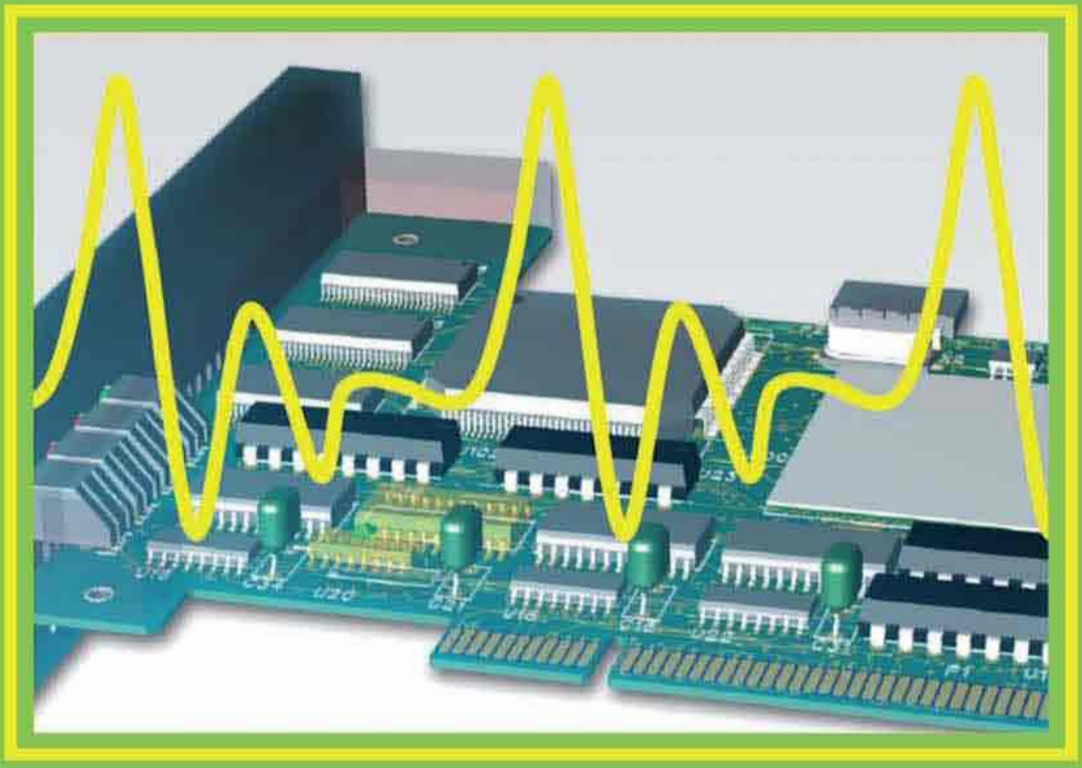
Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры



Л.Н. Кечиев

УДК 004.356.2
ББК 32.973.26-02
К 37

Все права защищены. Воспроизведение всей книги или любой ее части любыми средствами и в какой-либо форме, в том числе в сети Интернет, запрещается без письменного разрешения владельца авторских прав.

Рецензенты

С.Ф. Чермошенцев, д.т.н., профессор, зав. кафедрой САПР Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева

А.В. Нисан, к.т.н., начальник отдела исследований и разработки направления производства трехмерных схем на пластиках ООО «НИИИТ» (ГК Остек)

Кечиев Л.Н.

К 37 Проектирование системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. – М.: Грифон, 2016. – 400 с. – (Библиотека ЭМС).

ISBN 978-5-98862-316-8

Впервые в отечественной технической литературе рассматриваются вопросы проектирования системы распределения питания печатных узлов электронной аппаратуры. Помехи в системе питания быстродействующих цифровых узлов являются одной из основных проблем, без решения которой работоспособность узла не может быть гарантирована. Эти решения должны быть основаны на глубоком физическом понимании процессов, происходящих в системе питания цифровых узлов, анализе источников помех и методов их подавления, учете особенностей традиционной и новой компонентной базы помехоподавления и развязки, а также специфике топологического проектирования многослойных печатных плат.

В книге детально рассмотрены перечисленные вопросы, даны научно обоснованные рекомендации по схемотехническому и конструкторскому проектированию печатных узлов цифровой аппаратуры. Изложение сопровождается большим числом примеров и численных расчетов. Излагаемый материал имеет практическую направленность и ориентирован прежде всего на разработчиков и конструкторов электронной аппаратуры.

Книга будет полезна техническим специалистам, занятым в исследовательских, производственных и других сферах создания электронных средств. Издание можно рекомендовать в качестве учебного пособия бакалаврам, магистрам и аспирантам соответствующих направлений подготовки.

УДК 004.356.2
ББК 32.973.26-02

ISBN 978-5-98862-316-8

© Кечиев Л.Н., 2016

Содержание

Предисловие 8

Сокращения 11

1. Электромагнитные помехи в системе распределения питания электронной аппаратуры 12
1.1. Электромагнитные помехи 12
1.1.1. Электромагнитная совместимость 12
1.1.2. Электромагнитные помехи и их параметры 14
1.1.3. Методы подавления помех 15
1.2. Внутрисистемная ЭМС 16
1.2.1. Внутрисистемная ЭМС – «самопоражение» технического средства 16
1.2.2. Цифровой сигнал и его спектральный состав 17
1.2.3. Коммутационные помехи в системе распределения питания цифровых узлов 24
1.2.4. Коммутационные и сквозные токи выходных каскадов вентилей 28
1.2.5. Падение напряжения питания на индуктивности шины питания 32
1.2.6. Скачок опорного напряжения 33
1.2.7. Развязка как средство подавления помех в системе питания 36
1.3. Состав системы распределения питания 40
1.3.1. Определение СРП 40
1.3.2. Иерархическая структура СРП и ее параметры 43
1.3.3. Развязывающие конденсаторы на кристалле 46
1.3.4. Паразитные параметры корпуса и кристалла 48
1.4. Синхронные коммутационные помехи 51
1.4.1. Метрика синхронных коммутационных помех 51
1.4.2. Индуктивная перекрестная связь 54
1.4.3. Помехи дельта-I 54
1.4.4. Снижение напряжения электропитания 55
1.4.5. Синхронные коммутационные помехи при синхронных и асинхронных сигналах 55
1.4.6. Ослабление синхронных коммутационных помех 57

