

Авторский курс

«Электромагнитная совместимость
каналов передачи электрических
сигналов»

Содержание курса

Оглавление

Часть 1. Обеспечение ЭМС при разработке межблочных кабелей и жгутов.....	3
Тема 1. Общие подходы к обеспечению помехозащищенности	3
Тема 2. Экранирование линий передачи электрических сигналов	3
Тема 3. Заземление экранов	4
Тема 4. Резонанс.....	5
Тема 5. Фильтрация сигналов	6
Тема 6. Стабильность и долговечность параметров ЭМС.....	7
Часть 2. Обеспечение ЭМС и сохранение формы сигналов на уровне печатной платы.....	8
Тема 7. Вариант А, 8 ак.ч. Обеспечение ЭМС при проектировании печатных плат	8
Тема 7. Вариант Б, 16 ак.ч. Обеспечение ЭМС и сохранение формы сигналов на уровне печатной платы	10
Тема 8. Обеспечение функциональной безопасности в отношении ЭМС	14
Часть 3. Обеспечение устойчивости оборудования к электростатическим разрядам и кондуктивным коммутационным помехам	16
Тема 9. Обеспечение комплексной защиты радиоаппаратуры от импульсных помех.....	16
Тема 10. Электростатические разряды	16
Тема 11. Особенности применения варисторов для ограничения амплитуды наносекундных импульсных помех.....	18
Тема 12. Особенности применения полупроводниковых супрессоров (TVS) для ограничения наносекундных импульсных помех	18
Тема 13. Переходные процессы при коммутации реактивной нагрузки	19
Тема 14. Программные средства обеспечения помехоустойчивости систем.....	20
Часть 4. Высокочастотное и низкочастотное корпусное экранирование: теория и практика	22
Тема 15. Теория и практика высокочастотного корпусного экранирования.....	22
Тема 16. Теория и практика низкочастотного корпусного экранирования.....	24
Тема 17. Пластиковые и композитные экранирующие корпуса	26
Тема 18. Токопроводящие прокладки	26
Часть 5. Применение компонентов и материалов для обеспечения электромагнитной совместимости. (8 ак. часов)	28
Тема 19. Снижение эмиссии помех от радиаторов охлаждения	28
Тема 20. Электропроводные клеи, герметики и смазки. Радиопоглощающие материалы и структуры	29
Часть 6. Продвинутый курс.Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов.	32
Тема 21. Продвинутый курс. Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов. Экранирование.....	32
Тема 22. Продвинутый курс. Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов. Системы заземления.....	34

Часть 1. Обеспечение ЭМС при разработке межблочных кабелей и жгутов

Тема 1. Общие подходы к обеспечению помехозащищенности

Перечень рассматриваемых вопросов:

- принцип поэтапного ослабления помехи
- управление спектром цифрового сигнала как способ снижения эмиссии помех
- правила выбора комплектующих для обеспечения ЭМС
- схемотехнические и конструктивные приемы для обеспечения ЭМС
- мероприятия по снижению эффективности путей передачи помехи (правила деления на модули, экранирование, фильтрация)
- разнесение источника и приемника помехи в пространстве, примеры применения
- неэлектрические методы передачи сигналов – аналоговые волоконно-оптические каналы
- структура волоконно-оптического канала
- методы модуляции оптического сигнала, достоинства и недостатки
- конструкторские компромиссы при разработке аналоговых волоконно-оптических каналов
- методы улучшения характеристик аналоговых волоконно-оптических каналов
- симметричные линии связи: определение, преимущества и недостатки
- средства подавления синфазной помехи в широком диапазоне частот
- запас по помехозащищенности: определение, типовые значения, пример вычисления
- программные методы повышения помехозащищенности: интегрирование, усреднение, помехозащищенное кодирование
- сторожевые таймеры как средство повышения устойчивости работы программного обеспечения
- практические рекомендации по отладке систем: порядок поиска неисправностей, методы поиска источника помех, быстрая верификация эффективности принятых мер.

Тема 2. Экранирование линий передачи электрических сигналов

Перечень рассматриваемых вопросов:

- этапы проектирования экранов
- механизмы экранирование электромагнитных помех
- особенности экранирования помех в «ближней» и «дальней» зоне

- дифференциальные уравнения классической теории поля как фундамент для численной оценки эффективности экранов
- теория бесконечного экрана С.А. Щелкунова: оценка потерь на отражение, поглощение энергии помехи и переотражение в экране
- экраны с отверстиями: правила конструирования
- полное поверхностное сопротивление экрана как мера эффективности отвода энергии помехи;
- методы снижения влияния низкочастотного магнитного поля, особенности экранов из пермаллоев
- плетеный экран и экран из фольги: достоинства и недостатки, методы повышения эффективности
- оценка эффективности плетеного экрана: метод баланса мощностей
- многослойные экраны: достоинства, выбор материалов, правила конструирования, схемы подключения
- спиральный экран: достоинства, недостатки, методы расширения частотного диапазона применения
- суперэкраны
- улучшение характеристик ЭМС неэкранированных кабелей на примере ленточного кабеля
- свойства основных материалов, применяемых для экранирования (и их оксидов)
- активные управляемые экраны
- правила проектирования эффективных экранов.

Тема 3. Заземление экранов

Перечень рассматриваемых вопросов:

- значение системы заземления для обеспечения ЭМС изделия
- функциональные группы заземления
- петли заземления, методы борьбы с ними
- схемы систем заземления: одноточечная, многоточечная, последовательная, условия применения
- «плавающая система заземления»: достоинства, недостатки, условия применения
- частотно-зависимые (гибридные) схемы заземления
- правила соединения систем заземления, принадлежащих к различным функциональным группам
- конструктивное исполнение систем заземления: заземляющая поверхность, сеть заземления
- типы проводников для систем заземления: трубчатые, монолитные круглого сечения и ленточные, оценка их индуктивности

- соединение аппаратуры с системой заземления: выбор перемычек, правила монтажа, предотвращение резонанса на перемычках заземления
- винтовые соединения в системах заземления: правила выбора метизов, подготовка поверхности, защита соединений от коррозии
- снижение переходного сопротивления в точке винтового соединения
- схемы соединения экранов кабелей с системой заземления и условия их применения: с одного конца, с двух концов, интервальное соединение
- гибридные схемы соединения экрана с системой заземления
- соединение экранов с использованием отвода: ограничения на использование, правила выполнения
- расширение частотного диапазона использования отводов от экрана
- метод круговой заделки кабельного экрана
- методы обеспечения низкоомного соединения в цепи «экран кабеля-хвостовик соединителя-корпус соединителя (кабельная часть) – корпус соединителя (блочная часть) – корпус оборудования»
- технологии соединения экрана кабеля с хвостовиком соединителя

Тема 4. Резонанс

Перечень рассматриваемых вопросов:

