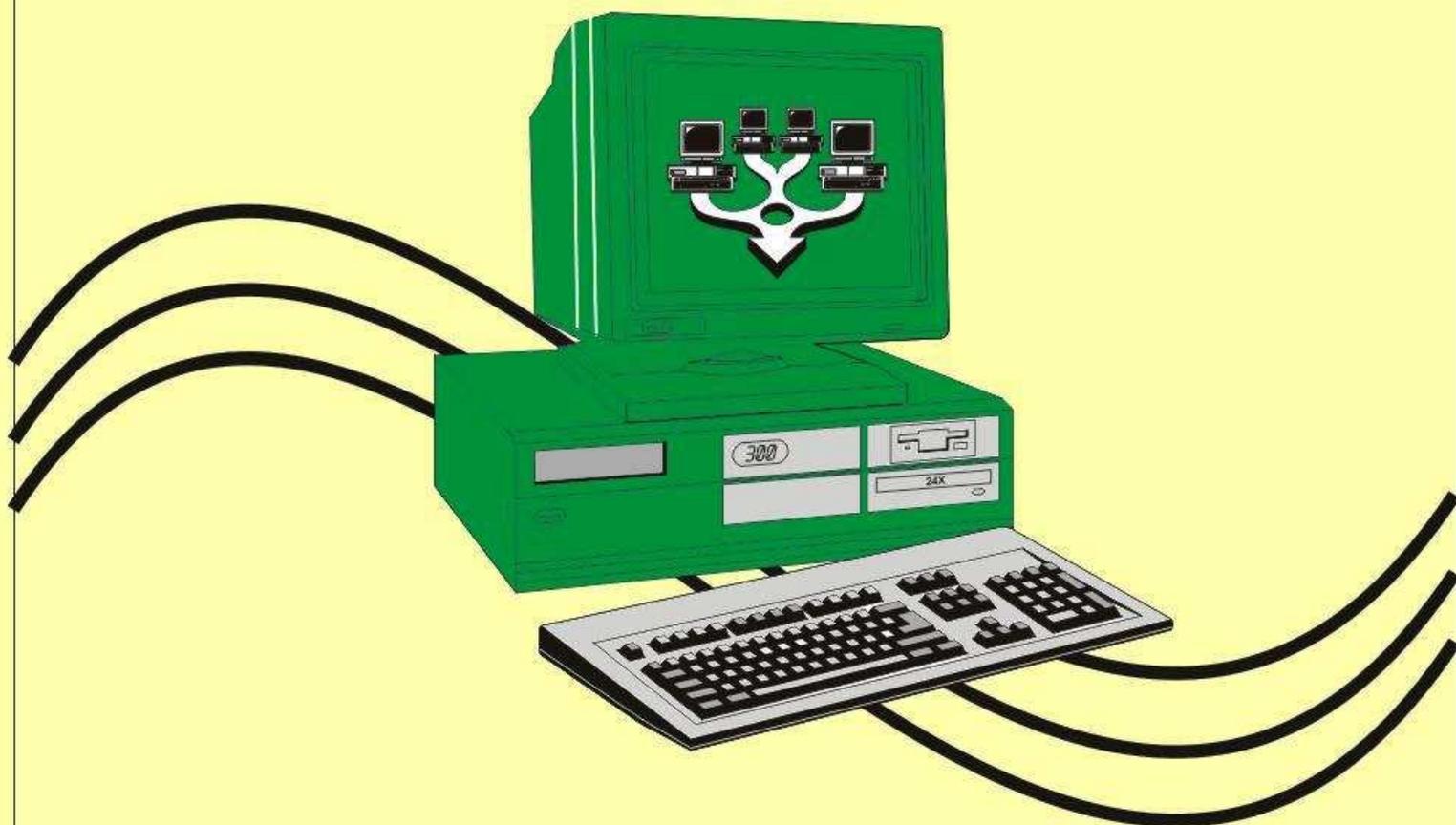


**В.П. Ланин, В.А. Емельянов, А.А. Хмыль**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ПРОИЗВОДСТВА ЭЛЕКТРОННОЙ  
АППАРАТУРЫ**



Министерство образования Республики Беларусь

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ

Кафедра электронной техники и технологии

В.Л. Ланин, В.А. Емельянов, А.А. Хмыль

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА  
ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ**

*Допущено Министерством образования Республики Беларусь  
в качестве учебного пособия для студентов специальностей  
«Проектирование и производство РЭС», «Проектирование и технология ЭВС»,  
«Электронно-оптическое аппаратостроение», «Медицинская электроника»  
высших учебных заведений*

Минск 1998

ББК 32.88 я 73

Л 22

УДК 621.396.6 (075.8)

**Р е ц е н з е н т ы:**

Л.М. Лыньков, доктор технических наук, профессор

В.П. Мельников, кандидат технических наук

**Ланин В.Л и др.**

Л 22 Проектирование и оптимизация технологических процессов производства электронной аппаратуры: Учеб. пособие / В.Л. Ланин, В.А. Емельянов, А.А. Хмыль. – Минск: БГУИР, 1998.– 196 с.  
ISBN 985-6227-38-0.

Данное учебное пособие является конспектом лекций по курсу "Технология радиоэлектронных средств и автоматизации производства" и предназначено для самостоятельной работы студентов, обучающихся по специальностям "Проектирование и производство РЭС", "Проектирование и технология ЭВС", "Электронно-оптическое аппаратостроение". В пособии рассматриваются общие принципы проектирования технологических процессов, моделирование и оптимизация процессов, технологическое оборудование, основы автоматизации производства, автоматизированные системы управления технологическими процессами.

Предназначено для студентов старших курсов и аспирантов высших учебных заведений.

ББК 32.88 я 73

Л 22

УДК 621.396.6 (075.8)

ISBN 985-6227-38-0

© В.Л. Ланин,

В.А.Емельянов,

А.А. Хмыль, 1998

© В.Л. Ланин, 2010

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие	3
<b>Г л а в а 1. Общие принципы проектирования технологических процессов производства</b>	<b>6</b>
1.1. Конструктивно-технологические особенности поколений электронной аппаратуры	6
1.2. Системный подход к технологии и иерархические уровни производства	10
1.3. Структура производственного процесса, виды и типы технологических процессов	15
<b>Г л а в а 2. Технологическая подготовка производства</b>	<b>22</b>
2.1. Система технологической подготовки производства	22
2.2. Порядок проектирования технологических процессов	24
2.3. Технологичность конструкций блоков электронной аппаратуры	29
2.4. Выбор оптимального варианта технологического процесса	38
2.5 Проектирование сборочно-монтажных работ	45
2.6. Разработка и оформление технологической документации	54
<b>Г л а в а 3. Точность и надежность технологических процессов</b>	<b>63</b>
3.1. Производственные погрешности и законы их распределения	63
3.2. Методы анализа производственных погрешностей	71
3.3. Точность и устойчивость технологических процессов	78
3.4. Расчет технологической точности с применением теории случайных функций	81
3.5. Методы обеспечения заданной точности технологических процессов	84
3.6. Надежность технологических процессов	88
<b>Г л а в а 4. Основы функционирования оптимальных технологических систем</b>	<b>90</b>
4.1. Модели технологических систем и их основные показатели	90
4.2. Процесс функционирования технологических систем	97

<b>Глава 5. Математическое моделирование и оптимизация технологических процессов</b>	<b>99</b>
5.1. Регрессионный анализ	99
5.2. Полный факторный эксперимент	103
5.3. Оптимизация технологических процессов	110
5.4. Моделирование систем массового обслуживания	121
5.5. Статистическое моделирование производственных процессов	124
<b>Глава 6. Технологическое оборудование и оснастка</b>	<b>139</b>
6.1. Технологическое оснащение и правила его выбора	139
6.2. Оборудование для мелкосерийного производства	141
6.3. Оборудование для серийного и массового производства	144
6.4. Программно-управляемое оборудование	150
<b>Глава 7. Основы автоматизации производственных процессов</b>	<b>155</b>
7.1. Этапы и пути автоматизации	155
7.2. Автоматические линии	172
7.3. Робото-технологические комплексы	173
7.4. Гибкое автоматизированное производство	185
Заключение	197
Список литературы	198

## 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 функциональных элементов сборки, монтажа, настройки и регулировки электронной аппаратуры, включая оборудование и средства автоматизации производства.

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

Поставленная цель достигается путем:

- \* теоретического изучения материала на лекциях;
- \* практического решения инженерных задач;
- \* исследования технологических процессов на моделях в лабораторных работах;
- \* выполнения курсового проекта;
- \* индивидуальной самостоятельной работы с периодической и патентной литературой, написания рефератов по новейшим разработкам.

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;
- \* знать принципы организации, построения и управления технологическими системами производства в условиях ГАП с применением микро- и мини-ЭВМ;
- \* уметь разрабатывать и внедрять новые технологические процессы автоматизированного производства с использованием промышленных роботов и микропроцессорных систем;

- \* знать структуру и функции ГПС, интегрированных производственных комплексов по видам производства;
- \* уметь проектировать технологические планировки ГПМ, участков ГАП с применением микропроцессорных систем управления.

Сложность изучения дисциплины заключается в:

- \* систематизации и интеграции знаний всех ранее изученных дисциплин ("Материаловедение", "Технология деталей РЭС", "Электронные компоненты" и др.),
- \* практической направленности (решение задач, курсовое проектирование по реальным темам),
- \* практическое использование ранее изученного математического аппарата для моделирования и оптимизации технологических процессов.

## ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Основными задачами технологии на современном этапе являются:

1. Обеспечение конкурентоспособности изделий на мировом рынке, что может быть достигнуто путем увеличения потребительских свойств изделий, а также снижением затрат на его изготовление.

Интегральная оценка качества изделия:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \Pi_i}{Z_n + Z_c},$$

где  $\Pi_i$  - совокупность потребительских свойств,

$Z_n$  - затраты на производство изделия,

$Z_c$  - затраты на сервисное обслуживание.

2. Достижение высокого качества изделий в условиях дефицита материалов, энергоресурсов и высокой стоимости рабочей силы. Эта задача решается с помощью следующих мероприятий:

- снижение материалоемкости изделий, переход на более дешевые и технологичные материалы;

- применение энергосберегающих технологий, использующих электрофизические методы обработки, порошковую металлургию, новые технологии формообразования;

- уменьшение числа рабочих, занятых тяжелым неквалифицированным или ручным трудом путем механизации и автоматизации производства.

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 ставит задачи:

- разработать и внедрить новые процессы сборки и монтажа аппаратуры на бескорпусных ИМС, чиповых элементов, керамических многослойных платах (монтаж на поверхность - SMT, повышающий производительность труда до 10 раз; монтаж матричных БИС (МаБИС), имеющих до 200 выводов с шагом 0,625 и 0,312 мм);

- освоить технологические процессы производства типовых элементов сборки (ТЭС) на коммутационных платах с использованием новых материалов (полиимидной пленки, керамических подложек с удельной теплопроводностью в 250 раз больше, чем стеклотекстолита, тканых материалов, обеспечивающих любую форму платы);

- разработать и внедрить в производство гибкие производственные системы (ГПС), включающие: программно-управляемое оборудование, роботы-манипуляторы (РМ-01 и др.), микропроцессорные средства управления, а также локальные сети ЭВМ, что позволит перейти к безлюдной технологии, обеспечить гибкую переналадку при смене объектов производства и в перспективе создать условия для внедрения автоматизированных технологических комплексов (АТК).

Создание новых технологий должно обеспечить существенное улучшение качественных характеристик изделий и в особенности 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.

# Глава 1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРОИЗВОДСТВА

## 1.1. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОКОЛЕНИЙ 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, 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 изменяется, изменяется технология их изготовления. Это удобно проследить, рассматривая поколения выпускаемых ЭА (рис.1.1).

Первое поколение (40-60-е годы) характеризовалось использованием электровакуумных приборов (ЭВП), электромеханических коммутационных элементов и объемных ЭРЭ (рис. 1.1, а). В качестве начального уровня использовался также объемный модуль (ОМ), под которым подразумевалась схема, выполняющая элементарную функцию (формирование, усиление, преобразование сигнала) и имеющая законченное конструктивное оформление. Электрическое соединение ЭРЭ на всех уровнях осуществлялось вручную с применением проводного (объемного) монтажа.

Для аппаратуры первого поколения характерны: большие габариты и масса; низкая надежность; высокая трудоемкость сборки; плотность монтажа не более 2-5 соед/см<sup>2</sup>.; потребление электроэнергии – 1–100 кВт.

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

Второе поколение (60-70-е годы) характеризовалось широким применением ППП, микромодулей из объемных ЭРЭ, внедрением печатного монтажа на этапе сборки функциональных ячеек (рис. 1.1, б). При изготовлении блоков и устройств использовался объемный монтаж с помощью жгутов. Плотность монтажа увеличилась в 20 раз и составила 10-

15 соедин./см<sup>2</sup>, в 10 раз увеличилась производительность процессов сборки за счет методов групповой пайки ("волной" припоя), объем функциональных ячеек уменьшился в 20-25 раз, потребляемая мощность - в 10-20 раз.

ЭА третьего поколения (начало 70-х годов) характеризовалась переходом от дискретных элементов к интегральным и созданием ТЭС (типовых элементов сборки), которые отличаются упорядоченным расположением элементов, что позволяет использовать механизированную их установку элементов на платы (рис. 1.1, в). Интегральная микросхема (ИМС) стала модулем нулевого уровня, а плотность упаковки достигла 500 элем/см<sup>2</sup>.

Вначале преобладали аналоговые ИМС на основе биполярных транзисторов. Начиная с 1975 г. большее распространение получают цифровые ИМС на основе МОП-структур (металл-окисел-проводник), которые обладают существенными преимуществами по возможности миниатюризации, энергопотреблению и высокому проценту выхода годных.

Объем блоков уменьшился в 80 раз по сравнению с 1-м поколением, потребление мощности снизилось в 15-20 раз, производительность труда увеличилась в 4-5 раз по сравнению со 2-м поколением.

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

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 объемных функциональных, коммутационных и других элементов.

Четвертое поколение (начало 80-х) характеризуется использованием микроблоков, которые содержат микросборки частного применения, бескорпусные ИМС, большие и сверхбольшие интегральные микросхемы (БИС и СБИС), акусто- и оптоэлектронные приборы, а также безвыводные ЭРЭ в ЧИПовом исполнении (рис. 1.1, г).

Основной конструктивной единицей остается ТЭС, но для изготовления используются методы монтажа на поверхность.

Плотность монтажа увеличилась, а объем уменьшился в 150-200 раз по сравнению со 2-м поколением, потребляемая мощность уменьшилась в 50 раз, производительность труда увеличилась в 40-50 раз из-за автоматизации монтажа на поверхность.

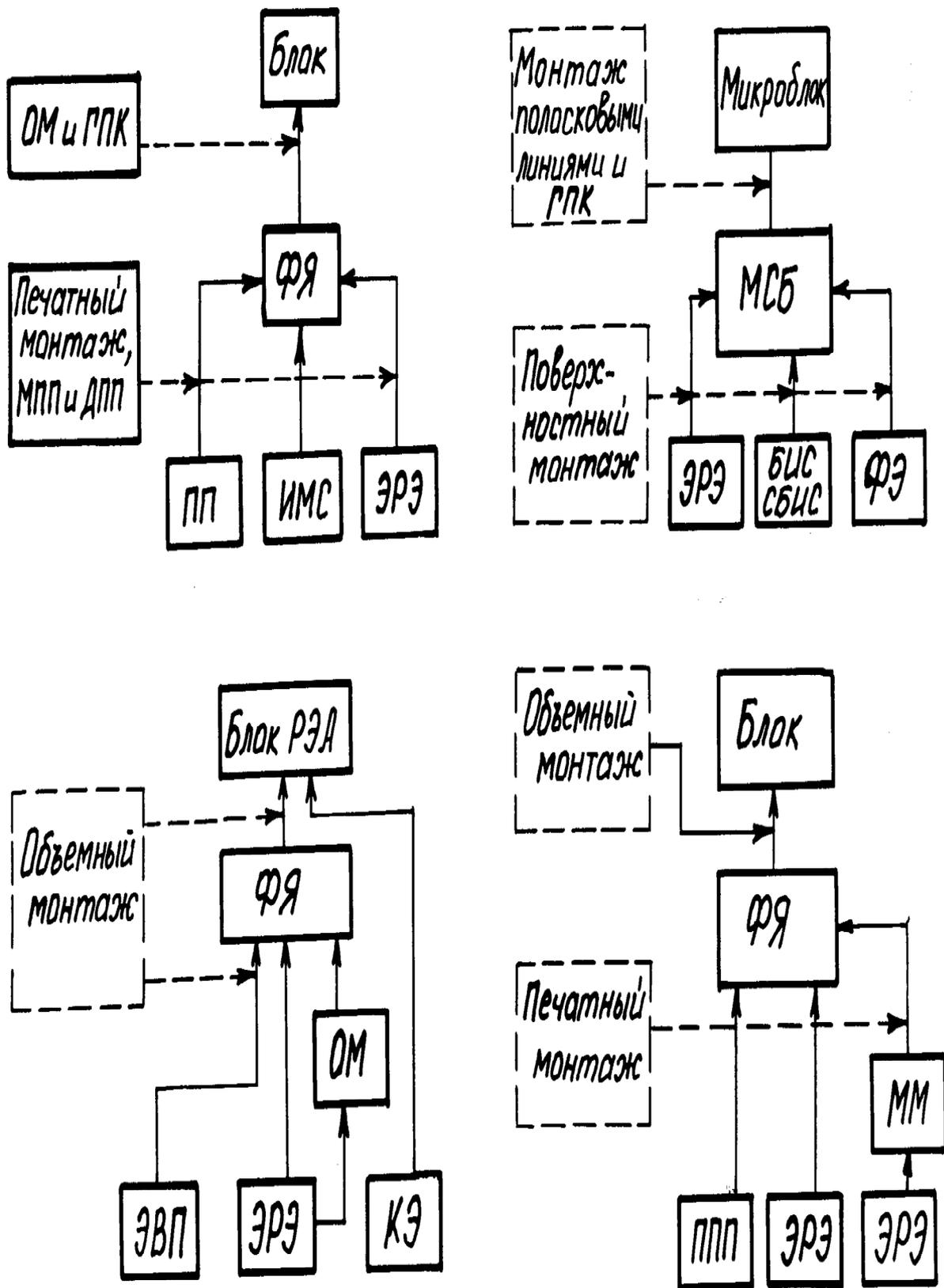


Рис.1.1. Структурные схемы поколений электронной аппаратуры

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 микропроцессоры - устройства обработки цифровой информации, состоящие из памяти, операционной и управляющей части.

Быстродействие электронных приборов по сравнению со вторым поколением возросло на 2 порядка, что привело к расширению их функциональных возможностей в обработке информации, проведению численных расчетов со скоростью 1 Гбит/с.

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

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

- ◆ постепенное усложнение и переход от отдельных аппаратов к сложным комплексам и системам;
- ◆ микроминиатюризация изделий;
- ◆ модульная компоновка из функционально законченных схем и блоков;
- ◆ изготовление ЭА строится на основе процессов сборки отдельных модулей и последующей их стыковке в более сложные единицы;
- ◆ широкое использование автоматизации проектирования, изготовления и управления производством.

Пятое поколение ЭА (90-е годы) предполагает использование многокристальных модулей (МКП), сверхпроводниковых схем и элементов, вхождение в молекулярную электронику. Это потребует создания новых материалов, сверхчистых и безлюдных технологий. Дальнейшее развитие получит микроминиатюризация. Если в настоящее время на одном кристалле размещают 0.1 млн, то в ближайшей перспективе - 1 млн элементов при увеличении размеров сторон кристалла с 2...4 до 8...12 мм. Повышение степени интеграции изменяет состав и структуру конструктивных уровней компоновки ЭА - увеличивается сложность элементной базы, уменьшается число уровней, снижается сложность конструкции и

уменьшаются габариты устройств, т. е. микроэлектронные изделия занимают уровни более высокой функциональной сложности.

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

## **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 процесса в целом характеризуется частичной или полной синхронизацией и взаимозависимостью выполнения режимов. Поэтому его можно отнести к сложным системам, а для анализа производственного процесса необходимо использовать системный подход и рассмотреть его составляющие.

Все используемые в производстве ЭА технологические процессы (ТП) классифицируются на 5 групп:

**1. ТП производства элементной базы**, в том числе: ЭРЭ, элементов функциональной электроники (ЭФЭ), микросборок (МСБ) и ИМС, для которых характерно:

- ◆ высокий уровень технологичности и автоматизации производства,
- ◆ 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, стабилизации и повышения точности ТП, автоматизации контроля параметров, использования ЭВМ на стадии проектирования и управления всеми ТП их производства.

**2. ТП изготовления элементов несущих конструкций** (это штамповка, литье, прессование, точение, фрезерование, электрофизические методы обработки), которые заимствованы из других отраслей и приспособлены для производства ЭА. Совершенствование этих ТП развивается по пути унификации как конструкторских, так и технологических

решений, широкого использования безотходных и программно-управляемых технологий и гибких модулей программно-перестраиваемого оборудования.

**3. ТП изготовления функциональных элементов:** запоминающих устройств, линии задержки и фильтров на поверхностно-акустических волнах (ПАВ) имеют свои особенности. Их характеризует широкое применение интегральной технологии, высокая идентичность параметров, высокие требования к оборудованию и его производительности. Перспективными направлениями развития ЭФЭ и их технологии являются: использование новых материалов и явлений, повышение точности изготовления, снижение массогабаритных показателей.

**4. ТП сборки, монтажа и герметизации блоков ЭА,** трудоемкость которых составляет до 50-80 %. Эти процессы наиболее сложны, 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 изделий, внедряется комплексная автоматизация. Основными направлениями их совершенствования являются: повышение плотности компоновки навесных элементов на ПП и плотности печатного монтажа за счет применения МПП на керамических и полиимидных основаниях; широкое использование бескорпусных ЭРЭ, перспективных технологий их монтажа на поверхность и 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. ТП контроля, регулировки и испытаний ЭА,** которые характеризуются 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 позволяет сократить время настройки ЭА в целом. Перспективным является широкое использование контролирующей и диагностирующей аппаратуры с применением микропроцессорных комплектов, повышение их гибкости работы и снижение стоимости изготовления.

Обеспечение качества и надежности ЭА, а также экономической эффективности её производства проводится с учетом всех групп ТП.

С позиций системного подхода ТП - 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).

На вход ТС поступают материалы (М), комплектующие изделия (К), энергия (Э), информация (И) и другие параметры, на выходе получаем изделия с их выходными параметрами ( $y_1, y_2, \dots, y_i$ ) (рис. 1.2.).

Для выполнения своих функций ТС должна иметь эффективную систему управления.

Как любая сложная система, ТС характеризуется следующими признаками:

- возможностью разбиения системы на множество подсистем, объединенных общей целью функционирования;

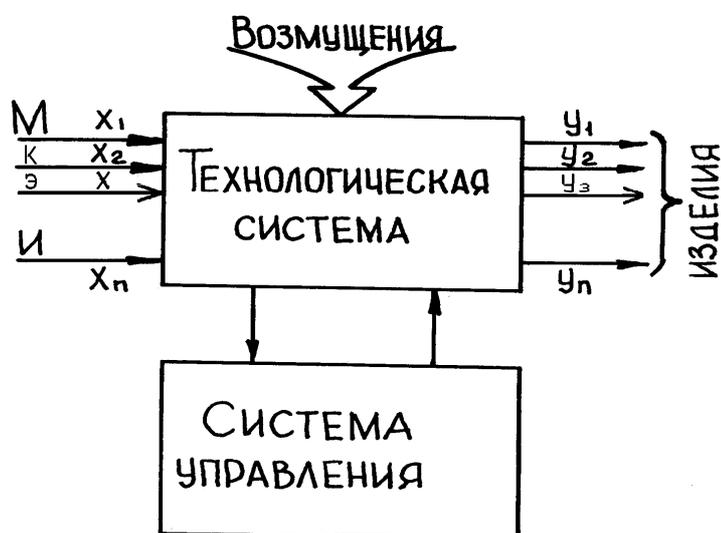


Рис 1.2. Схема технологической системы

- взаимодействием системы с внешней средой;
- функционированием в условиях воздействия случайных факторов;
- сложными информационными связями между элементами и подсистемами;
- наличием 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 производства ЭА решаются на 3-х уровнях (рис. 1.3.):

- ♦ в масштабах отрасли (министерство промышленности);

- ◆ в масштабах предприятия (ПО или НПО);
- ◆ в подсистемах предприятия (цех, участок).

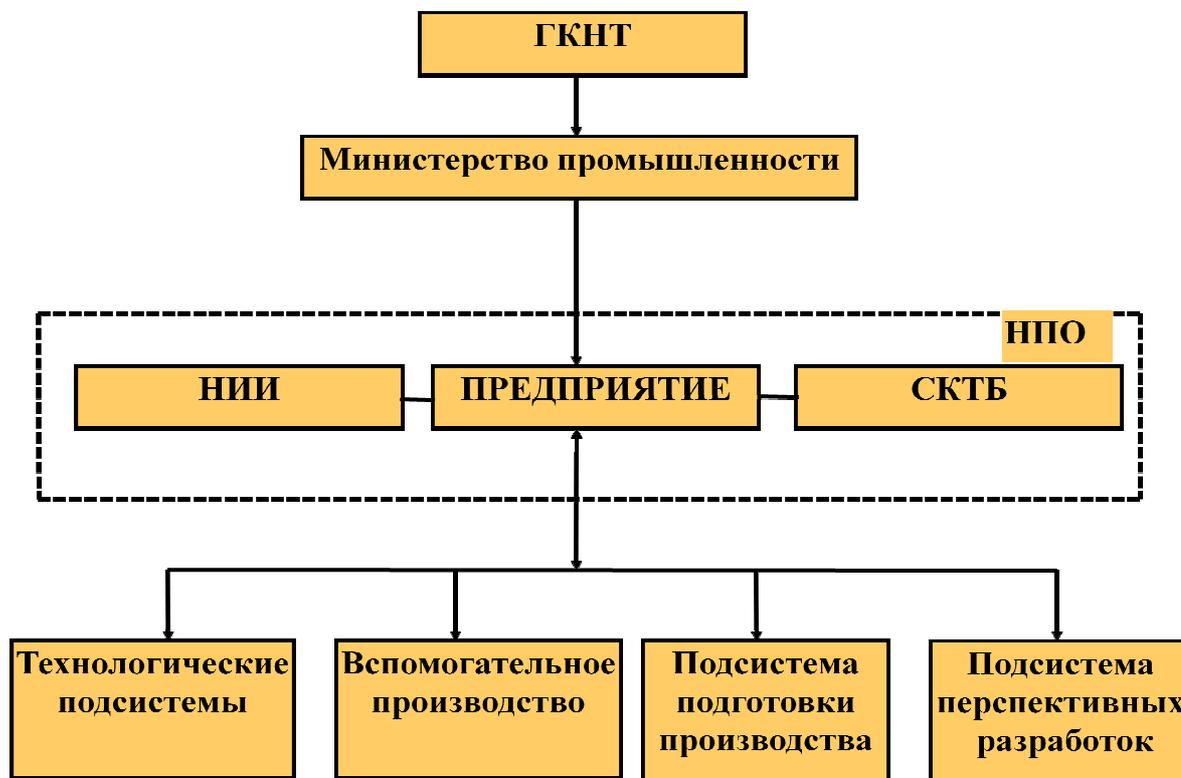


Рис. 1.3. Иерархические уровни организации технологии ЭА

На 1 уровне решаются следующие задачи:

- ◆ определение номенклатуры и программ выпуска изделий в форме госзаказа;
- ◆ разработка перспективных изделий;
- ◆ определение поставщиков комплектующих деталей и материалов;
- ◆ разработка типовых ТП в виде отраслевых стандартов (ОСТ);
- ◆ разработка унифицированного технологического оборудования и оснастки;
- ◆ сертификация изделий;
- ◆ подготовка квалифицированных кадров для отрасли в системе ВУЗов, колледжей, техникумов и училищ;
- ◆ информационно-издательская деятельность (журналы, сборники, реклама).

На 2 уровне (на уровне предприятия):

- ◆ оперативное планирование и управление текущим производством;
- ◆ техническая подготовка производства новых изделий;

- ◆ приобретение и освоение нового технологического оборудования;
- ◆ материально-техническое снабжение;
- ◆ разработка и изготовление специализированного оснащения;
- ◆ разработка единичных и групповых ТП (СТП);
- ◆ подготовка квалифицированных кадров в системе профессионально-технического образования;
- ◆ маркетинг.

На 3 уровне решаются задачи, специализированные по видам работ: заготовительного производства, изготовления деталей, сборки и монтажа, контроля и настройки, испытаний и т.п.

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

**Производственный процесс** - 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 процесс изготовления продукции, определяемой госзаказом и договорами с другими предприятиями.

Вспомогательное производство - ремонт оборудования, транспортировка объектов производства, изготовление оснастки, инструментов, электроснабжение.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС** (ТП) (ГОСТ 3.1109-82) - часть производственного процесса, который представляет собой комплекс действий исполнителей и оборудования, непосредственно направленных на преобразование материалов и комплектующих изделий в готовое изделие. ТП состоит из операций, установов, переходов, позиций (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, устанавливаются нормы времени и расценки, определяются требуемые количества рабочих, оборудования, приспособлений и инструмента, себестоимость изготовления (сборки); ведется календарное планирование производства и осуществляется контроль качества и сроков выполнения работ.

В условиях автоматизированного производства под операцией следует понимать законченную часть технологического процесса, 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 операций в состав технологического процесса включают ряд необходимых для его осуществления вспомогательных операций (транспортных, контрольных, маркировочных и т. п.).

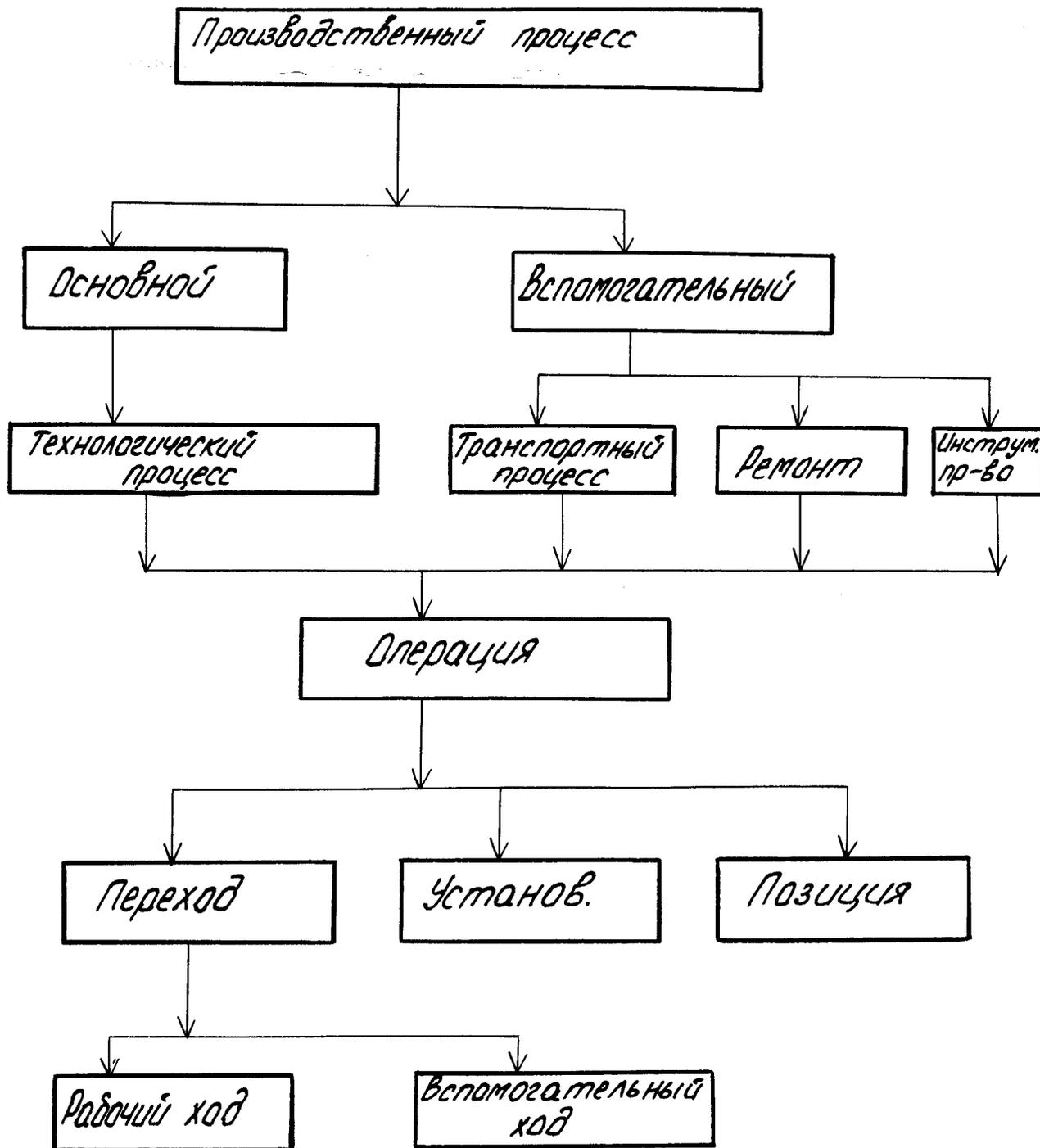


Рис. 1.4. Структура производственного процесса

Установ - часть операции, выполняемая при постоянстве закрепления 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 ход.

Рабочий ход - изменение характеристик обрабатываемой детали.

Вспомогательный ход - возврат рабочего органа в исходное положение.

Длительность производственного цикла  $T_{ц}$  - это время между запуском в производство и окончанием изготовления партии изделий.

Длительность производственного цикла зависит от сочетания операций.

При последовательном сочетании операций:

$$T_{ц} = N \cdot T_{s} = N \cdot \sum_{i=1}^n T_{штi}, \quad (1.1)$$

где  $N$  - количество изделий в партии,  $T_{s}$  - время прохождения всех операций одним изделием,  $T_{штi}$  - штучное время  $i$ -ой операции.

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

$$T_{ц} = T_{s} + (N - 1)T_{max}. \quad (1.2)$$

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

При смешанном способе сочетания операций:

$$T_{ц} = N \cdot T_{s} = \sum_{i=1}^{k-1} t_{см} + N \cdot T_{штк}, \quad (1.3)$$

где  $t_{см}$  - смещение во времени между началами двух последовательно идущих операций,  $T_{штк}$  - норма штучного времени конечной операции.

$$t_{см} = T_{штi} + (N - 1)T_{штi+1}, \text{ если } T_{штi} > T_{штi+1}; \quad (1.4)$$

$$t_{см} = T_{штi}, \text{ если } T_{штi} \leq T_{штi+1}. \quad (1.5)$$

#### Пример.

Изделие собирают в результате выполнения семи сборочных операций, нормы штучного времени которых составляют:  $T_{шт1} = 4$  мин;  $T_{шт2} = 6$  мин;  $T_{шт3} = 5$  мин;  $T_{шт4} = 4$  мин;  $T_{шт5} = 3$  мин;  $T_{шт6} = 4$  мин;  $T_{шт7} = 5$  мин. Определить, при каком способе организации процесса сборки будет быстрее изготовлена партия, состоящая из 300 шт.

Решение.

По последовательному варианту сборки:

$$T_{ц.посл.} = 300 \cdot 31 = 9300 \text{ мин} = 155 \text{ н/ч.}$$

По параллельному варианту сборки:

$$T_{ц.пар.} = 31 + 299 \cdot 6 = 1825 \text{ мин} = 30.4 \text{ н/ч.}$$

По смешанному варианту сборки.

Определяем смещения между началами смежных операций:

$$t_{см12} = 4 \text{ мин}; t_{см23} = 6 + 299 \cdot 5 = 1501 \text{ мин}; t_{см34} = 5 + 299 \cdot 4 = 1201 \text{ мин}; t_{см45} = 4 + 299 \cdot 3 = 901 \text{ мин}; t_{см56} = 3 \text{ мин}; t_{см67} = 4 \text{ мин.}$$

$$\sum_{i=1}^{n-1} t_{смi} = 3614 \text{ мин.}$$

$$T_{ц.смеш.} = 3614 + 300 \cdot 5 = 5114 \text{ мин} = 85.2 \text{ н/ч.}$$

Наиболее быстро будет изготовлена партия изделий при параллельном сочетании операций, однако при этом необходима организация параллельных рабочих мест по 6 операциям. Поэтому наиболее эффективен смешанный вариант сборки.

Все ТП согласно ГОСТ 14.002-83 Единой Системы Технологической Подготовки Производства (ЕСТПП) по степени универсальности и применяемости подразделяются на единичные и унифицированные. К унифицированным относятся групповые и типовые ТП.

**Единичный** - это ТП, который разработан для изготовления одного наименования изделия независимо от программы выпуска.

**Групповой** - разрабатывается для группы изделий, объединенных общими технологическими признаками.

**Типовой** - разрабатывается для группы изделий, характеризующихся признаками конструктивной и технологической общности.

Все типовые процессы приведены в отраслевых (ОСТ) и государственных стандартах (ГОСТ).

Типовые процессы разрабатываются для типового представителя группы конструктивно подобных изделий и характеризуются единством последовательности и содержания большинства технологических операций и переходов для объектов всей группы. Групповой ТП отличается от типового тем, что он разрабатывается для группы изделий более широкой номенклатуры, которые могут не иметь геометрического подобия. Они объединяются в группу по наличию признаков технологической общности, выражающуюся в общности технологической наладки на ту или иную операцию для последующей совместной обработки.

При разработке унифицированных ТП все детали и сборочные единицы предварительно классифицируются по признакам конструктивной и технологической общности. Эти операции легко выполняются на ЭВМ, используя конструкторские и технологические классификаторы.

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 позволяют 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 производства, групповые ТП - в условиях мелкосерийного и серийного производства.

По основному назначению ТП разделяются на рабочие и перспективные. Рабочим называется ТП выполняемый по рабочей технологической и конструкторской документации. Перспективным ТП называется в том случае, когда он соответствует современным достижениям науки и техники, но методы и средства его осуществления на данном предприятии предстоит освоить (полностью или частично).

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 отдельных наиболее сложных и важных или всех операций соответственно 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 технологического процесса 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: режущий инструмент, штампы, прессформы 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 и 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  $P$ :

$$K_{30} = \frac{O}{P}. \quad (1.6)$$

Наиболее характерные признаки типов производства приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1.

Характеристика типов производства

Показатели технологического процесса	Типы производства			
	мелкосерийное	серийное	крупносерийное	массовое
Объем партии, $N$ , тыс.шт. ↓	1-10	10-100	100-1000	>1000
Коэффициент закрепления операций ( $K_{30}$ )	$20 < K_{30} < 40$	$10 < K_{30} < 20$	$1 < K_{30} < 10$	$K_{30} \leq 1$
Номенклатура изделий	очень широкая	широкая	ограниченная	узкая $m=1..3$
Регулярность выпуска	нет	периодические партии		непрерывный выпуск
Техническое оснащение	универсальное	специализированное		Специальное
Квалификация рабочих	высокая (4-6)	средняя квалификация (3-4)		низкая (2-3)
Степень детализации процесса	маршрутный	маршрутно-операционный	операционный	Операционный

Единичное производство характеризуется широкой номенклатурой изготавливаемых изделий и малым объемом их выпуска. Для серийного производства характерно ограниченная номенклатура изделий, изготавливаемых периодически повторяющимися партиями и сравнительно большим объемом выпуска. В зависимости от количества изделий в партии и величины  $K_{30}$  серийное производство может быть мелкосерийным и крупносерийным.

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 большей длительностью цикла изготовления изделия.

Массовое производство отличается узкой номенклатурой и большим объемом выпуска изделий, непрерывно изготавливаемых в течение продолжительного времени. При этом используется специальное высокопроизводительное оборудование, которое расставляется 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 настроечных станках при обеспечении взаимозаменяемости обрабатываемых заготовок и собираемых узлов. Только в отдельных случаях применяется селективная сборка, обеспечивающая групповую взаимозаменяемость.

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

Необходимо различать понятия о циклах изготовления изделия.

**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: транспортировки партий, контроля качества, времени пролеживания между операциями. Оптимальным считается, когда производственный цикл равен двум технологическим. Так, в японских компаниях технологический цикл изготовления кристалла 64 К составляет 3 суток при трехсменной работе, а производственный - 6 суток (в США - 40 суток). Чем короче цикл изготовления изделия, тем выше выход годных кристаллов.

## **Глава 2. ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДГОТОВКА ПРОИЗВОДСТВА**

### **2.1 СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКИ ПРОИЗВОДСТВА**

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

Технологическая подготовка производства - 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 тысяч различной технической документации и изготовить до 5 тысяч различных видов оснастки и инструмента. Выполняют эту работу проектно-конструкторские и технологические службы предприятия, цехи машиностроительного производства и аналогичные службы предприятий-смежников.

Значительный вклад в решение проблемы сокращения сроков подготовки производства внесла Единая система технологической подготовки производства (ЕСТПП), 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.

Единая система технологической подготовки производства - 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 включает решение следующих основных задач:

- \* обеспечение технологичности конструкции изделия;
- \* разработку технологических процессов;
- \* конструирование средств технологического оснащения;
- \* отладку и внедрение ТП и средств технологического оснащения;
- \* организацию линии участков и цехов основного производства;

- \* организацию ТПП на базе типовой структурной схемы и типовых положений, а также и её совершенствования;
- \* управление процессом ТПП во взаимосвязи с другими функциональными подсистемами автоматизированной системы управления производством (АСУП).

Она, кроме стандартов этой системы, основывается на применении некоторых других систем, стандартов и нормативных документов (рис.2.1).

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.

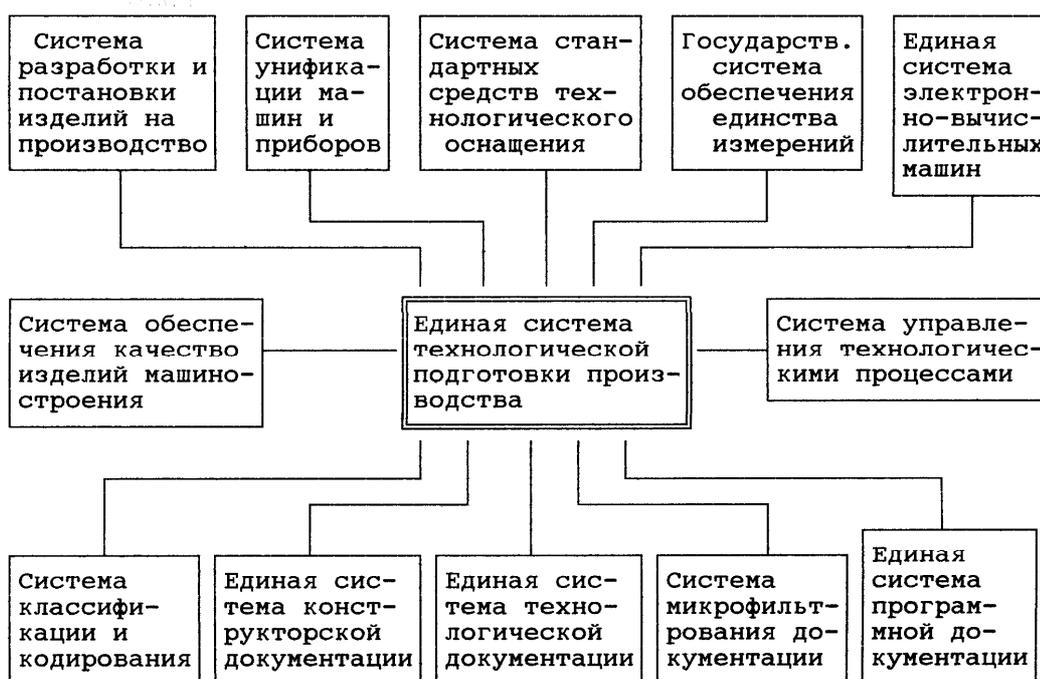


Рис.2.1. Связи Единой Системы Технологической Подготовки Производства с другими системами стандартов

## 2.2. ПОРЯДОК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

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.

Технологическая подготовка производства (ТПП) решает следующие основные задачи (рис. 2.2):

- \* обеспечение технологичности конструкции изделий,
- \* разработка технологического процесса: (маршрутно-операционного, операционного),
- \* проектирование специального технологического оснащения (ТО),
- \* управление процессом ТПП.



Рис. 2.2. Структурная схема технологической подготовки производства

Исходные данные для разработки ТП:

- \* технические условия (ТУ) на изделие;
- \* комплект конструкторской документации на изделие;
- \* программа выпуска изделия, N, шт;
- \* плановые сроки освоения производства, Тпл;
- \* отраслевые и внутризаводские типовые ТП (ОСТы и руководящий технический материал (РТМ));
- \* технологические классификаторы деталей, каталоги оборудования и оснастки;
- \* материальные и трудовые нормативы.

Проектирование ТП в соответствии с ГОСТ 14.301-73 включает этапы (рис. 2.3):

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

В 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:



Например классы: 41 - средства измерения электрических и магнитных величин;  
42 - устройства и системы контроля и регулировки;  
43 - микросхемы, приборы пьезоэлектрические и другие;  
71, 72, 73 - детали, тела вращения.

## 2. Выбор технологических баз и способов фиксации детали.

Технологические базы используют в процессе изготовления для определения положения заготовки или детали при обработке относительно инструмента. При базировании соблюдают основные правила: единство конструкторских, технологических и измерительных баз и постоянство баз, то есть 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, и 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 процесса (маршрут обработки или сборки).

На основе анализа типовых технологических процессов сборки блоков (ОСТ 4ГО.054.267) и перспективных ТП по научно-технической литературе разрабатывают 2 - 3 варианта маршрутной технологии. При разработке маршрутной технологии необходимо руководствоваться следующим:

- \* при поточной сборке разбивка процесса на операции определяется тактом выпуска (ритмом сборки), причем время, затрачиваемое на выполнение каждой операции, должно быть равно или кратно ритму;
- \* предшествующие операции не должны затруднять выполнение последующих;

- \* на каждом рабочем месте должна выполняться однородная по характеру и технологически законченная работа;
- \* после наиболее ответственных операций сборки, а также после регулировки или наладки предусматривают контрольные операции.

