

Содержание

Предисловие	16
Глава 1. Основы	21
1.1 Частота и время	21
1.2 Время и расстояние	27
1.3 Цепи с сосредоточенными параметрами и цепи с распределенными параметрами	29
1.4 К вопросу о полосе пропускания по уровню -3 дБ и эффективной полосе пропускания	30
1.5 Четыре вида реактивности	33
1.6 Собственная емкость	35
1.7 Собственная индуктивность	43
1.8 Более точный метод оценки постоянной времени экспоненциального спада	50
1.8.1 Измерение общей площади под кривой переходной характеристики	51
1.8.2 Применение метода площадей к примеру, изображенному на рис. 1.15	53
1.9 Взаимная емкость	54
1.9.1 Связь между взаимной емкостью и перекрестной помехой	55
1.9.2 Взаимная емкость между согласующими резисторами	58
1.10 Взаимная индуктивность	58
1.10.1 Связь между взаимной индуктивностью и перекрестной помехой	62
1.10.2 Разворот индуктивно связанного контура	66
1.10.3 Соотношение величин индуктивной и емкостной связей	68
Глава 2. Параметры, определяющие быстродействие логических элементов	69
2.1 Пример из истории развития цифровой техники	70
2.2 Мощность	72
2.2.1 Статическая и динамическая рассеиваемая мощность	73

2.2.2	Динамическая рассеиваемая мощность при работе на емкостную нагрузку	75
2.2.3	Динамическая рассеиваемая мощность, вызванная перекрытием токов смещения	76
2.2.4	Мощность, рассеиваемая входной цепью	79
2.2.5	Мощность, рассеиваемая логическим элементом на холостом ходу	80
2.2.6	Рассеиваемая мощность выходного каскада	83
2.2.7	Мощность, рассеиваемая нагрузкой логического элемента	101
2.3	Быстродействие	102
2.3.1	Влияние крутизны изменения напряжения, dV/dt	103
2.3.2	Влияние крутизны изменения тока, dI/dt	104
2.3.3	Запас по напряжению	107
2.4	Корпусирование	111
2.4.1	Индуктивность выводов	111
2.4.2	Емкость выводов	123
2.4.3	Параметры теплоотвода — Θ_{JC} и Θ_{CA}	125
Глава 3. Техника выполнения измерений		133
3.1	Время нарастания переходной характеристики и полоса пропускания измерительных щупов осциллографа	133
3.2	Собственная индуктивность заземляющего провода измерительного щупа осциллографа	138
3.2.1	Расчет собственной индуктивности контура, образуемого заземляющим проводом	139
3.2.2	Расчет времени нарастания переходной характеристики по уровням 10–90%	139
3.2.3	Оценка добротности Q измерительной цепи	140
3.2.4	О чем говорят полученные нами результаты	142
3.3	Наводки, проникающие в измерительную цепь через контур заземления	146
3.3.1	Скорость изменения тока в контуре А	147
3.3.2	Взаимная индуктивность контуров А и В	147
3.3.3	Воспользуемся определением взаимной индуктивности	148
3.3.4	Датчик магнитного поля	149
3.4	Какую нагрузку в измеряемой цепи создает измерительный щуп	150
3.5	Специальная оснастка для подключения измерительного щупа	154
3.5.1	Нестандартный измерительный щуп с коэффициентом деления 21:1	155

3.5.2	Приспособления для снижения индуктивности паразитного контура заземления щупа	160
3.5.3	Встроенные измерительные цепи	161
3.6	Устранение наводок, создаваемых экранными токами измерительного щупа	163
3.7	Измерения в системах последовательной передачи данных	170
3.8	Понижение частоты тактовой синхронизации схемы	173
3.9	Измерение уровня перекрестных помех	173
3.9.1	Отключение источника основного сигнала	174
3.9.2	Отключение источника перекрестной помехи	175
3.9.3	Преднамеренное создание перекрестной помехи	176
3.10	Измерение предельно допустимых параметров рабочего режима схемы	177
3.10.1	Аддитивный шум	178
3.10.2	Настройка синхронизации многозарядной шины	179
3.10.3	Электропитание схемы	184
3.10.4	Температура окружающей среды	185
3.10.5	Пропускная способность схемы	186
3.11	Экспериментальное наблюдение эффекта метастабильного поведения	187
3.11.1	Измерение условий синхронизации, вызывающих метастабильность поведения логических элементов	188
3.11.2	Сущность механизма метастабильного поведения	192
3.11.3	Результаты измерений, подтверждающие, что время срабатывания реально может быть очень большим	198
3.11.4	Средства защиты от метастабильности	202
Глава 4. Линии передачи		205
4.1	Недостатки обычных проводных соединений	205
4.1.1	Искажение сигнала в проводном соединении	206
4.1.2	ЭМП, создаваемые проводными соединениями	210
4.1.3	Перекрестные помехи в случае проводных соединений	211
4.2	Бесконечная однородная линия передачи	214
4.2.1	Идеальная линия передачи	214
4.2.2	Линии передачи с потерями	221
4.2.3	Поверхностный эффект	229
4.2.4	Эффект близости	238
4.2.5	Диэлектрические потери	240
4.3	Влияние импедансов источника сигнала и нагрузки	241
4.3.1	Отражения в линии передачи	242
4.3.2	Согласование на стороне нагрузки	247

