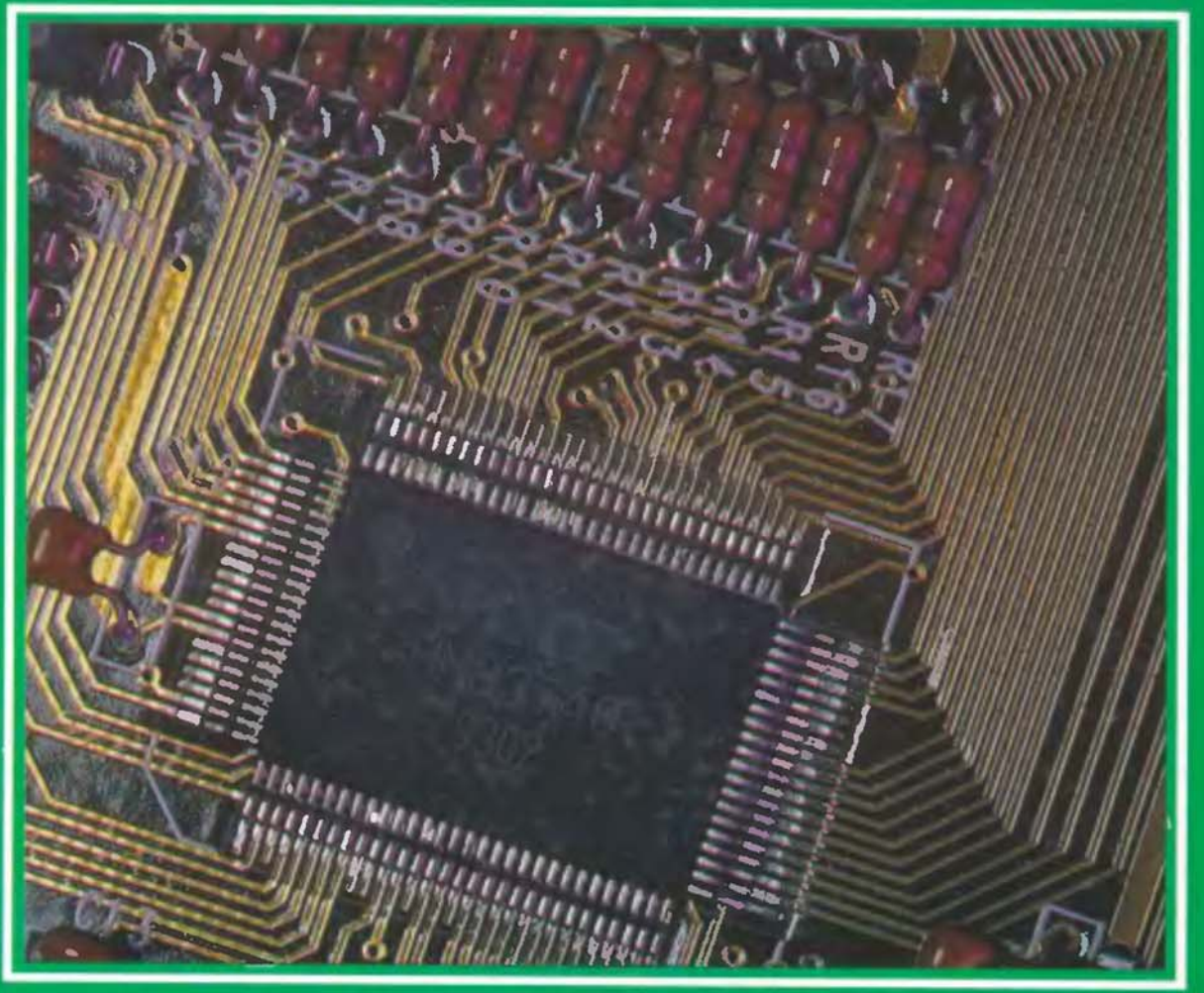
ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ *для* ЦИФРОВОЙ БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ



Л. Н. Кечиев

Серия «Библиотека ЭМС»

Л.Н. Кечиев

Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры

ООО «Группа ИДТ»

Москва

2007

УДК 004.3
ББК 32.973.26-02
К33

Серия основана в 2003 году
Серия издается под редакцией журнала «Технологии ЭМС»
Главный редактор серии — Кечиев Л.Н.,
д. т. н., профессор

Кечиев Л.Н.