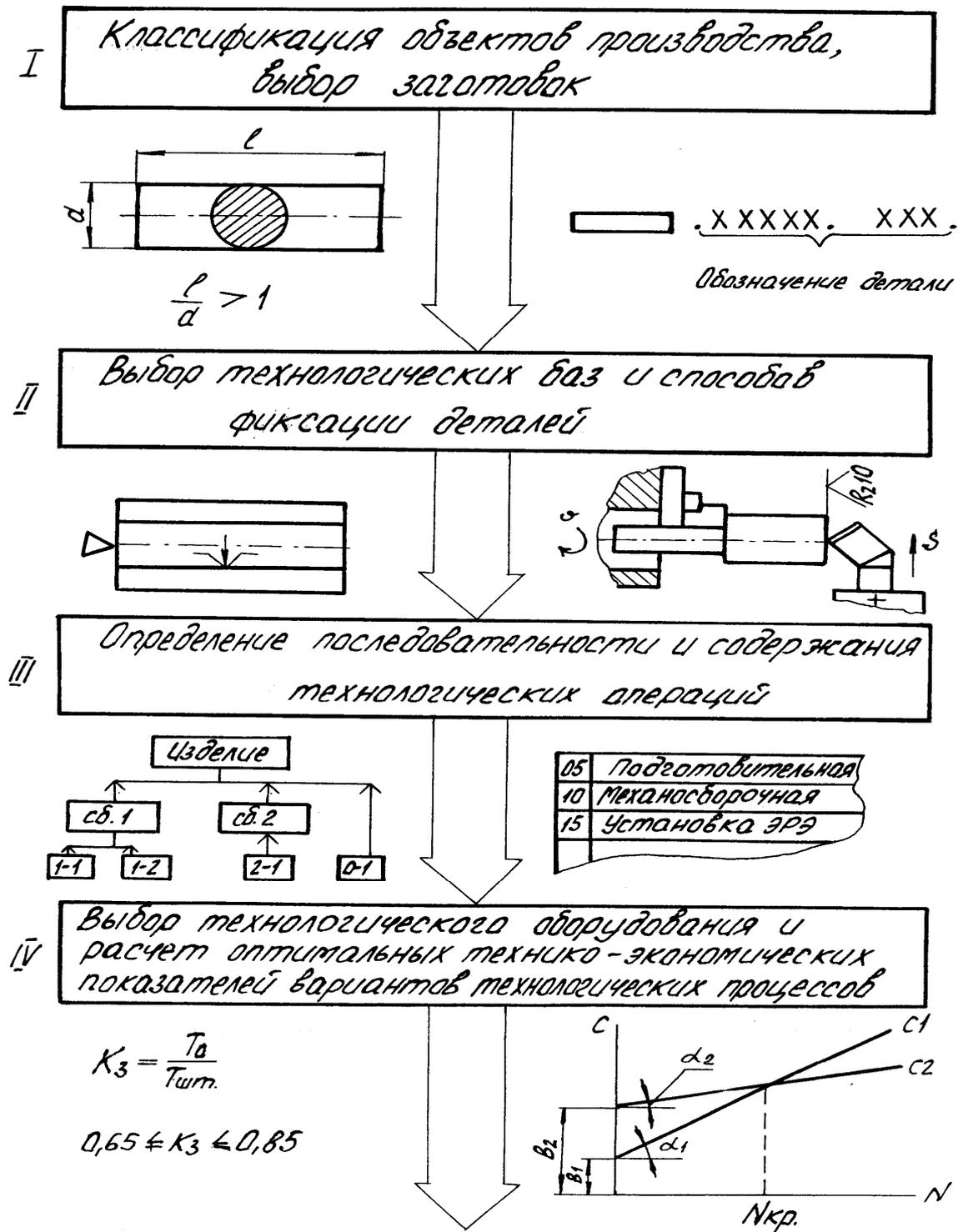


Рис. 2.3. Порядок проектирования ТП

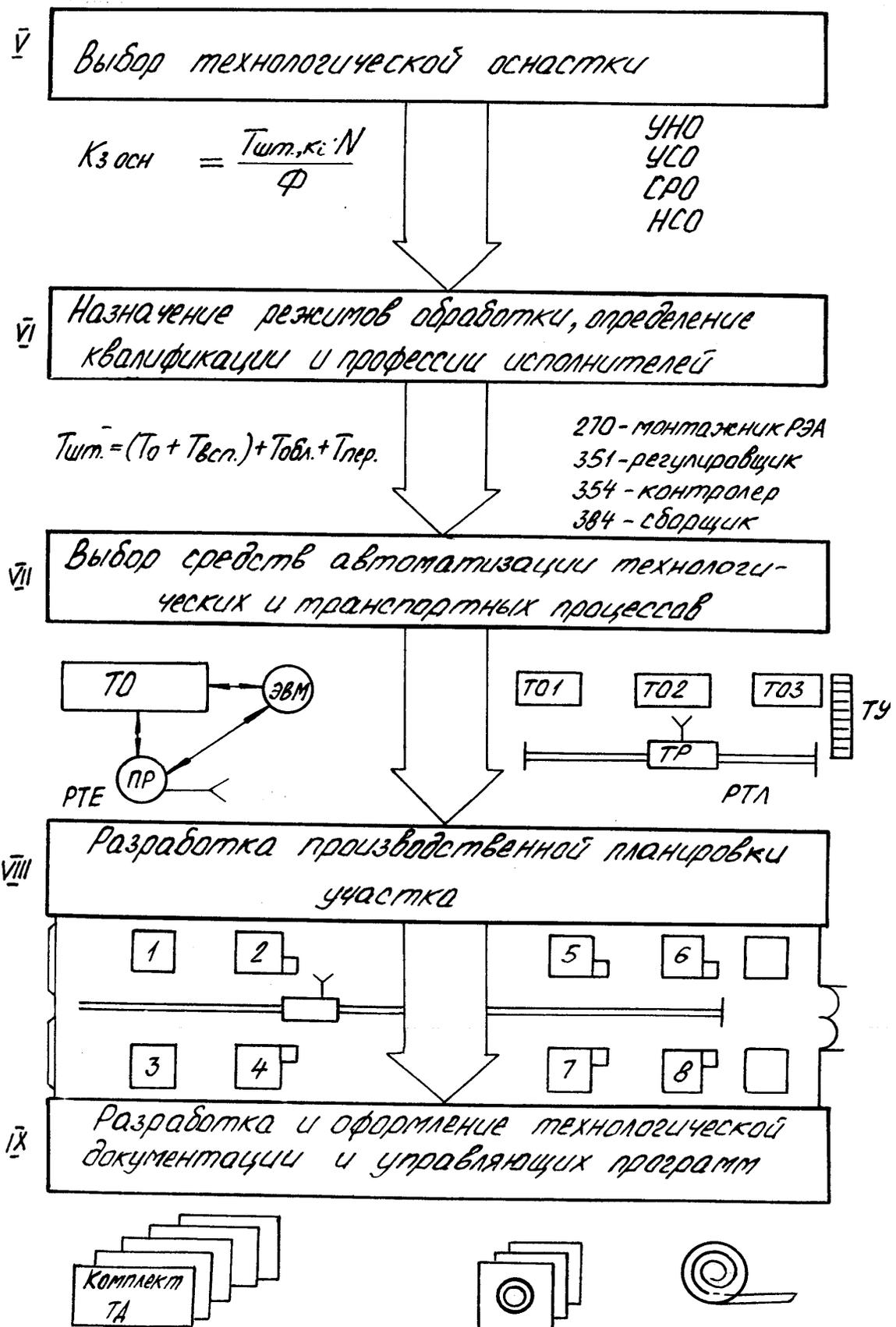


Рис. 2.3 (продолжение) Порядок проектирования ТП

4. Выбор технологического оборудования для 2-х либо 3-х вариантов ТП и расчет оптимального варианта по технико-экономическим показателям.

5. Выбор средств технологического оснащения или проектирование специализированной оснастки.

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

Для наглядного представления о средней загрузке оборудования на линии или участке строят графики загрузки.

7. Определение квалификации и профессий исполнителей, т.е. по виду выполняемой работы необходимо определить разряд рабочего или оператора.

8. Выбор средств автоматизации ТП и внутрицехового транспортирования (роботы-манипуляторы, автоматические линии).

9. Организация производственного участка и составление технологических планировок.

10. Разработка и оформление технологических документов на разработанный ТП.

### 2.3. ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИЙ БЛОКОВ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ

**Технологичность** - свойство конструкции, детали или совокупность свойств изделия, которые проявляются в оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени при изготовлении, эксплуатации и ремонте изделия.

Классификация показателей технологичности показана на рис. 2.4.

Основные показатели технологичности определяются стандартами Единой Системы Технологической Подготовки Производства (ЕСТПП).

1. Трудоемкость изготовления изделия:

$$T_{И} = \sum_{i=1}^n T_i, \text{ (н/час)} \quad (2.1)$$

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

2. Себестоимость технологическая:

$$C_T = C_M + C_3 + C_{ин} + C_0, \text{ (руб)} \quad (2.2)$$

где  $C_M$  - стоимость затрат на сырье и материалы,

$C_3$  - зарплата производственных рабочих,

$C_{ин}$  - стоимость инструмента и оснастки,

$C_0$  - расходы на амортизацию и эксплуатацию оборудования.

3. Уровень технологичности конструкции по трудоемкости:

$$K_{y.t.} = \frac{T_{и}}{T_{б.и.}}, \quad (2.3)$$

где  $T_{б.и.}$  - базового варианта изделия.

4. Уровень технологичности по себестоимости:

$$K_{y.c.} = \frac{C_T}{C_{б.и.}}, \quad (2.4)$$

где  $C_{б.и.}$  - себестоимость базового варианта изделия.

Дополнительные технические показатели технологичности:

1) коэффициент унификации:

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D}, \quad (2.5)$$

где  $E_y$  - число унифицированных сборочных единиц;

$D_y$  - число унифицированных деталей,

$E, D$  - общее число сборочных единиц и деталей соответственно.

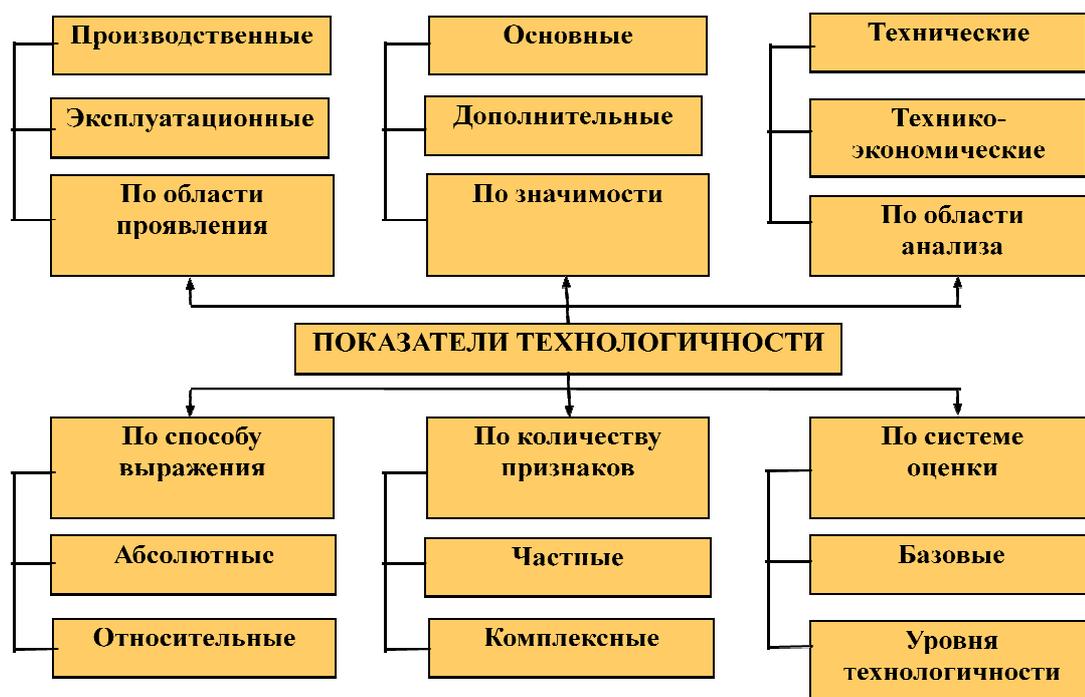


Рис. 2.4. Классификация показателей технологичности

2) коэффициент применимости типовых технологических процессов (ТП):

$$K_{\text{ТП}} = \frac{T_{\text{ТП}}}{T_{\text{И}}}, \quad (2.6)$$

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

3) коэффициент автоматизации и механизации:

$$K_{\text{МА}} = \frac{T_{\text{МА}}}{T_{\text{И}}}, \quad (2.7)$$

где  $T_{\text{МА}}$  - трудоемкость операций, выполненных на автоматическом и полуавтоматическом оборудовании.

Базовые показатели технологичности блоков РЭА установлены стандартом отраслевой системы технологической подготовки производства ОСТ 4ГО.091.219-81 "Методы количественной оценки технологичности конструкций изделий РЭА. Согласно нему все блоки по технологичности делятся на 4 основные группы:

- электронные,
- радиотехнические,
- электромеханические,
- коммутационные.

Для каждого блока определяются 7 показателей технологичности, каждый из которых имеет свою весовую характеристику  $\varphi_i$ .

Величина коэффициента весомости  $\varphi_i$  зависит от порядкового номера частного показателя и рассчитывается по формуле:

$$\varphi_i = \frac{q}{2^{q-1}}, \quad (2.8)$$

где  $q$  - порядковый номер ранжированной последовательности частных показателей (табл. 2.1).

Таблица 2.1

Весовая характеристика частных показателей

$q$	$\varphi_i$
1	1.0
2	1.0
3	0.8
4	0.5
5	0.3
6	0.2
7	0.1

Затем на основании расчета всех показателей вычисляют комплексный показатель технологичности:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^7 K_i \cdot Y_0}{\sum_{i=1}^7 Y_i}. \quad (2.9)$$

Коэффициент технологичности находится в пределах  $0 < K < 1$ .

$K$  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 в ранжированной последовательности для электронных РЭС приведен в табл. 2.2.

1. Коэффициент применения микросхем и микросборок:

$$K_{м.с} = \frac{K_{Э.МС}}{K_{Э.МС} + N_{ИЭТ}}, \quad (2.10)$$

где  $K_{Э.МС}$  - общее число дискретных элементов, замененных микросхемами и установленных на микросборках в РЭС;

$N_{ИЭТ}$  - общее число ИЭТ, не вошедших в микросхемы. К ИЭТ относят резисторы, конденсаторы, диоды, транзисторы, разъемы, реле и другие элементы.

Показатели технологичности электронных устройств

q <sub>i</sub>	Показатели технологичности	Обозначение	Степень Влияния
1	Коэффициент применения микросхем и микросборок в РЭС	K <sub>М.С</sub>	1.0
2	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	K <sub>М.М</sub>	1.0
3	Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу	K <sub>М.П.ИЭТ</sub>	0.8
4	Коэффициент автоматизации и механизации регулировки и контроля	K <sub>А.Р.К</sub>	0.5
5	Коэффициент повторяемости ИЭТ	K <sub>ПОВ.ИЭТ</sub>	0.3
6	Коэффициент применения типовых технологических процессов	K <sub>Т.П</sub>	0.2
7	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	K <sub>Ф</sub>	0.1

Коэффициент автоматизации и механизации монтажа:

$$K_{М.М} = \frac{H_{М.М}}{H_{М}}, \quad (2.11)$$

где  $H_{М.М}$  - количество монтажных соединений ИЭТ, которые предусматривается осуществить автоматизированным или механизированным способом. Для блоков на печатных платах механизация относится к установке ИЭТ и последующей пайке волной припоя;

$H_{М}$  - общее количество монтажных соединений. Для разъемов, реле, микросхем и ЭРЭ определяется по количеству выводов.

Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу:

$$K_{М.П.ИЭТ} = \frac{H_{М.П.ИЭТ}}{H_{П.ИЭТ}}, \quad (2.12)$$

где  $H_{М.П.ИЭТ}$  - количество ИЭТ в штуках, подготовка выводов которых осуществляется с помощью полуавтоматов и автоматов; в число их 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 конструкторской документации.

Коэффициент автоматизации и механизации регулировки и контроля:

$$K_{А.Р.К} = \frac{H_{А.Р.К}}{H_{Р.К}}, \quad (2.13)$$

где  $N_{A.P.K}$  - число операций контроля и настройки, выполняемых на полуавтоматических и автоматических стендах;

$N_{P.K}$  - общее количество операций контроля и настройки. Две операции: визуальный контроль и электрический являются обязательными. Если в конструкции имеются регулировочные элементы (катушки индуктивности с магнитными сердечниками), то количество операций регулировки увеличивается пропорционально числу этих элементов.

2. Коэффициент повторяемости ИЭТ:

$$K_{\text{пов. ИЭТ}} = 1 - \frac{N_{T.Ф. ИЭТ}}{N_{T. ИЭТ}}, \quad (2.14)$$

где  $N_{T.Ф. ИЭТ}$  - количество типоразмеров оригинальных ИЭТ в РЭС. К оригинальным относится ИЭТ, разработанные и изготовленные впервые по техническим условиям РЭС; типоразмер определяется компоновочным размером и стандартом на элемент;

$N_{T. ИЭТ}$  - общее количество типоразмеров на элемент.

Коэффициент применения типовых технологических процессов:

$$K_{T.П} = \frac{D_{T.П} + E_{T.П}}{D + E}, \quad (2.15)$$

где  $D_{T.П}$  и  $E_{T.П}$  - число деталей и сборочных единиц, изготавливаемых с применением типовых и групповых технологических процессов;

$D$  и  $E$  - общее число деталей и сборочных единиц в РЭС, кроме крепежа (винтов, гаек, шайб).

Коэффициент прогрессивности формообразования деталей:

$$K_{\Phi} = \frac{D_{\text{пр.}}}{D}, \quad (2.16)$$

где  $D_{\text{пр.}}$  - детали, изготовленные по прогрессивному ТП (штамповка, прессование из пластмасс, литье, порошковая металлургия и т.д.);

$D$  - общее число деталей (без учета нормализованного крепежа).

К радиотехническим относятся приемно-усилительные приборы и блоки, источники питания, генераторы сигналов, телевизионные блоки и т.д. Состав показателей технологичности приведен в табл. 2.3.

Коэффициент освоенности ДСЕ:

$$K_{\text{осв.}} = \frac{D_{T.З}}{D_T}, \quad (2.17)$$

где  $D_{T.З}$  - количество типоразмеров заимствованных ДСЕ, ранее освоенных на предприятии;

$D_T$  - общее количество типоразмеров ДСЕ в РЭС.

Таблица 2.3

Показатели технологичности радиотехнических устройств

$q_i$	Показатели технологичности	Обозначение	Степень влияния
1	Коэффициент автоматизации и механизации монтажа	$K_{M.M}$	1.0
2	Коэффициент автоматизации и механизации подготовки ИЭТ к монтажу	$K_{M.П.ИЭТ}$	1.0
3	Коэффициент освоенности ДСЕ	$K_{ОСВ.}$	0.8
4	Коэффициент применения микросхем и микросборок	$K_{M.C}$	0.5
5	Коэффициент повторяемости печатных плат	$K_{ПОВ.П.П}$	0.3
6	Коэффициент применения типовых технологических процессов	$K_{T.П}$	0.2
7	Коэффициент автоматизации и механизации регулировки и контроля	$K_{A.P.K}$	0.1

Коэффициент повторяемости печатных плат:

$$K_{ПОВ.П.П} = 1 - \frac{D_{ТПП}}{D_{ПП}}, \quad (2.18)$$

где  $D_{ТПП}$  - число типоразмеров печатных плат в изделии;

$D_{ПП}$  - общее число печатных плат.

К электромеханическим устройствам относятся механизмы привода, отсчетные устройства, кодовые преобразователи и т.д. Состав показателей технологичности приведен в табл. 2.4.

Коэффициент точности обработки определяется:

$$K_{T.X} = 1 - \frac{D_{T.X}}{D}, \quad (2.19)$$

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

Коэффициент сложности обработки определяется:

$$K_{C.O} = 1 - \frac{D_M}{D}, \quad (2.20)$$

где  $D_M$  - число деталей, включая заимствованные и стандартные, требующих обработки снятием стружки;

$D$  - общее число деталей.

Показатели технологичности электромеханических устройств

q <sub>i</sub>	Показатели технологичности	Обозначение	Степень влияния
1	Коэффициент точности обработки	K <sub>Т.ч</sub>	1.0
2	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	K <sub>Ф</sub>	1.0
3	Коэффициент сложности обработки	K <sub>С.О</sub>	0.8
4	Коэффициент повторяемости деталей и сборочных единиц	K <sub>ПОВ.ДСЕ</sub>	0.5
5	Коэффициент параллельности сборки	K <sub>П.СБ</sub>	0.3
6	Коэффициент сложности сборки	K <sub>С.СБ</sub>	0.2
7	Коэффициент использования материалов	K <sub>И.М</sub>	0.1

Коэффициент повторяемости деталей и сборочных единиц определяется:

$$K_{\text{пов. ДСЕ}} = 1 - \frac{D_T + E_T}{D + E}, \quad (2.21)$$

где  $D_T$  и  $E_T$  - общее число типоразмеров деталей и сборочных единиц без учета нормализованного крепежа;

$D$  и  $E$  - общее число типоразмеров деталей и сборочных единиц.

Коэффициент параллельности сборки определяется:

$$K_{\text{п.сб}} = \frac{E_{\text{п.сб}}}{E}, \quad (2.22)$$

где  $E_{\text{п.сб}}$  - число сборочных единиц, допускающих параллельную сборку, с учетом целесообразности расчленения изделия на сборочные единицы;

$E$  - общее число сборочных единиц.

Номенклатура частных показателей может быть расширена, но использование нового показателя должно быть оправданным.

Коэффициент сложности сборки определяется:

$$K_{\text{с.сб}} = 1 - \frac{E_{\text{т.сл}}}{E_T}, \quad (2.23)$$

где  $E_{\text{т.сл}}$  - число типоразмеров сборочных единиц, входящих в изделие и требующих регулировки и подгонки в процессе сборки;

$E_T$  - общее количество сборочных единиц.

Коэффициент использования материалов определяется:

$$K_{\text{ИМ}} = \frac{M}{M_{\text{К.М.Р}}}, \quad (2.24)$$

где  $M$  - масса изделия без учета комплектующих изделий и тары;

$M_{\text{К.М.Р}}$  - масса  $K$ -го конструкционного материала :

$$M = M_{\text{IE}} + M_{\text{IG}}, \quad (2.25)$$

где  $M_{\text{IE}}$  - масса  $i$ -й сборочной единицы;

$M_{\text{IG}}$  - масса  $i$ -й детали, являющейся составной частью изделия.

К коммутационным устройствам относятся соединительные, распределительные блоки, коммутаторы и т.п. Состав показателей технологичности приведен в табл. 2.5.

Коэффициент повторяемости материалов определяется:

$$K_{\text{ПВ.М}} = 1 - \frac{D_{\text{М.М}}}{D_{\text{Т.Ф}}}, \quad (2.26)$$

где  $D_{\text{М.М}}$  - число маркосортаментов материалов, применяемых в изделии. Под маркосортаментом понимается сочетание марки материала и профиля его поставки;

$D_{\text{Т.Ф}}$  - количество типоразмеров оригинальных деталей.

Таблица 2.5

Показатели технологичности коммутационных устройств

П/п №	Показатели технологичности	Обозначение	Степень влияния
1	Коэффициент повторяемости материалов	$K_{\text{ПОВ.М}}$	1.0
2	Коэффициент сложности сборки	$K_{\text{С.СБ}}$	1.0
3	Коэффициент точности обработки $K_{\text{Т.ч}}$	$K_{\text{Т.ч}}$	0.8
4	Коэффициент прогрессивности формообразования деталей	$K_{\text{Ф}}$	0.5
5	Коэффициент использования материалов	$K_{\text{ИМ}}$	0.3

Нормативные значения комплексных показателей технологичности ЭА конструкций изделий зависят от стадии разработки рабочей документации (табл. 2.6).

Для повышения технологичности конструкций устройств необходимо выполнение следующих групп мероприятий:

1) путем совершенствования конструкции блока:

\* повышение унификации блока, что улучшает показатели  $K_{\text{пов.эрэ}}$  и  $K_{\text{пр.эрэ}}$ ;

- \* расширение использования ИМС и микросборок, в том числе путем применения резисторных Б20 и конденсаторных Б18 сборок;
- \* увеличение сборности конструкции;
- \* увеличение количества деталей,изготовленных прогрессивным методом, и уменьшение числа деталей, изготовленных точным способом;
- \* рациональной компоновкой элементов на плате обеспечивает автоматизированную установку и монтаж.

Таблица 2.6

Нормативные значения показателей технологичности

Класс устройств	Разработка рабочей документации	Доработка рабочей документации	
		Установочной серии	Установившегося серийного пр-ва
Радиотехнические с использованием БНК	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

2) совершенствованием технологических процессов:

- \* механизация подготовки элементов к монтажу путем использования автоматов, полуавтоматов;
- \* совершенствованием ТП монтажа;
- \* механизация операций контроля и настройки;
- \* применение прогрессивных методов формообразования деталей.

## 2.4. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

При выборе 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 изделия:

$$C = AN + B, \quad (2.27)$$

где  $N$  - программа выпуска, шт.;

$A$  - текущие затраты на одно изделие;

$B$  - единовременные затраты на программу.

$$A = M + Z + П, \quad (2.28)$$

где  $M$  - затраты на основные материалы,

$Z$  - заработная плата производственных рабочих,

$П$  - расходы на эксплуатацию оснастки и оборудования.

Затраты на основные материалы рассчитываются с учетом возвратных отходов:

$$M = \sum_{i=1}^N m_i q_{1,i} - \sum_{j=1}^L m_j q_{2,j}, \quad (2.29)$$

где  $m_i$  - масса  $i$ -го материала в изделии;

$q_{1,i}$  - стоимость этого материала;

$N$  - программа выпуска;

$m_j$  - масса отхода  $i$ -го материала;

$q_{2,j}$  - стоимость этого отхода.

Заработная плата производственных рабочих:

$$Z = \sum_{i=1}^M K_{ЗП} T_{шт_i} S_i, \quad (2.30)$$

где  $K_{ЗП}$  - коэффициент к заработной плате;

$T_{шт}$  - штучное время выполнения операций в нормо-часах;

$S_i$  - часовая тарифная ставка рабочего по данной операции;

$M$  - число операций.

Коэффициент к заработной плате определяется как

$$K_{\text{эл}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (2.31)$$

где:

$K_1 = \frac{P}{Q}$ , - коэффициент многостаночного обслуживания,

P - число рабочих,

Q - число станков, которое обслуживает 1 рабочий,

$K_2$  - коэффициент, учитывающий перевыполнение нормы (1.1-1.2),

$K_3$  - коэффициент, связанный с дополнительной з/платой, включающей отчисления на социальное страхование, отпуска и т.д. (1,13-1,18).

Расходы на эксплуатацию оборудования П берутся в % к основной заработной плате рабочих (накладные расходы) (5-20).

Единовременные затраты В складываются из 2-х статей:

1. заработной платы наладчиков  $Z_n$ ;
2. затраты на основное технологическое оборудование  $C_o$ :

$$B = Z_n + C_o, \quad (2.32)$$

$$C_o = \sum_{i=1}^l C_i K_i, \quad (2.33)$$

где  $K_i$  - коэффициент амортизации,

k - число единиц оборудования.

$$K_i = \begin{cases} 1.0 - 1.2 & \text{- простое технологическое оснащение} \\ 0.7 - 0.8 & \text{- оснащение средней сложности} \\ 0.4 - 0.5 & \text{- сложное технологическое оснащение} \end{cases}$$

Зарплата наладчиков технологического оборудования:

$$Z_n = \sum_{i=1}^k K_{\text{эл}} T_{\text{пз}} S_{\text{нi}}, \quad (2.34)$$

где k - количество наладчиков,

$T_{\text{пзi}}$  - подготовительно-заключительное время по данной операции,

$S_{\text{нi}}$  - часовая тарифная ставка наладчика.

Уравнение технологической себестоимости единичной операции одной детали продукции:

$$C_{\text{от}} = A + \frac{B}{N}, \quad (2.35)$$

где A - текущие затраты,

$B$  - единовременные затраты,

$N$  - программа выпуска.

Зависимость можно разделить на 3 части (рис. 2.5):

участок А соответствует мелкосерийному типу производства;

участок Б - серийное производство;

участок В - крупносерийное и массовое производство.

Наиболее сильно программа выпуска влияет на технологическую себестоимость в мелкосерийном производстве.

Для выбора оптимального варианта ТП по себестоимости строим графические зависимости себестоимости годовой программы по двум вариантам:

$$\text{I вариант: } C_1 = A_1 \cdot N + B_1, \quad (2.36)$$

$$\text{II вариант: } C_2 = A_2 \cdot N + B_2,$$

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

Для нахождения  $N_{\text{кр}}$  считаем, что себестоимости по обоим вариантам равны  $C_1 = C_2$ .

Приравниваем уравнения:

$$A_1 N_{\text{кр}} + B_1 = A_2 N_{\text{кр}} + B_2, \quad (2.37)$$

где критическая величина партии:

$$N_{\text{кр}} = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2}. \quad (2.38)$$

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 будут меньше вследствие повышения производительности и снижения квалификации рабочих. Таким образом, если заданная программа меньше  $N_{\text{кр}}$ , то выбираем I-й вариант, если программа выпуска больше  $N_{\text{кр}}$ , то выбираем II-й вариант (рис. 2.6).

Для выбора оптимального варианта ТП по производительности рассчитываем производительность труда по каждому из вариантов.

**Производительность** - количество изделий в шт., которое изготовлено за единицу времени (час, смену).

Средняя производительность:

$$Q = \frac{\Phi}{\sum_{i=1}^n T_{\text{шт.}i}}, \quad (2.39)$$

где  $\Phi$  - полезный фонд на заданный плановый период времени,

$T_{шт.i}$  - трудоемкость  $i$ -ой операции,

$n$  - количество операций ТП.

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

Штучно-калькуляционное время (трудоемкость операции):

$$T_{шт.к} = T_{шт} + \frac{T_{п.з.}}{N}, \quad (2.40)$$

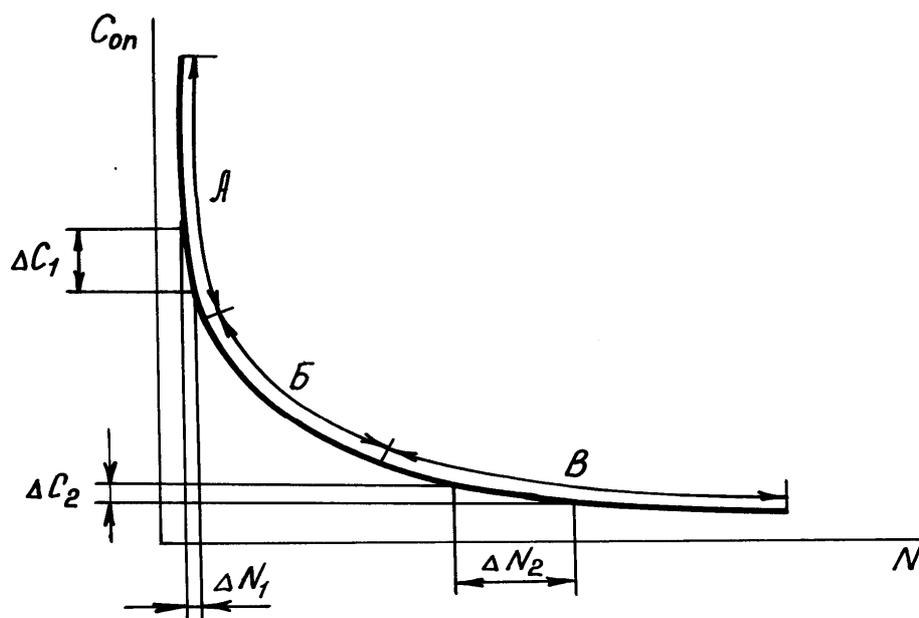


Рис. 2.5. Зависимость технологической себестоимости от программы выпуска

Для сборочно-монтажного производства объединяют  $T_{осн}$  и  $T_{всп}$  и получают оперативное время, а  $(T_{обсл} + T_{пер})$  составляют дополнительное время и задают его в % от  $T_{опер}$  в качестве коэффициента.

Тогда штучное время:

$$T_{шт} = T_{оп} \cdot \left( 1 + \frac{T_{пз} + T_{обс} + T_{лн} + T_{омд}}{100} \right) \cdot K_{мп} \cdot K_{ур}, \quad (2.42)$$

где  $K_{тп}$  - коэффициент, учитывающий тип производства (мелкосерийный - 1,5, серийный - 1,0, крупносерийный - 0,75, массовый - 0,7),

$K_{ур}$  - коэффициент, учитывающий условия работы (табл. 2.7).

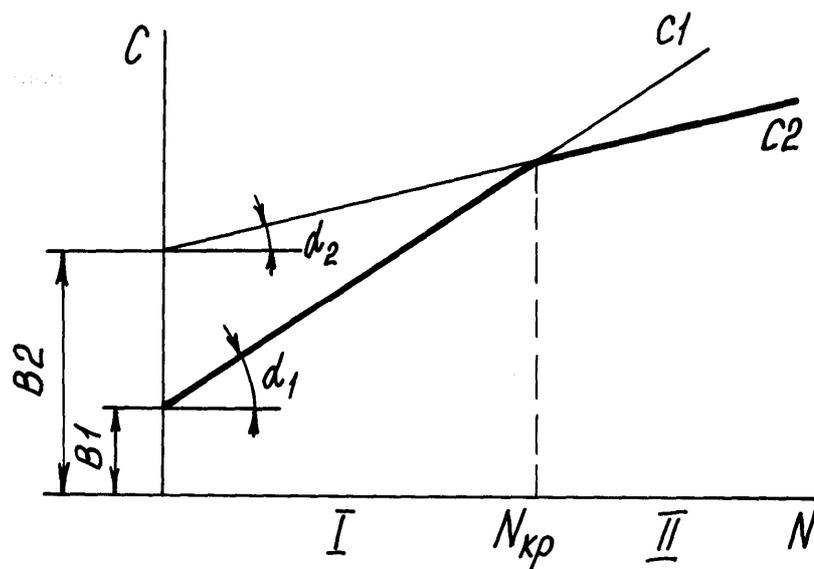


Рис. 2.6. Сравнение двух вариантов ТП по себестоимости

где  $T_{ПЗ}$  - подготовительно-заключительное время, которое затрачивается на ознакомление с чертежами, получение инструмента, на подготовку и наладку оборудования.  $T_{ПЗ}$  выдается на всю программу выпуска в нормативах, поэтому и делится на  $N$ .

Штучное время:

$$T_{ШТ} = T_{ОСН} + T_{ВСП} + T_{ОБСЛ} + T_{ПЕР}, \quad (2.41)$$

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 перерывов на регламентированные перерывы в работе.

Таблица 2.7

Значения коэффициента, учитывающего условия работы

Условия выполнения работы	Кур
Свободно, удобно	1.0
Осторожно, сосредоточение внимания	1.2
Стеснительно, неудобно, затруднительный доступ	1.3
Очень стеснительно и неудобно	1.5

Выбор времен  $T_{пз}$ ,  $T_{обс}$  и  $T_{лн}$  проводится в зависимости от типа производства (табл. 2.8).

Нормативы затрат времени на операцию

Виды затрат времени	Величина затрачиваемого времени, % от оперативного			
	массовое	крупносерийное	среднесерийное	мелкосерийное и единичное
Тпз	-	1.4	2.5	3.2
Тобс	1.6	1.9	3.0	4.3
Тлн	2.1	2.1	2.1	2.1
ВСЕГО	3.7	5.4	7.6	9.6

Тогда штучное время:

$$T_{шт} = T_{оп} \cdot K \cdot \left( \frac{K_1 + K_2}{100} + 1 \right). \quad (2.43)$$

1. Коэффициент  $K$  определяет группу сложности аппаратуры и тип производства. Согласно ОСТ 4ГО.050.012 "Нормирование сборочно-монтажных работ в производстве РЭА" выделяются 3 группы сложности:

1. РЭА 2-го поколения (ППП и дискретные элементы),
2. РЭА 3-го поколения (ППП, ИМС),
3. РЭА 4-го поколения (микросборки, микроблоки).

Для серийного производства  $K=1,2$ , для крупносерийного производства  $K=0,9$

2. Коэффициент  $K_1$  - учитывает подготовительно-заключительное время и время обслуживания в % от оперативного: для массового  $K_1 = 3.7$ , для крупносерийного - 5.4, для серийного - 7.6, для мелкосерийного - 9.6.

3. Коэффициент  $K_2$  учитывает долю времени на перерывы а работе в процентах к оперативному времени и зависит от сложности выполняемой работы и условий труда. Для простых работ в нормальных условиях 5%, во вредных условиях 9%, для работ с большим зрительным напряжением 12%, для работ в тяжелых условиях до 20%.

Для выбора оптимального варианта ТП составляют 2 уравнения в соответствии с технической нормой:

$$\sum_{i=1}^m T_{шт.КАЛ.i} = \sum_{i=1}^n T_{шт.i} + \frac{\sum_{i=1}^m T_{об.i}}{N}, \quad (2.44)$$

$$\sum_{i=1}^n T_{шт.КАЛ.i} = \sum_{i=1}^n T_{шт.i} + \frac{\sum_{i=1}^n T_{об.i}}{N}, \quad (2.45)$$

где  $m, n$  - число операций по вариантам.

Тогда критический размер партии изделий:

$$N_{\text{кр}} = \frac{\sum_{i=1}^m T_{\text{п.з.}i} \cdot \sum_{i=1}^n T_{\text{п.з.}i}}{\sum_{i=1}^n T_{\text{ш.}i} \cdot \sum_{i=1}^m T_{\text{ш.}i}}. \quad (2.46)$$

Если вариант ТП отличается большим уровнем автоматизации, то ему соответствует большая величина суммарного подготовительно-заключительного времени ввиду сложности подготовки оборудования, и одновременно - меньшая величина суммарного штучного времени.

Для ориентировочного расчета подготовительно-заключительного времени на всю программу можно использовать формулу:

$$T_{\text{п.з.}} = T_{\text{п.з.см}} \cdot C \cdot D_p, \quad (2.47)$$

где  $C$  - количество смен,

$D_p$  - количество рабочих дней на плановый период,

$T_{\text{пз см}}$  - сменная норма подготовительно-заключительного времени.

Подготовительно-заключительное сменное время определяется инструкцией по эксплуатации и выражает готовность оборудования на начало ТП (табл.2.9).

Таблица 2.9

Укрупненные нормы подготовительно-заключительного времени

Тип оборудования	$T_{\text{п.з. см}}$ , мин
Простая оснастка(паяльник)	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 выработки:

$$H_{\text{см}} = \frac{T_{\text{см}} - T_{\text{пз}}}{T_{\text{ш}}}, \quad (2.48)$$

где  $T_{\text{см}}$  - длительность смены (8.2 часа).

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

$$H_{CM} = \frac{T_{CM}}{T_{II}}, \quad (2.49)$$

При сборке на конвейерных линиях:

$$H_{CM} = \frac{\Phi_{CM}}{T_{OI}} = \frac{T_{CM} - (T_{OK} + T_{IP})}{T_O + T_B}. \quad (2.50)$$

## 2.5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СБОРОЧНО-МОНТАЖНЫХ РАБОТ

**Сборка** представляет собой совокупность технологических операций механического соединения деталей и ЭРЭ 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 производится с помощью печатных, проводных или тканых плат, одиночных проводников, жгутов и кабелей. Основу монтажно-сборочных 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 определяют применение такой формы в условиях 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 транспортировку, увеличению производственных площадей, повышению утомляемости рабочих при выполнении несложных однообразных действий.

Параллельность сборки - это одновременное выполнение частей или всего технологического процесса, что 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:

1) изготовление и сборка на многопредметных поточных линиях одновременно нескольких изделий;

2) совмещение на автоматизированных поточных линиях изготовления деталей с их сборкой.

Непрерывность ТП сборки предусматривает сокращение или полное устранение меж- или внутриоперационных перерывов. Достигается непрерывность рациональным выбором техпроцессов, соединением операций изготовления операций с их сборкой, включением в поток операций влагозащиты, контроля и регулировки.

Под принципом пропорциональности в организации производственного процесса понимается пропорциональная производительность в единицу времени на каждом рабочем месте, линии, участке, цехе. Это приводит к полному использованию имеющегося оборудования, производственных площадей и равномерному выпуску изделий. Улучшает пропорциональность рациональное деление конструкции на сборочные единицы и унифицированность ее элементов.

Принцип ритмичности предполагает выпуск в равные промежутки времени одинаковых или возрастающих количеств продукции. Ритмичность при сборке повышается за счет использования типовых и групповых процессов, их унификации и предварительной синхронизации операций.

Исходными данными для разработки ТП являются:

- технические условия на изделие (ТУ);
- комплект конструкторской документации на изделие (КД);
- программа выпуска изделия, N, шт;
- плановые сроки освоения производства, Tпл;
- отраслевые и внутризаводские типовые ТП (ОСТы и руководящий технический материал);
- технологические классификаторы деталей, каталоги оборудования и оснастки;
- материальные и трудовые нормативы;

Сборку ЭА проводят в три этапа.

На первом этапе (механическая сборка):

1) выполняют неразъемные соединения деталей и сборочных единиц с шасси, рамой, платой (сваркой, пайкой, развальцовкой, склеиванием и т.д.);

2) устанавливают крепежные детали (угольники, кронштейны, лепестки и т.д.);

3) выполняют разъемные соединения частей блоков;

4) закрепляют крупногабаритные элементы собственными креплениями (трансформаторы питания, разъемы и т.д.).

На втором этапе (электрический монтаж):

1) выполняют заготовительные операции (подготовка проводов, жгутов, кабелей, выводов ЭРЭ);

2) устанавливают навесные ЭРЭ и микросхемы на платы;

3) выполняют электрические соединения (монтаж) в соответствии с электрической принципиальной или электромонтажной схемами;

4) ведут межблочные соединения (жгутами, разъемами);

5) контролируют качество монтажа.

На третьем этапе (общая сборка изделия):

1) собирают шасси и переднюю панель;

2) устанавливают кожухи, закрепляют регулировочные элементы, ручки;

3) контролируют качество сборки и маркируют изделия;

4) выполняют регулировочно-настроечные работы.

По технологическим схемам сборки изделия выявляют число основных сборочные операции, определяют такт выпуска изделия:

$$T_B = \frac{60\Phi_D}{N}, [\text{мин} / \text{шт}], \quad (2.51)$$

где  $\Phi_D$  - годовой действительный фонд рабочего времени, н/ч,

$N$  - годовая программа выпуска, шт.

При разработке маршрутной технологии необходимо руководствоваться следующим:

1) при поточной сборке разбивка процесса на операции определяется тактом выпуска (ритмом сборки), причем время, затрачиваемое на выполнение каждой операции, должно быть равно или кратно ритму;

2) предшествующие операции не должны затруднять выполнение последующих;

3) на каждом рабочем месте должна выполняться однородная по характеру и технологически законченная работа;

4) после наиболее ответственных операций сборки, а также после регулировки или наладки предусматривают контрольные операции;

5) применяют более совершенные формы организации производства - непрерывные и групповые поточные линии, линии и участки гибкого автоматизированного производства.

Проектирование ТП сборочно-монтажных работ включает следующие этапы:

1. Разработка технологической схемы сборки изделия.

2. Расчет коэффициента сборности и показателя расчлененности сборки, выбор типа сборочного процесса.

3. Анализ типовых ТП и составление маршрута сборки.

4. Выбор технологического оборудования и нормирование 2-х либо 3-х вариантов ТП и расчет оптимального варианта по технико-экономическим показателям.

5. Выбор средств технологического оснащения или их проектирование.

6. Расчет режимов выполнения операций и коэффициента загрузки оборудования.

7. Определение квалификации и профессий исполнителей.

8. Выбор средств автоматизации и механизации внутрицехового транспортирования.

9. Организация производственного участка и составление планировки.

10. Оформление ТД на разработанный ТП.

Технологический процесс сборки представляет 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.

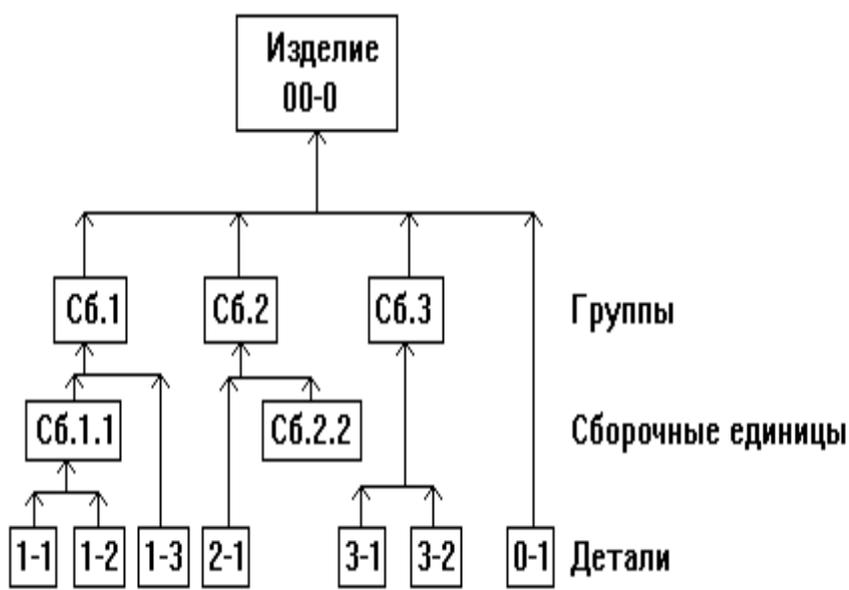
Сборочная единица является более сложным сборочно-монтажным элементом, состоящим из двух или более деталей, соединенных разъемным или неразъемным соединением. Характерным признаком сборочной единицы является возможность ее сборки отдельно от других сборочных единиц.