4.3.3	Согласование на стороне источника	248
4.3.4	Очень короткая линия	249
4.3.5	Длительность переходного процесса в случае несогласованной линии передачи	250
4.4	Частные случаи вариантов подключения линии передачи	251
4.4.1	Несогласованная линия передачи	251
4.4.2	Емкостные нагрузки, подключенные посреди линии передачи	254
4.4.3	Линия передачи с равномерно распределенными емкостными нагрузками	257
4.4.4	Прямоугольные изгибы печатных дорожек	261
4.4.5	Линии задержки	262
4.5	Волновое сопротивление и постоянная задержки линии передачи	264
4.5.1	Точность соблюдения параметров линий передачи	266
4.5.2	Формулы для коаксиального кабеля (рис. 4.29)	275
4.5.3	Формулы для кабеля типа “витая пара” (рис. 4.30)	276
4.5.4	Набор простых формул для микрополосковых линий (рис. 4.31–4.32)	276
4.5.5	Набор простых формул для полосковых линий (рис. 4.33–4.35)	277
Глава 5.	Слой земли и компоновка многослойной печатной платы	279
5.1	Высокочастотный ток следует по пути наименьшей индуктивности	280
5.2	Перекрестные помехи в случае сплошных слоев земли	282
5.3	Перекрестные помехи при наличии разрывов в сплошных слоях земли	286
5.4	Перекрестные помехи в случае решетчатой конфигурации опорных слоев	289
5.5	Перекрестные помехи в случае гребенчатой конфигурации шин питания и земли	292
5.6	Защитные дорожки	295
5.7	Перекрестные помехи на ближнем (NEXT) и дальнем (FEXT) концах линии	297
5.7.1	Механизм индуктивной связи	298
5.7.2	Механизм емкостной связи	300
5.7.3	Механизм совместного действия взаимной индуктивной и взаимной емкостной связи	302

5.7.4	Каким образом перекрестная помеха на ближнем конце создает проблему на дальнем конце линии передачи	304
5.7.5	Характерные особенности перекрестной связи между двумя длинными линиями	307
5.7.6	Использование последовательной согласующей нагрузки для уменьшения перекрестной помехи	308
5.8	Как правильно уложить слои в многослойной печатной плате	309
5.8.1	Проектирование слоев питания и земли	309
5.8.2	Слой аппаратной земли	310
5.8.3	Выбор геометрических размеров печатных дорожек	312
5.8.4	Связь между плотность трассировки и количеством необходимых слоев печатных проводников	315
5.8.5	Классические варианты укладки слоев	318
5.8.6	Дополнительные советы по проектированию печатных плат высокоскоростных цифровых устройств	323
Глава 6. Согласование цепей		325
6.1	Согласование на стороне нагрузки	326
6.1.1	Длительность фронта сигнала на входе приемника	326
6.1.2	Схема согласования линии передачи на стороне нагрузки со смещением уровня сигнала по постоянному току	329
6.1.3	Другие топологии линий передачи, в которых используется согласование на стороне нагрузки	332
6.1.4	Мощность, рассеиваемая согласующей нагрузкой, подключенной на конце линии передачи	335
6.2	Согласование на стороне источника	336
6.2.1	Сопrotивление последовательной согласующей нагрузки на стороне источника	337
6.2.2	Длительность фронта нарастания сигнала на выходе цепи передачи в случае линии, согласованной на стороне источника	338
6.2.3	Согласование на стороне источника уменьшает неравномерность переходной характеристики цепи передачи сигнала	338
6.2.4	Выходной ток, потребляемый от источника сигнала при согласовании линии передачи на стороне источника	339
6.2.5	Другие топологии линий передачи, в которых используется согласование на стороне источника	340

