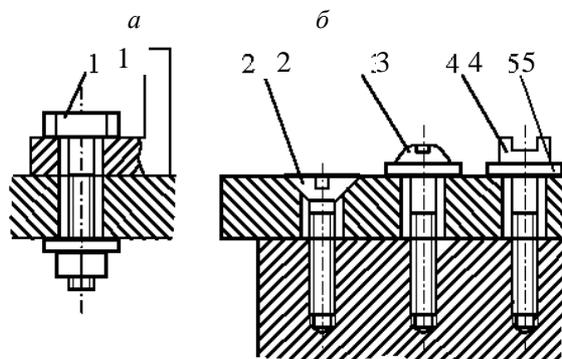


Рис. 8.2. Резьбовые соединения:  
*a* – болтовое; *б* – винтовое; 1 – болт; 2, 3, 4 – винты с потайной, полукруглой и круглой головками соответственно; 5 – шайба

При выполнении резьбового соединения момент затяжки определяется условиями работы резьбового соединения и тем, какой элемент (винт, гайка) ограничивает прочность соединения. При соединении металлических деталей винтом или болтом момент затяжки лимитируется их прочностью на растяжение. Если винт используется для стопора, то момент затяжки ограничивается прочностью его шлицев на смятие. При соединении неметаллических деталей момент затяжки лимитируется прочностью этих деталей.

Для определения максимально допустимого момента затяжки, когда винт подвергается кручению, необходимо рассчитать допустимое напряжение затяжки:

$$\sigma_{\text{доп.кр}} = k_{\text{п}} \sigma_{\text{т}},$$

где  $k_{\text{п}}$  — коэффициент прочности материалов резьбового соединения, для часто разбираемых соединений  $k_{\text{п}}=0,4—0,5$ , для неразбираемых или редко разбираемых  $k_{\text{п}} = 0,7—0,8$ ;  $\sigma_{\text{т}}$  — предел текучести материала.

В случае, если момент затяжки определяется по прочности винта на растяжение, допустимое напряжение затяжки уменьшается с учетом коэффициента приведенной прочности, который учитывает, что тело винта находится в сложно напряженном состоянии, так как наряду с растяжением на него действуют нормальные и касательные напряжения от осевой силы момента кручения в резьбе:

$$\sigma_{\text{доп.р}} = \sigma_{\text{т}} k_{\text{и}} k_{\text{п}}, \quad k_{\text{п}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 7,8 \operatorname{tg}^2 (\alpha + \xi)}},$$

где  $\alpha$  — угол подъема резьбы;  $\xi$  — приведенный угол трения в резьбе.

Максимальные моменты затяжки рассчитывают в зависимости от конструкции резьбового соединения по следующим формулам:

- при работе резьбового соединения на кручение (завинчивание резьбы в упор)

$$M_{\text{зам}} \leq k_1 k_u \sigma_m d_0^3,$$

где  $k_1$  — эмпирический коэффициент (0,05—0,07), зависящий от материала винта;  $d_0$  — диаметр резьбы;

- с учетом прочности шлицев на сминание

$$M_{\text{зат}} \leq k_2 k_{\text{и}} \sigma_{\text{T}} \frac{a_0}{d_1} d_0^3,$$

где  $k_2 = (0,08 — 0,085)$ ;  $a_0$  — глубина шлица;  $d_1$  — диаметр головки винта;

- при работе резьбы на срез

$$M_{\text{зат}} \leq k_3 k_{\text{и}} \frac{H}{d_1} \sigma_{\text{T}} d_0^3 (0,03 + k_4 \mu),$$

где  $k_3 = (1,5 — 1,54)$ ;  $H$  — высота гайки;  $k_4$  — коэффициент, определяющий условие затяжки: для круглой и цилиндрической головки винта  $k_4 = 1,2$ , для потайной  $k_4 = 1,65$ ;  $\mu$  — коэффициент трения  $(0,15 — 0,57)$ ;

- при работе резьбового соединения на растяжение

$$M_{\text{зат}} = 0,6 \sigma_{\text{доп.р}} d_0^3 (0,03 + k_4 \mu).$$

Для механизированной сборки разъемных соединений при блочной и окончательной сборке в качестве оснастки применяют ручные электрифицированные и пневматические инструменты. Инструмент с электроприводом (электроотвертка) приводится в движение встроенным электродвигателем типа МН-250 мощностью до 1000 Вт и скоростью заворачивания 1000 об/мин. Достоинствами электроотвертки являются: высокая производительность, возможность 5 — 7-кратной перегрузки по крутящему моменту. Недостатки — большие масса и потребление электроэнергии. Электродвигатель работает в импульсном режиме от источника постоянного тока в течение 0,1 с. Электроотвертка предназначена для метрических резьб М2—М6. Регулировкой пружины обеспечивается момент заворачивания в пределах 500 — 1100 Н·м при скорости заворачивания 250 об/мин.

Пневматический резьбосборочный инструмент ПГ-125 экономичен в работе, имеет небольшую массу и "мягкую" характеристику привода, универсален, безопасен, допускает большие перегрузки. Скорость заворачивания 200 — 500 об/мин, питание от сети сжатого воздуха давлением 0,3 — 0,5 МПа. Применяется для резьб М2—М5. Недостатками являются повышенный шум при работе, малое быстродействие. Малогабаритный пневмозавортывающий инструмент типа ПВ-М3 предназначен для резьб диаметром до 3 мм, имеет массу 380 г, максимальный момент затяжки 300—500 Н·м и скорость вращения на холостом ходу до 650 об/мин. Широко применяется механизированный инструмент ПГ-102, в котором с помощью гибкого вала вращение от электродвигателя передается редуктору со скоростью 146 об/мин. Инструмент состоит из вертикальной телескопической поворотной колонки, имеющей горизонтальную консоль, по которой перемещается каретка с закрепленными на ней электродвигателем и редуктором. От него с помощью подвески в виде гибкого вала вращение передается на резьбоверт. Наличие редуктора позволяет завинчивать винты от М2,5 до М6. Резьбоверт может отклоняться от вертикали на 30°.

Резьбовые соединения предохраняют от самопроизвольного отвинчивания различными видами стопорения по ГОСТ 30133—95.

*Стопорение наглухо*, обеспечивающее высокую надежность, но неудобно для разборки. Осуществляется кернением самой резьбы или сквозной прошивкой винта либо болта с помощью конического или цилиндрического штифта (винта) (рис. 8.3).

*Стопорение с помощью фигурных шайб*: с носком, с лапкой для нерегулируемых и неремонтируемых соединений специальной аппаратуры, с наружными и внутренними ушками.

*Стопорение пружинными шайбами* со смещенными краями (шайбы Гровера) с подкладыванием под шайбу Гровера дополнительной стальной шайбы для защиты от повреждения поверхности детали заостренными концами шайбы (рис. 8.4).

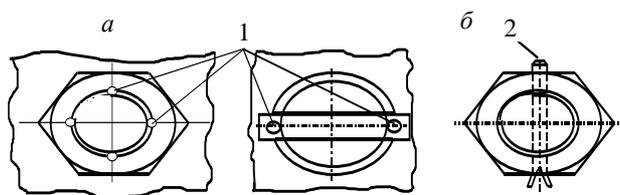


Рис. 8.3. Виды стопорения наглухо:  
*a, б* – кернением; *в* – штифтом; *1* – места кернения;  
*2* – штифт

*Стопорение путем повышения сил трения в резьбе и на опорных торцах головок винтов, болтов или гаек.* Оно достигается с помощью контргайки, которая увеличивает силы трения, либо применением специальной гайки со смещенными витками, которая имеет дополнительный поясок со смещенными двумя-тремя витками резьбы (рис. 8.5, *a*). Иногда в эту гайку закладывается упругий элемент — фибра (рис. 8.5, *б*). Для стопорения используют также разгибки в стороны свободных концов разрезанного винта (рис. 8.5, *в*).

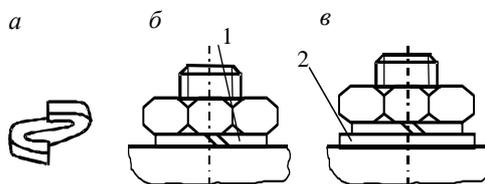


Рис. 8.4. Стопорение пружинными шайбами:  
*a* – шайба; *б* – стопорение гайки; *в* – стопорение детали из мягкого материала; *1* – шайба Гровера; *2* – стальная шайба

*Стопорение краской или заливочной массой.* Оно является самым простым и дешевым видом, совмещается с операцией контроля и применяется в бытовой ЭА. Состав заливочной массы: 75 % нитроэмали, 25 % молотого талька. После нанесения заливочной массы соединение подвергают сушке в течение 3—5 ч. Краска может наноситься с одной стороны резьбового соединения, по периметру выхода резьбы и заливкой головки винта. Для тропического исполнения аппаратуры вместо краски используют анаэробные герметики типа "Унигерм 2Н", которые сушат в течении 6 ч при температуре 60 °С.

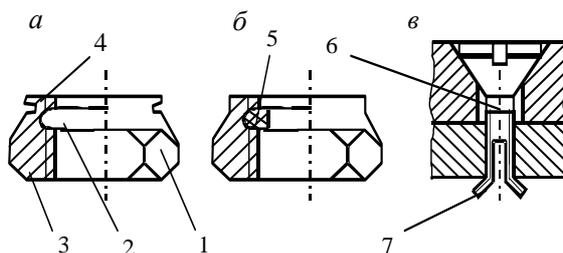


Рис. 8.5. Стопорение повышением сил трения:  
*1* – основная часть гайки; *2* – кольцевая проточка;  
*3* – поясок; *4* – часть гайки со смещенными витками;  
*5* – фибра; *б* – винт; *7* – разведенные концы винта

*Стопорение шплинтом с корончатой (прорезной) гайкой или проволочной петлей,* которые являются легко заменяемыми и сравнительно дешевыми элементами, обеспечивающими достаточную надежность.

*Штифтовые соединения* применяются для соединения деталей, испытывающих крутящие моменты. Используют штифты цилиндрической и конической формы из высококачественной легированной стали. Конические штифты имеют конусность  $K = (D - d) / l$  и создают натяг при сборке деталей. Штифтовка является слож-

ной и ответственной операцией, поскольку неправильная посадка штифта приводит к отказу аппаратуры. Штифтовые соединения как самостоятельные используются редко, обычно их применяют для стопорения резьбовых соединений.

*Шплинтовые соединения* используют в основном для крепления шайб и гаек на осях и болтах. Шплинт свободно вставляют в отверстие, проходящее через гайку и ось болта, а его выступающие концы разводят.

*Байонетное соединение* — основной вид присоединения коаксиальных разъемов, экранов пальчиковых радиоламп и других деталей. Оно удобно в разборке, но характеризуется наименьшей надежностью. При выполнении этого соединения выступы одной детали входят в прорези другой полый детали, а затяжку соединения производят, поворачивая одну деталь относительно другой.

### 8.3. НЕРАЗЪЕМНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

*Заклепочное соединение* применяют для листовых металлических деталей, когда требуется обеспечить его высокую механическую прочность. Заклепки изготавливают из мягкой стали (Ст3, Ст5, Ст10) для соединения стальных деталей конструкции с высокой механической прочностью, а из латуни — для низкого электрического сопротивления и достаточной механической прочности. Эти металлы подвергаются коррозии, поэтому после выполнения соединения заклепки покрывают лаком или краской. Для деталей малой массы в ВЧ- и СВЧ-цепях применяют медные заклепки М1, М2, а для неответственных деталей с малой массой — из алюминия марок А1 и А2. Заклепки имеют полукруглую, потайную или полупотайную головку.

Замыкающую головку заклепки образуют ударами специальной обжимки по стержню заклепки, которая с противоположной стороны опирается на специальную поддержку — наковальню (рис. 8.6, а). Наковальня должна иметь лунку по форме закладной головки, ее масса в 4—5 раз больше массы молотка.

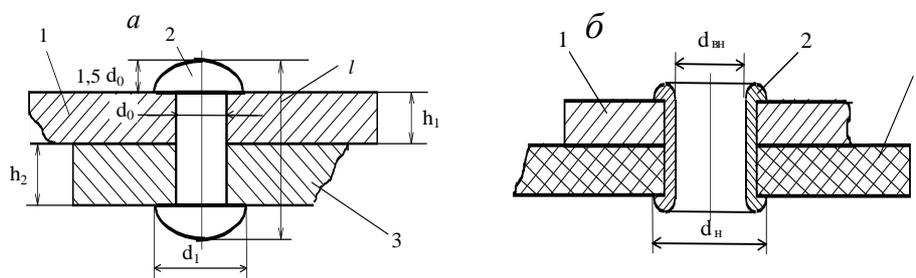


Рис. 8.6. Соединение расклепыванием (а) и развальцовкой (б):  
1,3 — детали; 2 — закладная деталь

Механизация клепки осуществляется высокопроизводительными вибрационными или соленоидными прессами, пневматическими приспособлениями с усилием 1—5 кН. Контроль качества соединения осуществляют наружным осмотром, при котором обращается внимание на правильность формы головки и точность прилегания к листам.

Соотношения при расклепывании деталей:  $d_1 = (1,5 — 1,7) d_0$ ,  $l = (h_1 + h_2) + 3 d_0$ .

Усилие расклепывания

$$P = (2,0 — 2,5) \sigma_b S,$$

где  $\sigma_b$  — предел прочности материала заклепки на растяжение;  $S$  — площадь соединения.

Для расклепывания в мелкосерийном производстве применяются наковальни или молотки (массой 200—500 г), в серийном — пневматическая расклепочная оснастка с усилием 1—5 кН, в случае повышенной прочно-

сти — кривошипно-шатунные либо вибропрессы с усилием несколько тонн. Виды и причины брака при клепке листов приведены в табл. 8.1.

*Развальцовка* применяется для соединения металлических и неметаллических деталей, например разъема с печатной платой. Она характеризуется меньшим усилием образования соединения за счет применения пустотелой заклепки, так называемого пистона, имеющего вид трубки, развальцованной с одной стороны (рис 8.6, б). Пистоны изготавливают из алюминия, латуни, стали и красной меди.

$$\text{Усилие развальцовки } P = \sigma_v S, \quad \text{где } S = \frac{\pi}{4} (d_n^2 - d_{вн}^2).$$

Табл. 8.1. Виды и причины брака при клепке листов

Виды брака	Эскиз	Причины брака
Изгиб стержня в отверстии		Диаметр отверстия чрезмерно большой
Прогиб материала		Диаметр отверстия мал
Смещение закладной головки		Отверстия в деталях не совпадают
Изгиб замыкающей головки		Очень длинный стержень заклепки, подтяжка установлена неперпендикулярно
Неполная замыкающая головка		Очень короткий стержень заклепки, мала лунка в обжимке или закладная головка отошла при клепке
Расклепывание стержня между деталями		Детали не уплотнены натяжкой
Перекус замыкающей головки		Неперпендикулярно установлены обжимка и поддержка

**Пример.** Для заклепки из латуни ЛС59-1 диаметром 3 мм площадь соединения  $S = \pi(1,5 d_0)^2 / 4 = 158 \text{ мм}^2$ , а усилие расклепывания  $P = 2 \cdot 215 \cdot 10^6 \cdot 15 \cdot 10^{-6} \approx 6,5 \text{ кН}$ . Для развальцовки пистона ( $d_n = 1,5 \text{ мм}$  и  $d_{вн} = 0,8 \text{ мм}$ ), изготовленного из латуни ЛС59-1,  $P = 215 \cdot 1,2 = 258 \text{ Н}$ .

*Соединения пластической деформацией* образуются путем деформации элементов крепления деталей либо зачеканки одной детали в другую (например, сборка роторной секции конденсатора переменной емкости). Этот процесс отличается высокой производительностью, не требует специальных деталей, однако не рекомендуется при значительных механических нагрузках.

*Запрессовка* обеспечивается необходимым натягом при условии, что диаметр охватывающей детали меньше диаметра охватываемой детали. Для мелких деталей усилие создают молотком, для больших — с помощью прессы. Для соединения металлических деталей применяют посадки: глухую (Гл), тугую (Т), напряженную (Н). Усилие запрессовки зависит от разности диаметров, формы и чистоты поверхности соприкасающихся деталей. Иногда для обеспечения запрессовки одну из деталей нагревают. Для соединения деталей из пластмасс под натягом рекомендуются посадки:  $H_8/k_8$  в системе отверстий,  $N_8/h_8$  в системе вала.

*Опрессовка (армирование)* заключается в образовании соединения металлической и неметаллической деталей путем литья под давлением либо опрессовкой реактопластами ( $T = 160—220$  °С,  $P = 2—5$  МПа).

*Склеивание* — это технологический процесс соединения деталей с помощью специальных связующих материалов, которые вследствие взаимодействия с поверхностью деталей и изменения своего физического состояния способны формировать прочные соединения. Соединение склеиванием является результатом проявления сил адгезии, аутогезии и когезии.

*Адгезией* называется явление сцепления двух разнородных материалов при их контакте, которое возникает в результате проявления сил молекулярного взаимодействия клея и соединяемой поверхности. *Аутогезией* называется явление сцепления поверхностей однородных материалов (самослипание). *Когезия* — явление сцепления молекул склеивающего материала в объеме тела. В пленке клея наблюдается образование прочных молекулярных цепей от границы раздела фаз в глубь полимера, что повышает прочность клеевого шва.

Общая схема развития сцепления при склеивании включает следующие процессы: адсорбция — адгезия — смачивание — поверхностные химические реакции. *Адсорбция* есть явление концентрации молекул полимера из раствора вблизи поверхности субстрата (подложки) под действием молекулярных сил. Различают два вида адсорбции: физическую и химическую. *Физическая адсорбция* вызывается силами Ван-дер-Ваальса и почти не требует энергии активации. Поскольку энергия связи при физической адсорбции мала (порядка 4—5 кДж/моль), то этот процесс обратим и энергетическое состояние адсорбированных молекул мало отличается от свободных. Взаимодействие молекул адгезива и субстрата происходит в результате полярных, индукционных и дисперсионных сил.

Мерой полярности молекул служит дипольный момент:

$$\mu = q r ,$$

где  $q$  — заряд;  $r$  — расстояние между центрами.

Индукционные силы возникают в результате взаимодействия постоянного диполя с неполярными молекулами. Дисперсионное взаимодействие свойственно всем молекулам и обусловлено смещением центров положительных и отрицательных зарядов относительно среднего положения в отдельные мгновения.

*Химическая адсорбция* протекает со значительным тепловым эффектом (40—400 кДж/моль) и требует заметной энергии активации. При этом происходит изменение электронной структуры взаимодействующих молекул.

Процесс склеивания состоит из нескольких стадий. На первой стадии образования соединения в результате броуновского движения молекул в адгезиве и адсорбции молекул адгезива происходит накопление молекул клеящего вещества у поверхности субстрата. Перемещение молекул адгезива интенсифицируется давлением и нагревом. На второй стадии, когда расстояние между молекулами клея и субстрата станет менее 5 нм, начинают

действовать межмолекулярные силы адгезии, приводящие к образованию различных связей типа "диполь—диполь", "диполь—наведенный диполь". Связи между молекулами адгезива и субстрата оказываются более прочными, чем взаимодействие молекул полимера с молекулами растворителя клея. Это усиливает миграцию молекулярных цепей полимера к субстрату и приводит к образованию большого числа точек контакта.

Работа сил адгезии между твердым телом и жидкостью определяется уравнением Дюпре

$$W_{т.ж} = \gamma_{т.г} + \gamma_{ж.г} - \gamma_{т.ж},$$

где  $\gamma_{т.г}$ ,  $\gamma_{ж.г}$ ,  $\gamma_{т.ж}$  — поверхностные натяжения на соответствующих границ раздела (рис. 8.7).

С учетом того, что соотношение сил поверхностного натяжения определяется равенством Юнга

$$\gamma_{т.г} = \gamma_{т.ж} + \gamma_{ж.г} \cos \theta,$$

получим следующее уравнение для работы сил адгезии:

$$W_{т.ж} = \gamma_{ж.г} (1 + \cos \theta).$$

Из этого уравнения следует, что максимальная работа сил адгезии будет получена при  $\cos \theta = 1$ , т. е. когда угол  $\theta = 0$ . В этом случае жидкость полностью смачивает поверхность твердого тела.

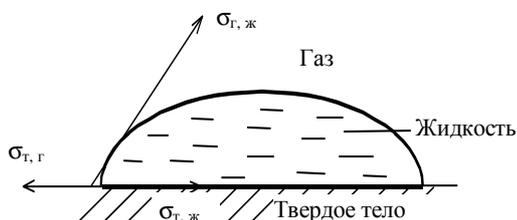


Рис. 8.7. Схема растекания капли жидкости по поверхности твердого тела

Обычно поверхность твердого тела загрязнена жировыми пленками, которые в значительной мере изменяют поверхностные свойства тел. Для увеличения работы адгезии при склеивании эти пленки необходимо удалять.

Прочность клеевого соединения увеличивается, если склеиваемые материалы имеют разветвленные поры, что способствует диффузии молекул полимера в пограничный слой материала. Тонкие пленки клея (0,1—0,2 мм) дают более надежное соединение за счет прочных межмолекулярных сил, чем толстые слои.

Технологический процесс склеивания состоит из следующих операций:

- очистка поверхностей деталей от загрязнений;
- нанесение клея на склеиваемые поверхности;
- подсушивание нанесенного слоя клея;
- соединение склеиваемых деталей и полимеризация клея;
- контроль качества клеевых соединений.

Подготовку поверхностей деталей под склеивание проводят механической обработкой (гидропескоструйной очисткой, шлифованием, зачисткой наждачной бумагой). Обезжиривание осуществляют органическими растворителями (трихлорэтилен, этиловый спирт и др.).

Клей наносят на склеиваемые поверхности кистью, пульверизатором или путем окунания. Толщина клеевого шва должна находиться в пределах от 0,1 до 0,25 мм. Подсушивание нанесенного слоя клея перед соединением деталей необходимо для удаления растворителей. Если растворитель остается в клеевом слое во время сборки, это может привести к образованию непрочных соединений. Подсушка производится обычно на воздухе в течение 5—20 мин. После склеивания деталей осуществляется полимеризация клея при повышенных температуре и давлении. Так, для клеев БФ температура нагрева составляет 60—120 °С, давление —  $(1,5—8) \cdot 10^5$  Па.

Контроль качества клеевых соединений осуществляют визуальным осмотром, с помощью дефектоскопов (ультразвуковой резонансный метод), выборочным испытанием изделия на разрушение. Для многослойной системы материалов наблюдаются четыре типа разрушения:

- адгезионный — полное отслаивание адгезива от субстрата;
- аутогезионный — разрушение по месту слипания склеиваемых поверхностей;
- когезионный — разрушение одного из склеиваемых материалов или самой клеевой пленки;
- смешанный — характеризуется частичным расслаиванием по месту контакта либо частичным разрушением адгезива или субстрата (рис. 8.8).

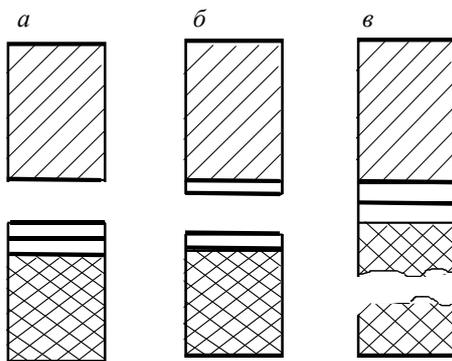


Рис. 8.8 Типы разрушений клеевых соединений

Основные типы клеев и условия проведения склеивания приведены в табл. 8.2.

Табл. 8.2. Характеристики клеев

Тип клея	Состав	Режим склеивания	Область применения
БФ – 4	Спиртовой раствор фенолформальдегидной смолы с добавками	120 °С, 1—2 ч, $(1—5) \cdot 10^5$ Па	Универсальный. Приклеивание фольги, ферритовых сердечников. Термостойкость до 250 °С. Устойчив при повышенных вибрациях
ВК – 9	Эпоксидная смола, полиамидная смола, карбонильное железо, алюминиевая пудра, отвердитель	20—25 °С, 24 г, 60 °С, 1 ч, $(0,1—2) \cdot 10^5$ Па	Крепление ЭРЭ, магнитопроводов, микросхем к платам и металлам
ПМП	Полиметакрилат, дихлорэтан	20 °С, 24 ч, $(0,5—2) \cdot 10^5$ Па	Склеивание оргстекла и целлулоида
88 НП	Бутилфенолформальдегидная смола, бензин, добавки	25 °С, 24 ч, $(0,2—2) \cdot 10^5$ Па	Приклеивание прокладок из резины, кожи, ткани к металлам, стеклу, дереву
ЛН	Смесь 20 %-го раствора нийрита в дихлорэтане и клея "Лейконат"	20 °С, 24 ч, $(0,2—0,5) \cdot 10^5$ Па	Склеивание полистирола и оргстекла с металлами, ферритов, магнитофонной ленты
ПФ – 41	Полиорганосилоксан, органосиликаты со стеклянным наполнителем	250 °С, 3 ч, $(0,7—1) \cdot 10^5$ Па	Для вакуумно-плотных герметичных соединений с термостойкостью до 200 °С

#### 8.4. ПАЙКА МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Конструкционная пайка выполняется низко-, средне- и высокотемпературными припоями. Низко- и средне-температурная пайка применяется в производстве прецизионных паяных соединений, так как уменьшение нагрева существенно снижает деформацию деталей, а высокотемпературная — при изготовлении крупногабаритных конструкций, для которых требуется высокая механическая прочность и термостойкость.

Процесс конструкционной пайки аналогичен процессу выполнения монтажной, меняются только типы паяных соединений (рис. 8.9) и повышаются требования к жесткости фиксации деталей перед выполнением соеди-

нения. Наибольшей механической прочностью обладают соединения внахлестку и встык с накладкой, а повышенной точностью — ступенчатое. Для крепления деталей применяют штифтовое соединение, прихватку сваркой, развальцовку, отборцовку, точечное обжатие, кернение, специальные конструктивные элементы (гнезда, уступы, буртики) и т. д. Поступающие на сборку детали должны удовлетворять требованиям технологичности и иметь в закрытых объемах отверстия диаметром 0,5—1,5 мм для выхода воздуха и газов в процессе пайки, технологические припуски 1—2 мм на длину во фланцевых соединениях для улучшения условий формирования галтели, покрытия с хорошей паяемостью.

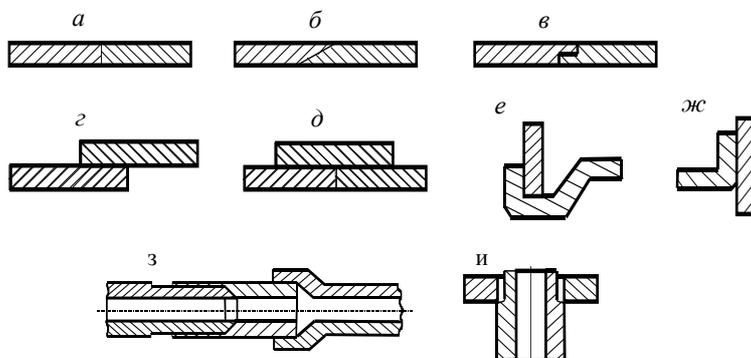


Рис. 8.9. Типы паяных соединений:

*a* – встык, прочность шва низкая; *б* – вскос, прочность шва более высокая; *в* – ступенчатое соединение, повышенная точность сборки и прочность соединения; *г* – внахлестку, прочность шва зависит от площади перекрытия; *д* – встык с накладкой, прочность соединения высокая; *е* – в замок, повышает прочность и плотность шва по сравнению с соединением в тавр (*ж*); *з* – телескопическое, повышает точность сборки и прочность соединения; *и* – соединение трубы с фланцем

Выбор припоя и флюса определяется требованиями, предъявляемыми к аппаратуре. Основные типы высокотемпературных припоев и флюсов, а также области их применения приведены в справочной литературе и отраслевых стандартах.

Высокотемпературную пайку механических соединений выполняют в поле токов высокой частоты, в печи или в ванне с расплавленной солью.

*Индукционная пайка* основана на разогреве паяемых деталей под действием электромагнитного излучения. Вследствие поверхностного эффекта тепловая энергия локализуется в тонком слое, толщина которого определяется глубиной проникновения токов ВЧ. Учитывая габаритные размеры и материал соединяемых деталей, подбирают частотный режим пайки. Для толстостенных изделий применяют низкочастотный нагрев в диапазоне 10—60 кГц, для тонкостенных — высокочастотный в диапазоне 200—1000 МГц.

Технологической оснасткой для пайки токами ВЧ является индуктор, представляющий собой катушку, изготовленную из высокопроводящего трубчатого материала, через которую интенсивно прокачивается охлаждающая жидкость. Термический КПД нагрева системы "круговой индуктор — деталь" рассчитывается по формуле

$$\eta_T = \frac{1}{1 + \frac{D_{ин}^2}{D_{д}^2} \left(1 + 6,25 \frac{\delta^2}{D_{д}^2}\right) \sqrt{\frac{\rho_1}{\mu \rho_2}}},$$

где  $D_{ин}$ ,  $D_{д}$  — диаметры индуктора и детали;  $\delta$  — глубина проникновения токов ВЧ;  $\mu$  — магнитная проницаемость материала детали;  $\rho_1$ ,  $\rho_2$  — удельные электрические сопротивления материалов индуктора и детали.

Из формулы видно, что КПД прямо пропорционально зависит от значений величин  $\rho_2$  и  $\mu$ , т. е. тем выше, чем большие значения  $\rho_2$  и  $\mu$  имеет нагреваемый материал (для сталей  $\eta_T = 0,7—0,8$ , для меди и медных сплавов  $\eta_T = 0,5—0,6$ ).

Индукционная пайка применяется для соединения СВЧ-элементов (волноводных звеньев, магнетронов, ламп бегущей и отраженной волн), герметизации микросборок в металлических корпусах. Она позволяет проводить процессы с высокой скоростью, одновременно паять несколько швов сложной пространственной конфигурации. Предварительный подогрев деталей обеспечивает повышение скорости процесса из-за быстрого выравнивания температуры по всему соединению и улучшение его качества за счет устранения теплового удара. Качество соединений повышается при проведении процесса в вакууме или среде очищенных газов (водород, азот либо их смесь). Процесс легко автоматизируется в конвейерных линиях сборки. Дозированное нанесение припоя на собранные в держателе или кассете детали осуществляется программируемым манипулятором. Его существенным недостатком является необходимость изготовления специальной оснастки для каждой сборки.

*Пайка в печи* с контролируемой атмосферой обеспечивает равномерность нагрева, точность поддержания температуры и времени выдержки, стабильность качества, легко поддается автоматизации, устраняет операции флюсования и последующей очистки. Нагрев паяемых деталей осуществляется в активной газовой среде, подвергнутой специальной очистке и осушению (водород, диссоциированный аммиак, водяной газ), в инертной среде или вакууме. Правильный выбор режима пайки позволяет совместить ее с последующей термообработкой соединения.

*Пайка в ваннах* с расплавленной солью применяется для сборки крупногабаритных изделий. Состав расплава подбирается таким образом, чтобы он обеспечивал требуемую температуру и оказывал флюсующее действие на соединяемые поверхности. Это в основном хлористые соединения калия, лития, натрия, бария, кальция. Собранные под пайку узлы (зазор 0,05—0,1 мм) предварительно нагревают в печи до температуры на 80—100 °С ниже температуры плавления припоя. Такая подготовка снижает коробление деталей и не нарушает температурный режим ванны. После выдержки в расплаве в течение 0,5—3 мин детали вместе с приспособлением извлекают из ванны и после охлаждения тщательно промывают для удаления остатков флюса.

## 8.5. КОНСТРУКЦИОННАЯ СВАРКА

*Конструкционной сваркой* соединяют антенные мачты, зеркала радиотелескопов, каркасы, стойки, шасси, волноводы, кожухи аппаратуры, изготовленные из стали, алюминиевых, титановых и медных сплавов. Сварные конструкции, обладая всеми необходимыми эксплуатационными качествами, должны быть изготовлены с минимальной трудоемкостью, экономичным расходом материалов и высокой стабильностью качества.

Надежность сварной конструкции во многом зависит от свариваемости материала. Понятие свариваемости материалов — комплексное, оно зависит от пригодности материала к сварке, технологических условий сварки и в свою очередь определяет надежность сварной конструкции (рис. 8.10).

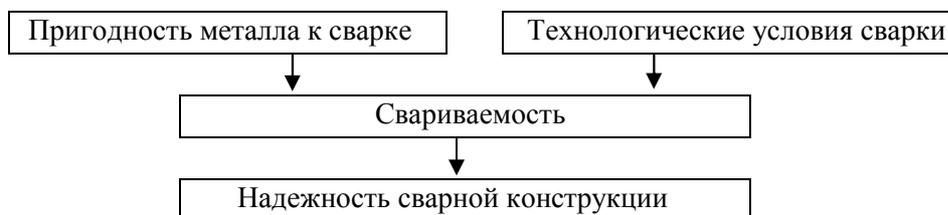


Рис. 8.10. Взаимосвязь факторов сварки

В радиоэлектронике при изготовлении элементов конструкций применяют разнообразные черные и цветные металлы, каждый из которых характеризуется определенной способностью к сварке. *Свариваемость* — это свойство материала в однородной или разнородной системе под воздействием активирующей энергии обеспе-

чивать надежное сварное соединение.

Свариваемость сталей зависит от химического состава, структуры, температуры и интервала плавления, склонности к поглощению газов. С увеличением степени легирования (особенно углеродом) растет их чувствительность к нагреву, увеличивается опасность возникновения трещин в шве. Поэтому критерием свариваемости сталей является эквивалентное содержание углерода:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn} + \text{Si}}{20} + \frac{\text{Ni}}{15} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{10},$$

где С, Мп, Si, Ni, Сг, Мо, V — химические элементы.

В зависимости от эквивалентного содержания углерода различают группы сталей по свариваемости (табл. 8.3). Свариваемость алюминия и его сплавов определяется их высокими теплопроводностью, термическим расширением, родством к кислороду, тугоплавкостью оксидной пленки и фазовыми превращениями при сварке, приводящими к охрупчиванию при 350—400 °С. Травление деталей перед сваркой и защита жидкой ванны от контакта с атмосферой обеспечивают отсутствие пор при сварке чистого алюминия и литейных сплавов. Массивные детали перед сваркой подогревают до 200—400 °С. Сварные соединения из дюралюминов (термически упрочняемых сплавов) склонны к образованию трещин, поэтому их подвергают естественному (5—10 сут) или искусственному (200 °С, 2—10 ч) старению.

Табл. 8.3. Свариваемость сталей

Характеристика свариваемости	Марка стали	С <sub>экв</sub> , %	Содержание легирующих примесей, %
Хорошая свариваемость (для ответственных сборок отпуск при 600—650 °С)	Стали низкоуглеродистые: 05; 08; 10; 15; стали низкоуглеродистые и среднелегированные: 15Х, 20Х	До 0,25	До 1,0
Свариваемость с предварительным нагревом до 200—300 °С, отпуск после сварки	Стали углеродистые: 25, 30, 35, 40; стали низколегированные и низкоуглеродистые: 14Г, 14ГС; стали низколегируемые и среднеуглеродистые: 25Г2С, 35ХМ	0,25—0,45	До 1,5
Свариваемость после предварительной термообработки (закалка при 900 °С и отпуск при 500—600 °С) с предварительным нагревом до 300—350 °С и последующим отпуском при 600—650 °С	Стали среднеуглеродистые: 35Г, 40, 45; стали низколегируемые и низкоуглеродистые: 18ГС2, 14ХГС, ЮХСНД	0,35—0,50	До 5,0
Свариваемость после предварительной термообработки (закалка при 900 °С и отпуск при 500—600 °С) с предварительным нагревом до 350—500 °С и последующим отпуском при 600—650 °С	Стали высокоуглеродистые: 50, 55, 60, 70, 80; стали низколегируемые и среднеуглеродистые: 35ХМ; стали среднелегированные: 30ХГСА, 12Х5МА	Свыше 0,5	До 10

Свариваемость меди определяется ее повышенной жидкотекучестью, теплопроводностью и химической активностью, наличием примесей свинца, кислорода, серы, висмута, которые не растворяются в ней. Нагревание меди до температуры выше 400 °С приводит к интенсивному окислению металла и его примесей, расплавленный металл хорошо растворяет газы, особенно водород с образованием паров воды. Пары воды при нагревании создают большое давление, под действием которого образуется сеть микротрещин и пор (водородная болезнь). Поэтому для изготовления сварных конструкций применяют специальную раскисленную медь, в которой нет кислородных включений. Медь и ее сплавы соединяют газовой дуговой или контактной сваркой.

Свариваемость разнородных металлов определяется их диаграммой состояния, разницей значений коэффи-

циента линейного теплового расширения, упругостью паров, температурой плавления и другими характеристиками. Наилучшей свариваемостью при прочих равных условиях обладают металлы с полной взаимной растворимостью. При сварке металлов, образующих хрупкие интерметаллиды, необходимо ограничивать время существования жидкой фазы и ее температуру. Для преодоления трудностей, связанных со сваркой разнородных металлов, применяют биметаллические переходники, компенсирующие или барьерные прокладки.

На качество сварных соединений оказывают влияние не только правильный выбор материалов, разработка оптимального варианта ТП, но и особенности конструкции соединения и всего изделия. Основные требования, предъявляемые к конструкции, следующие: 1) расположение деталей должно обеспечивать свободный доступ инструмента в зону соединения; 2) швы в изделии рекомендуется располагать таким образом, чтобы весь процесс сварки был выполнен в одном положении изделия; 3) стыки всех элементов желательно располагать в одной плоскости, избегая прохождения нескольких швов через одну точку; 4) расстояние между параллельными швами рекомендуется выдерживать не менее 10 мм для деталей толщиной до 2 мм, а для остальных — в 4—5 раз больше толщины деталей; 5) нецелесообразно располагать окна, отверстия на близком расстоянии от швов; 6) рекомендуется соблюдать пропорции между высотой элементов и расстоянием между ними (рис. 8.11, а); 7) кромки деталей под сварку разделяются, как показано на рис. 8.11, б.

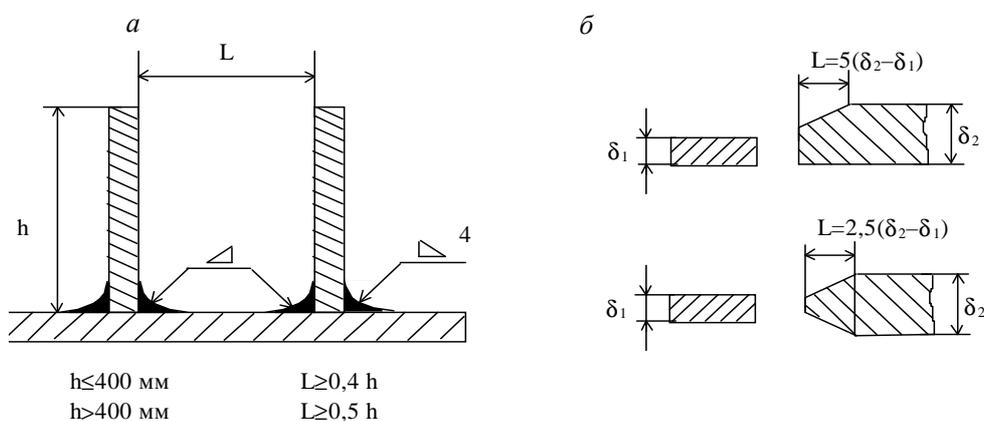
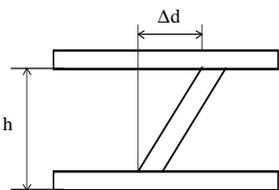
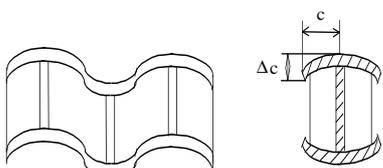


Рис. 8.11. Примеры рекомендуемых соотношений в сварных конструкциях

Неравномерный нагрев деталей при сварке приводит к различным дефектам (табл. 8.4).

Табл. 8.4. Допустимые отклонения размеров сварных конструкций

Геометрическая форма соединения	Контролируемый параметр	Максимальная деформация, мм
	Разность диагоналей $\Delta M$	$M = \begin{cases} 500 \dots 1500, & \Delta M = 2, \\ 1500 \dots 4000, & \Delta M = 3, \\ \text{свыше } 4000, & 0,001M, \leq 8 \end{cases}$
	Стрела кривизны $\Delta l$ для корабчатых и двутавровых балок	$L = \begin{cases} 500 \dots 2000, & \Delta L = 1,5, \\ \text{свыше } 2000, & 0,0007L \leq 10 \end{cases}$
	Поперечный уклон балок, рам, стоек $\Delta b$	$\Delta b = 0,005 b$

	Отклонение от вертикали боковых стенок балок $\Delta d$	$\Delta d = 0,004 h$
	Волнистость опоясывающих листов балок $\Delta c$	$\frac{\Delta c}{c} = 0,02$ (с ребрами) $\frac{\Delta c}{c} = 0,03$ (без ребер)

Основные методы получения металлоконструкций, каркасов, рам, стоек, оснований РЭА — контактная электродуговая, холодная, диффузионная и газовая сварка. Вне зависимости от метода для уменьшения деформации изделий детали закрепляют в приспособлении и стремятся обеспечить минимальный объем металла в сварочном шве, использовать прерывистый точечный шов, выдержать сборочные зазоры.

При изготовлении каркасов до 90 % работ выполняется контактной сваркой. Более пригодны для этого вида сварки металлы, имеющие высокие электросопротивление, пластичность и малую окисляемость, а именно: никель и его сплавы (ковар), платинит, низкоуглеродистая сталь и др. Схема установки для контактной (конденсаторной) сварки с трансформаторной связью приведена на рис. 8.12.

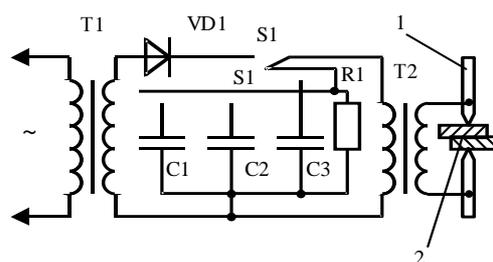


Рис. 8.12. Схема конденсаторной сварки:  
1 – электроды; 2 – свариваемые детали

На качество сварного соединения оказывают влияние энергия сварочного импульса, усилие сжатия электродов, площадь сечения и состояние поверхности электродов, форма импульса сварочного тока. Форма импульса сварочного тока и длительность его прохождения зависят от емкости сварочных конденсаторов  $C$ , напряжения их зарядки  $U$ , коэффициента трансформации  $K_{тр}$ , индуктивности  $L$  и суммарного активного сопротивления контура  $R_{\Sigma}$ . В зависимости от соотношения параметров разрядного контура наблюдаются три формы импульсов сварочного тока (рис. 8.13). Рабочей является аperiодическая форма тока. При переходе в колебательный режим процесс становится неустойчивым и требует регулировки параметрами  $K_{тр}$  и  $C$ . Производительность процесса зависит от постоянных времени заряда и разряда конденсаторов.

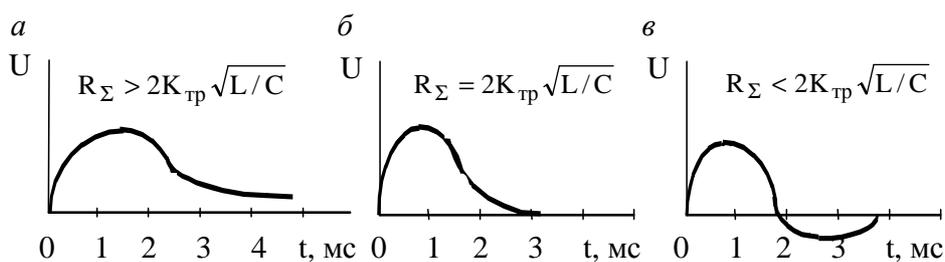


Рис. 8.13. Формы импульсов сварочного тока:

$a$  – кривая аperiodического типа;  $b$  – критического затухания;  
 $c$  – колебательного типа

*Аргонно-дуговая сварка* обеспечивает высокое качество соединений деталей из нержавеющей сталей, алюминиевых и титановых сплавов. Основными параметрами ТП являются: сила тока, напряжение на электродах, вид и полярность тока, диаметр электродов. Увеличение силы сварочного тока приводит к увеличению глубины провара и применяется при повышенных толщинах деталей. Напряжение линейно связано с шириной шва и не сказывается на глубине провара. При сварке постоянным током обратной полярности ("–" на изделии) глубина провара на 40—50 % выше, чем при сварке током прямой полярности, и на 15—20 % выше, чем при сварке переменным током. Использование аргона при дуговой сварке обеспечивает чистоту химического состава литого металла и создает благоприятные условия для формирования структуры шва.

*Холодная сварка* (рис. 8.14) осуществляется за счет пластической деформации соединяемых деталей под действием больших механических усилий. Удельное давление при соединении одноименных материалов определяется по формуле

$$P = \sigma_T \left( 1,5 + 0,5 \frac{S}{h_{\text{ост}}} \right),$$

где  $\sigma_T$  — предел текучести;  $S$  — ширина рабочей части пуансона;  $h_{\text{ост}}$  — остаточная толщина металла.

Метод применяется для соединения внахлестку тонких (до 1 мм) деталей.

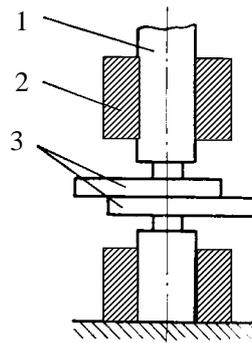


Рис. 8.14. Схема холодной сварки:  
1 – пуансон; 2 – прижим; 3 – свариваемые детали

*Диффузионная сварка* основана на соединении деталей в результате ползучести под действием приложенного давления в контролируемой атмосфере. Основными параметрами процесса являются температура  $T$ , давление  $P$  и время  $t$ , которые для взаимно растворимых металлов связаны следующим соотношением:

$$t P^m e^{-\frac{A}{RT}} = B,$$

где  $m$ ,  $B$  — константы для данного металла;  $A$  — энергия активации ползучести;  $e$  — основание натурального логарифма;  $R$  — универсальная газовая постоянная.

Метод диффузионной сварки позволяет сваривать разнородные материалы, обеспечивает высокую точность, прикладываемые усилия колеблются в пределах 5—20 МПа. Недостатками метода являются высокая энергоёмкость и низкая производительность (соединение длится 5—20 мин).

Газовая сварка применяется для сварных соединений из тонколистовой стали с целью предупреждения прожогов, для соединения деталей из легких сплавов с минимальными деформациями. В качестве горючей смеси используют ацетилен или природный газ и кислород.

## 8.5. ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ МЕХАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ

Механическое соединение деталей в сборочные единицы сопровождается расчетами геометрической точности, основанными на теории размерных цепей. *Размерная цепь* представляет собой совокупность взаимно связанных звеньев (размеров), которые образуют замкнутый контур и непосредственно участвуют в решении определенной технологической задачи. В зависимости от геометрии образованного контура размерная цепь бывает линейной, плоскостной или пространственной. Звенья размерной цепи разделяют на замыкающее (одно на цепь) и составляющие, которые в свою очередь бывают увеличивающие и уменьшающие.

*Замыкающее звено* определяется условиями поставленной задачи сборки, непосредственно не задается, а получается последним при ее решении. Номинальный размер отклонения и поле допуска замыкающего звена являются функциями соответствующих звеньев. В сборочных цепях замыкающим звеном может быть зазор между деталями, смещение осей симметрии, поворот между поверхностями, перекрытие деталей и т. д. Его отличительной особенностью является то, что номинальное значение размера может быть равным нулю.

*Составляющими* считаются звенья, функционально связанные с замыкающим и влияющие на него; степень и направление влияния между указанными звеньями определяется передаточным отношением (коэффициентом влияния). Звенья называются *увеличивающими*, если с их увеличением увеличивается замыкающее звено, и *уменьшающими* при обратном направлении влияния. На схемах размерных цепей (рис. 8.15) звенья изображают в виде стрелок, причем увеличивающие и уменьшающие звенья обозначены стрелками, направленными в разные стороны. Основное уравнение размерной цепи составляется по ее схеме и в общем случае имеет вид

$$A_1 \alpha_1 + A_2 \alpha_2 + \dots + A_i \alpha_i + \alpha_\Sigma = 0,$$

где  $A_1, A_2, \dots, A_i$  — передаточные отношения составляющих звеньев на замыкающее;  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \alpha_\Sigma$  — номинальные значения всех звеньев размерной цепи.

Для линейных цепей с параллельными звеньями передаточные отношения равны:  $A_i = 1$  — для увеличивающих составляющих звеньев;  $A_i = -1$  — для уменьшающих составляющих звеньев.

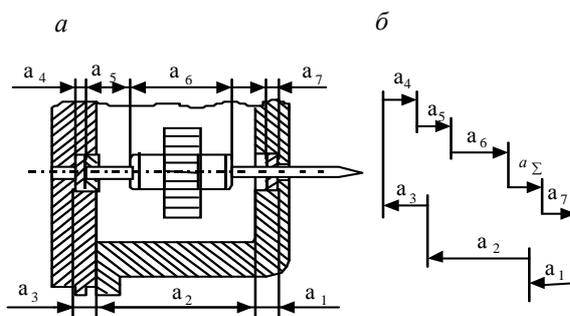


Рис. 8.15. Чертеж сборочной единицы (а) и размерной цепи (б)

В случае двух- и трехмерных цепей с линейными звеньями передаточные отношения равны косинусу угла между направлением звеньев  $\alpha_i$  и направлением замыкающего звена  $\alpha_\Sigma$ :

$$A_i = \cos(\alpha_\Sigma \wedge \alpha_i).$$

Решая это уравнение относительно номинального размера замыкающего звена, получаем

$$\alpha_\Sigma = \sum_{i=1}^{m-1} A_i \alpha_i,$$

где  $i = \overline{1, m}$  — порядковый номер звена.

Для расчета размерных цепей используют два метода: максимума-минимума и вероятностный. *Метод мак-*

*сумма-минимума* рекомендуется применять для малозвенных цепей высокой точности и для всех цепей малой точности, когда должна быть обеспечена полная взаимозаменяемость изделий. В этом случае максимальное (минимальное) значение размеров замыкающего звена  $\alpha_\Sigma$ , координата середины поля допуска  $\Delta_{0\Sigma}$ , допуск на размер замыкающего звена  $\delta_\Sigma$  рассчитываются по уравнениям:

$$\sigma_\Sigma^{\max} = \sum_{i=1} \bar{A}_i \alpha_i^{\max} + \sum_{i=1} \bar{A}_i \alpha_i^{\min}, \quad \alpha_\Sigma^{\min} = \sum_{i=1} \bar{A}_i \alpha_i^{\min} + \sum_{i=1} \bar{A}_i \alpha_i^{\max},$$

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} A_i \Delta_{0i}, \quad \delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{m-1} |A_i| \delta_i,$$

где  $\Delta_{0i}$ ,  $\delta_i$  — соответственно координата середины поля допуска и допуск на размер составляющего звена цепи. Если размерная цепь решена правильно, то выполняется условие  $\delta_\Sigma = \alpha_\Sigma^{\max} - \alpha_\Sigma^{\min}$ .

Достоинством метода максимума-минимума является простота выполнения расчетов, однако вследствие того, что сочетание крайних отклонений значений составляющих звеньев при сборке маловероятно, колебания замыкающего звена получаются больше действительных, а при расчете допусков на составляющие звенья по известному допуску на замыкающий размер они оказываются высокоточными.

*Вероятностным методом* рассчитываются размерные цепи, для которых экономически оправдан риск возможного выхода за пределы поля допуска размера замыкающего звена у части изделий. Решение получают по правилам суммирования случайных взаимозависимых величин. Координаты середины поля допуска замыкающего звена  $\Delta_{0\Sigma}$  и допуск на размер замыкающего звена  $\delta_\Sigma$  определяются из соотношений:

$$\Delta_{0\Sigma} = \sum_{i=1}^{m-1} A_i (\Delta_{0i} + \beta_i \delta_i) - \beta_\Sigma \delta_\Sigma, \quad \delta_\Sigma = \frac{1}{K_\Sigma} \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} A_i^2 K_i^2 \delta_i^2},$$

где  $\beta_i$ ,  $\beta_\Sigma$  — коэффициенты относительной асимметрии  $i$ -го и замыкающего звеньев;  $K_i$ ,  $K_\Sigma$  — коэффициенты относительного рассеивания размеров  $i$ -го и замыкающего звеньев.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Виды резьбовых соединений и расчет моментов затяжки.
2. Методы стопорения резьбовых соединений.
3. Технология неразъемных соединений.
4. Процессы склеивания в производстве РЭС.
5. Конструкционная пайка и сварка.

## 9. СБОРКА ЭЛЕКТРОННЫХ БЛОКОВ НА ПЕЧАТНЫХ ПЛАТАХ

### 9.1. СТРУКТУРА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СБОРКИ

Операции сборки и монтажа являются наиболее важными в технологическом процессе изготовления электронных блоков, поскольку они оказывают определяющее влияние на технические характеристики изделий и отличаются высокой трудоемкостью (до 50—60 % общей трудоемкости изготовления). При этом доля подготовки ИЭТ к монтажу составляет около 10 %, установки — более 20 %, пайки — 30 %. Автоматизация и механизация этих групп операций дает наибольший эффект в снижении трудоемкости изготовления изделий. Основными путями повышения эффективности являются: применение автоматизированного оборудования, групповая обработка ИЭТ, внедрение новой элементной базы, например поверхностно-монтируемых элементов.

Технологический процесс автоматизированной сборки состоит из подачи компонентов и деталей к месту установки, ориентации выводов относительно монтажных отверстий или контактных площадок, фиксации элементов на плате. В зависимости от характера производства сборка может выполняться: вручную с индексацией и без индексации адреса; механизированно на пантографе; автоматизированно параллельно на автоукладчиках и последовательно на автоматах или автоматических линиях с управлением от ЭВМ.

Подача элементов к месту установки при автоматизированной сборке происходит путем загрузки кассет с ИЭТ и платами в магазины и накопители автомата, захвата ИЭТ установочной головкой и позиционирования. Как правило, загрузка кассет осуществляется вручную, и только в ГАП эта операция выполняется с помощью автоматических транспортных средств. Остальные операции на сборочном автомате проводятся без участия оператора. Платы со смонтированными ИЭТ снимаются с автомата вручную или автоматически и направляются на полимеризацию клея. Далее плата поступает на светомонтажный или обычный сборочный стол, где устанавливаются ИЭТ малой применяемости. После пайки, отмывки остатков флюса и исправления дефектов собранная плата проходит визуальный и функциональный контроль. Заключительной операцией процесса сборки является нанесение влагозащитного покрытия.

Применение ручной сборки экономически выгодно при изготовлении изделий не более 15—20 тыс. шт. в год партиями по 100 шт. При этом на каждой плате может быть расположено не более 100 элементов, в том числе до 20 ИМС. Достоинствами ручной сборки являются: высокая гибкость при смене объектов производства, возможность постоянного визуального контроля, что позволяет своевременно обнаруживать дефекты плат или компонентов и устранять причины брака. Недостатки — невысокая производительность, значительная трудоемкость технологического процесса, использование высококвалифицированного рабочего персонала.

При объемах выпуска изделий порядка 100—500 тыс. шт. в год с количеством расположенных на плате элементов до 500 экономически целесообразно использовать механизированную сборку с пантографом. При этом высокая гибкость сочетается с большей, чем при ручной сборке, производительностью. В условиях массового выпуска однотипных изделий бытовой ЭА (0,5 — 5 млн шт. в год) целесообразно использовать автоматизированное оборудование (автоматы) или автоматические линии с управлением от ЭВМ.

Структура типового процесса сборки блоков ЭА на печатных платах приведена на рис. 9.1.



Рис. 9.1. Схема типового процесса сборки блоков на ПП

## 9.2. ВХОДНОЙ КОНТРОЛЬ И ЕГО ОПТИМИЗАЦИЯ

В производстве ЭА применяют следующие виды контроля (ГОСТ 16504—70):

- *входной* — дополнительная проверка элементов по параметрам, определяющим их работоспособность и надежность с целью исключения дефектных элементов вследствие ошибок поставщика, продолжительного хранения на складе, повреждений во время транспортирования и т. д.;
- *операционный* — контроль продукции после завершения какой-либо операции;
- *приемочный* — контроль готовой продукции после окончания всех технологических операций.

При входном контроле брак исправить легче, чем в готовом изделии, поэтому все комплектующие элементы подвергаются как визуальной, так и электрической проверке. При визуальной проверке обращают внимание на наличие на элементе отчетливо видимой надписи (тип, номинал, допуск, клеймо приемки ОТК), а также на отсутствие царапин, сколов, трещин, вмятин и коррозии. При электрической проверке проверяют соответствие электрических параметров элементов данным, указанным в ТУ или ГОСТах.

Входной контроль может быть сплошным (100 %) или выборочным. Объем выборки определяется по формуле

$$n = t_p \sigma^2 / \varepsilon ;$$

где  $t_p$  — коэффициент, зависящий от принятой вероятности  $P$  и определяемый по табл. 9.1;  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение;  $\varepsilon$  — заданная точность определения математического ожидания.

Табл. 9.1. Значения коэффициента  $t_p$

<b>P</b>	$t_p$	<b>P</b>	$t_p$
0,80	1,382	0,95	1,960
0,85	1,439	0,9973	3,000
0,90	1,643	0,999	4,200

В зависимости от закона распределения  $\sigma$  принимает следующие значения:  $\sigma = \Delta A/6 = \delta/3$  при нормальном законе;  $\sigma = \Delta A/(2\sqrt{3})$  при равновероятностном;  $y = \Delta A/2$  при дельта-распределении, где  $\Delta A$  — разность между верхней и нижней границами исследуемого параметра по ТУ.

**Пример.** Для партии резисторов МЛТ-0,125 10 кОм  $\pm 10\%$  при вероятности контроля  $P = 0,95$  и заданной точности  $\epsilon = 0,05$  объем выборки  $n = 1,96 \cdot 10^2 / (5 \cdot 3) = 4,35$  %.

*Правило контроля* гласит, что если при выборочной проверке ЭРЭ бракованным окажется большее количество элементов, чем приемочное число, то проверке подлежит удвоенное количество ЭРЭ. В случае выявления при проверке удвоенного количества изделий хотя бы одного бракованного проверке подвергают 100 % изделий полученной партии.

*Надежность входного контроля  $H$*  зависит от метода и характера контроля. В общем случае вероятность ошибки контроля  $P_k$  зависит от скорости испытаний и срока службы контрольного оборудования  $T$ :

$$P_k = \int_0^n P_o(V, T) dn,$$

где  $P_o$  — вероятность ошибки метода контроля;  $V = N/t$  — скорость испытаний;  $n$  — число испытываемых изделий;  $t$  — время контроля.

Зависимости вероятности ошибки при контроле в ручном (1) или автоматическом (2) режиме от времени работы  $T$  показаны на рис. 9.2.

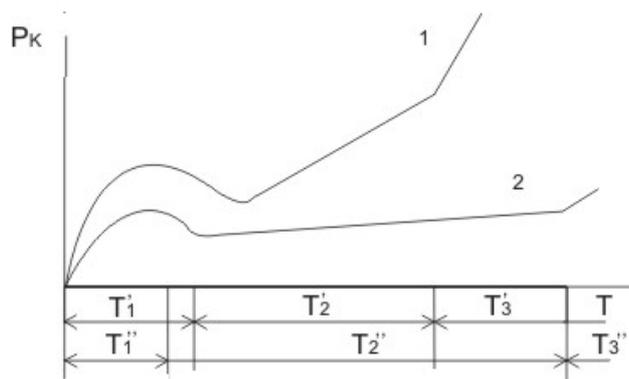


Рис. 9.2. Зависимость вероятности ошибки от времени работы

*Начальный период контроля  $T_1$*  характеризуется большой вероятностью ошибок, которая объясняется пусковым периодом для автоматического контроля и освоением процесса контроля оператором для ручного метода. *Основной период контроля  $T_2$*  для автоматического метода характеризуется постоянной вероятностью ошибки, а для ручного — возрастающей вероятностью ошибки. *Заклучительный период контроля  $T_3$*  характеризуется резким нарастанием вероятности ошибки из-за выработки срока службы контрольной аппаратуры и утомляемости оператора (по времени эти периоды несравнимы).

При 100 %-м контроле надежность операции определяется выражением

$$H_k = 1 - P_k = 1 - \int_0^n P_o(V, T) dn.$$

Надежность выборочного контроля определяется соотношением.

$$H_{в.к} = H_k H_b = (1 - P_k)(1 - P_b),$$

где  $H_b$  — надежность контроля непосредственно выборки;  $P_b$  — вероятность брака в выборке.

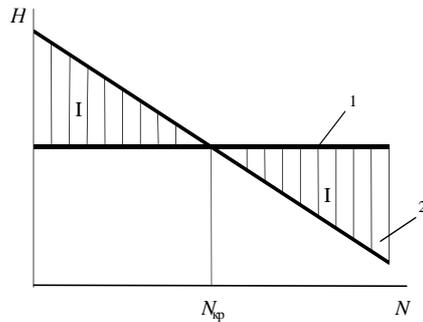


Рис. 9.3. Надежность выборочного (1) и 100%-го (2) контроля

Для автоматического контроля на горизонтальном участке кривой  $P = f(T)$  имеем  $P_0(V, T) = \text{const} = P_0$ . При 100 %-м контроле выражение надежности имеет вид  $H_k = 1 - P_0 n$  Для ручного контроля  $P(k) = b n$ , где  $b$  — коэффициент, характеризующий наклон кривой на участке  $T_2$ :  $b = k / (Tm)$ ;  $k$  — число ошибок контроля за последний промежуток времени;  $m$  — общее число ошибок контроля за время  $T$ . Тогда для ручного контроля  $H_k = 1 - (b N^2 / 2)$ .

Зоны надежности, справедливые как для автоматического, так и для ручного контроля, при выборочном и 100 %-м контроле показаны на рис. 9.3.

В зоне I большей надежностью обладает 100 %-й контроль, в зоне II — выборочный контроль,  $N_{кр}$  определяется из условия  $H_{к \max} = H_k$ . Для автоматического контроля  $N_{кр} = 2\sqrt{a P_{в.о}} / P_0$ , для ручного  $N_{кр} = 3\sqrt{a/b}$ , где  $a = 0,25—1,0$  в зависимости от выбранной надежности испытаний;  $P_{в.о}$  — вероятность брака при данной методике испытаний, которая является функцией от объема выборки.

На практике используют следующие статистические методы выборочного контроля:

1) *однократной выборки*, когда из партии выбирается  $n$  изделий. По ТУ для каждой выборки  $n$  имеется норматив бракования  $C$ . Если число бракования  $m > C$ , то партия бракуется; при  $m < C$  партия признается годной;

2) *двукратной выборки*, когда проверяется выборка из  $n_1$  изделий и при этом оказывается  $m_1$  бракованных. Если  $m_1/n_1 \leq C_1$ , то партия бракуется; при  $C_1 \leq m_1/n_1 \leq C_2$  проводятся повторные испытания. Берется партия из  $n_2$  изделий и определяется количество бракованных  $m_2$ . Если  $\frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2} \leq C_3$ , партия принимается, а при

$$\frac{m_1 + m_2}{n_1 + n_2} > C_3 \text{ бракуется;}$$

3) *последовательного анализа*, когда после испытания партии изделий строят график зависимости числа бракованных изделий от числа проверенных изделий, на которую наносят зоны приемки, браковки, продолжения испытаний. В соответствии с координатами точки  $(m, n)$  принимают решение о приемке или браковке партии.

Экономическая оценка входного контроля дает возможность решить вопрос о целесообразности применения того или иного метода входного контроля.

Под *полной стоимостью* будем понимать сумму затрат на входной контроль и устранение бракованных элементов в аппаратуре. При отсутствие входного контроля

$$C'_0 = P N C_p, \quad (9.1)$$

где  $C'_0$  — полная стоимость, равная работе по устранению бракованных элементов;  $P$  — вероятность брака;  $N$  — общее число деталей;  $C_p$  — затраты на замену (ремонт) одной детали.

При 100 %-м контроле полная стоимость равна сумме затрат на контроль и замену бракованных деталей:

$$C_0'' = N C_k + K_1 P N C_p, \quad (9.2)$$

где  $C_k$  — стоимость контроля одной детали;  $K_1$  — доля брака, пропущенного при 100 %-м контроле.

При выборочном контроле полная стоимость состоит из стоимости приемки и стоимости отбракованной партии:

$$C_0''' = P_A(C_k + (N - n)P C_p + n K_2 P C_p) + (n C_k(1 - P_A))/P_A, \quad (9.3)$$

где  $P_A$  — вероятность приемки партии;  $(N - n) P C_p$  — стоимость замены бракованных изделий из непроверяемой части партии;  $n K_2 P C_p$  — стоимость замены бракованных деталей из проверяемой части партии, пропущенных контролером;  $n C_k$  — стоимость контроля выборки из  $n$  элементов;  $1 - P_A$  — вероятность отбраковки.

Пользуясь уравнениями (9.1) — (9.3), построим графики зависимости полной стоимости контроля от доли брака (рис. 9.4). По этим графикам можно найти оптимальный по стоимости вариант контроля. Доля брака  $P$  обычно неизвестна до проверки партии, и поэтому следует при оценке этой величины ориентироваться на априорные данные гарантии поставщика ЭРЭ.

Критическая точка  $P_1$  пересечения кривых полной стоимости при отсутствии контроля и выборочном контроле определяется по уравнению

$$P_1 = \frac{n C_k}{C_p(N - P_A(N - n - n K_2))}.$$

Критическая точка  $P_2$  — пересечение кривых при отсутствии контроля и полной стоимости:

$$P_2 = \frac{C_k}{C_p(1 - K_1)}.$$

Критическая точка  $P_3$  — пересечение кривых при 100 %-м контроле и выборочном контроле:

$$P_3 = \frac{P_A C_k (N - P_A n + n) - n C_p}{P_A^2 C_p ((N - n) + K_2 n) - P_A C_p K_1 N}.$$

Если задана доля брака  $P_3 \geq P$ , то экономичен выборочный контроль, при  $P > P_3$  — 100 %-й контроль.

### 9.3. ПОДГОТОВКА ЭРЭ И ИМС К МОНТАЖУ

Подготовка навесных элементов к монтажу включает следующие операции: распаковку элементов, входной контроль, контроль паяемости выводов, рихтовку, формовку, обрезку, лужение выводов и размещение элементов в технологической таре.

Изготовитель ЭРЭ должен обеспечить сохранение паяемости в течение установленного срока. Однако на практике только в Японии с ее малыми расстояниями и высокой дисциплиной поставок монтажу "с колес" подлежит не более 70 % ЭРЭ, в нашей стране сроки поставки и хранения могут перекрывать гарантийные.

С завода-изготовителя ЭРЭ поступают в разнообразной таре. Большая часть ее рассчитана на грузозачные узлы сборочных автоматов, однако часть элементов, в том числе ИМС, поставляется в индивидуальной таре-спутнике, изготавливаемой из антистатического термостойкого материала.

Для распаковки ИМС в корпусах типа 4 используются автоматы моделей 141-411 или АД-901 и АД-902, технические данные которых приведены в табл. 9.2. Распаковка тары заключается в снятии с корпуса тонкой пластмассовой крышки путем ее поперечного сжатия с помощью двух стержней, которые входят в контакт с краями крышки и, сближаясь друг с другом, изгибают ее и выводят из зацепления с корпусом. Освобожденная крышка уносится в сборную емкость струей сжатого воздуха, а ИМС по направляющей соскальзывает в прием-

ную кассету. Автомат 141-411 загружает ИМС в этажерочные кассеты, а автоматы АД-901 и АД-902 — в прямоточные.

Табл. 9.2. Характеристики автоматов распаковки ИМС

Параметры	Модель 141-411	Модель АД-901	Модель АД-902
	401.14-1,2,3	401.14-1,2,3	402.16
<i>Тип корпуса ИМС</i>			
Производительность, шт/ч	1200	1800	1800
Число кассет	18	12	12
Число ИМС в кассете	50	30	26
Потребляемая мощность, Вт	500	120	120
Габаритные размеры, мм	990×450×1600	600×685×1700	600×685×1700
Масса, кг	300	200	200

Этажерочные и прямоточные кассеты используют для внутривозовского транспортирования ИМС с планарными выводами. В первых ИМС лежат перпендикулярно к продольной оси кассеты, каждая в своем отсеке, удерживаясь выводами. Выдача ИМС осуществляется с помощью толкателя сборочного автомата. Во вторых ИМС лежат продольно оси, одна за другой. Кассеты устанавливаются на сборочный автомат вертикально, и выгрузка ИМС происходит под действием силы тяжести и электромагнитного отсекающего механизма поштучной выдачи.

Резисторы и конденсаторы с осевыми выводами поставляют клееными в двухрядную липкую ленту на тканевой основе. Вклейку в ленту производят на специальных автоматах с соблюдением полярности элементов. Катушка диаметром 245 — 400 мм и шириной 70 — 90 мм содержит до 1—5 тыс. ЭРЭ. Во избежание сцепления соседних витков намотку ведут с межслойной прокладочной лентой из кабельной бумаги. С появлением "безвыводных" ИЭТ предложены ленточные носители с внутренними гнездами. Ширина носителя 8, 12 и 16 мм. Гнезда герметизируются полиэфирной пленкой предварительно нагретым инструментом.

Варианты формовки выводов ЭРЭ и установки на платы должны соответствовать ГОСТ 29137-91 (рис. 9.5).

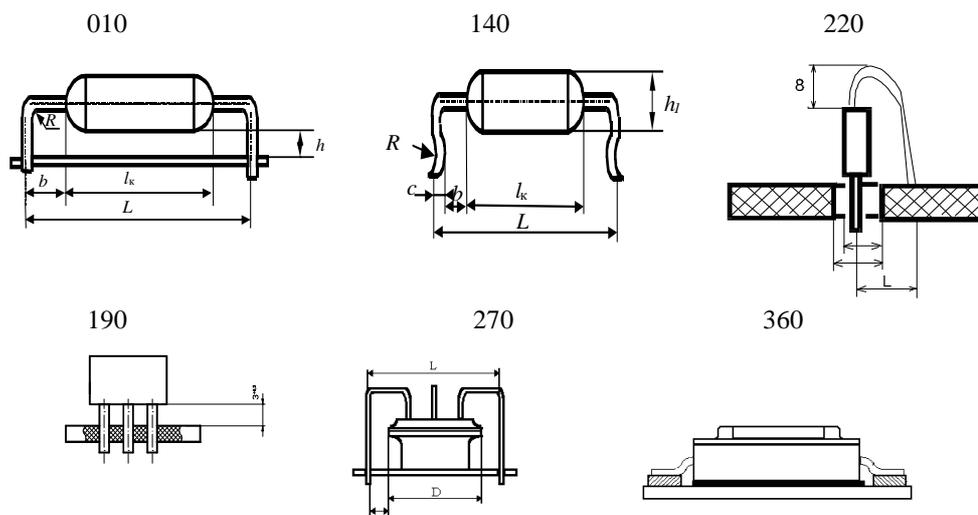


Рис. 9.5. Варианты установки ИЭТ на платы

Вариант 010 применяется для установки элементов на односторонние платы при значительных механических нагрузках. При этом используется П-образная формовка выводов элементов. Вариант 140 применяют для ДПП и МПП. Ему соответствует зиг — формовка выводов. Для выводов диаметром до 0,5 мм  $R_{\min}=0,5$  мм, для выводов 0,5—1,1 мм  $R_{\min}=1$  мм. Вариант 220 рекомендуется для плотной компоновки элементов на плате, 190 — для транзисторов с однонаправленными выводами, 270 — для транзисторов при значительных механических нагрузках и сохранении при демонтаже, 360 — для ИМС в корпусе типа 4 с планарными выводами. Для фиксации ЭРЭ на плате применяют образование "зига" на одном из выводов ЭРЭ (рис. 9.6).

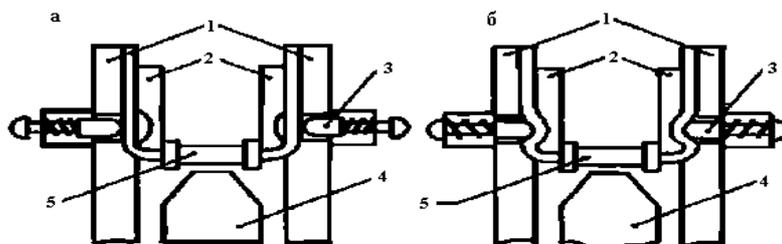


Рис. 9.6. Схема для "зиг" – формовки выводов радиоэлементов:  
а – гибка вывода; б – образование "зига"

Установочный размер должен быть кратным шагу координатной сетки (2,5 мм или 1,25 мм) и обеспечивается инструментом. Предельные отклонения размеров инструмента: отверстий по  $H12$ ,  $H13$ , валов по  $h12$ ; радиусов гибки  $+0,3$  мм, остальные по  $IT 14/2$ .

Усилие формовки-гибки планарных выводов рассчитывается по уравнению

$$P = 1,25 k b \delta \sigma_b + P_{\text{пр}},$$

где  $k$  — коэффициент, определяющий состояние поверхностей пуансона и матрицы (1,0—1,2);  $b$  — ширина вывода, мм;  $\delta$  — толщина вывода, мм;  $\sigma_b$  — предел прочности вывода, МПа;  $P_{\text{пр}}$  — усилие прижима выводов, которое составляет (0,25—0,3)  $P$ ; для корпусов типа 4 усилие прижима ( $15 \pm 1,5$ ) Н на вывод.