1.5. Программирование режима потребления 60
1.6. Особенности возникновения помех в СРП ASIC 63
1.6.1. Структура токов потребления ASIC..... 63
1.6.2. Потребляемый ток для буфера тактового генератора 66
1.6.3. Ток потребления больших ASIC 69
1.6.4. Помехи, связанные с протеканием тока по металлизированному отверстию..... 71
1.6.5. Влияние расположения выводов питания/заземления ASIC 73

2. Структура, параметры и характеристики системы распределения питания 74
2.1. Структура системы распределения питания..... 74
2.1.1. Требования к структуре СРП 74
2.1.2. Вносимые потери 79
2.2. Полное сопротивление системы распределения питания..... 80
2.2.1. Целевое полное сопротивление СРП..... 80
2.2.2. Определение максимальной целевой частоты 82
2.2.3. Управление полным сопротивлением СРП на стадии конструирования МПП..... 83
2.2.4. Оценка полного сопротивления топологии монтажа..... 84
2.3. Индуктивность шины питания 86
2.3.1. Основные понятия индуктивности..... 86
2.3.2. Парциальная индуктивность 91
2.3.3. Эффективная индуктивность проводников СРП..... 95
2.3.4. Собственная и взаимная индуктивность контура 99
2.4. Параметры выводов корпусов ИМС 102
2.4.1. Корпуса микросхем для монтажа в отверстия.....102
2.4.2. Корпуса для поверхностного монтажа 110
2.4.3. Корпуса с матрицей шариковых выводов (BGA).....115
2.4.4. Топологические элементы плат под корпуса BGA.....120
2.4.5. Корпуса с размерами кристалла 123
2.4.6. Электрические параметры корпусов ИМС.....126
2.5. Индуктивность топологических сегментов цепей питания в МПП 133
2.5.1. Топологические сегменты контура питания в МПП.....133
2.5.2. Индуктивность трасс 138
2.5.3. Индуктивность контактных площадок 141
2.5.4. Индуктивность металлизированных отверстий 143
2.5.5. Оценка индуктивности посадочных мест под BGA.....148
2.5.6. Оценка индуктивности для посадочных мест двухвыводных конденсаторов.....149
2.5.7. Индуктивность посадочного места проходных конденсаторов 155

2.5.8. Правила размещения контактных площадок конденсаторов, металлизированных отверстий и трасс 156
2.6. Планарный конденсатор и его параметры 160
2.6.1. Парциальная индуктивность планарного конденсатора 160
2.6.2. Емкость планарного конденсатора 161
2.6.3. Частотная характеристика планарного конденсатора 162
2.6.4. Материалы для планарного конденсатора 169
2.6.5. Эффективная зона планарного конденсатора 173
2.6.6. Индуктивность планарного конденсатора при наличии переходных отверстий 174
2.6.7. Индуктивность планарного конденсатора с матрицей отверстий 176

3. Развязка в системе распределения питания 178
3.1. Параметры развязывающих конденсаторов 178
3.1.1. Контуры токов в цепочке вентилей при наличии развязывающего конденсатора 178
3.1.2. Индуктивность и полное сопротивление развязывающего конденсатора 183
3.1.3. Последовательное эквивалентное сопротивление (ESR) 187
3.2. Частотные характеристики развязывающих конденсаторов 188
3.2.1. Частотная характеристика полного сопротивления конденсатора 188
3.2.2. Параллельная установка конденсаторов 192
3.2.3. Частотные характеристики различных типов конденсаторов 202
3.2.4. Потери, вносимые конденсаторами 204
3.2.5. Уменьшение ESR и ESL конденсаторов 205
3.2.6. Добротность конденсатора 208
3.2.7. Получение данных о частотных характеристиках 209
3.3. Выбор развязывающих конденсаторов 211
3.3.1. Предпосылки к выбору конденсаторов 211
3.3.2. Определение суммарной емкости конденсаторов 212
3.3.3. Выбор конденсаторов одного типоразмера 213
3.3.4. Выбор конденсаторов различных типоразмеров 215
3.3.5. Процедура выбора развязывающих конденсаторов 217
3.3.6. Электролитические (объемные) конденсаторы в СРП 222
3.4. Конструкции развязывающих конденсаторов 224
3.4.1. Материалы для развязывающих конденсаторов 224
3.4.2. Основные параметры керамических конденсаторов 230
3.4.3. Многослойные керамические конденсаторы (MLCC) 234
3.4.4. Конденсаторы с пониженной индуктивностью (LICC) 240
3.4.5. Конденсаторы со встречно-гребенчатой структурой (IDC) 242
3.4.6. Конденсаторные матрицы LICA 247