- определение резонанса, электрический резонанс
- последовательный и параллельный колебательные контуры: резонансная частота, добротность, ток и напряжение на частоте резонанса
- влияние резонанса на параметры ЭМС системы
- антенна-монополь и антенна-диполь: конструкция и условие возникновения резонанса
- обзор факторов, влияющих на эффективность антенн
- экран кабеля как антенна
- обнаружение источников излучения (скрытых антенн) в системе и оценка их частоты резонанса
- резонанс в системе заземления: механизм возникновения, последствия, методы снижения влияния
- резонанс на элементах RLC-фильтров: инверсия фильтров, методы повышения частоты инверсии
- затухающие гармонические колебания («звон») в цифровых каналах и линиях питания: методы подавления
- использование снебберов для подавления переходных процессов
- методика оценки параметров RC-снеббера, пример использования методики
- методика подавления резонанса в аудиоканалах
- резонанс на ферритовых фильтрах (габаритный и электрический): условия возникновения и методы снижения влияния
- резонанс в полости: условия возникновения и методы снижения влияния

- резонанс на краях отверстий корпуса: условия возникновения и методы снижения влияния

Тема 5. Фильтрация сигналов

Перечень рассматриваемых вопросов

- возможности фильтрации, методы фильтрации электрических сигналов, типы фильтров
- требования к фильтрам, обусловленные характеристиками системы: влияние импеданса линии на эффективность фильтрации, связь импедансов источника и приемника сигнала и конфигурации фильтров
- требования по подавлению помех и условиям эксплуатации
- сравнение основных конфигураций RLC фильтров, правила выбора блокирующего элемента
- правила монтажа фильтров
- фильтры цифровых сигналов: методика оценки параметров С- и LC- фильтров (с примерами)
- преобразование фильтров второго порядка в фильтры третьего порядка
- сетевые фильтры: устройство, правила выбора
- ферритовые фильтры: основные характеристики, правила применения
- повышение эффективности ферритовых фильтров
- токи смещения ферритовых фильтров
- учет дополнительных параметров ферритовых фильтров: зависимость магнитной проницаемости от температуры, диэлектрическая проницаемость ферритов
- правила монтажа ферритовых фильтров
- фильтры «линия потерь»
- применение конденсаторов в дискретных фильтрах: сравнение типов конденсаторов, паразитные параметры конденсаторов, методы снижения паразитной индуктивности
- применение катушек индуктивности в дискретных фильтрах: паразитные параметры, методы снижения паразитной емкости
- применение резисторов в дискретных фильтрах: сравнение типов резисторов, методы снижения паразитных параметров
- трансформаторы гальванической развязки: паразитная емкость, варианты электростатического экранирования трансформаторов, компенсация магнитного поля трансформатора
- синфазные дроссели: влияние паразитной емкости на эффективность фильтрации
- фильтр-контакты: устройство, правила применения, основные характеристики
- алгоритм выбора фильтр-контактов

Тема 6. Стабильность и долговечность параметров ЭМС

Перечень рассматриваемых вопросов:

- факторы неопределенности параметров ЭМС при эксплуатации оборудования
- факторы, определяющие стабильность параметров кабельных экранов: технологические факторы, механические и климатические воздействия
- стабильность параметров кабельных экранов при эксплуатации внутри помещения
- коррозия элементов системы заземления: влияние на параметры ЭМС, виды коррозии
- факторы, определяющие скорость развития коррозии
- влияние коррозии на значение переходного сопротивления винтовых соединений: критерии качественного соединения, обеспечение долговечности низкоомного сопротивления
- гальваническая коррозия: условие начала реакции
- факторы, определяющие скорость развития гальванической коррозии
- методы противодействия гальванической коррозии
- сравнение подходов к определению электрохимической совместимости
- использование покрытий для различных условий эксплуатации
- проактивный подход к борьбе с коррозией
- пассивная интермодуляция в системе заземления: механизмы возникновения нелинейностей в точке контакта поверхностей
- точки возникновения пассивной интермодуляции в кабельных сетях
- пример влияния пассивной интермодуляции
- влияние механических воздействий на переходное сопротивление в системе заземления
- методы повышения стабильности переходного сопротивления в системе заземления
- рост вискерсов на бессвинцовых покрытиях: факторы, определяющие скорость роста, мероприятия по противодействию
- методы инструментального контроля качества переходного сопротивления в эксплуатации
- стабильность параметров керамических конденсаторов: температурная стабильность, старение, разброс параметров при производстве

Часть 2. Обеспечение ЭМС и сохранение формы сигналов на уровне печатной платы

Тема 7. Вариант А, 8 ак.ч. Обеспечение ЭМС при проектировании печатных плат

Перечень рассматриваемых вопросов:

- эффективность затрат на разработку печатных плат: пирамида обеспечения ЭМС, преимущества одноплатной компоновки
- схемы заземления на печатной плате: преимущества одноточечной схемы
- поверхности заземления на печатной плате: правила выполнения, критерий необходимости
- решетка из проводников заземления, ее сравнение с поверхностью заземления
- правила устройства системы питания на двусторонних печатных платах
- использование внешних шин питания, их преимущества и ограничения
- система питания на многослойной печатной плате, правила сегментирования и соединения сегментов по переменному току высокой частоты
- правила выполнения «аналогового» и «цифрового» питания
- понятие структуры печатной платы (стека)
- преимущества и недостатки одно- и двухслойных плат
- многослойные печатные платы, критерии качества с точки зрения ЭМС
- «строительные блоки» многослойной платы
- четырехслойные печатные платы: типовая и улучшенная структуры, экранированные структуры
- шестислойные печатные платы: сравнение трех вариантов структур
- восьмислойные печатные платы: сравнение четырех вариантов структур
- десятислойные печатные платы: сравнение четырех вариантов структур
- двенадцатислойные печатные платы: сравнение двух структур
- сравнение стеков печатных плат: от 2 до 12 слоев
- алгоритм выбора стека печатной платы
- упрощенный алгоритм выбора стека печатной платы: преимущества и ограничения
- зонирование печатной платы: правила деления сигналов на группы
- порядок расстановки компонентов на печатной плате
- пример выделения функциональных зон
- расположение и подключение аналогово-цифровых устройств
- приемы повышения уровня изоляции обратных токов АЦП высокой разрядности (18 бит и выше)
- развязка по питанию: роль конденсаторов развязки

- многозвенные схемы развязки по питанию, конденсаторы с пониженной паразитной индуктивностью
- распределенная емкость поверхностей питания и заземления: оценка доступности распределенной емкости
- эффект от применения развязки по питанию
- определение емкости конденсаторов развязки первого звена: алгоритм и пример
- определение емкости конденсаторов развязки второго и третьего звена
- правила монтажа конденсаторов развязки: от первого звена до третьего
- монтаж конденсаторов развязки аналогово-цифровых устройств
- правила раскладки печатных проводников: порядок и правила раскладки шин данных
- неоднородности на пути обратных токов в многослойных печатных платах: типы и влияние на параметры ЭМС
- правила конструирования печатных плат для уменьшения неоднородностей
- экранирование на печатной плате от магнитного и электрического поля: общие правила
- экранирование поверхностями питания и заземления
- экранирование печатными проводниками: правила раскладки экранирующих проводников и их заземления
- экранирование решетками из переходных отверстий
- металлизация свободной поверхности печатной платы: правила выполнения, преимущества и ограничения
- нежелательные эффекты от экранирующих структур на печатной плате
- соединение печатной платы с системой экранирующего заземления прибора: три типа соединений, правила их выполнения и условия применения
- ограничение резонансных явлений при заземлении печатной платы
- печатные проводники высокоскоростных сигналов: критерий «длинной линии» с учетом ЭМС
- полосковые и микрополосковые линии: сравнение параметров для обеспечения волнового сопротивления
- симметричные линии связи: правила раскладки проводников
- использование элементов поверхностного монтажа в симметричных линиях
- влияние структуры диэлектрика на параметры симметричной линии: природа влияния, методы его снижения
- факторы, влияющие на стабильность волнового сопротивления симметричной линии
- влияние переходных отверстий на параметры симметричных линий
- согласование линий связи на печатной плате: общие правила
- влияние емкостной нагрузки на волновое сопротивление линии связи

