



1. Курсовой проект

Цель курсового проекта - овладеть практическими навыками по использованию и основам программирования микроконтроллерных устройств. Основополагающим программным продуктом, рекомендуемым для использования является пакет «Proteus 7.6. sp0».

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой конструирования и
технологии РЭС

_____Ю.Г. Грозберг

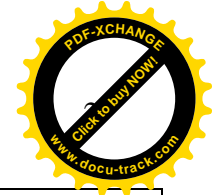
"__" _____ 2012 г.

ГРАФИК

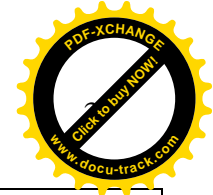
выполнения курсового проекта " Проектирование микроконтроллерного устройства "
по дисциплине **"Проектирование радиоэлектронных средств различного назначения"**5 курс

Дата (для заочного отделения)	Проце нт	Содержание по заданию
19.10.2012	15	Разработка структурной схемы и функциональной схемы устройства. 1.2. Описание работы электрической принципиальной схемы 1.3. Синтез структурной и функциональной схемы устройства. 2. Разработка программного обеспечения 2.1 Разработка алгоритма функционирования устройства. 2.2 Ввод и отладка программной части
26.10.2012 (29.10.2012*)	30	Ввод электрической схемы и моделирование работы. 3.1 Описание характеристик и имитация входных воздействий и сигналов. 3.2 Описание характеристик и выбор способа контроля выходных сигналов. 3.3 Выбор точек контроля электрических параметров схемы. 3.4 Результаты моделирования. <i>Чертеж -Структурная схема устройства</i>
09.11.2012	45	4. Выбор элементной базы 4.1 Описание требований к элементной базе по группам по результатам моделирования и требований конструкции. 4.2 Сравнительный анализ элементной базы различных групп. 4.3 Результаты выбора и характеристики элементов <i>Чертеж -Принципиальная схема устройства</i> <i>Перечень элементов</i>
23.11.2012 (19.11.2012)	60	5. Размещение и трассировка. 5.1 Анализ условий работы устройства и выбор материала печатного узла (узлов). 5.2 Выбор способа монтажа и особенности размещения и маркировки элементов. 5.3 Расчет элементов печатного монтажа. 5.3.1 Результаты данных моделирования. 5.3.2 Расчет токов и напряжений на выводах микросхем. 5.3.3. Группировка цепей по функциональному признаку. <i>Чертеж печатного узла</i>
07.12.2012 (10.12.2012)	75	5.3.4. Расчет параметров проводников для функциональных групп. 5.4 Трассировка. 5.4.1 Описание особенностей трассировки узлов устройства 5.4.2 Решение вопросов заземления и экранирования.
10.12.2012 (17.12.2012)	100	Пункты раздела 6 <i><u>Сборочный чертеж. Спецификация. Приложения</u></i>

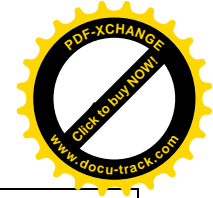
* - дни процентов уточняются в осеннем семестре и совпадают с днем заочника



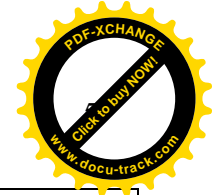
	ФИО	
<i>Группа 08-РКЗ-1</i>		
1.	<i>Береснев Денис Владимирович</i>	<i>Папка Laba 8 Схема 3 Напишите программу, при выполнении которой после нажатия на вторую кнопку двигатель начинает вращаться с частотой 100 Гц, а после нажатия на первую кнопку двигатель начинает вращаться с частотой 200 Гц. Кнопки не фиксируются</i>
2.	Гришанович Игорь Андреевич	Папка Laba 7 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой значения температуры от датчиков будут выводиться не последовательно, а параллельно все вместе на одном экране.
3.	Зябко Алексей Геннадьевич	Папка Laba 6 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой после принятия символа 'z' все светодиоды начинают мигать с частотой 5 Гц и прием сигнала с UART прекращается.
4.	Козловский Антон Николаевич	Папка Laba 5 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой скважность ШИМ изменяется скачкообразно со значения 90% до 10% с шагом 5% через промежутки времени 100 мс.
5.	Лабоха Виталий Александрович	Папка Laba 8 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой двигатель поворачивается на угол 180 градусов, затем меняет направление движения и поворачивается в обратную сторону на 90 градусов, затем направление меняется и процесс повторяется.
6.	Мазанов Владимир Владимирович	Папка Laba 6 Схема 3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии на клавиатуре первой кнопки на клавиатуре первого микроконтроллера на втором микроконтроллере загораются нечетные светодиоды, второй кнопки – четные.
7.	Морозов Роман Николаевич	Папка Laba 7 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой при понижении температуры ниже 1 °С на датчике, на экран выводится сообщение «Холод – и ваше ИМЯ!»
8.	Мудров Никита Олегович	Папка Laba 4 Схема3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии первой кнопки на экране сразу печатается ваша фамилия, при нажатии второй имя, третьей – отчество и т.д.
9.	Никитенко Петр Анатольевич	Папка Laba 8 Схема1 Напишите программу, при выполнении которой двигатель поворачивается на угол 180 градусов по часовой стрелке и останавливается на 5 сек, затем не меняя направления поворачивается на угол 90 градусов по часовой стрелке и останавливается на 5 сек. И так по циклу.
10.	Огурцов Евгений Геннадьевич	Папка Laba 5 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой после нажатия на нижнюю кнопку на выход НЧ фильтра выводится сигнал прямоугольной формы, а после нажатия на верхнюю выводится сигнал синусоидальной формы.



