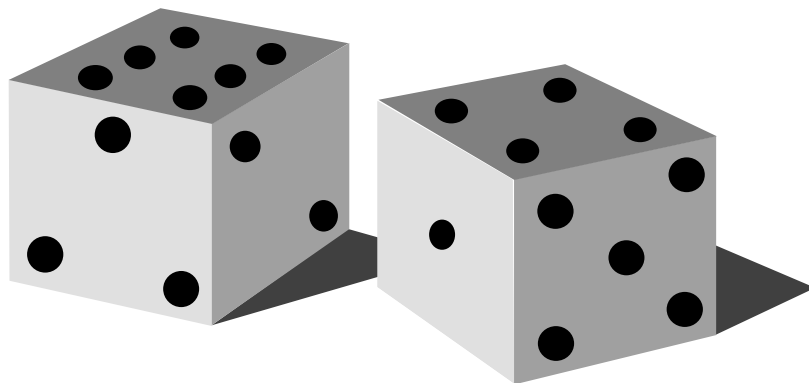




Кафедра конструирования
и производства радиоаппаратуры

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 210201 «ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»

Методические материалы для подготовки студентов
к сдаче теоретической части Государственного экзамена
под редакцией Д.В.Озёркина



ТОМСК 2012

Министерство образования и науки РФ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой КИПР

В.Н. ТАТАРИНОВ

“ ___ ” _____ 20__ г.

**ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН
ПО СПЕЦИАЛЬНОСТИ 210201
«ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ»**

Методические материалы для подготовки студентов
к сдаче теоретической части Государственного экзамена
под редакцией Д.В.Озёркина

2012

Идея: методист дипломного проектирования каф. КИПР Алексеев В.П.

Общая редакция: доцент каф. КИПР Озёркин Д.В.

Авторский коллектив: доцент каф. КИПР Алексеев В.П., доцент каф. КИПР Козлов В.Г., доцент каф. КУДР Кузевных Н.И., доцент кафедры КИПР Кулинич А.П., профессор каф. КИПР Масалов Е.В., доцент каф. КИПР Озёркин Д.В., доцент каф. КУДР Романовский М.Н., доцент каф. КУДР Солдатова Л.Ю., доцент каф. КИПР Чернышев А.А., профессор каф. КИПР Шостак А.С.

Рецензент: зав. каф. КИПР, профессор Татаринов В.Н.

Государственный экзамен по специальности 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств». Методические материалы для подготовки студентов к сдаче теоретической части Государственного экзамена / В.Г.Козлов, Д.В.Озёркин, А.С.Шостак и др.; Под редакцией Д.В.Озёркина.

Томск: Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, 2012. – 194 с.

В настоящих методических материалах приведены вопросы по теоретической части Государственного экзамена по специальности 210201 – «Проектирование и технология радиоэлектронных средств» и краткие ответы на них. Тезисное изложение ответов является минимально необходимым для получения оценки «удовлетворительно». Для более глубокой подготовки необходимо использовать рекомендуемую в пособии литературу.

© Кафедра КИПР Томского
государственного университета систем
управления и радиоэлектроники, 2012
© Озёркин Д.В., 2012

СОДЕРЖАНИЕ

СОДЕРЖАНИЕ.....	3
ВВЕДЕНИЕ	7
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, ВЫНОСИМЫЙ НА ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН.....	12
Вопрос № 1. Пакеты прикладных программ для анализа электронных схем.....	12
Вопрос № 2. Элементная база аналоговой схемотехники.....	15
Вопрос № 3. Микропроцессоры и их применение.....	19
Вопрос № 4. Элементная база и особенности конструирования СВЧ устройств.....	23
Вопрос № 5. Трансформаторы РЭС. Основы проектирования трансформаторов питания.....	27
Вопрос № 6. Высокочастотные катушки индуктивности (ВКИ). Основы проектирования ВКИ.....	30
Вопрос № 7. Дроссели и их применение в РЭС.....	33
Вопрос № 8. Основные технологические процессы формообразования механических деталей в РЭС.....	36
Вопрос № 9. Методы герметизации и защиты РЭС от влаги.....	39
Вопрос № 10. Методы расчета тепловых режимов РЭС.....	42
Вопрос № 11. Конструирование радиаторов полупроводниковых приборов.....	45
Вопрос № 12. Конструирование термостатов, их основные характеристики.....	48
Вопрос № 13. Конструирование и расчет гибридных интегральных схем.....	52
Вопрос № 14. Тонко- и толстопленочная технология, сравнительный анализ их применения, основные материалы.....	55
Вопрос № 15. Защита РЭС от механических воздействий.....	58
Вопрос № 16. Алгоритмы и программы проектирования печатных узлов.....	62

Вопрос № 17. Электро- и радиоизмерительные приборы, классификация, методы измерения электрических параметров.	66
Вопрос № 18. Технологическая подготовка производства.	69
Вопрос № 19. Отработка конструкций РЭС на технологичность.	72
Вопрос № 20. Классификация коммутационных плат и методов их изготовления.	76
Вопрос № 21. Неразъемные и разъемные электрические соединения.	79
Вопрос № 22. Контроль и испытания печатных плат.	82
Вопрос № 23. Технология и оборудование для подготовки печатных плат и компонентов к сборке и монтажу.	85
Вопрос № 24. Математическое моделирование технологических процессов и технологических систем.	89
Вопрос № 25. Гибкие производственные системы (ГПС) изготовления РЭС.	92
Вопрос № 26. Сущность и перспективы интегральной электроники.	95
Вопрос № 27. Модулированные колебания и их спектры.	98
Вопрос № 28. Устройства передачи и помехоустойчивого приема радиосигналов.	102
Вопрос № 29. Стадии разработки конструкторской документации изделий РЭС, определенные ГОСТ 2.103-68.	105
Вопрос № 30. Электромагнитная совместимость РЭС. Виды паразитных связей, их эквивалентные схемы и математическое описание.	109
Вопрос № 31. Качество и техническое совершенство продукции. Методы оценки уровня качества: дифференциальный и комплексный.	113
Вопрос № 32. Обязательное документальное подтверждение соответствия и защита прав потребителя. Декларирование и сертификация соответствия. Схемы подтверждения соответствия.	115
Вопрос № 33. Передаточная функция САУ, комплексная частотная функция, АЧХ, ФЧХ, АФЧХ.	117

Вопрос № 34. Исследование САУ на устойчивость с помощью критериев.....	120
Вопрос № 35. Аддитивная технология при изготовлении печатных плат (схема технологического процесса, разновидности методов изготовления плат, преимущество аддитивной технологии перед субтрактивной).....	124
Вопрос № 36. Технология поверхностного монтажа (ТМП) (варианты базовых конструкций поверхностно-монтируемых узлов при ТПМ, элементная база для ТПМ, технология пайки поверхностно-монтируемых компонентов, применение электропроводящих клеев в ТПМ).....	127
Вопрос № 37. Электромагнитные волны в диэлектриках. Фазовая скорость. Медленные ЭМВ. Поверхностные волны.	131
Вопрос № 38. Взаимодействие ЭМВ с акустическими волнами. Линии задержки на поверхностных акустических волнах.	135
Вопрос № 39. Простейшие модели и система параметров логических элементов.....	139
Вопрос № 40. Типы выходных каскадов цифровых элементов.	142
Вопрос № 41. Функциональные узлы цифровых устройств комбинационного типа (шифраторы и дешифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры, АЛУ).....	145
Вопрос № 42. Функциональные узлы последовательностного типа (схемотехника триггерных устройств, способы описания триггеров, синхронизация в цифровых устройствах).....	149
Вопрос № 43. Автоматизированный выпуск конструкторской документации.....	152
Вопрос № 44. Современные методы автоматизации конструкторского проектирования РЭС.....	155
Вопрос № 45. Биполярные транзисторы. Сущность усиления электрических сигналов. Усиление тока, напряжения, мощности.....	158
Вопрос № 46. Полевые транзисторы. Принцип действия и статические характеристики полевого транзистора с <i>p-n</i> переходом в качестве затвора.	161
Вопрос № 47. Плоские электромагнитные волны. Фазовая скорость.	164

Вопрос № 48. E - и H -волны. Собственные типы волн в волноводах. Основные типы волн в прямоугольном и круглом волноводах. Распределение силовых линий вектора E и H для волны H_{10} в прямоугольном волноводе и E_{01} – в круглом.....	167
Вопрос № 49. Физика работы p - n перехода полевого и биполярного транзистора	171
Вопрос № 50. Поляризация диэлектриков. Механизмы поляризации.	174
Вопрос № 51. Понятие надёжности. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий.....	177
Вопрос № 52. Расчёт надёжности невосстанавливаемых изделий: ориентировочный и окончательный.....	180
ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ	182
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	186

ВВЕДЕНИЕ

Целью проведения Государственного экзамена по специальности 210201 – «Проектирование и технология РЭС» является итоговый контроль результатов теоретической части обучения по учебному плану специальности и подготовка к выполнению итоговой квалификационной работы и ее защите.

Задачами государственного экзамена являются:

- проверка знаний по общетехническим и специальным дисциплинам учебного плана;
- проверка практических навыков самостоятельного выполнения индивидуального творческого проектного задания по предложенной теме.

Билет, выдаваемый каждому студенту для подготовки и сдачи Государственного экзамена, содержит два обязательных вопроса: теоретический и практический (индивидуальное творческое задание). При сдаче экзамена членами комиссии могут быть заданы дополнительные вопросы.

За пять дней до начала экзамена каждому студенту выдается индивидуальное творческое проектное задание, связанное с разработкой какого-либо радиоэлектронного устройства на стадии разработки – техническое предложение.

Перечень тем проектных заданий формируется ежегодно комиссией по приему Государственного экзамена на основе результатов учебно-исследовательской работы или по предложениям заинтересованных организаций.

По теме задания студент должен представить следующие материалы:

- системный анализ по проблеме проектирования;
- необходимые эскизы, поясняющие принцип работы спроектированного изделия, конструкторские и технологические решения.

Конкретный перечень представляемых материалов уточняется на этапе выдачи задания преподавателями – членами комиссии.

В работе над представленными методическими материалами участвовал профессорско-преподавательский состав радиоконструкторского факультета ТУСУРа. Конкретные сведения об участии в работе приведены в нижеследующей таблице. Авторский коллектив выражает благодарность старшему преподавателю кафедры РЭТЭМ В.Г.Христюкову за ряд ценных замечаний по технологическим вопросам Государственного экзамена, за предоставленную возможность использования специальной литературы.

Таблица

Теоретический вопрос	Авторы краткого ответа
1. Пакеты прикладных программ для анализа электронных схем	Д.В.Озёркин
2. Элементная база аналоговой схемотехники	В.Г.Козлов
3. Микропроцессоры и их применение	Д.В.Озёркин
4. Элементная база и особенности конструирования СВЧ устройств	А.С.Шостак, Д.В.Озёркин
5. Трансформаторы РЭС. Основы проектирования трансформаторов питания	Н.И.Кузевных
6. Высокочастотные катушки индуктивности (ВКИ). Основы проектирования ВКИ	Н.И.Кузевных, В.Г.Козлов
7. Дроссели и их применение в РЭС	Н.И.Кузевных, В.Г.Козлов
8. Основные технологические процессы формообразования механических деталей в РЭС	Д.В.Озёркин
9. Методы герметизации и защиты РЭС от влаги	В.Г.Козлов
10. Методы расчета тепловых режимов РЭС	В.Г.Козлов
11. Конструирование радиаторов полупроводниковых приборов	В.Г.Козлов
12. Конструирование термостатов, их основные характеристики	В.П.Алексеев, Д.В.Озёркин
13. Конструирование и расчет гибридных интегральных схем	В.Г.Козлов
14. Тонко- и толстопленочная технология, сравнительный анализ их применения, основные материалы	В.Г.Козлов
15. Защита РЭС от механических воздействий	В.Г.Козлов
16. Алгоритмы и программы проектирования печатных узлов	Д.В.Озёркин
17. Электро- и радиоизмерительные приборы, классификация, методы измерения электрических параметров	Е.В.Масалов
18. Технологическая подготовка производства	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин

Продолжение таблицы

Теоретический вопрос	Авторы краткого ответа
19. Отработка конструкций РЭС на технологичность	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин
20. Классификация коммутационных плат и методов их изготовления	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин
21. Неразъемные и разъемные электрические соединения	Г.Г.Зиновьев, Н.И.Кузевных, В.Г.Козлов
22. Контроль и испытания печатных плат	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин
23. Технология и оборудование для подготовки печатных плат и компонентов к сборке и монтажу	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин
24. Математическое моделирование технологических процессов и технологических систем	Д.В.Озёркин
25. Гибкие производственные системы (ГПС) изготовления РЭС	Д.В.Озёркин
26. Сущность и перспективы интегральной электроники	М.Н.Романовский
27. Модулированные колебания и их спектры	А.П.Кулинич
28. Устройства передачи и помехоустойчивого приема радиосигналов	А.С.Шостак
29. Стадии разработки конструкторской документации изделий РЭС, определенные ГОСТ 2.103-68	А.А.Чернышев
30. Электромагнитная совместимость РЭС. Виды паразитных связей, их эквивалентные схемы и математическое описание	В.Г.Козлов
31. Качество и техническое совершенство продукции. Методы оценки уровня качества: дифференциальный и комплексный	А.А.Чернышев
32. Обязательное документальное подтверждение соответствия и защита прав потребителя. Декларирование и сертификация соответствия. Схемы подтверждения соответствия	А.А.Чернышев
33. Передаточная функция САУ, комплексная частотная функция, АЧХ, ФЧХ, АФЧХ	В.Г.Козлов

Продолжение таблицы

Теоретический вопрос	Авторы краткого ответа
34. Исследование САУ на устойчивость с помощью критериев	В.Г.Козлов
35. Аддитивная технология при изготовлении печатных плат (схема технологического процесса, разновидности методов изготовления плат, преимущество аддитивной технологии перед субтрактивной)	Д.В.Озёркин
36. Технология поверхностного монтажа (ТПМ) (варианты базовых конструкций поверхностно-монтируемых узлов при ТПМ, элементная база для ТПМ, технология пайки поверхностно-монтируемых компонентов, применение электропроводящих клеев в ТПМ)	Г.Г.Зиновьев, Д.В.Озёркин
37. Электромагнитные волны в диэлектриках. Фазовая скорость. Медленные ЭМВ. Поверхностные волны	А.С.Шостак
38. Взаимодействие ЭМВ с акустическими волнами. Линии задержки на поверхностных акустических волнах	А.С.Шостак
39. Простейшие модели и система параметров логических элементов	Д.В.Озёркин
40. Типы выходных каскадов цифровых элементов	Д.В.Озёркин
41. Функциональные узлы цифровых устройств комбинационного типа (шифраторы и дешифраторы, мультиплексоры и демультимплексоры, сумматоры, АЛУ)	Д.В.Озёркин
42. Функциональные узлы последовательностного типа (схемотехника триггерных устройств, способы описания триггеров, синхронизация в цифровых устройствах)	Д.В.Озёркин
43. Автоматизированный выпуск конструкторской документации	Д.В.Озёркин
44. Современные методы автоматизации конструкторского проектирования РЭС	Д.В.Озёркин

Окончание таблицы

Теоретический вопрос	Авторы краткого ответа
45. Биполярные транзисторы. Сущность усиления электрических сигналов. Усиление тока, напряжения, мощности	Д.В.Озёркин
46. Полевые транзисторы. Принцип действия и статические характеристики полевого транзистора с $p-n$ переходом в качестве затвора	Д.В.Озёркин
47. Плоские ЭМ волны. Фазовая скорость	А.С.Шостак
48. E - и H - волны. Собственные типы волн в волноводах. Основные типы волн в прямоугольном и круглом волноводах. Распределение силовых линий вектора E и H для волны H_{10} в прямоугольном волноводе и E_{01} – в круглом	А.С.Шостак
49. Физика работы $p-n$ перехода полевого и биполярного транзистора	Д.В.Озёркин
50. Поляризация диэлектриков. Механизмы поляризации	Л.Ю.Солдатова
51. Понятие надёжности. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий	В.Г.Козлов
52. Расчёт надёжности невосстанавливаемых изделий: ориентировочный и окончательный	В.Г.Козлов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ МАТЕРИАЛ, ВЫНОСИМЫЙ НА ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЭКЗАМЕН

Вопрос № 1. Пакеты прикладных программ для анализа электронных схем.

Назначением схемотехнического проектирования является разработка принципиальных электрических схем сверхбольших интегральных схем (СБИС) и радиоэлектронных аппаратов (РЭА). Задачи схемотехнического проектирования разделяются на задачи **анализа** и **синтеза проектных решений**.

Процедуры схемотехнического проектирования обычно непосредственно не входят в маршрут проектирования СБИС. При проектировании интегральных схем их применяют, в основном, при отработке библиотек функциональных компонентов СБИС. Но при разработке принципиальных электрических схем радиоэлектронных устройств в различных приложениях они могут стать основными проектными процедурами (наряду с конструкторским проектированием печатных плат).

Схемотехнический анализ может потребоваться также и внутри маршрута проектирования СБИС. Так, в случае МОП-схем появляется промежуточный уровень абстракции между схемотехническим и вентиляльными уровнями, на котором элементами моделей являются не вентили, а МОП-транзисторы. Благодаря представлению последних в виде переключателей удастся отобразить процессы в схеме более детально, чем с помощью программ логического моделирования.

В области автоматизации схемотехнического проектирования наибольшее распространение получили **варианты программы SPICE**, созданные в нескольких фирмах.

В программе PSpice для персональных компьютеров предусмотрены статический, динамический и частотный виды анализа, смешанное логико-аналоговое моделирование, температурный (с индивидуальными значениями температуры по приборам) и шумовой анализы, расчеты в наихудшем случае и статистический по методу Монте-Карло, спектральный анализ. В логической части реализовано событийное моделирование, выявляются риски сбоя, рассчитываются зависимые от нагрузки задержки. Для оптимизации параметров, выполняемой градиентными методами, можно использовать программу PSpice Optimizer.

В библиотеках программы PSpice имеется несколько тысяч математических моделей элементов (диодов, биполярных и полевых транзисторов, операционных усилителей, стабилизаторов, тиристоров, компараторов, магнитных устройств с учетом насыщения и гистерезиса, оптронов, кварцевых резонаторов, длинных линий с учетом задержек, отражений, потерь и перекрест-

ных помех и др.). Библиотека открыта для включения моделей пользователя, имеются соответствующие инструментальные средства пополнения библиотеки. Предусмотрено взаимодействие аналоговой и цифровой частей схемы.

Известен также ряд других программ аналогового и смешанного моделирования: **MicroCAP** (фирма Spectrum-Software), **Electronics Workbench** (фирма Interactive Image Technologies) и пр. В отличие от системы PSpice, MicroCAP имеет более удобный интерфейс с обширной справочной системой. Отличительной особенностью системы Electronics Workbench является возможность подключения в схему измерительных приборов по внешнему виду и характеристикам приближающихся к промышленным образцам. В качестве контрольно-измерительных приборов можно использовать мультиметр, осциллограф, измеритель амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и фазочастотных характеристик (ФЧХ), логический анализатор, логический преобразователь, генератор слова, функциональный генератор.

Следует заметить, что в составе многих современных программных комплексов сквозного проектирования радиоэлектронных систем (РЭС) – **OrCAD**, **PCAD**, **Protel** и др. – имеются модули схемотехнического проектирования. Например, составной частью программного комплекса OrCAD является программа PSpice A/D.

Схемотехническое проектирование радиотехнических схем (RF-схем) отличается рядом особенностей математических моделей и используемых методов, особенно в области сверхвысокочастотного (СВЧ) диапазона. Для анализа линейных схем обычно применяют методы расчета полюсов и нулей передаточных характеристик. Моделирование стационарных режимов нелинейных схем чаще всего выполняют с помощью методов гармонического баланса, основанного на разложении неизвестного решения в ряд Фурье, его подстановки в систему дифференциальных уравнений с группированием членов с одинаковыми частотами тригонометрических функций, в результате получают системы нелинейных алгебраических уравнений, подлежащие решению. Сокращение времени в случае слабо нелинейных схем достигается при моделировании СВЧ-устройств с помощью рядов Вольтерра. Анализ во временной области для ряда типов схем выполняют с помощью программ типа SPICE путем интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Наиболее известным программным продуктом схемотехнического проектирования СВЧ-диапазона является система **Microwave Office** фирмы Applied Wave Research. Она содержит модули: Voltaire XL (пакет для моделирования линейных и нелинейных схем); EMSigt (модуль для моделирования трехмерных электромагнитных полей); Artisan (графический редактор топологий).

Имеются специальные программы для анализа электромагнитной совместимости компонентов в конструктивах РЭА. К ним, например, относятся программы семейства Omega PLUS, с помощью которых определяется форма сигналов в конструкциях с печатными платами, кабельными соединениями, микрополосковыми линиями; анализируются статические электрические и

магнитные поля в геометрических плоских и объемных конструкциях; выполняется расчет полосковых и микрополосковых устройств, взаимных индуктивностей и емкостей многопроводных линий передачи; моделируются электромагнитные излучения в печатных платах; рассчитываются задержки с учетом паразитных емкостей и индуктивностей. При моделировании компоненты схемы представляются в виде линейных эквивалентных схем входных и выходных цепей, затем проводится частотный анализ, фиксируются максимальные амплитуды напряженностей электрического и магнитного полей, электрических токов и напряжений, результаты используются для принятия необходимых конструктивных решений.

Особое положение в вопросе схемотехнического проектирования занимает **язык описания цифровой аппаратуры VHDL**, который поддерживается в настоящее время многими системами моделирования, такими как GMVHDL, Active VHDL, Accolade Peak VHDL, OrCAD и др.

Язык VHDL имеет развитую общеалгоритмическую базу, заимствованную от языка программирования PASCAL. Он содержит тщательно проработанные конструкции для поведенческого (функционального) и структурного представления, а также средства для документирования проектов.

Высокоуровневые описания могут комбинироваться с низкоуровневыми принципиальными схемами. Другими словами, это многоуровневый язык, поддерживающий иерархическое проектирование. Язык имеет средства для описания протекающих во времени процессов, для задания временных задержек на элементах. С его помощью можно описать временные диаграммы на входах моделируемой схемы и взаимодействия между отдельными устройствами через системную шину.

С внедрением языка VHDL разработчики аппаратуры могут «экспериментально» прорабатывать на своих компьютерах идеи по проектированию цифровой аппаратуры на архитектурном уровне и немедленно видеть результаты своих экспериментов.

В отличие от других языков описания и моделирования аппаратуры, язык VHDL не навязывает разработчику конкретный метод проектирования. Он волен выбрать любой способ проектирования с использованием как поведенческих, так и структурных представлений компонентов, можно применить как восходящее, так и нисходящее проектирование или комбинировать их.

Язык VHDL позволяет сначала создать абстрактное описание функций, а затем (по мере проработки проекта) осуществлять их детализацию, вплоть до того момента, когда для них станут ясными структурные решения. Системы моделирования, поддерживающие язык VHDL, обычно включают в себя компилятор языка VHDL, отладчик исходного кода и интерактивную подсистему цифрового моделирования. Некоторые производители программного обеспечения дополнительно включают схемный редактор или интегрируются с другими САПР, имеющими такой редактор. Например, можно создать принципиальную схему в пакете OrCAD и специальная программа конвертирует графическое описание в VHDL-код.

Вопрос № 2. Элементная база аналоговой схемотехники.

В аналоговой схемотехнике используют **аналоговые устройства**, способ функционирования которых связан с передачей и преобразованием непрерывных электрических сигналов.

Элементную базу аналоговой схемотехники составляют следующие группы элементов: **интегральные микросхемы (ИС), устройства функциональной электроники (УФЭ), активные элементы и пассивные дискретные элементы**. Из этих радиоэлементов с помощью механических и электрических соединений формируются функциональные узлы аналоговых устройств. У каждой из групп радиоэлементов своя теория функционирования, свои принципы конструирования, своя технология изготовления. Рассмотрим характеристики этих групп.

Интегральная микросхема – это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию преобразования информации и содержащее совокупность электрически связанных между собой электрорадиоэлементов (ЭРЭ), имеющих высокую плотность упаковки и изготовленных в едином технологическом цикле. Проблемы конструирования, расчета и технологии ИС обсуждены в ответах на вопросы № 13, 14, 26.

Устройства функциональной электроники – это функционально и конструктивно законченные электронные устройства, полученные методом физического интегрирования на основе непрерывных комбинированных сред с заданными свойствами, предназначенные для выполнения в них достаточно сложных функций. УФЭ отличаются от обычных ИС и от функциональных дискретных устройств. **Функциональная электроника** охватывает вопросы получения комбинированных сред с заданными свойствами и создание различных электронных устройств методами физической интеграции. **Методы физической интеграции** подразумевают использование принципов и явлений, реализация которых позволяет получить компоненты со сложным функциональным назначением в отличие от технологической интеграции, предусматривающей конструирование ИС на основе функционально простых элементов типа транзисторов, диодов, резисторов и т.д. Отличительной особенностью УФЭ являются несхемотехнические принципы их построения. **Функции схемотехники выполняют физические процессы**, особенностью которых является использование для обработки или хранения информации динамических неоднородностей в однородном объеме твердого тела. Примерами таких неоднородностей могут быть цилиндрические магнитные домены (ЦМД), пакеты зарядов в приборах с зарядовой связью (ПЗС), волны деформации кристаллической решетки в приборах на поверхностных акустических волнах (ПАВ) и др. Применение в УФЭ оптических методов управления переносом и обработкой информации позволяет достичь высокого быстродействия. В УФЭ носителем информации служит многомерный сигнал, преобра-

зователями которого управляет неоднородная среда под воздействием управляющих сигналов. Проблемы функционирования УФЭ обсуждены в ответах на вопросы № 26, 38.

Активные элементы в аналоговой схемотехнике – это изделия, предназначенные для усиления сигналов. К **активным элементам** аналоговой схемотехники относятся полевые и биполярные транзисторы, СВЧ-устройства и электровакуумные приборы. Принцип действия и характеристики **активных элементов** обсуждены в ответах на вопросы № 4, 45, 46, 49.

Пассивные дискретные элементы включают **ЭРЭ** и **функциональные устройства (ФУ)**.

Электрорадиоэлементы – это электроэлементы РЭС, имеющие законченную конструктивную форму и предназначенные для построения и выполнения простейших электрических функций, например, создания активного сопротивления току, накопления магнитной или электрической энергии, создания электрического контакта и т.д. Пассивные ЭРЭ (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) выполняют в РЭС различные операции над сигналами. Например, резисторы могут использоваться для перераспределения напряжения между элементами схемы, конденсаторы – для накопления электрического заряда, а катушки индуктивности – для создания магнитного поля. Принцип функционирования ЭРЭ основан на использовании физических свойств основных материалов во взаимодействии с окружающей средой. Принцип действия и характеристики катушек индуктивности и дросселей различных типов обсуждены в ответах на вопросы № 6, 7.

Резистором называют изделие, предназначенное для создания в электрической цепи заданной величины активного сопротивления. Величина сопротивления (R) – количественно выражает свойства резистора ограничивать ток I при заданном напряжении U :

$$R = U/I. \quad (2.1)$$

Резисторы используют для формирования заданных величин токов и напряжений, в качестве элементов, вносящих определенные затухания в колебательные системы, они позволяют заменить более дорогие катушки индуктивности в фильтрах. Резисторы классифицируют в зависимости от того постоянно или переменное значение сопротивления, от материала и от конструкции резистивного элемента. По ГОСТ 13453-68 постоянные резисторы обозначают буквой С, а переменные буквами СП. При этом углеродистые резисторы обозначают С1- и СП1-, металлопленочные и металлоокислые – С2- и СП2-, пленочные композиционные – С3- и СП3-, объемные композиционные – С4- и СП4-, проволочные С5- и СП5-. После дефиса следует номер конструктивной разработки, например С5-5.

Приведём **классификацию резисторов** по основным признакам:

а) **по назначению и исполнению**: резисторы постоянного и переменного сопротивления; нелинейные резисторы и резисторы для ИС. **Резисторы постоянного сопротивления** разделяются на резисторы общего применения и специального назначения. **Резисторы специального назначения**, в свою

очередь, делятся на прецизионные и высокоточные (допуск $\delta R \leq 2\%$), высоковольтные ($U_n > 1$ кВ), высокочастотные ($f > 10$ МГц), высокоомные ($R_n > 1$ МОм), микромодульные, теплостойкие, влагостойкие, вибропрочные и ударопрочные, высоконадёжные и т.д.

б) по типу резистивного элемента резисторы постоянного и переменного сопротивления делятся на проволочные резисторы (из проволоки высокого сопротивления) и непроволочные (тонкослойные и композиционные из непроволочного материала). **Непроволочные резисторы** по типу резистивного материала подразделяются на углеродистые и бороуглеродистые, металлоплёночные, металлоокисные и металлодиэлектрические, композиционные плёночные и объёмные, металлизированные.

У специальных резисторов сопротивление существенно меняется:

- под воздействием приложенного напряжения ($R = f(U)$) – **варисторы**;
- от температуры резистора ($R = f(t)$) – **терморезисторы** или **позисторы**;
- под воздействием деформации ($R = f(\delta l)$) – **тензомеры** и **тензорезисторы** (полупроводниковые тензомеры);
- от напряжённости магнитного поля ($R = f(H)$) – **магниторезисторы**;
- под воздействием излучения ($R = f(J)$) – **фоторезисторы**.

Резисторы для ИС подразделяются на ниточные, толстоплёночные, тонкоплёночные, полупроводниковые.

Рассмотрим **основные параметры** и характеристики резисторов.

Номинальное сопротивление R_n – это среднее значение сопротивления совокупности резисторов равное числу из ряда предпочтительных чисел.

Допуск ($\delta_R\% = \Delta R/R_n \cdot 100$) – это допустимое отклонение сопротивления от номинального.

Мощность номинальная (P_n) – максимальная мощность, которую способен рассеять резистор, при нормальных условиях, не изменяя существенно своих параметров.

Электрическая прочность характеризуется номинальным напряжением U_n , при котором резистор должен работать в нормальных условиях длительное время, не выходя из строя. Различают также **испытательное напряжение** $U_{исп} = (1.5 \dots 2)U_n$ и **рабочее напряжение** $U_{раб} \leq U_n$.

Стабильность характеризуется **температурным коэффициентом сопротивления** (ТКС):

$$\alpha_{R_n} = \frac{\Delta R}{R \Delta t}, \quad (2.2)$$

где ΔR – алгебраическая разность между сопротивлением, измеренным при заданной температуре, и сопротивлением, измеренным при нормальной температуре; Δt – алгебраическая разность между заданной и нормальной температурами.

Собственные шумы резисторов подразделяются на тепловые и токовые.

Конденсатором называют ЭРЭ, состоящий из двух и более обкладок разделенных диэлектриком. Конденсатор предназначен для накопления электрических зарядов.

Классификация конденсаторов по назначению: постоянной ёмкости, переменной ёмкости (КПЕ), подстроечные, нелинейные (КПЕ, управляемые электрически).

Классификация конденсаторов по конструктивному исполнению:

а) с газообразным диэлектриком: воздушные, вакуумные и газонаполненные;

б) **керамические:** пластинчатые, трубчатые, литые и бочоночные;

в) **слюдяные:** с вкладными и с наполненными обкладками;

г) **стеклянные** конденсаторы: стеклоплёночные и стеклоэмалевые;

д) **бумажные:** металобумажные и с вкладными обкладками;

е) **плёночные** конденсаторы (неполярные, полярные, металлоплёночные);

ж) **конденсаторы с оксидным диэлектриком** (оксидно-полупроводниковые и оксидно-металлические конденсаторы);

з) **печатные** конденсаторы (односторонние, двусторонние);

и) **конденсаторы для ИС** (плёночные, полупроводниковые, на МДП-структуре).

Параметры конденсаторов: номинальная ёмкость C_n ; допуск $\delta\%$; номинальное напряжение U_n ; испытательное напряжение $U_{исп}$; пробивное напряжение $U_{проб}$ (минимальное напряжение, при котором происходит пробой); сопротивление изоляции $R_{изол}$.

Потери характеризуются **тангенсом угла диэлектрических потерь** $\text{tg}\delta$, а стабильность – температурным коэффициентом ёмкости (ТКЕ):

$$\alpha_c = \frac{\Delta C}{C_n \Delta t}, \quad (2.3)$$

где ΔC – это разность между ёмкостью, измеренной при заданной температуре, и ёмкостью, измеренной при нормальной температуре; Δt – алгебраическая разность между заданной и нормальной температурами.

Вопрос № 3. Микропроцессоры и их применение.

Микропроцессором (МП) называют построенное на одной или нескольких БИС/СБИС программно-управляемое устройство, осуществляющее процесс обработки информации и управление им. МП применяются при вычислениях, они выполняют функции управления, используются при обработке звука и изображения. В зависимости от области применения МП меняются требования к нему. Это накладывает отпечаток на внутреннюю структуру МП. По **области применения** определилось три направления развития МП:

- микроконтроллеры;
- универсальные МП;
- сигнальные МП.

Микроконтроллеры (МК) – разновидность микропроцессорных систем (микроЭВМ), ориентированная на реализацию алгоритмов управления техническими устройствами и технологическими процессами. В сравнении с универсальными процессорами МК проще и это позволяет разместить всю их схемотехнику на одном кристалле. Сопоставляя универсальные МП и МК с точки зрения коммерческих потребностей, можно четко видеть преобладание МК. Применение МК поддерживается такими областями массового производства, как бытовая аппаратура, станкостроение, автомобильная промышленность и т.д. МК отличается малый объем памяти и менее разнообразный состав внешних устройств.

В состав **универсального МП** входят модули памяти большого объема и высокого быстродействия, имеется сложная иерархия запоминающих устройств. Универсальные МП находят свое применение в системах автоматизированного проектирования, компьютерной графики, мультимедийных приложениях и др.

По внутренней структуре существует два основных принципа построения МП:

- Гарвардская архитектура;
- архитектура фон Неймана.

В **Гарвардской архитектуре** принципиально различаются два вида памяти: память программ; память данных. В Гарвардской архитектуре принципиально невозможно производить операцию записи в память программ, что исключает возможность случайного разрушения управляющей программы в случае неправильных действий над данными. Кроме того, в ряде случаев для памяти программ и памяти данных выделяются отдельные шины обмена данными. Эти особенности определили области применения этой архитектуры построения МП. Гарвардская архитектура применяется в микроконтроллерах, где требуется обеспечить высокую надежность работы аппаратуры и в сигнальных процессорах, где эта архитектура кроме обеспечения высокой надежности работы устройств позволяет обеспечить высокую скорость вы-

полнения программы, за счет одновременного считывания управляющих команд и обрабатываемых данных, а также запись полученных результатов в память данных.

Отличие архитектуры **фон Неймана** заключается в принципиальной возможности работы над управляющими программами точно также как над данными. Это позволяет производит загрузку и выгрузку управляющих программ в произвольное место памяти процессора, которая в этой структуре не разделяется на память программ и память данных. Любой участок памяти может служить как памятью программ, так и памятью данных. Причем в разные моменты времени одна и та же область памяти может использоваться и как память программ, и как память данных. Для того, чтобы программа могла работать в произвольной области памяти, ее необходимо модернизировать перед загрузкой, то есть работать с ней как с обычными данными. Эта особенность архитектуры позволяет наиболее гибко управлять работой микропроцессорной системы, но создает принципиальную возможность искажения управляющей программы, что понижает надежность работы аппаратуры. Эта архитектура используется в универсальных компьютерах и в некоторых видах микроконтроллеров.

По системе команд МП отличаются огромным разнообразием, зависящим от фирмы-производителя. Тем не менее, можно определить две крайние политики построения МП: аккумуляторные и с регистрами общего назначения.

В МП с **регистрами общего назначения** математические операции могут выполняться над любой ячейкой памяти. В зависимости от типа операции команда может быть одноадресной, двухадресной или трехадресной.

Принципиальным отличием **аккумуляторных процессоров** является то, что математические операции могут производиться только над одной особой ячейкой памяти – аккумулятором. Для того, чтобы произвести операцию над произвольной ячейкой памяти ее содержимое необходимо скопировать в аккумулятор, произвести требуемую операцию, а затем скопировать полученный результат в произвольную ячейку памяти.

В настоящее время в чистом виде не существует ни та, ни другая система команд. Все выпускаемые в настоящее время процессоры обладают системой команд с признаками как аккумуляторных процессоров, так и МП с регистрами общего назначения.

С точки зрения полноты набора команд можно выделить два вида МП: RISC-процессоры (процессоры с сокращенным набором команд) и CISC-процессоры (процессоры с полным набором команд).

В процессорах с **полным набором команд** используется уровень микропрограммирования для того, чтобы декодировать и выполнить команду МП. В этих процессорах формат команды не зависит от аппаратуры процессора. На одной и той же аппаратуре при смене микропрограммы могут быть реализованы различные МП. С другой стороны смена аппаратуры никак не влияет на программное обеспечение МП. С точки зрения пользователя у МП

только увеличивается производительность, снижается потребление энергии, уменьшаются габариты устройств. Неявным недостатком таких процессоров является то, что производители микросхем стараются увеличить количество команд, которые может выполнять МП, тем самым увеличивая сложность микропрограммы и замедляя выполнение каждой команды в целом.

В процессорах с **сокращенным набором команд** декодирование и исполнение команды производится аппаратно, поэтому количество команд ограничено минимальным набором. В этих процессорах команда и микрокоманда совпадают. Преимуществом этого типа процессоров является то, что команда может быть в принципе выполнена за один такт (не требуется выполнение микропрограммы), однако для выполнения тех же действий, которые выполняет команда CISC-процессора, требуется выполнение целой программы.

На рисунке 3.1 показана структура микропроцессорной системы с МП Intel 8085A (отечественный аналог – К1821ВМ85А), имеющим мультиплексируемую шину адресов/данных. Несмотря на многолетний возраст, такие МП до сих пор выпускаются промышленностью и встречаются в каталогах фирм. Эти МП в настоящее время используются в системах управления различной аппаратурой, где их возможностей хватает.

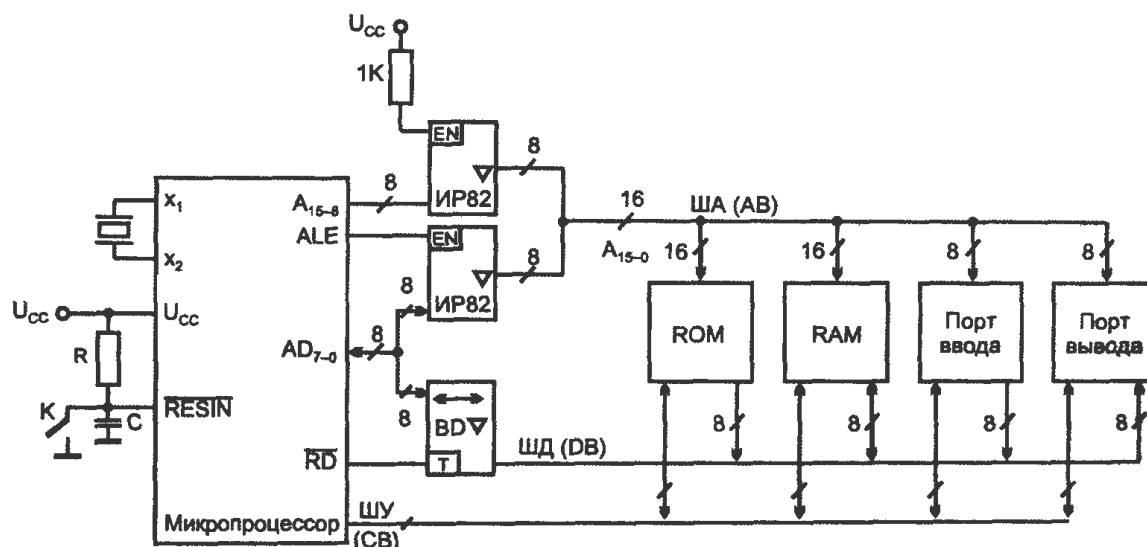


Рисунок 3.1 – Структура микропроцессорной системы

На рисунке 3.2 приведена структура МП Intel 8085A (К1821ВМ85А). МП имеет восьмиразрядную шину данных (внутреннюю), через которую его блоки обмениваются информацией.

На рисунке 3.3 показана структура МК семейства AT89С фирмы Atmel, реализованная по Гарвардской архитектуре и использующая отдельные блоки программной памяти типа «флэш» и ОЗУ данных.

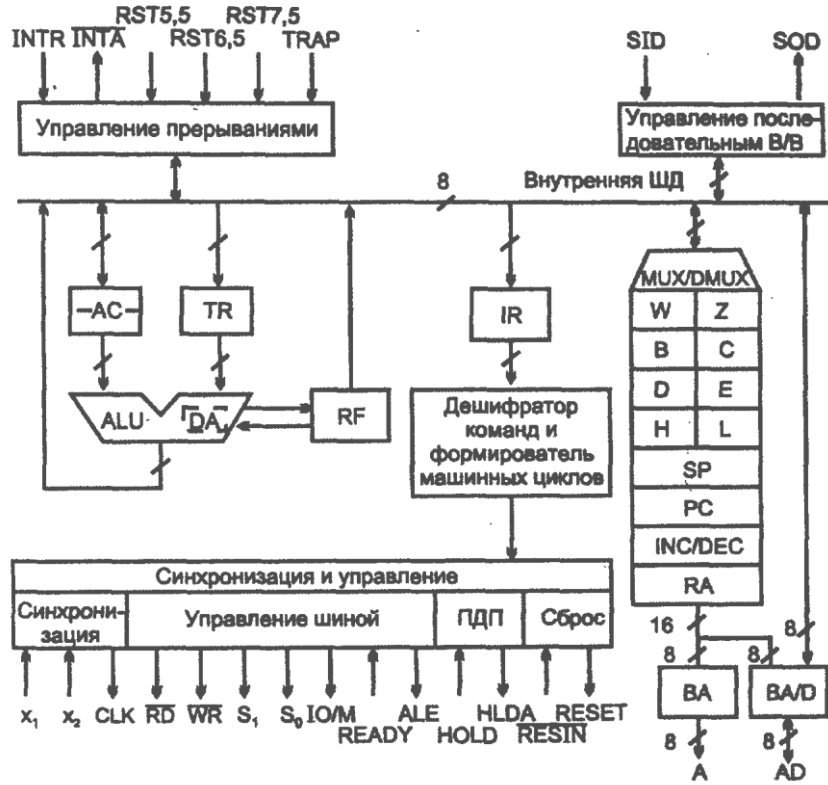


Рисунок 3.2 – Структура микропроцессора Intel 8085A (К1821ВМ85А)

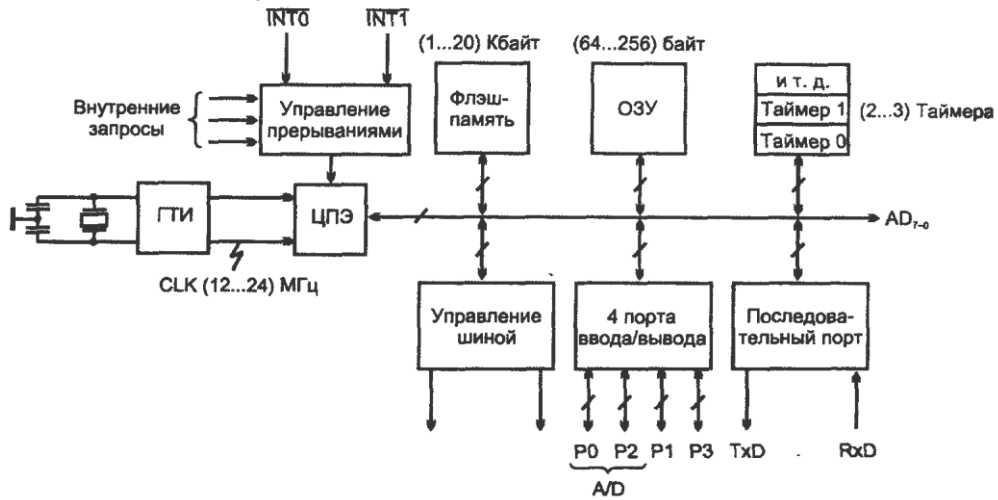


Рисунок 3.3 – Структура микроконтроллера Atmel AT89C

Вопрос № 4. Элементная база и особенности конструирования СВЧ устройств.

На первых этапах развития СВЧ-электроники широко использовались электровакуумные приборы (**лампы, магнетроны, клистроны** и т.д.) и различные узлы, выполненные из отрезков линий передач (**волноводы, фазовращатели, тройники, делители, ответвители, переключатели, циркуляторы** и т.д.).

Указанные дискретные приборы и узлы позволили освоить СВЧ-диапазон, однако не всегда удовлетворяли по таким параметрам, как миниатюрность, надежность, энергопотребление. Именно микроэлектронные устройства позволяли получить высокую надежность при малом энергопотреблении, малые габариты и низкую цену передачи, приема и обработки информации.

Микрополосковые линии (МПЛ) представляет собой проводник ленточного типа шириной W , прямоугольного сечения, расположенный на подложке толщиной h с высокой диэлектрической проницаемостью. Обратная сторона подложки металлизирована и заземлена. Микрополосковая линия такой конструкции обладает волновым сопротивлением, зависящим от соотношения W/h и величины диэлектрической проницаемости, а также от коэффициента потерь, от дисперсии и предельной передаваемой мощности.

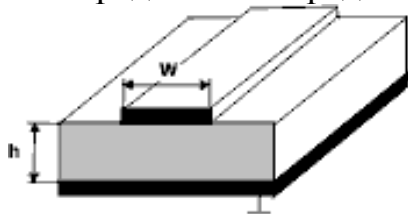
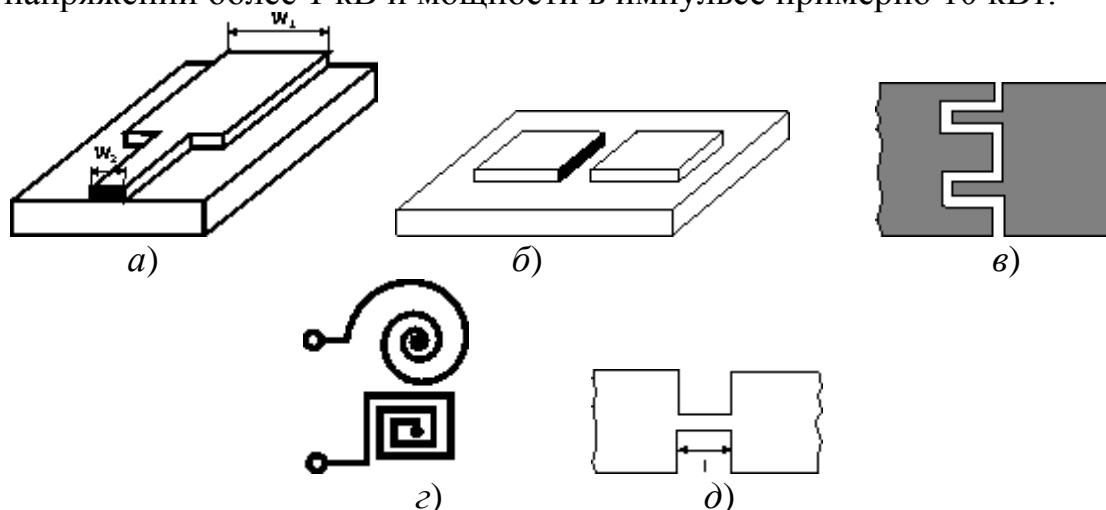


Рисунок 4.1 – Микрополосковая линия

К **пассивным элементам СВЧ-диапазона** относят резисторы, конденсаторы и индуктивности (рисунок 4.2). Эффект электрического сопротивления прохождению тока в СВЧ-диапазоне возникает в неоднородностях микрополосковых линий, в емкостях, образующихся в воздушных промежутках, в диэлектрических материалах, окисных пленках между кристаллами. Конденсаторы микросхем СВЧ-диапазона также изготавливаются на основе МПЛ. Малые номиналы (несколько пикофард) можно получить на разрывах МПЛ, большие реализуются в конструкции типа гребенчатого конденсатора. Для получения конденсаторов емкостью более 10 пФ используют многослойные структуры. Индуктивность, как элемент СВЧ-схем, может быть реализована в виде прямоугольного обрезка МПЛ со скачком по ширине или в форме круглой и квадратной спирали.

К пассивным элементам можно условно отнести диоды СВЧ-диапазона, которые не генерируют колебаний. **Диод с барьером Шоттки** представляет

собой выпрямляющий контакт металл-полупроводник (рисунок 4.3, *а*). Он работает на основных носителях заряда, неосновные не накапливаются. Время восстановления обратного сопротивления примерно 10^{-8} с, что позволяет использовать такие подложки до частот 300 ГГц. Диод *p*- и *i*-структуры формируется на основе обедненного *i*-слоя между *p*- и *n*-областями (рисунок 4.3, *б*). Диод обладает высоким пробивным напряжением, способен работать при напряжении более 1 кВ и мощности в импульсе примерно 10 кВт.



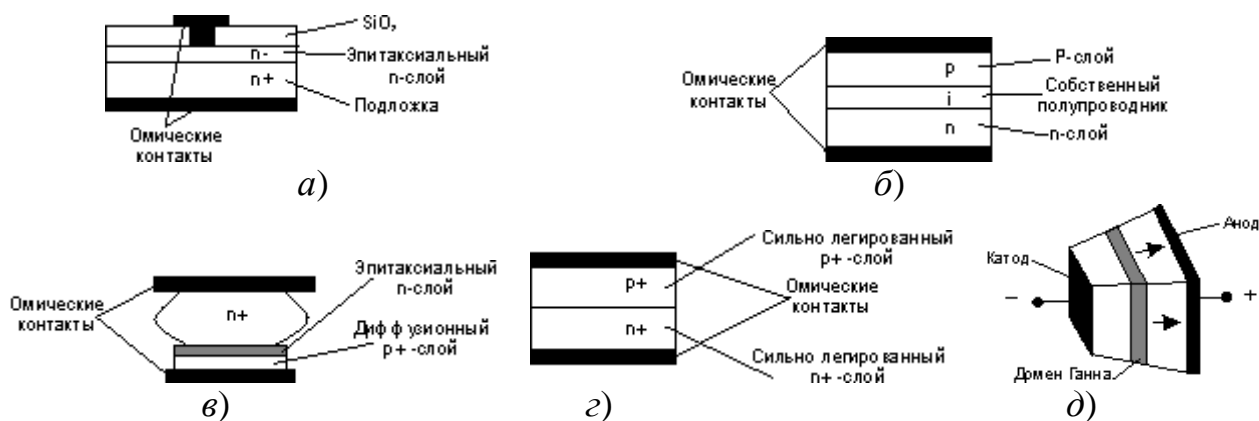
а – резистор; *б* – конденсатор малой емкости; *в* – гребенчатый конденсатор; *г* – индуктивность «спираль»; *д* – индуктивность «скачок по ширине»

Рисунок 4.2 – Пассивные элементы СВЧ-устройств

Существуют конструкции диодов, обладающие *S*- или *N*-образными вольт-амперными характеристиками (ВАХ). Такие диоды на определенных участках ВАХ имеют отрицательное дифференциальное сопротивление и способны генерировать электромагнитные колебания. Эти диоды и триодные структуры относятся к **активным элементам СВЧ устройств**. **Лавинно-пролетный диод** работает на основе лавинного пробоя *p-n*-перехода при высоких обратных напряжениях (рисунок 4.3, *в*). На его основе можно создать достаточно мощные диоды, работающие в гигагерцовом диапазоне частот. **Туннельные диоды** представляют собой *p-n*-переходы с туннельным эффектом (рисунок 4.3, *г*). Они обладают широкополосностью, низким уровнем шума, высокой температурной стойкостью. **Диод Ганна** в основе своей конструкции имеет невыпрямляющий контакт металл-полупроводник (рисунок 4.3, *д*). Работает в гигагерцовом диапазоне частот при значительных мощностях импульсов.

Однако наибольший интерес как активные элементы представляют **полевые и биполярные транзисторы**.

Главное их отличие от традиционных транзисторных структур микроэлектроники – материал. Если в традиционной микроэлектронике все структуры выполняются на кремниевых подложках того или иного типа проводимости, то в микроэлектронике СВЧ используются полупроводниковые соединения типа $A_{III}B_V$ или $A_{II}B_{IV}$.



a – диод с барьером Шоттки; *б* – *pin*-диод; *в* – лавинно-пролетный диод; *г* – туннельный диод; *д* – диод Ганна

Рисунок 4.3 – Диоды СВЧ-диапазона

Основные задачи при конструировании СВЧ устройств:

- получение высококачественных трактов СВЧ (малые потери, высокая однородность и стабильность волнового сопротивления, возможность подстройки, малые габариты и масса, малые помехи);
- обеспечение электромагнитной совместимости;
- обеспечение надежности в эксплуатации.

Процессы передачи электромагнитных сигналов в цепях СВЧ и в образующих их элементах являются весьма сложными. Их можно было бы проанализировать на основе решения соответствующих краевых задач электродинамики. Однако строгая постановка и решение таких задач даже для сравнительно простых элементов цепей СВЧ возможны далеко не всегда. На практике при анализе сложных цепей СВЧ применяют **метод декомпозиции** (разбиения): цель СВЧ разбивается на ряд элементов, которые анализируются независимо. При этом каждый такой элемент рассматривается как независимая электродинамическая система.

Проектирование СВЧ трактов современных радиотехнических устройств практически невозможно без ЭВМ. В результате проектирования должна быть получена конструкция устройства, частотные характеристики которой удовлетворяют заданным требованиям. В столь общей постановке данная задача не имеет единственного решения, так как различные по конструкции устройства могут иметь идентичные электрические характеристики. При проектировании СВЧ тракта выделяют два основных этапа.

Первый этап, называемый **конструктивным синтезом**, состоит в выборе одного или нескольких допустимых вариантов разрабатываемого устройства. На этом этапе разработчик, основываясь на интуиции и инженерном опыте, используя некоторые общие приближенные представления о принципе работы устройств СВЧ, пользуясь специальными пособиями, где содержатся сведения об аналогичных устройствах и необходимые справочные материалы, определяет набор элементов, из которых состоит разрабаты-

ваемое устройство, и порядок их включения, т.е. предопределяет конструктивное выполнение элементов.

Второй этап проектирования, называемый **параметрическим синтезом**, состоит в окончательном выборе варианта конструкции и уточнении параметров всех его элементов с целью получения требуемых частотных характеристик устройства. На этом этапе строят более точную эквивалентную схему проектируемого устройства и выполняют анализ схемы, вычисляют элементы матрицы рассеяния, что позволяет рассчитать частотные характеристики проектируемого устройства. Частотные характеристики, рассчитанные по уточненной эквивалентной схеме, могут существенно отличаться от заданных при проектировании. Это отличие будет тем больше, чем более грубые и приближенные методики синтеза использовались на первом этапе. Если найденные характеристики не удовлетворяют техническому заданию, возникает задача коррекции параметров базовых элементов, выбранных на первом этапе, с целью улучшения характеристик устройства.

Процесс улучшения характеристик устройства на основе какого-то исходного варианта называется **оптимизацией**. Он состоит в целенаправленном поиске таких параметров элементов устройства, которые обеспечивали бы минимальное значение некоторой целевой функции, оценивающей отклонение получающихся характеристик от требуемых техническим заданием. Как правило, оптимизация проводится численно, т.е. по определенному плану перебираются возможные значения параметров элементов. Для каждого сочетания параметров вычисляется матрица рассеяния и рассчитывается значение целевой функции. Отыскивается такое оптимальное сочетание параметров, при котором получается минимум целевой функции.

Вопрос № 5. Трансформаторы РЭС. Основы проектирования трансформаторов питания.