Для варианта установки Па "зиг"-формовка выводов осуществляется по схеме, приведенной на рис. 9.6. В подающих дисках 1 имеются канавки, в которые элементы подаются неподвижными формообразующими 2. Подающие диски получают непрерывное вращение. В диски встроены подпружиненные пуансоны 3, которые при набегании на рычаги приобретают поступательное движение и образуют "зиг" на выводах. Кулачок 4 выталкивает элемент 5 из пазов диска в тару.

Размер "зига"  $C$  рассчитывается по формуле

$$C = (d_o + d) / 2 + 0,5,$$

где  $d_o$ ,  $d$  — диаметры отверстия и вывода соответственно.

Механизация процесса подготовки выводов к монтажу осуществляется путем применения технологических приспособлений, полуавтоматов и автоматов, выбираемых в зависимости от конструкции ЭРЭ и типа производства. Полуавтомат (рис. 9.7), предназначенный для подготовки выводов ЭРЭ с осевыми проволочными выводами и цилиндрической формой корпуса, выполняет следующие операции: рихтовку выводов, контроль ЭРЭ по электрическим параметрам с разбраковкой "годен" — "не годен", зачистку и подрезку выводов, укладку ЭРЭ в технологические кассеты. Радиоэлементы 1 загружаются вручную в направляющие 2, по которым с помощью отсекателя 3 подаются в механизм рихтовки 4 по одной штуке, затем в зажимы б механизма контроля 5. Рихтовка выводов осуществляется с помощью подпружиненных пуансонов. Контроль и разбраковка по электриче-

ским параметрам производится прибором, подключенным к зажимам 6. При наличии бракованного элемента прибор подает сигнал в механизм отсечки брака 7 и деталь сбрасывается с ротора. Качественные ЭРЭ поступают в механизм зачистки 8, где металлическими щетками удаляются различные загрязнения. Далее ЭРЭ подаются в механизм обрезки 9, после чего загружаются в технологическую кассету 10.

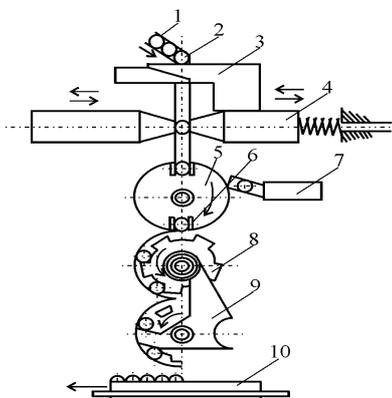


Рис. 9.7. Полуавтомат для подготовки радиоэлементов к лужению выводов

Рихтовку выводов в мелкосерийном производстве осуществляют либо вручную с помощью пинцета и плоскогубцев, либо в приспособлении для рихтовки (одновременно 20—50 выводов ЭРЭ модели ГГ 1422-4101 с производительностью 500 шт/ч). Для подготовки ЭРЭ и ИМС к сборке используют различное оборудование (табл. 9.3).

Табл. 9.3. Оборудование для подготовки ЭРЭ и ИМС

Наименование, тип	Тип ЭРЭ, ИМС	Производительность, шт/ч	Привод, мощность, Вт	Габариты, мм
Полуавтомат подготовки резисторов и диодов, ГГ-2420	Резисторы, диоды	3000	Электромеханический, 50	600×500×80
Установка рихтовки и обрезки выводов транзисторов, ГГ-2293	МП42, МП416, ГТ309	300	Электромагнитный, 80	295×215×27
Автомат П-образной формовки выводов ЭРЭ, ГГ-1611	Резисторы, диоды	3600	Электромеханический, 180	330×380×40
Автомат формовки ГГ-2629	ИМС в корпусе типа 4	1200	Электромеханический, пневматический, 500	900×400×1500
Полуавтомат АРСМ 2.230.000	Конденсаторы КМ	1500	Электромеханический, пневматический, 800	2200×1000×1500
Полуавтомат, ГГ-2125	Корпус 301.12-1;	300	Электромеханический, 180	335×300×30
Полуавтомат UNITRA	401.143 Резисторы, диоды и др.	5000	Электромеханический, 500	480×230×220

Лужение выводов может осуществляться как до, так и после формовки путем погружения в расплавленный припой. Для флюсового горячего лужения выводов ИМС (корпус 401.14-3) используют автомат модели ГГ-2630С. Производительность автомата — 900 шт/ч, пределы регулирования температуры припоя, 200—280 °С с точностью  $\pm 5$  °С. Лужение выводов ЭРЭ групповым способом проводится на механизированной установке ГГМ2.339.002. Производительность ее — 400 кассет/ч, время выдержки кассет во флюсе и припое — 1,5—3 с.

*Напрессовка припоя* — один из способов закрепления на выводах ИМС строго дозированного количества проволочного припоя путем его глубокой пластической деформации. Припой удерживается на выводах благодаря механическому заклиниванию выдавленных в пространство между соседними выводами выступов. Обычно для выводов сечением 0,3×0,1 мм (корпус 401.14 и др.) используют проволоку припоя диаметром 0,3—0,4 мм либо трубчатый припой с флюсовой сердцевиной диаметром 0,5 мм.

Размещение дискретных ЭРЭ в технологической таре позволяет повысить производительность сборки и механизировать установку элементов на платы. В качестве тары используют также и липкую ленту, в которую клеивают ЭРЭ преимущественно с осевыми выводами по программе. Вклейка осуществляется на установке ГГ-1740. В технологических кассетах ЭРЭ загружаются в накопители, откуда по программе подаются на транспортное устройство, двигаясь по которому, попадают в зону вклейки. Производительность автомата — 2400 шт/ч, количество элементов в одной программе 2—12 шт., шаг вклейки  $S$  кратен 5 мм, ширина ленты 6 или 9 мм. Полярные ИЭТ клеиваются в ленту в однозначно ориентированном положении (рис. 9.8, а).

Элементы 3, 4 и 8-й групп (с однонаправленными выводами) клеиваются в однорядную перфорированную ленту шириной 18 мм. Шаг вклейки 15 мм, расстояние между выводами 2,5 или 5 мм. ИЭТ 5,6,7 и 9-й групп (транзисторы типа КТ, ТО, ИМС) поставляются в специальных прямоточных одноручьевых технологических кассетах (рис. 9.8, б).

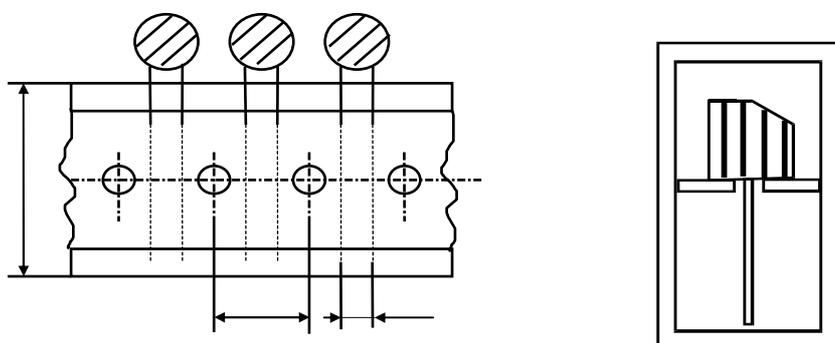


Рис. 9.8. Упаковка ИЭТ в однорядную ленту (а) и в кассету (б)

#### 9.4. УСТАНОВКА КОМПОНЕНТОВ НА ПЛАТЫ

Установка ЭРЭ и ИМС на платы является первым этапом монтажа, и дефекты данной операции неблагоприятно отразятся на качестве монтажных соединений. В зависимости от технической реализации различают ручную и механизированную сборку плат, причем в качестве критерия выбора оборудования принимают вариант исполнения выводов (штыревые, планарные). Оптимальное выполнение операции установки ЭРЭ на платы требует согласования допусков на выводы и на диаметры отверстий, выбора наиболее приемлемого метода фиксации компонента, определения оптимального варианта расположения ЭРЭ и ИМС на плате.

При автоматизированной сборке однослойных и многослойных плат должны выполняться следующие технические требования:

- использование минимального числа типоразмеров ЭРЭ и ИМС;
- размещение корпусных ИМС на ПП рядами или в шахматном порядке с шагом установки 2,5 мм; корпуса с планарными выводами допускается размещать с шагом 1,25 мм, зазоры между корпусами ИМС должны быть не менее 1,5 мм;
- установка ИМС со штыревыми выводами только с одной стороны ПП, а ИМС с планарными — с двух сторон.

Положение компонентов, полученное при сборке, не должно изменяться до момента контактирования, т. е. формирования монтажного соединения. Поэтому компоненты должны быть зафиксированы на плате. Фиксация должна: быть легкой в исполнении, не допускать применения дополнительных элементов, выдерживать собственную массу элементов, осуществляться при обратном ходе рабочего инструмента. Существуют различные варианты фиксации выводов элементов в отверстиях плат (рис. 9.9): загибка (*а*), расплющивание (*б*), деформация (*в*), под действием упругих сил (*г*) или трения (*д*).

Загибка создает большую опасность замыканий с близлежащими проводниками, чем расплющивание. Пружинные выводы ИМС не требуют загибки, так как фиксация происходит за счет трения о внутренние стенки отверстий. Для фиксации ИМС с планарными выводами применяют их предварительное приклеивание к плате.

Установка ЭРЭ и ИМС на платы проводится вручную или с помощью полуавтоматов и автоматов. Для повышения производительности ручной сборки применяют держатели плат, печатание с обратной стороны платы способом шелкографии позиционного обозначения ЭРЭ. В мелкосерийном производстве применяются сборочные столы типа "Трек-М", на которых обслуживающему персоналу выдается с диапозитивов или перфоленты информация о расположении элемента и последовательности сборки. На основании этой информации на краях плат загораются координатные лампы, определяющие место установки ЭРЭ, вращается тарельчатый магазин, подавая в лоток нужную деталь.

Программирование сборки осуществляют также подсветкой с применением светодиодов и стекловолоконных световодов, подключаемых к платам. По мере выполнения программы световоды высвечивают те позиции, которые должны быть заполнены элементом из очередной ячейки. Производительность установки 500 элементов в час.

При механизированной установке элементов основную роль играет сборочная головка, которая выполняет следующие функции (рис.9.10): принимает компонент из подающего устройства, ориентирует компонент, рихтует и обрезает выводы, вводит выводы в соответствующие отверстия или совмещает их с контактными площадками и при необходимости загибает. Варианты позиционирования (рис. 9.11) зависят от конструкции компонентов.

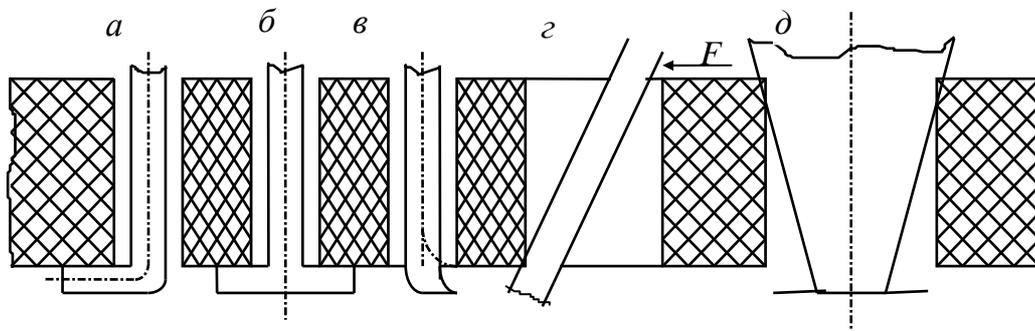


Рис. 9.9. Фиксация выводов компонентов в отверстиях плат

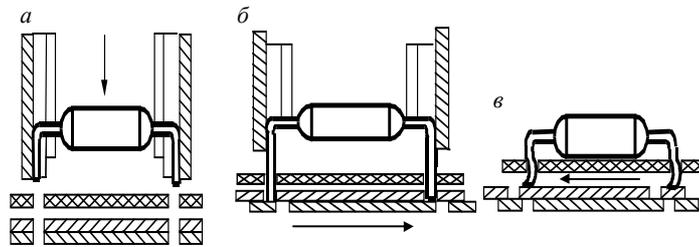


Рис. 9.10. Механизированная установка дискретных ЭРЭ:  
*a* – изгиб выводов; *б* – обрезка выводов; *в* – загибка выводов

Компоненты с боковыми выводами (резисторы) позиционируются по двум выводам, элемент подводится под легким внешним воздействием к плате. Для компонентов с несколькими штыревыми выводами (транзисторы) не применяют прямые направляющие, а позиционируют несколько выводов, что требует больших допусков на отверстия платы. Для ИМС выводы фиксированы по отношению к корпусу и не формируются. Тогда устанавливают элемент, удерживая его за корпус, что является менее надежным способом.

На работу установочной головки значительное влияние оказывают допуски всех элементов. При установке компонентов со штыревыми выводами на эффективное отклонение конца вывода влияет ряд допусков.

При условии, что минимальная ширина  $b_n$  направляющей 2 одинакова с максимальной шириной  $b_v$  вывода 1 (нет заклинивания вывода в направляющей) (рис. 9.12), в результирующей цепочке допусков получается сдвиг середины вывода компонента от идеального шага  $\delta_{A1}$  в направлении  $x$ :  $\delta_{A1} = \delta_{A2} + \delta_{A3} + \delta_{A4} + \Delta b_n + \Delta b_v$ .

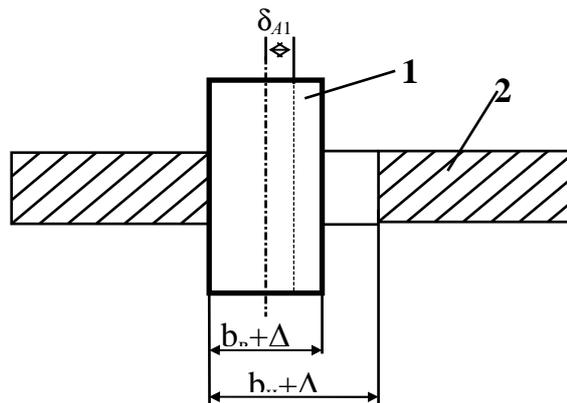


Рис. 9.12. Позиционирование вывода относительно направляющей

Эффективные допуски при механизированной установке интегральных микросхем с двухрядным расположением выводов определяются из табл. 9.4.

Табл. 9.4. Допуски на механизированную установку ИМС

Вид допуска	Обозначение	Значение, мм
На ширину вывода	$\Delta b_v$	$\pm 0,05$
На ширину направляющей	$\Delta b_n$	$\pm 0,01$
На положение направляющей	$\delta_{A2}$	$\pm 0,02$
На колебания машины	$\delta_{A3}$	$\pm 0,02$

На возвратно-поступательное движение	$\delta_{A4}$	$\pm 0,025$
На позиционирование	$\delta_{A5}$	$\pm 0,01$
На положение монтажного отверстия	$\delta_{01}$	$\pm 0,1$
При установке на устройстве позиционирования	$\delta_{уст}$	$\pm 0,1$

Так как для направляющей в направлении  $y$  не может быть заклинивания, то

$$\delta_{A1y} = \delta_{A2} + \delta_{A3} + \delta_{A5} + 1/2(\Delta b_H + \Delta b_B).$$

Допуски  $\delta_{A1x}$ ,  $\delta_{A1y}$  на отклонение направляющей, а также на позиционирование  $\delta_{A4}$  и допуск на положение монтажного отверстия позволяют рассчитывать необходимый диаметр монтажного отверстия:

$$d_{01} = 2\sqrt{D_{A1x} + D_{01} + D_{A4} + 0,5(b_{Bx} + D_{Bx})^2} + \sqrt{D_{A1y} + D_{A1} + D_{A4} + 0,5(b_{By} + D_{By})^2}.$$

### 9.5. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СБОРКИ

В условиях многономенклатурного и мелкосерийного производства ЭА применение специализированных автоматов и полуавтоматов экономически невыгодно, поэтому за последние 15 лет получило развитие новое направление в технологии монтажа — программируемая ручная сборка на светомонтажных столах, где световыми средствами указывают ячейку неподвижного накопителя и участок ПП, где нужно установить элемент. Это значительно повышает производительность сборки и уменьшает количество ошибок. Вручную, без специальных средств, обычный темп сборки — до 200 элементов в час, на светомонтажном столе он может достигать 500 — 600 шт/ч. Не требуется обращение к чертежу, исключаются ошибки размещения элементов, снижается квалификация рабочих.

*Светомонтажный стол* — довольно сложное устройство, в котором могут применяться различные принципы подачи ИЭТ, указания мест расположения на ПП, управления перемещением платы (рис.9.13).

Указание посадочных мест может быть выполнено путем проецирования со слайдов, "световой указкой" либо использования световодов (рис. 9.14).

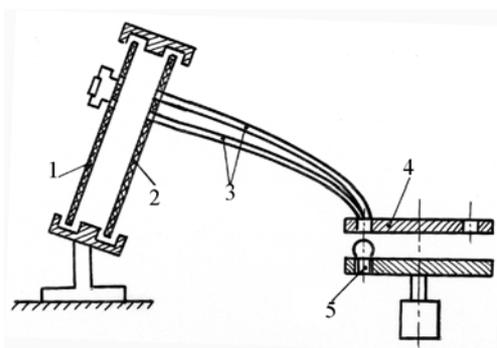


Рис. 9.14. Схема проецирования изображения через световод:  
1 – плата; 2 – шаблон; 3 – световод; 4 – программная панель; 5 – осветитель

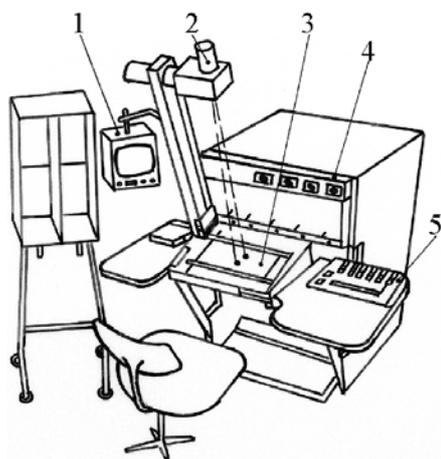


Рис. 9.15. Стол с гибкой программой сборки: 1 – дисплей; 2 – проектор; 3 – панель; 4 – накопитель; 5 – микроЭВМ; 6 – кассетница для нестандартных элементов и плат

В первых светомонтажных столах модели УПСР-904 (СССР) и фирмы Streckfuss (Германия) указание посадочных мест осуществлялось проецированием со слайдов в диапроекторе, закрепленном под столом. Число и расположение пятен света на ПП зависели от расположения отверстий в носителе информации — латунной фольге или киноплёнке толщиной 0,1 мм, вставленной в рамку слайда. Недостатками являлись высокая трудоемкость подготовки программ, низкий темп сборки.

Указание с помощью световодов путем подсветки отверстий в ПП снизу использовалось в установках "Свет" и "Цвет". Полярность элементов указывалась миганием. Недостатками являлись значительная трудоемкость подготовки программ (до 2 ч на 50 ЭРЭ), ограниченные возможности передачи дополнительных символов.

Более гибкая система с использованием "световой указки", в которой пятно светового луча от проектора перемещается по ПП со скоростью 300 — 400 мм/с с разрешением 0,15 — 0,3 мм. Луч может формировать разные символы, указывать место установки. Характеристики столов приведены в табл. 9.5.

Табл. 9.5. Светомонтажные столы программной сборки

Модель	Устройство управления	Производительность, шт/ч	Средства отображения	Тип внешних ОЗУ
ПМПП-902 (СССР)	МП-901	200-300	Табло 3-знаковое	НМЛ
ТС-1409 (СССР)	"Электроника-60"	500-600	То же	НМЛ
3D-TS Polytronik	Z-80	650	Табло 32-знаковое	НГМД 64 К
6235 Logpoint (Англия)	Z-80	1000	Дисплей	НГМД 64 К
V-T-AS	Микропроцессор	1000	То же	НМЛ

Светомонтажный стол модели Logpoint (рис. 9.15) состоит из светолучевой головки, рабочего стола, микроЭВМ, дисплея, клавиатуры и элеваторного накопителя. Программирование осуществляется в пошаговом режиме, и все данные выводятся на экран дисплея.

Сборка на полуавтоматах ведется с помощью *пантографа*. Перемещение платы в направлении осей  $x$  и  $y$  производится персоналом вручную, пантограф работает в основном масштабе 1:1, поэтому в качестве образца используют просверленную печатную плату. Пантограф имеет копирный щуп с конусной головкой, которая вставляется в отверстие шаблона или несмонтированной платы. Установочная головка при этом выполняет следующие действия: захватывает элемент, изгибает выводы, вставляет их в отверстия, обрезает и фиксирует выводы. Преимуществом полуавтоматов с пантографами является более высокая производительность по сравнению со светомонтажными столами, возможность быстрой переналадки на другие изделия. Недостатки — более жесткие допуски на монтажные отверстия, невысокий уровень автоматизации. Полуавтомат для установки ИМС в корпусах DIP с одновременной групповой подрезкой выводов ГГ-2482 имеет время цикла укладки 5 с, производительность 1200 шт/ч (рис. 9.16).

Сборочные автоматы, выполняющие основную технологическую операцию установки ИЭТ на плату, отражают более высокий по сравнению со светомонтажными столами уровень автоматизации сборочно-монтажных работ. Их применение становится оправданным в условиях серийного производства либо при сборке ИЭТ массового применения в любом производстве. Они могут быть узкоспециализированными, рассчитанными на установку одного типа ИЭТ, или гибкими универсальными автоматами. В последних одна и та же головка способна собирать на ПП разнообразные ИЭТ.



Рис. 9.16. Установка ИМС на полуавтомате с пантографом

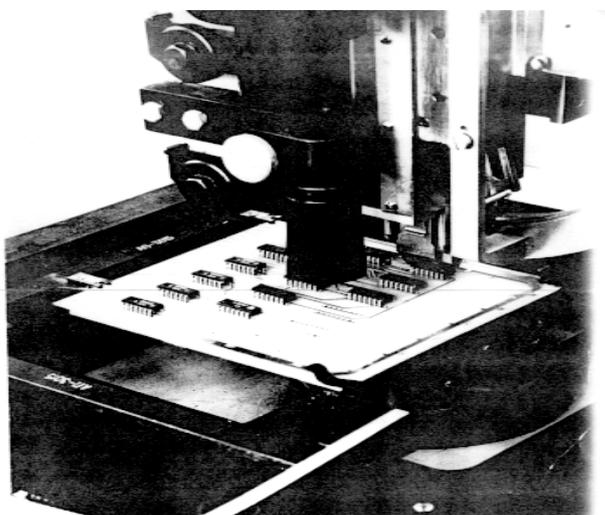


Рис. 9.17. Сборочная головка

Применяемые в промышленности сборочные автоматы отличаются выполняемыми операциями, возможностями установки определенной номенклатуры ИЭТ, степенью автоматизации, применяемыми дополнительными средствами и т. д. За последнее время появился ряд сборочных автоматов, в которых операция подачи ЭРЭ на сборку в заданном программой порядке выполняется без предварительной переклейки в липкую ленту.

Сборочные головки могут выполнять в автоматическом цикле одну или несколько технологических операций: извлечение ИЭТ из накопителя или носителя, поворот ИЭТ по ключу или оси координат, формовку выводов ИЭТ, перенос ИЭТ, центровку ИЭТ, установку ИЭТ на ПП. Один из вариантов сборочной головки показан на рис. 9.17. При изготовлении электронно-вычислительной аппаратуры, характеризующейся большим числом однотипных сборочных единиц — ТЭС — применяют *сборочные машины с цифровым управлением*. Информация, необходимая для управления машиной, считывается с носителя данных (перфоленты, магнитного диска). В этих станках к позиционированию стола предъявляют повышенные требования, т. е. необходимая точность составляет  $\pm 0,025$  мм. Параллельно во времени при позиционировании платы происходит выборка компонентов и их транспортирование к сборочной головке. Число магазинов должно быть достаточно большим (от 20 до 40) для выполнения сменного задания. Линия сборки из автоматов УР-5 приведена на рис. 9.18.



Рис. 9.18. Линия автоматической сборки модулей

В установке для параллельной сборки фирмы Philips (рис. 9.19) используется *принцип ударного монтажа*. Она состоит из неподвижного держателя печатных плат, на котором закрепляется плата 1, нескольких установочных головок 2 и магазина компонентов 3. В выпускаемом оборудовании для этих целей используют одновременно до 10 установочных головок, которые вращаются в аксиальном направлении на  $180^\circ$ . Фиксация выводов происходит посредством загибки их в нужном направлении с помощью специального устройства. Вследствие одновременной установки всех компонентов достигается высокая производительность (до 2500—3000 шт/ч), однако перестройка установки на другой тип плат требует много времени, поэтому метод пригоден для крупносерийного и массового производства.

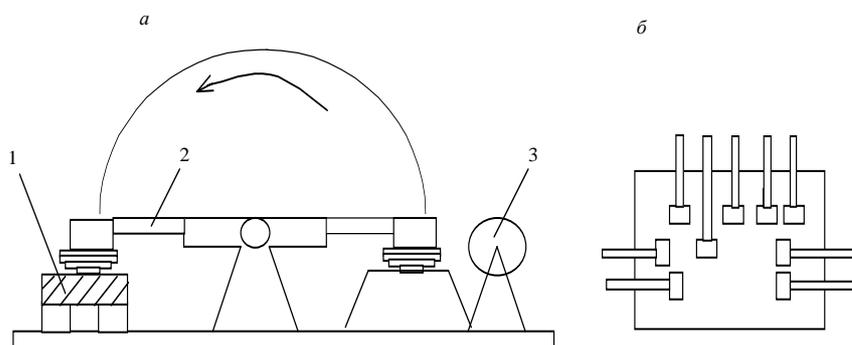


Рис. 9.19. Установка параллельной сборки:  
 а – принцип работы; б – расположение сборочных головок

Автомат "Трофей" для установки на платы в программной последовательности ЭРЭ с осевыми выводами и перемычек, вклеенных в ленту, управляется с помощью мини-ЭВМ "Электроника-60" и имеет две сборочные головки (рис. 9.20). Характеристики других автоматов приведены в табл. 9.6.

Табл. 9.5. Технические характеристики автоматов для установки ЭРЭ

Параметры	"Трофей" (СССР)	УР-5 (СССР)	УР-7 (СССР)	NM-2050 (Япония)
Производительность, шт/ч	9000	6000	2000	14 000
Габаритные размеры плат, мм	380×380	320×320	360×360	330×250
Размеры корпусов элементов, мм	2,2—9,0	2,0—4,0	4×4; 6×6; 8×8	—
Установочные размеры, мм	10—32,5		7,5—15	5—12,5
Типы выводов и элементов	Осевые выводы, перемычки, МЛТ, Д9, Д18, Д223		Однонаправленные, КМ, транзисторы	20 типов ЭРЭ
Количество сборочных головок	2	2	1	2
Электропитание, кВт	1,0	1,5	1,0	1,5
Пневмопитание, МПа	0,5	0,5	—	—
Габариты, мм	1650×1500×150	1600×1200×168	1600×1200×1630	4660×1455×1400
Масса, кг	0 1000	0 500	500	2800

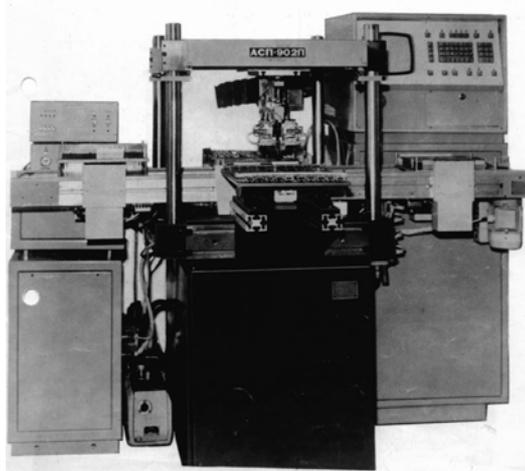
Для программной вклейки ЭРЭ с осевыми выводами и перемычек в липкую ленту используется автомат типа "Трал", управляемый с помощью мини-ЭВМ. В автомате секционного типа вклейка осуществляется одновременно с 20—60 бобин.

Автомат УР-5 предназначен для сборки ЭРЭ с осевыми выводами — резисторов МЛТ, диодов Д9, Д18, Д223 и др., вклеенных в липкую ленту. Сборочная головка выполняет операции вырезки ЭРЭ из ленты, формовки выводов и установки элементов на ПП с подгибкой выводов. Координатный стол имеет привод от двига-

теля постоянного тока СД-75Д с максимальной скоростью позиционирования 0,1 м/с и минимальным шагом 0,02 мм. Управление осуществляется от стойки ЧПУ, в качестве программносителя используется 8-дорожечная перфолента.



а



б

Рис. 9.20. Автоматы сборки: Трофей (а) и АСП-902П (б)

Для автоматизированной сборки и пайки ИМС с планарными выводами в корпусе типа 401.14 и других применяют автоматы с ЧПУ типов АРПМ, АУП-007, УСПА-1 (СССР) (табл. 9.7). Автомат сборки плат (АСП-902П) может устанавливать корпуса ИМС четырех типоразмеров с 14 и 16 выводами и управляется с помощью ЭВМ. Перед сборкой ПП закрепляются в пакетах (5—10 шт.) и устанавливаются на транспортно-накопительном модуле. Кассеты с микросхемами закрепляются на платформах вибрационных питателей.

Табл. 9.7. Технические характеристики автоматов сборки для ИМС с планарными выводами

Параметры	АРПМ	АУП-007	АСП-902П
Производительность, шт/ч	400	300	800
Габаритные размеры ПП, мм	250×250	250×250	200×270
Емкость накопителя ИМС, шт.	1500	1500	1500
Тип и время пайки, с	Точечная, 9	Точечная, 12	Групповая, 4
Мощность, кВт	1,0	3,0	2,5
Габариты, мм	1400×850×1020	1950×1200×16	1950×1930×16
Масса, кг	170	50	30
		600	1000

Клей наносится двумя методами: на ПП дозатором ( универсальный метод) или на дно микросхемы с помощью ванночек с клеем (более производительный метод). По программе плата из накопителя подается в рабочую зону, сборочная головка меняет схват, вакуумной присоской захватывает из кассеты микросхему, устанавливает ее на плату и производит пайку выводов групповым паяльником. После сборки плата подается в накопитель. Загрузка кассет ИМС в 14-выводном корпусе обеспечивает непрерывную работу автомата в течение часа.

## 9.6. ГИБКИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ МОДУЛИ СБОРКИ И МОНТАЖА

Трудоемкость сборочно-монтажных работ составляет 40—60 % общей трудоемкости изготовления РЭС, поэтому повышение производительности труда на этих операциях путем автоматизации ТП может осуществляться за счет внедрения ГПС, основными составными частями которых являются ГПМ и РТК. ГПМ — это единица технологического оборудования, автономно функционирующая с программным управлением и имеющая возможность встраивания в ГПС. РТК — это совокупность технологического оборудования, промышленного робота и средств оснащения, автономно функционирующих по заданной программе.

Организация ГПМ сборки и монтажа предъявляет следующие требования к ИЭТ:

- наличие на корпусе элемента в зоне первого вывода четко выраженного и конструктивно оформленного ключа в виде скоса, выступа, выемки и т. д.; нумерация остальных выводов ведется слева направо или по часовой стрелке;
- упаковка ИЭТ в тару, допускающую машинную обработку, например элементы 1-й и 2-й групп (неполярные ИЭТ — резисторы, конденсаторы, полярные ИЭТ — диоды, конденсаторы) с осевыми выводами должны поставляться клееными в двухрядную липкую (бумажную) ленту;
- конструкция ИЭТ должна обеспечивать стойкость к технологически воздействиям: трехкратной пайке без теплоотвода при 265 °С в течение 3 с; виброотмывке в спирто - бензиновой смеси (1:1) с частотой (50±5) Гц и амплитудой колебаний до 1 мм в течение 4 мин; УЗ-очистке в диапазоне частот 18—22 кГц с интенсивностью 0,4—0,6 Вт/см<sup>2</sup> (амплитуда 4—6 мкм) в течение 2 мин (кроме ППП и ИМС);
- печатные платы должны иметь прямоугольную форму с соотношением сторон не более 1:2 для обеспечения их достаточной жесткости при воздействии автоматической укладочной головки;
- для фиксации ПП на координатном столе сборочного автомата в конструкции ПП должны быть предусмотрены базовые фиксирующие отверстия с точностью расположения не хуже 0,05 мм;
- платы должны иметь зоны, свободные от ИЭТ, для фиксации их в направляющих координатного стола, накопителях, транспортной таре. Эти зоны располагаются, как правило, вдоль длинных краев ПП на расстоянии 5 мм для бытовой и 2,5 мм для специальной аппаратуры.

ГПМ установки ИМС на ПП и при необходимости крепления на ней подгибкой двух выводов в корпусах типа 2, уложенных в технологических кассетах, приведен на рис. 9.21.

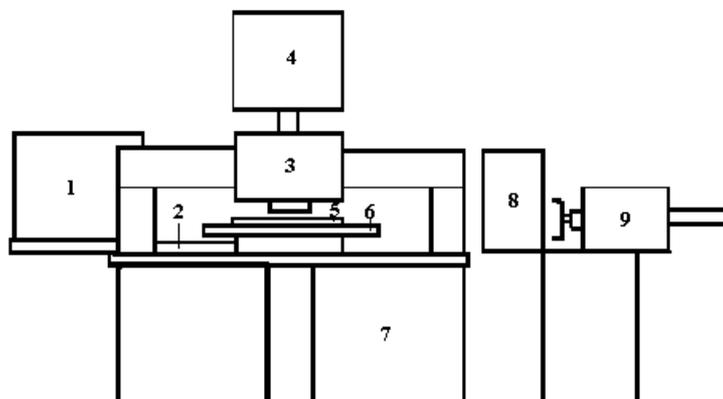


Рис. 9.21. ГПМ установки на ПП ИМС в корпусе типа 2

Процесс функционирования ГПМ следующий. ПП из накопителя 8 подается устройством загрузки-выгрузки 9 к координатному столу 6 сборочного автомата и фиксируется в нем с помощью фиксирующего устройства 5.

Координатный стол при этом выводится в нулевое положение. После фиксации ПП координатный стол перемещается к укладочной головке 3, которая в соответствии с задаваемой системой управления 7 программой производит выбор нужного типа ИМС из накопителя (линейного 1, установленного на столе 2, или роторного 4) и установку ИМС выводами в отверстия ПП. В некоторых вариантах оборудования специальная головка может осуществить подгибку двух выводов с целью дополнительного крепления ИМС на ПП. Для ИМС с числом выводов 14 и более в дополнительном креплении необходимости нет — ИМС держится на ПП за счет пружинения выводов, вставленных в отверстия.

Технические характеристики различных моделей автоматов приведены в табл. 9.8.

Табл. 9.8. ГПМ установки ИМС на ПП в корпусе типа 2 (DIP)

Параметры	Модель автомата	
	ГГМ1.149.015 (СССР)	DIPG "DynaPERT" (США)
Производительность, шт/ч	2500	4500
Размеры рабочего по- ля, мм	260×260	475×475
Емкость накопителя ПП, шт.	10; 20	15; 90
Емкость накопителя ИМС, шт.	900	1200
Тип кассеты	Этажерочный	Прямоточный
Габаритные размеры, мм	1400×1000	2450×1650
Масса, кг	480	650

РТК пайки волной припоя предназначен для выполнения монтажных соединений на ПП за счет автоматического выполнения операций загрузки-разгрузки, флюсования, подогрева, пайки и удаления излишков припоя (рис. 9.22). Плата с установленными на ней ИЭТ извлекает захватом 2 робот 3 из накопителя 1, устанавливается на специальную кассету и через устройство загрузки 4 передается на транспортер 9 линии пайки. Транспортер (цепной конвейер) последовательно перемещает ПП через агрегаты линии пайки. В агрегате флюсования 7 поверхность монтажных элементов, подлежащих пайке, смачивается флюсом, подающимся в виде пены к нижней поверхности ПП. В агрегате подогрева 8 происходит испарение жидкости, используемой в качестве растворителя флюса, с целью предотвращения разбрызгивания расплавленного припоя при попадании на него капелек жидкого флюса с поверхности ПП, а также подогрев ПП до 75—125 °С с целью уменьшения термоудара при погружении ПП в волну расплавленного припоя в агрегате пайки 10 при температуре 260 °С. Способ нагрева — терморadiационный. Температура должна быть максимальной, но не выше той, которую допускают ИЭТ, установленные на ПП.

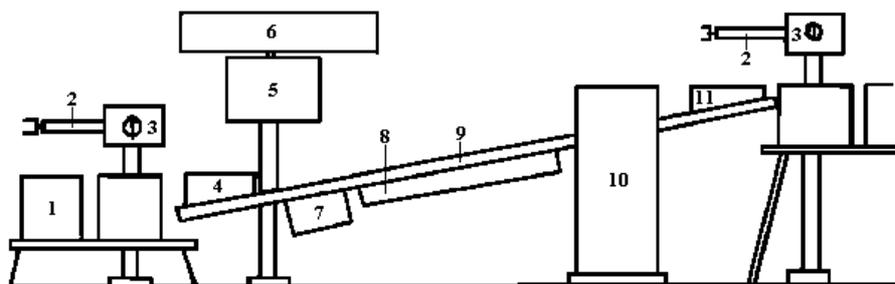


Рис. 9.22. ГПМ пайки волной припоя

Контроль и поддержание режимов пайки осуществляются автоматически с помощью устройства управления 5, а информация о режимах отображается на табло 6. Выгрузку плат выполняет устройство 11. Технические характеристики ГПМ приведены в табл. 9.9.

Табл. 9.9. ГПМ волновой пайки

Параметры	Модели линий пайки	
	Кirsten (Швейцария)	ЛПМ-300 (СССР)
Ширина и высота волны, мм	330; 20	330; 12
Скорость транспортера, м/мин	0,3—3,0	0,8—3,0
Угол наклона, град.	0—12	0—12
Потребляемая мощность, кВт	12	15
Тип нагнетателя припоя	Электромагнитный	Механический
Габаритные размеры, мм	3600×900×850	2500×850×1500
Управление	МПУ, дисплей	Пульт

## 9.7. ТЕХНОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО МОНТАЖА

Современный этап развития ЭА характеризуется все более широким применением новейшей элементной базы — поверхностно монтируемых элементов: безвыводных "чиповых" резисторов и конденсаторов, миниатюрных корпусов БИС, пластмассовых и керамических кристаллоносителей и др., что позволяет отказаться от плат с металлизированными отверстиями, упростить установку элементов, повысить надежность электронных блоков. Технология поверхностного монтажа (SMT) получила официальное признание в 1985 г. и имеет следующие преимущества:

1) конструктивные:

- повышение плотности компоновки элементов в 4—6 раз;
- снижение массогабаритных показателей в 3—5 раз;
- повышение быстродействия и помехозащищенности элементов за счет отсутствия выводов;
- повышение виброустойчивости и вибропрочности блоков в 2 раза;

- повышение надежности блоков за счет уменьшения количества металлизированных отверстий, являющихся потенциальным источником дефектов;

2) технологические :

- автоматизация сборки и монтажа элементов и повышение производительности труда в десятки раз;
- исключение операций подготовки выводов и соответствующего оборудования;
- сокращение производственных площадей на 50 %;
- уменьшение затрат на материалы.

К недостаткам следует отнести ограниченную номенклатуру поверхностно-монтажных элементов, их высокую стоимость, затрудненность отвода тепла, сложность контроля и ремонта. Прогнозы показывают, что к 2002 г. до 80 % всех компонентов за рубежом будут поверхностно-монтажными.

При поверхностном монтаже применяют следующие виды корпусов :

1) простые корпуса для пассивных компонентов (рис.9.23):

- прямоугольной формы, например резисторов и конденсаторов;
- типа MELF (Metal Electrode Face Bonded) с электродами в виде металлизированных торцов;

2) сложные корпуса для многовыводных полупроводниковых приборов:

- малогабаритный транзисторный (Small Outline Transistor — SOT);
- малогабаритный (Small Outline — SO) для интегральных схем;
- увеличенный малогабаритный (Small Outline Large — SOL) для интегральных схем;
- пластмассовые кристаллоносители с выводами (Plastic Leaded Chip Carrier — PLCC);
- безвыводные керамические кристаллоносители (Leadless Ceramic Chip Carrier — LCCC);
- керамические кристаллоносители с выводами (Leaded Ceramic Chip Carrier — LDCC);



Рис. 9.23. Типы корпусов пассивных компонентов

3) различные нестандартные корпуса для компонентов неправильной формы, например индуктивностей и переключателей.

Большая часть чип-резисторов изготавливается методами толстопленочной технологии, которая включает отжиг смесей оксидов металлов и керамики (или стекла), нанесенных на керамические подложки с применением, например, шелкографии. Аналогично изготавливаются контактные площадки резисторов. Резисторы нередко покрываются пассивирующим слоем стекла. После лазерной подгонки и покрытия эпоксидным составом подложки нарезаются на отдельные чип-резисторы.

В корпусах типа MELF изготавливают кремниевые диоды, высокочастотные катушки индуктивности с постоянной индуктивностью, танталовые конденсаторы, металлопленочные резисторы и устройства защиты от перенапряжений, но в наибольших объемах производятся постоянные керамические конденсаторы и графитовые пленочные резисторы.

Транзисторный мини-корпус SOT применяется для корпусирования дискретных полупроводниковых приборов: одиночных биполярных и полевых транзисторов, диодов, стабилитронов и др. Корпус TO-236 применяют для корпусирования кристаллов, имеющих площадь до 19,35 мм<sup>2</sup> и рассеиваемую мощность 200 мВт, а второй корпус, TO-243, рассчитан на кристаллы площадью 38,7 мм<sup>2</sup>, мощностью до 500 мВт при 25 °С. Оба корпуса очень просты по конструкции с тремя выводами: у TO-236 выводы поочередно отходят от каждой из сторон корпуса, в то время как у TO-243 они расположены по одну сторону корпуса, а центральный вывод — увеличенного размера для лучшего отвода тепла.

Интегральная схема в мини-корпусе SOIC/SOL напоминает уменьшенный вариант традиционного корпуса с двухрядным расположением ленточных выводов (типа DIP). Обычно мини-корпуса поставляются в 8, 14 и 16-выводном исполнении, при этом выводы имеют форму крыла чайки и расположены с шагом 1,27 мм (рис. 9.24, а). Большим преимуществом этого корпуса являются улучшенные массогабаритные характеристики по сравнению с его аналогом DIP: он на 70 % меньше по объему, на 30 % меньше по высоте, а масса такого корпуса составляет лишь 10 % массы его более крупного аналога. Кроме того, мини-корпус имеет лучшие электрические характеристики, определяющие скорость прохождения сигнала. Для переработки топологии обычной схемы на DIP-корпусах в вариант с использованием SOIC/SOL-корпусов нужно внести лишь небольшие изменения, так как разводка выводов одинакова, но общий размер платы может быть уменьшен.

Стандартный мини-корпус типа SO (рис. 9.24, б) имеет ширину 3,81 мм; существует также совершенно аналогичный корпус, называемый увеличенным вариантом, — SOL, который имеет ширину 7,62 мм.

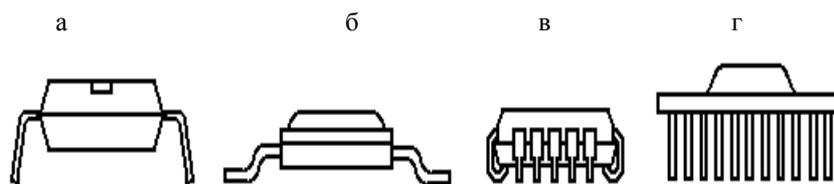


Рис. 9.24. Типы корпусов микросхем

Количество выводов у этих корпусов колеблется от 16 до 28. Пластмассовый кристаллоноситель с выводами (PLCC), размещенными по всем четырем сторонам корпуса, обеспечивает большую плотность соединений и представляет собой почти правильный квадрат с количеством выводов от 18 до 84 (рис. 9.24, в). Шаг выводов у PLCC обычно составляет 1,27 или 0,635 мм, однако для некоторых сложных СБИС применяется также шаг 0,508 мм.

Корпус PLCC характеризуется наличием одного ряда выводов по периферии. Варианты конструкции PLCC с числом выводов до 52 имеют, как правило, гибкие J-образные выводы, загибаемые под корпус при монтаже.

Наиболее распространенным типом керамических корпусов для поверхностного монтажа является LCCC — безвыводной керамический кристаллоноситель. Конструктивно LCCC состоит из трех основных элементов: металлизированного керамического основания, металлической крышки и герметизирующего материала, чаще всего специального припоя. В углах корпуса отсутствуют контактные площадки, корпус имеет два ориентирующих ключа: один из них для оптического считывания, второй — в виде угловой фаски. Эти корпуса выбирают для ответственных применений, например в военной технике, аппаратуре связи и аэрокосмической технике, поскольку они могут быть высокогерметичными. Однако LCCC имеют существенные недостатки. Главным из них является рассогласование температурных коэффициентов расширения (ТКР) корпуса и стандартной стеклоэпоксидной платы, которое способствует образованию и развитию дефектов в местах пайки при жестком термоциклировании или высоком уровне рассеиваемой мощности. Кроме того, эти корпуса относительно дороги в производстве. Керамические кристаллоносители с выводами (LDCC/CCC) позволяют решать проблему со-

гласования ТКР, хотя они дороже, конструктивно более сложны и пригодны лишь для военных и других ответственных применений, где стоимость не является основным критерием выбора компонентов.

Корпус PGA имеет тонкие штыревые выводы, расположенные в матричном порядке (рис.9.24, з).

Бескорпусные элементы, предназначенные для поверхностного монтажа, поставляются на пластиковых лентах, смотанных в катушки, в специальных трубчатых магазинах или россыпью. Для их установки на ПП используются автоматические укладчики. Станок М-2501 содержит магазинный питатель для подачи плат, систему позиционирования, блок поворота платы, вакуумный захват, модуль ультрафиолетового отверждения клея, которым крепится компонент, и магазинный накопитель собранных изделий. Подача компонентов производится по программе с 60 катушек. Для исключения повреждения активных элементов во время транспортирования в диэлектрический материал ленты при формовании вводят углеродный наполнитель, обладающий антистатическим свойством.

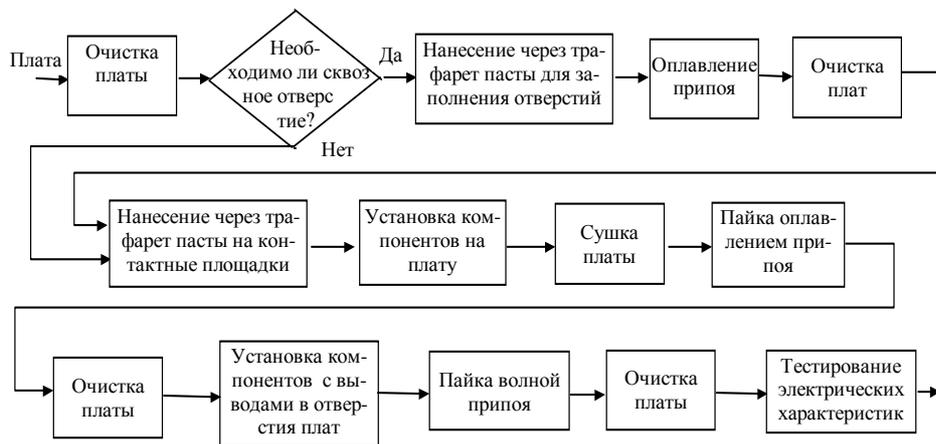
Более универсальным является автомат МС-30 фирмы Excellon Micronetics (США). Он может манипулировать с любыми выпускаемыми для поверхностного монтажа компонентами. Компоненты подаются к позициям вакуумного захвата на катушках, в магазинах или россыпью с вибробункера. В автомате предусмотрены три режима работы. В первом вакуумная головка захватывает компонент, прокатывает его по барабану, покрытому паяльной пастой или эпоксидной смолой, и устанавливает на требуемое место на плате. Во втором режиме производится то же самое с двукратным намазыванием, а в третьем — только захват и установка элемента.

В станке модели Microplacer фирмы МТ1 (США) компоненты захватываются приспособлением, в котором программируется давление захвата, и оно определяет габариты компонента, обеспечивая функции контроля размеров. В приспособлении имеется также центрирующий механизм, который делает менее критичными ориентацию и точное размещение компонента в питателе. Система оптического распознавания просматривает в режиме сканирования все собираемые платы, выделяя дефектные.

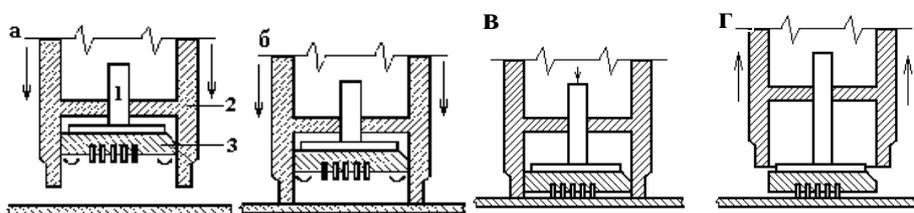
Автоматические укладчики для поверхностного монтажа комплектуются модулями, выполняющими другие функции, и модулями перемещения плат. Наиболее совершенным является оборудование фирмы Universal (США). В нем позиционируют сразу две платы, и пока на одну наносится точно дозированное количество клея, на второй производится установка компонента. Устанавливаемые компоненты подвергаются операционному контролю и при отклонении параметра заменяются исправными.

Монтаж на поверхности может быть выполнен в трех различных вариантах. П е р в ы й предусматривает размещение на верхней стороне платы только компонентов, монтируемых в сквозные отверстия, а на нижней — компонентов для поверхностного монтажа. Соединение элементов с платой осуществляется путем пайки волной припоя. Однако обычная волна припоя оказывается неэффективной для монтажа микрокорпусов, так как припой не может подтекать под них и достигнуть экранированных или металлизированных контактных площадок. Применение двойной волны, поступающей из двух резервуаров, позволяет обеспечить полный охват припоем металлизированных участков по всему периметру. Вторичная волна также удаляет избыток припоя с монтажных соединений.

В случае смешанного расположения компонентов на каждой стороне платы (в т о р о й вариант) ТП сборки усложняется (рис. 9.25). Сначала монтируют компоненты в микрокорпусах оплавлением припоя, а затем волной припоя — остальные. Для оплавления припоя применяют групповой инструмент (рис. 9.26).



**Рис.9.25. Схема сборки и монтажа печатных плат при смешанном расположении компонентов**



**Рис. 9.26. Монтаж микрокорпуса на плату специальным инструментом:**  
1 – толкатель; 2 – инструмент; 3 – микрокорпус

Он захватывает микрокорпус (а), опускается на плату (б) и расплавляет припой на контактных площадках (в). После этого инструмент поднимается (г). Толкатель удерживает элемент до тех пор, пока не наступит кристаллизация припоя. В инструменте с высокой точностью поддерживается температура, чтобы исключить перегрев кристалла в микрокорпусе. С помощью инструмента можно проводить также и ремонтные работы.

Третий вариант предусматривает установку элементов только на поверхность ПП различными методами пайки.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Структура типового процесса сборки блоков ЭА на ПП.
2. Оптимизация входного контроля элементов ЭА.
3. Методы формовки выводов элементов и их реализация.
4. Варианты фиксации выводов элементов при установке на платы.
5. Автоматизированное оборудование для сборки ЭА.
6. Гибкие производственные модули сборки и монтажа блоков ЭА на ПП.
7. Варианты поверхностного монтажа безвыводных элементов.

## 10. ГРУППОВАЯ ПАЙКА БЛОКОВ

### 10.1. КЛАССИФИКАЦИЯ СПОСОБОВ ГРУППОВОЙ ПАЙКИ

Современные способы групповой пайки блоков ЭА можно классифицировать по нескольким признакам, являющимся главными факторами при формировании паяных соединений. Образование паяного соединения включает стадии активации паяемых материалов, перехода припоя в жидкое состояние, смачивания и растекания припоя, взаимодействия припоя с паяемыми материалами. Таким образом, одним из важных факторов — тепловая энергия системы — определяет скорость протекания процессов на всех стадиях и качество получаемых соединений.

Передача тепловой энергии осуществляется теплопроводностью, конвекцией, излучением либо их совместным действием. При нагреве теплопроводностью источниками тепловой энергии могут быть расплав в ванне, волна припоя, нагретая жидкость либо групповой инструмент. Конвективный теплообмен осуществляется с использованием летучего теплоносителя: горячего газа, паров жидкости, пламени горелки. Излучение, наиболее эффективное в форме концентрированных потоков энергии, вводится в зону пайки контактным путем, например УЗ-колебаниями, либо бесконтактным: электромагнитной волной, инфракрасным излучением, лазерным лучом и т. д. Классификация способов групповой пайки приведена на рис. 10.1. Другим не менее важным фактором являются физико-химические процессы взаимодействия паяемых материалов и припоя, включая механизмы удаления оксидных пленок, воздействия специальных сред и т. д. Удаление оксидных пленок может осуществляться за счет применения флюсов, механическим путем, созданием специальных сред, УЗ-колебаниями, плазмохимической или ионной очисткой.



Рис. 10.1. Классификация способов групповой пайки

Критериями, характеризующими эффективность способов, могут служить следующие:

скорость нагрева паяемых элементов  $V_T = \Delta T / \Delta t$ ;

локальность  $K_S = S_n / S_n$ ,

где  $S_n, S_n$  — площади пайки и нагретого инструмента соответственно;

уровень энергопотребления  $K_W = W_{\text{п}} / W_{\text{и}}$ ,

где  $W_{\text{п}}$ ,  $W_{\text{и}}$  — мощности, вводимая в зону пайки и потребляемая от источника соответственно;

уровень автоматизации  $K_a = \sum_{i=1}^n T_{ai} / T_{\text{п}}$ ,

где  $T_{ai}$ ,  $T_{\text{п}}$  — длительности соответственно автоматизированных операций и технологического процесса пайки;

габаритно-программный показатель  $K_N = S_{\text{б}} N / S_i$ ,

где  $S_{\text{б}}$  — площадь блока;  $N$  — сменная программа выпуска;  $S_i$  — площадь, занимаемая технологическим оборудованием пайки, флюсования, очистки.

Скорость нагрева непосредственно определяет время, производительность и экономичность процесса пайки. Совместное действие нагрева погружением и УЗ-активации позволяет реализовать различные способы бесфлюсовой пайки, УЗ, ВЧ, ИК-излучения — бесфлюсовые и бесконтактные методы активации.

Увеличение локальности нагрева позволяет ограничить температурное воздействие на паяемое изделие, снизить тем самым нагрев термочувствительных компонентов и платы, повысить качество паяных соединений. Уровень энергопотребления характеризует экономичность метода, способность эффективно использовать тепловую энергию без больших ее потерь в окружающем пространстве. Уровень автоматизации показывает, какая доля операций всего технологического процесса пайки автоматизирована и характеризует применяемое технологическое оборудование по уровню автоматизации процесса. Габаритно-программный показатель показывает эффективность использования оборудования для заданной серийности производства на данной производственной площади.

Кроме перечисленных факторов, выбор способа групповой пайки определяется экологической чистотой процесса, особыми требованиями техники безопасности, конструктивными формами паяных соединений.

## 10.2. ПАЙКА ПОГРУЖЕНИЕМ

При пайке погружением собранная плата стороной пайки опускается в расплавленный припой, который является источником нагрева. Так как переход теплоты от жидкого припоя большой массы (50 кг и более) к контактными площадкам и выводам компонентов происходит достаточно быстро, то нагрев зоны соединения до температуры пайки достигается в течение 1—2 с. В зависимости от характера движения платы относительно поверхности припоя различают следующие способы пайки погружением в расплав припоя (рис. 10.2): вертикальным перемещением (*a*), наклонным перемещением (*б*), колебательным движением (*в*), маятниковым движением (*г*), протягиванием по поверхности припоя (*д*), избирательной подачей припоя (*е*).

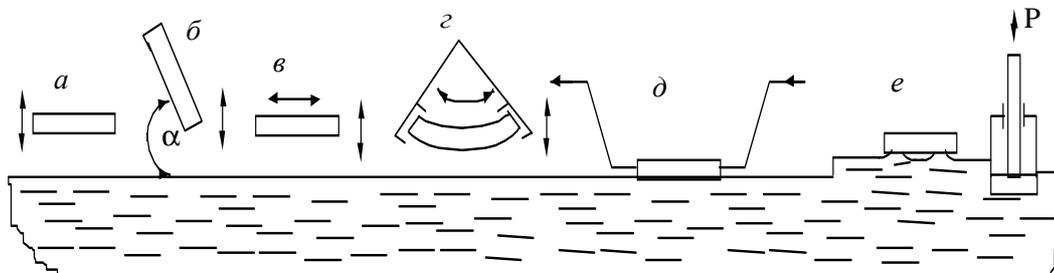


Рис. 10.2. Способы пайки погружением

Погружение платы в припой вертикальным перемещением осуществляют на глубину, не превышающую ее

толщину. Наиболее важными технологическими параметрами при этом являются: температура расплава припоя, которая поддерживается на уровне 260—280 °С и время погружения в пределах 4—6 с. Ванны для пайки оснащаются терморегуляторами, которые поддерживают температуру в заданном интервале с точностью  $\pm 5$  °С. Нагревательные элементы располагают таким образом, чтобы дно ванны было нагрето сильнее ее стенок. В этом случае за счет естественной конвекции происходит перемешивание жидкого припоя, обеспечивающее однородность состава во всем объеме ванны. Поверхность припоя (зеркало) при пайке должна быть чистой и свободной от оксидов, которые удаляются скребком перед каждым погружением платы.

При вертикальном погружении и извлечении платы наблюдается ряд недостатков, которые связаны с условиями удаления жидких и газообразных остатков флюса и излишков припоя. Затрудненность выхода остатков флюса на поверхность припоя может привести к "захвату" флюсом припоя и образованию ложных паяк. Припой не успевает стекать с платы и затвердевает с образованием сосулек, короткозамыкающих мостиков.

Ряд этих недостатков устраняется при наклонном погружении и извлечении платы. При погружении под углом 5—7° обеспечивается удаление газовых фракций флюса и продуктов реакции, а также стекание припоя. Удачным сочетанием способа с наклонным погружением платы и устройства для снятия оксидных пленок является способ пайки в лотке (рис. 10.3, а).

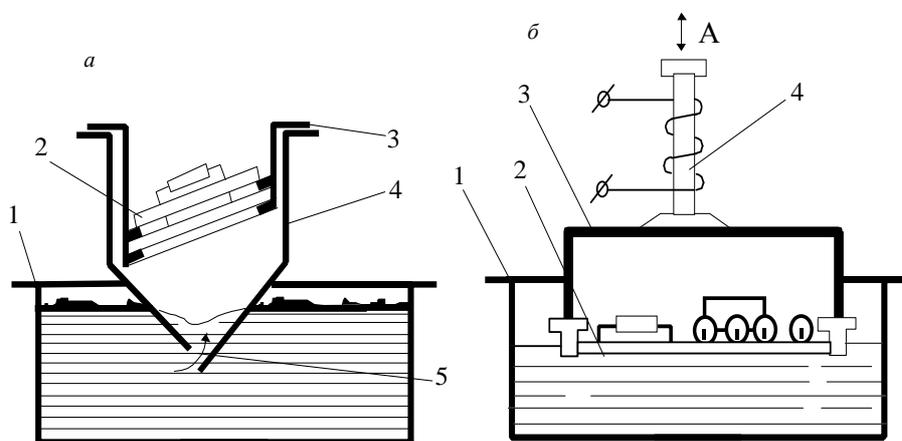


Рис. 10.3. Способы пайки в лотке и с применением вибрации

Припой находится в неподвижной ванне 1, а плата 2 с установленными компонентами укладывается наклонно в держатель 3 лотка 4. Лоток в поперечном сечении имеет форму треугольника с вершиной угла, направленного в глубь ванны. При опускании лотка в расплав припоя треугольное днище рассекает пленку оксидов на поверхности припоя и своим приемным отверстием 5 начинает забирать припой из глубины ванны. При этом создаются условия для постепенного удаления из зоны пайки жидких и газообразных остатков флюса, подачи в зону пайки чистого припоя. Недостатками данного метода являются: низкая производительность процесса, что определяет его пригодность для мелкосерийного производства; большой процент дефектных соединений; повышенный расход припоя; значительное термическое воздействие на плату.

Повышения качества паяных соединений в платах с металлизированными отверстиями достигают применением колебательных движений платы (рис. 10.3, б). Плата закрепляется в держателе, на который подаются механические колебания частотой 50—300 Гц и амплитудой 0,5—2,0 мм, получаемые от электромагнитного вибратора, либо УЗ-колебания частотой 20—44 кГц и амплитудой 10—20 мкм. Механические вибрации способствуют проникновению припоя в металлизированные отверстия, удалению остатков флюса, улучшают структуру припоя в соединении. Ультразвуковые колебания вызывают разрушение окисных пленок и улучшают смачива-

ние припоем паяемых поверхностей. Недостатками данного способа являются: необходимость надежного фиксирования компонентов на плате; возможность возникновения механических резонансов в компонентах, особенно транзисторах, что приводит к их повреждению.

Маятниковое движение плат, слегка изогнутых по дуге, уменьшает тепловое воздействие на плату, способствует удалению остатков флюса и излишков припоя. Однако при этом затрудняется крепление компонентов на плате, уровень припоя в ванне необходимо поддерживать с точностью  $\pm 1$  мм.

*Пайка протягиванием* по поверхности припоя заключается в том, что плата укладывается в держатель, который под углом  $5\text{--}10^\circ$  опускается на поверхность припоя и протягивается определенное расстояние по зеркалу припоя. Впереди держателя имеется скребок, который очищает поверхность зеркала от оксидов припоя. При подъеме платы излишки припоя стекают в ванну. Поскольку спокойная ванна припоя имеет меньшую склонность к окислению, то состав и чистота припоя поддерживаются с хорошим постоянством. Скорость протягивания составляет  $5\text{--}8$  м/мин, время протягивания одной платы — до 10 с. Установки для пайки протягиванием легко встраиваются в обычный сборочный конвейер. Недостатками способа являются относительно большое время пайки и связанное с этим значительное тепловое воздействие на поверхность платы. Последний недостаток устраняется применением защитных масок.

Во избежание коробления плат при пайке погружением термочувствительных элементов применяют *избирательную пайку*, которая заключается в подаче припоя только в места пайки. Ванна с припоем закрыта специальным кондуктором, в котором имеются отверстия, точно соответствующие числу и расположению зон пайки. Подача припоя осуществляется с помощью поршня, который выдавливает его через отверстия кондуктора в места пайки. Недостатком метода является трудность перестройки на другой типоразмер плат.

*Пайку погружением в нагретую жидкость*, например жидкий теплоноситель ОЖ-1 на основе лапрола Л2502-ОЖ при температуре  $260^\circ\text{C}$  или глицерин при  $240^\circ\text{C}$ , используют главным образом для оплавления гальванического покрытия олово-свинец на печатных платах с целью улучшения их паяемости.

### 10.3. ВОЛНОВЫЕ СПОСОБЫ ПАЙКИ

Способ *пайки волной* (wave soldering), впервые предложенный в 1955 г. в Англии, в настоящее время — самый распространенный в промышленности для пайки печатных плат крупносерийного и массового производства ЭА. Преимущества этого способа заключаются в высокой производительности вследствие механизированного движения плат относительно припоя и возможности создания автоматизированных установок, включающих полный комплекс операций: обезжиривание, флюсование, подогрев, пайку, отмывку от флюса и сушку, во взаимодействии платы с чистой поверхностью припоя в короткий промежуток времени, что снижает термоудар, коробление диэлектрика, перегрев элементов. Недостатки — большая масса припоя в ванне ( $100\text{--}500$  кг), повышенные габариты оборудования, большее окисление припоя.

Технологические основы метода пайки волной обусловлены характером взаимодействия потока припоя и платы. Главным условием высокой разрешающей способности пайки волной, позволяющей без перемычек, мостиков и сосулек припоя паять платы с малыми зазорами между печатными проводниками, является создание тонкого и равномерного слоя припоя на проводниках платы, что в свою очередь способствует формированию паяных соединений "скелетной" формы. Процесс пайки состоит из трех этапов: вхождения платы в припой (точка *A* на рис. 10.4), контактирования с припоем (отрезок *AB*) и выхода из припоя (точка *B*).

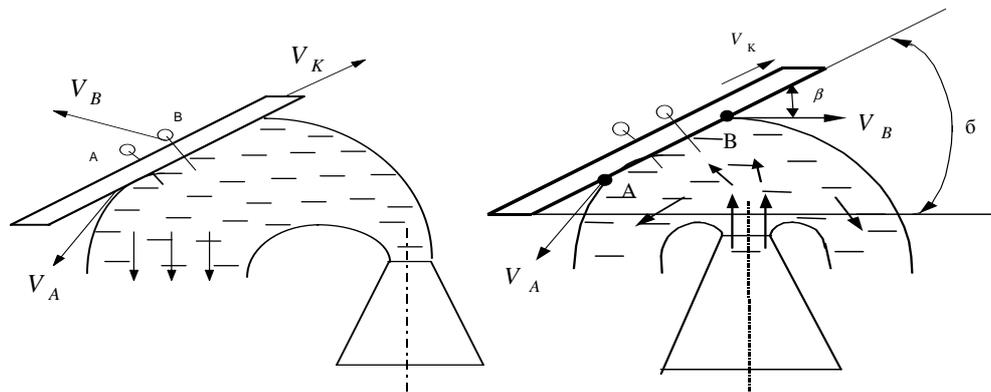


Рис. 10.4. Схема взаимодействия волн припоя и платы:  
а – односторонняя волна; б – двусторонняя

На первом этапе направление фонтанирования волны  $V_A$  способствует удалению паров флюса из зоны реакции (как при симметричной двусторонней, так и при направленной односторонней волне). На втором этапе полоса растекания припоя по плате  $AB$  в сочетании со скоростью конвейера  $V_K$  определяет время пайки. При двусторонней волне это время больше, что обеспечивает более полное заполнение припоем металлизированных отверстий. Увеличение времени взаимодействия, однако, повышает толщину припоя на печатных проводниках до некоторого предела.

Окончательное формирование толщины слоя происходит на выходе платы из волны припоя в точке  $B$ . При этом в односторонней волне продольная составляющая скорости фонтанирования  $V_B$  вычитается из скорости конвейера, при этом смываются излишки припоя и утончается оставшийся слой припоя.

При односторонней волне более благоприятными являются горизонтальное положение конвейера, пологая форма и возможно большая скорость циркуляции припоя. Глубина "ныряния" обычно составляет 0,6—0,8 толщины платы, но может достигать 1,5—2,0 толщины с носовым козырьком в передней части кассеты. В двусторонней волне скорость  $V_B$  складывается со скоростью конвейера  $V_K$  и способствует образованию наплывов. Таким образом, в двусторонней волне необходимо стремиться к повышению угла наклона, увеличению крутизны волны и уменьшению скорости фонтанирования.

Односторонняя волна применялась в установке пайки АП-4, имевшей конвейер, двигавшийся со скоростью до 1,5 м/мин, и блок создания волны. Вследствие ряда недостатков эта установка снята с производства. Двусторонняя волна используется в линии пайки ЛПМ-300 и установках фирмы Hollis, имеющих скорость конвейера до 2,5 м/мин, пенный флюсователь, подсушку флюса (рис. 10.5).



Рис. 10.5. Установка пайки TDC фирмы Hollis Engineering Inc.

В технологии групповой пайки электронных блоков на ПП наряду с односторонней и двусторонней параболической волнами применяют волны других профилей (рис. 10.6): плоскую (или широкую), вторичную (или "отраженную"), дельта-, лямбда- и омега-волну.

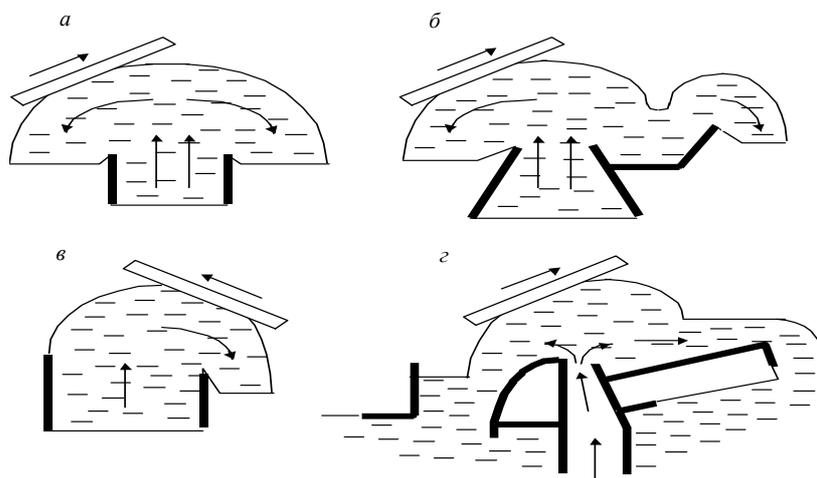


Рис. 10.6. Профили волн для групповой пайки:  
*а* – плоская; *б* – двойная; *в* – дельта; *г* – лямбда

*Плоская* или *широкая волна* имеет протяженность до 70—90 мм, что увеличивает площадь контакта между платой и припоем и позволяет повышать производительность процесса пайки за счет увеличения скорости движения платы до 3 м/мин (установка ASTRA фирмы Hollis (США)). Подобная конфигурация волны позволяет получать качественные паяные соединения при меньшей температуре припоя, чем при пайке волной параболической формы. К недостаткам данной волны относится увеличенная открытая поверхность расплава, способствующая образованию оксидных пленок в припое. *Вторичная волна* образуется за счет наклонного отражателя с одной стороны сопла, что обеспечивает удержание определенного количества припоя в виде волны меньшей высоты. Температура во вторичной волне меньше, чем в основной. За счет взаимодействия платы и вторичной волны происходит оплавление сосулек припоя и повторная пайка соединений.

*Дельта-волна* характеризуется стоком припоя в одну сторону, для чего одна стенка сопла выполнена удлиненной, а также большим напором припоя, что обеспечивает более глубокую волну, которая применяется для пайки элементов с удлиненными выводами, например разъемов с выводами под накрутку. Недостаток — зависимость высоты волны от степени нагнетания припоя и трудность ее поддержания на постоянном уровне.

*Лямбда-волна*, предложенная фирмой Electrovert (Канада), использует насадку сложной формы, имеет передний со стороны платы крутой слив припоя и длинный практически горизонтальный профиль волны на выходе платы. На входе платы в волне формируется ускоренный поток припоя, обладающий хорошим смачивающим действием и проникающей способностью. На выходе устанавливается практически нулевая скорость платы относительно припоя, а постепенное увеличение угла между платой и поверхностью припоя устраняет образование наплывов и сосулек. Такой профиль волны позволяет вести качественную пайку многослойных плат с плотным монтажом и используется в установке WSV фирмы Electrovert, где высота волны регулируется от 13 до 19 мм при скорости конвейера до 5,4 м/мин.

На базе лямбда-волны фирмой Electrovert создана *омега-волна* за счет размещения вибрирующего элемента в окне сопла, через которое подается припой. Вибрация элемента создается с помощью электромагнитного вибратора, работающего на частоте 60 Гц с амплитудой колебаний 1—3 мм. За счет придания турбулентности волне припоя обеспечивается заполнение металлизированных отверстий в платах на уровне 99 %, количество дефектов в виде непропаев сокращается в два раза. Омега-волна используется в установке Century 2000 (фирмы Electrovert), имеющей скорость конвейера до 6 м/мин.

Серийно выпускаемые линии механизированной пайки ЛПМ-300 и ЛПМ-500 уже не удовлетворяют по сво-

им техническим параметрам современным требованиям, поэтому на отдельных предприятиях они подверглись модернизации. Так, на базе ЛПМ-300 разработана установка УПМ-300, имеющая:

- плавное регулирование скорости движения транспортера от 0,3 до 3,0 м/мин;
- электромагнитный воздухораспределитель, прекращающий пенообразование флюса при выключении двигателя транспортера;
- устройство для автоматической остановки платы над секцией терморadiационной сушки для лучшего подгрева плат толщиной более 1,5 мм;
- подачу защитной жидкости как на волну припоя, так и на поверхность платы в ванне.

На линии SOLTEX (Голландия) осуществляется двухступенчатая пайка по следующей схеме: пениое флюсование — подогрев — пайка протягиванием по поверхности припоя со скоростью 1,5 м/мин — охлаждение — обрезка выводов фрезой с подзаточкой и пневматическим реверсом — очистка щетками — флюсование — подогрев — пайка волной припоя. При этом сокращается расход припоя, обеспечивается однородность паяных соединений с заданной высотой выводов над поверхностью платы.

В 80-х гг. при массовой пайке волной припоя возникли новые проблемы. Дальнейшая микроминиатюризация компонентов привела к увеличению плотности компоновки, размеры проводников на плате уменьшились до 0,25 мм, а зазоры — до 0,125 мм, число выводов на компонент возросло с 2—3 до 68. Появились безвыводные "чиповые" компоненты, монтируемые поверхностью. Традиционные установки уже не обеспечивали выполнение основной функциональной цели волновой пайки — оставлять на плате ровно столько припоя, сколько требуется для образования надежного электрического контакта. Остающийся на плате избыток припоя вызывает образование соединений заливной формы, которые менее надежны, чем соединения видимого контура, способствует возникновению перемычек и сосулек припоя.

Примером нового подхода к технологии массовой пайки волной припоя является концепция "воздушного ножа", предложенная фирмой Hollis Engineering (рис. 10.7).

