

Список сокращений

АЗУ – аналогово-запоминающее устройство
АИГ – алюмоиттриевый гранат
АМ – амплитудная модуляция
АРУ – автоматическая регулировка усиления
АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки производства
АСУП – автоматизированная система управления производством
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БГИС – большая гибридная интегральная схема
БД – банк данных
БИС – большая интегральная схема
БЦК – блок цифрового кодирования
ВКУ – видеоконтрольное устройство
ВОК – волоконно-оптический кабель
ВОЛС – волоконно-оптические линии связи
ВЧ – высокочастотный
ГАП – гибкое автоматизированное производство
ГЖПП – гибко-жесткие печатные платы
ГИС – гибридная интегральная схема
ГПК – гибкий печатный кабель
ГПП – гибкие печатные платы
ГПС – гибкая производственная система
ГСС – генератор стандартных сигналов
ДОЗУ – динамическое оперативное запоминающее устройство
ДПП – двусторонние печатные платы
ЕСТД – Единая система технологической документации
ЕСТПП – Единая система технологической подготовки производства
ЗГ – знакогенератор
ЗУ – запоминающее устройство
ИК – инфракрасный
ИПК – интегрированные производственные комплексы
ИС – интегральная схема
ИТК – интегрированный технологический комплекс
ИЭТ – изделия электронной техники
КД – конструкторская документация
КП – коммутационные платы
КПЕ – конденсатор переменной емкости
КПП – коммутационные печатные платы
КТЛР – коэффициент термического линейного расширения
КЭ – коммутационные элементы
МАР – микроанализатор
МБОГ – микроблоки с общей герметизацией
МК – маршрутная карта
МКМ – многокристальный модуль
МКП – многослойные керамические платы
ММ – микромодуль

МО – математическое ожидание
МОП – металл – оксид – полупроводник
МПК – микропроцессорные комплекты
МПП – многослойные печатные платы
МСБ – микросборка
МСП – магнитострикционный преобразователь
МЭМС – микроэлектромеханические системы
НЧ – низкая частота
ОКГ – оптический квантовый генератор
ОМ – объемный модуль
ОПП – односторонние печатные платы
ОС – оптическая система
ОСТ – отраслевой стандарт
ПАВ – поверхностно-активные вещества
ПВС – поливиниловый спирт
ПВЦ – поливинилциннамат
ПЗС – приборы с зарядовой связью
ПК – персональный компьютер
ПЛ – полосковые линии
ПЛК – плоские ленточные кабели
ПМ – поверхностный монтаж
ПП – печатная плата
ППП – полупроводниковый прибор
ПФЭ – полный факторный эксперимент
ПЧ – промежуточная частота
РТК – робототехнологический комплекс
РТЛ – робототехнологические линии
РТМ – руководящие технические материалы
РЭА – радиоэлектронная аппаратура
РЭМ – растровые электронные микроскопы
РЭС – радиоэлектронные средства
САК – система автоматизированного контроля
САО – система анализа отказов
САПР – система автоматизированного проектирования
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВЧ – сверхвысокая частота
СЗП – система задания программ
СМО – система массового обслуживания
СОП – система оптимизации программ
СТЗ – системы технического зрения
СТО – специальное технологическое оснащение
СТП – стандарты предприятия
ТВК – телевизионная камера
ТД – технологические документы
ТЗС – термозвуковая микросварка
ТИ – технологические инструкции
ТК – технологический классификатор
ТКЛР – термический коэффициент линейного расширения
ТКС – термокомпрессионная сварка