К33 Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры / Л.Н. Кечиев – М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. – 616 с.: ил. – (Библиотека ЭМС).

ISBN 978-5-94833-024-2

Впервые в отечественной литературе рассматривается полный комплекс вопросов проектирования печатных плат для быстродействующей цифровой аппаратуры. Дается характеристика современной и перспективной элементной базы, рассматриваются электрофизические параметры печатных плат и линий передач в их составе. Большое внимание уделено методам анализа помех в цифровых узлах. Отдельно рассмотрен один из важнейших вопросов — проектирование шин питания и заземления в составе плат. Детально представлен материал по проектированию дифференциальных пар, которые все шире применяются в печатных платах. Излучения от печатных плат и их восприимчивость к электромагнитным помехам рассмотрены в контексте электромагнитной совместимости, базовые сведения о которой необходимы каждому разработчику. В завершение рассматриваются некоторые аспекты САПР печатных плат, применение которых важно для создания быстродействующих печатных узлов, а также влияние технологии на конечные показатели плат.

Изложение материала ориентировано на инженерную аудиторию, иллюстрируется многочисленными практическими примерами и сопровождается конкретными рекомендациями и правилами проектирования.

Книгу можно рассматривать как развернутый справочник. Она может быть полезна разработчикам печатных плат, студентам и аспирантам соответствующих специальностей, а также её можно рекомендовать в качестве учебного пособия в системе повышения квалификации и профессионального мастерства.

Издание книги одобрено Гильдией профессиональных технологов приборостроения.

УДК 004.3
ББК 32.973.26-02

Все права защищены. Никакая часть настоящей книги не может быть воспроизведена или передана в какой бы то ни было форме и какими бы то ни было средствами, будь то электронные или механические, включая фотокопирование и запись на магнитный носитель. При нарушении авторских прав применяются меры в соответствии с нормами Российского законодательства в области авторских прав.

ISBN 978-5-94833-024-2

© Кечиев Л.Н., 2007
© ООО «Группа ИДТ», 2007
Перепечатка запрещена

Оглавление

Содержание 4
Предисловие 9

Глава 1. Печатные платы в цифровых системах 13

1.1. Тенденции развития электронных средств и проблемы проектирования печатных плат 13
1.1.1. Развитие методов проектирования и конструкций печатных плат 13
1.1.2. Стратегия разработки и верификации плат 21
1.2. Элементы цифровой обработки информации 33
1.2.1. Цифровые системы и передача сигналов 34
1.2.2. Стандарты передачи сигналов и семейства логических микросхем 37
1.2.3. Помехи в системе при работе микросхем 48
1.2.4. Вольтамперные характеристики цифровых схем 52
1.2.5. Электрические соединения на плате 56
1.2.6. Цифровой сигнал в электрических соединениях 57
1.2.7. Контрольная диаграмма, джиттер и расфазировка 64
1.3. Номенклатура и параметры корпусов микросхемы 67
1.3.1. Микросхемотехника и печатные платы 67
1.3.2. Корпуса микросхем для монтажа в отверстия 68
1.3.3. Корпуса для поверхностного монтажа 76
1.3.4. Корпуса с матрицей шариковых выводов BGA 79
1.3.5. Корпуса с размерами кристалла 90
1.3.6. Электрические параметры корпусов ИС 92
1.3.7. Методология моделирования корпусов микросхем 105
1.4. Материалы для печатных узлов 109
1.4.1. Материалы для корпусирования кристаллов 109
1.4.2. Материалы для печатных плат 110
1.4.3. Материалы с высокой магнитной проницаемостью 121