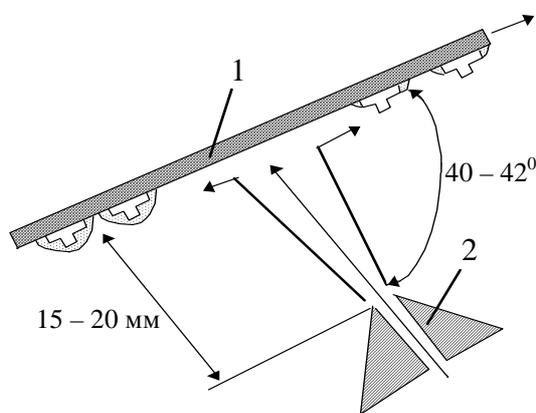


Рис. 10.7. Схема "воздушного ножа"

Поток горячего воздуха, направленный на плату 1, удаляет с ее поверхности излишки припоя, перемычки и сосульки. Сопло 2 изготавливается из нержавеющей стали и имеет достаточную массу для удержания тепла. Встроенные нагреватели внутри сопла обеспечивают нагрев воздуха до температуры 375—390 °С при давлении 0,3 МПа. Горячий воздух направляется на паяемую сторону платы через 6—8 с после ее выхода из волны под углом 40—42° на расстоянии до 20 мм от поверхности платы. Поскольку нагрев воздуха сопровождается значительными затратами электроэнергии, установки оснащают автоматической системой, включающей подачу воздуха при выходе платы из волны. "Воздушный нож" используется в установках GBS Mark 3 и SPS фирмы Hollis, имеющих модули двойной волны припоя, предварительный ИК - подогрев плат с двух сторон и макси-

мальную скорость конвейера — до 3,6 м/мин.

Для ограничения количества припоя на печатных проводниках в технологии массовой пайки применяют паяльные маски в виде сухой фотополимерной пленки, наносимой на поверхность платы вакуумным ламинированием и экспонируемой ультрафиолетовым излучением. Маска типа BAKREL фирмы Du Pont (США) матово-зеленого цвета обладает хорошей адгезией к поверхности платы, устраняет образование перемычек припоя и защищает печатный монтаж от климатических воздействий. Маски выпускаются толщиной 50, 75 и 100 мкм и обеспечивают требуемую геометрию паяных соединений с фотографической точностью.

До сих пор технология волновой пайки не требовала высокой квалификации исполнителя, так как многие переменные факторы процесса не контролировались. Сокращение брака и обеспечение высокого процента выхода годных сборок (до 90 % и выше) возможно путем компьютеризации процесса волновой пайки. Компьютер позволяет не только улучшать качество соединений, но и увеличивать в 10 и более раз скорость контроля. Для реализации компьютерного управления необходимо для каждой электронной сборки сформировать матрицу параметров, таких, как тип печатной платы, длина выводов элементов, скорость и ширина конвейера, температура подогрева платы, плотность флюса, температура пайки и др. Компьютеризация позволяет обеспечивать стабильность качества паяных соединений в массовом производстве. Микропроцессорными системами управления оснащены установки SPS фирмы Hollis, Gemini 400 FM фирмы Sensbey (Япония), NFS300 фирмы Zevatron (Германия).

Для образования волны припоя в установках пайки используют механические нагнетатели, давление воздуха или газа, УЗ-колебания и электромагнитные нагнетатели. Механический нагнетатель работает по следующему принципу (рис. 10.8). В замкнутую полость 1, на конце которой устанавливают сопло 2, постоянно нагнетается расплавленный припой с помощью крыльчатки, расположенной на валу 5, связанном клиноременной передачей с электродвигателем. Плата 4 входит в волну припоя под углом  $\alpha$ . Высота гребня волны 3 регулируется изменением числа оборотов электродвигателя постоянного тока путем изменения напряжения питания с помощью регулируемого автотрансформатора. Такая конструкция наиболее проста, однако недостатком ее является наличие в расплаве припоя вращающихся деталей. Это требует наличия дополнительных блокировок от включения двигателя при нерасплавленном припое.

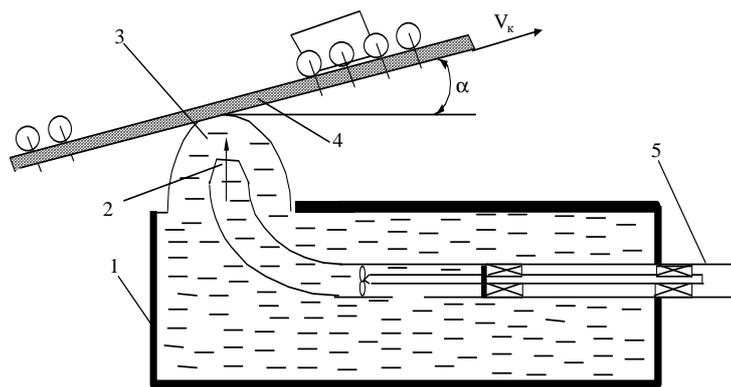


Рис. 10.8. Схема механического нагнетателя

Еще проще использовать для создания волны припоя давление воздуха или газа, подаваемого в замкнутую полость. Однако на практике применение воздуха приводит к окислению припоя, а использование инертного газа экономически нецелесообразно.

Для создания небольшой по размеру волны припоя могут использоваться УЗ-колебания, вводимые в припой с помощью специального излучателя. Однако конструктивно сложно "развязать" излучатель с ванной припоя,

волна имеет очень небольшие размеры и затруднена пайка плат с обычными размерами. Поэтому более рационально вводить УЗ-колебания в волну припоя, создаваемую механическими нагревателями.

Принцип действия электромагнитных нагнетателей заключается в том, что взаимодействие электрического тока, проходящего через припой, и внешнего магнитного поля приводит к появлению в жидком припое электромагнитных (пондеромоторных) сил, направленных перпендикулярно к векторам тока и поля и приводящих припой в движение:  $F_{эм} = I \times B$ .

$$F_{эм} = I \times B$$

По принципу действия электромагнитные нагнетатели подразделяются на *кондукционные* и *индукционные*. В первых электрический ток подводится к припою от внешнего источника с помощью специальных электродов, контактирующих с жидким припоем непосредственно либо через стенки канала (рис. 10.9, а). Прямоугольный канал, выполненный из немагнитного материала с низкой электропроводностью (нержавеющая сталь), расположен между полюсами N и S магнита. В канал вмонтированы электроды, по которым пропускается постоянный ток от источника. Взаимодействие магнитного поля и тока приводит к появлению разности давлений на входе и выходе насоса (по правилу левой руки). Постоянные магниты должны быть изготовлены из твердых магнитных материалов (например, феррита бария), сохраняющих свои магнитные свойства при рабочих температурах пайки. К недостаткам такого нагнетателя следует отнести небольшие размеры струи припоя и старение постоянных магнитов при воздействии температуры.

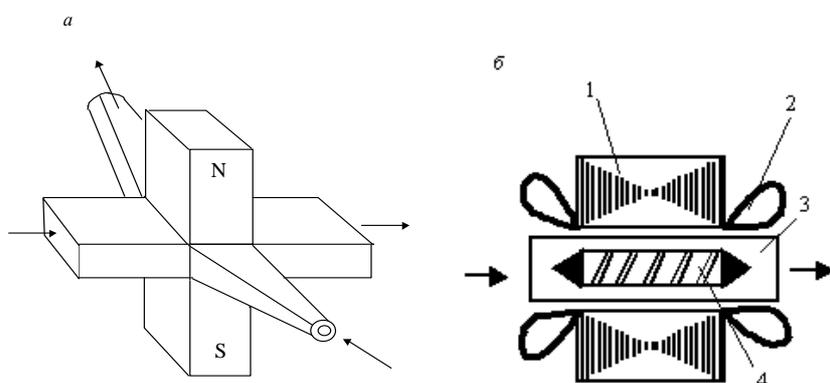


Рис.10.9. Схемы нагнетателей:  
а – кондукционного; б – спирального индукционного

Принцип действия индукционных нагнетателей подобен принципу действия асинхронных двигателей (рис. 10.9, б). Ток в расплаве возбуждается индукционным путем с помощью переменного электромагнитного поля. Примером является спиральный индукционный нагнетатель, который состоит из индуктора 1, выполненного подобно статору асинхронного двигателя из листовой электротехнической стали, в пазы которого уложена обмотка 2, магнитопровода 3, служащего для уменьшения рассеивания магнитного потока рабочего канала 4 и выполненного в виде одно- или многозаходной спирали.

В результате взаимодействия вращающегося магнитного поля и наведенных им в массе металла индукционных токов в припое возникают центробежные силы, перемещающие жидкий металл по виткам канала, обеспечивая поступательное движение расплава. К недостаткам подобного устройства относятся ограниченные размеры волны и турбулентный (вихревой) ее характер.

Большее распространение получили индукционные однофазные электромагнитные нагнетатели, в которых используется специальным образом профилированная ванна и часть расплава припоя в качестве токопровода для индуцирования в нем электрических токов (рис. 10.10, а). В ванне 1, заполненной жидким припоем, уста-

новлены камеры 2 и 3, внутри которых помещены полюса электромагнита 4, подключенного к источнику переменного тока. Камеры со всех сторон омываются припоем, образующим два короткозамкнутых витка с током вокруг полюсов электромагнита. При пропускании тока через обмотку в припое индуцируется электрический ток и расплав начинает перемещаться вверх, образуя струю припоя шириной не более 100 мм.

Двухконтурный электромагнитный нагнетатель (рис.10.10, б) содержит Ш-образный магнитопровод 8, между крайними стержнями 2 и 4 которого размещена ванна 5, заполненная припоем. Средний, более короткий, стержень 3 примыкает к дну ванны, омывается со всех сторон припоем и образует вторичный короткозамкнутый виток. Стержень 1 имеет обмотку индукционного нагрева 6, стержень 7 — обмотку нагнетания 8. При питании обмоток переменным током в зазоре между стержнями 3 и 7 образуется переменное магнитное поле, а во вторичном жидкометаллическом витке индуцируется ток. В результате их взаимодействия припой выбрасывается наверх. Для получения максимальной силы выброса фазу напряжения питания обмотки 8 выбирают такой, чтобы магнитный поток в рабочем зазоре совпадал по фазе с индуцируемым током. Управление режимами нагрева и нагнетания производится раздельно. Имеется возможность варьировать соотношение между значениями силы тока в обмотках, создающих магнитное поле, и индуцированным в расплаве током. Одинаковый по величине гидравлический напор припоя можно получить при большой индукции поля и малом токе, и наоборот.

Преимущества электромагнитных нагнетателей:

- в зоне нагнетания припой дополнительно нагревается индуцированными в нем электрическими токами;
- электромагнитные силы перемещают расплав припоя только непосредственно в рабочем канале, что уменьшает окисление припоя;
- отсутствуют движущиеся детали в припое;
- высота волны легко регулируется.

Электромагнитные нагнетатели применяются в установках GTF/160 и GTF/330 фирмы Kirsten (Германия) для создания динамической Jet - волны высотой 5—25 мм при скорости конвейера до 3 м/мин.

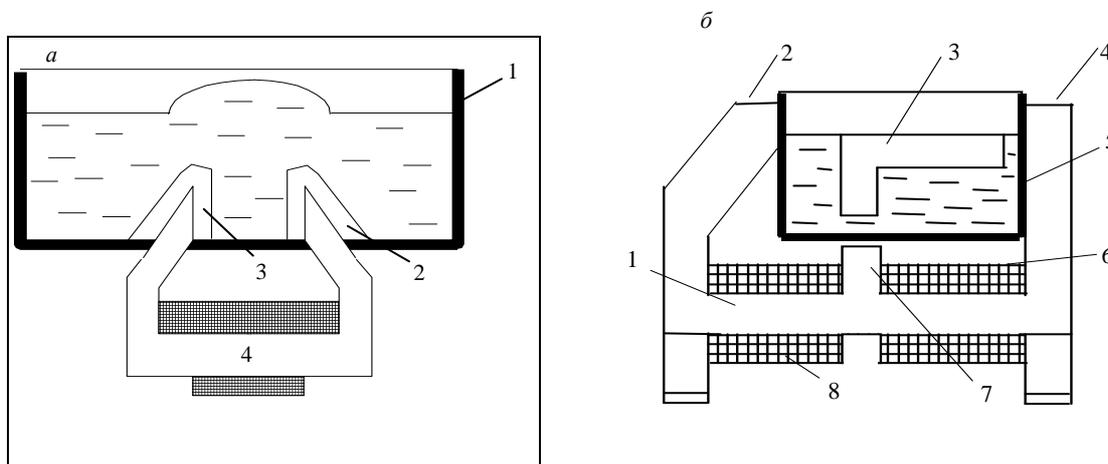


Рис. 10.10. Схема индукционных насосов:

а – однофазного; б – контурного

#### 10.4. ПАЙКА ГРУППОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Интегральные микросхемы в корпусах типа 4 (401.14-, 402.16-, 405.24, 429.42 и др.), резисторные, конденсаторные сборки типов Б18, Б19, зарубежные корпуса "flat pack" имеют планарные коваровые позолоченные выводы с шагом 1,25; 1,0; 0,625 мм. При сборке на печатных платах ИМС из этажерочных кассет, в которых они поступают на сборку, с помощью манипулятора с вакуумным захватом устанавливаются на поверхность платы. Перед установкой на плату дозатор наносит клей. По программе палета (держатель) с платой из накопителя по-

дается в рабочую зону, сборочная головка с помощью вакуумного захвата извлекает ИМС из кассеты, устанавливает ее на плату и производит пайку выводов.

Механизированную пайку планарных выводов ИМС ведут несколькими способами: миниатюрными паяльниками с дозированной подачей припоя; групповыми паяльниками прямого нагрева; инструментом с параллельными электродами; лазерным излучением.

Автомат дозированной пайки АДПМ-1, входящий в технологическую линию "Палмис", имеет одну паяльную головку с двумя миниатюрными паяльниками, которые могут подниматься и опускаться вместе и порознь, что позволяет вести пайку ИМС в различных корпусах. Механизм подачи припоя на паяльник — электромагнитный. Проволочный припой диаметром 0,5 мм наматывается на катушку, и по командам от стойки ЧПУ или пульта ручного управления электромагнит подает нужное количество припоя, при этом единичная доза составляет 0,6 мг. Подавая на электромагнит 1—6 импульсов, дозу можно изменять в пределах 0,6 — 3,6 мг.

Паяльная головка (рис. 10.11) обеспечивает вертикальное перемещение паяльника в пределах до 35 мм, раздвижку на 9—70 мм, прижим паяльника к паяемым выводам в пределах 1—4 Н. Время пайки 0,75—2,75 с задается программой с дискретностью 0,25 с. Контроль и поддержание заданной температуры паяльников осуществляются автоматически электронными потенциометрами с помощью термпар типа Х—К.

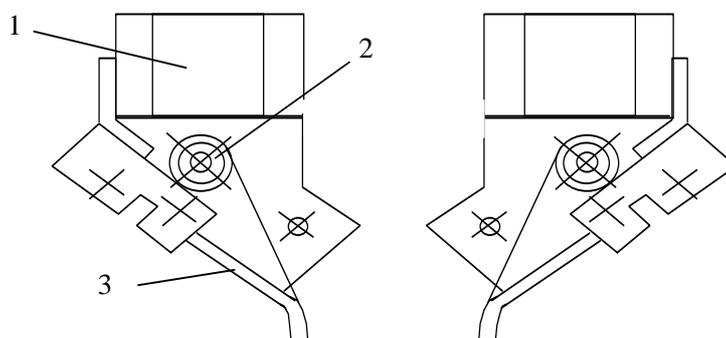


Рис. 10.11. Паяльная головка в установке пайки АДПМ-1:  
1 — головка; 2 — припой; 3 — микропаяльник

Координатный стол перемещается шаговыми двигателями по осям  $x$ ,  $y$  со скоростью 0,7 м/мин и погрешностью не более  $\pm 0,04$  мм. Стойка ЧПУ работает от 8-дорожечной перфоленты и обеспечивает подачу координатного стола на шаг 1,25 мм.

Дальнейшее развитие оборудования дозированной пайки привело к созданию автомата АСМ-1, имеющего магазин барабанного типа для хранения 30 прямоточных кассет, содержащих по 30 ИМС, универсальные автоматы для пайки четырех типов ИМС с планарными выводами типов УАП-1, УАП-2 для технологической линии "Прогресс".

Универсальный автомат с микропроцессорным управлением УСПА-1 обеспечивает нанесение дозы припоя на выводы, установку ИМС, пайку выводов и имеет более совершенную механическую систему, обеспечивающую перемещение координатного стола со скоростью 0,25 м/с и дискретностью 0,01 мм. Погрешность установки ИМС составляет  $\pm 0,2$  мм. Стойка ПУ построена на базе микроЭВМ "Электроника - 60".

Недостаток механизированной пайки паяльниками — низкая производительность: АДПМ-1 — 800 паек в час, АСМ-1 — 1200, УАП-1 — 1650 паек в час. Пайка групповым паяльником позволяет повышать производительность процесса пайки до 250—300 соединений в минуту (1800 паек в час) и получать соединения, не отличающиеся по внешнему виду и свойствам от соединений, паяемых вручную. Способ реализован в установках пайки типов АПМ-1, ППМ-3, УГП-902.

Высокое качество достигается при одновременной пайке 8—10 выводов одним паяльником (рис. 10.12, *а*), увеличение числа выводов до 12—20 приводит к снижению качества паяных соединений вследствие разброса толщины выводов. При числе выводов более 12 разность потенциалов между крайними выводами превышает 5 В, что может привести к выходу из строя ИМС. Поэтому импульсные групповые паяльники, в которых потенциал прикладывается поперек рабочего торца паяльника и не превышает доли вольта, более предпочтительны (рис. 10.12, *б*).

Дальнейшим развитием установок пайки групповым паяльником стали автоматы АРПМ и АУПМ-007, которые имеют поворотный магазин с 30 этажерочными кассетами, механизмы выдачи ИМС из кассеты на приемный столик и ориентации по ключу, манипулятор с вакуумным захватом, паяльники косвенного нагрева. Автомат АРПМ имеет программное управление с перфоленты и производительность 300 шт/ч, а АУПМ-007 — микропроцессорную систему управления и производительность до 400 шт/ч.

Способ групповой импульсной пайки предложен в 60-х гг. фирмой Weltek (США). В СССР в 80-х гг. выпущен автомат сборки и пайки импульсными паяльниками модели АС-901, который выполнял операции выбора ИМС в корпусах 401.14-3,4, установки их на платы с приклейкой, групповой импульсной пайки с производительностью до 800 шт/ч.

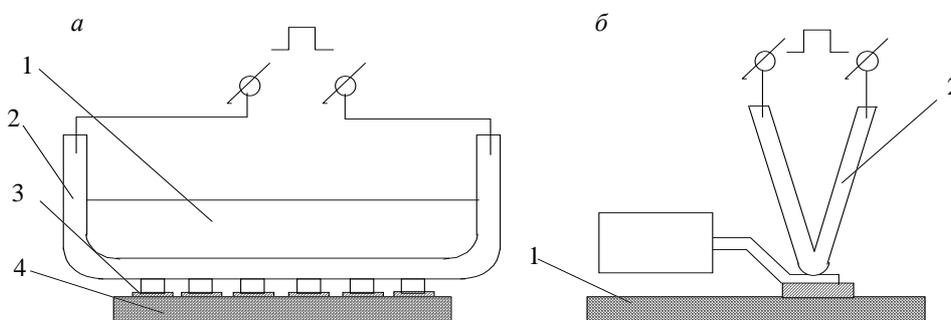


Рис. 10.12. Групповая пайка выводов ИМС паяльником

Автомат АСП-902П построен по модульному принципу. Манипуляционной основой автомата является модуль МАРС-901, имеющий линейный шаговый развернутый двигатель с платформой, которая перемещается по координатам  $x$  и  $y$  над плитой стола. На платформе закреплены рабочая постановочно-паяльная головка с устройством автоматической смены схватов и нанесения клея на плите стола, магазин сменных схватов, вибрационные питатели для установки кассет с микросхемами. Клей наносится двумя методами: на плату дозатором, на дно микросхемы с помощью ванночек с клеем. Метод пайки выводов микросхем — импульсный, система управления — микроЭВМ, производительность — до 600 шт/ч.

Припой для пайки импульсными паяльниками дозируют путем осаждения на плату гальванического сплава ПОС 61 толщиной 12—15 мкм и последующего оплавления либо нанесения слоя припоя толщиной до 100 мкм волной припоя. Время пайки обычно задают в интервале 0,1 — 0,4 с. Недостаток — отличие формы паяных соединений от пайки ручным паяльником, так как на соединениях остается отпечаток торца импульсного паяльника.

Способ пайки параллельными электродами основан на прямом нагреве места соединения током, проходящим через электроды (рис.10.13). Достаточное для расплавления припоя количество теплоты выделяется в паяемых деталях (выводе ИМС и контактной площадке печатной платы) на участке межэлектродного зазора. Припой в соединение вводится заранее. Электроды перемещаются в вертикальной плоскости независимо друг от друга и прижимаются к выводу ИМС усилием  $F$ . От регулируемого источника питания через понижающий

трансформатор подается импульс тока  $I_{\Pi}$ , который переходит от одного электрода к другому через паяемые детали.

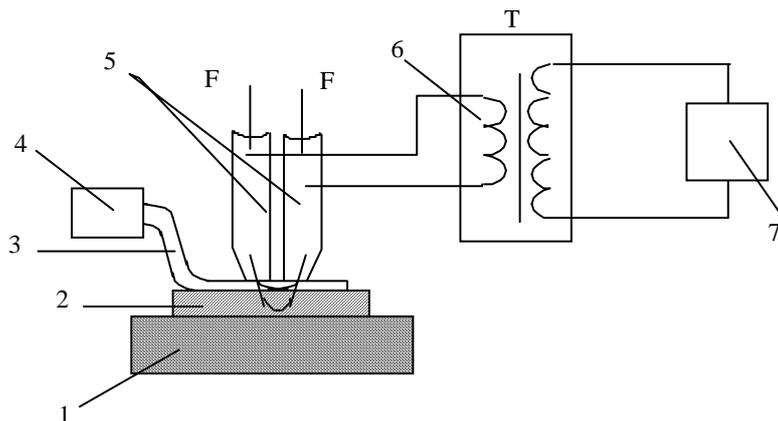


Рис. 10.13. Схема пайки параллельными электродами:  
1 – плата; 2 – контактная площадка; 3 – вывод; 4 – ИМС; 5 – электрод; 6 – трансформатор;  
7 – источник питания

Вследствие большого разброса параметров соединяемых материалов (толщины выводов ИМС и контактных площадок, покрытий) в процессе пайки сильно меняется сопротивление нагрузки. Кроме того, с увеличением нагрева деталей растет электросопротивление в зоне контакта. Поэтому для нагрева при пайке параллельными электродами используют регулируемый источник с цепями обратной связи, обеспечивающий стабилизацию напряжения на электродах:

$$U_{\text{э}} = I_{\Pi} R = \text{const} .$$

В 80-х гг. способ пайки параллельными электродами возродился на новой технической основе. Были разработаны источники тока повышенной частоты (до 1 кГц), которые обеспечивают подачу импульсного тока пачками импульсов, стабилизированных по напряжению, длительностью 5—50 мс. Это позволило стабилизировать температуру в зоне соединения, а также за счет возникновения вибраций и течений в расплавленном припое под действием электродинамических сил дополнительно активировать процесс смачивания выводов ИМС припоем.

Важным преимуществом данного способа является возможность вести активный контроль качества соединений по силе тока, что делает этот способ более экономичным и производительным по сравнению со способами, при которых используется визуальный контроль.

Способ пайки параллельными электродами реализован в автомате с программным управлением "Поиск" для ИМС в корпусе 401.14—1. Автомат состоит из координатного стола, двух паяльных головок с автоматической раздвижкой электродов, манипулятора, системы управления на основе микроЭВМ "Электроника С5-21М". Производительность автомата — до 200 шт/ч, скорость перемещения координатного стола по осях  $x$  и  $y$  в пределах 300 мм — 0,625 м/мин, шаг — 0,625; 1,25 мм. Давление электродов на выводы 0,5—18 Н, напряжение на электродах 0,3 — 1,0 В; время пайки 0,10 — 0,8 с.

## 10.5. ПАЙКА ЛЕТУЧИМ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕМ

Появление на коммутационных платах поверхностно-монтажных компонентов существенно изменило технологию групповой пайки. Для пайки плат со смешанным монтажом (компоненты, монтируемые в отверстия с одной стороны платы, и "чиповые" элементы) был разработан метод пайки двойной волной припоя (рис.

10.14). Первая волна — турбулентная и узкая, она выходит из сопла под большим давлением. Турбулентность и высокое давление припоя обеспечивают хорошее смачивание, исключают образование полостей с газообразными продуктами разложения флюса, но не исключают образования перемычек. Вторая, более пологая, волна с малой скоростью истечения устраняет перемычки припоя, а также завершает образование галтелей. Поэтому установки пайки двойной волной должны иметь отдельные нагнетатели припоя, сопла, блоки управления параметрами каждой волны. Кроме того, их дополнительно оснащают "воздушным" ножом для разрушения перемычек из припоя. Недостаток данной схемы пайки — значительные термические нагрузки на плату.

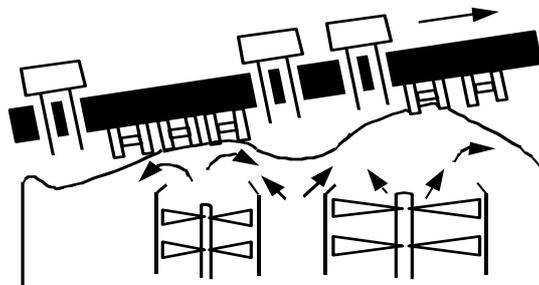


Рис. 10.14. Пайка двойной волной припоя

Перспективным методом является пайка поверхностно-монтажных элементов *расплавлением дозированного припоя* (Reflow Soldering), который наносится в виде заготовок или паяльной пасты. Во втором случае флюсования не требуется, так как паста имеет в составе флюс. Нагрев платы с пастой производится в три этапа: сушка летучей связки, оплавление порошка припоя, растекание припоя по контактной площадке. "Чиповые" элементы, монтируемые на контактные площадки, при установке приклеиваются к плате, при этом они ориентируются по отношению к контактным площадкам платы. Используются следующие виды нагрева: контактным электросопротивлением, газом, фокусированным световым лучом, ИК-нагревом и в паровой фазе.

*Пайка горячим газом* нашла применение для присоединения "чиповых" элементов к многослойным керамическим платам. Инертный газ (аргон, азот или их смесь) нагревается, проходя под давлением через электронагревательные элементы мощностью 0,8—1,0 кВт. Температура газа регулируется путем изменения его скорости и напряжения на электронагревательных элементах таким образом, чтобы она превышала на 150 °С точку плавления припоя. Струя газа вырывается из сопла диаметром 2,5 мм, что позволяет локализовать нагрев паяемых мест. Отсутствие контакта с источником теплоты обеспечивает высокое качество паяных соединений.

Фирмой Funk & Meier AG разработана настольная установка SURFACE MOUNT 202 для пайки "чиповых" элементов горячим газом. Установка снабжена стереомикроскопом для работы оператора при сборке плат размерами 250×450 мм и высотой элементов до 25 мм. Воздух под давлением 4 — 8 бар при регулируемой в пределах 150 — 450°С температуре подается в зону пайки. Установка снабжена блоком микропроцессорного управления или персональной ЭВМ (рис. 10.15).

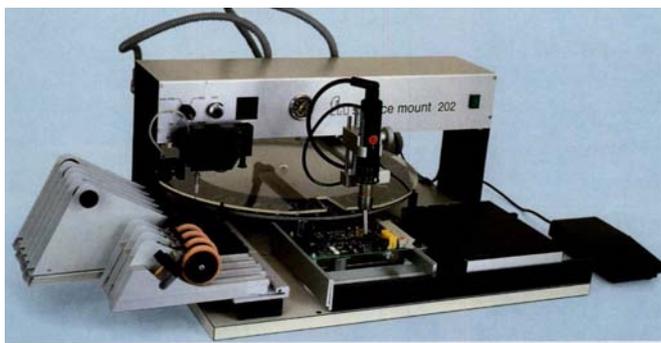


Рис. 10.15. Установка пайки поверхностно-монтируемых элементов

Установка монтажа компонентов СТ-508 (Беларусь) обеспечивает:

- монтаж - демонтаж поверхностно-монтируемых элементов типа конденсаторов К10-17 "в", транзисторов КТ31, диодов КТ62, резисторов Р1-12;
- размещение элементов в двух круговых накопителях по 18 лотков;
- зажим плат размерами от 60×80 до 250×450 мм;
- дозированное нанесение припойной пасты, флюса, клея;
- вакуумный захват "чиповых" элементов;
- ориентацию по углу, позиционирование по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ;
- предварительный подогрев плат до температуры 80-230 °С;
- автоматическое поддержание температуры газового потока двух паяльников в пределах 120-400 °С.

Технологическая производительность при времени пайки не более 1,5 с — 400 плат в час, потребляемая мощность 0,8 кВт. Недостаток пайки горячим газом — сравнительно медленная передача теплоты за счет конвекции, что значительно увеличивает время пайки.

Технологию *пайки в паровой фазе* (конденсационную пайку) предложила в 1973 г. фирма Du Pont (США), после того как были запатентованы специальные термостабильные рабочие жидкости. К преимуществам данного метода относятся равномерный нагрев электронной сборки до постоянной во времени температуры пайки в анаэробной инертной среде с применением слабоактивированных флюсов, что позволяет получать однородные паяные соединения и исключает образование перемычек из припоя.

Необходимые для пайки припой и флюс наносят на плату в виде припойной пасты перед ее погружением в пар. По мере погружения платы в зону насыщенного пара над кипящей рабочей жидкостью пар конденсируется по всей ее поверхности, быстро и равномерно нагревая до температуры пайки. При этом припойная паста расплавляется и образует галтель между выводом компонента и контактной площадкой платы. Когда температура платы достигнет температуры жидкости, процесс конденсации прекращается, тем самым заканчивается и нагрев платы. Повышение температуры платы до температуры расплавления припоя осуществляется в короткий промежуток времени (до 10 с) и не поддается регулированию. Для уменьшения термических напряжений в компонентах осуществляют предварительный подогрев платы.

Основной частью установки для пайки в паровой фазе является резервуар 1 со слоем рабочей жидкости на дне (рис. 10.16). Пар 2 образуется за счет нагрева до кипения с помощью внешних либо встроенных внутренних нагревателей 5. Для предотвращения утечки пара в верхней части резервуара расположены змеевики охлаждения 3. По мере прохождения смонтированной платы 4 над кипящей жидкостью пар конденсируется над всей поверхностью, быстро и равномерно прогревая плату до температуры пайки. В качестве жидких теплоносителей

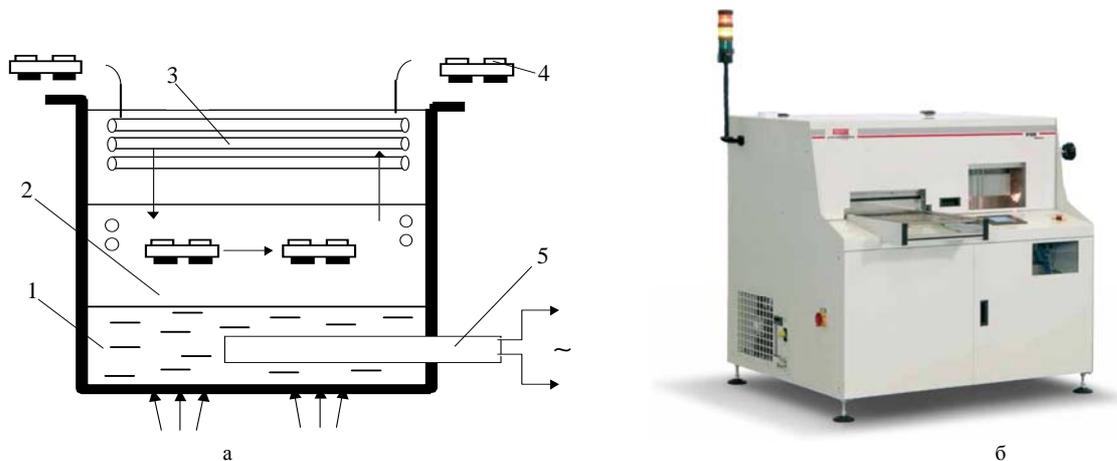


Рис. 10.16. Схема (а) и внешний вид (б) установки пайки в паровой фазе камерного типа

лей используются перфторированные инертные жидкости с температурой кипения несколько выше температуры плавления оловянно-свинцового припоя. Например, наиболее распространенный теплоноситель Fluoronert Liquid C-70 имеет температуру кипения 215 °С. С целью предотвращения утечки паров дорогого фторуглерода поверх основной технологической среды создается дополнительная среда из более дешевого фреона.

Недостатки процесса — его длительность (40—50 с), высокая стоимость жидкого теплоносителя, утечка рабочей жидкости в атмосферу, образование различных кислот на границе раздела жидкостей.

В установках конвейерного типа ПЛ-6 — ПЛ-24 фирмы НТС Product (США) имеются транспортер для ввода изделия в камеру, дополнительные холодильники, вакуумные шлюзы, что исключает применение фреоновой защитной среды.

Недостаток парофазной пайки — критичность к использованию канифольных флюсов, остатки которых не растворяются в рабочей жидкости и, попадая на нагреватель, снижают его теплоотдачу. При плотности мощности более 10 Вт/см<sup>2</sup> происходит локальный перегрев рабочей жидкости и ее разложение с выделением высокотоксичного газа перфторизобилена, что может привести к отравлению персонала.

Для автоматизированной установки поверхностно-монтажных компонентов и их пайки выпущена линия "Темп-4000", которая включает модуль трафаретной печати для нанесения лудящих паст, модуль установки компонентов и установку пайки. Номенклатура устанавливаемых компонентов: резисторы Р1-11 (МЭЛФ), Р1-12 (чип), конденсаторы К10-17, транзисторы в корпусах КТ-27, КТ-28, КТ-46, КТ-47, ИМС в корпусах 2, 4, Н, Ф. Рабочие температуры жидкостей-теплоносителей: 180±5; 235±5 °С. Установка работает без использования защитной жидкости — хладона 113. Мощность, потребляемая установкой, 1,6 кВт. Производительность составляет до 30 сборок в час.

## 10.6. ПРИМЕНЕНИЕ КОНЦЕНТРИРОВАННЫХ ПОТОКОВ ЭНЕРГИИ ДЛЯ ГРУППОВОЙ ПАЙКИ

Активация энергией УЗ-колебаний — одно из перспективных направлений в технологии пайки. Введение механических упругих колебаний частотой 18—70 кГц и интенсивностью  $(1—2) \cdot 10^5$  Вт/м<sup>2</sup> в припой позволяет резко интенсифицировать большинство физико-химических процессов при пайке: смачивание, растекание, капиллярное течение припоя, диффузию припоя в паяемые материалы за счет увеличения химической активности припоя, паяемых материалов и их физического взаимодействия при пайке. Развитие кавитационного процесса в жидком припое вызывает разрушение оксидных пленок на поверхности паяемого металла за счет высоких локальных давлений (до  $10^6 — 10^7$  Па), возникающих в момент захлопывания кавитационных полостей. Одновременно с процессом кавитации в жидком припое вблизи излучающей поверхности инструмента возникают вторичные эффекты, такие, как микро- и макропотоки, которые способствуют удалению оксидных пленок и ускорению процесса смачивания поверхности металла припоя.

Для ультразвуковой пайки используют УЗ-ванны с возбуждением всей массы припоя (рис. 10.17, а) и с локальным воздействием ультразвука (рис. 10.17, б) с помощью направленного излучателя. В первом случае можно активировать большую поверхность изделия, однако при этом не удастся получить однородную интенсивность УЗ-колебаний во всем объеме припоя. Локальный метод позволяет сконцентрировать УЗ-колебания в значительно меньшем объеме, уменьшить окисление припоя, однако более сложен в реализации.

Для контроля параметров УЗ-колебаний и кавитационных явлений разработаны аппаратные средства: измерители вибраций, виброметры, кавитометры, позволяющие объективно оценивать уровень УЗ-активации процессов пайки.

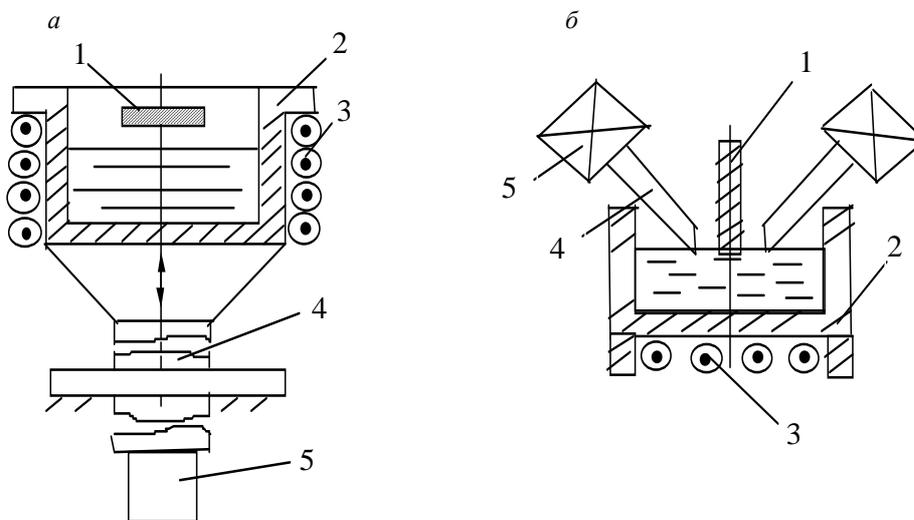


Рис. 10.17. УЗ-ванны с общим (а) и локальным (б) воздействием УЗ:  
1 — изделие; 2 — ванна; 3 — нагреватель; 4 — волновод; 5 — преобразователь

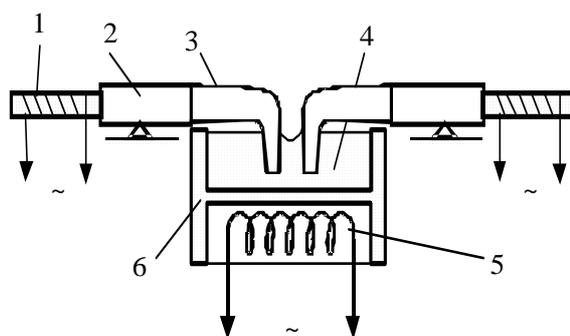


Рис. 10.18. Схема устройства УЗ-лужения конденсаторов

Эффект подъема припоя по излучающей поверхности волновода использован в устройстве для УЗ-лужения стеклокерамических конденсаторов без их погружения в расплав припоя. Устройство (рис. 10.18) содержит две УЗ-колебательные системы, включающие магнестрикционные преобразователи 1, акустические трансформаторы упругих колебаний 2, волноводы 3, рабочие концы которых имеют Г-образную форму и опущены в ванну 6 с расплавленным припоем 4. Колебательные системы установлены на основаниях, которые имеют возможность точного горизонтального перемещения. Расплавление припоя и поддержание необходимой температуры пайки осуществляется с помощью резистивного нагревателя 5. Г-образные концы волноводов колеблются в полуволновом резонансе, что приводит к появлению двух пучностей и узла колебаний. При колебании рабочего конца волновода на припой действует гидродинамическая сила, направленная перпендикулярно к рабочей плоскости, под действием вертикальной составляющей которой припой поднимается до уровня верхней пучности, где он удерживается за счет адгезии. Таким образом, зона верхней пучности, расположенная выше уровня припоя в ванне, является рабочей, чем и обеспечивается возможность автоматизации процесса лужения.

С помощью ротора с зажимами заготовки стеклокерамических конденсаторов типа К22-5 с электродами из алюминиевой фольги подаются в зону лужения со скоростью 5—100 мм/с. Два генератора типа УЗГ 3-0,4 связаны с акустическими системами; настроенными на резонансную частоту  $44 \pm 1$  кГц. Лужение изделий осуществляется припоем П300К (Sn—15%, Zn—65%, Cd—20%) при температуре 400—430 °С, напряжении на выходе генератора 20—30 В со скоростью 40—60 мм/с. Данные устройства позволили полностью механизировать операцию лужения и обеспечить высокий процент выхода годных изделий.

Энергия электромагнитных колебаний высоких частот в диапазоне 200—2000 кГц используется для бесконтактного нагрева паяемых деталей и припоя с помощью специальной оснастки—индукторов, которые наводят в металлических деталях вихревые токи, разогревающие детали и припой до температуры пайки. Исследования показали, что поскольку плотность вихревых токов по сечению детали распределяется неравномерно, а концентрируется в основном в слое глубиной  $\delta$ , то частоту электромагнитных колебаний  $f$  для высокочастотной пайки изделий РЭА, чувствительных к электромагнитному воздействию, необходимо выбирать из соотношения  $h/8 < \delta \leq h/4$ , где  $h$  — толщина стенки корпуса изделия. С учетом того, что

$$\delta = \sqrt{\rho / (\mu f)} / (2\pi),$$

где  $\rho$  — удельное электрическое сопротивление металла корпуса;  $\mu$  — магнитная проницаемость металла, границы высокочастотного диапазона электромагнитной активации определяются так:

$$4 \frac{\rho}{\mu} h^2 \leq f (\text{МГц}) < 16 \frac{\rho}{\mu} h^2.$$

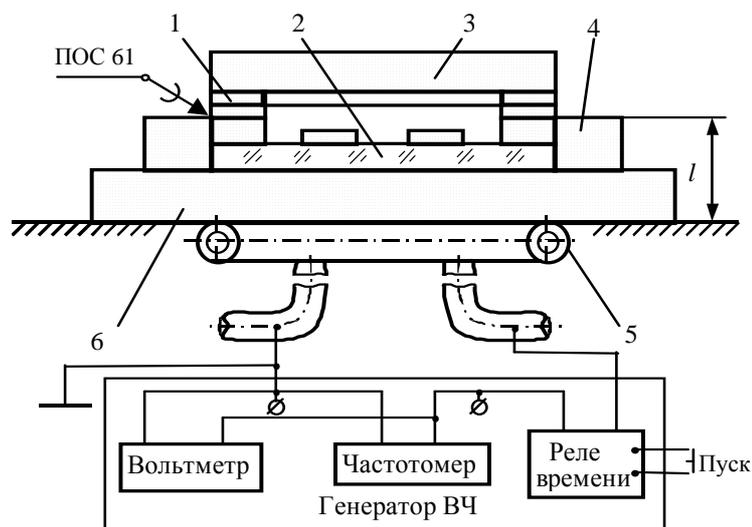


Рис. 10.19. Схема пайки микросборок ВЧ-нагревом

Активация ВЧ электромагнитными колебаниями сопровождается резким повышением локальности нагрева. Это снижает температурное воздействие на паяемое изделие, а также вызывает эффективное перемешивание расплавленного припоя под действием вихревых токов и ponderomotorных сил, что улучшает растекание припоя и способствует формированию качественных паяных соединений. В качестве источников ВЧ электромагнитных колебаний используют ламповые генераторы мощностью 4—10 кВт. Для увеличения магнитной связи между индуктором и паяемыми деталями применяют магнитопроводы, выполненные из магнетодиэлектриков и ферритов, что улучшает равномерность электромагнитного поля в зоне нагрева. Скорость высокочастотного нагрева пропорциональна  $\sqrt{см}$  и составляет от 30 до 100 град/с. Время активации энергией ВЧ-колебаний дозируется с помощью реле, встроенных в генератор.

Для пайки рамки 1 к плате микросборки 2 разработана специальная оснастка (рис. 10.19), включающая прижим 3, индуктор тока ВЧ 5, технологическую кассету 4, в которой располагаются микросборки, теплоизолирующую плату 6. Расположение индуктора под платой имеет то преимущество, что исключает случайное прикосновение к нему в процессе пайки и обеспечивает возможность свободного перемещения кассеты с микросборками с помощью транспортного устройства.

Инфракрасное излучение с длиной электромагнитных волн 1—5 мкм, генерируемое галогенными лампами мощностью 0,5—1,0 кВт, применяют для бесконтактной пайки безвыводных элементов на воздухе и в специальной среде. ИК-излучение незначительно проникает в глубь нагреваемых металлов, поэтому скорость их нагрева зависит от степени черноты поверхности. Лучшие результаты дает использование паяльных паст, наносимых на участки пайки трафаретной печатью.

ИК-печи для пайки припойной пастой поверхностно-монтажных элементов, выпускаемые фирмой Aurel (Италия), содержат ряд последовательных зон, каждая из которых снабжена своим регулируемым нагревательным элементом с обратной связью. Источниками нагрева служат кварцевые лампы с излучением в диапазоне длин волн 3,5—5,5 мкм, которые обеспечивают равномерный нагрев деталей с различной степенью черноты и одновременно повышают температуру газовой среды (воздуха или инертного газа), благодаря чему повышается равномерность температурного поля. В ИК-печах выполняется пайка плат размерами до 500 мм. Программа ИК-нагрева задается персональным компьютером. К недостаткам следует отнести трудности локализации зоны нагрева и загрязнение рефлекторов испаряющимся флюсом.

Активацию монохроматическим когерентным излучением в оптическом диапазоне длин волн 0,7—10,6 мкм осуществляют с помощью ОКГ мощностью 60—100 Вт. Лазерное излучение представляет собой надежное и экономичное средство высокопроизводительного бесконтактного нагрева для пайки благодаря его высокой управляемости и локальности воздействия. Проблемы внедрения полуавтоматов лазерной пайки связаны с необходимостью выбора оптимального метода нанесения припоя, мощности излучения, скорости перемещения луча.

Лазерная пайка планарных выводов ИМС в корпусах типа 4 реализована с использованием твердотельного лазера на АИГ с неодимом Nd - ЛТН - 102 А (рис. 10.20). Мощность лазерного излучения 26 — 30 Вт, диаметр луча в фокальной плоскости 2 — 4 мм, скорость перемещения координатного стола 4 — 7 м/с. Припой наносится дозированно на выводы 3 ИМС путем напresseвки проволочного припоя диаметром 0,4 мм либо в виде паяльной пасты. Плату 1 с установленными ИМС 4 закрепляют на координатном столе, наносят на выводы флюс и, включив лазер и перемещение координатного стола, проводят пайку последовательным обходом всех паяемых соединений на плате лучом 2 под углом 90° или 45°.

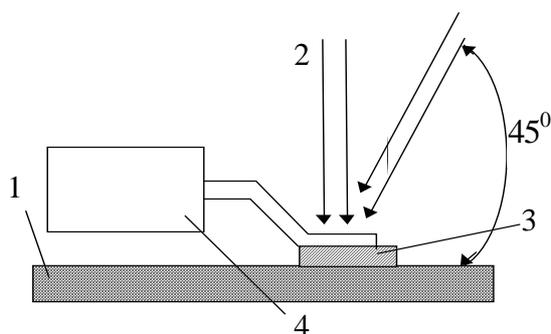


Рис. 10.20. Схема лазерной пайки

При пайке лазерным излучением время пайки одного вывода не превышает 0,7 с, благодаря короткому времени припой имеет мелкозернистую структуру, интерметаллиды в соединении отсутствуют.

На базе лазера ЛТН-102 разработан ряд автоматов лазерной пайки: ТС-1061 с ЧПУ от 8-дорожечной перфоленты через фотосчитывающее устройство FS 1501; "Квант-52" с управлением от ЭВМ "Электроника С5-21 М".

Для наблюдения за ходом процесса используется малогабаритная ТВ-система МТУ-1 на базе телевизора "Электроника-100", которая формирует увеличенное в 15 раз черно-белое изображение рабочей зоны и повышает удобство работы на установке и безопасность для зрения оператора.

Фирма Vanzetti Systems (США) выпускает установки лазерной пайки типа ILS - 7000, которые отличаются работой в прерывистом режиме с нагревом каждого соединения во время остановки координатного стола, а также способностью активно регулировать процесс нагрева по длительности в зависимости от тепловых характеристик соединения, определяемых количеством припоя. Для этого установки снабжены ИК-детектором, воспринимающим тепловое излучение от паяного соединения, цепью обратной связи и управляющей ЭВМ, которая помимо управления процессом выдает информацию о дефектных соединениях в форме распечатки. При диаметре пятна лазерного луча 0,6 мм пайка каждого вывода занимает 50 — 150 мс.

Рациональный выбор способов активации процессов пайки в производстве позволяет в наибольшей степени интенсифицировать процессы монтажа, повысить качество паяемых соединений. Активированные процессы пайки легко автоматизируются путем применения транспортных устройств и роботов-манипуляторов, управляемых с помощью микроЭВМ или микропроцессоров, что создает предпосылки перехода к безлюдной технологии производства.

## 10.7. ПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ ОПЕРАЦИИ ПРИ ГРУППОВОЙ ПАЙКЕ

К вспомогательным операциям процесса групповой пайки относятся: обезжиривание, нанесение маски, флюсование, удаление маски, отмывка флюса, сушка и контроль. При обезжиривании плату погружают в органический растворитель на 7—10 с так, чтобы верхняя сторона покрывалась слоем растворителя на 0,5—1 мм.

Защитные маски одноразового использования штампуют из бумажной ленты, покрытой клеем, смачивают водой с помощью пульверизатора, плотно прижимают к плате на 2—4 мин. После пайки платы бумажная маска удаляется промывкой в горячей воде. Маски многоразового использования изготавливают из нержавеющей стали, их прижимают к плате с помощью термостойкой резины. В настоящее время применяют защитные компаунды, которые являются маской в процессе пайки, а также влагозащитным покрытием. В составе компаундов, — эмаль, полимеризующий агент, вазелиновое масло. Жизнеспособность компаунда 3 ч.

Флюсование осуществляют следующими способами: погружением в ванну с флюсом, вращающимися щетками, напылением, волной или с помощью пены. Нанесение флюса погружением малопроизводительно, не обеспечивает однородного и равномерного покрытия платы флюсом, требует строго выдерживать глубину погружения платы во флюс. Поэтому данный метод используется в индивидуальном и мелкосерийном производстве.

Нанесение флюса вращающимися щетками обеспечивает механизацию процесса флюсования (рис. 10.21). Однако нерабочие части щеток, не погруженные во флюс, при остановке засыхают, ворс на них слипается.

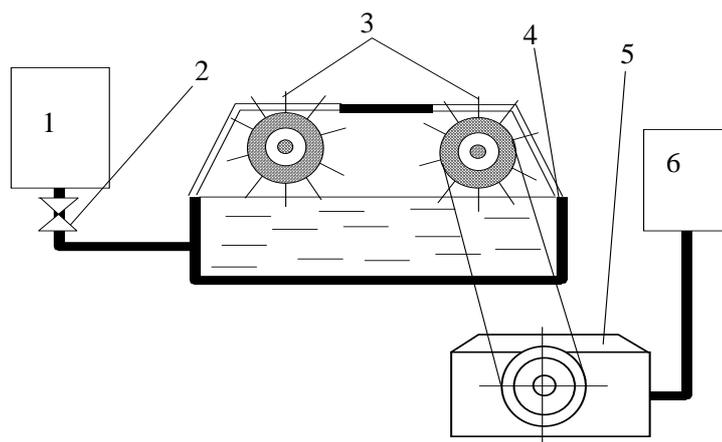
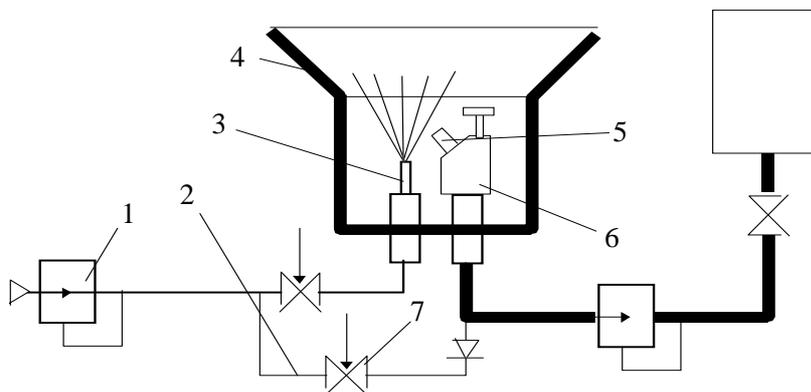


Рис. 10.21. Нанесение флюса вращающимися щетками:

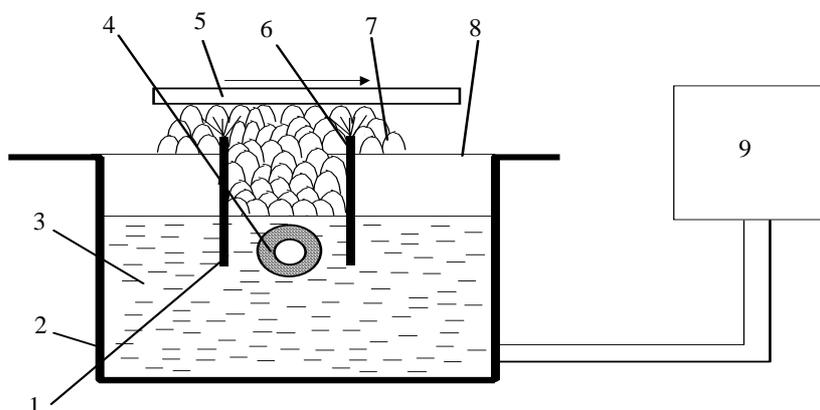
1 – емкость с флюсом; 2 – вентиль; 3 – щетки; 4 – ванна с флюсом; 5 – редуктор; 6 – электродвигатель

Нанесение флюса методом напыления с помощью одной пары сопел при расстоянии до платы 300 мм обеспечивает флюсование платы шириной до 100 мм. Для более широких плат применяют две и более пар сопел. В установке для нанесения флюса напылением (рис. 10.22) флюс из резервуара поступает через кран в электромагнитный клапан и оттуда в регулируемое жиклерное устройство и дозирующее сопло пульверизатора. Там флюс захватывается потоком воздуха, выходящим из воздушного сопла пульверизатора. Сжатый воздух подается через регулятор давления и ресивер. Магистраль 2 служит для продувки каналов клапана, жиклеров и сопла при их засорении остатками флюса.

Оборудование для нанесения флюса в виде пены (рис. 10.23) состоит из внутреннего 1 и наружного 2 резервуаров, соединенных между собой таким образом, чтобы жидкий флюс 3 свободно перетекал из одного отсека в другой. Во внутреннем резервуаре установлены жестко связанные между собой вспенивающие элементы 4, выполненные из пористых материалов (керамики, фетра, войлока) в виде дисков, трубок.



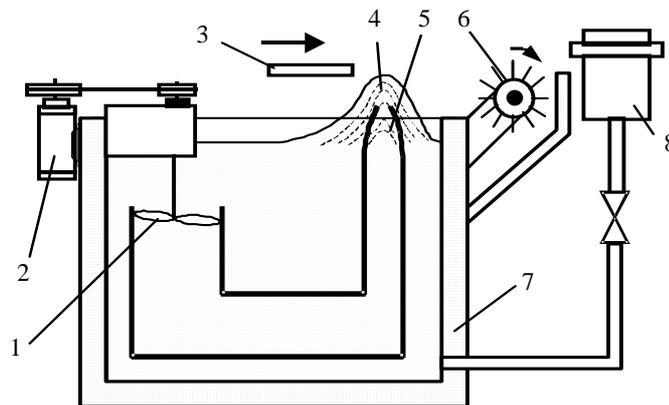
**Рис. 10.22. Нанесение флюса распылением:**  
 1 – электромагнитный клапан; 2 – магистраль продувки; 3,5 – сопла; 4 – кожух; 6 – жиклер;  
 7 – регулятор давления



**Рис. 10.23. Схема установки для нанесения флюса в виде пены:**  
 1, 2 – резервуары; 3 – флюс; 4 – вспенивающий элемент; 5 – плата; 6 – щетки;  
 7 – пена; 8 – сетка; 9 – емкость с флюсом

При подаче через отверстие в элемент 4 сжатого воздуха флюсующий состав во внутреннем резервуаре вспенивается выходящим воздухом в виде "шапки пены" 7 и поднимается над резервуаром. Наружный резервуар закрывается сеткой 8, которая способствует ускоренному превращению пены снова в жидкость. Для поддержания равномерного уровня поверхности пены над выходным отверстием используют вертикальные щетки 6. Расход флюса восполняется из емкости 9. Весьма важным фактором для образования равномерного по высоте гребня пены является однородность размеров ячеек пористого материала, из которого изготовлены вспенивающие элементы 4.

Устройство для образования волны флюсующей жидкости (рис. 10.24) имеет вращающуюся крыльчатку, нагнетающую жидкость в специальный канал, на выходе которого образуется стоячая волна флюса. Регулирование высоты волны осуществляется изменением числа оборотов электродвигателя. Скоростной напор потока флюса позволяет не только покрывать флюсом нижнюю сторону платы, но и обеспечивает проникновение его в металлизированные отверстия многослойных плат. Излишки флюса удаляются с платы щеткой. Недостатки устройства — его сложность, увеличенные габариты линии пайки.



**Рис. 10.24. Нанесения флюса с помощью волны:**  
 1 – крыльчатка; 2 – электродвигатель; 3 – плата; 4 – волна; 5 – канал; 6 – щетка;  
 7 – ванна; 8 – емкость с флюсом

Подсушка флюса перед пайкой в сочетании с предварительным подогревом печатных плат во многом определяет качество паяных соединений, особенно в крупносерийном и массовом автоматизированном производстве. Поскольку в состав флюсов в качестве растворителей входят спирт и вода с температурами кипения 80 и 100 °С соответственно, то при соприкосновении жидкого флюса с расплавленным припоем при температуре 230—250 °С происходит бурное кипение флюса с образованием значительного количества газов и паров. За счет этого в припое образуются газовые раковины и паровые "карманы", приводящие к пористости соединений. Кроме того, поверхностные слои припоя, контактирующие с жидким флюсом, за счет его испарения существенно охлаждаются, что ухудшает смачиваемость поверхности. Поэтому при подсушке флюса важно добиться полного испарения растворителя из флюсующего состава. Такая задача решается нагревом нижней (паяемой) поверхности плат до температуры 85 °С, если растворителем служит спирт, и до 100 °С, если растворителем является вода. В результате предварительного подогрева плат перед пайкой уменьшается тепловой удар в момент соприкосновения платы с расплавленным припоем, что снижает коробление плат при пайке.

Нагрев плат осуществляют в камерах радиационной сушки, где тепловое излучение от ИК-лампы отражается с помощью рефлектора и направляется на плату вентилятором, что создает конвективный поток воздуха. Недостатки подобного устройства — стекание остатков флюса и возникновение дымления, что снижает интенсивность ИК-излучения. Чтобы избежать этого, радиационные излучатели 1 (рис. 10.25) располагают под углом к горизонтальной поверхности платы 2, а для излишков флюса устанавливают специальные сборники 3, которые легко чистить.

Для защиты поверхности расплавленного припоя применяют специальные жидкости, которые кроме защиты от окисления выполняют ряд функций: восстанавливают оксиды меди; снижают поверхностное натяжение припоя и увеличивают его смачивающую способность; уменьшают наплавы припоя на широких проводниках, а также сокращают количество таких дефектов, как перемычки и сосульки; позволяют на 10—20 °С снижать температуру пайки, что уменьшает тепловое воздействие на полупроводниковые приборы.

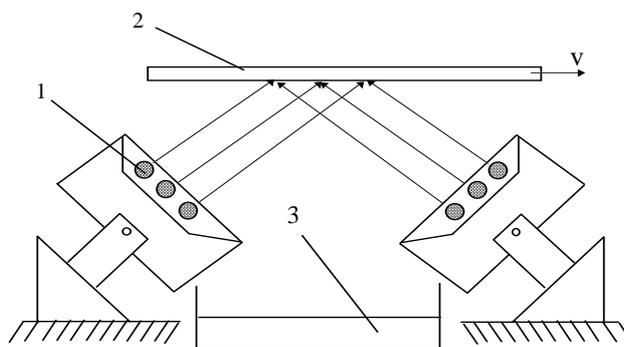


Рис. 10.25. Подогрев плат в камере боковыми нагревателями

Основными компонентами защитных жидкостей являются: минеральные масла на основе углеводов с высокой термической стабильностью, жировые масла растительного или животного происхождения, обладающие смачивающими свойствами, кремнийорганические жидкости и др.

Защитная жидкость должна обладать следующими свойствами: температура вспышки в открытом месте должна превышать температуру пайки (для ТП-22 температура вспышки 230 °С, а самовоспламенения 300 °С); обладать высокой термической стабильностью при температуре расплавленного припоя (230—260 °С), например в течение 1—2 смен работы линии пайки; слабо испаряться (не более 3—4 %) в течение смены; не снижать электрические параметры платы; легко удаляться обычными растворителями; показатель кислотности свежей защитной жидкости не должен превышать 14 мг КОН.

В качестве защитных жидкостей при групповой пайке используют ЖЗ-1, ТП-22, ВМ-71, ЖЗФ-350, ЖЗК-400. Способы подачи жидкости в зону пайки могут быть различными: с помощью валика, соприкасающегося с волной припоя; капельным методом; внутрь объема припоя. Расход жидкости составляет 2—4 дм<sup>3</sup> за смену. Экономия припоя благодаря применению защитной жидкости достигает до 0,5 кг за смену.

Как правило, после пайки на плате остается еще некоторое количество флюса и продуктов его разложения. Они могут вызвать коррозию, деградацию паяных соединений и ухудшить электрические параметры схемы. Необходимость очистки платы после пайки определяется в зависимости от требуемой степени надежности аппаратуры, условий ее эксплуатации, назначения изделия. При использовании защитных масел очистка обязательна во всех случаях. Для очистки и промывки плат применяют различные растворители и составы, включая воду. Общее правило при этом заключается в следующем: моющие составы должны быть способны растворять как связующее вещество, так и основной материал флюса.

Удаление остатков канифольных флюсов осуществляют спиртом, спиртобензиновой смесью, трихлорэтиленом, четыреххлористым углеродом. Однако применяемые жидкости пожароопасны и токсичны. Широкое применение получили фтор- и хлоруглеродистые растворители — фреоны, которые негорючи, малотоксичны, химически стойки и являются универсальными растворителями. Обладая низким поверхностным натяжением, фреон проникает в углубления и под скопления загрязнений, а благодаря исключительной способности к смачиванию легко смачивает и вытекает из самых маленьких зазоров, захватывая частицы загрязнений. Особенно экономичны фреоны хладон-113 и Ф-114В с температурой кипения 47,57 и 47,25 °С соответственно.

В установке КР-1 очистку плат от канифольных флюсов ведут спиртофреоновой смесью (1:10) в ваннах предварительной и окончательной отмывки. Для интенсификации процесса очистки применяют подогрев и циркуляцию моющего раствора. Большую степень автоматизации очистки платы обеспечивает роботизированный комплекс "Прима-1", в котором автоматически поддерживаются заданные температура и время очистки. В двух ваннах предварительной и окончательной очистки непрерывно идет процесс регенерации растворителя,

что обеспечивает его полную замену через 2 ч. Содержание канифоли в ванне окончательной очистки не превышает 0,25 %. Очистка производится хладоном при вибрации промышленной частоты с амплитудой 0,1—1,5 мм. Весь цикл очистки не превышает 5 мин, в том числе предварительная сушка 1—2 мин, выдержка над ванной 0,5 мин, выдержка в каждой ванне 1—2 мин. Недостаток — нежелательные экологические последствия фреоновых технологий.

Очистка плат после пайки с применением водорастворимых флюсов производится горячей водой (50—60 °С) с добавками поверхностно-активных веществ (ПАВ). Очистка на роботизированной линии "Прибой-1" выполняется по следующей схеме: очистка в моющей среде — 10 мин, 60 °С; стекание раствора — 0,5 мин; ополаскивание в воде — 5 мин, 60 °С; ополаскивание в деионизованной воде — 5 мин, 25 °С; предварительная сушка — 30 мин, 60 °С; окончательная сушка — 180 мин, 25 °С. Эта технология очистки позволяет без снижения качества избавиться от спиртобензиновой и спиртофреоновой смесей, а также предотвратить загрязнения окружающей среды парами органических растворителей.

Контроль качества очистки от остатков паяемых флюсов проводят визуальным осмотром под микроскопом типа МБС-2 с увеличением в 8—10 раз, а также люминесцентным или кондуктометрическим методом. *Люминесцентный метод* основан на явлении флюоресцентного свечения веществ, входящих в состав флюсов (канифоли, салициловой кислоты и др.). Источниками излучения при облучении платы являются лампы СВД-129А, ПРК-5 со светофильтром УФС-6. Наличие загрязнений определяют по видимому свечению остатков на поверхности платы в темной камере: голубое — для канифоли марки "В" и салициловой кислоты, желтое — для канифоли марки "А". Точность метода — до 10 г/см<sup>2</sup>.

*Кондуктометрический метод* основан на измерении сопротивления дистиллированной воды до и после контрольной отмывки в ней проверяемых флюсов. Допускается снижение сопротивления до значения не более 2·10 Ом/см<sup>3</sup>.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Классификация и сравнительная характеристика способов групповой пайки.
2. Волновые способы групповой пайки и применяемое оборудование.
3. Методы и оборудование для пайки элементов с планарными выводами.
4. Технология пайки поверхностно-монтажных элементов.
5. Применение концентрированных потоков энергии для групповой пайки.
6. Вспомогательные операции при групповой пайке.

## 11. ВНУТРИ - И МЕЖБЛОЧНЫЙ МОНТАЖ

### 11.1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ К МОНТАЖУ

Под электромонтажными работами понимают совокупность технологических операций, обеспечивающих электрическое соединение элементов, сборочных единиц, входящих в блоки, комплексы, системы и изделия. Электрический внутри и межблочный монтаж ЭА в зависимости от сложности и конструктивного уровня аппаратуры выполняется одиночными проводами и кабелями, жгутами, жесткими и гибкими платами (рис. 11.1).

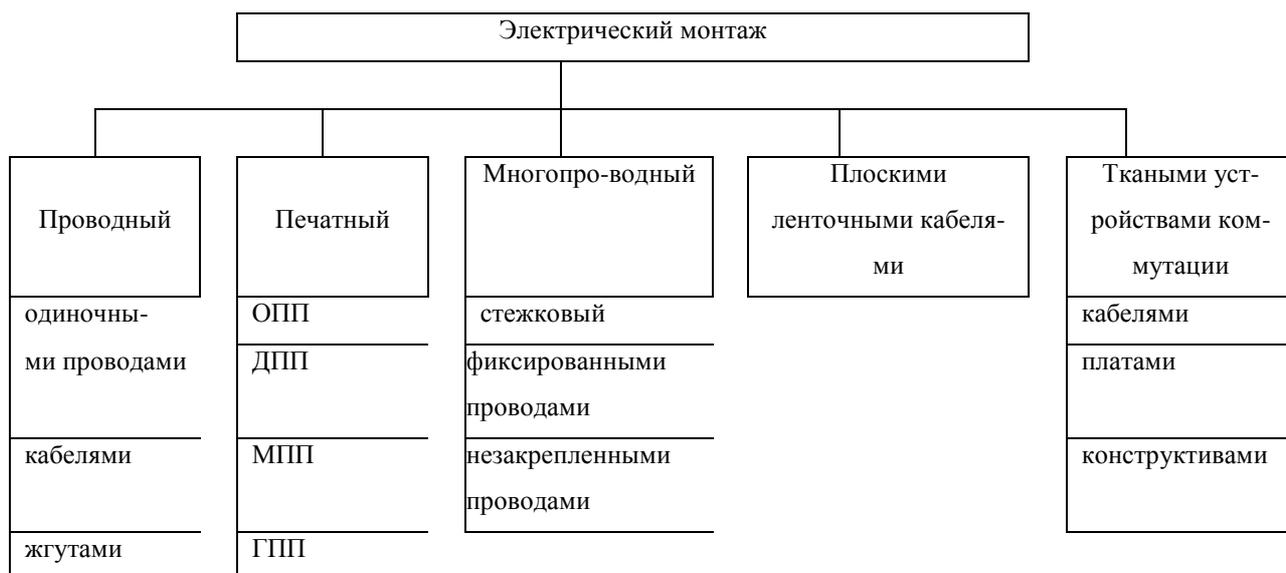


Рис. 11.1. Классификация методов монтажа

Выбор метода монтажа определяется требованиями, предъявляемыми к изготавливаемой аппаратуре, ее сложностью, учетом величины помех, которую обеспечивает система сложных проводников. Напряжение помех, вызванное электрическим монтажом, складывается из емкостной, индуктивной или гальванической составляющих. Емкостная составляющая определяется длиной, сечением и типом изоляции проводов, расстоянием между ними и земляными шинами, а индуктивная - рабочей частотой, длиной проводов и расстоянием между ними. Гальванические помехи возникают в цепях электропитания при завышении омического сопротивления токопроводящих шин. Для снижения этого вида помех провода питания выполняются плоскими, минимальной длины с поперечным сечением, соответствующим токовой нагрузке.

Проводный монтаж представляет собой электрическое соединение отдельных элементов и сборочных единиц при помощи одиночных изолированных проводников (кабелей) или системы проводников, объединенных в жгут. Он применяется для внутриблочного и межблочного монтажа аппаратуры. Наибольшая плотность монтажа - до  $300 \text{ эл/дм}^3$ . Монтаж одиночными проводами трудно механизировать и автоматизировать, поэтому доля такого монтажа в дальнейшем постоянно сокращается. Объединение проводов в жгут позволяет выполнять подготовительные операции параллельно со сборкой, использовать автоматизированное оборудование, обеспечить механическую прочность и стабильность параметров монтажных соединений при повышенных вибрационных и ударных нагрузках.

Печатный монтаж отличается высоким уровнем автоматизации и получил распространение для внутриблочного монтажа, выполняется на плоских диэлектрических основаниях и используется в качестве конструктивного элемента (печатной платы). Межблочный монтаж в конструктивных модулях третьего и четвертого уровня ЭА осуществляют путем соединения печатных плат гибкими шлейфами или ленточными кабелями. Наибольшая плотность монтажа элементов печатным монтажом достигает 1000 эл/дм<sup>3</sup>.

Многопроводные методы монтажа выполняются фиксированными или незакрепленными проводами, а также стежковым методом. Многопроводной монтаж фиксируемыми проводами (метод Multiwire) представляет собой упорядоченное прокладывание изолированных проводов по поверхности двухсторонних печатных плат с фиксацией их в слое адгезива. Монтаж осуществляется автоматически по программе с помощью специального оборудования и экономически целесообразен при макетировании в опытном и мелкосерийном производстве.

Монтаж толсто пленочными металлическими покрытиями осуществляется при изготовлении керамических многослойных плат, содержащих до 30 металлизированных слоев, соединенных между собой металлизированными отверстиями диаметром 0,12 мм с шагом 0,5 мм. На лицевой стороне платы размером 90x50x5 мм устанавливаются от 100 до 130 бескорпусных ИМС.

К проводному монтажу предъявляются следующие требования:

- минимальная длина электрических связей;
- обеспечение надежных электрических и механических контактов;
- технологичность при изготовлении и ремонте аппаратуры;
- высокая помехоустойчивость за счет применения экранов, заземление каждого экрана в отдельности, пересечения монтируемых высокочастотных цепей под углом, близким к 90°;
- соблюдение допустимых расстояний между оголенными участками проводов и металлическими поверхностями конструкций (не менее 3 мм для цепей с напряжением до 250 В, 5 мм для цепей свыше 250 В);
- подключение не более 2-3 проводов под один зажимной контакт и выбор сечения проводов в зависимости от токовой нагрузки;
- оголенные участки проводов должны иметь антикоррозионное или технологическое покрытие под пайку.

К проводам для жгутового монтажа предъявляют следующие требования: высокая механическая и электрическая прочность; гибкость, эластичность, возможность фигурной укладки; наличие цветной изоляции или маркировочных бирок на концах проводников; соответствие сечения провода и изоляции току нагрузки, допускаемому падению напряжения; наличие паяемых и антикоррозионных покрытий. Для фиксированного внутриблочного монтажа используют медные провода с волокнистой изоляцией из капроновых нитей (МШДЛ, МЭШДЛ, МГШ, МГШД), пластика (ПВХ, НВ, НВМ), с комбинированной волокнисто-полихлорвиниловой (МШВ, МГШВ, БПВЛ), полихлорвиниловой (ПМВ, МГВ), поливинилхлоридной (МКШ, МПКШ) и резиновой изоляции (ЛПРГС, ПРП, АПРФ, ПРГ). Монтаж при повышенной температуре ведут проводами в изоляции из стекловолокна (МГСЛ, МГСЛЭ). При повышенной температуре (до 250°С) и влажности используют провод во фторопластовой изоляцией (МГТФ), для аппаратуры, работающей в интервале температур -60 - +40°С - провода в шланговой оболочке из морозостойкой резины марок РПД и РПШЭ.

Монтажные провода поставляются в бухтах. Часть монтажных проводов, в первую очередь с резиновой изоляцией, имеют луженые токопроводящие жилы, что ускоряет процесс подготовки проводов для монтажа. При выборе цвета изоляции монтажных проводов и их обозначений на электромонтажных схемах рекомен-

дуются учитывать назначение электрической цепи. Помимо цвета провода могут различаться при помощи бирок, липких лент или путем нанесения маркировочных обозначений непосредственно на изоляцию проводов. (Например, красный - для цепей с высоким положительным потенциалом, синий - с отрицательным потенциалом, желтый - питание переменным током, черный - нулевое значение потенциала и т. д).