ТЛ – титульный лист
ТО – техническое обеспечение
ТП – технологический процесс
ТПП – технологическая подготовка производства
ТС – технологическая система
ТУ – технические условия
ТЭС – типовые элементы сборки
УЗ – ультразвук
УЗГ – ультразвуковой генератор
УНЧ – усилитель низкой частоты
УОВ – устройство обработки видеосигнала
УПТ – усилитель постоянного тока
УФ – ультрафиолетовый
ФЭ – функциональный элемент
ФЯ – функциональные ячейки
ЦКОП – центральный композиционный ортогональный план
ЦКП – центральный композиционный план
ЧМ – частотная модуляция
ЧПУ – числовое программное управление
ЭВП – электровакуумные приборы
ЭК – электронный компонент
ЭМ – электронные модули
ЭМИ – электромагнитные излучения
ЭРЭ – электрорадиоэлементы
ЭС – электронные средства
BGA – ball grid array (массив шариков – тип корпуса поверхностно-монтируемых схем)
COB – chip-on-board (кристалл на плате)
CSP – clip scale package (корпус с размерами кристалла)
D-Pak – discrete power device package (дискретный корпус мощного прибора)
Flip-chip – монтаж методом перевернутого кристалла
HASL – hot air solder leveling (финишное покрытие горячим лужением)
HD PCB – high density printed circuit board (печатные платы высокой плотности)
IGBT – insulated gate bipolar transistor (биполярный транзистор с изолированным затвором)
ppm – parts per million (процент на миллион)
QFN – quad flat no-leads package (семейство корпусов микросхем, имеющих планарные выводы, расположенные непосредственно под микросхемой по всем четырем сторонам)
QFP – quad flat package (семейство корпусов микросхем, имеющих планарные выводы, расположенные по всем четырем сторонам)
SMD – surface mount device (поверхностно-монтируемый компонент)
SMT – surface mount technology (поверхностный монтаж)
THT – through-hole technology (технология монтажа в отверстия)

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 греч. *techne* – умение, мастерство, *logos* – наука) – это наука о мастерстве.

Предмет дисциплины – технология сборки, монтажа, настройки и регулировки электронных средств, а также программно-управляемое оборудование и средства автоматизации технологических процессов.

В данной дисциплине предусматривается изучение технологических систем производства, включая методы проектирования и управления оптимальными технологическими процессами с применением микропроцессоров и микроконтроллеров, обеспечивающих интенсификацию и эффективность производства, высокое качество изготавливаемой продукции, изучение средств автоматизации, в том числе гибких производственных систем, методов моделирования, оптимизации, анализа и синтеза технологических систем производства.

В результате изучения дисциплины студенты должны знать физико-технологические основы процессов сборки и монтажа, контроля, регулировки модулей и блоков электронных средств, методику их компьютерного проектирования и оптимизации, принципы построения и управления технологическими системами производства в условиях гибких автоматизированных производств, уметь разрабатывать и внедрять новые технологические процессы автоматизированного производства с использованием промышленных роботов и микропроцессорных систем, проектировать технологические планировки участков с микропроцессорными системами управления.

Учебник обобщает достижения современной отечественной и зарубежной технологии и состоит из 16 глав, в которых описываются технологические системы производства электронных средств, принципы их проектирования, оценки точности и надежности, моделирования и оптимизации.

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

Значительное место отводится физико-технологическим основам процессов и оборудованию для производства коммутационных плат, намоточных изделий, сборки и монтажа блоков, контроля, регулировки, тренировки и герметизации аппаратуры. Систематизированы технологии электрических и механических соединений при сборке электронных модулей, групповой пайке,

внутри- и межблочном монтаже, методы и средства технической диагностики, применяемое технологическое и контрольно-испытательное оборудование.

Большое внимание уделено вопросам автоматизации производства, гибким производственным системам, автоматизированным системам управления и проектирования технологических процессов, автоматическим линиям, автоматизированным комплексам и гибким производственным модулям в производстве электронных средств.

Изложение материала основано на опыте преподавания авторами дисциплины «Технология радиоэлектронных средств» в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники в течение 30 лет на кафедре «Электронная техника и технология».

Авторы выражают признательность рецензентам: заведующему кафедрой конструирования и производства приборов Белорусского национального технического университета доктору технических наук, профессору М.Г. Киселеву и члену-корреспонденту Национальной академии наук Республики Беларусь, доктору технических наук, профессору В.А. Пилипенко.

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

Авторы

Глава 1

Принципы проектирования технологических процессов производства электронных средств

1.1. Системный подход к технологии и иерархические уровни производства

Комфортная среда, окружающая человека, во многом зависит от функциональных возможностей современных электронных средств (ЭС). Постоянное совершенствование и обновление ЭС обеспечивается высоким уровнем развития производства. Современное производство ЭС: мобильных телефонов, персональных компьютеров, средств телекоммуникаций, бытовых и промышленных приборов, электронных носителей информации (флеш- и смарт-карты), невозможно без разработки новых технологий и совершенствования производственных систем.