Глава 2. Электрофизические параметры печатного монтажа 123

2.1. Полное сопротивление и электрические модели печатного монтажа 123
2.1.1. Описание целостности сигнала в решениях и терминах полного сопротивления 124
2.1.2. Полные сопротивления реальных и идеальных элементов цепей 125
2.1.3. Полные сопротивления во временной области
2.1.4. Полные сопротивления в частотной области 129
2.1.5. Эквивалентные схемы компонентов 132
2.1.6. Выбор моделей 134
2.2. Сопротивление и его модели 137
2.2.1. Физические основы сопротивления 137
2.2.2. Объемное удельное сопротивление материала 141
2.2.3. Сопротивление на единицу длины проводника 142
2.2.4. Поверхностное сопротивление 142
2.2.5. Скин-эффект и распределение тока по сечению проводника 144

2.3. Электрическая емкость в печатном монтаже ... 150
2.3.1. Основные определения ... 150
2.3.2. Классификация электростатических систем ... 153
2.3.3. Общие свойства электрической емкости ... 154
2.3.4. Электрический ток в конденсаторах ... 156
2.3.5. Емкость и конфигурация проводников ... 157
2.3.6. Плоскопараллельный конденсатор ... 158
2.3.7. Диэлектрическая проницаемость ... 159
2.3.8. Эффективная диэлектрическая проницаемость ... 160
2.3.9. Емкость между слоями платы ... 162
2.3.10. Погонная емкость ... 165
2.4. Методы расчета электрической емкости в печатном монтаже ... 167
2.4.1. Классификация методов расчета емкости ... 167
2.4.2. Инженерные методы оценки емкости ... 168
2.4.3. Емкость металлизированных отверстий ... 175
2.5. Физические основы индуктивности ... 179
2.5.1. Понятие индуктивности ... 180
2.5.2. Парциальная индуктивность ... 184
2.5.3. Эффективная индуктивность проводников ... 187
2.5.4. Собственная и взаимная индуктивность контура ... 192
2.5.5. Система электропитания и индуктивность контура питания ... 193
2.5.6. Индуктивность контура с прямоугольными пластинами ... 194
2.5.7. Индуктивность контура и переходные отверстия ... 195
2.5.8. Индуктивность контура с плоскостями, содержащими матрицу отверстий с гарантированным шагом ... 197
2.5.9. Взаимная индуктивность контуров ... 198
2.5.10. Индуктивность нескольких элементов ... 198
2.5.11. Вихревые токи и индуктивность ... 199

Глава 3. Линии передачи в печатном монтаже ... 202

3.1. Линии передачи и их модели ... 202
3.1.1. Модели линии передачи ... 202
3.1.2. Однородные линии передачи ... 205
3.1.3. Скорость распространения сигнала в линии ... 207
3.1.4. Пространственное разрешение при распространении сигнала ... 210
3.1.5. Понятие электрически длинной и короткой линии передачи ... 211
3.1.6. Мгновенное полное сопротивление линии передачи ... 216
3.1.7. Волновое сопротивление ... 216
3.1.8. Путь возвратного тока в линии передачи ... 218
3.1.9. Возвратный путь в смежных слоях МПП ... 220
3.1.10. Модель линии на основе *LC*-звеньев ... 227
3.1.11. Расчет волнового сопротивления с помощью приближенных соотношений ... 228
3.1.12. Частотная зависимость волнового сопротивления ... 234
3.2. Линии передачи с потерями ... 234
3.2.1. Влияние потерь в линиях передачи на качество функционирования цифрового узла ... 235
3.2.2. Контрольная диаграмма ... 237
3.2.3. Механизмы потерь в линии передачи ... 239
3.2.4. Коэффициент рассеяния ... 240
3.2.5. Модель линии передач с потерями ... 243

3.2.6. Волновое сопротивление линии передачи с потерями ... 247
3.2.7. Скорость распространения сигнала в линии с потерями ... 247
3.2.8. Ослабление в линии с потерями ... 248
3.2.9. Полоса пропускания линии передачи ... 255
3.2.10. Поведение линии с потерями во временной области ... 258