Наибольшее применение получила маркировка при помощи маркировочных бирок, изготовленных из полихлорвиниловых трубок. Бирку закрепляют на конце провода таким образом, чтобы она перекрывала обрез его изолирующей оплетки на 1-3 мм и не сползала при тряске и вибрации. Изготовление бирок включает маркировку, сушку и отрезку полихлорвиниловых трубок и осуществляется на специальных автоматах.

## 11.2. ПОДГОТОВКА ПРОВОДОВ К МОНТАЖУ

Подготовка проводов к монтажу включает следующие операции: мерную резку, удаление изоляции и заделку концов проводов, маркировку, облуживание и свивание проводов. Мерную резку проводов вручную выполняют ножницами, кусачками, определяя длину провода по шаблону. В мелкосерийном производстве эта операция механизмуется с помощью устройств мерной резки (рис. 11.2). Приспособление состоит из упора 1 с закрепленной на нем стрелкой 4. Упор жестко крепится на столе 7 гайкой-барашком так, чтобы стрелка 4 совпадала с делением линейки 8. Резка производится между отверстиями в неподвижном 2 и подвижном 3 дисках путем поворота диска 3 вручную рукояткой 5. Диск 3 возвращается в исходное состояние с помощью пружины 6. Приспособление позволяет получить точность нарезки  $\pm 0.7$  мм. В других конструкциях вращение диска осуществляется электродвигателем.

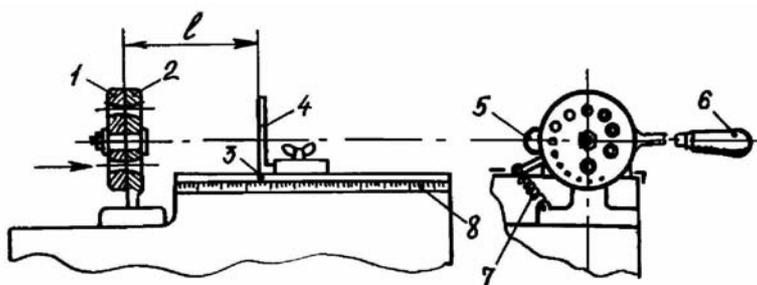


Рис. 11.2. Устройство мерной резки

Резку проводов (различных марок и сечений) длиной от 50 до 1350 мм и зачистку концов обжигом пластиковой изоляции по концам на расстоянии 5-10мм при массовом производстве выполняют на специальных автоматах (рис. 11.3). Провод с катушки 1 протягивается через механизм предварительной подачи 2, роликовый механизм рихтовки 3, мерный ролик 4, механизм подачи (ролики 5,6), механизм зажима 8,9, механизм обжига 7 к механизму резки 10. При достижении заданной длины ведущие подвижные ролики 5 отходят от ведущих неподвижных роликов 6 с помощью пневмосистемы, но происходит фиксация провода зажимами 8 и 9. После этого механизм обжига 7 наджигает изоляцию провода в двух местах. Далее провод разрезается отрезным ножом 10 и выталкивается захватом 9 с помощью пневмосистемы в тару 11. Производительность автомата достигает 2000 шт/ч.

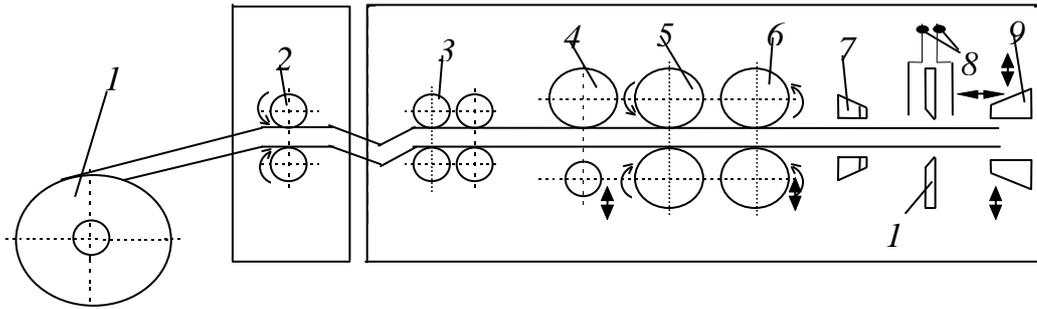


Рис. 11.3. Схема автомата подготовки провода

Зачистка проводов от изоляции должна обеспечить технологичность монтажа и надежность контактного соединения. Для большинства соединений зачистку осуществляют на длину 7-10 мм, для многожильных проводов - 10-15 мм (рис. 11.4). Изоляцию проводов удаляют:

- МГВ, МГВЛ, МГВЛЭ, МГВСЛ - электрообжигом;
- МГСЛ (с внутренней изоляцией из стекловолокна) надрезом на автомате, специальными щипцами;
- МГТФ, МГТФЛЭ (термостойкая фторопластовая изоляция) надрезом;
- ЛПЛ (х/б пряжа), МОГ (шелк, капрон), МГТЛ (лавсановая) электрообжигом;
- МШВ, МГШВ (пленочная и волокнистая изоляции) - электрообжигом;
- эмалевую изоляцию с проводов ПЭТ, ПЭЛ - шлифовальной шкуркой, шабером;
- ПЭВ и ПЭМ - погружением в муравьиную кислоту и протиркой бязью;
- многожильных ЛЭШО и ЛЭШД - нагревая в верхней части пламени спиртовой горелки и погружая в спирт с последующей протиркой бязью, либо погружением в расплав солей (хлористый калий) при температуре 768° С на 1-2с.

Для зачистки изоляции применяют специальные приспособления, удаляющие изоляцию обжигом и стягиванием съемником изоляции (рис. 11.5). Основными рабочими органами являются нить накала 3 и губки-ножи 2. Нить прожигает изоляцию при повороте провода 1 вокруг оси. Губки являются опорой для провода при прожигании изоляции, предохраняют ее от обугливания, обеспечивают снятие изоляции. Для исключения над-разов губки полируются и имеют радиус скругления 0,08 мм.

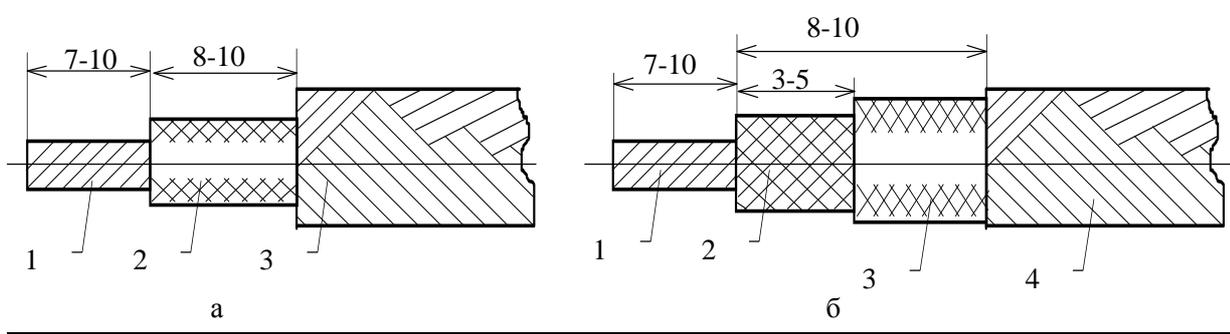


Рис. 11.4. Разделка концов проводов:  
с пластиковой (а) и комбинированной (б) изоляцией

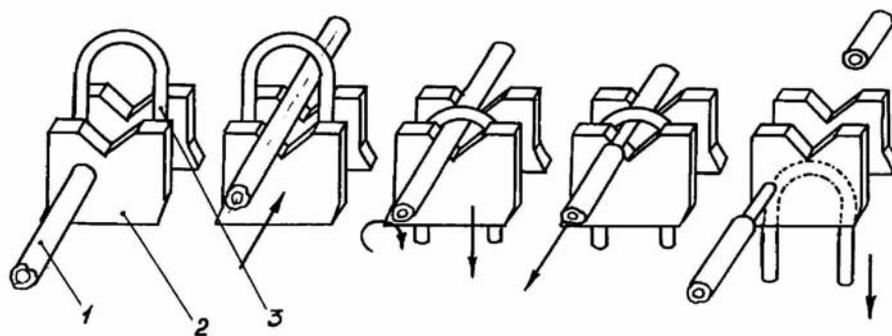


Рис. 11.5. Схема удаления изоляции обжигом

Термомеханический способ позволяет снимать изоляцию в один прием с проводов сечением 0,07-0,35 мм<sup>2</sup>. Рабочее место при этом должно быть оборудовано местной вентиляцией. Недостатки тепловых методов удаления изоляции: возможны пережоги провода, образование окисной пленки, выделение вредных газов.

К механическим приспособлениям, предназначенным для снятия любой изоляции, относится устройство с механическими щетками, которые вращаются при помощи электродвигателя в противоположных направлениях. Зазор между щетками регулируется. Время зачистки изоляции 2-3 с., производительность 150-300 проводов/час, длина снимаемой изоляции 5-20 мм. Недостатки механического способа: уменьшение диаметра, насечки, скручивание, трудности при обработке проводов малого диаметра 0,02-0,05 мм.

В связи с развитием более совершенных методов объемного монтажа все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация подготовки проводов к монтажу. Примером является автомат для мерной резки, зачистки изоляции и лужения проводов марки МШВ, МГШВ, МГВ на длину от 40 до 300 мм (рис. 11.6), который состоит из цепной передачи 1, укладчика провода 4, совершающего качательное движение, катушки с запасом провода 5, щеток 2, зоны обжига изоляции 3, зоны флюсования 6, лужения 7, влагозащиты 8, ножей 9. При перемещении цепей и качании раскладчика провод, сматываясь с катушки, перемещается вместе со штырьками цепи, попадает в зону обжига изоляции 3, затем щетками 2 снимается окисная пленка, флюсование осуществляется войлочным валиком 6. Лужение происходит в волне припоя 7, влагозащита - в ванночке 8 с вращающимся войлочным роликом, а затем ножами 10 провод отрезается. Заделку концов изоляции с волокнистой изоляцией осуществляют с помощью нитроклея, путем одевания полихлорвиниловых трубок или наконечников из пластмасс, нитками (оклетневка). Оклетневка состоит в наматывании

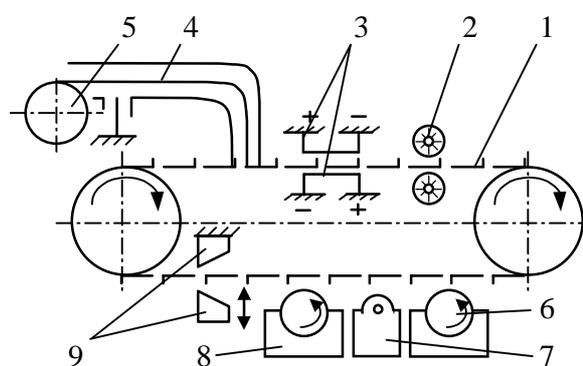
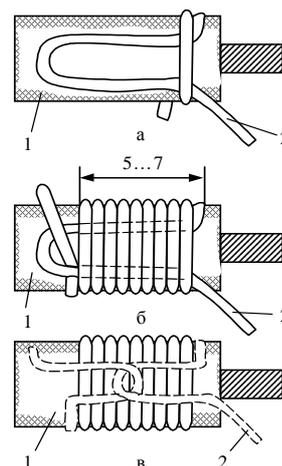


Рис. 11.6. Схема автомата для подготовки проводов

Рис. 11.7. Закрепление изоляции провода ниткой: 1 – провод, хлопчатобумажная нитка



вании на изоляцию слоя цветных хлопчатобумажных или шелковых ниток, которые затем покрывают клеем БФ-4 или нитролаком.(рис. 11.7)

Для отрезания трубок необходимой длины применяют станки, работающие в автоматическом цикле (рис. 11.8). Трубка 1 проходит через направляющую втулку 2 и попадая на сменный ведущий ролик 10 прижимается резиновым валиком 3. Далее вращением шестерен 4 и 7 трубка подается во вторую направляющую втулку 5 и на лезвие подвижного ножа 6 и неподвижного ножа 9, при помощи которых изоляционная трубка отрезается. Производительность станка - 300000 заготовок/смену. Он позволяет разрезать трубки диаметром 2-6 мм на отрезки длиной от 8 до 20 мм.

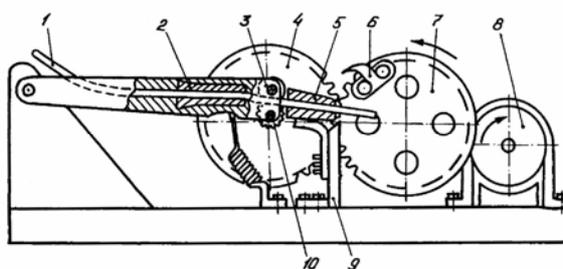


Рис. 11.8. Станок для отрезания изоляционных трубок

Для снятия экранирующей оплетки с кабелей применяется установка СЭ-1, работающая по принципу винтового среза оплетки с помощью вращающихся фрез и неподвижных ножей (рис. 11.9). Перемещением втулки 1 устанавливают расстояние между ножами 2. Кабель 4 подается в отверстие втулки до упора 5. Фрезы 3, вращаясь навстречу движению провода, загибают экранирующую оплетку 6, которая срезается, попадая в зазор между зубьями фрез и ножами. Круговой срез обеспечивается поворотом провода вокруг оси. Установка для снятия экранирующей оплетки с концов монтажных проводов типа МГВШЭ, БПВЛЭ диаметром по оплетке 1-5 мм имеет производительность 600 заготовок/ч.

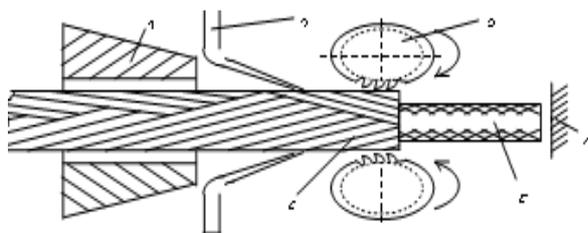


Рис. 11.9. Схема установки для снятия экранирующей оплетки

Разделку концов экранирующей оплетки, обеспечивающую подключение ее к корпусу выполняют следующими способами:

- протаскиванием конца провода через отверстие, сделанное в оплетке на расстоянии 20 мм от конца и подключение свободной части оплетки к корпусу;
- подпайкой к оплетке дополнительного провода.

Лужение монтажных проводов осуществляют путем погружения оголенных участков в ванны с припоем ПОС61, ПОС61М при температуре 250-260 С в течение 1-4 с с использованием флюсов ФКСп, ФКТ. Для ВЧ кабелей с нетеплостойкой изоляцией применяется припой ПОСВ-33 при температуре 170-190 С.

### 11.3. ТЕХНОЛОГИЯ ЖГУТОВОГО МОНТАЖА

Конструкции жгутов определяются особенностями конструкций аппаратуры и требованиями к обслуживанию. Жгуты делятся на межблочные и внутриблочные, которые, в свою очередь подразделяются на простые (прямые) (а), с ответвлениями (б), сложные (в), с замкнутыми ветвями (г) (рис.11.10).

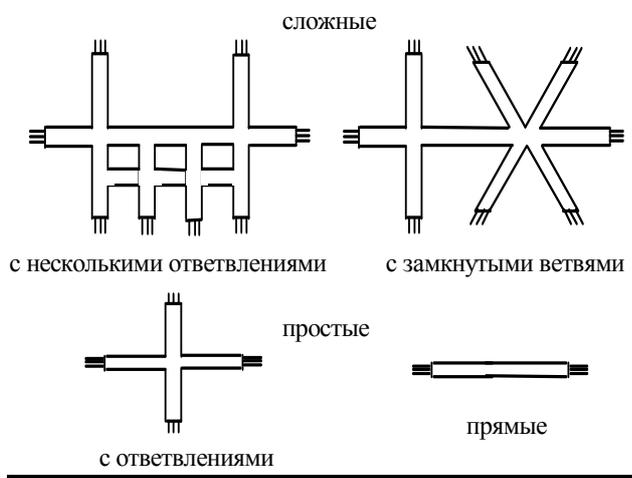


Рис. 11.10. Виды жгутов



Рис. 11.11. Рабочее место жгутового монтажа

В зависимости от конструкции жгута для его изготовления применяют плоские и объемные шаблоны. Плоский шаблон представляет собой основание из изоляционного материала, на котором нанесен рисунок жгута и в соответствии с трассировкой расположены металлические шпильки, на которые надеты изоляционные трубки (рис.11.11). Для фиксации концов проводов предусмотрены специальные зажимы. Между шпильками производят укладку монтажных проводов.

Повышение производительности изготовления жгутов и исключение ошибок монтажа достигают применением электрофицированных шаблонов, в которых концы монтажных проводов фиксируются специальными зажимами, электрически связанными с сигнальными лампочками. Лампочки и зажимы коммутированы таким образом, что при правильной укладке и фиксации провода загораются поочередно лампочки 1-й, затем 2-й трассы и т.д (рис. 11.12). Провод прокладывается по трассе шаблона, лампочки при этом гаснут, а загорается красная контрольная лампочка, подтверждающая правильность укладки. Например, при подаче питания 6,3 В загораются две зеленые лампочки ЛЗ1 и ЛЗ2. При закреплении конца провода кнопкой-зажимом КН1 мы размыкаем контакты 1 и 2 цепи питания лампочки ЛЗ1 и 3-4 ЛЗ2. При этом загорается красная контрольная лампочка ЛН1 и лампочки ЛЗ3 и ЛЗ4 для следующей цепи.

Первоначально разработку конструкции жгута осуществляют на макете. Укладывают провода согласно монтажной или принципиальной схеме, концы проводов маркируют с двух сторон бирками с указанием номера трассы (1-2; 1-6; 3-5 и т. д.), после чего измеряют их длину и заносят данные в таблицу монтажных соединений. (Например, при соединении контактов реле Р2 с разъемом Ш1 (табл. 11.1)).

Таблица 11.1

Таблица монтажных соединений

№ провода	Марка провода	Сечение провода, мм	Длина провода, мм	Трасса соединений
-----------	---------------	---------------------	-------------------	-------------------

1-2	МГШВ	0,5	30	1Р2-2Ш1
1-3	БПВЛ	1,0	160	2Р2-3Ш1
1-4	—//—	—//—	250	5Р2-5Ш1
1-5	—//—	—//—	290	4Р2-6Ш2

При раскладке жгутов соблюдают следующие правила: экранированные провода должны быть внутри жгута, поэтому с них начинают раскладку; внутри жгута укладывают короткие провода малых сечений; длинные провода укладывают снаружи с образованием лицевой стороны; шаг вязки жгутов  $t$  выбирают в зависимости от сечения жгута, числа проводов  $n$  и диаметра жгута по (табл. 11.2). Кроме того:

- концы жгута должны иметь бандажи и оконечные узлы;
- для защиты от механических повреждений жгут по всей длине или на отдельных участках обматывают изоляционной лентой;
- жгут на каркасе крепят металлическими скобками с установкой под ним изоляционных трубок или прокладок из лакоткани (длина закрепления 150-200 мм);
- отверстия в каркасе, через которые проходят жгуты, должны иметь закругленные кромки и резиновые втулки;
- при пайке проводов жгута обязательно применяют их механическое крепление на контактных лепестках, путем продевания в отверстие лепестка и загибки.

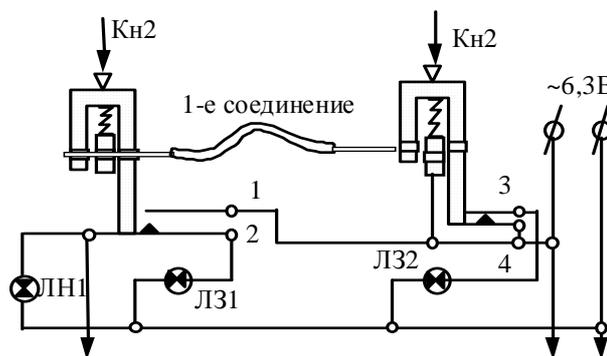


Рис. 11.12. Схема электрофицированного шаблона

Таблица 11.2

#### Шаг вязки жгутов

Сечение провода менее 0,33 мм <sup>2</sup>		Сечение провода более 0,33 мм <sup>2</sup>	
$n$ , шт	$t$ , мм	$n$ , шт	$t$ , мм
5	5-10	10	15-20
5-15	10-12	11-30	8-30
16-20	13-18	>30	30-40
>20	25		

Если аппаратура предназначена для работы в условиях тряски и вибрации, концы проводов огибают вокруг лепестков на 1-2 оборота и обжимают. Запрещается паять незакрепленные концы (встык и внахлестку). Для большинства монтажных соединений, допускающих нагрев до 280°C применяется припой ПОС-40, для наиболее ответственных соединений применяют припой ПСр 2,5, который содержит 2,5% Ag, 5,5% Sn и 92% Pb и имеет температуру кристаллизации 305°C. Для пайки проводов, допускающих нагрев до 230°C применяют припой ПОС-61.

Для снижения трудоемкости процесс вязки жгутов механизмируют, используя пневматические пистолеты. Автоматизация процесса вязки осуществляется на специальных станках, автоматах или полуавтоматах, управляемых с ЭВМ. Последовательность вязки жгутов следующая:

- в исходном состоянии игла 1 располагается в крайнем нижнем положении, нитедержатель 2 - ниже в крайнем положении (рис.11.13а);
- при подаче воздуха в пневмопистолет, происходит перемещение штока с иглой, разрезное зубчатое колесо 3 с нитедержателем поворачивается на 72 градуса (рис. 11.13б);
- как только кнопка отжата, плоская пружина возвращает золотник пистолета в исходное положение, сжатый воздух снова начинает поступать в заднюю полость пневмоцилиндра, а разрезное зубчатое колесо поворачивается по часовой стрелке еще на 72 градуса, подводя нитедержатель к игле (рис. 11.13в);
- далее игла захватывает нить, и, возвращаясь в среднее положение, протаскивает ее в петлю. При перемещении иглы вниз происходит затягивание узла и образование новой петли (рис 11.13г).

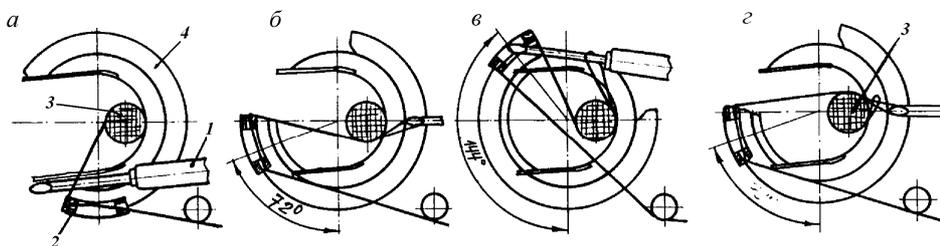


Рис. 11.13. Последовательность механизированной вязки жгутов

Для механизации операций изготовления жгута в условиях серийного производства используют конвейерные линии. В этом случае технологический процесс разбивают на ряд простых операций, например, на одном рабочем месте осуществляют раскладку проводов одного сечения и марки. Такт работы составляет 5-7.5 с. Конвейер для изготовления жгутов замкнут в горизонтальной плоскости и транспортирует шаблоны с помощью тележек. Он оснащается пистолетами для вязки жгутов, приспособлениями для снятия изоляции и лужения.

Для раскладки жгутов разработан автомат с программным управлением модели KL-327, выполняющий следующие операции: выбор провода и подготовку его к раскладке по расцветке и сечению; крепление начала проводника обмоткой вокруг шпильки на шаблоне; раскладку провода; обрезку провода.

Автомат раскладывает провода марки МГШВ сечением до 0,5 мм<sup>2</sup> со скоростью 10 м/мин. Наибольшее количество раскладываемых цепей - 102 шт., габариты жгутов - до 1000\*400 мм.

Для изготовления жгутов используют РТК, которые включают: робот-манипулятор (PM-01), универсальный шаблон, сменную оснастку робота: схваты, механизм раскладки провода. Средняя скорость укладки проводов не менее 0,25 м/с.

#### 11.4. МОНТАЖ ПЛОСКИМИ ЛЕНТОЧНЫМИ КАБЕЛЯМИ

Плоские ленточные кабели (ПЛК) применяют для электрического межблочного монтажа в ЭВМ и другой электронной аппаратуре. Кабели обеспечивают передачу высокочастотных сигналов с высокой стабильностью характеристик, обладают достаточным теплоотводом, устойчивы к климатическим воздействиям. Исполь-

зование плоских кабелей позволяет уменьшить габариты и массу аппаратуры, по сравнению с объемным монтажом, вести монтаж в трех плоскостях, чему способствует гибкость кабелей.

Основными элементами гибких кабелей являются многожильные ленточные проводники и специальные соединители. Плоские ленточные кабели могут быть опресованными, плетеными, ткаными и печатными. Ленточные опресованные кабели имеют токоведущие жилы из меди с гальваническим покрытием серебром, оловом или никелем, которые изолированы друг от друга методом опресовки в пластмассовую ленту из обычного или облученного полиэтилена, поливинилхлорида, полиимида, лавсана или стекловолкна. Они выпускаются марок ПЛП и КППР для фиксированного внутри- и межблочного монтажа, ПЛПМО - для монтажа подвижных устройств, ЛЛПС - для монтажа цепей, работающих при напряжении 115 В и частоте 5000 Гц, ПЛМ - для фиксированного монтажа ПП. Ленточные высокочастотные кабели с группами жил типов ПВП и ЛПВЛ применяют для монтажа блоков ЭВМ с электрическим напряжением до 100 В и частотой до 1 кГц.

Ленточные плетеные провода марок ЛФ и ЛФЭ имеют токоведущие шины, скрученные из медной посеребрянной проволоки, расположенные в один ряд и скрепленные нитью, пропитанной лаком. Они предназначены для работы в цепях с напряжением до 100 В и частоте 5 кГц.

Ленточные тканые провода изготавливают из обычных монтажных проводов марок МГШВЭ, МГШП, МГТФ, с саржевым переплетением плотностью 8-10 нитей на 1 см длины.

Гибкие печатные кабели представляют собой систему печатных проводников, расположенных на диэлектрическом основании. Их изготавливают из фольгированных гибких диэлектриков марок ФДМ-3, НС-1, ФД-1 химическим методом. Многослойные печатные кабели получают прессованием нескольких однослойных или на двухсторонних ПП с металлизированными монтажными отверстиями.

Подготовка ленточных проводов к монтажу включает мерную резку, удаление изоляции с концов провода, нанесение покрытия на оголенные токоведущие жилы. Удаление изоляции осуществляют механическим, термомеханическим и химическим методами. Механическую зачистку ленточных проводов с фторопластовой изоляцией, имеющей слабую адгезию с токоведущими шинами, осуществляют строганием с продольным перемещением резца. Резец по ширине больше ленточного провода и удаляет изоляцию в течение нескольких секунд. Применяют возвратно-поступательное движение резца шириной 2-2.5 мм с углом при вершине 30 град., который удаляет изоляцию полосками, равными ширине резца (рис. 11.14).

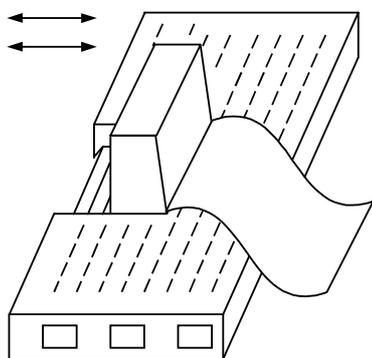


Рис. 11.14. Механическое удаление изоляции с ленточного провода

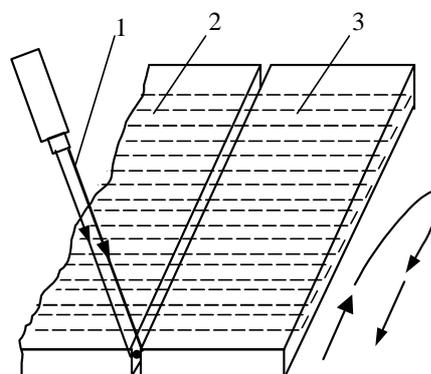


Рис. 11.15. Удаление изоляции с ленточного провода с помощью лазера

Изоляцию также удаляют путем шлифования абразивными кругами. Круги из стекловолна диаметром 30-55 мм вращаются со скоростью до 45 м/с. В результате абразивного и теплового воздействия происходит размягчение термопластичной изоляции и механическое удаление ее вращающимися кругами.

Примером термического удаления изоляции является лазерная зачистка. Сфокусированный луч лазера 1 испаряет изоляцию на небольшом участке ленточного провода 2, затем удаляемый участок 3 легко механически снять с провода (рис. 11.15). Мощность лазерной установки 30 Вт, скорость удаления 0,09-0,36 м/мин.

Для защиты медных токоведущих жил ленточного провода от окисления и для обеспечения пайки или сварки на них наносят гальванические покрытия никелем, золотом, сплавами серебро-сурьма, олово-висмут.

В процессе сборки и монтажа ленточных кабелей применяют неразъемные и разъемные электрические соединения проводов. Неразъемные обеспечивают постоянные внутриплатные, межплатные, межблочные, межкабельные соединения, разъемные - возможность периодического подключения и отключения ленточного кабеля к печатной плате. Неразъемные монтажные соединения выполняют пайкой, сваркой, обжиганием, врезанием, накруткой. Для разъемных применяют различные по конструкции разъемы.

Паянные неразъемные межкабельные соединения получают с помощью термоусадочных паяльных муфт типа "термофит" (рис. 11.16). Муфта состоит из изоляционной оболочки 3, кольца припоя 2, содержащего флюс и двух уплотнительных герметизирующих колец. Оболочку из термоусадочного материала (поливинилхлорид, фторопласт, политетрафторэтилен) формуют и подвергают гамма-облучению, в результате которого в структуре материала возникают поперечные связи в молекулярных цепях, а материал приобретает свойство термоусадки, т.е. после быстрого нагревания дает усадку до первоначальных размеров перед размягчением.

В муфту с двух сторон вводят соединяемые проводники и нагревают ее в тепловом рефлекторе или источнике ИК облучения. В процессе нагревания происходит расплавление кольца припоя и его деформация, усадка оболочки и получение изолированного герметизированного соединения. Уплотнительные кольца могут иметь и плоскую прямоугольную форму для соединения ленточных проводов с плоскими шинами.

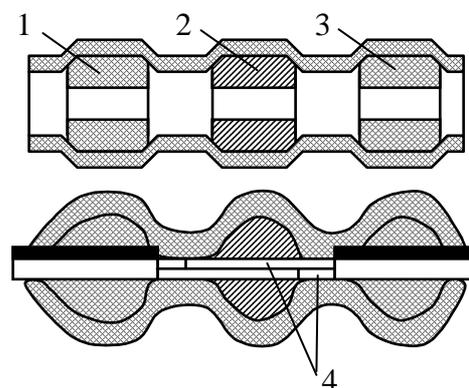


Рис. 11.16. Соединение ленточных проводов паяльными муфтами (а), загерметизированное соединение (б)

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Классификация методов электрического монтажа и основные требования к нему.
2. Способы подготовки проводов к монтажу.
3. Жгутовой монтаж радиоэлектронной аппаратуры.
4. Монтаж плоскими ленточными кабелями.

## 12. ТЕХНОЛОГИЯ РЕГУЛИРОВКИ И ТРЕНИРОВКИ

### 12.1. МЕТОДЫ РЕГУЛИРОВКИ

Под *регулировкой* понимают комплекс работ по доведению параметров устройств до значений, соответствующих требованиям ТУ с заданной степенью точности. Целью регулировки является обеспечение заданных параметров устройства в пределах допуска, гарантирующего нормальную эксплуатацию, при наименьших затратах на регулировку и устранение неисправностей, допущенных при сборке и монтаже. Регулировочные работы включают:

- исправление неисправностей, возникших при сборочно-монтажных и регулировочных операциях;
- настройку резонансных систем (контуров) путем изменения параметров подстроечных элементов или с помощью магнитных сердечников;
- установку оптимальных режимов отдельных каскадов и всего блока в целом;
- сопряжение электрических, радиотехнических и кинематических параметров устройства и отдельных его блоков.

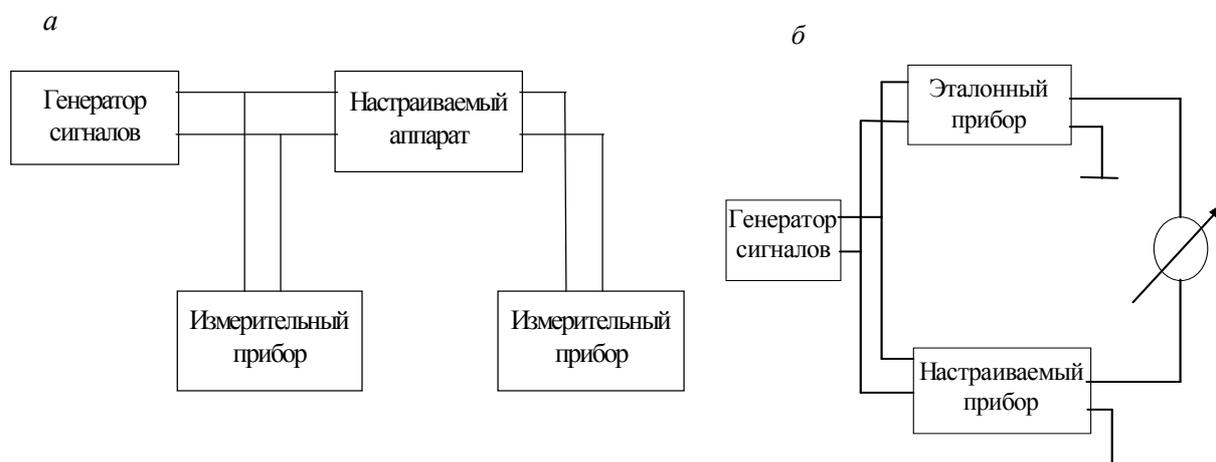


Рис.12.1. Схема методов регулировки:  
а – инструментального; б – электрического копирования

Различают технологическую (производственную) и эксплуатационную регулировки. В первом случае добиваются наилучших показателей всеми имеющимися регулировочными элементами при их среднем положении, во втором — с помощью эксплуатационных регулировочных элементов, вынесенных на лицевую или заднюю панель.

В зависимости от вида организации производства регулировку осуществляют с помощью универсальной измерительной аппаратуры или специальной регулировочной оснастки (стендов, имитаторов, пультов т. д.). При работе с ВЧ-блоками регулировку проводят в экранированных камерах, которые снижают уровень помех от внешних электромагнитных полей. При регулировке ЭА используют два метода: инструментальный (по измерительным приборам) и электрического копирования (путем сравнения настраиваемого прибора с образцом). Суть *инструментальной регулировки* (рис. 12.1, а) заключается в том, что на входе и выходе регулируемого объекта измеряют с помощью приборов электрические параметры и регулировочными элементами добиваются их оптимального значения. Общая погрешность настройки инструментальным методом

$$\sigma_{\text{и}} = (\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)K_1,$$

где  $\delta_1$  — погрешность измерительных приборов;  $\delta_2$  — температурная погрешность;  $\delta_3$  — погрешность, вызван-

ная старением прибора;  $\delta_4$  — погрешность, вызываемая неточностью поддержания режима питания прибора;  $K_1$  — коэффициент одновременного действия всех факторов.

Регулировка методом электрического копирования заключается в том, что производится сравнение эффекта воздействия электрического сигнала как на регулируемый объект, так и на объект, принятый за образец (рис. 12.1, б). При этом нет необходимости знать точные значения электрических параметров, возможно применение стендов для регулировки. При настройке прибора методом электрического копирования погрешность выражается формулой

$$d_K = (d'_1 + d''_2 + d''_3 + d''_4 + d''_5)K_2,$$

где  $d'_1 = (d_1 + d_2 + d_3 + d_4)K_1$  — погрешность образца;  $\delta''_5$  — ошибка метода сравнения;  $K_2$  — коэффициент одновременного действия всех факторов.

Исходя из погрешностей настройки по двум методам, имеем

$$(\delta_1 + \delta_2 + \delta_3 + \delta_4)K_1 = ((\delta'_1 + \delta'_2 + \delta'_3 + \delta'_4)K_2 + \delta''_1 + \delta''_2 + \delta''_3 + \delta''_4 + \delta''_5)K_3.$$

Полученное уравнение необходимо решить относительно  $\delta'_1$ . Примем некоторые допущения:  $K_1 = K_2 = K_3 = K_4$ ,  $\delta_5 = 0$ . При питании от одного источника  $\delta''_4 = \delta_4$ . С учетом этого уравнение примет вид

$$\delta_1 K = (\delta_1 + \delta'_2 + \delta''_2) - \delta''_3 - (\delta_4 - \delta''_4) = \delta_1 - \delta'_2 - \delta'_3,$$

откуда  $\delta'_1 = (\delta_1 - \delta'_2 - \delta'_3) / K$ . Это выражение определяет допустимую ошибку при регулировке РЭА методом электрического копирования.

Автоматизация регулировки заключается в периодическом изменении с помощью электромеханического привода регулируемого параметра в некотором диапазоне. При равенстве нулю частной производной  $dQ/dU_i$  (где  $Q$  — обобщенный показатель оптимальности,  $U_i$  — управляющее воздействие) определяется оптимальное значение параметра. Структурная схема автоматизированной регулировки фильтров и трансформаторов ПЧ радиовещательных приемников включает (рис. 12.2) генератор 1, фазовый датчик 2, фазовый детектор 3, к входу которого подключается регулируемый фильтр, исполнительное устройство 4, содержащее модулятор, усилитель мощности и электродвигатель с редуктором.

Регулировка осуществляется по образцовой амплитудно-частотной характеристике (АЧХ). В зависимости от фактической расстройки на выходе фазового детектора возникает напряжение рассогласования, управляющее исполнительным механизмом вращения сердечника катушки индуктивности.

## 12.2. НАСТРОЙКА И РЕГУЛИРОВКА ПАРАМЕТРОВ РАДИОПРИЕМНИКОВ

Качество радиовещательных приемников характеризуются их параметрами по ГОСТ 5651—82. В зависимости от этих параметров радиовещательные приемники подразделяются на классы, определяющие кроме технических характеристик также их стоимость, поэтому естественна ответственность предприятия за соблюдение гарантированных стандартом показателей. Качество в производственных условиях достигается правильным подбором и соблюдением технологического процесса в целом и процессом настройки и контроля приемника в особенности. Сложность настройки, электрического и электроакустического контроля обусловлена зависимостью параметров приемника от показателей разных его блоков, производимых часто на разных участках и в разное время, а также наличием большого количества разнообразных методов измерения и устройств.

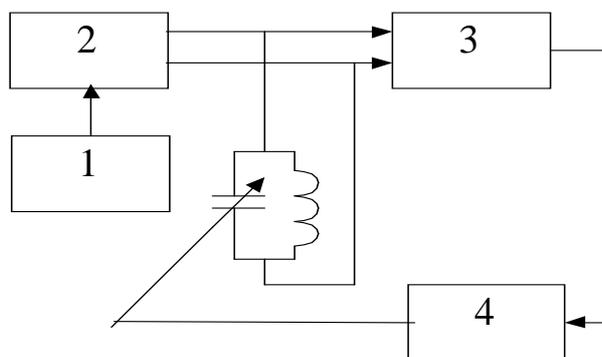


Рис. 12.2. Схема автоматизированной регулировки фильтров

Реальная чувствительность стационарных приемников определяется величиной сигнала высокой частоты (ВЧ) в микровольтах, модулированного частотой 1000 Гц с глубиной модуляции 30 % (для УКВ—девиацией 15 кГц) на входе эквивалента антенны, подключенного к приемнику, который обеспечивает на выходе приемника стандартную выходную мощность 50 мВт при отношении напряжения полезного сигнала к напряжению шумов не менее 20 дБ в диапазонах длинных, средних и коротких волн, и не менее 26 дБ в диапазоне УКВ. В случае переносных радиоприемников с внутренней антенной она задается напряженностью поля в милливольт на метр (мВ/м).

Реальная чувствительность определяется произведением коэффициентов усиления трех основных трактов приемника (низкой, промежуточной и высокой частот) и уровнем его внутренних шумов. Так как чувствительность тракта низкой частоты (НЧ) оговаривается особо (для обеспечения возможности пользования звукоснимателем и магнитофоном), а достаточно низкий уровень внутренних шумов гарантируется качеством транзисторов (ламп), то реальная чувствительность на производстве обеспечивается достаточным усилением трактов промежуточной и высокой частот (ПЧ и ВЧ). Усиление по тракту ПЧ доводится до максимума в процессе настройки катушек контуров ПЧ, а усиление по тракту ВЧ зависит от настройки катушек и подстроечных конденсаторов (триммеров) всех диапазонов радиоприемника, а также от идентичности всех секций блока конденсатора переменной емкости (КПЕ).

Эффективность встроенной или совмещенной с блоком приемника антенны диапазона УКВ выражается в децибелах и определяется отношением напряжений генератора стандартных сигналов (ГСС) с частотной модуляцией (ЧМ) 1000 Гц и девиацией 50 кГц, которые необходимы для создания на выходе приемника номинальной мощности. Первое измерение производится с применением в качестве антенны полуволнового диполя, расположенного на расстоянии 3 м от передающего диполя, питаемого от ГСС, а второе измерение — с помощью внутренней антенны радиовещательного приемника. Указанный параметр обеспечивается конструкцией встроенной в радиовещательный приемник антенны и настройке не поддается.

Избирательность или ослабление соседнего канала устанавливается только для диапазонов длинных и средних волн, выражается в децибелах и определяется как ослабление модулированного частотой 1000 Гц сигнала при его расстройке на 9 кГц. Решающим фактором обеспечения избирательности является форма АЧХ тракта ПЧ, которая окончательный вид приобретает в результате настройки тракта. Усредненная крутизна ската резонансной характеристики диапазона УКВ является показателем избирательности в этом диапазоне и выражается в децибелах на килогерц в интервале ослабления сигнала от 6 до 26 дБ (2 — 20 раз). Одновременно оговаривается ширина полосы пропускания в диапазоне УКВ на уровне 6 дБ. Непосредственная избирательность в диапазоне УКВ задается для расстроек на 120 и 180 кГц.

Названные показатели приобретают окончательные значения после настройки тракта ПЧ и блока УКВ.

Ослабление сигнала зеркального канала выражается в децибелах и определяется отношением уровней входного сигнала, необходимого для получения на выходе приемника стандартной мощности 50 мВт. Первое измерение производится при расстройке частоты источника сигнала относительно частоты приемника на удвоенную промежуточную частоту последнего, второе — при совпадении частот настроек источника сигнала и радиоприемника. Соответствие этого параметра техническим требованиям обеспечивается взаимодействием контура гетеродина, входных контуров и контуров УВЧ. Так как указанные элементы одновременно участвуют в создании реальной чувствительности радиоприемника, то при соблюдении ТП ослабление зеркального канала должно получаться автоматически.

Ослабление сигнала на ПЧ измеряется на частотах 370 и 560 кГц, выражается в децибелах и определяется отношением уровней входного сигнала, необходимого для получения на выходе приемника стандартной мощности 50 мВт, при подаче на вход сигнала, несущая частота которого соответствует ПЧ приемника, и сигнала, несущая частота которого соответствует настройке приемника (400 или 560 кГц). Этот параметр обеспечивается правильной настройкой одного или нескольких заграждающих фильтров. Они могут быть выполнены в виде запирающего фильтра (последовательно включенный параллельный контур) или пропускающего фильтра (параллельно включенный последовательный контур). Наиболее рациональное место их расположения с точки зрения настройки — блок ПЧ. Настройка фильтров обычно завершает процесс настройки данного блока.

Промежуточная частота характеризуется своим абсолютным значением и допуском. На производстве соблюдение этих допусков достигается использованием для настройки трактов ПЧ источников сигналов, центральная частота которых достаточно точна и стабильна.

Уход частоты гетеродина устанавливается для КВ- и УКВ-диапазонов стационарных радиоприемников. Причинами, которые могут вызвать уход частоты гетеродина, являются самопрогрев радиоприемника, изменение температуры окружающей среды, напряжения питания и уровня входного сигнала. Этот параметр обусловлен качеством радиодеталей и конструкцией радиоприемника.

Излучение гетеродина в УКВ-диапазоне характеризуется напряженностью поля на расстоянии 3 м от приемника, измеряемой в микровольтах на метр (мкВ/м) и не должно превышать установленного значения. Величина излучения зависит от электрической схемы и конструкции УКВ-блока. Некоторые приемники содержат настроечный элемент, регулировкой которого излучение гетеродина сводится до минимума. В остальных случаях соответствие этого параметра норме должно обеспечиваться конструкцией приемника.

Подавление сопутствующей амплитудной модуляции (АМ) в диапазоне УКВ в децибелах определяется отношением стандартной входной мощности от ЧМ-сигнала (частота модуляции 400 Гц, девиация 50 кГц) к мощности, создаваемой АМ (частота модуляции 1000 Гц, глубина модуляции 30 %). Наибольшее подавление сопутствующей АМ достигается симметрией дробного детектора.

Действие автоматической регулировки усиления (АРУ) в децибелах определяется тем предельным изменением напряжения на выходе, которое вызывается изменением входного сигнала с частотой 1 МГц. Естественно, что действие АРУ обусловлено режимом работы приемника, в частности его трактов ПЧ и ВЧ, и настройке не подлежит. Частотная характеристика всего тракта усиления (кривая верности) по звуковому давлению оговаривается ГОСТом как номинальная полоса звуковых частот, в которой неравномерность акустического давления не должна превышать значения, заданного стандартом для приемника соответствующего класса. Кривая верности обеспечивается взаимодействием всей акустической системы (не только громкоговорителей) приемника с трактом усиления. Этот параметр определяет минимальную ширину полосы пропускания тракта ПЧ, как избирательность лимитирует ту же полосу по ее максимуму.

*Среднее* (номинальное) *звуковое давление* в диапазоне воспроизводимых частот определяется как среднее

арифметическое звуковых давлений на тех из оговоренных ГОСТом частотах, которые входят в частотный диапазон приемника. Звуковое давление на каждой из оговоренных частот получается в результате модулированного сигнала, поданного на УКВ-вход приемника. Несущая частота сигнала 69 МГц, девиация 15 кГц, а мощность 1000 мВт. Регулятор громкости обеспечивает на выходе приемника мощность, не превышающую его максимальную мощность, т. е. такую, при которой коэффициент гармоник равен 10 %. При отсутствии диапазона УКВ возбуждающий сигнал звуковой частоты подается на вход тракта НЧ. Указанный параметр всецело определяется кривой верности, мощностью и линейностью усилителя НЧ и акустической системы.

Коэффициент гармоник всего тракта усиления по звуковому давлению выражается в процентах и зависит от формы амплитудно-частотной характеристики ВЧ-части приемника (в основном тракта ПЧ), линейности характеристики усилителя низкой частоты (УНЧ) и акустической системы приемника.

Уровень фона по переменному току оговаривается для стационарных радиоприемников как по тракту низкой частоты, так и с антенного входа. Он выражается в децибелах и определяется отношением мощности фона к номинальной выходной мощности приемника. Значение уровня фона зависит от электрической схемы источника питания, соответствующих фильтров и монтажа приемника.

*Ручная регулировка громкости* определяется отношением напряжений с частотой 1000 Гц на выходе приемника при положении ручного регулятора громкости, соответствующем максимальному и минимальному усилению приемника. Указанный параметр полностью определяется качеством ручного регулятора громкости и монтажом приемника.

*Чувствительность* тракта определяется величиной напряжения с частотой 1000 Гц на входе звукоснимателя, которое обеспечивает на выходе приемника номинальную мощность. Этот параметр целиком зависит от коэффициента усиления тракта НЧ. Минимальное входное сопротивление и максимальная входная емкость тракта НЧ с входа "звукосниматель" определяются соответственно в килоомах и пикофарадах и зависят исключительно от электрической и монтажной схем входного тракта НЧ. Напряжение на выходе приемника для записи на магнитофон, отнесенное к 1 кОм нагрузки, определяется напряжением на нагрузке в 25 кОм, имитирующей входное сопротивление магнитофона. Величина сигнала на входе приемника выбирается из расчета обеспечения на его выходе номинальной мощности. Рассматриваемый параметр зависит исключительно от схемы выходного каскада.

Потребляемая мощность от автономных источников питания определяется в ваттах при отдаваемой приемником мощности, соответствующей 0,3 номинальной, и зависит от режима работы приемника.

Напряжение питания кроме абсолютного значения характеризуется допусками, при которых приемник должен сохранять работоспособность. Так, в случае стационарного приемника его чувствительность не должна уменьшаться больше чем на 6 дБ, а выходная мощность — на 3 дБ при колебаниях напряжения. В переносном приемнике допустимые отклонения оговариваются в ТУ. Выполнение этих требований зависит от режимов работы транзисторов (ламп) радиоприемника.

Кроме параметров, гарантированных ГОСТом, ТУ содержат дополнительные показатели. Наиболее распространенными являются нижеследующие.

*Номинальная выходная мощность ( $P_{ном}$ )*, выраженная в ваттах, развивается приемником без превышения заданного значения коэффициента гармоник по напряжению (коэффициента нелинейных искажений). Значение номинальной выходной мощности определяется конструкцией и режимом работы УНЧ.

*Ручная регулировка тембра* выражается в децибелах и определяется отношением выходного напряжения определенной частоты при разных положениях регулятора тембра к выходному напряжению с частотой 1000 Гц. Действие ручной регулировки тембра определяется схемой УНЧ.

*Тонкомпенсация* при регулировке громкости выражается в децибелах и определяется снижением уровня выходного сигнала на заданной частоте при понижении регулятором громкости уровня входного сигнала с частотой 1000 Гц на заданное количество децибел. Исходным для измерения является выходное напряжение, соответствующее номинальной мощности приемника. Действие тонкомпенсации определяется элементами того каскада схемы УНЧ, в котором расположен потенциометр.

Относительная погрешность градуировки шкалы задается в процентах как отношение разности частот (напечатанной на шкале приемника и частоты принимаемого в этой точке сигнала) к частоте принимаемого сигнала. Погрешность градуировки зависит от настройки блока КПЕ и тракта ВЧ приемника.

*Мощность, потребляемая приемником* от сети переменного тока, измеряется в ваттах при отдаче мощности, соответствующей 0,3 номинальной. Параметр аналогичен оговоренному ГОСТом для приемников с автономным питанием и зависит от режима работы приемника.

Номинальная выходная электрическая мощность ( $P_{\text{ном}}$ ) и ряд других параметров проверяются при типовых испытаниях трактов НЧ (рис.12.3). Проверка осуществляется подачей на вход УНЧ сигнала с частотой 1000 Гц и напряжением, соответствующим гарантированной в ТУ чувствительности тракта НЧ. Регулятором громкости устанавливается на звуковой катушке громкоговорителя напряжение, соответствующее номинальной выходной мощности, т. е.  $U_{\text{ном}} = \sqrt{P_{\text{ном}} Z}$ , где  $Z$  — модуль полного электрического сопротивления звуковой катушки громкоговорителя. При этом измеряется коэффициент гармоник выходного напряжения, который должен быть ниже оговоренного в ТУ.

Напряжение, соответствующее номинальной мощности, рассчитывают исходя из номинального значения модуля полного электрического сопротивления звуковой катушки громкоговорителя на частоте 1000 Гц. Соответствие выходной мощности норме проверяется в цехе перед настройкой тракта ПЧ. Несовпадение результатов типовых испытаний и цеховой проверки может быть вызвано неточностью градуировки НЧ-аттенюатора, погрешностью электронного вольтметра на рабочем месте оператора, а также вследствие большого разброса параметров транзисторов выходного каскада и несоответствия номиналов резисторов в схеме.

Ручная регулировка громкости проверяется непосредственно после контроля номинальной мощности приемника. Регулятор громкости приемника устанавливается в положении максимального усиления, а напряжение на входе «звукоснимателя» увеличивается до получения на выходе приемника напряжения, соответствующего номинальной выходной мощности. Затем ручка регулятора громкости устанавливается в положение минимального усиления (в пределах плавной регулировки) и вновь определяется выходное напряжение приемника. Отношение обоих напряжений на выходе приемника, выраженное в децибелах, характеризует действие ручной регулировки громкости и должно быть не меньше значения, указанного в ТУ. В случае отсутствия в приемнике входа "звукосниматель" действие ручной регулировки громкости проверяют с помощью ГСС, с которого на антенный вход приемника через эквивалент антенны подается напряжение, модулированное частотой 1000 Гц с глубиной модуляции 50 %.



Рис.12.3. Схема типовых испытаний тракта НЧ

Чувствительность с входа УНЧ определяется при установке регулятора громкости в положение максимального усиления, регулятора тембра — в положение наиболее широкой полосы приема звуковых частот. На входе "звукосниматель" напряжение с частотой 1000 Гц увеличивается до уровня, вызывающего на выходе напряжение, соответствующее номинальной мощности приемника. Уровень входного напряжения, выраженный в милливольтгах, определяет проверяемую чувствительность. В случае пьезокерамического звукоснимателя напряжение от генератора звуковой частоты подводится через резистор величиной 200 кОм, являющийся эквивалентом пьезокерамического звукоснимателя.

Уровень фона по НЧ для радиоприемников определяется при регуляторе громкости, установленном в положение максимального усиления, и регуляторе тембра в положении, соответствующем приему наиболее широкой полосы звуковых частот. Вход "звукосниматель" замыкается на резистор 200 кОм, и на выходе замеряются напряжения составляющих фона с частотами 50, 100, 150 и 200 Гц. Избирательность измерений достигается подключением между приемником и электронным вольтметром трехоктавных фильтров (учитывая вносимые ими затухания) или заменой электронного вольтметра анализатором гармоник. Отношение среднеквадратичного значения составляющих фона к выходному напряжению, соответствующему номинальной выходной мощности, выраженное в децибелах, является уровнем фона, который должен быть не хуже указанного в ТУ.

Действие тонкомпенсации при регулировке громкости проверяют при подаче на вход "звукосниматель" сигнала с частотой 1000 Гц с входа УНЧ и уровнем, соответствующим номинальной чувствительности. Регулятором громкости устанавливают выходное напряжение, соответствующее номинальной мощности, а затем, не меняя входного уровня сигнала, частоту генератора поочередно устанавливают равной нижнему и верхнему значениям, указанным в ТУ. Для каждой из этих частот регулятором тембра добиваются выходного уровня, соответствующего номинальной мощности на частоте 1000 Гц. После этого частоту генератора снова устанавливают равной 1000 Гц и регулятором громкости понижают выходной уровень сигнала на заданное количество децибел. Далее, сохраняя положение всех регуляторов, определяют выходное напряжение на нижней и верхней частотах. Отношение выходного напряжения на заданных в ТУ частотах к выходному напряжению на частоте 1000 Гц, выраженное в децибелах, является показателем действия тонкомпенсации при заданной в ТУ глубине регулировки громкости. Действие тонкомпенсации проверяется до настройки тракта ПЧ. Основной причиной дефектов в приемнике обычно является несоответствие схеме номиналов запаянных элементов.

Действие регуляторов тембра проверяется путем подачи на вход "звукосниматель" сигнала с частотой 1000 Гц и уровнем, соответствующим номинальной чувствительности по входу УНЧ. Регуляторы тембра устанавливают в положения, соответствующие приему наиболее широкой полосы звуковых частот, а регулятором гром-

кости устанавливаются на выходе приемника напряжение, соответствующее номинальной выходной мощности. Затем, не меняя уровня входного сигнала, поочередно устанавливаются оговоренные в ТУ звуковые частоты и фиксируются соответствующие им выходные напряжения. После этого регуляторы тембра устанавливаются в положение узкой полосы и проверка повторяется. Действие регуляторов тембра выражается в децибелах и определяется отношением выходного напряжения на заданных звуковых частотах к выходному напряжению на частоте 1000 Гц.

Испытания тракта АМ-сигналов по частоте ведутся при относительно высоких уровнях входных сигналов и, как правило, могут успешно выполняться вне экранированных помещений. Схема испытаний приведена на рис. 12.4.

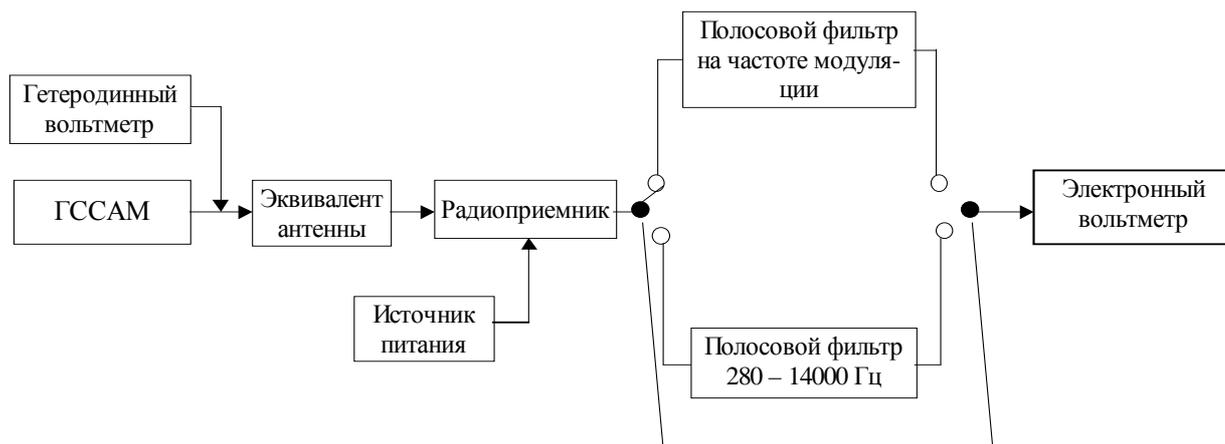


Рис. 12.4. Схема типовых испытаний тракта АМ – сигналов по напряжению

Перекрытие диапазонов и относительная погрешность градуировки шкалы проверяются в пяти точках каждого диапазона. Первоначально приемник настраивается на одну, затем на другую крайнюю частоту диапазона. Регулятор ширины полосы пропускания (если такой имеется) устанавливается в положение, соответствующее приему узкой полосы частот. На вход приемника через эквивалент антенны (или посредством генератора поля, если приемник имеет только внутреннюю ферритовую антенну) подается АМ-сигнал от ГСС, частота которого меняется до осуществления качественного приема сигнала, фиксируемого оптическим индикатором настройки по максимуму выходного уровня или минимуму нелинейных искажений на выходе приемника. Уровень снимаемого с ГСС сигнала не должен превышать номинальной чувствительности приемника. В дальнейшем модуляция генератора выключается, а его частота измеряется гетеродинным волномером или электронно-счетным частотомером. Измеренные частоты должны находиться вне (или, в крайнем случае, на пределе) гарантированного в ТУ диапазона принимаемых частот.

Проверка повторяется при настройке поочередно на все три частоты сопряжения каждого диапазона. Отличие обработки результатов заключается лишь в том, что для каждой из точек сопряжения дополнительно рассчитывается отклонение частоты градуировки, шкалы приемника и частоты сигнала. Это отклонение, отнесенное к частоте сигнала и выраженное в процентах, называется *относительной погрешностью градуировки шкалы*.

Несоответствие градуировки шкалы в какой-либо точке может возникнуть из-за отклонения этой частоты в централизованном источнике ВЧ-сигналов. Несмотря на то что все частоты централизованных источников сигналов стабилизируются кварцами, целесообразно убедиться в точности опорной частоты, так как возможен

выход из строя кварцевого резонатора с продолжением работы задающего генератора на случайной частоте, близкой к первоначальной.

Причиной несоответствия перекрытия диапазонов при удовлетворяющей требованиям относительной погрешности градуировки шкалы может быть отклонение от нормы соотношения максимальной и минимальной емкостей гетеродинной секции блока КПЕ. Поэтому следует обратить особое внимание на проверку минимальных емкостей секций.

Определение ПЧ производится в положении регулятора ширины полосы пропускания (если такой имеется), соответствующем приему наиболее узкой полосы частот, и регулятора громкости в положении, соответствующем максимальному усилению. На вход приемника, настроенного на 1605 кГц, через эквивалент антенны (на управляющий электрод смесителя) подается от ГСС АМ-сигнал. Частота модуляции 1000 Гц, глубина модуляции 30 %. Частота ГСС меняется вблизи 465 кГц до осуществления качественного приема сигнала, как это указывалось в описании предыдущего измерения. Уровень сигнала на входе приемника должен обеспечить на его выходе напряжение, соответствующее стандартной выходной мощности 50 мВт. Затем ГСС расстраивается в обе стороны от установленной частоты и фиксируются частоты  $f_{п1}$  и  $f_{п2}$ , при которых напряжение на выходе приемника уменьшается в два раза (6 ДБ) по сравнению с напряжением при первоначально установленной частоте. Фиксация частот производится гетеродинным волномером или электронным цифровым частотомером при выключенной модуляции генератора. Значение ПЧ определяется по формуле

$$f_{п} = f_{п1} + f_{п2} / 2 .$$

Выход ПЧ за установленные пределы  $\pm 2$  кГц может иметь место при отсутствии эксплуатационного наблюдения за работой централизованного источника сигналов ПЧ, если от него на рабочие места не поступают кварцеванные частотные метки. Централизованная частота генератора качающейся частоты не стабилизируется (что весьма затруднительно), а только контролируется кварцем.

При типовых испытаниях уход частоты гетеродина определяется только при самопрогреве приемника, который до проведения измерений должен находиться в выключенном состоянии не менее 4 ч. Измерение производится на верхних частотах сопряжения КВ-диапазонов при слабой связи гетеродинного волномера или цифрового частотомера с гетеродином приемника. Первое измерение выполняется через 5 мин после включения приемника и повторяют через 15 мин. Уход частоты при самопрогреве выражается в виде разницы обоих измерений в килогерцах.

При наличии в приемнике АПЧ измерение следует производить при выключенной автоподстройке. Величина ухода частоты гетеродина в этом случае определяется делением полученного результата на коэффициент автоподстройки.

Коэффициент автоподстройки ( $k_{ап}$ ) определяется как отношение расстройки приемника при выключенной автоподстройке  $\Delta f_{ост}$  к расстройке приемника при включенной автоподстройке  $\Delta f_{нач}$ . Первоначально при выключенной автоподстройке замеряется промежуточная частота  $f_{п}$  приемника, точно настроенного на принимаемый сигнал. Перед измерением модуляцию ГСС снимают. Измерение повторяют после расстройки приемника от принимаемого сигнала на 5 кГц при АМ и 50 кГц при ЧМ, т. е. определяют частоту  $f'_{п}$ . Затем включают автоподстройку и повторным измерением определяют частоту  $f''_{п}$ . Коэффициент автоподстройки рассчитывается по формуле

$$k_{ап} = \frac{\Delta f_{нач}}{\Delta f_{кон}} = \frac{f_{п} - f'_{п}}{f_{п} - f''_{п}} .$$

Уход частоты гетеродина от самопрогрева в цехе не проверяется ни прямым, ни косвенным путем. Этот па-

раметр должен полностью обеспечиваться конструкцией приемника. Отклонение от нормы может быть вызвано некачественным транзистором (лампой) или каким-либо из конденсаторов. Выявление истинной причины для каждого конкретного случая может оказаться весьма трудоемкой задачей.

Испытания тракта АМ-сигналов по напряжению рекомендуют производить в хорошо экранированном помещении, исключающем воздействие внешних полей на приемник. Питающее напряжение подводится через соответствующие фильтры. Все испытания выполняются с помощью одного комплекта измерительной аппаратуры (рис. 12.5).

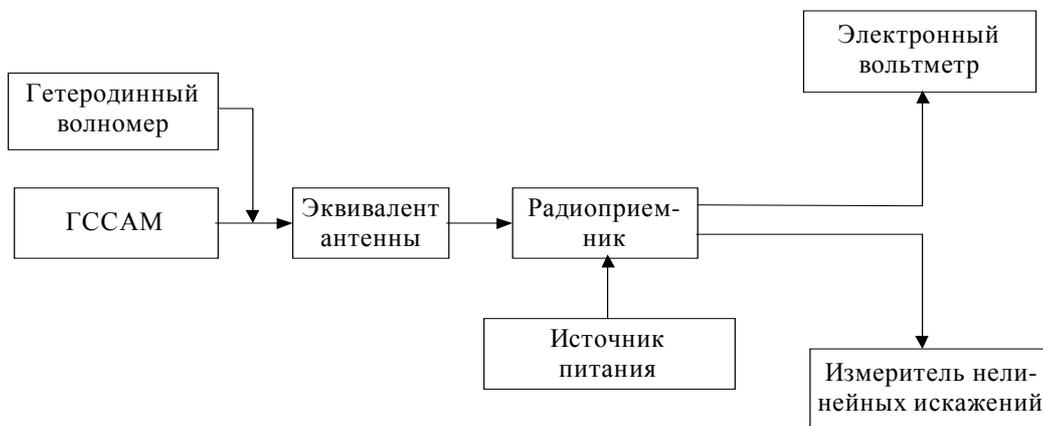


Рис. 12.5. Схема типовых испытаний тракта АМ – сигналов по частоте

Измерение чувствительности производится в трех точках сопряжения каждого диапазона. На растянутых диапазонах допускается замер в одной точке, а на полурастянутых диапазонах — на двух частотах, оговоренных в ТУ. Регуляторы тембра и ширины полосы пропускания приемника должны находиться в положении, соответствующем максимальному усилению. Регулятор громкости первоначально устанавливается в таком же положении. Приемник и ГСС настраиваются поочередно на все частоты сопряжения, причем точность совпадения их настроек определяется по индикатору настройки, а в случае его отсутствия — по максимальному уровню выходного сигнала.

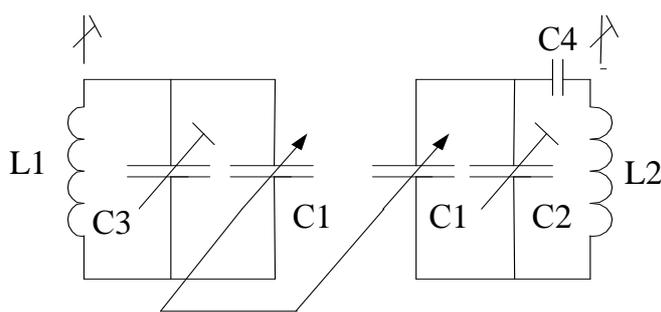


Рис.12.6. Схема сопряжения контуров входной цепи и гетеродина

Избирательность (ослабление соседнего канала) замеряют на двух частотах: 250 кГц и 1 МГц. Для ее определения на вход приемника подается АМ-сигнал с частотой модуляции 1000 Гц и глубиной модуляции 30 %, что должно соответствовать номинальной чувствительности. Регулятор ширины полосы пропускания (если такой имеется) устанавливают в положение, соответствующее приему узкой полосы частот. Точная настройка приемника на частоту ГСС производится обычным способом. Регулятором громкости устанавливается выходное напряжение, соответствующее стандартной выходной мощности 50 мВт, после чего ГСС расстраивают от первоначального положения точно на 9 кГц (в обе стороны), а уровень сигнала увеличивают до получения на

выходе приемника напряжения, существовавшего там до расстройки генератора. Точность расстройки генератора обязательно проверяется гетеродинным волномером или цифровым частотомером. Меньшее из двух напряжений, которое обеспечивает требуемый выходной уровень, отнесенное к напряжению номинальной чувствительности и выраженное в децибелах, является показателем избирательности.

Для получения наилучшей чувствительности и избирательности радиоприемников в диапазоне перестройки необходимо добиться точного сопряжения входных и гетеродинных контуров, т. е. чтобы частота настройки гетеродинного контура была больше частоты настройки входного контура на значение промежуточной частоты при любом положении ручки настройки радиоприемника. При использовании во входных и гетеродинных контурах одинаковых секций КПЕ получить точное сопряжение во всем диапазоне принципиально невозможно, так как при сопряжении в средней точке диапазона и на границах его ошибка будет недопустимо большой.

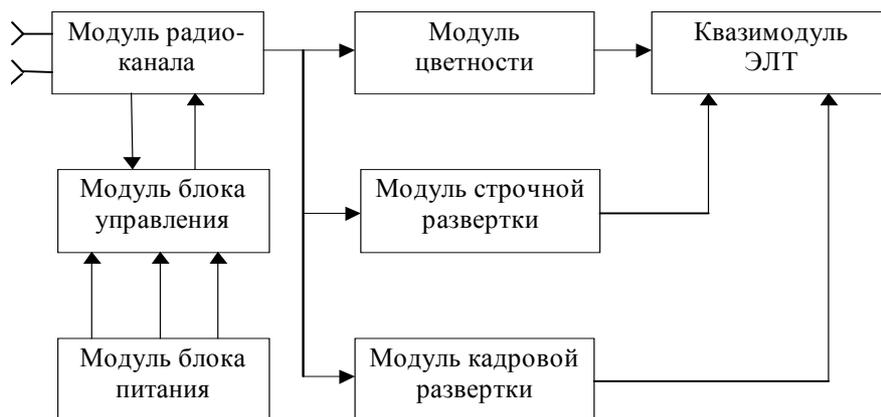


Рис.12.7. Структурная схема телевизора блочно-модульной конструкции

Для уменьшения максимальной ошибки в контуры включаются подстроечные конденсаторы С2 и С3, а в контур гетеродина — дополнительный сопрягающий конденсатор С4 с допустимыми отклонениями от номинального значения  $\pm 5\%$  (рис. 12.6).

В диапазонах ДВ и СВ сопряжение осуществляется в трех точках: на верхней, средней и нижней частотах диапазона. При этом используют два подстроечных элемента: конденсатор — на верхней частоте сопряжения, подстроечный сердечник в контурной катушке — на нижней. Тогда средняя частота устанавливается автоматически.

На КВ-диапазонах применяют двухточечное (на полурастянутых) и даже одноточечное (на растянутых) сопряжение и один подстроечный элемент.

### 12.3. РЕГУЛИРОВКА ПАРАМЕТРОВ ТЕЛЕВИЗИОННЫХ БЛОКОВ

Усовершенствование цветных телевизоров постоянно направлено на улучшение качества изображения, повышение надежности, уменьшение габаритов, массы, потребляемой энергии, повышение технологичности изготовления, регулировки и ремонта, обеспечение удобства эксплуатации. Это достигнуто при широком внедрении принципа модульного конструирования. Модульная конструкция телевизора значительно облегчает регулировку, ремонт телевизоров и позволяет модернизировать модули без существенных изменений технологии. Начиная с третьего поколения, телевизоры имеют блочно-модульную структуру, причем большие блоки называются *модулями*, а малые, входящие в их состав, — *субмодулями*. Структурная схема телевизора блочно-модульной конструкции показана на рис. 12.7.

Высокочастотный телевизионный сигнал метрового или дециметрового диапазона поступает на модуль радиоканала, в котором происходит селекция каналов, преобразование ВЧ-сигнала, выделение промежуточных частот изображения (38 МГц) и звука (31,5 МГц), выделение строчных и кадровых синхроимпульсов, управляющих модулями строчной и кадровой разверток, и формирование сигналов, необходимых для работы модуля цветности. Сигналы с модулей цветности, строчной и кадровой разверток подаются на квазимодуль электронно-лучевой трубки (ЭЛТ), в который помимо ЭЛТ входят отклоняющая система, блок сведения, регулятор сведения, схема размагничивания кинескопа.

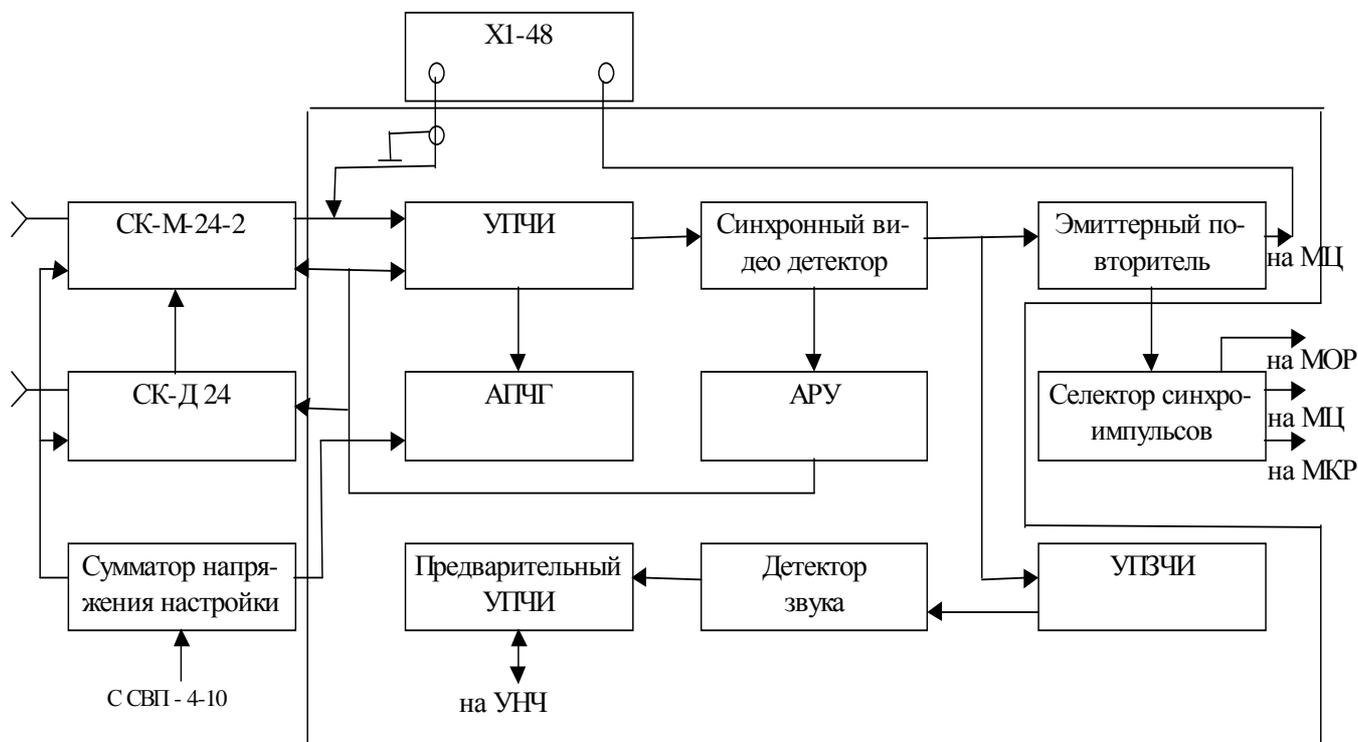


Рис.12.8. Структурная схема модуля радиоканала

В модуле блока управления расположены регуляторы тембра, громкости, яркости и т. д. Модуль питания вырабатывает напряжения, необходимые для работы всех модулей телевизионного приемника.