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство переменного тока, предназначенное для: преобразования (повышения или понижения) напряжения источника в ряд напряжений требуемой величины; согласования сопротивлений электрических цепей; разделения цепей источника и нагрузки по постоянному току.

Принцип функционирования трансформатора основан на преобразовании электрической энергии в первичной обмотке в энергию магнитного поля магнитопровода и обратного преобразования энергии магнитного поля в электрическую во вторичных обмотках. Таким образом, электрическая энергия из первичной обмотки во вторичные передается магнитным потоком, что позволяет произвести гальваническую развязку источника сигнала и нагрузки. Одновременно осуществляется преобразование напряжения источника U_1 по величине. Величина напряжения вторичных обмоток U_{2i} определяется коэффициентом трансформации n_i , т.е. $U_{2i} \approx U_1/n_i = U_1 \cdot W_{2i}/W_1$, где W_1 и W_{2i} – число витков первичной и вторичных обмоток.

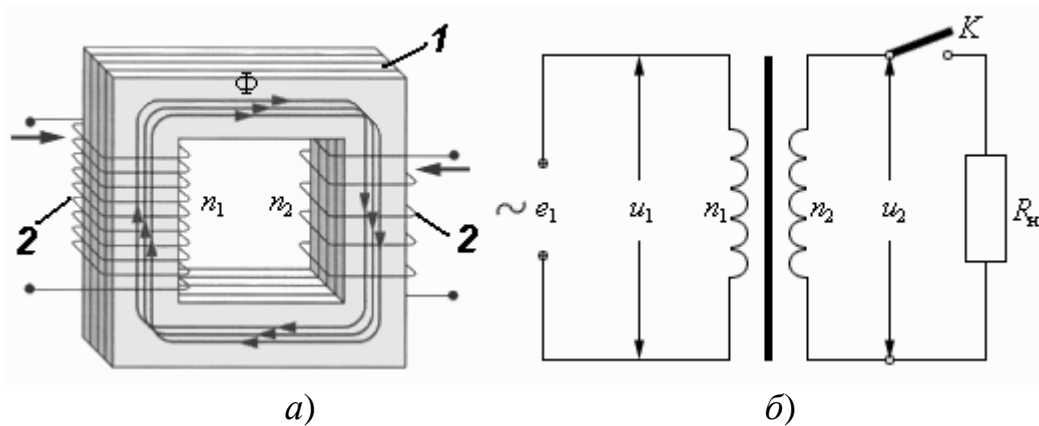
В радиоэлектронных средствах нашли применение трансформаторы питания, согласующие и импульсные трансформаторы.

Наиболее широкое применение в РЭС (около 70 % от всех трансформаторов) имеют **трансформаторы питания**, которые используются в источниках вторичного электропитания, являющихся неотъемлемым функциональным блоком РЭС любого назначения.

Согласующие трансформаторы предназначены для согласования различных электрических цепей и их гальванической развязки. Они находят широкое применение в радиоприемной, радиопередающей и радиоизмерительной аппаратуре для согласования и гальванической развязки источника сигнала и нагрузки.

Импульсные трансформаторы служат для передачи из одной электрической цепи в другую импульсов напряжения (тока) определенной формы и длительности, преобразования их по амплитуде и для гальванической развязки источника импульсного сигнала и нагрузки. В РЭС они применяются в различных импульсных устройствах.

Основными конструктивными элементами трансформаторов являются магнитопроводы (сердечники) и катушки (рисунок 5). По конструкции сердечника трансформаторы делятся на броневые (Ш-образные), стержневые (П-образные), тороидальные (кольцевые или О-образные), обращенный тор (полное кольцо), кабельного типа, типа «шпуля», катушечные и др. Сердечники могут быть *пластинчатые* или *ленточные* из тонколистовой электротехнической стали или ферромагнитных сплавов и *прессованные* из магнитодиэлектриков и ферритов.



a) *б)*
1 – магнитопроводы (сердечники); 2 – катушки
Рисунок 5 – Упрощенная конструкция (а) и
электрическая схема (б) трансформатора

Во многих случаях возникает необходимость проектирования ненормализованных трансформаторов питания (ТП) оптимальным образом удовлетворяющего заданным требованиям. В настоящее время широкое применение находят две методики проектирования ТП: И.И.Белопольского и Р.Х.Бальяна. Методика Белопольского предусматривает учет на начальном этапе только падения напряжения, а температура перегрева определяется лишь на заключительном этапе проектирования. Методика Бальяна позволяет уже на начальном этапе учесть как падение напряжения, так и перегрев обмоток, что является несомненным преимуществом.

Проектирование ТП можно разделить на **следующие этапы:**

- 1) анализ технического задания (ТЗ), предварительное обоснование и выбор конкурентных вариантов конструкций и конструктивных решений;
- 2) предварительный расчет технико-экономических показателей (ТЭП) конкурентных вариантов и выбор оптимальной конструкции трансформатора;
- 3) электрический расчет оптимального ТП;
- 4) конструктивный расчет оптимального ТП;
- 5) уточнение электромагнитных параметров и определение фактических технико-экономических показателей ТП;
- 6) разработку конструкции и конструкторской документации ТП;
- 7) критический анализ результатов проектирования и предложения по совершенствованию разработанной конструкции.

Рассмотрим несколько подробнее содержание этих этапов.

При анализе ТЗ необходимо выбрать и обосновать:

- 1) конкурентные типы трансформаторов (броневой, стержневой, тороидальный, обращенный тор, кабельного типа, типа «шпуля» и т.д.);
- 2) конкурентные типы и ряды сердечников (ленточный, пластинчатый, прессованный, ШЛ, ПЛ, ОЛ, ШЛМ, ШЛР, ПЛМ, ПЛР и т.д.);
- 3) конкурентные ферромагнитные материалы (марки электротехнических сталей, сплавов, магнетодиэлектриков, ферритов и т.д.);
- 4) конструкции катушки (каркасная, бескаркасная, секционированная);

5) конкурентные проводниковые материалы и марки обмоточных проводов (медь, алюминий, круглого или прямоугольного профиля, ленточный, марка провода);

6) электроизоляционные материалы (корпусную, межслоевую, межобмоточную, наружную изоляцию);

7) способ защиты катушки и трансформатора от влаги и агрессивной среды (пропитка, обволакивание, заливка и т.д.) и защитные материалы (пропиточные лак или компаунды, защитно-декоративные эмали и т.д.).

Предварительный расчет конкурентных вариантов проводится с целью выбора оптимальной конструкции трансформатора. Рассчитываются габаритная мощность трансформатора и габаритные критерии, которые позволяют выбрать наименьший типоразмер сердечника из конкурентных рядов. Рассчитав технико-экономические показатели (массу, габаритный объем, стоимость) и проведя анализ полученных результатов, выбирается оптимальный вариант реализации ТП, наилучшим образом отвечающий требованиям технического задания.

Электрический расчет проводится для выбранного оптимального варианта ТП. В нем рассчитывается или определяется величина рабочей индукции в сердечнике B , потери в сердечнике P_C и в обмотках P_O , число витков в обмотках W_i , плотности тока и сечения проводов обмоток. По величине сечения из справочника выбираются стандартные провода.

В конструктивном расчете уточняются ранее принятые конструктивные решения и производится расчет размещения обмоток в окне сердечника.

На заключительном этапе расчета производится **уточнение электромагнитных параметров и расчет технико-экономических показателей ТП.**

После завершения расчетной части **производится разработка конструкции и конструкторской документации ТП.**

В заключение необходимо провести **критический анализ результатов проектирования:** провести сравнительный анализ параметров и характеристик разработанного устройства с заданными в ТЗ; указать, какой ценой пришлось достичь выполнения тех или иных требований ТЗ; оценить, насколько оптимальным оказалось разработанное устройство; указать возможные пути совершенствования – улучшения свойств и технико-экономических показателей.

Более подробные сведения по данному вопросу можно найти в литературе, приведенной в библиографическом указателе в конце пособия.

Вопрос № 6. Высокочастотные катушки индуктивности (ВКИ). Основы проектирования ВКИ.

Под высокочастотной катушкой индуктивности понимается свернутый в спираль проводник, обладающий в области высоких частот значительным индуктивным и относительно малым активным сопротивлением. Согласно ГОСТ 19880-74 катушка индуктивности – это элемент электрической цепи, предназначенный для использования его индуктивности.

Конструктивно катушки индуктивности выполняются цилиндрическими, плоскими, печатными, микроминиатюрными в виде чип-элементов для поверхностного монтажа и т.д. Катушки могут быть выполнены без сердечников, с ферромагнитными и немагнитными сердечниками, с экранами и без экранов. В зависимости от назначения ВКИ делятся на катушки контуров, катушки связи и дроссели высокой частоты.

Основными параметрами катушки индуктивности являются индуктивность L и добротность Q_L .

Обычно величина индуктивности L задается в техническом задании, тем не менее, знание расчетных зависимостей L от геометрических параметров необходимо, так как расчет конструктивных параметров по величине индуктивности ведется, как правило, методом последовательных приближений.

Для цилиндрической катушки без сердечника **индуктивность** будет равна:

$$L = \frac{\mu_0 N^2 D_0^2}{K_l l},$$

где μ_0 – магнитная проницаемость вакуума (воздуха); D_0 и l – диаметр и длина намотки катушки; K_l – коэффициент пропорциональности между длиной средней силовой линии и длиной намотки. В инженерной практике обычно используются приближенные зависимости. Так для цилиндрических катушек индуктивность определяется по формуле:

$$L = L_0 N^2 D_0,$$

где $L_0 = f\left(\frac{l}{D_0}; \frac{h}{D_0}\right)$ – вспомогательный коэффициент, зависящий от соотношения длины l и глубины h намотки к среднему диаметру намотки D_0 – справочная величина.

Для ВКИ с ферромагнитным сердечником индуктивность катушки увеличивается на величину действующей магнитной проницаемости сердечника μ_c , т.е. $L_{kc} = L \cdot \mu_c$.

Обычно **число витков** катушки приходится рассчитывать методом последовательных приближений. В частности можно применять следующий алгоритм расчета числа витков катушки со сплошной намоткой:

1) согласно рекомендациям по заданной величине индуктивности L_{3AD} выбирают диаметр каркаса D и диаметр провода d (табличные данные);

2) определяется коэффициент неплотности намотки $\alpha = f(d_{из})$;

3) рассчитывается число витков в нулевом приближении $N^{(0)}$;

4) определяют вспомогательный параметр L_0 (табличные данные). При этом, если величина l/D находится между табличными значениями, то параметр L_0 рассчитывают с использованием линейной аппроксимации;

5) рассчитывается индуктивность катушки в первом приближении:

$$L^{(1)} = L_0(N^{(0)})^2 \cdot D \cdot 10^{-3};$$

6) если расчетная индуктивность $L^{(1)}$ отличается от заданной не более, чем на 10%, то число витков уточняется по формуле:

$$N^{(2)} = N^{(1)} \sqrt{\frac{L_{3AD}}{L^{(1)}}};$$

7) далее пункты 5-6 повторяются, пока не будет достигнута желаемая точность.

Добротность ВКИ равна отношению реактивного сопротивления x_L к активному r_L :

$$Q_L = \frac{\omega L}{r_L}.$$

Активное сопротивление катушки в общем случае складывается из сопротивления провода току высокой частоты r_f , сопротивления, вносимого потерями в диэлектрике Δr_d , в сердечнике Δr_c , в экране $\Delta r_э$ и т.д.:

$$r_L = r_f + \Delta r_d + \Delta r_c + \Delta r_э.$$

В области относительно низких частот преобладают потери в проводе.

Для ВКИ важным паразитным параметром является **собственная ёмкость** C_0 , которая ограничивает применение катушки в области верхних частот. В инженерной практике её рассчитывают по упрощенным эмпирическим зависимостям. Так для однослойной неэкранированной катушки с удовлетворительной точностью ёмкость можно рассчитать по формуле:

$$C_0 = \frac{\pi D}{8.31 \cdot \lg(a + \sqrt{a^2 - 1})},$$

где D – диаметр намотки катушки; $a = \tau/d$ – отношение шага намотки к диаметру провода без изоляции.

К существенному снижению собственной ёмкости приводит секционирование катушек:

$$C_0 \approx \frac{C_{0с} (0.33n + 0.67)}{n},$$

где $C_{0с}$ – собственная ёмкость секции; n – число секций.

Более низкую собственную емкость имеют ВКИ с шаговой и универсальной намоткой. Наибольшей емкостью C_0 обладают плоские и печатные катушки.

Диэлектрические потери возникают в диэлектрике собственной ёмкости катушки и зависят от величины этой ёмкости, качества материала каркаса и частоты тока.

Для параллельной схемы замещения (рисунок 6) сопротивление диэлектрических потерь определится по формулам:

$$R_{\text{д}} = \frac{1}{\omega C_{0\text{д}} \operatorname{tg} \delta}, \quad C_{0\text{д}} = \frac{C_0}{1 + \frac{1}{a\epsilon}},$$

где $C_{0\text{д}}$ – собственная ёмкость катушки, обусловленная диэлектриком, пФ; $\operatorname{tg} \delta$ – тангенс угла потерь материала каркаса; ϵ – диэлектрическая проницаемость материала каркаса; a – коэффициент, зависящий от конструкции намотки. Для однослойных катушек при намотке круглым проводом на гладкий каркас: $a = 0.08$, на нарезной каркас: $a = 0.111$.

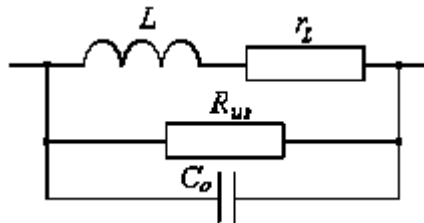


Рисунок 6 – Параллельная схема замещения ВКИ

Для устранения взаимного влияния через внешнее электромагнитное поле катушки индуктивности **экранируются**. Экранирующее действие характеризуется коэффициентом экранирования $K_{\text{Э}}$ – отношением напряженности внешнего поля катушки при наличии экрана (за пределами экрана) и без него. Для экранов среднего качества $K_{\text{Э}} \approx 0.01 \dots 0.05$.

В задачи проектирования ставится: определение геометрических параметров катушки (диаметра каркаса, длины намотки и др.); расчет числа витков, оптимального диаметра провода, добротности, собственной емкости, температурного коэффициента изменения индуктивности; разработка конструкции ВКИ – выбор и обоснование конструктивных решений, выполнение сборочного чертежа и спецификаций.

Более подробные сведения по данному вопросу можно найти в литературе, приведенной в библиографическом указателе в конце пособия.

Вопрос № 7. Дроссели и их применение в РЭС.

Дроссель – статическое электромагнитное устройство, используемое в электрических цепях переменного и пульсирующего тока в качестве индуктивного сопротивления.

По назначению и функциональному признаку различают:

а) *дроссели переменного тока*, применяемые в качестве балластных и токоограничивающих сопротивлений, а также в качестве индуктивности в низкочастотных резонансных фильтрах и в корректирующих цепях;

б) *дроссели насыщения*, используются как нелинейные регулируемые индуктивные сопротивления в низкочастотных силовых цепях переменного тока (регуляторы тока, стабилизаторы переменного напряжения);

в) *сглаживающие дроссели*.

В РЭС наиболее широкое применение получили **сглаживающие дроссели** (СД), а дроссели переменного тока и дроссели насыщения получили преимущественное применение в устройствах автоматики.

Сглаживающие («фильтровые») дроссели используются преимущественно для фильтрации переменной составляющей выпрямленного тока в источниках вторичного электропитания (ИВЭП). Электромагнитная схема и схема замещения магнитной цепи СД приведены на рисунке 7.1.

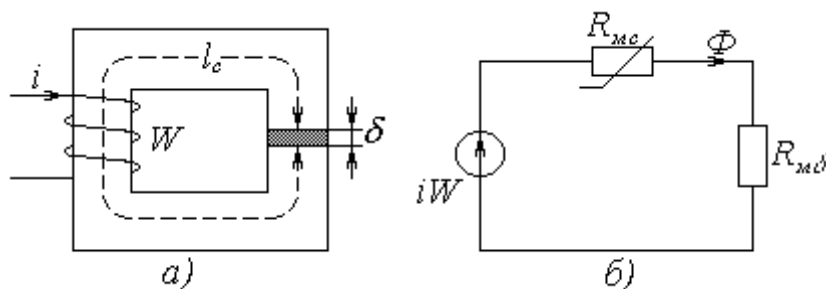


Рисунок 7.1 – Электромагнитная схема (а) и магнитная схема замещения сглаживающего дросселя (б)

Основными электромагнитными параметрами СД являются: индуктивность L , номинальный ток (постоянная составляющая) I_0 , сопротивление обмотки постоянному току $r_{др}$, минимальная и максимальная допустимые амплитуды пульсаций напряжения (переменной составляющей) $U_{m \min}$ и $U_{m \max}$. К основным характеристикам СД относятся зависимости индуктивности от величины постоянной составляющей тока $L(I_0)$ и от амплитуды переменной составляющей индукции $L(B_m)$.

Особенность функционирования СД заключается в одновременном воздействии на магнитопровод постоянной и переменной составляющих намагничивания. Поэтому СД работает на частном цикле перемагничивания AB (рисунок 7.2). Рабочая точка СД (H_0, B_0) определяется величиной постоянного тока ($H_0 = I_0 W$). Эквивалентная магнитная проницаемость сердечника μ_c про-

порциональна углу наклона частного цикла перемагничивания α и зависит как от переменной (H_m), так и от постоянной (H_0) составляющих напряженности:

$$\mu_0\mu_c = \frac{B_m}{H_m} \square \operatorname{tg}\alpha.$$

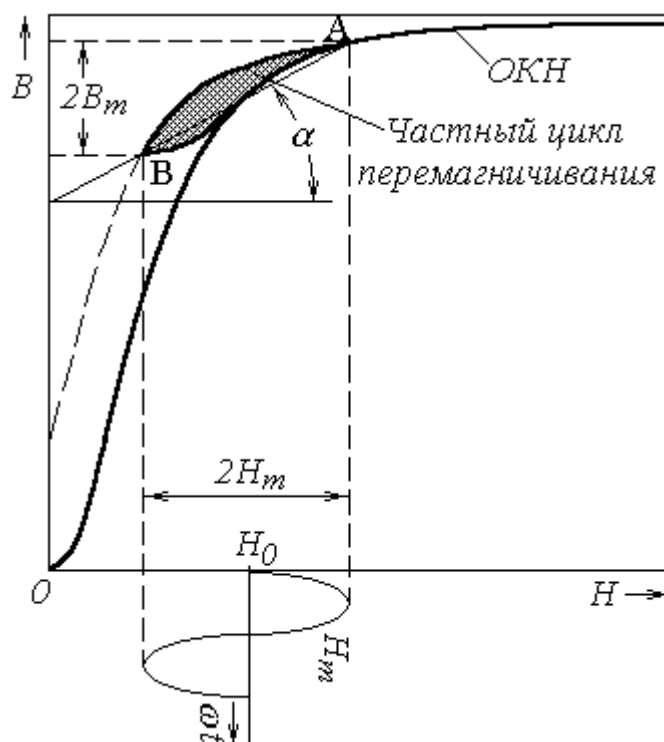


Рисунок 7.2 – Кривая перемагничивания сердечника в сглаживающем дросселе

Индуктивность СД пропорциональна эквивалентной магнитной проницаемости сердечника с немагнитным зазором μ_{ε} , зависящей от μ_c и величины немагнитного зазора δ , квадрату числа витков обмотки W , площади сечения сердечника Q_c и коэффициенту заполнения ее магнитным материалом K_c и обратно пропорциональна длине средней силовой линии сердечника l_c :

$$L = \frac{\mu_0\mu_{\varepsilon}W^2Q_cK_c}{l_c}.$$

На рисунке 7.3 представлены зависимости индуктивности СД от величины немагнитного зазора δ , постоянной составляющей тока I_0 и переменной составляющей индукции B_m .

Для «фильтровых» дросселей высокой частоты, применяемых для коррекции АЧХ, важным параметром является собственная ёмкость C_0 . Чем меньше значение C_0 , тем больше собственная частота f_0 , следовательно, тем шире будет область рабочих частот. Поэтому конструктивно дроссели фильтров выполняются: либо в виде длинных секционированных катушек с малым диаметром ($D < 10$ мм) для диапазонов ДВ и СВ (рисунок 7.4, а, б, в), либо в

виде тонких однослойных катушек для диапазона УКВ (рисунок 7.4, *ж*), либо на керамических стержнях резисторов для диапазона КВ (рисунок 7.4, *д*).

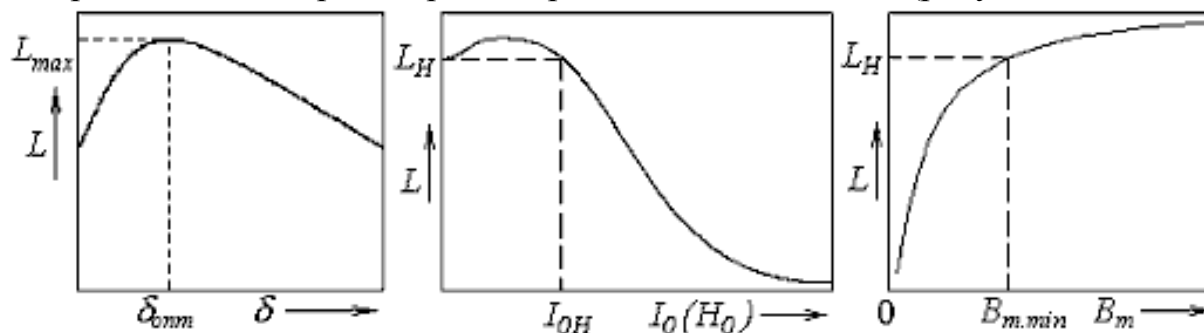


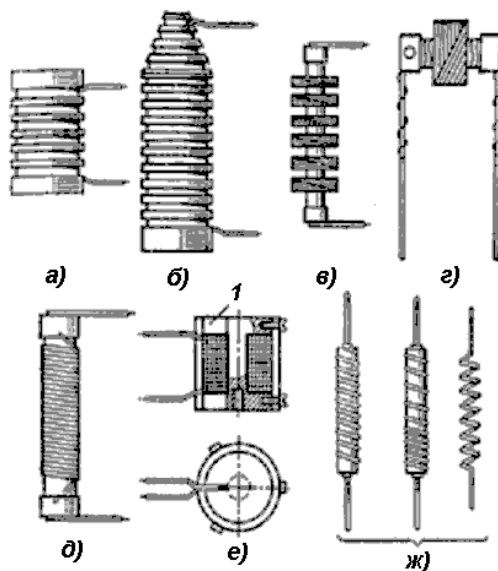
Рисунок 7.3 – Зависимости индуктивности СД от немагнитного зазора δ , постоянного тока I_0 и переменной составляющей индукции B_m

В дросселях накальных цепей для повышения добротности применяются ферромагнитные сердечники, чаще всего замкнутого типа: броневые, катушечные, кольцевые (рисунок 7.4, *е*).

Дроссели корректирующих цепей, как правило, выполняются в виде коротких катушек на стержнях резисторов (рисунок 7.4, *з*). Для последних двух типов дросселей особых требований к величине C_0 не предъявляется.

Добротность «фильтровых» дросселей обычно низкая ($Q = 10 \dots 30$).

Расчет дросселей заключается в определении индуктивности, числа витков, собственной ёмкости и полного сопротивления.



1 – ферромагнитный сердечник; *а* – для длинных волн; *б* – для широкого диапазона (длинные и средние волны); *в* – для средних волн; *г* – корректирующий; *д* – для коротких волн; *е* – дроссель цепей питания со стальным сердечником; *ж* – дроссели для диапазона УКВ

Рисунок 7.4 – Устройство дросселей высокой частоты

Более подробные сведения по данному вопросу можно найти в литературе, приведенной в библиографическом указателе в конце пособия.

Вопрос № 8. Основные технологические процессы формообразования механических деталей в РЭС.

Часть производственного процесса, непосредственно связанная с изменением физического состояния материала, размеров, формы, внешнего вида и взаимного расположения элементов при изготовлении изделий, называется **технологическим процессом**. Основной частью технологического процесса является **операция** – законченная часть технологического процесса, выполняемая на одном рабочем месте.

Производство РЭС характеризуется большим разнообразием технологических процессов. Основные технологические процессы и операции **формообразования механических деталей РЭС** приведены в таблице 8.

Таблица 8 – Технологические процессы и операции формообразования механических деталей РЭС

Процессы	Операции
Литье	Литье в землю, в кокиль, под давлением, по выплавляемым моделям, в оболочковые формы
Холодная штамповка	Резка; штамповка-вырубка и пробивка; штамповка-гибка; штамповка-вытяжка; объемная штамповка; бесштамповая обработка давлением
Изготовление деталей из пластмасс	Горячее прессование; литье; выдувание; обработка резанием
Изготовление деталей со снятием стружки	Операции, выполняемые на токарных, револьверных, фрезерных, шлифовальных и агрегатных станках; отделка

Литье – процесс изготовления деталей и заготовок заливкой расплавленного металла в литейную форму. В приборостроении процессы литья применяют в основном для получения заготовок деталей сложной конфигурации (корпуса, основания, обоймы, постоянные магниты и др.) из металлов и сплавов. В отдельных случаях литьем в приборостроении получают и готовые детали (радиаторы, крышки, кронштейны и т.п.). Использование процесса литья в качестве заготовительной операции значительно снижает трудоемкость изготовления этих деталей и их металлоемкость – меньше металла переводится в стружку.

Литье в землю – самый старый из известных методов получения отливок. Он не отличается высокой производительностью, однако полностью отказаться от него, особенно в условиях мелкосерийного производства, не удастся, поскольку стоимость оснастки по сравнению с другими методами литья минимальна.

В процессе *литья в кокиль* используются металлические формы многократного применения – кокили. Литье в кокиль – более производительный процесс, т.к. не нужна такая трудоемкая операция, как формовка. Этот вид литья отличается значительно более высоким уровнем механизации: кокиль может устанавливаться на специальном станке, позволяющем механизировать операции разъема формы и удаления отливки.

Литье под давлением – наиболее производительный способ изготовления тонкостенных деталей сложной формы из цинковых, алюминиевых, магниевых и медных сплавов. В крупносерийном и массовом производстве принимается, что все размеры отливок стабильно могут быть получены с точностью, соответствующей 12 качеству.

Процесс литья по выплавляемым моделям включает в себя следующие этапы: изготовление моделей из легкоплавкого материала; нанесение на модель огнеупорной пленки; обсыпка пленки кварцевым песком и сушка; формовка в металлических опоках; выплавление моделей в горячей воде или печи; заливка металла в неразъемные формы, образуемые огнеупорной пленкой после выплавления модели; разрушение формы и извлечение отливок. По производительности этот метод литья значительно уступает литью под давлением, т.к. используются одноразовые формы и обязательна операция формовки.

Холодная штамповка – один из самых распространенных методов изготовления механических деталей РЭС. По разным оценкам от 70 до 85% механических деталей РЭС в серийном и массовом производстве получают, используя различные операции холодной штамповки.

Метод холодной штамповки охватывает большое число различных операций, которые можно разделить на две основные группы:

1) разделительные операции с полным или частичным разделением обрабатываемого материала: отрезка, вырубка, пробивка, надрезка, обрезка, зачистка, просечка и др.;

2) формоизменяющие операции с превращением заготовки в деталь заданной формы – гибка, правка, вытяжка, формовка, чеканка, отбортовка, объемная штамповка и др.

К достоинствам холодной штамповки относят:

- относительно высокую и стабильную точность получаемых размеров;
- высокую производительность труда;
- простоту выполнения операций и высокие возможности автоматизации процесса.

К недостаткам холодной штамповки относятся:

- высокая стоимость штампов;
- ограничения в выборе материала, а также формы детали и конструктивного оформления отдельных ее элементов.

По объему **использования пластических масс** на единицу продукции радиоэлектронная промышленность занимает одно из первых мест среди дру-

гих отраслей промышленности. Пластмассовые детали составляют до 70% от объема и до 45% от массы отдельных приборов.

Основные способы переработки пластмасс в приборостроении – прессование и литье под давлением.

Метод прямого прессования экономичен и не требует сложных пресс-форм. Однако ему присущ ряд недостатков: износ оформляющих поверхностей пресс-формы; внутренние напряжения, образование пустот и других дефектов в изделиях; по линии разъема пресс-формы на изделиях образуется облой (заусенец). Методом прямого прессования, как правило, изготавливают детали простой конфигурации, не имеющие элементов пониженной жесткости.

Метод литьевого прессования свободен от перечисленных выше недостатков. Литьевым прессованием можно получать тонкостенные детали сложной конфигурации со сквозной арматурой, с глубокими отверстиями малого диаметра. К недостаткам метода следует отнести сложность, высокую стоимость пресс-форм и большой расход материала.

Литье под давлением – характерный процесс при изготовлении деталей из термопластов без наполнителя. По сравнению с процессами прямого литьевого прессования реактопластов литье под давлением имеет значительно более высокую производительность (до 300 отливок в час в одноместной пресс-форме). Литьем под давлением можно получить сложные по конфигурации, тонкостенные детали с высокой точностью размеров. Можно получить армированные детали.

Изготовление деталей приборов механической обработкой **со снятием стружки** по сравнению с другими технологическими методами малопродуктивно. Поэтому в условиях серийного и массового производства стремятся сократить объем обработки минимизацией припуска; заменой механической обработки другими технологическими методами изготовления деталей.

В рамках технологического процесса изготовления деталей со снятием стружки различают: обработку плоских поверхностей; обработку наружных и внутренних цилиндрических, конических и других поверхностей вращения.

Для обработки плоских поверхностей применяются следующие технологические операции: *фрезерование; шлифование, притирка и суперфиниш*. Обработку наружных и внутренних поверхностей вращения выполняют в два этапа. На первом *обтачиванием* или *сверлением* получают требуемую конфигурацию, а на втором производят отделку – получение требуемой точности и шероховатости.

Нарезание резьб и зубьев, а также отделочные операции для этих поверхностей ничем не отличаются от принятых в точном машиностроении.

В технологических процессах изготовления механических деталей РЭС применяется также ряд специфических операций: *гидрополирование, галтовка, дробеструйная обработка, накатывание*. В последние годы все более широко используются методы *электрофизической* и *электрохимической обработки* поверхности заготовки детали.

Вопрос № 9. Методы герметизации и защиты РЭС от влаги.

Герметизацией радиоэлектронных средств называют обеспечение изоляции этих средств от воздействия газов, влажности, воды, пыли, песка и плесневых грибов.

Различают индивидуальную, общую, частичную и полную герметизации. При **индивидуальной герметизации** каждый элемент защищен отдельно, а при **общей герметизации** защита элементов осуществляется общим гермокорпусом. Ремонт при общей герметизации затруднителен. **Частичная герметизация** осуществляется с помощью пропитки, обволакивания, заливки изделия различными диэлектриками. Практически **полная герметизация** достигается с помощью герметичных корпусов из металлов, стекла и керамики с достаточной степенью непроницаемости. Она весьма эффективна для аппаратуры, устанавливаемой на летательных аппаратах. В этих случаях полная герметизация предохраняет не только от влаги и пониженного давления, но и повышает электрическую прочность. Иногда в герметичные корпуса закачивают инертные газы. Выбор материала и конструкции герметического корпуса определяется сроком службы изделия. Наиболее широко применяются металлические корпуса, изготавливаемые из мягкой листовой стали. Керамические и стеклянные корпуса используют для герметизации небольших изделий (рисунок 9.1).

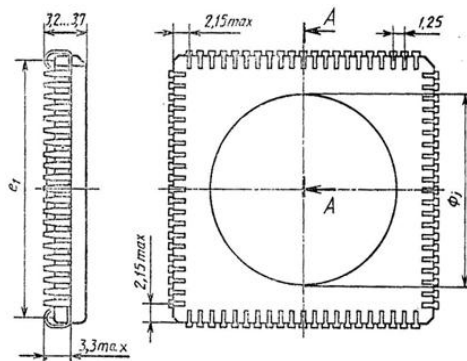


Рисунок 9.1 – Конструкция герметичного керамического корпуса типа PLCC для поверхностного монтажа ИС в РЭА особого назначения (военной, космической, связной)

Пропитка – это процесс заполнения лаками, смолами или компаундами пор и каналов в диэлектриках, а также зазоров между витками обмоток. Пропитке подвергают моточные изделия, каркасы катушек, монтажные платы, планки и т.п. Для пропитки используют жидкие масла (если корпус узла имеет гермокожух), смолы, лаки и их эмульсии, воски, битумы (парафин, церезин и т.п.), компаунды. Наилучшие результаты дает пропитка при чередовании вакуума и повышенного давления. При выборе материалов для пропитки желательна их **химическая нейтральность** к элементам пропитываемого изделия, хорошая **пропиточная способность, нетоксичность, влаго- и нагрево-**

стойкость, хорошая адгезия, высокая теплопроводность, малые усадки, высокая механическая прочность, высокая электрическая прочность, хорошая эластичность и т.п. Температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) материалов для пропитки не должен сильно отличаться от ТКЛР пропитываемого изделия. Эти же свойства учитывают и при выборе материалов для обволакивания и заливки. Для пропитки чаще всего применяют лаки, например Э-4100 и УР-231.

Обволакивание состоит в образовании покровных оболочек на поверхности изделий, предназначенных для кратковременной работы в условиях влажной среды. Для обволакивания применяют лаки, эмали, термопластичные материалы (полиэтилен, полипропилен, полиуретановые смолы, а также кремнийорганические соединения, обладающие высокой водоотталкивающей способностью). Наиболее часто для создания гидрофобной (водоотталкивающей) поверхности используют кремнийорганическую жидкость ГКЖ-94. Обволакивание осуществляют несколькими способами: окунанием, с помощью пульверизатора, а также опрессовкой в специальных формах.

Опрессовка – очень дешёвый вид влагозащиты при массовом производстве. При опрессовке большое количество изделий, находящиеся в коллективных пресс-формах, покрывают порошком. Под действием высокой температуры и давления порошок превращается в смолу, обволакивающую изделия. При остывании смола переходит в твёрдое состояние, и опрессованные изделия удаляются из пресс-форм. Опрессовка используется при производстве конденсаторов, транзисторов, микросхем (рисунок 9.2). Наиболее часто опрессовку осуществляют полиуретановыми смолами.



Рисунок 9.2 – Конструкция опрессованного корпуса микросхем типа SOLIC, подтип 43 по ГОСТ 17467-88 с числом выводов от 18 до 32

Заливка – это процесс заполнения изоляционным материалом пространства между изделием и кожухом. Иногда вместо кожуха делают разъёмную форму, которую снимают после отвердевания заливочного материала. Заливке, как правило, предшествует пропитка. Заливка – более надёжный способ влагозащиты по сравнению с обволакиванием, но более дорогой. Кроме того, заливка довольно сильно увеличивает массу изделия. Для заливки наиболее часто используют эпоксидные компаунды, термореактивные компаунды КГМС1 и 2, ДГМ-С, МБК-1. При этом изделия часто имеют меньшие габариты по сравнению с такими же изделиями, защищаемыми кожухами. Герметичные корпуса с неразъёмными швами используются главным образом для защиты малогабаритных узлов и блоков, а с разъёмными – для сравнительно больших контейнеров с аппаратурой, нуждающейся в смене ее отдельных элементов. Неразъёмные швы получают пайкой, сваркой и др., а

швы разъемных конструкций обеспечивают с помощью прокладок из свинца, резины или специальных пластиков. В разъемных конструкциях внутрь корпуса помещают осушитель, чаще всего силикагель. Силикагель представляет собой гранулы кремнезема SiO_2 , обработанного кислотами. В результате в гранулах образуются капилляры. За счет капиллярной конденсации силикагель может сорбировать из окружающей среды влагу, причем количество влаги может составлять до 30% от массы сухого силикагеля. Широкое использование силикагеля обусловлено его химической нейтральностью, а также способностью восстанавливать после сушки свойства поглощения влаги.

Для кратковременной защиты интегральных микросхем в условиях повышенной влажности или же в качестве предварительной защиты используется **бескорпусная защита**. Она может быть выполнена: заливкой компаундами, покрытием лакокрасочными материалами, обволакиванием.

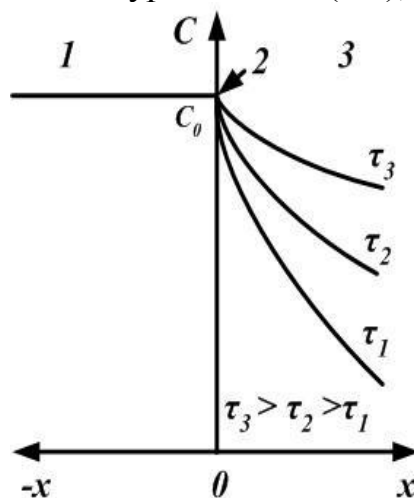
Толщину влагозащитного полимерного покрытия x при заданной долговечности изделия τ можно оценить с помощью выражения:

$$C_{кр} \leq C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D\tau}} \right), \quad (9.1)$$

где D – коэффициент диффузии материала влагозащитного покрытия; C_0 – усреднённая во времени концентрация водяных паров в воздухе при эксплуатации РЭС; $C_{кр}$ – максимально допустимая концентрация водяных паров в воздухе при эксплуатации изделия без влагозащитного покрытия; erf – функция ошибок, значения которой табулированы:

$$\operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D\tau}} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}} \exp\left(-\frac{x^2}{4D\tau}\right) d\left(\frac{x}{2\sqrt{D\tau}}\right). \quad (9.2)$$

Распределение концентрации водяных паров для различных моментов времени диффузии, описываемое уравнением (9.1), показано на рисунке 9.3.



1 – воздушное пространство; 2 – граница раздела «воздух-твёрдое тело»;
3 – объём твёрдого тела

Рисунок 9.3 – Распределение концентрации водяных паров для различных моментов времени

Вопрос № 10. Методы расчета тепловых режимов РЭС.

При расчете тепловых режимов РЭС используют **аналитические методы и коэффициентный метод**. Все эти методы являются **приближёнными**.

Аналитические методы подразделяют на **метод последовательных приближений** и **метод тепловых характеристик**.

Аналитические методы используют приближённые приёмы, упрощающие расчет тепловых режимов: **принцип суперпозиции температурных полей, принцип местного влияния, переход от системы тел к квазиоднородному телу и иерархический принцип**.

Принцип суперпозиции температурных полей. Если мощности P_i источников теплоты, теплопроводности отдельных частей системы и её коэффициенты теплоотдачи не зависят от температуры, то в любой j -ой точке системы температуру t_j находят по формуле:

$$t_j = t_c + \sum_{i=1}^n R_{i,j} \cdot P_i, \quad (10.1)$$

где t_c – температура внешней среды; n – количество областей в системе; $R_{i,j}$ – тепловые сопротивления, не зависящие от температуры.

Принцип местного влияния. Любое местное возмущение является локальным, то есть не распространяется на удалённые участки поля. Температура j -ой точки t_j практически не зависит от формы и размеров деталей, расположенных в удалённой от этой точки i -ой области, способа их монтажа и характера распределения мощностей в деталях, а зависит лишь от расстояния от центра области i до j -ой точки и теплового сопротивления $R_{i,j}$.

Переход от системы тел к квазиоднородному телу состоит в том, что нагретую зону системы тел рассматривают как однородное тело, теплофизические свойства которого таковы, что температурные поля реального и однородного тел мало отличаются.

Иерархический принцип состоит, во-первых, в том, что влияние областей системы с малым тепловыделением не учитывают, что сокращает объём вычислений, а во-вторых, в том, что тепловой расчёт вначале производят укрупнённо (например, вычисляют среднюю температуру воздуха в блоке), а затем более детально (например, вычисляют температуру коллекторного перехода конкретного транзистора).

Метод последовательных приближений рассмотрим на примере моноблока в герметичном корпусе (рисунок 10.1), в состав которого входят три ФУ. Мощности тепловыделения ФУ обозначены P_1, P_2, P_3 ; тепловые потоки между ФУ – $P_{12}, P_{13}, \dots, P_{32}$; между ФУ и корпусом – $P_{1К}, P_{2К}, P_{3К}$; тепловой поток от корпуса в окружающую среду – $P_{КС}$; температуры – $t_1, t_2, t_3, \dots, t_К$. Для определения температур ФУ и корпуса ($t_1, t_2, t_3, t_К$) составляют систему из 4-х уравнений теплового баланса.

виде произведения коэффициентов, каждый из которых учитывает влияние на перегрев одного конкретного фактора. Например:

$$v_K = v_0(P/S) \cdot K(S) \cdot K(H) \cdot K(\varepsilon), \quad (10.5)$$

где P – мощность; S – площадь охлаждения; H – давление; ε – степень черноты поверхности; $v_0(P/S)$, $K(S)$, $K(H)$, $K(\varepsilon)$ – коэффициенты, определяемые из графиков, приведенных в справочниках.

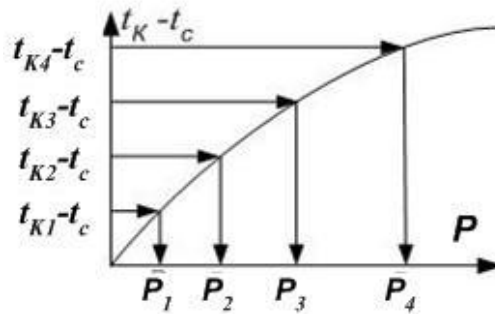
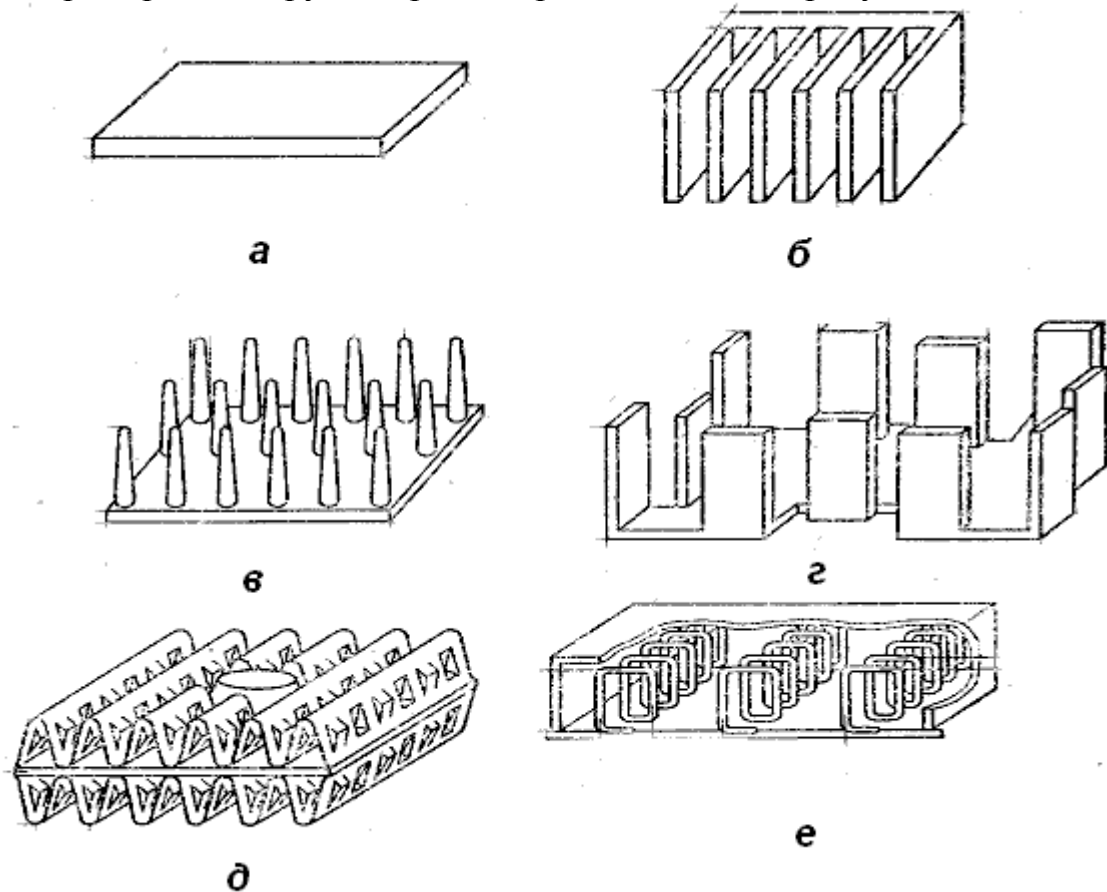


Рисунок 10.2 – Тепловая характеристика для поверхности корпуса РЭС

Вопрос № 11. Конструирование радиаторов полупроводниковых приборов.

Радиаторами называют теплоотводы для охлаждения РЭА и полупроводниковых приборов, представляющие собой металлические пластины с гладкой или развитой поверхностью.

Примеры конструкций радиаторов показаны на рисунке 11.1.



а – радиатор-пластина; *б* – ребристый радиатор; *в* – игольчато-штыревой радиатор; *г* – радиатор типа «краб»; *д* – жалюзийный радиатор; *е* – петельно-проволочный радиатор, применяемый только при вынужденной конвекции

Рисунок 11.1 – Примеры конструкций радиаторов

Влияние конструкции радиатора на температуру коллекторного перехода транзистора $t_{пер}$ показано на рисунке 11.2.

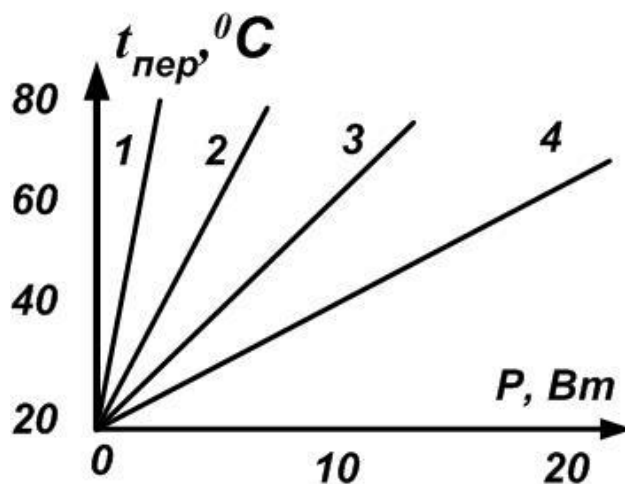
При конструировании могут встретиться следующие задачи:

а) при неизменной мощности за счет оребрения требуется снизить температуру;

б) при неизменной температуре за счет оребрения поверхности необходимо увеличить рассеиваемую мощность.

При увеличении числа ребер (или штырей) возрастает теплоотдающая поверхность, что должно увеличивать рассеиваемую мощность, однако при

уменьшении зазора между рёбрами (или штырями) возникает застой воздуха, что приводит к увеличению температуры воздуха в зазорах, следовательно, к уменьшению конвективной составляющей. Таким образом, при увеличении числа ребер рассеиваемая мощность возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается.



1 – без теплоотвода; 2 – радиатор-пластина с размерами $60 \times 60 \text{ мм}^2$;
3 – игольчато-штыревой радиатор с размерами $60 \times 60 \times 34 \text{ мм}^3$; 4 – тот же игольчато-штыревой радиатор, но при обдуве воздухом со скоростью 2 м/с

Рисунок 11.2 – Влияние конструкции радиатора на температуру коллекторного перехода транзистора

При конструировании величина рассеиваемой мощности радиатора оценивается по графику зависимости (рисунок 11.3) коэффициента эффективности оребрения (отношения мощностей рассеивания оребренной и неоребренной поверхностей)

$$K_p = \frac{P_{\text{ор}}}{P_{\text{неор}}} \quad (11.1)$$

от коэффициента оребрения радиатора (отношения площадей оребренной и неоребренной поверхностей)

$$K_s = \frac{S_{\text{ор}}}{S_{\text{неор}}} \quad (11.2)$$

Для разных конструкций радиатора и высот рёбер конкретный вид зависимости приведён в справочниках, а на рисунке 11.3 приведен лишь общий характер зависимости. Из графика видно, что с увеличением числа ребер (с ростом K_s) рассеиваемая мощность сначала растёт, а затем падает.

В настоящее время на промышленном рынке представлено большое количество радиаторов типовых конструкций, для которых в справочнике приведены значения величин теплового сопротивления для различных скоростей обдува.

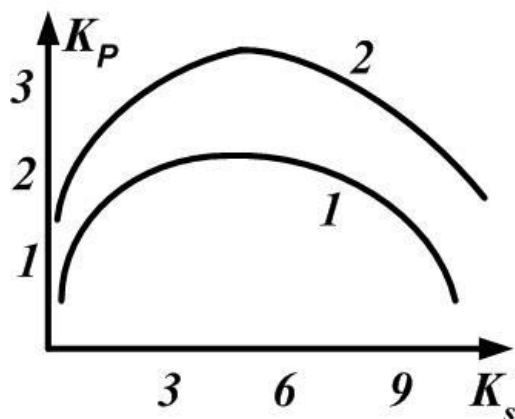


Рисунок 11.3 - Графики зависимости коэффициента эффективности оребрения от коэффициента оребрения радиатора для двух различных по длине рёбер

Приведём методику выбора радиатора типовой конструкции. Должны быть заданы: мощность P , рассеиваемая транзистором; площадь контакта радиатора с транзистором S_K ; материал кристалла транзистора; температура воздуха t_{oc} . Величина теплового сопротивления транзистора $R_{пер-к}$ находится из справочника. Максимально допустимая температура коллекторного перехода транзистора $t_{пер}$ для кремниевых транзисторов равна 150°C , а для германиевых транзисторов равна 85°C . Расчёт в этом случае проводят согласно схеме, изображённой на рисунке 11.4. Находят тепловое сопротивление R_K контакта между транзистором и радиатором:

$$R_K \approx \frac{2.2 \cdot 10^{-4}}{S_K} \text{ [}^{\circ}\text{C/Вт]}.$$

Определяют максимально допустимую температуру радиатора $t_{p \max}$:

$$t_{p \max} \leq t_{пер} - P(R_{пер-к} + R_K).$$

Находят значение максимально допустимого теплового сопротивления между радиатором и окружающей средой:

$$R_{p-oc \max} = \frac{t_{p \max} - t_{oc}}{P}.$$

Выбирают радиатор типовой конструкции, имеющий величину теплового сопротивления:

$$R_{p-oc} \leq R_{p-oc \max}.$$

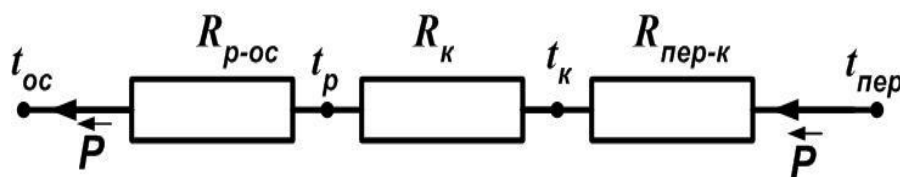


Рисунок 11.4 – Схема отвода тепла от транзистора на радиаторе

Вопрос № 12. Конструирование термостатов, их основные характеристики.

В инженерной практике термостатом называется устройство, которое, находясь в среде с меняющейся в широком интервале температурой, обеспечивает внутри некоторого объема с помещенным в него объектом термостатирования заданную температуру (узкий интервал изменения температуры) в течение длительного времени. При этом объект термостатирования может быть пассивным (без источников тепловой энергии) и активным. Более полная классификация приведена на рисунке 12.1.



Рисунок 12.1 – Классификации радиотехнических термостатов

Конструктивно термостат (рисунок 12.2) состоит из камеры 1, с объектом термостатирования 2, источника или стока тепловой энергии 3, теплоизолирующей оболочки 4 с защитным кожухом 5. Элементы конструкции, а также электрические соединения 6 являются тепловыми мостами (связями) объекта термостатирования с камерой и окружающей средой. Для контроля температуры внутри камеры устанавливается датчик 7 с контрольными и исполнительными устройствами 8, которые управляют источником или стоком тепловой энергии. Наличие управляющих устройств с регуляторами температуры – характерная черта активных термостатов.

Для выравнивания поля температур в рабочей зоне термостата его камеру выполняют из хорошо проводящего тепло материала, нагревательные или холодильные элементы располагают по стенкам камеры равномерно, используют внутри камеры конвекцию среды, применяют снаружи камеры вещество с постоянной температурой плавления и т.д.

При проектировании термостатов необходимо обеспечить:

- 1) заданные температуры в рабочем объеме или объекте;

- 2) точность термостатирования;
- 3) допустимую неравномерность поля температур в объекте или в объеме камеры;
- 4) нормальную работу при изменении внешних тепловых потоков;
- 5) допустимую мощность источников или стоков тепла;
- 6) необходимое время выхода на заданный режим;
- 7) заданные массу и объем.

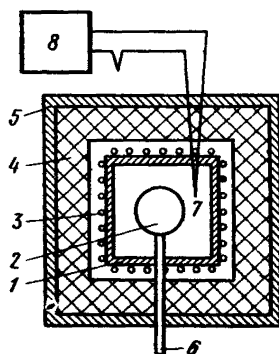


Рисунок 12.2 – Схематическое изображение термостата

При разработке конструкций термостатов рекомендуется:

- равномерно распределять по объему активного объекта источники тепловой энергии (если требуется обеспечить одинаковую точность термостатирования по всему объекту);

- электрические и механические связи объекта выполнять из материалов с большим тепловым сопротивлением, располагать их (по возможности) на изотермических поверхностях, применять тепловые компенсаторы;

- выбирать форму камеры в виде шара, цилиндра или куба с надежным тепловым контактом конструкций. Для выравнивания поля температур в камере и уменьшения колебаний температуры в процессе регулирования ее стенки должны быть массивными, выполнены из материала с высоким коэффициентом теплопроводности и большой теплоемкостью. Однако для сокращения времени установления рабочей температуры теплоемкость камеры должна быть минимальна, поэтому для удовлетворения обоих условий необходимо выбрать материал с высоким коэффициентом температуропроводности (например, алюминий);

- обеспечить равномерное температурное поле нагревателя и использовать хорошо проводящие тепло электроизоляционные материалы;

- для оболочки термостата применять теплоизоляцию с малым коэффициентом теплопроводности (например, пенопласт, фетр, стекловолокно, войлок) или создавать вакуумную прослойку;

- для уменьшения теплоотдачи от термостата в окружающую среду помещать термостат в кожух, выполненный из тонкого листового металла с малым коэффициентом излучения и с хорошей обработкой поверхности (полировкой).

При последующем тепловом расчете и оптимизации конструкции термостата выполняют:

- 1) расчет стационарного режима (выбор размеров, теплофизических параметров материалов, мощности нагревателя и т.п.);
- 2) оценку неравномерности поля температур в объекте и камере;
- 3) анализ стационарного и нестационарного тепловых режимов термостатируемого объекта по отношению к камере термостата и окружающей среде для уменьшения статических ошибок термостата;
- 4) расчет нестационарного теплового режима (определение теплоинерционных свойств объекта, элементов и термостата в целом; расчет переходного процесса и влияния изменения внешних условий на точность термостатирования; получение уравнений динамики термостата, объекта и датчика температуры);
- 5) анализ работы электрической схемы автоматики для стабилизации температуры;
- 6) расчетно-экспериментальное моделирование геометрических, теплофизических, статических и динамических характеристик термостата;
- 7) оптимизацию конструкции с учетом типовых решений.

При включении мощности нагревателя переходный процесс в термостате рассчитывается по приближенной формуле:

$$\theta_k(t) = \theta_{k,ст} \left(1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon_k}} \right); \quad \theta_{k,ст} = \frac{\Phi_H}{\sigma_{1c}}, \quad (12.1)$$

где θ_k – температура камеры; $\theta_{k,ст}$ – температура камеры в режиме стабилизации; t – время; ε_k – тепловая инерционность термостата; Φ_H – мощность нагревателя; σ_{1c} – тепловая проводимость объект-среда.