- схемы согласования по волновому сопротивлению: последовательная схема, параллельная схема, схема Тевенина, схема согласования по переменному току, диодная схема
- правила оценки параметров элементов различных схем согласования
- схема согласования двунаправленной линии передачи данных

Тема 7. Вариант Б, 16 ак.ч. Обеспечение ЭМС и сохранение формы сигналов на уровне печатной платы

Перечень рассматриваемых вопросов:

- эффективность затрат на обеспечение ЭМС на уровне печатной платы
- взаимосвязь требований к электрическим характеристикам
- антенный эффект проводника на печатной плате
- использование характеристики антенного эффекта
- выбор компоновки прибора
- активное сопротивление проводника постоянному току
- активное сопротивление проводника переменному току
- влияние шероховатости поверхности на активное сопротивление
- индуктивность контура с током и индуктивность участка цепи
- внутренняя и наружная индуктивность участка цепи
- индуктивность замкнутой цепи на печатной плате
- эффекты проводимости и их частотная зависимость
- основные характеристики стеклотекстолитов
- утечки через диэлектрик
- выбор волнового сопротивления линии связи
- преимущества линий связи с импедансом 50 Ом
- микрополосковые и полосковые линии
- импеданс микрополосковой линии: основные формулы
- импеданс микрополосковой линии: верификация формул
- импеданс микрополосковой линии: изменение параметров
- импеданс полосковой линии: базовые формулы
- импеданс полосковой линии: верификация формул
- импеданс полосковой линии: неоднородности одной из поверхностей
- импеданс полосковой линии: изменение параметров
- числовой пример выбора конфигурации для $Z_0=50$ Ом
- суммарные потери в линии связи на печатной плате
- потери в проводниках печатной платы
- потери в диэлектрике печатной платы
- меры по снижению общего уровня потерь в линиях связи

- Время распространения сигнала в линии связи
- Механизм возникновения отражений в линиях связи
- диаграмма отражений в канале: алгоритм
- диаграмма отражений в канале: пример использования алгоритма
- диаграмма отражений в канале: влияние параметров цепи
- влияние времени нарастания сигнала на вид переходного процесса
- влияние реактивных параметров нагрузки
- уменьшение влияния отражений в линиях связи
- критерии необходимости использования согласованных линий
- емкостная нагрузка как фактор уменьшения волнового сопротивления
- степень влияния емкостной нагрузки на волновое сопротивление
- степень влияния емкостной нагрузки на задержку распространения
- стабильность волнового сопротивления
- общий принцип согласования линий связи
- согласование на стороне источника сигнала: правила и применение
- согласование на стороне приемника сигнала: правила и применение
- согласование на стороне приемника сигнала: схема Тевенина
- схема согласования по переменному току и диодная схема
- схема активного согласования и согласование двунаправленной шины
- схемы систем заземления
- решетка заземления
- сетчатая структура поверхности заземления
- система питания на двухсторонней печатной плате
- система питания на многослойной печатной плате
- система питания на печатных платах с аналоговым сегментом
- источники импульсного шума в системах питания и заземления
- противодействие генерации импульсного шума
- назначение конденсаторов развязки
- структура схемы развязки по питанию
- уменьшение паразитных параметров развязки по питанию
- доступная емкость между поверхностями печатной платы
- оптимизация развязки по питанию
- определение емкости конденсаторов: алгоритм
- определение емкости конденсаторов: пример
- монтаж конденсаторов развязки: расположение
- монтаж конденсаторов развязки: минимизация индуктивности
- монтаж конденсаторов развязки: схемы подключения
- монтаж конденсаторов развязки: минимизация эмиссии помех
- монтаж конденсаторов развязки: минимизация количества компонентов
- монтаж конденсаторов развязки: аналого-цифровые устройства

- пусковые токи печатной платы с конденсаторами развязки
- уменьшение площади токовых контуров
- порядок раскладки проводников
- правила раскладки шин данных
- пути обратных токов в многослойных печатных платах
- неоднородности на пути обратных токов в многослойных печатных платах
- вырезы и разрывы в опорных поверхностях
- области в повышенным индуктивным импедансом
- влияние токовых петель на прием помех и перекрестные наводки
- влияние токовых петель на форму рабочего сигнала
- краевой эффект печатной платы
- разделенные поверхности питания и заземления
- смена сигнальным проводником «опорной» поверхности
- смена сигнальным проводником «опорной» поверхности: пример
- смена «опорной» поверхности в соединителях
- смена «опорной» поверхности: характеристики переходных отверстий
- раскладка проводников для минимизации влияния разрывов
- вырезы в поверхности заземления вокруг соединителей и микросхем
- заземление островков металлизации «сигнальной земли»
- искровые промежутки для защиты от импульсных кондуктивных помех
- бюджет перекрестных наводок в схеме и принцип суперпозиции
- механизмы возникновения перекрестных наводок
- наводки на ближнем конце линии связи
- «длина насыщения» при расчете наводок на ближнем конце
- формирование наводки на ближнем конце
- оценка коэффициента связи при перекрестных наводках
- наводка на дальнем конце линии связи
- оценка коэффициента связи наводки на дальнем конце
- заглубление проводника для уменьшения наводок на дальнем конце
- борьба с отражениями для уменьшения влияния перекрестных наводок
- перекрестные наводки между электрически короткими линиями
- приемы уменьшения перекрестных наводок: выводы
- взаимодействие проводников симметричной дифференциальной линии
- импеданс симметричной линии: формулы
- импеданс симметричной линии: верификация формул
- связь между проводниками копланарной симметричной линии
- связь между проводниками развернуто-связанной линии
- максимум дифференциального импеданса развернуто-связанной линии
- улучшение симметрии развернуто-связанной линии
- расстояние между проводниками копланарной симметричной линии

- снижение уровня помех, генерируемых дифференциальными токами
- перекрестные наводки на симметричную линию связи
- правила раскладки проводников симметричных линий связи
- зигзагообразная раскладка симметричных линий связи
- компоненты поверхностного монтажа в симметричных линиях
- влияние структуры диэлектрика на симметрию линии связи
- перекос симметричного дифференциального сигнала
- влияние согласования и перекоса на синфазную компоненту сигнала
- обоснование необходимости согласования синфазной компоненты
- схемы согласования симметричных линий связи
- симметричные линии тактовых сигналов
- разрыв в опорной поверхности и дифференциальный сигнал
- перекрестные наводки на симметричную линию связи
- допустимый перекос в симметричной линии связи
- влияние синфазных токов в интерфейсном кабеле на уровень помех
- приемы уменьшения влияния синфазных токов в кабелях
- «дефекты» опорных поверхностей для фильтрации синфазных токов
- использование «дефектной» опорной поверхности, пример
- поворот сигнального проводника
- неиспользуемые участки сквозных переходных отверстий
- понятие структуры печатной платы
- однослойные и двухслойные печатные платы
- многослойные печатные платы (4 и более слоев): требования к структуре
- четырехслойные печатные платы: примеры
- шестислойные печатные платы: примеры
- восьмислойные печатные платы: примеры
- десятислойные печатные платы: примеры
- двенадцатислойные печатные платы и платы большей слойности: примеры
- описание алгоритма
- деление сигналов на группы
- порядок работ по компоновке платы и правила зонирования
- роль разрывов в опорных поверхностях печатной платы
- варианты формирования зон в зависимости от функций платы
- пример деления печатной платы на функциональные зоны
- изолированные островки поверхности заземления: пример
- псевдоизолированные островки поверхности заземления: пример
- интерфейсный сегмент поверхности заземления
- расположение и подключение аналого-цифровых устройств
- схемы заземления аналого-цифровых функциональных модулей
- минимизация наводок между проводниками AGND и DGND