Модуль радиоканала телевизоров 2УСЦТ (рис. 12.8) включает: селектор каналов метрового диапазона СК-М-24-2, селектор каналов дециметрового диапазона СК-Д-24, submodule радиоканала (СМРК), селектор синхроимпульсов, задающий генератор строчной развертки, устройство автоматической подстройки частоты и фазы, сумматор напряжения настройки.

Submodule радиоканала осуществляет второе преобразование частоты, формирование АЧХ радиоканала, разделение сигналов изображения и звука, их усиление до требуемого уровня, формирование уровня задержки сигнала и АРУ, выработку напряжения АПЧГ.

Основными структурными элементами СМРК являются: усилитель промежуточной частоты изображения (УПЧИ), синхронный видеодетектор, схема АРУ, автоматическая подстройка частоты изображения (АПЧИ), усилитель промежуточной частоты звука (УПЧЗ), детектор звука, предварительный усилитель низкой частоты, эмиттерный повторитель.

На вход УПЧИ СМРК поступает сигнал промежуточной частоты изображения и звука с выхода СК-М-24-2. Переключение программ осуществляется в обоих селекторах устройством сенсорного выбора программ СВП-4-10. Напряжение настройки поступает на варикапы селекторов через сумматор и перестраивает по частоте вход-

ные, усилительные и гетеродинные цепи селекторов. На этот же сумматор поступает и медленно меняющийся сигнал с АПЧГ, несущий информацию об ошибке настройки гетеродина на выбранную частоту. Система АПЧГ работает от сигнала, поступающего с УПЧИ, в котором происходит основное усиление сигнала. С выхода УПЧИ сигнал поступает также на синхронный видеодетектор. С видеодетектора сигнал подается на схему АРУ, на УПЧЗ и через эмиттерный повторитель — на модуль цветности (МЦ) и селектор синхроимпульсов.

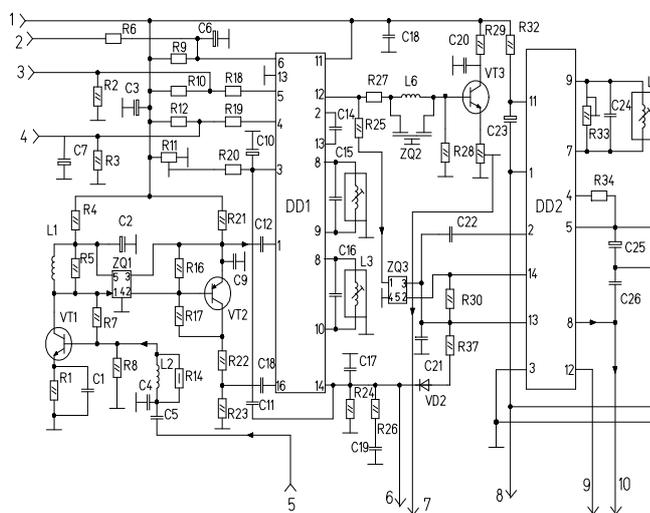


Рис.12.9. Принципиальная схема submodule радиоканала

В УПЧЗ осуществляется селекция сигнала разностной частоты звукового сопровождения (6,5 МГц), ее усиление и ограничение по амплитуде. Частотный детектор выделяет сигнал низкой частоты, который после усиления в предварительном усилителе подается на оконечный УНЧ, расположенный в модуле блока управления. Селектор синхроимпульсов предназначен для управления строчной и кадровой развертками. В нем производится выделение строчных и кадровых синхроимпульсов из полного телевизионного сигнала. Одновременно происходит амплитудная селекция синхросигнала, формирование импульсов запуска строчной и кадровой разверток и строчного строб-импульса, используемого в модуле цветности для получения яркостной площадки и управления цветовой синхронизацией.

Модуль радиоканала выполнен на микросхемах с использованием фильтра на ПАВ (рис. 12.9). В качестве УПЧИ, видеодетектора, предварительного усилителя видеосигнала, схемы АРУ, детектора и усилителя системы АПЧГ используются микросхемы типа К174УР5 или КР1021УР1. АЧХ формирует фильтр на ПАВ типа К04ФЕ001-01, который не требует настройки и заменяет ФСС, содержащий 9—13 точек настройки. Компенсацию затухания, вносимого фильтром, обеспечивают два каскада УПЧИ на транзисторах VT1, VT2. Сигнал ПЧ поступает на выводы 1, 16 микросхемы. Внутри микросхемы выход УПЧИ связан с синхронным видеодетектором. К выводам 8, 9 микросхемы подключен опорный контур L3, C15 синхронного видеодетектора. С выхода детектора видеосигнал поступает на предварительный видеоусилитель и схему АРУ.

Через вывод 12 видеосигнал поступает на режекторный фильтр ФП1Р8-63-02, который совместно с резисторами R27, R28 и дросселем L6 обеспечивает подавление промежуточной частоты звука и осуществляет сдвиг фазы сигнала для эффективной режекции сигнала частотой 6,5 МГц. Выход фильтра связан с эмиттерным повторителем на VT3, в эмиттерную цепь которого включен резистор R15, определяющий размах видеосигнала, поступающего на модули цветности и синхронизации.

Со схемы АРУ (вывод 4 микросхемы) через резистор R19 напряжение подается на селекторы каналов. Начальное напряжение АРУ определяется делителем R3, R12. Постоянную времени АРУ определяет фильтр C17, R24, R26, C19, подключенный к выводу 14, а начало срабатывания (1 мВ) — цепь R11, R20, C10, подключенная

к выводу 3 микросхемы. Величина задержки срабатывания устанавливается резистором R11. Питание 12 В подается на вывод 11, к выводам 2 и 15 подключен конденсатор C14.

Детектор системы АПЧГ выполнен по схеме двойного балансного умножителя. Необходимый фазовый сдвиг обеспечивается опорным контуром L4, C16, настроенным на частоту 38 МГц и подключенным к выводам 7 и 10 микросхемы. Напряжение ошибки настройки поступает на селекторы каналов с вывода 5. Блокировка схемы АПЧГ осуществляется сигналом с сенсора выбора программ (СВП), поступающим на вывод 6.

Канал звука выполнен на микросхеме K174УР4. Видеосигнал с промежуточной частотой звука поступает через резистор R25 на вход пьезокерамического фильтра K04ФЕ003 и далее на выводы 2, 13 микросхемы. Средняя частота настройки фильтра 6,5 МГц, ширина полосы пропускания 300 кГц. Элементы L8, C24 образуют фазосдвигающий опорный контур. Параллельно контуру подсоединен резистор R33, расширяющий его полосу и одновременно регулирующий амплитуду выходного напряжения звуковой частоты.

Выделенный детектором сигнал звуковой частоты поступает на входы регулируемого и нерегулируемого усилителей низкой частоты. С выхода нерегулируемого усилителя (вывод 12) сигнал НЧ подается на внешние устройства (магнитофон, видеоманитофон), а с выхода регулируемого усилителя (вывод 8) — на УНЧ.

Для исследования АЧХ СМРК используют прибор X1-49, состоящий из двух блоков: собственно измерителя X1-48 и селективного преобразователя, предназначенного для обеспечения возможности измерения АЧХ устройства с большими начальными ослаблениями и в большом динамическом диапазоне входных сигналов. Прибор X1-48 выполнен по блочному принципу и состоит из генераторной части, включающей преобразователь частоты, генератор пилообразного напряжения (ГПН), узел частотных меток, ступенчатый аттенюатор, и индикаторной части, включающей осциллографический блок и усилитель постоянного тока (УПТ). На вход исследуемого устройства с X1-48 подают напряжение со стабильной амплитудой и периодически изменяющейся частотой, а на экране индикатора воспроизводят огибающую ВЧ-сигнала, полученную с помощью детекторной головки на выходе исследуемого устройства.

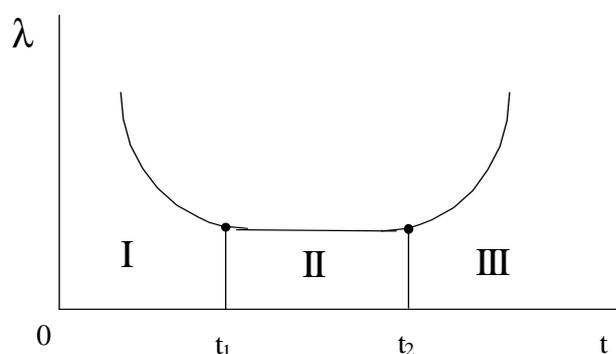


Рис. 12.11. Зависимость интенсивности отказов от времени

Синхронность перестройки частоты генератора (преобразователя частоты) и развертки индикатора достигается тем, что развертка в ЭЛТ осуществляется с помощью пилообразного напряжения, которое одновременно применяются в качестве модулирующего и в преобразователе частоты. Для анализа частотных параметров используются частотные метки, вырабатываемые блоком частотных меток, который включает генератор, смеситель и формирователь.

Диапазон рабочих частот прибора (0,1—150 МГц) формируется в преобразователе частоты смешиванием сигнала ГФЧ 350 МГц с сигналом ГПЧ 350—500 МГц в смесителе. Сигнал разностной частоты со смесителя поступает на фильтр НЧ, отфильтровывается, усиливается, и с выхода аттенюатора его можно подавать на ис-

следуемое устройство, установив предварительно необходимый уровень. Постоянство сигнала, поступающего на аттенюатор, поддерживается системой АРМ. Сигнал с исследуемого блока поступает на вход У и далее через УПТ на ЭЛТ. Таким образом, на экране ЭЛТ наблюдается фигура (рис. 12.10), которая и будет представлять собой зависимость амплитуды сигнала, прошедшего через исследуемый модуль (ось  $y$ ), от частоты (ось  $x$ ).

По частотным меткам определяют границы изменения полосы пропускания и магнитным сердечником катушки L3 устанавливают их в пределах 5,8 МГц. Изменяя положение ручки потенциометра R15, устанавливают необходимый диапазон изменения видеосигнала.

## 12. 4 ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ТРЕНИРОВКА И ИСПЫТАНИЯ

Технологическая тренировка ЭА представляет собой испытания аппаратуры с целью выявления и устранения приработочных отказов. Интенсивность отказов элементов зависит от их типа, режима работы, технологии изготовления, условий эксплуатации и изменения во времени (рис. 12.11).

Период приработки характеризуется низкой надежностью, что объясняется действием технологических дефектов. С целью их устранения и проводится технологическая тренировка, продолжительность которой обычно 10—200 ч в зависимости от типа ЭА. Для сокращения времени технологической тренировки ее совмещают с испытаниями на воздействие вибраций, термоциклирования, повышенного напряжения питания.

После окончания "жестких" технологических испытаний аппаратура должна проработать такое же время в нормальных условиях. Поскольку в процессе технологической тренировки происходит иногда отклонение параметров за пределы ТУ, необходимо предусмотреть регулировочную операцию и повторить технологический прогон. Нарушение режимов и продолжительности технологической тренировки оборачивается значительным браком готовой продукции.

При проектировании технологической тренировки определяют:

- время тренировки (10—200 ч);
- последовательность и жесткость технологических испытаний, при которой постепенно уменьшается "жесткость" режима (термоудар, циклическое воздействие температур и др);
- периодичность проверки параметров;
- объем контролируемых параметров, автоматизацию контроля ряда параметров аппаратуры.

Для ускоренных испытаний блоков на ПП применяют термоциклы по программе (рис. 12.12). Соотношение амплитуды деформации ПП и числа циклов изменений напряжения до разрушения, вызванного усталостными явлениями, определяет уравнение Коффрина—Мэнсона:

$$N_{от} = 0,5 \left( \frac{2e}{\epsilon_0} \right)^\beta,$$

где  $N_{от}$  — число циклов до наступления отказа;  $e$  — фактическая деформация;  $\epsilon_0$  — амплитуда остаточной деформации;  $\beta$  — константа кривой усталости (для ПП  $\beta = 2$ ).

По режиму термоциклов достигается ускорение испытаний в 1000 раз.

Испытания на термоудар проводятся с целью определения устойчивости межсоединений в ПП путем контроля изменения сопротивления последовательно соединенных металлизированных отверстий ("ныряющий проводник"). Испытуемая плата не должна иметь покрытия, которое снимается химическим способом.

Сопротивление измеряется при постоянном токе ( $100 \pm 5$ ) мА четырехзондовым методом. Степень изменения сопротивления является показателем качества металлизации отверстия. Термоудар осуществляется по следую-

щей программе погружений:

- в холодную ванну при  $T = (25 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ ,
- в нагретую ванну при  $T = (260 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$  в течение  $(20 \pm 1) \text{ с}$  (2—3 цикла),
- в холодную ванну.

Ускоряющим фактором для большинства механизмов отказов является повышенная температура. Коэффициент ускорения  $K_T$  определяется по уравнению Аррениуса:

$$K_T = \frac{E_a}{K} \left( \frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_\phi} \right),$$

где  $E_a$  — энергия активации механизмов отказов, эВ;  $K$  — постоянная Больцмана:  $K = 8,6 \cdot 10^{-5} \text{ эВ/К}$ ;  $T_0$ ,  $T_\phi$  — температура изделия соответственно начальная и в форсированном режиме, К.

Температура кристалла рассчитывается так:

$$T_k = T_{\text{осн}} + R_T P_{\text{рас}},$$

где  $T_{\text{осн}}$  — температура основания;  $R_T$  — тепловое сопротивление перехода кристалл—окружающая среда;  $P_{\text{рас}}$  — мощность, рассеиваемая на кристалле.

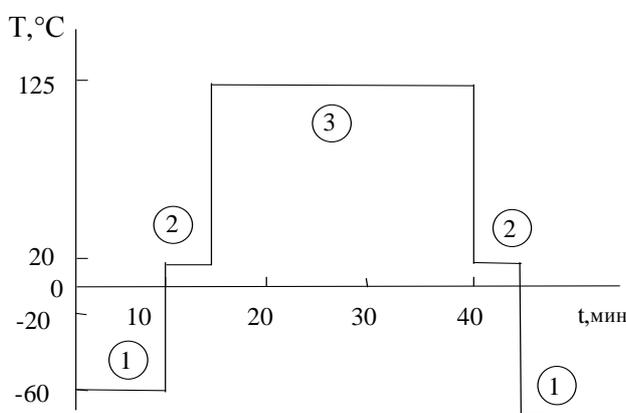


Рис. 12.12. Программа термоциклов для ускоренных испытаний III

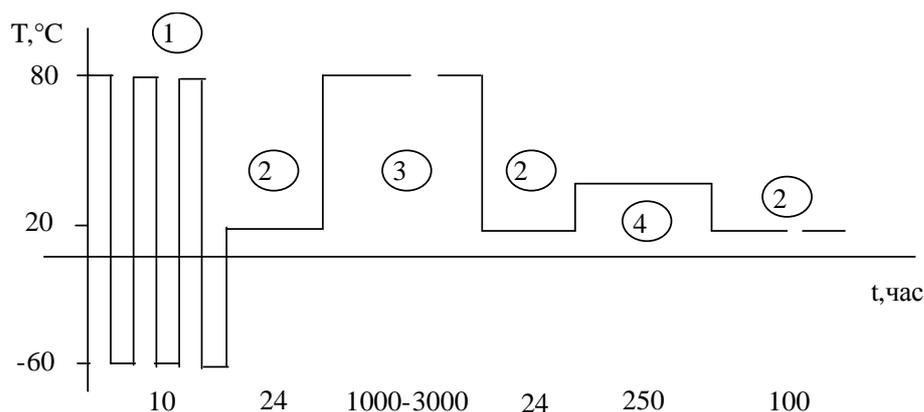


Рис. 12.13. График испытаний на надежность

Для ИМС при отсутствии экспериментальных данных  $E_a \approx 0,4 \text{ эВ}$ ,  $R_T = 100 \text{ К/Вт}$ . При выборе параметров необходимо учитывать следующее: температура перехода кристалл—основание — не выше  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ , при наличии контактов Au—Al — не выше  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , плотность тока в пленках Al-металлизации не должна превышать  $2 \cdot 10^{-6} \text{ А/см}$ , коэффициент ускорения  $K_T \leq 5$ .

Длительность ускоренных испытаний

$$t_{y.и} = \frac{t_{и} n_0}{K_T n_y},$$

где  $t_{и}$  — время испытаний;  $n_0$  — объем выборки при обычных испытаниях;  $n_y$  — объем выборки при ускоренных испытаниях на безотказность.

При испытаниях монтажных соединений на надежность по заданной программе можно рекомендовать временной график испытаний, показанный на рис. 12.13.

Объем испытаний устанавливают, исходя из экспоненциального закона распределения времени работы соединений до отказа:

$$N \geq r_0 / \lambda,$$

где  $N$  — объем выборки;  $r_0$  — коэффициент, зависящий от доверительной вероятности: при  $P = 0,90 r_0 = 2,30$ , при  $P = 0,95 r_0 = 3,0$ ;  $\lambda$  — интенсивность отказов для паяных соединений ( $2 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  для бытовой РЭА,  $1 \cdot 10^{-9} \text{ ч}^{-1}$  для специальной).

## 12.5 ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РЕГУЛИРОВКИ

В процессе производства часть изделий получается кондиционной без проведения с ними каких-либо работ, тогда как другая их часть нуждается в наладке (доводке). Процесс наладки связан с затратами, на которые, ставя задачу повышения эффективности производства по параметру затрат, целесообразно иметь возможность налагать ограничения. В данном случае под надежностью ТП мы будем понимать вероятность  $P_k$  того, что изделие оказывается кондиционным без проведения наладочных работ. При большом количестве изготавливаемых изделий (с точки зрения достоверности статистического подхода) можно записать:

$$P_k = N_k / N,$$

где  $N_k$  — число кондиционных изделий без проведения наладки;  $N$  — общее число изделий.

Если процесс наладки некондиционных изделий не предусмотрен, то затраты на одно кондиционное изделие

$$Z = Z_0 / P_k, \quad (12.1)$$

где  $Z_0$  — затраты на изготовление всех изделий при отсутствии операции наладки.

Таким образом, затраты на изделия, идущие в брак, вносятся в стоимость кондиционных изделий. Допустим, что мы ввели операцию наладки некондиционных изделий и все некондиционные изделия удастся наладить при конечной величине затрат на наладку. Обозначим среднюю величину этих затрат, приходящихся на одно кондиционное изделие (оказавшееся кондиционным сразу или же в результате проведения наладки), через  $\bar{Z}_н$ . Тогда при наладке средние затраты на одно кондиционное изделие

$$\bar{Z} = Z_0 + \bar{Z}_н. \quad (12.2)$$

Зная средние затраты для двух видов производства (с предусмотренным процессом наладки и без наладки), мы можем для оценки эффективности наладочных работ по критерию затрат на одно некондиционное изделие ввести функцию эффективности как относительную разность затрат на одно изделие без операции наладки и с наладкой:

$$\Theta = \frac{Z - \bar{Z}}{\bar{Z}} = \frac{Z}{\bar{Z}} - 1.$$

Учитывая выражения (12.1) и (12.2), эффективность наладочных работ можно записать в виде

$$\Theta = \frac{Z_o}{P_k(Z_o - \bar{Z}_H)} - 1. \quad (12.3)$$

Отсюда следует, что эффективность наладочных работ может быть как положительной, так и отрицательной. В ряде случаев введение наладочных работ нецелесообразно, и они оправданы только при выполнении условия

$$Z_o > P_k(Z_o + \bar{Z}_H).$$

В условиях производства может существовать ограничение на затраты по наладке. Это конкретное значение будет определяться в основном конкретными величинами  $P_k$  и  $\bar{Z}_H$ . Критическая величина средних затрат зависит только от надежности производства:

$$Z_{H.kp} = 1/P_k.$$

График этой зависимости (рис. 12.14) показывает, что при низкой надежности производства затраты на наладку могут быть оправданными даже в тех случаях, когда они значительно превосходят затраты на изготовление.

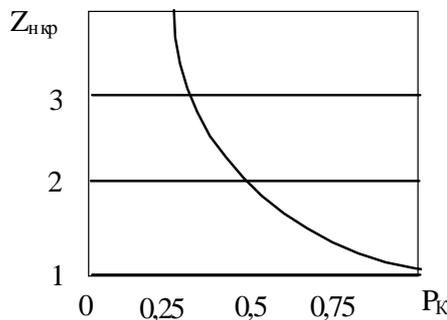


Рис. 12.14. Зависимость критических затрат на регулировку от надежности производства

Если учесть, что затраты на наладку при серийном и массовом производстве являются случайной величиной и наиболее полно характеризуются функцией плотности распределения  $\varphi(Z)$ , то возникает вопрос: каковы максимальные затраты, которые целесообразно планировать на наладку? Тогда вероятность  $P$  характеризует событие, заключающееся в том, что данное изделие будет налажено при затратах, не превышающих некоторую заданную величину  $Z_{max}$ :

$$P = \int_0^{Z_{max}} \varphi(Z) dZ.$$

Кроме того, математическое ожидание затрат на наладку изделий, для которых  $Z \leq Z_{max}$ , определяется в виде

$$\bar{Z}_H = \int_0^{Z_{max}} Z \varphi(Z) dZ.$$

Допустим, что изготовлена большая партия изделий, состоящая из  $N$  штук, в числе которых оказалось  $N_k$  штук кондиционных изделий, не нуждающихся в последующей наладке.

На изготовление всей партии изделий затрачено  $NZ_o$  средств. Кроме того, потребуются затраты на наладку. Средства на наладку складываются из затрат: на наладку изделий, налаженных без превышения величины  $Z_{max}$ :

$$P(N - N_k)\bar{Z}_H = (N - N_k) \int_0^{Z_{max}} Z \varphi(Z) dZ \int_0^{Z_{max}} \varphi(Z) dZ,$$

и на наладку тех изделий, которые при условии ограниченности  $Z_{max}$  наладить не удалось:

$$(1 - P)(N - N_k)Z_{max} = (N - N_k)Z_{max} \left( 1 - \int_0^{Z_{max}} \varphi(Z) dZ \right).$$

Таким образом, суммарные затраты на партию изделий из  $N$  штук составляют

$$NZ + \left( \int_0^{Z_{\max}} Z\varphi(Z)dZ + \int_0^{Z_{\max}} \varphi(Z)dZ + Z_{\max} \left( 1 - \int_0^{Z_{\max}} \varphi(Z)dZ \right) \right) (N - N_k).$$

Запишем выражение для определения эффективности наладки:

$$\Theta = \frac{Z_o (P_k + (1 - P_k)) \int_0^{Z_{\max}} \varphi(Z)dZ}{P_k \left( Z_o + \left( \int_0^{Z_{\max}} Z\varphi(Z)dZ + Z_{\max} \left( 1 - \int_0^{Z_{\max}} \varphi(Z)dZ \right) \right) (1 - P_k) \right)}.$$

Исследование условий функции эффективности наладки позволяет принять решение о целесообразности ее проведения.

### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Основные методы регулировки и оценка их погрешности.
2. Методика регулировки параметров радиоприемников.
3. Регулировка параметров СМРК телевизионных приемников.
4. Методика технологической тренировки и способы ее ускорения.
5. Оценка экономической эффективности регулировки в зависимости от типа производства.

## 13. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ БЛОКОВ И ИЗДЕЛИЙ

### 13.1. КЛАССИФИКАЦИЯ МЕТОДОВ ГЕРМЕТИЗАЦИИ

Электронная аппаратура эксплуатируется в различных климатических условиях, поэтому на надежность ее работы влияют температура окружающей среды, влага, пыль, биологическая среда, радиация и другие факторы. Под действием температуры происходит изменение физических параметров материалов деталей, их старение и ухудшение эксплуатационных свойств. Биологическая среда содержит микроорганизмы, в частности плесневые грибки и бактерии, выделяющие в продуктах обмена различные кислоты, которые вызывают разложение органических материалов. Пыль из окружающей атмосферы, оседая на поверхности материалов, адсорбирует влагу, увеличивает поверхностную электропроводность материалов, ускоряет коррозию металлических покрытий, способствует образованию плесени.

Наиболее вредное влияние на намоточные изделия, функциональные элементы (полупроводниковые приборы, ИМС, БИС и СБИС), сборочные единицы и блоки на печатных и многослойных платах оказывает влага, проникновение которой в поры изоляционных материалов (размеры молекул воды имеют диаметр, равный  $(2,7—3,4) \cdot 10^{-2}$  мкм, что значительно меньше размеров пор изоляционных материалов) приводит к снижению объемного сопротивления, возрастанию диэлектрических потерь и ухудшению диэлектрической проницаемости. Гигроскопичные материалы органического происхождения при увлажнении набухают, при этом изменяются геометрические размеры деталей. Влага, конденсируясь на поверхности деталей, образует электропроводящие мостики между контактами, оказывая шунтирующее действие и резко снижая объемное сопротивление диэлектриков. Попадание влаги между витками обмоток создает благоприятные условия для возникновения коррозии меди, что приводит в конечном счете к обрыву провода обмотки. Влага оказывает вредное воздействие на металлы, вызывает их коррозию.

*Герметизация* — это совокупность работ по обеспечению работоспособности ЭА в процессе ее производства, хранения и последующей эксплуатации. Герметизация может быть поверхностной и объемной (рис. 13.1).



Рис. 13.1. Классификация методов герметизации

*Пассивация и оксидирование* — процессы подавления химически активных центров, снижающие восприимчивость поверхностей к воздействию внешней среды, которые используются в производстве полупроводниковых кремниевых приборов и ИМС. Пассивация заключается в проведении силанирования, этилирования, сульфидирования, что приводит к образованию тонких защитных пленок (до 1 мкм). Оксидирование осуществляют

при температуре 850—1200 °С в атмосфере сухого кислорода или в парах воды при высоком давлении и температуре 500—900 °С. Толщина пленки диоксида кремния (SiO<sub>2</sub>) составляет 0,1—1,5 мкм, она является средством технологической защиты поверхности и в сочетании с последующей герметизацией способствует повышению эксплуатационной надежности приборов.

Герметизация стеклянными покрытиями, наносимыми термическим испарением в вакууме халькогенидных, боросиликатных, фосфосиликатных и других стекол, позволяет дополнительно защитить слоем стекла толщиной 0,3—10 мкм пленочные конденсаторы, резисторы и ИМС.

Основными способами покровной герметизации являются пропитка, обволакивание, гидрофобизация.

*Пропитка* заключается в заполнении пор, трещин, пустот в изоляционных материалах, а также промежутков между конструктивными элементами узлов электроизоляционными негигроскопичными материалами. Пропитке подвергаются многие детали и сборочные единицы ЭА, изготовленные из волокнистых электроизоляционных материалов, являющихся пористыми и гигроскопичными. К ним относятся намоточные изделия, каркасы катушек и др. Одновременно с повышением влагозащиты при пропитке достигается повышение механической прочности, нагревостойкости, теплопроводности и химической стойкости.

Применение пропитки нецелесообразно для таких изделий, как импульсные трансформаторы с малой длительностью импульсов или высокочастотные низковольтные катушки, так как при этом увеличиваются паразитные емкости изделий.

*Обволакиванием* называется процесс создания покровной оболочки на поверхности изделий, предназначенных для кратковременной работы в условиях влажной среды (не более 100 ч). Появление микроскопических каналов и зазоров вследствие разницы в температурных коэффициентах расширения и усадки обволакивающего материала и изделия неизбежно приводит к проникновению влаги внутрь изделия и потере герметичности.

Для обволакивания используются материалы, удовлетворяющие следующим требованиям: высокая адгезия к материалам покрываемого изделия, достаточная механическая прочность, малая влагопроницаемость, высокие электроизоляционные свойства. Процесс обволакивания осуществляется несколькими способами:

- окунанием в расплавленный материал на 1,5—2 с; толщина слоя покрытия зависит от вязкости материала, разности температур обволакивающего состава и изделия (чем выше разность температур, тем больше толщина слоя);
- пресс-обволакиванием расплавленным термопластичным материалом под давлением, что дает равномерный по толщине слой;
- опрессовкой.

Разновидностью обволакивания является гидрофобизация изделий.

*Гидрофобизация* — повышение влагостойкости материалов, деталей и изделий путем нанесения на их поверхность защитной пленки. Для получения высокой водоотталкивающей способности пленок применяют кремнийорганические высокомолекулярные соединения. Гидрофобизацию применяют для обработки стекла, керамики, сложных диэлектриков, пластмасс и тканей. Обработанные материалы теряют способность не только поглощать влагу, но и смачиваться ею.

### 13.2. ФИЗИКО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ПОКРОВНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ

Технологический процесс пропитки изделий состоит из следующих операций:

- предварительная сушка изделий — удаление влаги из воздушных прослоек, каналов и пор изделий;

- пропитка — заполнение пропиточным материалом мест, ранее заполненных влагой и воздухом;
- сушка пропитанных изделий — удаление растворителей из пропитывающего состава и его отверждение;
- лакировка — предохранения поверхности изделий от проникновения влаги, кислот, щелочей, масла, а также от скопления на изделиях пыли и грязи;
- сушка после лакировки — удаление растворителя и отверждение лакирующего или обволакивающего состава;
- контроль качества пропитки.

Температуру предварительной сушки устанавливают не выше теплостойкости изоляционных материалов, т. е. порядка 100 °С. Критерием определения оптимального времени сушки является сопротивление изоляции, которое на первом этапе нагрева падает, затем непрерывно увеличивается до максимального значения. Время, после которого устанавливается практически постоянное сопротивление изоляции, увеличивают на 10—20 % и принимают за оптимальное время сушки (рис. 13.2). Основными видами сушки являются конвекционная, терморadiационная, индукционная и вакуумная.

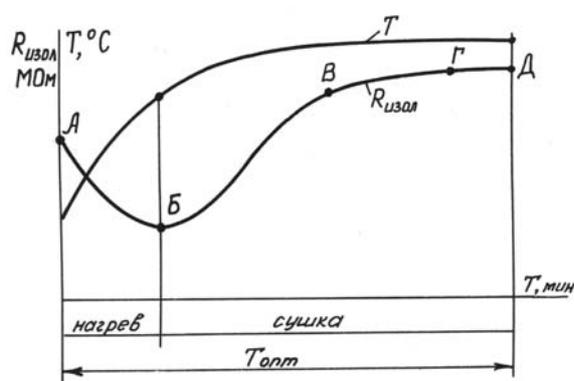


Рис. 13.2. Зависимости температуры (1) и сопротивления изоляции (2) от времени сушки

*Конвекционная сушка* происходит в результате переноса тепла от нагревателя с помощью воздуха и осуществляется в сушильных шкафах и термостатах. Основным недостатком такого метода является малая скорость движения воздуха, что удлиняет время сушки, а также создает неравномерность нагрева в разных зонах шкафа. Недостаток устраняют применением принудительной циркуляции воздуха в процессе сушки.

*Терморadiационная сушка* основана на передаче тепла лучеиспусканием. В качестве излучателей используют инфракрасные лампы накаливания, тепловые лучи которых проникают в изделие на глубину до 2—3 мм. Сушка с использованием инфракрасных ламп осуществляется на конвейерных установках туннельного типа и применяется для высушивания тонких пленок лака, нанесенных на поверхность изделий после пропитки.

*Индукционная сушка* осуществляется при нагревании изделий токами высокой частоты, т. е. с использованием тепла, выделяющегося непосредственно в изоляционном материале вследствие диэлектрических потерь. Прогрев происходит равномерно по всей толщине независимо от размеров и формы изделий. Индукционная сушка применяется для изделий (из древесины и других материалов), пропитанных водно-эмульсионными лаками. Частота нагрева диэлектрических материалов выбирается в пределах 30—50 МГц. В качестве специальной технологической оснастки используют обкладки, образующие конденсатор.

*Вакуумная сушка* изделий происходит при пониженном давлении (порядка 0,65—1,3 кПа). Вследствие понижения температуры парообразования удаление влаги идет значительно быстрее, что позволяет уменьшать температуру нагрева изоляционных изделий и избегать термического или окислительного разрушения волокнистых изоляционных материалов. Как правило, высушивание сочетают с пропиткой или заливкой, используя ва-

куумные пропиточные установки.

Скорость испарения влаги с поверхности материала тем больше, чем меньше давление пара в окружающей среде  $P_0$ :

$$dM / dx = k S (P_M - P_0),$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий условия испарения и физические свойства жидкостей;  $S$  — площадь поверхности;  $P_M$  — давление водяных паров над поверхностью материала.

Пропитка намоточных изделий может быть открытой, горячим погружением, вакуумной, под давлением, комбинированной и ультразвуковой.

*Открытая пропитка* заключается в погружении высушенных изделий в лак при температуре 120 °С и атмосферном давлении. Она применяется в тех случаях, когда в пропиточный состав входит растворитель, обладающий большой летучестью, например полистирольный лак, в котором 90 % массы составляет бензол. Под действием гидростатического давления, создаваемого лаком, воздух вытесняется из пор и пустот внутри изделия до установления равновесного состояния. Прекращение выделения пузырьков свидетельствует об окончании процесса пропитки.

*Горячее погружение* — самый простой и распространенный способ пропитки. Он состоит в погружении еще неостывших после сушки изделий (60—80 °С) в лак. Однако горячее погружение, как и открытая пропитка, не обеспечивает глубокого проникновения пропиточного состава, так как некоторое количество воздуха остается в изделии.

*Вакуумная пропитка* применяется при использовании пропиточных составов с высокой вязкостью. Выдерживая изделия в вакууме, удаляют воздух из пор и капилляров и, после этого погружают в пропиточный состав. Вакуумная пропитка при непрерывно действующем вакуумном насосе не должна продолжаться более 10 мин вследствие интенсивного испарения растворителя из пропиточного состава. Схема вакуумной пропитки показана на рис. 13.3. Изделия 1 загружают в камеру 3, нагревают до 70—80 °С, открывают кран 2 и создают разрежение порядка 1 кПа. Пропитывающий состав в камере 4 также нагревают до 110 °С, затем открывают кран 6 и впускают в камеру 3, где и осуществляется пропитка. Затем открывают кран 5 и создают вакуум в камере 4, куда возвращается пропитывающий состав. Кран 6 закрывают, изделия выгружают из камеры.

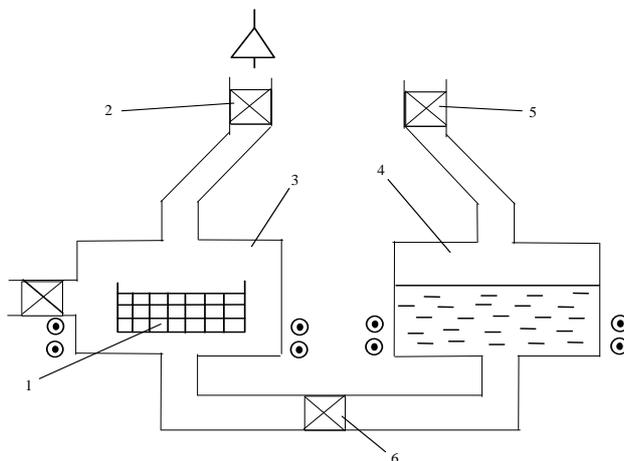


Рис. 13.3. Схема вакуумной пропитки

*Пропитка под давлением* применяется при использовании вязких пропиточных составов или компаундов с наполнителями. Создание избыточного давления 0,5—1,0 МПа нейтрального газа, например азота, ускоряет проникновение пропиточного состава в поры и капилляры изделий.

*Комбинированная (циклическая) пропитка* заключается в сочетании вакуумной пропитки с пропиткой под

давлением. Применение вакуума обеспечивает удаление из изделий влаги и пузырьков воздуха, а под действием избыточного давления пропиточный состав полностью заполняет все поры и капилляры в изделиях.

Чередование циклов пропитки в вакууме и под давлением (рис. 13.4) обеспечивает ее высокое качество. Участок *АВ* соответствует процессу предварительной сушки, точка *В* — момент начала пропитки в вакууме. Длительность вакуумной пропитки не превышает 5—10 мин, так как вакуум способствует интенсивному удалению паров растворителей и повышению вязкости лака. Точка *В* на графике отражает момент окончания пропитки в вакууме, давление в камере повышается до атмосферного (точка *Г*), а затем подачей сжатого газа из баллона поднимается до 4 МПа (точка *Д*). Избыточное давление выдерживается в камере 10 мин (участок *ДЕ*), после чего доводится до атмосферного (точка *Ж*).

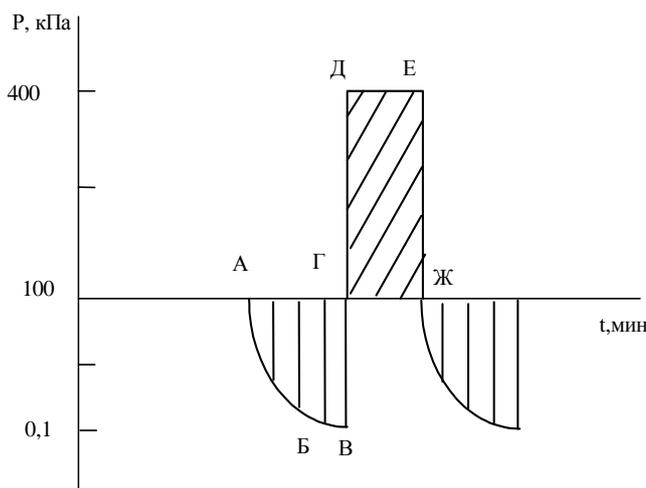


Рис. 13.4. Схема комбинированной пропитки

При пропитке пористых тел жидкость проникает в поры под действием сил поверхностного натяжения, или капиллярных сил. Высота  $h$  капиллярного подъема жидкости в капилляре диаметра  $D$  прямо пропорциональна коэффициенту поверхностного натяжения жидкости  $\sigma$  и смачивающей способности  $\cos\theta$  и обратно пропорциональна диаметру капилляра  $D$  и плотности жидкости  $\rho$ :

$$h = \frac{4\sigma \cos \theta}{\rho g D}.$$

Интенсификация пропитки достигается применением *ультразвуковых колебаний*. Влияние ультразвука при пропитке основано на действии переменных давлений, проявляющихся непосредственно при кавитации, а также за счет вторичных эффектов радиационного давления, "звукового ветра" и др. Ускорение процесса в 6—10 раз происходит вследствие резкого увеличения капиллярного эффекта, т. е. увеличения скорости движения пропиточного состава по капиллярным каналам и увеличения глубины его проникновения. Схема ультразвуковой пропиточной ванны представлена на рис. 13.5.

Магнитострикционный преобразователь (МСП) 5 прикреплен к дну ванны 4, выполненной в виде пустотелого цилиндра из нержавеющей стали. Для охлаждения лака, который под воздействием УЗ-колебаний нагревается, ванна окружена рубашкой охлаждения 2. Пропитываемые детали 1 в сетке 3 погружаются в лак до такого уровня, чтобы они были полностью покрыты лаком. Время пропитки от 5 до 15 мин в зависимости от габаритных размеров изделий и типа намоточного провода.

Установлено, что основной причиной капиллярного ультразвукового эффекта является образование кумулятивных струй жидкости, при этом потенциальная энергия захлопывающегося кавитационного пузырька преобразуется в кинетическую энергию струи  $E_c$ , которая, попав в канал капилляра, увеличивает высоту подъема

жидкости:

$$\Delta E_c = \Delta P_0 + \Delta A_{\text{тр}},$$

где  $\Delta P_0$  — увеличение потенциальной энергии столба жидкости:  $\Delta P_0 = \rho g H_m$ ;  $H_m$  — максимальная высота подъема жидкости под действием ультразвука;  $\Delta A_{\text{тр}}$  — работа против сил трения.

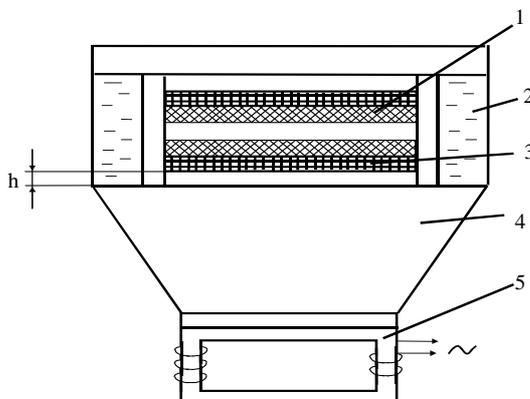


Рис. 13.5. Схема УЗ пропитки

Ультразвуковой капиллярный эффект был открыт академиком АН БССР Е. Г. Коноваловым и используется для пропитки лаками, расплавами припоев пористых тел. Разновидностями пропитки намоточных изделий являются капельная и "самопропитка".

*Капельная пропитка* заключается во введении пропиточного состава одновременно с намоткой провода. Пропиточный состав поступает из капельницы, установленной на намоточном станке, и высушивается сфокусированным ИК-нагревом, что обеспечивает более полное проникновение состава в обмотку, исключает необходимость пропиточного оборудования, однако при этом падает скорость намотки.

"*Самопропитка*" основана на применении в качестве межслойной изоляции поливинилбутиральной пленки ППС толщиной 0,15 мм, высушивается в сушильном шкафу при температуре  $(150 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 3 ч. Обмотка склеивается в монолитную конструкцию, которая является неразборной. Преимущества процесса заключаются в снижении трудоемкости и нетоксичности материала пленки. "Самопропитка" применяется при изготовлении силовых трансформаторов для ПЭВМ.

*Заливкой* называется процесс заполнения лаками, смолами или компаундами свободного пространства между деталями, изделиями и стенками кожухов. Кожух предотвращает растекание неотвердевшего или размягченного заливочного материала. Иногда кожухи заменяют специальными оболочками, выполненными из пресованной бумаги, пленочных материалов, которые не извлекают из залитого изделия.

Достоинством заливки является то, что помимо защиты от климатических воздействий в большей степени, чем при пропитке, повышается механическая стойкость изделий и стойкость к вибрационным нагрузкам. Недостатки — ухудшение теплоотвода, снижение добротности, увеличение паразитных емкостей, длительность процесса полимеризации компаунда (5—10 ч). При значительном объеме заливаемого пространства в результате циклических колебаний температуры возникают напряжения в материале, вызывающие микротрещины.

Технологический процесс заливки состоит из следующих операций:

- подготовка формы (на рабочую поверхность наносят кистью или пульверизатором специальную смазку, предотвращающую прилипание компаунда к стенкам формы);
- фиксация изделия в форме с помощью специальных выступов, упоров, предусмотренных в конструкции формы или изделия, либо пластин из эпоксидного компаунда, прокладываемых между стенками формы и изде-

лием;

- сушка изделия в течение 2 ч при температуре около 100 °С до полного удаления влаги из изделия;
- заливка эпоксидным компаундом холодного отверждения ЭД-5;
- полимеризация компаунда;
- контроль залитых изделий.

Визуальным контролем выявляют изделия, имеющие на поверхности трещины, раковины и пузыри. Эти дефекты устраняются заполнением компаундом с последующей полимеризацией.

Перед полимеризацией применяют вакуумирование залитых компаундом ответственных изделий. Для этого формы с изделиями выдерживают в течение 5—10 мин в автоклавах или вакуумных сушильных шкафах, где создается вакуум 30—50 тор. Процесс полимеризации компаунда проводят в сушильных шкафах в два этапа. На первом формы с изделиями выдерживают в течение 2 ч при температуре (120±5) °С. Такой режим соответствует выделению воздушных включений из заливочной массы до ее отверждения. На втором этапе температуру поднимают до (140±5) °С и поддерживают ее на этом уровне в течение 2—6 ч. Дальнейшее отверждение компаунда может происходить без формы при температуре (135±5) °С.

### 13.3. МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ГЕРМЕТИЗАЦИИ И ИХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Для пропитки применяют жидкие нефтяные, синтетические и растительные масла, масляные лаки, воски, битумы. *Лаки* — это коллоидные растворы смол, битумов, высыхающих масел и других пленкообразующих веществ в летучих растворителях. При сушке растворитель улетучивается, а основа отвердевает, образуя лаковую пленку. Для пропиточных работ применяют материалы, указанные в табл. 13.1.

Табл. 13.1. Состав и технологические свойства пропиточных материалов

Наименование материала	Состав	Режим сушки:		Область применения
		Время, <i>t</i> , ч	<i>T</i> , °С	
Битумно-масляный лак 447	Коллоидный раствор битума, асфальта и растительных масел	6	105—110	Пропитка обмоток радиокомпонентов
Глифталевый лак ГФ-95	Раствор фталевого ангидрида, растительных масел в органических растворителях	6	120—150	Пропитка обмоток трансформаторов, работающих в масле
Электроизоляционный лак МЛ-92	Смесь глифталевого лака и меламиноформальдегидной смолы, растворенной в бутаноле	8	120—150	Пропитка прецизионных проводочных резисторов, деталей из гетинакса и текстолита
Кремнийорганический лак ФЛ-98	Раствор кремнийорганических смол в органических растворителях	0,5	105—110	Пропитка обмоток, работающих в тропических условиях
Кремнийорганический лак К47-К	Раствор полисилоксановых смол в органических растворителях	0,25	105—110	То же
Покровный лак УР-231	Фенольно-формальдегидная смола, тунговое масло, янтарь, парафин	0,5	50	Покрывания плат печатного монтажа и других радиокомпонентов

*Воски* — смесь твердых насыщенных углеводородов, получаемых из нефти и имеющих высокие диэлектрические свойства ( $\text{tg}\delta = (3—7) \cdot 10^{-4}$ ,  $R_V \approx 10^{14}$  Ом·мм) в диапазоне частот до 10 МГц. К воскам относятся парафин, церезин, озокерит, имеющие температуру плавления 50—80 °С и используемые для пропитки трансформаторов, катушек, бумажных и слюдяных конденсаторов, сердечников фильтров. Недостатки восков — малая адге-

зия, невысокие механические свойства.

При хранении лаков и эмалей во избежание улетучивания растворителя тара должна быть герметически закрытой. Вязкость лаков, применяемых для пропитки, должна быть не менее 30 с по вискозиметру ВЗ-4 при температуре 20 °С, эмалей — не менее 20 с. Если в процессе применения лак загустеет, рекомендуется разбавить его соответствующим растворителем. В качестве растворителей используют бензин, ксилол, уайт-спирит, толуол и их смеси.

Для заливки применяют эпоксидные, метакрилатные (МБК), полиэфирстирольные (КГМС) и другие компаунды. Они характеризуются отсутствием растворителя, способностью заполнять определенный объем при обычных условиях и полимеризоваться при определенной температуре. Основой эпоксидных компаундов служат смолы ЭД-5 и ЭД-6. Они различаются молекулярной массой, вязкостью, содержанием эпоксидных групп. Смола ЭД-5 применяется главным образом для компаундов холодного отверждения, а ЭД-6 — горячего.

При отверждении в нормальных условиях в качестве отвердителя вводят фталевый ангидрид или полиэтиленполиамин в соотношении 1:10. Для повышения стойкости компаундов к тепловым ударам в их состав вводят пластификаторы — полиэферы, а для повышения механических свойств — наполнители (тальк, диоксид титана и др.).

Компаунды горячего отверждения ЭД-6 заливаются при температуре (115±5) °С. Понижение температуры приводит к кристаллизации отвердителя, а повышение — к его бурному выделению и образованию пузырей в компаунде. Если необходимо быстро отвердить состав в нормальных температурных условиях, то применяют азотсодержащие соединения (полиэтиленполиамин и др.). При необходимости получить теплостойкий состав с увеличенной жизнеспособностью и высокими физико-химическими и диэлектрическими показателями используют кислотные отвердители — фталевый и малеиновый ангидриды или их смеси.

Пластификатор, снижая вязкость и хрупкость композиции и увеличивая ее жизнеспособность, в большинстве случаев снижает теплостойкость и несколько ухудшает диэлектрические и механические свойства. В качестве пластификаторов применяют полиэферы (5—30 % от массы смолы). Наполнители — кварцевый песок, слюдяную и фарфоровую муку, тальк — вводят в композицию для уменьшения коэффициента линейного расширения компаунда и повышения его теплостойкости и теплопроводности.

#### 13.4. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ В ВАКУУМНО-ПЛОТНЫЕ КОРПУСА

Микроминиатюризация и связанная с ней высокая плотность монтажа в микромодульных конструкциях ЭА предъявляют особые требования к герметизирующим материалам, которые должны обеспечить надежную изоляцию между элементами в аппаратуре с высокой плотностью монтажа, сохранение функциональной точности выходных параметров узла, механическую прочность и защиту сложных и чувствительных элементов. Стойкость герметичных кожухов и корпусов довольно высока, поэтому полную герметизацию проводят в случаях, специально оговоренных в технических условиях на РЭА. Наиболее эффективным способом защиты ЭА от климатических воздействий и повышения ее надежности является *герметизация*, которая заключается в размещении изделий внутри вакуумно-плотных корпусов и оболочек из металла, стекла и керамики.

Достоинства герметизации — обеспечение надежной защиты изделий от внешних воздействий за счет обеспечения герметичности (6—7)·10<sup>-9</sup> м<sup>3</sup>·Па/с, устойчивость к ударным воздействиям и вибрациям. Недостатки — высокая стоимость герметичных корпусов и оболочек, трудоемкость.

При использовании вакуумно-плотных корпусов в них предусматриваются выводы.

Электрические высокочастотные и высоковольтные выводы к аппаратуре подключаются через проходные

изоляторы, низкочастотные цепи — с помощью герметизированных разъемов типа ШРГ. Гермовыводы состоят из стеклянного изолятора, вывода или трубки из сплава 29Н18К (ковар) с коэффициентом линейного расширения  $5,5 \cdot 10^{-6} 1/^\circ\text{C}$ . Изоляторы, предназначенные для дуговой сварки, закрепляются в корпусе сваркой угольным электродом в среде защитного газа (аргона). Изоляторы для пайки имеют более короткий фланец (рис. 13.6).

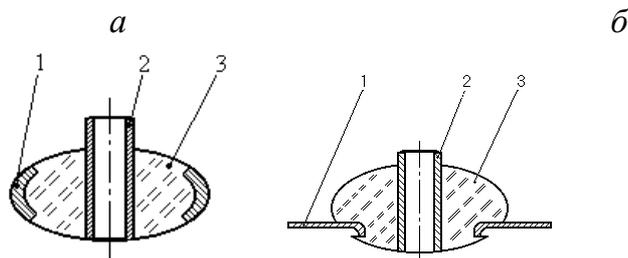


Рис. 13.6. Конструкции гермовыводов для пайки (а) и сварки (б),  
1 – фланец; 2 – трубка; 3 – изолятор

Изготавливают корпуса, кожухи, оболочки литьем, глубокой вытяжкой, ударным выдавливанием или сваркой из отдельных деталей. Материалами корпусов являются мягкая сталь, латунь, медные, алюминиевые и титановые сплавы. Конструкции корпусов подразделяются на: сборные, соединяемые методом сварки; изготовленные глубокой вытяжкой, ударным выдавливанием, фрезерованием на станках с ЧПУ. По используемому материалу корпуса подразделяются на металлические, металлокерамические, металлостеклянные, керамические, стеклянные и пластмассовые. Материалы, используемые в конструкциях корпусов: ковар (сплав 29НК: 29 % Ni, 18 % Co, 53 % Fe); стекло С-49-2, керамика 22ХС, "Поликор".

Схема технологического процесса герметизации изделий ЭА показана на рис. 13.7.

Герметизация корпусов осуществляется пайкой, холодной сваркой, закаткой, с помощью резиновых уплотняющих прокладок, а также сваркой плавлением (дуговой в защитном газе, электронным лучом, лазером, микроплазменным нагревом). К недостаткам методов сварки относятся высокая трудоемкость, связанная с переориентацией корпусов, высокое температурное воздействие на схему, значительный брак.

В ряде случаев для герметизации корпусов применяют холодную сварку, для которой необходим пластичный металл (специальный коваровый лист, плакированный медью). Холодная сварка не требует нагрева и заключается в пластической деформации металла соединения деталей 1, 2 под воздействием давления в специальном штампе, рабочие части 3 которого образуют замкнутый контур (рис. 13.8). Полученное в результате холодной сварки соединение обладает высокой прочностью и герметичностью в диапазоне температур  $-80 \dots +180$  °С. Процесс холодной сварки является высокопроизводительным (доли секунд) и применяется для герметизации полупроводниковых приборов. Недостатки холодной сварки — необходимость специальной конструкции корпуса с увеличенными фланцами, чувствительность к органическим загрязнениям зоны соединения, необходимость применения специального технологического оборудования (гидравлических прессов).

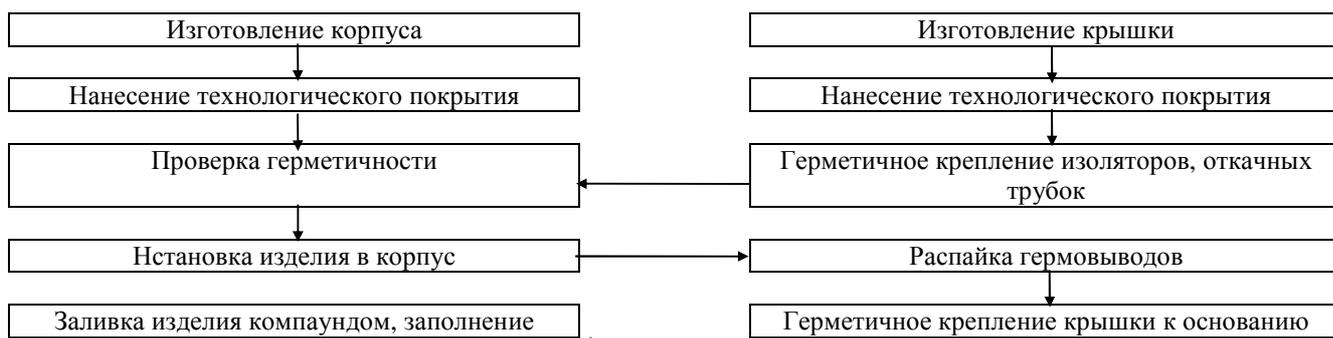




Рис. 13.7. Схема технологического процесса герметизации

Роликовая сварка используется для больших круглых и прямоугольных корпусов. При сварке крышка 1 прижимается к корпусу 2 конусообразными роликами 3 из проводящего материала (рис. 13.8). Сварной шов 4 образуется в результате слияния сварных точек при подаче импульсов тока длительностью 20–80 мс на ролики. Скорость сварки до 2,5 мм/с, мощность установки герметизации сваркой ПГРС –600 Вт.

Сварка лазерным лучом имеет следующие преимущества: не требуется сжатие и защитная атмосфера; свариваемые металлы могут быть разнородными; снижается нагрев корпуса.

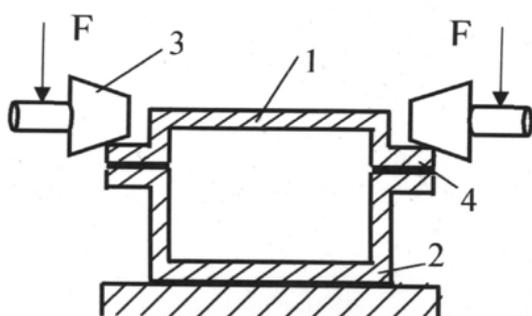


Рис. 13.9. Схема роликовой сварки

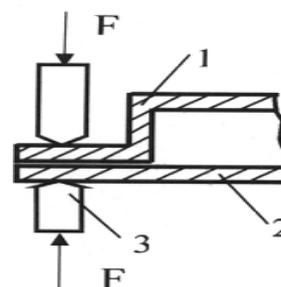


Рис. 13.8. Схема холодной сварки

Герметизация изделий в монолитных пластмассовых корпусах осуществляется заливкой жидкими компаундами и опрессовкой под давлением (0,1—0,5 МПа). Герметичность пластмассовых корпусов недостаточно надежна. Вследствие разницы ТКЛ в зоне вывод — основание возможно возникновение микротрещин, поэтому средняя влагостойкость таких корпусов составляет 10 сут.

### 13.5. ГЕРМЕТИЗАЦИЯ ПАЙКОЙ

Для герметизации металлостеклянных и металлокерамических корпусов МС и БИС применяют пайку легкоплавкими припоями типа ПОС 61, ПОИ-50 и др. Для обеспечения бесфлюсовой пайки соединяемые кромки корпуса и крышки покрывают золотом слоем толщиной 3—5 мкм. Для пайки применяют различные способы нагрева: контактный, горячим газом, лазерным лучом и др..

Герметизация корпусов микроблоков является одной из наиболее ответственных операций, поскольку от ее качества во многом зависит надежность работы аппаратуры. Герметизация микроблоков в настоящее время осуществляется путем пайки или с помощью эластичных уплотнений, что обеспечивает ремонтпригодность микроблока.

При повышенных требованиях к герметичности применяют вакуумно-плотную герметизацию (рис. 13.10,а) с укладкой в зазоре между крышкой 4 и корпусом 1 по всему периметру уплотнительного шнура 5 из нагревостойкой резины. На прокладку по всему периметру накладывают стальную облуженную проволоку 3 диаметром 0,8 мм, образуя зазоры 0,1—0,2 мм для заполнения припоем 2. Пайку проводят припоем ПОИН-50 с использованием спиртоканифольного флюса ФКСп. Один из концов проволоки выводят из зазора через паз в

крышке, что позволяет вскрывать крышку. После ремонта допускается повторная герметизация пайкой.

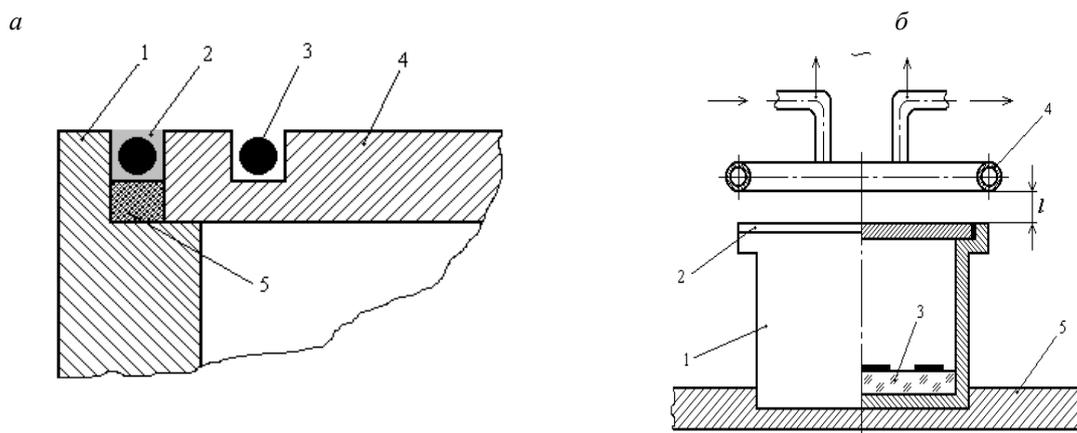


Рис. 13.10. Схема герметизации пайкой с уплотнительной прокладкой (а), с ВЧ-нагревом (б)

Применяемые в настоящее время способы пайки при герметизации микроблоков вручную паяльником не обеспечивают требуемой производительности и высокого качества паяных соединений. При этом трудно достигнуть однородности и равномерности паяного шва, что отрицательно сказывается на качестве герметизации микроблока.

Активация процесса пайки энергией высокочастотного электромагнитного поля частотой 150—1500 кГц позволяет увеличить скорость нарастания температур в 5—10 раз по сравнению с пайкой паяльником за счет бесконтактного нагрева вихревыми токами ВЧ, локализовать зону пайки и снизить тем самым общий нагрев изделия, активировать припой за счет его эффективного перемешивания вихревыми токами. Одновременно обеспечивается возможности автоматизации процесса герметизации, улучшаются условия труда.

При выполнении ВЧ-пайки (рис. 13.10.б) индуктор 4 токов ВЧ, выполненный из тонкостенной медной трубки диаметром 4—6 мм, располагается на заданном расстоянии  $l$  от микроблока и охлаждается в процессе нагрева проточной водой. Пайка крышки 2 к корпусу микроблока 1 осуществляется с использованием дозированного кольца припоя, уложенного в зазор между ними. При пайке плата микросборки 3, расположенная на нижней стороне микроблока, охлаждается с помощью массивного теплоотвода 5. Технологические параметры процесса ВЧ-пайки: расстояние  $l = (8—10)$  мм, частота электромагнитных колебаний 350—550 кГц, источник ВЧ-энергии — генератор мощностью 5—10 кВт, время пайки 5—7 с, температура нагрева микроплаты внутри корпуса не выше 85—90 °С при использовании припоя ПОС 61 и температуре в зоне пайки 230—240 °С.

### 13.6. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ГЕРМЕТИЗАЦИИ

Для контроля герметичности корпусов применяется целый ряд методов: вакуумный, вакуумно-жидкостный, люминесцентный, радиоактивный. Выбор метода контроля герметичности определяется уровнем требований к степени герметичности испытуемых объектов, направлением и величиной газовой нагрузки на оболочку и др.

*Масс-спектрометрический метод* основан на разделении сложной смеси газов или паров по массам с помощью электрических и магнитных полей и имеет наиболее высокую чувствительность. Изделия наполняются гелием двумя способами: герметизацией корпусов приборов и микросхем в атмосфере гелия; опрессовкой загерметизированных приборов и микросхем в атмосфере гелия. Опрессовывают те ИМС, корпуса которых не подвергались окраске или лакировке, так как после окраски или лакировки микроотверстия в корпусах могут быть закрыты для доступа гелия краской или лаками. Негерметичные ИМС, не отбракованные на этапе ТП, при

эксплуатации могут выйти из строя.

Для опрессовки ИМС загружают в камеру, которую герметично закрывают, затем откачивают из камеры воздух до давления 14 — 7 Па. После откачки камеру заполняют гелием и выдерживают в ней ИМС при давлении  $(3 — 5) \cdot 10^{-5}$  Па. Время выдержки ИМС в камере устанавливают в зависимости от типов корпусов (внутреннего объема), обычно от 3 — 48 ч до 3 сут. За этот период в корпуса ИМС, имеющие течи, попадает гелий, который остается в них некоторое время. После завершения цикла опрессовки давление в камере понижают до нормального и ИМС переносят в измерительную камеру для контроля герметичности.

Для случая молекулярного истечения газа размер течи определяется по формуле

$$B = \varepsilon U \sqrt{\frac{M}{M_v}} \frac{1}{\gamma} \frac{P_{\text{атм}}}{P_2 - P_1}, \quad (13.1)$$

где  $\varepsilon$  — чувствительность схемы измерения;  $U$  — показания милливольтметра масс-спектрометра, мВ (фиксируется превышение отсчета прибора над фоном, который определяется заранее для каждого измерения);  $M$ ,  $M_v$  — молекулярная относительная масса наполняющего прибор гелия и воздуха (соответственно 4 и 29);  $\gamma$  — концентрация газа в приборе;  $P_{\text{атм}}$  — атмосферное давление;  $P_1$  — давление в откачиваемой камере (может быть принято равным нулю);  $P_2$  — давление газа в приборе.

Для гелия формула (13.1) трансформируется в вид

$$B = \frac{282 \varepsilon U}{\gamma P_2}.$$

Скорость утечки гелия измеряют не позднее чем через 1,5 ч после извлечения из опрессовочной камеры с помощью гелиевого течеискателя. Герметичными считаются корпуса ИМС, имеющие течь менее  $5 \cdot 10^{-5}$ . Масс-спектрометрическим методом могут быть не отбракованы ИМС с большими течами, если введенный гелий выйдет раньше, чем они будут подвергнуты контролю, т. е. в корпусах не окажется пробного газа.

Суть *вакуумно-жидкостного метода* состоит в том, что в объеме испытуемого изделия создается давление газа, затем изделие погружается в жидкость. Образование пузырьков свидетельствует об истечении газа. По скорости образования и размерам пузырьков можно судить о местонахождении течи и о ее величине.

Испытуемые изделия выдерживают в течение 1 — 5 мин при давлении 10 — 15 Па, затем помещают в стеклянный сосуд с керосином или уайт-спиритом, который до погружения изделий вакуумируют. Если корпус контролируемого изделия негерметичен, то из-за разности давлений внутри изделия и вне его находящийся в нем воздух начнет выходить в керосин или уайт-спирит в виде непрерывной струйки пузырьков. Чувствительность этого метода контроля примерно  $5 \cdot 10^{-3}$ .

*Метод погружения* изделий в нагретую жидкость основан на обнаружении истечения газа из негерметичных приборов, наблюдаемого визуально. ИМС погружают в ванну с нагретым силиконовым маслом ВК.Ж-94А или этиленгликолем так, чтобы верхняя часть корпуса не менее чем на 50 мм находилась под поверхностью жидкости и были отчетливо видны одиночные пузырьки, выделяющиеся из корпуса. Температуру нагретой жидкости выбирают равной 70 — 150 °С. Этим методом обнаруживают скорости натекания  $1 \cdot 10^{-2}$  и более.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Классификация методов герметизации и их применение в производстве РЭУ.
2. Технология пропитки намоточных изделий.
3. Процессы заливки, обволакивания и гидрофобизации.
4. Технология герметизации в вакуумно-плотные корпуса.

## 14. ТЕХНОЛОГИЯ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ

### 14.1. ВИДЫ КОНТРОЛЯ

*Технология контроля* представляет собой совокупность контрольных операций, включаемых в технологический процесс. Контрольные операции назначаются после:

- наиболее важных технологических операций, обеспечивающих основные параметры изделия;
- операций, при которых возможно появление брака;
- финишных (заключительных) операций.

Контрольные операции оснащаются средствами контроля (инструментом, приспособлениями, приборами) и заносятся в карты технологического процесса. Контроль классифицируется по объекту, цели, охвату, срокам и методам реализации (рис. 14.1). Применяются следующие виды контроля:

- *рабочий контроль* (РК), предусматривающий проверку качества деталей, сборочных единиц самим рабочим в конце работы; записывается в ТД в виде перехода, является сплошным или выборочным;
- *профилактический контроль* (ПК), проводимый мастерами и технологами цеха в целях проверки соблюдения технологической дисциплины производства; этот вид контроля в технологических картах не оговаривается, однако его проведение является обязательным для сборочных цехов;
- *контроль наладки* (КН), предусматривающий контроль качества изделий при наладке оборудования. После наладки оборудования наладчик обязан изготовить не менее трех изделий и предъявить их контролеру ОТК. После проверки на соответствие ТУ одно изделие возвращается наладчику, второе передается мастеру участка как эталон, дающий право проводить работу, третье остается у контролера. Контроль наладки является в ТП специальной операцией;

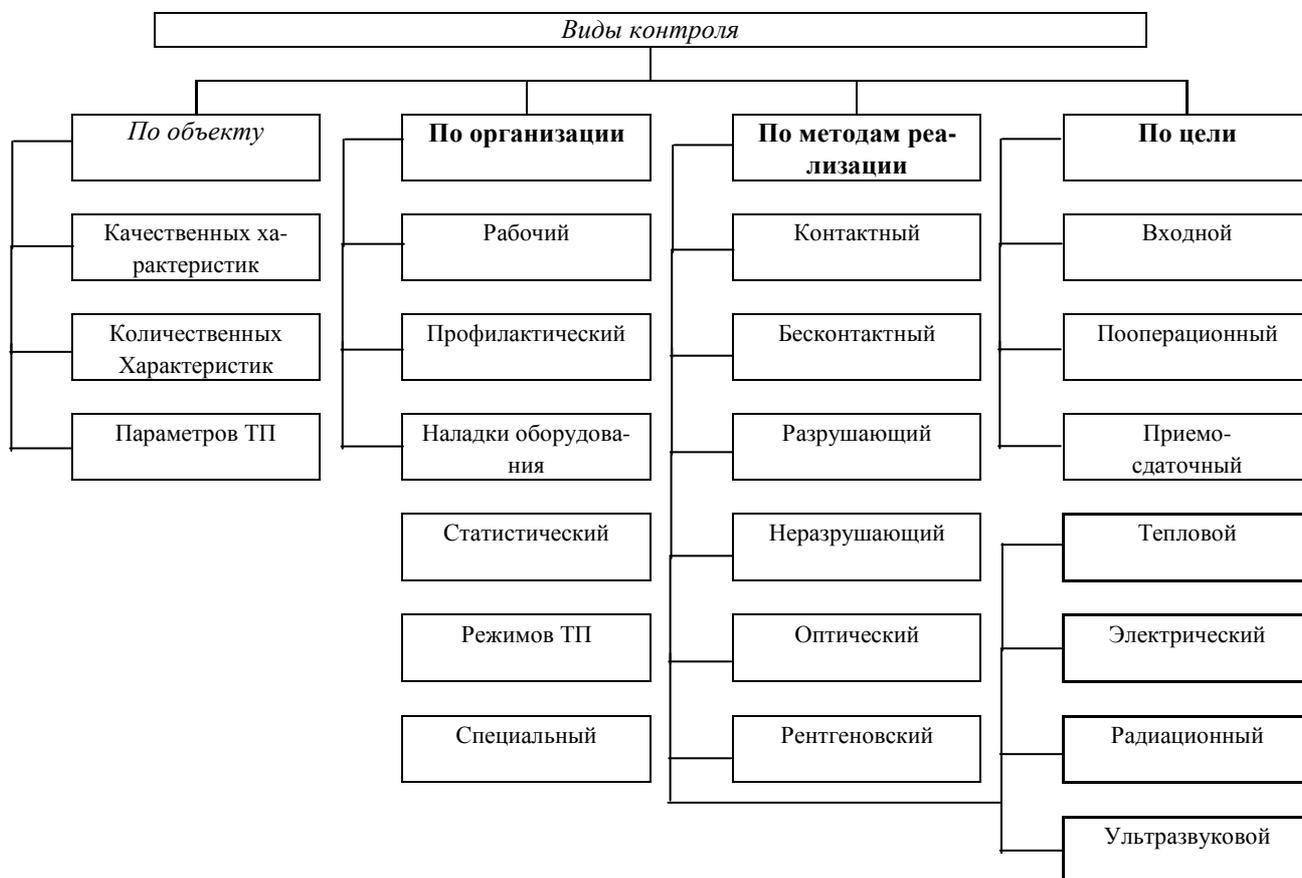


Рис. 14.1. Классификация видов контроля

- *выборочный контроль* (ВК), предусматривающий отбор из каждой партии пробы в размере 2 % партии, но не менее 3 шт. и не более 100 шт., контроль качества деталей и сборочных единиц. Если в пробе после ВК обнаружено не более 1 % деталей с дефектами, то партия возвращается в цех мастеру на разбраковку. При повторном предъявлении контролер ОТК отбирает пробу в удвоенном количестве. При повторном браке принимается решение подвергать контролю 100 % изделий в течение определенного срока, устанавливаемого начальником ОТК предприятия. ВК указывается в технологических документах специальной операцией с указанием параметров, подлежащих контролю, и средств контроля;

- *статистический контроль* (Ст.К), предусматривающий контроль качества выпускаемой продукции путем систематических проверок изделия в процессе изготовления. Через определенные промежутки времени контролер обходит рабочие места, производит контрольные замеры и делает соответствующие отметки в контрольной карте. Если отметки приближаются к границам полей допусков, то контролер предупреждает рабочего и наладчика о необходимости переналадки оборудования. При обнаружении брака работа прекращается;

- *контроль режимов* (КР), осуществляемый в соответствии с технологическими инструкциями и предусматривающий проверку параметров ТП, рабочих составов материалов. В ТИ указываются сроки контроля составов и взятия проб для анализа в химической лаборатории предприятия;

- *специальный контроль* (Сп.К), предусматривающий контроль качества по специально разработанной технологии (отражающей требования карт технологического контроля), осуществляется с помощью комплекта приспособлений, приборов, инструментов.

Обязательными контрольными операциями после сборки и монтажа ЭА являются визуальный и электрический контроль. *Визуальным контролем* проверяют: внешнее соответствие изделия чертежу, образцу, качество крепления деталей, сборочных единиц (совмещается с операцией стопорения резьбовых соединений), качество паяных и сварных соединений, отсутствие внешних дефектов (трещин, вмятин, следов коррозии и т. д.), качество отделки поверхности в сравнении с эталоном или образцами, маркировку изделий и отдельных сборочных единиц.

Наружный осмотр проводят как невооруженным глазом, так и с помощью лупы (х4), микроскопа бинокулярного типа МБС-9 с 50-кратным увеличением или специальных приборов и приспособлений. Дефекты при сборке сборочных единиц возникают в результате неправильного программирования, технических отказов или субъективных факторов, поэтому целесообразно проверять качество и правильность сборки до монтажа. Для ускорения визуального контроля используют оптическое сравнение смонтированной платы с эталонной (рис. 14.2), применяя осветитель 2 и зеркало 5.

Вращением секторного диска 3 с частотой несколько герц добиваются, чтобы наблюдатель видел при полном соответствии оригинала 1 и объекта проверки 6 через призму 4 одно изображение. Недостатком данного метода является повышенная утомляемость оператора.