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

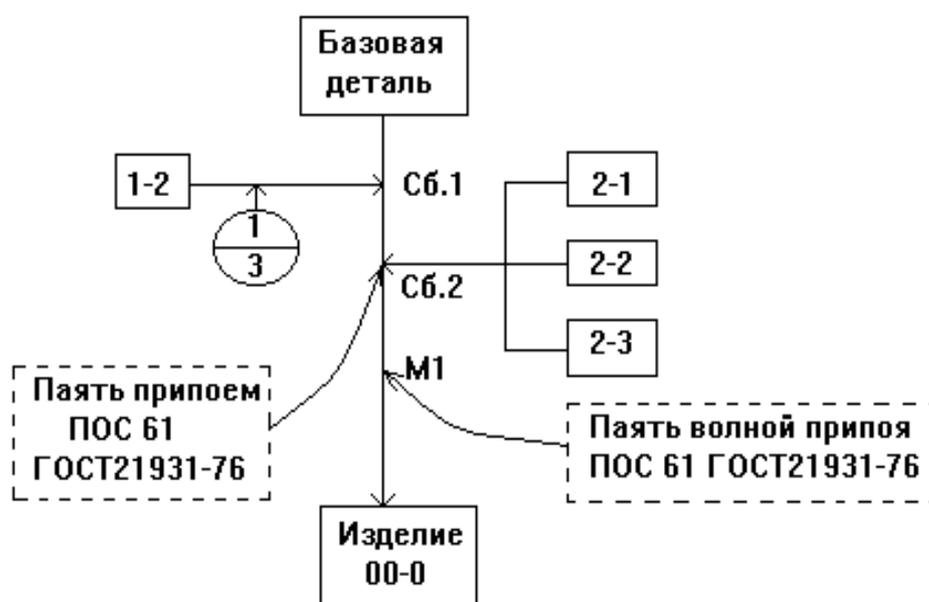
- схема составляется независимо от программы выпуска изделия на основе сборочных чертежей, электрической и кинематической схем изделия;
- сборочные единицы образуются при условии независимости их сборки, транспортировки и контроля;
- минимальное число деталей, необходимое для образования сборочной единицы 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 характеристик сборки превращает ее в технологическую схему сборки. Наиболее широко применяются схемы сборки "веерного" типа (рис. 2.7, а) стрелками показано направление сборки деталей и сборочных единиц. Достоинством схемы является ее простота и наглядность, но она не отражает последовательности сборки во времени.



а



б

Рис. 2.7. Схемы сборки: "веерного" типа (а) и с базовой деталью (б)

Схема сборки с базовой деталью (рис. 2.7, б) указывает временную последовательность сборочного процесса. При такой сборке необходимо выделить базовый элемент, т.е. базовую деталь или сборочную единицу. В качестве базовой 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.2.8, а), в котором указывают позицию детали по спецификации к сборочному чертежу (1), ее наименование (2) и обозначение (3) согласно конструкторского документа, а также количество деталей (4), подаваемых на одну операцию сборки. Размеры прямоугольника рекомендуются 50x15 мм. Допускается изображение нормализованных или стандартных крепежных деталей в виде круга диаметром 15 мм, в котором указывают позицию по спецификации и количество деталей (рис. 2.8, б).

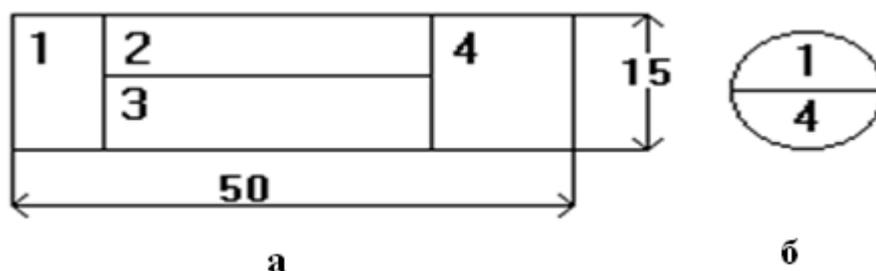


Рис. 2.8. Условные обозначения деталей и сборочных единиц (а), крепежных деталей (б)

Технологические указания по выполнению сборочных операций или электрического монтажа помещают в прямоугольник, ограниченный штриховой линией, а место его выполнения указывают наклонной стрелкой в точку, соответствующую данной операции. Так на технологических схемах сборки оговаривают характер выполнения неразъемных соединений, например, сварку, пайку, склеивание, запрессовку и т.д.; применяемый материал при сборке; характер операций монтажа элементов: волной припоя, и т.д.; характер операций влагозащиты изделия, контроля и маркировки (рис. 2.9).

Для определения количества устанавливаемых ЭРЭ и ИМС на платы в ходе выполнения сборочных операций необходим предварительный расчет ритма сборки:

$$r = \frac{\Phi_{\text{д}}}{N}, \text{ мин/шт,} \quad (2.52)$$

где  $\Phi_{\text{д}}$  - действительный фонд времени за плановый период,

$N$  - программа выпуска.

Количество элементов, устанавливаемых по  $i$ -й операции, должно учитывать соотношение:

$$0.9 < T_i < 1.2, \quad (2.53)$$

где  $T_i$  - трудоемкость  $i$ -й операции сборки.

Разработка технологических схем сборки способствует дифференциации процессов сборки, что значительно сокращает длительность производственного цикла.

После выбора оптимальной схемы сборочного состава из сравниваемых вариантов производится расчет следующих коэффициентов:

1) средняя полнота сборочного состава (количество сборочных единиц на каждой ступени сборки):

$$E_{\text{CP}} = \frac{E}{i-1}, \quad (2.54)$$

где  $E$  - общее количество сборочных единиц в схеме сборочного состава,

$i$  - показатель степени сложности сборочного состава, равный количеству ступеней сборки изделия.

$$E = \sum_{i=1}^{l=i-1} m_i, \quad (2.55)$$

где  $m_i$  - число групп, подгрупп, сборочных единиц.

2) показатель расчлененности данного процесса сборки  $M$  рассчитывается:

$$M = \frac{n}{E}, \quad (2.56)$$

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

3) коэффициент средней точности сборочных работ:

$$K_{\text{CP.CB}} = \frac{kq}{E}, \quad (2.57)$$

где  $k$  - показатель качества точности,

$q$  - число сборочных единиц данного качества точности;

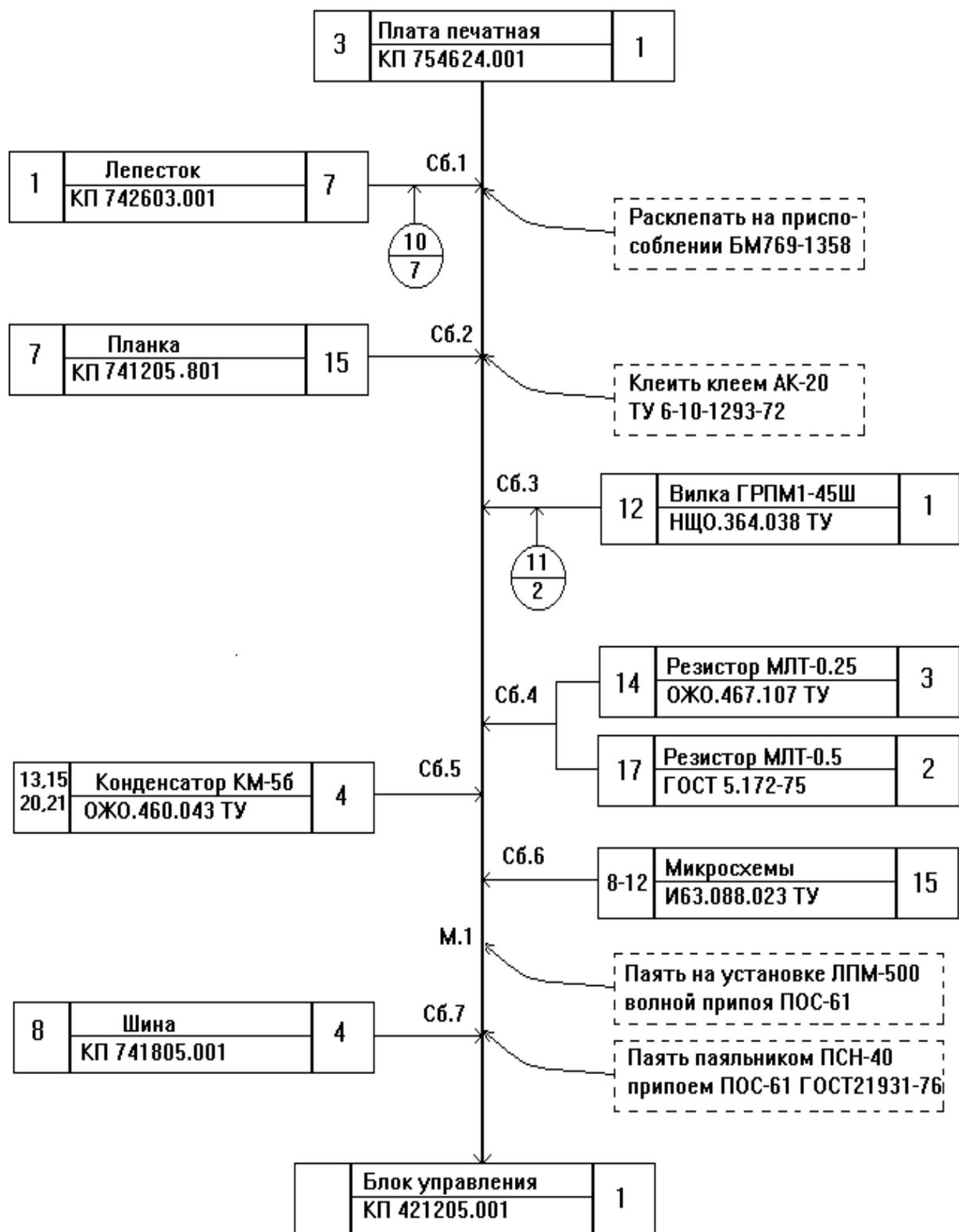


Рис. 2.9. Технологическая схема сборки блока с базовой деталью

4) коэффициент сборности изделия:

$$K_{\text{СБ}} = \frac{E_{\text{СБ}}}{E_{\text{СР}} + D_{\text{СР}}}. \quad (2.58)$$

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

## 2.6. 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 установлены следующие стадии разработки ТД:

- на этапе “эскизного и технического проекта КД” - ТД соответствует стадии «предварительный проект» с присвоением литеры “П”,
- рабочей документации на стадии “опытный образец” присваивается литера “О”,
- на стадии “установочная серия” - литера “А”,
- массового или серийного производства - литера “Б”.

К ТД относятся графические и текстовые документы, назначение и содержание которых приведены в табл.2.10. При серийном производстве и маршрутно-операционном типе технологического процесса комплект ТД включает:

- 1) титульный лист (ГОСТ 3.1105-84);
- 2) ведомость технологических документов (ГОСТ 3.1106-84);
- 3) комплектовочную карту (ГОСТ 3.1106-84);
- 4) маршрутные карты (ГОСТ 3.1105-84 формы 2 и 2а);
- 5) ведомость оснастки (ГОСТ 3.1105-84 формы 9 и 9а);
- 6) ведомость операции контроля (ГОСТ 3.1105-84 форма 3).

Виды и назначение основных технологических документов

Вид документа	Содержание и назначение документа
Маршрутная карта, МК	Описание технологического процесса 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 технологического процесса, правил эксплуатации средств технологического оснащения, физических и химических явлений, возникающих на отдельных операциях
Карта эскизов, КЭ	Эскизы, схемы и таблицы, необходимые для выполнения технологического процесса, 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 инструмента, необходимых для выполнения технологического процесса
Ведомость технологических документов, ВТД	Состав и комплектность технологических документов, необходимых для изготовления изделия
Операционная карта, ОК	Описание технологической операции с указанием переходов, данных о технологическом оборудовании, оснастке, инструменте 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, инструменте и требований к контролируемым параметрам изделия

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

- 1) титульный лист (ГОСТ 3.1105-84);
- 2) ведомость технологических документов (ГОСТ 3.1106-84);
- 3) комплектовочную карту (ГОСТ 3.1106-84);
- 4) маршрутные карты (ГОСТ 3.1105-84 формы 2 и 2а);
- 5) операционную карту сборки (ГОСТ 3.1407-84);
- 6) карту эскизов (ГОСТ 3.1105-84 формы 5 и 5а);
- 7) ведомость оснастки (ГОСТ 3.1105-84 формы 9 и 9а);
- 8) операционную карту контроля (ГОСТ 3.1502-84).

Технологическая документация разрабатывается в виде комплекта документов. Виды технологических документов 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 следующими способами:

- 1) машинописным с шагом письма 2,54 или 2,6 мм,
- 2) рукописным, черной тушью, с высотой букв и цифр по ГОСТ 2.304-81.

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 проводить в технологической последовательности выполнения операций, переходов, приёмов 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.

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 должность и подпись лица, согласовавшего комплект документов от разработчика (слева) и утвердившего документ (справа).

Далее прописными буквами записывают: "КОМПЛЕКТ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ" или "КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ", ниже строчными - название технологического процесса, например:

### **"КОМПЛЕКТ ДОКУМЕНТОВ"**

на технологический процесс сборки

Ниже слева указывают должность и подпись лиц, подтверждающих согласование комплекта документов с подразделениями предприятия, справа - ответственных за разработку комплекта документов. В нижней части ТЛ указывают номера акта и дату внедрения технологического процесса в производство, например: АКТ N 14-87 от 15.05.99.

Маршрутная карта (МК) является одним из важнейших технологических документов комплекта ТД, его составной и неотъемлемой частью, 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 маршрутных карт устанавливает ГОСТ 3.1118-82. При маршрутном и маршрутно-операционном описании технологического процесса МК является одним из основных документов, в котором описывается весь процесс в технологической последовательности выполнения операций. При операционном описании технологического процесса 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 (смотри расшифровку в табл.2.11) и проставляются перед номером строки.

Таблица 2.11

Содержание символов, используемых для описания МК

Обозначение символа	Содержание информации, вносимой в графы МК, расположенные в строке
1	2
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, при необходимости, переноса

информации на следующие строки. При операционном описании техпроцесса номер проставляют в начале строки. Информацию на строках с символом Т записывают в следующей последовательности: приспособления, вспомогательный, режущий, слесарно-монтажный, специальные инструменты, 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, ГУИР.ХХХХХХ.ХХХ (5), приспособление для гибки. Графы маршрутных карт заполняют в соответствии с табл. 2.12.

Таблица 2.12

Кодирование информации в графах маршрутной карты

Служебные символы графы	Условное обозначение графы	Содержание информации в графе
1	2	3
МО1	-	Наименование, сортамент, размер и марка материала, обозначение стандарта, технических условий. Например: лист х/к 1x1000x200 ГОСТ3680-57/08 КП ГОСТ 16523-70.
МО2	КОД	Код материала по классификатору
МО2	ЕВ	Код единицы величины (массы, длины, площади) детали, заготовки, материала по классификатору.
МО2	МД	Масса детали по конструкторскому документу.
МО2	ЕН	Единица нормирования, на которую установлена норма расхода материала или норма времени, например, 1, 10, 100, 1000.
МО2	Н.расх.	Норма расхода материала.
МО2	КИМ	Коэффициент использования материала.
МО2,МО3	Код загот.	Код заготовки по классификатору. Допускается указывать вид заготовки (отливка, прокат и т. Д.)
МО2,МО3	Профиль и размеры	Профиль и размеры исходной заготовки, например, лист 1x100x1000.
МО2,МО3	КД	Количество деталей, изготавливаемых из одной заготовки.
МО2,МО3	МЗ	Масса заготовки.

1	2	3
А, В	Цех, уч., РМ	Номера (коды) цеха, участка, рабочего места, где выполняется операция.
А, В	Опер.	Номер операции в технологической последовательности (включая контроль и перемещение) :005;010;015 и т.д.
А, В	Код, наим. операции	Код операции по технологическому классификатору, наименование операции.
А, Г	Обознач. документа	Обозначение документа, инструкций по охране труда, применяемых при выполнении данной операции.
Б, Д	Код, наимен.обору д.	Код оборудования по классификатору, краткое наименование.
Б, Е	СМ	Степень механизации (код).
Б, Е	Профиль	Код профессии по классификатору ОК ПДТР (прил.9).
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	Объём производственной партии в штуках.
Б,Е	Кпп	Коэффициент штучного времени при многостаночном обслуживании, зависящий от числа обслуживаемых станков М - 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	Наименов. детали, сб.единицы, материала	Наименование деталей, сборочных единиц, материалов детали, применяемых при выполнении операции

1	2	3
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	Нрасх.	Норма расхода материалов

При заполнении МК и ОК руководствуются следующими правилами и требованиями:

- именовать операции кратко, без возможности других толкований;
- начиная с глагольного существительного (например, Установка ЭРЭ на печатные платы),
- 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 главный предмет и действие, а затем указываются предметы и действия, посредством которых достигается основная цель;
- все операции, включая регулировочные и контрольные, вносятся в ТД в порядке их выполнения.

Контроллер												
В	Цех	Уч	РМ	Опер	Код, наименование операции							
Г Обозначение документа												
Д Код оборудования					Наименование, модель оборудования							
Е	СМ	Проф.	Р	УТ	КР	КОИД	ЕН	ОП	Кшт.	Тп.з.	Тшт.	
ЛМ Наименование детали, сборочной единицы или материала												
НМ	Обозначение, код				ОПП	ЕВ	ЕН	КИ	Н.расх			
01												
В02					1	005	<b>0200 Входной контроль деталей</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	1,0	5	5,0	
Т11	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 ОМ-1971											
Е16	03	18596	3				1	1	1,0	10	13,25	
Т17	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 ОМ-1971											
Е22	03	14544	4				1	1	1,0	5	7,56	
О23	Установка и пайка припоем ПОС-61 ГОСТ 21931-76 резисторов R50...R65,											

## **Глава 3. ТОЧНОСТЬ И НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

### **3.1 ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ПОГРЕШНОСТИ И ЗАКОНЫ ИХ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ**

Производственные погрешности выходных параметров изделий следует рассматривать как следствие влияния нестабильности технологических процессов изготовления деталей, электрорадиоэлементов, а также технологических операций сборки и монтажа: пайки, сварки, герметизации, термотренировки и других. Под производственными погрешностями понимают отклонения параметров изделий от номинальных данных, указанных в технических условиях 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 невозможно.

Систематической называется такая погрешность, которая в процессе исследований остаётся постоянной или же изменяется по определённому 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 к 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 установок;
- 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 технологическом процессе 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;

то погрешности распределяются по закону нормального распределения Гаусса:

$$y(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{(x-M_x)^2}{2\sigma^2}}, \quad (3.1)$$

где  $y(x)$  - плотность распределения,

$x$  - отклонение от центра группирования,

$\sigma$  - среднее квадратичное отклонение.

Площадь под кривой Гаусса составляет 100% всех значений случайной величины. При этом односигмовые границы соответствуют точкам перегиба кривой Гаусса с площадью 0.6826, двухсигмовые - 0.9544. Между границами  $M(x)-\sigma$  и  $M(x)+\sigma$  находится 68.28% или 2/3 наблюдаемых значений.

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.3.1)

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

Математическое ожидание случайной величины для дискретных чисел

$$M(x) = \sum_{i=1}^k x_i \frac{n_i}{N}, \quad (3.2)$$

где  $n_i/N$  - частость значений,  $k$  - число интервалов ряда распределения.

Для отображения дискретных изменений значений параметра  $x$  строится гистограмма и полигон распределения. Для этого по оси абсцисс откладывают отрезки, соответствующие ширине интервала  $s$ , а по оси ординат - частоту, т.е. число значений, попавших в данный интервал (рис. 3.2 ).

Обычно принимают, что число интервалов:

$$K=5\lg N, \quad (3.3)$$

где  $N$  - число значений.

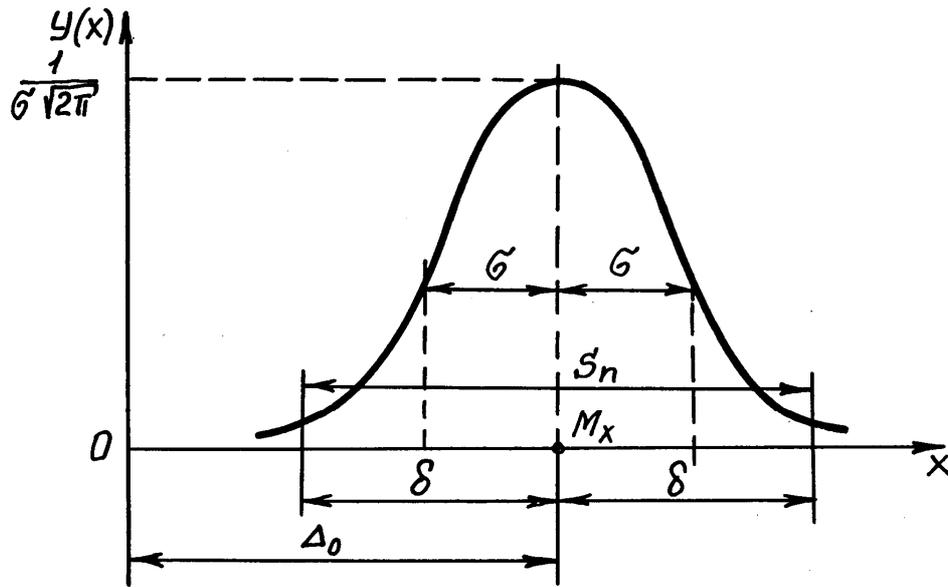


Рис. 3.1 Кривая распределения нормального закона

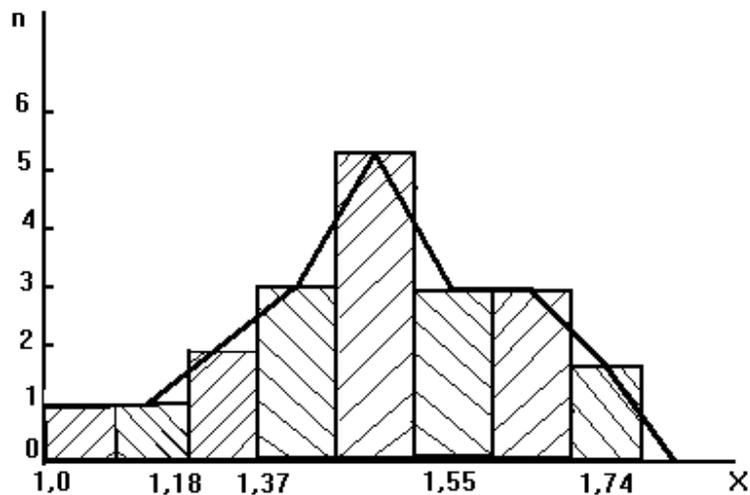


Рис. 3.2 Гистограмма и полигон ряда распределения

Для непрерывных случайных чисел математическое ожидание:

$$M(x) = \int_{-\infty}^{+\infty} x \cdot y(x) \cdot dx. \quad (3.5)$$

Среднее квадратичное отклонение: для дискретных чисел

$$\sigma(x) = \sqrt{\sum_{i=1}^k [x_i - M(x)]^2 n_i / N}, \quad (3.6)$$

для непрерывных чисел

$$\sigma(x) = \sqrt{\int_{-\infty}^{+\infty} [x_i - M(x)]^2 \cdot y(x) \cdot dx} . \quad (3.7)$$

Односигмовые границы соответствуют точкам перегиба кривой Гаусса. Половина поля допуска на параметр

$$\delta = 3\sigma . \quad (3.8)$$

Полное поле рассеяния на уровне вероятности 0.9973:

$$S_n = 2\delta = 6\sigma . \quad (3.9)$$

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:

$$S_n \leq 2\delta(TУ) . \quad (3.10)$$

Настроенность технологического процесса определяют с помощью коэффициента технологической точности Т и коэффициента смещения от середины поля допуска Е:

$$T = \frac{2\delta(TУ)}{S_n} = \frac{\delta(TУ)}{\delta} , \quad (3.11)$$

$$E = \frac{M(x) - B_{CP}(TУ)}{\delta(TУ)} , \quad (3.12)$$

где  $B_{CP}(TУ)$  и  $\delta(TУ)$  - номинальное значение параметра и половина поля допуска по техническим условиям.

Технологический процесс считается настроенным при  $T > 0.95$  и  $E < 0.05$ , при этом случае брак не превысит 1%.

Нормальному закону распределения в производстве интегральных микросхем (ИМС) подчиняются процессы нанесения резистивных и диэлектрических слоёв 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 вероятность того, что случайная величина  $\chi^2$  принимает значение, большее заданного

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^k \left\{ \frac{(n_i^| - n_i)}{n_i^|} \right\}^2 , \quad (3.13)$$

где  $n_i$  и  $n_i^|$  - практические и теоретические частоты распределения.

Для распределения  $P(\chi^2)$  составлены таблицы, дающие возможность по значению  $\chi^2$  и числу степеней свободы  $m$  найти вероятность того, что  $\chi^2$  превзойдет заданное значение  $\chi_0^2$ .

Число степеней свободы определяется как

$$m = k^l - f - 1, \quad (3.14)$$

где  $k^l$  - число объединённых ( $n_i > 5$ ) интервалов,

$f$  - число параметров закона распределения.

Границей между случайным и существенным расхождением берётся 5% уровень значимости, т.е. при  $P(x^2) > 0.05$  расхождение является случайным и предполагаемый закон распределения описывает опытные данные. В противном случае расхождение признается существенным и для описания статистических данных выбирается другой закон распределения. При использовании критерия  $P(x^2)$  число данных выборки должно быть больше 30, но не больше 300-500.

Если распределение производственных погрешностей значительно отличается от нормального, то принимается обобщенный закон типа А, который математически выражается равенством :

$$Y_A(X) = y(x) - \frac{r_3}{6} y^3(x) + \frac{r_4 - 3}{24} y^4(x), \quad (3.15)$$

где  $y(x)$  - плотность распределения нормального закона,

$r_3, r_4$  - основные моменты 3-го и 4-го порядка,

$y^3(x), y^4(x)$  - производные 3-го и 4-го порядка.

Обобщённый закон распределения типа А (рис. 3.3) наряду со средним значением  $M(x)$ , средним квадратическим отклонением  $\sigma$ , характеризуется мерой крутости  $\tau$  и мерой косости  $\alpha$ , которые равны:

$$\tau = r_4 - 3 / \alpha = r_3. \quad (3.16)$$

Обобщённый закон типа А наиболее часто встречается в производстве гибридных пленочных ИМС. Так погрешности параметров тонкопленочных резисторов и конденсаторов, измеренных за сравнительно большой период их производства, подчиняются этому закону. Примером также может служить 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:

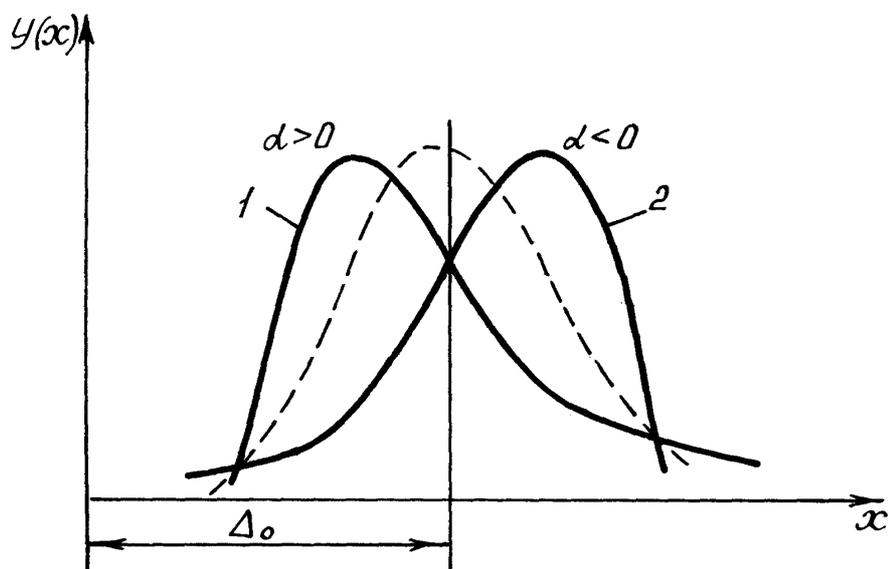
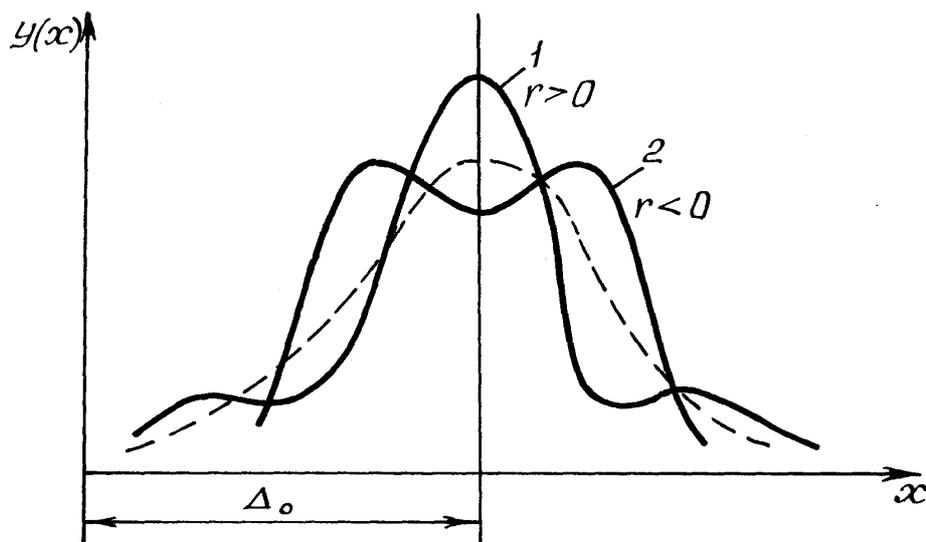


Рис. 3.3 Кривые распределения обобщенного закона типа А:  
 а) с положительной 1 ( $\tau > 0$ ) и отрицательной 2 ( $\tau < 0$ ) крутостью,  
 б) с положительной 1 ( $\alpha > 0$ ) и отрицательной 2 ( $\alpha < 0$ ) косостью

$$\gamma_h = \frac{\sum_{i=1}^k \frac{(x_i - a_0)^h}{c} n_i}{N}. \quad (3.17)$$

При  $c=1$  и  $h=1$   $\gamma_1=M(x)$ .

Центральным моментом порядка  $h$  называется сумма произведений отклонений случайной величины  $x_i$  относительно среднего значения  $M(x)$  в

степени  $h$  на соответствующую частность:

$$\mu_h = \sum_{i=1}^k \frac{[x_i - M(x)]^h}{c} \cdot \frac{n_i}{N}. \quad (3.18)$$

При  $c=1$  и  $h=2$   $\mu_2 = \sigma^2$ .

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

$$r_h = \mu_h / \sigma^h. \quad (3.19)$$

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

$$y(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < a \\ 1 / (b - a), & \text{при } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{при } x > b \end{cases} \quad (3.20)$$

где  $a$  и  $b$  - границы изменения значений систематической погрешности (рис. 3.4).

Математическое ожидание

$$M(x) = (a + b) / 2, \quad (3.21)$$

дисперсия

$$D(x) = (b - a)^2 / 12. \quad (3.22)$$

Полное поле рассеяния погрешности при этом равно

$$S_b = 3.464 \cdot \sigma. \quad (3.23)$$

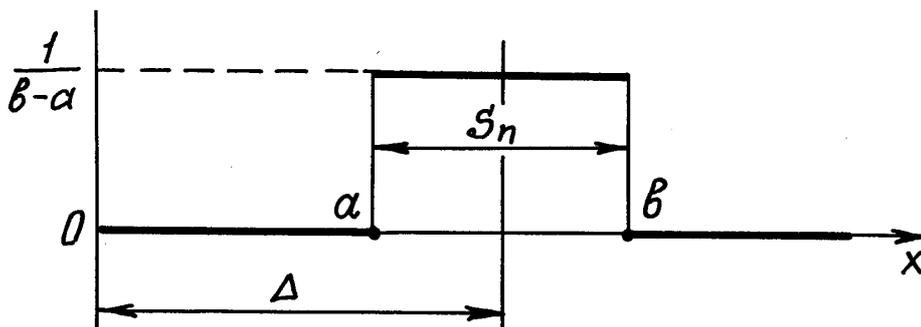


Рис. 3.4 Равновероятностное распределение

### 3.2 МЕТОДЫ АНАЛИЗА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ

Для анализа производственных погрешностей применяют два метода: статистический и аналитический.

**Статистический метод** анализа производственных погрешностей основан на обработке достаточно большого количества наблюдений с помощью правил математической статистики. Он позволяет определить 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.

Статистический метод проводится в три этапа, на первом 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, заполнение протоколов испытаний, которые для удобства вычисления характеристик ряда распределения разбивают на интервалы.

На третьем этапе по известным формулам рассчитывают  $M(x)$ ,  $\sigma_s$ ,  $\delta$ ,  $S_4$ ,  $T$ ,  $E$  и в конечном итоге определяют настроенность технологического процесса.

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 приведена на рис. 3.5.

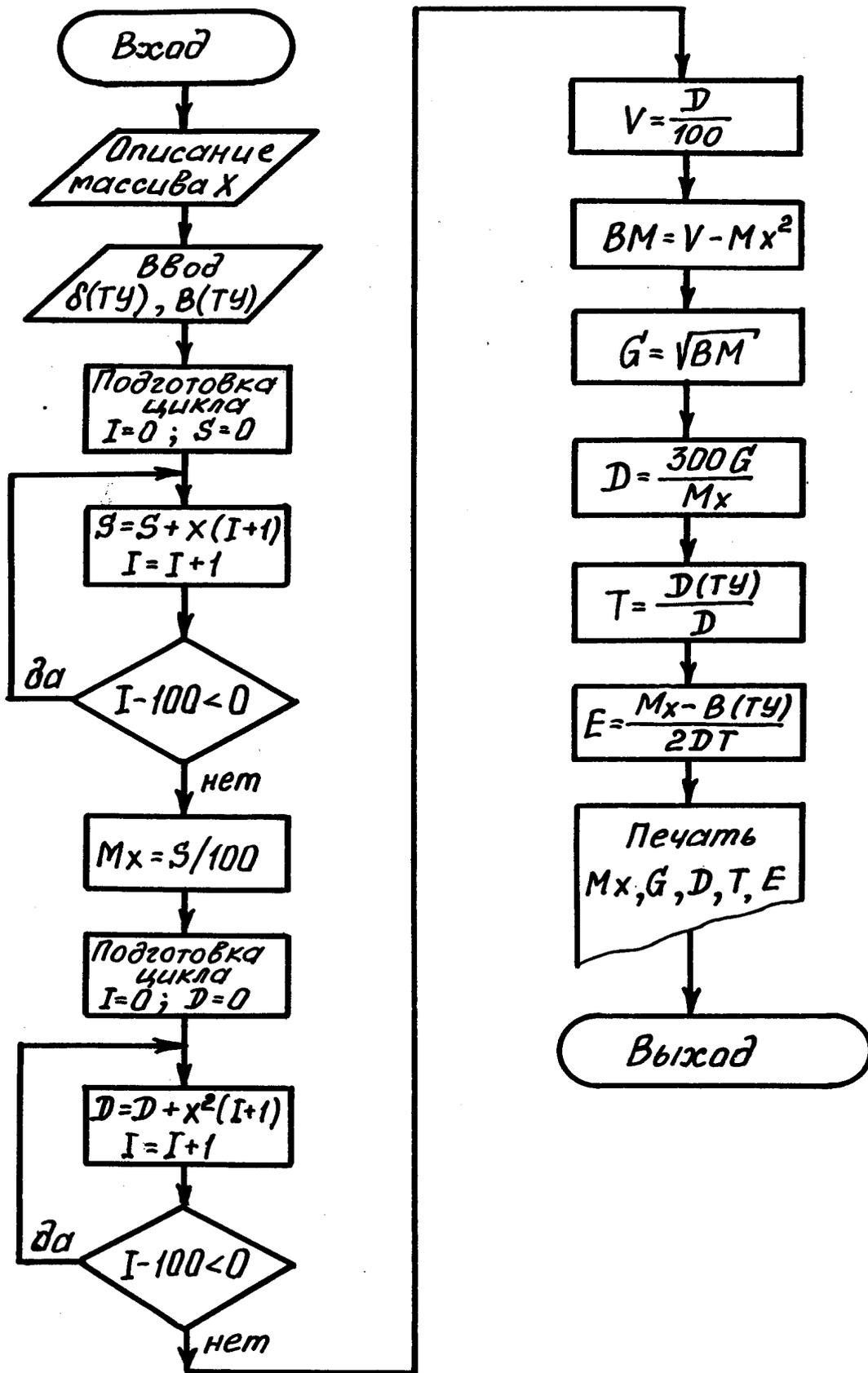


Рис. 3.5 Алгоритм расчета технологической точности изготовления

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 технологического процесса.

Для оценки влияния погрешностей параметров отдельных деталей на величину производственной погрешности выходного параметра сборочных единиц используют выражение выходного параметра в общем виде:

$$\Pi = q_1, q_2, q_3, \dots, q_k, \quad (3.24)$$

где  $\Pi$  - выходной параметр сборочной единицы;  $q_i$  - параметры деталей, входящих в сборку.

После дифференцирования выражения (3.24) и замены дифференциалов конечными приращениями получим

$$\Delta\Pi = \sum_{i=1}^k \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \Delta q_i. \quad (3.25)$$

где  $k$  - количество деталей, участвующих в сборке изделия.

Но на практике удобнее пользоваться не абсолютными значениями параметров, а относительными. Для этого уравнение (3.25) разделим на уравнение (3.24) и, произведя некоторые преобразования, получим

$$\frac{\Delta\Pi}{\Pi} = \sum_{i=1}^k A_i \frac{\Delta q_i}{q_i}, \quad (3.26)$$

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

$$A_i = \frac{\partial\Pi}{\partial q_i} \frac{q_i}{\Pi}. \quad (3.27)$$

Используя уравнение (3.26), можно однозначно определить величину производственной погрешности выходного параметра при заданных погрешностях параметров элементов, если известны величины  $A_i$ . Для расчета коэффициентов влияния широко используют расчетный и статистические методы (малых приращений, корреляционный, планирования эксперимента и регрессивного анализа).

Определив тем или иным способом коэффициенты влияния, вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра по формулам:

$$M\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i \cdot M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \quad (3.28)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}, \quad (3.29)$$

где  $M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$  - среднее значение относительной погрешности параметра элемента,  
 $\delta\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)$  - половина поля допуска на параметр.

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, смещения партий, выборки и т.п. практические кривые распределения отклоняются относительно значений, заложенных в технических условиях (ТУ) на элементы. Количественно эти отклонения оцениваются коэффициентами относительной асимметрии  $b_i$  и рассеяния  $k_i$ :

$$b_i = \frac{Mx_i - Mx_i(\text{ТУ})}{\delta_i(\text{ТУ})}, \quad (3.30)$$

$$k_i = \frac{Sn_i}{2\delta(\text{ТУ})}, \quad (3.31)$$

где  $\delta_i(\text{ТУ})$  - половина поля допуска на параметр, определяемая по ТУ,

$Sn_i$  - 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 определяется закон распределения производственных погрешностей (при помощи критериев Пирсона или Колмогорова) и его параметры.

Используя значения величин  $b_i$  и  $k_i$ , вычисляют среднее значение и поле рассеяния относительной погрешности выходного параметра:

$$M\left(\frac{\Delta \Pi}{\Pi}\right) = \sum_{i=1}^k A_i \cdot b_i \cdot M\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right), \quad (3.32)$$

$$\delta\left(\frac{\Delta \Pi}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \cdot k_i^2 \cdot \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}, \quad (3.33)$$

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

$$\Pi = \frac{Q}{H}, \quad (3.34)$$

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  $i$ -того параметра может быть больше 1, то коэффициенты влияния могут быть определены по формуле

$$A = \frac{mQ(q_i)}{Q} - \frac{nH(q_i)}{H}, \quad (3.35)$$

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 технологического процесса изготовления. Так, корреляционные связи параметров ламп ( $S$  и  $r_i$ ), катушек индуктивности ( $L$  и  $R$ ), подстроечных конденсаторов переменной емкости ( $C_{\min}$  и  $C_{\max}$ ), транзисторов ( $h_{11}$ ,  $h_{21}$ ) и другие. Корреляционная связь характеризуется формой и теснотой связи. Численными характеристиками тесноты связи являются следующие: при линейной зависимости - коэффициент корреляции  $r$ , при нелинейной - корреляционное отношение  $\zeta$ .

Величина коэффициента корреляции может изменяться от  $-1$  до  $+1$  и определяется по формуле

$$r = \frac{\gamma_{11} - M(x) \cdot M(y)}{\sigma_x \sigma_y}, \quad (3.36)$$

где  $\gamma_{11}$  - начальный момент связи, который равен

$$\gamma_{11} = \sum_{i=1}^N x_i \cdot y_i / N. \quad (3.37)$$

Среднее квадратичное отклонение

$$\sigma_k = \frac{1 - r^2}{\sqrt{N}}. \quad (3.38)$$

Линейное уравнение регрессии

$$\left. \begin{aligned} X - M(x) &= p_{x/y} (M(y) - y) \\ Y - M(y) &= p_{y/x} (M(x) - x) \end{aligned} \right\}, \quad (3.39)$$

где коэффициенты регрессии

$$p_{x/y} = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y}, p_{y/x} = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (3.40)$$

Проверка надежности найденной корреляционной зависимости осуществляется по условию

$$|r| \cdot \sqrt{N - 1} > 3 \quad (3.41)$$

или по номограмме (рис 3.6).

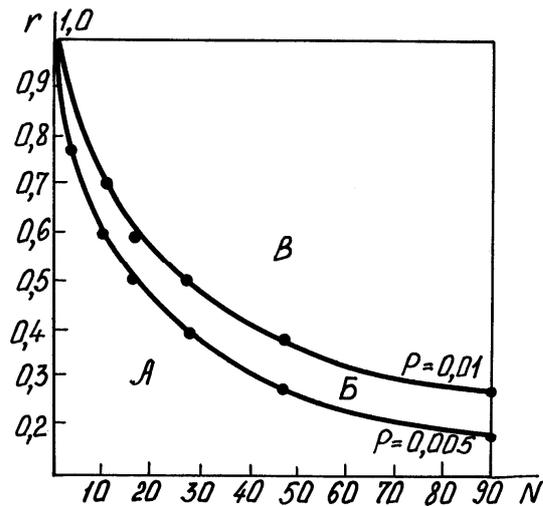


Рис. 3.6. Номограмма для проверки достоверности коэффициентов корреляции

При наличии корреляционной связи между параметрами отдельных элементов (индуктивностей, транзисторов, микросхем и т.д.) ее учитывают введением поправочных коэффициентов в общее уравнение погрешности выходного параметра сборочной единицы:

$$\sigma\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 k_i^2 \sigma^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + \sum_{i \neq j} 2r_{ij} A_i k_i \sigma\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) A_j k_j \sigma\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)}. \quad (3.42)$$

Если сборочную единицу характеризует не один выходной параметр, а "к", то точность ее определяется системой из к уравнений (3.42).

$$\left\{ \begin{aligned} \sigma\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right) &= \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 k_i^2 \sigma^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + \sum_{i \neq j} 2r_{ij} A_i k_i \sigma\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) A_j k_j \sigma\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)} \\ \sigma\left(\frac{\Delta\Pi_k}{\Pi_k}\right) &= \sqrt{\sum_{i=1}^l A_i^2 k_i^2 \sigma^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) + \sum_{i \neq j} 2r_{ij} A_i k_i \sigma\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right) A_j k_j \sigma\left(\frac{\Delta q_j}{q_j}\right)} \end{aligned} \right. \quad (3.43)$$

### Пример.

Определить допуск на коэффициент усиления блока УНЧ при следующих условиях:

$$\text{коэффициент усиления } K_y = \frac{h_{21} \cdot R_n}{h_{11} + h R_n};$$

$$\text{эквивалентное сопротивление нагрузки } R_n = \frac{R3 \cdot R5}{R3 + R5};$$

$$R3 = 3\text{к}; R5 = 6\text{к}; h_{21} = 100; h_{11} = 4,5\text{к}; h = 0,5;$$

$$R_n = \frac{36}{9} = 4\text{к}; \left(\frac{R3}{R3}\right) = \left(\frac{R5}{R5}\right) = 10\%; \left(\frac{h_{21}}{h_{21}}\right) = 20\%$$

Рассчитываем коэффициент влияния параметра  $h_{21}$ :

$$Ah_{21} = \frac{k}{h_{21}} \frac{h_{21}}{k} = \frac{R_H}{h_{11} + hR_H} \frac{h_{21}(h_{11} + hR_H)}{h_{21}R_H} = 1$$

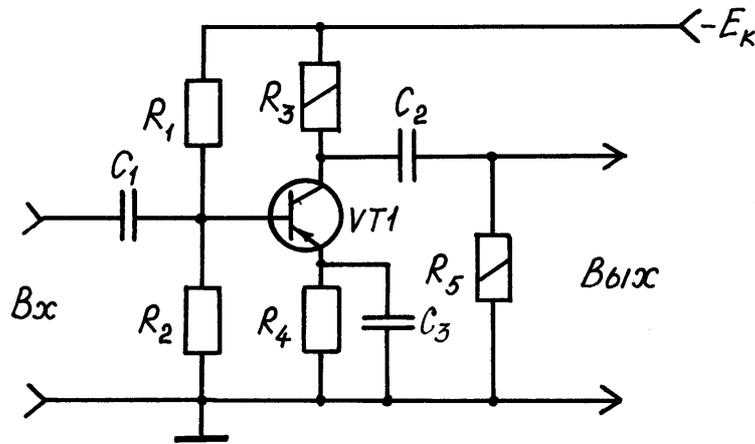


Рис.3.7. Схема усилителя низкой частоты

Рассчитываем коэффициент влияния параметра  $R_H$ :

$$AR_H = \frac{h_{21}(h_{11} + hR_H) - h_{21}R_H h R_H (h_{11} + hR_H)}{(h_{11} + hR_H) h_{21}R_H} = \frac{h_{11}}{(h_{11} + hR_H)} = \frac{4.5}{4.5 + 0.5 \cdot 2.0} = 0.8.$$

Рассчитываем коэффициент влияния параметра  $h_{11}$ :

$$Ah_{11} = \frac{-h_{21}R_H}{(h_{11} + hR_H)} \frac{h_{11}(h_{11} + hR_H)}{h_{21}R_H} = \frac{-h_{11}}{h_{11} + hR_H} = -0.8.$$

Определяем допуск на коэффициент усиления:

$$\delta\left(\frac{\Delta K_y}{K_y}\right) = \sqrt{\sum_{i=1}^k A_i^2 \left(\frac{q_i}{q_i}\right)^2 + 2r_{ij} A_i A_j \left(\frac{q_i}{q_i}\right) \left(\frac{q_j}{q_j}\right)} =$$

$$\sqrt{(0.8)^2 (0.1+0.1)^2 + 1^2 \cdot 0.2^2 + (0.8)^2 \cdot 0.2^2 - 2 \cdot 0.9 \cdot 1 \cdot 0.8 \cdot 0.2 \cdot 0.2} = 0.183.$$

### 3.3. ТОЧНОСТЬ И УСТОЙЧИВОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Все технологические операции производства блоков и изделий ЭА по влиянию на выходные параметры изделий условно разбиваются на три основные группы:

- 1) **активные формирующие** - в процессе которых формируется данный показатель блока (сборочно-монтажные операции);
- 2) **активные преобразующие** - в результате которых изменяются качественные показатели выходных параметров блока (настройка, заливка, пропитка, обволакивание, термотренировка);
- 3) **пассивные операции** - которые не влияют на количественные показатели выходных параметров (покраска, маркировка, контроль).