- минимизация зашумления потенциала аналогового сегмента
- заземление и развязка дополнительных устройств вокруг АЦП/ЦАП
- формирование сигнала тактовой частоты для АЦП/ЦАП
- уменьшение уровня шумов в аналоговом сегменте: варианты решений
- подключение аналого-цифровых устройств: выводы
- механизмы экранирования на печатной плате
- крышки микросхем как локальные экраны
- экранирование поверхностями
- проницаемость опорных поверхностей для обратных токов
- экранирование печатными проводниками
- экранирование решеткой из переходных отверстий
- плоско-параллельный волновод на основе опорных поверхностей
- высокоимпедансные структуры: основные параметры
- высокоимпедансные структуры: однослойные и многослойные
- высокоимпедансные структуры: использование сигнального слоя
- высокоимпедансные структуры: планарная конфигурация
- высокоимпедансные структуры: алгоритм расчета
- высокоимпедансные структуры: недостатки и ограничения, пример 1
- высокоимпедансные структуры: недостатки и ограничения, пример 2
- защитное кольцо для изоляции высокоимпедансных входов
- островки металлизации
- металлизация свободных областей печатной платы

Тема 8. Обеспечение функциональной безопасности в отношении ЭМС

Перечень рассматриваемых вопросов:

- последствия игнорирования функциональной безопасности в отношении ЭМС
- актуальность нового подхода к обеспечению ЭМС
- перечень «слепых пятен» при реализации традиционного подхода к конструированию высоконадежных систем
- возможности повышения надежности и функциональной безопасности в рамках традиционного подхода
- препятствия на пути внедрения нового подхода к обеспечению ЭМС
- полнота безопасности в соответствии с ГОСТ Р МЭК 61508-2-2012
- обеспечение функциональной безопасности: процесс по ГОСТ IEC/TS 61000-1-2-2015
- детализация плана обеспечения функциональной безопасности
- межсистемные взаимодействия: описание процедуры оценки
- применение «простых моделей» при оценке межсистемных взаимодействий

- внутрисистемные взаимодействия: учитываемые факторы, правила применения «матрицы ЭМС»
- разработка «ЭМС – спецификации» системы: общие правила
- типовые ошибки при разработке «ЭМС – спецификации»
- методы разработки «ЭМС-спецификации»: правила применения, сравнение эффективности, применяемые стандарты
- индуктивные методы, дедуктивные методы, методы «мозгового штурма»
- учет неопределенностей при разработке «ЭМС-спецификации»
- внедрение системного подхода при обеспечении ЭМС: этапы внедрения
- оценка бюджета службы ЭМС, ее роль при разработке высоконадежных систем
- вовлечение смежных служб в процесс обеспечения ЭМС, вариант программы обучения
- роль руководителя службы ЭМС на всех этапах проектирования: от согласования ТЗ до этапа испытаний опытного образца
- реализация системного подхода при обеспечении ЭМС: от этапа согласования ТЗ до этапа испытаний опытного образца
- планирование работ по обеспечению ЭМС
- план управления ЭМС: назначение, правила разработки, содержание разделов
- план испытаний на ЭМС: назначение, правила разработки, содержание разделов
- инструменты конструктора при обеспечении ЭМС: анализ критичности отказов, простые модели, исследовательские испытания, перечни самоконтроля, базы знаний, отказоустойчивые архитектуры, анализ «уязвимых частот», использование многослойной защиты, снижение вероятности отказов, углубленный анализ «безопасных режимов», мониторинг внешних воздействий
- «простые» и «сложные» системы: различие в подходах к проектированию
- правила выбора стандартных модулей для включения в состав высоконадежных систем
- процесс контроля разработки новых модулей для включения в состав высоконадежных систем
- разработка плана верификации и валидации системы в отношении ЭМС
- перечень мероприятий верификации и правила их выполнения
- нестандартные испытания: правила формирования программы
- правила оценки испытательного запаса при использовании ГОСТ МЭК 61508-2-2012
- выбор вида и уровня испытательных воздействий
- мероприятия по обеспечению ЭМС в ходе производства и монтажа системы на основном изделии
- мероприятия по поддержанию параметров ЭМС в ходе эксплуатации систем

Часть 3. Обеспечение устойчивости оборудования к электростатическим разрядам и кондуктивным коммутационным помехам

Тема 9. Обеспечение комплексной защиты радиоаппаратуры от импульсных помех

Перечень рассматриваемых вопросов:

- влияние импульсных помех на радиоэлектронную аппаратуру
- импульсные помехи малой длительности
- импульсные помехи большой мощности
- колебательные затухающие импульсы
- взаимодействие источника импульсной помехи и защитных элементов
- основные принципы комплексной защиты

Тема 10. Электростатические разряды

Перечень рассматриваемых вопросов:

- природа разрядов и их виды
- электростатический разряд на электронный компонент
- электростатический разряд на корпус оборудования
- электростатический разряд на незаземленные конструкции
- проникновение импульсных помех в систему
- последствия воздействия импульсных помех
- факторы, влияющие на уровень защиты оборудования
- преобразование импульсного тока в напряжение помехи в контуре
- реализация ступенчатого принципа защиты
- оценка уровня устойчивости системы к сбоям в работе
- оценка запаса устойчивости системы к сбоям
- роль надежности в отношении ЭМС при разработке изделия
- заградительные меры защиты от импульсных помех
- ограничители амплитуды: трудности сравнения характеристик
- стратегии шунтирования импульсных токов
- приемы отладки системы в отношении импульсных помех
- пути протекания высокочастотных и низкочастотных токов
- снижение эффективности паразитных емкостных связей
- снижение вероятности проникновения тока разряда в схему