Применение *систем технического зрения* (СТЗ) становится предпосылкой создания адаптивного управления, которое приобретает такие положительные качества, как универсальность и гибкость. Основой СТЗ являются телевизионные вычислительные системы, работающие на времяимпульсной базе, в которой  $f(L) = f(t)$ . При перемещении сканирующего луча по оси времени края измеряемого объекта будут последовательно пересекаться в точках  $x_1$  и  $x_2$  в моменты времени  $t_1$  и  $t_2$ , т. е. каждому размеру будет соответствовать видеоимпульс определенной длительности. Сравнивая его с контрольным, можно измерять размеры объекта с точностью до 0,1 % (рис. 14.3).

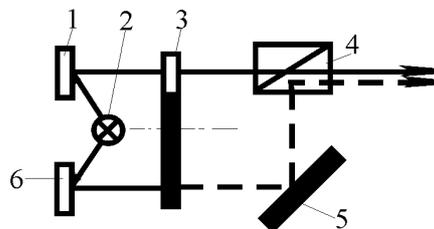


Рис. 14.2. Схема оптического сравнения

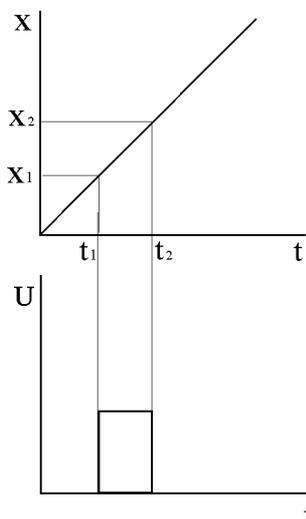


Рис. 14.3. Принцип времяимпульсной системы

В современных СТЗ зрительная информация, преобразованная в матричный массив цифровых данных, обрабатывается на ЭВМ по определенным алгоритмам. Структурная схема СТЗ включает (рис. 14.4): оптическую систему (ОС); телевизионный преобразователь, преобразующий световое изображение наблюдаемого объекта в видеосигнал; устройство обработки видеосигнала (УОВ), преобразующее видеоинформацию в соответствующий массив цифровых данных; ЭВМ, осуществляющую обработку информации по определенным алгоритмам распознавания и выделения объекта.

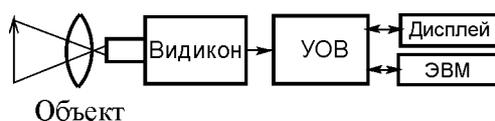


Рис. 14.4. Обобщенная структурная схема СТЗ

Фотоэлектрические преобразователи, применяемые в СТЗ, разделяют на две группы: вакуумные телевизионные трубки (видиконы) и приборы с зарядовой связью (ПЗС). С появлением в 1969 г. ПЗС открылись принципиально новые возможности для СТЗ. Чувствительность ПЗС составляет несколько тысяч телевизионных линий (в трубке — 750), отсутствует инерционность, потребляемая мощность и масса снижаются в 10 раз, долговечность увеличивается в 30 раз. Дополнительные достоинства фотоприемников на основе ПЗС заключаются в использовании разнообразных полупроводниковых материалов, что позволяет покрывать широкую область электромагнитного спектра, включая и ИК-область.

Примером использования СТЗ в целях контроля является установка контроля микрообъектов УКМ-1, которая применяется при выполнении сборочных операций в производстве ИМС. Установка состоит из видеокamеры, закрепленной на штативе, предметного столика, блока питания и видеоконтрольного устройства (ВКУ).

Микроструктурный анализатор MSA фирмы Opton — это бесконтактный оптический контрольно-измерительный прибор для распознавания структурных признаков, позиционирования и измерения геометрических величин (рис. 14.5). Он обеспечивает возможность распределения элементов по критериям отбора при контроле в производственном процессе, что сокращает брак при больших допусках. Технические характеристики установок контроля с СТЗ приведены в табл. 14.1.



Рис. 14. 5. Микроструктурный анализатор MSA

Табл. 14.1. Характеристики установок контроля

Параметры	Модель	
	УКМ-1 (Россия)	MSA (Германия)
Увеличение телесистемы	100±5	200±5
Разрешающая способность, лин/мм	Не менее 100	512
Поле зрения	От 1,2×0,9 до 2,6×2,0 мм	60×48 мкм
Габаритные размеры, мм	1200×1080×1250	1500×800×600
Масса, кг	100	200

Изображение воспринимают двумя методами: теньвым и отраженным. По теньвому объект располагается между источником света и камерой, зона качественного изображения меньше зависит от освещенности ((0,5 – 1,0) · 10<sup>3</sup> лк). Отраженный метод позволяет лучше распознавать объекты (читать маркировку элементов), хотя и требует большей освещенности (до 2 · 10<sup>3</sup> лк). Яркость  $R$  в каждой точке изображения определяется формулой

$$R = I \xi \cos \alpha, \quad (14.1)$$

где  $I$  — интенсивность падающего света;  $\xi$  — отражательная способность;  $\cos \alpha$  — угол падения луча к нормали к поверхности.

С точки зрения спектральной области анализа изображений выделяют четыре физических принципа организации СТЗ: в видимом диапазоне (0,38 — 0,78 мкм) — 80 %; лазерное сканирование (1,06 мкм) — 10 %; в ИК-диапазоне (0,78 — 3,0 мкм) — 5 %; в рентгеновском диапазоне (менее 0,28 мкм) — 5 %.

Производительность контроля СТЗ достигает 60 фрагментов в минуту при подсчете количества элементов и 120 фрагментов при сортировке по изображению. Типичные задачи СТЗ в производстве ЭА: контроль качества паяных соединений — 12 %, навесного монтажа — 13 %, проводников ПП — 8 %, сборки гибридных ИМС — 10 %, подложек — 4 %, томографическое тестирование — 4 %, остальное — другие задачи.

Путем измерений проверяют линейные размеры, массу, физические параметры (давление, вязкость, твердость), электрические параметры, правильность монтажных соединений и др. Для измерения линейных разме-

ров используются штангенциркули, микрометры, индикаторы малых перемещений. Фирма Mauser (Германия) выпускает эти инструменты с цифровым отсчетом.

*Электрический контроль* правильности монтажных соединений является необходимой операцией, предшествующей настройке. Эту операцию осуществляют, используя электромонтажные схемы изделия. Автоматизация контроля достигается применением установок, работающих по принципу неуравновешенного моста. Применяют схемы автоматизации контроля двух видов. Первая (рис. 14.6, а) предназначена для контроля цепей с короткозамыкающими перемычками, замыканиями на корпус и индуктивностями с малым омическим сопротивлением, а вторая — для проверки цепей с омическими сопротивлениями.

На резисторах R1 — R4 собран мост постоянного тока, в точках 1 и 2 шаговым искателем (ШИ) периодически подключаются цепи проверяемого монтажа. При ошибочной установке резистора в проверяемую цепь сила тока разбаланса будет достаточна для срабатывания реле, включенного в диагональ моста. Контакты реле, через которые замыкается цепь питания шагового искателя, размыкаются, последний прекращает работу, на табло зажигается контрольная лампочка номера цепи.

Во второй схеме автомата (рис. 14.6, б) посредством этого же шагового искателя в плечи моста включаются проверяемые резисторы  $R_x$  и соответствующие им эталонные резисторы  $R_n$ . В одну из диагоналей моста включен усилитель постоянного тока (УПТ), нагрузкой которого является электромагнитное реле. Коэффициент усиления УПТ выбран таким образом, что если проверяемое сопротивление резистора лежит вне пределов допуска, реле срабатывает и разрывает цепь питания шагового искателя.

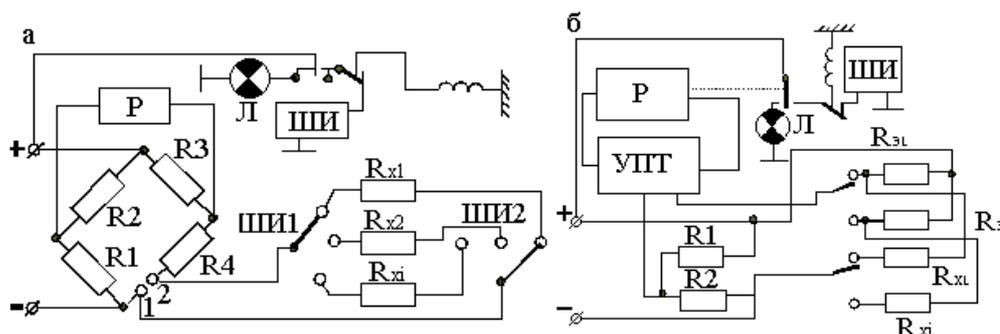


Рис. 14.6. Схема электрического контроля малых (а) и больших (б) сопротивлений

Внутрисистемное тестирование предполагает возможность доступа к внутренним электрическим контактам компонентов блока и сборочной единицы. Для обеспечения доступа к внутренним контактам приборы технической диагностики (автоматические тестеры) имеют матрицу подпружиненных контактов (рис. 14.7), состоящую из фиксированной 6 и подвижной 3 плат, контактных игл 5, установленных с заданным шагом, пружин 4 для перемещения изделия 1, уплотнения 2.

Прибор технической диагностики для проверки резисторов, диодов, наличия короткозамыкающих перемычек на плате видеоканала телевизора имеет контактное устройство для одновременного подключения контролируемых цепей. Проверка производится последовательным способом с отражением результатов на табло. Время проверки всей платы не более 20 с.

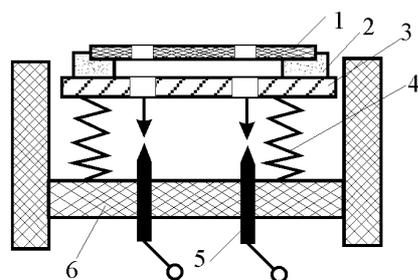


Рис. 14.7. Матрица подпружиненных контактов

Для автоматизированного внутрисхемного контроля аналоговых, цифровых или цифроаналоговых печатных блоков предназначена "Система технологическая 1013", которая имеет: максимальное количество каналов контроля 760; производительность контроля параметров ЭРЭ 15—17 шт/с, цифровых ИС 5—12 шт/с, топологии — 150 проводников в секунду; потребляемую мощность 2,0 кВт; площадь 3,5 м<sup>2</sup>.

Установка контроля параметров печатных плат завода "Элмаш" (Беларусь) обеспечивает 4-зондовое контактирование при проверке МПП и ЖКИ с производительностью до 6300 точек в час, погрешностью позиционирования  $\pm 0,025$  мм и имеет управление от микроЭВМ "Электроника - 60".

## 14.2. ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ

*Техническая диагностика* — это комплекс мероприятий, направленных на изучение отказов в процессе проектирования, производства и эксплуатации аппаратуры и разработку возможных методов повышения надежности изделий. Техническая диагностика включает проведение испытаний ЭА:

- на функционирование, когда устанавливают соответствие характеристик изделия требованиям ТУ при работе в течение относительно короткого времени;
- на воздействие окружающих условий, обычно при максимальных значениях температуры, ударных нагрузок, вибраций;
- на надежность, в ходе которых устанавливают соответствие характеристик изделия требованиям ТУ при работе в течение всего заданного интервала времени.

Для диагностики отказов ЭА создаются системы анализа отказов (САО), которые предусматривают определенный порядок проведения анализа, его информационное, методическое и техническое обеспечение. Порядок проведения анализа заключается в изучении сопроводительной документации на изделие, составлении и выполнении программ анализа брака, составлении актов, протоколов или отчетов в установленном порядке. Информационное обеспечение базируется на регламентирующих документах различного уровня (межотраслевых, отраслевых и предприятия), информационных массивах, хранимых в ЭВМ. САО (рис. 14.8) состоит из следующих устройств:

- диагностирования (4), производящего контроль работоспособности изделия и поиск отказавшей подсистемы;
- оценки достоверности анализа (5);
- банка априорной информации (6) о вероятностях отказов блоков в зависимости от условий их работы;
- подготовки решения (7), по результатам действия которого оператором принимается решение либо о достаточной достоверности анализа отказа и переходе к следующей подсистеме, либо о повторении анализа на том же уровне с применением дополнительной априорной информации;

- проверяемых блоков (1—3).

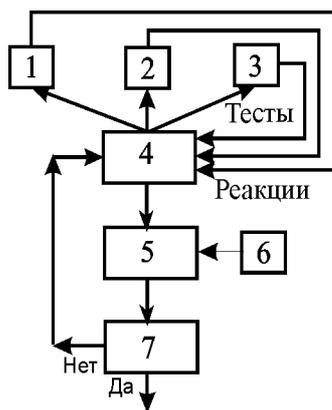


Рис. 14.8. Схема анализа отказов

При реализации САО должны выполняться следующие принципы технической диагностики: рекуррентность, неповреждаемость, метрологическая совместимость, производительность. Согласно принципу рекуррентности, на каждом следующем уровне (блоки, комплектующие изделия и их элементы) схема САО должна повторяться, только ее элементы будут иметь свое содержание в зависимости от используемых методов и технических средств. Неповреждаемость состоит не только в создании физических дефектов и разрушений, но и условий для протекания деградационных или информационных процессов. Метрологическая совместимость заключается в обеспечении соответствия метрологических характеристик методов и средств анализа отказов. Производительность требует обеспечения возможности анализа за требуемое время всех отказавших изделий, а в них — всех дефектов, т. е. обеспечения необходимого уровня оперативности и глубины анализа. При анализе отказов ЭА методика технической диагностики включает ряд этапов (табл. 14.2).

Табл. 14.2. Последовательность, цели и методы анализа отказов ЭА

Основные цели	Методы анализа отказов
<b>Диагностирование блока или системы ЭА</b>	
Локализация отказавшей сборочной единицы	Программный и тестовый контроль
<b>Первичный анализ сборочной единицы, ТЭС</b>	
Локализация отказавшего элемента (ЭРЭ, ИМС)	Измерение электрических параметров; методы неразрушающего анализа: оптические, радиационные, тепловые и др.
<b>Углубленный физико-химический анализ вскрытого элемента</b>	
Оптико-топологическое определение дефектных мест, размеров и формы дефектов	Микроскопия: оптическая в УФ-И, ИК-свет, растровая электронная, протонная, рентгеновская, телевизионная
Анализ элементного и фазового состава примесей, загрязнений, коррозионных слоев с распределением по глубине и поверхности	Спектроскопия: оптическая, абсорбционная, акустоэмиссионная, рентгеновская флюоресцентная, инфракрасная, электронная, ионная ОЖС, ядерная гамма-резонансная
Анализ структурных дефектов по глубине и поверхности, определение текстуры и направлений осей в кристаллах	Интерферометрия: оптическая, голографическая; рентгеноструктурный, термогравитометрический, радиационно-химический анализ.
Исследование физико-химических свойств, механизмов диэлектрических потерь, проницаемости, поляризации фазовых и магнитных превращений, диффузии	Химический и нейтронно-активационный анализ, газовая хроматография
<b>Моделирование отказов</b>	
Подтверждение результатов и повышение достоверности результатов углубленного анализа	Многофакторное моделирование внешних воздействий и деградационных или разрушающих дефектов; аналоговое, цифровое и имитационное или статическое моделирование внешних воздействий и дефектов

Локализованный ТЭС или ЭРЭ подвергается первичному анализу, который осуществляется без вскрытия корпуса и предназначен для подтверждения факта отказа по результатам измерения параметров. Первым этапом углубленного анализа является вскрытие изделия путем механического или химического удаления корпуса и проведение оптико-топологического наблюдения дефектных мест.

Для установления причин и механизма отказа выделенного элемента анализируют элементный и фазовый состав, определяют радиационные и структурные дефекты, исследуют физико-химические свойства материала дефектной зоны. Если результаты этих этапов не позволили однозначно определить причины и механизмы дефекта, то производят моделирование отказа и диагностические испытания.

### 14.3. МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ

Первая группа методов диагностики основана на измерении функциональных параметров (электрических, теплофизических и др.) контактными и бесконтактными способами. При контактном способе измерительные приборы подключаются с помощью специальных контактов: игольчатых, зажимных и ленточных. Недостатки этого способа — возможность повреждения элементов, плат, невысокая производительность. Бесконтактные способы применяются для диагностики цифровых ИМС, при работе которых в импульсном режиме переменное магнитное поле вокруг схемы может регистрироваться с помощью индуктивного зонда (миниатюрной катушки индуктивности), а переменное электрическое поле — с помощью емкостного зонда (медный штырь в электрическом экране) (рис. 14.9).

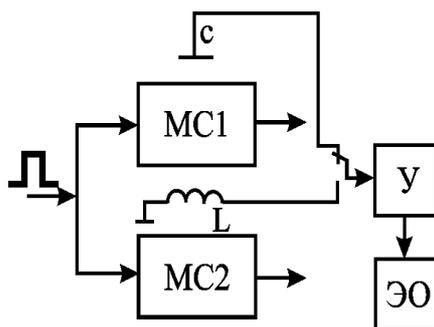


Рис. 14.9. Бесконтактные методы контроля

Вторая группа методов основана на измерении откликов на выходе блоков, ИС на определенные входные воздействия (методы переходного счета, сигнатурного анализа). В основе *метода переходного счета* лежит подсчет числа переходов двоичных символов в противоположные при нулевом состоянии счетчика. Это наиболее простой метод диагностирования цифровых блоков ЭА. Вероятность пропуска ошибок:

$$q = N_{н.о} + N_{ош} , \quad (14.2)$$

где  $N_{н.о}$  — число необнаруженных ошибок;  $N_{ош}$  — число ошибок.

*Метод сигнатурного анализа* основан на прослеживании сигналов с учетом их динамики. Для этого к схеме подключают сигнатурный анализатор, преобразующий длинные последовательности двоичных сигналов, поступающих от испытуемого изделия, в короткие четырехзначные шестнадцатеричные ключевые коды — "сигнатуры", которые сравниваются с эталонными. Выявляемая ошибка в двоичной последовательности прослеживается по схеме обратным ходом путем просмотра запоминающих элементов и ключей, пока не обнаружится элемент с ошибочным выходным сигналом.

Результаты преобразования могут представлять собой число единичных значений сигналов (типа 1, 0). Аппаратно это решается с помощью сдвигового регистра с обратными связями и сумматора по модулю на вхо-

де. На вход  $x_1$  сумматора поступает двоичная последовательность  $Q$ , которая должна быть преобразована в 16-разрядную сигнатуру (рис. 14.10). На входы  $a_1, \dots, a_4$  поступают сигналы с 16, 12, 9 и 7-го разрядов регистра D2. Вход "Сброс" служит для начальной установки регистра D2 перед поступлением последовательности  $Q$ . На вход "Синхронизация" поступают тактовые сигналы, синхронизирующие работу регистра. Установившиеся значения разрядов регистра после подачи последовательности  $Q$  определяют ее сигнатуру.

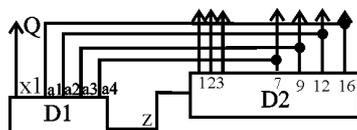


Рис. 14.10. Шестнадцатери-разрядный сигнатурный генератор

Аналитически функция сумматора  $z = x_1 + a_1 + a_2 + a_3 + a_4$ . Для диагностирования цифровых устройств и приборов с точностью до компонента используется анализатор сигнатурный типа АС-817, работа которого основана на преобразовании (сжатии) входных последовательных двоичных потоков с помощью заторможенного генератора последовательности максимальной длины, который представляет собой регистр сдвига с обратными связями по модулю два. Начало и конец обработки (окна измерения) определяются внешними управляющими сигналами "Пуск" и "Стоп". Входная двоичная последовательность поступает через вход "Данные" на регистр сдвига с обратными связями синхронно с управляющим сигналом "Такт", также снимаемым с проверяемой схемы (рис. 14.11).

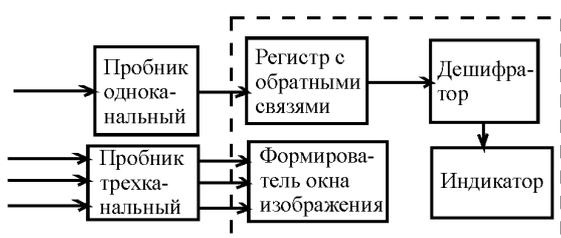


Рис. 14.11. Упрощенная структурная схема анализатора

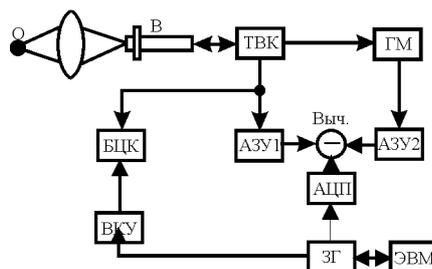


Рис. 14.12. Структурная схема тепловизора

Результирующий двоичный код, получаемый в регистре после прихода сигнала "Стоп", дает сигнатуру, которая индуцируется в шестнадцатеричном коде. Выносные пробники обеспечивают возможность подключения к проверяемой схеме для подачи на анализатор управляющих сигналов "Пуск", "Стоп", "Такт" и сигнала "Данные". Вероятность правильного диагностирования 99,998 %. Максимальная частота входных управляющих сигналов 10 МГц, минимальная длительность импульсов сигналов 10 нс.

Среди физических методов диагностики и неразрушающего контроля ЭА особая роль принадлежит рентгеновским, основанным на поглощении излучения веществом и позволяющим наблюдать изображение внутренней структуры просвечиваемого изделия благодаря различным коэффициентам поглощения. По способу регистрации информации эти методы подразделяются на рентгенографические, рентгеноскопические, рентгенотелевизионные, рентгеностроскопические.

*Рентгеноскопические методы* позволяют фиксировать теневую картину на рентгеночувствительной пленке, обладающей высокими разрешением и чувствительностью, что дает возможность документировать результаты анализа.

*Рентгенотелевизионная микроскопия* основана на том, что изображение попадает на мишень рентгеночувствительного видикона. Для наблюдения получаемых изображений используется телевизионная система, что

позволяет наблюдать скрытые микродефекты, обеспечивает высокую производительность, оперативность и безопасность контроля. Технические характеристики отечественных рентгенотелевизионных микроскопов типа МТР-3 и МТР-6 даны в табл. 14.3.

Табл. 14.3. Рентгенотелевизионные микроскопы

Параметры	МТР-3	МТР-6
Разрешающая способность, лин/мм	20 пар	100 пар
Диапазон увеличения	15—35	15—100
Контрастная чувствительность, %	1,5	1,5—3
Размеры контролируемых объектов, мм	5—150	0,01—100
Максимальное напряжение на рентгеновской трубке, кВ	150	50

С использованием рентгенотелевизионного метода выявляются следующие дефекты: неточности сборки полупроводниковых приборов и ИМС; нарушение сплошности паяных и сварных соединений, поры, трещины, расслоения в материалах; нарушения внутренней геометрии изделий и разрушение механических связей и деталей приборов после вибрационных, ударных и тепловых воздействий.

Метод рентгенотелевизионной микроскопии как средство неразрушающего контроля отличается высокой оперативностью и эффективностью контроля. Примером его применения является контроль сплошности паяного шва при посадке микрополосковых плат на основание корпуса (96 — 98 % спая), а также герметичности паяного шва интегральных схем.

*Тепловые методы* применяются для контроля тепловых режимов, обнаружения зон локального перегрева, выявления областей повышенного или пониженного сопротивления. Тепловые контактные методы основаны на регистрации температуры или ее распределения по поверхности изделия с помощью жидких кристаллов, термомасок, термобумаги, термоэлектрических датчиков (термопар, полупроводниковых терморезисторов, термотранзисторов и др.), контактирующих с поверхностью. Разработанные в настоящее время термоиндикаторы позволяют измерять температуру в диапазоне 36—250 °С с погрешностью  $\pm(1—2)$  °С.

Тепловые бесконтактные методы основаны на регистрации собственного излучения элементов в диапазоне электромагнитных волн длиной 0,5—1000 мкм с помощью оптико-электронных приборов. Инфракрасные приборы — ИК-радиометры и тепловизоры — обычно состоят из оптической системы, работающей в ИК-диапазоне сканирующего устройства, ИК-приемника и фиксирующего устройства. В пирометрах используют фоторезисторы типа СФИ-1 с площадью чувствительной площадки 1 мм<sup>2</sup> и пороговой чувствительностью  $2 \cdot 10^{-10}$  Вт. Модулятор, приводимый в движение электродвигателем с частотой вращения 300 с<sup>-1</sup>, а следовательно, частотой модуляции порядка 3600 Гц, периодически прерывает поток излучения. В этот момент на преобразователь подается опорный сигнал и пирометр генерирует электрический сигнал, пропорциональный разности падающего потока излучения и опорного сигнала. Для наведения пирометра на объект и контроля на нем температуры применяют лазерную указку ЛГ-78.

Пирометры типа "Смотрич" (НПО "Термоприбор", Украина) имеют диапазоны измерения температуры от 100 до 3500 °С, основную погрешность до 2,5 %, инерционность 1 с, рабочее расстояние 0,35—10 м.

Тепловизоры преобразуют тепловое излучение в видимое на экране, что позволяет качественно и количественно с помощью контрольных точек оценить тепловой режим работы отдельных участков изделия. Основные технические характеристики приборов теплового контроля приведены в табл. 14.4.

Табл. 14.4. Технические характеристики приборов теплового контроля

Тип прибора	Диапазон измеряемых температур, °С	Разрешение			Назначение
		температурное, °С	угловое, град.	линейное, мкм	
Тепловизор ТВ-03 (СССР)	20—200	0,2	4,5	—	Контроль тепловых полей
Микрорадиометр ИКР-2 (СССР)	20—200	0,5—3,0	45	20—60	Измерение температуры на поверхности ИМС, транзисторов
Тепловизор АГА-680 (Швеция)	20—200	0,3	1,3	10—100	Контроль тепловых полей миниатюрных объектов
Микротермоскоп (Германия)	20—500	1,0	—	2,5—7,5	Измерение температуры ИМС, ПП, ЭРЭ
ИК-термометр (США)	0—500	0,5	—	5000	Дистанционное измерение температур
Термовизионная система ИИ-42ТМ, (Беларусь)	500—1200	1,0	2,0	0,5—1,8	Тепловые поля в цветном изображении. Управление: ПЭВМ

В тепловизорах с оптико-механическим сканированием осуществляется последовательное преобразование ИК-излучения в видимое за счет пространственной развертки наблюдаемого изображения путем движения оптических элементов: зеркал, призм и др. Такие тепловизоры обладают высокой чувствительностью, достигающей сотых долей градуса, однако имеют плохое разрешение вследствие малого количества строк в кадре и малой частоты строк. Тепловизоры с электронным сканированием с использованием ИК-видиконов имеют температурный порог чувствительности десятые доли градуса, разрешающую способность 2 %, аппаратную погрешность измерения температуры 0,5—1 %.

Формируемый телевизионной камерой (ТВК) стандартный видеосигнал несет информацию о тепловом распределении по поверхности контролируемого объекта (О). Для точного измерения температуры в любой точке обнаружения в генераторе (ГМ) формируются измерительный и опорный маркеры, которые управляют работой аналогово-запоминающего устройства (АЗУ). Вычитание осуществляется для исключения теплового тока видикона. АЦП преобразует сигнал в цифровой код, который с помощью знакогенератора (ЗГ) выводится на экран видеоконтрольного устройства (ВКУ). Для большей наглядности изображения используют блок цифрового кодирования (БЦК) (рис. 14.12).

Физическую основу *электронно-микроскопических методов* составляют явления взаимодействия пучка электронов и вещества (просвечивающая и растровая микроскопия, электрография) или явления испускания электронов под воздействием теплоты, света, ионного или электронного потока (эмиссионные и Оже-спектрометрические методы). Диагностические возможности электронных методов анализа приведены в табл. 14.4.

Характерной особенностью электронно-микроскопического метода, ограничивающего его использование при анализе дефектов, является необходимость работы с очень тонкими образцами материалов толщиной около 0,05 мкм (репликами). Поэтому в настоящее время в качестве основного инструмента анализа поверхности изделий без их разрушений используют растровые электронные микроскопы (РЭМ). Варьируя энергию электронов луча и изменяя тем самым глубину их проникновения, определяют пространственный рельеф залегания  $p$

—  $n$ -переходов в многослойной структуре, распределение потенциалов на пленочных сопротивлениях, качество микросварных соединений.

РЭМ, как и традиционный микроскоп, имеет линзовую систему, но функция ее состоит в том, чтобы получить пучок электронов предельно малого сечения (зонд), обеспечивающий достаточно большую интенсивность ответного сигнала от участка объекта, на который попадает пучок. Размер участка определяется сечением зонда, который может достигать 0,1 мкм. Для получения информации о микроструктуре достаточно большой области зонд заставляют обегать (сканировать) заданную площадь по программе (строчки, образующие квадрат, круг и т. д.).

Яркость электронного луча катодно-лучевой (телевизионной) трубки модулируется сигналом от приемника сигналов (например, коллектора вторичных электронов), усиливаемого видеоусилителем. Масштаб изображения на экране определяется отношением размера сканирования на поверхности объекта и размера изображения (растра) на экране. Уменьшение размеров участка сканирования приводит к увеличению изображения. Предельные увеличения в современных конструкциях РЭМ составляют 150—200 тыс. раз. Достоинством является чрезвычайно большая глубина резкости, которая практически не меньше размеров участка, изображаемого в плоскости.

Большая глубина резкости изображения в РЭМ снимает одно очень важное ограничение анализа микроструктуры в светооптическом микроскопе — необходимость подготовки плоскости шлифа. Это открывает широкие возможности для микроскопического исследования естественных поверхностей объектов, что важно для микроэлектронных приборов. При исследовании непроводящих материалов на их поверхность наносят металлический проводящий слой (например, золота, серебра) путем напыления в вакууме. Так, для определения степени обжата проволочного вывода толщиной 35 мкм при монтаже кристаллов ИМС УЗ-микросваркой и качества микросварного соединения используют малогабаритный микроскоп МРЭМ - 200 (СССР) либо растровый электронный микроскоп Stereoscan-360 фирмы Cambridge Instruments (Великобритания) с увеличением в 1000 раз (рис. 14.13)..

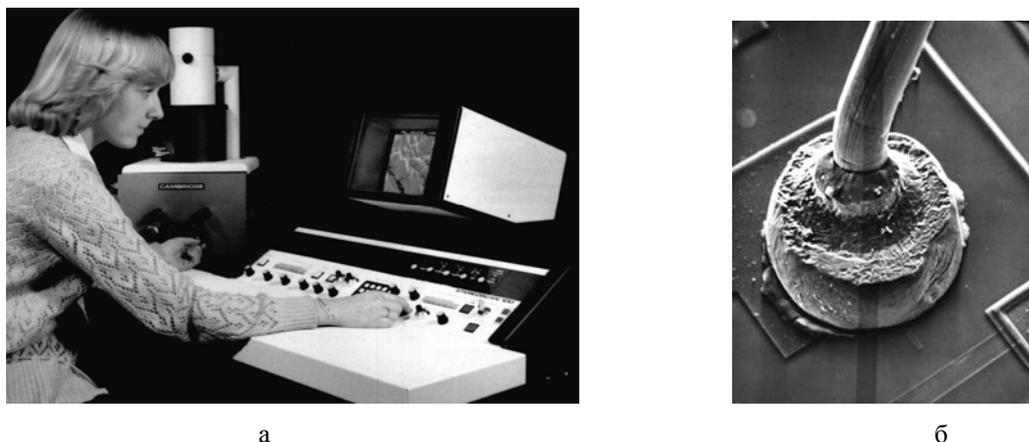


Рис. 14.13. Растровый электронный микроскоп Stereoscan-360 (а) и микросварное соединение (б)

Современная аппаратура, предназначенная для рентгеноспектрального анализа в микроскопически малых объемах, рентгеновские микроанализаторы (МАР) позволяют с высокими локальностью (0,5—5 мкм по поверхности и 0,01—5 мкм по глубине) и чувствительностью (0,01—0,5 %) устанавливать химический состав и характер распределения элементов в микрообъемах материала. Микроанализатор состоит из электронно-оптической системы для получения узкого пучка электронов (электронная пушка и две электромагнитные линзы), одного или более рентгеновских спектрометров для анализа излучения по длинам волн и интенсивностям,

светового микроскопа для выбора участка исследования, устройства для получения растрового изображения объекта. Полупроводниковые детекторы имеют значительно лучшее по сравнению с пропорциональными счетчиками разрешение и могут работать без кристаллов-анализаторов. Сигнал с предусилителя подается в многоканальный амплитудный анализатор (снабженный ЭВМ и видеомонитором), который разделяет сигналы с разной энергией

Метод Оже-спектроскопии — уникальный метод анализа химического состава и распределения химических элементов в самых тонких слоях, примыкающих к поверхности. Однако Оже-спектрометры требуют для работы высокого вакуума ("сверхвакуума" до  $10^{-6}$  Па). Происхождение Оже-электрона связано с возбуждением атомов мишени на одной из внутренних электронных оболочек. Для атомов легких металлов относительная вероятность Оже-переходов составляет 95 %, для тяжелых ( $z > 10$ ) — около 10 %. Обычно Оже-спектр представляет первую производную кривой распределения вторичных электронов по энергиям. Оже-спектры могут быть использованы для определения химического состава веществ и типа химической связи на поверхности.

Новым направлением в области дефектоскопии и технической диагностики является использование звуковидения, основанного на получении изображения с помощью акустических волн, длина которых по крайней мере на порядок меньше размеров объекта. Развитие звуковидения как самостоятельной области науки стало возможным благодаря исследованиям П. Ланжевена, который в 1918 г. предложил использовать пьезоэлектрический эффект для генерации в воде УЗ-колебаний высокой частоты для обнаружения германских подводных лодок.

В 30-х гг. советский физик-акустик С. Я. Соколов создал первый акусто-оптический преобразователь, так называемый ультразвуковой видикон. В начале 70-х гг. был разработан жидкокристаллический акустооптический преобразователь, с помощью которого удалось получить ультразвуковые голограммы.

Акустические микроскопы на основе линзовых систем используют электронную фокусировку, по конструкции они близки к сканирующим электронным, только в них движется исследуемый объект, а не сканирующий луч. В фокальной плоскости электрически управляемого преобразователя помещается механически сканируемый объект, облучаемый акустическими волнами с обратной стороны (рис. 14.14).

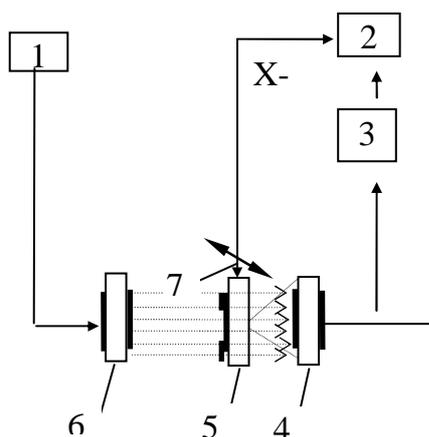


Рис. 14.14. Схема акустического микроскопа

Механическое сканирование синхронизировано со строчной разверткой дисплея, и луч электронно-лучевой трубки модулируется по яркости сигналом, пропорциональным интенсивности звуковой волны, прошедшей через образец. При этом на экране дисплея визуализируется изображение, представляющее собой распределение акустической прозрачности объекта. На экране получается трехмерное изометрическое изображение. Применяют УЗ-колебания частотой от 10 до 500 МГц, достигнутое разрешение составляет примерно 10 мкм. В отли-

чие от электронного сканирующего микроскопа не требуется электрическое соединение всех наблюдаемых участков, что часто невозможно в работающем приборе. Диагностические возможности методов электронного анализа приведены в табл. 14.5.

Табл. 14.5. Диагностические возможности и основные характеристики электронных методов анализа

Физические явления	Диагностические возможности	Характеристики
<b>Просвечивающая электронная микроскопия</b>		
Преломление, отражение, поглощение, дифракция электронов, взаимодействие с атомами вещества	Структурный и фазовый анализ, выявление нарушений кристаллической структуры, дислокаций, определение толщины пленок	Разрешающая способность до $5 \times 10$ мкм. Увеличение до 100 тыс. раз. Толщина просвечиваемых объектов не более 0,1 мкм. Погрешность определения толщины 5—10 %
<b>Растровая электронная микроскопия</b>		
Телевизионная развертка тонкого пучка электронов на поверхности образца и взаимодействие луча с образцом	Наблюдение топографии и морфологии поверхности ИМС и ЭРЭ, качества микросварных соединений, магнитных и электрических полей, количественный элементный анализ по поверхности объекта	Разрешающая способность до $5 \times 10$ мкм. Увеличение до 200 тыс. раз. Глубина анализируемого слоя до 0,1 мкм
<b>Эмиссионная электронная микроскопия</b>		
Эмиссия электронов с образца под действием нагрева, облучения светом, ионами, электронами	Измерение локальных параметров $p - n$ -переходов, термокатодов, наблюдение быстропеременных процессов в ППП, измерение магнитных и электрических полей	Разрешающая способность 0,1—0,5 мкм. Точность измерения микрополей 10—20 %
<b>ОЖЕ-микроскопия, спектроскопия</b>		
Эмиссия электронов с надповерхностного слоя под действием электронов или ионов	Наблюдение распределения материала по поверхности объекта, послыйный анализ состава	Толщина анализируемого материала 10—20 мкм. Точность определения состава вещества 10 %

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Классификация видов контроля и оценка их эффективности.
2. Автоматизация визуального контроля и технические средства.
3. Автоматизация электрического контроля блоков РЭУ.
4. Методика диагностики неисправностей РЭС.
5. Средства технической диагностики.
6. Методы электронной микроскопии и их применение для контроля микрообъектов.

## 15. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА

### 15.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ И ПРАВИЛА ЕГО ВЫБОРА

Технологический процесс реализуется с помощью универсального и специального технологического оснащения, к которому относятся оборудование, оснастка, а также средства механизации и автоматизации.

*Технологическое оборудование* (включая контрольное и испытательное) — это орудия производства, в которых для выполнения определенной части ТП размещаются материалы, заготовки, детали, ЭРЭ, средства воздействия на них и, при необходимости, источники энергии.

*Технологическая оснастка* (в том числе инструмент и средства контроля) — это орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части ТП.

*Средства механизации* — это орудия производства, в которых ручной труд человека частично или полностью заменен машинным с сохранением участия человека в управлении машинами.

*Средства автоматизации* — это орудия производства, в которых функции управления переданы машинам и приборам.

Выбор средств технологического оснащения производится с учетом типа производства и его организационной структуры, вида изделия и программы его выпуска, характера намеченного ТП, возможности группирования операций, максимального применения универсальных и стандартных моделей, равномерной загрузки.

*Технологическое оборудование* выбирают по каталогам, рекламным проспектам, научно-технической литературе на основе анализа затрат на реализацию ТП, который предусматривает:

- выбор вариантов, отвечающих определенным техническим требованиям и обеспечивающих решение одинаковых задач в конкретных условиях производства;
- сравнение вариантов на основании технологических требований к изделию, технических возможностей, затрат на приобретение и эксплуатацию;
- учет требований техники безопасности и промышленной санитарии.

Результаты анализа представляются в виде отношений: основных времен, штучных времен, затрат. Важными показателями при выборе оборудования являются коэффициенты загрузки  $K_3$  и использования оборудования  $K_o$ :

$$K_3 = \frac{M_p}{M_{п}}, \quad K_o = \frac{T_o}{T_{шт} (T_{шт.к})},$$

где  $M_p$ ,  $M_{п}$  — соответственно расчетное и принятое количества единиц оборудования;  $T_o$ ,  $T_{шт}$  — основное и штучное время работы оборудования.

Нормативный коэффициент загрузки зависит от типа производства: 0,65—0,77 для массового, 0,75—0,85 для серийного, 0,8—0,9 для единичного.

Выбор технологической оснастки производится в такой последовательности:

- проведение анализа конструктивных характеристик изделий;
- группирование технологических операций с целью определения наиболее приемлемой системы оснастки;
- определение исходных требований к технологической оснастке;
- установление принадлежности конструкций оснастки к системам оснастки;
- отбор конструкций оснастки, соответствующей установленным требованиям, и выбор оптимальной исходя из минимума затрат;

- определение исходных данных и разработка ТЗ для конструирования нестандартной оснастки.

Для облегчения выбора всю оснастку разбивают на системы, определяемые правилами проектирования, изготовления и эксплуатации, сведения о которых приведены в соответствующих каталогах.

*Универсально-безналадочная оснастка (УБО)* включает приспособления для закрепления деталей, объединенных общностью базовых поверхностей и характером обработки (тиски, патроны). Она покупается заводами или поступает с прокатных баз. При ее эксплуатации требуется только регулирование зажимных элементов. Затраты на оснащение технологической операции за анализируемый период производства изделий этого вида оснастки определяется уравнением

$$P_{УБО} = A_{УБО} / q_o,$$

где  $A_{УБО}$  — амортизационные отчисления на приобретенную оснастку;  $q_o$  — количество оснащаемых операций.

*Универсально-сборная оснастка (УСО)* состоит из комплектов стандартных деталей и сборочных единиц, из которых на предприятии собирают несколько вариантов оснастки. Эта оснастка также не проектируется заводом-изготовителем ЭА, а покупается на предприятиях технологической оснастки или поступает с баз проката. Затраты на оснащение:

$$P_{УСО} = C_{УСО} q_c + C_b,$$

где  $C_{УСО}$  — себестоимость сборки;  $q_c$  — количество сборок за анализируемый период;  $C_b$  — затраты за прокат.

*Сборно-разборная оснастка (СРО)* состоит из нестандартных сборно-разборных частей, широко применяемых в разных наборах. Она проектируется для группы деталей, полностью изготавливается и собирается на заводе. Затраты на оснастку определяются уравнением

$$P_{СРО} = C_3 + C_{СРО} q_c + A_{СРО} / q_o,$$

где  $C_3$  — себестоимость изготовления специальных элементов;  $C_{СРО}$  — себестоимость сборки оснастки;  $A_{СРО}$  — амортизационные отчисления за постоянную часть.

*Универсально-наладочная оснастка (УНО)* представляет собой покупное изделие, для которого предприятие проектирует и изготавливает сменные наладочные элементы. *Специализированная наладочная оснастка (СНО)* отличается тем, что и базовая часть, и сменные наладки проектируются и изготавливаются на предприятии. Затраты на эти системы оснасток

$$P_{СНО}^{УНО} = C_{с.э} + C_y q_y + A_{СНО}^{УНО} / q_n,$$

где  $C_{с.э}$  — себестоимость изготовления сменных элементов наладки;  $C_y$  — затраты на установку наладки;  $q_y$  — количество установок наладки за анализируемый период;  $A_{СНО}^{УНО}$  — амортизационные отчисления за постоянную часть;  $q_n$  — количество наладок, закрепленных за постоянной частью.

*Неразборная специальная оснастка (НСО)* представляет собой приспособления на одну операцию. Она проектируется и изготавливается предприятием. Затраты на приобретение НСО состоят из затрат на изготовление деталей  $C_3$  и их сборку  $C_{НСО}$ :

$$P_{НСО} = C_3 + C_{НСО}.$$

При выборе средств механизации и автоматизации необходимо учитывать не только рост производительности труда и качество продукции, но и экономическую эффективность, критерием которой считается срок окупаемости новой техники:

$$T = (P_1 - P_2) / (C_2 - C_1),$$

где  $P_1, P_2$  — капитальные вложения по механизированному (автоматизированному) и немеханизированному вариантам;  $C_1, C_2$  — себестоимость продукции, изготавливаемой по сравниваемым вариантам.

В приборостроении срок окупаемости составляет 3—4 года.

## 15.2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА И ПРАВИЛА ЕЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Технологическая оснастка представляет собой дополнительные или вспомогательные устройства, предназначенные для реализации технологических возможностей оборудования или работающие автономно на рабочем месте с использованием ручного, пневматического, электромеханического и других приводов. Технологическая оснастка применяется для выполнения следующих операций:

- подготовка выводов радиоэлементов к монтажу (гибка, обрезка, формовка, лужение);
- подготовка проводов и кабелей к монтажу (снятие изоляции, зачистка, заделка, маркировка, вязка жгутов, лужение);
- механосборка (расклепка, развальцовка, запрессовка, расчеканка, свинчивание, стопорение резьбовых соединений);
- установка радиоэлементов на печатные платы (укладка, закрепление, склеивание);
- монтажные работы (пайка, сварка, накрутка, демонтаж элементов);
- регулировочные и контрольные операции (подстройка параметров, визуальный и автоматический контроль) и т. д.

Цель разработки технологической оснастки — механизация или автоматизация отдельных операций технологического процесса. Технологическую оснастку выбирают в соответствии с ГОСТ 14.305—73 путем сравнения вариантов и определения принадлежности к стандартным системам оснастки. На этом этапе используются отраслевые стандарты (ОСТ 4ГО.054.263 — ОСТ 4ГО.054.268), научно-техническая, патентная и справочная литература.

Эффективность выбора технологической оснастки определяется коэффициентом ее загрузки и затратами на оснащение технологических операций. Коэффициент загрузки единицы технологической оснастки

$$K_3 = T_{\text{шт.к}} N / \Phi_{\text{п}},$$

где  $T_{\text{шт.к}}$  — штучно-калькуляционное время выполнения технологической операции;  $N$  — программа выпуска на единицу оснастки;  $\Phi_{\text{п}}$  — полезный фонд работы оснастки. Затраты на оснащение технологических операций оснасткой рассчитываются по методике, изложенной в прил. 2 к ГОСТ 14.305—73.

На втором этапе осуществляется доработка конструкции рабочих механизмов технологической оснастки в соответствии с размерами обрабатываемых деталей и радиоэлементов и ТУ на изделие. Конструкция приспособления должна быть увязана с конструкцией технологического оборудования, например с расположением стола станка, пресса, крепежных пазов на нем.

К проектированию специализированных групповых приспособлений предъявляются следующие требования:

- приспособление должно иметь комплект сменных или регулируемых элементов (направляющие, установочные, зажимные и др.), обеспечивающих стабильность установки любой детали из группы;
- количество деталей, входящих в сменный комплект, должно быть минимальным;
- переналадка приспособления должна быть простой, доступной рабочему 2-го или 3-го разряда и проводиться не более 5—10 мин.

Сборочный чертеж технологической оснастки содержит обычно 2—3 проекции общего вида с соответствующими разрезами и сечениями, обеспечивающими возможность детализации. На нем указывают габарит-

ные и присоединительные размеры, а также размеры, которые влияют на точность приспособления. К таким размерам относятся различного рода посадки, обозначаемые в соответствии со СТ СЭВ 144—75. В технических требованиях приводятся следующие сведения:

- характеристики совместно используемого оборудования, тип привода;
- наибольшие габаритные размеры обрабатываемых деталей или радиоэлементов;
- характер смазки трущихся деталей и др.

На завершающем этапе проектирования технологической оснастки выполняют поверочный расчет, цель которого — определение ее работоспособности, производительности и других технических характеристик.

При расчетах чаще всего определяют механические характеристики работы приспособления. Усилие, разрабатываемое винтовым механизмом, зависит от приложенного момента, формы рабочего торца винта и вида резьбы. Для винтов со сферическим торцом

$$F = \frac{F_{\text{прил}} L}{r_{\text{ср}} \operatorname{tg}(\alpha + x_{\text{пр}})},$$

где  $F_{\text{прил}}$  — усилие, приложенное к рукоятке винтового механизма;  $L$  — длина рукоятки, м;  $r_{\text{ср}}$  — средний радиус резьбы, м;  $\alpha$  — угол подъема резьбы;  $x_{\text{пр}}$  — приведенный угол и радиус трения.

Угол подъема резьбы и приведенный угол трения:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{S}{2 \pi r_{\text{ср}}}, \quad \operatorname{tg} x_{\text{пр}} = \frac{f}{\cos b},$$

где  $S$  — шаг резьбы, мм;  $f$  — коэффициент трения на плоскости;  $b$  — половина угла при вершине профиля резьбы, град.

Для винтов с плоским торцом

$$F = \frac{F_{\text{прил}} L}{r_{\text{ср}} \operatorname{tg}(a + x_{\text{пр}}) + \frac{1}{3} m D},$$

где  $m$  — коэффициент трения на плоском торце;  $D$  — наружный диаметр плоского торца.

Условие самоторможения винтового механизма определяется неравенством  $a < x_{\text{пр}}$ .

Для резьб величина угла подъема лежит в пределах  $1,5$  —  $4^\circ$ , приведенный угол трения изменяется в зависимости от коэффициента трения в пределах  $6$ — $16^\circ$ , условие торможения, как правило, выполняется. Для поверочных расчетов винтового механизма выбирают исходные данные в следующих пределах:  $F_{\text{прил}} = (15—25)$  Н;  $L = (0,08—0,24)$  м;  $f = (0,1—0,15)$ ;  $r_{\text{ср}} = 0,45d$ ;  $D = 0,8 d$ ;  $m = 0,1$ ;  $b = 120^\circ$  ( $d$  — номинальный диаметр резьбы, мм).

КПД винтового механизма рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\operatorname{tg}(\alpha + f_{\text{пр}})}.$$

Для самотормозящихся винтовых механизмов КПД меньше 0,5. Выбрав номинальный диаметр винта в зависимости от требуемого усилия зажима  $F$ , проверяют прочность винта:

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{F}{K d^2} < \sigma_{\text{р. доп}},$$

где  $\sigma_{\text{р}}$  — напряжение растяжения винта, МПа;  $\sigma_{\text{р. доп}}$  — допустимое напряжение растяжения материала винта, МПа;  $K$  — коэффициент, для метрической резьбы с крупным шагом  $K = 0,5$ .

Для винтов с резьбами М6—М18, изготовленных из углеродистых сталей обыкновенного качества марок Ст3, Ст5, допустимое напряжение — до 200 МПа, качественных сталей — до 430 МПа.

Развиваемое рычажным механизмом (рис. 15.1) усилие

$$F = F_{\text{прил}} \frac{L_1 - r f_0}{L_2 + r f_0},$$

где  $L_1, L_2$  — плечи рычага;  $r$  — радиус оси;  $f_0$  — коэффициент трения на оси.

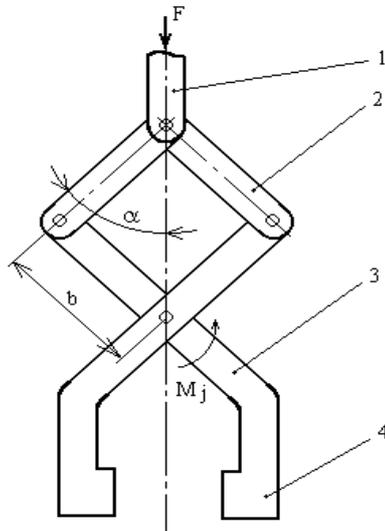


Рис. 15.1. Схема рычажного механизма:

1 — проивод; 2 — плечи; 3 — губки

В эксцентриковых механизмах применяются круговые и криволинейные эксцентрики, представляющие собой диск или валик с осью вращения, смещенной относительно геометрической оси. Угол подъема кругового эксцентрика достигает максимального значения при угле поворота  $90^\circ$ . Однако при этом возможна нестабильность усилия. В связи с этим для обеспечения незначительного изменения зажимного усилия выбирают рабочий участок профиля кругового эксцентрика в пределах  $30\text{--}45^\circ$  влево и вправо от расчетной точки контакта детали с эксцентриком. Усилие зажима круговым эксцентриком

$$F = \frac{F_{\text{прил}} L_1}{L_2 (\text{tg}(\alpha + f) + \text{tg} f_1)},$$

где  $F_{\text{прил}}$  — сила, приложенная к рукоятке эксцентрика (100—150 Н);  $L_1$  — плечо приложения силы, м:  $L_1 = L + 0,5D$ ;  $L$  — длина рукоятки;  $D$  — диаметр кругового эксцентрика;  $\alpha$  — угол подъема кривой эксцентрика, град.;  $L_2$  — расстояние от оси вращения эксцентрика до точки соприкосновения с изделием, м;  $f$  — угол трения между эксцентриком и изделием, град.;  $f_1$  — угол трения на оси эксцентрика, град.

Условие самоторможения кругового эксцентрика  $D/L \geq 14$ , где  $L$  — эксцентриситет (1,5—5,0 мм).

При выполнении операций сборки неразъемных соединений путем расклепывания усилие, прикладываемое к детали, определяют следующим образом:

$$F = (2,0\text{--}2,5) \sigma_p S,$$

где  $\sigma_p$  — предел прочности материала детали на растяжение;  $S$  — площадь приложения давления. Для развальцовки это усилие определяется так:  $F = \sigma_b S$ .

При свободной гибке выводов радиоэлементов усилиегиба выбирается следующим образом:

$$F_r = \frac{L d^2}{6 B} \sigma_r,$$

где  $L$  — длина линии изгиба;  $d$  — диаметр вывода;  $B$  — плечо гибки, равное  $r + 1,25d$ ;  $r$  — внутренний радиус гибки;  $\sigma_T$  — предел текучести материала выводов.

Рассчитанное усилие, необходимое для работоспособности приспособления, должно быть в 5—8 раз меньше усилия, развиваемого приводом приспособления или технологическим оборудованием. Усилие, развиваемое пневмоприводом (рис. 15.2),

$$F_{\text{п}} = \frac{p}{4} D^2 k - F_c,$$

где  $D$  — диаметр поршня или диафрагмы в пневмоцилиндре;  $p$  — давление сжатого воздуха;  $k$  — коэффициент не герметичности;  $F_c$  — усилие сопротивления возвратной пружины в крайнем рабочем положении поршня.

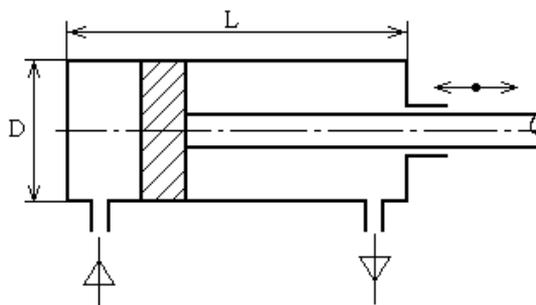


Рис. 15.2. Схема пневмопривода

Время срабатывания пневмопривода

$$t = \frac{D L}{d_0^2 v},$$

где  $L$  — длина хода поршня, для диафрагмы  $L = (0,25—0,35)D$ ;  $d_0$  — диаметр воздухопровода;  $v$  — скорость подачи воздуха (1500—2500 м/с).

При автоматизации процессов сборки часто возникает необходимость проектирования технологической тары, которая является организационной технологической оснасткой. При подборе типовых конструкций тары используют отраслевые каталоги. Тара должна быть по возможности универсальной и отличаться простотой изготовления.

### 15.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Современная технология ЭА предусматривает реализацию основных операций сборки и монтажа: входной контроль материалов и комплектующих изделий, подготовку элементов к сборке, сборку и монтаж плат, финишный контроль на автоматическом оборудовании, выпускаемом ведущими в данной области производителями. Высокий технический уровень оборудования обеспечивает получение требуемого качества выпускаемых изделий.

Сборочные участки оснащают современными средствами контроля и измерений: шлифомикроскопом с фотокамерой фирмы Zeiss; стереомикроскопом фирмы Leica; высокоточным оборудованием для контроля механических и электрических параметров.

Для входного контроля микросхем применяют тестовую систему Sentry 21 Schlumberger, с помощью которой осуществляются контроль и тестирование БИС и СБИС (включая микропроцессоры, логические матрицы, ПЗУ, программируемые контроллеры и т. д.). Контрольные тесты для системы Sentry 21 разрабатываются с

помощью комплекта программного обеспечения, инсталлированного на рабочей станции с процессором Pentium. Программирование ПЗУ и логических матриц осуществляется на программаторах, управляемых мощным компьютером.

В состав участка сборки и монтажа плат могут входить:

- автоматизированный склад комплектующих фирмы Kardex, обеспечивающий выдачу элементов в соответствии со сменным заданием;
- оборудование для формовки и обрезки выводов элементов фирм Streckfuss и Siemens Nixdorf, легко перестраиваемое в зависимости от требований по установке элементов;
- конвейерная линия установки элементов с планарными выводами (SMD-элементы) на печатную плату; она состоит из станций нанесения паяльной пасты на плату фирмы Ekra, подклейки (нанесения клеевых точек для фиксации элементов), трех станций автоматического монтажа элементов фирмы Siemens (точность позиционирования 5 мкм, время установки элемента не более 0,5 с) и инфракрасной печи фирмы ИТС, где пайка элементов осуществляется в среде азота. Линия управляется встроенными компьютерами, имеет "машинное зрение", обеспечивающее 100 %-й контроль выполнения операций.

Комплекс монтажа элементов с осевыми выводами, разъемов, сложных электронных и электромеханических элементов, как правило, включает:

- автоматизированные рабочие места для установки элементов фирмы Royonic;
- линии пайки двойной волной припоя в среде азота фирмы Seho, связанные конвейером;
- установку пайки элементов со сложной конфигурацией фирмы AAT Aston, оснащенную компьютером и двумя видеокамерами с мониторами;
- установку маркировки плат фирмы Wiedenbush, позволяющую наносить надписи различной длины и высоты на поверхность любой формы с помощью специальных чернил, стойких к большинству растворителей.

Для контроля готовых плат применяется мощный тестовый комплекс, в состав которого входят стенды HP-3075 фирмы Hewlett Packard и UNITEST-100AP фирмы Spea. Стенд HP-3075 позволяет выполнять электрические функциональные тесты как аналоговых, так и цифровых ячеек. Стенд UNITEST-100AP предназначен для проверки силовых (высоковольтных) плат, например плат источников питания.

Участок сборки должен обладать всей необходимой инфраструктурой (бесперебойное стабилизированное электропитание, кондиционированный воздух), иметь защиту от статического электричества. Производительность участка 300 тыс. сложных плат в год.

Оборудование и применяемая технология позволят выпускать платы любой сложности с минимальными размерами 50×70 мм, максимальными 415×294 мм, толщиной 0,5 — 4,2 мм, с шагом координатной сетки 0,625 мм, например материнские платы для всех типов персональных компьютеров, платы для RISC-машин, современных универсальных ЭВМ, а также для любой ЭА.

Сборочные головки могут выполнять в автоматическом цикле одну или несколько технологических операций: 1) извлечение ИЭТ из накопителя или носителя; 2) поворот ИЭТ по ключу или оси координат; 3) формовку выводов ИЭТ; 4) перенос ИЭТ; 5) центровку ИЭТ; 6) установку ИЭТ на ПП.

Например, при установке резисторов и конденсаторов электрической формы с осевыми выводами, клеенных в двухрядную ленту, производятся операции 1, 3, 6 или 1, 3, 5, 6 (операции подгибки и обрезки выводов, выполняемые другими устройствами, рассмотрены ниже). При установке безвыводных элементов реализуются операции 1, 4, 5, 6 или 1, 4, 6, а при установке ИС в корпуса SO-14 — операции 1 — 6.

Тип сборочной головки во многом определяется видом собираемых ИЭТ.

Пример раздвижной головки, применяемой в автоматах фирмы Dupapert, показан на рис. 15.3. Ходовой винт с шариковой гайкой обеспечивает одновременную раздвижку левого и правого блоков ножей 2 и 4, давая возможность менять установочный размер формовки выводов от 7,5 до 33 мм.

Работает сборочная головка следующим образом. ЭРЭ 6 подается с помощью зубчатого колеса 3. Ножи 7 и 8 обрезают выводы ЭРЭ 6. Вниз опускаются направляющие толкатели 1 и затем пуансоны 5. Поднимаются матричные формующие выступы 7. Пуансоны 5 совместно с выступами 7 осуществляют П-образную формовку. Матричные выступы отодвигаются назад, толкатели продолжают двигаться вниз, передвигая ЭРЭ, выводы которого вставляются в отверстия.

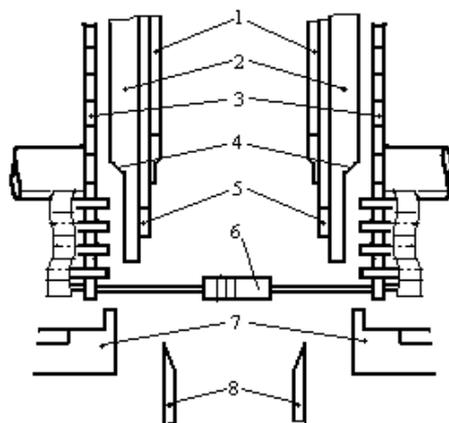


Рис. 15.3. Установочная головка для ЭРЭ с осевыми выводами

Сборочные головки для ЭРЭ с однонаправленными выводами отличаются от предыдущих промежуточным патроном-схватом, который обеспечивает вырезку ЭРЭ из ленты и перенос к установочному узлу. Последний берет ЭРЭ и с помощью толкателя вставляет его выводами в отверстие ПП.

В сборочной головке для ИМС со штыревыми выводами имеются направляющие пластины, по пазам которых выводы направляются вниз и попадают в соответствующие отверстия. Обычные сборочные головки имеют малые габаритные размеры и не позволяют установить ИЭТ нестандартной формы и размеров, например ИМС в корпусе панельной формы с одним рядом выводов, контактные колодки, соединители и т. д. Для этой цели используются сборочные головки со схватами, аналогичными схватам роботов.

Применяются следующие устройства для уменьшения ошибки совмещения при сборке:

- рамка-окно на пути движения ИМС. Если ИМС располагается на вакуумном захвате неточно, торцы выводов или корпус задевают одну из сторон рамки и ИМС сдвигается в нижнюю сторону (автоматы АРПМ, ППМ-5);
- лепестковый центратор на вакуумном захвате. После захвата ИМС включается сначала одна пара лепестков, центрируя ИМС по оси  $x$ , затем другая, центрируя по оси  $y$ ;
- трех-, четырехлепестковый центратор, вынесенный в тракт подачи ИС (установка УСПА-1). Дальние перемещения ИС осуществляет вакуумный схват с боковыми ограничителями положения ИС;
- вакуумный захват со сменными наконечниками для установки базовых ИЭТ, имеющих малые размеры (например, конденсаторов типа К10-17 и др.), в торце которых имеется углубление по размерам ИЭТ. Сменные наконечники хранятся в отдельном накопителе. Смена производится автоматически по команде программы (установки МС-30 фирмы Excellon, автоматы МСМ фирмы Philips).

В связи с появлением корпусов ИЭТ с шагом выводов 0,625 и 0,5 мм суммарные погрешности механических узлов автомата становятся сопоставимыми с этим шагом и с погрешностями позиционирования ИЭТ по линейному перемещению и углу поворота и необходимость в такой системе многократно возрастает. Созданы адаптивные робототехнические установки, способные распознавать многоуровневые образы и решать сложные логические задачи пространственного позиционирования объектов и управления всем технологическим процессом. Они обеспечивают коррекцию неточностей расположения контактных площадок или кристалла в целом.

Адаптивный робот (рис. 15.4) функционирует следующим образом. Исходный объект, связанный с системой двумерного позиционирования, освещается через оптическую систему инфракрасным и видимым светом. Отраженный световой поток через оптическую систему поступает на средства визуального отображения и через ИК фильтр проецируется на светочувствительное матричное поле прибора с зарядовой связью (ПЗС).

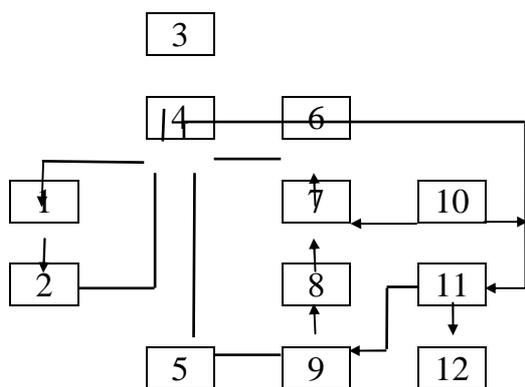


Рис. 15.4. Структурная схема адаптивного робота

От блока управления на ПЗС поступают сигналы для его нормального функционирования. Световой поток, попадающий на исходный объект, регулируется с помощью замкнутой системы регулировки яркости до оптимального значения.

Световая информация преобразуется ПЗС в ряд электрических сигналов, дискретизированных по времени. Затем эти сигналы квантуются по уровню и в виде цифрового кода передаются в ЭВМ, где цифровая информация обрабатывается по определенному алгоритму, в результате чего по выделенным реперным знакам или меткам находятся истинные координаты положения кристалла прибора относительно некоторых условных координатных осей.

По разности координат эталонного и собираемого объекта ЭВМ определяет поправки для каждой из координат и вырабатывает сигнал для управления шаговыми двигателями, перемещающими координатный стол с ленточным носителем ИМС, в которых сварочная головка выполняет микромонтажные соединения.

#### 15.4. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ КРУПНОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Увеличение объемов выпуска ЭА в сочетании с применением современной элементной базы потребовало принципиально новых ТП, автоматизированных средств технологического оснащения, управляемых с помощью ЭВМ или МПУ. Эта проблема решена с помощью универсальных и специализированных комплексов оборудования, которые позволили автоматизировать большинство операций подготовки, сборки и монтажа электроники.

тронных блоков. К их числу относятся комплекс "Универсал", линии ПАЛМИС, "Прогресс", "Атлас", комплексы фирм Universal Instruments (США), Panasonic (Япония), Streckfuss (Германия) и др.

Комплекс "Универсал" (рис. 15.5) содержит участки подготовки ЭРЭ и ИМС, сборки, наладки, промывки, контроля и влагозащиты. На первом участке расположены стеллаж-элеватор 1, полуавтоматы формовки выводов 2 типа МФЗП, автоматы формовки выводов 3 типа АФЗП, установки лужения 4 типа УЛВ-902, промывки 5 типа УПИ-901, линия подготовки 6 ЭРЭ с осевыми выводами типа ЛПЭ-901, на втором автомат распаковки 7 ИМС типа АР-901, автомат подготовки 8 типа ЛПМ-901, линия промывки 9 типа "Парус-3", сборочный стол 10, установка 11 регенерации жидкостей УРЖ-903, автомат сборки и пайки 12 АСП-901.

Подготовленные ЭРЭ и платы с установленными ИМС подаются на продольный конвейер 13, по обе стороны которого установлены светомонтажные столы 14 типа УПСП-904 для программированной сборки ЭРЭ и ИМС. Их число определяется программой выпуска электронных блоков. Далее (по ходу ТП) располагаются линии пайки 15 типа УПВ-903Б, промывки 16 типа ЛПП-901.

На участке контроля установлены полуавтоматические стенды 17 контроля логических блоков типа УТК-3, автоматизированная система контроля и диагностирования 18 электронных сборок типа МАСК.

На участке влагозащиты располагаются установки промывки 5, лакирования 19 типа УЛПМ-901 и терморадационной сушки 20 типа УТС-90. Конвейерная линия обеспечивает транспортирование электронных сборок в кассетах по верхней части конвейера и возврат кассет по нижней ветви к исходному рабочему месту со скоростью 0,5—4 м/мин с целью соблюдения оптимального режима пайки волной плат.

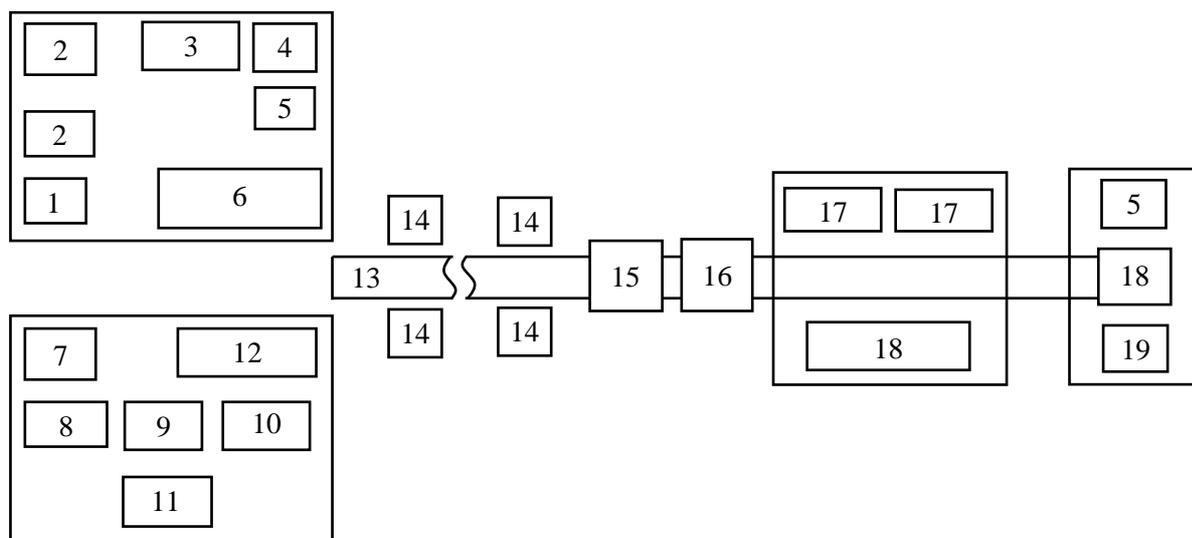


Рис. 15.4. Планировка комплекса "Универсал"

Комплекс обеспечивает сборку плат с максимальными размерами до 260×300 мм, потребляет мощность до 15 кВт и имеет габаритные размеры 15×3×1,6 м. Число работающих снизилось по сравнению с ручной сборкой со 120 до 20, а трудоемкость — в 5 раз.

Технические характеристики оборудования, используемого в комплексе "Универсал", приведены в табл. 15.1.

Табл. 15.1. Оборудование комплекса "Универсал"

Модель	Производительность, шт/ч	Тип ЭРЭ	Габаритные размеры, мм
МФЗП-901	600	ЭРЭ с осевыми выводами	420×280×205
АФЗП-901	1200	То же	504×480×470
МЗФР-901	6000	ЭРЭ с односторонними выводами	262×152×132
АФЗ-1	6000	Транзисторы ТО-5	800×500×600
УЛВ-902	1200	ЭРЭ, ИМС	850×940×1250
ЛПЭ-901	1800	ЭРЭ с осевыми выводами	1300×700×1460
ЛПМ-901	1800	ИМС 401.14	1250×800×1500
АСП-901	600	То же	1380×830×1300
УПВ-903Б	0,5 — 0,3 м/мин	Платы с ЭРЭ, ИМС	2000×700×1460
УПИ-901	60	То же	1150×850×1200
ЛПП-901	0,1— 0,2 м/мин	«	3200×900×1400
УЛПМ-901	60 — 120	«	754×900×2050
УТС-904	60	ЭРЭ, ИМС	2000×790×2400
МАСК 031/1024	60	Платы с ЭРЭ, ИМС	3200×1800×1400

Для крупносерийного производства ЭА, использующей элементные базы с осевыми и односторонними выводами, применяют автоматизированные системы "Трасса" с управлением от микроЭВМ, включающие автоматы "Трал", "Трофей", "Трамплин-М".

Для поверхностного монтажа применяют сборочные автоматизированные линии фирмы Philips, являющейся лидером в этой области. Оборудование отличается гибкостью, высокой производительностью (96 тыс. компонентов в час), различными вариантами исполнения: от самого простого — настольного, до самого сложного — управляемого от ПЭВМ и встраиваемого в автоматическую линию.

Оборудование для комбинированного монтажа комплектуется по следующей технологической цепочке: нанесение паяльной пасты трафаретной печатью, установка КМП на платы, групповая пайка КМП ИК-нагревом, установка элементов со штыревыми выводами, пайка двойной волной припоя, отмывка, сушка, функциональный контроль. Технические характеристики оборудования для поверхностного монтажа приведены в табл. 15.2.

Табл. 15.2. Оборудование для поверхностного монтажа

Наименование, тип	Назначение	Технические характеристики
Автомат трафаретной печати Ultraprint 2000, Phi-	Нанесение паяльной пасты в автоматическом режиме. Автоматическое управление от компьютера, загрузка и выгрузка	Габариты платы — до 508×406 мм 2—3-мерный оптический контроль нанесенной пасты; скорость ракеля — 6,35—127

lips	ка плат, совмещение, контроль качества	мм/с;
Полуавтомат SM 902, Philips	Установка компонентов по программе от ПЭВМ с 2 координатным механизмом наведения головки на рабочую позицию. Быстрая переналадка при смене платы	Производительность — до 900 шт/ч; количество типономиналов — до 1500;
Автомат ЕСМ 96, Philips	Автоматическая установка компонентов с шагом до 0,5 мм и возможностью гибкой переналадки, управлением от ПЭВМ	Производительность — до 3500 шт/ч; питатели — ленты, кассеты, матричные поддоны; компоненты — от 1,0×0,5 мм до микросхем чип PLCC 40,0×40,0 мм; габариты платы — до 450×400 мм;
HS 180, Siemens (Германия)	Автоматическая установка компонентов с возможностью гибкой переналадки и управлением от ПЭВМ	Производительность — до 12 тыс. шт/ч; компоненты — чип, ИМС; габариты платы — до 450×450 мм;
Автомат GEM Sapphire, Philips	Быстродействующий автомат на GEM платформе с двумя блоками по 12 головок в каждом и видеопроцессором	Производительность — до 25 тыс. шт/ч; компоненты — от чип (SOT, SOD, MELF, SOP, QFP) до микросхем PLCC 25,0×25,0 мм; габариты платы — до 457×407 мм;
Установка пайки войной волной Eсопорак	Пайка двойной волной припоя типа "лямбда" или "омега" с цифровым управлением и индикацией. Пригодна и для обычных компонентов. Содержит пенный флюсователь с двойным аэратором и встроенным компрессором	Регулировка высоты волны и автоматическое ее включение; скорость конвейера — 0,3—3,0 м/мин;
Печь конвекционного оплавления OmniFlo	Групповая пайка компонентов в крупносерийном производстве путем ИК-нагрева и подачи инертного газа, компьютерное управление	Скорость конвейера — до 1,78 м/мин; 5, 7 или 10 зон нагрева
Установка ИК-пайки SMD-TRASSA-5609, "Техномаш" (Россия)	Групповая пайка КМП ИК-нагревом в трех зонах	Скорость конвейера — 0,3 м/мин; 3 зоны нагрева (150, 200, 300 °С); габариты — 1630×465×180;
Система отмывки ICOM 8000L	Групповая трех стадийная отмывка плат в растворителях до уровня не более 0,3 мг/см <sup>3</sup> NaCl эквивалента. Управление от ПЭВМ, самодиагностика	Размер плат — до 500×400 мм; производительность — до 150 плат в час;

#### 15..5. ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ ОБОРУДОВАНИЯ

Каждый технологический агрегат, отработавший определенное число часов, подвергается техническому обслуживанию и плановым ремонтам, чередование и периодичность которых зависят от конструктивных особенностей, габаритов агрегатов и условий их эксплуатации. Важнейшими нормативами планово-предупредительного ремонта (ППР) являются структура ремонтного цикла, продолжительности ремонтных циклов  $t_{р.ц}$ , межремонтных периодов  $t_{мр}$  и цикла технического обслуживания  $t_{ц.т.о}$ , а также категории сложности ремонта и нормативы трудоемкости.