Технологический процесс производства функциональных блоков и изделий можно представить в виде структурной схемы, состоящей из ряда технологических операций: формирующих, преобразующих и пассивных (рис. 3.8).

На вход первого формирующего звена поступают серии компонентов и деталей со своими параметрами  $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ . На выходе его из совокупности этих параметров образуются новые показатели  $y_{11}, y_{21}, \dots, y_{j1}$ , которые после преобразующего звена приобретают значения  $y_{12}; y_{22}; y_{32}; \dots, y_{i2}$  и т.д.

Основная задача анализа точности технологического процесса 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 техническим условиям (ТУ) и задается допуском.

Обычно функциональная точность аппаратуры задана, а функциональная точность блоков и сборочных единиц рассчитывается исходя из соотношения

$$\delta N_{\text{ТУ}} \leq f(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \dots, \delta_i, \dots), \quad (3.44)$$

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 технологического процесса означает, что все изменения параметров изделия укладываются в поле допуска по ТУ. Но так как технологические

процессы не могут быть абсолютно устойчивыми, то кривые распределения параметров могут иметь вид, отличный от нормального закона распределения.

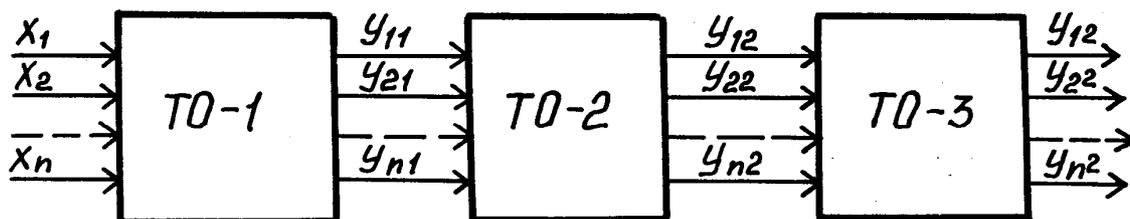


Рис. 3.8 Схема многооперационного технологического процесса

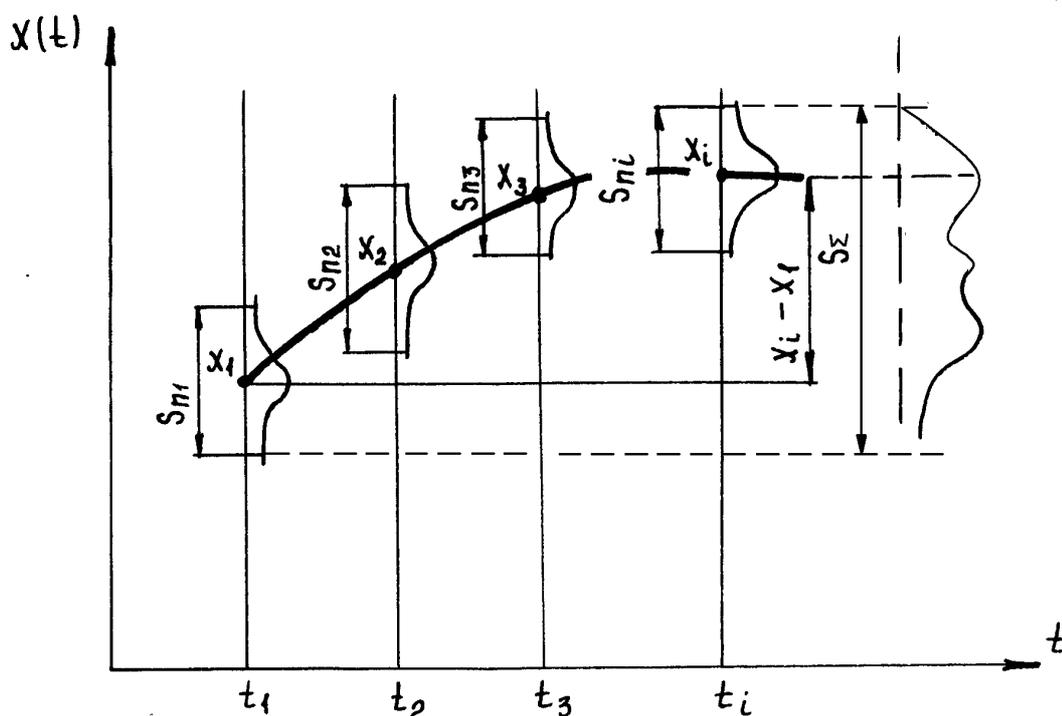


Рис. 3.9. Точностная диаграмма технологического процесса

Для оценки устойчивости технологических процессов 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  $M(x)$ , среднего квадратичного отклонения и предельных отклонений  $S_{ni}$ . Соединяя последовательно точки, получаем временную функцию изменения параметра изделия (рис. 3.9).

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

$$T_y = \sigma_I / \sigma_s, \quad (3.45)$$

где  $\sigma_I$  - среднеквадратическое значение в данный момент  $t_1, t_2, \dots, t_i$ ;  $\sigma_s$  -общее среднеквадратическое отклонение.

Процесс остается устойчивым, если  $T_y > 0.95$  и стремится к 1. Дополнительными характеристиками устойчивости процесса являются число наладок  $N$  за наблюдаемый период времени  $T$  и коэффициент длительности периода между наладками:

$$T_H = T / N. \quad (3.36)$$

Коэффициент  $T_H$  характеризует способность процесса длительно сохранять нормальное функционирование без наладок.

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 объёма 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. необходима математическая модель каждой технологической операции.

### 3.4. 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 величина.

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 (неслучайную) функцию.

В качестве аргумента в теории случайных функций используют чаще всего время  $t$ .

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

Предположим, что в результате опытов получено  $n$  реализаций независимой функции (рис. 3.10). 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  $t_1, t_2, \dots, t_k$ :

$$\begin{cases} \bar{X}(t_1) = \sum_{i=1}^n x_I(t_1) / n \\ \bar{X}(t_2) = \sum_{i=1}^n x_I(t_2) / n \\ \bar{X}(t_3) = \sum_{i=1}^n x_I(t_3) / n \end{cases}, \quad (3.47)$$

где  $n$  - общее число функциональных блоков, выходные параметры которых были измерены в сечении:  $t_1, t_2, \dots, t_k$ ,

$x$  - выходной параметр функционального блока, измеренный в сечении  $t_1, t_2, \dots, t_k$ .

Следовательно, математическое ожидание случайной величины в общем случае зависит от выбранного сечения  $t$ , т.е. представляет собой функцию:

$$M[x(t)] = m_x(t). \quad (3.48)$$

Для фиксированного сечения  $t_k$  математическое ожидание

$$m_x(t_k) = \bar{x}(t_k) = \sum x_i(t_k) / n. \quad (3.49)$$

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:

$$D_x(t) = D[x(t)]. \quad (3.50)$$

Среднее квадратичное значение случайной функции  $\sigma$ :

$$\sigma_x(t) = \sqrt{D_x(t)}. \quad (3.51)$$

Корреляционной функцией случайной функции  $x(t)$  называется неслучайная функция двух аргументов  $K_x(t_k, t_1)$ , которая при каждой паре значений  $t_k$  и  $t_1$  равна:

$$K_x(t_k, t_1) = \frac{\sum_{i=1}^n [x(t_k) - m_x(t_k)][x(t_1) - m_x(t_1)]}{n - 1}, \quad (3.52)$$

где  $t_k, t_1$  - независимые переменные, определяющие сечения, для которых вычисляется корреляционная функция.

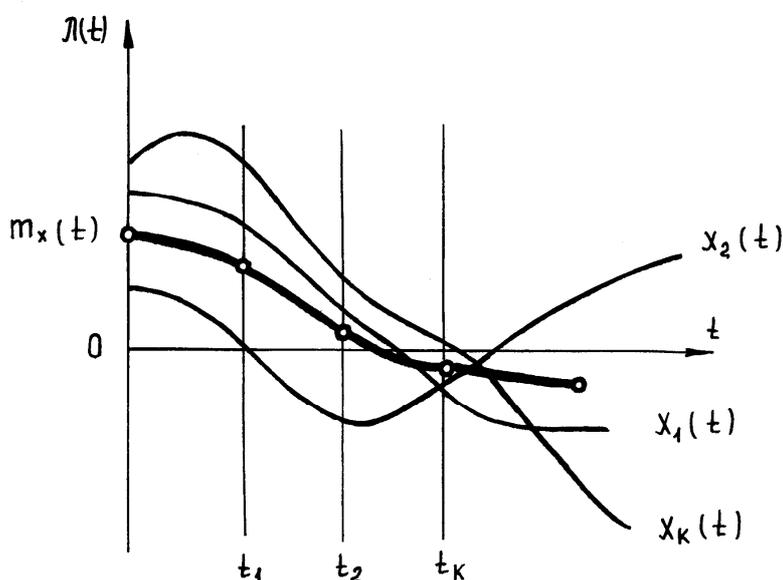


Рис. 3.10 Реализация случайных функций  $x(t)$  и  $m_x(t)$

Во многих случаях вместо корреляционной функции  $K_x(t_k, t_1)$  пользуются нормированной корреляционной функцией, равной:

$$r_x(t_k, t_1) = \frac{K_x(t_k, t_1)}{\sigma_x(t_k) \cdot \sigma_x(t_1)}, \quad (3.53)$$

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

$$K_x(t_k, t_l) = D_x(t). \quad (3.54)$$

Метод случайных функций используется для определения выходных параметров функциональных блоков (коэффициент усиления для УНЧ, длительности импульса - для формирователя импульсов) в дискретные моменты времени  $t_1, \dots, t_n$  (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.



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. 3.12).

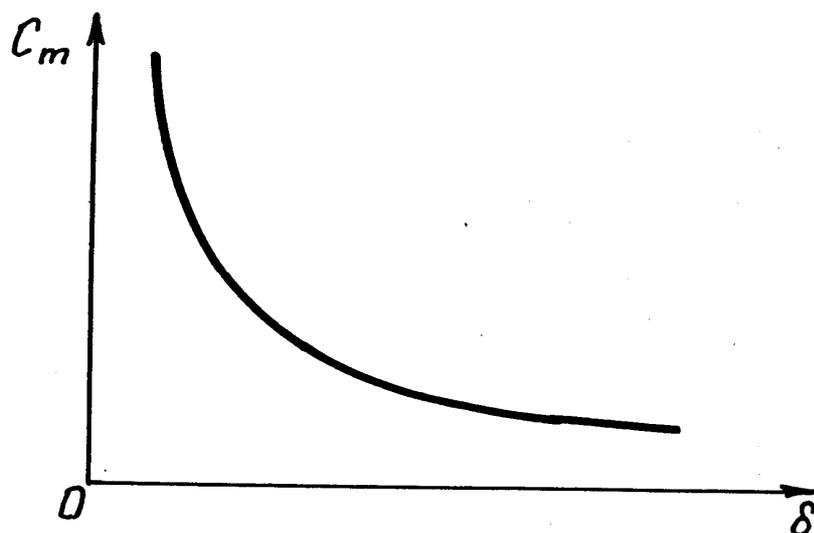


Рис. 3.11. Зависимость себестоимости изготовления изделия от допуска на параметр

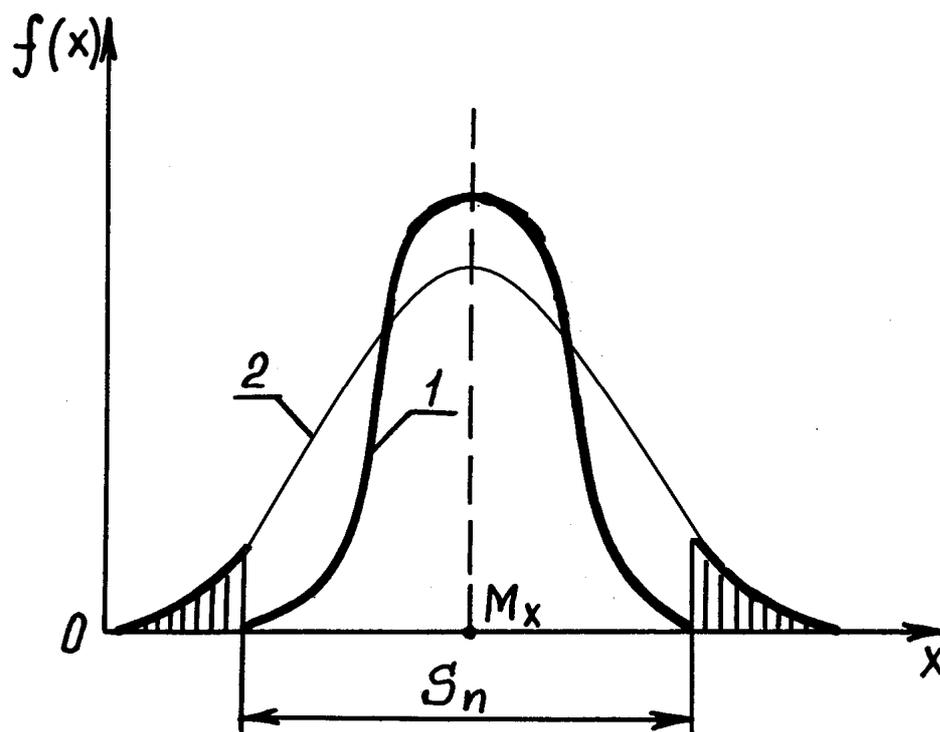


Рис. 3.12. Распределение погрешностей в пределах поля допуска при полной (1) и неполной (2) взаимозаменяемости

Расчет допусков выходных параметров производится по формуле:

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right)_{\text{ТУ}} \geq \frac{1}{k_S} \sqrt{\sum_{i=1}^1 A_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}, \quad (3.56)$$

где  $k_S$  - коэффициент относительного рассеяния выходных параметров, который выбирается в зависимости от допустимого брака изделий (табл. 3.1)

Таблица 3.1

Выбор коэффициента относительного рассеяния

Процент брака	0.27	0.5	1.0	1.5	2.0	5	10
$k_S$	1	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. Недостатком данного метода является необходимость дополнительных рабочих мест на исправление брака.

Сущность метода **групповой взаимозаменяемости** заключается в том, что требуемая точность выходных параметров блоков достигается включением в изделие деталей с узкими допусками на их параметры, полученными 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:

$$\delta\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) = \delta\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right) = 0 \quad (3.57)$$

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

$$\delta^1\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right) \geq \sqrt{\sum_{i=1}^{n-2} A_i^2 k_i^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_i}{q_i}\right)}, \quad (3.58)$$

затем определяют допуски на параметры сильно влияющих элементов из неравенства:

$$\delta\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right)_{\text{ТУ}} - \delta^1\left(\frac{\Delta\Pi_1}{\Pi_1}\right) \geq \sqrt{A_1^2 k_1^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_1}{q_1}\right) + A_2^2 k_2^2 \delta^2\left(\frac{\Delta q_2}{q_2}\right)} \quad (3.59)$$

методом последовательного подбора.

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.

Сущность метода **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 можно записать так :

$$Z = Y(A_1, A_2, \dots, A_i, \dots, A_k), \quad (3.60)$$

где  $A_i$  - составляющие размеры.

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

$$dZ = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial Z}{\partial A_i} \right| dA_i. \quad (3.61)$$

Среднеквадратичное значение отклонение размера замыкающего звена равно:

$$\sigma_s = \frac{1}{k_s} \sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 \delta_i^2}, \quad (3.62)$$

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:

$$2\delta_k \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right) = 2\delta \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right)_{\text{ПАК}} - 2\delta \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right)_{\text{ТУ}}, \quad (3.63)$$

$$\delta \left( \frac{\Delta q_k}{q_k} \right) = \sqrt{(\delta_k^2 \left( \frac{\Delta \Pi_i}{\Pi_i} \right)^2) / B_k^2}. \quad (3.64)$$

При групповых методах подгонки точность составляет  $\pm 0,5\%$ , при индивидуальных  $\pm 0,1\%$ . 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. Недостатками метода являются: необходимость дополнительных работ, связанных с измерением и подгонкой компенсирующего элемента, например, проволочного резистора.

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

К недостаткам метода следует отнести снижение надежности аппаратуры, так как надежность регулировочных элементов значительно ниже надежности элементов с постоянными параметрами в виду необходимости фиксации положения, трудностей влагозащиты и так далее, а также усложнения технологического процесса регулировочными операциями.

### 3.6. НАДЕЖНОСТЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Под надежностью технологического процесса понимают способность процесса обеспечивать изготовление изделий в полном соответствии с технической документацией.

Надежность - это вероятность того, что изготавливаемое изделие будет годным.

$$H = N_{\text{год}} / N_{\text{общ}}, \quad (3.65)$$

где  $N_{\text{год}}$  - число годных изделий,  $N_{\text{общ}}$  - общее число изделий.

$$N_{\text{общ}} = N_{\text{год}} + N_{\text{г/д}} + N_{\text{д/г}} + N_{\text{деф}}, \quad (3.66)$$

где  $N_{\text{г/д}}$ ,  $N_{\text{д/г}}$  - число годных изделий, признанных дефектными и наоборот из-за несовершенства выходного контроля;

$N_{\text{деф}}$  - дефектные изделия.

Поэтому надежность производственного процесса состоит из трех составляющих

$$H_{\text{п.р}} = H_1 \cdot H_2 \cdot H_3, \quad (3.67)$$

где  $H_1$ ,  $H_2$ ,  $H_3$  - надежности входного контроля, технологического процесса и выходного контроля соответственно.

Технологический процесс состоит из ряда технологических операций и поэтому его надежность равна произведению надежностей операций.

$$H_2 = \prod_{i=1}^k H_i, \quad (3.68)$$

где  $H_i$  - надежность  $i$ -ой операции,

$K$  - число операций.

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

$$P_{1...k}(m) = \frac{\lambda^m}{m!} e^{-\lambda}, \quad (3.69)$$

где  $\lambda$  - математическое ожидание числа дефектных изделий в данном процессе.

Нормально организованный технологический процесс характеризуется малым количеством дефектных изделий, т.е.  $m$  мало. При  $m = 1$

$$P_{1...k}(1) = \lambda e^{-\lambda}. \quad (3.70)$$

Разложением функции  $e$  в ряд Маклорена можно получить, ограничиваясь первым членом разложения:  $P(1) \approx \lambda$ .

Среднее количество дефектных изделий на выходе технологического процесса определяют по эмпирическим формулам:

$$\lambda = ak^z, \quad (3.71)$$

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

Кроме того, величина  $\lambda$  может быть определена статистическим путем. Так, например, при сборке блока УПЧ:

$$\lambda = 0.0023k^{1.425}. \quad (3.72)$$

Вероятность появления брака на одном рабочем месте сборщика или монтажника

$$P_{от} = \lambda / k, \quad (3.73)$$

где  $\lambda$  - среднее число дефектов, допускаемых оператором на рабочем месте в технологическом процессе,  $k$  - число операций.

Тогда вероятность выхода годных изделий с этого рабочего места, т.е. вероятность данной технологической операции

$$H_{от} = 1 - P_{от}. \quad (3.74)$$

Даже при хорошо организованном контроле технологического процесса всегда остается вероятность попадания дефектных изделий в готовую продукцию, что снижает показатели надежности процесса. Одним из путей повышения количественных показателей надежности выпускаемых изделий является отбраковка потенциально ненадежных изделий путем их технологической тренировки. Технологическая тренировка представляет собой испытание готовых изделий под нагрузкой в течение заданного интервала времени.

Для сокращения длительности тренировки увеличивают нагрузку при испытаниях изделий. Однако при этом необходимо учитывать, что она не должна вызывать отказов у

бездефектных изделий. Технологическая тренировка под повышенной электрической нагрузкой является более эффективным средством для потенциально ненадежных приборов, например, транзисторов и ИМС, чем термотренировка, поскольку позволяет выявить различные механизмы отказов.

## **Глава 4. ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

### **4.1. МОДЕЛИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ И ИХ ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ**

Для современных технологических процессов (ТП) производства РЭА 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 неконтролируемых и неуправляемых факторов, играющих роль возмущений.

Изучение и оптимизация таких сложных ТП невозможны без применения современной методики моделирования процессов на базе ЭВМ.

Современная технологическая система (ТС) - это совокупность взаимосвязанных потоков энергии, материалов и информации, действующая как единое целое, в которой осуществляется определенная последовательность технологических процессов. Совокупность физико-химических процессов внутри технологической системы можно рассматривать как преобразование вводимых потоков энергии и вещества (рис. 4.1). Для обеспечения требуемых физико-химических превращений в ходе выполнения технологических процессов этими потоками необходимо управлять.

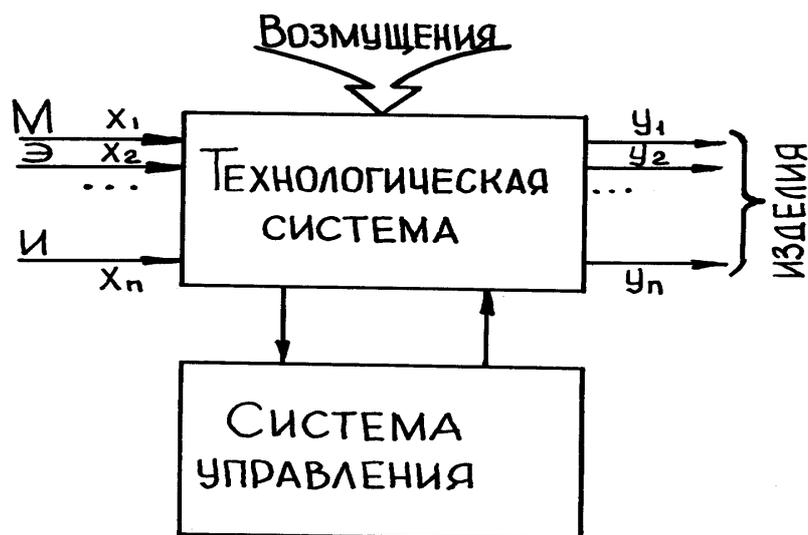


Рис. 4.1. Схема сложной технологической системы

Технологическим системам свойственны признаки больших систем:

- \* наличие общей цели функционирования (выпуск продукции);
- \* большое количество элементов, составляющих систему и большое количество параметров, характеризующих ее функционирование;
- \* сложность поведения системы ввиду большого числа взаимосвязей между ее составляющими;
- \* наличие внешних неконтролируемых воздействий.

Модель - упрощенная система, отражающая отдельные наиболее важные стороны явлений 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 метода моделирования: физическое и математическое.

Физическое моделирование предполагает воспроизведение объекта в ином, более мелком, 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 технологических процессов производства ЭА применение затруднительно.

Математическое моделирование - метод качественного и (или) количественного описания процесса с помощью математической модели.

Математические модели различны по своей природе и степени сложности так как моделируемые процессы весьма разнообразны по своей природе и степени сложности. Все процессы по своему характеру проявления делятся на детерминированные и стохастические.

Детерминированными называются такие процессы, параметры которых можно предсказать на основе изучения их механизма. Жесткие модели, описывающие детерминированные процессы, строятся обычно без использования статистических вероятностных распределений. Стохастическими процессами называются такие, параметры которых изменяются случайно под воздействием неконтролируемых дестабилизирующих факторов. Вероятностные модели, описывающие стохастические процессы, строятся с использованием теории вероятности и математической статистики. В зависимости от характера и сложности тех или иных процессов при их изучении могут использоваться следующие виды моделей: изоморфные, гомоморфные. Изоморфная модель характеризуется полным поэлементным соответствием между ней и реальной системой или процессом. Модели, отдельные элементы которых соответствуют лишь крупным частям реальной системы, называют гомоморфными.

Математические модели могут быть аналитическими и имитационными. При использовании 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 найти 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 учесть 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. 4.2):

- \* формулирование целей оптимизации параметров технологического процесса, 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;
- \* проверку адекватности математической модели исследуемому процессу с целью проверки, насколько правомерны принятые допущения.

При необходимости математическая модель корректируется и используется для оптимизации технологического процесса.

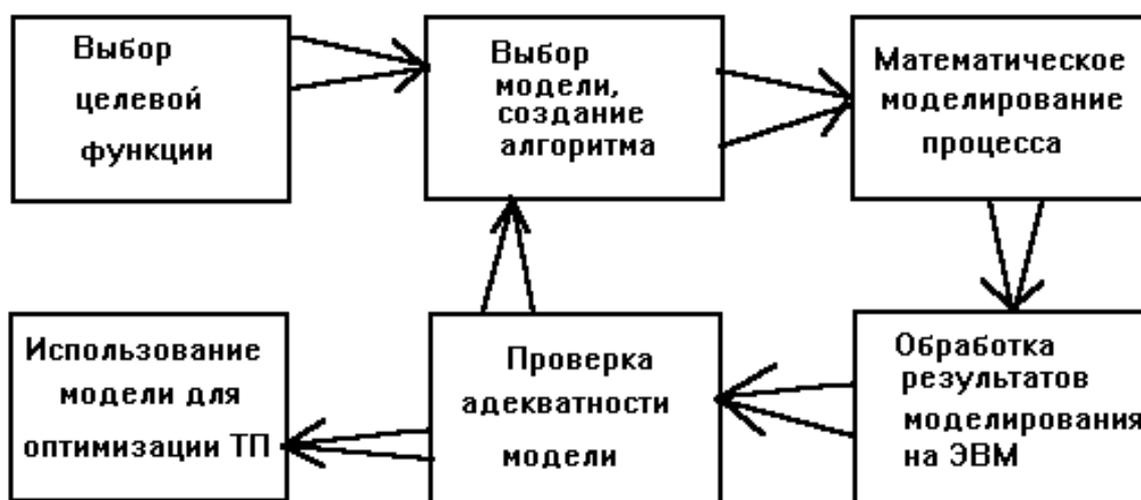


Рис. 4.2. Стратегия построения математической модели

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

Под показателем эффективности сложной системы понимают такую числовую характеристику, которая оценивает степень приспособленности системы к выполнению основной цели.

В качестве показателей эффективности СТС принимают производительность, измеряемую как:

$$Q = \frac{N_{CP}}{T_{ПЛ}}, \quad (4.1)$$

где  $N_{CP}$  - среднее число изделий,  $T_{ПЛ}$  - плановый период времени.

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

$$Q = Q(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n; \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m), \quad (4.2)$$

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

$$W_t = \varphi(\Pi_t, C_t, K), \quad (4.3)$$

Прибыль за время  $t$   $\Pi_1$  и чистая прибыль  $\Pi_2$  определяются по формулам:

$$\Pi_1 = \Pi_t - C_t, \quad (4.4)$$

$$\Pi_2 = \Pi_t - C_t - E_n \cdot K, \quad (4.5)$$

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 не применимы такие показатели надежности как вероятность безотказной работы, среднее время безотказной работы т.к. они констатируют лишь сам факт отказа и не позволяют получить представление о влиянии отказа на конечный эффект функционирования системы.

Пусть величина  $R$  является показателем эффективности некоторой сложной системы, тогда величина  $\Delta R_a$  показывает, насколько снижается эффективность системы за счет возможных отказов ее элементов по сравнению с эффективностью идеальной системы  $R_0$ :

$$\Delta R_a = R_0 - R_a, \quad (4.6)$$

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) улучшение организации системы путем синтеза надежной системы из малонадежных элементов. Этот способ связан с использованием избыточности разного вида:

резервированием (при обрыве (рис. 4.3, а) или замыкании в элементах (рис. 4.3, б) система будет оставаться работоспособной, хотя параметр эффективности изменится), дублированием (рис. 4.3, в) или с утроением и мажоритарным выбором результата (рис. 4.3, г).

Вероятность безотказного функционирования ТС можно оценить по формуле:

$$P(t) = \prod_{i=1}^m [1 - (1 - P_{xi})(1 - P_k)], \quad (4.7)$$

где  $P_{xi}$  - вероятность нахождения параметра элемента в пределах допустимого,  $P_k$  - вероятность контроля ( для неконтролируемых параметров  $P_k=0$ , абсолютно надежный контроль  $P_k = 1$ ),  $m$  - число элементов.

При решении вопросов надежности сложных систем учитывают варианты резервирования малонадежных элементов системы, профилактические мероприятия, возможность восстановления отказавших элементов.

Управлению в сложных системах принадлежит исключительная роль, поэтому качество управления является одной из наиболее важных характеристик функционирования системы. Качество управления зависит от наличия 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 А по сравнению с эффективностью, управляемой по варианту В:

$$\Delta R_{упр} = R_{упр}^A - R_{упр}^B, \quad (4.8)$$

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:

$$\alpha_i = \alpha_{i,0} + \Delta\alpha_i, \quad (4.9)$$

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

Внешние помехи проявляются в отклонениях от нормы в результате воздействий на сложную систему внешней среды:

$$\beta_i = \beta_{i,0} + \Delta\beta_i, \quad (4.10)$$

Тогда показатель эффективности системы при действии на нее внутренних и внешних помех:

$$R_{п.о.м} = R(\alpha_1^l, \alpha_2^l, \alpha_3^l, \dots, \alpha_n^l; \beta_1^l, \beta_2^l, \beta_3^l, \dots, \beta_n^l), \quad (4.11)$$

а величина разности:

$$\Delta R_{\text{п о м}} = R_0 - R_{\text{п о м}}, \quad (4.12)$$

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 системы S**, состоящей из элементов со сложностью  $S_i$ , (где  $i=1,2,\dots,N$ ), называется величина:

$$S = \sum_{i=1}^N S_i \cdot K_i, \quad (4.13)$$

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

Максимальное число связей в системе, состоящей из  $N$  элементов,  $N(N-1)$ , а фактическое число связей в системе -  $M$ . Тогда величина:

$$a = M / N (N - 1), \quad (4.14)$$

характеризует относительное число реализованных связей, а сложность системы выразится как:

$$S = (1 + \gamma \cdot a) \sum_{i=1}^N S_i \cdot K_i, \quad (4.15)$$

где  $\gamma$ - коэффициент, учитывающий сложность связей по сравнению со сложностью элементов системы.

## 4.2. ПРОЦЕСС ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Технологическая система представляет собой целостную совокупность элементов, связи между которыми могут быть описаны системой функций:

$$\left\{ \begin{array}{l} f_{j1}(x_{k1}, \dots, x_{i1}) = 0 \\ f_{j2}(x_{k2}, \dots, x_{i2}) = 0 \\ \dots \dots \dots \\ f_{jl}(x_{kl}, \dots, x_{il}) = 0 \end{array} \right., \quad (4.161)$$

где  $x_{k1}, x_{k2}, x_{k3}, \dots, x_{il}$  - переменные параметры системы,  $f_{ji}$  - дифференцируемая функция в заданной области изменения переменных.

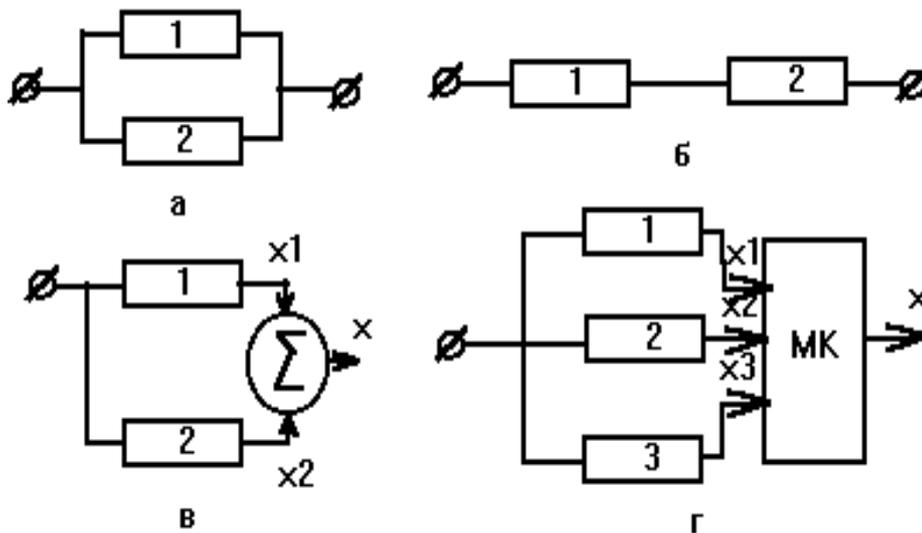


Рис. 4.3. Резервирование блоков

В процессе функционирования ТС постоянно вступает в контакт со средой, которая имеет бесконечно большое число степеней свободы.

Взаимодействие переменных  $X_{k1} \dots X_{il}$  со средой выражается в том, что эти координаты системы непрерывно сравниваются с параметрами  $Z_1 \dots Z_k$  среды. Если рассогласования не равны нулю, то они воздействуют через механизмы обратной связи (ОС) как на систему, так и на среду.

Будем полагать, что целью системы является выполнение ее целевой функции, при этом рассогласования  $\Delta_1 \dots \Delta_k$ , возникающие при контактировании элементов системы с внешней средой должны быть сведены к нулю. Для этой цели в системе управления ТС вырабатываются также командные сигналы, которые сводят рассогласования к нулю (рис. 4.4).

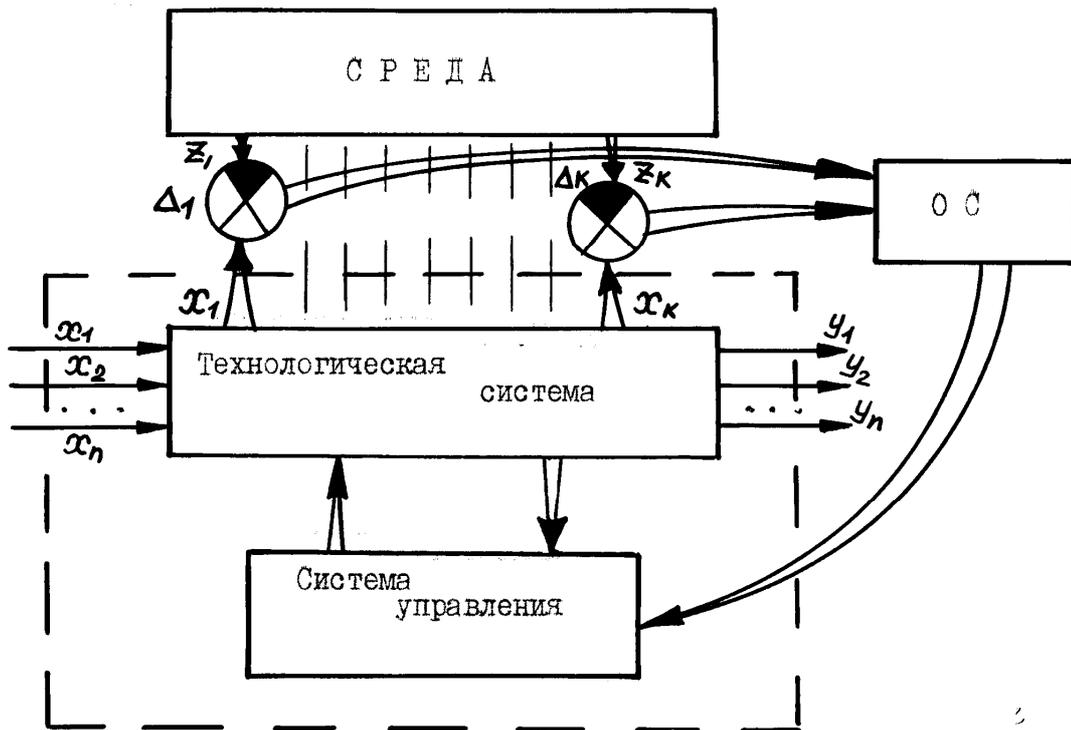


Рис. 4.4. Взаимодействие ТС со средой в процессе функционирования

Какими же механизмами располагает система, чтобы достичь поставленной цели?

Система управления ведет подстановку системы в функции от  $\Delta_1 \dots \Delta_k$  путем включения коэффициентов  $U_s$  в дифференциальное уравнение:

$$F_j(x_k, \dots, x_i) U_s = 0, \quad (4.17)$$

Этот способ приспособления называется самонастройкой.

Но система может приспособиться к среде не только за счет варьирования коэффициентов  $U_s$ . В блоке управления после анализа отклонений может быть найдена такая функциональная связь между переменными  $X_k \dots X_i$ , что наложение ее позволит уменьшить рассогласование. Этот способ приспособления называется обучением.

Рассмотрим вопрос о соотношении между этими двумя способами.

Гибкость или мобильность системы будет определяться количеством коэффициентов  $U_s$ . При увеличении числа наложенных связей  $M$ , способность системы к самонастройке растет, проходит максимум и начинает падать. Т.е. система переучилась, наложение новых связей ведет к уменьшению  $U_s$ , к снижению гибкости системы (рис. 4.5).

В пределе число коэффициентов  $U_s$  может быть сведено к нулю, в этом случае будем иметь систему с жесткой структурой, которая при самом небольшом изменении внешней среды

не может правильно функционировать. Неспособность системы эффективно функционировать приводит к необходимости замены старой технологической системы другой, более совершенной.

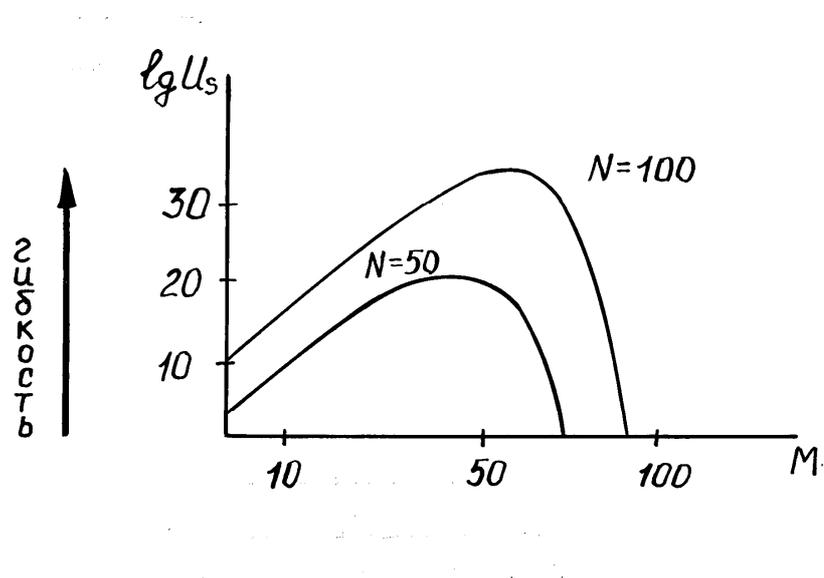


Рис. 4.5. Зависимость числа неопределенных коэффициентов от количества ограничений. N - число переменных, M - число наложенных связей

## Глава 5. МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

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

### 5.1. РЕГРЕССИОННЫЙ АНАЛИЗ

Пассивный эксперимент сводится к отбору и обработке данных, полученных в результате пассивного наблюдения за технологическим процессом в производственных условиях. Для анализа и обработки полученных данных в основном используют корреляционный анализ, в результате которого определяют степень взаимосвязи изучаемых переменных величин и по величине коэффициента корреляции судят о тесноте связи.

Одним из видов пассивного эксперимента является регрессионный анализ, который представляет собой метод определения коэффициентов модели, при котором функция ошибки минимальна.

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  $S_1^2, S_2^2, \dots, S_n^2$  должны быть однородными.

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

$$M[y(x)] = f(x, \alpha, \beta, \gamma \dots), \quad (5.1)$$

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

Наиболее простым случаем является линейная регрессия, когда функция  $f(x)$  линейна относительно  $x$ . Тогда уравнение имеет вид:

$$Y = b_0 + b_1 x, \quad (5.2)$$

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

$$\begin{cases} Y_1 = b_0 + b_1 x_{11} \\ Y_2 = b_0 + b_1 x_{12} \end{cases}, \quad (5.3)$$

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

$$F = \sum_{k=1}^N (y_k - y)^2 - \min, \quad (5.4)$$

или для простейшей модели

$$F = \sum_{k=1}^N (y_k - b_0 - b_1 x_{1k})^2 - \min, \quad (5.5)$$

По величине коэффициентов в уравнении регрессии можно судить об их влиянии на выходной параметр.

В случае большого числа факторов уравнение приобретает вид:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_i x_i + \dots + b_n x_n, \quad (5.6)$$

Коэффициенты  $b_0$  и  $b_1$  в уравнении (3.3) можно определить как:

$$b_0 = K_{XY} / D_X; b_1 = M_Y - b_0 M_X, \quad (5.7)$$

где

$$M_X = \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) / N; M_Y = \left( \sum_{i=1}^n y_i \right) / N \quad (5.8)$$

$$K_{XY} = \left[ \sum_{i=1}^N (x_i - M_X) \cdot (y_i - M_Y) \right] / N \quad (5.9)$$

$$D_X = \left[ \sum_{i=1}^N (x_i - M_X)^2 \right] / N \quad (5.10)$$

Линейная зависимость, связывающая x и y имеет вид:

$$Y = \frac{K_{XY}}{D_X} + \left[ M_Y - \frac{K_{XY}}{D_X} \cdot M_X \right] \cdot X \quad (5.11)$$

Пример. Температура жала паяльника зависит от напряжения нагревателя следующим образом (табл. 5.1).

Таблица 5.1

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 5.7– 5.10 получено уравнение регрессии следующего вида:  $T = 122.6 + 3.27U$ .

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 технологических процессов.

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 изменения или регистрации.

## 5.2. 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;
- ◆ формализация процесса построения математической модели и возможность ее оптимизации.

Одним из активных методов планирования экстремальных экспериментов является полный факторный эксперимент (ПФЭ), при котором модель процесса выбирается в виде:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} x_i x_j, \quad (5.12)$$

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  $X_I$

$$X_I = (x_I - x_{0I}) / \Delta x_I, \quad (5.13)$$

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 качественных факторов, имеющих два уровня, верхний обозначают +1, нижний -1.

В полном факторном эксперименте реализуются все возможные сочетания уровней факторов.

Если число уровней каждого фактора равно 2 (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.

$X_0$  - условная переменная, которая в процессе опыта имеет значение +1 и вводится для удобства вычислений.

ПФЭ обладает 3-мя важными свойствами:

- симметричностью относительно центра эксперимента, т.е. алгебраическая сумма элементов вектор-столбцов каждого фактора равна 0, т.е.

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 0, \quad (5.14)$$

где  $i$  - номер опыта,  $j$  - номер фактора ( $j = 1 \dots k$ );

- условием нормировки: сумма квадратов элементов каждого столбца равна числу опытов:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij}^2 = N, \quad (5.15)$$

что является следствием того, что значения факторов в матрице задаются равными -1 и +1;

- ортогональностью матрицы планирования: сумма почленных произведений любых 2-х факторов-столбцов матрицы равно 0:

$$\sum_{i=1}^N X_{iu} \cdot X_{iv} = 0, u = 0, 1, \dots, k, \quad (5.16)$$

После выполнения ПФЭ осуществляют независимую оценку коэффициентов полинома по формулам:

$$b_0 = \frac{\sum_{i=1}^N \bar{y}_i}{N}; b_1 = \frac{\sum_{i=1}^N x_{i1} \bar{y}_i}{N}; b_{1j} = \frac{\sum_{i=1}^N x_{i1} x_{ij} \bar{y}_i}{N}, \quad (5.17)$$

где  $y_i$  - среднее значение выходного параметра по результатам параллельных опытов.

Находят дисперсии среднего арифметического в каждой строке матрицы, которые должны быть однородны

$$S_i^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m (y_i - \bar{y}_i)^2, \quad (5.18)$$

где  $m$  - количество параллельных опытов.

Если одна дисперсия значительно превышает остальные, то 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  $S_{\max}^2$  и рассчитывают критерий Кохрена:

$$G = S_{\max}^2 \{y\} / \sum_{i=1}^N S_i^2, \quad (5.19)$$

и сравнивают с табличным значением (табл. 5.2).

Если табличное значение критерия больше, чем рассчитанное, то дисперсии однородны.

Дисперсия всего эксперимента равна:

$$S^2(\bar{y}) = \left( \sum_{i=1}^N S_i^2 \right) / N, \quad (5.20)$$

Таблица 5.2

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:

$$\sigma^2\{b_i\} = S^2\{\bar{y}_i\} / N, \quad (5.21)$$

Оценка достоверности коэффициентов регрессии производится с помощью критерия Стьюдента (t).