Температура на поверхности объекта при включении регулятора может быть найдена по приближенной формуле:

$$\theta_{1s}(t) = \theta_{k,ст} \left(1 - e^{-\frac{t}{\varepsilon_1}} \right), \quad (12.2)$$

где ε_1 – тепловая инерционность объекта термостатирования.

Длительность переходного процесса t_2 (время выхода в заданный режим стабилизации) определяется как:

$$t_2 = t_1 + \Delta t = -\varepsilon_k \ln \left(\frac{\theta_{k,ст} - \theta_{стаб}}{\Phi_H / \sigma_{1c}} \right), \quad (12.3)$$

где t_1 – время выключения нагревателя при температуре нагревателя θ_H (рисунок 12.3).

Время выхода в режим t_2 может быть уменьшено за счет включения большей мощности нагревателя.

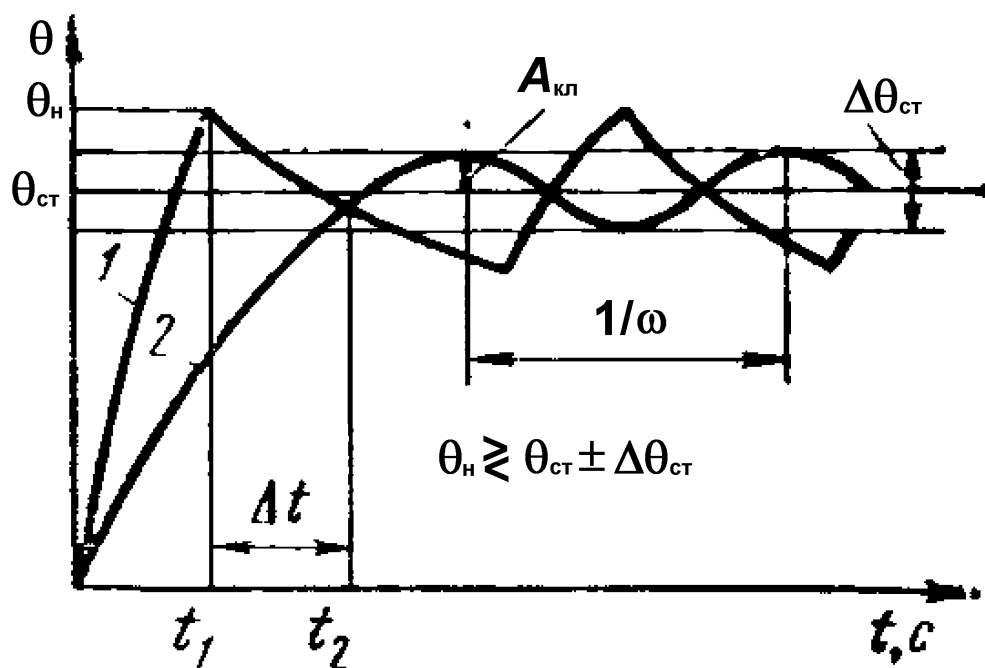


Рисунок 12.3 – График зависимости температуры нагревателя (1) и объекта термостатирования (2) от времени работы термостата при входе в режим стабилизации

Квазиустановившийся (автоколебательный) режим термостата – это такой режим, при котором колебания температуры внутри камеры с объектом термостатирования происходят в заданном узком интервале вследствие работы автоматической системы управления нагревателем.

Вопрос № 13. Конструирование и расчет гибридных интегральных схем.

Интегральная микросхема – это конструктивно законченное изделие электронной техники, выполняющее определенную функцию преобразования информации и содержащее совокупность электрически связанных между собой ЭРЭ, изготовленных в едином технологическом цикле.

Гибридные ИС (ГИС) представляют собой комбинацию пленочных пассивных ЭРЭ с миниатюрными бескорпусными активными дискретными приборами (полупроводниковыми ИС, транзисторами, диодами), расположенных на общей диэлектрической подложке.

ЭРЭ, которые являются неотъемлемой составной частью ИС и не могут быть выделены из нее как самостоятельное изделие, называют **элементами ИС**, а дискретные активные ЭРЭ ГИС – **навесными компонентами** (или просто компонентами). В отличие от дискретных компонентов, элементы ИС называют интегральными (интегральный резистор, интегральный диод). **Элементы ИС** располагаются на одной подложке на сравнительно небольших расстояниях друг от друга и формируются одновременно. Это обуславливает малый технологический разброс их параметров.

ГИС в зависимости от применяемой технологии делятся на **толстопленочные и тонкопленочные**.

В ГИС электрические связи осуществляются с помощью пленочного или проволочного монтажа. Исходя из особенностей конструкции элементов и защиты от внешних воздействий (влага, пыль, газы, механические воздействия и др.) ГИС разделяют на корпусированные и бескорпусные. В первом случае подложки с элементами устанавливаются в специальные корпуса, а во втором – они заливаются компаундом.

Конструирование ГИС начинают с **выбора материала подложки**, на поверхности которой по заданному рисунку формируются пленочные элементы ГИС. Материалы подложек должны обладать:

- высоким удельным сопротивлением;
- малыми потерями на высоких частотах и при высоких температурах;
- достаточной электрической прочностью;
- иметь ТКЛР равный или близкий к ТКЛР наносимого на подложку пленочного материала;
- инертностью по отношению к наносимым материалам;
- иметь низкую стоимость;
- для толстопленочных ГИС поверхности подложек должны обрабатываться по 8...12 классам чистоты (микронеровности 1...2 мкм), для тонкопленочных ГИС – по 12...14 классам (микронеровности 50...200 нм).

Для тонкопленочных маломощных ГИС наиболее часто используют подложки из ситалла СТ-50-1, для мощных ГИС используют поликор, а для особо мощных – бериллиевую керамику, имеющую очень высокое значение

коэффициента теплопроводности ($210 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^{\circ}\text{С})$). Для толстопленочных ГИС наиболее часто используют дешёвую керамику ВК94 (22ХС), реже поликор и бериллиевую керамику. В последнее время для толстопленочных ГИС начали использовать подложки из оксидированного алюминия и эмалированные подложки, а подложки из стекла перестали применять из-за низкой временной стабильности их свойств. Толщина подложек составляет $0.35 \dots 0.5 \text{ мм}$.

Размеры плат подложек, применяемых в корпусах, определяются конкретной конструкцией корпуса. В основном применяются платы подложки с размерами, получаемыми при безотходном делении стандартной подложки $60 \times 48 \text{ мм}$.

После выбора материала подложки **выбирают навесные компоненты ГИС**, а затем переходят к **разработке топологии**, которую рекомендуется проводить в одинаковой для тонкопленочных и для толстопленочных ГИС последовательности:

- составление схемы соединений элементов на плате;
- расчёт конструкции пленочных элементов;
- определение необходимой площади платы и согласование типоразмеров корпуса, выбранного для ГИС;
- разработка эскиза топологии, оценка качества топологии и при необходимости её корректировка.

Для **составления схемы соединений** на принципиальной электрической схеме выделяют пленочные элементы и навесные компоненты, намечают порядок их расположения и проводят упрощение схемы соединений с целью уменьшения числа пересечений проводников и сокращения длины проводников.

Расчёт конструкции пленочных элементов производят с учётом технологических ограничений. Например, для тонкопленочных ГИС точность изготовления линейных размеров пленочных элементов $\pm 0.01 \text{ мм}$, а для толстопленочных ГИС $\pm 0.1 \text{ мм}$. Пленочные элементы тонкопленочных ГИС изготавливают с помощью масочного метода с точностью изготовления пленочных элементов $\pm 10\%$ (при мелкосерийном и серийном производстве), фотолитографических и комбинированных методов с точностью изготовления пленочных элементов $\pm 1\%$ (при серийном и массовом производстве). Пленочные элементы толстопленочных ГИС изготавливают с помощью сеткографического метода с точностью изготовления пленочных элементов без подгонки $\pm 30\%$ и $\pm 2\%$ с лазерной подгонкой. Номиналы резисторов R рассчитывают по формуле:

$$R = R_{\square} \cdot l/b, \quad (13.1)$$

где R_{\square} – величина сопротивления квадрата плёнки из выбранного материала для данной технологии нанесения плёнки; b – ширина, l – длина.

Минимальный размер резистора определяется с учётом возможностей выбранной технологии, заданной точности и допустимой удельной мощности рассеяния ($\text{Вт}/\text{мм}^2$).

Конструирование конденсаторов заключается в расчете площади перекрытия обкладок, выборе формы обкладок и расположении выводов. Нижняя обкладка должна выступать за края верхней, а диэлектрическая плёнка должна выступать за край нижней обкладки.

Исходными данными являются:

- номинальное значение ёмкости C и её предельное отклонение;
- рабочее напряжение;
- условия эксплуатации;
- технологические погрешности.

Рекомендуемый порядок расчёта:

- выбирают материал и определяют толщину диэлектрического слоя;
- по таблицам находят значение удельной емкости диэлектрического слоя конденсатора;

- вычисляют активную площадь конденсатора:

$$S = C/C_0 \text{ [мм}^2\text{]}; \quad (13.2)$$

- вычисляют размеры верхней, нижней обкладки и диэлектрического слоя конденсатора и проверяют точность расчетов.

Затем вычисляют необходимую площадь платы:

$$S \approx 2.5(S_{\Sigma R} + S_{\Sigma C} + S_{\Sigma K} + S_{\Sigma НК}), \quad (13.3)$$

где $S_{\Sigma R}$, $S_{\Sigma C}$, $S_{\Sigma K}$ – площади, занимаемые всеми резисторами, конденсаторами, контактными площадками; $S_{\Sigma НК}$ – суммарная площадь навесных компонентов, которые не могут быть расположены над пленочными элементами.

Разработку топологии завершают выбором корпуса, разработкой эскиза топологии, оценкой качества топологии и при необходимости её корректировкой.

Вопрос № 14. Тонко- и толстопленочная технология, сравнительный анализ их применения, основные материалы.

Тонкопленочная и толстопленочная технологии отличаются друг от друга методами получения пленочных элементов. Для получения рисунка тонкопленочных элементов используют методы фотолитографии и масочный, а также совмещенный. Рисунок толстопленочных элементов получают методом трафаретной печати (сеткографии).

Толстопленочная технология намного проще тонкопленочной технологии, использующей дорогостоящее вакуумное оборудование, и имеет более короткий путь освоения. Благодаря большой толщине толстопленочные резисторы имеют повышенную удельную мощность рассеивания. Основные недостатки толстопленочной технологии по сравнению с вакуумными методами – **ограничение минимальных размеров пленочных элементов и, следовательно, меньшая точность их изготовления и меньшая степень интеграции.**

Микронеровности подложки должны быть на порядок меньше толщины элементов. При толщине толстопленочных элементов от 15 до 70 мкм **поверхности подложек должны обрабатываться по 8...12 классам чистоты** (микронеровности 1...2 мкм). Если поверхности будут более гладкими, то может произойти отслаивание пленок из-за плохой адгезии их к поверхности подложки при вжигании паст. Толщина тонкопленочных элементов порядка 1 мкм, поэтому для **тонкопленочных ГИС поверхности подложек должны обрабатываться по 12...14 классам чистоты** (микронеровности 50...200 нм). Если поверхности будут менее гладкими, то будет велика неравномерность толщины тонкопленочных элементов, что может привести к пробое конденсаторов и выходу из строя резисторов. Для тонкопленочных ГИС выбирают химически стойкие материалы подложек, которые при обработке дают гладкую поверхность, например, ситалл СТ-50-1, полированный кварц, сапфир. Для подложек толстопленочных ГИС выбирают материалы, обладающие высокой физической и химической стойкостью при нагреве до 800 °С и большой теплопроводностью (бериллиевая керамика, поликор, высокоглинистая керамика ВК-94).

Для изготовления толстопленочных элементов применяют пасты, которые наносят на подложку с помощью ракеля (эластичной резиновой лопатки) продавливанием через сетчатый трафарет, имеющий открытые и закрытые участки. Растекаясь, столбики пасты, копирующие отверстия сетки, сливаются, образуя такой же рисунок, как на трафарете. В связи с разработкой светочувствительных паст трафаретный метод можно заменить фотолитографией, что повысит точность размеров толстопленочных элементов. **Пасты** после нанесения **подвергают** сушке, а затем **вжиганию в печах** конвейерного типа.

В качестве основных материалов в проводящие и резистивные пасты входят металлы: золото, серебро, платина, палладий, индий, осмий, а также сплавы: *Pt-Au*, *Pd-Ag*, *Pd-Au* и др. С целью экономии драгоценных металлов для формирования резисторов применяют соединения *Ag-Ru*, *Bi-Ru*, *Ru-In* и пасты на основе рутения. Основным материалом для диэлектрической пасты служит размельчённая керамика с высокой диэлектрической проницаемостью ϵ и с малым углом электрических потерь в диэлектрике $\text{tg } \delta$. Для межслойной изоляции используют кристаллизирующиеся стекла с малым значением ϵ . Для хорошего сцепления пленки с платой и связывания частиц основного материала между собой в состав паст вводят порошок стекла. **Точность изготовления элементов толстопленочных ГИС без подгонки $\pm 30\%$ и $\pm 2\%$ с лазерной подгонкой.**

Масочный метод получения рисунка тонкоплёночных элементов состоит в том, что с помощью фоторезиста на поверхности фольги создают рисунок и затем эту поверхность протравливают. На фольге получают окна, соответствующие по форме наносимым элементам. Недостаток этого метода в том, что невозможно получить замкнутый контур, спираль и даже незамкнутый, но сложно-ажурный контур. Масочный метод используют при мелкосерийном и серийном производстве, при этом **точность изготовления пленочных элементов $\pm 10\%$.**

Сущность получения рисунка тонкоплёночных элементов методом фотолитографии заключается в засвечивании слоя светочувствительного материала и в последующем проявлении (удалении) засвеченной части (или наоборот не засвеченной). Фотолитографический и комбинированный методы используют при серийном и массовом производстве, при этом **точность изготовления пленочных элементов $\pm 1\%$.**

Методы получения тонких пленок относятся к вакуумным (термическое и ионно-плазменное распыление).

В качестве резистивных материалов тонкоплёночных ГИС, используют чистые металлы и сплавы с высоким электрическим сопротивлением, а также специальные резистивные элементы – керметы, которые состоят из частиц металла и диэлектрика. Наиболее распространенный кермет: хром - монооксид кремния. Однако свойства керметов сильно зависят от технологических факторов. Следовательно, резисторы на основе керметов имеют худшую воспроизводимость номиналов и большой температурный коэффициент сопротивления по сравнению с резисторами на основе металлов. Наилучшими резистивными материалами для тонкоплёночных ГИС являются металлосилицидные сплавы *Cr-Si*, легированные добавками железа, никеля, кобальта, вольфрама (например МЛТ-3М, РС).

Материалы тонкоплёночных конденсаторов должны иметь высокую проводимость, коррозионную стойкость, совместимость с другими материалами, высокую механическую прочность. Наилучшим материалом является алюминий, но он имеет плохую адгезию к подложке. Поэтому для предот-

вращения отслаивания плёнки алюминия вначале напыляют слой титана или ванадия. В качестве диэлектрика часто используют моноокиси кремния и германия. Самым распространенным материалом проводников и навесных компонентов в тонкоплёночных ГИС повышенной надежности является золото с подслоем хрома, никеля или титана. С менее жесткими требованиями к надежности применяют пленки меди или алюминия с подслоем хрома, ни-хрома или титана. Для предотвращения окисления меди и улучшения условий пайки ее покрывают никелем, золотом или серебром.

Вопрос № 15. Защита РЭС от механических воздействий.

В процессе производства, транспортировки, эксплуатации и хранения РЭС испытывают различные **механические воздействия** (МВ): вибрации, ударные и линейные ускорения, акустические шумы, давление и комбинированные воздействия. В результате этих воздействий могут возникнуть повреждения или отказы РЭС.

Механические воздействия характеризуются **перегрузкой**, которая равна отношению ускорения a к ускорению силы тяжести g . Вибрации характеризуются амплитудой колебаний и частотой, а удар – длительностью и амплитудой ударного импульса.

Для бесперебойной работы РЭС необходимо обеспечить:

а) виброустойчивость, то есть свойство объекта сохранять работоспособность при заданной вибрации;

б) по возможности отсутствие механических резонансов элементов конструкции в заданном диапазоне частот вибрации;

в) вибропрочность, то есть способность объекта противостоять разрушающему механическому воздействию при заданной вибрации и после её прекращения;

г) прочность и устойчивость к действию ударов, акустического шума и давления, к комбинированным воздействиям, то есть прочность при указанных механических воздействиях и после их прекращения.

Защита РЭС от механических воздействий осуществляется следующими методами:

а) методами уменьшения интенсивности источников механических воздействий (балансировка, уменьшение зазоров, виброизоляция источника механических воздействий);

б) методами уменьшения воздействий (путём виброизоляции самого РЭС, демпфирования, устранения резонансов).

При проектировании РЭС сначала выясняют, нужны ли защитные мероприятия. Сравнивают величины допустимых МВ для применяемых элементов по техническим условиям (ТУ) с величинами МВ на объекте установки РЭС. Величины факторов МВ следует скорректировать с учетом возможного резонансного усиления колебаний. В случае, если уровни МВ превышают допустимые, предусматривают защитные мероприятия с оценкой их эффективности.

Основные **способы защиты** РЭС от наиболее распространенных видов МВ – вибраций и ударов – можно условно подразделить на три разновидности: повышение жесткости конструктивов, демпфирование и использование амортизаторов (виброизоляторов).

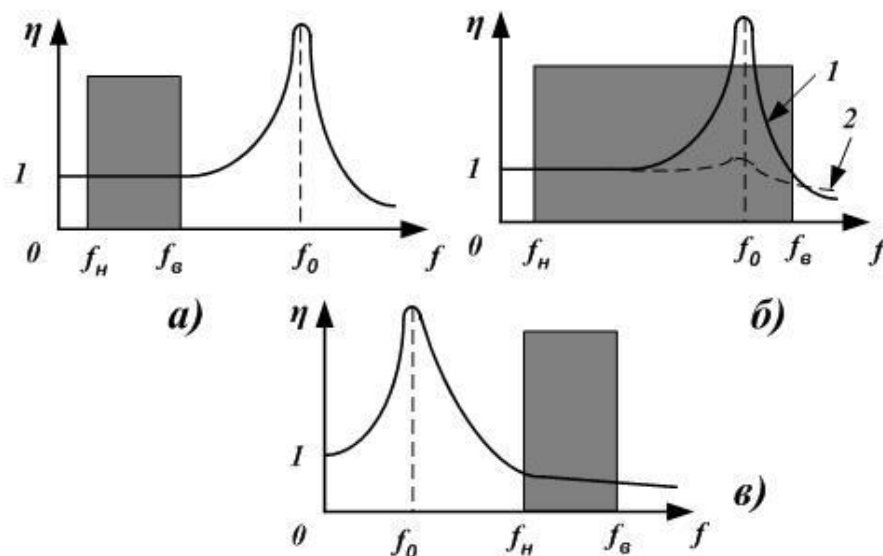
Эффективность способов виброзащиты можно оценить по АЧХ. В качестве критерия эффективности виброзащиты обычно служит значение **коэф-**

коэффициента динамичности η защищаемого объекта в диапазоне частот воздействующих вибраций. Коэффициент η вычисляют по формуле:

$$\eta = A_B/A_{B0}, \quad (15.1)$$

где A_{B0} – амплитуда колебаний несущего основания механической системы; A_B – амплитуда вынужденных колебаний защищаемого объекта.

Виброзащита за счет **повышения жесткости** конструктивных элементов блоков, которую можно обеспечить применением ребер жесткости, отбортовок и выдавок, выбором материалов с большой удельной жесткостью, оптимизацией геометрических размеров и другими способами, может быть пояснена с помощью АЧХ на рисунке 15.1, *а*. Если известен диапазон частот воздействующих (возбуждающих) вибраций от f_n до f_v , то элементы конструкции будут находиться в относительно благоприятных условиях функционирования, если вывести значения их собственных частот f_0 из диапазона частот воздействий, обеспечив выполнение соотношения $f_0 > 2f_v$. Рассматриваемый способ виброзащиты обеспечивает значение коэффициента динамичности $\eta = 1$. Среди материалов для деталей максимальную удельную жесткость имеет пресс-материал АГ-4С (19.1 МДж/кг) и гетинакс-II (14.7 МДж/кг); удельная жесткость минимальна у фторопласта-4 (0.2 МДж/кг) и пенопласта ПС-1-350 (0.43 МДж/кг). У сталей, алюминиевых и магниевых сплавов удельная жесткость 22...25 МДж/кг.



- а* – АЧХ элемента конструкции при увеличении его жёсткости;
б – АЧХ элемента конструкции при увеличении степени демпфирования;
в – АЧХ амортизированного РЭС

Рисунок 15.1 – АЧХ устройств, защищаемых от вибраций

Использование **демпфирующих покрытий** и слоистых демпфирующих конструкций пояснено АЧХ, представленной на рисунке 15.1, *б*. Этот способ виброзащиты эффективен в широком диапазоне частот воздействующих вибраций, который может захватывать и область частот собственных колебаний.

В этом случае $\eta < 1$, но при резонансном возбуждении вибраций конструктивных элементов эффективность виброзащиты наибольшая, что следует из сравнения кривых 1 и 2. Наиболее перспективным и распространенным способом демпфирования конструкций РЭС является одно- или двусторонняя заливка печатного узла или введение высокоэффективных вибропоглощающих (демпфирующих) материалов в структуру несущих оснований. Эти способы основаны на способности полимеров рассеивать большое количество энергии колебаний при растяжении, изгибе или сдвиге за счет вязко-упругих свойств. Так, применение в конструкциях демпфирующего компаунда КТ-102 позволяет снизить коэффициент динамичности конструкции более чем на порядок. Демпфированные несущие основания чаще всего бывают двух типов: с наружным и с внутренним вибропоглощающими слоями. Показателем демпфирующих свойств материалов и конструкций служит **коэффициент механических потерь** (КМП) β' . Коэффициент динамичности при резонансе при наличии демпфирования $\eta_{рд}$ связан с коэффициентом динамичности при резонансе в отсутствие демпфирования η_p соотношением:

$$\eta_{рд} = \eta_p - \frac{1}{\beta'}. \quad (15.2)$$

Ассортимент вибропоглощающих материалов включает: клеи (например, КТ-102, полиизобутилен, имеющие КМП $\beta' = 1.0$), заливочные пеноматериалы (пенополиуретан ППУ-202-2, имеющий $\beta' = 0.13$), мастичные и листовые материалы. Мастики (адем-НШ, антивибрит-5М, имеющие $\beta' = 0.25$) представляют собой неотвержденные материалы.

Эффективность использования **амортизаторов** (рисунок 15.2) пояснена АЧХ, изображенной на рисунке 15.1, в. Данный способ виброзащиты – наиболее эффективный из всех рассмотренных, так как только он обеспечивает значения $\eta < 1$.

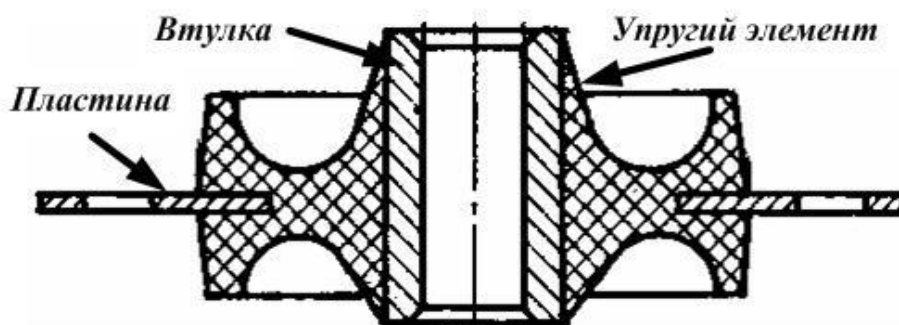


Рисунок 15.2 – Амортизатор резинометаллический типа АП

Кроме рассмотренных выше наиболее употребительных способов виброзащиты, в практике конструирования РЭС используют и другие:

- рациональную ориентацию конструктивных элементов относительно направления вектора воздействующих вибраций;
- размещение наиболее чувствительных элементов блока в местах конструкции, характеризующихся малыми значениями коэффициента η ;

- применение виброустойчивых и вибропрочных ЭРЭ;
- применение элементов компенсации виброшумов;
- применение гибких печатных плат и др.

В специальных случаях применяют, так называемые, активные системы виброзащиты на основе динамических гасителей колебаний. В ряде случаев демпфирование используется совместно с амортизацией.

Вопрос № 16. Алгоритмы и программы проектирования печатных узлов.

К задачам топологического проектирования РЭС в целом относят такие основные процедуры, как компоновка, размещение и трассировка. При топологическом проектировании печатных плат (ПП), как правило, используют две последние процедуры.

Общая постановка задачи размещения. В общем виде задача размещения заключается в определении оптимального в смысле некоторого критерия положения элементов и связей между ними в монтажном пространстве типовой конструкции РЭС. При этом должны соблюдаться конструктивно-технологические ограничения. Для регулярного монтажного пространства (например, для ПП, на которой предполагается устанавливать однотипные ЭРЭ) задачу размещения можно сформулировать следующим образом.

Имеется множество элементов $E = \{l_i / i = 1, N\}$ и множество соединяющих их цепей $Q = \{q_k / k = 1, K\}$. Монтажное пространство определено множеством фиксированных позиций для установки элементов $T = \{t_j / j = 1, M\}$, причем $M \geq N$. Необходимо найти такое отображение множества E на множество T , при котором достигается экстремум целевой функции F . Главной целью размещения является создание наилучших условий для последующей трассировки.

В процессе решения задачи размещения используются следующие основные критерии:

1. Минимум суммарной длины всех соединений или длины самой длинной связи.
2. Минимум числа пересечений связей при произвольной их конфигурации.
3. Максимум числа цепей с возможно более простой конфигурацией.
4. Максимально близкое расположение модулей, имеющих наибольшее количество связей между собой.

Наиболее часто используется критерий минимума суммарной длины соединений, так как при его оптимизации косвенно минимизируются длина связей и число их пересечений, снижается искажения сигналов. В последнее время считают, что критерий 2 является более глубоким при решении ряда задач топологического проектирования микросистемных узлов. Классификационная схема алгоритмов размещения представлена на рисунке 16.1.

Нередко ручное размещение элементов конструктором создает лучшие условия для трассировки, чем машинное. При ручном размещении конструктор обычно стремится располагать в соседних позициях наиболее связанные элементы, входящие в функционально законченную группу, следя в то же время за достаточно равномерным распределением соединений по монтажному пространству.



Рисунок 16.1 – Классификация алгоритмов размещения

Общая постановка задачи трассировки. Трассировка заключается в определении конкретных геометрических параметров печатного, пленочного или проводного соединения между элементами схемы. Рассмотрим в наиболее общем виде постановку задачи трассировки печатного монтажа.

В монтажном пространстве, представляющем собой совокупность коммутационных плоскостей, определены координаты электрорадиоэлементов и их выводов, а также заданы параметры и топологические свойства монтажного пространства. Множество цепей принципиальной схемы разбивает множество B выводов на непересекающиеся подмножества B_i так, что:

$$B = \{B_i / i = 1, M\}, \text{ а } B_i = \{b_{i,k} / k = 1, k_i\},$$

где M – число цепей; k_i – число контактов, соединяемых i -ой цепью.

Необходимо реализовать множество B_i в виде множества A_i таких же областей (рисунок 16.2) которые удовлетворяли бы следующим требованиям:

1. Все соединения должны быть выполнены в монтажной области.
2. В каждом слое проводники не должны иметь пересечений.
3. Расстояние между проводниками не должно быть меньше допустимого зазора ρ_0 .
4. Ширина проводника не должна быть меньше допустимой d_0 .
5. Все контакты i -ой цепи должны лежать на i -ом проводнике.
6. Если необходимо выполнить переход со слоя r на слой t , то пересечение областей должно иметь размер, достаточный для конструктивной реализации межслойного перехода.

В процессе трассировки используются следующие критерии:

1. Минимум суммарной длины всех проводников.
2. Минимум числа пересечений проводников.
3. Минимум изгибов проводников.

4. Минимум числа слоев многослойной печатной платы и переходов со слоя на слой.
5. Минимум длины параллельных участков соседних проводников.
6. Равномерное распределение проводников по монтажной области.

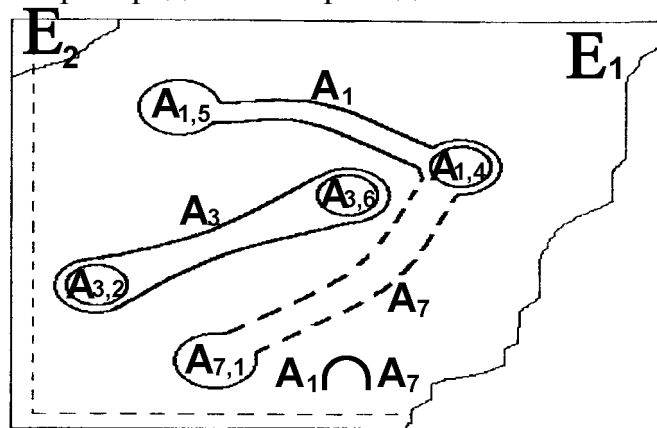


Рисунок 16.2 – Реализация печатных соединений в монтажном пространстве

В настоящее время задача одновременной оптимизации всех соединений пока окончательно не решена. Классификация алгоритмов трассировки приведена на рисунке 16.3.

Среди программного обеспечения проектирования печатных плат хорошо известны система OrCAD, программы SPECCTRA и PCB Design Studio (фирма Cadence Design Systems), системы P-CAD и Protel (фирма Altium), а также некоторые другие.

С помощью ряда редакторов, имеющих в OrCAD, выполняется интерактивное проектирование печатных плат. Имеются программы размещения компонентов, автотрассировки проводников и создания управляющих файлов для фотоплоттеров. В состав системы входят также средства для анализа и оптимизации электронных схем и проектирования устройств на программируемых логических интегральных схемах (ПЛИС). Поэтому система OrCAD признана как система сквозного проектирования РЭА.

Программа SPECCTRA – одна из наиболее мощных программ проектирования печатных плат – может выполнять размещение и трассировку как в интерактивном, так и в автоматическом режиме. Размещение происходит за несколько проходов, во время которых выявляются и устраняются конфликты типа пересечений проводников в одном слое или нарушения проектных норм.

Широко известна система проектирования печатных плат P-CAD. С ее помощью выполняют полный цикл проектирования печатных плат, включая интерактивное размещение компонентов, трассировку проводников и выпуск документации. Автоматическое размещение компонентов на плате и автоматическая трассировка проводников осуществляются с помощью отдельно поставляемого пакета SPECCTRA.

В системе P-CAD имеются библиотеки корпусов микросхем, библиотеки современных импортных ЭРЭ, которые можно пополнить библиотеками отечественной элементной базы, препроцессоры подготовки информации для изготовления фотошаблонов в форматах ряда известных фотоплоттеров. Поддержка текстовых форматов DXF и PDIF позволяет обмениваться информацией с такими распространенными пакетами, как AutoCAD, OrCAD, Viewlogic и др.

Компания Altium предлагает наряду с P-CAD систему сквозного проектирования ПЭС Protel собственной разработки, имеющую возможности, аналогичные возможностям системы PCAD.

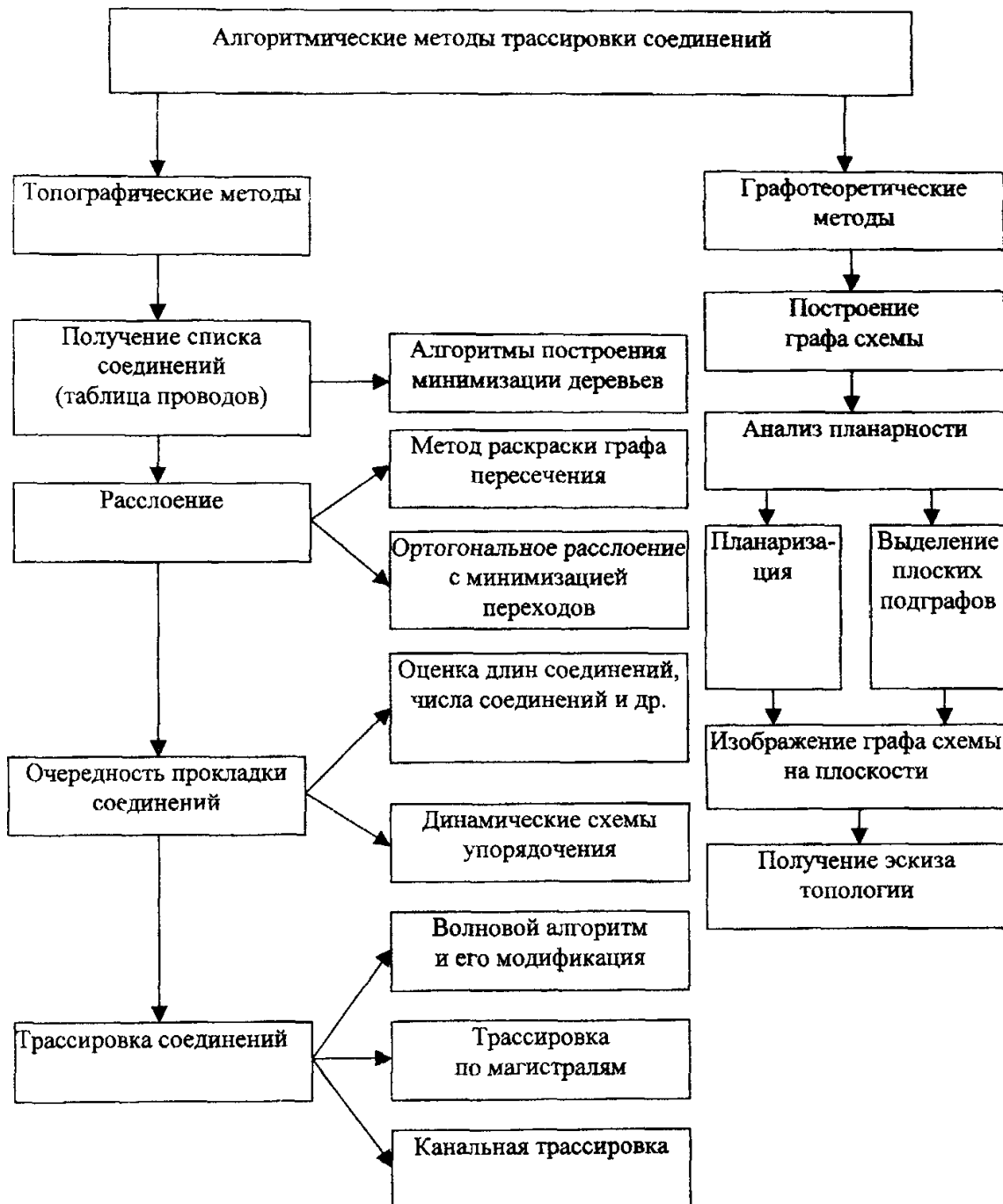


Рисунок 16.3 – Классификация алгоритмов трассировки

Вопрос № 17. Электро- и радиоизмерительные приборы, классификация, методы измерения электрических параметров.

Измерительный прибор (ИП) – средство измерений, предназначенное для выработки определенного вида сигнала измерительной информации в форме доступной для непосредственного восприятия наблюдателем.

Измерительные приборы, используемые в радиоэлектронике, по принципу действия можно в самом общем виде разделить на **электромеханические** и **электронные**. К радиоизмерительным приборам относят только электронные, в состав которых в качестве отсчетного узла могут еще входить электромеханические устройства. По структурной схеме электронные приборы делятся на аналоговые и цифровые.

Аналоговый измерительный прибор – средство измерения, показания которого являются непрерывной функцией изменения измеряемой величины. Аналоговые приборы делятся на четыре основные группы.

В первую – самую большую – входят приборы для **измерения параметров и характеристик сигналов** (например, осциллографы, вольтметры, частотомеры, анализаторы спектра и т.д.).

Вторую группу образуют приборы для **измерения параметров и характеристик активных и пассивных элементов электрических схем**. Это – измерители сопротивления, емкости, индуктивности, параметров микросхем, транзисторов, а также приборы для снятия частотных и переходных характеристик.

Третья группа – **измерительные генераторы**, являющиеся источниками сигналов различной амплитуды, формы и частоты.

В четвертую группу входят **элементы измерительных схем** такие как: преобразователи, аттенюаторы, циркуляторы, фазовращатели, направленные ответвители и т.д.

Цифровым измерительным прибором (ЦИП) называется средство измерения, автоматически вырабатывающее дискретные сигналы измерительной информации, показания которого представлены в цифровой форме (ГОСТ 16263-70).

ЦИП имеют перед аналоговыми ряд преимуществ:

- удобство и объективность отсчета измеряемых величин;
- высокая точность результатов измерения;
- широкий динамический диапазон при высокой разрешающей способности;
- высокое быстродействие из-за отсутствия подвижных электромеханических элементов;
- возможность автоматизации процесса измерения, включая автоматический выбор полярности и пределов измерения;

- возможность использования новейших достижений микроэлектроники при конструировании и изготовлении;

- высокая устойчивость к внешним механическим и климатическим воздействиям.

По конструктивному исполнению все радиоизмерительные приборы делятся на **показывающие** и **регистрирующие**, среди которых различают **самопишущие** и **печатающие**.

По принципу действия измерительные приборы делятся на ряд классов:

Измерительные приборы прямого действия – в них предусмотрено одно или несколько преобразований сигнала измерительной информации в одном направлении, т.е. без применения цепей обратной связи; например, амперметры, вольтметры.

Измерительные приборы сравнения – они предназначены для непосредственного сравнения измеряемой величины с известной величиной; например, электроизмерительный потенциометр.

Интегрирующие измерительные приборы – устройства, в которых подводимая величина интегрируется по времени или по другой независимой переменной; например, электрический счетчик энергии.

Суммирующие измерительные приборы – приборы, показания которых функционально связаны с суммой двух или нескольких величин, подводимых к ним по различным каналам; например, ваттметр для измерения суммы мощностей нескольких электрических генераторов.

Как и измерения других физических величин, радиоизмерения базируются на определенных принципах. Под принципом измерений понимается совокупность физических явлений, на которых основаны измерения.

Совокупность приемов использования принципов и средств измерений определяется как метод измерений, являющийся основной характеристикой измерений. Методы измерений подразделяют на метод непосредственной оценки и метод сравнения (рисунок 17).

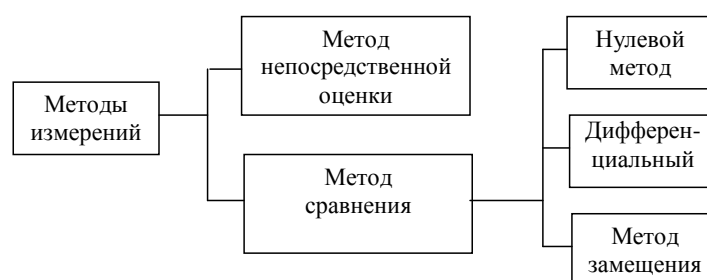


Рисунок 17 – Классификация методов измерения

При **методе непосредственной оценки** численное значение измеряемой величины определяется непосредственно по показанию измерительного прибора (например, измерение напряжения с помощью вольтметра).

Метод сравнения – метод измерений, при котором измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой. Это может быть,

например, измерение уровня напряжения постоянного тока путем сравнения с ЭДС нормального (эталонного) элемента. Различают следующие разновидности метода сравнения:

- **нулевой метод**, при котором действие измеряемой величины полностью уравновешивается образцовой;

- **дифференциальный метод**, когда измеряется разница между измеряемой величиной и близкой ей по значению известной эталонной (например, измерение электрического сопротивления методом неуравновешенного моста);

- **метод замещения**, при котором действие измеряемой величины замещается образцовой (например, с помощью последовательно проводимых во времени действий).

Из всех перечисленных методов нулевой метод обеспечивает наибольшую точность измерений физической величины. Его разновидностями являются:

- **компенсационный метод**, при котором действие измеряемой величины компенсируется (уравновешивается) образцовой;

- **мостовой метод**, когда достигают нулевого значения тока в измерительной диагонали моста, в которую включается чувствительный индикаторный прибор (обычно нуль-индикатор).

По характеру изменения измеряемой величины во времени различают статический и динамический режимы измерений.

Статический режим измерений – это режим измерений, при котором средство измерений работает в статическом режиме, т.е. когда выходной сигнал остается неизменным в течение времени его использования (или меняется так медленно, что каждый результат измерения может быть выражен только одним числом).

Динамический режим измерений – это режим измерений, результатом которого является функциональная зависимость измеряемой величины от времени, т.е. когда выходной сигнал средства изменяется во времени, в соответствие с изменением по времени измеряемой величины. Таким образом, динамические измерения применяют для измерения параметров величин, имеющих зависимость от времени. Пример динамического измерения – определение мгновенных значений радиотехнических сигналов в течение какого-либо интервала времени. Для оценки точности результатов динамических измерений необходимо знание динамических свойств (погрешностей) средств измерений.

Необходимо также различать измерения параметров **детерминированных величин** (сигналов) и **характеристик случайных величин** (сигналов, процессов). В первом случае измеряются заведомо постоянные, либо меняющиеся по известному закону величины. Во втором – в результате некоторого числа опытов определяются характеристики законов распределения измеряемых случайных величин (амплитуды, длительности импульсов и т.д.).

Вопрос № 18. Технологическая подготовка производства.

Техническая подготовка производства состоит из конструкторской (КПП) и технологической (ТПП) подготовки производства.

Технологическая подготовка производства – это совокупность взаимосвязанных процессов, обеспечивающих технологическую готовность предприятия к выпуску изделия заданного качества при установленных сроках, объеме выпуска и материальных затратах. Она обуславливает освоение серийного выпуска новых образцов изделий, повышение технического уровня и качества продукции, улучшение всех технико-экономических показателей работы предприятия.

Технологическая подготовка производства базируется и осуществляется в соответствии с правилами, установленными Государственными стандартами **Единой системы технологической подготовки производства (ЕСТПП)**.

Главная задача ЕСТПП, основанной на принципе стандартизации, заключается в обеспечении необходимой мобильности промышленности, которая при высоких производственно-технических показателях может быть оперативно переключена на выпуск требуемой номенклатуры новых изделий.

Стандарты ЕСТПП состоят из следующих классификационных групп: основные положения; правила организации и управления процессом ТПП; правила обеспечения технологичности конструкции изделий; правила разработки и применения технологических процессов и средств технологического оснащения; правила применения технических средств механизации и автоматизации инженерно-технических работ.

ЕСТПП предусматривает широкое применение прогрессивных типовых технологических процессов, стандартизованных технологической оснастки и оборудования, средств механизации и автоматизации не только технологических процессов, но и инженерно-технических и управленческих работ. Она включает в себя решение следующих функциональных задач: 1) обеспечение технологичности конструкции изделий; 2) разработку технологических процессов; 3) проектирование и изготовление средств технологического оснащения; 4) организацию и управление процессом ТПП.

При решении конкретных задач ТПП для специфических условий отрасли и различных типов производства предусматривается возможность на базе основных положений ЕСТПП разрабатывать стандарты организаций.

Документацию на конкретные методы и средства ТПП разрабатывают на основе следующих документов и стандартов ЕСТПП:

- 1) ЕСКД – единой системы конструкторской документации;
- 2) ЕСТД – единой системы технологической документации;
- 3) Единой системы классификации и кодирования технико-экономической информации (в том числе – чертежей изделий, технологических процессов, операций и т.п.);

- 4) Государственной системы обеспечения единства измерений;
- 5) документации по механизации и автоматизации обработки информации, используемой при ТПП и управлении ею;
- 6) нормативно-технической документации на типовые и другие прогрессивные технологические процессы и методы их типизации и стандартизации, средства технологического оснащения и методы их унификации, стандартизации, средства механизации и автоматизации инженерно-технических работ, методы нормирования и нормативно-справочные данные и др.

Основные этапы работ по ТПП производятся параллельно с этапами конструкторской подготовки. На стадии разработки конструкторской документации «**Техническое предложение**» технологическую документацию допускается не разрабатывать. Разработка технологической документации на стадии «**Предварительный проект**» производится с присвоением литеры «**П**» и соответствует стадиям разработки конструкторской документации «**Эскизный проект**» и «**Технический проект**». Предварительный проект содержит перечни специальных и типовых технологических процессов, технических заданий на разработку специального технологического оснащения.

На стадии разработки «**Рабочей документации опытного образца**» производится проектирование технологической документации для изготовления и испытания опытного образца. По результатам его испытаний корректируется конструкторская документация, и вносятся необходимые изменения в технологическую документацию, после чего ей присваивается литера «**О**». При изготовлении и испытании установочной серии производится корректировка технологических документов с присвоением им литеры «**А**».

При серийном или массовом производстве осуществляется дальнейшее уточнение конструкторских и технологических документов. Технологическим документам, окончательно отработанным и проверенным в производстве, присваивается литера «**Б**».

Трудоемкость ТПП в значительной степени зависит от типа и вида производства, сложности изготавливаемого изделия, его технологической характеристики и организационно-технической структуры предприятия.

В общем случае объем и содержание ТПП включает в себя:

- проведение всего комплекса работ по проектированию технологических процессов;
- конструирование и изготовление технологического оснащения (приспособлений, инструмента, нестандартного оборудования, средств механизации и автоматизации производственных процессов);
- разработку технологии контроля и средств для его осуществления; установку и освоение нового оборудования;
- расчет норм расхода материалов, рабочей силы, необходимых производственных площадей;
- проектирование внутрицехового и межцехового транспорта;
- разработку системы планирования производства.

В перечисленных работах участвуют научно-исследовательские институты, проектно-конструкторские организации, предприятия-смежники, большинство цехов и других подразделений завода-изготовителя нового изделия.

Создание **автоматизированных систем технологической подготовки производства (АСТПП)** позволяет повысить производительность и качество проектных работ, сократить сроки технологической подготовки и уменьшить количество инженерно-технических работников, необходимых для ее осуществления, повысить качество проектируемых технологических процессов. В АСТПП более 60% объема инженерных работ выполняется на ЭВМ.

Технической основой создания и внедрения АСТПП является унификация технологических процессов и применяемой оснастки на основе типовых и групповых процессов.

В составе АСТПП выделяют ряд подсистем.

Подсистемами общего назначения являются: информационный поиск; кодирование; контроль и преобразование информации, формирование исходных данных для автоматизированных систем управления различных уровней; оформление технической документации.

Подсистемы специального назначения включают в себя обеспечение технологичности конструкции; проектирование технологических процессов; конструирование средств технологического оснащения; управление ТПП; изготовление средств технологического оснащения. Состав подсистем специального назначения следует устанавливать для каждого предприятия с учетом специфики ТПП и экономической целесообразности.

Вопрос № 19. Отработка конструкций РЭС на технологичность.

Технологичность конструкции определяется как совокупность ее свойств, проявляемых при оптимальных затратах труда, средств, материалов и времени, требуемых на необходимую техническую подготовку производства, изготовление, эксплуатацию и ремонт по сравнению с соответствующими показателями аналогичных конструкций того же назначения при обеспечении установленных показателей качества.

Стандартами ЕСТПП перед разработкой технологических процессов предусмотрена обязательная отработка конструкций на технологичность.

Основная задача отработки конструкции изделия на технологичность состоит в повышении производительности труда, снижении материальных затрат и сокращении времени на проектирование, технологическую подготовку производства, изготовление, техническое обслуживание и ремонт изделия при обеспечении его высокого качества. Отработка конструкции на технологичность ведется конструкторами и технологами на всех стадиях проектирования и изготовления изделий.

Основным критерием при выборе принципиальной схемы нового изделия является технологичность конструкции при равноценности всех вариантов с эксплуатационной точки зрения (по выходным параметрам). Например, конструкцию изделия по выбранной схеме можно оформить из нескольких простых деталей, изготавливаемых точением, холодной штамповкой, прессованием или другими методами, или в виде одной сложной детали, изготавливаемой литьем под давлением. Для обеспечения требования технологичности конструкций деталей и сборочных единиц нужно, ориентируясь на различные методы изготовления, наметить конструктивные варианты и выявить из них наиболее рациональные в технологическом отношении.

Согласно стандартам ЕСТПП различают два вида технологичности конструкции: производственную и эксплуатационную.

Производственная технологичность конструкции изделия обеспечивается сокращением затрат средств и времени на конструкторскую и технологическую подготовку производства и процессы изготовления изделия.

Эксплуатационная технологичность проявляется в сокращении затрат средств и времени на техническое обслуживание и ремонт изделия.

Эксплуатационная технологичность достигается в процессе конструирования изделия, производственная – в процессе конструирования и ТПП.

К основным параметрам, по которым определяется технологичность изделия, относятся:

- вид изделия (деталь, сборочная единица, комплекс, комплект), определяющий его главные конструктивно-технологические признаки;

- объем выпуска и тип производства, характеризующие степень технологического оснащения, механизации и автоматизации технологических процессов.

Оценка технологичности конструкции может быть качественной и количественной.

Качественная оценка определяет в основном достоинство составных частей конструкции (деталей, сборочных единиц) и выражает технологичность, обобщенную на основе опыта исполнителя. **Количественная оценка** технологичности конструкции осуществляется с помощью системы показателей, которые используются для сравнительной оценки вариантов конструкции в процессе проектирования изделия, определения уровня технологичности разработанного изделия, накопления статистических данных и прогнозирования технического совершенствования конструкции изделия. Последовательность анализа конструкции изделия при выборе показателей технологичности представлена на рисунке 19.

К основным показателям технологичности конструкции относятся:

1) абсолютный технико-экономический показатель – трудоемкость изготовления изделия:

$$T_{\text{и}} = \sum_{i=1}^n T_i,$$

где T_i – трудоемкость изготовления i -й составной части изделия; n – количество составных частей изделия;

2) уровень технологичности конструкции по трудоемкости изготовления:

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

где $T_{\text{б.и}}$ – базовый показатель трудоемкости;

3) технологическая себестоимость изделия:

$$C_{\text{т}} = C_{\text{м}} + C_{\text{з.п.}} + C_{\text{ц.р.}},$$

где $C_{\text{м}}$, $C_{\text{з.п.}}$, $C_{\text{ц.р.}}$ – соответственно стоимость материалов, заработная плата и цеховые расходы;

4) уровень технологичности конструкции по технологической себестоимости:

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

где $C_{\text{т}}$ – достигнутая технологическая себестоимость изделия; $C_{\text{б.т}}$ – базовый показатель технологической себестоимости изделия.

К дополнительным показателям технологичности относятся: относительные трудоемкости заготовительных работ, ремонтов, относительные и удельные себестоимости отдельных видов работ, а также коэффициенты унификации, стандартизации, применяемости материала, точности обработки и шероховатости поверхности (технические показатели).



Рисунок 19 - Последовательность анализа конструкции изделия на технологичность

Рекомендуемый дополнительный технический показатель технологичности – коэффициент унификации изделия. Он характеризует преимущество проектируемой конструкции и определяется как:

$$K_y = \frac{E_y + D_y}{E + D},$$

где $E_y = E_{y.z.} + E_{y.n.} + E_{ст}$ – число унифицированных сборочных единиц в изделии, равное сумме заимствованных $E_{y.z.}$, покупных $E_{y.n.}$ и стандартных $E_{ст}$ единиц; D_y – число унифицированных деталей, являющихся составными частями изделия и не вошедших в E_y (стандартные крепежные детали не учитываются); $E = E_y + E_{ор.}$ – количество сборочных единиц в изделии; $D = D_y + D_{ор.}$ – количество деталей, являющихся составными частями изделия; $E_{ор.}$ и $D_{ор.}$ – число оригинальных сборочных единиц и деталей в изделии.

Выражение коэффициента унификации является исходным для получения его отдельных составляющих: коэффициентов унификации сборочных

единиц и деталей, стандартизации конструкции изделия и его составных частей, характеризующих преемственность конструкции.

Количество выбираемых показателей по разработанному изделию должно быть минимальным, но достаточным для оценки технологичности изделия.

Отработка конструкции изделия и его составных частей на технологичность производится на всех стадиях разработки конструкторской документации. Основные стадии отработки конструкции изделия на технологичность приведены в нормативных документах. Во время разработки технического задания по аналогам устанавливаются базовые показатели технологичности и допустимые отклонения от них. На стадии **«Техническое предложение»** определяется оптимальный вариант по технологичности, и выявляются оригинальные составные части компоновки изделия, требующие применения новых технологических процессов и оснащения. На стадии **«Эскизный проект»** производятся отработка конструктивных схем и компоновок с учетом используемых материалов и габаритных размеров, принятие решений о технологичности конструкции и технического обслуживания изделия.

Вопрос № 20. Классификация коммутационных плат и методов их изготовления.

Коммутационные платы – это плоские элементы конструкции, которые состоят из проводящих и диэлектрических участков и обеспечивают соединение элементов электрической цепи.

Классификацию коммутационных плат можно провести по нескольким признакам: **по частотному диапазону** (низкочастотные и высокочастотные); **по жесткости диэлектрического основания** (жесткие и гибкие); **по количеству диэлектрических и проводящих слоев** (однослойные и многослойные); **по структуре проводящих участков** (печатные, рельефные, тканые) и т.д.

Печатные платы – это элементы конструкции, которые состоят из плоских проводников в виде участков металлизированного покрытия, размещенных на диэлектрическом основании и обеспечивающих соединение элементов электрической цепи. Они получили широкое распространение в производстве модулей, ячеек и блоков РЭС.

Элементами печатных плат являются диэлектрическое основание, металлическое покрытие в виде рисунка печатных проводников и контактных площадок, монтажные и фиксирующие отверстия. Они должны соответствовать требованиям ГОСТ 23752-86 и отраслевым стандартам. Конструктивно-технологические разновидности ПП представлены на рисунке 20.1.



Рисунок 20.1 - Классификация печатных плат

Все процессы изготовления печатных плат можно разделить на субтрактивные и аддитивные.

В субтрактивных методах (*subtratio* – отнимание) в качестве основания для печатного монтажа используют фольгированные диэлектрики, на которых формируется проводящий рисунок путем удаления фольги с непро-

дящих участков. Дополнительная химико-гальваническая металлизация монтажных отверстий привела к созданию комбинированных методов изготовления ПП.

Аддитивные (*additio* – прибавление) методы основаны на избирательном осаждении токопроводящего покрытия на диэлектрическое основание, на которое предварительно может наноситься слой клеевой композиции.

На рисунке 20.2 приведена классификация методов изготовления печатных плат в зависимости от способа получения элементов печатного монтажа и защитного рисунка.

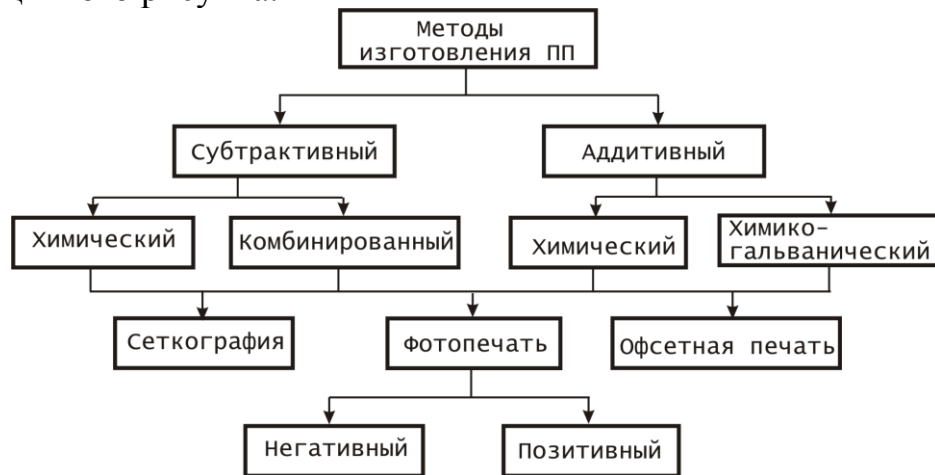


Рисунок 20.2 - Классификация методов изготовления печатных плат

Разновидностью аддитивных методов является **фотоформирование** проводящего рисунка схемы, при котором из процесса исключается фоторезист. На поверхность заготовки наносится состав, содержащий ионы металла (меди, палладия), которые восстанавливаются под действием ультрафиолетового излучения через фотошаблон или посредством сканирования светового луча по поверхности заготовки ПП. Облученный слой инициирует последующее формирование толстослойной металлизации (18...35 мкм). Полученный печатный монтаж обладает хорошей адгезией к диэлектрику, а печатные проводники имеют ширину 0.08...0.1 мм.