*Структура ремонтного цикла* представляет собой последовательность выполнения ремонтных работ и работ по техническому обслуживанию в период между двумя капитальными ремонтами или между вводом оборудования в эксплуатацию и первым капитальным ремонтом.

*Межремонтным периодом* называется период работы оборудования между двумя последовательными ремонтами.

*Циклом технического обслуживания* называется период работы оборудования между двумя очередными техническими обслуживаниями или между очередным плановым ремонтом и техническим обслуживанием. Степень сложности ремонта агрегата (оснастки), их ремонтные особенности оцениваются категорией сложности ремонта  $R$ , которая характеризует трудоемкость ремонтных работ механической и электрической частей оборудования:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^m t_{сл. i}}{t_p},$$

где  $m$  — типовой перечень слесарных работ с указанием процентов изношенности важнейших деталей, которые заменяются при проведении капитального ремонта;  $t_{сл. i}$  — норма времени выполнения каждой слесарной операции; нормо-ч;  $t_p$  — норма времени на одну ремонтную единицу оборудования, нормо-ч.

Для большинства оборудования отрасли норма времени на одну ремонтную единицу равна 23 ч для механической части оборудования и 11 ч для электрической части.

При ремонте некоторых групп оборудования, например контрольного, испытательного, где объем слесарных работ меньше, чем радиомонтажных, электротехнических, настроечных, категория ремонтной сложности определяется по общему объему ремонтных работ для групп однотипного оборудования агрегатов:

$$T_{рем} = R m_p t_{н.р},$$

где  $T_{рем}$  — трудоемкость ремонтных работ для группы однотипного оборудования, нормо-ч;  $R$  — категория ремонтной сложности;  $m_p$  — количество ремонтных единиц;  $t_{н.р}$  — норматив времени на одну единицу ремонтной сложности.

Необходимое число рабочих для выполнения планового ремонта

$$C_{рем} = T_{рем} / t_{рем. раб},$$

где  $t_{рем. раб}$  — норматив трудоемкости ремонта, приходящийся на одного ремонтного рабочего (слесаря, наладчика).

В общем случае расчет количества рабочих, необходимых для выполнения плановых ремонтов, выполняется на основании годового плана ремонтов оборудования, отдельно для механической и электротехнической частей оборудования по формуле

$$C_{рем} = \frac{t_{н.к} \sum m_k + t_{н.с} \sum m_c + t_{н.м} \sum m_m}{F_d K_H},$$

где  $\Sigma m_k$ ,  $\Sigma m_c$ ,  $\Sigma m_m$  — суммарное годовое количество ремонтных единиц оборудования при капитальном, среднем и малом ремонтах;  $t_{н.к}$ ,  $t_{н.с}$ ,  $t_{н.м}$  — нормативы времени на одну ремонтную единицу для капитального, среднего и малого ремонтов, ч;  $F_d$  — действительный годовой фонд рабочего времени, ч;  $K_n$  — коэффициент выполнения нормы.

Количество дежурных слесарей-наладчиков для технического обслуживания оборудования между двумя очередными ремонтами рассчитывается по видам оборудования:

$$C_{р.д.сл} = \frac{\Sigma m_{обс} K_{см}}{t_{м.о}},$$

где  $\Sigma m_{обс}$  — сумма ремонтных единиц обслуживаемого оборудования;  $K_{см}$  — коэффициент сменности работы оборудования;  $t_{м.о}$  — норматив технического обслуживания ремонтных единиц на одного рабочего в смену.

Годовая потребность в основных материалах на ремонт и технологическое обслуживание оборудования рассчитывается на основе объема работ, предусмотренных годовым планом ремонта оборудования:

$$Q_M = K_{р.м} H_k (\Sigma m_k + a \Sigma m_c + b \Sigma m_m),$$

где  $K_{р.м}$  — коэффициент, учитывающий расход основных материалов на техническое обслуживание;  $H_k$  — норма расхода материала на капитальный ремонт оборудования одной ремонтной единицы;  $a$  — коэффициент, характеризующий соотношение количество материала, расходуемого при среднем и капитальном ремонтах;  $b$  — коэффициент, характеризующий соотношение количества материала, расходуемого при малом и капитальном ремонтах.

Важное значение при техническом обслуживании приобретает задача сокращения времени простоя оборудования в ремонте, что позволяет повысить коэффициент использования оборудования. Продолжительность простоя оборудования зависит от категории сложности ремонта оборудования данного вида, вида ремонта, которому оно подвергается, количества и квалификации одновременно работающих ремонтных рабочих, технологии ремонта и организации технических условий выполнения ремонтных работ.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Правила выбора технологического оснащения.
2. Основные системы технологической оснастки и их применение.
3. Методика поверочного расчета технологической оснастки.
4. Пневмопривод и его параметры.
5. Оборудование для мелкосерийного производства РЭУ.
6. Автоматизированное оборудование для серийного производства.

## 16. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

### 16.1. ЭТАПЫ И ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

В развитии техники можно выделить этапы, характеризующиеся взаимодействием человека и орудий труда: использование орудий ручного труда, использование машин и средств малой механизации, применение автоматов и автоматических комплексов. Применение в производственном процессе машин и механизмов, заменяющих мускульный труд рабочих, называется *механизацией*. *Автоматизация* — это освобождение человека не только от ручного труда, но и от оперативного управления машинами и механизмами.

Различают стадии частичной, комплексной и полной автоматизации. *Частичная (начальная) автоматизация* — это автоматизация рабочего цикла машин или использование автомата в автономном режиме; *комплексная* характеризуется автоматическим выполнением всех производственных операций, включая вспомогательные, транспортные, однако за человеком остаются функции управления и контроля; *полная автоматизация* предусматривает передачу функций управления и контроля системам автоматического управления.

Большой удельный вес сборочно-монтажных работ (до 30—40 %) в общем объеме производства ЭА делает жизненно необходимой комплексную автоматизацию этих процессов, которая должна основываться на новейших достижениях науки и техники и учитывать особенности производства. Развитие технологии показало, что для автоматизации используются следующие группы орудий производства:

- 1) станки, агрегаты с ручным управлением, имеющие универсальное назначение;
- 2) универсальные полуавтоматы и автоматы с большей производительностью, но меньшей мобильностью;
- 3) специализированные полуавтоматы и автоматы, используемые для строго определенных видов продукции, имеющие высокую производительность, но полностью лишенные мобильности;
- 4) агрегатные станки и машины, создаваемые путем компоновки унифицированных механизмов, обладающие достоинствами 3-й группы и повышенной универсальностью за счет быстрой переналадки;
- 5) автоматические линии из агрегатных станков и машин, имеющие большую производительность и используемые в массовом производстве;
- 6) автоматические линии из универсального оборудования, обладающие высокой производительностью и возможностью переналадки;
- 7) автоматические линии из специального оборудования узкого профиля для выпуска массовой однотипной продукции;
- 8) станки, машины с цифровым программным управлением, позволяющие автоматизировать производственные процессы с возможностью быстрой переналадки;
- 9) участки и линии ГАП, обеспечивающие комплексную автоматизацию всех производственных процессов и обладающие возможностью гибкой переналадки на выпуск новых изделий.

Для мелкосерийного производства ЭА характерны 1, 2 и 4-я группы. Для серийного и массового — 3, 5, 6, 7, 8-я. Этап 9-й является наиболее перспективным в настоящее время. Автоматизация производственных процессов является новым этапом технического прогресса.

### 16.2. ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ ТРУДА И ВЫБОР НАПРАВЛЕНИЯ АВТОМАТИЗАЦИИ

Критериями автоматизации являются: рост производительности труда, степень охвата рабочих механизированным и автоматизированным трудом, уровень механизации и автоматизации.

Производительность общественного труда  $\Pi$  — это количество выпущенной продукции  $N$  (в штуках), отнесенное к трудовым затратам:

$$\Pi = N / Z,$$

где  $Z$  — трудовые затраты (время, денежное исчисление).

Общие трудовые затраты складываются из следующих составляющих:

$$Z = Z_{\Pi} + (Z_v + Z_{\text{ж}})t,$$

где  $Z_{\Pi}$  — средства на оборудование, монтаж, производственные здания (единовременные затраты прошлого труда);  $Z_v$  — годовые текущие затраты прошлого труда на материалы, энергию, инструмент, ремонт и эксплуатацию оборудования;  $Z_{\text{ж}}$  — годовые текущие затраты живого труда на обслуживание машин;  $t$  — время эксплуатации новой техники. Тогда

$$\Pi = \frac{N}{Z_{\Pi} + (Z_v + Z_{\text{ж}})t}.$$

Количество выпущенной продукции зависит от времени эксплуатации новой техники  $t$  и годового выпуска продукции  $Q_r$ :

$$N = Q_r t.$$

Тогда

$$\Pi = \frac{Q_r t}{Z_{\Pi} + (Z_v + Z_{\text{ж}})t}. \quad (16.1)$$

Из уравнения (16.1) видно, что производительность труда является переменной величиной. В момент запуска новой техники при  $t \rightarrow 0$ , когда имели место значительные затраты прошлого труда, а отдачи еще нет, производительность невысокая. По мере эксплуатации новой техники производительность труда растет.

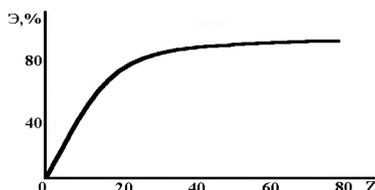


Рис. 16.1. Зависимость экономии заработной платы от количества автоматов

Обозначим через  $K$  степень технической вооруженности производства:

$$K = Z_{\Pi} / Z_{\text{ж}},$$

через  $m$  — отношение текущих затрат прошлого труда к затратам живого труда:

$$m = Z_v / Z_{\text{ж}}.$$

Подставив  $K$  и  $m$  в выражение для  $\Pi$ , получим

$$\Pi = \frac{Q_r}{Z_{\text{ж}}} \frac{t}{K + (m + 1)}.$$

Чем выше техническая оснащенность труда (выше  $K$  и  $m$ ), тем ниже производительность общественного труда, тем больше рабочих незримо присутствует в процессе производства, обеспечивая его прошлым трудом.

Коэффициент роста производительности труда

$$\lambda = P_2 / P_1,$$

где  $P_1, P_2$  — производительность труда соответственно по исходному и новому вариантам.

Степень охвата рабочих механизированным и автоматизированным трудом

$$C_{\text{м.а}} = \frac{P_{\text{м}} + P_{\text{а}}}{P_{\text{р}} + P_{\text{м}} + P_{\text{а}}} 100,$$

где  $P_{\text{р}}, P_{\text{м}}, P_{\text{а}}$  — количество рабочих, занятых ручным, механизированным и автоматизированным трудом соответственно.

Уровень механизации и автоматизации производственного процесса

$$Y_{\text{м.а}} = \frac{T_{\text{м}} + T_{\text{а}}}{\sum_{i=1}^n T_i} 100,$$

где  $T_{\text{м}}, T_{\text{а}}$  — трудоемкость механизированных и автоматизированных операций;  $T_i$  — трудоемкость  $i$ -й операции;  $n$  — количество операций.

Для современного этапа развития техники характерны нижеследующие пути в автоматизации производственных процессов и роста производительности труда.

Первый путь связан с уменьшением затрат живого труда, сокращением числа рабочих, непосредственно занятых в процессе производства за счет использования автоматов или автоматических линий. Такая автоматизация имеет ограниченные возможности, так как с ростом числа единиц оборудования растут капиталовложения и потери производительности оборудования (рис.16.1). Так, если один рабочий будет обслуживать два станка, то экономия фонда заработной платы ( $\mathcal{E}$ ) составляет 50 %, если десять станков — 90 %. Дальнейшее увеличение количества обслуживаемых автоматов требует значительных затрат на автоматические системы управления, накопители, автоматический транспорт. Такая автоматизация эффективна для производств с малым  $K$ , где еще велики затраты ручного труда (рис.16.2).

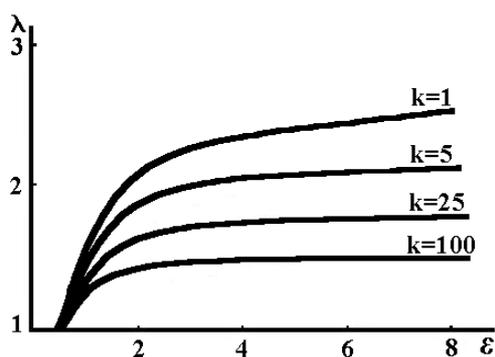


Рис. 16.2. Зависимости роста производительности труда от технической оснащенности производства

Второй путь технического прогресса предполагает уменьшение затрат живого и прошлого труда путем повышения производительности средств производства. Он достигается за счет разработки новых прогрессивных технологических процессов и создания высокопроизводительных машин. На рис.16.3 кривые  $I, I'$  характеризуют рост производительности  $\lambda$  вследствие объединения машин и станков в автоматические системы при

неизменном уровне их производительности. При этом источником экономии служит лишь сокращение фонда заработной платы обслуживающих рабочих. Кривые 2, 2' характеризуют рост производительности при автоматизации, когда она сочетается с ростом производительности машин и сокращением затрат живого труда  $\lambda > 1$ . Здесь потенциальная возможность роста  $\Pi$  намного больше и автоматизация заведомо является эффективной.

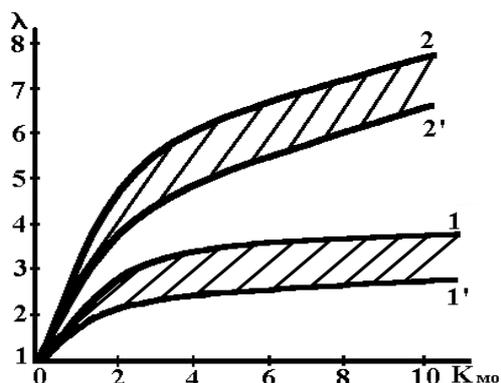


Рис. 16.3. Зависимости роста производительности труда от коэффициента многостаночного обслуживания

Третий путь технического прогресса предполагает сокращение затрат прошлого труда путем снижения стоимости средств производства и достигается непрерывным совершенствованием технологии и средств производства, стандартизацией и унификацией рабочих машин и оборудования. Этот путь требует агрегатного метода создания средств производства. На рис.16.4 показана динамика роста производительности труда при различной производительности каждого варианта. Производительность труда каждого варианта постепенно увеличивается, достигая максимума и далее сохраняя максимальное значение. Чем быстрее достигается максимум, тем выше эффективность новой техники.

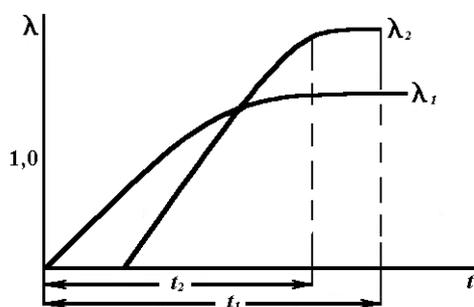


Рис. 16.4. Зависимости уровня производительности от времени эксплуатации новой техники

Производительность рабочих машин или оборудования зависит от временной длительности рабочих  $t_p$  и холостых  $t_x$  ходов:

$$\Pi = \frac{1}{t} = \frac{1}{t_p + t_x}.$$

Если у машины отсутствуют холостые ходы, то  $\Pi_p = 1/t_p$ .

Коэффициент производительности характеризует степень непрерывности использования оборудования во времени:

$$\eta = \Pi_p / \Pi.$$

Смысл автоматизации заключается в дальнейшем совершенствовании технологического оборудования, когда  $t_x \rightarrow 0, \eta \rightarrow 1$ . Фактическая производительность оборудования часто отличается от цикловой:

$$P_{\phi} = N_{\text{ср}} / t_{\text{пл}},$$

где  $N_{\text{ср}}$  — количество выпущенной продукции;  $t_{\text{пл}}$  плановый период времени с учетом внецикловых потерь времени из-за простоя машин.

Потери рабочего времени разделяются на технологические и организационные. К первым относят подачу материала, транспортировку объектов обработки, зажим и освобождение заготовок, установку и смену инструмента, заточку инструмента, регулировку и ремонт механизмов, ко вторым — получение запасных частей, уборку отходов, сдачу готовых изделий, передачу смены, простои, поломки, брак в производстве, переналадку, связанную с заменой технологической оснастки, и т. д. Для сокращения потерь времени:

- создают машины непрерывного действия, где потери первой группы устраняются;
- автоматизируют смену и регулировку инструмента (станки с ЧПУ);
- повышают долговечность и надежность автоматических линий;
- автоматизируют управление производством путем применения ЭВМ;
- повышают качество продукции за счет автоматизации контроля;
- механизуют и автоматизируют вспомогательные (транспортирование, складирование, погрузочно-разгрузочные работы), а также складские работы.

Бурное развитие ЭА приводит в настоящее время к чрезвычайно быстрой смене объектов производства, что вызывает потери, связанные с переналадкой и заменой специального оборудования, и подчас вынуждает отказываться от механизированных систем, использовать ручной труд при сборочно-монтажных работах. Решение этой проблемы возможно путем создания участков или линий гибкого автоматизированного производства.

Экономическая эффективность новой техники определяется следующими критериями:

- сроком окупаемости дополнительных капиталовложений:

$$t_{\text{ок}} = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2},$$

где  $K_1, K_2$  — капиталовложения по двум сравниваемым вариантам;  $C_1, C_2$  — годовая себестоимость продукции по двум вариантам;

- коэффициентом эффективности капиталовложений, определяющим прибыль на дополнительные вложения:

$$C = 1/t_{\text{ок}};$$

- удельными капиталовложениями, исходя из которых, выбирают вариант, требующий минимальных затрат при создании одинаковых производственных мощностей:  $\lambda = K_2 / K_1$  при  $K_2 > K_1, \lambda > 0$ .

### 16.3. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ И ИХ ОСНАЩЕНИЕ

Основным направлением, которое позволяет решить проблему существенного роста производительности труда, является внедрение в производство механизированных, автоматизированных и автоматических поточных линий.

*Автоматическая линия* (АЛ) представляет собой систему автоматических станков и агрегатов, которые устанавливаются в технологической последовательности и объединяются общими системами транспортирования заготовок, удаления отходов и управления. По характеру транспортной связи оборудования АЛ подразделяются

на две группы: жесткие (синхронные) и гибкие (несинхронные). *Жесткие линии* характеризуются тем, что на всех рабочих позициях детали обрабатываются одновременно, а после окончания операций перемещаются транспортером на соседние позиции. Отказ хотя бы одного элемента жесткой линии приводит к ее остановке, что снижает производительность. Жесткие линии на 70—90 % компонуются из унифицированных узлов и агрегатов, что обеспечивает низкую их стоимость, короткие сроки проектирования и изготовления. *Гибкие линии* состоят из независимо (по времени) работающих станков с гибкой транспортной связью.

В зависимости от способа перемещения обрабатываемых деталей АЛ подразделяются на спутниковые и беспутниковые. *Спутниковые АЛ* — это линии, в которых детали базируются, обрабатываются в течение всего технологического процесса в приспособлениях, называемых спутниками. Применение таких приспособлений позволяет точно базировать детали сложной формы, не имеющие базовых поверхностей, расширяет номенклатуру деталей, однако увеличивает затраты на обслуживание линий.

*Беспутниковые АЛ* — в свою очередь подразделяются на прямоточные, поточные, бункерные.

В *прямоточных линиях* (рис.16.5, а) детали с помощью транспортера перемещаются от одного станка к другому на расстояние  $L$ , равное расстоянию между рабочими зонами станков, а затем подаются в зону обработки. В *поточных линиях* (рис.16.5, б) заготовки передаются на расстояние  $d$ , равное размерам самой заготовки. *Бункерные линии* (рис.16.5, в) снабжаются бункерами, откуда заготовки непрерывно подаются к станкам. Они применяются для обработки деталей небольшой массы и размеров.

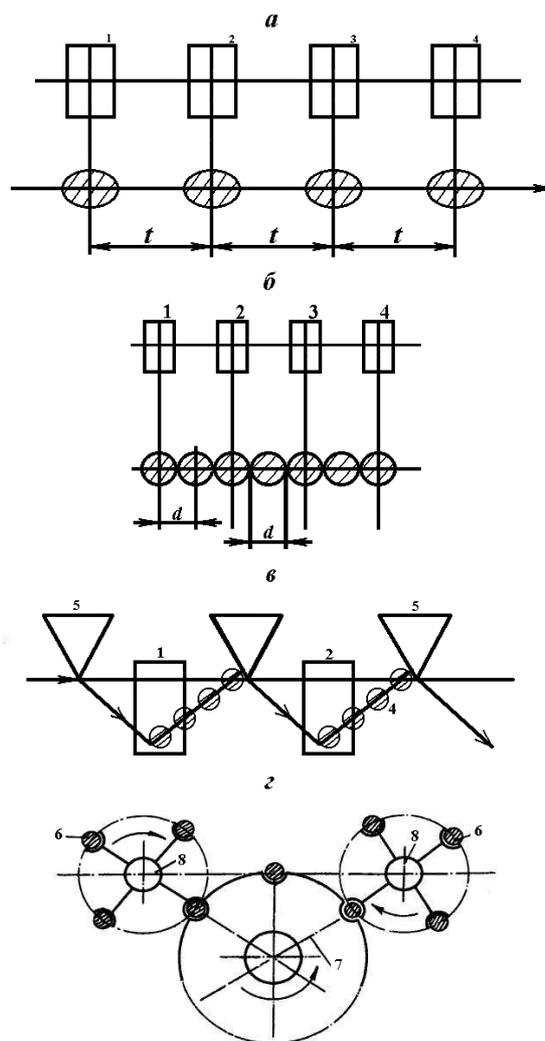


Рис. 16.5. Схемы автоматических линий:

1 – 4 станки; 5 – бункеры; 6 – заготовки; 7 – рабочий ротор; 8 – транспортный ротор

*Роторные линии* (рис.16.5, з) отличаются тем, что в них заготовки обрабатываются в процессе перемещения от одной позиции к другой, и состоят из технологических роторов 7, на позициях которых выполняются технологические операции, и транспортных роторов 6, вращающихся синхронно с технологическими и осуществляющих межоперационное транспортирование заготовок. Роторы вращаются от общего привода через систему зубчатых колес, расположенных на вертикальных валах роторов. Роторная машина совершает непрерывное транспортирующее движение одновременно с необходимыми технологическими движениями, поэтому ее производительность не зависит от продолжительности технологических операций, а определяется временем перемещения ротора на значение шага между инструментами:

$$R_M = h / V_{тр},$$

где  $h$  — шаговое расстояние;  $V_{тр}$  — транспортная скорость. Тогда производительность:

$$\Pi = 1 / R_M = V_{тр} / n,$$

где  $n$  — количество роботов.

Независимость ритма роторной машины от длительности операций — важное условие резкого снижения межоперационных простоев и сохранения высокого коэффициента использования всех машин, входящих в АЛ. Областью рационального применения роторных АЛ являются технологические процессы, характеризуемые поверхностным действием орудий на предметы обработки: штамповка, прессование, литье, вытяжка, химическая обработка и т. д.

В зависимости от количества деталей, одновременно обрабатываемых на каждой позиции, линии подразделяются на однопозиционные и многопозиционные. Линии, скомпонованные из однопозиционных агрегатных станков, используются в основном для обработки сравнительно крупных деталей. Линии из многопозиционных станков производительнее благодаря уменьшению вспомогательного времени за счет совмещения транспортирования обрабатываемых деталей и выполнения технологических операций. Многопозиционные станки со сменной инструмента в виде барабана или с поворотным столом уменьшают число схем базирования деталей, что снижает вероятность нарушения базирования. Линия из многопозиционных станков 1, 3 (рис.16.6) с проходным транспортером-накопителем 2 имеет возможность функционирования тогда, когда один из станков остановлен для обслуживания и смены инструмента.

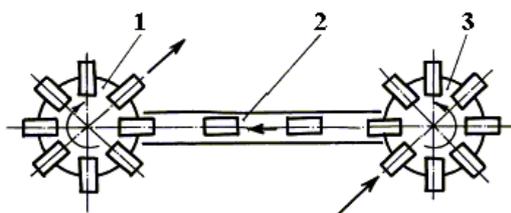


Рис. 16.6. Схема многопозиционной АЛ

Транспортные системы автоматических линий подразделяются на жесткие и гибкие.

*Жесткое транспортное устройство* линий спутникового вида состоит из межстаночного транспортера, перемещающего от станка к станку детали в спутниках, возвратного транспортера и поворотного устройства для изменения ориентации спутников. Межстаночный транспортер включает две круглые поворотные штанги 1 с флажками 2 и спутниками 3 (рис.16.7). Флажки препятствуют скольжению спутников по штангам в моменты их разгона и торможения путем прижима их к верхним базам 4. Это позволяет переносить спутники с помощью

штанг на высокой скорости (20 м/мин) с замедлением ее до 3 м/мин в начале и в конце цикла перемещения. Такая схема обеспечивает сохранность баз и требует небольшого усилия для перемещения спутников.

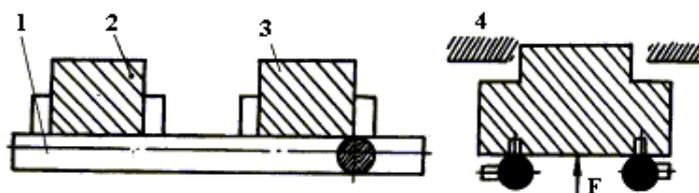


Рис. 16.7. Схема жесткого транспортера

Гибкость межагрегатных транспортных связей может быть достигнута с помощью накопителей деталей, расположенных между отдельными участками, обработкой деталей в параллельных потоках, а также созданием линий со сплошной структурой. Примером гибкой линии, состоящей из участков 1 и 3 и накопителя 2 между ними, является линия с проходным транспортером-накопителем (рис.16.8). При выходе из строя первого участка станки второго имеют возможность обрабатывать детали, поступающие из накопителя. Производительность таких линий выше, чем линий с жесткими транспортными связями.

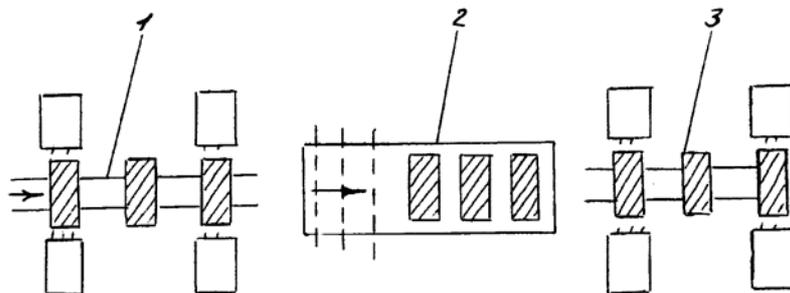


Рис. 16.8. Схема гибкой транспортной системы с накопителем

Механизация и автоматизация процессов сборки ЭА осуществляется путем применения поточных линий:

- *механизированных*, в которых большая часть операций производственного процесса выполняется с применением механизированного инструмента (пневматического, электрифицированного и др.), а процессы перемещения собираемых изделий механизированы путем применения конвейера без автоматического адресования;
- *автоматизированных*, в которых большая часть операций выполняется с применением полуавтоматического и автоматического оборудования, а процессы перемещения изделий автоматизированы путем применения конвейера с автоматическим адресованием.

В зависимости от номенклатуры закрепленных за линией изделий поточные линии могут быть однопредметными и многопредметными. За *однопредметной линией* закреплена сборка изделия одного наименования, за многопредметной — изделий разных наименований, сходных по конструктивно-технологическим признакам. Технологической основой создания *многопредметных линий* является применение групповых или типовых ТП, позволяющих приблизить организацию серийного производства к условиям массового производства.

Для определения возможности организации одно- или многопредметной поточной линии выполняется предварительный расчет количества рабочих мест:

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m N_i T_i}{\Phi_d},$$

где  $m$  — количество изделий в группе;  $N_i$  — программа выпуска  $i$ -го изделия, входящего в группу;  $T_i$  — фактическая трудоемкость изготовления  $i$ -го изделия;  $\Phi_d$  — годовой действительный фонд времени работы линии.

Наилучшие технико-экономические показатели имеют линии с количеством рабочих от 10 до 50. Если количество рабочих превышает 50, то затрудняется управление линией, снижается ее надежность. В этом случае целесообразно организовать две линии.

Производительность автоматических линий можно определить так:

$$Q = K_{\text{эф}} \Phi_d / t_{\text{ц}},$$

где  $K_{\text{эф}}$  — технический коэффициент использования;  $t_{\text{ц}}$  — длительность цикла поточной линии.

Технический коэффициент использования

$$K_{\text{эф}} = Q_{\text{ц}} / Q_{\text{ф}},$$

где  $Q_{\text{ф}}$ ,  $Q_{\text{ц}}$  — фактическая и цикловая производительность.

Фактическая производительность меньше цикловой на величину неизбежных затрат времени на замену инструмента, переналадку, профилактику оборудования.  $K_{\text{эф}}$  составляет 0,75—0,80 для переналаживаемых линий и 0,65—0,70 для переналаживаемых.

Основным оборудованием автоматизированных транспортных систем, в том числе поточно-механизированных линий, являются конвейеры, монорельсовые подвесные дороги и транспортные роботы. Выбор типа конвейера зависит от массы и габаритных размеров собираемых деталей, возможности выполнения работ со съемом изделий или без него, наличия параллельных рабочих мест и других факторов.

Конвейеры для поточных линий классифицируют по ряду признаков несущего органа:

- по конструкции — на ленточные, пластинчатые, тележечные, роликовые, элеваторы;
- по назначению — на распределительные и рабочие;
- по съему предметов — на ручные и механизированные;
- по положению в пространстве — на горизонтально- и вертикально-замкнутые;
- по характеру движения — на непрерывно-поступательные и периодические.

*Ленточные конвейеры* предназначены для транспортирования насыпных или штучных грузов и широко применяются из-за простоты их конструкции и низкой стоимости изготовления. Несущий орган — лента — изготавливают из прорезиненного ремня или эластичного пластика. На ней могут транспортироваться изделия массой до 15 кг. В зависимости от габаритных размеров изделий ширина несущего органа может быть 200,300,400 и 500 мм.

Типы ленточных конвейеров: непрерывно-поступательные ПТ-92...ПТ-95 с шириной ленты от 200 до 500 мм и скоростью 0,6—1,45 м/мин; периодические ПТ-106...ПТ-109 с теми же размерами и скоростью до 10 м/мин.

Для удобства монтажа типовые ленточные конвейеры изготавливают из отдельных секций (приводной и натяжной станций, промежуточных секций длиной 2500 мм на 4 рабочих места), при этом рабочие места могут располагаться в одностороннем, двустороннем или в шахматном порядке. Верхняя и нижняя ветви ленты поддерживаются роликовыми парами. Постоянное натяжение ленты обеспечивается винтовым натяжным устройством. Но жесткость и сравнительно малая прочность несущего органа такого конвейера не дают возможности закреплять на нем технологические приспособления и собирать детали большой массы, поэтому ленточные конвейеры чаще всего используют как распределительные.

*Пластинчатые конвейеры* применяются в основном для сборки более тяжелых изделий массой до 40 кг и длиной до 500 мм, а также в том случае, когда предъявляются повышенные требования к точности и качеству сборки или к механизации съема изделий. В качестве несущего органа конвейера применяется стальная пла-

стинк, которая одновременно выполняет функцию цепи. В зависимости от габаритных размеров изделия пластинчатые конвейеры имеют ширину несущего органа 100,300,400 и 500мм (ПТ-110...ПТ-112). Пластинчатые конвейеры могут быть распределительными и рабочими, а по расположению в пространстве — только вертикально-замкнутыми и в большинстве случаев периодического действия.

Тяговым органом *тележечных конвейеров* является бесконечная цепь шарнирного типа, замкнутая между звездочками. Несущим органом является тележка, прикрепленная к цепи шарнирами. Размеры тележки находятся в пределах от 200×250 до 450×500 мм, грузоподъемность — 50 кг и более (ПТ-113). Применение цепных горизонтально-замкнутых конвейеров обеспечивает удобную компоновку линий с рациональным использованием площади.

*Распределительный конвейер* применяют, если на линии необходимо иметь параллельные рабочие места и масса изделий составляет менее 8 кг. *Рабочий конвейер* используют только при отсутствии параллельных рабочих мест и массе передаваемых изделий более 8 кг.

Выбор способа съема изделия с несущего органа зависит от вспомогательного времени, необходимого для съема и установки на несущий орган конвейера, а также от массы изделий. При *ручном съеме* адресование изделий осуществляется либо по номерной (цветовой), либо по световой системе. *Механизированный съем* может осуществляться с помощью механического нумератора, командоаппарата, кодирования контейнера.

*Номерная (цветовая) система адресования* осуществляется путем числового кодирования или окрашивания участков несущего органа конвейера в разные цвета и закрепления за ним рабочих мест. Система имеет простую организацию, однако отвлекает и утомляет рабочего, снижает производительность труда.

При *световой системе адресования* на рабочем месте в нужный момент загорается сигнальная лампочка и рабочий узнает, что ему следует снять подошедшее изделие и взамен поставить собранное. Такая система удобна для сборщика и освобождает его от наблюдения за конвейером.

Механизированным съемом с помощью нумератора оснащаются горизонтально-замкнутые напольные конвейеры с наклонными тележками и непрерывно-поступательным движением несущего органа, работающего на скоростях 8 и 10 м/мин. В этом случае рабочий, закончив операцию, устанавливает тару 1 с собранным изделием на наклонную плоскость любой подошедшей тележки 3, где для удержания тары имеются два упора 2 (рис.16.9). Нажав на определенные клавиши двухразрядного нумератора 4 на тележке, он задает номер следующей операции. С помощью двух разрядного нумератора (по 10 шт. в ряду) можно закодировать до 90 различных операций. Перемещаясь от одного рабочего места к другому, закодированная тележка штырями 5 находит на кулачок 6 (который соответствует только данной операции), утапливает упоры 3, удерживающие тару, и последняя по наклонной плоскости скатывается на рабочее место.

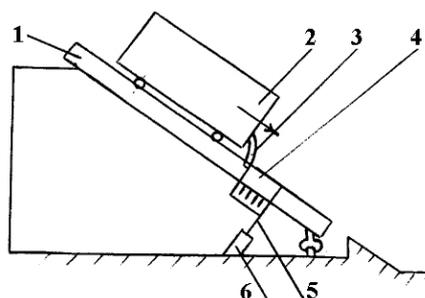


Рис. 16.9. Конвейер с наклонными тележками

Такая система позволяет работать с любым количеством параллельных рабочих мест на линии, изменять маршрут сборки, осуществлять гибкую связь между рабочими местами.

*Расположение несущего органа* в пространстве зависит от формы и размеров помещения, где размещается поточная линия сборки, а также от возможности создания прямоточного производства. Горизонтально-замкнутые конвейеры отличаются большей гибкостью и обеспечивают планировку линий различной формы (прямолинейную, Ш-образную, Т-образную). Вертикально-замкнутые конвейеры обеспечивают прямолинейную форму. Монорельсовые подвесные дороги применяют для меж- или внутрицеховых грузопотоков. В транспортную систему входят: путевые устройства, эстакада, грузоносители, средства автоматизации и управления. Их достоинствами являются высокая экономичность, использование малой производственной площади, высокая скорость, удобство обслуживания.

#### 16.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОТОЧНЫХ ЛИНИЙ СБОРКИ

Проектирование однопредметной непрерывно-поточной линии, выполненной на конвейере, осуществляют по приведенной ниже последовательности.

1. Определяют ритм выпуска изделий по формуле

$$r = \frac{\Phi_d}{N_p} n_{\text{тр}},$$

где  $\Phi_d$  — базовый действительный фонд времени:  $\Phi_d = D \cdot 8 \cdot 60 \cdot C \cdot K_{\text{рег.пер}}$ ;  $D$  — число рабочих дней;  $C$  — число смен;  $K_{\text{рег.пер}}$  — коэффициент, учитывающий время регламентированных перерывов в работе линии (0,94—0,95);  $n_{\text{тр}}$  — количество изделий, транспортируемых в пачке;  $N_p$  — расчетная программа выпуска:

$$N_p = N \left( 1 + \frac{P}{100} \right),$$

где  $N$  — годовая программа выпуска;  $P$  — возможные технологические потери (1—3 %).

2. Рассчитывают количество рабочих мест, выполняющих параллельно одну и ту же операцию:

$$C_{pi} = T_{opi} / r,$$

где  $T_{opi}$  — норма оперативного времени  $i$ -й операции.

3. Определяют коэффициенты загрузки рабочих мест как отношение расчетного числа рабочих мест к принятому, фактическому:

$$K_{zi} = C_{pi} / C_{при}.$$

Операции считаются синхронизированными, если  $0,9 < K_{zi} < 1,2$ .

4. Находят общее количество рабочих мест сборщиков на линии:

$$K_p = \sum_{i=1}^n C_{pi} = \sum T_{сб} / r,$$

где  $T_{сб}$  — трудоемкость сборки изделия, равная  $\sum_{i=1}^n T_{opi}$ ;  $n$  — число операций.

Если количество рабочих мест равно или меньше 10, организация линии поточной сборки экономически нецелесообразна, если больше 50, — необходимо организовать две или более линий.

5. Рассчитывают общее количество рабочих мест на линии:

$$K_{\text{общ}} = K_p + K_{\text{рез}} + K_{\text{компл}} + K_{\text{контр}},$$

где  $K_{рез}$  — количество резервных мест (0,1—0,2)  $K_p$ ;  $K_{комп}$ ,  $K_{контр}$  — количество рабочих мест комплектовщиков и контролеров соответственно.

6. Рассчитывают шаг конвейера:

$$d = V_n r ,$$

где  $V_n$  — скорость непрерывного движения ленты конвейера.

При пульсирующем движении ленты конвейера со скоростью  $V_n$

$$d = V_n T_{пр} ,$$

где  $T_{пр}$  — время передвижения предмета на один интервал.

7. Определяют длину конвейера:

$$L = L_p + L_1 + L_2 ,$$

где  $L_p$  — рабочая длина несущего органа конвейера;  $L_1$ ,  $L_2$  — длины приводной и натяжной станций соответственно, выбираемые по справочным данным, (1,5—2)м.

Рабочая длина несущего органа конвейера при однорядном расположении рабочих мест (рис. 16.10, а) рассчитывается так:

$$L_p = K_{max} l_{уд} ;$$

для двухрядного расположения рабочих мест (рис. 16.10, б)

$$L_p = (K_{max} + 1) l_{уд} / 2 ,$$

где  $K_{max}$  — максимальное количество рабочих мест на линии;  $l_{уд}$  — расстояние между двумя соседними рабочими местами (обычно равно 1,2 м).

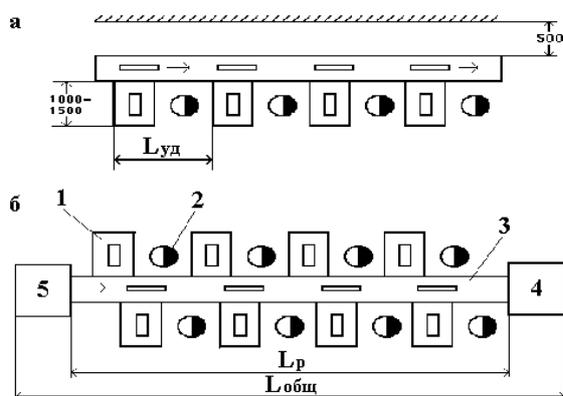


Рис. 16.10 Схемы поточных линий с односторонним (а) и двухсторонним (б)

расположением рабочих мест: 1 – рабочие места; 2 – сборщик; 3 – лента; 4, 5 – натяжная и приводная станции

8. Рассчитывают количество предметов в заделе  $N_3$ , сборка которых не окончена:

$$N_3 = N_{тех} + N_{тр} + N_{рез} + N_{обор} ,$$

где  $N_{тех}$  — технологический задел, представляющий собой изделия на сборке на рабочих местах линии;  $N_{тех} = K_p n_{тр}$ ;  $N_{тр}$  — транспортный задел; при непрерывном движении конвейера  $N_{тр} = L_p / d_{тр}$ , при пульсирующем  $N_{тр} = K_p n_{тр}$ ;  $N_{рез}$  — резервный задел, равный 2—5 % сменного выпуска изделий;  $N_{обор}$  — оборотный задел, создаваемый на комплектовочной и упаковочной площадках в размере сменной потребности линии.

Полное использование фонда рабочего времени достигается внедрением многостаночного обслуживания и совмещением обслуживания операций. Для этого составляют график обслуживания, определяющий периоды

работы оборудования и рабочих, обслуживающих несколько операций на протяжении смены. Время работы рабочего на одном рабочем месте — это период комплектования задела

$$T_x = r K_3,$$

где  $K_3$  — коэффициент загрузки рабочего на одном рабочем месте на данной операции:  $K_3 = T_{шт} / r$ .

В течение периода комплектования задела сохраняется одинаковый план работы на смежных операциях, а величина межоперационного задела изменяется от нуля до максимального абсолютного значения. Положительная величина задела относится к концу периода  $T_x$ , а его отрицательная величина — к началу периода  $T_x$ .

Величина межоперационного оборотного задела  $Z_{max}$

$$Z_{max} = \left( \frac{n_{pi}}{T_{шти}} - \frac{n_{pi+1}}{T_{шти+1}} \right) T_x,$$

где  $n_{pi}$ ,  $n_{pi+1}$  — количество рабочих мест на каждой из двух смежных операций, занятых в течение периода  $T_x$ .

Производительность конвейера определяется формулой

$$Q = Vm / d,$$

где  $V$  — скорость транспортирования, м/мин;  $m$  — масса изделия, кг;  $d$  — шаг конвейера, м.

По полученному значению  $Q$  рассчитывают мощность привода конвейера:

$$W = 0,141 (L_{п} V m_k / 36 + L_p Q / 270),$$

где  $m_k$  — погонная масса ленты конвейера (6—9 кг/м).

## 16.5. РОБОТОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ

Переход от автоматизированных поточных линий к качественно новому уровню автоматизации — автоматическим производственным системам, работающим с минимальным участием человека, осуществляется путем использования роботов. Промышленные роботы дают возможность автоматизировать не только основные, но и вспомогательные операции, обеспечить быструю переналадку автоматических линий, что является предпосылками создания гибкого автоматического производства.

Слово "робот" впервые ввел в обращение Карел Чапек в своей пьесе "R.V.R." в 1920 г., где он говорит о механическом прообразе человека, выполняющего тяжелую работу. Чешское слово "robota" означает тяжелый, подневольный труд.

Быстрыми темпами робототехника стала развиваться 20 лет назад, что отвечало насущным потребностям общественного производства и необходимости замены человека на участках с опасными, вредными или монотонными условиями труда. Так, если в 1972 г. в Западной Европе работало в производстве 300 роботов, в США — 850, в Японии — 1500, то к 1990 г. их количество возросло в 25 раз. Начало работ в СССР по созданию роботов относится к 1969 г., когда был разработан робот "универсал-50", но только в 1975 г. опытные образцы роботов "циклон-35" и "универсал-15М" нашли применение на производстве. Выдающуюся роль в развитии теории роботов и организации работ по их созданию сыграл академик И. И. Артоболевский, долгие годы возглавлявший Координационный совет по робототехнике АН СССР.

В настоящее время под *роботом* понимают автоматический манипулятор с программным управлением. В зависимости от участия человека в процессе управления роботами их подразделяют на биотехнические, автономные, полуавтоматические и автоматические. К биотехническим относятся дистанционно управляемые роботы, копирующие движения человека и имеющие средства обратной связи. Автономный робот может длительно

работать без участия человека. Полуавтоматический робот характеризуется сочетанием ручного и автоматического управления. Он снабжен устройством управления для вмешательства человека в процесс автономного функционирования путем сообщения дополнительной информации или последовательности действий.

За короткий период развития роботов произошли большие изменения в элементной базе, структуре, функциях и характере их использования. Это привело к делению роботов на поколения.

Роботы первого поколения (программные роботы) имеют жесткую (как правило цикловую) программу действий и элементарную обратную связь с окружающей средой или не имеют ее.

Роботы второго поколения (адаптивные роботы) обладают координацией движений с восприятием. Они пригодны для малоквалифицированного труда при изготовлении изделий. Программа работы робота требует для реализации движений управляющей ЭВМ и программного обеспечения для обработки сенсорной информации и выработки управляющих воздействий.

Роботы третьего поколения обладают способностью к обучению и адаптации в процессе решения производственных задач и способны вести диалог с человеком, формировать себе модель внешней среды, распознавать и анализировать сложные ситуации.

Структурная схема *промышленного робота* (ПР) включает ряд систем устройство (рис.16.11): механическую, приводов, управления, связи с оператором, информационную, а также операционное. Механическую систему выполняют, как правило, в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности. Привод обеспечивает силовое воздействие на соответствующий механизм, осуществляющий заданное перемещение. Система управления координирует движение рабочих органов манипулятора, осуществляет прием сигналов от датчиков внешней информации и использует их для выбора подпрограммы работы ПР. Приведем основные технические показатели роботов.

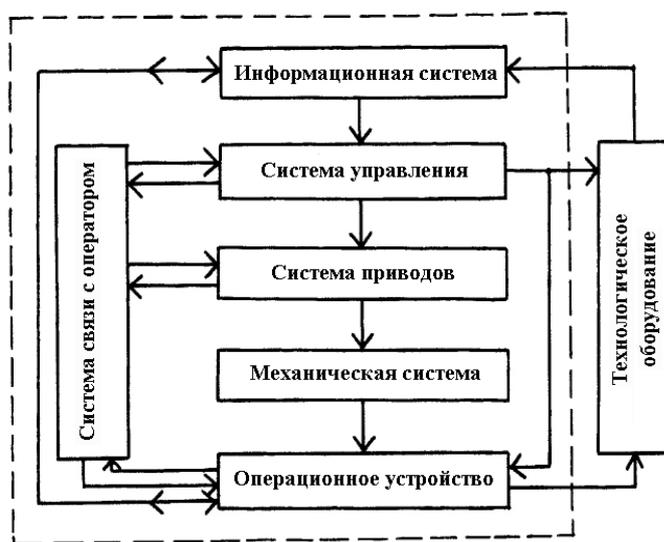


Рис. 16.11. Структурная схема ПР

1. *Число степеней подвижности* — сумма возможных координационных движений объекта манипулирования относительно опорной системы. Простые роботы-манипуляторы имеют две степени подвижности, сложные — шесть.

2. *Грузоподъемность руки* — наибольшая масса груза, перемещаемого при заданных условиях, например скорости и т. д. ПР подразделяются на сверхлегкие (до 1 кг), легкие (1—10 кг), средние (10—200 кг), тяжелые (200—1000 кг).

3. *Рабочая зона* — пространство, в котором при работе может находиться рука манипулятора (рис. 16.12).

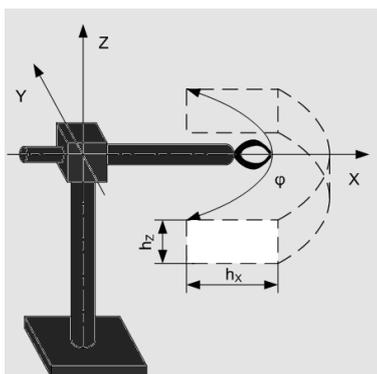


Рис. 16.12. Рабочая зона робота

4. *Погрешность позиционирования* — отклонение заданной позиции исполнительного механизма от фактической при многократном повторении:

$$\delta_x = \sum_{i=1}^n \Delta X_i / k,$$

где  $\Delta X_i$  — отклонение координаты;  $k$  — количество повторений. ПР с малой точностью позиционирования и погрешностью более 1,0 мм способны выполнять транспортные операции, операции окраски, конструкционной сварки. Средняя точность позиционирования 0,1—1,0 мм при скоростях перемещений 0,5—1,0 м/с в основном удовлетворяет требованиям, предъявляемым к обслуживанию различных видов технологического оборудования. ПР с высокой точностью позиционирования (менее 0,1 мм) используют для выполнения сборочных работ.

5. *Скорость перемещения* конечного звена манипулятора, которая определяет быстродействие. Малое быстродействие при скорости перемещения до 0,5 м/с характерно для гидравлических ПР средней и большой грузоподъемности. Среднее быстродействие (до 1,0 м/с) соответствует средней скорости движения руки человека и основной массе ПР, используемых для автоматизации производственных процессов. Высокое быстродействие (более 1,0 м/с) используется для ограниченного типоразмера роботов вследствие значительных механических трудностей их создания и эксплуатации.

6. *Системы управления* ПР подразделяются на цикловые, позиционные, контурные и комбинированные. При цикловом управлении программируются последовательность движений и интервалы времени между циклами. Информация о положении исполнительных механизмов ПР задается для крайних положений рабочих органов по каждой из координат. Позиционное управление позволяет программировать независимые перемещения по осям координат в произвольные точки рабочей зоны манипулятора. Здесь движение каждой степени подвижности осуществляется в виде конечной последовательности позиций, заданных программой, с дискретной обработкой движений. При контурном управлении рабочие органы манипулятора перемещаются по заданной программой траектории в пределах рабочей зоны. Комбинированное управление объединяет возможности позиционного и контурного управления.

Эффективность работы ПР во многом определяется конструкцией захватного устройства (ЗУ). К нему предъявляются следующие требования: простота конструкции, надежность, неизменность положения заготовки при ее транспортировании, минимальное время обработки, достаточное усилие, исключение повреждения изделий. ЗУ делятся на механические, вакуумные, пневматические, магнитные, электромагнитные и др. Наиболее широкое распространение получили механические захваты, которые могут быть незажимными и зажимными. Незажимные захваты выполняются в виде перемещающихся возвратно-поступательно планок, стержней, периодически вращающихся дисков и барабанов (рис.16.13). К зажимным захватам относятся кулачковые, кле-

щевые, шариковые и др. Они просты по конструкции и надежны в работе, однако характеризуются низкой универсальностью, сложностью переналадки и возможностью повреждения поверхности контакта.

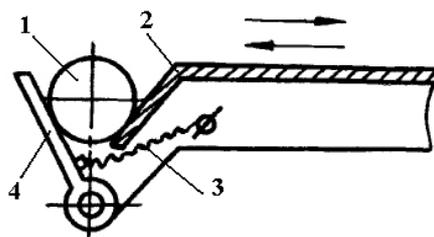


Рис. 16.13. Незажимный захват:

1 – груз; 2 – планка; 3 – пружина; 4 – рычаг

Вакуумные захваты (рис. 16.14) состоят из трубки 1, которая в нижней части переходит в раструб в виде колокола, и шарикового клапана 2. При нажатии на плоскость изделия раструб распрямляется в кольцо, при этом воздух, находящийся в полости колокола вытесняется через клапан, и изделие присасывается к захвату. Усилие прижима определяется по формуле

$$F = k S_{\text{п}} P_{\text{и}},$$

где  $k$  — коэффициент негерметичности (0,8—0,85);  $S_{\text{п}}$  — площадь поверхности, ограниченной кольцом;  $P_{\text{и}}$  — избыточное давление, равное разности между атмосферным и давлением в вакуумной полости приспособления ( $0,1 \cdot 10^5$  Па).

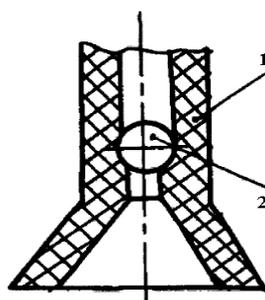


Рис. 16.13. Вакуумный захват

Преимущества вакуумного захвата — удобство поштучного отделения груза, отсутствие сосредоточенных сил зажима, недостатки — малая грузоподъемность, необходимость сплошной гладкой поверхности деталей.

Для транспортирования деталей, изготовленных из ферромагнитных материалов, применяют магнитные захваты. К их достоинствам относятся простота конструкции, возможность захвата деталей сложной конфигурации, отсутствие повреждений поверхности деталей, к недостаткам — намагничивание деталей, ограниченная номенклатура материалов деталей. Усилие захвата определяется свойствами материала объекта (магнитной индукцией  $B$ ) и площадью  $S$  контакта:

$$F = (B/10^4)^2 S,$$

Пневматические захваты (рис. 16.15) основаны на использовании камерных элементов, просты по конструктивному исполнению и надежны в работе. При захватывании объектов сжатый воздух по шлангам 1 подается в каждый из баллонов-губок 3, которые захватывают объект. Изменением давления сжатого воздуха, поступающего в баллоны, достигается регулировка усилия, удерживающего объект. Поэтому пневматический захват может удерживать объекты, имеющие различные размеры и массу.

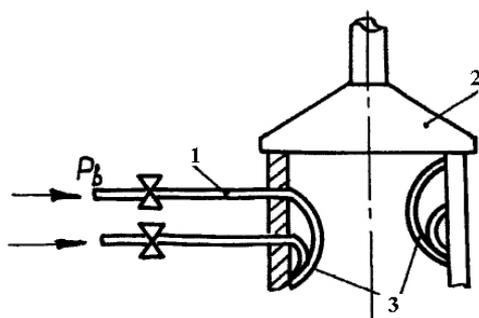


Рис. 16.15. Пневматический захват

В электромагнитном захвате используется усилие, создаваемое электромагнитом. Преимущества — быстро-та срабатывания, возможность включения в любой точке траектории движения по поступившей команде.

Характеристики некоторых промышленных роботов приведены в табл.16.1.

Табл. 16.1. *Тех-*

*ническая характеристика промышленных роботов*

Параметр	Тип робота					
	ПМР-0.5-154-КПВ	ПР5-2П	РС-4	РС-6	"Гном-52"	РМ-01
Число степеней подвижности	4	3	5	4	3	6
Горизонтальное перемещение, мм	154	150	255	240	250—180	864
Средняя скорость горизонтального перемещения, мм/с	400	200	400	400	500	500
Вертикальное перемещение, мм	50	100	48	48	50	432
Средняя скорость, мм/с	100	200	100	100	100	500
Точность позиционирования, мм	±0,29	±0,1	±0,05	±0,05	±0,25	±0,1
Система управления	Позиционная	Цикловая	Цикловая	Позиционная	Цикловая	Микро-ЭВМ
Масса груза, кг	0,5	0,3	0,5	0,5	0,63	2,5
Габаритные размеры, мм	1100×805 ×500	425×268 ×214	110×850 ×430	560×850 ×450	855×625 ×400	600×600 ×1800

Применение ПР в производстве вносит определенные требования при проектировании *робототехнологических комплексов* (РТК), включающих робот или группу роботов, станок, агрегат или группу однотипного технологического оборудования. При организации РТК выделяют активную рабочую зону и несколько вспомогательных зон, связанных с подачей и удалением заготовок и изделий, обслуживанием робота.

Производственная площадь  $S_0$ , занимаемая оборудованием, определяется по формуле

$$S_0 = (L + a + 0,5 h_1)(b + 0,5 h_2),$$

где  $L$  — суммарная длина основного оборудования вдоль фронта;  $a$  — расстояние от стены или колонны до рабочего места;  $h_1$  — проход между оборудованием;  $b$  — ширина основного технологического оборудования;  $h_2$  — расстояние между рядами оборудования.

Рациональность структуры РТК оценивается по коэффициенту использования производственной площади:

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{oi} + S_{всп})}{S},$$

где  $n$  — количество единиц технологического оборудования;  $S_{oi}$  — площадь, занимаемая основным оборудованием;  $S_{всп}$  — площадь, занятая вспомогательным оборудованием и роботами;  $S$  — площадь здания.

Площадь, занятая промышленным роботом,

$$S_{\text{ПР}} = k (L_{\text{ПР}} + h_3) b_{\text{ПР}},$$

где  $k$  — коэффициент, учитывающий площадь, необходимую для эксплуатации, профилактики и ремонта ПР (1,2—1,5);  $L_{\text{ПР}}$  — длина ПР;  $h_3$  — величина прохода;  $b_{\text{ПР}}$  — ширина ПР.

РТК в общем случае включает: автоматическое технологическое оборудование (автоматы); робототехническое транспортное оборудование (роботы-манипуляторы, транспортные роботы и др.); автоматические загрузочные и разгрузочные устройства; управляющие устройства (пульты управления, микроЭВМ). При компоновке РТК возможные два варианта:

1) ПР встраивается в существующую технологическую линию, когда требуется большая универсальность робота и наличие у него элементов адаптации;

2) ПР проектируется как составная часть сборочного технологического оборудования.

Второй вариант наиболее рационален и перспективен, поскольку позволяет в максимальной степени использовать преимущества модульного принципа построения ПР. При этом варианте оборудование может располагаться вокруг ПР или устанавливаться в линию. Компоновка РТК по дуге окружности (рис.16.16, а) предусматривает расстановку оборудования 1, 2, 3 по дуге, описываемой захватом робота 4. Такая компоновка применяется для выполнения последовательных технологических операций: лужения, отмывки, рихтовки, гибки, контроля параметров ЭРЭ.

Компоновка РТК по линейке (рис. 16.16, б) предусматривает размещение оборудования в линию, а робот должен быть снабжен модулем перемещения между транспортными конвейерами 5. Транспортные операции перемещения сборочных единиц по позициям сборки реализуются с помощью транспортного робота, а операции загрузки и разгрузки отдельных видов технологического оборудования — с помощью роботоманипуляторов.

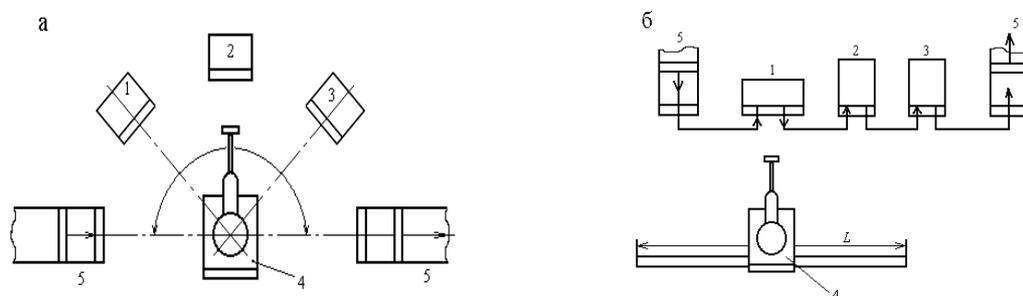


Рис. 16.16. Компоновка РТК по дуге окружности (а) и по линейке оборудования (б)

Автоматизация транспортных работ может осуществляться с помощью подвесных ПР серии М, к преимуществам которых относятся: малая занимаемая площадь, большая зона обслуживания, удобство доступа к

оборудованию. Подвесные ПР построены на базе унифицированных модулей, в состав которых входят: модуль транспортного перемещения, направляющая (монорельс) с модулем пневмоэлектропитания, исполнительные органы, комплект сменных захватов.

В качестве исполнительных органов в ПР серии М используются руки двух типов — с пневматическим и электромеханическим приводом. Компоновка РТК на базе ПР серии М показана на рис. 16.17, характеристики подвесных ПР приведены табл. 16.2.

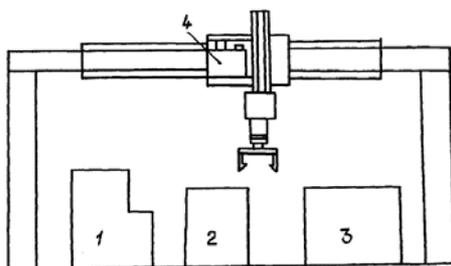


Рис. 16.17. РТК на базе ПР серии М

Табл. 16.2. Основные характеристики подвесных ПР

Параметр	М-21	М-33	М-34
Грузоподъемность руки, кг	3	10	20
Количество рук	2	1	2
Число степеней подвижности	4	2	3
Перемещение руки, мм	0—500	0—1100	0—1000
Угол поворота схвата, град.	180	—	—
Погрешность позиционирования, мм	±0,2	±0,2	±2
Скорость перемещения, м/с	1	0,8	0,4
Система управления		Позиционная	

## 16.6. ГИБКОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Процессы производства ЭА бытового назначения отличаются частыми изменениями структурного и элементного характера в результате появления новых схемно-конструктивных решений. Так, сменяемость бытовой радиоаппаратуры составляет 3—5 лет, технологического оборудования — 4—6 года, коммутационной техники — 10 лет, товаров широкого потребления — 2—3 года. Быстрое обновление продукции и снижение серийности привели к тому, что традиционные жесткие автоматические линии перестали соответствовать требованиям современного развития техники и сдерживали создание новых изделий. Поэтому в современных условиях гибкость производства приобретает особую значимость. Ниже рассмотрены предпосылки создания ГПС.

1. Появление в 50-х годах станков с ЧПУ, которые обладали возможностью быстрой переналадки с одного изделия на другое, однако имели малый полезный цикл обработки (5—10 % общего времени), невысокую надежность и были дорогими, что сдерживало их широкое применение.

2. Появление в 60-х годах роботов, в результате чего возникла принципиальная возможность автоматизировать не только вспомогательные операции, связанные с обслуживанием станков с ЧПУ, но и многие основные технологические операции (сварка, окраска, штамповка, сборка и др.). Однако функции управления в таких системах по-прежнему выполнял человек.

3. Создание РТК, включавших станки с ЧПУ и обслуживающие их роботы, управляемые с помощью микроЭВМ. Этот этап начался в начале 70-х годов в связи с появлением сравнительно дешевых и надежных микропроцессоров и микроЭВМ. Управляемые от микроЭВМ РТК позволили в 2—10 раз повысить производительность труда и значительно снизить численность обслуживающего персонала, доведя его до одного человека-оператора на несколько РТК.

Этап гибкой автоматизации, начавшийся в начале 80-х годов, характеризовался появлением ГПС первого поколения. В основе их действия лежали принципы программного управления оборудованием в масштабе участка или цеха и последовательной технологии обработки изделий. Согласно этим принципам, весь технологический процесс расчленяется на элементарные операции, а их реализация возлагалась на технологическое оборудование с ЧПУ и роботы, связанные между собой и со складами транспортными средствами.

Под *гибким автоматическим производством* понимается производственная единица (линия, участок, цех, завод), функционирующая автоматически на основе безлюдной технологии, координируемая единой системой управления от ЭВМ и обеспечивающая быструю перестройку при смене объектов производства. В общем случае ГАП состоит из технологической, транспортной, складской и информационно-управляющей подсистем (рис. 16.18).

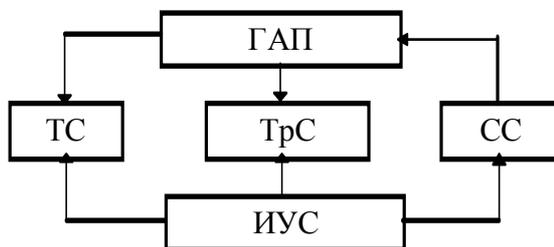


Рис. 16.18. Структура ГАП

В состав технологической системы (ТС) входят модули или технологические ячейки (рис.16.19): автоматическая обрабатывающая ячейка (АОЯ), включающая переналаживаемое технологическое оборудование, роботоманипулятор и управляющую микроЭВМ; автоматизированная контрольно-измерительная ячейка (АКИЯ), включающая автоматизированный пульт контроля и управляющую микроЭВМ.

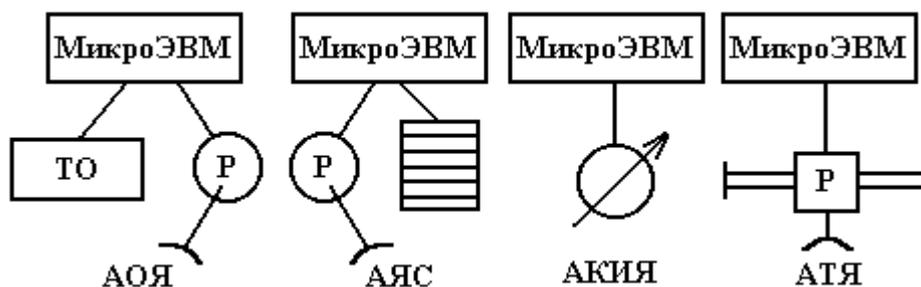


Рис. 16.19. Основные ячейки ГАП

Транспортная система (ТрС) наряду с традиционными транспортными средствами (подвесные конвейеры) использует автоматические транспортные ячейки (АТЯ), включающие транспортный робот и управляющую микроЭВМ, для перемещения заготовок, инструмента и готовых изделий между оборудованием и складами, а также удаления отходов производства.

Складская подсистема (СС) обеспечивает прием, учет, хранение и выдачу заготовок, инструмента и готовой продукции. Она включает в основном автоматизированные ячейки склада (АЯС).

Информационно-управляющая система (ИУС) служит для хранения информации, необходимой для оперативного управления производством. На нее возлагаются функции гибкого планирования производства, программного управления оборудованием, диагностики отказов и контроля за качеством изделия. Для выполнения этих функций в автоматическом режиме ИУС реализуется на базе сети ЭВМ, включающей программно-совместимые мини-ЭВМ, микропроцессоры и необходимый интерфейс. Диапазон возможностей перестройки и степень интеллектуальности управляющей системы определяются главным образом программным обеспечением и возможностями исполнительной системы.

Конструктивным признаком автоматического технологического оборудования (АТО) является наличие полного комплекса механизмов (двигательного, передаточного, исполнительного), осуществляющих все движения рабочего цикла, и устройств управления, координирующих их работу. В свою очередь исполнительный механизм состоит из целевых механизмов: рабочих ходов, холостых ходов, управления.

К механизмам холостых ходов АТО подготовки к монтажу и сборке ЭРЭ относятся механизмы: захвата и выдачи деталей из навала, ориентации, сортировки и кассетирования, накопления и выдачи деталей из накопителя, перемещения, позиционирования и совмещения. К механизмам рабочих ходов указанного АТО относятся механизмы: рихтовки, обрезки, формовки, подгибки выводов ЭРЭ и пайки.

АТО состоит из ряда типовых элементов (рис.16.20), реализующих в автоматическом цикле основные и вспомогательные операции и переходы, функции измерения и преобразования сигналов, необходимые для работы АСУТП ГПС. В число типовых элементов АТО входят: специализированные устройства (автоматические загрузочные — АЗУ, транспортные — ТУ, питатели — П, накопители — Н) и технические средства АСУ (датчики, видеоконтрольные устройства и др.).

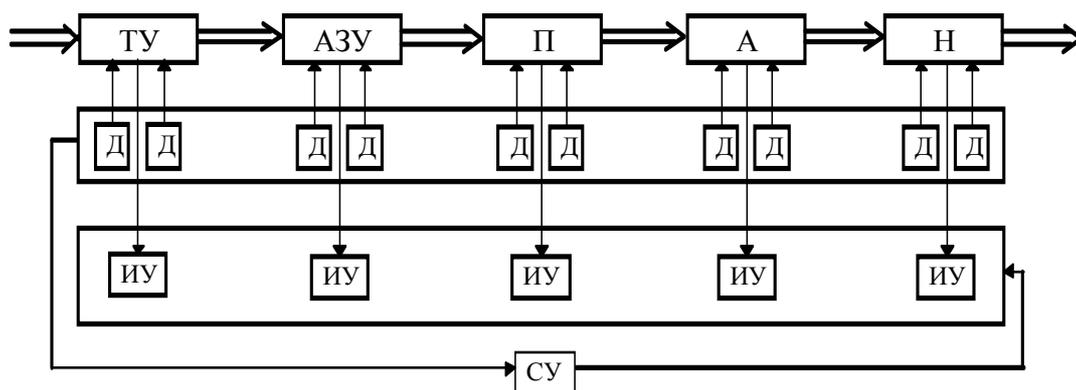


Рис. 16.20. Структура АТО

АЗУ реализуют вспомогательные операции загрузки, являющиеся частью операции ввода объекта производства в рабочую зону АТО, ТУ — транспортные операции, связанные с перемещением объекта производства в пространстве между различными функционирующими элементами АТО. Питатель обеспечивает подачу объек-

тов производства на рабочую позицию. Накопитель служит для накопления определенного числа объектов производства для их последующей передачи на другое АТО.

Датчики первичной информации служат для прямого и косвенного измерения параметров объектов производства (геометрических, размерных, физико-механических, электромагнитных, оптических и др.) до и после их обработки, определения положения в пространстве рабочих органов, траекторий их перемещения, взаимного положения, наличия инструмента, а также режимов и параметров технологических процессов и операций (подача, точность, скорость, давление, температура, степень вакуума и др.).

Рабочие органы АТО обеспечивают изменения параметров объекта производства в рабочей зоне. Исполнительные устройства реализуют функции управления работой элементов АТО в системе автоматического управления и регулирования.

*Гибкая производственная система* (ГПС) (ГОСТ 26228—85) представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, РТК, ГПМ, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени. ГПС обладает возможностью автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. Основными частями ГПС являются ГПМ и РТК.

*ГПМ* представляет собой единицу технологического оборудования с программным управлением для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик, автономно функционирующую, автоматически осуществляющую все функции, связанные с изготовлением изделий и имеющую возможность встраивания в ГПС.

Под *РТК* понимается совокупность единицы технологического оборудования, ПР и средств оснащения, автономно функционирующих и осуществляющих многократные циклы.

*Гибкость ГПС* — это способность оперативно перестраиваться с выпуска одного вида продукции на другой за счет самонастройки управляющей системы и автоматической перестройки технологии. Этим ГПС принципиально отличаются от автоматических линий и промышленных автоматов с жесткой структурой, переход на выпуск новой продукции у которых либо вообще невозможен, либо сопряжен со сложной реконструкцией, требующей больших затрат. Роль и место ГПС в сфере производства наглядно можно охарактеризовать с помощью зависимости (рис.16.21), построенной в логарифмическом масштабе для двух показателей:  $n$  — числа типов изделий (номенклатура) и  $m$  — объема годового выпуска. Области  $I—V$  соответствуют различному использованию средств автоматизации. Область  $I$  соответствует автоматическим поточным линиям, специализированным станкам-автоматам, применяемым в массовом производстве. Эти производственные системы рассчитаны на выпуск одной и той же продукции (узкая номенклатура) при большой программе (свыше 100 тыс. шт. в год). Производительность таких традиционных средств автоматизации очень высока, однако гибкость чрезвычайно мала.

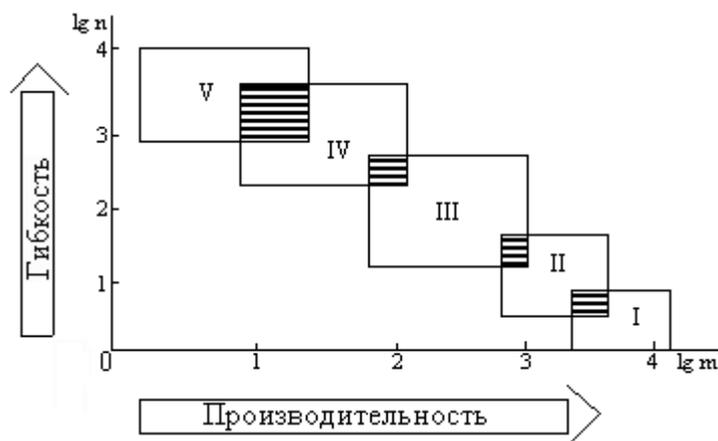


Рис. 16.21. Место ГПС в сфере производства

Области II и III соответствуют крупносерийному и серийному производству. Область V — индивидуальное и экспериментальное производство, характеризуемое универсальным оборудованием. Для такого производства характерна высокая гибкость, но низкая производительность. Использование ГПС в мелкосерийном производстве (область IV) позволяет сочетать преимущества массового производства (высокая производительность) и индивидуального производства (высокая гибкость), что достигается применением программно-управляемого технологического оборудования и гибкой управляющей системы. В этих условиях достигается разумный компромисс между гибкостью и производительностью производственных систем. Таким образом, использование ГПС эффективно в тех случаях, когда число различных типов изделий невелико ( $3 \leq n < 30$ ), годовой объем выпуска изделий  $10^3 \leq m < 10^4$ . Самая высокая гибкость ГПС — это и самая высокая стоимость, поэтому ГПС должны быть менее универсальны, но полностью загружены с привлечением по кооперации заказов других предприятий.

Опыт работы ГПС на ряде предприятий показал, что существуют ряд проблем.

1. Невысокая надежность технологического оборудования, приемлемая только для традиционного производства, где у станка стоит один человек, который исправляет ошибку ЧПУ, заменяет вышедший из строя инструмент и т. д. В ГПС малейший сбой ведет к простоям всей системы, поэтому необходимо довести цикл наработки на отказ до десятков тысяч часов.

2. качество инструмента для ГПС, так как 50 % простоев оборудования и 100 % технологического брака вызваны неудовлетворительным состоянием инструмента.

3. Недостаточные функциональные возможности и низкая надежность средств вычислительной техники, рекомендуемой в качестве базовой для нижних уровней управления ГПС — микроЭВМ "Электроника-60". Необходимы более современные и надежные управляющие микроЭВМ.