Если  $b_i < t_{\text{табл.}} \cdot \sigma(b_i)$ , то коэффициент считается незначимым.

Значения критерия Стьюдента определяются по таблицам в зависимости от числа степеней свободы  $f_1 = N(m-1)$  и выбранного уровня значимости (табл. 5.3).

Таблица 5.3

Квантили распределения Стьюдента

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, используется критерий Фишера.

Для этого оцениваем дисперсию адекватности:

$$\sigma_{ад}^2 = \frac{1}{N-d} \sum_{i=1}^N (\bar{y}_I - \hat{y}_I)^2, \quad (5.22)$$

где  $d$  - число членов в уравнении регрессии, за исключением  $b_0$ ,

$\hat{y}_I$  - значение выходного параметра, полученного расчетным путем из математической модели.

Затем находим  $F$ - критерий:

$$F = \sigma_{фд}^2 / S^2(\bar{y}), \quad (5.23)$$

Если  $F < F_{табл}$ , то модель признается адекватной.  $F_{табл}$  выбирается по таблицам в зависимости от числа степеней свободы:

$$\begin{cases} f_1 = N - d \\ f_2 = N(m - 1) \end{cases}, \quad (5.24)$$

В противном случае модель считается неадекватной и 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.5.1.

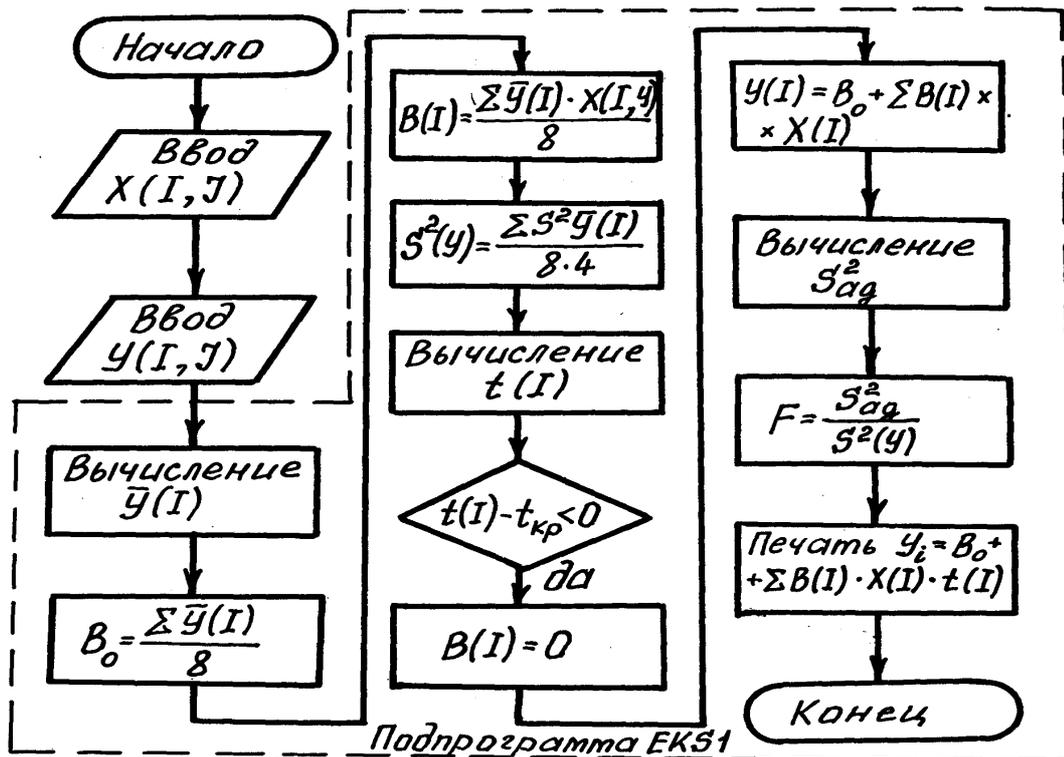


Рис. 5.1. Алгоритм получения математической модели на ЭВМ.

Графическая интерпретация уравнения регрессии осуществляется на плоскости  $X_1 X_2$  при  $X_3 = \text{const}$  (рис.5.2).

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 фактор на параметр оптимизации. Увеличение фактора при положительном коэффициенте увеличивает значение функции  $Y$ , увеличение факторов при отрицательном - уменьшает значение функции  $Y$ . Абсолютные значения коэффициентов возрастают с увеличением интервалов варьирования.

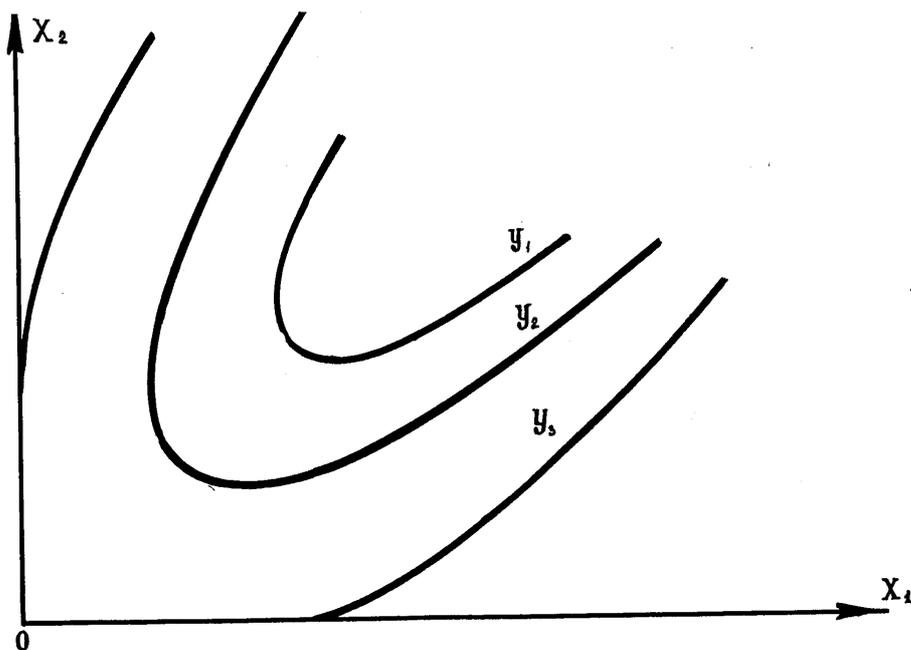


Рис. 5.2 Поверхность отклика функции

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

На втором этапе переходят к оптимизации математической модели различными методами.

Пример.

Рассмотрим ПФЭ процесса УЗ микросварки проволочных алюминиевых выводов толщиной 35 мкм к контактными площадкам, покрытым гальваническим сплавом Ni-In с целью замены золотого покрытия.

Критерий оптимизации - прочность микросварочного соединения на разрыв,  $P$ , г.

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.5.4.

Таблица 5.4.

Начальные условия и матрица планирования процесса УЗ микросварки

Значения факторов		x <sub>1</sub> , (P)		x <sub>2</sub> , (t)		x <sub>3</sub> , (F)				
Основной уровень x <sub>1</sub>		0.20		0.20		20				
Интервал варьирования Δx <sub>1</sub>		0.05		0.05		5				
Верхний уровень(+1)		0.25		0.25		25				
Нижний уровень(-1)		0.15		0.15		15				
Номер опыта	X <sub>0</sub>	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub>	X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>3</sub>	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> X <sub>3</sub>	$\bar{Y}_i$	S <sub>i</sub> <sup>2</sup> {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) в следующем виде

$$y = 9.81 + 1.42x_1 + 1.27x_2 + 2.21x_3 + 0.05x_1x_2 + 0.18x_2x_3 + 0.44x_1x_3 - 0.26x_1x_2x_3$$

Так как в данном примере  $f_1 = 8(3-1) = 16$ , то при уровне значимости 0.05  $t_{\text{табл}} = 2.12$  и величина  $b_{\text{кр}}$  равна

$$b_{\text{кр}} = t_{\text{кр}} \sigma\{b_i\} = 2.12 \cdot 0.495 = 1.02$$

После исключения незначимых членов в итоге 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.

### 5.3. ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Задача оптимизации сводится к нахождению таких условий проведения технологического процесса, 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 обычно не непрерывно, а шагами.

**Метод Гаусса–Зайделя.** Последовательное продвижение осуществляется путем поочередного варьирования каждым фактором до достижения частного экстремума выходной величины. В каждой серии опытов изменяется только переменная  $x_i$ , остальные остаются неизменными. Изображающая точка перемещается попеременно вдоль каждой из координатной осей  $x_i (i=1,2,3,\dots,k)$  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  $x_{iN}$ , где  $dy(x_{iN})/dx_i=0$  (рис. 5.3).

Направление движения вдоль  $(i+1)$ -й координатной оси выбирается обычно по результатам 2-х 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 до 5-6 применение метода Гаусса-Зайделя для оптимизации технологических процессов становится малоэффективным в силу увеличения числа экспериментов.

**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:

$$\text{grad}y(x) = \left( \frac{\delta_y}{\delta_{x_1}} i; \frac{\delta_y}{\delta_{x_2}} j; \dots; \frac{\delta_y}{\delta_{x_k}} u \right), \quad (5.25)$$

служат коэффициенты при линейных членах уравнения регрессии  $b_1, b_2, \dots, b_k$ , то 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 величины частной производной:

$$\frac{\delta_y}{\delta_{x_i}} \approx \frac{\Delta y}{\Delta x_i} = b_i; i = 1, 2, \dots, k, \quad (5.26)$$

После нахождения составляющих градиента выполняется рабочий шаг по направлению к экстремуму (рис. 5.4):

$$x_{N+1} = x_N + \rho_{\text{ш}} \text{grad} y(x_N), \quad (5.27)$$

где  $\rho_{\text{ш}}$  - параметр рабочего шага.

Размер рабочего шага выбирают в зависимости от его номера  $h$  или расстояния от оптимума  $\gamma$

$$\rho_{\text{ш}} = \frac{\rho}{h \cdot \gamma}; 0 < \gamma < 0.5 (\gamma = 0.25), \quad (5.28)$$

где  $\rho$  - const;  $h$  - номер шага.

Показателем выхода в область оптимума является малое значение модуля градиента  $|\text{grad} y(x)| = 0$ , т.е. все коэффициенты  $b_i (i=1, 2, \dots, k)$  становятся незначимыми или равными нулю.

Одним из важных моментов в градиентном методе является выбор шага. При слишком малом шаге требуется большое число экспериментов, если размер шага велик, то можно "проскочить" оптимум.

**Метод крутого восхождения** (Бокса-Уилсона) 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 него 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, и 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  $b_6 \Delta x_6$ ;

3) для базового фактора выбирается шаг движения  $\lambda_6$  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  $b_i$ :

$$\lambda_1 = \frac{b_1 \Delta k_1}{b_\sigma \Delta k_\sigma}, \quad (5.29)$$

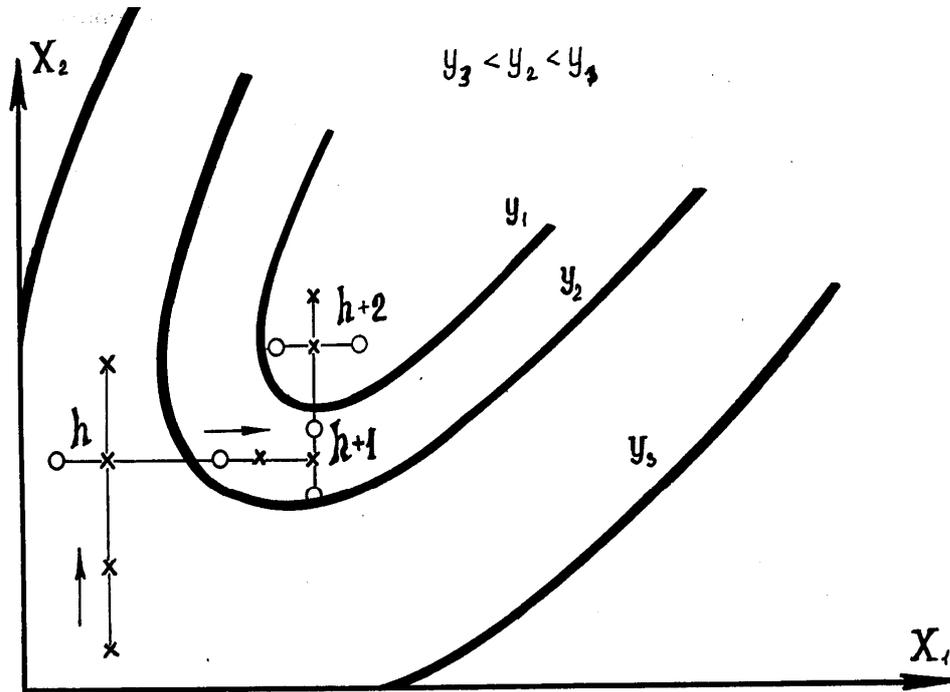


Рис. 5.3 Метод Гаусса-Зейделя

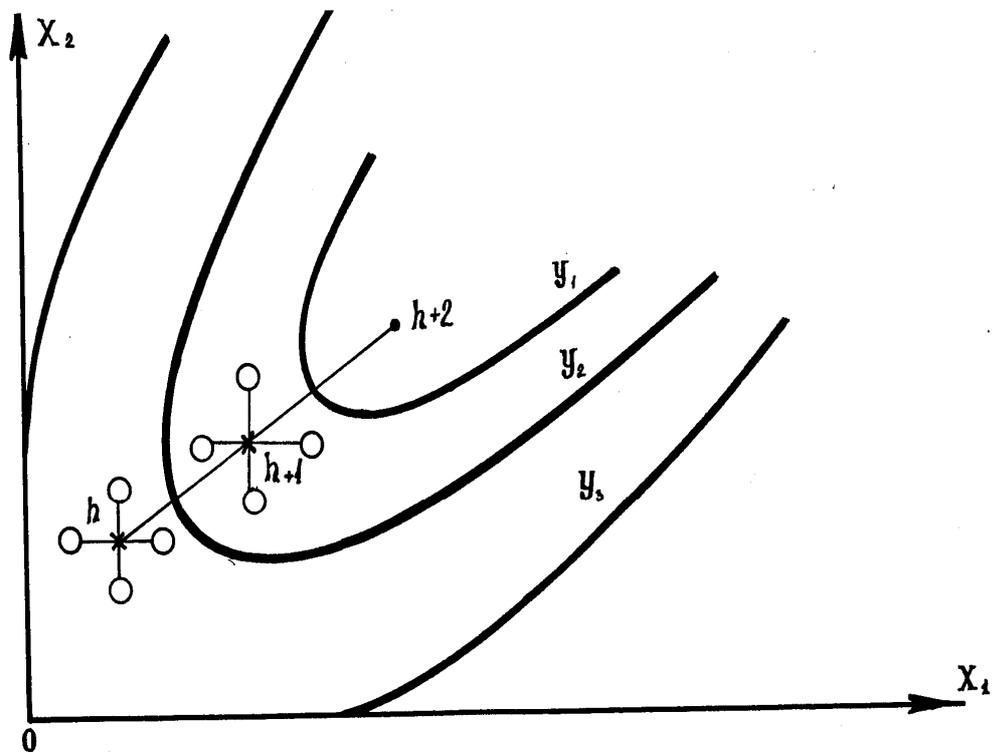


Рис. 5.4 Метод градиента

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

$$y(x) = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + \dots + b_k x_k, \quad (5.30)$$

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

$$x_{nI} = x_{II} + h \frac{\lambda_I}{\Delta x_I}, \quad (5.31)$$

где  $h=1,2,\dots,m$ ;  $i=1,2,\dots,k$

$$\lambda_I = b_I \Delta x_I = b_I + \frac{\Delta x_I}{n}, \quad (5.32)$$

Прогнозируемое значение выходного параметра ,

$$Y_{K.ПР} = b_0 + h \sum b_I \frac{\lambda_I}{\Delta x_I}, \quad (5.33)$$

5) поскольку каждый цикл крутого восхождения приближает к поверхности отклика с большой крутизной, то рекомендуется выбирать шаг для каждой последующей серии опытов 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.

Исходное уравнение регрессии:

$$Y = 9.81 + 1.42X_1 + 1.27X_2 + 2.21X_3.$$

1. Шаг варьирования определяем по формуле:

$$\Delta i = \frac{\Delta X_i}{10}$$

2. Шаг движения выбираем равный:

$$\lambda_i = b_i \Delta i$$

$$\lambda_1 = 0.005 \cdot 1.42 = 0.007$$

$$\lambda_2 = 0.005 \cdot 1.27 = 0.006$$

$$\lambda_3 = 0.5 \cdot 2.21 = 1.105$$

3. Определяем значения факторов  $X$  в начале опыта,

$$X_1^I = X_1^{HOM} + \Delta X_1 b_1 = 0.15 + (0.005 \cdot 1.42) = 0.157$$

$$X_2^I = X_2^{HOM} + \Delta X_2 b_2 = 0.15 + (0.005 \cdot 1.27) = 0.156$$

$$X_3^I = X_3^{HOM} + \Delta X_3 b_3 = 10 + (0.5 \cdot 2.21) = 11.1$$

4. Начинаем "крутое восхождение" в сторону увеличения переменных  $x_1, x_2, x_3$ , которые выбираем на уровне -1.

5. Проводим "мысленные опыты", которые заносим в таблицу 5.5:

Таблица 5.5

"Крутое восхождение"

Характеристика фактора № опыта	Выходные факторы			$\tilde{Y}$	$\bar{Y}$
	$X_1(P, Вт)$	$X_2(t, с)$	$X_3(F, сН)$		
коэффициент, $b_1$	1.42	1.27	2.21	--	--
шаг варьирования, $\Delta i$	0.005	0.005	0.5	--	--
начальная точка	0.15	0.15	10	--	--
1-й реализ. опыт	0.157	0.156	11.1	10.93	10.45
2-й реализ. опыт	0.164	0.162	12.2	12.04	11.60
3-й реализ. опыт	0.171	0.168	13.3	13.16	12.42
4-й реализ. опыт	0.178	0.174	14.4	14.28	14.00
5-й реализ. опыт	0.185	0.180	15.5	15.40	12.20
6-й реализ. опыт	0.192	0.186	16.6	16.52	10.30

6. Наибольшее усилие отрыва  $P = 14.00$  в 4 опыте, которое подтверждается экспериментальными данными. В 5 опыте экспериментальное значение  $Y$  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.

Почти стационарную область обычно удается описать с достаточной точностью с помощью полинома второго порядка:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_{I_i} x_{I_i} + \sum_{ij} b_{II_{ij}} x_{I_i} x_{I_j} + \sum_{i=1}^k b_{III_i} x_{I_i}^2, \quad (5.34)$$

Для вычисления полинома второго порядка число уровней должно быть, как минимум, три, т.е. на единицу больше степени полинома.

Однако применение ПФЭ типа  $3^K$  не рационально, т.к. это характеризуется резким увеличением объема экспериментов. Сократить их численность можно, используя так называемые центральные композиционные планы (ЦКП).

Особенностью этих планов является добавление нескольких специально спланированных экспериментальных точек к матрице планирования ПФЭ для получения плана второго порядка. Общее число опытов ЦКП при  $K$  факторах равно:

$$N = 2^K + 2K + m_0, \quad (5.35)$$

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. 5.5).

Бокс и Уилсон предложили выбирать плечо  $\alpha$  и количество центральных точек  $m_0$  так, чтобы план второго порядка оставался ортогональным. Центральный композиционный ортогональный план (ЦКОП) при  $K = 3$  содержит всего 15 опытов, тогда как при ПФЭ  $3^3 = 27$ .

В силу ортогональности плана все коэффициенты определяются независимо друг от друга:

$$b_I = \frac{\sum_{i=1}^N X_I \bar{Y}_I}{\sum_{i=1}^N X_I^2}, \quad (5.36)$$

$$b_{IJ} = \frac{\sum_{i=1}^N X_I X_J \bar{Y}_I}{\sum_{i=1}^N (X_I X_J)^2}, \quad (5.37)$$

$$b_{II} = \frac{\sum_{i=1}^N \left( X_I^2 - \frac{\sum_{i=1}^N X_I^2}{N} \right) \cdot \bar{Y}_I}{\sum_{i=1}^N \left( X_I^2 - \frac{\sum_{i=1}^N X_I^2}{N} \right)^2}, \quad (5.38)$$

В отличие от линейного полинома при ортогональном планировании второго порядка оценки коэффициентов полинома находятся с неодинаковыми дисперсиями  $\sigma^2\{b_I\} = \sigma^2\{b_{II}\}$  по уравнению (3.22), а дисперсия при квадратичных членах уравнения регрессии по формуле:

$$\sigma^2\{b_{II}\} = \frac{S^2(\bar{Y})}{\sum_{i=1}^N \left[ X_i^2 - \left( \frac{\sum_{i=1}^N X_i^2}{N} \right) \right]^2}, \quad (5.39)$$

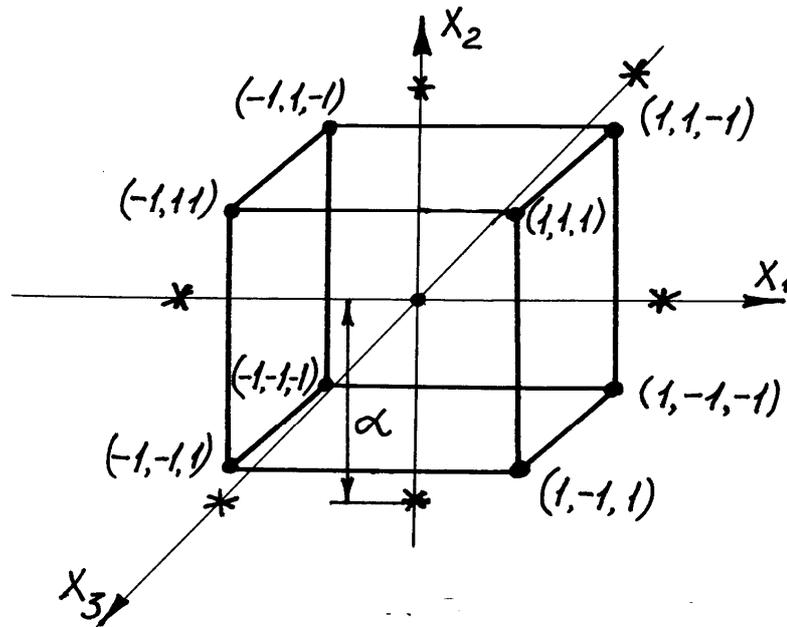


Рис. 5.5 Координатная решетка центрального композиционного плана

Так же как и при получении линейной модели, обработка результатов при реализации ЦКП 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 освобождаемся от линейных членов путем переноса начала координат в точку  $O$ , соответствующую  $B_0$ , затем - от эффектов взаимодействия путем поворота осей координат (рис.5.6).

Для двух независимых переменных получают уравнение в канонической форме:

$$Y - Y_{01} = B_{11}^2 (x_1^I)^2 + B_{22}^2 (x_2^I)^2, \quad (5.40)$$

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. 5.6 а). В этом случае для нахождения

оптимальной точки можно воспользоваться и неприведенным уравнением второго порядка, для чего приравниваются нулю значения частных производных:

$$\partial Y / \partial x_I = b_I + 2b_{II} + b_{IJ}x_j = 0, \quad (5.41)$$

и решается система уравнения. 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  $B_I$  равен нулю, то поверхность отклика имеет форму вырастающего возвышения (рис.5.6, б). Для отыскания оптимума следует двигаться по гребню, пока это допускают возможности технологического процесса.

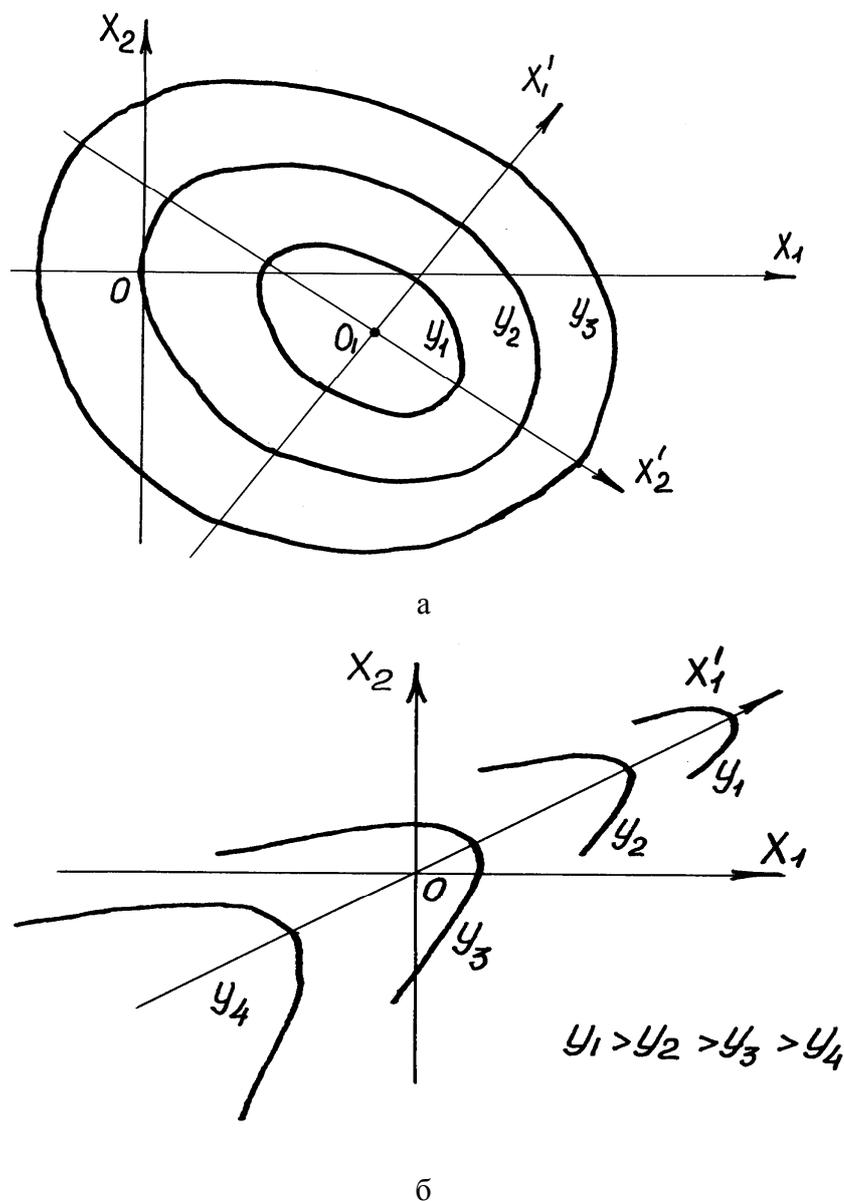


Рис. 5.6. Поверхности отклика функций: эллиптической (а), типа возрастающего возвышения (б)

Пример. Начальные условия эксперимента приведены в таблице 5.6.

В результате обработки экспериментальных данных ЦКОП на ПЭВМ получили уравнение регрессии следующего вида:

$$Y = 12.57 + 0.08X_1 + 0.53X_2 + 0.09X_3 - 0.33X_1X_2 + 0.55X_1X_3 + \\ + 0.06X_2X_3 + 1.07X_1X_2X_3 - 1.79X_1^2 - 1.13X_2^2 - 1.86X_3^2$$

Для уровня значимости 0.05 и числа степеней свободы  $f_1 = N(m-1) = 15(4-1) = 45$ ,  $t$ -критерий Стьюдента, равен 2.0. С учетом проверки значимости коэффициентов полинома по критерию Стьюдента уравнение приобретает вид:

$$Y = 12.57 + 0.53X_2 - 0.33X_1X_2 + 0.55X_1X_3 + 1.07X_1X_2X_3 - 1.79X_1^2 - 1.13X_2^2 - 1.86X_3^2$$

Таблица 5.6

Матрица центрального композиционного ортогонального плана

Значения факторов				$x_1$	$x_2$	$x_3$				
Основной уровень $x_1$				0.13	0.125	5				
Интервал варьирования $\Delta x_1$				0.01	0.025	2				
Верхний уровень (+1)				0.14	0.150	7				
Нижний уровень (-1)				0.12	0.100	3				
№ 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	

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

$$F_{\text{РАС}} = \frac{S_{\text{АД}}^2(\bar{Y})}{S^2(Y)} = 1.16 < 2.63 = F_{\text{ТАБЛ}}$$

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:

$$\lambda_1 = -1.089; \quad \lambda_2 = -1.517; \quad \lambda_3 = -2.120$$

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 имеют координаты:

$$a = 0.293; \quad b = 0.354; \quad c = 0.411.$$

Анализ модели второго порядка показывает, что линейные члены практически (кроме  $X_2$ ) 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 ультразвуковой микросварки (рис. 5.7).

Для нахождения оптимальных значений технологических параметров УЗ микросварки решили систему уравнений второго порядка. Для этого установили значение  $X_3=0$  и приравняли 0 производные оставшегося уравнения

$$Y = 12.4 + 0.165X_1 + 0.53X_2^2 - 1.79X_1^2 - 1.13X_2^2:$$

$$\begin{cases} \frac{\partial Y}{\partial X_1} = 0.165 - 3.58X_1 = 0 \\ \frac{\partial Y}{\partial X_2} = 6.53 - 2.26X_2 = 0 \end{cases}$$

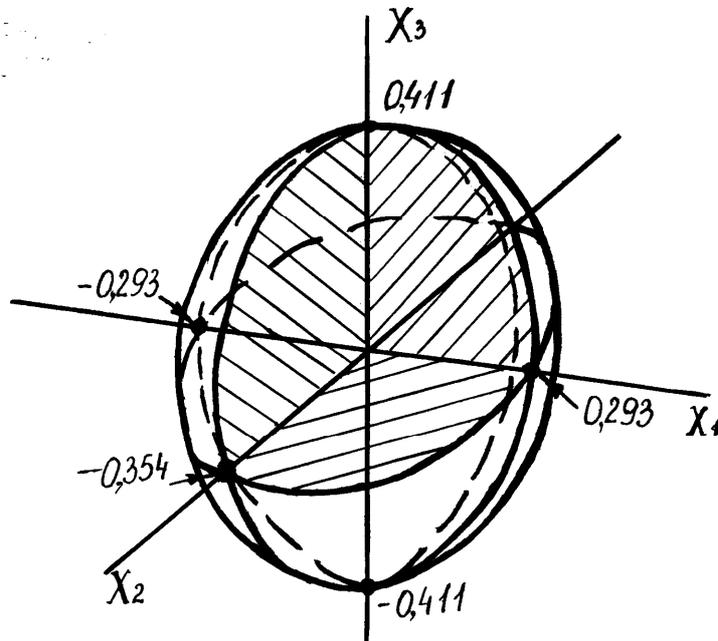


Рис. 5.7 Поверхность отклика функции

Решая систему уравнений относительно  $X_1$  и  $X_2$  получили, что  $X_1=0.046$ ,  $X_2=0.234$ , а оптимум функции соответствует 12.6 сН.

Оптимизация параметров процесса микросварки проволочных выводов по гальваническому покрытию Ni-In обеспечивает высокую надежность соединений в ИМС при экономии драгоценных металлов.

## 5.4. МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ

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

В сложной системе обслуживания каждая заявка или требование, помимо момента поступления характеризуется рядом непрерывных  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_l$  и дискретных  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_l$  параметров. Такую заявку можно рассматривать как случайный вектор.

Последовательность заявок есть поток случайных векторов, основные характеристики которого следующие:

1) ординарность - которая означает, что в каждый момент времени в систему поступает не более одной заявки;

2) стационарность - означает, что вероятность поступления в систему за интервал времени определенного количества заявок зависит от длительности интервалов;

3) 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  $t$  равна:

$$P_k(t) = \frac{(\lambda t)^k}{k!} e^{(-\lambda t)}, \quad (5.42)$$

где  $k$  - количество требований,  $k = 0, 1, 2, 3, \dots$

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

$$P(\tau > \Theta) = e^{(-\lambda\Theta)}, \quad (5.43)$$

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 2-х возможных состояний: "занят" (если он обслуживает заявки) и "свободен".

При этом в системе возникают ситуации, когда образуется либо очередь заявок в ожидании обслуживания, либо простой каналов обслуживания. Основной целью моделирования является уменьшение потерь из-за простоя в очереди.

Пусть в технологическую систему массового обслуживания поступает среднее число заявок в единицу времени -  $k$ .

Продолжительность обслуживания - случайная величина с показательным законом распределения:

$$P(\zeta > \Theta) = e^{(-\mu\Theta)}, \quad (5.44)$$

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

Тогда  $\zeta$  - среднее число заявок, обслуживаемых каналом в единицу времени  $\zeta = k/t$ , а  $n$  - количество каналов.

Приняты допущения: приоритета в обслуживании нет, взаимопомощь между каналами отсутствует, группового поступления заявок нет.

Средняя плотность потока заявок:

$$\lambda_1 = \frac{\lambda}{n}, \quad (5.45)$$

где  $\lambda$  - интенсивность потока заявок.

Приведенная плотность потока заявок за среднее время обслуживания:

$$\alpha = \frac{\lambda_1}{\zeta}, \quad (5.46)$$

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

1) коэффициент загрузки канала:

$$K_3 = \frac{\alpha}{n}, \quad (5.47)$$

2) среднее число простаивающих в очереди:

$$m_{Ox} = \frac{\alpha^{n+1} \cdot P_0}{n!n(1-\alpha/2)^2}, \quad (5.48)$$

3) среднее число заявок в системе:

$$m = m_{Ox} + \alpha, \quad (5.49)$$

4) среднее время ожидания заявки в системе

$$t = \frac{m_{Ox}}{\lambda_1}, \quad (5.50)$$

Пример: Рассчитаем операционные характеристики СМО на примере сборочного конвейера, обслуживаемого в первом случае рабочими с тележками, во втором - транспортным роботом (рис. 5.8).

Условия:

- 1) количество рабочих мест на конвейере  $k=10$ ;
- 2) интенсивность потока заявок  $\lambda = 100$  ед/ час;
- 3) 1-ый вариант - 5 одноканальных систем; 2-ой вариант 1-5 канальная система;
- 4) число заявок обслуживаемое каналом в единицу времени  $\zeta_1 = 10$ ,  $\zeta_2 = 20$ .

Рассчитанные параметры СМО приведены в табл. 5.7.

Таблица 5.7

СМО на примере сборочного конвейера

Параметры СМО	Варианты	
	1 вариант	2 вариант
Средняя плотность потока заявок, $\lambda_1$	20	20
Приведенная плотность потока заявок на среднее время обслуживания, $\alpha$	2	1
Коэффициент загрузки канала, $K_3$	0.4	0.2
Коэффициент простоя, $K_{П=1} \cdot K_3$	0.6	0.8
Среднее число простаивающих в очереди заявок, $m_{оч}$	0.4	0.2
Среднее время ожидания заявки в системе, $t$	0.02	0.001

Сравнительный анализ показывает, что характеристики пятиканальной системы обслуживания лучше, чем у одноканальной, т.к. время ожидания заявки резко уменьшается.

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 систему массового обслуживания (СМО) с отказами (рис. 5.9).

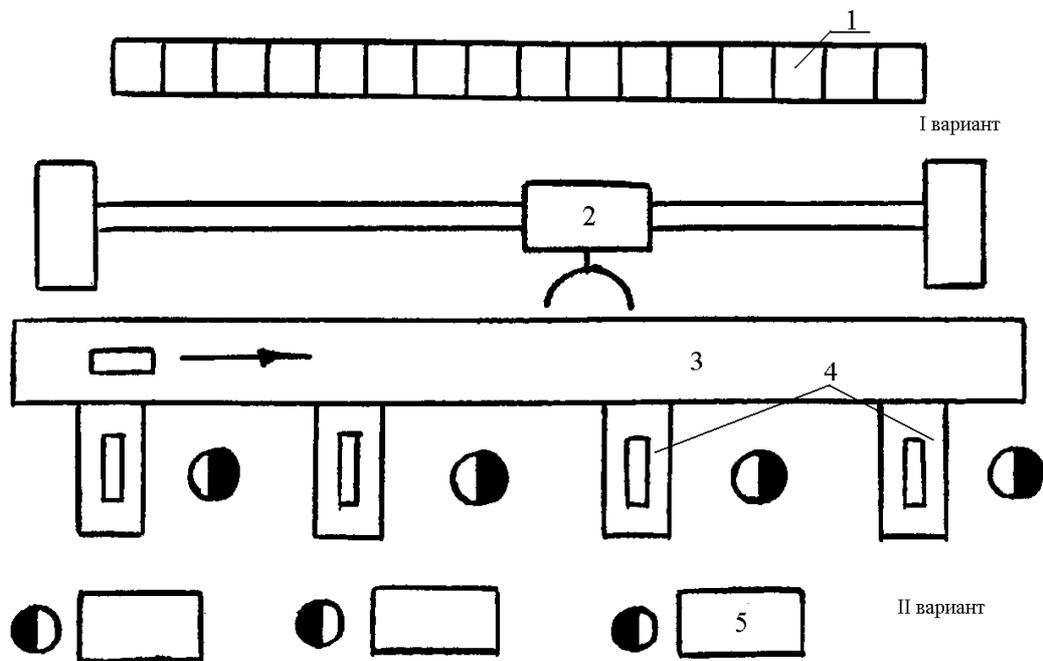


Рис. 5.8. Схема вариантов обслуживания сборочного конвейера:

- 1 - автоматизированный склад, 2 - транспортный робот,
- 3 - конвейер, 4 - рабочие места, 5 - транспортная тележка

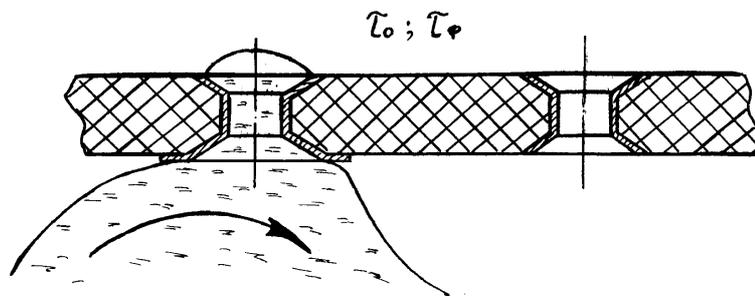


Рис 5.9. Определение каналов обслуживания для волновой пайки плат

Для этого необходимы следующие предположения:

- 1)  $\tau_{\Pi}$  - время заполнения припоем зазоров - необходимое время пайки - как время обслуживания заявки;
- 2)  $\tau_{\Phi}$  - фактическое время пайки;

3) канал обслуживания - часть волны припоя, которое проходит место соединения за время, соответствующее среднему времени пайки  $\tau_{CP}$ ;

4) число каналов обслуживания

$$n \leq \tau_a / \tau, \quad (5.51)$$

- наибольшее целое число;

5) среднее время пребывания в канале обслуживания

$$\tau_{II} = \tau_{\phi} / n!, \quad (5.52)$$

Если для конкретного места соединения время  $\tau_{\phi} < \tau_{II}$ , то зазор не заполняется припоем - это отказ в системе обслуживания.

Вероятность непропоев  $P_H$  - это вероятность отказов в СМО определяется по формуле

$$P_{*H} = 1 / \left[ \frac{\tau_{II}}{\tau_0} \cdot \frac{n!}{(n-1)!} + \frac{\tau_{II}^2}{\tau_0^2} \cdot \frac{n!}{(n-2)!} + \dots + \frac{\tau_{II}^n \cdot n!}{\tau_0^n} \right], \quad (5.53)$$

Пример. При пайке печатных плат с металлизированными отверстиями волной припоя ПОС61 при температуре пайки 235 С, флюсование ФКСП, среднее фактическое время пайки  $\tau_{\phi} = 3,5$  с,  $\tau_{II}$  по расчетам, включающим время нагрева, время на гистерезис смачивания, время на подъем припоя - 1 с.

1) Определяем число каналов:  $n = 3,5/1,0 = 3,5$ , принимаем  $n=3$ .

2) Вычисляем среднее время пребывания в канале обслуживания соединения  $\tau_C = 3,5 / 1 \cdot 2 \cdot 3 = 0,6$ с;

3) Рассчитываем  $P_H = 0,043$  или 4,3%.

Среднее фактическое число непропаев составляет около 5%.

## **5.5. СТАТИСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ**

При исследовании сложных систем, к которым относятся технологические процессы методом статистического моделирования на ЭВМ должны быть выполнены следующие этапы работ:

- составление содержательного описания процесса;
- построение формализованной схемы процесса;
- составление моделирующего алгоритма;
- формулирование методики решения задачи получения численных результатов и их использование для анализа и синтеза технологических систем.

Основой для составления математической модели процесса является его содержательное описание. Оно позволяет

- составить ясное представление о содержании операций;
- выделить простейшие элементы операций;
- определить показатели производственного процесса;
- определить показатели операций;
- составить схему взаимодействия элементов в операции;
- составить схему взаимодействия операций в процессе;
- определить закономерности изменения показателей процесса при изменении его параметров.

Содержательное описание в словесном выражении концентрирует сведения о физической природе и количественных характеристиках элементов исследуемого процесса о степени и характере взаимодействия между ними, 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 используется 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) численные значения известных характеристик и параметров процесса в виде таблиц и графиков; 3) значение начальных условий.

Формализованная схема процесса разрабатывается совместно технологами и математиками для сложных процессов, когда трудно осуществить переход от содержательного описания к математической модели. Для построения формализованной схемы необходимо выбрать показатели процесса, установить систему параметров, определяющих 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.

В инженерной практике случайные объекты проявляются как случайные события, случайные величины и случайные функции. В качестве примеров случайных событий, встречающихся при формализации производственных процессов можно привести случаи появления брака, отказа устройств, станков и другого оборудования. Случайными величинами оказываются обычно количества заготовок или изделий, отклонения их размеров, колебание режимов и т.д. При помощи случайных функций описываются флуктуации различных характеристик, зависящих от времени, координат или других непрерывных параметров.

При формализации случайные события должны задаются вероятностью их проявления в зависимости от параметром производственного процесса. Случайные величины представляются законами распределения или их числовыми характеристиками: средними значениями, среднеквадратичными отклонениями  $\delta^2$ , корреляционными моментами. Случайные функции характеризуются средними значениями и корреляционными функциями.

Современным производственным процессам свойственна частичная или полная синхронизация, которая может нарушаться под действием дестабилизирующих факторов. Вследствие этого оказываются очереди изделий или простой станков, которые не остаются неизменными, а интенсивно флуктуируют, создавая динамический 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 (например, случайное событие, система массового обслуживания и т.д.), 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 техпроцессов 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 типичных законов распределения ( нормального, равномерного, 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 при помощи математической модели, необходимо построить моделирующий алгоритм. Желательно записывать его в таком виде, который наглядно бы отражал особенности его структуры. Поэтому моделирующий алгоритм представляется в виде операторной схемы, содержащей последовательность операторов, каждый из которых изображает достаточно крупную группу элементарных операций. Операторная форма представления алгоритма не учитывает особенностей системы команд ЭВМ. Они будут учтены при построении развернутых схем счета для воспроизведения отдельных операторов при программировании задачи.

Вся совокупность операторов, составляющих моделирующий алгоритм делиться на три группы: 1) основные, 2) вспомогательные, 3) служебные. К основным относятся операторы, используемые для имитации отдельных элементов исследуемого процесса и взаимодействия между ними, т.е. описываются 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 обработку.

Для изображения операторных схем алгоритмов удобно пользоваться операторами двух принципиально различных классов: 1) арифметическими, 2) логическими. Арифметические операторы обозначаются  $A_{31}$  - это означает, что арифметический оператор №31. Передача управления данному оператору обозначается номером того оператора, от которого передается управление, записываемым слева вверху от символа данного оператора.  $^{10,16}A_{18}$  - это означает, что оператор  $A_{18}$  получает управление от операторов №10 и №16. Принципиальным свойством любого арифметического оператора является то, что после выполнения изображенных им 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. Обозначается буквой  $P_{22}^{\uparrow 35 \downarrow 12}$  - это 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 следующие типы операторов;

1. **Вычислительные**, которые являются арифметическими и обозначаются буквой  $A_i$ .
2. **Операторы формирования реализаций случайных процессов** -  $\Phi_i$ . Они применяются 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: 1) ввести в ЗУ ЭВМ специальные таблицы случайных чисел и выбирать из них отдельное число по мере надобности, 2) случайные числа вырабатываются в самой машине по особым программам. Операторы  $\Phi$  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 имитируют работу вычислительных и управляющих средств реального оборудования.

4. **Счетчики обозначаются символом  $K_i$** . При помощи их производится подсчет количества 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 технологических процессов трудно представить единый набор конкретных правил и готовых математических схем для формализации. Поэтому удобно процесс расчленить на элементарные акты, которые имеют достаточно простые математические схемы и построить также 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. Для них построим математические описания.

Под **абстрактной операцией обработки** понимают такой элементарный акт производственного процесса над данным полуфабрикатом, в результате которого меняется значение хотя бы одного из параметров полуфабриката. К классу операций обработки относят обработку резанием, штамповку, т.е. операции связанные с изменением размеров, с изменением положения в пространстве (повороты, транспортировка), 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 между параметрами, характеризующими взаимодействия станка и полуфабриката в процессе обработки.

Пусть момент начала операции обозначается  $t^{(н)}$ , а ее длительность  $\tau^{(оп)}$ . В рассматриваемой задаче нам известны значения всех параметров  $\alpha_{ик}$  полуфабриката как непрерывных, так и дискретных для моментов времени  $t \leq t^{(н)}$ , т.е. до операции. Требуется определить значение  $\alpha_{ик}$  параметров полуфабриката для моментов времени  $t \geq t^{(к)}$ , где величина

$$t^{(к)} = t^{(н)} + \tau^{(оп)} \quad (5.54)$$

является моментом окончания операции обработки. Поэтому первой частью математического описания операции обработки должны быть соотношения

$$\alpha_{ик} = f(\alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \quad (5.55)$$

для всех  $k = 1, 2, \dots, n$ , где  $\beta_m$  - некоторые параметры, характеризующие станок.