Характерными особенностями различных методов изготовления ПП являются:

- способ получения защитного рисунка;
- способ получения печатного рисунка.

К основным методам, применяемым в промышленности для создания защитного рисунка печатного монтажа, относятся:

- фотохимический (фотопечать);
- сеткографический (сеткография),
- офсетная печать.

Новыми направлениями в проектировании и изготовлении коммутационных плат являются рельефные и тканые платы.

Рельефная печатная плата (РПП) представляет собой диэлектрическое основание 1, на котором расположены проводники 2 в виде металлизи-

рованных канавок и сквозные отверстия 3 конической формы (рисунок 20.3). Канавки и переходные отверстия заполняются сплавом Розе 4. Обычно РПП бывают двусторонними. Рельефный проводник по ширине в 2...3 раза меньше печатного плоского проводника того сечения, имеет более надежное сцепление с основанием и не выступает над поверхностью платы. Проводники на одной стороне платы располагаются только в одном направлении – перпендикулярно проводникам на другой стороне. Малая ширина проводников, отсутствие контактных площадок и строгая ортогональность проводников позволяют в 5...6 раз повысить плотность монтажа.

РПП изготавливают обычно электрохимическим способом. Канавки получают фрезерованием на станках с числовым программным управлением (ЧПУ) или прессованием. Остальные операции осуществляются по типовому технологическому процессу.

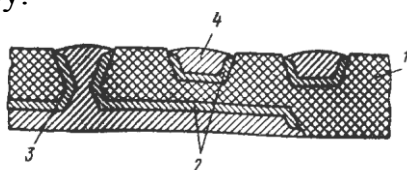


Рисунок 20.3 – Сечение РПП

Тканые (плетеные) платы (рисунок 20.4) изготавливаются из провода на ткацком станке с программным управлением. Основание платы 1 состоит из переплетных проводов 3 и 4, образующих отверстия 5. В местах крепления элементов 2 с проводов удаляется изоляция. Провода прерываются или соединяются пайкой в соответствии с электрической схемой. Такие платы обладают высокими изоляционными свойствами. Наиболее полно их преимущество реализуется при монтаже интегральных схем планарными выводами. Вследствие высокой производительности текстильных станков изготовление тканых плат в 5...6 раз дешевле аналогичных по структуре ПП или плат с проводным монтажом.

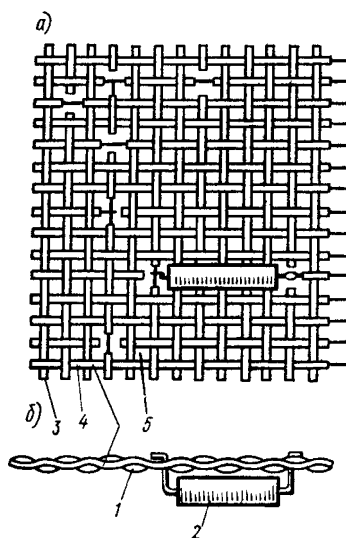


Рисунок 20.4 – Тканая (плетеная) плата

Вопрос № 21. Неразъемные и разъемные электрические соединения.

Под неразъемным понимается такое соединение, разборка которого сопровождается разрушением материалов и элементов, с помощью которых оно осуществлено.

Основные методы выполнения неразъемных электрических соединений, которые применяются в производстве РЭС, приведены на рисунке 21.1.



Рисунок 21.1 – Классификация методов выполнения неразъемных электрических соединений

Пайкой называется процесс соединения металлов в твердом состоянии путем введения в зазор расплавленного припоя, взаимодействующего с основным металлом и образующего жидкую металлическую прослойку, кристаллизация которой приводит к образованию паяного шва.

Паяные электрические соединения очень широко применяют при монтаже электронной аппаратуры из-за низкого и стабильного электрического сопротивления, универсальности, простоты автоматизации, контроля и ремонта. Однако этому методу присущи и существенные недостатки: высокая стоимость используемых цветных металлов и флюсов, длительное воздействие высоких температур, коррозионная активность остатков флюсов, выделение вредных веществ.

Сварка – это процесс получения неразъемного соединения материалов под действием активирующей энергии теплового поля, деформации, ультразвуковых колебаний или их сочетаний. По сравнению с пайкой она характеризуется следующими преимуществами: более высокой механической прочностью получаемых соединений, отсутствием присадочного материала, не-

значительной дозированной тепловой нагрузкой ЭРЭ, возможностью уменьшения расстояний между контактами. К недостаткам метода следует отнести: критичность при выборе сочетаний материалов, увеличение переходного сопротивления из-за образования интерметаллидов, невозможность группового контактирования соединения, сложность ремонта.

Соединения, основанные на деформации контактируемых деталей, проводов или выводов, выполняются в холодном состоянии. Под действием значительных механических усилий, приложенных к этим элементам, происходит разрушение оксидных пленок и образование надежного вакуумплотного соединения. Оно характеризуется высокой механической прочностью, низкой стоимостью, легко поддается механизации, не создает помех в цепях низкого напряжения.

Соединение токопроводящими клеями и пастами в отличие от пайки и сварки не вызывает изменения структуры соединяемых материалов, так как контактирование осуществляется при низких температурах, упрощает конструкцию соединений и применяется в тех случаях, когда другие способы невозможны: в труднодоступных местах, при ремонтных работах и т.д. Однако широкого распространения в серийном производстве метод не получил из-за невысокой проводимости, низкой термостойкости и надежности соединений.

Разъемные электрические соединения – это контактные коммутационные устройства, предназначенные для оперативного соединения и разъединения электрических цепей в обесточенном состоянии.

По **назначению** разъемы делятся на: междублочные – для соединения/разъединения блоков в блочных конструкциях РЭА; блочные – для соединения блоков (аппаратов) между собою с помощью кабелей; кабельные – для соединения кабелей (жгутов проводов) между собою; проходные – для соединения двух кабелей или жгутов через стенку; разъемы для печатного монтажа – для соединения/разъединения печатных плат в блоках; специального назначения.

По **конструктивному признаку** разъемы делятся на цилиндрические (круглые), прямоугольные и разъемы для печатных плат.

По **виду соединяемых цепей** разъемы подразделяются на низкочастотные (НЧ) напряжением до 1.5 кВ, радиочастотные (РЧ) напряжением свыше 1.5 кВ и комбинированные.

НЧ разъем предназначен для работы в электрических цепях переменного и импульсного токов с частотой до 3 МГц с рабочей длительностью сигнальных фронтов импульсов до 0.1 нс.

РЧ разъем предназначен для соединения и разъединения радиочастотных трактов с волновым сопротивлением 50 Ом или 75 Ом.

При выборе типа разъема следует учитывать следующие рекомендации: цилиндрические по сравнению с прямоугольными более устойчивы к воздействиям климатических и механических факторов, обеспечивают более надежную заделку жгутов, проводов и кабелей, дают выигрыш в габаритах, хорошо экранируются; прямоугольные разъемы более удобны для производства мон-

тажа при большой плотности контактов, хорошо сопрягаются с блочными конструкциями РЭА, могут быть выполнены на большее количество контактов и т.д.; навесные соединители для печатных плат по сравнению с торцовыми имеют большие габариты, вес и стоимость, но при этом они обеспечивают большую износостойчивость и эксплуатационную надежность, не требуют высокой точности в изготовлении печатных плат, не усложняют трассировку печатного монтажа.

Пример конструктивного исполнения высокочастотного (ВЧ) разъема приведен на рисунке 21.2, а на рисунке 21.3 показаны примеры конструкций основных типов НЧ разъемов: прямоугольного, круглого, для микросхем.

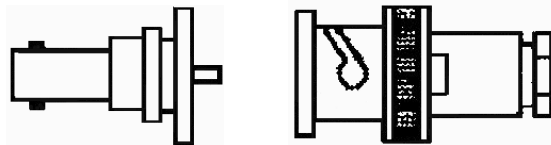
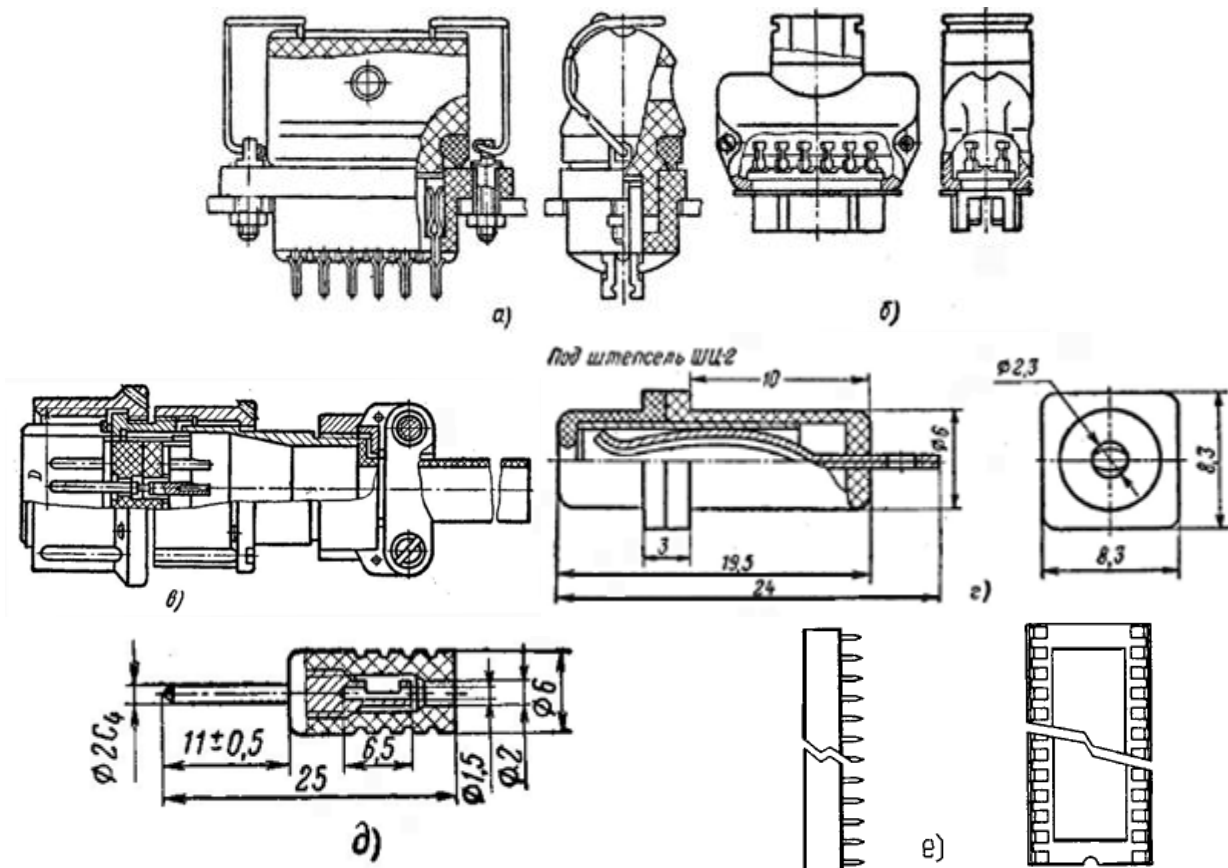


Рисунок 21.2 – Высокочастотные разъёмы СР-50-74 с байонетом



- а* – прямоугольный миниатюрный типа РПМ (розетка); *б* – типа РПМ (вилка);
в – вилка штексельного круглого малогабаритного разъёма типа 2РМ;
г – гнездо однополюсное типа ГИ2; *д* - штеккер типа ШЦ2;
е – панелька DIP для микросхем

Рисунок 21.3 – Низкочастотные разъёмы

Вопрос № 22. Контроль и испытания печатных плат.

Технологический процесс изготовления плат, особенно многослойных, состоит из большого числа сложных и взаимосвязанных операций, при выполнении которых возникают неучтенные и трудно предсказуемые возмущения, приводящие к отклонениям выходных параметров от номинальных. **Контроль и испытание ПП** предназначены для определения качества изготовленных изделий, под которым понимают степень их соответствия требованиям чертежа, технических условий, отраслевых и государственных стандартов. Основными **видами выходного контроля ПП** являются: контроль внешнего вида; инструментальный контроль геометрических параметров и оценка точности выполнения отдельных элементов, совмещения слоев; проверка металлизации отверстий и их устойчивости к токовой нагрузке; определение целостности токопроводящих цепей и сопротивления изоляции. Рассмотрим требования, предъявляемые к материалам и элементам печатного монтажа.

Металлизированные отверстия. Металлизация отверстий должна быть ровной, плотной, иметь толщину медного слоя не менее 25 мкм с мелкозернистыми пластичными осадками. Неровность металлизированного слоя свидетельствует о некачественной подготовке отверстий, создает нежелательные концентраторы напряжений, препятствует полному удалению из отверстий агрессивных реактивов и затрудняет процесс пайки. Неровность металлизированного слоя, проверяемая на контрольных микрошлифах, не должна превышать 50 мкм.

Контактные площадки металлизированных отверстий. Контактные площадки представляют собой области соединения проводников с металлизированным слоем отверстий, обеспечивающие электрические связи, а для наружных слоев также возможность пайки навесных элементов в монтажных отверстиях. Площадь контактных площадок на любом слое должна быть такой, чтобы не было их разрывов при сверлении, и оставался гарантированный пояс медной меди, соответствующий классу точности ПП. Разрывы контактных площадок даже при сохранении электрических связей могут уменьшить допустимое сечение проводников (например, при электрическом контроле плат на установках типа УКПМ цепь сохраняется при переключке шириной 30 мкм). Кроме того, разрывы на внутренних слоях многослойных печатных плат (МПП) способствуют проникновению агрессивных растворов, применяемых при изготовлении плат, в их структуру. Допускаемые разрывы контактных площадок наружных слоев вне зоны проводников уменьшают адгезию площадок к диэлектрику, особенно после термоудара в процессе пайки. Контактные площадки монтажных отверстий должны выдерживать без видимого отслаивания не менее трех перепаек. Частичное отслаивание отдельных контактных площадок наружных слоев не в зоне проводников считается допу-

стимым для переходных отверстий и может быть устранено с помощью эпоксидного клея.

Проводники наружных слоев и планарные контактные площадки. Адгезия рисунка схемы к диэлектрическому основанию платы должна соответствовать ТУ на фольгированный материал и проверяется отрывом проводника на технологическом поле платы. Не допускаются подтравливание рисунка (при осмотре платы под углом до оплавления покрытия должна быть видна медь розового цвета на торцах) и отслоение его участков от диэлектрика. Планарные контактные площадки должны выдерживать без отслоения не менее двух перепаек.

Проводники внутренних слоев МПП. По сравнению с проводниками наружных слоев проводники внутренних слоев МПП находятся в более выгодных эксплуатационных условиях: изолированы от внешних воздействий, в том числе от загрязнений, промежутки между ними после прессования заполняются диэлектрическим материалом, что обеспечивает прочное закрепление на слое.

Диэлектрическое основание ПП должно быть монолитным, однородным, без вздутий, расслоений, царапин и посторонних включений в диэлектрике. Цвет такого основания из стеклотекстолита однотонный без резких границ, выделяющих какие-либо области поверхности платы. Возможное изменение внешнего вида диэлектрического основания возникает вследствие поверхностных или внутренних дефектов материала, а также нарушений технологии изготовления плат. Такие отклонения должны рассматриваться как исключения.

Диэлектрическое основание слоев МПП. После вытравливания рисунка схемы на тонких внутренних слоях МПП снимается армирующее воздействие медной фольги на основание, в результате чего возникает линейная деформация. Линейную деформацию учитывают при расчете минимально допустимых размеров контактных площадок внутренних слоев МПП. При превышении установленного допуска контактные площадки могут быть разорваны при сверлении платы, что приведет к окончательному её браку.

Под испытанием ПП понимают экспериментальное определение электрических и механических характеристик при имитации условий эксплуатации или воспроизведения заданных воздействий климатических, механических и специальных факторов по заданной программе. Целью испытаний является проверка соответствия ПП ТУ и обеспечение их работы в условиях климатических, механических и электрических воздействий, предусмотренных техническими требованиями на аппаратуру.

Испытания подразделяют на: приемосдаточные, периодические, типовые.

Приемосдаточные испытания включают в себя:

- стопроцентную проверку плат на соответствие конструкторской документации и внешнему виду проводящего рисунка и диэлектрического основания;

- выборочный контроль – 5% односторонних печатных плат (ОПП) или двухсторонних печатных плат (ДПП) и 10% МПП – от ежедневной выработки на толщину металлизации в отверстиях;
- стопроцентный контроль деформации ПП;
- выборочный контроль (3% от партии, но не менее 3 шт.) паяемости контактных площадок и металлизированных отверстий;
- стопроцентный контроль правильности монтажных соединений на целостность цепей и отсутствие коротких замыканий;
- выборочную проверку сопротивления изоляции при ручном контроле (3% от партии, но не менее 5 шт.) и стопроцентную проверку при автоматизированном.

Периодические испытания проводят с целью проверки соответствия ПП требованиям ТУ для каждого метода изготовления отдельно не реже одного раза в течение 6 месяцев или при изменении технологического процесса. Испытаниям подвергаются не менее пяти плат при опытном и мелкосерийном производстве и не менее 10 плат при серийном производстве. Испытывают платы, прошедшие приемосдаточные испытания (в дальнейшем эти платы не используются). Периодические испытания состоят из:

- многократного изгиба гибких печатных плат (ГПП) и гибких печатных кабелей (ГПК). ГПП должны выдерживать пятикратный изгиб радиусом 10 мм, а ГПК – 150-кратный изгиб радиусом не более 3 мм на 90° в обе стороны от исходного положения;
- выборочной проверки паяемости (на 8...10 отверстиях и 5...10 контактных площадках), а также числа возможных перепаек (на 5...10 отверстиях и контактных площадках);
- выборочной проверки (3...5 цепей) целостности электрических цепей;
- выборочной проверки сопротивления изоляции в нормальных и повышенных климатических условиях (не менее чем на пяти парах проводников, в том числе цепей питания);
- термоударов (не менее трех) при температуре от –60 до +100 °С с последующим контролем внешнего вида и целостности соединений;
- воздействия повышенной влажности в течение 4 суток с последующим контролем сопротивления изоляции;
- воздействия повышенной (+100 °С) и пониженной (–60 °С) температуры среды в течение 2 часов с последующим контролем внешнего вида, целостности соединений и сопротивления изоляции;
- воздействия пониженного атмосферного давления (0.05 МПа) с последующим контролем прочности изоляции;
- испытания на устойчивость при механических воздействиях и на надежность (в составе узлов, блоков и аппаратуры в целом в соответствии с частным ТУ).

Типовые испытания проводят по программе, составляемой предприятием-изготовителем ПП, и согласовывают с разработчиком.

Вопрос № 23. Технология и оборудование для подготовки печатных плат и компонентов к сборке и монтажу.

Технологический процесс сборки и монтажа узлов на печатных платах (УПП) состоит из следующих этапов: входной контроль комплектующих элементов; подготовка комплектующих элементов к монтажу; сборка компонентов на печатных платах; технология монтажа ЭРЭ и микросхем на печатных платах; контроль.

Входной контроль – это ТП проверки поступающих на завод-потребитель ЭРЭ, ИС и ПП по параметрам, определяющим их работоспособность и надежность перед включением этих элементов в производство. Затраты на проведение входного контроля значительно меньше затрат, связанных с испытаниями и ремонтом собранных плат, блоков и аппаратуры.

Для контроля резисторов, конденсаторов, транзисторов, ИС, ПП разработаны **многочисленные тестеры с программным управлением режимом**, которые позволяют не только измерить параметры элементов, но и разделить их на заданные группы.

Подготовка комплектующих элементов к монтажу. Подготовка ЭРЭ и ИС включает распаковку компонентов, рихтовку, зачистку, формовку, обрезку и лужение выводов, размещение компонентов в технологической таре в количестве, достаточном для выполнения производственного задания.

Рихтовка (выпрямление), формовка и обрезка аксиальных и радиальных выводов, выводов транзисторов осуществляется на групповой технологической оснастке, представляющей собой **штамп (формующий, отрезной) с пневматическим приводом и набором сменных элементов**.

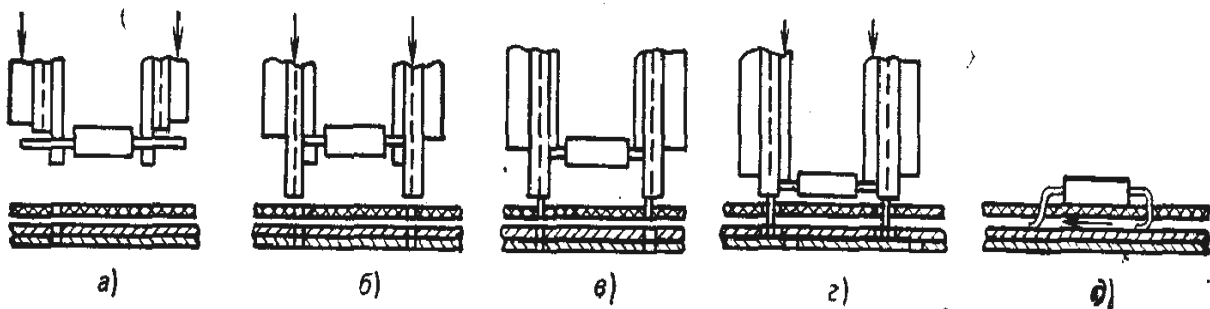
Сборка компонентов на ПП состоит из подачи их к месту установки, ориентации выводов относительно монтажных отверстий или контактных площадок, сопряжения со сборочными элементами и фиксации в требуемом положении. Она в зависимости от характера производства может выполняться вручную, механизированным или автоматизированным способами.

Применение ручной сборки экономически выгодно при производстве не более 16 тыс. плат в год партиями по 100 шт.

Механизированная установка с пантографом состоит из монтажного стола с двухкоординатным перемещением, на котором укрепляется держатель одной или нескольких плат, магазина компонентов, установочной головки, механизма фиксации компонентов и устройства позиционирования стола. Компоненты с аксиальными и радиальными выводами поступают на сборку клееными в ленту в заданной последовательности (рисунок 23.1), а призматические компоненты подаются в зону установки из вертикально расположенных магазинов.

В автоматических станках позиционирование сборочного стола осуществляется с высокой скоростью и точностью (± 0.025 мм) при помощи безынерционных шаговых двигателей, управляемых от ЭВМ. Одновременно

автоматизируется весь комплекс работ по установке и фиксации компонентов на плате, включая контроль. Возможность гибкого управления сборочным оборудованием и высокая производительность (18...24 тыс. элементов/час) позволяют использовать их как в условиях серийного, так и крупносерийного производства. Однако стоимость такого оборудования в 5...7 раз выше стоимости станков с пантографами, повышаются требования к жесткости конструкции станка и точности выполнения рисунка ПП.



a – вырезка ЭРЭ из ленты; *б* – гибка выводов; *в* – ориентация выводов; *г* – сопряжение элемента и подгибка выводов; *д* – фиксация выводов

Рисунок 23.1 – Последовательность работы механизированной укладочной головки

Технология монтажа ЭРЭ и микросхем на печатных платах. Технологический процесс монтажа состоит из следующих операций: нанесение и сушка флюса; предварительный нагрев платы и компонентов; пайка; обрезка выводов; очистка.

Нанесение флюса на соединяемые поверхности осуществляется различными способами, выбор которых определяется составом флюса, технологической схемой пайки, способом закрепления выводов в отверстиях, степенью автоматизации и экономичностью. Наибольшее распространение получили следующие способы нанесения флюса: кистью, погружением, протягиванием, накатыванием, распылением, вращающимися щетками, которые применяются в единичном и серийном производстве. При массовом изготовлении микроблоков РЭС на ПП используют пенное или волновое флюсование.

Перед пайкой **флюс подсушивается** при температуре 80...100 °С, а плата подогрывается, так как при соприкосновении жидкого флюсующего состава с расплавленным припоем происходит бурное кипение растворителя с образованием значительного количества газов и паров, которые оттесняют расплавленный припой от зоны пайки и приводят к пористости монтажных соединений. Контактное расплавление припоя с невысохшим флюсом охлаждает его поверхностные слои за счет теплоты парообразования, что ухудшает качество пайки. Предварительный нагрев платы также способствует установлению теплового баланса в системе «плата - припой», уменьшает тепловой удар, внутренние напряжения в соединениях и коробление ПП.

Предварительная тепловая обработка смонтированных блоков обычно проводится в два этапа: сначала при температуре кипения постепенно уда-

ляется растворитель флюса, а затем плату интенсивно нагревают до температуры 120...150 °С. Для этого применяют **радиационные нагревательные плиты** или **трубчатые инфракрасные излучатели**, которые располагают под движущимися платами.

Групповая пайка компонентов со штыревыми выводами проводится волной припоя на автоматизированных установках модульного типа, которые оснащают конвейерами с постоянным или регулируемым углом наклона относительно зеркала припоя (рисунок 23.2). В состав **автоматической линии пайки** входят: конвейер; пенный и волновой флюсователь; подогреватели флюса и платы; модули пайки; устройства управления модулями.

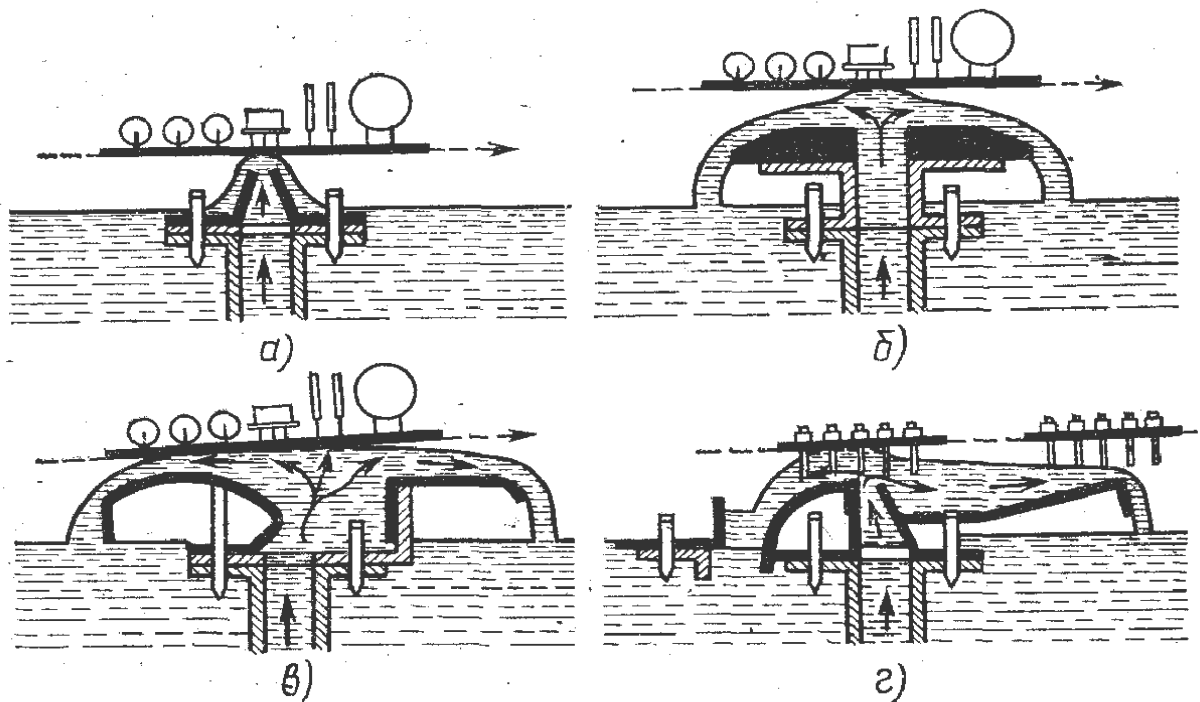


Рисунок 23.2 – Способы пайки обычной (а), широкой (б), лямбда (в) и высокой лямбда-волной (г) припоя

После пайки на поверхности плат остается некоторое количество флюса и продуктов его разложения, которые способны вызвать коррозию контактных соединений и ухудшить диэлектрические характеристики используемых материалов. Поэтому предусматривается **очистка смонтированных ПП**, способ проведения которой определяется степенью и характером загрязнений, требуемой надежностью выполнения операции. Обычно применяют отмывку в различных моющих средах. Технологически просто происходит удаление остатков водорастворимых флюсов путем промывки плат в проточной горячей воде с использованием мягких щеток или кистей. Следы канифольных флюсов удаляются промывкой в течение 0.5...1 минут в таких растворителях, как спирт, смесь бензина и спирта (1:1) или фреона и ацетона (7:1), трихлорэтилен, четыреххлористый углерод и др. Отмывка выполняется в **специальных вибрационных установках**, колеблющихся с частотой 50 Гц и амплитудой 1...2 мм, на волне моющего раствора со щетками или струйным

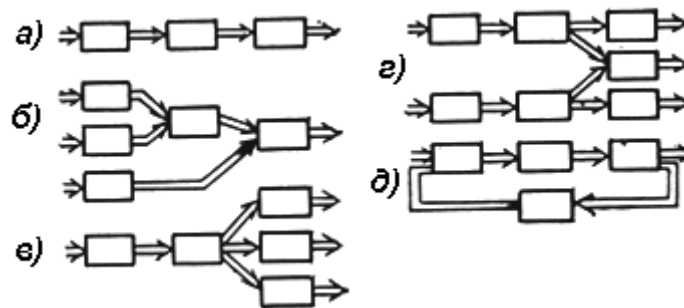
методом. Если печатный монтаж способен выдержать температуру паровой обработки, то рекомендуются **эффективные установки**, в которых очистная жидкость, конденсируясь на поверхности холодного изделия, растворяет остатки флюса. Перспективной является очистка плат с применением ультразвуковых (УЗ) колебаний частотой 20...22 кГц и амплитудой 0.5...1 мм в спирто-бензиновой или спирто-фреоновой смеси.

Контроль, регулировку и наладку УПП производят на специальных участках, оснащенных установками автоматического контроля логических типовых элементов замены (ТЭЗ), стендами контроля специальных ТЭЗ, установками демонтажа ИС и монтажной оснасткой. Логические ТЭЗ контролируют с помощью диагностических тестов, т.е. набора входных сигналов, и последующего сравнения выходных сигналов контролируемого и эталонного ТЭЗ. Достоверность и высокую производительность контроля обеспечивают системой автоматического контроля.

Вопрос № 24. Математическое моделирование технологических процессов и технологических систем.

Технологический процесс производства РЭА может содержать заготовительные, обрабатывающие, сборочные, испытательные и контрольно-разбраковывающие операции, каждая из которых описывается своей **математической моделью (ММ)**.

Для количественного описания ТП необходимо определить взаимосвязи между его контролируемыми параметрами, т.е. построить ММ процесса в целом. При этом удобно составить обобщенную структурную схему ТП или исследуемой его части. Среди множества разнообразных ТП можно выделить **типовые** (рисунок 24): простейшая последовательная структура; сходящаяся структура; расходящаяся структура; сходящаяся-расходящаяся (параллельная) структура; структура с реверсом (материальной обратной связью).



а – последовательная; *б* – сходящаяся; *в* – расходящаяся; *г* – параллельная; *д* – с обратной связью

Рисунок 24 – Структурные схемы технологических процессов

При использовании ЭВМ необходимы формализованные **модели связи элементов ТП**. Эти модели можно представить в виде схем сопряжения, соединяющих входы и выходы элементов. Для этого используются понятия входных \vec{X} и выходных \vec{Y} контактов элемента, а схему сопряжения описывают оператором сопряжения $\{\vec{Y}_i^k\} = \{R[x_i^j]\}$. Оператор сопряжения можно задать в виде таблицы, в которой на пересечении строк с номерами элементов j и столбцов с номерами контактов i располагаются пары чисел (k, l) , указывающие номер элемента k и номер контакта l , с которыми соединен контакт F_i^j . Операторы сопряжения удобны при автоматизированном проектировании ТП, т.к. позволяют алгоритмизировать составление ММ, описывающих несколько взаимосвязанных технологических операций (ТО), а в итоге – весь ТП.

Для анализа и синтеза ТП сборки и монтажа РЭА, оптимизации их структуры и принципов управления широкое распространение получил **метод статистического моделирования**. Его сущность состоит в создании специального алгоритма, реализуя который на ЭВМ, можно воспроизвести процесс

по элементам с сохранением логической структуры и последовательности протекания процесса. В этом случае все реальные операции с их физико-химическим содержанием заменяются абстрактными, выполняющими функции преобразователя параметров изделий.

Для формализованного представления сложных многовариантных ТП, содержащих множество ТО, которые, возможно, могут быть выполнены на различных сочетаниях оборудования, перспективны **сетевые модели**. Среди них наибольшее распространение находят **модели в виде сетей Петри**. Различают **сети-системы** и **сети-процессы**.

Сеть Петри – мощный инструмент исследования дискретных систем. По определению – это набор $N(P, T, I, O, M, \mu_0)$, где P – конечное непустое множество мест; T – конечное непустое множество переходов; $I : P \times T \rightarrow \{0, 1\}$ – отношение инцидентности функций входа $O : T \times P \rightarrow \{0, 1\}$ и выхода; M – функция кратности дуг; $\mu_0 : P \rightarrow \{0, 1, 2\}$ – начальная разметка; N – сеть.

Функциональная схема ТП, описываемая в терминах сетей Петри, выражает состав и определенную последовательность операций. Все операции изменения состояния предмета производства идентифицируются множеством переходов в сети $\{t_i\}$, условия срабатывания перехода в сети – множеством мест $\{P_i\}$, производительность перехода – кратностью дуг m_i , начальный задел – разметкой $\mu(P_i)$.

В технологической системе ТП является объектом управления. **Управление ТП** может быть ручным, автоматическим или автоматизированным, но в любом случае управление сводится к формированию управляющих воздействий с целью обеспечения необходимого протекания ТП. **По принципу формирования управляющего воздействия** различают жесткое управление, управление с компенсацией, управление с обратной связью и их различные комбинации.

Жесткое управление строится на основе предположения об идеально определенной взаимосвязи между управляющим воздействием $\vec{X}(\vec{r}, t)$ и предполагаемой реакцией $\vec{Y}(\vec{r}, t)$ на это воздействие управляемого ТП:

$$\vec{Y}(\vec{r}, t) = \vec{\Phi}_1[\vec{X}(\vec{r}, t)].$$

Здесь оператор $\vec{\Phi}_1[\square]$ по определению должен любому задаваемому $\vec{X}(\vec{r}, t)$ из определенного множества однозначно ставить в соответствие характеристики процесса $\vec{Y}(\vec{r}, t)$.

Если среди возмущающих воздействий удастся выделить и измерить наиболее сильнодействующее и, более того, сформировать дополнительное управляющее воздействие $\vec{X}_k = \vec{\Phi}_k[\vec{Z}(\vec{r}, t)]$, компенсирующее измеренное возмущение, приходим к **управлению с компенсацией**:

$$\vec{Y}(\vec{r}, t) = \vec{\Phi}_2[\vec{X}(\vec{r}, t), \vec{X}_k(\vec{r}, t), \vec{Z}(\vec{r}, t)].$$

Управление с обратной связью состоит в том, что контролируется фактическое состояние регулируемых параметров управляемого ТП $\vec{Y}(\vec{r}, t)$ и при их отклонении от заданных значений в регуляторе формируется управляющее воздействие, которое обеспечивает необходимое течение управляемого процесса без анализа возмущающих воздействий $\vec{Z}(\vec{r}, t)$, вызывающих фиксируемые отклонения. Важным достоинством принципа с обратной связью является возможность обеспечения выработки управляющих воздействий независимо от вида, места приложения и числа воздействий, вызывающих нежелательные отклонения регулируемых параметров.

Комбинированные системы автоматического управления ТП при надлежащем выборе оптимальных значений всех параметров могут обеспечить предельно возможные, т.е. потенциально достижимые, значения соответствующих критериев эффективности в заданных условиях. Однако для реализации этих возможностей необходимы ММ всех входящих в управляемый ТП операций, исчерпывающие полное описание возмущающих воздействий, что не всегда возможно в силу сложности ММ. Указанные и другие подобные обстоятельства приводят к **априорной недостаточности**, т.е. к недостатку или изменчивости сведений об условиях функционирования объекта управления и управляющих воздействий.

Для преодоления априорной недостаточности используют один из двух путей: создание робастных, нечувствительных к некоторому разбросу условий работы, систем автоматического управления и создание адаптивных, т.е. приспособляющихся к априори неизвестным или изменяемым условиям, систем автоматического управления.

Для получения робастной системы автоматического управления необходимо синтезировать ее с неизменной структурой и постоянными параметрами таким образом, чтобы при изменении в определенных пределах внешних воздействий и некоторой нестабильности ее собственных параметров качество работы не ухудшалось ниже допустимого уровня. При этом используются результаты теории чувствительности и теории инвариантности систем, а также минимаксный подход, когда система управления синтезируется как оптимальная при наиболее неблагоприятных сочетаниях условий работы.

Адаптивные системы автоматического управления должны автоматически изменять параметры или структуру при изменении условий функционирования таким образом, чтобы обеспечивать оптимальный, близкий к оптимальному или просто заданный режим работы. Адаптивные системы с перестройкой только параметров называют самонастраивающимися, с перестройкой структуры – самоорганизующиеся. Самоорганизация и самонастройка обычно осуществляются путем коррекции основного контура обратной связи. Коррекция основного контура обратной связи, в свою очередь, может быть реализована по принципу жесткого управления, управления с компенсацией или управления с обратной связью.

Вопрос № 25. Гибкие производственные системы (ГПС) изготовления РЭС.

Гибкая производственная система (по ГОСТ 26228-85) представляет собой совокупность в разных сочетаниях оборудования с ЧПУ, роботизированных технологических комплексов (РТК), гибких производственных модулей, 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 составными частями технологической подсистемы ГПС являются **гибкие производственные модули (ГПМ)**. ГПМ представляет собой единицу технологического оборудования с программным управлением для производства изделий произвольной номенклатуры в установленных пределах значений их характеристик, автономно функционирующую, автоматически осуществляющую все функции, связанные с изготовлением изделий, имеющую возможность встраивания в ГПС. Под **РТК** понимается совокупность единицы технологического оборудования, промышленных роботов (ПР) и средств оснащения, автономно функционирующих и осуществляющих многократные циклы.

По организационной структуре (рисунок 25) различают следующие виды ГПС: гибкие автоматизированные линии (ГАЛ), участки (ГАУ) и цехи (ГАЦ). **ГАЛ** – это ГПС, в которой технологическое оборудование расположено в принятой последовательности технологических операций. **ГАУ** – это ГПС, функционирующая по технологическому маршруту, в котором предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования. **ГАЦ** – это ГПС, представляющая собой в различных сочетаниях совокупность гибких автоматизированных и роботизированных технологических линий и участков для изготовления изделий РЭА заданной номенклатуры.

Роботизированная технологическая линия представляет собой совокупность роботизированных технологических комплексов, связанных между собой транспортными средствами и системой управления, или нескольких единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним или несколькими ПР для выполнения операций в принятой технологической последовательности.

Роботизированный технологический участок представляет собой совокупность роботизированных технологических комплексов, связанных между собой транспортными средствами и системой управления, или нескольких единиц технологического оборудования, обслуживаемых одним или несколькими ПР, в которой предусмотрена возможность изменения последовательности использования технологического оборудования.

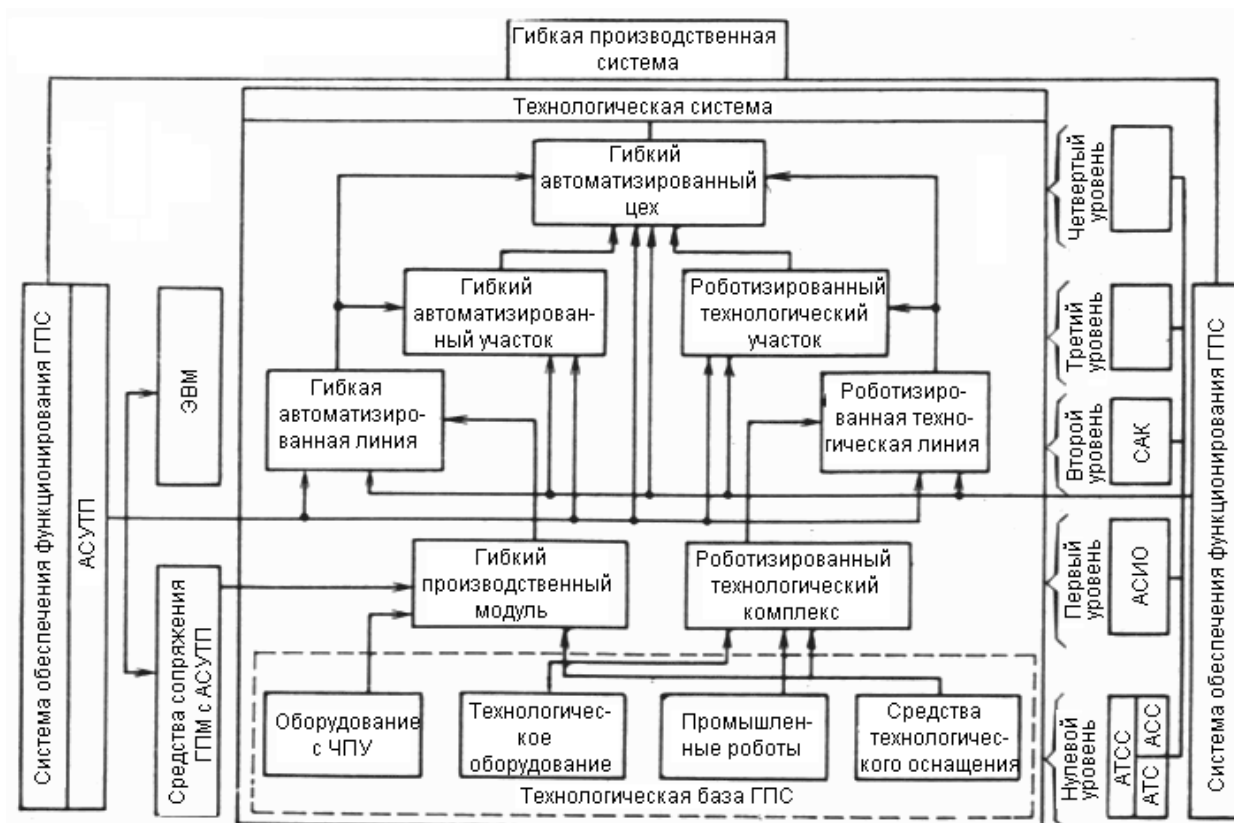


Рисунок 25 – Структурный состав ГПС

ГПС состоит из двух подсистем: технологической и обеспечивающей.

В состав **технологической подсистемы ГПС** входит множество единиц технологического оборудования с ЧПУ, ПР совместно с необходимыми средствами технологического оснащения, организованных в ГПМ, РТК, ГАЛ, ГАУ, ГАЦ и предназначенных для выполнения основных технологических операций производства РЭА.

В **подсистему обеспечения функционирования ГПС** входят следующие основные системы: автоматизированная транспортно-складская система; автоматизированная система управления ТП; система автоматизированного контроля; автоматизированная система инструментального обеспечения.

Автоматизированная транспортно-складская система (АТСС) - система взаимосвязанных автоматизированных транспортных и складских устройств для укладки, хранения, временного накопления, разгрузки и доставки предметов труда, технологической оснастки. Функционально в АТСС можно выделить автоматизированные складскую (АСС) и транспортную систему (АТС).

Автоматизированная складская система ГПС предназначена для накопления, приема и хранения нормативного задела в производстве и учете заготовок, полуфабрикатов, комплектующих, готовых изделий, приспособлений, инструмента, тары с целью обеспечения ритмичного процесса в ГПС. В ГПС АСС могут предназначаться для выполнения каждой из указанных

функций или различных их сочетаний, вплоть до совмещения всех функций в едином складе.

Автоматизированная система управления ТП ГПС (АСУ ТП) состоит из средств вычислительной техники – управляющих ЭВМ, связанных в единый комплекс с помощью интерфейсных устройств и линий передачи данных, и программного обеспечения, предназначенного для управления отдельными единицами автоматизированного оборудования всех подсистем и системы в целом. Вычислительные машины, устройства сопряжения с объектами и передачи данных являются аппаратными средствами системы управления ГПС, функционирующими под управлением программных средств.

Система управления охватывает все уровни иерархии ГПС: нижний уровень управления – локальную систему управления (ЛСУ) ГПМ и обслуживающие их АСС, АТС и систему автоматизированного контроля (САК); высший уровень управления – АСУ цеха ГПС.

Особое место в ГПС любого из рассмотренных уровней занимают **системы автоматизированного контроля**. Эти системы решают следующие задачи: получения и передачи информации о свойствах, техническом состоянии и пространственном расположении контролируемых объектов, а также о состоянии технологической среды; сравнения фактических параметров с заданными; передачи информации о рассогласованиях для принятия решений на различных уровнях управления ГПС; получения и представления информации об исполнении функций; автоматической перестройки средств контроля в пределах заданной номенклатуры контролируемых объектов; полноты и достоверности контроля.

Автоматизированная система инструментального обеспечения (АСИО) – система взаимосвязанных элементов, включающая участки подготовки инструмента, его транспортирования, накопления, устройства смены и контроля качества инструмента, обеспечивающие подготовку, хранение, автоматическую установку и замену инструмента.

В свою очередь ГПС можно рассматривать как элемент организационной структуры **интегрированной производственной системы (ИПС)**, состоящей из соответствующих подсистем, реализующих цикл «наука - производство».

Вопрос № 26. Сущность и перспективы интегральной электроники.

Интегральная электроника (микроэлектроника) занимается изучением, разработкой и изготовлением РЭС в микроминиатюрном исполнении. Интегральные устройства радиоэлектроники – это ИС и технологические совместимые с ними функциональные устройства.

Функционирование ИС основано на свойствах **статических** неоднородностей (потенциальных барьеров) – локальных областей на поверхности или в объеме кристалла. Технология ИС представляет собой совокупность физических и химических способов групповой обработки различных материалов – полупроводников, металлов, диэлектриков. В классической планарно-эпитаксиальной технологии кремниевых ИС используются следующие основные операции: окисление, травление, литография, диффузия, ионное легирование, эпитаксия, осаждение пленок.

В настоящее время среди типов ИС (полупроводниковые, пленочные и гибридные) доминирующее положение занимают **полупроводниковые ИС**. Объем выпуска полупроводниковых ИС более чем на порядок превышает объем выпуска ГИС. Однако это не снижает значимости последних. Есть типы ИС, которые имеют лучшие показатели, если их изготавливать в виде ГИС. К ним относятся:

1. ИС, где требуется либо высокая точность элементов и возможность их подстройки (прецизионные, высокочастотные и др.), либо значительная мощность.
2. ИС частного применения (преобразователи аналог-код, схемы питания и др.); это связано с относительной простотой технологии изготовления ГИС по сравнению с технологией изготовления полупроводниковых ИС.
3. ИС СВЧ диапазона.

Кроме того, технологические методы изготовления ГИС открывают возможности для замены ими методов многослойного печатного монтажа и позволяют повысить функциональную сложность схемы, так как в качестве компонентов могут использоваться ИС и даже БИС. Поэтому ГИС являются не конкурентом полупроводниковым ИС, а дополнением последних, расширяющих возможности ИС.

В полупроводниковых ИС все схемные элементы изготавливаются в приповерхностном слое и на поверхности полупроводниковой пластины. Пассивными элементами в полупроводниковых ИС являются резисторы и конденсаторы, активными – биполярные и МДП-транзисторы, диоды, транзисторы с барьером Шоттки и др.

В ГИС по пленочной технологии получают только пассивные элементы (резисторы, конденсаторы и иногда индуктивности), а активные – являются навесными.

В таблице 26 представлены максимальные и минимальные сопротивления резисторов и емкости конденсаторов и разброс их номиналов δ . Катушки индуктивности обычно имеют номинал до нескольких микрогенри.

Таблица 26 – Параметры пассивных элементов ИС

Тип ИС	Резисторы			Конденсаторы		
	R_{\min} , Ом	R_{\max} , Ом	δ , %	C_{\min} , пФ	C_{\max} , пФ	δ , %
Полупроводниковая	Единицы	Сотни	15...20	---	200	20
Гибридная тонкопленочная	Единицы	Тысячи	15...20	Единицы	10000	15...20
Гибридная толстопленочная	Единицы	Сотни	50	50	2500	15...20

ИС классифицируют по конструктивно-технологическому исполнению, степени интеграции, функциональному назначению, частотному диапазону и по другим признакам. Вторым признаком классификации – **степень интеграции ИС** – характеризуется числом содержащихся в ней элементов и компонентов:

$$K = \lg N,$$

где K – коэффициент, округляемый до ближайшего (большего) целого числа; N – число элементов и компонентов, входящих в микросхему.

По степени интеграции ИС подразделяются на обычные ($K = 1...3$), большие (БИС, $K = 3...4$), сверхбольшие интегральные схемы (СБИС, $K = 4...6$) и интегральные системы, например микропроцессоры ($5 \cdot 10^5$ приборов и более на одном кристалле). Наибольшей степенью интеграции обладают полупроводниковые ИС, затем тонкопленочные и, наконец, толстопленочные. Полупроводниковые ИС на биполярных транзисторах по степени интеграции уступают ИС на МДП-транзисторах.

Совершенствование методов получения полупроводниковых слоев и формирования «рисунка» ИС позволило перейти от микронных толщин слоев и линейных размеров отдельных элементов к нанометровым. По мере приближения размеров твердотельных структур к нанометровой области, все больше проявляются квантовые (волновые) свойства электрона. С одной стороны, это приводит к нарушению работоспособности классических транзисторов и других активных элементов, использующих закономерности поведения электрона как классической частицы, а с другой – открывает перспективы создания новых уникальных переключающих, запоминающих и усиливающих элементов. Последние являются основным объектом исследований и разработок нового этапа развития микроэлектроники – **наноэлектроники**.

Приборы и структуры наноэлектроники, сопоставимые по размерам с электронной длиной де Бройля, получили название **мезоскопических**. Они могут быть реализованы как на основе полупроводников, так и на основе металлов и сверхпроводников. Исследования в этой области в настоящее время

носят, главным образом, фундаментальный характер. Вместе с тем, уже существует большое число перспективных приборов нового поколения, принцип действия которых (в отличие от традиционных приборов микроэлектроники) основан на волновой природе электрона (резонансные туннельные диоды и транзисторы и др). Обсуждаются проблемы создания квантовых ИС, основными элементами которых могут быть транзисторные структуры на основе квантовых размерных эффектов и управляемой интерференции электронов.

Функциональная электроника, в отличие от интегральной, основывается на использовании в качестве носителей информационного сигнала **динамических** неоднородностей, обеспечивающих не схемотехнические принципы работы приборов и устройств. Такие неоднородности генерируются в континуальных (непрерывных) средах, как правило, в твердом теле **в процессе функционирования устройства** и могут иметь самую различную физическую природу. Используются оптические, магнитные явления, сверхпроводимость, фазовые переходы, электрон-фононные взаимодействия, плазменные явления, инжекционные процессы, явления живой природы, различные комбинации физических явлений и процессов в континуальных средах. В силу этого, методами функциональной электроники может быть реализована практически любая функция передачи и отображения информации.

В зависимости от типа динамической неоднородности, континуальной среды, той или иной комбинации физических полей или явлений различают **направления в функциональной электронике**: функциональная оптоэлектроника, квантовая электроника, акустоэлектроника, биоэлектроника, молекулярная электроника, магнитоэлектроника, диэлектрическая электроника, криоэлектроника, хемотроника. Объединяющим их признаком является динамическая неоднородность как носитель, транслятор или хранитель информации.

В устройствах функциональной электроники для обработки информации в качестве элементарных могут использоваться функции высшего порядка (преобразование Фурье, интегральное преобразование Лапласа; операции свертки, корреляции, автокорреляции, управляемой задержки, фильтрации, когерентного сложения, ответвления, комбинированной обработки сигналов и др.). В тоже время, в них могут быть реализованы и обычные элементарные логические функции, а также их различные комбинации.

В активной среде прибора функциональной электроники может храниться и одновременно обрабатываться большой объем информации в аналоговом виде. Так, например, акустооптический процессор обеспечивает эффективную производительность $10^{10} \dots 10^{12}$ операций в секунду, в то время как специальные ИС быстрого преобразования Фурье – не более $2.5 \cdot 10^8$. Выигрыш нескольких порядков в производительности весьма существенен.

Отметим, что устройства функциональной электроники (ПЗС и многие другие) изготавливаются с помощью методов и процессов, которые возникли и развиваются в технологии полупроводниковых приборов и ИС.

Вопрос № 27. Модулированные колебания и их спектры.

Под **модуляцией** в радиоэлектронике и теории информации понимается процесс, при котором один или несколько параметров несущего колебания изменяются по закону передаваемого сообщения. Получаемые в процессе модуляции колебания называют **радиосигналами**. В аналоговых системах связи радиосигналы передаются непрерывно во времени, и при модуляции могут изменяться амплитуда, частота или фаза несущего гармонического колебания. В зависимости от того, какой из названных параметров несущего колебания подвергается изменению, различают два основных вида аналоговой модуляции: **амплитудную** и **угловую**. Последний вид модуляции, в свою очередь, разделяется на **частотную** и **фазовую**. В современных и перспективных цифровых системах связи, радиолокации, радионавигации, радиотелеуправления применяются и будут применяться различные виды **импульсной модуляции**, при которой радиосигналы представляются в виде радиоимпульсов.

В процессе осуществления амплитудной модуляции несущего колебания вида:

$$U_H(t) = U_H \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = U_H \cos \psi(t) \quad (27.1)$$

его амплитуда должна изменяться по закону:

$$U_H(t) = U_H + k_A e(t), \quad (27.2)$$

где U_H – амплитуда в отсутствие модуляций; ω_0 – угловая (круговая) частота; φ_0 – начальная фаза; $\psi(t) = \omega_0 t + \varphi_0$ – полная (текущая или мгновенная) фаза; k_A – безразмерный коэффициент пропорциональности; $e(t)$ – модулирующий сигнал.

Функцию $U_H(t)$ в радиотехнике принято называть **оггибающей** амплитудно-модулированного сигнала (АМ-сигнала).