- правила экранирования: роль системы заземления
- правила экранирования: щелевые антенны на пути импульсных токов
- правила экранирования: воздушные зазоры
- перехватывающие экраны
- защита межблочных кабельных линий
- стандартизация испытаний, моделирование параметров разрядов
- стандарты, описывающие испытания оборудования на устойчивость к ЭСР
- стандарты, описывающие испытания компонентов на устойчивость к ЭСР
- испытания аппаратуры на стойкость к ЭСР по ГОСТ 30804.4.2-2013
- испытания компонентов на стойкость к ЭСР человеческого тела (НВМ) по ГОСТ Р 53734.3.1-2013
- испытания компонентов на стойкость к ЭСР машины (ММ) по ГОСТ Р 53734.3.2-2013
- испытания компонентов разрядом на нейтральный объект (СДМ) по ГОСТ Р 53734.3.3-2016
- импульс линии передачи (TLP) по IEC 62615-2010
- связь между видами импульсных воздействий
- не стандартизированные разряды: разряд кабельной линии
- не стандартизированные разряды: разряд печатной платы
- ступенчатая защита от импульсных токов на печатной плате
- сравнение методик оценки стойкости к ЭСР по ГОСТ 30804.4.2-2013 и ГОСТ 53734.3.1-2013
- сравнение основных принципов внутренней защиты микросхем
- приемы защиты микросхем от компонент разряда по ГОСТ 30804.4.2-2013
- последовательно включенные фильтрующие элементы: резисторы, ферритовые фильтры, катушки индуктивности
- многоэлементные фильтры импульсных помех
- ограничители амплитуды импульсных помех: зажимные и коммутирующие элементы
- ограничители амплитуды импульсных помех: общие правила выбора
- правила выбора коммутирующего элемента
- преимущества использования гальванической развязки
- индуктивная гальваническая развязка: «за» и «против»
- оптическая гальваническая развязка: «за» и «против»
- емкостная гальваническая развязка: «за» и «против»
- изолирующие усилители аналогового сигнала
- изоляторы цифрового сигнала
- взаимодействие электростатического разряда со схемой в проводящем корпусе
- правила шунтирования импульсных токов
- заземление схем в композитных корпусах

Тема 11. Особенности применения варисторов для ограничения амплитуды наносекундных импульсных помех

Перечень рассматриваемых вопросов:

- устройство защитного элемента
- параметры варисторов: напряжение пробоя
- параметры варисторов: максимальный импульсный ток
- параметры варисторов: вольтамперная характеристика
- параметры варисторов: паразитная емкость и индуктивность
- снижение нагрузок в зависимости от количества импульсов
- снижение нагрузок при повышении температуры окружающей среды
- оценка амплитуды полезного сигнала и импульсного тока
- импеданс источника импульсной помехи
- последовательное соединение варисторов
- параллельное соединение варисторов
- температурные коэффициенты варисторов
- причины снижения срока службы варисторов в цепях питания
- схемы защиты источника сигнала при отказе варистора
- защита варисторов с использованием плавких вставок
- интегрированная защита с использованием термисторов

Тема 12. Особенности применения полупроводниковых супрессоров (TVS) для ограничения наносекундных импульсных помех

Перечень рассматриваемых вопросов:

- зенеровские диоды (стабилитроны)
- отличия супрессоров и стабилитронов
- сравнение свойств различных типов защитных элементов
- характеристики полупроводниковых супрессоров
- взаимозаменяемость стабилитронов и супрессоров
- температурная корректировка напряжения пробоя супрессора
- повышение уровня защиты чувствительных приемников сигнала
- координация супрессоров с внутренней диодной защитой
- координация супрессоров со стабилитронами и тиристорами
- преимущества и ограничения внешней диодной защиты
- снижение импульсной нагрузки на систему электропитания
- защитные сборки с низкой паразитной емкостью
- правила выбора и применения супрессоров

Тема 13. Переходные процессы при коммутации реактивной нагрузки

Перечень рассматриваемых вопросов:

- быстрые переходные процессы (EFT)
- переходные процессы при коммутации резистивной нагрузки
- отключение индуктивной нагрузки
- коммутационные импульсы трансформатора и линии связи
- коммутационные импульсы соленоидов и реле
- свойства коммутационных импульсов
- коммутационные помехи в бортовых сетях наземной техники
- пусковой ток трансформатора
- влияние коммутационных помех на полупроводники и контакты реле
- влияние коммутационных помех на надежность систем
- процесс коммутации механических контактов
- дуговой и искровой электрические разряды между контактами
- влияние электрических разрядов на механические контакты
- граничные условия комбинированного электрического разряда
- эрозия поверхности механических контактов при размыкании цепи
- скорость эрозии поверхности механических контактов
- свойства серебряных контактов
- свойства палладиевых, вольфрамовых и ртутных контактов
- рекомендации по применению механических реле
- схемы управления двигателем постоянного тока
- предотвращение дребезга контактов реле
- методы защиты контактов от коммутационных помех
- диодная схема защиты от коммутационных помех
- схемы защиты на основе стабилитронов и супрессоров
- сравнение схем защиты на основе диодов и супрессоров
- схемы защиты контактных групп на пассивных элементах
- выбор параметров элементов емкостной защиты: расчет
- упрощенный метод оценки параметров элементов емкостной защиты
- схема защиты контактов на основе RCD - снаббера
- схемы защиты транзисторного ключа от коммутационных выбросов
- пример влияния защитной схемы на уровень кондуктивных шумов
- емкостная нагрузка как причина возникновения пусковых токов
- средства ограничения пусковых токов
- схемы ограничения пусковых токов на основе термисторов
- ограничение пусковых токов резистивной нагрузки

Тема 14. Программные средства обеспечения помехоустойчивости систем

Перечень рассматриваемых вопросов:

- программное обеспечение как ключевой элемент надежности системы
- общие приемы разработки программ для высоконадежных систем
- задачи программного обеспечения при воздействии импульсных помех
- преимущества программных средств защиты перед аппаратными
- обработка программных ошибок в условиях импульсных помех
- условия применения сторожевых таймеров
- выбор периода таймера
- расположение точек сброса счетчика таймера
- точки подключения входа сторожевого таймера
- пример алгоритма анализа корректности исполнения кода
- алгоритм анализа исполнения программ под управлением OCPB
- контроль корректности исполнения длительных процедур
- автономные сторожевые таймеры: достоинства и недостатки
- интегрированные сторожевые таймеры: достоинства и недостатки
- подключение сторожевого таймера к входу немаскируемого прерывания
- использование многоступенчатых сторожевых таймеров
- приемы повышения эффективности сторожевых таймеров
- сторожевой таймер с двумя значениями «периода счета» (WWDT)
- приемы повышения надежности схем слежения на сторожевых таймерах
- работа сторожевого таймера в «режиме минимальной задержки»
- роль сторожевого процессора и правила его выбора
- функции сторожевого процессора
- понятие сигнатуры программного кода
- упрощение процесса формирования сигнатур
- модификации метода формирования сигнатур исполняемого кода
- пример использования метода редуцирования защищенного кода
- преимущества и недостатки использования сигнатурного анализа
- ограничения сигнатурного анализа при большом количестве переходов
- использование программных меток – токенов
- поиск ошибок и восстановление корректной работы программы
- заполнение неиспользуемых областей памяти программ
- неиспользуемые векторы прерываний и рекурсивные процедуры
- назначенные области памяти и «потенциально опасные» данные
- программно-определяемые приемы снижения эмиссии помех
- приемы коррекции ошибок при выполнении программы
- область действия резервных копий для разных типов ошибок
- механизмы восстановления поврежденных массивов данных
- резервирование критических параметров функционирования
- использование семплирования при чтении цифрового сигнала

- прочие методы обнаружения ошибок при считывании сигналов
- избыточные коды: обнаружение и корректировка ошибок
- циклический избыточный код (CRC)
- многократное резервирование при хранении данных
- защита содержимого критически важных регистров процессора
- защита режима записи данных
- оценка затрат на внедрение процедур защиты ПО
- задача обеспечения баланса при обеспечении надежности системы
- требования к инструменту обнаружения «электромагнитной атаки»
- использование функции автоподстройки генератора тактовых сигналов