3.4.7. Конденсаторы LGA 249
3.4.8. Проходные конденсаторы и их применение 253
3.5. Индуктивности и *LC*-фильтры в цепях питания 259
3.5.1. Схемы фильтров с индуктивностями в цепях развязки 259
3.5.2. Частотные характеристики *LC*-фильтров 261
3.5.3. Ферритовые помехоподавляющие компоненты 265
3.5.4. Разновидности чип-индукторов 268
3.5.5. Частотные характеристики катушек индуктивности 271
3.5.6. Частотные характеристики ферритовых бусин 273
3.5.7. Параметры ферритовых бусин для развязки 277
3.5.8. Корректировка емкости конденсатора при наличии индуктивности 283
3.5.9. Комбинации емкости, индуктивности и проходных конденсаторов 284
3.5.10. Условия использования катушки индуктивности в СРП 288

4. Размещение и монтаж компонентов помехоподавления 290
4.1. Влияние параметров монтажа развязывающих конденсаторов 290
4.1.1. Влияние индуктивности монтажа 290
4.1.2. Влияние топологии пути протекания тока помех 292
4.2. Требования к монтажу компонентов помехоподавления 295
4.3. Рекомендации по размещению развязывающих конденсаторов 297
4.3.1. Общие требования к размещению конденсаторов 297
4.3.2. Эффективный радиус размещения 299
4.4. Выбор местоположения конденсаторов для улучшения локальной развязки 309
4.4.1. Магнитная связь между токами в отверстиях 309
4.4.2. Параметры локальной развязки в частотной области 311
4.4.3. Параметры локальной развязки во временной области 314
4.4.4. Конструкция и параметры локального узла развязки в МПП 316
4.4.5. Локальная развязка при нескольких шинах питания 320
4.5. Правила монтажа конденсаторов 324
4.6. Установка проходных конденсаторов 334
4.6.1. Монтаж проходных конденсаторов на МПП 334
4.6.2. «Непроходное» подключение проходного конденсатора 336
4.7. Уменьшение площади под конденсаторы 338

5. Стратегия подавления помех в СРП при проектировании печатных узлов 342
5.1. Методика определения емкости конденсаторов СРП 342
5.2. Уточнение емкости развязывающих конденсаторов для СБИС 344

5.3. Обоснование проектных решений 350
5.3.1. Принятие проектных решений 350
5.3.2. Помехоэмиссия от шины питания 351
5.3.3. Рекомендации по совершенствованию проекта МПП 353
5.4. Техника проектирования СРП 354
5.4.1. Конструирование распределенной плоскости питания и отверстий под BGA 354
5.4.2. Уточнение целевой частоты при наличии развязывающих конденсаторов в корпусе ИМС 359
5.4.3. Конструкторские факторы проекта шины питания МПП 362
5.4.4. Сценарии конструирования 366
5.4.5. Проект СРП с набором напряжений питания 370
5.5. Методика формирования профиля полного сопротивления для БИС 376
5.5.1. Последовательность вычисления целевого полного сопротивления СРП для БИС 376
5.5.2. Выбор модуля регулятора напряжения и определение значения емкости развязки на самой низкой частоте 378
5.5.3. Выбор развязывающих конденсаторов для формирования профиля целевого полного сопротивления СРП на высоких и средних частотах 379
5.5.4. Эффективный радиус установки развязывающих конденсаторов 380
5.5.5. Размещение планарных конденсаторов с учетом технологичности и стоимости 381
5.5.6. Вариант СРП с ультранизким полным сопротивлением 382

6. Советы разработчикам 384

7. Литература 390

8. Основные буквенные обозначения 395

1. Электромагнитные помехи в системе распределения питания электронной аппаратуры

1.1. Электромагнитные помехи

1.1.1. Электромагнитная совместимость

Проблема, связанная с проектированием аппаратуры, способной функционировать в условиях реальной электромагнитной обстановки (ЭМО) одновременно с другими техническими средствами и не создавать помех этим средствам, называется электромагнитной совместимостью (ЭМС) технических средств (ТС) [1, 7]. В соответствии с международным стандартом МЭК 60050-161:1990 под ЭМС понимают «способность оборудования или системы удовлетворительно функционировать в своей электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам в этой обстановке» (термин 161-01-07). Таким образом, ЭМС в современном понимании – это совместимость оборудования и систем между собой и с окружающей электромагнитной средой. Проблема ЭМС делится на два направления: межсистемная ЭМС и внутрисистемная ЭМС. Межсистемная ЭМС рассматривает взаимное влияние различных радиосистем и ЭМО на функционирование систем. Внутрисистемная ЭМС охватывает задачи проектирования ТС – от узлов аппаратуры до завершенных объектов. Если на бытовом уровне наличие помех создает некоторые неудобства, то значительно более критические ситуации могут возникнуть в промышленной, медицинской и научной обстановке. Особую роль играют вопросы, связанные с электромагнитными помехами, в военных приложениях, где зачастую наличие электромагнитных помех может привести к катастрофическим последствиям [2, 3].

Источники электромагнитных помех весьма разнообразны. Они классифицируются на источники естественного и техногенного происхождения. Параметры помех от этих источников лежат в очень широком диапазоне значений. Технические средства характеризуются с одной стороны помехоэмиссией, а с другой – восприимчивостью. Требования к параметрам ЭМС ТС зависят от назначения ТС и оговариваются в стандартах. Выполнение требований стандартов гарантирует, что электронные устройства будут корректно работать и их исполь-

зование безопасно [4–6, 7]. Вопросы ЭМС подлежат регламентации на международном, региональном и национальном уровне. Разработчики продукции должны строго выполнять требования технических регламентов и стандартов по помехоэмиссии и восприимчивости аппаратуры к воздействию внешних электромагнитных помех. В настоящее время в стране действует Технический регламент Таможенного союза «Электромагнитная совместимость технических средств» [7].