В ряде случаев приходится считаться с тем обстоятельством, что  $\alpha_{ик}$  представляют собой случайные величины. Случайными могут оказаться параметры станка  $\beta_m$ , да и сама

функция  $\alpha_{\text{IIк}}$ , флуктуирует случайно при выполнении операции. Поэтому вместо уравнения (5.55) пользуются соотношением

$$\alpha_{(\text{IIк})} = \alpha_{\text{IIк}}^0 \pm \delta_{\alpha\text{IIк}} \quad (5.56)$$

где  $\delta_{\alpha\text{IIк}}$  - случайные отклонения величины  $\alpha_{\text{IIк}}$  от некоторого неслучайного значения  $\alpha_{\text{IIк}}^0$ , заданные соответствующими законами распределения.

Однако соотношение (5.56) не исчерпывает математического описания операции обработки. К нему необходимо добавить зависимости, определяющие режим функционирования станка во времени. Помимо  $t^{(н)}$  и  $t^{(к)}$  введем следующие величины:  $t_j^{(н)}$  - момент поступления  $j$ -го экземпляра полуфабриката к станку,  $\tau^{(г)}$  - время, затрачиваемое на подготовку станка к выполнению следующей операции, а также момент готовности станка к выполнению операции

$$t^{(г)} = t^{(к)} + \tau^{(г)} \quad (5.57)$$

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 запишется

$$t_j^{(н)} = \begin{cases} t_j^{(н)} & \text{если } t_{j-1}^{(к)} + \tau_{j-1}^{(г)} \leq t_j^{(п)} \\ t_{j-1}^{(к)} + \tau_{j-1}^{(г)} & \text{если } t_{j-1}^{(к)} + \tau_{j-1}^{(г)} \geq t_j^{(п)} \end{cases} \quad (5.58)$$

Любые дополнительные простои могут быть обобщены и включены в  $\tau^{(г)}$ .

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

$$\left. \begin{array}{l} t^{(к)} + \tau^{(г)} \geq t^{(п)} \\ t_0 + k\tau^{(т)} < t^{(к)} + \tau^{(г)} \leq t_0 + (k+1)\tau^{(т)} \end{array} \right\} \quad (5.59)$$

Исходя из (5.59) можно записать

$$t^{(н)} = t_0 + (k^* + 1)\tau^{(т)} \quad (5.60)$$

где  $t_0$  - начало отсчета времени,

$k^*$  - число от 0 до  $n$ .

Под **абстрактной операцией сборки** понимают такой элементарный акт производственного процесса над совокупностью полуфабрикатов (один ведущий и несколько ведомых), в результате которого изменяется значение хотя бы одного из параметров ведущего полуфабриката (за счет присоединения к нему ведомых), а соответствующие ведомые полуфабрикаты прекращают свое существование.

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

$$\Pi_j = f(\alpha_j, \alpha_{i1}, \alpha_{i2}, \dots, \alpha_{in}, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m) \quad (5.61)$$

Вначале рассмотрим некоторые параметры, характеризующие операцию сборки.

### 1. Момент начала операции $t^{(n)}$

Если  $t_j^{(n)}$  - момент поступления на сборку ведущего полуфабриката, а  $t_{i1}^{(n)}, t_{i2}^{(n)}, \dots, t_{in}^{(n)}$  - моменты поступления деталей, то операция сборки начинается в момент готовности всей совокупности элементов

$$t_j^{(n)} = \max \{ t_j^{(n)}, t_{i1}^{(n)}, t_{i2}^{(n)}, \dots, t_{in}^{(n)}, t_{j-1}^{(k)} + \tau_{j-1}^{(r)} \} \quad (5.62)$$

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

Если операция сборки синхронизирована с тактом выпуска продукции, то

$$t_j^{(n)} = t_0 + (k+1)\tau^{(e)} \quad (5.63)$$

где  $t_0$  - начало отсчета,

$\tau^{(r)}$  - длительность ритма сборки,

$k$  - числа  $0, 1, 2, \dots$ .

### 2. Длительность операции сборки $\tau^{(оп)}$ .

При формализации операции сборки ее длительность удобно представить в виде последовательных этапов: установка детали на ведущем полуфабрикате  $\tau^{(y)}$ , крепление (пайка) деталей  $\tau^{(кр)}$ , регулировка сборочной единицы  $\tau^{(рег)}$ .

Тогда

$$\tau^{(оп)} = \tau^{(y)} + \tau^{(кр)} + \tau^{(рег)} \quad (5.64)$$

3. **Время, затрачиваемое на подготовку сборочного агрегата к следующей операции  $\tau^{(r)}$ .** Этот параметр является случайной величиной с определенным законом распределения. Обычно принимается экспоненциальный закон распределения  $\tau^{(r)}$

$$f(\tau^r) = \lambda_r \cdot e^{-\lambda_r \tau^r} \quad (5.65)$$

где  $\lambda_r = 1/T^r$  - среднее количество подготовок за единицу времени, 1/час.

4. **Длительность ритма сборки  $\tau^{(r)}$**  принимается детерминированной неслучайной величиной.

5. **Момент времени готовности агрегата к выполнению следующей операции**

$$t_j^{(r)} = t_{j-1}^{(k)} + \tau_{j-1}^{(r)} \quad (5.66)$$

6. **Надежность сборочного агрегата.** Из за отказов оборудования происходит срыв процесса сборки. Плотность распределения вероятности времени выхода из строя оборудования описывается функцией

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (5.67)$$

где  $t$  - время,  $\lambda$  - среднее число отказов за единицу времени.

Можно также пользоваться средним временем безотказной работы  $T_{cp}$ , которое для экспоненциального распределения равно

$$T_{(cp)} = \frac{1}{\lambda} \quad (5.68)$$

7. Из-за износа оборудования оно постепенно изменяет свои параметры, что приводит к увеличению доли бракованных изделий. **Вероятность брака**

$$P^{(бр)} = P_0^{(бр)} + v \left[ t - t^{(нд)} \right]^s \quad (5.69)$$

где  $t^{(нд)}$  - момент последней наладки,  $v, s$  - константы,  $P_0^{(бр)}$  - вероятность брака после наладки.

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  $\tau^{(пр)}$ . Она может оказаться бракованной с вероятностью  $P^{(бр)}$ . В этом случае она заменяется другой деталью, если такая имеется. Операция сборки может продолжаться лишь ограниченное время. Если операция в норму времени не укладывается, то наступает 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  $t_j^{(n)} < T$ , где  $t_j^{(n)}$  - 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, 3, ..., n. Каждая i-я операция, полученная при разбиении, состоит в присоединении к сборочной единице лишь одной детали. Длительность i-ой операции, j-го узла обозначим  $\tau_{ij}^{(k)}$ , а момент ее окончания  $t_{ij}^{(k)}$ . Если к моменту  $t_{ij}$  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 следующий вид

$${}^8\Phi_1 P_{2\downarrow 21}^{2,18,20} P_{3\downarrow 9} \Phi_4 K_5 K_6 F_7 F_8^1 {}^3 F_9^{9,14} P_{10\uparrow}^{12, 10,17} K_{11}^{19} {}^{10} K_{12} \Phi_{13} P_{14\uparrow}^{10} \Phi_{15} A_{16} P_{17\downarrow 11} K_{18}^3 {}^{11} F_{19} K_{20}^3 {}^2 A_{21} Y_{22}$$

где  $A$  - вычислительный, арифметический оператор,  $\Phi$  - оператор формирования реализаций случайных процессов,  $F$  - оператор формирования неслучайных величин,  $K$  - счетчик.

На рис. 5.10. показана блок схема моделирующего алгоритма. Сущность работы алгоритма состоит в следующем.

Оператор  $\Phi_1$  формирует момент поступления на сборку ведущего полуфабриката  $t_j^{(n)}$ . Величина  $t_j^{(n)}$  сравнивается с моментом окончания сборочных процессов  $T$  (оператор  $P_2$ ). Если  $t_j^{(n)} < T$ , 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 условие  $i > n$ . Пусть сначала  $i > n$ . Это значит, что сборка данного изделия закончена. Тогда осуществляется переход к новой сборочной единице (оператор  $F_8$ ) с попутным формированием выходного параметра  $\alpha_{ikj}$  (оператор  $\Phi_4$ ), подсчетом количества готовых изделий (оператор  $K_5$ ), определение номера следующего ведущего полуфабриката, т.е. новой сборочной единице (оператор  $K_6$ ) и формированием начала сборки  $i = 1$  (оператор  $F_7$ ). Если же условие, проверяемое оператором  $P_3$ , оказывается невыполнимым, то сборка изделия не закончилась и переходим к оператору  $\Phi_9$  для формирования  $t_{ij}^{(k)}$  - подготовка к очередной сборочной операции. Оператор  $P_{10}$  проверяет имеется ли k-я деталь, необходимая для i-ой операции сборки ( $n_{ki} > 0$ ).

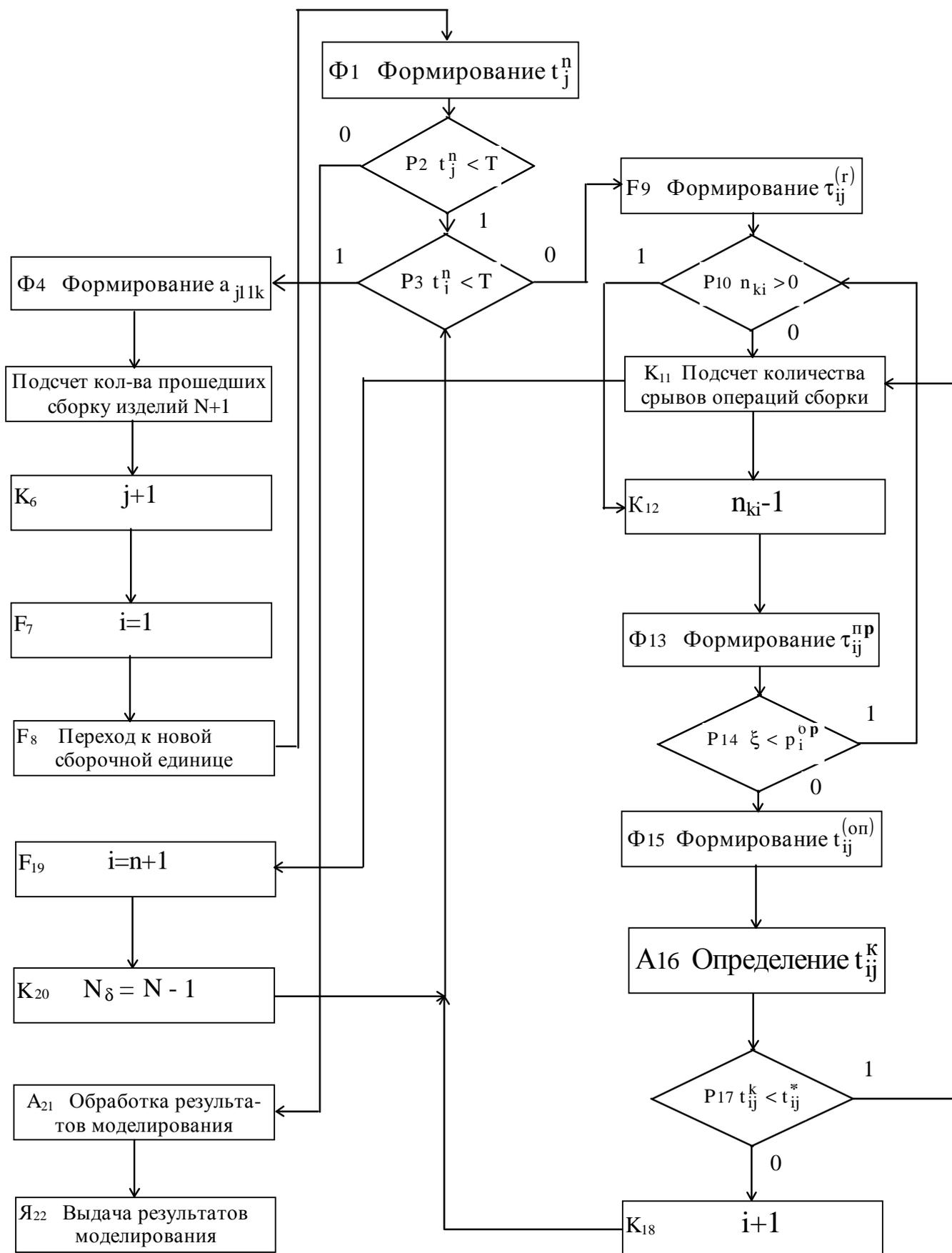


Рис. 5.10. Моделирующий алгоритм операции сборки

Если детали нет (не поступила из 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  $i = n + 1$  (т.е. имитирует конец сборки), а оператор  $K_{20}$  вычитает единицу из количества готовых изделий для компенсации действия оператора  $K_5$  и управление передается оператору  $P_3$ . Теперь  $i > n$  (т.е. условно сборка закончена). Поэтому работа алгоритма будет продолжаться по знакомой цепи  $P_3\Phi_4K_5K_6F_7F_8\Phi_1$ . Будем теперь считать, что имеются детали для сборки  $n_{ki} > 0$  (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 жребью (оператор  $P_{14}$ ) определяется качество детали. Если деталь бракованная, то возвращаемся к оператору  $P_{10}$  и выбираем новую деталь. Если деталь годная, то продолжаем сборку: оператор  $\Phi_{15}$  формирует длительность сборки  $\tau_{ij}^{(on)}$ , а оператор  $A_{16}$  определяет момент ее окончания  $t_{ij}^{(\kappa)}$ . Если  $t_{ij}^{(\kappa)} < t_{ij}^*$  (оператор  $P_{17}$ ), то переходим к оператору  $K_{18}$  ( $i + 1$ ), а затем к  $P_3$ . Если это условие не выполнено то получается срыв сборки (оператор  $K_{11}$ ).

Часто приходится сравнивать с  $t_{ij}^*$  не  $t_{ij}^{(\kappa)}$ , свойственное  $i$ -ой операции, а  $t_j^{(\kappa)}$  - моментом окончания составной операции сборки. В этом случае в качестве  $t_j^{(\kappa)}$  можно взять наибольшее  $t_{ij}^{(\kappa)}$  и несколько изменить алгоритм. Вместо оператора  $P_{17}$  необходимо поставить оператор обеспечивающий запоминание  $t_{ij}^{(\kappa)}$  и оператор сравнения  $\max \{ t_{ij}^{(\kappa)} \}$  с  $t_{ij}^*$ , а после оператора  $P_3$  ввести оператор, выбирающий  $\max \{ t_{ij}^{(\kappa)} \}$ .

Моделирование технологического процесса сборки электронного модуля на печатной плате проводится в следующей последовательности:

1. На основании ОСТ 4 ГО.054.264-267 общая 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 принимаем за математическое ожидание длительности операции сборки  $M(\tau_{ij}^{on})$ . Ориентировочно оценивается масса изделия  $\Pi_{jII}$  и полученная величина принимается за математическое ожидание массы изделия  $M(\Pi_{jII})$ . Такие же действия прделываются для остальных свойств изделия.

3. Экспериментально устанавливаются законы распределения случайных величин:

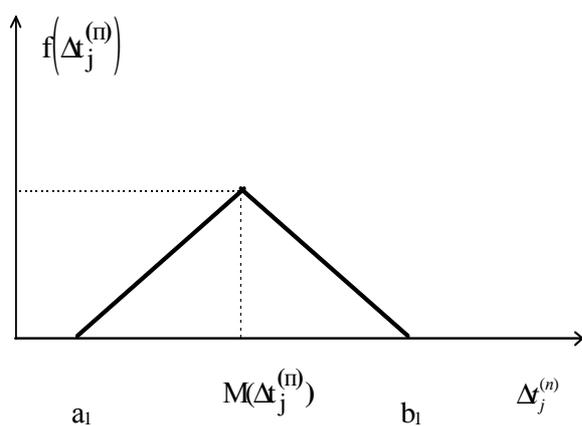
- плотность распределения и интервалов между моментами поступления ведущего полуфабриката  $\Delta t_j^{(n)}$  подчиняется треугольному закону (рис. 5.11, а)

$$f(\Delta t_j^{(n)}) = \begin{cases} K(\Delta t_j^{(n)} - a_1), & \text{когда } - a_1 \leq \Delta t_j^{(n)} \leq \frac{b_1 + a_1}{2} \\ -K(\Delta t_j^{(n)} - b_1), & \text{когда } - \frac{b_1 + a_1}{2} \leq \Delta t_j^{(n)} \leq b_1 \\ 0, & \text{когда } - \Delta t_j^{(n)} < a_1 \text{ или } \Delta t_j^{(n)} > b_1 \end{cases} \quad (5.70)$$

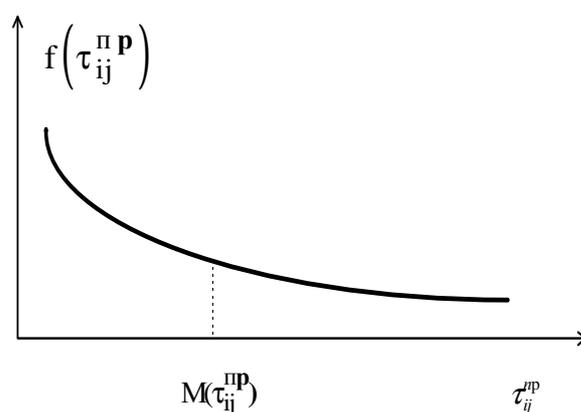
где  $K = \frac{4}{(b_1 - a_1)^2}$ ,

$$M(\Delta t_j^{(n)}) = \frac{a_1 + b_1}{2}$$

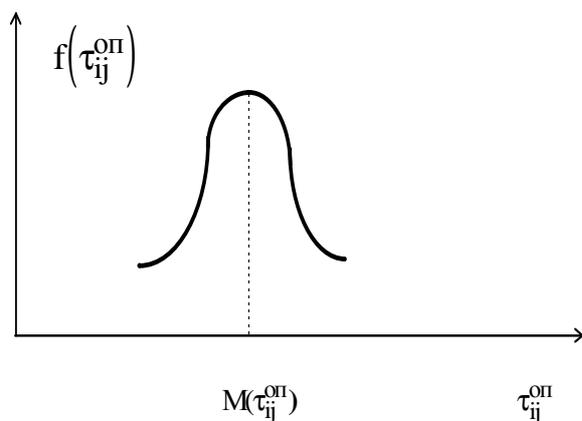
$$\sigma^2 = \frac{1}{24}(b_1 - a_1)^2$$



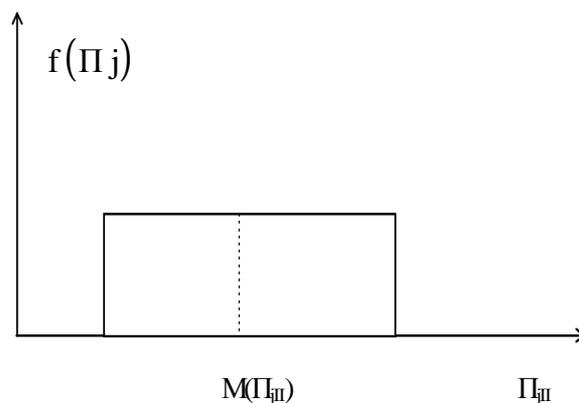
а



б



в



г

Рис. 5.11. Законы распределения случайных величин:

а - треугольный, б - экспоненциальный, в - нормальный, г - равновероятностный

- плотность распределения длительности проверки качества детали  $\tau_{ij}^{пп}$  подчиняется экспоненциальному закону (рис. 5.11, б)

$$\begin{aligned} f(\tau_{ij}^{пп}) &= \lambda_{пп} e^{-\lambda_{пп} \tau_{ij}^{пп}} \\ M(\tau_{ij}^{пп}) &= \frac{1}{\lambda_{пп}} = T^{(пп)}, \end{aligned} \quad (5.71)$$

где  $\lambda_{пп}$  - среднее число проверок за единицу времени,  $T^{(пп)}$  - среднее время без проверок.

- плотность распределения длительности операции сборки  $\tau_{ij}^{оп}$  подчиняется нормальному закону (рис. 5.11, в)

$$\begin{aligned} f(\tau_{ij}^{оп}) &= \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\left(\frac{\tau - \tau_0}{\sqrt{2}\delta}\right)^2} \\ M(\tau_{ij}^{оп}) &= \tau_0 \end{aligned} \quad (5.72)$$

- плотность распределения одного из параметров изделия  $\Pi_{jII}$  - массы, подчиняется равномерному закону распределения (рис. 5.11, г)

$$\begin{aligned} f(\Pi_{jII}) &= \begin{cases} \frac{1}{b_2 - a_2}, & \text{когда } a_2 \leq \Pi_{jII} \leq b_2 \\ 0, & \text{когда } \Pi_{jII} < a_2; \Pi_{jII} > b_2. \end{cases} \\ M(\Pi_{jII}) &= \frac{a_2 + b_2}{2} \end{aligned} \quad (5.73)$$

### 3. Выбираются на основании опытных данных

- значение относительных допусков на интервалы поступления ведущего полуфабриката

$$\frac{M(\Delta t_j^п) - a_1}{M(\Delta t_j^п)} = \frac{b_1 - M(\Delta t_j^п)}{M(\Delta t_j^п)} = 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10\%, \quad (5.74)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  - границы изменения параметра.

- продолжительность подготовки к операции  $\tau_{ij}^г$

$$\tau_{ij}^г = 1,2,3,4,5с \quad M(\tau_{ij}^г) = \tau_{ij}^г. \quad (5.75)$$

- интенсивность проверки качества деталей  $\lambda_{пп}$

$$\lambda_{\text{пп}} = 0.2; 0.25; 0.3; 0.5; e^{-1}. \quad (5.76)$$

- относительное среднеквадратичное отклонение продолжительности сборки

$$\frac{\sigma_{\tau_{ij}^{\text{жг}}}}{M(\tau_{ij}^{\text{оп}})} = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20\%. \quad (5.77)$$

- значения относительных допусков массы изделия

$$\frac{M(\Pi_{j\Pi}) - a_2}{M(\Pi_{j\Pi})} = \frac{b_2 - M(\Pi_{j\Pi})}{M(\Pi_{j\Pi})} = 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20\%, \quad (5.78)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  - границы изменения параметра.

- вероятность бракованных деталей  $P_{\text{ки}}^{(\text{бп})}$  для транзисторов, диодов и ламп

$P_{\text{ки}}^{(\text{бп})} = 0.5; 1.0; 2.5\%$ , интегральных схем, резисторов, конденсаторов  $P_{\text{ки}}^{(\text{бп})} = 0.1; 0.2; 0.3\%$ .

4. Определяется длительность рабочей смены  $T = 8$  часов.

5. Рассчитывается

- ритм сборки  $\tau^{(\text{т})}$  по формуле

$$\tau^{(\text{т})} = \frac{1}{n} \left[ \sum_{i=1}^n M(\tau_{ij}^{\text{оп}}) + \sum_{i=1}^n M(\tau_{ij}^{\text{г}}) + \sum_{i=1}^n \sum_{\kappa=1}^{n_{\text{ки}}} M(\tau_{\text{ки}}^{\text{пп}}) \right]. \quad (5.79)$$

Данное значение ритма принимается за математическое ожидания продолжительности интервалов между поступлениями ведущего полуфабриката  $M(\Delta t_j^n)$ .

- количество деталей, необходимое для сборки за смену

$$n_{\text{ки}}^* = \frac{T}{M(\Delta t_j^n)}. \quad (5.80)$$

- начало операции сборки сборочной единицы

$$t_{ij}^{(\text{н})} = \begin{cases} t_{i-1,j}^{(\text{к})}, & \text{если } t_{i,j-1}^{(\text{к})} < t_{i-1,j}^{(\text{к})} \\ t_{i,j-1}^{(\text{к})}, & \text{если } t_{i,j-1}^{(\text{к})} \geq t_{i-1,j}^{(\text{к})} \end{cases} \quad (5.81)$$

- конец  $i$ -ой операции сборки определяется

$$t_{ij}^{(\text{к})} = t_j^{(\text{н})} + \left( \tau_{ij}^{\text{у}} + \sum_{\kappa=1}^{n_i} \tau_{\text{ки}}^{(\text{пп})} + \tau_{ij}^{\text{оп}} \right). \quad (5.81)$$

- конец сборки сборочной единицы

$$t_j^{(\text{к})} = t_j^{(\text{н})} + \sum_{i=1}^n \left( \tau_{ij}^{\text{г}} + \sum_{\kappa=1}^{n_i} \tau_{\text{ки}}^{(\text{пп})} + \tau_{ij}^{(\text{оп})} \right). \quad (5.82)$$

- предельное значение момента сборки  $i$ -ой операции

$$t_{ij}^* = t_j^{(n)} + 1.1 \left[ M(\tau_{ij}^r) + \sum_{k=1}^{n_{ki}} M(\tau_{kij}^{np}) + M(\tau_{ij}^{op}) \right]. \quad (5.83)$$

- предельное значение момента сборки -  $j$ -ой сборочной единицы

$$t_j^* = t_j^{(n)} + 1.1 \sum_{i=1}^n \left[ M(\tau_{ij}^r) + \sum_{e=1}^{n_{ki}} M(\tau_{kij}^{np}) + M(\tau_{ij}^{op}) \right]. \quad (5.84)$$

## Глава 6. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ОСНАСТКА

### 6.1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОСНАЩЕНИЕ И ПРАВИЛА ЕГО ВЫБОРА

Технологический процесс реализуется с помощью универсального и специального технологического оснащения, к которому относится 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 и инструмент и средства контроля) - это орудия производства, добавляемые к технологическому оборудованию для выполнения определенной части технологического процесса.

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 технологического процесса;
- возможности группирования операций;
- максимального применения универсальных и стандартных моделей;
- равномерной загрузки.

Выбор технологического оборудования (ТО) проводится по каталогам, рекламным проспектам, научно-технической литературе на основе анализа затрат на реализацию ТП, который предусматривает:

а) выбор вариантов технологического оборудования, отвечающих определенным требованиям и обеспечивающих решение одинаковых задач в конкретных условиях производства;

б) сравнение вариантов ТО на основании технологических требований к изделию, технических возможностей, затрат на приобретение и эксплуатацию;

в) учет требований техники безопасности и промышленной санитарии.

Результаты анализа представляются в виде:

- отношений основных времен;
- отношений штучных времен;
- отношений приведенных затрат.

Важными показателями при выборе оборудования являются:

- коэффициент загрузки

$$K_3 = \frac{M_P}{M_N}, \quad (6.1)$$

где  $M_P$  и  $M_N$  - расчетное и принятое количества единиц оборудования.

Нормативный коэффициент загрузки зависит от типа производства: для массового - 0,65-0,77, серийного - 0,75-0,85, единичного - 0,8-0,9

- коэффициент использования оборудования

$$K_0 = \frac{t_0}{t_{шт} (t_{шк})}, \quad (6.2)$$

где  $t_0$ ,  $t_{шт}$  - основное и штучное время работы оборудования.

Выбор технологической оснастки производится в следующей последовательности :

- проведение анализа конструктивных характеристик изделий;
- группирование технологических операций с целью определения наиболее приемлемой системы технологической оснастки;
- определение исходных требований к технологической оснастке;
- установление принадлежности выбираемых конструкций оснастки к системам оснастки;
- отбор конструкций оснастки, соответствующей установленным требованиям и выбор оптимальной исходя из минимума затрат;

- определение исходных данных для конструирования и изготовления новых конструкций оснастки;

- выдача технического задания на конструирование и изготовление технологической оснастки.

Для облегчения выбора всю оснастку разбивают на системы, определяемые правилами проектирования, изготовления и эксплуатации. В промышленности существует шесть систем технологической оснастки, сведения о которой приведены в соответствующих каталогах.

Универсально-безналадочная оснастка (УБО) объединяет приспособления для закрепления деталей, объединенных общностью базовых поверхностей и характером обработки ( тиски, патроны ). Она покупается заводами или поступает с прокатных баз. При её эксплуатации требуется только регулирование зажимных элементов. Затраты на оснащение технологической операции за анализируемый период производства изделий этого вида оснастки определяется уравнением

$$P_{УБО} = \frac{A_{УБО}}{q_0}, \quad (6.3)$$

где  $A_{УБО}$  - амортизационные отчисления за приобретённую оснастку,

$q_0$  - количество оснащаемых операций.

Универсально-сборная оснастка (УСО) состоит из комплектов стандартных деталей и сборочных единиц, из которых на предприятии собираются несколько вариантов оснастки. Эта оснастка также не проектируется заводом-изготовителем РЭС, а покупается на предприятиях техоснастки или покупается с баз проката. Затраты на оснащение операций определяются уравнением

$$P_{УСО} = C_{УСО} \cdot q_C + C_B, \quad (6.4)$$

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

$$P_{СРО} = C_Э + C_{СРО} \cdot q_C + A_{СРО} / q_0, \quad (6.5)$$

где  $C_Э$  - себестоимость изготовления специальных элементов,

$C_{СРО}$  - себестоимость сборки оснастки,

$A_{СРО}$  - амортизационные отчисления за постоянную часть.

Универсально-наладочная оснастка (УНО) представляет собой покупное изделие, к которому 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 приобретение этих систем оснасток определяются уравнением:

$$P_{\text{СНО}}^{\text{УНО}} = C_{\text{СЭ}} + C_{\text{У}} \cdot q_{\text{У}} + A_{\text{СНО}}^{\text{УНО}} / q_{\text{Н}}, \quad (6.6)$$

где  $C_{\text{СЭ}}$  - себестоимость изготовления сменных элементов наладки,

$C_{\text{У}}$  - затраты на установку наладки,

$q_{\text{У}}$  - количество установок наладки за анализируемый период,

$A_{\text{СНО}}^{\text{УНО}}$  - амортизационные отчисления за постоянную часть,

$q_{\text{Н}}$  - количество наладок, закрепленных за постоянной частью.

Неразборная специальная оснастка (НСО) представляет собой приспособление на одну операцию. Она проектируется и изготавливается предприятием. Затраты на приобретение НСО состоит из затрат на изготовление деталей  $C_{\text{Э}}$  и их сборку  $C_{\text{НСО}}$

$$P_{\text{НСО}} = C_{\text{Э}} + C_{\text{НСО}}, \quad (6.7)$$

При выборе средств механизации и автоматизации необходимо учитывать не только рост производительности труда и качества продукции, но и экономическую эффективность. Критерием экономической эффективности считается срок окупаемости новой техники

$$T = \frac{P_1 - P_2}{C_2 - C_1}, \quad (6.8)$$

где  $P_1$  и  $P_2$  - капитальные вложения по механизированному (автоматизированному) и немеханизированному вариантам,

$C_1$  и  $C_2$  - себестоимость продукции, изготавливаемой по сравниваемым вариантам.

В приборостроении срок окупаемости составляет 3-4 года.

## 6.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В условиях многономенклатурного и мелкосерийного производства РЭС 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. Светомонтажный стол подает ЭРЭ монтажнику или индицирует ячейку неподвижного накопителя и указывает световыми

средствами 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/час, на светомонтажном столе он может достигать 500-600 шт/час.

Светомонтажный стол - довольно сложное устройство, в котором могут применяться различные принципы подачи ИЭТ, указания мест расположения на ПП, управление устройства (рис.6.1).

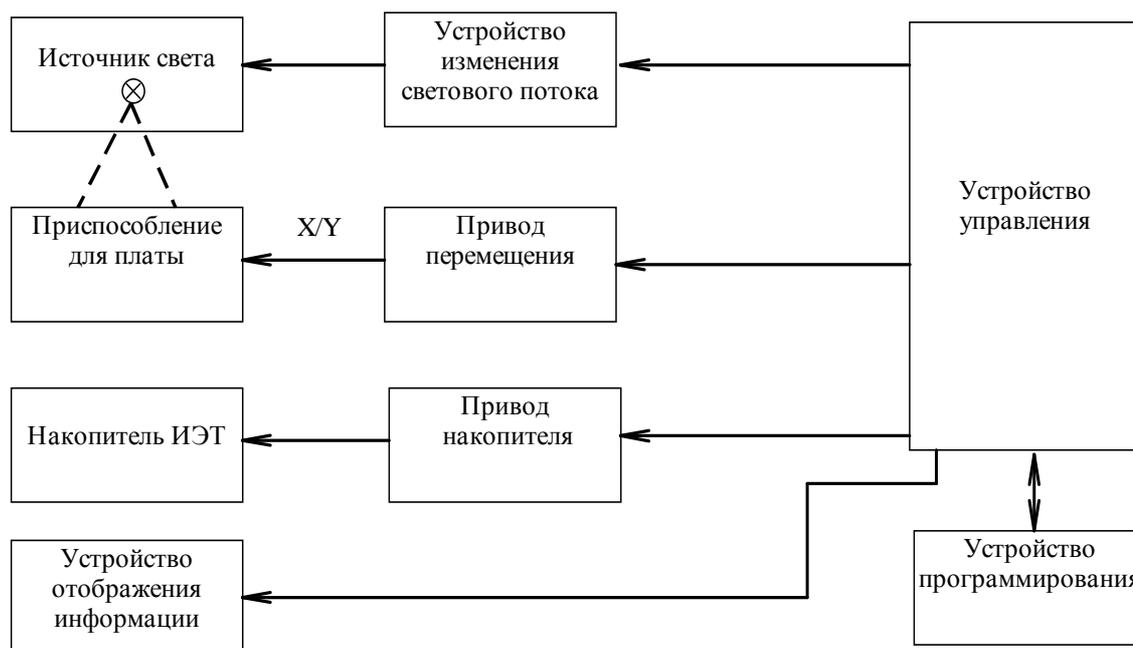


Рис. 6.1. Схема светомонтажного стола

Указание посадочных мест может быть выполнено путём проецирования со слайдов либо “световой указкой”, либо использованием световодов (рис. 6.2).

В первых светомонтажных столах модели УПСП - 904 (СССР) и фирмы Streckfuss (Германия) указания посадочных мест осуществлялось проектированием со слайдов в диапроекторе, закреплённым под столом. Число и расположение пятен света на ПП зависело от расположения отверстий в носителе информации - латунной фольге или киноплёнке толщиной 0,1 мм, вставленной в рамку слайда. Недостатками являлись высокая трудоёмкость подготовки программ, низкий темп сборки.

Указание с помощью световодов посадочных мест путём подсветки отверстий в ПП применялось в установках “Свет” и “Цвет”. Полярность элементов индировалась миганием. Недостатками являлись значительная трудоёмкость подготовки программ (до 2

часов на 50 ЭРЭ), ограниченные возможности передачи дополнительных символов и интеграции.

Более гибкой является система с использованием "световой указки", 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 направление на место установки (рис. 6.3).

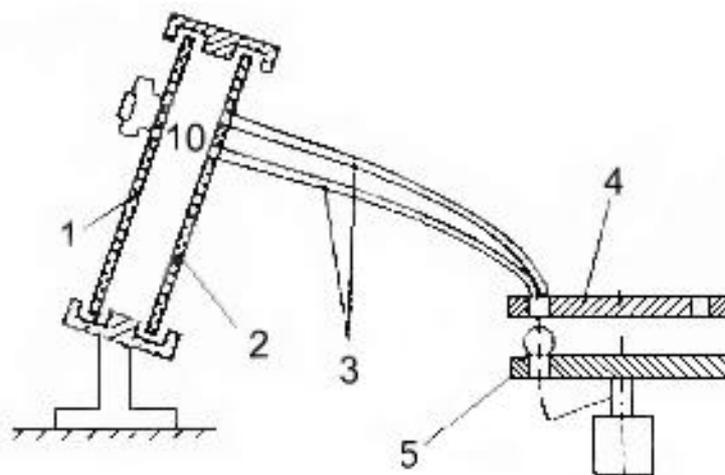


Рис. 6.2. Схема проецирования изображения через световод:  
1 - плата, 2 - шаблон, 3 - световод, 4 - программная панель,  
5 - осветитель



Рис. 6.3. Светомонтажный стол с гибкой программой сборки

Характеристики светомонтажных столов приведены в табл. 6.1.

Таблица 6.1.

Светомонтажные столы программной сборки

Модель	Устройство управления	Емкость ОЗУ	Средства отображения	Тип внешних ОЗУ
ПМПП-902	МП-901	16 К	Табло	НМЛ
3D-TS	Z-80	32 К	3-х знаковое Табло	НГМД 64 К
Polytronik Logpoint (Англия)	Z-80	64 К	32-х знаковое Дисплей	НГМД 64 К

### 6.3. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СЕРИЙНОГО И МАССОВОГО ПРОИЗВОДСТВА

Сборочные автоматы, выполняющие основную технологическую операцию установки ИЭТ на печатную или керамическую 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.

Применяемые в промышленности сборочные автоматы отличаются выполняемыми технологическими операциями и переходами, возможностями установки определенной номенклатуры ИЭТ (по исполнению или номиналам), степенью автоматизации, применяемыми дополнительными средствами и т.д.

За последнее время появился ряд сборочных автоматов, в которых операции 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: 1) извлечение ИЭТ из накопителя или носителя, 2) поворот ИЭТ по ключу или оси координат, 3) формовка выводов ИЭТ, 4) перенос ИЭТ, 5) центровка ИЭТ, 6) установка ИЭТ на ПП. Один из вариантов сборочной головки показан на рис. 6.4.

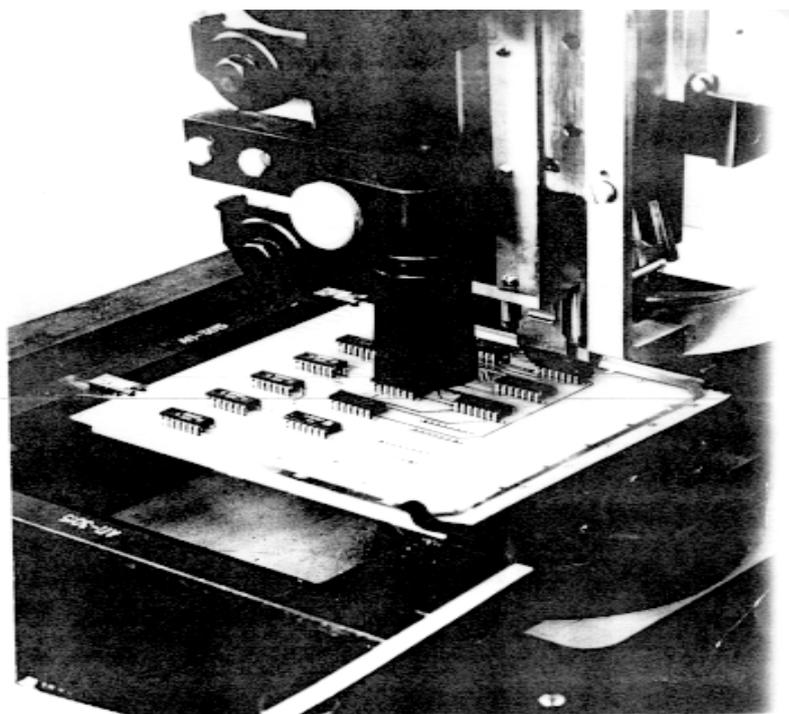


Рис. 6.4. Сборочная головка



Рис. 6.5. Установка ИМС на полуавтомате с пантографом

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 печатной платы. Установочная головка при этом выполняет следующие действия: захватывает элемент, изгибает выводы, вставляет выводы в отверстия, обрезает и фиксирует выводы. С помощью копирного щупа пантографа можно позиционировать одновременно много держателей печатных плат, что повышает производительность до 2000 элем./час.

Преимуществом полуавтоматов с пантографами является высокая производительность, возможность быстрой переналадки на другие изделия.

Недостаток - более жесткие допуски на монтажные отверстия.

Пример: полуавтомат для установки ИМС в корпусах DIP с одновременной групповой подрезкой выводов ГГ-2482 имеет время цикла укладки 3 с, производительность 1200 шт/час (рис. 6.5).

Установки для параллельной сборки используют принцип ударного монтажа фирмы PHILIPS. Установка параллельной сборки имеет неподвижный держатель печатных плат, на котором закрепляется плата 1, установочные головки 2 и магазин компонентов 3. При параллельной установке во времени компонентов используют одновременно до 10 установочных головок, которые вращаются в аксиальном направлении на  $180^{\circ}$ . (рис. 6.6).

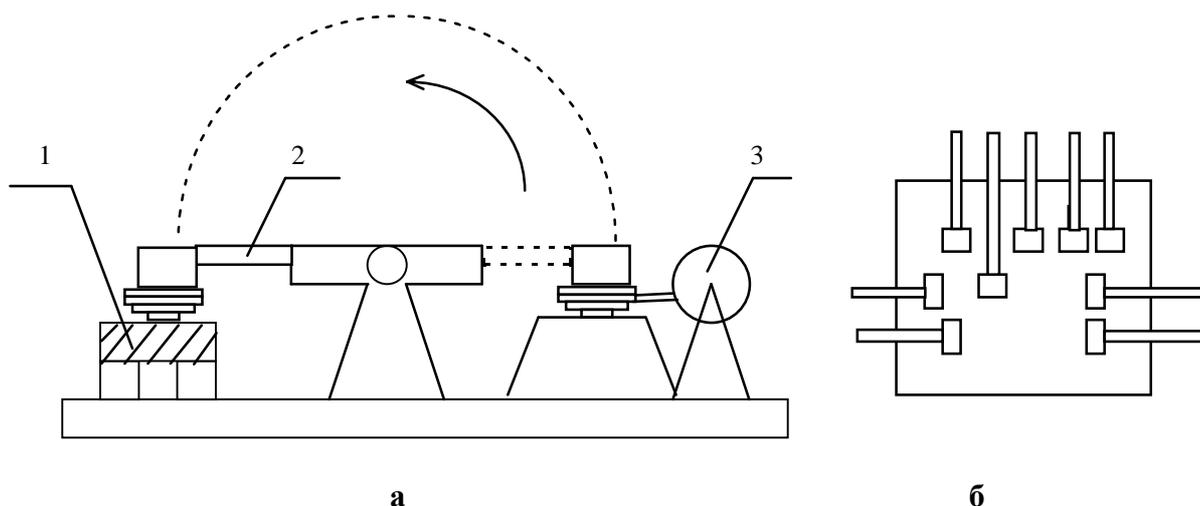


Рис. 6.6. Принцип ударного монтажа:

а - принцип работы, б - расположение сборочных головок,

1 - плата, 2 - головка, 3 - питатель

Фиксация выводов происходит посредством загибки их в нужном направлении с помощью специального устройства. Чтобы установочные головки не мешали друг другу, они располагаются вокруг печатной платы. Вследствие одновременной установки достигается высокая производительность (до 2500-3000 шт/час), однако перестройка установки на другой тип плат требует много времени, поэтому метод пригоден для крупносерийного и массового производства.

При изготовлении электронно-вычислительной аппаратуры, характеризующейся большим числом однотипных сборочных единиц - типовых элементов замены (ТЭЗ) применяют сборочные машины с цифровым управлением. Информация, необходимая для управления машиной, считывается из носителя данных: магнитного диска.

К позиционированию стола предъявляют повышенные требования, т.е. необходимая точность составляет  $\pm 0.025$  мм. Параллельно во времени при позиционировании печатной платы происходит выборка компонентов и их транспортирование к сборочной головке. Число магазинов должно быть достаточно большим от 20 до 40 для выполнения сменного задания.

Автомат установки на печатные платы ЭРЭ с осевыми выводами и перемычек, вклеенных в ленту в программной последовательности типа "Трофей", управляемый с помощью мини-ЭВМ "Электроника-60" имеет техническую характеристику, приведенную в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Техническая характеристика автоматов для установки ЭРЭ

Параметры	"Трофей" СССР	ГГМ 1.149.002 СССР	ГГМ 1.149.007 СССР	NM-2050 Япония
Производительность, шт/час	9000	6000	2000	14000
Габаритные размеры плат, мм	380x380	320x320	360x360	330x250
Размеры корпусов элементов, мм	2.2-9.0	2.0-4.0	4x4; 6x6; 8x8	-
Установочные размеры, мм	10-32.5		7.5-15	5-12.5
Типы выводов элементов	ЭРЭ с осевыми выводами		однонаправленные	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	1650x 1500x1500	1600x 1200x1680	1600x 1200x1630	4660x 1455x1400
Масса, кг	1000	500	500	2800

Для программной вклейки ЭРЭ с осевыми выводами и перемычек в липкую ленту используется автомат типа “ТРАЛ”, управляемый с помощью мини-ЭВМ. Автомат секционного типа, вклейка одновременно осуществляется с 20-60 бобин.

Автомат ГГМ 1.149.002 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 на двигателе постоянного тока СД-75Д с максимальной скоростью позиционирования 0.1 м/с и минимальным шагом 0.02 мм. Управление автоматов осуществляется от стойки СЧПУ, программноноситель - 8-дорожечная перфолента.

Для автоматизированной сборки и пайки выводов ИМС с планарными выводами в корпусе типа 401.14 и др. применяют автоматы с числовым программным управлением типов АРПМ, АУП-007, УСПА-1 (СССР) (табл. 6.3). Автомат сборки плат (АСП-902П) может устанавливать корпуса ИМС 4-х типоразмеров с 14 и 16 выводами. Перед сборкой ПП закрепляются в пакетах, которые пакетом в 5-10 шт устанавливаются на транспортно-накопительном модуле. Кассеты с микросхемами закрепляются на платформах вибрационных питателей.

Таблица 6.3.

Технические характеристики автоматов сборки для ИМС с планарными выводами

Параметр	АРПМ	АУП-007	АСП-902П
Производительность, шт/час	400	300	800
Габаритные размеры ПП, мм	250x250	250x250	200x270
Емкость накопителя ИМС, шт	1500	1500	1500
Пайка ИМС: вид время, с	точечная 9	точечная 12	групповая 4
Мощность, кВт	1.0	3.0	2.5
Габариты, мм	1400x850x1020	1950x1200x1650	1950x1930x1630
Масса, кг	170	600	1000

Клей наносится двумя методами: на печатную плату дозатором ( универсальный метод) или на дно микросхемы с помощью ванночек с клеем (более производительный метод).