Глава 4. Обеспечение целостности сигнала в печатном монтаже ... 260

4.1. Целостность сигнала в электронных модулях ... 260
4.1.1. Целостность сигнала и проектирование печатных плат ... 260
4.1.2. Однородность линий передачи и помехи отражения ... 263
4.1.3. Перекрестная помеха в межсоединениях ... 264
4.1.4. Помехи в шинах питания ... 265
4.1.5. Джиттер цифрового сигнала ... 267
4.1.6. Нарушение целостности сигнала за счет скин-эффекта ... 271
4.1.7. Режим общего вида ... 274
4.1.8. Электромагнитные помехи ... 276
4.1.9. Методология проектирования печатных плат и печатных узлов ... 278
4.2. Целостность сигнала в коротких и длинных одиночных линиях передачи ... 279
4.2.1. Короткие линии передачи ... 279
4.2.2. Длинные линии передачи ... 280
4.2.3. Отражения в линиях передачи ... 286
4.2.4. Помехи отражения в длинных линиях передачи ... 290
4.2.5. Определение формы сигнала в однородной линии с линейными нагрузками ... 292
4.2.6. Определение формы сигнала в однородной линии с нелинейными нагрузками ... 296
4.2.7. Согласование линии передачи ... 305
4.2.8. Особенности согласования ЭСЛ-схем ... 313
4.3. Неоднородности в линиях передачи ... 316
4.3.1. Плоскость как возвратный проводник линии передачи ... 316
4.3.2. Возвратный путь в аналого-цифровых платах ... 318
4.3.3. Разветвления ... 320
4.3.4. Шлейфы ... 321
4.3.5. Емкостная нагрузка в конце линии ... 322
4.3.6. Емкостная нагрузка в середине линии ... 325
4.3.7. Повороты сигнальных проводников ... 328
4.3.8. Металлизированные отверстия ... 329
4.3.9. Нагрузки, распределенные по длине линии ... 331
4.3.10. Индуктивные неоднородности ... 333
4.3.11. Компенсация ... 336
4.3.12. Последовательно соединенные короткие отрезки линии ... 337
4.3.13. Соединители как неоднородность линий передачи ... 338
4.4. Перекрестные помехи в связанных линиях передачи ... 341
4.4.1. Перекрестные помехи и суперпозиция ... 341
4.4.2. Механизм связи активной и пассивной линий ... 342
4.4.3. Модели описания перекрестных помех ... 343
4.4.4. Перекрестные помехи в коротких линиях ... 344
4.4.5. Перекрестные помехи в длинных линиях передачи ... 346
4.4.6. Коэффициенты перекрестной помехи в длинной линии ... 350
4.4.7. Емкостные параметры связанных линий ... 359

4.4.8. Матрица емкостей и расчет ... 360
4.4.9. Индуктивная матрица ... 363
4.4.10. Способы снижения уровня перекрестных помех ... 364
4.4.11. Защитные трассы ... 365
4.4.12. Перекрестная помеха и диэлектрическая проницаемость ... 368
4.4.13. Перекрестные помехи и джиттер ... 368
4.4.14. Коммутационные помехи ... 370
4.4.15. Методы снижения перекрестных помех ... 372

Глава 5. Проектирование шин питания и заземления ... 373

5.1. Система питания и заземления ... 373
5.1.1. Полное сопротивление системы питания ... 373
5.1.2. Стратегия и правила проектирования слоев питания ... 376
5.1.3. Потенциальный слой с сетчатым рисунком ... 379
5.1.4. Топология сплошных слоев питания и опорного напряжения ... 384
5.1.5. Структура набора слоев МПП ... 389
5.2. Помехи в шине питания и их устранение ... 398
5.2.1. Особенности систем питания цифровых микросхем ... 398
5.2.2. Развязывающие конденсаторы в электронных модулях ... 406
5.2.3. Минимизация полного сопротивления системы питания ... 422
5.3. Рекомендации по проектированию шин питания и заземления ... 426