Часть 4. Высокочастотное и низкочастотное корпусное экранирование: теория и практика

Тема 15. Теория и практика высокочастотного корпусного экранирования

- стратегия разработки экранов
- общие подходы к разработке экранов
- дополнительные преимущества электропроводных корпусов
- понятие эффективности экранирования
- «волновая» и «токовая» теории экранирования
- импеданс электрического и магнитного полей
- ослабление интенсивности поля в ближней и дальней зонах
- отражение энергии помехи на границе сред с отличающимся импедансом
- оценка импеданса экрана
- оценка потерь на отражение в зависимости от типа поля
- потери на отражение и условия применения экрана
- отражение помехи для снижения эмиссии помех
- скин-эффект и его влияние на поглощение энергии помехи
- оценка коэффициента переотражения
- общая характеристика эффективности экранирования
- факторы снижения эффективности экранирования РЭА
- формирование поверхностных токов в проводнике
- правила изоляции поверхностных токов экрана
- приемы изоляции поверхностных токов: экранирование
- приемы изоляции поверхностных токов: фильтрация
- отверстия в экранирующей стенке
- изменение ориентации щели в экране для снижения эмиссии помех
- эффективность дифракционных экранов
- прозрачность отверстий: оценка снизу
- прозрачность отверстий: оценка сверху
- прозрачность нескольких отверстий: оценка снизу
- прозрачность массива одинаковых отверстий
- ограничения простых формул при оценке параметров экрана: пример

- оценка эффективности перфорированного экрана
- влияние расстояния «источник-приемник» и боковых вырезов
- взаимная емкость деталей и снижение излучения щели
- правила разработки корпусов с отверстиями: обобщение
- правила разработки корпусов с отверстиями: обобщение
- принцип действия предельных волноводов
- эффективность предельных волноводов
- прозрачность отверстий в ближней зоне
- правила использования предельных волноводов
- применимость теории экранирования к различным группам материалов
- изменение магнитной проницаемости ферромагнитных материалов
- магнитная проницаемость на частном цикле
- предельные волноводы вентиляционных решеток
- варианты экранирования вентиляционных отверстий
- использование псевдоволноводов при соединении деталей
- увеличение длины предельных псевдоволноводов
- фальцевое соединение корпусных деталей
- влияние параметров фальцевого соединения на его прозрачность
- варианты псевдоволноводов с непрямолинейным каналом
- пример 1. Сэндвич-структура для крупногабаритных экранов
- пример 2. Токопроводящая прокладка с каналами-волноводами
- снижение прозрачности отверстий для одиночных светодиодов
- мероприятия по изоляции «грязной зоны» для установки дисплеев
- оптически прозрачные покрытия для экранирования дисплеев
- выбор толщины оптически прозрачных покрытий
- возможности сетчатых экранов для индикаторов и дисплеев
- особенности применения сетчатых экранов для дисплеев
- экранирование мембранных клавиатур
- экранирование отверстий под поворотные потенциометры
- экранирование отверстий для ввода электрических сигналов
- последствия использования экранов в качестве «сигнальной земли»
- улучшение характеристик экранирования алюминиевого корпуса: пример
- влияние полостного резонанса на эффективность экранирования
- методы борьбы с резонансом токопроводящих корпусов

- сравнение характеристик немагнитных материалов
- влияние покрытий на эффективность отражения помехи
- проводящие покрытия для электромагнитных экранов
- соединение деталей электромагнитных экранов методом сварки
- методы борьбы с высокотемпературной деформацией при сварке
- прочие технологии изготовления экранирующих корпусов
- защелки и замки на экранирующих корпусах
- петли на экранирующих корпусах
- ножевой механизм сочленения двери с корпусом
- многослойное экранирование для повышения надежности изделия
- многослойное экранирование тонкими экранами
- цели и принципы локального экранирования
- выбор материала и конструкции локального экрана
- металлизированные пластиковые локальные экраны
- виды отверстий в локальных экранах
- управление прозрачностью отверстий в локальном экране: пример
- последствия резонанса в полости локальных экранов
- добротность резонанса локальных экранов и методы ее снижения
- структура полностью экранированного печатного модуля
- структура частично экранированного печатного модуля
- сочетание экранирующего кожуха и радиатора
- экранирование каскадов усилителя промежуточной частоты

Тема 16. Теория и практика низкочастотного корпусного экранирования

- история исследований низкочастотных полей
- заряды в проводнике в отсутствие внешнего электрического поля
- монолитный проводник во внешнем электрическом поле
- незаземленный полый проводник во внешнем электрическом поле
- электрический заряд внутри полого проводника (экрана)
- экранирование электрического поля диэлектриками
- принципы экранирования низкочастотного электрического поля
- правила экранирования низкочастотного электрического поля

- методы экранирования низкочастотных магнитных полей
- экранирование вихревыми токами: принцип действия и требования
- направление вихревых токов в экране
- экранирование вихревыми токами: эффективность экрана
- экранирование катушек индуктивности вихревыми токами
- отклоняющие магнитные экраны: принцип действия и требования
- магнитная цепь магнитостатического экрана
- эффективность экранирования магнитостатического экрана
- многослойные магнитостатические экраны
- оптимальная толщина зазора между оболочками
- многослойные отклоняющие экраны из фольги
- эффективность двухслойного магнитостатического экрана
- предотвращение насыщения магнитостатических экранов
- связь эффективности экранирования и размера экрана
- комбинированный эффект компенсации и отклонения поля
- выбор формы магнитного экрана: сфера и цилиндр
- влияние краевого эффекта цилиндрического экрана на эффективность
- влияние угла наклона линий поля и конусности экрана на эффективность
- выбор формы магнитного экрана: параллелепипед
- выбор формы магнитного экрана: плоский листовой
- выбор формы магнитного экрана: каналный с тремя стенками
- сравнение свойств плоского и каналного магнитных экранов
- сравнение свойств замкнутых и незамкнутых экранов: пример
- зависимость эффективности экрана от свойств материала: пример
- снижение влияния отверстий в магнитном экране на его эффективность
- эквивалентная толщина сетчатых экранов
- эффективность сетчатых магнитных экранов
- материалы магнитных экранов
- магнитные экраны из магнитомягких ферритов
- снижение магнитного сопротивления в зоне неоднородностей экрана
- термообработка сплавов для повышения магнитной проницаемости
- размагничивание экранов для повышения магнитной проницаемости
- «магнитное встряхивание» для повышения магнитной проницаемости
- упругая и вязкая компоненты магнитной проницаемости ферромагнетиков

- различия влияния упругой и вязкой компонент на уровень помех
- комбинирование магнитного и высокочастотного экранов
- пример конструкции высокоэффективного магнитостатического экрана

Тема 17. Пластиковые и композитные экранирующие корпуса

- преимущества и ограничения
- токопроводящие краски: сравнение составов
- частотные характеристики токопроводящих красок
- условия получения качественного покрытия на основе красок
- покрытие термонапылением металлов
- сравнение технологий термонапыления
- химическое и электролитическое осаждение металлов
- последствия низкого качества электролитического покрытия
- правила конструирования деталей для электролитического покрытия
- повышение стойкости покрытых деталей к термоциклированию
- технологический процесс химического осаждения
- совместимость пластиков с химическим и гальваническим покрытиями
- электрическое соединение покрытых пластиковых деталей
- замковое соединение покрытых пластиковых деталей
- особенности использования токопроводящих покрытий
- токопроводящие композитные материалы