Производственная система объединяет людей, технические средства в виде оборудования, инструмента, зданий, системы поддержки производства, включая проектирование изделий, технологическую подготовку и планирование производства, контроль качества и бизнес-функции. Для современных производственных систем характерен высокий уровень автоматизации и компьютеризации производственных процессов и поддерживающих систем (рис. 1.1).

Производство новых изделий включает ряд последовательных стадий, начиная от маркетинга и формирования заказа, схемного и конструкторского проектирования, подготовки производства, технологических процессов изготовления и контроля качества и заканчивая выводом изделия на рынок (рис. 1.2). Основными параметрами конкурентоспособности изделий на рынке являются:

- повышенная функциональность;
- эргономичный современный дизайн;
- пониженные размеры и вес;
- оптимальная цена;
- качество и надежность;
- сервисное обслуживание.

Первые три параметра обеспечиваются в процессе разработки конструкции изделия, два последующих – в условиях его эффективного производства, а последний – при эксплуатации изделия.

Критериями эффективного производства являются:

- высокое качество и надежность выпускаемой продукции: количество отказов в гарантийный период не более 1000 ppm (процент на миллион);

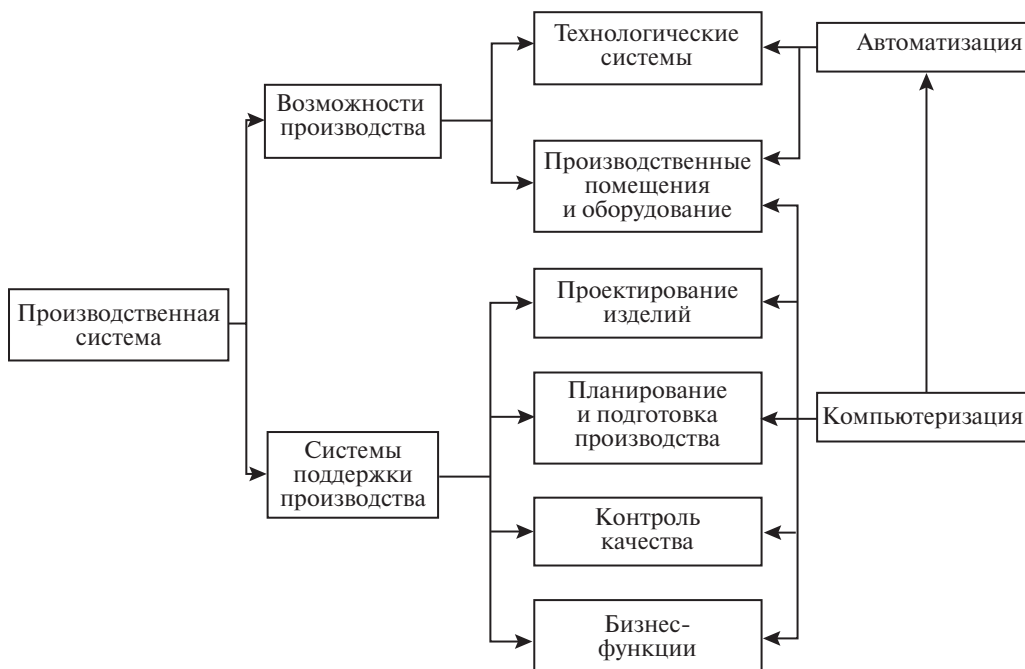


Рис. 1.1. Структура производственной системы

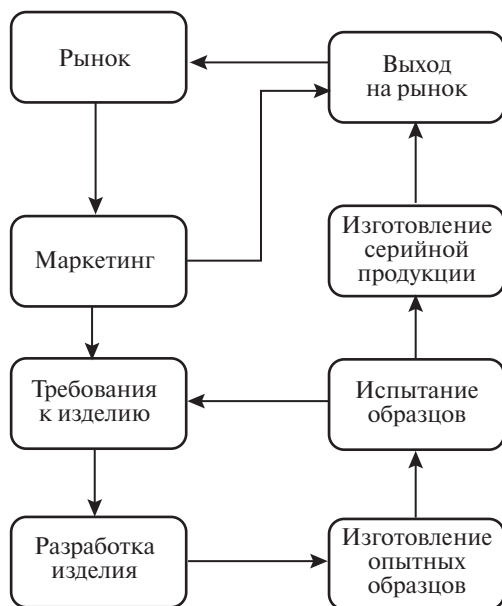


Рис. 1.2. Бизнес-процесс разработки, изготовления и выхода на рынок новых изделий