Требования защищенности ТС к электромагнитным помехам включают степени жесткости испытаний (уровни испытательных воздействий) и критерии качества функционирования при воздействии электромагнитных помех на различные порты. Нормы создаваемых электромагнитных помех представляют собой предельные значения их измеряемых параметров в установленных полосах частот измерений [8].

Помехоэмиссия и помехозащищенность играют одинаково важную роль в работе ТС, и потому при проектировании систем с точки зрения ЭМС необходимо учитывать обе эти составляющие. Предпосылками для создания успешного и практически реализуемого системного проекта ЭМС служат рекомендованные измерительные методики и предельные значения параметров и характеристик ЭМС, которые используются при тестировании ТС.

Типовая ситуация при анализе ЭМС содержит три составляющие: источник помех – среда распространения помех – рецептор помех (рис. 1.1).

Источник помех может оказывать воздействие на рецептор или по проводам (кондуктивное воздействие) или посредством излучаемых электромагнитных полей. Аналогичным образом и воспринимающее устройство (рецептор) может быть чувствительно как к помехам, поступающим по проводам (кондуктивная восприимчивость), так и к воздействию электромагнитных полей (восприимчивость к излучению). Распространение помех происходит по таким трактам, как сигнальные цепи, цепи питания и управления, линии передачи данных, а также через открытое пространство.

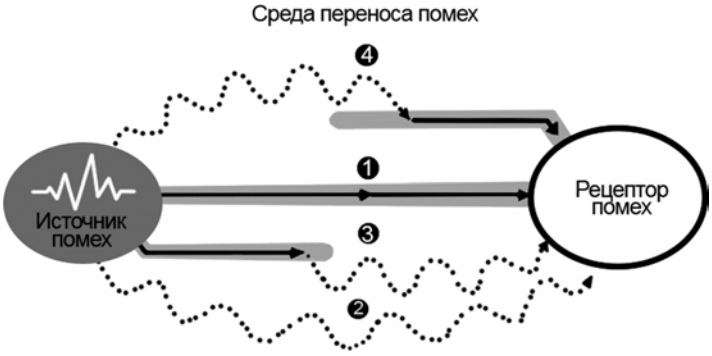


Рис. 1.1. *Иллюстрация проблемы ЭМС: 1 – перенос помех по проводным соединениям; 2 – перенос помех по полю; 3, 4 – перенос помех как по проводным соединениям, так и по полю*

На практике одним из основных способов подавления кондуктивных помех является применение помехоподавляющих фильтров, назначение которых – ограничение помех по частоте и по амплитуде до значений, заданных в системном проекте ЭМС. Эти фильтры оказываются эффективными как для снижения уровня помех, выходящих из источника, так и для снижения помех, поступающих на рецептор. Основные вопросы проектирования, выбора, применения и конструирования помехоподавляющих фильтров рассмотрены в [9–12].

Диапазон применения помехоподавляющих фильтров очень широк: от шин питания, служащих для передачи энергии, до линий данных и каналов связи, обеспечивающих передачу информации. Обширна номенклатура помехоподавляющих фильтров – от чип-компонентов до фильтров-соединителей, отличающихся компактностью, эффективностью подавления помех, удобством применения в микроэлектронной аппаратуре, особенно в устройствах вычислительной техники при организации линий передачи информационных каналов.

ГОСТ 28934-91 «Совместимость технических средств электромагнитная. Содержание раздела технического задания в части электромагнитной совместимости» [13] устанавливает номенклатуру параметров и содержание технического задания или любого документа, определяющего необходимые и достаточные требования к ТС в части ЭМС. Этим стандартом предусматривается наличие в нормативно-технической документации пунктов, оговаривающих требования к допустимым уровням восприимчивости ТС по цепям электропитания, управления, передачи информации, заземления к квазипиковому (среднему) напряжению (току) радиопомех и к импульсным помехам.

Для выполнения соответствующих пунктов задания потребуется применение помехоподавляющих фильтров.

1.1.2. Электромагнитные помехи и их параметры

Наиболее распространенным видом естественных помех являются молнии и статическое электричество, которые существовали до появления ТС. ТС должны обладать устойчивостью к естественным помехам. Техногенные помехи – помехи, которые возникли после того, как начали использовать радиоэлектронные устройства. Интенсивность помех от техногенных источников непрерывно возрастает, появляются источники преднамеренных помех. Поскольку электронные устройства используются все более широко, влияние техногенных помех возрастает.

Помехи генерируются как извне аппаратуры, так и в самой аппаратуре. Уровень внутрисистемных или внутриаппаратурных помех определяется схемотехническими и конструкторскими решениями, принятыми при разработке объектов или аппаратуры. Цифровые цепи удобнее рассматривать во временной области: задаются технические требования к времени переключения вентилей ИМС, тактовой частоте и времени задержки распространения

сигнала в ИМС и линиях передачи. Эти параметры задаются для различных логических состояний 1 или 0.

В общем случае помехи предпочтительнее описывать в частотной области. Например, проектировщики должны знать определенные частоты, которые вызывают проблемы ЭМС при тестировании. Как только эта частота известна, применение соответствующих методов развязки, фильтрации или экранирования могут уменьшить уровни излучаемых или кондуктивных помех.