Подставив формулу (27.2) в (27.1), получим выражение для АМ-сигнала в общем виде:

$$u_{AM}(t) = U_H(t) \cos(\omega_0 t + \varphi_0) = [U_H + k_A e(t)] \cos(\omega_0 t + \varphi_0). \quad (27.3)$$

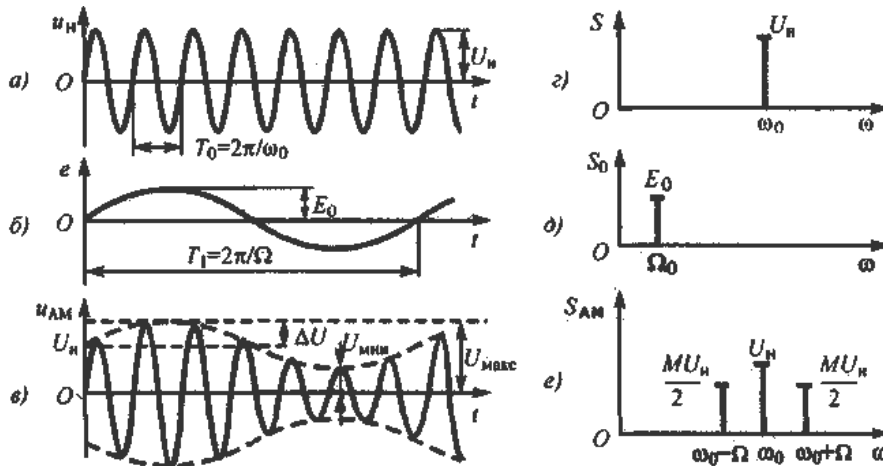
Графики несущего колебания с $\varphi_0 = 90^\circ$, модулирующего сигнала с $\theta_0 = 90^\circ$ и АМ-сигнала показаны на рисунке 27.1, *а, б, в*, а на рисунке 27.1, *г, д, е* – соответствующие им спектры.

Если в несущем колебании изменяется частота ω_0 , то имеем дело с **частотной модуляцией (ЧМ)**, если же изменяется начальная фаза φ_0 – **фазовой модуляцией (ФМ)**.

При частотной модуляции несущая частота $\omega(t)$ связана с модулирующим сигналом $e(t)$ зависимостью:

$$\omega(t) = \omega_0 + k_{\text{ч}} e(t), \quad (27.4)$$

здесь $k_{\text{ч}}$ – размерный коэффициент пропорциональности между частотой и напряжением [рад/(В·с)].



a – несущее колебание; *б* – модулирующий сигнал; *в* – АМ-сигнал;
г, *д*, *е* – соответствующие спектры

Рисунок 27.1 – Амплитудная модуляция

Рассмотрим **однотональную частотную модуляцию**, когда модулирующим сигналом является гармоническое колебание $e(t) = E_0 \cos \Omega t$, у которого для упрощения начальная фаза $\theta_0 = 0$. Пусть также начальная фаза несущего колебания $\varphi_0 = 0$. При необходимости начальные фазы θ_0 и φ_0 легко могут быть введены в окончательные соотношения. Полную фазу ЧМ-сигнала в любой момент времени t определим путем интегрирования частоты, выраженной через формулу (27.4):

$$\psi(t) = \int_0^t \omega(t) dt = \int_0^t (\omega_0 + k_{\text{ч}} E_0 \cos \Omega t) dt = \omega_0 t + \frac{\omega_{\text{дч}}}{\Omega} \sin \Omega t, \quad (27.5)$$

где $\omega_{\text{дч}} = k_{\text{ч}} E_0$ – максимальное отклонение частоты от значения ω_0 , или **девиация частоты** при частотной модуляции.

Отношение

$$m_{\text{ч}} = \omega_{\text{дч}} / \Omega = k_{\text{ч}} E_0 / \Omega, \quad (27.6)$$

являющееся девиацией фазы несущего колебания, называют **индексом частотной модуляции**.

С учетом (27.5) и (27.6) ЧМ-сигнал запишется в следующем виде:

$$u_{\text{ЧМ}}(t) = U_n \cos \psi(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_{\text{ч}} \sin \Omega t). \quad (27.7)$$

В ФМ-сигнале полная фаза несущего колебания изменяется пропорционально модулирующему напряжению

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_{\text{ф}} e(t), \quad (27.8)$$

где $k_{\text{ф}}$ – размерный коэффициент пропорциональности [рад/В].

При однотональной модуляции фаза несущего колебания:

$$\psi(t) = \omega_0 t + k_{\text{ф}} E_0 \cos \Omega t. \quad (27.9)$$

Из (27.9) следует, что, как и в случае частотной модуляции, полная фаза несущего колебания при фазовой модуляции изменяется по гармоническому закону. Максимальное отклонение фазы несущего колебания от начальной фазы характеризует **индекс фазовой модуляции**

$$m_{\Phi} = k_{\Phi} E_0. \quad (27.10)$$

Подставляя формулы (27.8) и (27.9) в (27.1), запишем ФМ-сигнал

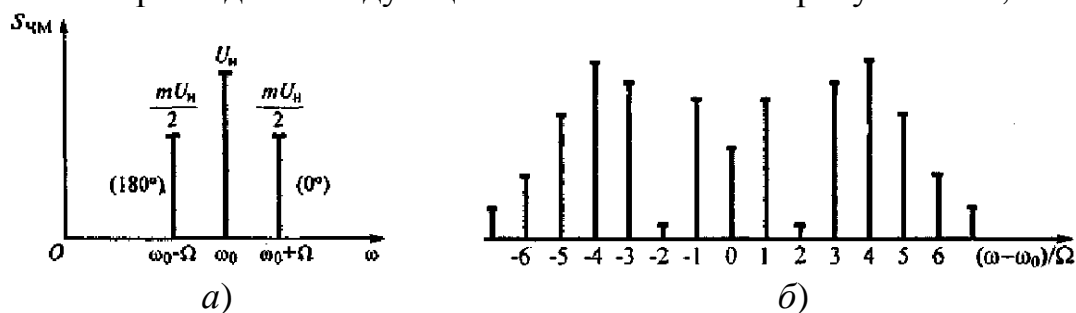
$$u_{\Phi M}(t) = U_n \cos(\omega_0 t + m_{\Phi} \cos \Omega t). \quad (27.11)$$

Дифференцирование формулы (27.8) дает частоту ФМ-сигнала

$$\omega(t) = \omega_0 - m_{\Phi} \Omega \sin \Omega t = \omega_0 - \omega_{\text{дФ}} \sin \Omega t, \quad (27.12)$$

где $\omega_{\text{дФ}} = m_{\Phi} \Omega = k_{\Phi} E_0 \Omega$ – максимальное отклонение частоты от значения несущей ω_0 , т.е. **девиация частоты** при фазовой модуляции.

На рисунке 27.2, *а* представлена спектральная диаграмма для ЧМ-сигнала при индексе модуляции $m \ll 1$. Ширина спектра в данном случае равна 2Ω , как и при амплитудной модуляции. Примерная структура спектра ЧМ-сигнала при индексе модуляции $m = 3$ показана на рисунке 27.2, *б*.



а) $m \ll 1$; б) $m = 3$

Рисунок 27.2 – Спектры ЧМ-сигналов

При импульсной модуляции (рисунок 27.3) в качестве несущего колебания (точнее, поднесущего) используют различные периодические импульсные последовательности, в один из параметров которых вводится информация о передаваемом сообщении. Для дискретных сигналов процесс модуляции принято называть **манипуляцией** параметров импульсов.

Теоретической основой построения всех методов импульсной модуляции является **теорема Котельникова**, в соответствии с которой непрерывный первичный сигнал $e(t)$ с ограниченной шириной спектра F_B может быть передан своими отсчетами (последовательностью коротких импульсов), следующих с интервалом $T = \Delta t = 1/(2F_B)$. Достаточно большие временные интервалы между импульсами используют для передачи рабочих импульсов от других источников, т.е. для осуществления многоканальной передачи с временным разделением каналов. Положим, что поднесущим колебанием в системе передачи информации с импульсной модуляцией является периодическая последовательность прямоугольных импульсов с амплитудой U_n , длительностью τ_H и периодом повторения T (рисунок 27.3, *а*). Для наглядности в качестве модулирующего сигнала выбрано гармоническое колебание $e(t) = E_0 \cos \Omega t$, у которого начальная фаза $\theta_0 = 90^\circ$ (рисунок 27.3, *б*).

Импульсную модуляцию в зависимости от выбора изменяемого параметра модулируемой импульсной последовательности принято делить на следующие виды:

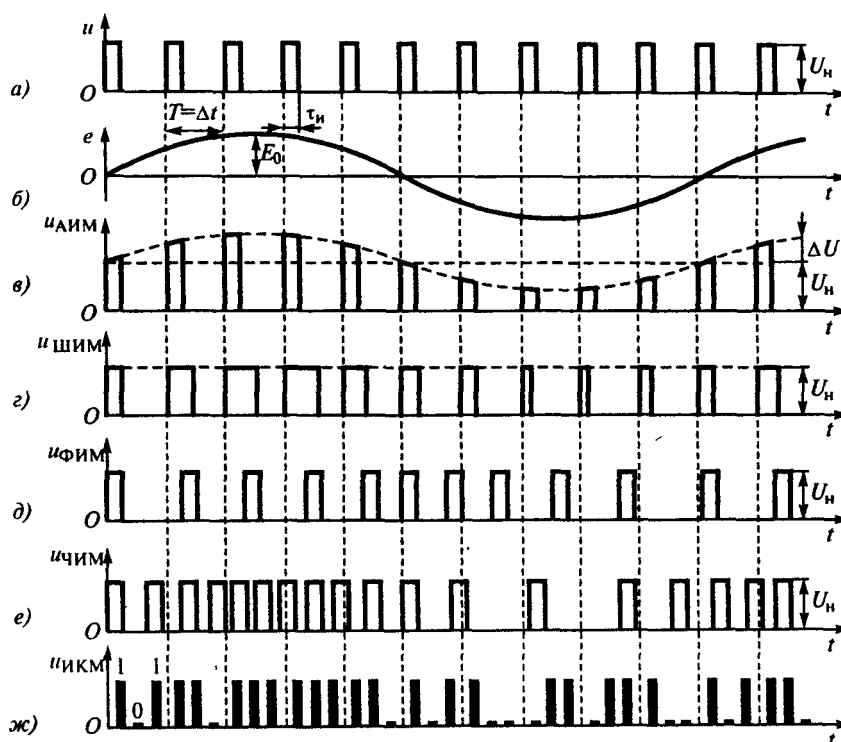
- **амплитудно-импульсную (АИМ)**, когда по закону передаваемого сообщения изменяется амплитуда импульсов исходной последовательности (рисунок 27.3, в);

- **широтно-импульсную (ШИМ)**, при изменении по закону передаваемого сообщения длительности (ширины) импульсов исходной последовательности (рисунок 27.3, г);

- **фазоимпульсную (ФИМ)**, или **временнo-импульсную (ВИМ)**, если по закону передаваемого сообщения изменяется временное положение импульсов (рисунок 27.3, д);

- **частотно-импульсную модуляцию (ЧИМ)**, при изменении по закону передаваемого сообщения частоты следования импульсов поднесущей (рисунок 27.3, е);

- **импульсно-кодovую модуляцию (ИКМ)** – вид дискретной (цифровой) модуляции (цифровой манипуляции), при которой передаваемый аналоговый первичный сигнал превращается в цифровой код – последовательность импульсов (1 – «единица») и пауз (0 – «нулей»), имеющих одинаковую длительность (рисунок 27.3, ж).



а – периодическая последовательность исходных импульсов;

б – модулирующий сигнал; в – АИМ; г – ШИМ; д – ФИМ; е – ЧИМ; ж - ИКМ

Рисунок 27.3 – Импульсная модуляция

Вопрос № 28. Устройства передачи и помехоустойчивого приема радиосигналов.

Радиопередающие устройства предназначены для формирования колебаний несущей частоты, модуляции их по закону передаваемого сообщения и излучения полученного радиосигнала в пространство или передачи его по физическим линиям связи.

Структурно радиопередающие устройства состоят из передающей антенны и собственно радиопередатчика. Сформированные в передатчике информационные радиосигналы поступают в антенну и излучаются ею в свободное пространство в виде электромагнитных волн. Обобщенная структурная схема современного радиопередатчика изображена на рисунке 28.1.

Задающий генератор (или возбудитель) *1* генерирует высокостабильные радиочастотные колебания в заданном диапазоне частот. Далее эти колебания усиливаются в предварительных каскадах *2* и поступают на оконечный усилитель мощности *3*. Часто предварительные каскады передатчика работают в режиме умножения частоты РЧ колебаний. Это облегчает требования к возбудителю и повышает устойчивость работы передатчика, поскольку усиление ведется на различных частотах. Усилитель мощности *3* обеспечивает на выходе антенны (или фидера) заданную мощность РЧ колебаний. Антенная система *4* излучает РЧ колебания в пространство. Для управления ВЧ колебаниями служит модуляционное (или манипуляционное) устройство *5*. Если передатчик работает с АМ, то модуляционное устройство воздействует на оконечный или предварительные каскады. Если передатчик работает с ЧМ (манипуляцией), то модуляция (манипуляция) осуществляется в задающем генераторе *1*. Устройство охлаждения ламп и контуров *8* поддерживает заданный тепловой режим передатчика, а устройство блокировки и сигнализации (УБС) *7* дает информацию о режиме работы передатчика и обеспечивает его включение и выключение, безопасность обращения с ним обслуживающего персонала. Источники питания *6* необходимы для подачи заданных питающих напряжений на лампы или транзисторы передатчика.

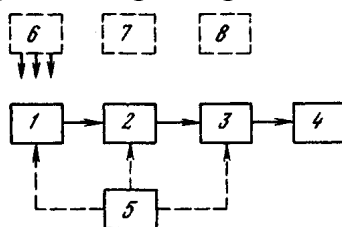


Рисунок 28.1 – Обобщенная структурная схема радиопередатчика

Устройства формирования и передачи сигналов классифицируются:

- **по назначению** – связные, радиовещательные, телевизионные, радиолокационные, радионавигационные, телеметрические и т.д.;

- **по мощности** – маломощные (до 100 Вт), средней мощности (до 10 кВт), мощные (до 1000 кВт) и сверхмощные (свыше 1000 кВт);

- **по роду работы (виду излучения)** – телеграфные, телефонные, однополосные, импульсные и т.д.;

- **по способу транспортировки** – стационарные и подвижные (переносные, автомобильные, корабельные, самолетные и т.д.);

- **по диапазону рабочих волн** – мириаметровые, километровые, гекаметровые, декаметровые, метровые, дециметровые, сантиметровые и т.д.

К основным показателям радиопередающих устройств можно отнести следующие: стабильность излучаемой частоты; мощность излучения; уровни подавления побочного и внеполосного излучений; достоверность передачи; надежность и долговечность элементов; эффективность, экономичность и КПД; масса и габаритные размеры; уровень автоматизации, преемственности и унификации; эксплуатационные показатели; показатели охраны труда.

Радиоприемные устройства (РПУ) предназначены для приема радиосигналов и преобразования их к виду, позволяющему использовать содержащуюся в них полезную информацию.

РПУ состоят из приемной антенны и собственно радиоприемника.

РПУ осуществляют операции: преобразование с помощью антенны электромагнитного поля в радиосигнал; выделение (фильтрация по частоте) полезных радиосигналов из совокупности других сигналов и помех; преобразование и усиление принимаемых сигналов; демодуляция (детектирование) принятого сигнала; декодирование принятого сигнала; обработка сигналов с целью ослабления помех.

РПУ классифицируют по назначению, виду принимаемых сигналов, диапазону принимаемых частот и т.д.

По назначению РПУ можно разделить на профессиональные и бытовые.

По виду принимаемых сигналов выделяют приемники непрерывных и дискретных сигналов.

По диапазону частот принимаемых сигналов различают приемники НЧ, средней частоты (СЧ), ВЧ, очень высокой частоты (ОВЧ) и СВЧ.

РПУ можно классифицировать также по ряду других признаков: способу питания, конструктивному выполнению и др.

К основным характеристикам РПУ относятся чувствительность, избирательность (селективность), помехоустойчивость.

Обобщенная структурная схема **приемника прямого усиления** содержит (рисунок 28.2): входную цепь, усилитель (усилители) радиочастоты, детектор (амплитудный), усилитель низкой (звуковой) частоты и воспроизводящее устройство. Селекция и усиление сигналов производятся на несущей частоте принимаемого сигнала. Для обеспечения высокой избирательности приходится увеличивать число высокочастотных резонансных контуров, что усложняет перестройку по диапазону.

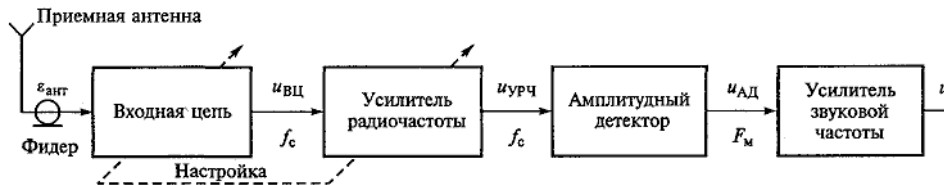


Рисунок 28.2 – Структурная схема приемника прямого усиления

Приемник супергетеродинного типа обеспечивает очень высокую избирательность во всех диапазонах, а также более равномерное усиление в ВЧ тракте. Это достигается введением в главный тракт приемника преобразователя частоты, состоящего из смесителя (См), гетеродина (Г) и полосового фильтра (ПФ) промежуточной частоты (рисунок 28.3). Основное усиление производится на (одной) промежуточной частоте с помощью резонансных усилителей с типовыми полосовыми фильтрами (УПЧ).

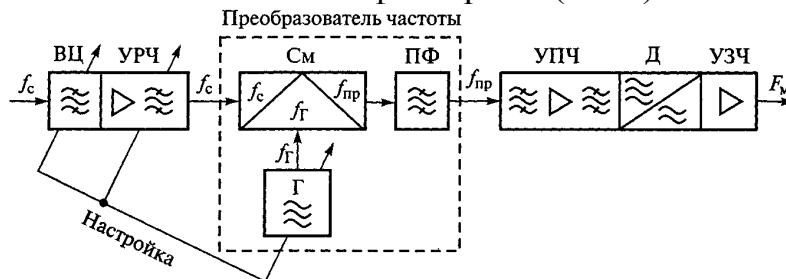


Рисунок 28.3 – Структурная схема супергетеродинного приемника

В системе связи качество передачи информации зависит от степени искажений принятого сообщения. Эти искажения зависят от свойств и технического состояния системы, а также от интенсивности и характера помех. Необратимые искажения сообщений в технически исправной системе обусловлены лишь воздействием помех. В этом случае качество передачи полностью определяется помехоустойчивостью системы связи.

Прием радиосигналов всегда сопровождается помехами. **Помехоустойчивость** – способность системы связи противостоять вредному влиянию помех на передачу сообщений. Верность передачи информации зависит от отношения средних мощностей сигнала и помехи (отношения сигнал/шум). При данном уровне шума вероятность ошибки тем меньше, чем сильнее различаются между собой сигналы, соответствующие разным сообщениям. Основой методов выделения сигнала из аддитивной смеси сигнала и шума является **линейная фильтрация**, использующая линейные частотные фильтры.

Для выделения сигнала на фоне помех можно использовать **оптимальную фильтрацию**, при которой радиотракт (часть приемника от входа до детектора) должен иметь частотную характеристику, комплексно-сопряженную со спектром принимаемого сигнала. Однако на практике создание оптимального фильтра затруднено, поэтому в радиотракте импульсного приемника, как правило, реализуется **квазиоптимальная фильтрация** с помощью обычных резонансных цепей, полоса пропускания которых выбирается так, чтобы обеспечить максимальное отношение сигнал/шум.

Вопрос № 29. Стадии разработки конструкторской документации изделий РЭС, определенные ГОСТ 2.103-68.

Предпроектная стадия – составление ТЗ.

ТЗ следует составлять по ГОСТ 15.001-88. Рекомендуется в ТЗ включать следующие разделы:

- 1) наименование и область применения;
- 2) основание для разработки;
- 3) цель и назначение разработки;
- 4) источники разработки;
- 5) технические требования;
- 6) экономические показатели;
- 7) стадии и этапы разработки;
- 8) порядок контроля и приемки.

После утверждения ТЗ руководителями организаций разработчика и заказчика приступают к выполнению следующей стадии разработки конструкторской документации.

Первая стадия по ГОСТ 2.103-68 – это техническое предложение.

Техническое предложение представляет собой совокупность конструкторских документов, в которых отображаются различные варианты конструкторского и схемного построения разрабатываемого РЭА и дается сравнительная оценка этих вариантов между собой и с аналогами отечественного и зарубежного исполнения. На стадии технического предложения проводятся технико-экономические обоснования целесообразности разработки РЭА. Эта стадия вводится с целью выполнения дополнительных или уточненных требований к РЭА, которые не могли быть указаны в ТЗ без предварительной конструкторской проработки и анализа различных вариантов. Все возникающие замечания и предложения обязательно согласуются с заказчиком. Основное в техническом предложении – построение общей структурной (функциональной) схемы РЭА, из которой должна быть ясна картина взаимодействия всех узлов и блоков разрабатываемой аппаратуры по каждому варианту. На стадии технического предложения проверяют варианты на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформляют заявки на изобретения. Если для сравнительной оценки необходимо проверить принципы работы различных вариантов РЭА, а также сравнить их по эргономическим и эстетическим показателям, то могут быть изготовлены макеты. Полный объем работ, и требования к выполнению технического предложения устанавливает ГОСТ 2.118-73. Конструкторские документы на стадии технического предложения имеют литеру «П». После согласования и утверждения в установленном порядке техническое предложение становится основой для разработки эскизного проекта.

Вторая стадия – это эскизный проект.

Эскизный проект – совокупность конструкторских документов, содержащих принципиальные и конструктивные решения, общие представления об устройстве и принципе работы РЭА, а также данные по основным параметрам разрабатываемой аппаратуры. Эскизный проект разрабатывают, если это предусмотрено ТЗ или протоколом рассмотрения технического предложения. Эта стадия обычно вводится с целью проверки принципиальных конструктивных, схемных и других решений, когда это целесообразно сделать до разработки технического проекта РЭА или рабочей конструкторской документации. В эскизном проекте в общем случае разрабатывают и обосновывают технические решения по обеспечению показателей надежности, установленных ТЗ и техническим предложением, оценивают РЭА на технологичность по показателям стандартизации и унификации, по эргономическим и эстетическим характеристикам, проверяют варианты на патентную чистоту и конкурентоспособность, оформляют заявки на изобретения, изготавливают и испытывают макеты с целью проверки принципов работы всей аппаратуры и ее составных частей, выбирают оптимальный вариант (варианты) РЭА с обоснованием выбора, принимают принципиальные решения, подтверждают (или уточняют) предъявляемые к РЭА требования (технические характеристики, показатели качества и др.), установленные ТЗ и техническим предложением, и определяют технико-экономические характеристики и показатели, не установленные ТЗ и техническим предложением. Объем работ, проводимых на стадии эскизного проекта, определен в ГОСТ 2.119-73. Конструкторские документы на стадии эскизного проекта имеют литеру «Э». После согласования и утверждения в установленном порядке эскизный проект служит основанием для разработки технического проекта.

Третья стадия – это технический проект.

Технический проект – совокупность конструкторских документов, содержащих окончательные технические решения и дающих полное представление об устройстве разрабатываемого РЭА и исходные данные для разработки рабочей конструкторской документации. Технический проект разрабатывают, если это предусмотрено техническим заданием, протоколом рассмотрения технического предложения или эскизного проекта. Эта стадия вводится часто с целью выявления окончательных технических решений, дающих полное представление о конструкции РЭА (когда это целесообразно сделать до разработки рабочей конструкторской документации). В техническом проекте разрабатывают конструкцию РЭА и его составных частей, выполняют необходимые расчеты, принципиальные схемы, схемы соединений; разрабатывают и обосновывают технические решения, обеспечивающие показатели надежности, анализируют конструкцию РЭА на технологичность в условиях данного производства; разрабатывают, изготавливают и испытывают макеты; оценивают эксплуатационные данные РЭА (взаимозаменяемость, удобство обслуживания, ремонтпригодность, устойчивость против воздействия внешней среды, возможность быстрого устранения отказов, контроль качества работы и пр.); проверяют РЭА на патентную чистоту и конкурентоспособность,

оформляют заявки на изобретения. Перечень работ, выполняемых в техническом проекте, определен ГОСТ 2.120-73, а конструкторские документы имеют литеру «Т». После согласования и утверждения в установленном порядке технический проект служит основанием для разработки рабочей конструкторской документации.

Четвертая стадия – это разработка рабочей документации.

На стадии рабочего проектирования происходит создание и отработка полного комплекта (см. ГОСТ 2.102-68) конструкторской документации на РЭА. На этой стадии разрабатывается технология изготовления составных частей и РЭА в целом. В общем случае на стадии рабочего проекта изготавливается опытный образец с целью окончательного определения технических характеристик аппаратуры в процессе проведения испытаний, проверки показаний эксплуатационной надежности (помехозащищенности, радиационной стойкости, ремонтпригодности) разрабатываемой аппаратуры и безопасности при эксплуатации, проверки и отработки технической документации, определения необходимости составления дополнительной технической документации (инструкции по настройке, монтажу, регулировке и др.) для изготовления опытной партии, эксплуатации и ремонта РЭА. В процессе изготовления РЭА проводятся приемо-сдаточные испытания отдельных узлов и блоков, а после изготовления всего изделия – приемосдаточные испытания опытного образца (одного или нескольких) по электрическим, механическим, климатическим и другим требованиям. Испытания проводятся представителями отдела технического контроля (ОТК) и представителями заказчика в соответствии с техническими условиями, которые составляются разработчиком на узлы, блоки и на весь РЭА в целом. Технические условия входят обязательно в состав конструкторской документации, передаваемой на завод-изготовитель. По результатам изготовления и испытания конструкторская документация корректируется и в ней проставляется литера «О». Откорректированная техническая документация выпускается под литерой «А» и передается предприятием-разработчиком предприятию-изготовителю для выпуска установочной серии РЭА и запуска в серийное или массовое производство. Взаимоотношения между разработчиком и заводом-изготовителем регламентируются договором, который заключается на период освоения РЭА в серийном производстве. Разработчик при этом обязуется передать заводу-изготовителю несколько комплектов копий конструкторской и технологической документации, обучить представителей завода процессам наладки и регулировки, новым технологическим процессам и т.д. Для ускорения процесса запуска РЭА в производство разработчик передает заводу-изготовителю образцы нестандартной технологической оснастки и приспособлений. В процессе эксплуатации и ремонта РЭА, изготовленного в серийном (массовом) производстве, иногда возникает необходимость в корректировке функциональных, принципиальных, монтажных и других схем, конструкторской и технологической документации. Эти изменения вносят в техническую документацию по установленной форме по ГОСТ 2.503-74.

Все перечисленные этапы и стадии разработки конструкторской документации применяют для сложных РЭА. Для простых РЭА или их модернизации некоторые стадии могут быть опущены. Опытно-конструкторская работа (ОКР) может проводиться без предварительной научно-исследовательской работы (НИР) в тех случаях, когда совершенствуются существующие РЭА и не применяются новые принципы для их построения. С целью сокращения сроков внедрения разрабатываемого РЭА в производство параллельно с конструкторской проработкой рассматриваются и разрабатываются технологические процессы.

Вопрос № 30. Электромагнитная совместимость РЭС. Виды паразитных связей, их эквивалентные схемы и математическое описание.

Электромагнитная совместимость. Согласно стандарту (ГОСТ 23611-79) **электромагнитная совместимость РЭС** – это способность этих средств одновременно функционировать в реальных условиях эксплуатации с требуемым качеством при воздействии на них непреднамеренных радиопомех и не создавать недопустимых радиопомех другим РЭС.

Радиопомеха – это электромагнитная помеха (ЭМП) в диапазоне радиочастот. Радиопомеха, созданная за счет распространения электромагнитных волн, называется **излучаемой**. Помеха, которая создается в проводящей среде за счет гальванических связей, называется **кондуктивной**. **Непреднамеренной электромагнитной помехой (НЭМП)** считают любую радиопомеху, создаваемую источником искусственного происхождения, не предназначенную для нарушения функционирования РЭС.

Устойчивость к ЭМП, или помехоустойчивость – это способность РЭС сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров в отсутствие дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения технического средства. **Помехозащищенность** – это способность ослаблять действие ЭМП за счет дополнительных средств защиты от помех, не относящихся к принципу действия или построения РЭС.

При изучении электромагнитной совместимости вводят понятия источников помех и рецепторов помех. **Источники ЭМП** – класс любых устройств, которые могут создавать электромагнитное излучение. Сюда включают устройства, не предназначенные для излучения электромагнитных волн (например, двигатели, системы зажигания и др.). **Рецепторы ЭМП** – все устройства, которые изменяют (обратимо или необратимо) значения своих параметров под влиянием электромагнитных помех.

Для устранения ЭМП используют фильтры, экраны и поглощающие покрытия. В диапазоне волн 0.8...10 см в качестве поглощающих покрытий используют: резиновые коврики марок В2Ф-2, В2Ф-3 и ВКФ-1, магнетодиэлектрические пластины марок ХВ-0.8, ХВ-2.0, ХВ-3.2, ХВ-10.6, поролоновые поглощающие покрытия марки «Болото». В диапазоне волн 15...200 см в качестве поглощающих используют древесные покрытия марки «Луч» и ферритовые пластины марки СВЧ-0.68. Эти покрытия обеспечивают коэффициент отражения (1...4)%.

Виды паразитных связей, их эквивалентные схемы и математическое описание. При изучении паразитных связей вводят понятия источников наводки и приемников наводки и связей между ними. **Источник наводки (ИН)** может быть связан с **приемником наводки (ПН)** через электрическое и магнитное поле, электромагнитное поле излучения и соединительные прово-

да. Напряженность ближних электрического и магнитного полей в свободном пространстве обратно пропорциональна квадрату расстояния от элемента, возбуждающего поле. Напряженность дальних электрического и магнитного полей излучения обратно пропорциональна первой степени расстояния. Напряжение на конце проводной линии или волновода с увеличением расстояния падает весьма медленно. При малых расстояниях наводка может поступать по всем рассмотренным путям. С увеличением расстояния практически исчезают связи через ближние электрическое и магнитное поля, затем перестает влиять электромагнитное поле излучения, а на большом расстоянии наводка может передаваться только по проводам и волноводам. Паразитную связь оценивают с помощью **коэффициента паразитной связи**:

$$\beta = U_{\text{ПН}}/E_{\text{ИН}}. \quad (30.1)$$

Различают следующие **виды паразитных связей (ПС)**: через общее сопротивление, емкостная связь, индуктивная связь, емкостная и индуктивная связи через посторонние провода и связь через электромагнитное излучение.

Паразитная связь через общее сопротивление может осуществляться через общие провода, лепестки и участки корпуса, входящие в состав ИН и ПН, а также через внутреннее сопротивление источника питания (рисунок 30.1, а).

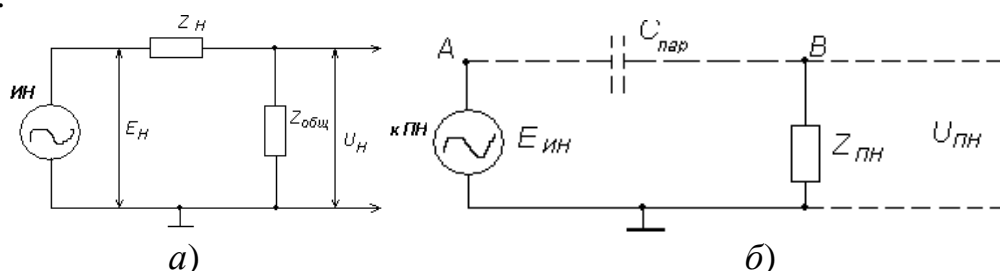


Рисунок 30.1 – Паразитная связь через общее сопротивление (а); емкостная паразитная связь (б)

Коэффициент паразитной через общее сопротивление связи определяется как:

$$\beta_{\text{общ}} = \frac{Z_{\text{общ}}}{Z_{\text{Н}} + Z_{\text{общ}}} \approx \frac{Z_{\text{общ}}}{Z_{\text{Н}}}. \quad (30.2)$$

Через цепи ИН и ПН протекает ток I , создающий на $Z_{\text{общ}}$ падение напряжения $U_{\text{Н}}$, которое оказывается приложенным к ПН. Для **уменьшения этой связи** следует применять источники питания с малым внутренним сопротивлением и использовать отдельные провода для заземления различных частей схемы.

Паразитная емкостная связь осуществляется за счёт ближнего электрического поля через емкость $C_{\text{пар}}$ (рисунок 30.1, б). Так как всегда имеет место неравенство $X_{\text{пар}} \gg Z_{\text{ПН}}$, то коэффициент паразитной емкостной связи определяется как:

$$\beta_e = \frac{Z_{\text{пн}}}{Z_{\text{пн}} + Z_{\text{пар}}} \approx Z_{\text{пн}} \omega C_{\text{пар}}. \quad (30.3)$$

Для уменьшения этой связи следует разнести провода, несущие ВЧ напряжение, и заземлить экраны.

Паразитная индуктивная связь (рисунок 30.2) осуществляется за счёт ближнего магнитного поля через взаимную индуктивность $M_{\text{пар}}$ между индуктивно связанными цепями A (ИН) и B (ПН). Коэффициент индуктивной паразитной связи для этого случая равен:

$$\beta_M = \frac{U_{\text{пн}}}{E_{\text{ин}}} = \frac{\omega M_{\text{пар}} Z_{\text{пн}}}{Z_A Z_B}. \quad (30.4)$$

Для уменьшения этой связи следует разнести провода, несущие ВЧ напряжение, и не применять параллельный монтаж этих проводов.

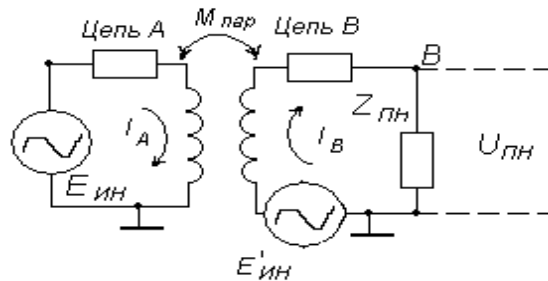


Рисунок 30.2 – Схема возникновения индуктивной паразитной связи

Емкостная и индуктивная паразитные связи по посторонним проводам могут получаться и при отсутствии непосредственной связи между ИН и ПН. На рисунке 30.3, *а* показано размещение ИН и ПН в отдельных экранированных отсеках, находящихся на большом расстоянии друг от друга. Через отсеки проходит провод AB , не имеющий непосредственного отношения к обоим элементам. Этот провод имеет емкость C_1 или взаимную индукцию M_1 по отношению к ИН и емкость C_2 или взаимную индукцию M_2 по отношению к ПН. Из-за наличия провода AB оба элемента имеют емкостную, индуктивную или индуктивно-емкостную ПС. Величина ПС определяется значениями C_1 , C_2 , M_1 , M_2 и Z_{AB} , где Z_{AB} – полное сопротивление провода относительно корпуса. Для уменьшения этих связей следует надевать на посторонние провода, несущие ВЧ напряжение ферритовые бусы и использовать экраны.

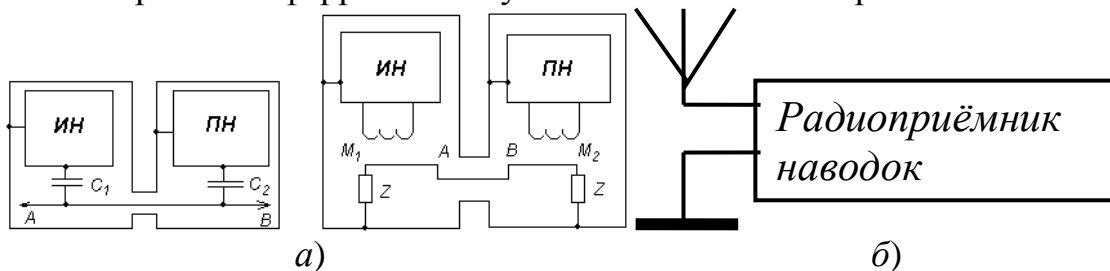


Рисунок 30.3 – Схема паразитных связей: емкостной и индуктивной через посторонний проводник (*а*), через поле излучения (*б*)

Паразитная связь через электромагнитное поле излучения (рисунок 30.3, б) наблюдается при значительных расстояниях между ИН и ПН, на которых непосредственные емкостная и индуктивная ПС практически отсутствуют. Такими считаются расстояния, превышающие пять длин волн. В пределах одного прибора связь через электромагнитное поле излучения в принципе возможна на волнах короче 30 см, т.е. на частотах свыше 1 ГГц. **Для уменьшения этих связей** следует разнести провода, несущие ВЧ напряжение, и использовать фильтры, экраны, заземления и поглощающие покрытия.

Вопрос № 31. Качество и техническое совершенство продукции. Методы оценки уровня качества: дифференциальный и комплексный.

ГОСТ Р ИСО 9000-2001 дает определение: **качество – степень соответствия присущих характеристик требованиям.**

Рекомендуемое практическое определение: **качество – степень удовлетворенности запросов и ожиданий потребителей и других заинтересованных сторон.**

Виды показателей качества продукции:

- единичный (характеризует одно из ее свойств);
- комплексный (характеризующий несколько ее свойств);
- интегральный (является отношением суммарного полезного эффекта от эксплуатации продукции к суммарным затратам на ее создание и эксплуатацию);
- определяющий (по которому принимают решение оценивать качество).

Техническое совершенство продукции (ТС) – совокупность наиболее существенных свойств продукции, определяющих ее качество и характеризующих научно-технические достижения в развитии данного вида продукции.

Номенклатура показателей ТС определяется с учетом:

- международных стандартов;
- национальных стандартов и технических регламентов;
- каталогов, проспектов производителей;
- патентной и конъюнктурно-экономической информации;
- тенденций развития данного вида продукции.

Различают две группы показателей ТС:

- 1) классификационные (для отнесения к определенному виду продукции, они не используются при оценке);
- 2) оценочные.

Дифференциальный метод оценки качества основан на использовании единичных показателей качества.

При использовании дифференциального метода уровень качества характеризуется n числами (относительными единичными показателями качества D_i) соответственно количеству n учитываемых свойств.

Относительные единичные показатели качества D_i определяются по одной из двух формул:

$$D_i = \frac{P_i}{P_{i\text{баз}}} \quad (31.1)$$

или

$$D_i = \frac{P_{i\text{баз}}}{P_i}, \quad (31.2)$$

где P_i – значение i -го показателя оцениваемой продукции (абсолютное); $P_{i\text{баз}}$ – базовое значение i -го показателя (абсолютное).

Из формул (31.1) и (31.2) выбирается та, при которой улучшению качества оцениваемой продукции по данному показателю соответствует увеличение D_i .

Комплексный метод оценки качества. При использовании комплексного метода уровень качества может быть охарактеризован одним числом – обобщенным показателем.

Для вычисления комплексных показателей наиболее часто применяют метод среднего взвешенного:

$$Q = \sum_{i=1}^n m_i D_i,$$

где D_i – относительный единичный показатель i -го свойства, определяемый по формуле (31.1) или (31.2), безразмерная величина; m_i – коэффициент весомости единичного показателя i -го свойства; n – число свойств, принимаемых во внимание при оценке.

Если n охватывает все свойства, по совокупности которых принимается решение о качестве продукции, то показатель Q является **определяющим**. Поскольку использован комплексный метод, то показатель оценки качества будет **обобщенным**.

Рекомендуется выбирать m_i исходя из условия нормировки:

$$\sum_{i=1}^n m_i = 1.$$

Вопрос № 32. Обязательное документальное подтверждение соответствия и защита прав потребителя. Декларирование и сертификация соответствия. Схемы подтверждения соответствия.

С 1 июля 2003 г. вступил в действие Федеральный закон (ФЗ) «О техническом регулировании», заменяющий законы «О стандартизации» и «О сертификации...». Основное предназначение закона – предотвратить нарушение интересов потребителей и общества.

В соответствии с ФЗ «О защите прав потребителей», потребитель имеет право:

1. На безопасность товара, услуги.
2. На информацию о товаре, услуге (обеспечение возможности правильного выбора).
3. На возмещение ущерба в случае ненадлежащей информации или ненадлежащего качества товара.

Реализация прав потребителей и соблюдение интересов общества предполагает обеспечение соответствия продукции/услуг установленным требованиям. Обязательные требования устанавливаются только техническими регламентами.

Технические регламенты принимают:

- Государственная Дума РФ;
- Правительство РФ;
- Президент РФ.

Согласно ФЗ «О техническом регулировании» обязательное документальное подтверждение соответствия осуществляется в двух формах:

- декларирование соответствия (приоритетная форма);
- обязательная сертификация третьей независимой стороной.

Приоритетной формой обязательного подтверждения соответствия является декларирование соответствия первой стороной, т.е. производителем. Обязательная сертификация предусматривается только в обоснованных случаях:

- высокая степень потенциальной опасности продукции (например, лекарственные средства, радиоактивные материалы и др);
- международные соглашения.

Необходимость обязательной сертификации для конкретного вида продукции устанавливается техническим регламентом.

Декларация о соответствии – документ, в котором изготовитель, продавец или исполнитель удостоверяет, что поставляемая, продаваемая им продукция или оказываемая услуга соответствует требованиям, установленным в технических условиях на продукцию/услугу. Декларация о соответствии заполняется по установленной форме и подписывается руководителем организации.

Согласно международному определению (ИСО/МЭК), сертификация соответствия – действие третьей стороны, доказывающее, что должным образом идентифицированная продукция, процесс или услуга соответствуют конкретному стандарту или иному нормативному документу. Помимо рассмотренной выше обязательной сертификации, возможна добровольная сертификация, осуществляемая признанными органами по желанию производителя.

Сертификат соответствия – название документа, которым завершается процесс сертификации. Порядок и условия оформления, выдачи и регистрации сертификатов устанавливается в каждой системе сертификации.

Процедуры сертификации осуществляются по схемам обязательного подтверждения соответствия, каждая из которых представляет собой совокупность действий, результаты которых рассматриваются в качестве доказательств соответствия продукции установленным требованиям. Конкретная схема подтверждения соответствия устанавливается техническим регламентом, исходя из особенностей продукции.

Схемы могут включать одну или несколько операций, результаты которых необходимы для подтверждения соответствия продукции установленным требованиям, а именно:

- испытания (типовых образцов, партий или единиц продукции);
- сертификацию системы качества (СМК) производителя;
- инспекционный контроль (за продукцией, производством, системой качества).

Инспекционный контроль проводится в межсертификационный период не реже одного раза в год. Сертификат соответствия, как правило, выдается предприятию органом по сертификации на три года. По прошествии этого времени проводится повторная сертификация (ресертификация).

Вопрос № 33. Передаточная функция САУ, комплексная частотная функция, АЧХ, ФЧХ, АФЧХ.

Если система автоматического управления (САУ) (или элемент САУ) имеет один вход и один выход, связь между сигналом на выходе $x_{\text{ВЫХ}}(t)$ и сигналом на входе $x_{\text{ВХ}}(t)$ в общем случае описывается дифференциальным уравнением вида:

$$\begin{aligned} a_n \frac{d^n x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_{\text{ВЫХ}}(t)}{dt} + a_0 x_{\text{ВЫХ}}(t) = \\ = b_m \frac{d^m x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_{\text{ВХ}}(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx_{\text{ВХ}}(t)}{dt} + b_0 x_{\text{ВХ}}(t). \end{aligned} \quad (33.1)$$

В операционном исчислении выражение $x(t)$ называют оригиналом функции x . Перевести дифференциальное уравнение (33.1) в линейное при нулевых начальных условиях можно с помощью преобразования Лапласа. При этом переходят от **оригинала функции** $x(t)$ к **изображению функции** $X(p)$, где p – комплексная переменная. При преобразовании Лапласа $X(p)$ и $x(t)$ связаны соотношением, называемым прямым преобразованием Лапласа:

$$X(p) = \int_0^{\infty} x(t) \cdot e^{-pt} dt = L\{x(t)\}. \quad (33.2)$$

При переходе от оригиналов функций к их изображениям в уравнении (33.1) при нулевых начальных условиях справедлива чисто формальная замена $x(t)$ на $X(p)$, а $(d/dt)^n$ на p^n . Тогда дифференциальное уравнение (33.1) преобразуется в линейное уравнение:

$$\begin{aligned} a_n P^n X_{\text{ВЫХ}}(P) + a_{n-1} P^{n-1} X_{\text{ВЫХ}}(P) + \dots + a_1 P X_{\text{ВЫХ}}(P) + a_0 X_{\text{ВЫХ}}(P) = \\ = b_m P^m X_{\text{ВХ}}(P) + b_{m-1} P^{m-1} X_{\text{ВХ}}(P) + \dots + b_1 P X_{\text{ВХ}}(P) + b_0 X_{\text{ВХ}}(P) \end{aligned} \quad (33.3)$$

и

$$\begin{aligned} X_{\text{ВЫХ}}(P) [a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + a_0] = \\ = X_{\text{ВХ}}(P) [b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + b_0]. \end{aligned} \quad (33.4)$$

Величина

$$W(P) = \frac{X_{\text{ВЫХ}}(P)}{X_{\text{ВХ}}(P)} = \frac{b_m P^m + b_{m-1} P^{m-1} + \dots + b_1 P + b_0}{a_n P^n + a_{n-1} P^{n-1} + \dots + a_1 P + a_0} \quad (33.5)$$

называется **передаточной функцией системы** (или элемента).

Если на вход линейной непрерывной системы (или отдельного звена) подать синусоидальные колебания с постоянными амплитудой и частотой

$$x_{\text{ВХ}}(t) = A_{\text{ВХ}} \sin \omega t, \quad (33.6)$$

то после затухания переходных процессов на выходе также возникают синусоидальные колебания

$$x_{\text{ВЫХ}}(t) = A_{\text{ВЫХ}} \sin(\omega t + \varphi). \quad (33.7)$$

Комплексные амплитуды сигналов $x_{\text{вх}}(t)$ на входе и $x_{\text{вых}}(t)$ на выходе можно записать как:

$$\dot{X}_{\text{вх}} = A_{\text{вх}} e^{j\omega t} \text{ и } \dot{X}_{\text{вых}} = A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)} \dot{X}_{\text{вх}}. \quad (33.8)$$

Отношение $W(j\omega)$ комплексных амплитуд выходных и входных колебаний называется **комплексной частотной функцией**:

$$\frac{\dot{X}_{\text{вых}}}{\dot{X}_{\text{вх}}} = \frac{A_{\text{вых}} e^{j(\omega t + \varphi)}}{A_{\text{вх}} e^{j\omega t}} = W(j\omega). \quad (33.9)$$

Выражение для комплексной частотной функции $W(j\omega)$ можно получить чисто формально путем замены в выражении передаточной функции переменной p на переменную $j\omega$. Комплексную частотную функцию $W(j\omega)$ можно представить в виде:

$$W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega) = A(\omega)e^{j\varphi(\omega)}, \quad (33.10)$$

где $P(\omega)$ и $Q(\omega)$ – действительная и мнимая части $W(j\omega)$, а $A(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ – модуль и аргумент комплексной функции.

При фиксированном значении частоты ω комплексную частотную функцию можно изобразить вектором на комплексной плоскости (рисунок 33).

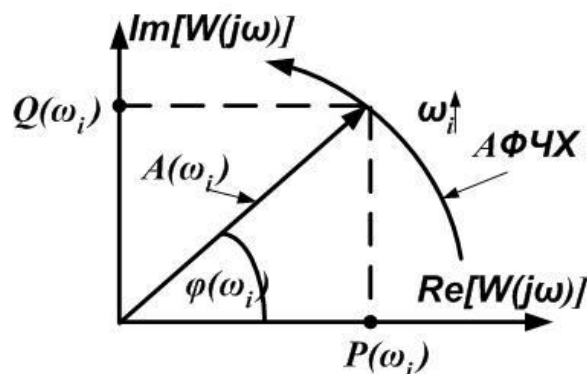


Рисунок 33 – Изображение частотных характеристик САУ на комплексной плоскости

Геометрическое место концов векторов комплексной частотной функции при изменении частоты от нуля до бесконечности называется **амплитудно-фазовой частотной характеристикой (АФЧХ)**.

$P(\omega)$ называется **вещественной частотной**, а $Q(\omega)$ – **мнимой частотной характеристикой**.

$A(\omega)$ показывает отношение амплитуд выходного и входного гармонических сигналов при изменении частоты и называется **амплитудной частотной характеристикой**.

$\varphi(\omega)$ показывает сдвиг фазы выходного гармонического сигнала относительно входного при изменении частоты и называется **фазовой частотной характеристикой**.

Между всеми частотными характеристиками существует непосредственная связь, вытекающая из тригонометрических соотношений:

$$\begin{aligned}
 A(\omega) &= |W(j\omega)| = \sqrt{P^2(\omega) + Q^2(\omega)}; \\
 \varphi(\omega) &= \operatorname{arctg} \frac{Q(\omega)}{P(\omega)}; \\
 P(\omega) &= A(\omega) \cos \varphi(\omega); \\
 Q(\omega) &= A(\omega) \sin \varphi(\omega).
 \end{aligned}
 \tag{33.11}$$

В практических расчетах чаще всего амплитудную и фазовую частотные характеристики изображают в логарифмическом масштабе и вводят понятия **логарифмических амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик (ЛАЧХ и ЛФЧХ)**. ЛАЧХ – это зависимость $G(\omega)$ от $\lg \omega$, где $G(\omega) = 20 \cdot \lg A(\omega)$ – величина логарифма АЧХ, выраженная в децибелах. ЛФЧХ – это зависимость угла $\varphi(\omega)$ от $\lg(\omega)$.

Вопрос № 34. Исследование САУ на устойчивость с помощью критериев.

Система называется устойчивой, если:

- 1) после снятия воздействия по окончании переходного процесса система возвращается в исходное равновесное состояние;
- 2) после изменения воздействия на постоянную величину по окончании переходного процесса система приходит в новое равновесное состояние.

Правила, позволяющие определять устойчивость системы, называют **критериями устойчивости** (алгебраический критерий Гурвица и частотные критерии Михайлова и Найквиста).

Критерий устойчивости Гурвица. По этому критерию условия устойчивости сводятся к выполнению ряда неравенств, связывающих коэффициенты полинома $A(p) = a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + \dots + a_1 p + a_0$, стоящего в знаменателе выражения для передаточной функции замкнутой САУ. Полагая $a_n > 0$ (если a_n отрицательно, то это условие можно выполнить, умножив весь полином на минус единицу), составляют из коэффициентов $A(p)$ определитель Гурвица:

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_{n-1} & a_{n-3} & a_{n-5} & \dots & \dots & 0 \\ a_n & a_{n-2} & a_{n-4} & \dots & \dots & 0 \\ 0 & a_{n-1} & a_{n-3} & \dots & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_1 & 0 \\ 0 & \dots & \dots & \dots & a_2 & a_0 \end{vmatrix}. \quad (34.1)$$

В первой строке записываются коэффициенты с условно нечетными индексами (т.е. коэффициенты с индексами n минус нечетное число, где n – порядок характеристического полинома), во втором – с условно четными (т.е. n минус четное число). Концы строк заполняются нулями так, чтобы матрица имела n столбцов. Третья и четвертая строки получаются сдвигом первых двух на одно место вправо и т.д.; причем всего строк будет n . Условия устойчивости заключаются в требовании положительности определителя Гурвица и всех его диагональных миноров.

Критерий устойчивости Михайлова основан также на рассмотрении характеристического полинома $A(p)$ замкнутой САУ. Подставив в этот полином вместо p мнимую переменную $j\omega$, получим комплексную функцию:

$$A(j\omega) = X(\omega) + jY(\omega),$$

где $X(\omega)$ – действительная часть, полученная из членов $A(p)$, содержащих четные степени p , а $Y(\omega)$ – мнимая часть, полученная из членов $A(p)$ с нечетными степенями p . Изобразим $A(j\omega)$ в виде графика в комплексной плоскости, называемого годографом Михайлова (рисунок 34.1).

Каждому значению ω соответствуют определенные значения $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ и определенная точка на плоскости. При $\omega = 0$ функция $A(j\omega) = a_0$, т.е.

годограф начинается на действительной оси. При $\omega \rightarrow \infty$ функция $A(j\omega)$ тоже неограниченно возрастает.

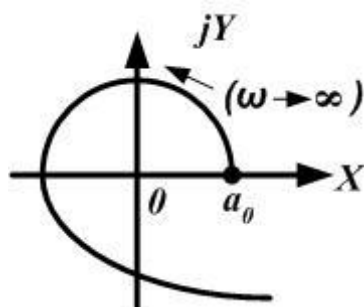


Рисунок 34.1 – Годограф Михайлова

Сформулируем **критерий Михайлова**: система устойчива, если годограф $A(j\omega)$, начинаясь на действительной положительной полуоси, огибает против часовой стрелки начало координат, проходя последовательно n квадрантов, где n – порядок системы.

Годограф на рисунке 34.1 соответствует устойчивой САУ четвертого порядка.

Устойчивость имеет место, если нули $X(\omega)$ и $Y(\omega)$ чередуются с ростом ω , начиная с $\omega = 0$, когда $Y(\omega) = 0$, а $X(\omega) > 0$.

Условием нахождения САУ на границе устойчивости является прохождение годографа Михайлова через начало координат при какой-то частоте ω_0 .

Критерий устойчивости Найквиста. Для случая, если разомкнутая цепь устойчива, условия устойчивости замкнутой САУ сводится к требованию, чтобы АФЧХ разомкнутой цепи $W_{pc}(j\omega)$ не охватывала точку с координатами $(-1, j0)$.

Если АФЧХ разомкнутой цепи проходит через точку $(-1, j0)$, то замкнутая САУ будет находится на границе устойчивости.

На рисунке 34.2 приведены три АФЧХ. Кривая 1 соответствует устойчивой САУ, кривая 3 – неустойчивой, а кривая 2 – нахождению САУ на границе устойчивости.

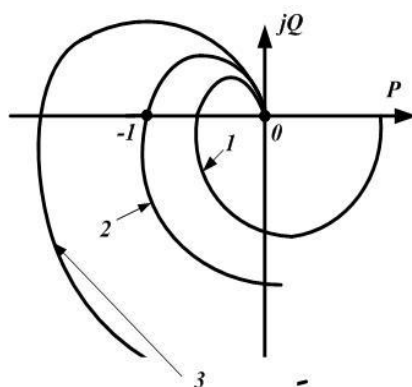


Рисунок 34.2 – АФЧХ САУ

Если уменьшать коэффициент передачи в неустойчивой САУ, то ее АФЧХ будет сжиматься к началу координат, в результате чего система станет устойчивой.

В соответствии с критерием Найквиста об устойчивости можно судить не только по АФЧХ, но и совместно по амплитудной и фазовой частотным характеристикам разомкнутой цепи. Обычно при этом пользуются логарифмическими характеристиками. Но если ЛАЧХ используется асимптотическая, то расчеты будут достаточно грубыми.

Неохват АФЧХ точки $(-1, j0)$ имеет место, если при частоте, на которой $A(\omega) = 1$, абсолютное значение фазы меньше π . Но значение $A(\omega) = 1$ соответствует $G = 20 \cdot \lg A = 0$. Поэтому для устойчивости замкнутой САУ необходимо, чтобы ЛАЧХ разомкнутой цепи пересекла ось абсцисс раньше, чем фаза, спадая, перейдет за значение $-\pi$.

На рисунке 34.3 приведены ЛАЧХ и ЛФЧХ, соответствующие устойчивой САУ. Из рисунка видно, как определить запас устойчивости по усилению ΔG и запас устойчивости по фазе $\Delta \varphi$.