- оптимальная себестоимость выпускаемой продукции: цена не выше среднерыночной (при рентабельности 4–7 %);

- эффективное использование инвестиций в техническое перевооружение производственной системы и их возврат в течение 2,5 лет.

Переход от ручных операций сборки к автоматическим сборочным линиям — важнейшее условие при построении эффективного производства современной высокотехнологичной продукции.

Производственный процесс изготовления ЭС состоит из большого количества технологических операций, реализуемых на различном оборудовании. Отдельные виды оборудования объединяются в технологические линии изготовления деталей, электронных компонентов (ЭК), сборки модулей, блоков и изделия в целом. Работа оборудования в составе линий характеризуется частичной или полной синхронизацией и взаимозависимостью выполнения режимов. Поэтому производственный процесс можно отнести к сложным системам, а для его анализа необходимо применять системный подход. Процессы, используемые в производстве ЭС, делят на пять групп.

1. *Производство элементной базы* (в том числе ЭК, микросборок (МСБ) и интегральных схем (ИС), микропроцессоров), для которого характерны высокий уровень технологичности и автоматизации, массовый тип производства, тщательность разработки конструкции, высокая надежность и низкая стоимость. Дальнейшее развитие элементной базы идет по пути разработки новых материалов, ужесточения требований к их параметрам, уменьшения дефектов подложек, повышения точности и автоматизации контроля параметров, компьютерного проектирования и управления всеми процессами. Поверхностно-монтируемые компоненты (SMD – surface mount device), сверхбольшие интегральные схемы (СБИС), микропроцессоры в корпусах BGA (ball grid array – массив шариков) нашли широкое применение в современных ЭС.

2. *Производство функциональных элементов* (линий задержки и фильтров на поверхностно-акустических волнах (ПАВ), намоточных изделий, печатных и многослойных плат), которое характеризуется серийным выпуском, гибкостью в освоении новых конструкций и технологических решений. Основными направлениями их совершенствования являются микроминиатюризация, применение для плат керамических и полиимидных оснований, повышение функциональности конструкций изделий.

3. *Производство элементов несущих конструкций* (корпусов, панелей, стоек, держателей и др.), которые заимствованы из машиностроения и приспособлены для производства ЭС (штамповка, литье, прессование, точение, фрезерование, электрофизические методы обработки и др.). Совершенствование осуществляется по пути унификации как конструкторских, так и технологических решений, широкого использования безотходных и программно-управляемых технологий и гибких модулей программно-управляемого оборудования.

4. *Сборка, монтаж и герметизация электронных модулей и блоков*, трудоемкость которых составляет до 50–80 % общих затрат производства. Эти процессы требуют гибкой автоматизации производства и широкой номенклатуры технологического оснащения. Для снижения длительности производственного цикла осуществляется параллельная сборка модулей различных уровней, сочетание на одной линии сборки, монтажа и герметизации модулей. Основными направлениями их совершенствования являются повышение плотности компоновки элементов, применение многослойных печатных плат (МПП) на

керамических и полиимидных основаниях; широкое использование SMD и технологии поверхностного монтажа, автоматизированного программно-управляемого оборудования; разработка новых методов сборки и монтажа 3D-модулей, а также мер по технологическому обеспечению надежности электрических соединений.

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

Качество и надежность ЭС, а также экономическая эффективность их производства обеспечиваются с учетом особенностей всех групп процессов. С позиций системного подхода производство ЭС – 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).

Технологическая система – совокупность функционально связанных средств технологического оснащения, предметов производства и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства заданных технологических процессов (ТП) или операций (ГОСТ 27.004-85 «Системы технологические. Термины и определения»).