6.2.6	Мощность, рассеиваемая последовательной согласующей нагрузкой	340
6.3	Согласование линии передачи в промежуточных точках	341
6.4	Смещение согласующей нагрузки по переменному току	343
6.4.1	Нарушение баланса резистивно-емкостной согласующей нагрузки по постоянному току	345
6.4.2	Согласование дифференциальных линий на стороне нагрузки	346
6.5	Выбор согласующих резисторов	346
6.5.1	Точность соблюдения сопротивления согласующих резисторов	346
6.5.2	Мощность, рассеиваемая согласующими резисторами	347
6.5.3	Последовательная индуктивность согласующих резисторов	349
6.6	Перекрестные помехи, создаваемые согласующими нагрузками	354
6.6.1	Перекрестная помеха, наводимая соседними резисторами с аксиальными выводами	355
6.6.2	Перекрестная помеха, наводимая соседними резисторами поверхностного монтажа	357
6.6.3	Перекрестная помеха между резисторами набора, собранного в корпусе с однорядным расположением выводов (SIP)	357
Глава 7. Межслойные перемычки		359
7.1	Конструктивные характеристики межслойных перемычек	359
7.1.1	Диаметр готовой межслойной перемычки	360
7.1.2	Необходимый размер контактной площадки межслойной перемычки	363
7.1.3	Требования к зазорам: воздушный зазор	367
7.1.4	Зависимость плотности трассировки от размера контактной площадки	368
7.2	Емкость межслойной перемычки	370
7.3	Индуктивность межслойной перемычки	372
7.4	Возвратные токи и межслойные перемычки	375
Глава 8. Системы питания		379
8.1	Обеспечение стабильного опорного напряжения	379
8.2	Разводка питания, обеспечивающая одинаковое напряжение питания во всех точках схемы	386
8.2.1	Сопротивление разводки питания	387
8.2.2	Индуктивность разводки питания	388
8.2.3	Фильтрация на уровне платы	389

8.2.4	Дополнительная фильтрация питания на уровне интегральных схем	393
8.2.5	Емкость структуры, образованной слоями питания и земли	396
8.2.6	Измерительная схема для измерения переходной характеристики системы распределения питания	398
8.3	Распространенные причины нарушений в работе системы распределения питания	400
8.3.1	Спонтанные сбои в комбинированных схемах, построенных с использованием ЭСЛ- и ТТЛ-элементов	400
8.3.2	Слишком большие потери напряжения на разводке питания	401
8.3.3	Броски напряжения на шине питания при “горячей” замене плат	402
8.3.4	Электромагнитные помехи, создаваемые разводкой питания	403
8.4	Выбор блокировочного конденсатора	404
8.4.1	Эквивалентное последовательное сопротивление и индуктивность выводов конденсатора	404
8.4.2	Влияние варианта корпусирования на рабочие характеристики конденсатора	409
8.4.3	Конденсаторы поверхностного монтажа	412
8.4.4	Конденсаторы, монтируемые под корпусом микросхем	414
8.4.5	Три типа диэлектриков	414
8.4.6	Запас надежности по рабочему напряжению и срок службы	421
Глава 9. Соединители		423
9.1	Взаимная индуктивность: как соединители создают перекрестные помехи	423
9.1.1	Оценка уровня перекрестных помех	424
9.1.2	Как земляные контакты соединителя влияют на путь возвратного тока сигнала	427
9.2	Последовательная индуктивность: как соединители создают электромагнитные помехи	430
9.3	Паразитная емкость: использование соединителей в многоотводной шине	437
9.3.1	Емкость между контактами соединителя	439
9.3.2	Емкость печатной дорожки	439
9.3.3	Емкость приемников и шинных формирователей	440
9.3.4	Равномерно распределенные нагрузки	440