1.1.3. Методы подавления помех

Проблема ЭМС, как указывалось выше, требует наличия трех факторов – источник помех, рецептор и путь переноса помех. Проблема ЭМС может быть устранена, если удается устранить один из этих факторов. Соответствующие меры можно принять со стороны источника помех или со стороны рецептора. Например, если не используются цифровые схемы, импульсные источники питания или генераторы, то помехи, создаваемые ТС, будут очень слабыми. Другим примером может быть создание избыточности в программном обеспечении на стороне рецептора, что обеспечивает восстановление информации, даже если она частично изменится под воздействием помех. Эти меры могут быть приняты на уровне концептуальных решений, но они могут вызвать большие вторичные эффекты, такие как значительное снижение производительности ТС или увеличение их размеров и стоимости, что делает во многих случаях такие меры нерентабельными.

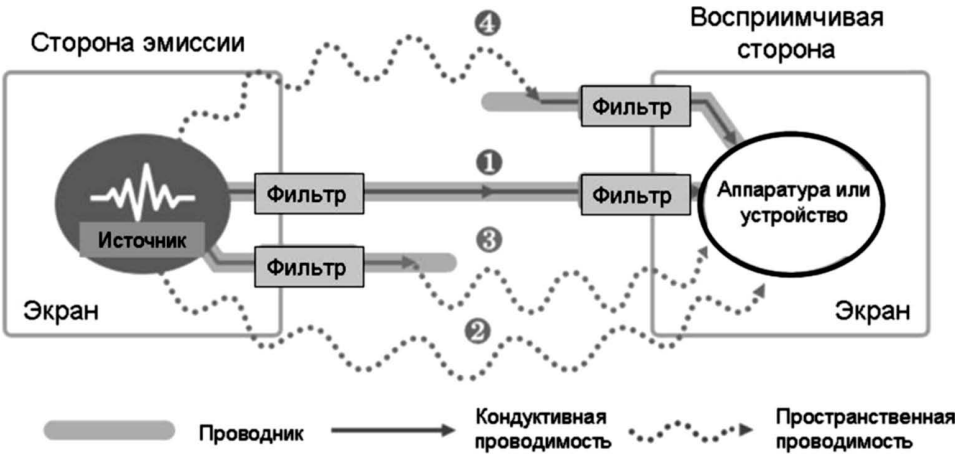


Рис. 1.2. *Меры по подавлению помех: 1 – кондуктивная проводимость; 2 – пространственная проводимость; 3 – совместная кондуктивная и пространственная проводимость; 4 – совместная пространственная и кондуктивная проводимость*

Как отмечалось, помехи передаются по полю в виде эмиссии от источника (пространственная проводимость) и по проводящим путям (кондуктивные помехи). Эти пути переноса помех могут быть прерваны, например, как показано на рис. 1.2: пространственная проводимость ограничивается электромагнитными экранами, а кондуктивная проводимость – фильтрами. Помехи излучения и кондуктивные помехи имеют тенденцию взаимного преобразования через провода, которые работают в качестве антенн. Поэтому, даже если имеются только кондуктивные помехи, нельзя игнорировать возможность появления помех излучения.

1.2. Внутрисистемная ЭМС

1.2.1. Внутрисистемная ЭМС – «самопоражение» технического средства

Помехи могут генерироваться в ТС без внешнего воздействия. Помехи от одного участка схемы внутри ТС могут вызвать помехи в другой цепи в том же электронном устройстве. Анализ подобных помех, методы и средства их подавления и соответствующие методы проектирования ТС выделяются в актуальное научно-практическое направление, которое получило название *внутрисистемной ЭМС*. Например, если мобильный телефон имеет встроенные цифровые схемы, помехи от них могут ухудшить работу приемника телефона (снижение чувствительности приемника). В этом случае расстояние между источником помех и рецептором значительно меньше, чем от внешнего источника помех, в результате чего возникают более серьезные помехи. В зависимости от конкретного случая подавление помех при решении задач внутрисистемной ЭМС на стадии проектирования аппаратуры выполняется гораздо более строго, чем требует регулирование ЭМС.

Снижение внутрисистемных помех – совместная задача разработчиков и конструкторов ТС. Максимальные усилия для подавления помех должны быть приложены на этапе проектирования аппаратуры. Если недостаточная помехозащищенность или большая помехоэмиссия будет выявлена на этапе тестирования, то затраты на доведение аппаратуры до требований ЭМС возрастут в сотни раз. На рис. 1.3 показана относительная стоимость достижения показателей ЭМС при создании ТС. Видно, что затраты экспоненциально растут по мере завершения проекта. Это подтверждает, что тщательный анализ помех и квалифицированное применение методов их подавления должны проводиться с первых стадий проектирования, что может быть выполнено только при достаточно глубоком понимании физических процессов, происходящих в аппаратуре при обработке сигналов.

Для цифровых узлов, реализованных на многослойных печатных платах (МПП), выделяются две основные задачи, на решение которых должны быть направлены усилия разработчиков и конструкторов: обеспечение целостности

Рис. 1.3. *Относительная стоимость достижения требований ЭМС*

сигнала и целостности питания [14]. Особое внимание к проблеме внутрисистемной ЭМС требует цифровая техника из-за быстротечных коммутационных процессов, которые присущи ей при работе.

1.2.2. Цифровой сигнал и его спектральный состав

В цифровых системах источником помех являются цифровые микросхемы в режиме переключения. Скоротечные процессы переключения создают кондуктивные помехи в проводниках, которые работают как случайные излучающие антенны. Эти помехи распространяются как в линиях передачи сигналов, так и в системе распределения питания. Коммутационные помехи в СРП цифровых устройств возникают при переключении ИМС, когда в соответствии с поступающими сигналами происходят изменения логических состояний вентилей микросхем. Уровни кондуктивных и излучаемых помех существенно зависят от быстродействия системы.