4. Недостаточное количество устройств сопряжения ЭВМ в локальные вычислительные сети, отсутствие единого программного обеспечения.

5. Разница в уровнях организационно-технологической дисциплины, вызывающая конфликт ГПС с традиционным производством. Нормальное функционирование ГПС предполагает поддержание очень высокой организационно-технологической дисциплины. Сегодня все ГПС создаются в виде участков, которые представляют собой "островки автоматизации" на предприятиях, полную автономию такого участка обеспечить невозможно.

К преимуществам ГПС относятся: резкое увеличение производительности труда в условиях мелкосерийного производства, высвобождение рабочих от малоквалифицированного и монотонного труда; сокращение времени производственного цикла в несколько раз; повышение качества продукции за счет устранения ошибок

и нарушений технологических режимов, неизбежных при ручном труде; снижение объема незавершенного производства.

Под *гибкостью* ГПС понимается ее способность перестраиваться на производство изделий рыночной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. Следовательно, гибкость системы можно однозначно характеризовать суммарным временем переналадки технологического оборудования с учетом номенклатуры изделий. Показатель гибкости ГПС можно выразить произведением трех коэффициентов:

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = K_1 K_2 K_3, \quad (16.2)$$

где  $K_1$  — коэффициент, характеризующий потери времени на переналадку технологического оборудования:  $K_1 = T / (T + T_{\text{пер } i})$ ;  $T$  — планируемый отрезок времени;  $T_{\text{пер } i}$  — общие потери времени, связанные с переналадкой технологического оборудования;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий объем номенклатуры изделий, обрабатываемых в режимах ГПС:  $K_2 = 1 - 1/N$ ;  $N$  — заданный объем номенклатуры изделий;  $K_3$  — коэффициент, характеризующий потенциальные возможности ГПС:  $K_3 = 1 - N / N_n + 1$ ;  $N_n$  — потенциальный объем номенклатуры изделий с учетом возможностей технологического оборудования.

Выражение (16.2) справедливо только для производства с постоянным для всех операций количественным составом номенклатуры объектов, например механообрабатывающего, при этом показатель гибкости изменяется в пределах от 1 до 0.

Для сборочно-монтажных производств характерны четыре основных комплекса операций: подготовка операций к монтажу, которая определяется количеством элементов, типом их корпуса, вариантом формовки; установка и пайка, зависящая от топологии печатных плат; функциональный контроль, определяемый схемотехническими и конструктивными решениями. Для производств такого типа порядок расчета гибкости ГПС следующий:

- технологический процесс разбивается на группы операций, характеризующихся равным количественным и качественным объемом номенклатуры объектов;
- для технологического оборудования, реализующего каждую группу операций, определяется показатель гибкости  $\Gamma_j$ ;
- на основании полученных результатов рассчитывается общий показатель гибкости:

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = \prod_{j=1}^m \Gamma_j,$$

где  $m$  — количество выделенных групп операций.

Таким образом, в общем случае выражение показателя гибкости ГПС принимает вид

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = \prod_{j=1}^m K_{1j} K_{2j} K_{3j}.$$

При  $j = 1$  имеет место случай производств первого типа, при  $j > 1$  — второго.

Вариант планировки участка ГАП сборки ТЭС приведен на рис. 16.22. В данной планировке транспортно-складские операции автоматизированы с помощью автооператора.

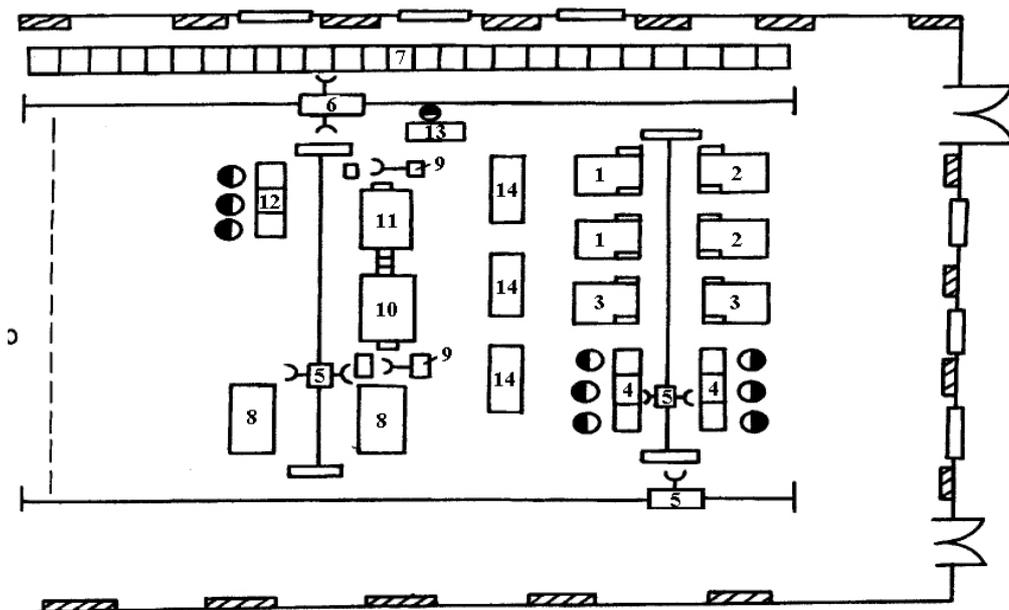


Рис.16.22. Планировка участка сборки ТЭС с элементами ГАП:

- 1 – модуль установки ИМС; 2,3 – модули установки ЭРЭ; 4 – рабочее место установки ЭРЭ;  
 5 – транспортный робот; 6 – автооператор СТАС-50; 7 – автоматический склад;  
 8 – установка сушки; 9 – робот-загрузчик; 10 – установка пайки; 11 – установка отмывки;  
 12 – рабочее место контроля и допайки;  
 13 – рабочее место мастера; 14 – управляющие ЭВМ

#### ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Этапы и стадии автоматизации производства.
2. Критерии автоматизации.
3. Основные тенденции в автоматизации производства.
4. Виды автоматических линий и их основные параметры.
5. Методика проектирования однопредметной непрерывно-поточной линии.
6. Промышленные роботы и их характеристики.
7. ГПС в производстве РЭУ.

## 17. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

### 17.1. ПРИНЦИПЫ И МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ

В течение длительного времени прогресс общественного производства определялся в основном уровнем технологических процессов, энерговооруженностью и технической оснащенностью. В современном производстве наряду с этим все большее значение приобретают вопросы управления.

*Управление* — совокупность действий, выбранных на основе определенной информации и направленных на поддержание или улучшение функционирования технологических систем. Процесс управления предполагает наличие объекта управления, информации о его состоянии и системы управления. В технологических системах оборудование и машины являются объектами управления, а человек — субъектом управления. Функцию управления человек выполняет либо при непосредственном управлении машинами и оборудованием, либо через комплекс технических средств автоматизированного управления.

Структура любого предприятия включает две основные подсистемы: производства и управления.

В подсистеме управления решаются задачи: технико-экономического планирования, управления технологической подготовкой производства, оперативного управления, управления материально-техническим снабжением.

Для разработки автоматизированной системы управления (АСУ) необходимо перевести на машинную обработку информацию: оперативно-календарного планирования (диспетчерских служб, планово-диспетчерского отдела), оперативного учета и контроля качества изделия (отдела технического контроля), анализа и оперативного регулирования производственных процессов (программно-управляемого или микропроцессорного технологического оборудования).

Основной единицей в АСУ предприятием являются цеховые АСУ, при создании которых используют принципы: управляемости по вертикали (АСУ цеха является подсистемой АСУ предприятия); организации горизонтальных связей между цехами (обеспечивают основное и вспомогательное производство и транспортные операции); иерархии АСУ на базе локальных сетей микроЭВМ, мини-ЭВМ, а также микропроцессоров, встроенных в технологическое оборудование.

Наиболее часто перед АСУ стоит задача управления запуском партий изделий и минимизации показателя технологической себестоимости среднестатистической партии изделий:

$$C_{\tau} = \min \left( \sum_{i=1}^n (M_i + Z_i) N_i + \sum_{i=1}^k S_i N_i \right),$$

где  $n$  — количество наименований изделий;  $M_i$  — материалы;  $Z_i$  — заработная плата;  $N_i$  — программа;  $k$  — количество групп однотипного оборудования;  $S_i$  — накладные расходы.

Задача оптимизации решается путем значительного сокращения затрат на заработную плату производственных рабочих и определенного увеличения накладных расходов на эксплуатацию более совершенного технологического оборудования. Алгоритм управления запуском партии (рис. 17.1) включает: определение технического состояния производства, обеспеченности заказа материалами и комплектующими, расчет технологической себестоимости и определение оптимальных значений  $n$  и  $N_i$ .

Для построения управляемых технологических процессов, для которых определены статистические значения выходных параметров, по каждой операции устанавливается взаимосвязь входных и выходных параметров процесса, определяются методы воздействия на параметры процесса. Синтез оптимальных систем управления осуществляется с помощью различных методов. Задача синтеза состоит в обеспечении надежности функционирования и точности достигаемых параметров.

Блочный метод синтеза основан на предположении, что каждая операция представляет собой определенный блок и снижение процента брака достигается снижением дисперсии отдельных блоков. Выходная функция  $Y_i$  зависящая от количества блоков  $m$  и входных параметров  $X_1, X_2, \dots, X_i$ ,

$$\{Y_i\} = \min \sum_{i=1}^m \frac{Y_i}{X_i} \text{ бл } \{X_i\}, Y_i = F(X_1, X_2, \dots, X_i).$$

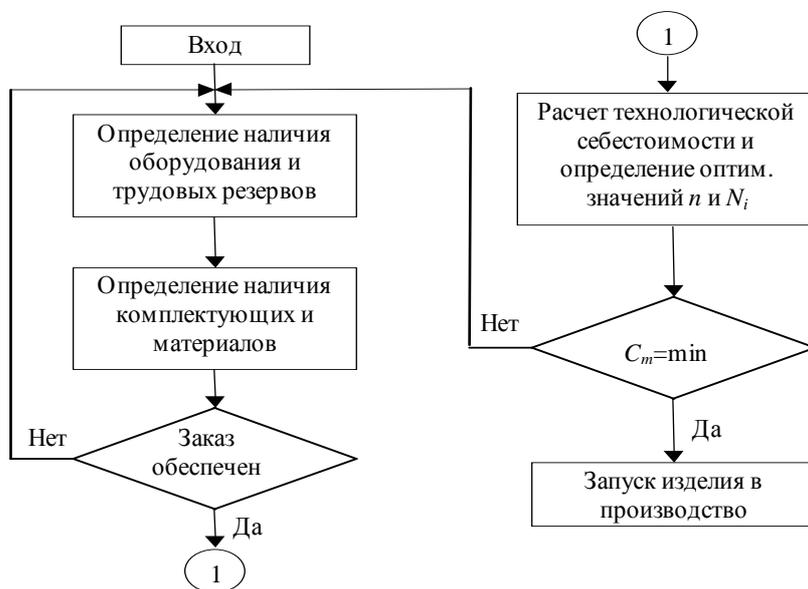


Рис. 17.1. Алгоритм управления запуском партии

Для реализации блочного метода необходимо обеспечить точную настройку технологического оборудования на центр группирования, что является сложным для многих операций. Поэтому в технологическом процессе выделяют критические операции и обеспечивают стабилизацию их параметров. Используются в основном системы с жесткой связью.

В основу комплексного метода положены математическое описание технологического процесса и его оптимизация, включающая методы, указанные в табл. 17.1.

Табл. 17.1. Методы оптимизации технологического процесса

Наименование метода	Применение
Корреляционный анализ	Нахождение взаимосвязи параметров технологического процесса путем определения коэффициента корреляции и построения уравнения регрессии: $\Pi_{\text{вых}} = a_0 + a_1 \Pi_{\text{вх}}; a_1 = r \frac{\sigma(\Pi_{\text{вых}})}{\sigma(\Pi_{\text{вх}})}$
Факторный анализ	Получение математической модели процесса вида $\Pi_{\text{вых}} = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i X_i + \sum_{i=1}^n b_{ij} X_i X_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} X_i^2$
Метод наименьших квадратов	Определение по экспериментальным данным математического значения функции путем минимизации квадратичных отклонений в зависимости от предполагаемого вида функции: $\min(f(X_i) - Y_i) = \sum_{i=1}^n (f(X_i) - Y_i)^2$
Метод наименьших квадратов	Статистическая оценка процесса путем минимизации функции правдоподобия: $\min F(X_1, X_2, X_3) = Y(X_1)Y(X_2)Y(X_3) \dots Y(X_i),$ <p>где <math>Y</math> — плотность распределения</p>

Метод ранжирования	Присвоение конечных оценок качества параметрам изделия по априорно принятому закону
Метод динамического программирования	Поиск оптимальных решений с использованием систем управлений, связывающих выходные и входные параметры процесса или изделия
Метод вариационного исчисления	Определение неизвестных функций, которые обеспечивают экстремальное значение интеграла определенного типа

Корреляционный анализ применяют в серийном производстве ввиду минимальных затрат на его проведение, однако он не оптимизирует процесс при большом числе факторов.

Метод наименьших квадратов легко реализуется для простых зависимостей, для более сложных требуется более сложная обработка данных. Факторный анализ позволяет установить зависимости между большим числом независимых параметров и выходным параметром в виде модулей, которые в дальнейшем можно оптимизировать.

## 17.2. АСУТП И ОСНОВНЫЕ ФУНКЦИИ ПОДСИСТЕМ

Для управления простым технологическим процессом, состоящим из одной или нескольких операций, применяется схема с обратной связью (рис. 17.2, а), которая обеспечивает функционирование процесса  $Y$  при управляемом входе  $X$  с целью получения заданного выхода  $Z$ . Под выходом  $Z$  понимают параметры готового изделия, удовлетворяющие заданным требованиям. Под входом  $X$  подразумеваются материалы, комплектующие, технологическое оборудование, нормативно-техническая документация. Управление качеством продукции осуществляется по контролю выходных параметров и изменению входа в соответствии с данными, поступающими от систем управления, а также в результате обратных связей. Схема используется, если выходные параметры изделия связаны с входными параметрами процесса функциональными или корреляционными зависимостями (в данном случае воздействие на параметры технологических операций не оказывается).

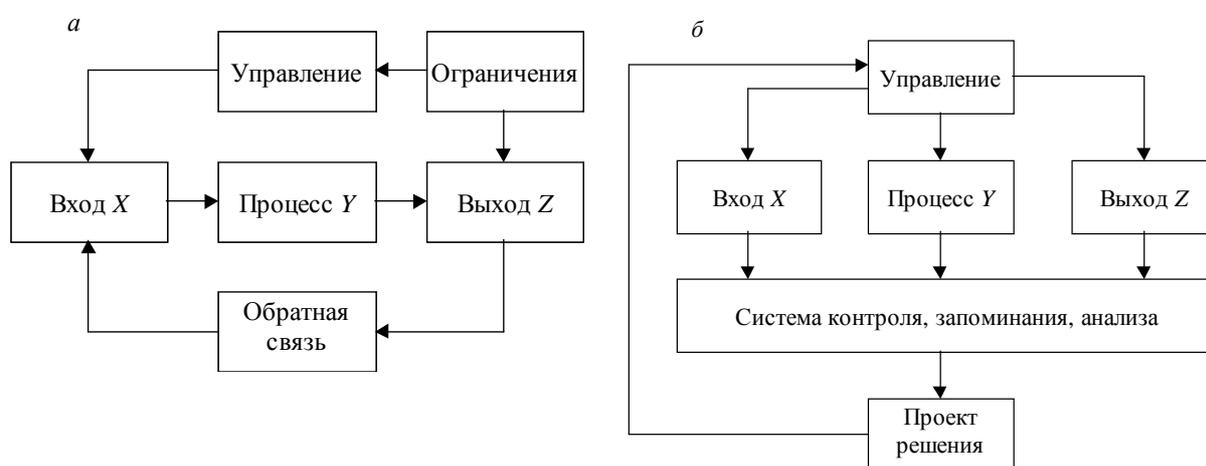


Рис. 17.2. Схемы управления простым (а) и сложным (б) технологическими процессами

Управление сложными процессами зависит от информации, получаемой от каждой операции технологического процесса и обработки этой информации в виде, удобном для принятия решения оператором (рис. 17.2, б). Эта схема позволяет по накопленным статистическим данным наблюдений (или по специально спланированным экспериментам) устанавливать степень влияния входных параметров и характеристик процесса на конечный результат, который используется для создания человек-машинной АСУТП. Такие АСУТП нашли широкое

применение в производстве вследствие простоты эксплуатации и экономичности, но они ограничены по количеству и сложности управляющих операций, так как оператор в силу своих психофизиологических свойств не может обеспечить заданное качество управления.

Примером человеко-машинной системы является АСУТП на базе мини-ЭВМ (рис. 17.3), в состав которой входят ветви сбора информации, передачи управляющих воздействий и связи с оператором. В качестве первичных источников информации могут использоваться как простейшие датчики (термопара), так и цифровые измерительные приборы. Система предназначена для контроля технологических режимов, сортировки изделий в пределах поля допуска и регулировки технологических режимов. Недостатки системы — невысокое быстродействие и уменьшение выхода годных изделий в результате возможных сбоев системы.

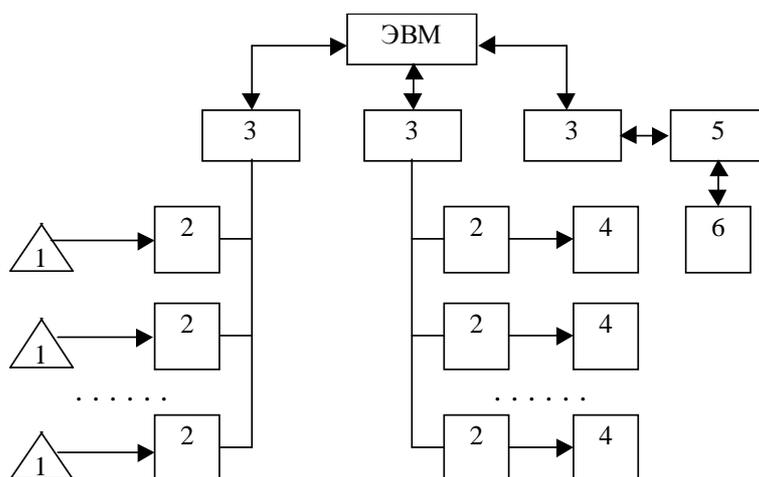


Рис. 17.3. АСУТП на базе мини-ЭВМ:

1 – первичные источники информации; 2 – блоки преобразования АЦП и ЦАП;  
3 – устройство сопряжения с ЭВМ; 4 – электромагнитные и электромеханические исполнительные устройства; 5 – периферийные устройства; 6 – оператор

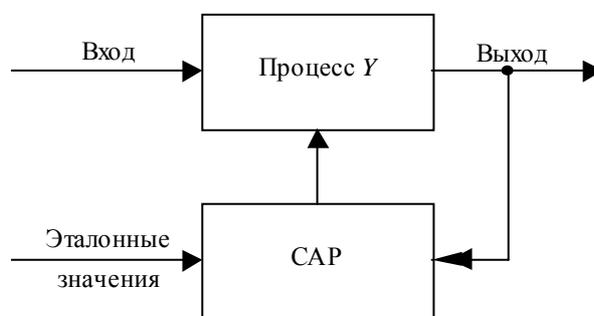


Рис. 17.4. Система управления с жесткой связью

*Автоматические системы управления* подразделяются на системы с жесткой связью, программного и оптимального управления. Основной задачей систем с жесткой связью (рис. 17.4) является стабилизация параметров ТП на заранее установленном уровне с помощью эталонных значений. Эталонные значения вводятся по нескольким каналам и поддерживают режимы технологических операций, выходные параметры изделия в заданных пределах. Недостатками системы являются ограничение выходных функций для числа технологических параметров и технологических операций, а также отсутствие гибкости управления.

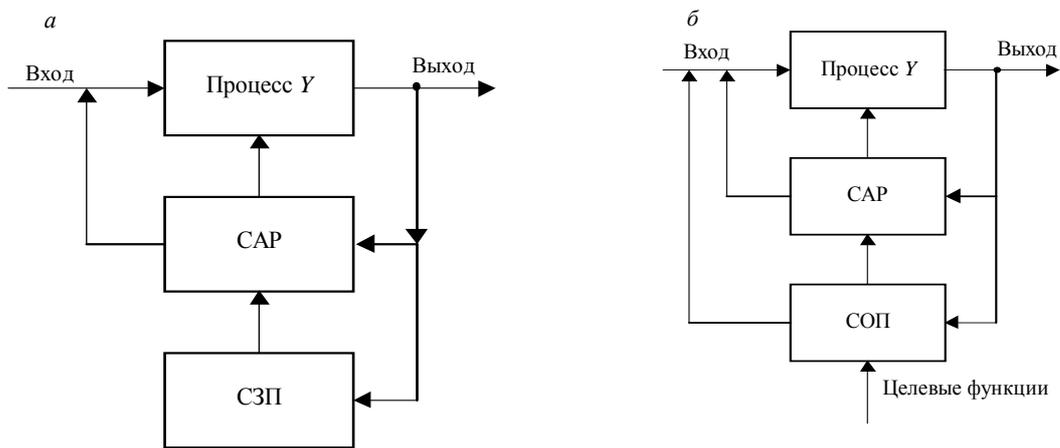


Рис. 17.5. Системы логико-программного (а) и оптимального (б) управления

*Программное управление* (рис. 17.5, а) осуществляется с помощью систем задания программ (СЗП) и позволяет изменять параметры технологических операций в соответствии с изменяющимися условиями производства.

*Системы оптимального управления* (рис. 17.5, б) позволяют обеспечивать наилучшие режимы выполнения операций для заданного качества изделия, что достигается за счет математического описания процесса и оптимизации его по одной или нескольким целевым функциям в системе оптимизации программы (СОП).

### 17.3. ТЕХНИЧЕСКИЕ СРЕДСТВА АСУТП

Для реализации систем управления требуется наличие универсальных технологических датчиков и регуляторов. *Технологический датчик* — это устройство, преобразующее контролируемый технологический (физический) параметр в нормализованный выходной сигнал постоянного тока или напряжения. В зависимости от назначения датчики могут быть одно- или двухуровневыми.

*Одноуровневая структура* датчика применяется в случае использования информации о технологическом процессе в непосредственной близости от технологического оборудования (например, в локальной автоматике) и строится в зависимости от назначения по одной из схем, приведенных на рис. 17.6. В качестве вторичных преобразователей могут использоваться датчики емкостного и индуктивного типов, фотоприемники, кондуктомеры и др.

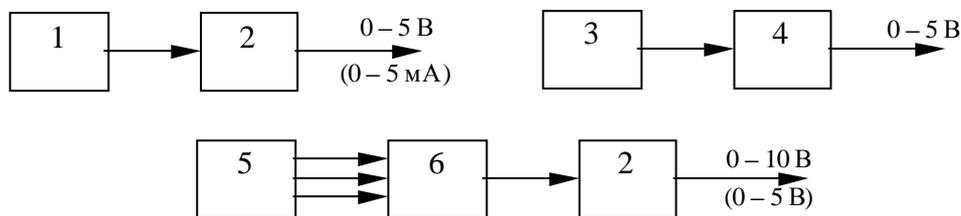


Рис. 17.6. Схемы одноуровневых технологических датчиков:

1 – активный чувствительный элемент; 2 – входной усилитель-нормализатор; 3 – пассивный чувствительный элемент; 4 – вторичный преобразователь; 5 – термодатчик; 6 – преобразователь термозависимое сопротивление – напряжение

*Двухуровневые датчики* применяют в тех случаях, когда информационный сигнал о состоянии технологиче-

ского процесса необходимо передать на значительное расстояние (например, в помещение, где установлена ЭВМ) от технологического оборудования в условиях промышленных электропомех. Выходной сигнал от одноуровневого датчика 1 преобразуется в частотный сигнал модулем ПНЧ 2 и передается по длинной линии на вход модуля ПЧН 3, где происходит гальваническое разделение входных и выходных цепей, демодуляция и усиление сигнала до нормализованного значения 0—5 В (рис. 17.7).

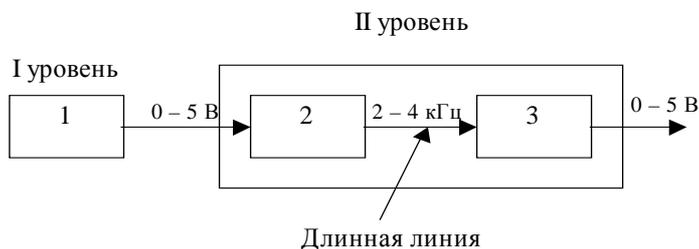


Рис. 17.7. Схема двухуровневого технологического датчика

Для создания микропроцессорных АСУТП необходимы специальные технические средства управления — микропроцессорные комплексы (МПК). Микропроцессор — программно-управляемое устройство, осуществляющее прием, обработку и выдачу цифровой информации. В состав МПК входят: базовый процессор, БИС памяти (ПЗУ), БИС устройства ввода-вывода, системный контроллер, генератор тактов. Минимальное количество МПК образует простейший модуль — микроконтроллер (рис. 17.8), состоящий из дешифратора состояний (ДшС), формирователя команд сигналов (ФКС), устройства управления (УУ), формирователя управляемых сигналов (ФУС).

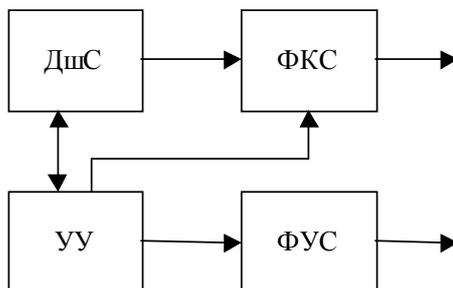


Рис. 17.8. Схема микроконтроллера

Благодаря высокой автономности, малым габаритам и небольшой потребляемой мощности микроконтроллеры встраиваются прямо в технологическое оборудование. МПК классифицируют:

- по числу БИС — на однокристалльные, многокристалльные, секционные;
- по назначению — на специализированные (один тип оборудования) и универсальные;
- по разрядности формата чисел на 2, 4, 8, 12, 16, 32 и 64-разрядные;
- по набору команд: 50—120;
- по времени цикла выполнения команды — 2—10 мс (МОП-технология) и 50—200 нс (би-полярная технология).

Хронологически, а также с учетом повышения разрядности и функциональных возможностей микропроцессорных БИС можно выделить несколько семейств фирмы Intel: 8086/88 (аналоги в СНГ — К1810 и К580— 8 разрядов), 80186, 80286, 80386. Комплект ИМС семейства 80386 обеспечивает расширение разрядности обрабатываемых данных до 32 разрядов при сохранении аппаратной и программной совместимости с предыдущими 16-разрядными семействами. Повышенное быстродействие МП 80386 позволило им в начале 90-х гг. занять ли-

дирующее положение. В семействе МП 80486 сохранен подход аппаратно-программной совместимости, включена КЭШ-память, реализована обработка данных с плавающей точкой. Микропроцессор Pentium (P5) Intel имеет 64-разрядную внешнюю шину данных, отдельные КЭШ-памяти команд. Процессор Intel Core 2 Duo также имеет 64 разрядную шину, однако 2 ядра и КЭШ-память 2x2 Мбайта.

Для создания АСУТП необходима компоновка МПК в единую локальную сеть управления. Такая сеть включает блоки сбора данных и центральный микропроцессорный модуль, имеющий устройство внешней памяти. Блок сбора данных состоит из мультиплексора, микропроцессорного модуля, интерфейса, АЦП и буфера (рис. 17.9). Аналоговый мультиплексор позволяет по программе опрашивать первичные преобразователи и вводить информацию через АЦП в микропроцессорный модуль.

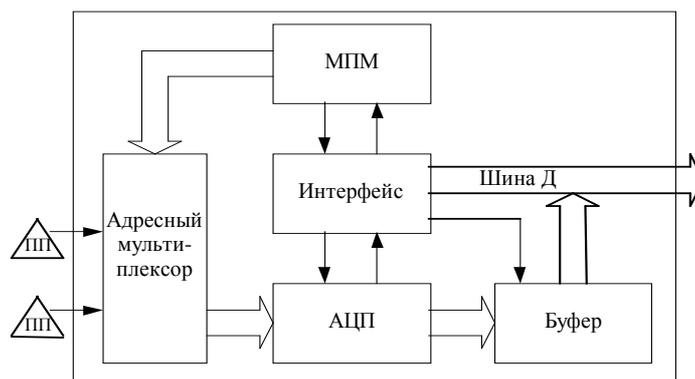


Рис. 17.9. Аналоговый мультиплексор

Назначение основного блока — представление информации в запрограммированной последовательности в локальную сеть управления, которая строится по трем схемам: кольцевая, "звездная" и комбинированная. Кольцевая схема (рис. 17.10, а) использует устройство связи, которое управляет работой отдельных блоков сбора данных и формирует информацию для центрального микропроцессорного модуля. Ее достоинства — минимальная длина связи между БСД и центральным МПК, а недостатки — малое быстродействие, сложность обмена информацией между отдельным блоком сбора данных и центральным МПК.

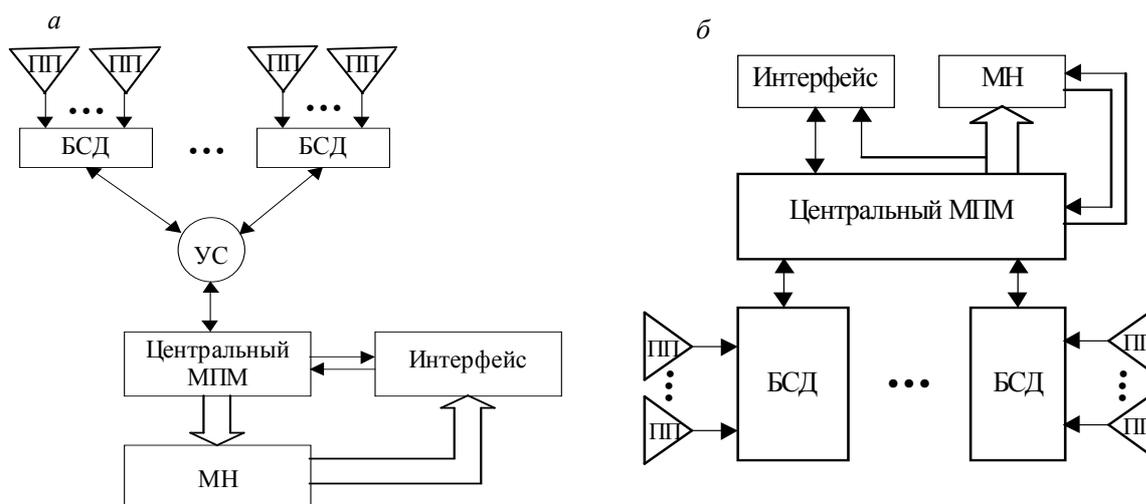


Рис. 17.10. Кольцевая (а) и "звездная" (б) схемы построения микропроцессорных АСУТП

"Звездная" схема (рис. 17.10, б) устраняет недостатки кольцевой схемы, при этом каждый БСД замыкается непосредственно на центральный МПК. На практике часто используют комбинированные схемы, когда для

оборудования, требующего быстрой реакции, используют "звездную" схему, а для медленно работающего оборудования — кольцевую. При построении сетей необходимо учитывать проблемы, связанные с организацией передачи данных на более протяженное расстояние и помехозащищенностью каналов.

Вычислительные сети древовидной или звездообразной конфигурации характерны в большей степени для верхних уровней ГАП, имеющих следующие количественные характеристики: объем данных  $10^6$ — $10^{10}$  бит/с, длина сети 1—5 км, скорость передачи данных 10 Мбит/с.

Однако для типичных уровней ГАП применение традиционной вычислительной техники экономически не оправдано, поскольку эти уровни имеют следующие характеристики: большое число элементов управления, распределенных по группам и размещенных на расстоянии 20—200 м, интенсивность объема  $10^2$ — $10^3$  бит/с, время выработки управляющего воздействия 10—1000 мс. Поэтому для нижних уровней ГАП применяют локальные вычислительные сети, в которых реализуются принципы комплексирования и коллективного использования микро- и мини-ЭВМ. Главные преимущества таких локальных вычислительных сетей — высокая производительность обработки данных, мобильность и расширяемость, высокая надежность и живучесть, низкая стоимость.

Основными компонентами локальных вычислительных сетей являются физическая среда передачи данных, топология сетей и метод доступа к физической среде.

В современных локальных вычислительных сетях широко применяются следующие типы физической среды передачи данных (табл. 17.2): витая пара проводов, коаксиальный кабель с дискретной сигнализацией, коаксиальный кабель с аналоговой сигнализацией, оптоволоконный кабель.

Основные недостатки витой пары — низкая скорость передачи данных (до 1 Мбит/с) и узкая полоса пропускания, которые ограничивают применение телефонных абонентских каналов для связи персональных ЭВМ с печатающими устройствами, накопителями на магнитных дисках.

Табл. 17.2. Характеристики физических сред передачи данных

Тип физической среды передачи, скорость передачи	Полоса пропускания	Число терминалов	Протяженность без повторителя	Трудоемкость прокладки	Помехозащищенность	Стоимость
Витая пара, до 1 кБит/с	Узкая, до 3 кГц	Малое	Малая	Средняя	Низкая	Низкая
Коаксиальный кабель с дискретной сигнализацией, до 10 кБит/с	Средняя	Среднее	Средняя до 2 км с повторителями до 10 км	Малая	Высокая	Средняя
Коаксиальный кабель с аналоговой сигнализацией	Широкая, 0—400 МГц	Большое	Большая, с повторителем до 50 км	Средняя	Высокая	Высокая
Оптоволоконный кабель, до 150 кБит/с	Очень широкая	Малое	Очень большая	То же	Очень высокая	Очень высокая

Для управления небольшим количеством оборудования используют микровычислительные системы СМ 50/10, в которые входят: терминал на базе микровычислительного комплекса, два периферийных устройства (дисплей, печатающее устройство).

Терминал с объемом памяти до 64 кБ осуществляет обработку сигналов, которые поступают от первичных преобразователей, установленных на оборудовании (рис. 17.11, а).

Для управления технологическим оборудованием в пределах участка на базе терминалов и персональных ЭВМ создается локальная сеть управления. Концентратор СМ 50/10 выполняет функции устройства согласования для кольцевой схемы управления (рис. 17.11, б).

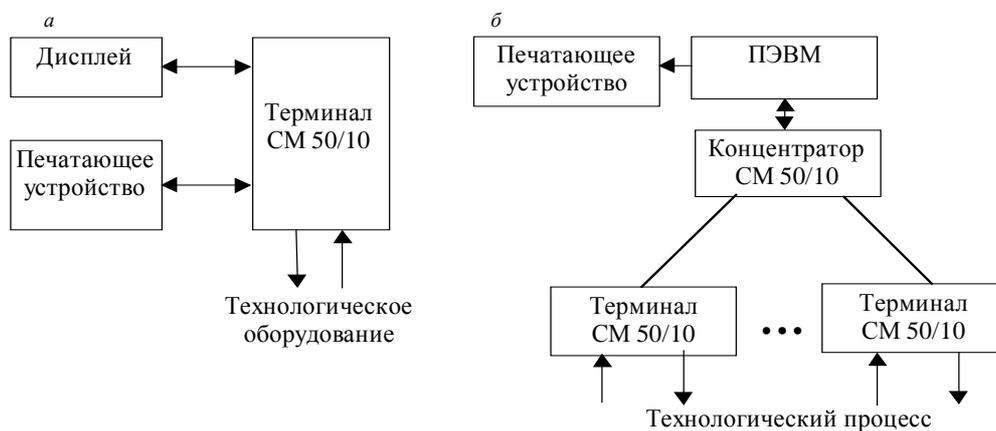


Рис. 17.11. Конфигурации схем управления

Для участка ГАП строится локальная сеть управления на базе мини-ЭВМ (рис. 17.12).

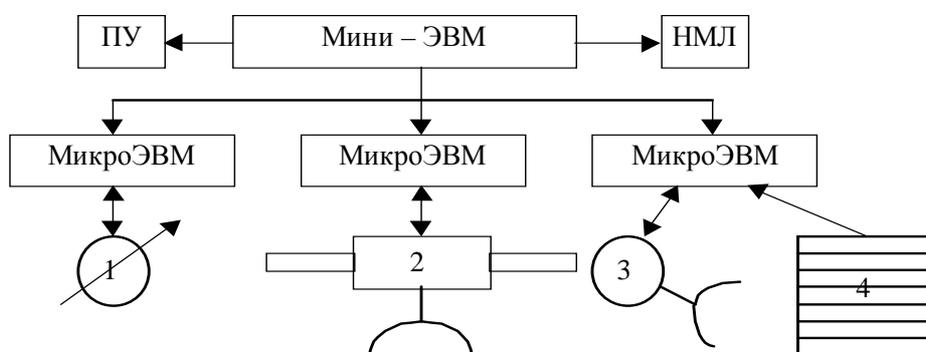


Рис. 17.12. Локальная сеть управления ГАП:

1 – автоматический тестер; 2 – транспортный робот; 3 – робот-загрузчик;  
4 – автоматический склад

В качестве микроЭВМ нижнего уровня используются "Электроника-60", "Электроника НЦ-80" с максимальным объемом памяти 64 кБ, на верхнем уровне — микроЭВМ СМ 1810 с памятью до 100 МБ. МикроЭВМ применяют для управления технологическим процессом на отдельном технологическом оборудовании, например для контактной точечной микросварки деталей (рис.17.13). Для реализации высокой механической прочности необходимо контролировать и управлять следующими параметрами: силой тока сварки, проходящего через электроды; напряжением между электродами; усилием сжатия электродов; толщиной свариваемых деталей. В качестве управляющей микроЭВМ используется "Электроника-60". Для получения первичной информации о параметрах сварки на сварочной машине размещены датчики и усилители сигналов. Для преобразования аналоговой информации в цифровую и обратно используются блоки АЦП и ЦАП. Связь оператора с системой управления осуществляется с помощью терминалов и печатающих устройств, а загрузка данных о технологическом процессе — с ГМД. Данная система позволяет с частотой 50 кГц считывать с датчиков информацию, производить преобразование данных, строить графические зависимости  $P_{св}$  и  $Q_{св}$  от параметров сварки и толщины деталей  $h$ . Это автоматизирует процесс контроля параметров и поддерживает их оптимальные значения.

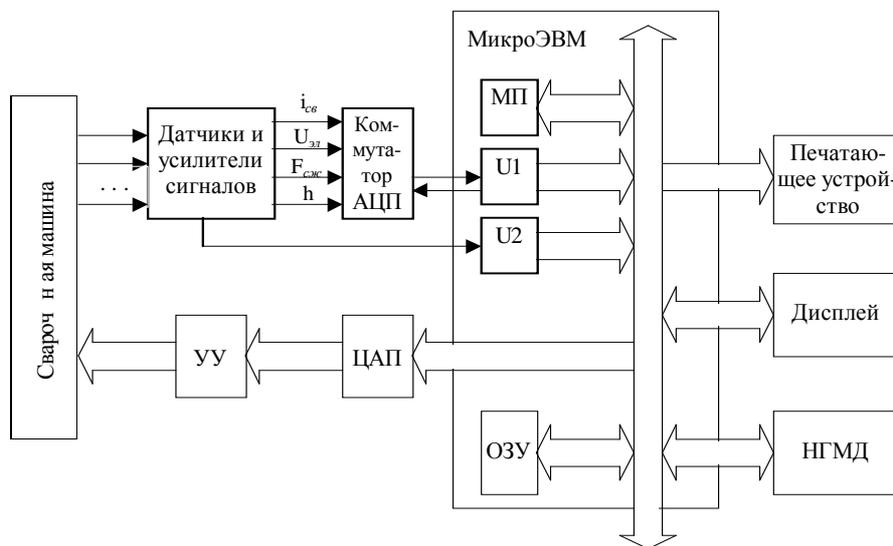


Рис. 17.13. Схема управления ТП контактной точечной микросварки с помощью микроЭВМ

В условиях ГАП к микропроцессорным системам предъявляются следующие требования:

- увеличение оперативного объема информации;
- быстрая смена управляющих программ;
- надежность и долговечность блоков управления, а также низкая их себестоимость.

Этим требованиям удовлетворяют программируемые микропроцессоры — контроллеры, которые подразделяются на три группы:

1) контроллеры с малым объемом памяти и ограниченным числом каналов (до 64), где ввод осуществляется с клавиатуры (МК-1);

2) универсальные контроллеры (рис. 17.14), имеющие несколько микропроцессоров, значительный объем памяти и до 256 каналов ввода; программа вводится с отдельной микроЭВМ с помощью машинных носителей ГМД;

3) устройства, использующие универсальные языки программирования и обладающие способностью вести диагностирование.

Необходимость использования двух микропроцессорных модулей вызвана технологическими особенностями управляемого оборудования. Для управления технологическими процессами, требующими быстрой реакции, используется скоростной МП. Медленный МП позволяет применять кольцевые схемы сопряжения для управления оборудованием с длительным технологическим циклом.

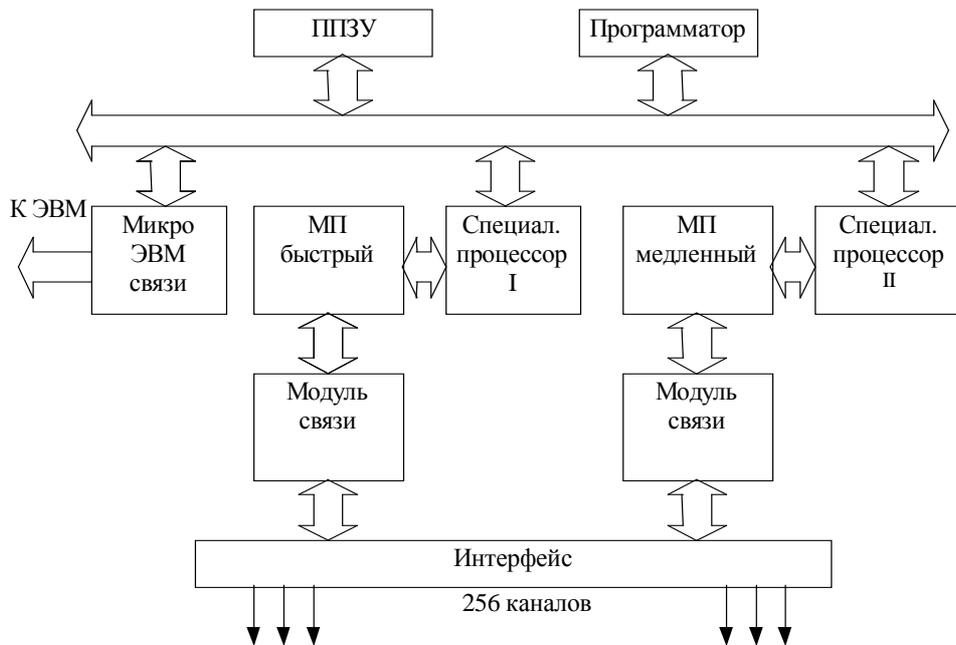


Рис. 17.14. Схема универсального контроллера

#### 17.4. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТП

Технологическая подготовка производства (ТПП) — это сложный комплекс организационно-технологических мероприятий и инженерных работ, направленных на подготовку предприятия к выпуску новых видов изделий. ТПП осуществляется в соответствии с государственными стандартами ЕСТПП, предусматривающими широкое применение прогрессивных типовых ТП, средств механизации и автоматизации производственных процессов, инженерно-технических и управленческих работ. Основные задачи ТПП:

- обработка конструкции изделия на технологичность (ведущие технологи ОГТ);
- организация и управление ТПП (плановая группа ОГТ);
- стандартизация и разработка ТП (технологические бюро ОГТ);
- технологическое оснащение производства (КБ и ТБ ОГТ совместно с ОМА СКТБ);
- разработка норм (группа нормирования).

Функциональная схема системы ТПП приведена на рис. 17.15. К входной информации  $X$  относятся конструкторская, планово-экономическая документация, директивные сроки освоения изделий, к выходной  $Y$  — сведения о качестве и технических характеристиках изделий, потребность в технологических оборудовании и оснастке, трудоемкость, себестоимость изделия и другие планово-экономические данные.

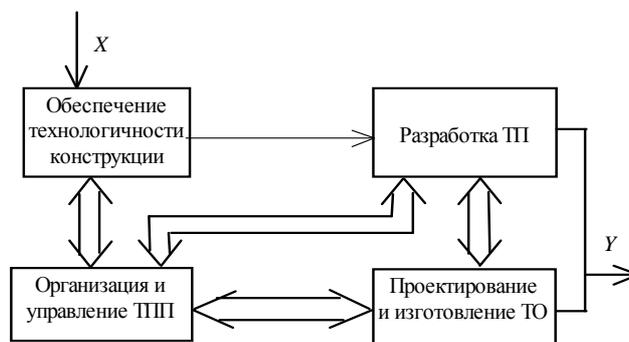


Рис. 17.15. Функциональная схема системы ТПП

ТПП современных сложных изделий требует больших затрат времени и труда, что сдерживает освоение новых образцов. Создание автоматизированных систем ТПП (АСТПП) позволяет без увеличения численности технологов сократить сроки и стоимость ТПП, а также улучшить качество проектируемых ТП. Кроме того, АСТПП является частью автоматизированной системы управления производством (АСУП), и к ее разработке применяют системные методы.

АСТПП — это человеко-машинная система ТПП, созданная на базе специально спроектированного и освоенного комплекса экономико-математических методов, программных пакетов, электронно-вычислительной и организационной техники. В структуре АСТПП можно выделить системы общего и специального назначения (рис. 17.16). Система управления и планирования является координирующей для всех систем, через нее осуществляется связь с АСУП. Информационно-поисковая система предназначена для обслуживания технологического банка данных во всех системах. Система обработки конструкции изделия на технологичность (Т) решает задачи контроля чертежей изделий на технологичность, унификацию и стандартизацию объектов производства и технологической оснастки. В системе проектирования (П) осуществляется проектирование единичных и унифицированных (типовых и групповых) ТП. В системе технологического конструирования (К) проектируются нестандартные технологическое оборудование, приспособления и оснастка.

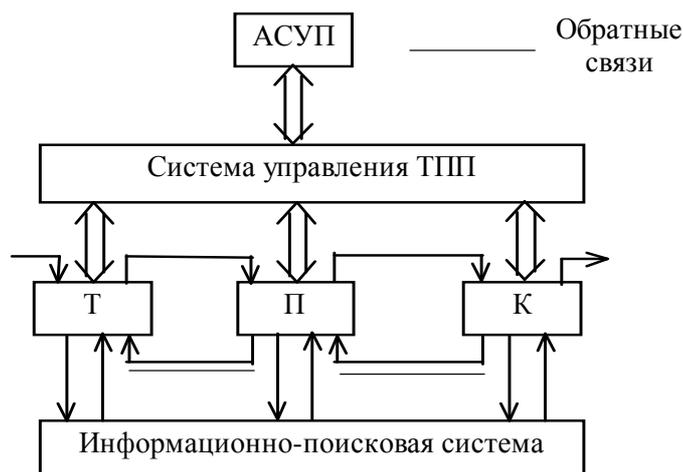


Рис. 17.16. Схемы функциональных связей между системами АСТПП

Организационная структура АСТПП представлена на рис 17.17. Во всех отделах имеются группы подготовки данных (ГПД), в вычислительном центре — группы приема и выдачи документов (ГПВ), обработки данных (ГОД), разработки программ (ГРП).

При автоматизированном проектировании ТП сборки и монтажа должны быть заданы:

- 1) конструкторская документация в виде сборочного чертежа изделия, система конструкторско-технологических кодов изделия;
- 2) комплект математических моделей, позволяющих получить формализованное описание конструкции изделия как объекта сборки;
- 3) допустимые варианты единиц АСТО, роботов-манипуляторов, технологической оснастки, инструмента;
- 4) плановые задания на объем и сроки выпуска изделия.

В результате проектирования сборочно-монтажных технологических процессов получают следующие выходные данные:

- состав маршрутной и операционной технологии;
- программы траекторий движения рабочих органов АСТО и роботов-манипуляторов;
- схемы базирования и крепления элементов конструкции на каждой операции;
- состав типового АСТО, роботов-манипуляторов, оснастки, инструмента;
- нормативно-технические показатели выполнения отдельных операций.

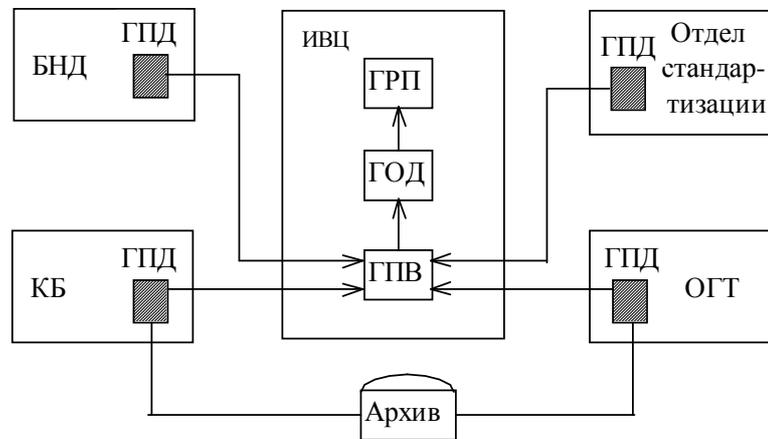


Рис. 17.17. Организационная структура АСПП

Для формализованного описания структуры изделия разбирают на множество элементов конструкции  $A_i(k)$ , где  $i$  — порядковый номер подкласса в классификаторе,  $i=1, \dots, n$ ;  $k$  — порядковый номер элемента конструкции в  $i$ -м подклассе,  $k=1, m$ , и множество пространственных связей между ними  $S_i(k)$  — вид связей элементов (рис. 17.18).

Формализованное описание сопряжения выполняют в виде графа, вершинами которого являются компоненты, а дугами (ребрами) — поверхности связей элементов конструкций. Описание структуры модуля вида  $A_i(i=1, p)$  смешанным графом и матрицей соответствия вершин графа (рис. 17.19) является базой для разработки микромаршрутов технологических операций и переходов, траектории движения роботов-манипуляторов.

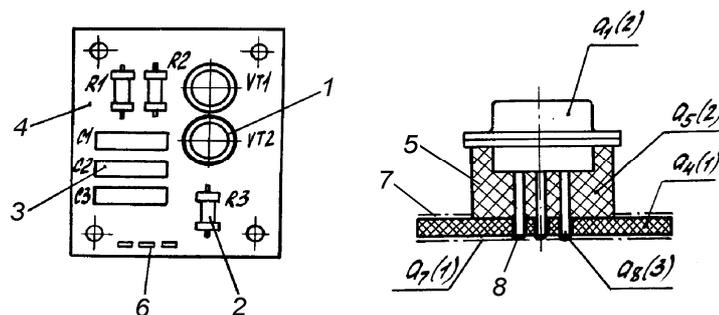


Рис. 17.18. Конструкция элементарного модуля :

1 — транзистор; 2 — резистор; 3 — конденсатор; 4 — плата; 5 — втулка; 6 — контакт; 7 — покрытие; 8 — пайка

Технологическое проектирование в АСПП процессов сборки и монтажа изделий ЭА осуществляется в соответствии с функциональной схемой, состоящей из программных модулей ПМ1—ПМ10 (рис 17.20). Программный модуль ПМ1 осуществляет контроль, первичную обработку, кодирование входящей в систему информации и представление ее в приемлемой для ЭВМ буквенно-цифровой форме. Технологические модули ПМ2—ПМ10 проектируют процессы сборки и монтажа (как единичные, так и типовые). Модули ПМ3—ПМ4 — микромаршруты изготовления  $i$ -го изделия ( $i=1, n$ ). Модуль ПМ5 осуществляет выбор стандартных АСТО и

роботов-манипуляторов, ПМ6 — станочных приспособлений и оснастки, ПМ7 — вспомогательных и измерительных инструментов. Если требуются специальная оснастка или инструмент, то формируются заказы подсистемам проектирования специальной технологической оснастки и инструмента. Программный модуль ПМ8 служит для определения режимов и параметров сборочно-монтажных операций, ПМ9 — для нормирования технологических операций, ПМ10 формирует программы для функционирования АСТО и роботов-манипуляторов.

Информационное обеспечение АСТПП включает информационную базу и системы кодирования объектов производства. Носителями информации являются техническая документация, магнитные и оптические диски.

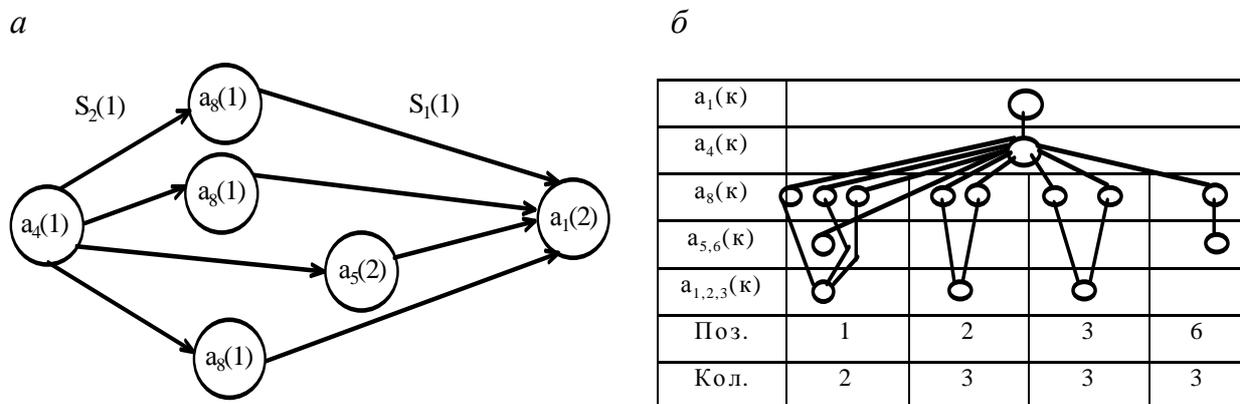


Рис. 17.19. Граф сопряжений в транзисторе (*а*) и электронном модуле (*б*)

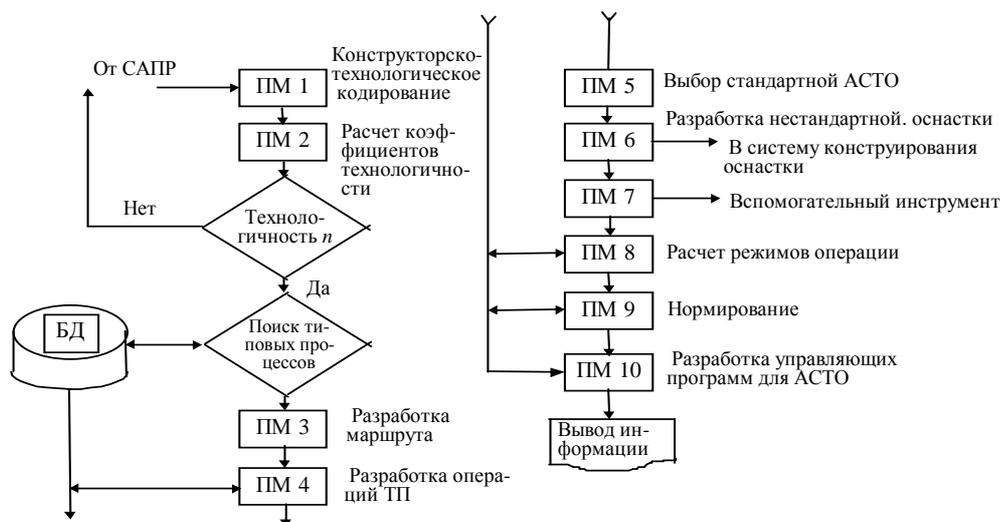


Рис. 17.20. Функциональная схема технологического проектирования в АСТПП

Математическое обеспечение системы делится на общее и специальное. Общее математическое обеспечение составляют языки программирования (Ассемблер, Фортран, Кобол, PL/I) и программы общего назначения. К специальному математическому обеспечению относятся программы-трансляторы для перевода с внешних описаний объекта на внутренние, управляющие программы отдельных подсистем и решения конкретных технологических задач.

## 17.5. АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС

С развитием ЭВМ наметился переход от автоматизации отдельных производственных операций к комплексной автоматизации всего производственного цикла — от проектирования, изготовления до контроля качества готовых изделий. Только такая автоматизация на основе внедрения ЭВМ во все сферы производства может дать существенный экономический и социальный эффект.

Основные подразделения современного неавтоматизированного предприятия (цехи, отделы) функционально подчинены администрации предприятия. Отличительная особенность такого предприятия — механизация непосредственно на производстве (в цехе), в остальных подразделениях преобладает ручной труд. Информационное обеспечение таких предприятий включает "бумажную" технологию обработки информации, использующую ручные методы подготовки, обработки, передачи, хранения и поиска информации (рис. 17.21).

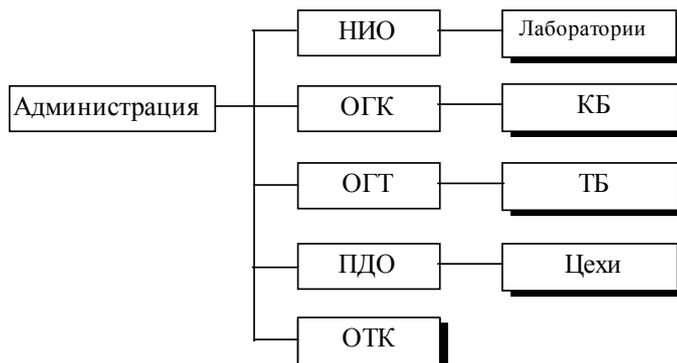


Рис. 17.21. Обобщенная структурная схема неавтоматизированного предприятия

Внедрение вычислительной техники приводит к появлению автоматизированных систем: в научно-исследовательских отделах — АСНИ, в КБ — САПР, в ОГТ — АСТПП, в цехах — СУГАП, в ОТК — система автоматизированного контроля (САК). Управляет работой всех подразделений автоматизированная система управления предприятием (АСУП) (рис. 17.22).

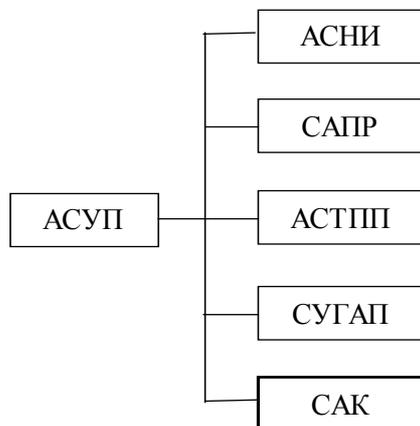


Рис. 17.22. Схема АСУП

Произошли изменения в технологии обработки информации. Обработка, хранение и поиск информации осуществляются автоматизированно с использованием локальных БД в каждом подразделении. Однако информация из одного подразделения в другое передается как в бумажном виде, так и на машинных носителях. В целом частичная автоматизация не изменяет структуру предприятия, функции его подразделений остаются прежними.

Дальнейшая автоматизация предприятий должна привести к качественному скачку — появлению производств нового типа — интегрированных производственных комплексов (ИПК). Каким путем осуществляется интеграция? Во-первых, путем объединения вычислительных машин предприятия в информационно-вычислительную сеть. В результате информация из любого подразделения может быть оперативно отправлена в любую службу производственного комплекса (рис. 17.23). Во-вторых, централизацией управления путем унификации и стандартизации структур данных и системы протоколов связи между локальными БД. В-третьих, использованием на рабочих местах персональных ЭВМ, что позволяет осуществлять обработку информации на месте, т. е. децентрализованно.

Таким образом, ИПК на основе ЭВМ автоматизируют научные исследования, проектно-конструкторские работы, технологическая подготовка производства, управление работой технологического оборудования, контроль и управление качеством продукции, а также управление всеми подразделениями предприятия. Структурная схема управления ИПК проведена на рис. 17.24.

В основе схемы управления лежит модульный принцип, что обеспечивает поэтапный ввод системы на предприятии, начиная с АСНИ, САПР, АСТПП. Основная задача заключается в интегрированной обработке больших объемов данных со значительным числом объектов управления в нестационарных условиях поступления внешних заданий.

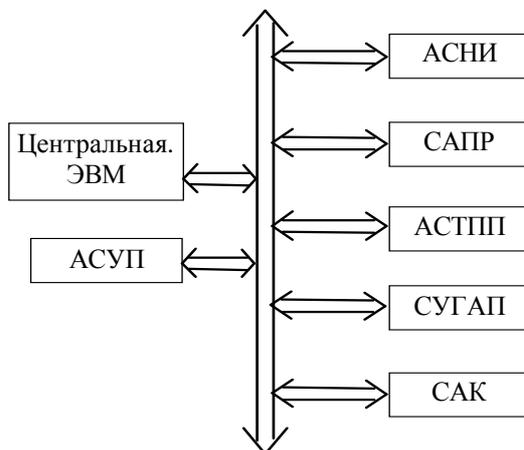


Рис. 17.23. Схема информационно-вычислительной сети

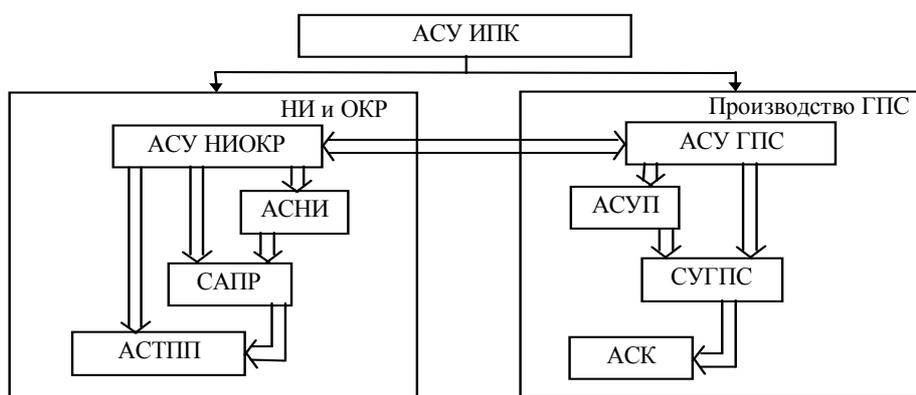


Рис. 17.24. Структурная схема управления ИПК

Реализация автоматизации производства на уровне ГПС невозможна без одновременного хранения и оперативного анализа больших объемов разнообразной информации. Поэтому базы данных размещают как территориально по службам и отделам предприятия, так и по различным механическим средствам управления.

Предметная область (рис. 17.25) представляет собой совокупность технических средств производства (ТСП), снабженных устройствами автоматической регистрации и контроля (АРиК), а также встроенными устройствами реализации управляющих воздействий (РУВ) — микропроцессорами и соответствующими исполнительными механизмами. Все АРиК периодически опрашиваются алгоритмами регистрации (АР) соответствующей ЭВМ первого локального уровня управления. Результаты опроса оперативно помещаются в локальные БД, что обеспечивает актуальность их информационного содержания в любой момент времени.

Текущее состояние локальной БД образует основу для функционирования алгоритма управления (АУ), который вырабатывает управляющие воздействия. Локальные АУ в свою очередь являются результатом функционирования АУ более старших уровней управления. Управляющие воздействия в контуре управления ГПС вырабатываются посредством специальных алгоритмов принятия решений на основе комплексного анализа информационных моделей технологического процесса (ИМТП) и состояния производства (ИМСП) с учетом нормативной базы данных (НБД) в системе АСТПП.

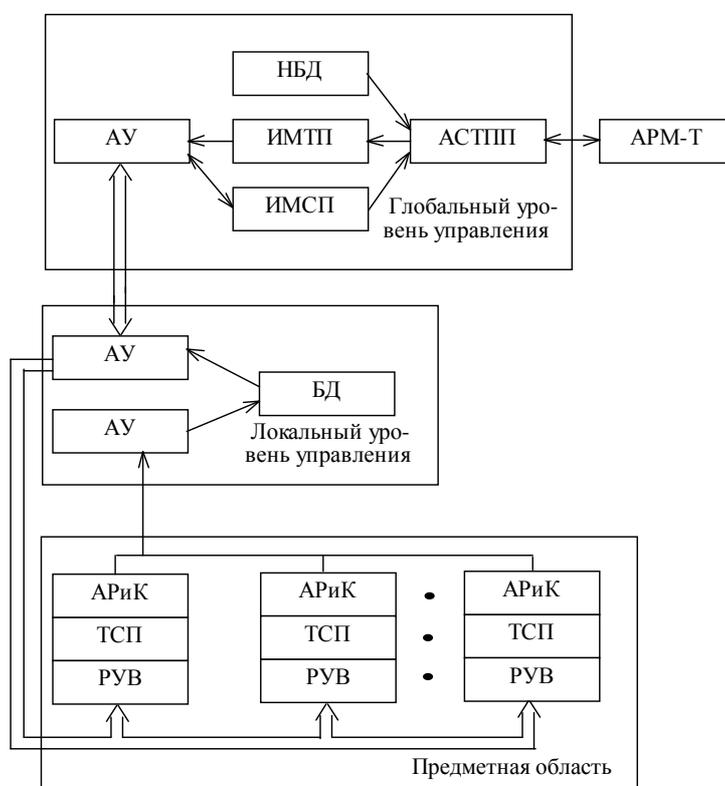


Рис. 17.25. Архитектура информационного обеспечения АТК

## 17.6. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Для автоматизированного проектирования технологической оснастки эффективно применение системы TECHCARD как в технологических подразделениях и технических отделах крупных предприятий, так и в небольших организациях, производящих технологическую подготовку производства с применением автономных персональных компьютеров и локальных сетей.

Относительная простота, доступность и гибкость системы в сочетании с мощным интерфейсом позволяют удовлетворять самые разнообразные требования пользователей:

- создание новых и редактирование имеющихся форм бланков ТД;

- включение в состав одного бланка текста и графических изображений;
- ввод в технологическую карту данных с клавиатуры или из базы данных;
- управление оформлением и выводом на печать документов;
- сопровождение базы данных для различных видов производств с возможностью графической иллюстрации классификаторов, справочников и т. п.;
- создание и сопровождение технологических таблиц и формул для их последующего использования при проектировании ТП;
- создание графических библиотек типовых элементов, стандартных нормализованных деталей с обеспечением редактирования любых текстов полей из базы данных;
- проектирование ТП обработки деталей в диалоговом режиме с использованием базы данных и таблиц;
- оперативная настройка вида и состава комплекта ТД для различных видов производств;
- взаимосвязь с системой ведения архива конструкторской документации SEARCH для организации и ведения архива технологических документов;
- взаимосвязь с системой разработки конструкторской документации CADMECH для проектирования и оформления операционных эскизов и карт наладок.

Изучение и освоение системы TECHCARD позволит будущим специалистам повысить общий уровень подготовки и быстрее включиться в рабочий процесс на предприятии, куда они пойдут работать после окончания университета.

Помимо типовых технологических процессов можно использовать типовые фрагменты, представляющие собой наборы операций и переходов с оснасткой (например, для обработки типового фрагмента операция "Сверлильная" с переходами: центрировать отверстие, сверлить отверстие под резьбу, зенковать фаску, нарезать резьбу).

В системе TECHCARD можно как самостоятельно создавать новые типовые ТП и фрагменты, так и использовать базовые, поставляемые в составе системы. Типовые процессы и фрагменты создаются точно так же, как и обычные ТП (с помощью ПРОЕКТ-ТП), но для типовых процессов не требуется вводить конкретные размеры в тексты переходов.

Для регистрации в каталоге типовых фрагментов следует выполнить команду "Проектирование / Типовые фрагменты", создать новую папку в каталоге типовых фрагментов по команде всплывающего меню "Создать" и, сделав новую папку текущей, дать команду "Свойства" из всплывающего меню дерева каталога.

После указания команды "Свойства" необходимо в появившемся диалоге назначить на странице "Рисунок" тот рисунок, который будет показываться при выборе типовых фрагментов, и указать на странице "Типовой" файлы ТП и, возможно, рабочего чертежа, которые требуется занести в библиотеку типовых фрагментов.

Типовой ТП должен быть сохранен в SEARCH, при этом ему необходимо присвоить обозначение документа, по которому система TECHCARD будет выбирать данный процесс из архива.

Команда "Файл / Открыть типовой фрагмент" позволяет открыть окно выбора типового фрагмента детали. Для выбора типового фрагмента необходимо выбрать соответствующую папку на дереве и нажать кнопку "Да". После выбора типового фрагмента его содержимое будет загружено в отдельный редактор ТП, откуда требуемые папки операций и переходов можно копировать в другие окна редакторов. Копирование может выполняться как с помощью команд копирования в буфер, так и "перетаскиванием" мышью с удерживаемой клавишей Ctrl. Типовой фрагмент может быть изменен и сохранен так же, как и обычный ТП.

Работа с типовыми ТП организовывается следующим образом. На этапе настройки базы данных в сценарий общих сведений заносится строка, связанная с фиксированным аргументом системы с именем "Номер типового

технологического процесса" (код "КТП"). На этапе проектирования после создания нового процесса заполняются общие сведения о детали. При заполнении поля общих сведений, связанного с аргументом "КТП" (значение может быть как занесено вручную, так и получено с помощью экспертной системы), система пытается найти в архиве SEARCH документ с обозначением, которое совпадает со значением, попавшим в упомянутое поле. Если документ-процесс будет найден, то он будет загружен в то окно редактора, где редактируется новый процесс. Далее выполняются следующие действия:

- создание расцеховочного маршрута по нескольким вариантам;
- выбор сортамента, цеха, участка;
- вызов диалога расчета заготовки и ее расчет по настраиваемым сценариям;
- формирование маршрута обработки с использованием классификатора операций и переходов (рис. 17.26);
- назначение оборудования по операциям и оснастки по переходам;
- редактирование текста переходов;
- расчет режимов обработки в соответствии с техническими данными оборудования;
- расчет норм времени на операции;
- проектирование операций с эскизами (рис. 17.27) с использованием системы CADVTCH-T и определение состава документов, которые требуется получить пользователю;
- получение комплекта ТД, сохранение в архиве и выведение на печать.

Редактирование типового процесса выполняется в Проект-ТП после отправки на редактирование соответствующего документа из SEARCH.

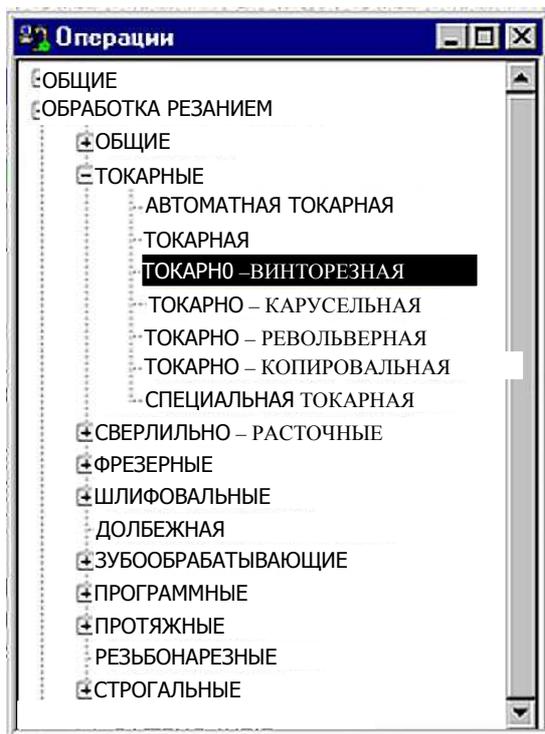


Рис. 17.26. Окно диалога проектирования техпроцесса

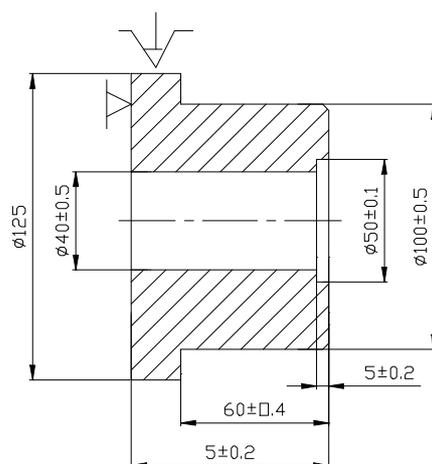


Рис. 17.27. Пооперационный эскиз фрагмента детали

Пункт меню "Настройка / Оснастка" предоставляет возможности для работы с каталогом оснастки. Анкета оснастки содержит следующую информацию: основные параметры (постоянные), дополнительные параметры (информация по типоразмерам), шаблон обозначения рисунка (рисунков).

Привязка операции к оборудованию выполняется на странице "Операции" выделением нужных папок в каталоге операций. Привязка оснастки к оборудованию выполняется на странице "Оснастка" выделением нужных папок в каталоге оснастки.

Страница "Размещение" позволяет установить, где размещено оборудование, и изменить при необходимости список размещения и инвентарные номера.

Выбор или очистка графического изображения темплета и рабочей зоны оборудования производится с помощью команд всплывающего меню, вызываемого нажатием правой кнопки мыши, когда указатель находится на поле вывода изображения (кнопка "Показать рисунки" в кнопочной панели должна быть в утопленном состоянии). Команда "Открыть" позволяет переназначить, а команда "Очистить" – очистить изображение. Изображения могут выбираться из графических файлов следующих типов: WMF, BMP, EMF, ICO.

## ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Принципы управления ТП.
2. АСУТП в производстве РЭУ.
3. Техническое обслуживание оборудования.
4. Методика автоматизированного ТП с помощью графов.
5. Автоматизированный технологический комплекс.
6. Системы автоматизированного проектирования технологической оснастки.