Технологическую систему характеризуют следующие признаки:

- возможность разбиения на ряд подсистем, объединенных общей целью функционирования;
- взаимодействие с внешней средой;
- функционирование в условиях воздействия случайных факторов;
- сложные информационные связи между элементами и подсистемами;
- наличие иерархической структуры.

Технологическая система представляет возможность разбиения на подсистемы нижних уровней, а с другой стороны, ТС входит составной частью в систему предприятия.

Координация развития науки и техники, а также перспективных технологий осуществляется Государственным комитетом по науке и технологиям, Министерством промышленности, Национальной академией наук Республики Беларусь (рис. 1.3) в рамках следующих задач:

- разработка перспективных направлений научно-технического прогресса;
- координация деятельности научно-исследовательских институтов, научно-технологических парков, предприятий и других органов управления в сфере научно-технической деятельности;

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

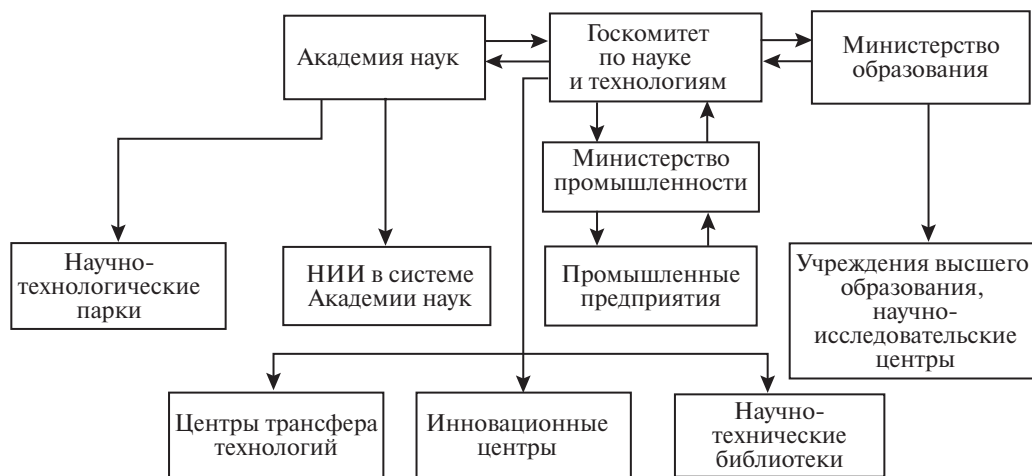


Рис. 1.3. Иерархические уровни координации развития науки и техники

На уровне предприятия осуществляется:

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

1.2. Структура производственного процесса, виды и типы технологических процессов

Производственный процесс — это совокупность действий, в результате которых сырье, материалы и полуфабрикаты, поступающие на предприятие, превращаются в готовое изделие. Он делится на основной и вспомогательный. **Основной производственный процесс** — это изготовление продукции, определяемой госзаказом и договорами с другими предприятиями, **вспомогательный** — ремонт оборудования, транспортирование объектов производства, изготовление оснастки, инструментов, электроснабжение (рис. 1.4).