При описании процессов переключения цифровых ИМС часто оперируют понятиями прямоугольного или трапецеидального импульса. Прямоугольный импульс, как и трапецеидальный импульс, является идеализированным представлением процесса переключения вентилей ИМС. В качестве приближения они могут быть использованы при расчете спектра сигнала. Прямоугольная форма импульса чаще всего используется для формального описания процессов (для наглядности), происходящих при переключениях логических вентилей. Время фронта и время спада прямоугольного импульса теоретически стремится к нулю, то есть переключение при таком приближении осуществляется мгновенно. Подобное приближение может быть использовано, например, при

описании работы генераторов импульсов при экспериментальной оценке помехоустойчивости микросхемы.

Более реальному описанию цифрового сигнала соответствует трапецеидальный импульс. Особенностью трапецеидального сигнала является то, что система переходит из одного состояния в другое не мгновенно, а в течение некоторого, пусть и короткого, интервала времени. Выделяют два интервала времени – длительность фронта импульса и длительность спада импульса, – которые соответствуют переключению из состояния логического нуля в состояние логической единицы и обратно (рис. 1.4). Длительность фронта и длительности спада импульса не равны между собой. Как правило, длительность фронта короче длительности спада импульса. Поэтому именно фронт цифрового сигнала берется за основу при оценке быстродействия системы и при расчете спектра сигнала.

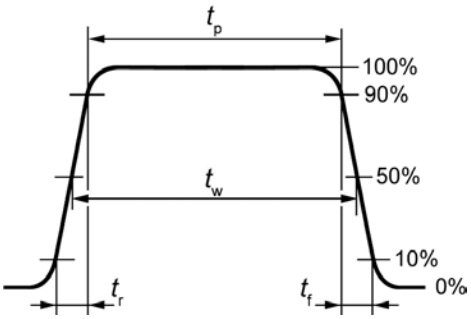


Рис. 1.4. *Временные характеристики цифрового сигнала*

Трапецеидальное представление импульса является также определенным приближением. Переход от одного приближения к другому (более адекватному) является основой стратегии проектирования, которая позволяет постепенно уточнять используемые при расчетах модели. В данном случае более точным приближением будет представление импульса в форме асимметричнотрапецеидальной формы. Для инженерных расчетов достаточно использовать представление импульса в виде трапеции.

Длительность t_r фронта импульса трапецеидальной формы соответствует времени перехода вентиля из состояния логического нуля в состояние логической единицы, которое отсчитывается по шкале амплитуды (напряжения) между уровнем 0,1 и 0,9 от значения максимальной амплитуды импульса. Аналогично можно сформулировать определение для длительности спада импульса t_f, которая будет определяться между моментами времени, соответствующими уровню 0,9 и 0,1.

Для дальнейшего описания процессов переключения и особенности работы логических схем используем определение длительности импульса, времени

задержки распространения сигнала и длительности цикла. Длительность импульса t_w можно определить как интервал времени, измеренный между двумя уровнями, равными половине значения амплитуды импульса. Время задержки распространения при включении (и выключении) логического элемента определяется интервалом времени – задержкой – между соответствующими точками входной и выходной формы сигнала при его распространении в микросхеме.

При оценке быстродействия при передаче информации используется понятие тактовой частоты, определяемой длительностью цикла такта. Тактовый цикл – интервал времени t_c, который отсчитывается от уровня 0,5 амплитуды сигнала одного логического перехода до уровня 0,5 следующего перехода (рис. 1.5). Тактовый цикл, при котором длительность импульса занимает половину длительности цикла, обозначают как 50/50.

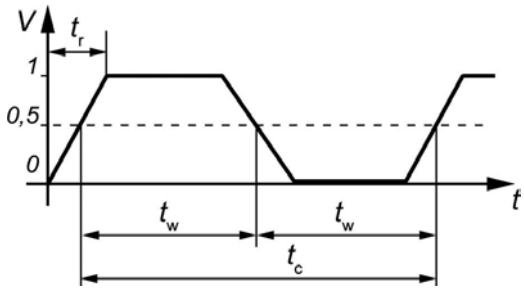


Рис. 1.5. *Определение тактового цикла 50/50*

Максимальная тактовая частота достигается при минимальной длительности цикла $t_{c.\min}$, при которой сохраняется требуемая работоспособность системы:

$$f_{c.\max} = \frac{1}{t_{c.\min}}, \text{ Гц},$$

где $t_{c.\min}$ – минимально возможная длительность цикла, с.

В свою очередь длительность цикла будет определяться длительностью импульса. При цикле 50/50 длительность цикла равна удвоенной длительности импульса. Минимальная длительность импульса не должна быть менее 3–5 значений фронта. Если принять $t_{c.\min} = 2t_w = 10t_r$, то максимальная тактовая частота составит

$$f_{c.\max} = \frac{1}{10t_r}, \text{ Гц},$$

где t_r – длительность фронта импульса, с.

Тактовая частота определяет *фундаментальную* частоту в спектре сигнала и является оценкой быстродействия при анализе информационных процессов. Например, при фронте сигнала 1 нс при такте 50/50 максимальная тактовая частота будет 100 МГц.

Для проектирования аппаратуры основным фактором, характеризующим быстродействие, является спектр информационного сигнала, который приближенно определяется через длительность его фронта:

$$f_{\max} = k\frac{1}{t_r}, \text{ Гц},$$

где $k = 0{,}3–1{,}0$ – коэффициент, связывающий длительность фронта t_r (с) и частоты, которые присутствуют в спектре сигнала. Чем ответственнее аппаратура и больше риск допустить ошибку, тем больше k, но при этом технические решения становятся более дорогими и не всегда оправданными. При отсутствии априорных данных коэффициент k принимают 0,35 [14].