9.3.5	Шина с очень низким быстродействием	441
9.4	Измерение взаимной связи между контактами соединителей	443
9.4.1	Сигнальные и земляные контакты	444
9.4.2	Генератор импульсов и импеданс источника	444
9.4.3	Импеданс нагрузки на выходе цепи-источника помехи	445
9.4.4	Имитация условий нагрузки, соответствующих реальным, в линии-приемнике помехи	445
9.4.5	Согласующий резистор	446
9.5	Неразрывность слоя земли под соединителем	446
9.6	Способы решения проблемы электромагнитных помех, создаваемых внешними соединениями	448
9.6.1	Фильтрация	450
9.6.2	Экранирование	450
9.6.3	Дроссель подавления синфазного сигнала	452
9.7	Специальные разъемы для высокоскоростной цифровой аппаратуры	453
9.7.1	Соединитель для двухточечных линий AMP Z-pack	453
9.7.2	Соединитель компании Augat для двухточечных линий передачи	455
9.7.3	Соединитель компании Teradyne для многоотводных шин	455
9.8	Передача дифференциального сигнала через соединитель	456
9.9	Подача питания через разъемы	458
Глава 10.	Плоский кабель	461
10.1	Электрические характеристики плоского кабеля	462
10.1.1	Частотная характеристика плоского кабеля	463
10.1.2	Время нарастания переходной характеристики плоского кабеля	466
10.1.3	Измерение времени нарастания	468
10.2	Перекрестные помехи в плоском кабеле	469
10.2.1	Приближенная оценка уровня перекрестных помех	469
10.2.2	Эффект множества земляных проводов	472
10.2.3	Влияние скручивания проводов	474
10.2.4	Измерение перекрестных помех	476
10.2.5	Укладка плоских кабелей в стопу	479
10.3	Соединители для плоских кабелей	480
10.3.1	Индуктивность соединителя	481
10.3.2	Емкость соединителя	481
10.3.3	Расстановка контактов соединителя в шахматном порядке с целью ослабления паразитных эффектов	482

10.4	Электромагнитное излучение плоского кабеля	483
10.4.1	Обмотка плоской фольгой	484
10.4.2	Плоский кабель с односторонним экранированием	484
10.4.3	Плоский кабель в трубчатом экране	484
Глава 11. Распределение сигналов тактовой синхронизации		487
11.1	Запас по длительности периода синхронизации	487
11.2	Расфазировка сигналов тактовой синхронизации	490
11.3	Применение формирователей с повышенной нагрузочной способностью	494
11.4	Использование низкоомных шлейфовых шин распределения сигнала тактовой синхронизации	497
11.5	Согласование в схеме параллельного подключения линий передачи к источнику синхросигнала	499
11.6	Защита линий синхронизации от перекрестных помех	502
11.7	Преднамеренная коррекция задержки	504
11.7.1	Элементы фиксированной задержки	504
11.7.2	Настраиваемые элементы задержки	508
11.7.3	Автоматически программируемые узлы задержки	510
11.8	Дифференциальная передача сигналов тактовой синхронизации	513
11.9	Скважность сигнала тактовой синхронизации	514
11.10	Компенсация паразитной емкости повторителя тактового сигнала	517
11.11	Развязка приемников тактовых импульсов от шины синхронизации	519
Глава 12. Генераторы тактовой синхронизации		521
12.1	Применение корпусированных генераторов тактовой синхронизации	521
12.1.1	Частотные параметры	524
12.1.2	Допустимые условия эксплуатации	527
12.1.3	Электрические параметры	530
12.1.4	Вариант конструктивного исполнения	531
12.1.5	Технологические проблемы, связанные с вариантом корпусирования	531
12.1.6	Надежность	532
12.1.7	Дополнительные характеристики	533
12.2	Джиттер сигнала тактовой синхронизации	535
12.2.1	Когда джиттер сигнала тактовой синхронизации становится важным фактором	536
12.2.2	Измерение джиттера сигнала тактовой синхронизации	537

12.2.3	Измерение помехозащищенности по питанию генератора тактовой синхронизации	539
12.2.4	Фильтрация питания генераторов тактовой синхронизации	542
Литература		546
Приложение А. На заметку		551
Приложение Б. Расчет времени нарастания		567
Б.1	Сигналы, включенные в таблицу Б.1	572
Б.1.1	Сигнал однополюсной формы	572
Б.1.2	Сигнал двухполюсной формы	573
Б.1.3	Сигнал гауссовой формы	574
Б.2	Пять методов определения времени нарастания, использовавшихся для получения результатов, приведенных в табл. Б.1	575
Б.2.1	Время нарастания T_σ по стандартному отклонению	575
Б.2.2	Время нарастания по уровням 10–90%	576
Б.2.3	Время нарастания по уровням 20–80%	576
Б.2.4	Время нарастания по крутизне наклона в точке половинной амплитуды	577
Б.2.5	Время нарастания по максимальной крутизне наклона	578
Б.3	Два способа определения ширины амплитудно-частотной характеристики из табл. Б.1	579
Б.3.1	Ширина амплитудно-частотной характеристики по уровню -3 дБ	579
Б.3.2	Эффективная или шумовая эквивалентная ширина амплитудно-частотной характеристики	579
Приложение В. Формулы для расчетов в MathCad		581
Предметный указатель		607