По программе палета с платой из накопителя подается в рабочую зону, сборочная головка меняет хват, вакуумной присоской захватывает из кассеты микросхему, устанавливает ее на плату и производит пайку выводов групповым паяльником. После сборки палета с платой подается в накопитель. Загрузка кассет ИМС в 14-ти выводном корпусе обеспечивает непрерывную работу автомата в течение часа.

## 6.4. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

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:

- 1) подготовки выводов радиоэлементов к монтажу (гибка, обрезка, формовка, лужение);
- 2) подготовки проводов и кабелей к монтажу (снятие изоляции, зачистка, заделка, маркировка, вязка жгутов, лужение);
- 3) механосборки (расклепка, развальцовка, запрессовка, расчеканка, свинчивание, стопорение резьбовых соединений);
- 4) установки радиоэлементов на печатные платы (укладка, закрепление, склеивание);
- 5) монтажных работ (пайка, сварка, накрутка, демонтаж элементов);
- 6) регулировочных и контрольных операций (подстройка параметров, визуальный и автоматический контроль) и т.д.

Разработка технологической оснастки имеет целью механизировать или автоматизировать отдельные операции технологического процесса. Выбор технологической оснастки проводят в соответствии с ГОСТ14.305-73 путем сравнения вариантов и определения принадлежности к стандартным системам оснастки. На этом этапе используются отраслевые стандарты: ОСТ4ГО.054.263 - ОСТ4ГО.054.268, научно-техническая (журналы “Обмен производственно-техническим опытом”, “Радиопромышленность”), патентная и справочная литература.

Эффективность выбора технологической оснастки определяется коэффициентом ее загрузки и затратами на оснащение технологических операций. Коэффициент загрузки единицы технологической оснастки

$$K_3 = T_{\text{шк}} \cdot N / \Phi_0, \quad (6.9)$$

где  $T_{\text{шк}}$  - штучно-калькуляционное время выполнения технологической операции;  $N$  - программа выпуска на единицу оснастки;  $\Phi_0$  - полезный фонд работы оснастки. Затраты на оснащение технологических операций оснасткой рассчитываются по методике, изложенной в прил. 2 к ГОСТ14.305-73.

На втором этапе осуществляется доработка конструкции рабочих узлов технологической оснастки в соответствии с размерами обрабатываемых деталей и радиоэлементов и техническими условиями на изделие. Конструкция приспособления должна быть увязана с

конструкцией технологического оборудования, например, расположением стола станка, прессы, крепежных пазов на нем.

К проектированию специализированных групповых приспособлений предъявляются следующие требования:

1) приспособление должно иметь комплект сменных или регулируемых элементов (направляющие, установочные, зажимные и др.), обеспечивающих стабильность установки любой из деталей группы;

2) количество деталей, входящих в сменный комплект, должно быть минимальным;

3) переналадка приспособления должна быть простой, доступной рабочему 2-3 разряда, и проводиться не более 5-10 мин.

Сборочный чертеж технологической оснастки содержит обычно две-три проекции общего вида с соответствующими разрезами и сечениями, обеспечивающими возможность детализации. На нем указывают габаритные и присоединительные размеры, а также размеры, износ, которые влияют на точность приспособления. К таким размерам относятся различного рода посадки, обозначаемые в соответствии со СТ СЭВ 144-75. В технических требованиях приводят следующие сведения:

- характеристики совместно используемого оборудования, тип привода;
- наибольшие габаритные размеры обрабатываемых деталей или радиоэлементов;
- характер смазки трущихся деталей и др.

В графической части проекта приводят также чертежи вновь разрабатываемых и оригинальных деталей технологической оснастки. При этом в пояснительной записке дается обоснование выбора материалов деталей, сортамента и вида обработки, степени шероховатости поверхностей, вида термической обработки, типа покрытия. Указанные сведения приводятся в технических требованиях и основной надписи на чертежах деталей. Примерные конструкции технологической оснастки приведены в альбомах оснастки.

На завершающем этапе проектирования технологической оснастки выполняют поверочный расчет, который имеет целью определение ее работоспособности, производительности и других технических характеристик.

При расчетах чаще всего определяют механические характеристики работы приспособления. Усилие, разрабатываемое винтовым механизмом, зависит от величины приложенного момента, формы рабочего торца винта и вида резьбы. Для винтов со сферическим торцом

$$F = \frac{F_{\text{прил}} \cdot L}{r_{\text{ср}} \operatorname{tg}(a + \chi_{\text{пр}})}, \quad (6.10)$$

где  $F_{\text{прил}}$  - усилие, приложенное к рукоятке винтового механизма, Н;  $L$  - длина рукоятки, м;  $r_{\text{ср}}$  - средний радиус резьбы, м;  $a$  - угол подъема резьбы;  $\chi$  - приведенные угол и радиус трения.

Угол подъема резьбы и приведенный угол трения:

$$\operatorname{tg} a = \frac{S}{2\pi r_{\text{ср}}}; \quad \operatorname{tg} \chi_{\text{пр}} = \frac{f}{\cos b}, \quad (6.11)$$

где  $S$  - шаг резьбы, мм;  $f$  - коэффициент трения на плоскости;  $b$  - половина угла при вершине профиля резьбы, град.

Для винтов с плоским торцом

$$F = \frac{F_{\text{прил}} \cdot L}{r_{\text{ср}} \operatorname{tg}(a + \chi_{\text{пр}}) + 1/3mD}, \quad (6.12)$$

где  $m$  - коэффициент трения на плоском торце;  $D$  - наружный диаметр плоского торца, м.

Условие самоторможения винтового механизма определяется неравенством

$$a < \chi_{\text{пр}}. \quad (6.13)$$

Для резьб величина угла подъема лежит в пределах  $1,5 - 4^\circ$ , а приведенный угол трения изменяется в зависимости от величины коэффициента трения в пределах от 6 до  $16^\circ$ , условие торможения, как правило, выполняется. Для проверочных расчетов винтового механизма выбирают исходные данные в пределах:

$$\begin{aligned} F_{\text{прил}} &= 15-25 \text{ Н}; & L &= 0,08-0,24 \text{ м}; \\ f &= 0,1-0,15; & r_{\text{ср}} &= 0,45d; \\ D &= 0,8d; & m &= 0,1; & b &= 120^\circ, \end{aligned}$$

где  $d$  - номинальный диаметр резьбы, в мм.

КПД винтового механизма рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{\operatorname{tg} a}{\operatorname{tg}(a + f_{\text{пр}})}. \quad (6.14)$$

Для самотормозящихся винтовых механизмов КПД меньше 0,5. Выбрав номинальный диаметр винта в зависимости от требуемого усилия зажима  $F$ , проверяют прочность винта:

$$\sigma_{\text{р}} = \frac{F}{K \cdot d^2} < \sigma_{\text{р.доп.}}, \quad (6.15)$$

где  $sp$  - напряжение растяжения винта, МПа;  $sp_{доп}$  - допустимое напряжение растяжения материала винта, МПа;  $K$  - коэффициент, для метрической резьбы с крупным шагом - 0,5.

Для винтов с резьбами М6-М18, изготовленных из углеродистых сталей обыкновенного качества марок Ст3, Ст5, допустимое напряжение до 200 МПа, качественных сталей 10...85 - до 430 МПа.

Усилие, развиваемое рычажным механизмом (рис. 6.7), определяется по формуле

$$F = F_{\text{прил}} \cdot \frac{L1 - r f_0}{L2 + r f_0}, \quad (6.16)$$

где  $L1, L2$  - плечи рычага;  $f_0$  - коэффициент трения на оси;  $r$  - радиус оси.

В эксцентриковых механизмах применяются круговые и криволинейные эксцентрики, представляющие собой диск или валик со смещенной осью вращения 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  $30-45^\circ$  влево и вправо от расчетной точки контакта детали с эксцентриком. Усилие зажима круговым эксцентриком определяют по формуле

$$F = \frac{F_{\text{прил}} \cdot L1}{L2 \cdot [\text{tg}(a + f) + \text{tg} f_1]}, \quad (6.17)$$

где  $F_{\text{прил}}$  - сила, приложенная к рукоятке эксцентрика (100-150 Н);  $L1$  - плечо приложения силы, м,  $L1 = L + 0,5D$ , где  $L$  - длина рукоятки;  $D$  - диаметр кругового эксцентрика;  $L2$  - 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;  $a$  - угол подъема кривой эксцентрика, град.

Условие самоторможения кругового эксцентрика

$$D/L \geq 14, \quad (6.18)$$

где  $L$  - эксцентриситет (1,5-5,0 мм).

При выполнении операций сборки неразъемных соединений путем расклепывания усилие, прикладываемое к детали, определяют таким образом:

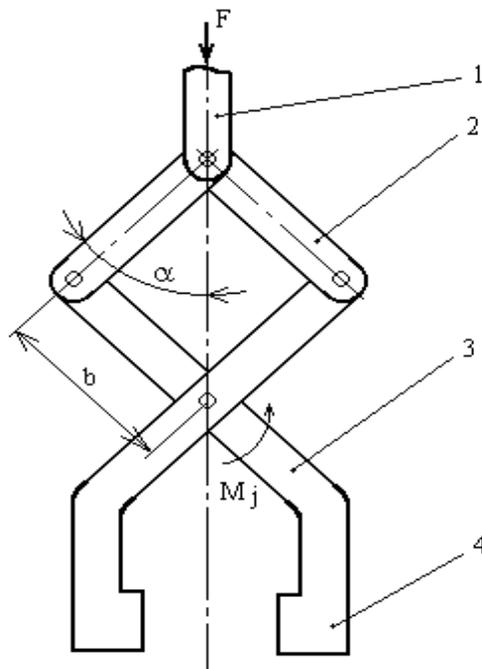


Рис. 6.7. Схема рычажного механизма:

1 – привод; 2 – плечи; 3 – губки

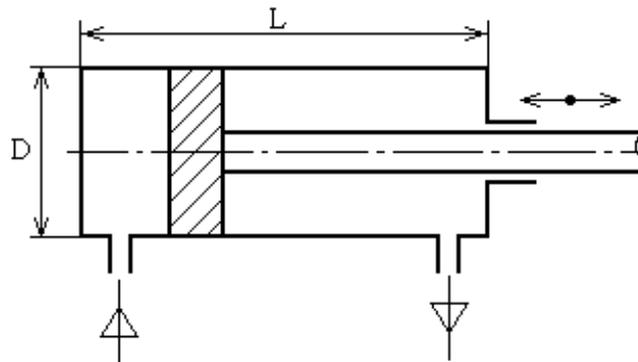


Рис. 6.8 Схема пневмопривода

$$F = (2-2,5) \cdot \sigma_b \cdot S, \quad (6.19)$$

где  $\sigma_b$  - предел прочности материала детали на растяжение;  $S$  - площадь приложения давления.

Для развальцовки это усилие определяется как

$$F = \sigma_b \cdot S. \quad (6.20)$$

При свободной гибке выводов радиоэлементов усилиегиба выбирается из условия

$$F_r = \frac{L \cdot d^2}{6B} \cdot \sigma_T, \quad (6.21)$$

где  $L$  - длина линии изгиба;  $d$  - диаметр вывода;  $B$  - плечо гибки, равное  $r+1,25d$ , где  $r$  - 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. 6.8),

$$F_{\Pi} = \frac{p}{4} \cdot D \cdot p \cdot z - F_c, \quad (6.22)$$

где  $D$  - диаметр поршня или диафрагмы в пневмоцилиндре;  $p$  - давление сжатого воздуха;  $F_c$  - усилие сопротивления возвратной пружины в крайнем рабочем положении поршня.

Время срабатывания пневмопривода

$$t = \frac{D \cdot L}{d_o^2 v}, \quad (6.23)$$

где  $L$  - длина хода поршня, для диафрагмы  $L = 0,25-0,35D$ ;  $d$  - 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. Процесс проектирования аналогичен специальной технологической оснастке. Тара должна быть по возможности универсальной и отличаться простотой изготовления из прочных и недефицитных материалов.

## 7. ОСНОВЫ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

### 7.1. ЭТАПЫ И ПУТИ АВТОМАТИЗАЦИИ

Исторически в развитии техники можно выделить этапы по характеру воздействия человека с орудиями труда:

- 1) использование орудий ручного труда;
- 2) использование машин, обеспечивающих механизацию производственных процессов;
- 3) применение автоматов и автоматических комплексов.

Механизация - применение в производственном процессе машин и механизмов, заменяющих мускульный труд рабочих.

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) обеспечивает автоматизацию 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 - предусматривает передачу функций управления и контроля системам автоматического управления.

Большой удельный вес сборочно-монтажных работ (до 30-40%) в общем объеме производства ЭА делают жизненно необходимой комплексную механизацию и автоматизацию этих процессов, которая должна основываться на новейших достижениях науки и техники и учитывать особенности производства ЭА.

Историческое развитие технологии ЭА показало, что автоматизация производства прошла через следующие этапы:

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, обладающие комплексной автоматизацией всех производственных процессов, единой системой управления с применением ЭВМ и гибкой переналадкой на выпуск изделий.

Для мелкосерийного производства ЭА характерны 1, 2 и 4 группы. Для серийного и массового - 3, 5, 6, 7, 8, 9 этап является наиболее перспективным в настоящее время.

Автоматизация производственных процессов является новым этапом технического прогресса. Критериями автоматизации являются:

- 1) рост производительности труда,
- 2) степень охвата рабочих механизированным и автоматизированным трудом,
- 3) уровень механизации и автоматизации.

Производительность труда  $\Pi$  - это количество выпущенной продукции  $N$  (в шт.), отнесенное к трудовым затратам:

$$\Pi = \frac{N}{3}, \quad (7.1)$$

где  $3$  - трудовые затраты (время, денежное исчисление).

Общие трудовые затраты складываются из следующих составляющих:

$$3 = 3_{\Pi} + (3_v + 3_{\text{ж}}) \cdot t \quad (7.2)$$

где  $3_{\Pi}$  - средства на оборудование, монтаж, на производственные здания (единовременные затраты прошлого труда);

$3_v$  - годовые текущие затраты прошлого труда на материалы, энергию, инструмент, ремонт и эксплуатацию оборудования;

$3_{\text{ж}}$  - годовые текущие затраты живого труда на обслуживание машин;

$t$  - календарное текущее время эксплуатации новой техники.

Тогда:

$$\Pi = \frac{N}{3_{\Pi} + (3_{V} + 3_{Ж}) \cdot t}, \quad (7.3)$$

Количество выпущенной продукции зависит от времени эксплуатации новой техники  $t$  и годового выпуска продукции  $Q_{\Gamma}$ ;

$$N = Q_{\Gamma} \cdot t, \quad (7.4)$$

Тогда:

$$\Pi = \frac{Q_{\Gamma} \cdot t}{3_{\Pi} + (3_{V} + 3_{Ж}) \cdot t}, \quad (7.5)$$

Из уравнения видно, что производительность труда является переменной величиной, в момент пуска новой техники при  $t \rightarrow 0$ ; когда имели место затраты прошлого труда  $3_{\Pi} > 0$ ; а отдачи еще нет  $N=0$ ;  $\Pi$ - мало.

По мере эксплуатации новой техники производительность труда растет.

Обозначим через коэффициент  $K$  степень технической вооруженности производства:

$$K = \frac{3_{\Pi}}{3_{Ж}}, \quad (7.6)$$

через  $m$  - отношение текущих затрат прошлого труда к затратам живого труда:

$$m = \frac{3_{V}}{3_{Ж}}, \quad (7.7)$$

Подставляя  $K$  и  $m$  - в выражение для  $\Pi$  получим:

$$\Pi = \frac{Q_{\Gamma}}{3_{Ж}} \frac{t}{K + (m + 1)}, \quad (7.8)$$

Чем выше техническая оснащенность труда, (выше  $K$  и  $m$ ), тем ниже рост автоматизации, тем больше рабочих незримо присутствует в процессе производства, обеспечивая его прошлым трудом.

Таким образом, повышение производительности труда заключается в том, что доля живого труда уменьшается, а доля прошлого труда увеличивается, но увеличивается таким образом, что общая сумма труда, заключающаяся в товаре, уменьшается таким образом, что количество живого труда уменьшается больше, чем увеличивается количество прошлого труда.

Коэффициент роста производительности труда:

$$\lambda = \frac{\Pi_2}{\Pi_1}, \quad (7.9)$$

где  $\Pi_1$  и  $\Pi_2$  - соответственно производительности труда по исходному и новому вариантам.

Степень охвата рабочих механизированным и автоматизированным трудом (в %) определяется как:

$$C_{MA} = \frac{P_M + P_A}{P_P + P_M + P_A} \cdot 100, \quad (7.10)$$

где  $P_P, P_M, P_A$  - количество рабочих, занятых ручным, механизированным и автоматическим трудом соответственно.

Уровень механизации и автоматизации производственного процесса:

$$Y_{MA} = \frac{T_M + T_A}{\sum_{i=1}^n T_i} \cdot 100, \quad (7.11)$$

где  $T_M, T_A$  - трудоемкость механизированных и автоматизированных операций, Н/час,

$T_i$  - трудоемкость  $i$ -ой операции,

$n$  - количество операций.

Для современного этапа развития техники характерны следующие тенденции в автоматизации производственных процессов и пути роста производительности труда:

1. Уменьшение затрат живого труда. сокращение числа рабочих, непосредственно занятых в процессе производства путем использования автоматов или автоматических линий. Такая автоматизация имеет ограниченные возможности, т.к. с ростом числа оборудования растут капиталовложения и потери производительности оборудования (рис.7.1). Так, если один рабочий будет обслуживать 2 станка, то экономия фонда заработной платы ( $\mathcal{E}$ ) составляет 50%, если 10 - 90 %. Дальнейшее увеличение количества обслуживаемых автоматов требует дорогостоящих затрат на применение автоматических систем управления, накопителей, автоматического транспорта. Такая автоматизация эффективна для производств с малым  $K$ , где еще велики затраты ручного труда (рис. 7.2).

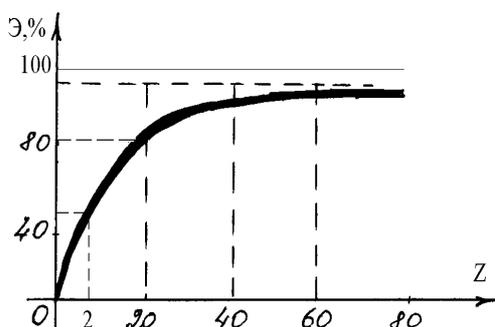


Рис. 7.1. Зависимость экономии от количества автоматов

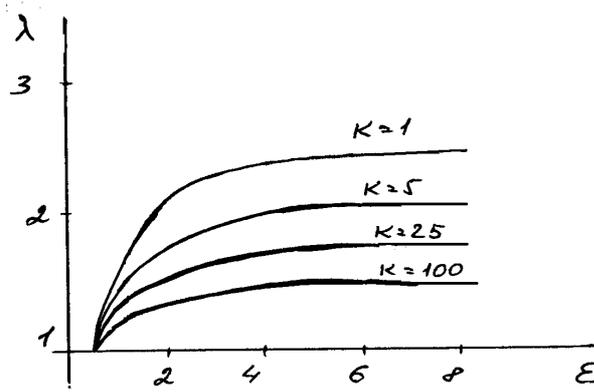


Рис. 7.2. Зависимость роста производительности труда от технической оснащённости производства

2. Вторым путём технического прогресса предполагается уменьшение затрат живого и прошлого труда путём повышения производительности средств производства. Он достигается за счёт разработки новых прогрессивных технологических процессов и создания высокопроизводительных машин. На рис.7.3. кривая 1 характеризует рост производительности  $\lambda$  вследствие объединения машин и станков в автоматические системы при неизменном уровне их производительности:

$$\lambda = \frac{\Pi_2}{\Pi_1} = 1, \quad (7.12)$$

При этом источником экономии служит лишь сокращение фонда заработной платы обслуживающих рабочих.

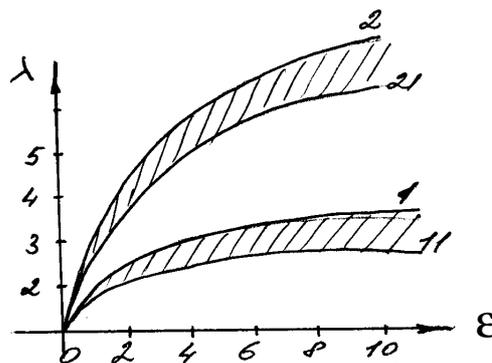


Рис. 7.3. Зависимость роста производительности труда от коэффициента многостаночного обслуживания

Кривая 2 характеризует рост производительности при автоматизации, которой она сочетается с ростом производительности машин и с сокращением затрат живого труда  $\lambda > 1$ .

Здесь потенциальная возможность роста  $\Pi$  намного больше и автоматизация заведомо является эффективной.

3. Третий путь технического прогресса - предполагает сокращение затрат прошлого труда путем снижения стоимости средств производства. Достигается непрерывным совершенствованием технологии и средств производства, стандартизации и унификации рабочих машин и оборудования. Этот путь требует агрегатного метода создания средств производства: автоматических линий. На рис.7.4 показана динамика роста производительности труда при различной производительности каждого варианта.

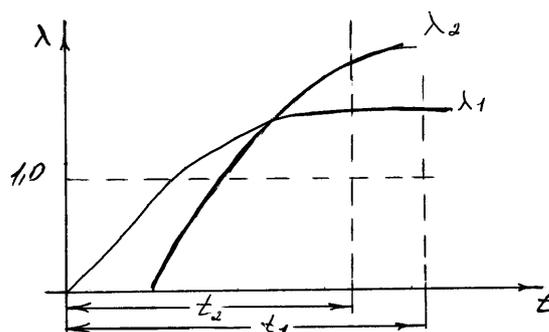


Рис.7.4. Зависимость уровня производительности от времени эксплуатации новой техники

Производительность труда каждого варианта постепенно увеличивается, достигая максимума и далее сохраняя максимальную величину. Чем быстрее он достигается, тем выше эффективность новой техники.

Производительность рабочих машин или оборудования зависит от временной длительности рабочих  $t_p$  и холостых ходов  $t_x$ ;

$$\Pi_y = \frac{1}{t} = \frac{1}{t_p + t_x}, \quad (7.13)$$

где  $t$  - период рабочего цикла.

Если у машины отсутствуют холостые ходы:

$$\Pi_p = \frac{1}{t_p}, \quad (7.14)$$

Коэффициент производительности характеризует степень непрерывности использования оборудования во времени:

$$\eta = \frac{\Pi_p}{\Pi_y}, \quad (7.15)$$

Смысл автоматизации заключается в дальнейшем совершенствовании технологического оборудования, когда  $t_x \rightarrow 0; \eta \rightarrow 1$

Фактическая производительность оборудования часто отличается от цикловой:

$$П_{\Phi} = \frac{N_{CP}}{t_{ПЛ}}, \quad (7.16)$$

где  $N_{CP}$  - количество выпущенной продукции,  $t_{ПЛ}$  плановый период времени с учетом внецикловых потерь времени из-за простоя машин.

Потери времени различаются следующим образом:

- 1) подача материала, транспортировка объекта обработки, зажим и освобождение заготовки;
- 2) установка и смена инструмента, заточка, правка инструмента;
- 3) регулировка и ремонт механизмов, получение запасных частей;
- 4) уборка отходов, сдача готовых изделий;
- 5) передача смены, простои, поломки, брак в производстве;
- 6) переналадка, связанная с заменой технологической оснастки и т.д.

Все эти потери рабочего времени делятся на две группы:

- 1) собственные потери, связанные с режимом работы оборудования;
- 2) организационные, которые необходимо свести до минимума.

Пути решения этих проблем:

- 1) создание машин непрерывного действия (роторные автоматические линии), где потери 1 группы устраняются;
- 2) автоматизация смены и регулировки инструмента (станки ЧПУ);
- 3) повышение долговечности и надежности автоматических линий.

Увеличение коэффициента надежности:

$$K_n = \frac{1}{\lambda(t)}, \quad (7.17)$$

где  $\lambda(t)$  - интенсивность отказов.

Коэффициент надежности  $1 < K < \infty$ . Высокий уровень автоматизации требует безотказности работы оборудования;

- 4) автоматизация управлением производства путем применения информационно-управляемых комплексов на основе ЭВМ. АСУТП;
- 5) повышение качества продукции и ликвидация брака путем автоматизации контроля качества изделия;

б) механизация и автоматизация вспомогательных работ (транспортировки, складирования, погрузочно-разгрузочных работ) путем введения АСУТП, механизации складских работ (автооператоры, транспортные работы и т.д.);

7) повышение мобильности автоматизированного производства.

Бурное развитие электронной техники приводит в настоящее время к чрезвычайно быстрой смене объектов производства. Это вызывает потери, связанные с переналадкой и заменой специального оборудования, что подчас вынуждает отказываться от механизированных систем, а использовать ручной труд при сборочно-монтажных работах.

Решение этой проблемы возможно путем создания участков или линий гибкого автоматизированного производства (ГАП).

Экономическая эффективность или рентабельность новой техники определяются следующими критериями:

1) сроком окупаемости дополнительных капиталовложений:

$$n = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2}, \quad (7.18)$$

где  $K_1$  и  $K_2$ - капиталовложения по двум сравниваемым вариантам;

$C_1$  и  $C_2$ - себестоимость годовая продукции по 2-м вариантам;

2) коэффициентом эффективности капиталовложений:

$$C = \frac{1}{n}, \quad (7.19)$$

это прибыль на дополнительные вложения;

3) удельными капиталовложениями выбирается тот вариант, который требует минимальных капитальных вложений в создание одинаковых производственных мощностей

$$\lambda = \frac{K_2}{K_1}, \text{ при } K_2 > K_1; \lambda > 0, \quad (7.20)$$

## 7.2. АВТОМАТИЧЕСКИЕ ЛИНИИ

Основным направлением, которое позволяет решить проблему существенного роста производительности труда, является внедрение в производство механизированных и автоматизированных поточных линий сборки и перевод к более высокой ступени организации производства - созданию автоматических линий.

Автоматическая линия 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 автоматические линии 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% komponуются из унифицированных узлов и агрегатов, что обеспечивает низкую их стоимость, короткие сроки проектирования и изготовления.

Гибкие линии состоят из независимо работающих (по времени) станков с гибкой транспортной связью. В зависимости от способа перемещения обрабатываемых деталей линии подразделяются на следующие типы:

1) спутниковые - в которых детали базируются, обрабатываются в течение всего технологического процесса в приспособлениях, называемых спутниками. Применение таких приспособлений позволяет точно базировать детали сложной формы, не имеющих базовых поверхностей, расширяет номенклатуру деталей, однако увеличивает затраты на обслуживание линии;

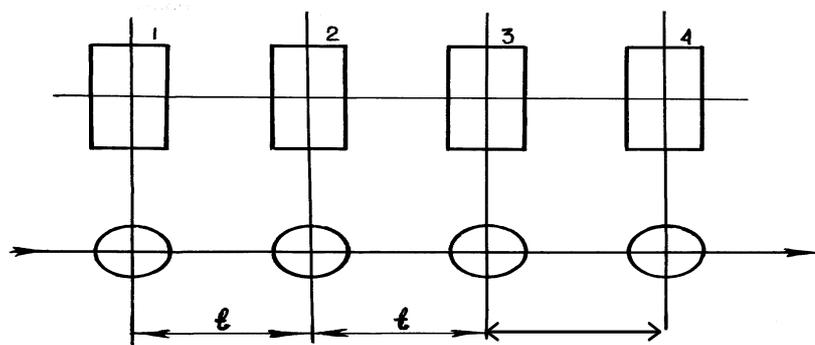
2) бесспутниковые - в свою очередь подразделяются на прямоточные, поточные, бункерные.

В прямоточных автоматических линиях детали перемещаются от одного станка к другому на величину  $L$ , равную расстоянию между рабочими зонами станков с помощью транспортера, а затем перемещается в зону обработки (рис.7.5. а).

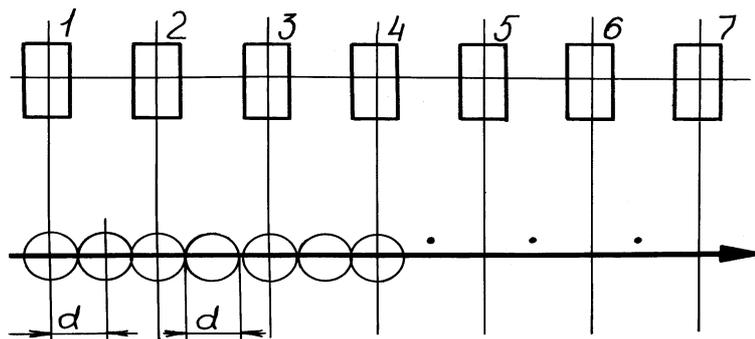
В поточных автоматических линиях заготовки передаются на величину  $d$ , равную размерам самой заготовки (рис.7.5. б).

Бункерные автоматические линии снабжаются бункерами, откуда заготовки непрерывно подаются к станкам. Они выпускаются для обработки деталей небольшой массы и размеров (рис.7.5. в).

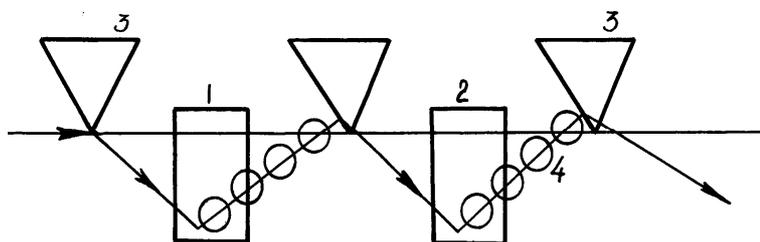
Роторные линии отличаются тем, что в них заготовки обрабатываются в процессе перемещения от одной позиции к другой. Роторные автоматические линии состоят из технологических роторов 1, на позициях которых выполняются технологические операции и транспортных роторов, вращающихся синхронно с технологическими и осуществляющих межоперационное транспортирование заготовок.



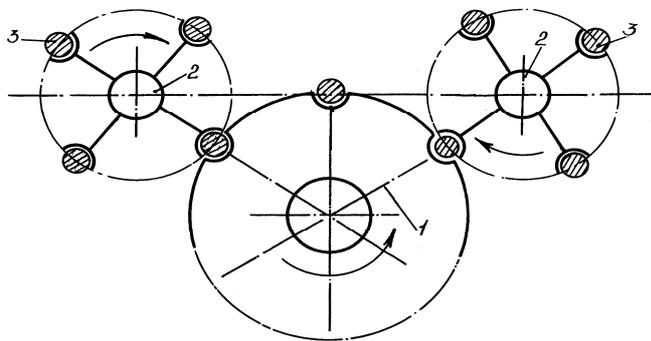
а



б



в



г

Рис.7.5. Схемы автоматических линий:

а - прямоточная; б - поточная; в - бункерная; г - роторная;

1-5 - станки; 6 - бункеры; 7 - рабочий ротор; 8, 9 - транспортные роторы.

Роторы вращаются от общего привода через систему зубчатых колес, расположенных на вертикальных валах роторов.

На роторных автоматических линиях целесообразно выполнять механическую обработку простых мелких деталей, штамповку, сборку несложных изделий.

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 величину шага между инструментами:

$$R_M = \frac{h}{V_{TP}}, \quad (7.21)$$

где  $h$  - шаговое расстояние,  $V_{TP}$  - транспортная скорость. Тогда производительность  $\Pi$  равна:

$$\Pi = \frac{1}{R_M} = \frac{V_{TP}}{n}. \quad (7.22)$$

Независимость ритма роторной машины от длительности операций - важное условие резкого снижения межоперационных простоев и сохранения высокого коэффициента использования всех машин, входящих в автоматическую линию.

Областью рационального применения роторных автоматических линий являются технологические процессы, характеризуемые поверхностным действием орудий на предметы обработки: штамповка, прессование, литье, вытяжка, химическая обработка, гальваническое покрытие и т.д.

В зависимости от количества деталей, одновременно обрабатываемых на каждой позиции линии подразделяются на однопозиционные и многопозиционные. Автоматические 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 сменой инструмента в виде барабана или с поворотным столом уменьшают число перебазирования деталей, что снижает вероятность нарушения базирования. Автоматическая линия из многопозиционных станков 1,2 с проходным транспортером - накопителем 3 имеет возможность функционирования тогда, когда один из станков остановлен для обслуживания и смены инструмента (рис.7.6).

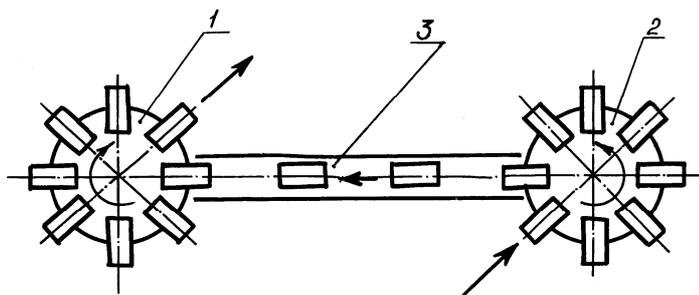


Рис.7.6. Схема многопозиционной автоматической линии

Транспортные системы автоматических линий подразделяются на жесткие и гибкие.

Жесткое транспортное устройство линий спутникового вида состоит из транспортера межстаночного, 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. Флажки препятствуют скольжению спутников по штангам в моменты их разгона и торможения путем прижима их к верхним базам 4 (рис .7.7). 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.

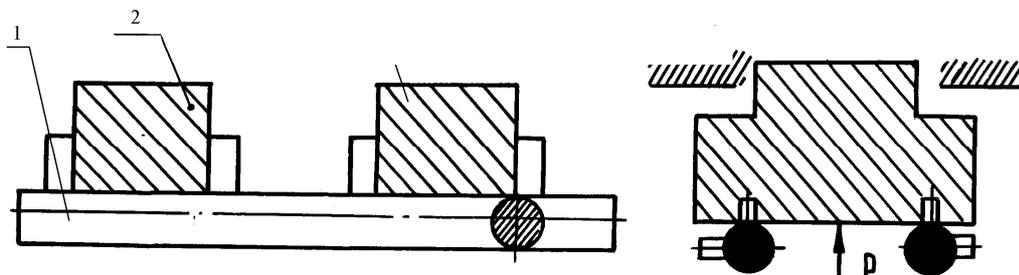


Рис. 7.7. Схема жесткого транспортера

Гибкость межагрегатных транспортных связей может быть достигнута с помощью накопителей деталей между отдельными ее участками или их обработкой 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.7.8). 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.

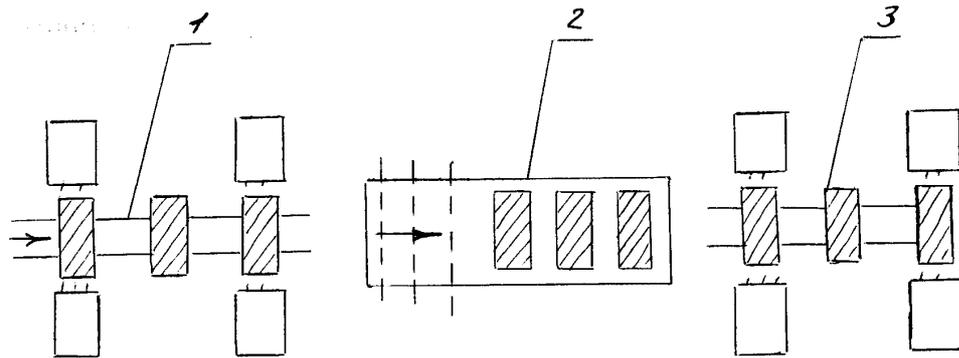


Рис .7.8. Схема гибкой транспортной системы с накопителем

Механизация и автоматизация процессов сборки ЭА осуществляется путем применения поточных линий:

1) 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;

2) автоматизированных поточных линий, в которых большая часть операций выполняется с применением полуавтоматического и автоматического оборудования, а процессы перемещения изделий осуществляются конвейером с автоматическим адресованием.

По номенклатуре закрепленных за линией изделий поточные линии могут быть однопредметные и многопредметные. 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 технологических процессов, позволяющих приблизить организацию серийного производства к условиям массового производства.

Для определения возможности организации одно- или многопредметной поточной линии проводится предварительный расчет количества рабочих мест  $C$  :

$$C = \frac{\sum_{i=1}^m N_i T_i}{\Phi_d}, \quad (7.23)$$

где  $N_i$  - программа выпуска  $i$ -го изделия, входящего в группу,

$T_i$  - фактическая трудоемкость изготовления  $i$ -го изделия,

$\Phi_d$  - годовой действительный фонд времени работы линии,

$m$  - количество изделий в группе.

Наилучшие технико-экономические показатели имеют линии с количеством рабочих от 10 до 50. Если количество рабочих превышает 50, то управление линией затрудняется, тогда целесообразно организовать две линии.

Производительность автоматических линий можно определить по формуле:

$$Q = K_{\text{эф}} \frac{\Phi_{\text{д}}}{T_{\text{ц}}}, \quad (7.24)$$

где  $\Phi_{\text{д}}$  - годовой действительный фонд рабочего времени;

$t_{\text{ц}}$  - длительность цикла поточной линии;

$K_{\text{эф}}$  - технический коэффициент использования;

$$K_{\text{эф}} = \frac{Q_{\text{цикл}}}{Q_{\text{ф}}}, \quad (7.25)$$

где  $Q_{\text{ф}}$  и  $Q_{\text{цикл}}$  - 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 - 0.8 для переналаживаемых линий, 0.65 - 0.7 - для переналаживаемых.

Основным оборудованием автоматизированных транспортных системы, в том числе поточно-механизированных линий сборки, являются конвейерные системы, монорельсовые подвесные дороги и транспортные роботы. Выбор типа конвейера зависит от веса 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 сборки классифицируют по следующим признакам:

- 1) по конструкции несущего органа на ленточные, пластинчатые, тележечные, роликовые, элеваторы;
- 2) по назначению несущего органа на распределительные, рабочие;
- 3) по съему предметов с несущего органа на ручные и механизированные;
- 4) по положению несущего органа в пространстве на горизонтально- и вертикально-замкнутые;
- 5) по характеру движения несущего органа на непрерывно поступательные или периодические движения.

Ленточные конвейеры предназначены для транспортировки насыпных и штучных грузов широко применяются из-за простоты их конструкции и низкой стоимости изготовления. Несущий орган - ленту изготавливают из прорезиненного ремня или эластичного пластика. На

ней могут транспортироваться изделия весом до 15кг. 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 на ширину ленты от 200 до 500 мм со скоростью 0.6-1.45 м/мин.

- периодические ПТ-106...ПТ-109 на те же размеры, скорость до 10 м/мин.

Для удобства монтажа типовые ленточные конвейеры изготавливают из отдельных самостоятельных 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 (рис.7.9).

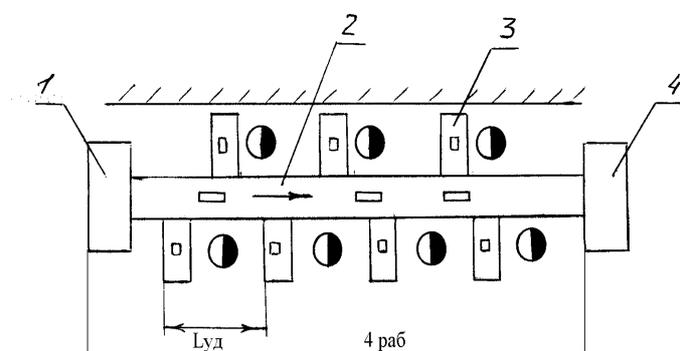


Рис .7.9. Двустороннее расположение рабочих мест в "шахматном порядке":  
1 - натяжная станция, 2 - конвейер, 3 - рабочие места, 4 - приводная станция.

Верхняя и нижняя ветви ленты поддерживаются роликовыми парами. Постоянное натяжение ленты обеспечивается винтовым натяжным устройством.

Нежесткость и сравнительно малая прочность несущего органа такого конвейера не дают возможности закреплять на нем технологические приспособления и собирать детали большого веса, поэтому ленточные конвейеры чаще всего используют как распределительные.

Пластинчатые конвейеры применяются в основном для сборки более тяжелых изделий весом до 40 кг и длиной до 500 мм, а также в том случае, если предъявляются повышенные требования к точности и качеству сборки или к механизации съема изделий. В качестве несущего органа конвейера применяется стальная пластинка, которая одновременно выполняет функцию цепи. В зависимости от габаритных размеров изделия пластинчатые конвейеры имеют ширину несущего органа 100, 300, 400 и 500 мм (ПТ-110...112).

По назначению несущего органа 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 вес изделий составляет менее 8 кг.

Рабочий конвейер используют только при отсутствии параллельных рабочих мест и весе передаваемых изделий более 8 кг.

Выбор способа съема изделия с несущего органа зависит от величины вспомогательного времени, идущего на съем и установку на несущий орган конвейера, а также от веса изделий.

При ручном съеме адресование изделий осуществляется либо по номерной (цветовой) либо по световой системе. Механизированный съем может осуществляться:

- 1) с помощью механического нумератора;
- 2) с помощью командоаппарата;
- 3) посредством кодирования контейнера.

Номерная (цветовая) система адресования осуществляется путем нумерации или окрашивания участков несущего органа конвейера в разные цвета и закреплением за ним рабочих мест. Система имеет простую организацию, однако, отвлекает и утомляет рабочего, снижает производительность труда.

При световой системе адресования на рабочем месте конвейера в нужный момент загорается сигнальная лампочка и оператор узнает, что ему следует снять подошедшее изделие и взамен поставить собранное. Такая система удобна для оператора и освобождает его от наблюдения за конвейером.

При механизированном съеме с помощью нумератора конвейер является напольным горизонтально-замкнутым с наклонными тележками и непрерывно-поступательным движением несущего органа, работающего на скоростях 6 и 10 м/мин.

Закончив операции, рабочий устанавливает тару 1 с собранным изделием на наклонную плоскость любой подошедшей тележки 2, где для удержания тары имеются два упора 3 (рис.7.10). Нажав на определенные клавиши двухрядного нумератора 4 на тележке, он задает

номер следующей операции. При помощи 2-х 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.

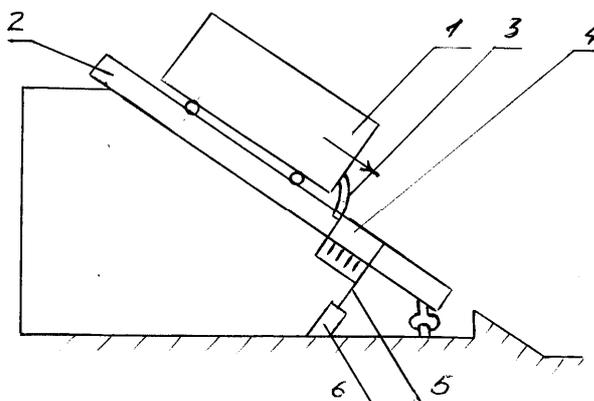


Рис .7.10. Конвейер с наклонными тележками

Такая система работы на линии позволяет работать с любым количеством параллельных рабочих мест на линии, изменять маршрут сборки, осуществлять гибкую связь между рабочими местами.

Выбор расположения 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-замкнутый обеспечивает только прямолинейную форму.

Монорельсовые подвесные дороги применяют для меж- и внутрицеховых грузопотоков. В транспортную систему входят: путевые устройства, эстакада, грузоносители, средства автоматизации и управления. Их достоинствами являются: высокая экономичность, малое использование производственной площади, высокая скорость, удобство обслуживания.

### 7.3. РОБОТО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ 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

создают возможность автоматизировать не только основные, но и вспомогательные операции, обеспечить быструю переналадку автоматических линий, что является предпосылками создания гибкого автоматического производства (ГАП).

Слово "робот" впервые ввел в обращение Карел Чапек в своей пьесе "R.V.R." в 1920м году, где он говорит о механическом прообразе человека, выполняющего тяжелую работу. Чешское слово "robota" означает тяжелый, подневольный труд.

Однако быстрыми темпами робототехника стала развиваться 15-20 лет тому назад, что обязало насущным потребностям общественного производства и необходимости замены человека на участках с опасными, вредными или монотонными условиями труда.

С 1970 по 1990 г. общий парк роботов в мире значительно возрос. Так, например в 1972 г. в Западной Европе работало в производстве 300 штук роботов, в США - 850, в Японии - 1500, то к 1990 их количество возросло до 25 раз.

Начало работ в нашей стране 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 (1905-1977), 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 и автоматические.

К биотехническим роботам относятся дистанционно управляемые роботы, копирующие движение человека с наличием средств обратной связи.

Полуавтоматический робот характерен сочетанием ручного и автоматического управления. Он снабжен устройством управления для вмешательства человека в процесс автономного функционирования путем сообщения дополнительной информации с помощью указания дел или последовательности действия.

За короткий период развития роботов произошли большие изменения в элементной базе, структуре, функциях и характере их пользования. 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 (манипуляторы).

**Роботы второго поколения** (адаптивные роботы) обладают координацией движений с восприятием. Они пригодны для малоквалифицированного труда при изготовлении изделий.

Программа движений робота требует для реализации управляющей ЭВМ. Для них требуется программное обеспечение для обработки сенсорной информации и выработки управляющих воздействий.

**Роботы третьего поколения** относятся к роботам с искусственным интеллектом. Они обладают способностью к обучению и адаптации в процессе решения производственных задач. Эти роботы способны вести диалог с человеком, формировать в себе модель внешней среды, распознавать и анализировать сложные ситуации.

Структурная схема промышленного робота (ПР) включает ряд систем: механическую, приводов, управления, связи с оператором, информационную, а также операционное устройство (рис.7.11).