Например, для сигнала с фронтом 1 нс значимая часть спектра будет простираться до частоты 350 МГц. Таким образом, с достаточной степенью точности можно сказать, что частотный спектр сигнала заключен в диапазоне от фундаментальной частоты $f_{c.\max}$ до максимальной частоты $f_{\max}$ спектра.

Приведенные соотношения количественно подтверждают тот факт, что чем короче фронт, тем шире спектр сигнала. Следует обратить внимание на то, что для проектирования аппаратуры необходимо учитывать частотные составляющие, которые определяются фронтом сигнала, а тактовая частота определяет только скорость передачи информации. *Тактовая частота всегда меньше максимальной частоты в спектре сигнала*.

В реальной ситуации эти оценки могут отличаться от расчетных, но приведенные данные дают хорошее представление о частотном диапазоне современных цифровых устройств. В любом случае при повышении быстродействия сокращается длительность фронта цифрового сигнала, увеличиваются тактовые частоты и расширяется спектр сигнала, достигая гигагерцевого диапазона. Именно эти частоты присутствуют в помехах, которые генерируются цифровыми устройствами как в сигнальных цепях, так и в системе питания. Высокочастотный характер происходящих при этом процессов существенно усложняет процедуру проектирования и применение методов подавления помех. В большинстве случаев проектировщикам приходится принимать решения, требующие глубокого понимания физических процессов, происходящих в аппаратуре.

Параметр, характеризующий длительность фронта и представленный в паспорте микросхемы, часто берется с запасом и может отличаться от реального значения в 3 и даже в 4 раза. *Реальный фронт ИМС всегда будет короче, чем указано в паспорте*. Это необходимо учитывать при оценке спектра сигнала.

Представление цифрового сигнала в виде импульсов прямоугольной или трапецеидальной формы позволяет перейти к качественному рассмотрению состава и формы сигнала. Известно, что каждый импульс битовой последо-

вательности можно представить в виде суперпозиции синусоидальных сигналов (спектра) – гармоник. Поэтому последовательность прямоугольных импульсов с циклом 50/50 можно представить в виде набора гармонических составляющих в виде нечетных гармоник ($3f_1$, $5f_1$, $7f_1$, ...), частоты которых кратны фундаментальной частоте $f_1 \equiv f_{c.\max}$. Если цикл отличается от 50/50, то в спектре сигнала появляются четные гармоники ($2f_1$, $4f_1$, $6f_1$, ...).

Амплитуды гармоник, вычисленные с использованием разложения в ряд Фурье, различны и убывают с увеличением номера гармоники (рис. 1.6). Форма сигнала, которая может быть восстановлена при сложении гармонических составляющих, приближается к исходной трапецеидальной форме, по мере того как увеличивается число учитываемых гармоник.

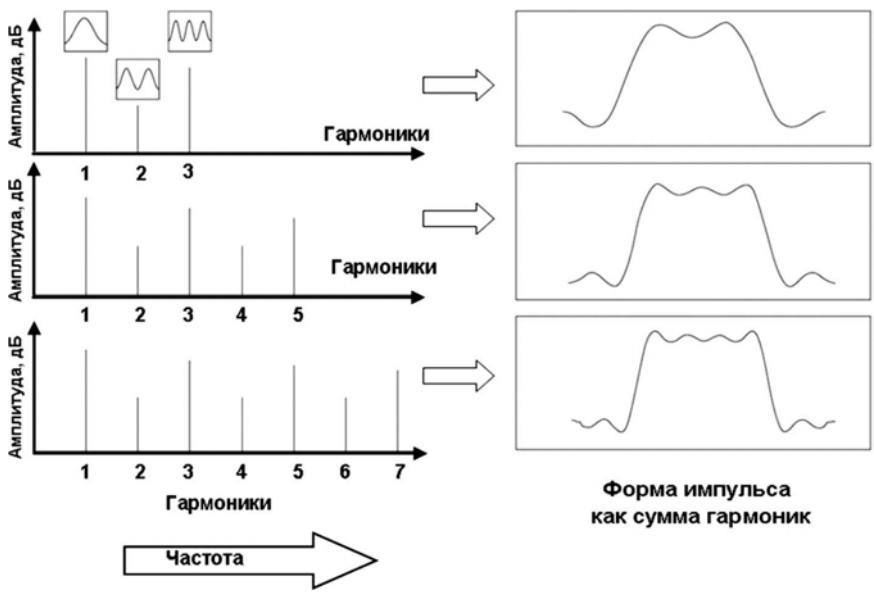


Рис. 1.6. *Связь формы цифрового сигнала с числом учитываемых гармоник для данного сигнала (гармоника 1 – фундаментальная частота)*

Преобразование Фурье используется для перехода от временно́го описания сигнала (форма волны) в частотную область (спектр). Одно из требований для выполнения преобразования Фурье заключается в периодичности анализируемой формы волны за аналитический период. Для большинства цифровых сигналов это требование выполняется.

Выше рассматривался цикл 50/50, но в общем случае цифровые сигналы могут иметь различную длительность в цикле. На рис. 1.7 показаны спектры одинаковых по амплитуде цифровых сигналов, каждый с относительной длительностью 50, 25 и 12,5% от длительности цикла.