Тема 18. Токопроводящие прокладки

- назначение и основные требования
- «Ом на квадрат» как мера поверхностного сопротивления
- прокладки на основе эластомеров
- параметры пазов для токопроводящих прокладок
- токопроводящие прокладки между деталями из листового металла
- обеспечение защиты поверхностей, контактирующих с прокладками
- правила применения прокладок с различным профилем
- прокладки на основе эластомеров с проводящим покрытием
- проволоочные токопроводящие прокладки

- силиконовые прокладки с вертикально ориентированными проволоками
- ленты пружинных лепестковых контактов
- остаточные деформации токопроводящих прокладок
- усилие обжатия токопроводящих прокладок
- правила обжатия прокладок
- методы сравнения характеристик токопроводящих прокладок
- реактивный импеданс соединительного шва
- влияние типа прокладки на реактивный импеданс шва
- шаг креплений для обжатия прокладки: консервативное правило
- шаг креплений для обжатия прокладки: расчет
- правила выбора момента затягивания винтовых соединений
- ограничения при применении прокладок

Часть 5. Применение компонентов и материалов для обеспечения электромагнитной совместимости. (8 ак. часов)

Тема 19. Снижение эмиссии помех от радиаторов охлаждения

- радиаторы охлаждения как источники излучаемых помех
- причины повышенного уровня наводок в аппаратуре
- радиаторы охлаждения из непроводящих материалов
- использование печатной платы для отвода излишков тепла
- механизмы возникновения излучаемых помех от радиаторов
- оценка частоты резонанса радиатора
- выбор габаритных размеров радиаторов охлаждения
- резонанс вертикальных радиаторов
- габариты радиатора и уровень помех на частоте резонанса
- зависимость уровня излучения радиатора от формы основания
- возможности снижения уровня помех для плоского радиатора
- оптимизация параметров радиатора для снижения уровня помех
- расположение тепловыделяющего элемента и направление ребер
- свойства игольчатых радиаторов и выбор покрытия
- влияние окружающих конструкций на эмиссию помех от радиатора
- приемы снижения взаимной емкости корпуса компонента и радиатора
- фильтрация шумовых токов радиатора
- эффективность фильтрации шумовых токов радиатора
- снижение эмиссии помех от трубчатых теплоотводов
- снижение эмиссии помех от пластин-теплообменников
- совмещение радиатора и волноводной вентиляционной решетки
- требования к перемычкам заземления радиаторов
- влияние количества точек заземления на электрическое поле помехи
- оптимальное положение точек заземления радиатора
- влияние формы перемычек заземления на уровень помех от радиатора
- использование параллельного резонанса в заземляющих структурах
- резистивное заземление радиаторов: преимущества и ограничения
- приемы организации резистивного заземления на печатной плате
- влияние заземления радиатора на стойкость системы к ЭСР

- использование радиопоглощающих материалов для снижения эмиссии
- правила применения радиопоглощающих материалов
- взаимодействие радиаторов с полосковыми линиями на печатной плате
- совмещение функций радиатора охлаждения и экранирующего корпуса
- совмещение функций радиатора охлаждения и локального экрана

Тема 20. Электропроводные клеи, герметики и смазки. Радиопоглощающие материалы и структуры.

- клеевые технологии в электронике
- роль электропроводных клеев и герметиков при обеспечении ЭМС
- ограничения соединений на основе электропроводных клеев
- анизотропные проводящие клеи: технология склеивания
- анизотропные проводящие клеи: типы связующего
- анизотропные проводящие клеи: типы наполнителей
- изотропные проводящие клеи: технология склеивания
- изотропные проводящие клеи: типы связующего
- изотропные проводящие клеи: виды металлических наполнителей
- изотропные проводящие клеи: виды неметаллических наполнителей
- миграция серебра из клеевого соединения
- готовые к применению и смешиваемые клеи с эпоксидным связующим
- режимы полимеризации эпоксидных связующих
- значение предварительного нагрева для прочности клеевого шва
- температурная спецификация клеев с эпоксидным связующим
- значение вязкости и тиксотропности клеев с эпоксидным связующим
- ремонт клеевых соединений на основе эпоксидных связующих
- электрические характеристики электропроводных клеев
- возможности снижения объемного сопротивления клея
- стабилизация контактного сопротивления клея
- электропроводные клеи на основе силиконовых связующих
- механические свойства клеев и их теплопроводность
- влияние повышенной влажности на надежность клеевого соединения
- причины и последствия увеличения объема связующего
- влияние циклически изменяющихся температур на надежность шва

- методы повышения прочности клеевых соединений
- влияние свойств материала деталей на прочность клеевых соединений
- склеивание деталей из материалов с отличающейся упругостью
- влияние геометрических параметров клеевого шва на его прочность
- повышение прочности клеевых соединений к усилиям на сдвиг
- повышение прочности клеевых соединений к усилиям на разрыв
- приемы повышения прочности клеевого соединения встык
- преимущества гибридных соединений с использованием клеев
- повышение прочности клеевого соединения: пример
- использование герметизирующих составов в РЭА
- геометрические размеры шва при соединении деталей встык
- управление глубиной и формой поверхности герметизирующего шва
- оценка подвижности герметизирующего шва
- надежность герметизированных соединений «встык» и «внахлест»
- усадка и остаточные деформации герметизирующих составов
- влияние климатических факторов на надежность соединения
- правила выбора токопроводящих герметиков для военной техники
- жизнеспособность и время применения герметиков
- технологии «формируемых» прокладок (FIPG) из электропроводных герметиков
- преимущества токопроводящих прокладок FIPG
- ограничения токопроводящих прокладок FIPG
- силиконовые связующие для токопроводящих прокладок FIPG
- виды наполнителей для токопроводящих прокладок FIPG
- конструирование корпусных деталей для прокладок FIPG
- технология «отливаемых по месту» эластичных экранирующих элементов (MIP)
- технология оценки чистоты поверхности перед нанесением герметиков
- роль пластичных смазок в электротехнике и электронике
- области использования проводящих пластичных смазок
- состав пластичных смазок
- критерии выбора проводящих пластичных смазок
- ограничения проводящих и диэлектрических смазок
- технологические особенности применения токопроводящих смазок
- роль радиопоглощающих материалов (РПМ) при обеспечении ЭМС
- группы радиопоглощающих структур и их свойства

- выбор РПМ с максимальной эффективностью
- минимизация отражения электромагнитного излучения от поверхности РПМ
- приемы согласования импедансов воздуха и поверхности РПМ
- резонансные радиопоглощающие структуры: правила применения
- примеры резонансных структур: резонатор Далленбаха и экран Солсбери
- резонатор Яумана и частотно-избирательные поверхности
- сравнение частотных характеристик резонансных структур
- взаимодействие РПМ и стоячих волн внутри проводящих оболочек
- распределение напряженности полей внутри пустого корпуса
- эффективность РПМ для снижения добротности полостного резонанса
- РПМ с диэлектрическими и магнитными потерями
- особенности применения РПМ на основе вспененных материалов
- выбор толщины и зоны размещения РПМ для борьбы с резонансом

Часть 6. Продвинутый курс. Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов.