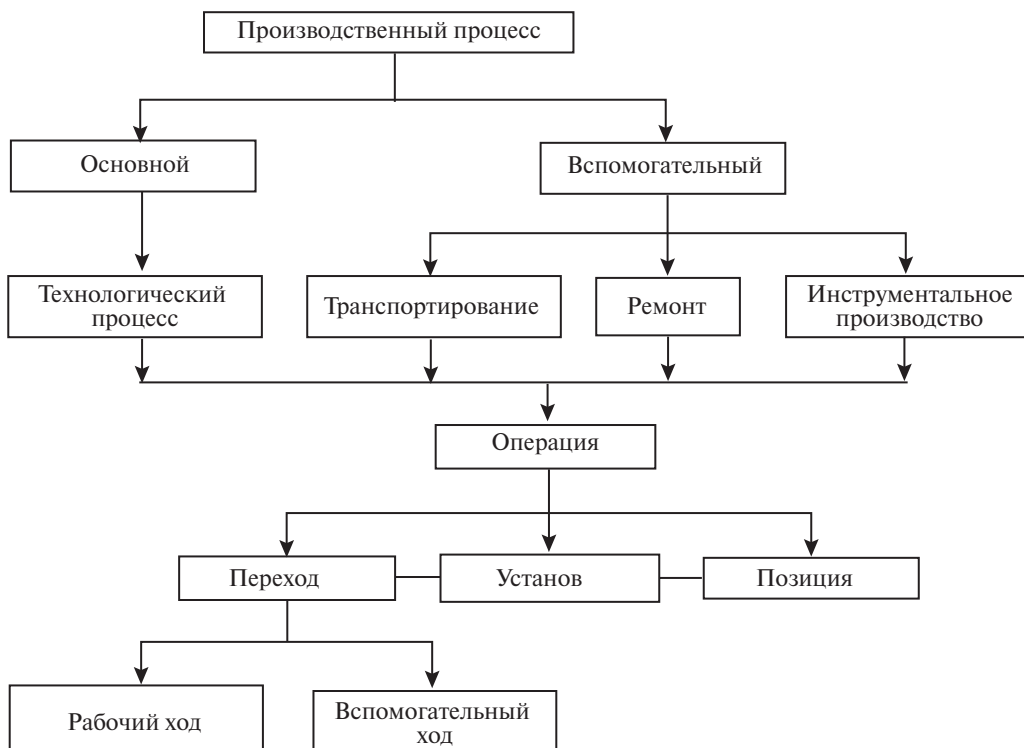


Рис. 1.4. Структура производственного процесса

Технологический процесс – часть производственного процесса, представляющая собой комплекс действий исполнителей и оборудования, направленных на преобразование материалов и комплектующих изделий в готовое изделие. ТП состоит из операций, установов, позиций, переходов.

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 требуемое количество рабочих, оборудования, приспособлений и инструмента, себестоимость, ведется календарное планирование производства и осуществляется контроль качества выполненных работ.

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

Оглавление

Список сокращений	3
Предисловие	6
Глава 1. Принципы проектирования технологических процессов производства электронных средств	8
1.1. Системный подход к технологии и иерархические уровни производства	8
1.2. Структура производственного процесса, виды и типы технологических процессов	12
1.3. Технологическая система подготовки производства и порядок проектирования технологических процессов	18
1.4. Выбор оптимального варианта технологического процесса	24
1.5. Конструктивно-технологические особенности электронных модулей и блоков	29
1.6. Технологичность конструкций электронных модулей	34
1.7. Проектирование сборочно-монтажных работ	38
1.8. Разработка и оформление технологической документации	44
1.9. Автоматизированное проектирование технологических процессов	50
Глава 2. Моделирование и оптимизация технологических процессов	55
2.1. Модели технологических систем	55
2.2. Регрессионный анализ технологических процессов	57
2.3. Моделирование методом полного факторного эксперимента	59
2.4. Методы оптимизации технологических процессов	64
2.5. Моделирование систем массового обслуживания	72
2.6. Статистическое моделирование сборочных процессов	75
Глава 3. Точность и надежность технологических процессов	90
3.1. Производственные погрешности и законы их распределения	90
3.2. Методы анализа производственных погрешностей	96
3.3. Точность и устойчивость технологических процессов	101
3.4. Методы обеспечения заданной точности технологических процессов ..	104
3.5. Надежность технологических процессов	108
Глава 4. Технология коммутационных плат	112
4.1. Конструктивно-технологические требования, предъявляемые к платам и печатному монтажу	112
4.2. Классификация плат и методов их изготовления	117
4.3. Материалы для изготовления печатных плат	121
4.4. Формирование рисунка схемы	124
4.5. Травление меди с пробельных мест	134
4.6. Химическая и электрохимическая металлизация	139
4.7. Механическая обработка печатных плат	146
4.8. Технология односторонних и двусторонних печатных плат	151
4.9. Технология многослойных печатных плат	156
4.10. Платы с высокой плотностью межсоединений	165