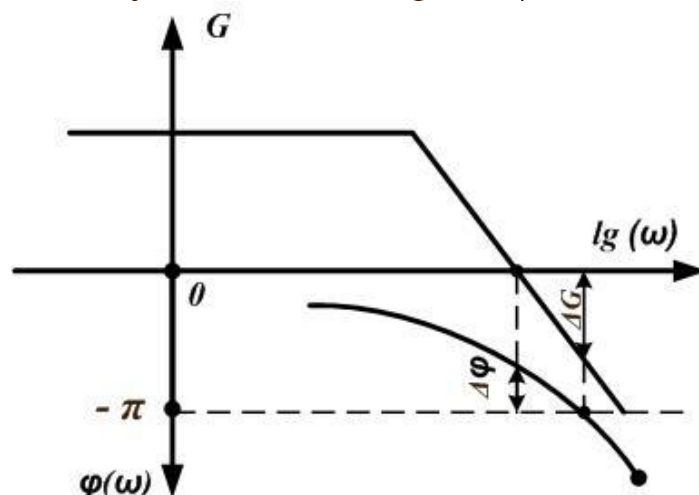


Рисунок 34.3 – ЛАЧХ и ЛФЧХ, соответствующие устойчивой САУ

Физический смысл критерия Найквиста заключается в том, что при увеличении частоты входного воздействия сигнал, проходящий по цепи обратной связи, оказывается в противофазе с входным. А это равносильно замене отрицательной обратной связи на положительную. Если же при этой частоте разомкнутый контур обладает усилением (т.е. $k > 1$), то замкнутая САУ становится неустойчивой (любое увеличение сигнала на выходе приводит к увеличению сигнала на входе по цепи обратной связи, что вызывает дальнейший рост выходного сигнала и т.д.).

Для аналитических расчетов с помощью критерия Найквиста условия нахождения системы на границе устойчивости можно записать в двух формах:

а) используя вещественную и мнимую частотные функции разомкнутой цепи:

$$\begin{cases} \operatorname{Re}[W_{\text{пр}}(j\omega)] = -1, \\ \operatorname{Im}[W_{\text{пр}}(j\omega)] = 0; \end{cases} \quad (34.2)$$

б) используя амплитудную и фазовую частотные характеристики разомкнутой цепи:

$$\begin{cases} A(\omega) = 1, \\ \varphi(\omega) = -\pi. \end{cases} \quad (34.3)$$

Вопрос № 35. Аддитивная технология при изготовлении печатных плат (схема технологического процесса, разновидности методов изготовления плат, преимущество аддитивной технологии перед субтрактивной).

Несмотря на то, что методы изготовления ПП, основанные на травлении фольгированного диэлектрика, вследствие высокого уровня их оснащённости занимают доминирующее положение в массовом производстве, имеются серьезные тенденции исключить субтрактивный метод ввиду ряда его недостатков. Возможность для этого представляет **аддитивный метод**, приобретающий все большее значение. При этом методом исходным является нефольгированный диэлектрик (например, стеклотекстолит), на поверхность которого (как и на стенки просверленных отверстий) наносится желаемый рисунок печатной платы.

Рассмотрим **два основных варианта** аддитивного метода изготовления ПП: **химический** и **химико-гальванический**. В первом варианте проводящие слои получают на основе восстановительного осаждения; этот процесс по сравнению с другими бестоковыми методами позволяет осаждать весьма толстые слои – до 10 мкм (рисунок 35.1).



Рисунок 35.1 – Схема технологического процесса изготовления ДПП химическим аддитивным методом

Химический метод обладает некоторыми специфическими особенностями. Толщина слоя равномерна в отверстиях и на поверхности, а осаждаемые слои меди обнаруживают хорошие механические и физические свойства (твердость, износостойкость, паяемость). Недостатками химического метода являются высокая стоимость изделия (в 3...4 раза выше, чем при гальваническом осаждении) и низкая скорость осаждения.

Чтобы устранить недостатки химического метода, часто обращаются к комбинированным методам. При этом на поверхности нефольгированного диэлектрика сначала химически получают связанный с подложкой слой меди толщиной до 5 мкм, который при последующем селективном гальваническом наращивании служит рисунком печатных проводников, а по окончании наращивания вытравляется, где это необходимо. Принцип и важнейшие операции этого метода представлены на рисунке 35.2.

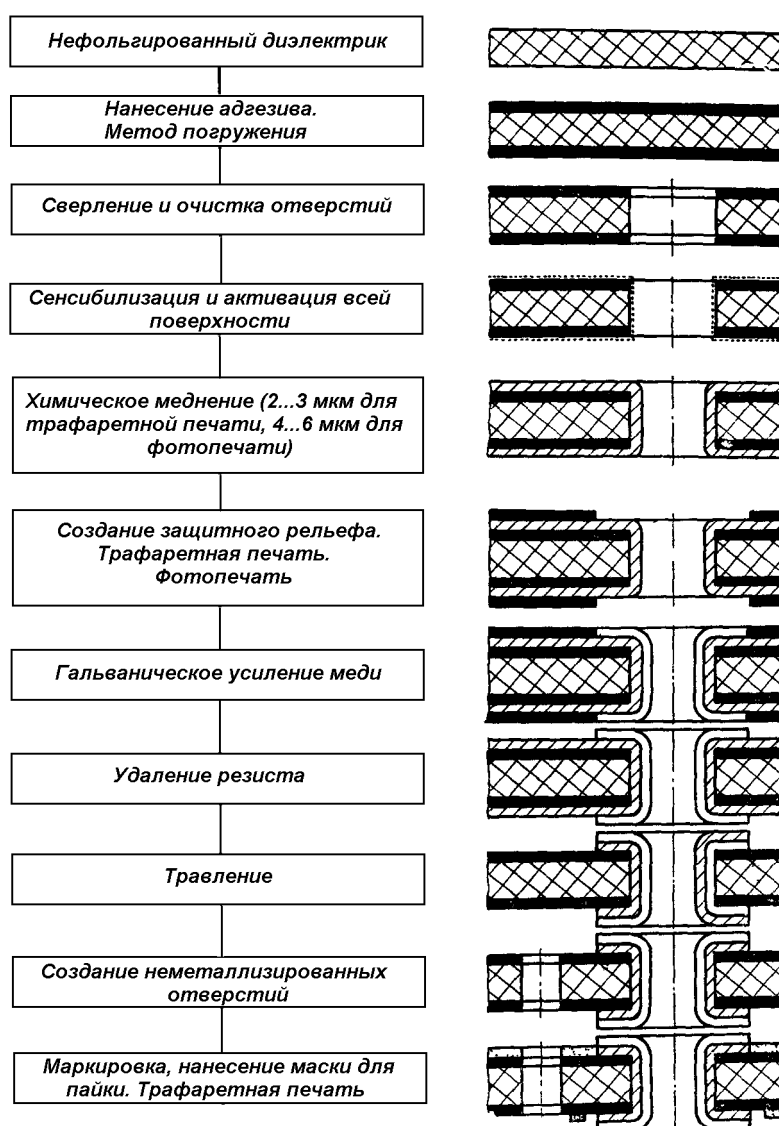


Рисунок 35.2 – Схема технологического процесса изготовления ДПП химико-гальваническим аддитивным методом

Этот метод обладает рядом положительных свойств:

- повышение производительности труда;
- возможность эффективного использования оборудования, применяемого при субтрактивном методе.

Недостатком является неравномерная толщина покрытия в отверстиях из-за неравномерного распределения плотности тока гальванических ванн и возникновение переходной зоны между химически восстановленной и гальванически осажденной медью.

Необходимую для химического осаждения активацию диэлектрика можно осуществить как с помощью включения катализатора в диэлектрик при его производстве, так и с помощью растворов двухлористого олова и хлористого палладия. При использовании диэлектрика с внедренным катализатором первой операцией после сверления отверстий является создание рисунка схемы на основе фоторезиста, поэтому в восстановительной ванне осаждается только рисунок печатных проводников и осуществляется металлизация отверстий. Так как активацию с помощью растворов можно производить только на всей поверхности ПП, то создание защитного рельефа возможно только после создания медного слоя толщиной 5 мкм. После химического или гальванического усиления меди необходима относительно короткая операция травления для удаления медного покрытия толщиной 5 мкм с нежелательных мест.

Для обеспечения пайки ЭРЭ платы подвергаются покрытию сплавом ПОС-61 горячим способом. Покрытие наносится по методике, предусматривающей после погружения плат в расплавленный припой обдувку их горячим воздухом с целью выглаживания слоя припоя и удаления излишков припоя. В установках для выполнения этой операции платы, подвергнутые флюсованию, проходят зону подогрева с целью удаления влаги и смягчения термоудара, вызывающих коробление при погружении в расплавленный припой. Время выдержки плат в расплавленном припое не должно превышать 4 с. Основная часть установки – воздушные ножи – предназначена для равномерной подачи горячего воздуха по всей длине плат. Толщина слоя припоя на платах в среднем составляет около 8 мкм.

Особенно экономичен аддитивный метод при изготовлении МПП с металлизированными отверстиями.

Существенными преимуществами аддитивного метода по сравнению с субтрактивным методом являются:

- более высокая надежность, т.к. проводники и металлизация отверстий получаются в едином гальваническом процессе;
- однородность соединений между проводниками и металлизацией отверстий;
- отсутствие подтравливания;
- отсутствие гальванического защитного покрытия при травлении;
- экономия меди, химикатов для травления и уменьшение затрат на нейтрализацию сточных вод;
- упрощение технологического процесса.

Вопрос № 36. Технология поверхностного монтажа (ТМП) (варианты базовых конструкций поверхностно-монтируемых узлов при ТМП, элементная база для ТМП, технология пайки поверхностно-монтируемых компонентов, применение электропроводящих клеев в ТМП).

Термин «технология поверхностного монтажа» является общим обозначением нового направления в области электроники, включающего переход от монтажа компонентов с выводами в отверстия к поверхностному монтажу безвыводных компонентов в микрокорпусах или компонентов с планарными выводами. Навесные компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа, в основном, намного меньше, чем их традиционные эквиваленты, монтируемые в отверстия. Вместо длинных выводов они имеют короткие выводы или просто внешние контактные площадки. Такие компоненты непосредственно закрепляются на печатной плате при совмещении их выводов или внешних контактов с контактными площадками.

Конструкции узлов на печатных платах, изготавливаемых по ТМП, можно условно разделить на три группы с учетом того, что в переходном варианте возможно применение компонентов как монтируемых в отверстия (КМО), так и на поверхность печатной платы (КПМ).

К первой группе конструкций УПП можно отнести сборки, основанные только на ТМП, одностороннем и двухстороннем монтаже (рисунок 36.1, а).

При двустороннем монтаже более крупные КПМ желательно устанавливать на вторую сторону ПП, что позволит исключить технологическое приклеивание КПМ на первой стороне платы.

Ко второй группе конструкций (рисунок 36.1, б) можно отнести сборки смешанного монтажа, когда с одной стороны устанавливаются КМО, а с другой – КПМ. В переходном варианте этот вид конструкции наиболее характерен, особенно, для бытовой электронной аппаратуры. Построение процесса монтажа для этой группы типично для мелкосерийного производства или при небольшой доле КМО и их широкой номенклатуре, что приводит к ручной установке КМО. В случае автоматизированной установки КМО с подгибкой выводов они устанавливаются в первую очередь, однако досборка КМО, как правило, остается.

Необходимо отметить, что КПМ при таком монтаже должны выдерживать температурное воздействие волны припоя, и желательны их небольшие размеры (во избежание теневых эффектов при пайке волной припоя).

При необходимости монтажа микросхем с планарными выводами их рекомендуется располагать со стороны КМО и монтировать в последнюю очередь с применением пайки локальным нагревом.

К третьей группе конструкций (рисунок 36.1, в) относится сочетание двустороннего монтажа КПМ и одностороннего монтажа КМО.

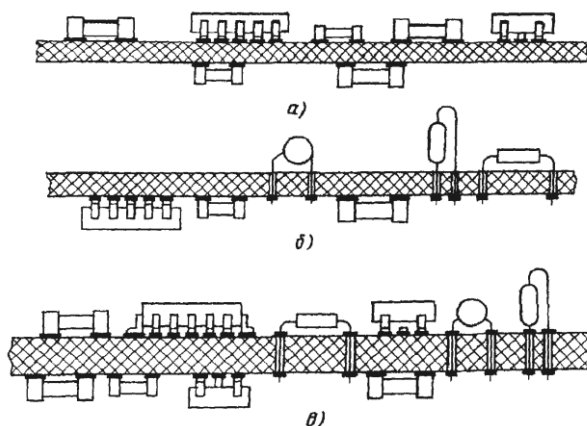


Рисунок 36.1. Варианты базовых конструкций поверхностно-монтируемых узлов

Основной предпосылкой появления ТМП является новая элементная база – компоненты для поверхностного монтажа, которые по габаритам намного меньше, чем их традиционных (DIP) эквиваленты, монтируемые в отверстия. Основными особенностями компонентов для поверхностного монтажа являются:

- 1) малые габаритные размеры;
- 2) симметричное и точное расположение выводов или контактных площадок (поверхностей) относительно геометрического центра корпуса, что позволяет производить захват компонента вакуумной присоской (пинцетом), ориентировать его симметрично по осям X и Y в сборочных головках и устанавливать на печатную плату с совмещением выводов с припойными площадками знакоместа;
- 3) возможность применения групповой пайки общим нагревом;
- 4) отсутствие предварительной подготовки выводов (контактных площадок).

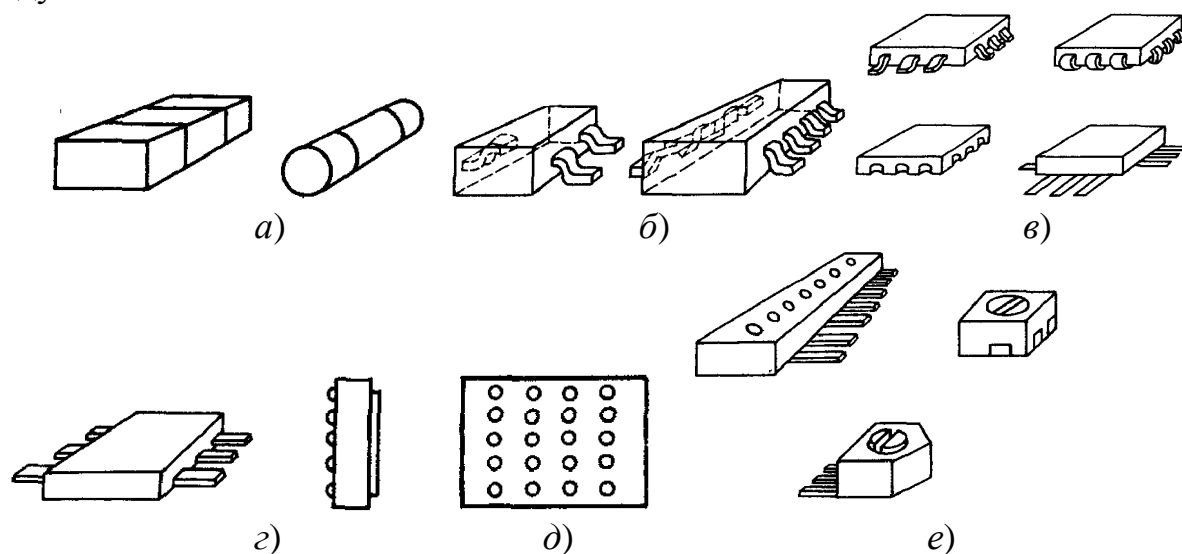
На рисунке 36.2 представлены стандартные конструкции корпусов компонентов, предназначенных для поверхностного монтажа.

Большинство методов микроконтактирования в ТМП для обеспечения электрического соединения навесного компонента с контактной площадкой реализуются с помощью различных способов групповой пайки.

Метод пайки волной припоя (ПВП) является эффективным при реализации смешанных вариантов сборки и монтажа изделий. Качество паяных соединений в значительной степени определяется геометрическими размерами волны, скоростью и другими ее характеристиками. Для улучшения качества пайки создают однородный управляемый вертикальный поток асимметричной волны.

Пайка расплавлением дозированного припоя в парогазовой среде. Этот метод (называемый также **конвекционной пайкой**) обеспечивает равномерные нагрев и оплавление всех мест пайки одновременно, независимо от геометрии ПП и контактных площадок, высокопроизводителен, хотя до

настоящего времени более дорогостоящ, чем ПВП. Данный способ применим только к микросборкам с поверхностным монтажом. Разновидностью данного способа пайки является оплавление дозированного припоя в среде нагретого воздуха.



a - безвыводные с цилиндрической или прямоугольной формой корпуса;
б - миниатюрные в пластмассовом корпусе с жесткоориентированными плоскими выводами;
в - керамические или пластмассовые корпуса с выводами в виде контактных площадок или с жесткоориентированными выводами;
г - металлостеклянные, металлокерамические или стеклокерамические корпуса с планарными выводами;
д - керамические корпуса с матричными выводами;
е - керамические или пластмассовые корпуса с выводами в виде контактных площадок или с жесткоориентированными выводами

Рисунок 36.2 – Элементная база для ТМП

Пайка расплавлением дозированного припоя при его нагреве излучением (ПРДПИ). Процесс пайки компонентов, собранных на коммутационной плате, с помощью **инфракрасного (ИК) нагрева** аналогичен пайке в парогазовой среде, за исключением того, что нагрев платы с компонентами производится не парами жидкости, а ИК-излучением. Основным механизмом передачи тепла, используемым в установках пайки с ИК-нагревом, является излучение. Передача тепла излучением имеет большое преимущество перед теплопередачей за счет теплопроводности и конвекции, так как это единственный из механизмов теплопередачи, обеспечивающий передачу тепловой энергии по всему объему монтируемого устройства. Остальные механизмы теплопередачи обеспечивают передачу тепловой энергии только поверхности монтируемого изделия.

Применение **лазерного излучения** для процессов пайки позволяет получить эффективное средство бесконтактного нагрева. Источником лазерного излучения являются оптические квантовые генераторы (ОКГ). В технологии пайки используются в основном твердотельные лазеры, работающие на длине волны $\lambda = 1.06$ мкм, что связано с распространенностью твердотельных лазе-

ров и простотой управления их энергетическими и оптическими характеристиками. Лазерное излучение обеспечивает возможность прецизионной пайки ИС с планарными выводами, безвыводных поверхностно-монтируемых компонентов на ПП.

Применение эластичных электропроводящих клеев имеет определенные преимущества в сравнении с методами, использующими припой. Так, клеи лучше выдерживают механические напряжения, более пластичны. Разработчики этого метода в ТМП считают, что наиболее важной проблемой в период адаптации традиционных методов пайки к новой технологии является недостаточная прочность соединения компонента с контактной площадкой платы.

Технологический процесс сборки и монтажа при использовании электропроводящих клеев имеет следующую последовательность: слой электропроводящего клея толщиной примерно 50 мкм пропечатывается на контактные площадки платы методом сеткографии; массивные компоненты крепятся к плате непроводящим клеем; прочие навесные компоненты устанавливаются на плате в соответствии со сборочным чертежом; отверждение клея происходит в печи при ИК нагреве.

Электрические соединения, полученные таким методом, исключительно надежны, а изделия, изготовленные с помощью такого монтажа, ремонтнопригодны и имеют более высокий выход годных изделий, чем при пайке.

Электропроводящие клеи в ТМП могут также использоваться для замены металлических дорожек на электропроводящие клеевые, выполняющие функции коммутации и наносимые методом трафаретной печати на ПП. Полимерные материалы служат для создания диэлектрических и проводящих слоев, отверждающихся при воздействии ультрафиолетового излучения, что не требует нагрева выше комнатной температуры и сокращает время проведения операции по формированию межсоединений навесной компонент-проводящая дорожка ПП до нескольких секунд.

Вопрос № 37. Электромагнитные волны в диэлектриках. Фазовая скорость. Медленные ЭМВ. Поверхностные волны.

Для диэлектриков характерны прочные связи электронов с атомами, т.е. высокие значения энергии связи. Поэтому при помещении образца диэлектрика в электрическое поле (ЭП) сквозного дрейфового движения носителей заряда в толще материала не наблюдается, по крайней мере, не в слишком сильных ЭП.

Однако при этом молекула диэлектрика деформируется таким образом, что ее можно представить совокупностью двух разноименных зарядов $+q$ и $-q$, смещенных в пространстве на некоторое расстояние l . Такую систему из двух зарядов называют **электрическим диполем**. Очевидно, что величина l тем больше, чем выше напряженность приложенного ЭП.

При описании электродинамических явлений в диэлектриках принято вводить векторное поле \vec{D} (поле электрического смещения):

$$\vec{D} = \mu_0 \vec{E} + \vec{P}, \quad (37.1)$$

где μ_0 – абсолютная магнитная проницаемость вакуума; \vec{E} – напряженность электрического поля; \vec{P} – поляризованность.

Закон Гаусса относительно поля \vec{D} принимает вид:

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho_{\text{св}},$$

где $\rho_{\text{св}}$ – объемная плотность свободных зарядов.

Во многих диэлектриках при не слишком сильных внешних полях наблюдается прямая пропорциональность между векторами \vec{E} и \vec{P} в каждой точке пространства:

$$\vec{P} = k_{\text{Э}} \vec{E}. \quad (37.2)$$

Это равенство справедливо при условии, что вектор \vec{E} меняется во времени достаточно медленно и поэтому вектор \vec{P} успевает «следить» за вектором \vec{E} . Коэффициент $k_{\text{Э}}$ называют диэлектрической восприимчивостью вещества. Физический смысл формулы (37.2) – некоторая аналогия между поляризуемой молекулой и упругой пружиной, удлинение которой пропорционально приложенной силе. Подставив (37.2) в (37.1), получим универсальную характеристику поляризуемого вещества – абсолютную диэлектрическую проницаемость:

$$\varepsilon_{\text{а}} = \varepsilon_0 + k_{\text{Э}}, \quad (37.3)$$

где ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума.

Тогда формула (37.1) предстает в виде **материального уравнения для электрического поля в диэлектрике**:

$$\vec{D} = \varepsilon_{\text{а}} \vec{E}. \quad (37.4)$$

В инженерных расчетах часто используют безразмерную характеристику материала – относительную диэлектрическую проницаемость:

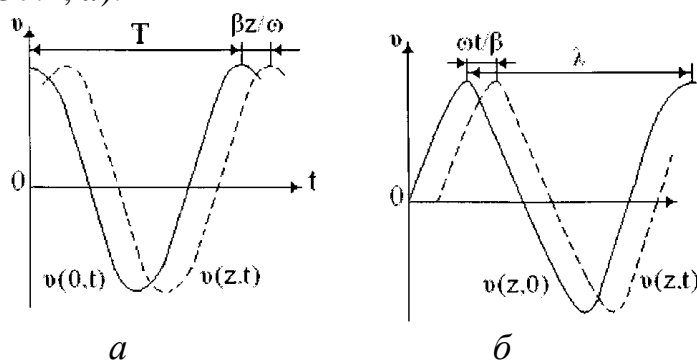
$$\varepsilon = \varepsilon_a / \varepsilon_0 . \quad (37.5)$$

Предположим, что в каждой точке пространства с декартовой системой координат (x, y, z) определена некоторая величина v (физическая природа ее на данном этапе безразлична), описываемая формулой:

$$v(z, t) = V_m \cos(\omega t - \beta z), \quad (37.6)$$

где V_m, ω, β – действительные числа.

Данная зависимость является математической моделью **однородной плоской волны**. Мгновенные значения однородной плоской волны не зависят от поперечных координат x и y . Как временная, так и пространственная зависимости величины $v(z, t)$ описываются гармоническими функциями. Действительно, зафиксировав точку $z = 0$, получим $v(0, t) = V_m \cos \omega t$. Колебания в точке с координатой $z > 0$ имеют вид $v(z, t) = V_m \cos(\omega t - \beta z)$, т.е. характеризуются теми же амплитудой V_m и частотой ω , однако запаздывают по фазе на βz радиан (рисунок 37.1, а).



а – изменение поля во времени; б – изменение поля в пространстве

Рисунок 37.1 – Однородная плоская волна

Рассмотрим «мгновенную фотографию» процесса $v(z, t)$ в начальный момент времени $t = 0$ (рисунок 37.1, б). Данная зависимость описывается гармонической функцией $v(z, 0) = V_m \cos \beta z$. Параметр β играет роль «пространственной частоты» процесса и называется **коэффициентом фазы плоской волны**. Величина β имеет размерность рад/м или м^{-1} .

Функция $v(z, 0)$ периодична; ее период λ называют **длиной волны**. Между величинами β и λ существует очевидная связь: $\beta = 2\pi/\lambda$.

Чтобы изобразить график функции $v(z, t)$ при $t > 0$, формулу (37.6) удобно записать в виде $v(z, t) = V_m \cos(\beta z - \omega t)$. При этом видно, что с ростом t фазовый сдвиг ωt увеличивается, так что исходная кривая $v(z, 0)$ сдвигается вдоль оси вправо, т.е. в сторону увеличения координаты z (рисунок 37.1, б).

Назовем **плоскостью равных фаз** или **волновым фронтом** воображаемую бесконечно протяженную плоскость, перпендикулярную оси z . Координата z этой плоскости при любых t удовлетворяет соотношению:

$$\omega t - \beta z = \text{const}. \quad (37.7)$$

Волновой фронт данной плоской волны перемещается вдоль оси z с **фазовой скоростью**:

$$v_{\Phi} = \frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega t - \text{const}}{\beta} \right) = \frac{\omega}{\beta}. \quad (37.8)$$

Рассмотрим систему состоящую из диэлектрической пластины толщиной a и идеально проводящего основания (рисунок 37.2). Материал пластины с относительной диэлектрической проницаемостью ϵ , диэлектрик немагнитный ($\mu_a = \mu_0$) и без потерь ($\sigma = 0$). Покажем, что такая пластина может играть роль волновода **замедленных волн** ($v_{\Phi} < c$).

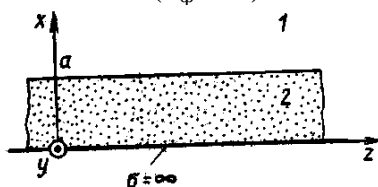


Рисунок 37.2 – Диэлектрическая пластина на идеально проводящем основании

Рассмотрим электромагнитное поле (ЭМП) в области I . Комплексная амплитуда H_{y1} единственно отличной от нуля проекции магнитного вектора здесь удовлетворяет уравнению Гельмгольца:

$$\nabla^2 \dot{H}_{y1} + \beta_0^2 \dot{H}_{y1} = 0. \quad (37.9)$$

Решение этого уравнения представляется в виде бегущей волны, распространяющейся вдоль оси z с неизвестным пока продольным волновым числом h и амплитудным множителем, который зависит лишь от поперечной координаты x :

$$\dot{H}_{y1}(x, z) = H_{y1}(x) e^{-jhz}. \quad (37.10)$$

Подставив формулу (37.10) в уравнение (37.9), приняв во внимание условие $\partial/\partial y = 0$, а также сокращая результат на общий для всей левой части экспоненциальный множитель $\exp(-jhz)$, приходим к дифференциальному уравнению второго порядка в обыкновенных производных относительно амплитудного коэффициента искомой проекции вектора напряженности магнитного поля:

$$\frac{d^2 H_{y1}}{dx^2} - p^2 H_{y1} = 0. \quad (37.11)$$

Входящий сюда параметр $p = \sqrt{h^2 - \beta_0^2}$ является прямым аналогом поперечного волнового числа в теории полых металлических волноводов. Отметим, что для замедленных волн, у которых $\lambda_B < \lambda$, число p всегда действительно.

Общее решение уравнения (37.11) находится элементарно:

$$H_{y1}(x) = A e^{-hx} + B e^{hx}, \quad (37.12)$$

где A, B – произвольные постоянные. Из физических соображений ясно, что $B = 0$, т.к. в противном случае амплитуда поля неограниченно увеличивалась бы при удалении от пластины, что невозможно.

Итак, с точностью до произвольной амплитудной постоянной:

$$\dot{H}_{y1}(x, z) = Ae^{-px}e^{-jhz}. \quad (37.13)$$

Формула (37.13) дает возможность сделать принципиально важный вывод о том, что **замедленная волна одновременно является поверхностной**. Действительно, с удалением точки наблюдения от пластины вдоль поперечной оси x амплитуда поля уменьшается по экспоненциальному закону. Чем меньше фазовая скорость волны v_{ϕ} по сравнению со скоростью света c , тем короче длина волны в волноводе λ_B , а значит, тем больше продольное волновое число $h = 2\pi/\lambda_B$ по сравнению с коэффициентом фазы $\beta_0 = 2\pi/\lambda_0$ колебаний той же частоты в свободном пространстве. Сокращение фазовой скорости приводит к росту параметра p , который входит в показатель действительного экспоненциального выражения. Как следствие, поле сильнее «прижимается» к направляющей поверхности диэлектрической пластины. Сделанный вывод имеет большую общность и справедлив применительно к любым замедляющим системам.

Вопрос № 38. Взаимодействие ЭМВ с акустическими волнами. Линии задержки на поверхностных акустических волнах.

Акустоэлектрический эффект – одно из проявлений акустоэлектронного взаимодействия, в результате которого под действием бегущей ультразвуковой волны в проводящей среде возникает электрический ток. Появление тока связано с передачей импульса (и соответственно энергии) от ультразвуковой волны электронам проводимости. Это приводит к направленному движению носителей заряда – электрическому току в **направлении распространения звука**.

При взаимодействии акустических волн с электронами проводимости каждый фонон, взаимодействующий с электроном, передает ему импульс $\hbar\omega/v$, где ω и v частота и скорость звука соответственно. При этом электрон получает дополнительную скорость $\Delta v = \hbar\omega/(mv)$ в направлении распространения звука (m – масса электрона), и возникает электрический ток, плотность которого:

$$J_{ae} = en_e \Delta v = \frac{en_e \hbar\omega}{mv},$$

где e – заряд электрона; n_e – число электронов проводимости в единице объема.

Если учесть, что $\mu = \tau e/m$ – это подвижность электронов; τ – время между столкновениями; $I = \hbar\omega n_\phi v$ – интенсивность ультразвуковой волны; n_ϕ –

число фононов в единице объема; $a_e = \frac{n_e}{n_\phi} \cdot \frac{1}{v\tau}$ – коэффициент поглощения

электронов в проводящей среде, то получим соотношение Вайнрайха:

$$j_{ae} = \frac{a_e \mu I}{e}.$$

Например, в замкнутой электрической цепи, состоящей из кристалла CdS с металлическими электродами, перпендикулярными направлению распространения звука, в измерительном приборе будет протекать акустоэлектрический ток. Если же цепь разомкнута, то между электродами возникает акустоэлектрическая разность потенциалов, напряженность поля которой:

$$E_{ae} = \frac{j_{ae}}{\sigma} = \frac{a_e \mu I}{\sigma v},$$

где σ – электропроводность среды.

Величина E_{ae} достигает нескольких В/см при интенсивности звука 1 Вт/см².

Наряду с продольным акустоэлектрическим эффектом можно наблюдать и **поперечный**, т.е. возникновение разности потенциалов на электродах

кристалла, расположенных параллельно направлению распространения звука. Акустоэлектрический эффект имеет место и для упругих поверхностных волн.

Поверхностные акустические волны это упругие волны, распространяющиеся вдоль свободной поверхности твердого тела или вдоль границы твердого тела с другими средами и затухающие при удалении от границ. ПАВ бывают двух **типов**: с вертикальной поляризацией, у которых вектор колебательного смещения частиц среды расположен в плоскости, перпендикулярной к границе (вертикальная плоскость), и с горизонтальной поляризацией, у которых вектор смещения частиц среды параллелен границе и перпендикулярен направлению распространения волны.

Простейшими и наиболее часто встречающимися на практике ПАВ с вертикальной поляризацией являются **волны Рэлея**, распространяющиеся вдоль границы твердого тела с вакуумом или достаточно разреженной газовой средой. Фазовая скорость волн Рэлея $v_R = 0.9v_t$, где v_t – фазовая скорость плоской поперечной волны.

Вдоль границы двух твердых тел, плотности и модули упругости которых не сильно различаются, может распространяться **ПАВ Стоунли**, состоящая как бы из двух рэлеевских волн (по одной в каждой среде). Фазовая скорость Стоунли меньше v_t и v_l в обеих граничных средах, где v_l – скорость продольных волн.

Кроме ПАВ рэлеевского типа существуют волны с горизонтальной поляризацией (**волны Лява**).

По физическим принципам можно выделить пассивные линейные устройства, в которых производится линейное преобразование сигнала (линии задержки, фильтры и др.), активные линейные устройства (усилители сигналов) и нелинейные (устройства для генерации, модуляции, перемножения и других преобразований сигналов).

Работа акустоэлектронных устройств основана на возбуждении в пьезоэлектрических материалах (кварц, ниобат лития, гермонат висмута и др.), распространении в них и взаимодействии с электронами акустических звуковых волн. В приборах СВЧ могут использоваться ультразвуковые (до 10^{13} Гц) колебания. Практически освоены приборы с гиперзвуковыми колебаниями до 10^{10} Гц.

Малая скорость распространения акустических колебаний в среде $v = 0.33 \dots 10$ км/с дает возможность получить задержку радиосигнала $\tau = 1 \dots 30$ мкс на сантиметр длины звукопровода. Длина акустической волны $\lambda = v/f$ примерно в 10^5 раз меньше длины электромагнитной волны в свободном пространстве при одной и той же их частоте колебаний f .

Принцип действия линий задержки (ЛЗ) на ПАВ основан на использовании малой скорости их распространения вдоль звукопровода. ЛЗ состоит из кристалла пьезоэлектрика 1 и двух преобразователей 2 (рисунок 38), нане-

сенных на его поверхности и удаленных друг от друга на расстояние, обеспечивающее получение требуемого времени задержки:

$$\tau = l/v,$$

где l – длина звукопровода.

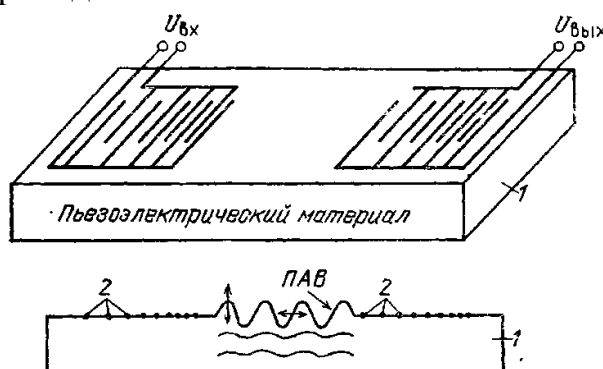


Рисунок 38 – Линия задержки на поверхностно-акустических волнах

Наиболее эффективное преобразование радиосигнала в ПАВ и обратно осуществляется **встречно-штыревыми преобразователями (ВШП)** – двумя рядами электродов, вложенными друг в друга (рисунок 38), период структуры которых должен быть равен λ . Во входном ВШП возбуждаемые радиосигналом в пьезоэлектрике акустические волны от каждой пары электродов складываются в фазе и распространяются к выходному ВШП, где происходит обратное преобразование. В широкополосных ЛЗ шаг штырей ВШП делается переменным. Для получения одинаковой задержки на различных частотах расстояния между каждыми парами соответствующих штырей входного и выходного ВШП должны быть одинаковыми.

Используя сложную траекторию – многократное прохождение волной звукопровода, время задержки можно увеличить в десятки раз и довести до единиц миллисекунд. Дискретная регулировка задержки сигнала производится поочередным подключением выходных преобразователей многоотводной ЛЗ.

Суммарные потери в устройствах на ПАВ состоят из потерь в преобразователях и потерь при распространении. Причинами последних являются:

- взаимодействие ПАВ с тепловыми колебаниями решетки, а также рассеяние на дефектах кристаллов, загрязнениях и трещинах поверхности. Эти потери уменьшаются полировкой кристаллов и соответствующим выбором направлений плоскостей срезов;

- перекачка энергии ПАВ в энергию синфазной объемной волны в воздухе.

Потери снижаются вакуумированием поверхности звукопровода или помещением его в атмосферу легкого газа.

Общее затухание в устройствах на ПАВ пропорционально их длине, т.е. времени задержки, и в зависимости от их конструкции и рабочей частоты может составлять от десятых долей до десятков децибел.

Вопрос № 39. Простейшие модели и система параметров логических элементов.

Логическим элементом называют такой элемент, у которого отклик на выходе связан с воздействием на входе по законам алгебры логики (булевой алгебры). Логические элементы составляют основу цифровых устройств и основными являются элементы трех типов: НЕ, ИЛИ, И. Но в булевой алгебре доказано, что любые логические операции могут быть выполнены с помощью только одного логического элемента ИЛИ-НЕ или И-НЕ. Следовательно, любое цифровое устройство может быть построено из логических элементов одного типа. **Функционально полной системой** называется совокупность логических элементов, позволяющих реализовать логическую схему произвольной сложности. Однако при проектировании реальных цифровых устройств одну обработку информации удобнее реализовать с помощью логических элементов ИЛИ-НЕ, а другую – с помощью элементов И-НЕ. Поэтому на практике не ограничиваются одним логическим элементом.

Операция НЕ. Для реализации операции логического отрицания требуется инвертор или логический элемент НЕ (рисунок 39.1, а), в качестве которого можно использовать обычный транзисторный ключ (рисунок 39.1, б). В отсутствие входного сигнала (рисунок 39.1, в) (на входе U^0) транзистор закрыт, падение напряжения на резисторе R_K практически равно нулю, а напряжение на выходе есть E_K или U^1 . При подведении ко входу достаточно большого положительного напряжения $U_{ВХ} > E_B$ (на входе U^1) транзистор открывается и при насыщении его выходное напряжение становится близким к нулю (на выходе U^0). Таким образом, ключ преобразует 0 в 1 и наоборот.

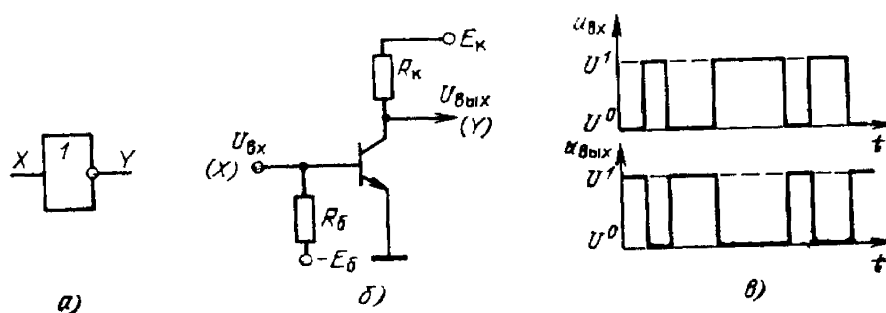


Рисунок 39.1 – Логический элемент НЕ и временные диаграммы его работы

Операция ИЛИ. Для реализации операции логического сложения требуется логический элемент ИЛИ (рисунок 39.2, а), в качестве которого можно использовать диодно-резисторную схему (рисунок 39.2, б). В отсутствие входных сигналов (рисунок 39.2, в) (на входах U^0) оба диода закрыты, и выходное напряжение равно нулю (на выходе U^0). При подведении положительного напряжения к любому входу (на входе U^1) через резистор R пойдет ток, а на выходе появится напряжение (на выходе U^1). Таким образом реализуется операция ИЛИ.

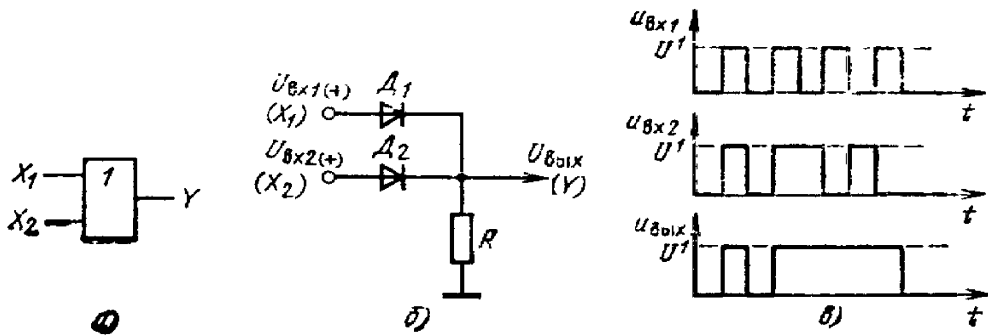


Рисунок 39.2 – Логический элемент ИЛИ
и временные диаграммы его работы

Операция И. Для реализации операции логического умножения требуется логический элемент И (рисунок 39.3, а), в качестве которого можно использовать схему, показанную на рисунке 39.3, б. При отсутствии входных напряжений (на обоих входах U^0) оба диода открыты, падения напряжений на резисторах R_1 и R_2 малы и на выходе напряжение равно нулю (на выходе U^0). При подведении положительного напряжения к одному из входов положение не изменится: по-прежнему $U_{\text{ВЫХ}} \approx U^0$. Только при подведении положительных напряжений одновременно к обоим входам произойдет закрывание обоих диодов, в результате $U_{\text{ВЫХ}}$ окажется близким к E , т.е. $U_{\text{ВЫХ}} \approx U^1$. Таким образом реализуется операция И.

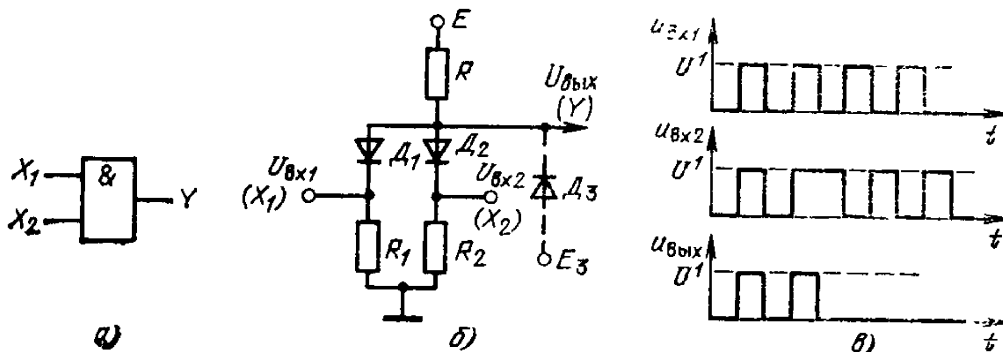


Рисунок 39.3 – Логический элемент И
и временные диаграммы его работы

В настоящее время широко применяются два типа логических элементов на биполярных транзисторах: **транзисторно-транзисторный (ТТЛ)** и **эмиттерно-связанный (ЭСЛ)**. В ТТЛ-элементе с простым инвертором (рисунок 39.4, а) реализуется функция И-НЕ. Основным узлом ЭСЛ-элемента является транзисторный переключатель тока, представляющий собой обычный дифференциальный усилительный каскад (рисунок 39.4, б). На выходе $Y1$ реализуется логическая операция ИЛИ-НЕ, а на выходе $Y2$ – операция ИЛИ. Транзисторы ЭСЛ-элемента не входят в режим насыщения, что обеспечивает высокое быстродействие, а симметрия схемы приводит к отсутствию изменений потребляемого тока, что не создает всплесков напряжения в цепях питания, снижая уровень внутренних помех.

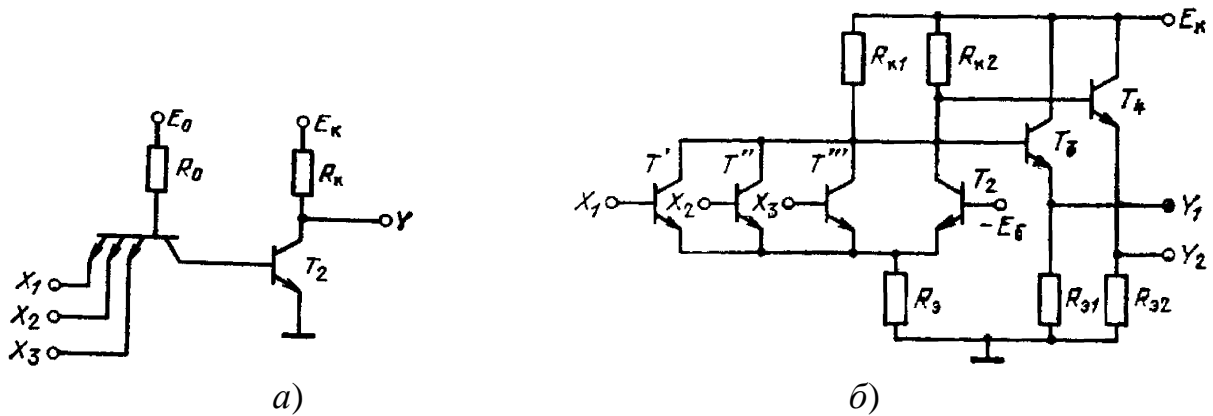


Рисунок 39.4 – TTL-элемент (а) и ЭСЛ-элемент (б)

Также широкое применение находят логические элементы на МОП-транзисторах – КМОП-элементы. Благодаря большому входному сопротивлению МОП-транзисторов в таких логических элементах не нужны резисторы или диоды в цепях связи, что значительно упрощает структуру. Простейшие схемы инверторов на МОП-транзисторах p - и n -типа показаны на рисунке 39.5. В этих схемах транзисторы T_1 являются активными элементами, а транзисторы T_2 играют роль резисторов.

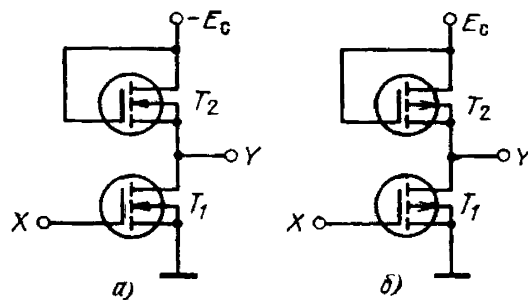


Рисунок 39.5 – Логический элементы НЕ на МОП-транзисторах

Основными параметрами логических элементов являются: коэффициент разветвления по выходу; коэффициент объединения по входу; потребляемая мощность и напряжение питания; помехоустойчивость; быстродействие; степень интеграции; надежность; стоимость. Все основные параметры логических элементов тесно связаны между собой, и каждый тип логических элементов имеет свои преимущества и недостатки.

Вопрос № 40. Типы выходных каскадов цифровых элементов.

Цифровые элементы (логические, запоминающие, буферные) могут иметь выходы следующих типов: логические, с открытым коллектором (стоком), с третьим состоянием, с открытым эмиттером (истоком).

Логический выход формирует два уровня выходного напряжения (U^0 и U^1). Выходное сопротивление логического выхода стремятся сделать малым, способным развить большие токи для перезаряда емкостных нагрузок и, следовательно, получения высокого быстродействия элемента. Такой тип выходов имеют большинство логических элементов, используемых в комбинационных цепях.

Схемы логических выходов элементов ТТЛ(Ш) и КМОП подобны двухтактным каскадам – в них оба фронта выходного напряжения формируются с участием активных транзисторов, работающих противофазно, что обеспечивает малые выходные сопротивления при любом направлении переключения выхода (рисунок 40.1).

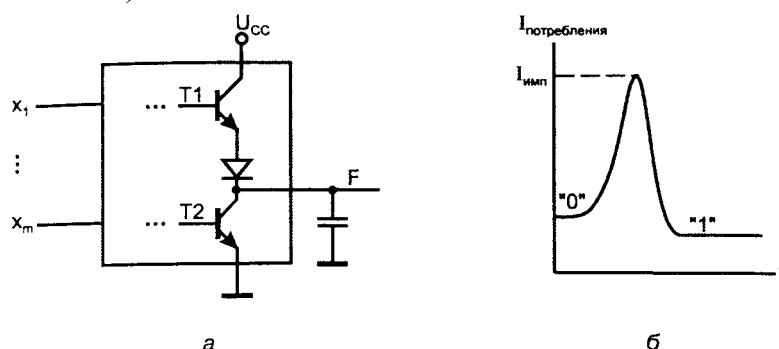


Рисунок 40.1 – Схема выходной цепи цифрового элемента (а) и график изменения потребляемого им тока в процессе переключения (б)

Особенность таких выходов состоит в том, что их нельзя соединять параллельно. Во-первых, это создает логическую неопределенность; во-вторых, при соединении выходов, находящихся в различных логических состояниях, возникло бы их «противоборство».

Вторая особенность логического выхода двухтактного типа связана с протеканием через оба транзистора коротких импульсов тока значительной величины при переключении из одного логического состояния в другое (рисунок 40.1, б).

Элементы с тремя состояниями выхода (ТС) кроме логических состояний 0 и 1 имеют состояние «отключение», в котором ток выходной цепи пренебрежимо мал. В это третье состояние элемент переводится специальным управляющим сигналом, обеспечивающим запертое состояние обоих транзисторов выходного каскада ($T1$ и $T2$ на рисунке 40.1, а). Сигнал управления элементом типа ТС обычно обозначается как OE (Output Enable). При наличии разрешения ($OE = 1$) элемент работает как обычно, выполняя свою логику.

ческую операцию, а при его отсутствии ($OE = 0$) переходит в состояние «отключено». В цифровых устройствах широко используются буферные элементы типа ТС для управляемой передачи сигналов по тем или иным линиям. Буферы могут быть неинвертирующими или инвертирующими, а сигналы OE – Н-активными или L-активными, что ведет к наличию четырех типов буферных каскадов (рисунок 40.2).

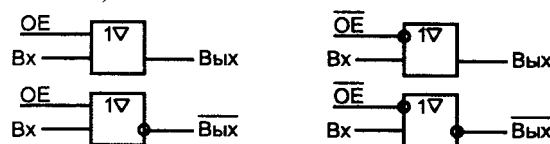


Рисунок 40.2 – Типы буферных каскадов с третьим состоянием

Выходы типа ТС можно соединять параллельно при условии, что в любой момент времени активным может быть только один из них. Элементы типа ТС сохраняют такие достоинства элементов с логическим выходом как быстрое действие и высокая нагрузочная способность.

Элементы с открытым коллектором (ОК) имеют выходную цепь, заканчивающуюся одиночным транзистором, коллектор которого не соединен с какими-либо цепями внутри микросхемы (рисунок 40.3, а). Транзистор управляется от предыдущей части схемы элемента так, что может находиться в насыщенном или запертом состоянии. Насыщенное состояние трактуется как отображение логического нуля, запертое – единицы. Для формирования высокого уровня напряжения при запираии транзистора на выходе элементов с открытым коллектором требуется подключать внешние резисторы (или другие нагрузки), соединенные с источником питания. Несколько выходов типа ОК можно соединять параллельно, подключая их к общей для всех выходов цепочке $U_{CC} - R$ (рисунок 40.3, б). При этом можно получить режим поочередной работы элементов на общую линию, как и для элементов типа ТС, если активным будет лишь один элемент, а выходы всех остальных окажутся запертыми. Если же разрешить активную работу элементов, выходы которых соединены, то можно получить дополнительную логическую операцию, называемую **операцией монтажной логики**.

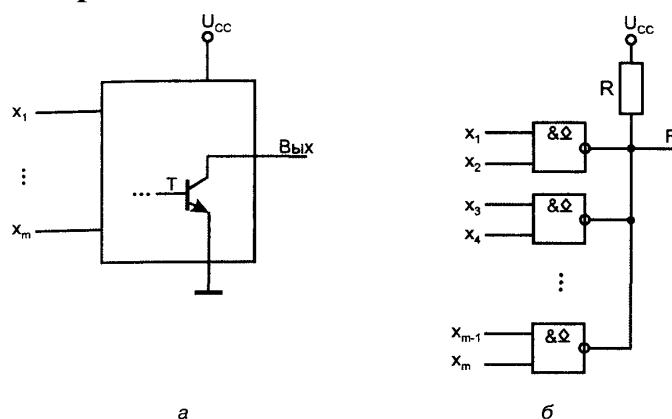


Рисунок 40.3 – Схема выходной цепи цифрового элемента с открытым коллектором (а) и реализации монтажной логики (б)

Положительной чертой элементов с ОК при работе в магистрально-модульных системах является их защищенность от повреждений из-за ошибок управления, приводящих к одновременной выдаче на шину нескольких слов, а также возможность реализации дополнительных операций монтажной логики. Недостатком таких элементов является большая задержка переключения из 0 в 1. При работе с элементами типа ОК проектировщик должен задать сопротивление резистора R , которое не является стандартным, а определяется для конкретных условий.

Выход с открытым эмиттером характерен для элементов типа ЭСЛ. Для работы на магистраль такие элементы не используются. Возможность соединять друг с другом выходы с открытым эмиттером при объединении эмиттерных резисторов в один общий резистор приводит к схеме, изображенной на рисунке 40.4. Иногда такая схема называется «эмиттерный дот» и применяется для получения дополнительных операций монтажной логики. Элементы ЭСЛ имеют противофазные выходы, на одном из которых реализуется функция ИЛИ, на другом – ИЛИ-НЕ. Соединяя прямые выходы нескольких элементов, получают расширение по ИЛИ. Соединяя инверсные выходы, получают операцию И-ИЛИ относительно инверсий входных переменных, т.к. при этом:

$$F = \overline{x_1 + x_2} + \overline{x_3 + x_4} = \bar{x}_1\bar{x}_2 + \bar{x}_3\bar{x}_4.$$

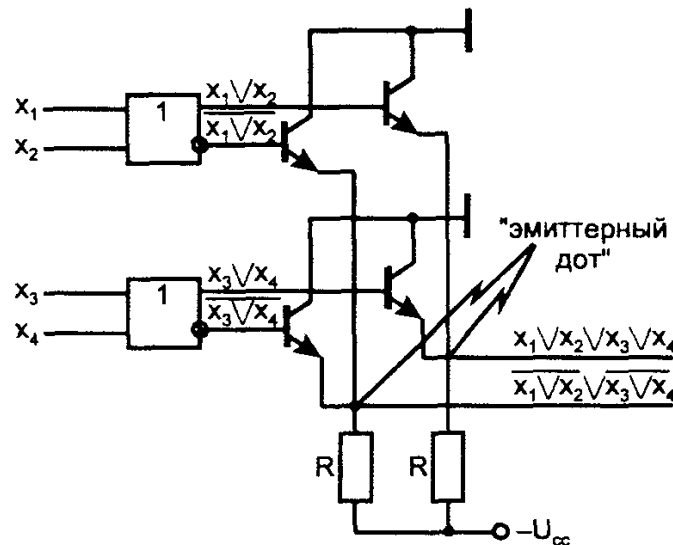


Рисунок 40.4 – Схема «эмиттерного дота»

Вопрос № 41. Функциональные узлы цифровых устройств комбинационного типа (шифраторы и дешифраторы, мультиплексоры и демультиплексоры, сумматоры, АЛУ).

Дешифраторы и шифраторы являются комбинационными элементами: логические состояния на их выходах зависят от сиюминутного состояния входов, с их изменением меняется и ситуация на выходах; такие элементы не сохраняют предыдущее состояние после смены логических состояний на входах, т.е не обладают памятью.

Классификация дешифраторов и шифраторов приведена на рисунке 41.1.



Рисунок 41.1 – Классификация дешифраторов и шифраторов

Каждому цифровому коду на входах дешифратора (рисунок 41.2, а, б) соответствует 1 или 0 на соответствующем выходе. Каждый входной код адресует соответствующий выход, который при этом активизируется. Основу структуры дешифратора могут составлять элементы И; выход каждого из них является выходом дешифратора (рисунок 41.2, в).