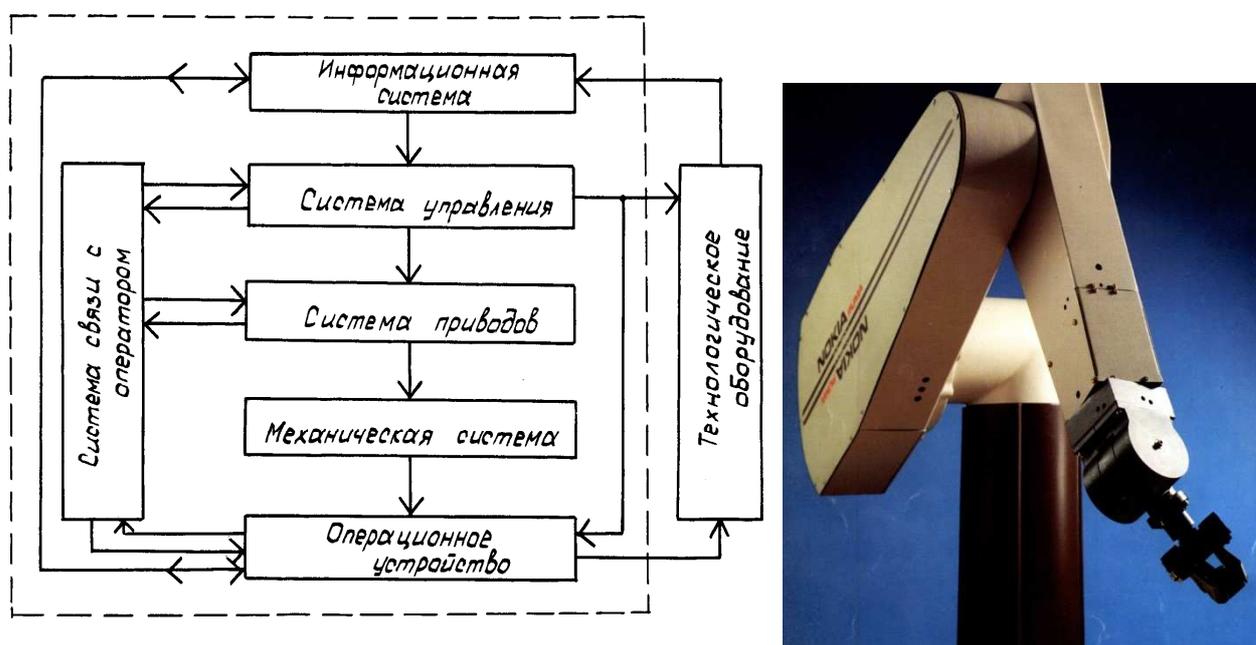


Рис.7.11 Структурная схема и внешний вид ПР

Механическую систему выполняют, как правило, в виде манипулятора, имеющего несколько степеней подвижности. Привод обеспечивает силовое воздействие на соответствующий механизм, осуществляющий заданное перемещение. Система управления осуществляет управление движением рабочих органов манипулятора, прием сигналов от датчиков внешней информации и использование этих сигналов для выбора той или иной подпрограммы работы ПР. Основные технические показатели роботов:

1. Число степеней подвижности - сумма возможных координационных движений объекта манипулирования относительно опорной системы. Простые роботы-манипуляторы - 2 степени, сложные - 6.

2. Грузоподъемность руки - наибольшая масса груза, перемещаемого при заданных условиях (при заданной скорости и т.д.). Установлен следующий ряд по грузоподъемности: сверхлегкие (до 1 кг.), легкие (1-10 кг), средние (10-200 кг.), тяжелые (200-1000кг).

3. Рабочая зона - пространство, в котором при работе может находиться рука манипулятора (рис. 7.12). Установлен ряд предпочтительных чисел 40 по ГОСТ 8032-56.

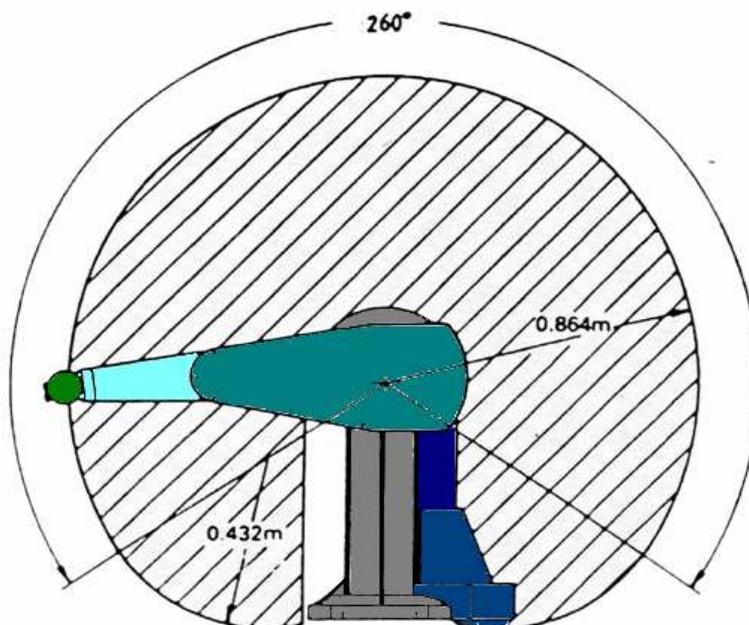


Рис. 7.12. Рабочая зона робота

4. Погрешность позиционирования - отклонение заданной позиции исполнительного механизма от фактической при многократном повторении.

$$\delta_x = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta X_i}{k}, \quad (7.26)$$

ПР с малой точностью позиционирования - с 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. Такие ПР в основном удовлетворяют требованиям, предъявляемым к обслуживанию различных видов технологического оборудования.

ПР с высокой точностью позиционирования - с погрешностью менее 0,1 мм - используются для выполнения сборочных работ.

5. Скорость перемещения конечного звена манипулятора. Малое быстродействие - если скорость перемещения до 0,5 м/с. Такую скорость имеют гидравлические ПР средней и большой грузоподъемности. Среднее быстродействие - до 1,0 м/с соответствует средней скорости движения руки человека, основная масса ПР, используются для автоматизации

производственных процессов. Большое быстродействие - более 1,0 м/с. Для ограниченного типоразмера роботов ввиду значительных механических трудностей их создания и эксплуатации.

6. Системы управления ПР подразделяются на цикловые, позиционные, контурные и комбинированные.

При цикловом управлении программируется последовательность движения 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 системой непрерывной обработки движения.

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 транспортировке, 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-поступательных планок, стержней, периодически вращающихся дисков и барабанов (рис.7.13).

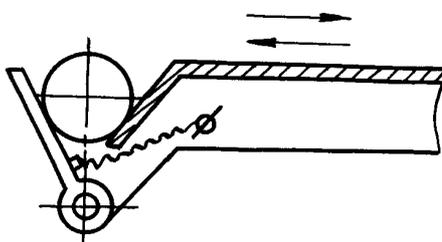


Рис. 7.13 Незажимный механический захват

К зажимным захватам относятся кулачковые, клещевые, шариковые и др. Они имеют простую конструкцию и надежны в работе, однако у них низкая универсальность, сложность переналадки и возможность повреждения поверхности контакта.

Вакуумные захваты состоят из трубки 1, которая в нижней части переходит в раструб в виде колокола, и шарикового клапана 2 (рис.7.14).

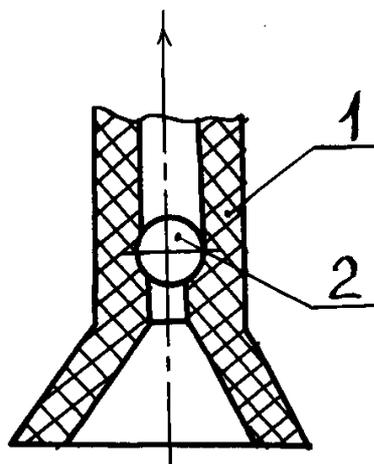


Рис.7.14. Вакуумный захват

При нажиме 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:

$$F = kS_{\Pi} P_{и}, \quad (7.27)$$

где  $S_{\Pi}$  - полезная площадь, ограниченная кольцом;

$P_{и}$  - избыточное давление, равное разности между атмосферным давлением в вакуумной полости приспособления:

$$P_{и} = 1 - P, \quad (7.28)$$

где  $P$  - остаточное давление (0,1-0,15 атм.);

$k$  - коэффициент негерметичности (0,8-0,85).

Преимущества вакуумного захвата - удобство поштучного отделения груза, отсутствие сосредоточенных сил зажима. Недостатки - малая грузоподъемность, необходимость сплошной гладкой поверхности деталей.

Для транспортировки 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 подаваемых деталей ограниченная номенклатура материалов деталей.

Усилие захвата определяется свойствами материала объекта (магнитной индукцией) и поверхностью  $S$  контакта:

$$F = \left( \frac{B}{10^4} \right)^2 \cdot S, \quad (7.29)$$

Пневматические захваты основаны на использовании камерных элементов, просты по конструктивному исполнению и надежны в работе. При захватывании объектов сжатый воздух по шлангам 1 подается в каждый баллон-губку 3, которые захватывают объект (рис.7.15). Изменением давления сжатого воздуха, поступающего в баллоны, достигается регулировка усилия, удерживающего объект. Поэтому пневматический захват может удерживать объекты, имеющие различные размеры и вес.

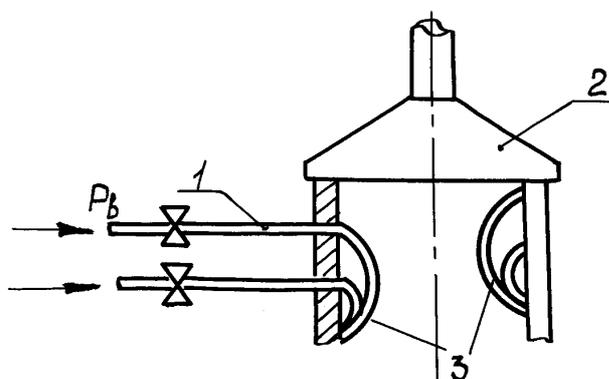


Рис.7.15. Пневматический захват:

1 - шланги, 2 - корпус, 3 - баллоны

Электромагнитный захват использует в своей конструкции усилие, создаваемое электромагнитом. Преимущество - быстрота срабатывания, возможность включения в любой точке траектории движения по поступившей команде.

Характеристики промышленных мини-роботов, применяемых при сборке приведены в табл.7.1.

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, несколько вспомогательных зон, связанных с подачей и удалением заготовок и изделий.

Производственная площадь  $S_0$  определяется по формуле:

$$S_0 = (L + b + 0.5h_1)(a + 0.5h_2), \quad (7.30)$$

Таблица 7.1

Техническая характеристика промышленных роботов

Параметр	ПМР-0.5	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	
Средняя скорость горизонтального перемещения, мм/с	400	200	400	400	500	500
Вертикальное перемещение, мм	50	100	48	48	50	
Средняя скорость, мм/с	100	200	100	100	100	
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



Рис. 7.16. Робот типа ПМР

где  $L$  - длина основного оборудования вдоль фронта;  $a$  - расстояние от стены или колонны до рабочего места;  $h_1$  - величина прохода между оборудованием;  $L$  - ширина основного технологического оборудования;  $h_2$  - расстояние между оборудованием по ширине.

Оценка рациональности структуры РТК определяется расчетом коэффициента использования производственной площади:

$$K_S = \frac{\sum_{i=1}^n (S_{0,i} + S_{\text{ВСП},i})}{S}, \quad (7.31)$$

где  $S_0$  - площадь, занимаемая основным оборудованием;

$S_{\text{ВСП}}$  - площадь, занятая вспомогательным оборудованием;

$n$  - количество единиц технологического оборудования.

Площадь, занятая промышленным роботом

$$S_{\text{ВСП}} = k(L_P + h_3)b_P, \quad (7.32)$$

где  $K$  - коэффициент, учитывающий площадь, необходимую для эксплуатации, профилактики и ремонта ПР; 1.2-1.5,  $L_P$  - длина ПР,  $h_3$  - величина прохода,  $b$  - ширина ПР.

РТК, представляющий совокупность технологического вспомогательного оборудования, в общем случае включает следующие основные элементы:

- 1) автоматическое технологическое оборудование (автоматы);
- 2) робототехническое транспортное оборудование (роботы-манипуляторы, транспортные роботы и др.);
- 3) автоматические загрузочные и разгрузочные устройства;
- 4) управляющие устройства (пульты управления, мини-ЭВМ).

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.

Оборудование в этом варианте может располагаться вокруг ПР или устанавливаться в линию. Компоновка РТК, как показано на рис.7.17 предусматривает расстановку оборудования 1, 2, 3 по дуге окружности, и для его обслуживания плечо робота 4 должно совершать возвратно-поступательные и вращательные движения. Такая компоновка применяется для выполнения последовательных технологических операций: лужения, отмывки, рихтовки, гибки и контроля параметров ЭРЭ.

Компоновка РТК по схеме, приведенной на рис. 7.18 предусматривает размещение оборудования в линию, а робот 4 должен быть снабжен модулем перемещения между транспортными конвейерами 5. Такая транспортные операции перемещения сборочных единиц по позициям сборки с помощью транспортного робота, а также операции загрузки и разгрузки отдельных видов технологического оборудования с помощью роботов-манипуляторов.

Автоматизация транспортных работ на участке ГАП решается с помощью подвесных ПР серии М, к преимуществам которых относятся: малая занимаемая площадь, большая зона обслуживания, удобство доступа к оборудованию обслуживающего персонала.

Подвижные роботы серии М 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 РТК на базе ПР серии М показан на рис. 7.19 (табл.7.2).

Таблица 7.2

Основные характеристики подвесных ПР

Параметры	М-21	М-33	М-34
Грузоподъемность руки, кг	3	10	20
Количество рук	2	1	2
Число степеней подвижности	4	2	3
Величина перемещения руки, мм	0-500	0-1100	0-1000
Угол поворота схвата, град	180	--	--
Погрешность позиционирования, мм	±0.2	±0.2	±2
Скорость транспортного перемещения, м/с	1	0.8	0.4
Система управления	Позиционная		

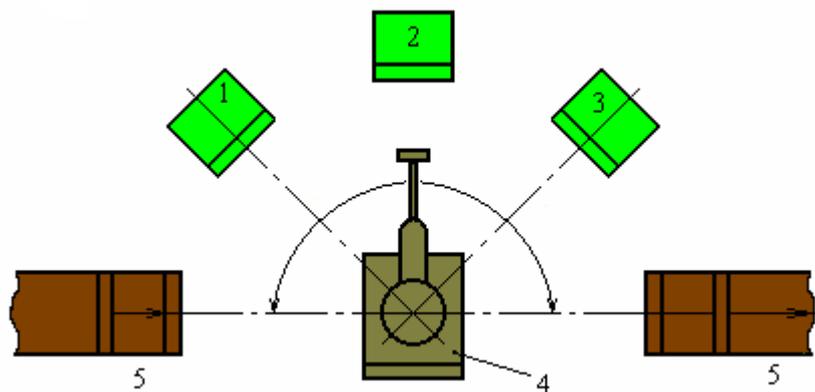


Рис. 7.17. Компонировка РТК по дуге окружности

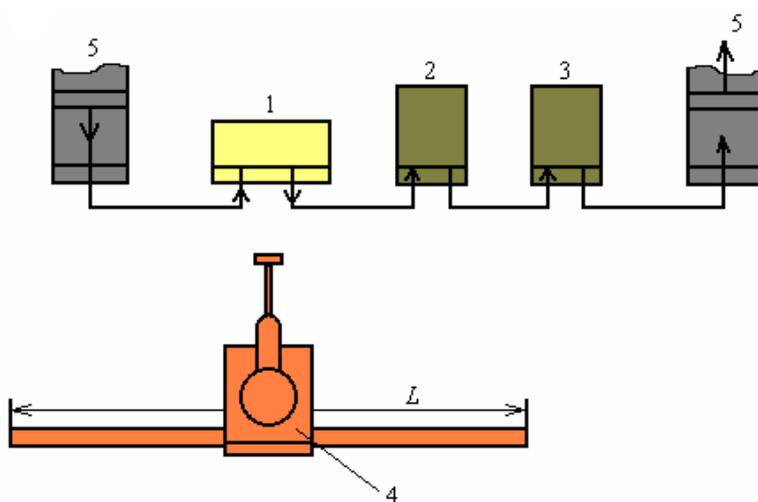


Рис. 7.18. Компонировка РТК по линейке оборудования

Для обслуживания нескольких групп технологического оборудования 4, 7 связанных транспортной системой 10 применяется компоновка, показанная на рис. 7.20, где роботы 3, 5, б, 8 осуществляют загрузку и разгрузку технологического оборудования и транспортной системы.

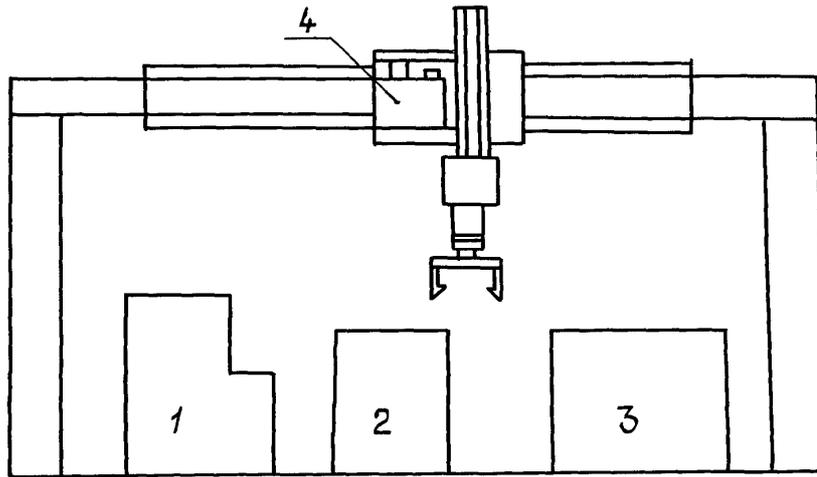


Рис.7.19 .РТК на базе ПР серии М

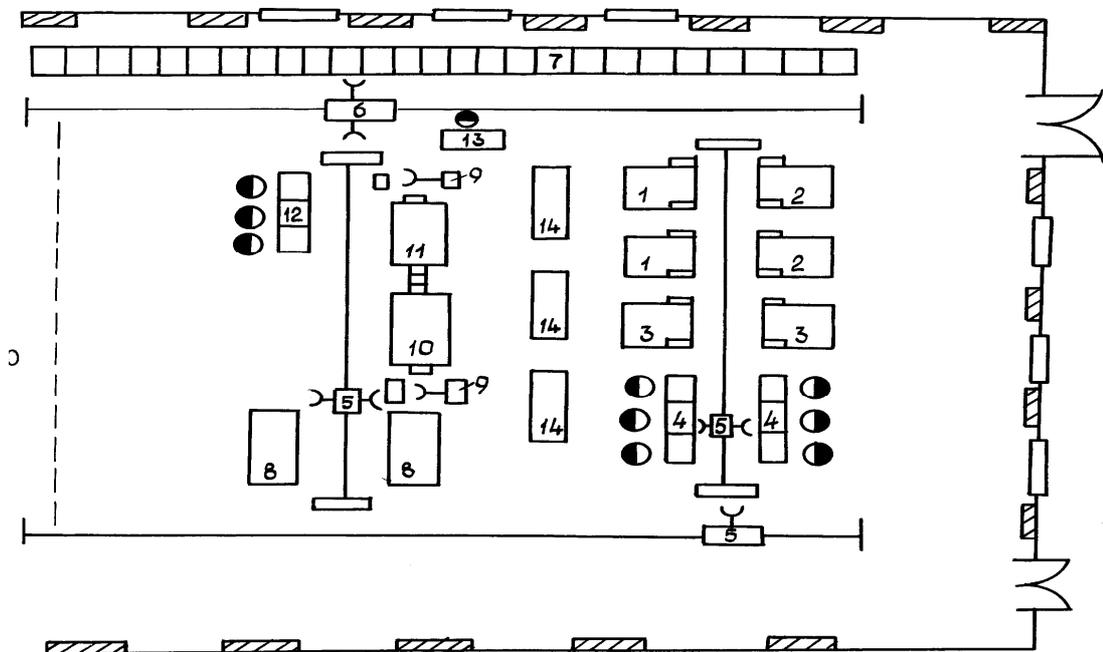


Рис.7.20. Планировка участка сборки ТЭЗ с элементами ГАП:

- 1 - модуль установки ИС, 2 - модуль установки ЭРЭ, 3 - модуль установки ЭРЭ,  
 4 - рабочее место установки ЭРЭ, 5 - транспортный робот,  
 6 - автооператор СТАС-50, 7 - механический склад, 8 - установка сушки ТЭЗ,  
 9 - робот-загрузчик, 10- установка пайки ЛПМ-300, 11 - установка отмывки ТЭЗ,УЗО,  
 12- рабочее место контроля и допайки, 13- рабочее место мастера, 14- управляющие ЭВМ

Управление роботами осуществляется от мини-ЭВМ.

Вариант планировки участка ГАП сборки типовых элементов замены (ТЭЗ) приведен на рис.7.18. В данной планировке автоматизированы транспортно-складские операции с помощью автооператора типа СТАС-50.

## **7.4. ГИБКОЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ ПРОИЗВОДСТВО**

### **7.4.1 Особенности производства РЭС и этапы гибкой автоматизации**

Процессы производства РЭС бытового и широкого народнохозяйственного применения отличаются частыми изменениями структурного и элементного характера в результате появления новых схемно-конструкторских решений. Так, сменяемость бытовой РЭС составляет 3-8 года, технологического оборудования - 4 - 6 лет, коммутационная техника до 20 лет, ТН - 2-3 года.

Быстрое обновление продукции и снижение серийности привели к тому, что традиционные жесткие автоматические линии не соответствуют требованиям современного развития техники и сдерживают создание новых изделий. Поэтому в современных условиях гибкость производства приобретает особую значимость. Предпосылки ГПС следующие:

1. Гибкая автоматизация связана с появлением в 1955 году станков с ЧПУ, которые имели возможность быстрой переналадки с одного изделия на другое. Однако недостатки станков с ЧПУ)

- малый полезный цикл обработки ((5-10)% из общего времени), остальное - закрепление и удаление заготовок и деталей;

- невысокая надежность и дороговизна первых станков сдерживали их широкое применение

2. Появление второго компонента гибких автоматизированных производственных систем (ГАПС) - роботов в 1962 году. В результате 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 гибких робототехнических комплексов (РТК), включающих станки с ЧПУ, обслуживающие их роботов управляемые с помощью микро-ЭВМ.

Этот этап начался в начале 70-х годов в связи с появлением сравнительно дешевых и надежных микропроцессоров и микро-ЭВМ. Управляемые от микро-ЭВМ РТК позволили в 2-10 раз повысить производительность труда и значительно снизить численность обслуживающего персонала, доведя его до одного человека-оператора на несколько РТК.

4. Новый этап гибкой автоматизации, начавшийся в начале 80-х годов, характеризуется появлением ГАПС первого поколения. В основе их действия лежат 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 возлагается 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 ГПС состоит из технологической, транспортной, складской и информационно-управляющей подсистем (рис.7.21).

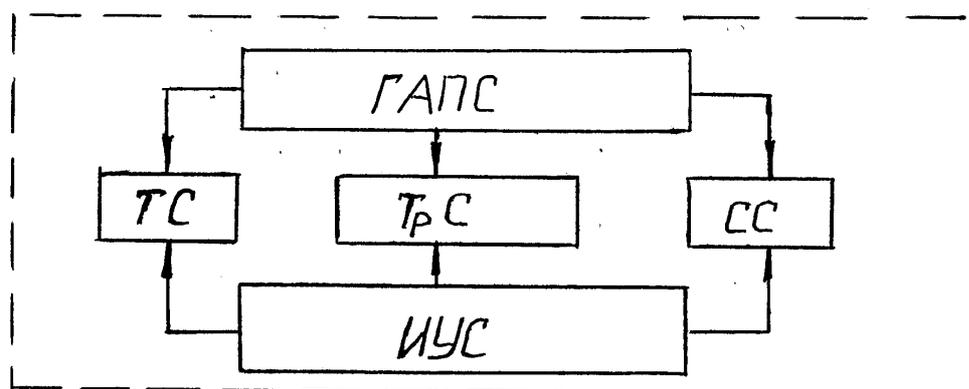


Рис.7.21. Структура ГАПС

В состав технологической системы (ТС) входят модули или технологические ячейки: автоматическая обрабатывающая ячейка (АОЯ), включающая переналаживаемое технологическое оборудование, робот-манипулятор и управляющую микро-ЭВМ; автоматизированная контроль-измерительная ячейка (АКИЯ), включающая автоматизированный пульт контроля и управляющую микро-ЭВМ (рис. 7.22).

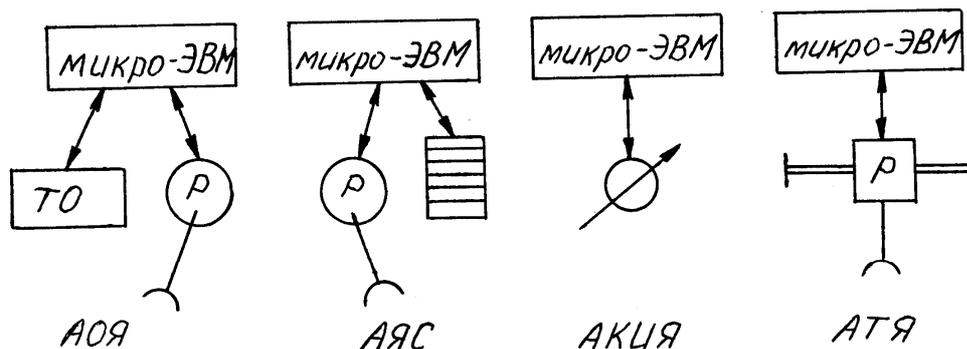


Рис.7.22. Основные ячейки ГАП

Транспортная система (ТрС) наряду с традиционными транспортными средствами (подвесные конвейеры) использует автоматические транспортные ячейки (АТЯ), включающие транспортный робот и управляющую микро-ЭВМ, для перемещения заготовок, инструмента и готовых изделий между оборудованием и складами, а также удаление 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 возлагается функция 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 рабочих и холостых ходов, осуществляющих все движения рабочего цикла, и механизмов управления, координирующих их работу.

В структуру АТО входят следующие основные механизмы: двигательный, передаточный, исполнительный. В свою очередь, исполнительный механизм АТО состоит из механизмов: рабочих ходов, холостых ходов и управления. Механизмы рабочих и холостых ходов, выполняющие отдельные элементы рабочего цикла, называют целевыми механизмами.

К механизмам холостых ходов АТО подготовки МЭА к монтажу и сборке функциональных узлов (ФУ) относятся механизмы: захвата и выдачи деталей из навала, ориентации, сортировки и кассирования, накопления и выдачи детали из накопителя, перемещения, позиционирования и совмещения.

К механизмам рабочих ходов указанного АТО относятся механизмы: рихтовки, обрезки, формовки, подгибки выводов ЭРИ и пайки.

Автоматическое технологическое оборудование состоит из ряда типовых элементов (рис.7.23), 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.)

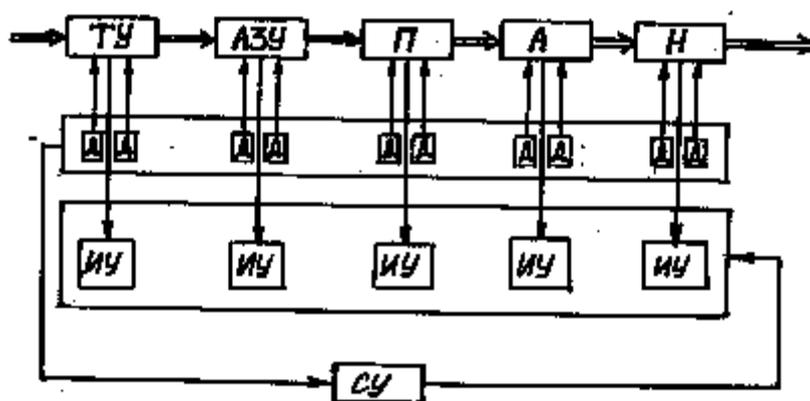


Рис. 7.23. Структура АТО

Автоматическое загрузочное устройство предназначено для реализации вспомогательной операции загрузки, являющейся частью операции ввода объекта производства в рабочую зону АТО. Транспортное устройство реализует транспортные операции, связанные с перемещением объекта производства в пространстве между различными функционирующими элементами АТО. Питатель обеспечивает подачу объектов производства на рабочую позицию. Накопитель служит для накопления определенного числа объектов производства для их последующей передачи на другое АТО.

Датчики первичной информации (ДПИ) служат для прямого и косвенного измерения параметров объектов производства (геометрических, размерных, физико-механических, электромагнитных, оптических и др.) до и после их обработки (ДПИ1), положения в пространстве рабочих органов, траекторий их перемещения, взаимного положения, наличия инструмента и других параметров (ДПИ2) и режимов и параметров протекания

технологических процессов и операций (величин подач, точности, скорости, давления, температуры, степени вакуума и др. ), осуществляемых ДПИЗ.

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 (по ГОСТ 26228-85) представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, робототизированных технологических комплексов (РТК), ГПМ, отдельных единиц технологического оборудования и систем обеспечения их функционирования в автоматическом режиме в течение заданного интервала времени, обладающая свойством автоматизированной переналадки при производстве изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик. Основными частями ГПС являются ГПМ и ГТК.

ГПМ представляет собой единицу технологического оборудования для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах их значений их характеристик с программным управлением, автономно функционирующая, автоматически осуществляющая все функции, связанные с изготовлением изделий, имеющая возможность встраивания в ГПС.

Под РТК понимается совокупность единицы технологического оборудования, ПР и средств оснащения, автономно функционирующих и осуществляющих многократные циклы.

#### **7.4.2 Гибкость и мобильность ГАПС**

Гибкость ГАПС - это способности оперативно перестраиваться с выпуска одного вида продукции на другой за счет самонастройки управляющей системы и автоматической перестройки технологии. Этим ГАПС принципиально отличаются от автоматических линий и промышленных автоматов с жесткой структурой. Переход на выпуск новой продукции у них либо вообще невозможен, либо сопряжен со сложной реконструкцией, требующей больших затрат.

Роль и место ГАПС в сфере производства наглядно можно охарактеризовать с помощью зависимости, построенной в логарифмическом масштабе (рис. 7.24).

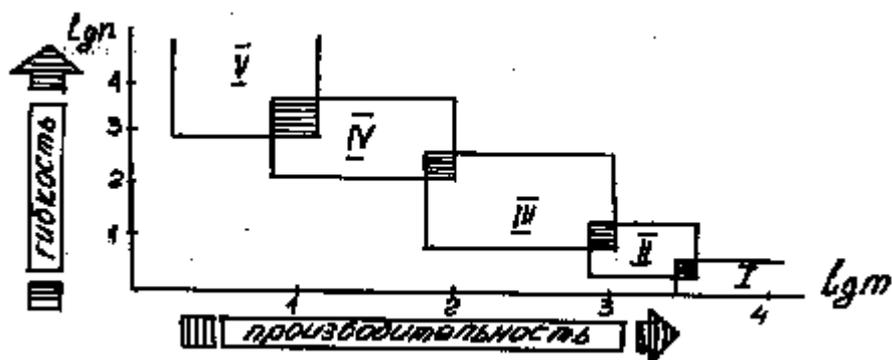


Рис.7.24. Место ГПС в сфере производства

В пространстве двух показателей  $n$  - число типов изделий (номенклатура),  $m$  - объем годового выпуска, изображены области I-V, соответствующие эффективному использованию различных средств автоматизации.

Область 1 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 100000 шт. в год). Производительность таких традиционных средств автоматизации очень высока, однако гибкость чрезвычайно мала.

Область 2 соответствует крупносерийному производству. Область V индивидуальное и экспериментальное производство, характеризуемое универсальным оборудованием. Для такого производства характерна высокая гибкость, но низкая производительность. Мелкосерийное производство соответствует области 4. ГАПС использует преимущества массового производства (высокая производительность) и единичного производства (высокая гибкость), что достигается применением программно-управляемого технологического оборудования и гибкой управляющей системой. В этих условиях достигается разумный компромисс между гибкостью и производительностью производственных систем.

Таким образом, использование ГАПС эффективно в тех случаях, когда число различных типов изделий невелико ( $3 \leq n < 30$ ), годовой объем выпуска изделий составляет  $10^3 \leq m < 10^4$ .

Анализ классификации производственных систем показывает, что необходимо изучить потребность системы в вариативности и стремиться уходить из последней (крайней правой) клетки (самая дорогая система) вверх и влево. Самая высокая гибкость ГАПС - это и самая высокая стоимость. Поэтому ГАПС должны быть менее универсальны и полностью загружены с привлечением по кооперации других предприятий.

Опыт работы ГАПС на ряде предприятий показывает, что существуют следующие проблемы:

1. Надежность технологического оборудования приемлема лишь для традиционного производства, где у станка стоит лишь один человек, который исправляет ошибку ЧПУ, заменяет вышедший из строя инструмент и т.д. В ГПС малейший сбой системы ведет к простоя оборудования. Необходимо довести цикл наработки на отказ 1 элемента ГПС до тысяч и десятков тысяч часов. Сейчас этот показатель на порядок ниже.

2. Качество инструмента для ГПС в настоящее время недостаточно, а час простоя современного обрабатывающего центра в условиях ГПС обходится в 200 рублей и выше. Статистика показывает, что 50% простоев оборудования и 100% технологического брака вызван авариями или неудовлетворительным состоянием инструмента.

3. Недостаточные функциональные возможности и низкая надежность средств вычислительной техники, рекомендуемой в качестве базовой для нижних уровней управления ГПС микро - ЭВМ. Необходимы более современные и надежные управляющие микро - ЭВМ.

4. Отечественная промышленность мало выпускает устройств сопряжения ЭВМ в локальную вычислительную сеть, нет единого программного обеспечения, до сих пор отсутствует стандарт для вычислительных сетей.

5. Нормальное функционирование ГАПС предполагает поддержание очень высокой организационно-технологической дисциплины. Сегодня все ГАПС создаются в виде участков, которые представляют собой "островки автоматизации" на предприятиях, поскольку полную автономию такого участка обеспечить невозможно, то разница в уровнях организационно-технологической дисциплины вызывает конфликт ГАПС с традиционным производством. К преимуществам ГАПС следует отнести:

- резкое увеличение производительности труда в условиях мелкосерийного производства, высвобождение рабочих, что особенно важно в условиях дефицита рабочей силы в стране;
- 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;
- улучшение условий труда, освобождение человека от малоквалифицированного и монотонного труда.

#### **7.4.3 Оценка гибкости ГПС сборки электронных модулей**

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. С учетом этих положений показатель гибкости по  $\Gamma_{\text{ГПС}}$  можно выразить произведением трех коэффициентов:

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3, \quad (7.33)$$

где  $K_1 = T/(T+T_{\text{пер.}i})$  - коэффициент, характеризующий потери времени на переналадку технологического оборудования, где  $T$  - планируемый отрезок времени,  $T_{\text{пер.}i}$  - общие потери времени, связанные с переналадкой технологического оборудования.

$K_2 = 1-1/N$  - коэффициент, учитывающий объем номенклатуры изделий, обрабатываемых в режимах ГПС,  $N$ - заданный объем номенклатуры изделий.

$K_3 = 1-N/N_n+1$  - коэффициент, характеризующий потенциальные возможности ГПС.  $N_n$  - потенциальный объем номенклатуры изделий с учетом возможностей технологического оборудования.

Показатель гибкости применяется в пределах от 1 до 0.

Приведенное выражение для  $\Gamma_{\text{ГПС}}$  справедливо только для производств с постоянным для всех операций количественным составом номенклатуры объектов, например, механообрабатывающим.

Для сборочно-монтажных производств характерно четыре основных комплекса операций: подготовка операций к монтажу, которая определяется количеством элементов, типом их корпуса, вариантом формовки, для операций установки и пайки - зависимостью от топологии печатной платы, для функционального контроля - 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 ГПС:

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = \prod_{j=1}^m \Gamma_j, \quad (7.34)$$

где  $m$  - количество выделенных групп операций.

Таким образом, в общем случае выражение показателя гибкости ГПС принимает вид:

$$\Gamma_{\text{ГПС}} = \prod_{J=1}^m K_{1J} \cdot K_2 \cdot K_{3J} \quad (7.35)$$

При  $j=1$  имеет место случай производств первого типа, при  $j > 1$  - второго.

#### 7.4.4 Гибкая автоматизация производства типовых элементов сборки (АП ТЭС)

ГАП ТЭС предназначена для многономенклатурного серийного и мелкосерийного производства ТЭС, выполненные на платах с печатным или проводниковым монтажом с изделиями электронной техники: ИМС, ЭРЭ и коммутационными элементами. В основу проекта ГПС положен типовой технический процесс сборки таких ячеек, который включает подготовку ИЭТ и плат к монтажу, установку элементов на плату, пайку, доустановку ИЭТ вручную и допайку, наладку и ремонт ячеек, вибро-, электротермо- и технологическую тренировки, аппаратно-программный контроль и диагностику, маркировку, влагозащиту и контроль.

Для выполнения перечисленных операций в структуре сборочно-монтажного производства предусмотрены: автоматизированный склад (АС), комплектовочный цех (КЦ) и собственно сборочный цех ТЭС. Функцию цехового транспорта выполняют два автоматических кран-штабелера (автооператора), которые осуществляют доставку кассет с ТЭС и комплектующими изделиями со склада на приемные площадки участков. Перемещения ТЭС на участках осуществляют по рабочим местам транспортными системами, конвейерами, транспортными роботами и т.д.

Комплектовочный цех имеет участки подготовки ИЭТ (ЭРЭ, ИМС, плат, соединителей) и комплектования. Цех собственно сборки имеет участки: сборки и монтажа ТЭС, автоматизированной пайки и отмытки ТЭС, проверки ТЭС и наладки, допайки и досборки ТЭС, тренировки и испытаний, влагозащиты.

Участок сборки ТЭС построен на базе гибких автоматизированных модулей с числовым программным управлением для установки ИМС и ручной установки конденсаторов на автоматизированном рабочем месте (АРМ) (рис. 7.25). На участке выполняются следующие основные и вспомогательные операции: получение со склада и учет комплектующих изделий и печатных плат, распределение их по рабочим местам, загрузка оборудования, установка ИМС на платы, установка блоков резисторов и конденсаторов на платы, контроль правильности сборки ТЭС перед пайкой, возврат пустых кассет на склад, получение, выдача и учет комплектующих изделий (КИ) для замены вышедших из строя при сборке.

Организационно участок построен по функционально законченному принципу и состоит из ГПМ установки ИМС и БР (1), АРМ установки ЭРЭ на печатные платы (2), контроля и ремонта ТЭС (3), транспортного робота (4).

Программное обеспечение участка на всю номенклатуру собираемых ТЭС содержится в памяти управляющего комплекса АСУ.

При решении задачи размещения оборудования необходимо оптимизировать следующие критерии:

- грузопоток,
- поток людей,
- площадь, занимаемую оборудованием,
- и т. д.

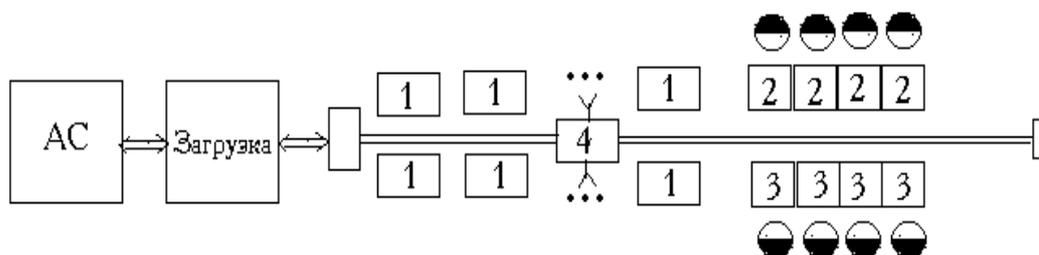


Рис. 7.25 Планировка участка установки ТЭС на плату

При этом необходимо учесть санитарные нормы, требования ТБ и ППТ, эстетические, эргономические и др. нормы.

Планировку по критерию минимального грузооборота можно считать рациональной, если она удовлетворяет следующим требованиям:

- технологический поток сборки является последовательным;
- все транспортно-складские работы входят в общий технологический поток, который замыкается на автоматизированный склад;
- транспортно-складские максимально механизированны и автоматизированы.

Рабочая площадь помещений основного производства определяется рациональным размещением оборудования с соблюдением необходимой ширины переходов и проездов, а также расстояний между оборудованием и рабочими местами и элементами зданий: колоннами, стенами и т.п.

Нормы расстояний следующие:

- |                                    |             |
|------------------------------------|-------------|
| 1. между оборудованием по фронту   | 900-1000 мм |
| 2. между оборудованием в “затылок” | 1400 мм     |

3. от оборудования до стены, колонны	800 мм
4. расстояние между рабочими местами на конвейере	2800 мм
5. расстояние между рабочими местами, между конвейерами	2800 мм
6. ширина проезда между рядами оборудования и рабочих мест	1900 мм
7. цеховой проезд	2000 мм

В общем случае производственная площадь определяется по формуле:

$$S = (l + b + 0.5d)(h + 0.5c) \quad (7.36)$$

где  $l$  - длина основного оборудования вдоль фронта,

$b$  - расстояние от стены или колонны до рабочего места,

$d$  - величина прохода между оборудованием,

$h$  - ширина основного технологического оборудования,

$c$  - расстояние между оборудованием по ширине.

Оценки рациональности компоновки оборудования определяется коэффициентом использования производственной площади:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^n (S_1 + S_2)}{S} \quad (7.37)$$

где  $S_1$  - площадь занятая основным оборудованием,

$S_2$  - площадь, занятая вспомогательным оборудованием.

Площадь кладовых сборочно-монтажного цеха рассчитывается по формуле:

$$S = \frac{Q \cdot t}{q \cdot h \cdot K \cdot m \cdot K_c} \quad (7.38)$$

где  $Q$  - годовой расход материала, Т,

$t$  - норма запаса, раб. дня,

$q$  - норма грузонапряженности полезной площади при высоте хранения 1 м, Т/м<sup>2</sup>,

$h$  - высота укладки материалов, м,

$K$  - коэффициент использования полезной площади кладовой,

$m$  - число рабочих дней в году,

$K_c$  - коэффициент изменения грузонапряженности в зависимости от типа производства: мелкосерийное - 1.0, крупносерийное - 1.1, массовое - 1.2.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рациональная организация производственного процесса невозможна без проведения тщательной технологической подготовки производства, которая должна обеспечивать полную технологическую готовность предприятия к производству изделий ЭА, конкурентоспособных на внешнем рынке при минимальных трудовых и материальных затратах. Основными этапами технологической подготовки производства являются: отработка конструкции изделий на технологичность, проектирование и оптимизация технологического процесса, выбор и проектирование специального технологического оснащения.

Оценка технологической точности и устойчивости технологических процессов позволяет обеспечить выходные параметры блоков электронной аппаратуры на заданном уровне, снизить до минимума технологический брак на отделочных операциях, существенно улучшить качество выпускаемых изделий. Устойчивость технологических процессов в условиях автоматизированного производства ЭА - это гарантия минимальных затрат на производство изделий и исправление брака.

Математическое моделирование технологических процессов является основой создания оптимальных гибких автоматизированных систем (ГАПС), обеспечивающих гибкую переналадку, «безлюдную» технологию и автоматизацию управления. Оптимизация технологических процессов в производстве ЭА позволяет управлять выходными параметрами изделий, обеспечивая требуемые физико-химические превращения при их производстве.

Мощным средством управления технологическими процессами являются персональные компьютеры, которые должны стать незаменимым помощником каждого инженера-технолога. Проводя с их помощью математическую обработку данных эксперимента, поиск оптимальных технологических решений, документирование информации, технолог освобождается от рутинной «бумажной» работы и получает возможность в полной степени раскрыть свои творческие возможности.

Автоматизация операций сборки и монтажа в значительной мере позволит увеличить производительность технологических процессов, повысить качество изделий, решить ряд социальных и экологических проблем.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры /Под ред. А.П. Достанко, Ш.М. Чабдарова. - М.: Радио и связь, 1989. - 624с.
2. Глудкин О.П., Черняев В.Н. Анализ и контроль технологических процессов производства РЭА. - М.: Радио и связь, 1983.-296с.
3. Ханке Х.И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры. - М.: Энергия, 1980. - 464с.
4. Павловский В.В., Васильев В.И., Гутман Т.Н. Проектирование технологических процессов изготовления РЭА. - М.: Радио и связь, 1992. - 160с.
5. Сборник задач и упражнений по технологии РЭА/ Под ред. Е.М.Парфенова. - М.: Высшая школа, 1982. - 255с.
6. Зажигаев Л.С., Кишьян А.А., Романиков Ю.И. Методы планирования и обработки результатов физического эксперимента. - М.: Атомиздат, 1978. - 232 с.
7. Длин А.М. Факторный анализ в производстве. - М.: Статистика, 1975. - 328 с.
8. Скурихин В.И., Шифрин В.Б., Дубровский В.В. Математическое моделирование. - Киев: Техніка, 1983. - 270 с.
9. Ланин В.Л. Технология сборки, монтажа и контроля в производстве электронной аппаратуры. – Минск: Инпредо, 1987.– 64 с.
10. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / Под ред. В.Г. Журавского. - М.: Радио и связь, 1988. - 280с.
11. Гибкие автоматизированные производства. Управление технологичностью РЭА / А.М. Войчинский, Н.И. Диденко, В.П.Лузин. - М.: Радио и связь, 1987. - 220 с.
12. Гибкое автоматическое производство / Под общ. ред. С.А. Майорова и Г.В. Орловского. – Л.: Машиностроение, 1983. – 376 с.
13. Гибкие производственные системы / Н.П. Меткин, М.С.Лапин, С.А.Клейменов, В.М. Критский. - М.: Стандарт, 1989. - 311 с.
14. Автоматические роторные линии / И.А. Клусов, Н.В.Волков, В.Н. Золотухин и др. - М.: Машиностроение, 1987. - 288 с.
15. Мысловский Э.В. Промышленные роботы в производстве радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Радио и связь, 1988.– 224 с.
16. Робототехника и гибкие автоматизированные производства / Под ред. И.М.Макарова / В 9 книгах.- М.: Высшая школа, 1986.