4.11. Гибкие и гибко-жесткие платы	167
4.12. Тестирование и испытания плат	170
Глава 5. Технология и оборудование для изготовления намоточных изделий	176
5.1. Конструктивно-технологические особенности намоточных изделий ...	176
5.2. Материалы проводов, каркасов и экранов	179
5.3. Оборудование и типовые процессы намотки	181
5.4. Тормозные устройства	185
5.5. Измерение натяжения провода	186
5.6. Автоматизация контроля намоточных изделий	187
5.7. Выбор оптимального натяжения провода при намотке	189
Глава 6. Технология разъемных и неразъемных механических соединений	191
6.1. Классификация механических соединений и области их применения ..	191
6.2. Разъемные соединения	192
6.3. Неразъемные соединения	196
6.4. Пайка механических соединений	201
6.5. Конструкционная сварка	205
6.6. Обеспечение точности при выполнении механических соединений ...	211
Глава 7. Технология электромонтажных соединений	214
7.1. Методы создания электромонтажных соединений	214
7.2. Физико-химическое содержание процесса пайки	219
7.3. Припои, флюсы, пасты	237
7.4. Технологические основы индивидуальной пайки	244
7.5. Контроль качества паяных соединений	250
7.6. Физико-технологическое содержание сварки	257
7.7. Монтажная микросварка	261
7.8. Накрутка, обжимка и запрессовка	273
Глава 8. Сборка электронных блоков на печатных платах	283
8.1. Структура технологического процесса сборки	283
8.2. Входной контроль и его оптимизация	284
8.3. Подготовка компонентов к монтажу	290
8.4. Установка компонентов на платы	292
8.5. Автоматическое оборудование для сборки	295
Глава 9. Пайка электронных модулей на печатных платах	299
9.1. Классификация способов групповой пайки	299
9.2. Пайка погружением	301
9.3. Волновые способы пайки	302
9.4. Пайка групповым инструментом	309
9.5. Пайка летучим теплоносителем	312
9.6. Подготовительные операции при групповой пайке	314
Глава 10. Поверхностный монтаж электронных модулей	318
10.1. Типы поверхностно-монтируемых элементов	318
10.2. Поверхностный монтаж и его разновидности	321
10.3. Технология дозирования паяльных паст	324
10.4. Методы и оборудование установки элементов на платы	327

10.5. Оценка точности позиционирования и способы центрирования элементов	330
10.6. Технология пайки поверхностного монтажа	333
10.7. Технология пайки модулей со смешанным монтажом	335
10.8. Типичные дефекты поверхностного монтажа	338
Глава 11. Технология сборки и монтажа микромодулей	341
11.1. Технология монтажа кристаллов	341
11.2. Монтаж компонентов жестко организованными выводами	353
11.3. Технология многокристалльных и 3D-модулей	360
11.4. Сборка и монтаж СВЧ-микромодулей	362
11.5. Конструктивно-технологические особенности волоконно-оптических модулей	365
11.6. Сборка и монтаж светодиодных модулей и панелей	368
Глава 12. Внутри- и межблочный монтаж электронных средств	372
12.1. Технические требования к монтажу	372
12.2. Подготовка проводов к монтажу	374
12.3. Технология жгутового монтажа	378
12.4. Монтаж плоскими ленточными кабелями	380
Глава 13. Технология контроля и диагностики	384
13.1. Виды контроля	384
13.2. Диагностика неисправностей	390
13.3. Методы и средства технической диагностики	392
Глава 14. Технология регулировки и тренировки	401
14.1. Методы регулировки	401
14.2. Настройка и регулировка параметров радиоприемников	403
14.3. Технологическая тренировка и испытания	412
Глава 15. Герметизация микроблоков и модулей	418
15.1. Классификация методов герметизации	418
15.2. Физико-технологические основы процессов покровной герметизации	420
15.3. Материалы для герметизации и их свойства	426
15.4. Герметизация в вакуумно-плотные корпуса	428
15.5. Герметизация пайкой	430
15.6. Контроль качества герметизации	432
Глава 16. Программно-управляемые технологические системы и производства	434
16.1. Технологические системы и их основные показатели	434
16.2. Принципы управления технологическими системами	437
16.3. АСУТП и основные функции подсистем	439
16.4. Технические средства АСУТП	441
16.5. Автоматизированные технологические комплексы интегрированного производства	445
16.6. CALS-технологии компьютеризированного производства	448
16.7. Инженерное обеспечение производства электронных средств	449
Литература	452