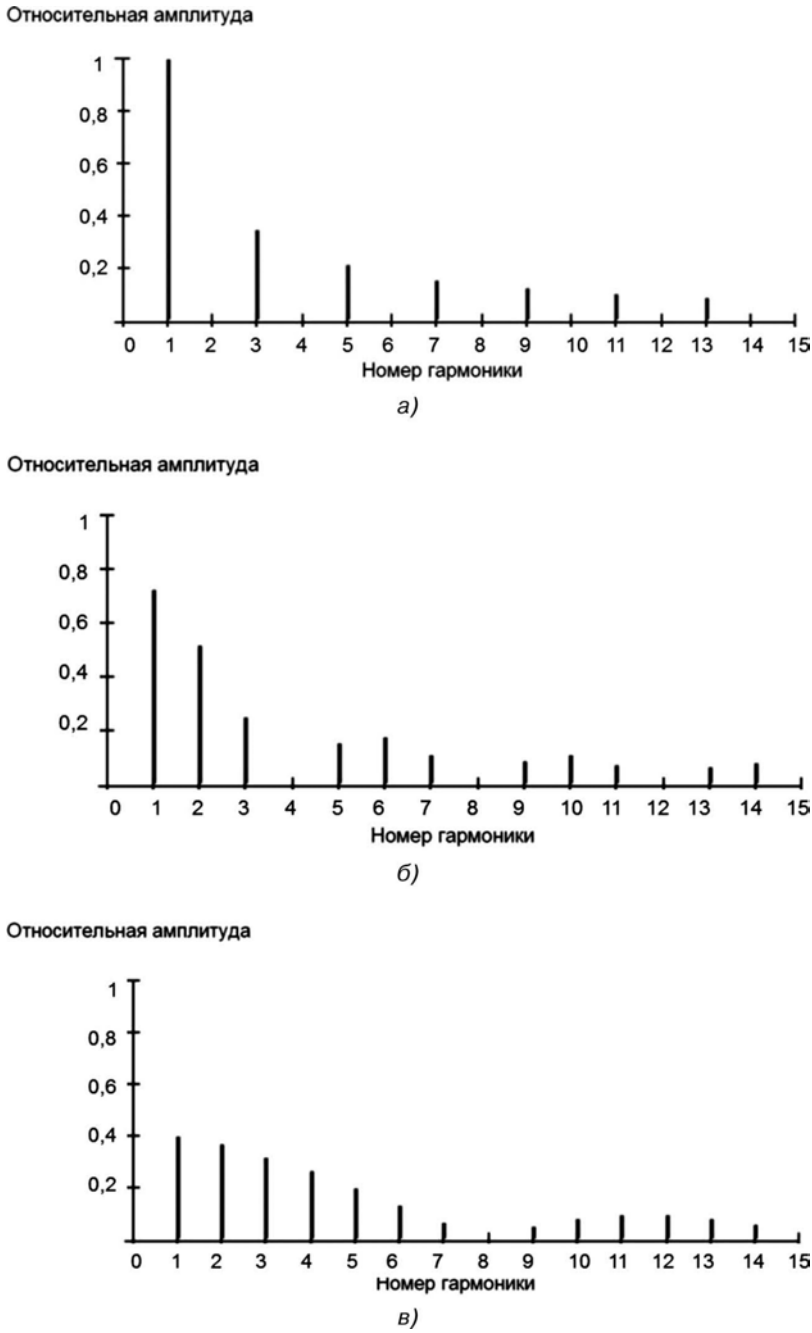


Рис. 1.7. *Спектр прямоугольного импульса при различной относительной длительности импульса: 50% (а), 25% (б), 12,5% (в)*

Анализ приведенных спектров позволяет сделать следующие выводы:

- самая высокая амплитуда гармоники на фундаментальной частоте наблюдается при рабочем цикле 50% (50/50); эта амплитуда берется за единичный уровень, относительно которого определяются амплитуды остальных спектральных составляющих;
- амплитуда компоненты на фундаментальной частоте всегда является самой большой, независимо от длительности рабочего цикла;
- амплитуды спектральных составляющих стремятся к нулю при увеличении частоты;
- в идеальном случае при рабочем цикле 50% в спектре сигнала отсутствуют четные гармоники;
- амплитуда на фундаментальной частоте уменьшается в 0,707 раза, когда рабочий цикл уменьшен до 25%;
- спектр состоит из дискретных частот, расположенных равномерно;
- большая часть энергии сигнала содержится в первых трех спектральных компонентах.

Данные выводы полезны при анализе амплитудных и частотных параметров помех и выработке техники их подавления или устранения. В большинстве задач подавления помех необходимо получить спектральную характеристику источников помех.

Гармоники, составляющие сигнал, могут являться причиной возникновения помех. Чем больше длительность фронта цифрового сигнала, тем меньше амплитуды гармонических составляющих на высоких частотах. Это подтверждает общую рекомендацию, согласно которой *необходимо выбирать семейство логических схем с минимально возможным требуемым быстродействием*, что снижает уровень гармонических составляющих сигнала и помех и облегчает решение задач обеспечения ЭМС.

Каждое семейство ИМС характеризуется своими параметрами статической и динамической помехоустойчивости [14]. Динамическая помехоустойчивость наиболее близко определяет поведение микросхемы в реальной обстановке при наличии импульсных помех. В общем случае чем выше быстродействие, тем ниже динамическая помехоустойчивость микросхемы. Поэтому при повышении тактовых частот и снижении питающих напряжений помехоустойчивость ИМС снижается.

Если в печатном узле присутствуют различные типы логик, например ТТЛШ и КМОП, быстродействие системы будет определяться скоростью работы самой медленной логики, при условии, что они используют один стандарт. В том случае, если уровень помехоустойчивости отличается от указанной в технической документации или параметр помехоустойчивости необходимо повысить, следует предпринимать дополнительные меры по экранированию, заземлению, рациональному монтажу, а также использовать схемотехнические решения, к которым относится установка развязывающих конденсаторов для обеспечения помехоустойчивости печатного узла и всей системы.