Тема 21. Продвинутый курс. Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов. Экранирование.

- синфазный и дифференциальный режимы протекания токов
- оценка уровня эмиссии от кабеля: наводка в ближней зоне
- оценка уровня эмиссии от кабеля: наводка в дальней зоне
- оценка уровня эмиссии от кабеля: сила тока в контуре
- борьба с излучаемыми помехами: ступенчатый принцип
- эмиссия помех, обусловленная протеканием синфазных токов
- ступенчатый принцип снижения влияния синфазных помех
- конверсия синфазных помех в дифференциальные
- дополнительные проводники сигнального заземления в кабелях
- эффективность витой пары на прием помехи
- эффективность витой пары на излучение помехи
- типовые ошибки при использовании витой пары
- условия применения экранирования кабельных линий
- значение законов Максвелла при конструировании экранов
- низкочастотные и высокочастотные наводки на кабель в экране
- высокочастотный импеданс экрана и частотная характеристика наводок
- изоляция экранных токов как критерий качественного экрана
- эффективность низкочастотных кабельных экранов: оценки снизу и сверху
- эффективность низкочастотных кабельных экранов: верификация
- плетеные экраны: выбор конструкции
- плетеные экраны: экспериментальные данные
- оптимизированные плетеные экраны
- кабельные экраны из фольги: выбор материалов
- кабельные экраны из фольги: выбор конструкции
- экраны из сетчатой ленты и комбинированные кабельные экраны
- тяжелые стальные кабельные экраны: спиральные и плетеные

- значение сопротивления передачи как метрики кабельного экрана
- оптическая плотность плетеного экрана
- вид частотной характеристики импеданса передачи экрана
- компоненты полного импеданса передачи экрана
- полный импеданс передачи электрически длинного экрана
- связь импеданса передачи экрана и эффективности экранирования
- коэффициент экранирования линии связи
- оценка характеристик экрана при известном импедансе передачи
- импеданс передачи трубчатых экранов
- импеданс передачи плетеных экранов: влияние отверстий
- импеданс передачи плетеных экранов: метод оценки сверху
- плетеные экраны: разработка каталогов конструкций
- плетеные экраны: пример алгоритма выбора
- наводки от экрана на симметричный дифференциальный канал
- электрические соединители как продолжение кабельного экрана
- полное сопротивление передачи электрических соединителей
- заделка плетенки на хвостовик цилиндрического соединителя
- соединение хвостовика с корпусом цилиндрического соединителя
- соединение кабельной и блочной частей цилиндрических соединителей
- характеристики прямоугольных соединителей
- характеристики кожухов прямоугольных соединителей
- улучшение характеристик кабелей с неэкранированными соединителями
- кабель «витая пара»: роль экрана
- кабель «витая пара»: роль повива проводников
- кабель «витая пара»: улучшение качества передачи сигнала
- кабель «витая пара»: выбор типа шунтирующего проводника
- коаксиальный кабель: конфигурации электрического и магнитного полей
- коаксиальный кабель: выбор конструкции наружного проводника
- коаксиальный кабель: экранирование
- коаксиальный кабель: средства заделки наружного проводника
- плоский кабель: экранирование для снижения эмиссии помех
- плоский кабель из витых пар
- связывание излишков кабеля: бухта и «змейка»
- задача сохранения формы сигнала в цифровых и аналоговых каналах

- амплитуда перекрестных наводок
- приемы борьбы с наводками через электрическое поле
- приемы борьбы с наводками через магнитное поле
- наводки на ближнем конце (NEXT) и дальнем конце (FEXT)
- простые правила для анализа интенсивности перекрестных наводок
- перекрестные наводки через проводник-посредник
- перекрестные наводки в плоском шлейфе: пример
- улучшение конфигурации плоского шлейфа модуля памяти: пример
- низкочастотный спектр перекрестных наводок
- экранирование и повив проводов для уменьшения наводок
- вариации шага повива для уменьшения перекрестных наводок
- квадрансальные кабели: стойкость к внешней наводке
- квадрансальные кабели: стойкость к наводкам в пределах кабеля

Тема 22. Продвинутый курс. Кабельные линии связи: обеспечение электромагнитной совместимости и сохранение формы сигналов. Системы заземления.

- связь понятия «заземление» и поверхности Земли
- эволюция соединения оборудования с поверхностью Земли
- специфические свойства систем заземления
- три класса систем заземления
- система защитного заземления: безопасность оператора
- система защитного заземления: ВЧ утечки на корпус
- система сигнального заземления: значение импеданса проводников
- система сигнального заземления: пример
- система сигнального заземления: изоляция групп цепей
- уменьшение связи каналов через систему сигнального заземления
- система экранирующего заземления
- система экранирующего заземления: функция «зеркала»
- система экранирующего заземления: влияние скин-эффекта
- одноточечная схема заземления
- многоточечная и древовидная схемы заземления
- комбинированные глобальные схемы заземления

- комбинированная схема заземления: правило раздачи питания
- последовательная схема заземления: условия использования
- плавающая система заземления
- соединение сигнального заземления с корпусом: критерии применения
- выбор местоположения точки соединения с корпусом: пример
- гибридная система с емкостной связью
- гибридная система с индуктивной связью
- разработка схемы заземления: пример
- активное сопротивление проводника
- полная индуктивность проводника
- индуктивный импеданс проводника
- влияние «эффекта приближения» на импеданс проводника
- форма проводников системы заземления
- детали корпуса как поверхность заземления
- схемы заделки экранов: влияющие факторы и противоречия
- пути протекания обратных токов двухпроводной линии
- частотная зависимость доли обратных токов
- соединение магнитного экрана с системой заземления
- влияние импедансов заделки экрана на уровень шума в линии
- влияние схемы заделки экрана на эмиссию помех
- влияние схемы заделки сигнального общего на эмиссию помех
- последовательное соединение экранов компонентных кабелей
- гибридная схема заделки экрана кабеля
- односторонняя заделка наружного проводника коаксиального кабеля
- заделка оплеток триаксиального кабеля
- заделка экрана твинаксиального кабеля
- заделка экранов линий широкополосных сигналов
- соединение при помощи перемычки из монтажного провода
- виды приспособлений для низкоимпедансной заделки экранов
- заделка экранов при проходе через переборку
- схемы заземления экранов внутреннего электромонтажа
- заделка экранов для борьбы с перекрестными наводками
- влияние «токовой петли» на параметры ЭМС
- дополнительные задачи, возникающие при двухсторонней заделке

- минимизация влияния «токовой петли»
- «токовые петли» на уровне внутribлочного монтажа: 3 примера
- «токовые петли» на уровне межблочного монтажа: примеры
- «токовые петли» на уровне межблочного монтажа: линии интерфейсов
- параллельный проводник – путь для синфазных токов
- параллельный проводник – экран для кабелей и жгутов
- трубчатый параллельный проводник
- плетеный и спиральный параллельные проводники
- плоский и коробчатый параллельные проводники
- кабель-канал: импеданс передачи и правила применения крышек
- кабель-канал с крышкой: улучшение характеристик
- материалы параллельных проводников: сталь и алюминий
- влияние нелинейных свойств стали: два примера
- правила соединения заземляющих проводников
- неоднородности в заземляющем проводнике и расположение кабеля
- высокочастотное экранирование коробчатыми кабель-каналами
- экранирование – не «панацея» от помех