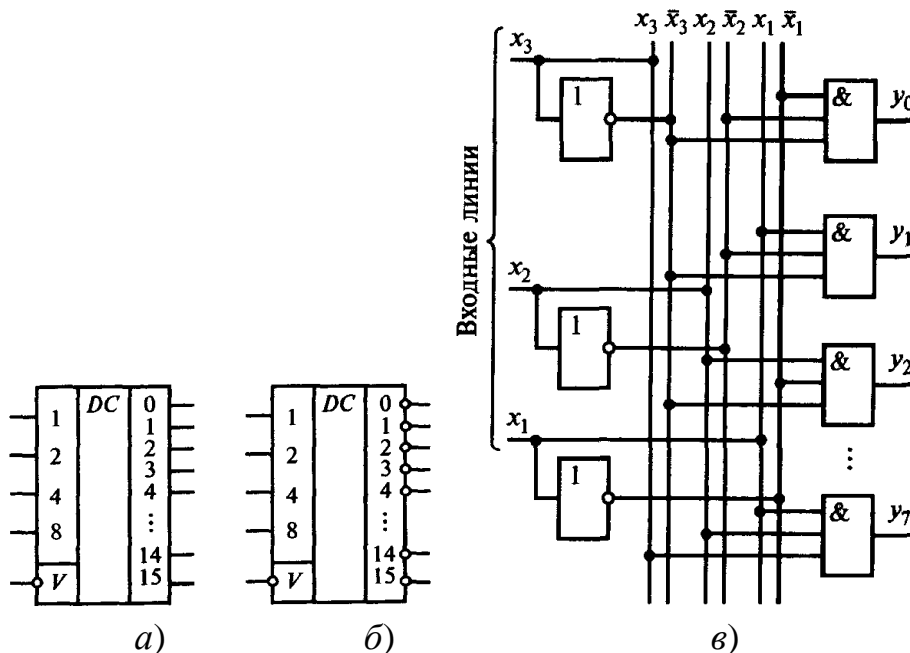


Рисунок 41.2 – Условное графическое обозначение дешифратора (а, б) и внутренняя структура (в)

На выходах **шифратора (кодера)** устанавливается двоичный код, соответствующий десятичному номеру активированного информационного входа. Внутренняя структура шифратора и условное графическое изображение приведены на рисунке 41.3.

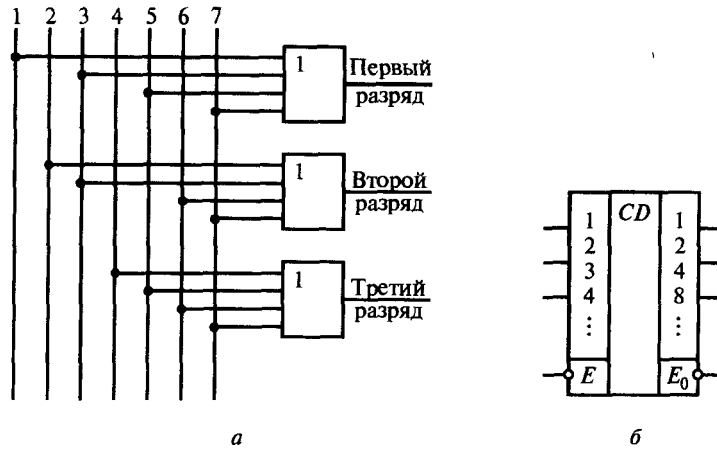


Рисунок 41.3 – Внутренняя структура (а) и условное графическое обозначение (б) шифратора

Существует два вида коммутаторов: **мультиплексоры** и **демультиплексоры**. **Мультиплексор** коммутирует на выход y один из входов D_0, D_1, D_2, \dots , который выбирается (адресуется) двоичным кодом на адресных входах A_0, A_1, A_2 (рисунок 41.4, а). На рисунке 41.4, б приведена внутренняя структура мультиплексора, который имеет восемь информационных ($D_0 \dots D_7$) и три адресных ($A_0 \dots A_2$) входа.

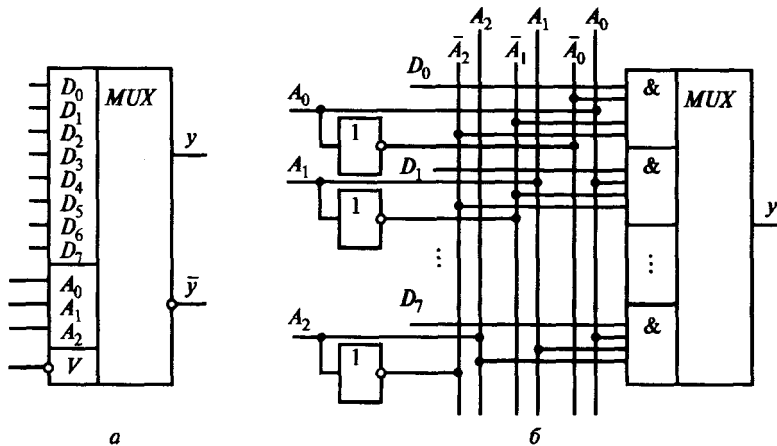


Рисунок 41.4 – Условное графическое обозначение (а) и внутренняя структура (б) мультиплексора

Демультиплексор (рисунок 41.5) выполняет задачу обратную мультиплексору: он коммутирует единственный информационный вход D на один из выходов, который адресуется двоичным кодом на адресных входах A_0, A_1, \dots

Сумматоры выполняют арифметическое (в противоположность логическому) сложение и вычитание чисел. Сумматоры имеют самостоятельное значение и являются также ядром схем арифметико-логических устройств

(АЛУ), реализующих ряд разнообразных операций и являющихся непременной частью всех процессоров. Классификация сумматоров приведена на рисунке 41.6.

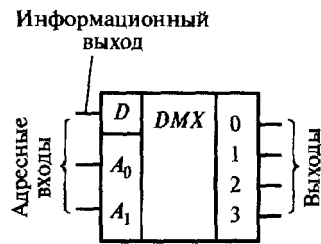


Рисунок 41.5 – Условное графическое обозначение демultipлексора

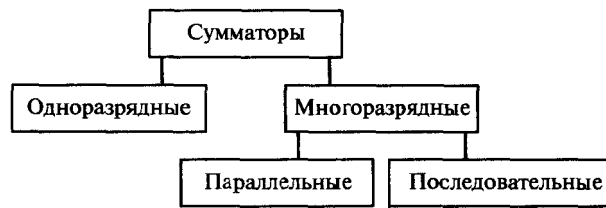


Рисунок 41.6 – Классификация сумматоров

Сложение одноразрядных двоичных чисел осуществляется по следующим правилам:

$$\begin{array}{r} 0 \ 1 \ 0 \ 1 \\ + 0 \ + 0 \ + 1 \ + 1 \\ \hline 0 \ 1 \ 1 \ 10 \end{array}$$

Переполнение разряда – перенос единицы в следующий разряд

Результат сложения двух единиц равен 2_{10} (10_2), он вдвое превышает «вес» единицы в данном разряде, т.е. равен «весу» единицы в следующем разряде. Поэтому указанный результат переносится в виде 1 в следующий разряд, а в данном разряде записывается 0. В таблице истинности 41 приведены все случаи сложения одноразрядных двоичных чисел A и B . По таблице можно установить следующие логические выражения, связывающие выходы S (цифра в данном разряде) и P (единица переноса в следующий разряд) с входами A и B :

$$S = A\bar{B} + \bar{A}B = A \oplus B; \tag{41.1}$$

$$P = AB. \tag{41.2}$$

Таблица 41 – Таблица истинности одноразрядного сумматора

Слагаемое		Результат в данном разряде (S)	Перенос в следующий разряд (P)
A	B		
1	0	1	0
1	1	0	1
0	0	0	0
0	1	1	0

Формула (41.1) представляет собой выражение неравнозначности, а формула (41.2) – конъюнкция одноразрядных чисел A и B . По этим выражениям может быть синтезирован полусумматор – устройство, реализующее сложение двух одноразрядных чисел (рисунок 41.7).

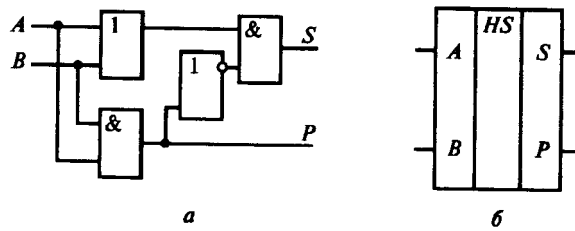


Рисунок 41.7 – Полусумматор

Арифметико-логические устройства выполняют над словами ряд действий. Основой АЛУ служит сумматор, схема которого дополнена логикой, расширяющей функциональные возможности АЛУ и обеспечивающей его перестройку с одной операции на другую. Обычно АЛУ четырехразрядны и для наращивания разрядности объединяются с формированием последовательных или параллельных переносов. АЛУ (рисунок 41.8) имеет входы операндов A и B , входы выбора операций S , вход переноса \bar{C}_i и вход M , сигнал которого задает тип выполняемых операций: логические ($M = 1$) или арифметико-логические ($M = 0$). Результат операции вырабатывается на выходах F , выходы G и H дают функции генерации и прозрачности, используемые для организаций параллельных переносов при наращивании размерности АЛУ. Сигнал \bar{C}_0 – выходной перенос, а выход $A = B\Omega$ есть выход сравнения на равенство с открытым коллектором.

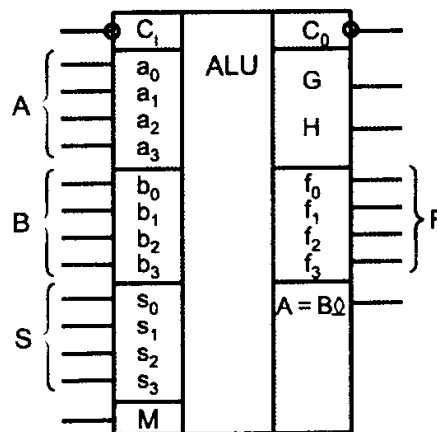


Рисунок 41.8 – Условное графическое обозначение АЛУ

Вопрос № 42. Функциональные узлы последовательного типа (схемотехника триггерных устройств, способы описания триггеров, синхронизация в цифровых устройствах).

Триггеры – элементарные автоматы, содержащие собственно элемент памяти (фиксатор) и схему управления. Фиксатор строится на двух инверторах, связанных друг с другом «накрест», так что выход одного соединен с входом другого. Такое соединение дает цепь с двумя устойчивыми состояниями (рисунок 42.1). Если на выходе инвертора 1 имеется логический ноль, то он обеспечивает на выходе инвертора 2 логическую единицу, благодаря которой сам и существует. То же согласование сигналов имеет место и для второго состояния, когда инвертор 1 находится в единице, а инвертор 2 – в нуле. Любое из двух состояний может существовать неограниченно долго.

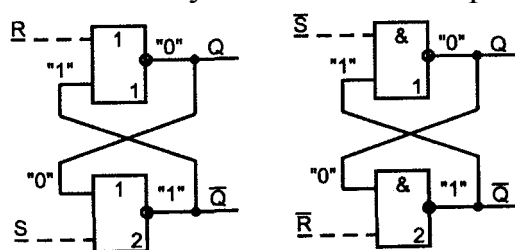


Рисунок 42.1 – Схемы фиксаторов с входами управления на элементах ИЛИ-НЕ и И-НЕ

Чтобы управлять фиксатором, нужно иметь в логических элементах дополнительные входы, превращающие инверторы в элементы И-НЕ, либо ИЛИ-НЕ. На входы управления поступают внешние установочные сигналы. Установочные сигналы показаны на рисунке 42.1 штриховыми линиями. Буквой R обозначен сигнал перевода триггера в ноль (сброс), а буквой S – сигнал перевода в состояние логической единицы (установка). Состояние триггера считывается по значению прямого выхода, обозначаемого как Q . Чаще всего триггер имеет и второй выход с инверсным сигналом \bar{Q} . Для фиксатора на элементах ИЛИ-НЕ активным сигналом считается единичный, поскольку только он приводит логический элемент в нулевое состояние независимо от сигнала на других входах элемента. Для фиксатора на элементах И-НЕ установочным сигналом является нулевой, как обладающий тем же свойством однозначно задавать состояние элемента независимо от состояний других входов.

Логическое функционирование триггеров описывается способами, принятыми для автоматов вообще: таблицами истинности, картами Карно, характеристическими уравнениями, диаграммами состояний, «словарями». Например, **таблицу истинности** триггера JK можно записать в **полном** (таблица 42.1) или **сокращенном виде** (таблица 42.2). Через Q_H обозначено новое состояние триггера (после переключения).

Таблица 42.1 – Полная таблица истинности JK -триггера

J	K	Q	Q_H
0	0	0	0
0	0	1	1
0	1	0	0
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

Таблица 42.2 – Сокращенная таблица истинности JK -триггера

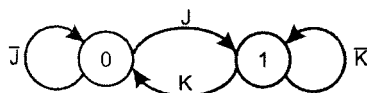
J	K	Q_H
0	0	Q
0	1	0
1	0	1
1	1	\bar{Q}

Карта Карно для JK -триггера показана на рисунке 42.2. Из нее можно получить характеристическое уравнение триггера $Q_H = J\bar{Q} + \bar{K}Q$.

		JK			
		00	01	11	10
Q	0	0	0	$\bar{1}$	$\bar{1}$
	1	$\bar{1}$	0	0	$\bar{1}$

Рисунок 42.2 – Карта Карно

Переведя уравнение в логический базис элементов, на которых строится триггер, получим **структурное уравнение триггера**, определяющее конфигурацию схемы. **Диаграмма состояний** (рисунок 42.3) отражает наличие у триггера двух устойчивых состояний и условия перехода из одного состояния в другое. **Словарь триггера** (таблица 42.3) дает ту же информацию в аналитической форме и является инструментом проектирования схем, содержащих триггеры.

Рисунок 42.3 – Диаграмма состояний для JK -триггеровТаблица 42.3 – Словарь JK -триггера

Переход	J	K
$0 \rightarrow 0$	0	X
$0 \rightarrow 1$	1	X
$1 \rightarrow 0$	X	1
$1 \rightarrow 1$	X	0

Важным способом описания функционирования триггеров являются **временные диаграммы**, отражающие не только логические функционирующие схемы, но и ее поведение во времени.

Однофазная синхронизация использует минимальное число синхросигналов и обеспечивает высокое быстродействие. На практике однофазная синхронизация чаще всего применяется в схемах с триггерами, имеющими динамическое управление, или с двухступенчатыми триггерами. При использовании триггеров с динамическим управлением (рисунок 42.4) информация принимается по фронту синхроимпульса, а чувствительность триггера к информационным сигналам сохраняется лишь в малом интервале времени в окрестности фронта (в течение времени выдержки t_H). Триггеры должны потерять чувствительность к изменениям информационных сигналов, прежде чем до их входов по кратчайшему пути может дойти такое изменение. Если это не обеспечивается, возможен сбой. Таким образом, для соблюдения условий работоспособности должно выполняться соотношение:

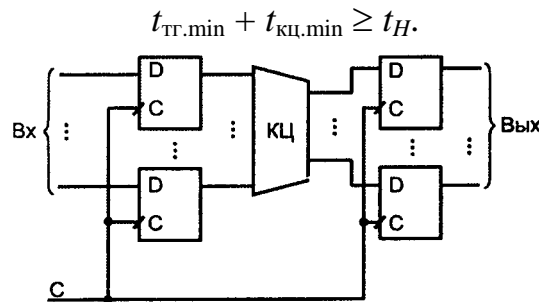


Рисунок 42.4 – Схема однофазной синхронизации триггеров с динамическим управлением

Двухфазная синхронизация характеризуется использованием двух последовательностей синхроимпульсов (рисунок 42.5, а), сдвинутых во времени друг относительно друга. Интервал между импульсами обеих последовательностей отводится для работы комбинационных цепей. Соседние каскады получают разноименные серии синхроимпульсов (рисунок 42.5, б).

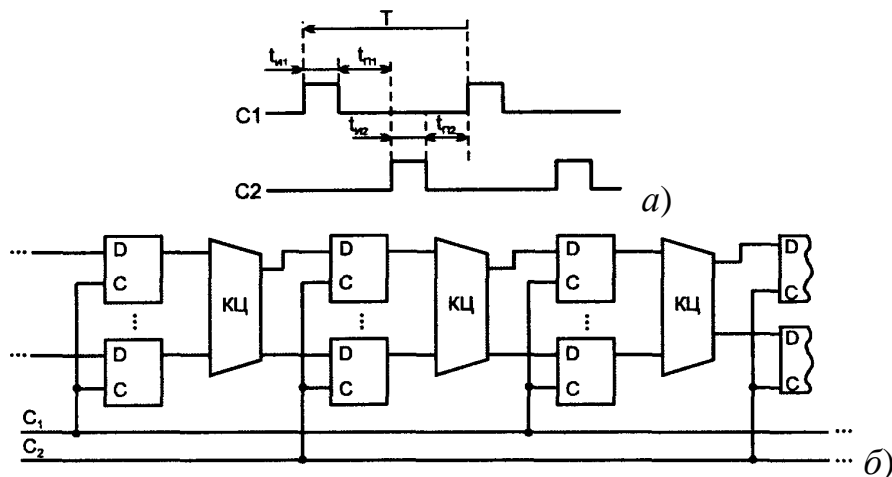


Рисунок 42.5 – Временная диаграмма синхросигналов (а) и схема тактирования элементов для двухфазной системы синхронизации (б)

Вопрос № 43. Автоматизированный выпуск конструкторской документации.

Основные этапы жизненного цикла документации при разработке и производстве РЭА представлены на рисунке 43.1.



Рисунок 43.1 – Этапы жизненного цикла документации РЭА

Проектирование связано с получением модели прототипа РЭА в каком-либо формате представления данных.

Оформление конструкторской документации (КД) предусматривает выпуск полного комплекта документации на разрабатываемое устройство с получением документов на твердом носителе.

Сопровождение КД в производстве – внесение изменений в документацию в результате обработки ее в производстве, настройки опытного образца и т.д.

На сегодняшний день на рынке **отсутствует САПР, решающая все задачи конструкторско-технологического проектирования РЭА**, адаптированная на специфику отечественных предприятий радиотехнического профиля. Поэтому для внедрения автоматизированного проектирования по разработке РЭА вообще, и выпуску КД в частности, требуется учитывать специфику предприятий приборостроения, проводить адаптацию доступных САПР, разрабатывать дополнительные программы. Другими словами, возникает **задача создания комплексной САПР** проектирования и производства РЭА.

На сегодняшний день безусловными лидерами среди **электрических САПР** являются программные продукты PCAD, OrCAD и Protel. Система PCAD фирмы Altium при одинаковых возможностях обработки данных (по сравнению с OrCAD и Protel), но различных пользовательских характеристиках по оформлению КД и адаптации на отечественных предприятиях выглядит более привлекательной.

На российском рынке **механических САПР** имеются сравнимые по классификационным характеристикам и по степени популярности параметрические трехмерные системы твердотельного моделирования: SolidWorks, T-flex, ADEM, КОМПАС. Для оформления конструкторской документации на механические узлы и детали часто служит двумерная система AutoCAD, иногда дополняемая специальными программными модулями трехмерного моделирования.

Рассмотрим примерную организацию взаимодействия САПР на предприятии радиотехнического профиля с точки зрения автоматизированного выпуска КД.

Особое внимание в процессе автоматизированного выпуска КД уделяется созданию **систематизированных банков данных**. Элементами систематизации выступают ЭРЭ. Первичная информация о них сосредоточена в ТУ и в стандарте предприятия на установку ЭРЭ на УПП. В банки данных ЭРЭ включается вся информация о них, которая впоследствии выдается в КД и на технологическое оборудование.

Минимальный набор первичной информации об ЭРЭ включает:

- вид на принципиальной электрической схеме (условное графическое обозначение);
- массив данных для чертежа детали (посадочное место) – вид сверху и вид снизу;
- массив данных для сборочного чертежа – вид сверху и вид снизу;
- массив данных для фотошаблона верхнего и нижнего слоев;
- массив данных для сверления отверстий;
- дополнительная графическая информация об установке корпуса на плате (дополнительный боковой вид, разрез, формовка и т.д.) для отображения его на сборочном чертеже УПП;
- текстовое описание компонента – наименование, ТУ, высота, масса и т.д.

Дополнительная справочная графическая информация, поясняющая установку данного корпуса на ПП, может быть отображена на сборочном чертеже УПП. В ряде случаев требуется изменить масштаб графического изображения корпуса ЭРЭ. Поскольку программный комплекс PCAD не позволяет масштабировать графические объекты (за исключением объекта Design View), то часто для этих целей применяют AutoCAD. Передача данных осуществляется посредством формата *dxf*.

Оформление принципиальной электрической схемы осуществляется в графическом редакторе Schematic пакета программ PCAD. После создания схемы в файле *sch* сосредоточена вся графическая и текстовая информация, необходимая для выпуска КД: чертеж принципиальной электрической схемы, перечень элементов, ведомость покупных изделий.

Для автоматизированного выпуска текстовых документов «**Перечень элементов**» и «**Ведомость покупных изделий**» обычно самостоятельно разрабатываются программы на языке Visual Basic для Microsoft Word, оформленные в виде шаблонов. Поскольку программный комплекс PCAD построен по открытой архитектуре, то возможно программным способом из приложения Visual Basic обращаться к проекту *sch* или *pcb* для чтения данных или проведения корректировок в проектах.

После разработки принципиальной электрической схемы конструктор работает над УПП, используя инструментарий редактора PCB. **Оформление графических документов на УПП** осуществляется в PCAD посредством системы слоев. Доработка образа УПП до уровня полноценного конструкторского документа обычно ведется экспортированием в механические САПР, о чем сказано ниже.

После разработки УПП конструктор приступает к **оформлению текстового документа «Спецификация»**. Для автоматизированного выпуска указанного документа обычно также применяют программу собственной разработки на языке Visual Basic, реализованную в виде шаблона Microsoft Word. Такая программа кроме спецификации формирует основные пункты технических требований на сборочной чертеж УПП.

Иногда при сопровождении КД в производстве по результатам настройки блоков, предварительных испытаний и т.д. возникает необходимость **корректировки КД**. Для этого в PCAD служит механизм ECO, который проводит изменения с принципиальной электрической схемы в редакторе Schematic на УПП в редакторе PCB или обратно.

Приборостроение специфично тем, что разрабатываются как электронные, так и механические узлы. **Для проектирования механических деталей и узлов**, как уже было отмечено выше, применяют системы трехмерного параметрического моделирования. В частности, программный комплекс SolidWorks позволяет формировать ассоциативно связанные чертежные виды и разрезы на смоделированные сборки и детали. Для оформления чертежа конструктору остается только проставить размеры, написать технические требования, заполнить основную надпись. При проведении каких-либо изменений в модели все сгенерированные чертежные виды автоматически обновляются, что обеспечивает отсутствие ошибок в чертежах.

Так как проектирование приборов связано с использованием механических САПР, то возникает необходимость организации связующего звена между электрическими САПР и механическими. Решением данного вопроса служит наличие экспорта в формат IDF, который включает в себя следующую информацию: координаты контура ПП, список ЭРЭ, координаты их точек привязки, углы поворота и высота, сторона размещения ЭРЭ на плате. Например с помощью программы CircuitWorks формат IDF импортируется в SolidWorks, что дает возможность проводить компоновку блока с размещенными в нем ПП и **выпуск соответствующей КД**. Естественно, что для детальной визуализации необходимо наличие объемных моделей ЭРЭ в контексте механической САПР (рисунок 43.2).

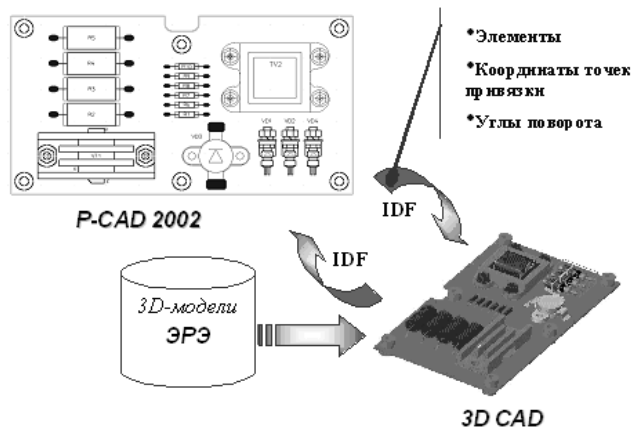


Рисунок 43.2 – Трехмерная компоновка УПП

Вопрос № 44. Современные методы автоматизации конструкторского проектирования РЭС.

Исходными данными для конструкторского проектирования являются результаты, полученные на функционально-логическом уровне проектирования. Конструкции РЭС, как правило, имеют иерархическую структуру, в которой конструктивы низшего уровня объединяются в конструктивы высшего уровня.

На любом уровне конструкторского проектирования основная исходная информация задана схемой: **принципиальной электрической** – при проектировании элементов (ИС, ГИС) и ячеек, **функциональной** или **структурной** – при проектировании последующих конструктивов. В сквозном цикле автоматизированного проектирования исходная схема проектируемого конструктива отрабатывается с помощью математического моделирования и информация о ней находится в базе данных САПР.

Кроме описания исходной схемы, для конструкторского проектирования РЭС необходима следующая условно-постоянная информация, хранимая в базах данных САПР:

- описание элементной базы;
- описание конструктивов (стандартных или типовых) всех уровней;
- описание форм конструкторских и технологических документов;
- описание технологических требований (масштабная координатная сетка платы или подложки ИС, микросборки, возможные посадочные места элементов, допустимая ширина монтажных соединений и расстояния между ними и т.д.).

В конструкторском проектировании выделяют три группы задач:

- синтез конструкции;
- контроль полученных конструктивных решений;
- оформление КД и технологической документации (ТД), включая выпуск носителей информации (НИ) для управления технологическими автоматами.

Основными задачами синтеза конструкций РЭС и БИС являются следующие коммутационно-монтажные задачи:

- компоновка конструктивов i -го в конструктивы $(i - 1)$ -го уровня (компоновка ИС и других ЭРЭ в ячейки, ячеек в блоки и устройства);
- размещение конструктивов i -го уровня в конструктивах $(i - 1)$ -го уровня (размещение компонентов ИС на подложке, размещение ЭРЭ на печатной плате, размещение ячеек в блоке и т.д.);
- трассировка монтажных соединений между конструктивами на всех уровнях (соединения между ИС, печатный монтаж, межплатные соединения).

Процесс перехода от электрической схемы к конструктивному распределению (разбиению) всех элементов на группы, соответствующие конструкторскому

тивам различных уровней, т.е. процесс преобразования функционального описания аппаратуры в конструктивное, называется **компоновкой**.

Компоновка в САПР может выполняться «снизу вверх» и «сверху вниз». В первом случае осуществляется последовательная компоновка конструктивов низших иерархических уровней (микросхем, ТЭЗ, устройств, блоков, стоек и т.д.) в конструктивы высших иерархических уровней, а во втором случае – конструктивы высшего уровня последовательно разбиваются на конструктивы меньшей сложности до тех пор, пока не будет получена схема связей конструктивов низшего уровня, вошедших в конструктив более высокого уровня. На практике применяются оба способа и различные их комбинации.

Во всех случаях в результате решения задачи компоновки исходная схема преобразуется в схему соединений элементов, определяется состав конструктивов и связи между ними на различных иерархических уровнях.

Размещение элементов – это задача конструкторского проектирования, заключающаяся в определении местоположения элементов на коммутационном поле в конструктивном модуле. Местоположение должно быть таким, при котором создаются наилучшие условия для решения последующей задачи трассировки соединений с учетом конструктивно-технологических требований и ограничений.

Следует отметить, что задачи размещения элементов и трассировки соединений тесно связаны и в неавтоматизированных методах конструирования решаются одновременно. Раздельное решение этих задач в САПР объясняется только сложностью их совместного автоматического решения.

Трассировка монтажных соединений – это задача геометрического построения на коммутационном поле всех цепей данного конструктива, координаты начала и конца которых определены при размещении элементов. При этом необходимо учитывать различные конструктивно-технологические ограничения (допускаются пересечения или нет, возможен ли переход со слоя на слой, сколько слоев отводится для трассировки, ортогональная трассировка или «внавал», допустимые ширина проводников и расстояния между ними и т.д.). Алгоритмы трассировки существенно зависят от принятой конструкции и технологии изготовления РЭС.

Трассировка проводных соединений более проста, так как проводники изолированы друг от друга, не надо думать об ограничениях на пересечения, поэтому достаточно минимизировать длину соединений. Но для высокочастотных устройств необходимо учитывать электромагнитную несовместимость цепей.

Трассировки печатных и пленочных соединений родственны и зависят от метрических (размеры элементов и компонентов, ширина и предельные длины проводников и др.) и топологических (планарность, возможность пересечений, метод перехода со слоя на слой и др.) параметров схемы соединений и коммутационного пространства. Эти соединения (печатные и пленочные) допускают построение цепи не только типа «вывод – вывод», но и типа «вывод – проводник».

Контроль полученных конструктивных решений включает контроль соответствия конструкции исходной принципиальной электрической схеме и контроль выполнения заданных конструктивно-технологических ограничений. В случае БИС и СБИС контролируется выполнение проектных норм на размеры областей, на расстояния между областями в одном слое, на перекрытие областей различных слоев и т.п. Соответствие топологии принципиальной схеме проверяется путем восстановления принципиальной схемы по топологии, заданной набором файлов послойных чертежей, и установлением изоморфизма графов, описывающих исходную и восстановленную схемы.

Основой программного обеспечения конструкторского проектирования в электрических САПР являются средства топологического проектирования, среди которых выделяют **программы разработки топологии кристаллов СБИС, многокристалльных СБИС и печатных плат.**

Конструкторское проектирование СБИС включает в себя ряд процедур. **Разрезание** (компоновка) заключается в группировании компонентов по критерию связности, что необходимо либо для размещения формируемых групп в отдельных чипах при многокристалльной реализации, либо для определения их взаимного расположения в одном кристалле в процессе выполнения последующей **процедуры планировки кристалла**. Группы при планировании представляют в виде прямоугольников, их расположение обычно определяется в интерактивном режиме, но находят применение также генетические алгоритмы.

Далее следуют процедуры **размещения компонентов, трассировки соединений, сжатия топологической схемы, проверки соответствия топологической и принципиальной схем, подготовки информации для генераторов изображений.**

Конструкторское проектирование печатных плат включает процедуры компоновки, размещения и трассировки. При топологическом проектировании печатных плат, как правило, используют две последние процедуры.

Вопрос № 45. Биполярные транзисторы. Сущность усиления электрических сигналов. Усиление тока, напряжения, мощности.

Сопротивление обратно смещенного коллекторного перехода (при подаче на него обратного напряжения) очень велико (несколько мегаом). Поэтому в цепь коллектора можно включать нагрузочные резисторы с весьма большими сопротивлениями, не изменяя значения коллекторного тока (рисунок 45.1). Соответственно в цепи нагрузки будет выделяться значительная мощность. Сопротивление прямосмещенного эмиттерного перехода, напротив, весьма мало (десятки ом). Поэтому при почти одинаковых значениях эмиттерного и коллекторного токов мощность, потребляемая в цепи эмиттера, оказывается существенно меньше мощности, выделяемой в цепи нагрузки. Это указывает на то, что **транзистор является полупроводниковым прибором, усиливающим мощность.**

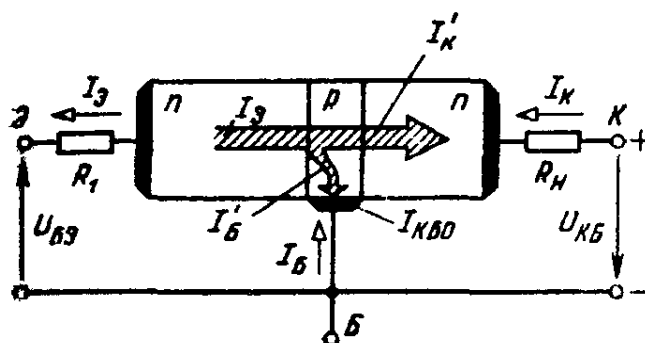


Рисунок 45.1 – Схема включения биполярного транзистора *n-p-n* типа в схеме с ОБ

С другой стороны, малые значения входного напряжения (прямое смещение эмиттерного перехода, составляющее десятые доли вольта) и большие значения выходного напряжения (обратное смещение коллекторного перехода, составляющее десятки вольт) указывают на то, что этот **управляемый нелинейный элемент может применяться для усиления напряжения.**

Каждый переход биполярного транзистора можно включить либо в прямом, либо в обратном направлении. В зависимости от этого **различают четыре режима работы транзистора**: нормальный или активный режим; инверсный режим; двойной инжекции или насыщения; отсечки. Основным режимом работы биполярного транзистора в аналоговых электронных устройствах является **нормальный или активный режим.**

Биполярный транзистор как усилительное устройство может быть представлен в виде четырехполюсника. В зависимости от того, какой из трех выводов транзистора является общим для входа и выхода четырехполюсника, различают схему включения транзистора с **общей базой (ОБ)**, **общим эмиттером (ОЭ)** и **общим коллектором (ОК)**. Полярность подключаемого внешнего источника зависит от типа транзистора – *p-n-p* или *n-p-n* (рисунок 45.2).

Основными параметрами, характеризующими транзистор как активный нелинейный четырехполюсник (при любой схеме включения), являются коэффициенты усиления:

- по току $k_I = \Delta I_{\text{ВЫХ}} / \Delta I_{\text{ВХ}}$;
- по напряжению $k_U = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{ВХ}}$;
- по мощности $k_P = k_I k_U = \Delta P_{\text{ВЫХ}} / \Delta P_{\text{ВХ}}$;

а также:

- входное сопротивление $R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}}$;
- выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВЫХ}}$.

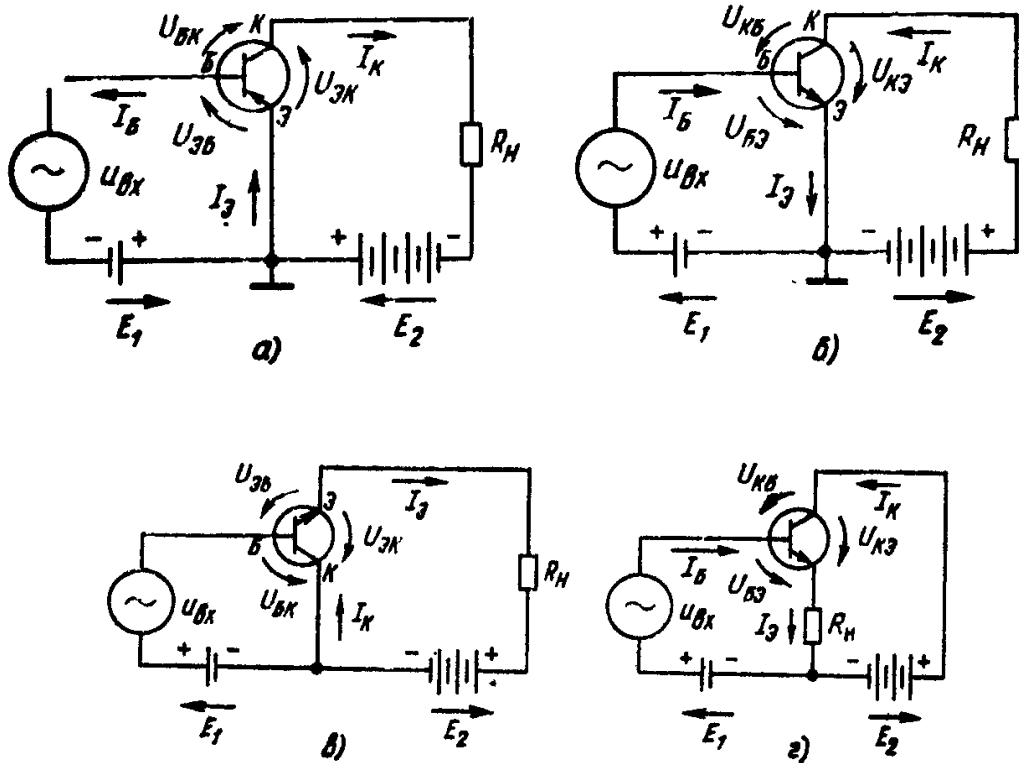


Рисунок 45.2 – Включение биполярного транзистора $p-n-p$ (а) и $n-p-n$ (б) типов в схеме с ОЭ и $n-p-n$ типа в схеме с ОК (в, г)

В схеме с ОБ (рисунок 45.1) имеем:

$$k_{I_Б} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Э}}} = \alpha; \quad R_{\text{ВХ_Б}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Э}}},$$

где $R_{\text{ВХ_Б}}$ – сопротивление открытого эмиттерного перехода, составляющее десятки ом;

$$k_{U_Б} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Э}} R_{\text{ВХ_Б}}} = \alpha \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ_Б}}},$$

где $k_{U_Б} \gg 1$, т.к. $R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ВХ_Б}}$.

Таким образом, схема с ОБ характеризуется малым входным сопротивлением, отсутствием усиления по току, большим усилением по напряжению и мощности.

В схеме с ОЭ (рисунок 45.2, а, б) имеем:

$$k_{I_{\text{Э}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta; \quad R_{\text{ВХ}_{\text{Э}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} I_{\text{Э}}}{I_{\text{Э}} I_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} \frac{I_{\text{К}} + I_{\text{Б}}}{I_{\text{Б}}} = R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} (B + 1),$$

где B – статический коэффициент передачи тока базы (в отличие от дифференциального коэффициента передачи тока базы β).

Для проведения сравнительных расчетов значений параметров транзистора при различных схемах его включения примем $B \approx \beta$. Тогда:

$$R_{\text{ВХ}_{\text{Э}}} = R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}(\beta + 1) \approx \beta R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}; \quad k_{U_{\text{Э}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Б}} R_{\text{ВХ}_{\text{Э}}}} = \beta \frac{R_{\text{Н}}}{\beta R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}} \approx \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}},$$

где $k_{U_{\text{Э}}} \gg 1$, т.к. $R_{\text{Н}} \gg R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}$.

Таким образом, схема с ОЭ имеет большее, чем схема с ОБ, входное сопротивление и усиливает сигнал как по току, так и по напряжению и мощности.

В схеме с ОК (рисунок 45.2, в, з) имеем:

$$k_{I_{\text{К}}} = \frac{\Delta I_{\text{Э}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \frac{\Delta I_{\text{К}} + \Delta I_{\text{Б}}}{\Delta I_{\text{Б}}} = \beta + 1,$$

т.е. схема с ОК имеет $k_{I_{\text{К}}} \gg 1$;

$$\begin{aligned} R_{\text{ВХ}_{\text{К}}} &= \frac{U_{\text{КБ}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} + U_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}} I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}} I_{\text{Э}}} + \frac{U_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \frac{U_{\text{ЭБ}}}{I_{\text{Э}}} \frac{I_{\text{Э}}}{I_{\text{Б}}} + \frac{I_{\text{Э}} R_{\text{Н}}}{I_{\text{Б}}} = \\ &= R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}}(\beta + 1) + R_{\text{Н}}(\beta + 1) = (R_{\text{Н}} + R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}})(\beta + 1); \\ k_{U_{\text{К}}} &= \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{КБ}}} = \frac{\Delta U_{\text{Н}}}{\Delta U_{\text{ЭБ}} + \Delta U_{\text{Н}}} = \frac{\Delta I_{\text{Э}} R_{\text{Н}}}{\Delta I_{\text{Э}} R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} + \Delta I_{\text{Э}} R_{\text{Н}}} = \frac{R_{\text{Н}}}{R_{\text{ВХ}_{\text{Б}}} + R_{\text{Н}}}, \end{aligned}$$

т.е. $k_{U_{\text{К}}} \approx 1$.

Таким образом, схема с ОК (схема эмиттерного повторителя) имеет значительно большее значение входного сопротивления, чем любая другая схема включения транзистора, и усиливает сигнал по току и мощности. Большое значение входного сопротивления схемы с ОК предопределяет широкое применение на практике эмиттерного повторителя в качестве согласующего устройства.

Анализ данных свидетельствует об универсальности схемы с ОЭ, обеспечивающей усиление транзистора как по току, так и по напряжению. Этим объясняется широкое применение указанной схемы включения транзистора в нелинейных цепях. Высокие значения β обуславливают также усилительные свойства транзистора по току, заключающиеся в возможности малыми токами (током $I_{\text{Б}}$) управлять существенно большими токами (током $I_{\text{К}} \approx \beta I_{\text{Б}}$) в выходной нагрузочной цепи.

Вопрос № 46. Полевые транзисторы. Принцип действия и статические характеристики полевого транзистора с $p-n$ переходом в качестве затвора.

Полевой транзистор – полупроводниковый прибор, усилительные свойства которого обусловлены потоком основных носителей, протекающим через проводящий канал, и управляемым электрическим полем.

В полевом транзисторе с объемным каналом площадь поперечного сечения канала меняется за счет изменения площади обедненного слоя обратного включенного $p-n$ -перехода. На рисунке 46.1 показан полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом, включенный по схеме с общим истоком (ОИ). При ее анализе все напряжения будем рассматривать с учетом их знаков.

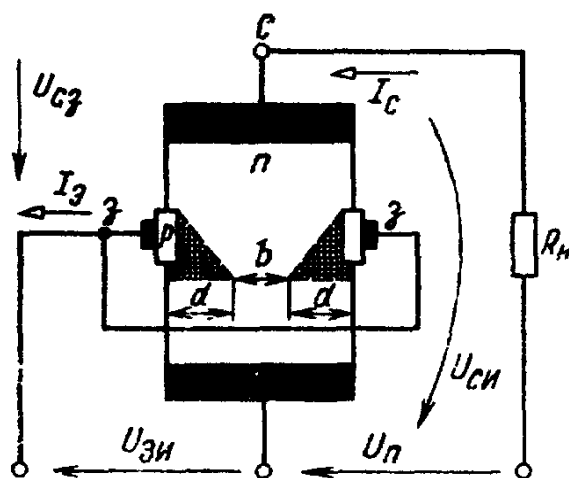
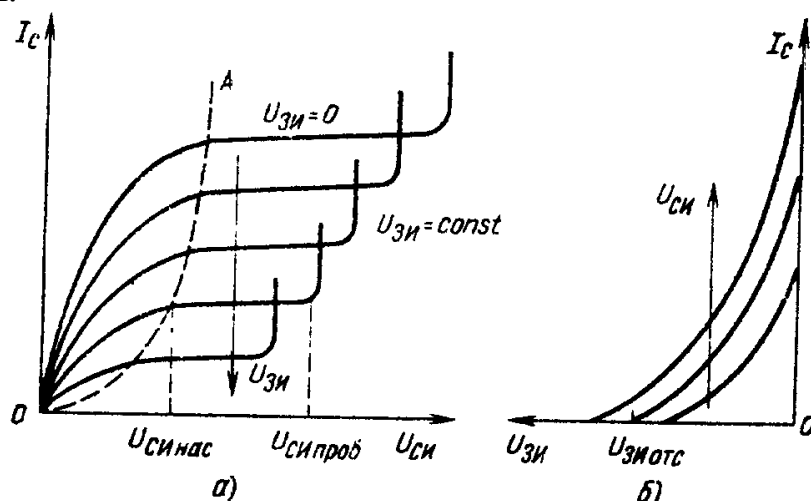


Рисунок 46.1 – Полевой транзистор с управляющим $p-n$ -переходом

На $p-n$ -переход (затвор - исток) подается обратное напряжение $U_{ЗИ}$. При его уменьшении глубина d обедненного слоя (см. рисунок 46.1) возрастает, а токопроводящее сечение b канала сужается. При этом увеличивается сопротивление канала, а следовательно, снижается выходной ток I_C транзистора. Поскольку напряжение $U_{ЗИ}$ прикладывается к $p-n$ -переходу в обратном направлении, ток $I_З$ ничтожно мал и практически не зависит от управляющего напряжения.

Для полевых транзисторов входная характеристика (зависимость $I_З$ от $U_{ЗИ}$ при фиксированном значении $U_{СИ}$) не имеет практического применения и при расчетах используют только передаточные и выходные ВАХ. На рисунке 46.2 приведены **выходные и передаточные характеристики полевого транзистора** с управляющим $p-n$ -переходом для схемы включения с ОИ. Эти характеристики, подобно характеристикам биполярного транзистора, имеют нелинейный характер, а, следовательно, полевой транзистор, как и биполярный, является управляемым нелинейным элементом цепи. Однако при сравнении их выходных характеристик очевидны существенные различия.

На начальном участке изменения выходного напряжения полевого транзистора крутизна его ВАХ с изменением входного сигнала не остается постоянной, как в случае биполярного транзистора. Как видно из рисунка 46.2 с уменьшением $U_{зи}$ крутизна ВАХ уменьшается, а следовательно, возрастает выходное сопротивление транзистора. Это указывает на зависимость выходного сопротивления транзистора от управляющего напряжения на этом участке ВАХ.



а) выходные; б) передаточные

Рисунок 46. 2- Статические ВАХ полевых транзисторов с управляющим $p-n$ -переходом (схема ОИ)

Изменение выходного тока I_C полевого транзистора при изменении $U_{СИ}$ происходит до определенного значения выходного напряжения, равного напряжению $U_{СИ\text{нас}}$ (проекция на ось абсцисс точки пересечения штриховой кривой OA с соответствующей ВАХ транзистора). Это напряжение равно $U_{СИ\text{нас}} = U_{зи} - U_{зи\text{отс}}$, где $U_{зи\text{отс}}$ – управляющее напряжение, при котором $I_C = 0$ (режим отсечки), а $U_{зи}$ – управляющее напряжение, соответствующее рассматриваемой ВАХ транзистора.

При дальнейшем возрастании выходного напряжения ток I_C остается неизменным вплоть до пробивного напряжения $U_{СИ\text{проб}}$. Физику происходящих при этом процессов в полевом транзисторе можно объяснить следующим образом.

При входном напряжении $U_{зи} = U_{зи\text{отс}}$, соответствующем обратному напряжению на $p-n$ -переходе (затвор - исток), при котором токопроводящей канал транзистора будет полностью перекрыт, выходной ток I_C транзистора будет равен нулю (см. рисунок 46.2, б). При $U_{зи} > U_{зи\text{отс}}$ в токопроводящем канале появляется проток шириной b и по нему от стока к истоку начинает протекать ток I_C , создающий на сопротивлении канала падение напряжения. Это напряжение, складываясь с напряжением $U_{зи}$, по мере приближения к стоку, приводит к увеличению напряжения на обратно смещенном $p-n$ -переходе, т.е. к сужению канала при приближении к истоку, как это показано на рисунке 46.1. Рост тока I_C приводит к увеличению падения напряжения на

канале и к уменьшению его ширины, в результате уменьшается ток I_C , протекающей между стоком и истоком.

Однако уменьшение тока стока приводит к уменьшению падения напряжения на канале и к уменьшению фактического (суммарного) напряжения на обратно смещенном p - n -переходе, что увеличивает ширину b канала, а следовательно, и ток I_C . В результате, в структуре полевого транзистора, приведенного на рисунке 46.1, устанавливается динамическое равновесие и при $U_{СИ} > U_{СИ\text{ нас}}$ ток стока поддерживается на уровне насыщения $I_{C\text{ нас}}$.

Как видно из рисунка 46.2, a с уменьшением напряжения $U_{ЗИ}$ пробивное напряжение транзистора $U_{СИ\text{ проб}}$ уменьшается. При этом всегда выполняется равенство:

$$U_{СИ\text{ проб}} = U_{СИ\text{ проб}} (\text{при } U_{ЗИ} = 0) + U_{ЗИ}.$$

Если $U_{ЗИ} = U_{ЗИ\text{ отс}}$, транзистор заперт (режим отсечки) и $I_C = 0$. В случае открытого транзистора для любого значения выходного тока I_C будет соблюдаться равенство:

$$U_{ЗИ} - U_{СИ\text{ нас}} = U_{ЗИ\text{ отс}} = -U_{СЗ\text{ нас}},$$

где $U_{СЗ\text{ нас}}$ – напряжение между стоком и затвором в режиме насыщения транзистора.

Из сравнения приведенных на рисунке 46.2 ВАХ видно, что полярности управляющего и выходного напряжений полевого транзистора с управляющим p - n -переходом не совпадают.

Основными преимуществами полевого транзистора являются его большое входное сопротивление по постоянному току и высокая технологичность. Последнее обуславливает широкое применение полевых транзисторов при разработке цифровых интегральных схем.

Вопрос № 47. Плоские электромагнитные волны. Фазовая скорость.

Предположим, что в каждой точке пространства с декартовой системой координат (x, y, z) определена некоторая величина v (физическая природа ее на данном этапе безразлична), описываемая формулой:

$$v(z, t) = V_m \cos(\omega t - \beta z), \quad (47.1)$$

где V_m , ω , β – действительные числа.

Говорят, что данная зависимость является математической моделью **однородной плоской волны**.

Рассматривая характер изменения величины $v(z, t)$ в пространстве и во времени, заметим, прежде всего, что значения v постоянны в любой плоскости, перпендикулярной оси z . Иными словами, мгновенные значения однородной плоской волны не зависят от поперечных координат x и y .

Далее обратим внимание на то, что как временная, так и пространственная зависимости величины $v(z, t)$ описываются гармоническими функциями. Действительно, зафиксировав точку $z = 0$, получим $v(0, t) = V_m \cos \omega t$. Колебания в точке с координатой $z > 0$ имеют вид $v(z, t) = V_m \cos(\omega t - \beta z)$, т.е. характеризуются теми же амплитудой V_m и частотой ω , однако запаздывают по фазе на βz радиан. Сказанное поясняется кривыми на рисунке 47.1, а.

Рассмотрим теперь «мгновенную фотографию» процесса $v(z, t)$ в начальный момент времени $t = 0$ (рисунок 47.1, б). Данная зависимость описывается гармонической функцией $v(z, 0) = V_m \cos \beta z$. Параметр β играет роль «пространственной частоты» процесса и называется **коэффициентом фазы** плоской волны. Величина β имеет размерность рад/м или, короче, м^{-1} .

Функция $v(z, 0)$ периодична; ее период λ , называют **длиной волны**. Между величинами β и λ существует очевидная связь:

$$\beta = 2\pi\lambda. \quad (47.2)$$

Чтобы изобразить график функции $v(z, t)$ при $t > 0$, формулу (47.1) удобно записать в виде $v(z, t) = V_m \cos(\beta z - \omega t)$. При этом видно, что с ростом t фазовый сдвиг с ωt увеличивается, так что исходная кривая $v(z, 0)$ сдвигается вдоль оси вправо, т.е. в сторону увеличения координаты z (рисунок 47.1, б).

Назовем **плоскостью равных фаз** или **волновым фронтом** воображаемую бесконечно протяженную плоскость, перпендикулярную оси z ; координата z этой плоскости при любых t удовлетворяет соотношению:

$$\omega t - \beta z = \text{const}. \quad (47.3)$$

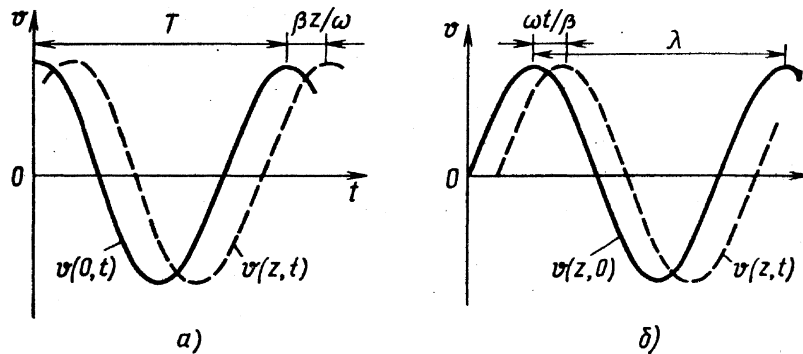
Волновой фронт данной плоской волны перемещается вдоль оси z с так называемой **фазовой скоростью**:

$$v_\Phi = \frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\omega t - \text{const}}{\beta} \right) = \frac{\omega}{\beta}. \quad (47.4)$$

Формулу (47.4) можно представить и по-иному:

$$v_{\Phi} = \lambda f, \quad (47.5)$$

где $f = \frac{\omega}{2\pi}$ – частота процесса, выраженная в герцах.



a – изменение поля во времени; *б* – изменение поля в пространстве

Рисунок 47.1 – Однородная плоская волна

Итак, из трех параметров v_{Φ} , ω , β лишь два можно выбирать произвольно; третий параметр подчиняется соотношению (47.4).

Рассмотрим однородную плоскую волну с математической моделью вида:

$$v(z, t) = V_m \cos(\omega t + \beta z). \quad (47.6)$$

Все сказанное ранее применимо и к этому случаю, за исключением того, что из уравнения волнового фронта $\omega t - \beta z = \text{const}$ вытекает следующая формула для нахождения фазовой скорости:

$$v_{\Phi} = \frac{dz}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{\text{const} - \omega t}{\beta} \right) = -\frac{\omega}{\beta}. \quad (47.7)$$

Сравнивая выражения (47.4) и (47.7), убеждаемся, что плоская волна, описываемая формулой (47.6), распространяется **влево**, т.е. в сторону уменьшения координаты z .

В любой реальной среде амплитуда волнового процесса неизбежно уменьшается по мере распространения, например за счет тепловых потерь. Закон ослабления амплитуды легко найти из следующих соображений. Предположим, что в начальной плоскости $z = 0$ амплитуда имеет исходное значение V_{m0} принимаемое за 100% (рисунок 47.2). Положим для конкретности, что при прохождении одного метра пути амплитуда волны уменьшается на 10%, т.е. $V_{m1} = 0.9V_{m0} = 90\%$. Легко видеть, что $V_{m2} = 0.9V_{m1} = 81\%$, $V_{m3} = 0.9V_{m2} = 72.9\%$ и т.д. Общая закономерность такова:

$$\frac{V_{m0}}{V_{m1}} = \frac{V_{m1}}{V_{m2}} = \dots = \frac{V_{mN-1}}{V_{mN}} = \dots$$

Из элементарной алгебры известно, что именно таким свойством обладает показательная функция. Поэтому закон изменения амплитуды вдоль оси распространения в общем виде можно записать так:

$$V_m(z) = V_{m0} e^{-\alpha z}. \quad (47.8)$$

где α – коэффициент ослабления плоской волны в среде. Эта действительная величина имеет, подобно коэффициенту фазы, размерность м^{-1} .

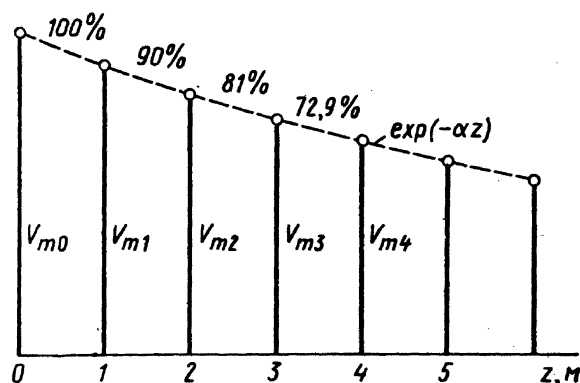


Рисунок 47.2 – Уменьшение амплитуды плоской волны при распространении в среде с потерями

В технических расчетах часто используют особую логарифмическую единицу – **погонное затухание** $\Delta_{\text{пог}}$, которое измеряют в децибелах на метр (дБ/м) и определяют по формуле:

$$\Delta_{\text{пог}} = 20 \lg \left(\frac{V_{m0}}{V_{m1}} \right) = 20 \lg (e^{\alpha}) = 8.686 \alpha. \quad (47.9)$$

Чтобы оценить удобство пользования логарифмическими единицами затухания, рассмотрим следующий пример.

Объединив формулы (47.1) и (47.8), можно записать общее выражение для пространственно-временного распределения мгновенных значений поля однородной плоской волны в среде с затуханием:

$$v(z, t) = V_{m0} e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z). \quad (47.10)$$

Так как зависимость вида (47.10) является гармонической относительно аргумента t , можно воспользоваться методом комплексных амплитуд.

Очевидно, что комплексная амплитуда данного поля:

$$\dot{\vec{V}}(z) = V_{m0} e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} = V_{m0} e^{-(\alpha + j\beta)z}, \quad (47.11)$$

поскольку:

$$v(z, t) = \text{Re} \left[\dot{\vec{V}}(z) e^{j\omega t} \right].$$

Коэффициент фазы β и коэффициент ослабления α объединяют в единую комплексную величину – так называемый **коэффициент распространения**:

$$\gamma = \alpha + j\beta. \quad (47.12)$$

Вопрос № 48. E - и H -волны. Собственные типы волн в волноводах. Основные типы волн в прямоугольном и круглом волноводах. Распределение силовых линий вектора E и H для волны H_{10} в прямоугольном волноводе и E_{01} – в круглом.