Глава 6. Дифференциальная пара в печатном монтаже ... 429

6.1. Передача дифференциальных сигналов ... 429
6.1.1. Основы дифференциальной передачи сигналов ... 429
6.1.2. Конструкция дифференциальной пары ... 432
6.1.3. Дифференциальное полное сопротивление несвязанных линий ... 434
6.1.4. Влияние связи между линиями ... 436
6.2. Полное сопротивление дифференциальной пары ... 440
6.2.1. Дифференциальное полное сопротивление ... 440
6.2.2. Распределение возвратного тока в дифференциальной паре ... 441
6.2.3. Нечетная и четная моды ... 443
6.2.4. Дифференциальное полное сопротивление и полное сопротивлениенечетной моды ... 446
6.2.5. Полное сопротивление режима общего вида и четной моды ... 447
6.3. Сигналы дифференциального и общего вида и компоненты напряжения нечетной и четной мод ... 448
6.3.1. Скорости мод и перекрестная помеха на дальнем конце дифференциальной пары ... 450
6.3.2. Модель идеальной связанной линии или идеальная дифференциальная пара ... 453
6.3.3. Согласование дифференциального и общего сигналов ... 454
6.3.4. Согласование низковольтных ЭСЛ схем ... 458
6.4. Преобразование дифференциального сигнала в сигнал общего вида ... 460
6.4.1. Расфазировка ... 460
6.4.2. Асимметрия ... 463
6.4.3. Сигналы общего вида и электромагнитные помехи ... 464
6.5. Помехи в дифференциальной паре ... 468
6.5.1. Перекрестная помеха между одиночной линией и дифференциальной парой ... 468
6.5.2. Неоднородности в возвратном пути ... 471

6.6. Расчет параметров дифференциальной пары ... 473
6.6.1. Расчет параметров нечетной и четной мод ... 473
6.6.2. Матрица волновых сопротивлений ... 475
6.7. Рекомендации по проектированию дифференциальной пары ... 477
Глава 7. Печатные платы и элементы ЭМС ... 484
7.1. ЭМС как показатель качества электронной аппаратуры ... 484
7.1.1. ЭМС и качество изделия ... 484
7.1.2. Система технического регулирования в области ЭМС ... 488
7.1.3. Понятие «электрического размера» ... 491
7.1.4. Общие единицы измерения ЭМС ... 493
7.2. Помехоэмиссия от печатных узлов ... 500
7.2.1. Ближняя и дальняя зоны излучаемого поля ... 500
7.2.2. Токи в дифференциальном и общем режиме ... 501
7.2.3. Модель излучения тока дифференциального режима ... 505
7.2.4. Модель излучения тока синфазного режима ... 509
7.3. Восприимчивость печатных плат ... 512
7.4. Экранирование печатных узлов ... 518
7.4.1. Принцип действия электромагнитного экрана ... 518
7.4.2. Механизмы работы экрана при различных видах излучения ... 520
7.4.3. Электро- и магнитостатическое экранирование ... 522
7.4.4. Практика экранирования ... 524
7.5. Соединение печатного узла с шасси ... 526
Глава 8. Конструкторско-технологическое проектирование: модели и системы автоматизации проектирования ... 531
8.1. Тенденции в развитии САПР ... 531
8.1.1. Целостность сигнала и САПР ... 531
8.1.2. Использование специализированного программного обеспечения в области целостности сигнала и ЭМС ... 533
8.1.3. Программы предтопологического и посттопологического анализа ... 536
8.2. Решение задач целостности сигналов в САПР ... 544
8.2.1. Перекрестные помехи и их моделирование ... 544
8.2.2. Сопротивление шин питания и заземления ... 546
8.2.3. Учет индуктивностей ... 548
8.3. Структура и задачи САПР печатных плат ... 549
8.3.1. Структура перспективных САПР ... 549
8.3.2. Комплексность решений при проектировании плат в САПР ... 563
8.3.3. Моделирование и симуляция в проектировании печатных плат ... 566
8.3.4. Методы моделирования цифровых узлов электронных приборов ... 571
8.4. Технологические факторы и целостность сигнала ... 579
8.4.1. Модели и инструметарий ... 579
8.4.2. Оценка влияния технологических факторов ... 581
8.5. Сводка САПР печатных плат с учетом ЭМС и целостности сигнала ... 596
Условные буквенные обозначения ... 601
Латинские ... 601
Греческий ... 607
Литература ... 609