По структуре поля направляемые волны делятся на поперечные, электрические, магнитные и гибридные.

Поперечными волнами, или TEM -волнами (T – первая буква английского слова *transvers*, что означает поперечный), называют волны, у которых векторы электрического E и магнитного H полей перпендикулярны направлению распространения волны, т.е. не имеют продольных составляющих. Отметим, что в соответствии с ГОСТ 18238-72 «Линии передачи сверхвысоких частот. Термины и определения» эти волны полагается называть T -волнами.

Электрическими волнами, или E -волнами, называют волны, у которых вектор E имеет как поперечные, так и продольную составляющие, а продольная составляющая вектора H равна нулю. E -волны иногда называют поперечными магнитными волнами или TM -волнами.

Магнитными волнами, или H -волнами, называют волны, у которых вектор H имеет как поперечные, так и продольную составляющую, а продольная составляющая вектора E равна нулю. H -волны иногда называют поперечными электрическими волнами или TE -волнами.

Гибридными, или смешанными волнами называют волны, у которых и вектор E , и вектор H наряду с поперечными составляющими имеют и продольные составляющие.

Кроме свободно распространяющихся волн существуют волны, распространение которых возможно только при наличии каких-либо направляющих элементов (границы раздела сред, металлических, диэлектрических или полупроводящих трубок, стержней и др.). Такие волны называют **направляемыми**. Совокупность направляемых элементов образует **направляющую систему**. Направляющие системы называют также **линиями передачи энергии** или, более коротко, **линиями передачи**. **Волновод прямоугольного сечения** – линия передачи, находящая наибольшее применение в технике СВЧ. Размер сечения вдоль широкой стенки обозначается через a , размер вдоль узкой стенки – через b . В технике СВЧ часто применяют также **круглый** металлический **волновод**, представляющий собой трубу с внутренним радиусом a .

Для исследования волн E -типа в прямоугольном волноводе необходимо решить уравнение Гельмгольца:

$$\nabla^2 \dot{E}_z + \beta^2 \dot{E}_z = 0$$

относительно амплитуды проекции \dot{E}_z вместе с соответствующим граничным условием на контуре поперечного сечения:

$$\nabla_{\perp}^2 E_z + g^2 E_z = 0 \text{ при } x = 0, x = a; \quad (48.1)$$

$$E_z = 0 \text{ при } y = 0, y = b, \quad (48.2)$$

где β - коэффициент фазы; g – поперечное волновое число.

В математике подобную совокупность уравнения в частных производных и некоторых граничных условий называют **краевой задачей**. Краевая задача вида (48.1) – (48.2) имеет отличные от нуля решения не при любых значениях параметра g , а лишь при таких, которые связаны с геометрическими размерами стенок волновода соотношением:

$$g = \sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2}. \quad (48.3)$$

Данная величина g , отвечающая паре чисел m и n , носит название **собственного значения** рассматриваемой краевой задачи для уравнения Гельмгольца. Каждому собственному значению отвечает функция вида:

$$E_z(x, y) = E_0 \sin\left(\frac{m\pi}{a}x\right) \sin\left(\frac{n\pi}{b}y\right), \quad (48.4)$$

называемая **собственной функцией** краевой задачи. Такая собственная функция описывает одно из бесконечного множества решений уравнений Максвелла, которое в данном случае называют **волной типа E_{mn}** . Числа m и n называют **индексами** волны данного типа. Физически они означают количества стоячих полуволн, возникающих внутри волновода вдоль координатных осей x и y соответственно. Поскольку индексы могут быть любыми, в прямоугольном металлическом волноводе возможно раздельное существование сколь угодно большого числа волн типа E_{mn} . Заметим, что волн типа E_{0n} и E_{m0} не существует.

Исследование распространения волн H -типа в прямоугольном волноводе сводится к решению краевой задачи для поперечного уравнения Гельмгольца:

$$\nabla_{\perp}^2 H_z + g^2 H_z = 0, \quad (48.5)$$

$$\dot{E}_x = 0 \text{ при } y = 0, y = b, \quad (48.6)$$

$$\dot{E}_y = 0 \text{ при } x = 0, x = a. \quad (48.7)$$

Краевая задача (48.5) – (48.7) отличается от той, которая описывает распространение волн E -типа, т.к. здесь на границе раздела воздух-металл обращается в нуль не сама неизвестная функция, а ее производная по нормали. Как и ранее, поперечное волновое число g определяется соотношением (48.3). Каждой паре индексов m, n соответствует волна H -типа, обозначаемая как H_{mn} :

$$H_z(x, y) = H_0 \cos g_x x \cos g_y y, \quad (48.8)$$

где $g_x = m\pi/a$; $g_y = n\pi/b$.

Задача о волнах E -типа в круглом металлическом волноводе сводится к решению поперечного уравнения Гельмгольца в цилиндрических координатах:

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} + g^2 E_z = 0 \quad (48.9)$$

с граничным условием:

$$E_z = 0 \text{ при } r = a. \quad (48.10)$$

Уравнение Гельмгольца (48.9) вместе с граничным условием (48.10) образует требуемую краевую задачу.

В соответствии с идеей метода разделения переменных амплитуда продольной проекции вектора напряженности электрического поля записывается в виде:

$$E_z = E_0 J_m(gr) \cos m\varphi, \quad (48.11)$$

где J_m – функция Бесселя m -го порядка.

Поперечное волновое число g должно принадлежать бесконечной последовательности g_{mn} :

$$g_{mn} = v_{mn}/a, \quad (48.12)$$

где v_{mn} – множество корней функций Бесселя.

При исследовании волн H -типа в круглом волноводе следует исходить из уравнения Гельмгольца относительно проекции \dot{H}_z в цилиндрической системе координат:

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \varphi^2} + g^2 H_z = 0. \quad (48.13)$$

Граничное условие принимает вид:

$$\frac{\partial H_z}{\partial r} = 0 \text{ при } r = a. \quad (48.14)$$

Проблема исследования волн H -типа в круглом металлическом волноводе сводится к решению краевой задачи (48.13) – (48.14) для поперечного уравнения Гельмгольца. Частное решение с m вариациями по азимутальной координате φ записывается в виде:

$$H_z(r, \varphi) = H_0 J_m(gr) \cos m\varphi. \quad (48.15)$$

Краевая задача, описывающая распространение волн H -типа в круглом металлическом волноводе, допускает бесконечное множество нетривиальных решений (собственных функций). Собственное значение можно найти как:

$$g_{mn} = \mu_{mn}/a, \quad (48.16)$$

где μ_{mn} – бесконечное множество корней функций Бесселя.

Рассмотрим картину силовых линий векторов электромагнитного поля волны H -типа (рисунок 48.1). В плоскости с координатой $x = a$, удовлетворяющей равенству $ga = \pi$, напряженность электрического поля обращается в нуль. Поэтому здесь можно разместить вторую отражающую плоскость и тем самым локализовать электромагнитное поле в пределах бесконечного плоского слоя $0 \leq x \leq a$, размер которого в точности равен половине поперечной длины волны. Поскольку силовые линии электрического вектора здесь параллельны поперечной оси y , во внутренней области волновода можно установить две идеально проводящие перегородки, параллельные оси x и отстоящие на некотором расстоянии b . В силу перпендикулярности векторов поля E к этим перегородкам граничные условия на них будут выполняться

автоматически. Таким образом, можно рассматривать лишь поле во внутренней области, ограниченной прямоугольным контуром поперечного сечения (две плоскости и две перегородки). Из приведенного рисунка видно, что количество полуволн вдоль осей x и y как раз таково, чтобы назвать рассматриваемый электромагнитный процесс волной типа H_{10} .

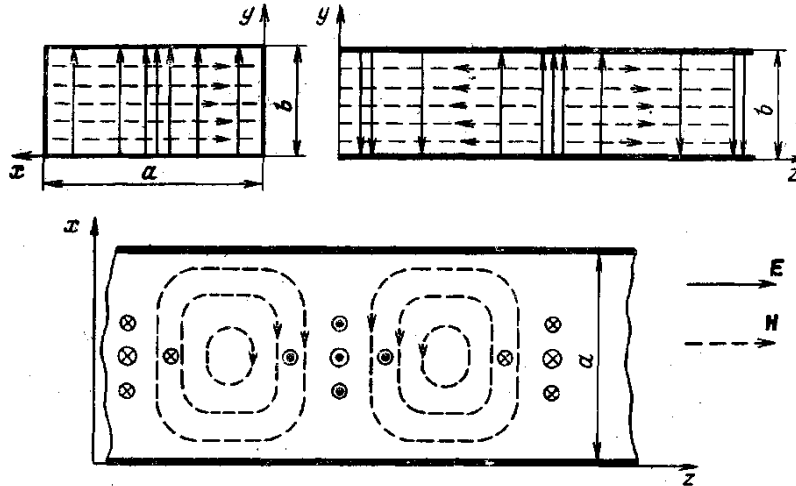


Рисунок 48.1 – Структура силовых линий векторов электромагнитного поля волны типа H_{10} в прямоугольном волноводе

Используя (48.11) и (48.12) и сделав ряд преобразований, можно рассчитать и построить картины мгновенного распределения силовых линий электромагнитного поля любой волны типа $E_{m n}$ в круглом волноводе. В качестве примера на рисунке 48.2 изображена структура поля простейшей симметричной волны типа E_{01} .

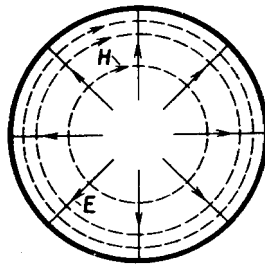


Рисунок 48.2 – Поперечное распределение силовых линий электромагнитного поля волны типа E_{01} в круглом волноводе

Вопрос № 49. Физика работы p - n перехода полевого и биполярного транзистора

Полярность и величина напряжений электродов определяют основные режимы работы транзистора: режим отсечки, режим насыщения, активный режим и инверсный режим. Наиболее распространен активный режим работы биполярного транзистора.

В активном режиме эмиттерный p - n -переход включается в прямом направлении, а коллекторный в обратном. На рисунке 49.1 показано включение транзистора с общей базой в активном режиме, который обеспечивается соответствующей полярностью напряжений эмиттера ($U_{ЭБ}$) и коллектора ($U_{КБ}$), отсчитываемых относительно базы.

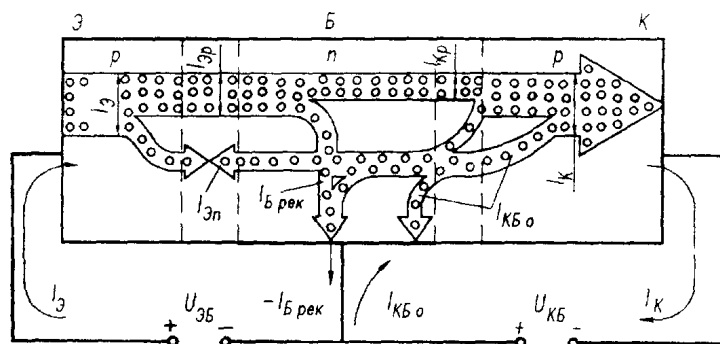


Рисунок 49.1 – Схемы включения биполярного транзистора в активном режиме

Поскольку концентрация дырок в эмиттере значительно больше концентрации электронов в базе, включение эмиттерного p - n -перехода в прямом направлении сопровождается значительной инжекцией дырок в базу и незначительной – электронной – из базы в эмиттера (см. рисунок 49.1). Это обуславливает прохождение через эмиттерный p - n -переход диффузионных токов: дырочного $I_{Эр}$ и электронного $I_{Эн}$. Следовательно, во внешней цепи проходит ток эмиттера:

$$I_{Э} = I_{Эр} + I_{Эн} = I_{ЭБ.0} \left(\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\Phi_T}\right) - 1 \right).$$

Вследствие инжекции концентрация дырок в базе повышается и зависит от напряжения эмиттерного перехода. Концентрация инжектированных в базу дырок на границе эмиттерного перехода определяется выражением:

$$p_{БЭ} = p_{n0} \left(\exp\left(\frac{U_{ЭБ}}{\Phi_T}\right) - 1 \right),$$

где p_{n0} – концентрация равновесных дырок в базе у эмиттерного перехода (при $x = 0$).

Таким образом, в результате инжекции дырок из эмиттера концентрация неосновных носителей (дырок) в базе у границы с эмиттерным переходом изменяется и может значительно превышать равновесную. Из решения уравнения непрерывности следует, что в бездрейфовом транзисторе градиент концентрации неосновных носителей в базе постоянен, т.е. не зависит от координаты, а распределение дырок в базе имеет линейный характер:

$$\frac{dp_n}{dx} = -\frac{p_{БЭ} - p_{БК}}{\omega}.$$

Под действием градиента концентрации происходит диффузионное движение инжектированных дырок через базу от эмиттера к коллектору. В процессе диффузионного движения часть дырок, не дойдя до коллекторного перехода, рекомбинирует с электронами. На место рекомбинировавших электронов в базу из внешней цепи поступают электроны, создавая совместно с электронами, уходящими из базы в эмиттер, ток базы рекомбинации $I_{Б,рек}$. Основная часть дырок достигает коллекторного перехода.

Дырки, инжектированные из эмиттера в базу и достигшие коллекторного p - n -перехода, попадают в его ускоряющее поле и перебрасываются (экстрагируются) в коллекторную p -область, создавая ток коллектора $I_{Кр}$, который в результате процессов рекомбинации в базе меньше тока эмиттера $I_{Эр}$. Экстракция дырок может сопровождаться ударной ионизацией атомов полупроводника и лавинным умножением носителей зарядов в коллекторном переходе. Чем больше дырок инжектируется эмиттером, тем большее их количество экстрагирует в коллектор, увеличивая его ток. **Возможность управления выходным током транзистора путем изменения входного тока является важным свойством биполярного транзистора, позволяющим использовать его в качестве активного элемента электрических схем.**

При рассмотрении полярности включения внешнего источника $U_{КБ}$ (см. рисунок 49.1) его напряжение является обратным для коллекторного p - n -перехода. Поэтому через коллекторный переход, кроме тока, обусловленного экстракцией дырок из базы в коллектор, проходит ток неосновных носителей базы и коллектора, направленный из базы в коллектор. Природа этого тока аналогична природе обратного тока полупроводникового диода, вследствие чего он получил название обратного тока коллектора.

Упрощенная структура кристалла полевого транзистора с управляющим p - n -переходом, изготовленного на основе полупроводника n -типа, показана на рисунке 49.2.

На границах раздела полупроводников n - и p -типа образуются запирающие слои, обладающие высоким сопротивлением. Часть полупроводниковой области n -типа, заключенную между p - n -переходами, называют каналом (К). Если к каналу подсоединить внешний источник постоянного тока, в канале создается электрическое поле, под действием которого электроны в канале перемещаются в сторону положительного полюса источника напряжения. Движение основных носителей заряда в канале за счет напряжения на

стоке (С) относительно истока $U_{С.И}$ обуславливает прохождение тока в канале и в цепи стока I_C .

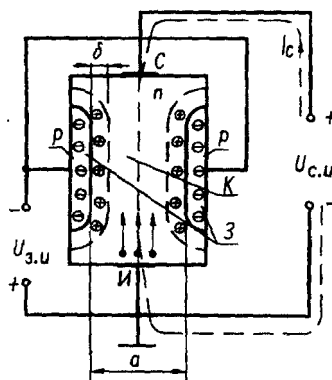


Рисунок 49.2 – Структура кристалла полевого транзистора с управляющим p - n -переходом и каналом n -типа

На затвор относительно истока подается напряжение $U_{з.И}$, смещающее p - n -переходы затвор-канал в обратном направлении. При увеличении напряжения источника $U_{з.И}$ смещающее обратное напряжение на p - n -переходах увеличивается, запирающие слои расширяются, уменьшая сечение канала. При этом электропроводность канала и проходящий через него ток уменьшаются. Таким образом, изменяя напряжения на затворе, можно управлять током, проходящим через канал полевого транзистора. При некотором напряжении на затворе (напряжении отсечки) может произойти смыкание областей объемного заряда, т.е. канал перекрывается.

Эффективное управление сечением канала происходит в том случае, если запирающий слой p - n -перехода располагается в основном в исходном полупроводнике. Это достигается выбором концентраций доноров и акцепторов таким образом, чтобы выполнялось условие $N_A \gg N_D$. При выполнении этого условия глубину проникновения области объемного заряда в основной полупроводник можно определить по формуле:

$$\delta = \delta_n = \sqrt{\frac{2\varepsilon(U_K + U_{з.И})}{qN_D}}.$$

Поскольку в запирающем слое отсутствуют подвижные носители зарядов, ширина канала, определяющая его площадь сечения и сопротивление, находятся из соотношения:

$$\omega_K = a - 2\delta = a - 2\sqrt{\frac{2\varepsilon(U_K + U_{з.И})}{qN_D}},$$

где a – расстояние между p -областями.

Таким образом, ширина канала, определяющая его сопротивление, и ток стока I_C зависят от напряжений $U_{з.И}$ и $U_{С.И}$. Входное сопротивление полевого транзистора велико, поскольку управляющий p - n -переход включается в обратном направлении.

Вопрос № 50. Поляризация диэлектриков. Механизмы поляризации.

Поляризацией называют состояние диэлектрика, характеризующееся наличием электрического момента у любого элемента его объема. Способность различных материалов поляризоваться в ЭП характеризуется относительной диэлектрической проницаемостью:

$$\varepsilon = C_d/C_0,$$

где C_d – емкость конденсатора с данным диэлектриком; C_0 – емкость того же конденсатора в вакууме (т.е. геометрическая емкость между электродами).

Количественной характеристикой поляризации служит поляризованность диэлектрика. Поляризованностью P называют векторную физическую величину, равную отношению электрического момента dp элемента диэлектрика к объему dV этого элемента $P = dp/dV$.

Для большинства диэлектриков в слабых ЭП поляризованность пропорциональна напряженности поля:

$$P = \varepsilon_0(\varepsilon - 1)E = \varepsilon_0\chi E,$$

где χ – диэлектрическая восприимчивость.

В сильных ЭП нарушается линейная зависимость между поляризованностью и напряженностью.

Механизмы поляризации. Значение емкости конденсатора с диэлектриком и накопленный в нем электрический заряд обусловлены несколькими механизмами поляризации, которые различны у разных диэлектриков и могут иметь место одновременно у одного и того же материала. Эквивалентную схему диэлектрика, в котором существуют различные механизмы поляризации, можно представить в виде ряда подключенных параллельно к источнику напряжения U конденсаторов, как показано на рисунке 50.

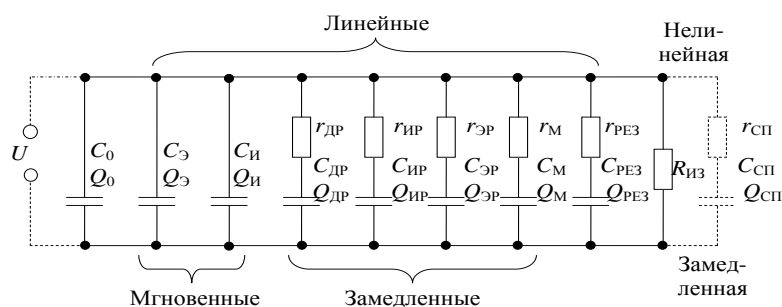


Рисунок 50 – Эквивалентная схема диэлектриков сложного состава с различными механизмами поляризации

Емкость C_0 и заряд Q_0 соответствуют собственному полю электродов, если в пространстве между ними нет диэлектрика (вакуум). Все остальные значения C и Q соответствуют различным механизмам поляризации: электронной, ионной, дипольно-релаксационной, ионно-релаксационной, электронно-релаксационной, миграционной, резонансной и спонтанной. Величины r означают сопротивления, эквивалентные потерям энергии при соответствующих механизмах поляризации. Вся емкость конденсаторов (см. рисунок

50) шунтирована сопротивлением изоляции $R_{из}$, представляющим собой сопротивление диэлектрика току сквозной электропроводности.

Электронная поляризация ($C_э, Q_э$) представляет собой упругое смещение и деформацию электронных оболочек атомов и ионов. Время установления электронной поляризации ничтожно мало (около $10^{-16} \dots 10^{-15}$ с) поэтому электронную поляризацию условно называют мгновенной. Она проявляется при всех частотах, вплоть до $10^{14} \dots 10^{16}$ Гц.

Электронная поляризация наблюдается у всех видов диэлектриков и не связана с потерями энергии до резонансных частот. Значение диэлектрической проницаемости вещества с чисто электронной поляризацией численно равно квадрату показателя преломления света. Поляризуемость частиц при электронной поляризации не зависит от температуры, а диэлектрическая проницаемость ϵ уменьшается с повышением температуры в связи с тепловым расширением диэлектрика и уменьшением числа частиц в единице объема.

Ионная поляризация ($C_{и}, Q_{и}$) характерна для твердых тел с ионным строением и плотной упаковкой ионов и обусловлена смещением упруго связанных ионов на расстояния, меньшие периода решетки. Смещению ионов под действием поля препятствуют упругие силы химической связи. В состоянии равновесия $qE = k_{упр}\Delta x$, где $k_{упр}$ – коэффициент упругой связи; Δx – смещение ионов, обусловленное внешним электрическим полем. Смещение двух разноименно заряженных ионов приводит к появлению элементарного электрического момента $p_{и} = q\Delta x = q^2E/k_{упр}$. Сумма всех таких элементарных моментов, приходящихся на единицу объема, определяет ионный вклад в поляризованность диэлектрика. Время установления ионной поляризации – порядка $10^{-14} \dots 10^{-13}$ с.

Рассмотренные выше электронная и ионная поляризации относятся к упругим поляризациям. Общим признаком таких механизмов поляризации является то, что она происходит очень быстро и без потерь.

Дипольно-релаксационная поляризация ($C_{др}, Q_{др}$) отличается от электронной и ионной тем, что дипольные молекулы, находящиеся в хаотическом тепловом движении, частично ориентируются под действием поля, что и является причиной поляризации.

Поворот диполей в направлении поля в вязкой среде требует преодоления некоторого сопротивления, а потому дипольно-релаксационная поляризация связана с потерями энергии и нагревом диэлектрика. Это отражено на рисунке 50 в виде последовательно включенного с конденсатором активного сопротивления $r_{др}$. После приложения поля поляризованность растет во времени $P_{др}(t) = P_{др.ст} [1 - \exp(-t/\tau_0)]$, где $P_{др.ст}$ – дипольно-релаксационная поляризованность в установившемся состоянии; τ_0 – постоянная времени (время релаксации).

Ионно-релаксационная поляризация ($C_{ир}, Q_{ир}, r_{ир}$) наблюдается в ионных диэлектриках с неплотной упаковкой ионов, например в неорганических стеклах и в некоторых кристаллических веществах.

В этом случае слабо связанные ионы вещества под воздействием внешнего электрического поля среди хаотических тепловых перебросов получают избыточные перебросы в направлении поля и смещаются на расстояния, превышающие постоянную решетки. После снятия электрического поля ионы постепенно возвращаются к центрам равновесия. Таким образом, этот механизм можно отнести к релаксационной поляризации, при которой имеет место необратимое рассеяние энергии.

Электронно-релаксационная поляризация ($C_{ЭР}$, $Q_{ЭР}$, $r_{ЭР}$) возникает за счет возбужденных тепловой энергией избыточных «дефектных» электронов или дырок.

Следует отметить относительно высокое значение диэлектрической проницаемости, которое может иметь место при электронно-релаксационной поляризации, а также наличие максимума в температурной зависимости ϵ .

Резонансная поляризация ($C_{РЕЗ}$, $Q_{РЕЗ}$, $r_{РЕЗ}$) наблюдается в диэлектриках при световых частотах. Она зависит от физико-химических особенностей вещества, может относиться к собственной частоте электронов или ионов (при очень высоких частотах) или к характеристической частоте дефектных электронов (при более низких частотах).

Различие собственных частот колебаний электронов и ионов обусловлено существенными различиями в массах этих частиц.

Миграционная поляризация (C_M , Q_M , r_M) является дополнительным механизмом поляризации, проявляющимся в твердых телах неоднородной структуры при макроскопических неоднородностях и наличии примесей. Эта поляризация отключается при наиболее низких частотах и связана со значительным рассеянием электрической энергии. Причинами возникновения такой поляризации являются проводящие и полупроводящие включения в технических диэлектриках, наличие слоев с различной проводимостью и т.д.

При внесении неоднородных материалов в электрическое поле свободные электроны и ионы проводящих и полупроводящих включений перемещаются в пределах каждого включения, которое становится подобным огромной поляризованной молекуле. В граничных слоях слоистых материалов и в приэлектродных слоях может быть накопление зарядов медленно движущихся ионов, что создает эффект миграционной поляризации.

Самопроизвольная (спонтанная) поляризация ($C_{СП}$, $Q_{СП}$, $R_{СП}$) существует только у группы твердых диэлектриков, обладающих такими же особенностями поляризации, как и сегнетова соль ($NaKC_4H_4O_6 \cdot 4H_2O$), а потому получивших название сегнетоэлектриков.

Спонтанная (самопроизвольная) поляризация – это поляризация, возникающая под влиянием внутренних процессов в диэлектрике, без внешних воздействий. Объем сегнетоэлектрика, как правило, разделен на домены – области с различным направлением векторов спонтанной поляризованности. В результате этого суммарная поляризованность образца в целом равна нулю.

Вопрос № 51. Понятие надёжности. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий.

1. Понятие надёжности. Надёжность – это свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих работоспособность.

Работоспособное состояние (работоспособность) – это состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической и (или) конструкторской (проектной) документации (НТД и КД).

Надёжность является комплексным свойством, может включать безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость или определенные сочетания этих свойств.

Безотказностью называют свойство объекта непрерывно сохранять работоспособное состояние в течение некоторого времени или наработки.

Наработка – это продолжительность или объём работы объекта. Нарботка может быть как непрерывной величиной (продолжительность работы в часах, километраж пробега и т.п.), так и целочисленной величиной (число рабочих циклов, запусков и т.п.).

Долговечностью называют свойство объекта сохранять работоспособное состояние до наступления предельного состояния при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

Ремонтпригодностью называют свойство объекта, заключающееся в приспособленности к поддержанию и восстановлению работоспособного состояния путем технического обслуживания и ремонта.

Сохраняемостью называют свойство объекта сохранять в заданных пределах значения параметров, характеризующих способности объекта выполнять требуемые функции, в течение и после хранения и (или) транспортирования.

2. Показатели безотказности невосстанавливаемых изделий. Невосстанавливаемый объект – это объект, для которого в рассматриваемой ситуации проведение восстановления работоспособного состояния не предусмотрено в НТД и КД.

Для необслуживаемых, невосстанавливаемых и неремонтируемых объектов в качестве показателей безотказности используют **вероятность безотказной работы, интенсивность отказов, среднюю наработку до отказа и гамма-процентную наработку до отказа.**

Отказ – это событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта.

Вероятность безотказной работы - это вероятность того, что в пределах заданной наработки отказ объекта не возникнет. Вероятность безотказной работы $P(t)$ объекта в интервале наработки от 0 до t включительно определяют как:

$$P(t) = P\{\tau > t\}. \quad (51.1)$$

Здесь $P\{\tau > t\}$ – вероятность события, заключенного в скобках; τ – величина наработки в момент отказа. Вероятность безотказной работы $P(t)$ является функцией наработки t .

Вероятность безотказной работы $P(t)$ связана с функцией распределения $F(t)$ и плотностью распределения $f(t)$ наработки до отказа:

$$F(t) = 1 - P(t); \quad f(t) = dF(t)/dt = -dP(t)/dt. \quad (51.2)$$

Наряду с понятием «вероятность безотказной работы» часто используют понятие «вероятность отказа» $Q(t)$, то есть вероятность того, что объект откажет хотя бы один раз в течение заданной наработки, будучи работоспособным в начальный момент времени:

$$Q(t) = 1 - P(t) = F(t); \quad (51.3)$$

$$Q(t) = \int_0^t f(t)dt = F(t); \quad (51.4)$$

$$P(t) = 1 - Q(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt. \quad (51.5)$$

Точечная статистическая оценка для вероятности безотказной работы $P_{\text{стат}}(t)$ производится по формуле:

$$P_{\text{стат}}(t) = 1 - n(t)/N, \quad (51.6)$$

где N – число объектов, работоспособных в начальный момент времени (наработки); $n(t)$ – число объектов, отказавших на отрезке от 0 до t .

Интенсивность отказов $\lambda(t)$ – это условная плотность вероятности возникновения отказа объекта, определяемая при условии, что до рассматриваемого момента времени отказ не возник. Её определяют по формуле:

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - Q(t)} = \frac{f(t)}{P(t)} = -\frac{1}{P(t)} \cdot \frac{dP(t)}{dt}; \quad (51.7)$$

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t)dt\right]. \quad (51.8)$$

Статистическая оценка для интенсивности отказов $\lambda_{\text{стат}}(t)$ имеет вид:

$$\lambda_{\text{стат}}(t) = \frac{n(t + \Delta t) - n(t)}{(N - n(t)) \cdot \Delta t}. \quad (51.9)$$

Типичная зависимость интенсивности отказов λ от времени (от наработки) t изображена на рисунке 51. На участке нормальной работы *II* изделий, находящемся между участком приработки изделий *I* и участком постепенных износных отказов *III*, интенсивность отказов λ определяется внезапными отказами и постоянна, то есть не зависит от времени. Для этого участка, на котором изделия работают наиболее долго, формула для расчёта вероятности безотказной работы упростится и примет вид:

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (51.10)$$

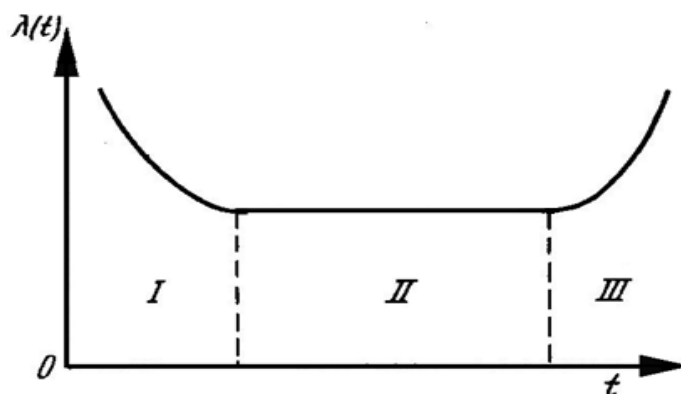


Рисунок 51 – Типичная зависимость интенсивности отказов λ от времени t

Средняя наработка до отказа T_1 – это математическое ожидание наработки объекта до первого отказа. Её вычисляют по формуле

$$T_1 = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} [1 - Q(t)] dt = \int_0^{\infty} P(t) dt. \quad (51.11)$$

Для второго участка работы (рисунок 51), когда интенсивность отказов λ не зависит от времени t , средняя наработка до отказа равна:

$$T_1 = 1/\lambda. \quad (51.12)$$

Статистическую оценку средней наработки до отказа $T_{1\text{стат}}$ вычисляют по формуле:

$$T_{1\text{стат}} = \left(\sum_{i=1}^N t_i \right) / N, \quad (51.13)$$

где N – число отказов, произошедших за наработку t ; t_i – наработка (время) отказа i -го элемента.

Гамма-процентная наработка до отказа – это наработка t_γ , в течение которой отказ объекта не возникнет с вероятностью γ , выраженной в процентах. Её определяют как корень t_γ уравнения:

$$F(t_\gamma) = Q(t_\gamma) = 1 - P(t_\gamma) = 1 - \gamma/100, \quad (51.14)$$

где $F(t_\gamma) = Q(t_\gamma)$ – функция распределения наработки до отказа (вероятность отказа), а $P(t_\gamma)$ – вероятность безотказной работы.

Вопрос № 52. Расчёт надёжности невосстанавливаемых изделий: ориентировочный и окончательный.

Расчёт значений величин вероятности безотказной работы и интенсивности отказов без учёта режима работы элементов называют ориентировочным расчётом надёжности. Ориентировочный расчёт надёжности производится на стадии эскизного проектирования.

Интенсивность отказов изделия (системы) λ_C вычисляют по формуле:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_i} \lambda_{ji}, \quad (52.1)$$

где λ_{ji} – интенсивности отказов элементов типа j в блоке i (их значения приводятся в таблицах); N – число блоков; n_i – число групп элементов в блоке i . Условия эксплуатации учитывают с помощью поправочных коэффициентов:

$$\lambda_j = \lambda_{jH} \cdot k_\lambda, \quad (52.2)$$

где λ_{jH} – интенсивность отказов элементов в лабораторных условиях работы;

$$k_\lambda = k_{\lambda 1} \cdot k_{\lambda 2} \cdot k_{\lambda 3}. \quad (52.3)$$

Коэффициенты учитывают воздействие на РЭС: $k_{\lambda 1}$ – ударов и вибраций; $k_{\lambda 2}$ – температуры и влажности; $k_{\lambda 3}$ – пониженного атмосферного давления. Их значения приводятся в таблицах. Средняя наработка до отказа устройства:

$$T_{1C} = 1/\lambda_C. \quad (52.4)$$

Вероятность безотказной работы устройства:

$$P_C(t) = \exp(-\lambda_C t). \quad (52.5)$$

Окончательный расчёт надёжности с учётом режимов работы элементов РЭС производится на стадии технического проектирования, когда эти режимы рассчитаны или измерены. Помимо общих эксплуатационных воздействий, учтённых в ориентировочном расчёте надёжности введением поправочного коэффициента k_λ , с помощью поправочного коэффициента a_j учитывают температуру среды t_{Cj} , окружающей каждый элемент, и отличие электрической нагрузки каждого элемента H_j от номинальной H_{Hj} . Отношение H_j к H_{Hj} называют коэффициентом нагрузки:

$$K_{Hj} = H_j/H_{Hj}. \quad (52.5)$$

В качестве нагрузки принимается электрический параметр, превышение которого чаще всего является причиной отказа данного элемента. У резисторов это мощность P , у конденсаторов это напряжение U , в моточных изделиях это может быть плотность тока J и т.д.

Значения поправочных коэффициентов:

$$a_j = \lambda_j/\lambda_{jH} \quad (52.6)$$

для различных элементов, температур среды t_{Cj} и коэффициентов нагрузки K_{Hj} приведены в литературе. Интенсивность отказов в блоке i вычисляют по формуле:

$$\lambda_{\text{с.ок}i} = \sum_{J=1}^{n_i} n_{ij} \lambda_{Ji} a_J. \quad (52.7)$$

Вероятность безотказной работы устройства:

$$P_{\text{с.ок}i}(t) = \exp(-\lambda_{\text{с.ок}i} t). \quad (52.8)$$

Средняя наработка до отказа устройства:

$$T_{1\text{с}} = 1/\lambda_{\text{с.ок}}. \quad (52.9)$$

ПРИНЯТЫЕ СОКРАЩЕНИЯ

- АИМ – амплитудно-импульсная модуляция
АЛУ – арифметико-логическое устройство
АМ – амплитудная модуляция
АСИО – автоматизированная система инструментального обеспечения
АСС – автоматизированная складская система
АСТПП – автоматизированная система технологической подготовки
производства
АСУ – автоматизированная система управления
АТС – автоматизированная транспортная система
АТСС – автоматизированная транспортно-складская система
АФЧХ – амплитудно-фазовая частотная характеристика
АЧХ – амплитудно-частотная характеристика
БИС – большая интегральная схема
ВАХ – вольт-амперная характеристика
ВИМ – времяимпульсная модуляция
ВКИ – высокочастотная катушка индуктивности
ВЧ – высокая частота
ВШП – встречно-штыревой преобразователь
ГАЛ – гибкая автоматизированная линия
ГАУ – гибкий автоматизированный участок
ГАЦ – гибкий автоматизированный цех
ГИС – гибридная интегральная схема
ГОСТ – государственный отраслевой стандарт
ГПК – гибкие печатные кабели
ГПМ – гибкие производственные модули
ГПП – гибкие печатные платы
ГПС – гибкие производственные системы
ДВ – длинные волны
ДПП – двусторонняя печатная плата
ЕСКД – единая система конструкторской документации
ЕСТД – единая система технологической документации
ЕСТПП – единая система технологической подготовки производства
ИВЭП – источник вторичного электропитания
ИК – инфракрасный
ИКМ – импульсно-кодовая модуляция
ИП – измерительный прибор
ИПС – интегрированная производственная система
ИС – интегральная схема
ИН – источник наводки
КВ – короткие волны

КД – конструкторская документация
КМО – компонент, монтируемый в отверстие
КМОП – комплементарный металл-оксид-полупроводник
КМП – коэффициент механических потерь
КПД – коэффициент полезного действия
КПЕ – конденсатор переменной емкости
КПМ – компонент поверхностного монтажа
КПП – конструкторская подготовка производства
ЛАЧХ – логарифмическая амплитудно-частотная характеристика
ЛЗ – линия задержки
ЛСУ – локальная система управления
ЛФЧХ – логарифмическая фазо-частотная характеристика
МВ – механические воздействия
МДП – металл-диэлектрик-полупроводник
МК – микроконтроллер
ММ – математическая модель
МОП – металл-оксид-полупроводник
МП – микропроцессор
МПЛ – микрополосковая линия
МПП – многослойная печатная плата
НИ – носитель информации
НИР – научно-исследовательская работа
НТД – научно-техническая документация
НЧ – низкая частота
НЭМП – непреднамеренная электромагнитная помеха
ОБ – общая база
ОВЧ – очень высокая частота
ОИ – общий источник
ОК – общий коллектор
ОК – открытый коллектор
ОКГ – оптический квантовый генератор
ОКР – опытно-конструкторская работа
ОПП – односторонняя печатная плата
ОСТ – отраслевой стандарт
ОТК – отдел технического контроля
ОЭ – общий эмиттер
ПАВ – поверхностно-акустическая волна
ПВП – пайка волной припоя
ПЗС – прибор с зарядовой связью
ПН – приемник наводки
ПП – печатная плата
ПР – промышленный робот
ПРДПИ - пайка расплавлением дозированного припоя при его нагреве

излучением

ПС – паразитная связь
РПП – рельефная печатная плата
РПУ – радиоприемное устройство
РТК – роботизированный технологический комплекс
РЧ – радиочастота
РЭА – радиоэлектронная аппаратура или радиоэлектронный аппарат
РЭС – радиоэлектронная система или радиоэлектронное средство
САК – система автоматизированного контроля
САПР – система автоматизированного проектирования
САУ – система автоматического управления
СБИС – сверхбольшая интегральная схема
СВ – средние волны
СВЧ – сверхвысокая частота
СД – сглаживающий дроссель
СМК – система менеджмента качества
СТП – стандарт предприятия
СЧ – средняя частота
ТД – технологическая документация
ТЗ – техническое задание
ТКЕ – температурный коэффициент емкости
ТКЛР – температурный коэффициент линейного расширения
ТКС – температурный коэффициент сопротивления
ТМП – технология поверхностного монтажа
ТО – технологическая операция
ТП – технологический процесс
ТП – трансформатор питания
ТПП – технологическая подготовка производства
ТС – техническое совершенство
ТС – третье состояние
ТТЛ – транзисторно-транзисторная логика
ТТЛ(Ш) - транзисторно-транзисторная логика Шоттки
ТУ – технические условия
ТЭЗ – типовой элемент замены
ТЭП – технико-экономические показатели
УБС – устройство блокировки и сигнализации
УЗ – ультразвук
УКВ – ультракороткие волны
УПП – узел на печатной плате
УПЧ – усилитель промежуточной частоты
УФЭ – устройство функциональной электроники
ФЗ – федеральный закон
ФИМ – фазоимпульсная модуляция
ФМ – фазовая модуляция
ФУ – функциональный узел

ФЧХ – фазо-частотная характеристика
ЦИП – цифровой измерительный прибор
ЦМД – цилиндрический магнитный домен
ЧИМ – частотно-импульсная модуляция
ЧМ – частотная модуляция
ЧПУ – числовое программное управление
ШИМ – широтно-импульсная модуляция
ЭВМ – электронная вычислительная машина
ЭДС – электродвижущая сила
ЭМВ – электромагнитная волна
ЭМП – электромагнитная помеха
ЭМП – электромагнитное поле
ЭП – электрическое поле
ЭРЭ – электрорадиоэлемент
ЭСЛ – эмиттерно-связанная логика

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

В настоящем разделе приведен список рекомендуемой литературы для более глубокой проработки вопросов, выносимых в качестве теоретического материала на Государственный экзамен. Глубокая проработка экзаменационных вопросов необходима, прежде всего, для студентов, претендующих на оценки «хорошо» и «отлично».

К вопросу № 1.

1. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР / И.Г.Мироненко, В.Ю.Суходольский, К.К.Холуянов. Под ред. И.Г.Мироненко. – М.: Высшая школа, 2002. – 391 с.

2. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В.Алексеев, А.А.Головков, И.Ю.Пивоваров и др. Под ред. О.В.Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.

3. Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Курушин А.А. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. – М.: Солон-Пресс, 2003. – 496 с.

К вопросу № 2.

1. Рычина Т.А., Зеленский А.В. Устройства функциональной электроники и электрорадиоэлементы. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 350 с.

2. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.

3. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н.Дулина, М.С.Жука. – М.: Энергия, 1977. – 576 с.

К вопросу № 3.

1. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 336 с.

2. Микропроцессоры. В 3-х кн.: Учеб. для втузов / П.В.Нестеров, В.Ф.Шаньгин, В.Л.Горбунов и др. / Под ред. Л.Н.Преснухина. – М.: Высшая школа, 1986. – Кн. 1 – 495 с., Кн. 2 – 383 с., Кн. 3 – 351 с.

3. Микропроцессоры и микропроцессорные комплекты интегральных микросхем: Справочник: в 2-х т./ Н.Н.Аверьянов, А.И.Березенко, Ю.Н.Борщенко и др. / Под ред. В.А.Шахнова. – М.: Радио и связь, 1988. – Т.1 – 368 с. Т. 2 – 368 с.

К вопросу № 4.

1. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматизированное проектирование. – М.: Радио и связь, 1990. – 288 с.

2. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г.Гасанов, А.А.Липатов, В.В.Марков, Н.А.Могильченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

3. Техническая электродинамика / Пименов Ю.И., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2002. – 536 с.

К вопросу № 5.

1. Бальян Р.Х. Трансформаторы питания для радиоэлектроники. – М.: Сов. радио, 1971. – 720 с.

2. Белополюский И.И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

3. Майер А.К. Методические указания по выполнению курсового проекта на тему «Трансформатор питания». – Томск: ТИАСУР, 1980. – 83 с.

К вопросу № 6.

1. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.

2. Рычина Т.А. Электрорадиоэлементы. – М.: Сов. радио, 1976. – 336 с.

3. Справочник по элементам радиоэлектронных устройств / Под ред. В.Н. Дулина, М.С. Жука. – М.: Энергия, 1977. – 576 с.

К вопросу № 7.

1. Фролов А.Д. Радиодетали и узлы. – М.: Высшая школа, 1975. – 440 с.

2. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.

3. Белополюский И.И. и др. Расчет трансформаторов и дросселей малой мощности. – М.: Энергия, 1973. – 400 с.

К вопросу № 8.

1. Буловский П.И., Лукичев А.Н. Технология и оборудование производства электроизмерительных приборов. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1983. – 280 с.

2. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

3. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. – 6-е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1979. – 520 с.

К вопросу № 9.

1. Черняев В.Н. Физико-химические процессы в технологии РЭА. – М.: Высшая школа, 1987. – 375 с.

2. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.

3. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1998. – 448 с.

К вопросу № 10.

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.

2. Роткоп Л.Л., Спокойный Ю.Е. Обеспечение тепловых режимов при конструировании радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Сов. радио, 1976. – 232 с.

3. Дульнев Г.Н. и др. Методы расчета теплового режима приборов / Г.Н.Дульнев, В.Г.Парфенов, А.В.Сигалов. – М.: Радио и связь, 1990. – 312 с.

К вопросу № 11.

1. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре. – М.: Высш. шк., 1984. – 247 с.

2. Обеспечение тепловых режимов изделий электронной техники / А.А.Чернышев, В.И.Иванов, А.И.Аксенов, Д.Н.Глушкова. – М.: Энергия, 1980. – 216 с.

3. Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г.Варламова. – М.: Сов. радио, 1972. – 856 с.

К вопросу № 12.

1. Справочник конструктора РЭА: Общие принципы конструирования / Под ред. Р.Г.Варламова. – М.: Сов. радио, 1980. – 480 с.

2. Ингбегман М.И., Фромберг Э.М., Грабой Л.П. Термостатирование в технике связи. М.: Связь, 1979. – 144 с.

3. Ярышев Н.А., Андреева Л.Б. Тепловой режим термостатов. - Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1984. – 176 с.

К вопросу № 13.

1. Конструирование и технология микросхем: Курсовое проектирование / Л.А.Коледов, В.А.Волков, Н.И.Докучаев и др. Под ред. Л.А.Коледова. – М.: Высшая школа, 1984. – 230 с.

2. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.

3. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.

К вопросу № 14.

1. Конструирование и технология микросхем: Курсовое проектирование / Л.А.Коледов, В.А.Волков, Н.И.Докучаев и др. Под ред. Л.А.Коледова. – М.: Высшая школа, 1984. – 230 с.

2. Коледов Л.А. Технология и конструкции микросхем микропроцессоров и микросборок. – М.: Радио и связь, 1989. – 400 с.

3. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.

К вопросу № 15.

1. Каленкович Н.И. и др. Механические воздействия и защита радиоэлектронных средств / Н.И. Каленкович, Е.П. Фастовец, Ю.В. Шамгин. – М.: Высшая школа, 1989. – 244 с.

2. Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г.Варламова. – М.: Сов. радио, 1972. – 856 с.

3. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1998. – 448 с.

К вопросу № 16.

1. Стешенко В.Б. EDA. Практика проектирования радиоэлектронных устройств. – СПб.; БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.

2. Стешенко В.Б. P-CAD. Технология проектирования печатных плат. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.

3. Лопаткин А.В. P-CAD 2004. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. – 560 с.

К вопросу № 17.

1. Сергеев А.Г. Метрология / А.Г.Сергеев, В.В.Крохин. – М.: Логос, 2001. – 408 с.

2. Тартаковский Д.Ф. Метрология, стандартизация и технические средства измерений / Д.Ф.Тартаковский, А.С.Ястребов. – М.: Высшая школа, 2001. – 206 с.

3. Информационно-измерительная техника и технологии / В.И.Калашников, С.В.Нефедов, А.Б.Путилин и др. Под ред. Г.Г.Раннева. – М.: Высшая школа, 2002. – 456 с.

К вопросу № 18.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 392 с.

К вопросу № 19.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 392 с.

К вопросу № 20.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н. Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 392 с.

К вопросу № 21.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Волгов В.А. Детали и узлы радиоэлектронной аппаратуры. – М.: Энергия, 1977. – 656 с.

3. Рычина Т.А. Электрорадиоэлементы. – М.: Сов. радио, 1976. – 336 с.

К вопросу № 22.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н, Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.Н.Черняева. – М.: Энергия, 1980. – 464 с.

К вопросу № 23.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В.Егунов, Б.Л.Жоржوليани, В.Г.Журавский, В.В.Жуков; Под ред. В.Г.Журавского. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.

3. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.Н.Черняева. – М.: Энергия, 1980. – 464 с.

К вопросу № 24.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н, Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 392 с.

К вопросу № 25.

1. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

2. Ушаков Н.Н, Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

3. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / Алексеев В.Г., Гриднев В.Н., Нестеров Ю.И. и др. – М.: Высшая школа, 1984. – 392 с.

К вопросу № 26.

1. Березин А.С., Мочалкина О.Р. Технология и конструирование интегральных микросхем. – М.: Радио и связь, 1992. – 320 с.

2. Бубенников А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий, приборов и схем. – М.: Высш. шк., 1989. – 320 с.

3. Черняев В.Н. Технология производства интегральных микросхем и микропроцессоров. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.

К вопросу № 27.

1. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 510 с.

2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы. 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2000. – 448 с.

3. Пенин П.И., Филиппов А.И. Радиотехнические системы передачи и информации. – М.: Радио и связь, 1984. – 256 с.

К вопросу № 28.

1. Нефедов В.И. Основы радиоэлектроники и связи: Учебник для вузов – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 2002. – 510 с.

2. Пестряков В.Б., Кузенков В.Д. Радиотехнические системы. – М.: Радио и связь, 1985. – 375 с.

3. Чердынцев В.А. Радиотехнические системы. – Минск: Высшая школа, 1988. – 368 с.

К вопросу № 29.

1. Ненашев А.П. Конструирование радиоэлектронных средств. – М.: Высшая школа, 1990. – 432 с.

2. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1998. – 448 с.

3. Троян Ф.Д. Основы проектирования электронной аппаратуры: Учеб. пособие/ Ф.Д. Троян, В.М. Хасин, А.И. Пугач. – Мн.: УП «Технопринт», 2001. – 134 с.

К вопросу № 30.

1. Князев А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости: производственно-практическое издание / А.Д.Князев, Л.Н.Кечиев, Б.В.Петров. – М.: Радио и связь, 1989. – 222 с.

2. Краткий справочник конструктора РЭА / Под ред. Р.Г.Варламова. – М.: Сов. радио, 1972. – 856 с.

3. Чернышев А.А. Основы конструирования и надежности электронных вычислительных средств: Учеб. для вузов. – М.: Радио и связь, 1998. – 448 с.

К вопросу № 31.

1. Менеджмент систем качества / Круглов М.Г. и др. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2003. – 247 с.

2. Розова Н.К. Управление качеством. – СПб: Питер, 2003. – 224 с.

3. Окрепилов В.В. Управление качеством /2-е изд., доп. и перераб. СПб.: ОАО «Издательство «Наука», 2000. – 912 с.

К вопросу № 32.

1. Менеджмент систем качества / Круглов М.Г. и др. – М.: ИПК «Издательство стандартов», 2003. – 247 с.

2. Розова Н.К. Управление качеством. СПб.: Питер, 2003. – 224 с.

3. Окрепилов В.В. Управление качеством /2-е изд., доп. и перераб. СПб.: ОАО «Издательство «Наука», 2000. – 912 с.

К вопросу № 33.

1. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления. – Томск: ТУСУР, 2003. – 206 с..

2. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. – СПб: Политехника, 2003. – 301 с.

3. Андриященко В.А. Теория систем автоматического управления. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. – 256 с.

К вопросу № 34.

1. Коновалов Б.И., Лебедев Ю.М. Теория автоматического управления. – Томск: ТУСУР, 2003. – 206 с.

2. Ерофеев А.А. Теория автоматического управления. – СПб: Политехника, 2003. – 301 с.

3. Андриященко В.А. Теория систем автоматического управления. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. – 256 с.

К вопросу № 35.

1. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Под ред. В.Н.Черняева. – М.: Энергия, 1980. – 464 с.

2. Бушминский И.П., Даутов О.Ш., Достанко А.П. и др. Технология и автоматизация производства радиоэлектронной аппаратуры: Учебник для вузов. – М.: Радио и связь, 1989. – 624 с.

3. Ушаков Н.Н, Технология производства ЭВМ. 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1991. – 416 с.

К вопросу № 36.

1. Мэнгин Ч.-Г., Макклелланд С. Технология поверхностного монтажа. – М.: Мир, 1990. – 276 с.

2. Монтаж на поверхность. Элементная база / Под ред. И.О.Шурчкова. – М.: Издательство стандартов, 1993. – 97 с.

3. Автоматизация и механизация сборки и монтажа узлов на печатных платах / А.В.Егунов, Б.Л.Жоржолиани, В.Г.Журавский, В.В.Жуков; Под ред. В.Г.Журавского. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.

К вопросу № 37.

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.

2. Петров Б.М. Электродинамика и распространение радиоволн. 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2003. – 558 с.

3. Техническая электродинамика / Пименов Ю.И., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2002. – 536 с.

К вопросу № 38.

1. Баскаков С.И. Электродинамика и распространение радиоволн. – М.: Высшая школа, 1992. – 416 с.

2. Техническая электродинамика / Пименов Ю.И., Вольман В.И., Муравцов А.Д. Под ред. Ю.В. Пименова. – М.: Радио и связь, 2002. – 536 с.

3. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г.Гасанов, А.А.Липатов, В.В.Марков, Н.А.Могильченко. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.

К вопросу № 39.

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.

2. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 336 с.

3. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.

К вопросу № 40.

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.

2. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 336 с.

3. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.

К вопросу № 41.

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.

2. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 336 с.

3. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.

К вопросу № 42.

1. Опадчий Ю.Ф. и др. Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов / Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров; Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2002. – 768 с.

2. Калабеков Б.А. Цифровые устройства и микропроцессорные системы: Учебник для техникумов связи. – М.: Горячая линия – Телеком, 2002. – 336 с.

3. Зельдин Е.А. Цифровые интегральные микросхемы в информационно-измерительной аппаратуре. – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 280 с.

К вопросу № 43.

1. Алексеев В.П., Коблов Н.Н., Хрулев Г.М. Современные технологии автоматизации проектирования РЭА специального назначения. Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2003. – 134 с.

2. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В.Алексеев, А.А.Головков, И.Ю.Пивоваров и др. Под ред. О.В.Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.

3. Уваров А.С. PCAD 2002 и SPECSTRA. Разработка печатных плат. – М.: СОЛОН-Пресс, 2003. – 544 с.

К вопросу № 44.

1. Стешенко В.Б. EDA. Практика проектирования радиоэлектронных устройств. – СПб.; БХВ-Петербург, 2003. – 720 с.

2. Автоматизированное проектирование узлов и блоков РЭС средствами современных САПР / И.Г.Мироненко, В.Ю.Суходольский, К.К.Холуянов. Под ред. И.Г.Мироненко. – М.: Высшая школа, 2002. – 391 с.

3. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств / О.В.Алексеев, А.А.Головков, И.Ю.Пивоваров и др. Под ред. О.В.Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 479 с.

К вопросу № 45.

1. Батушев В.А. Электронные приборы: Учебник для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 383 с.

2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для ВУЗов. 5-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 480 с.

3. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1980. – 296 с.

К вопросу № 46.

1. Батушев В.А. Электронные приборы: Учебник для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 383 с.

2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для ВУЗов. 5-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 480 с.

3. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – М.: Советское радио, 1980. – 296 с.

К вопросу № 49.

1. Епифанов Г.И. Физические основы микроэлектроники. – М.: Сов. радио, 1971. – 376 с.

2. Батушев В.А. Электронные приборы: Учебник для ВУЗов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. школа, 1980. – 383 с.

2. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы: Учебник для ВУЗов. 5-е изд., исправленное. – СПб.: Издательство «Лань», 2001. – 480 с.

К вопросу № 50.

1. Пасынков В.В., Сорокин В.С. Материалы электронной техники. – Санкт-Петербург: Лань, 2003. – 367с.

2. Богородицкий Н.П., Пасынков В.А., Тареев Б.М. Электротехнические материалы. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.

3. Мишин Д.Д. Магнитные материалы. – М.: Высшая школа, 1991. – 384 с.

К вопросу № 51.

1. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА. – М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.

2. Сборник задач по теории надёжности. Под ред. А.М.Половко и И.М.Маликова. – М.: Сов. радио, 1972.

3. Козлов В.Г. Теория надёжности. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, кафедра КИПР, 2004. – 138 с.

К вопросу № 52.

1. Яншин А.А. Теоретические основы конструирования, технологии и надёжности ЭВА. - М.: Радио и связь, 1983. – 312 с.

2. Сборник задач по теории надёжности. Под ред. А.М.Половко и И.М.Маликова. – М.: Сов. радио, 1972.

3. Козлов В.Г. Теория надёжности. Учебное пособие. – Томск: ТУСУР, кафедра КИПР, 2004. – 138 с.