11.	Петрукович Вячеслав Михайлович	Папка Laba 6 Схема 3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии на клавиатуре первой кнопки на клавиатуре первого микроконтроллера на втором микроконтроллере все светодиоды начинают мигать с частотой 2 Гц, при нажатии на вторую - прекращают.
12.	Родионов Юрий Александрович	Папка Laba 7 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой сначала выводится значение с 4го датчика, затем с 1го, затем с 3го, затем с 1го.
13.	Свиридов Алексей Олегович	Папка Laba 8 Схема 3 Напишите программу, при выполнении которой после нажатия на третью кнопку двигатель начинает вращаться с частотой 5 Гц, а после нажатия на первую кнопку двигатель останавливается.
14.	Симаков Алексей Дмитриевич	Папка Laba 5 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводятся только значения, полученные с трех входов АЦП. Значения в % от максимума.
15.	Симонов Сергей Александрович	Папка Laba 7 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой при превышении температуры выше 30 °С на датчике, на экран выводится сообщение «HoT – ВАША ФАМИЛИЯ!»
16.	Старовыборный Денис Анатольевич	Папка Laba 4 Схема3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии каждой кнопки на экран печатаются символы по букве вашей фамилии (сколько уместится) но при нажатии восьмой кнопки (первой снизу) экран очищается, и курсор переносится в начало строки.
17.	Улдукис Павел Павлович	Папка Laba 6 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой при после принятия символа 's' загораются нечетные светодиоды.
18.	Шуман Роман Игоревич	Папка Laba 8 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой двигатель вращается с частотой вращения равной 1 Гц. Одну минуту. Затем меняет скорость вращения на 0,5 Гц и вращается 1 минуту. Затем останавливается
19.	Юркевич Виталий Владимирович	Папка Laba 5 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой после нажатия на верхнюю кнопку на выход НЧ фильтра выводится сигнал синусоидальной формы, а после нажатия на нижнюю сигнал пропадает



Группа 08-РКз-1		
1.	Барановский Олег Петрович	Папка Laba 4 Схема 3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии каждой кнопки на экран печатаются целиком Ваша фамилия, другой – Ваше имя, третьей – Отчество, пятой Группа.. но при нажатии восьмой кнопки (первой снизу) экран очищается, и курсор переносится в начало строки.
2.	Буравский Дмитрий Антонович	Папка Laba 8 Схема1 Напишите программу, при выполнении которой двигатель поворачивается на угол 90 градусов, затем меняет направление движения и поворачивается в обратную сторону на 180 градусов, затем направление меняется и процесс повторяется.
3.	Гаврилов Вячеслав Валерьевич	Папка Laba 3 Схема 2 Написать программу, при выполнении которой на экран выводится четыре последней цифры вашей зачетки и мигают с частотой 0,5 Гц.
4.	Гаврильчик Денис Михайлович	Папка Laba 7 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой сначала выводится значение с 1го датчика, затем с 4го, затем с 3го, затем с 2го.
5.	Гоев Дмитрий Владимирович	Папка Laba 7 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводится значение температуры, к которому прибавлено 10 единиц .на 2 сек, затем – ВАША ФАМИЛИЯ на 2 сек и т.д.
6.	Казак Максим Николаевич	Папка Laba 5 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводится только значение, полученное с двух входов АЦП. Значения в милливольтках.
7.	Клачков Дмитрий Леонидович	Папка Laba 8 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой двигатель вращается с частотой вращения равной 1 Гц. В течении 5 сек в одну сторону а потом меняет направление и 10 сек в другую
8.	Королёва Анна Михайловна	Папка Laba 3 Схема 1 Написать программу, при выполнении которой после каждого нажатия первой сверху кнопки на индикатор выводится последовательно номер вашей зачетки по каждому нажатию
9.	Крепский Олег Олегович	Вольтметр на базе ATMEGA 8 Напряжение – переменное, 220 В, частота 50 Гц.. Индикация – 1 секунда напряжение, 1 секунда – частота. Далее по циклу
10.	Крестьянов Кирилл Сергеевич	Папка Laba 3 Схема 3 Написать программу, при выполнении которой Ваша фамилия отображается на матричном индикаторе бегущей строкой.
11.	Писцов Андрей Валерьевич	Папка Laba 7 Схема 1 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводится значение температуры, деленное в 10 раз на 3 сек, затем умноженное в 2 раза на 3 сек и так далее.

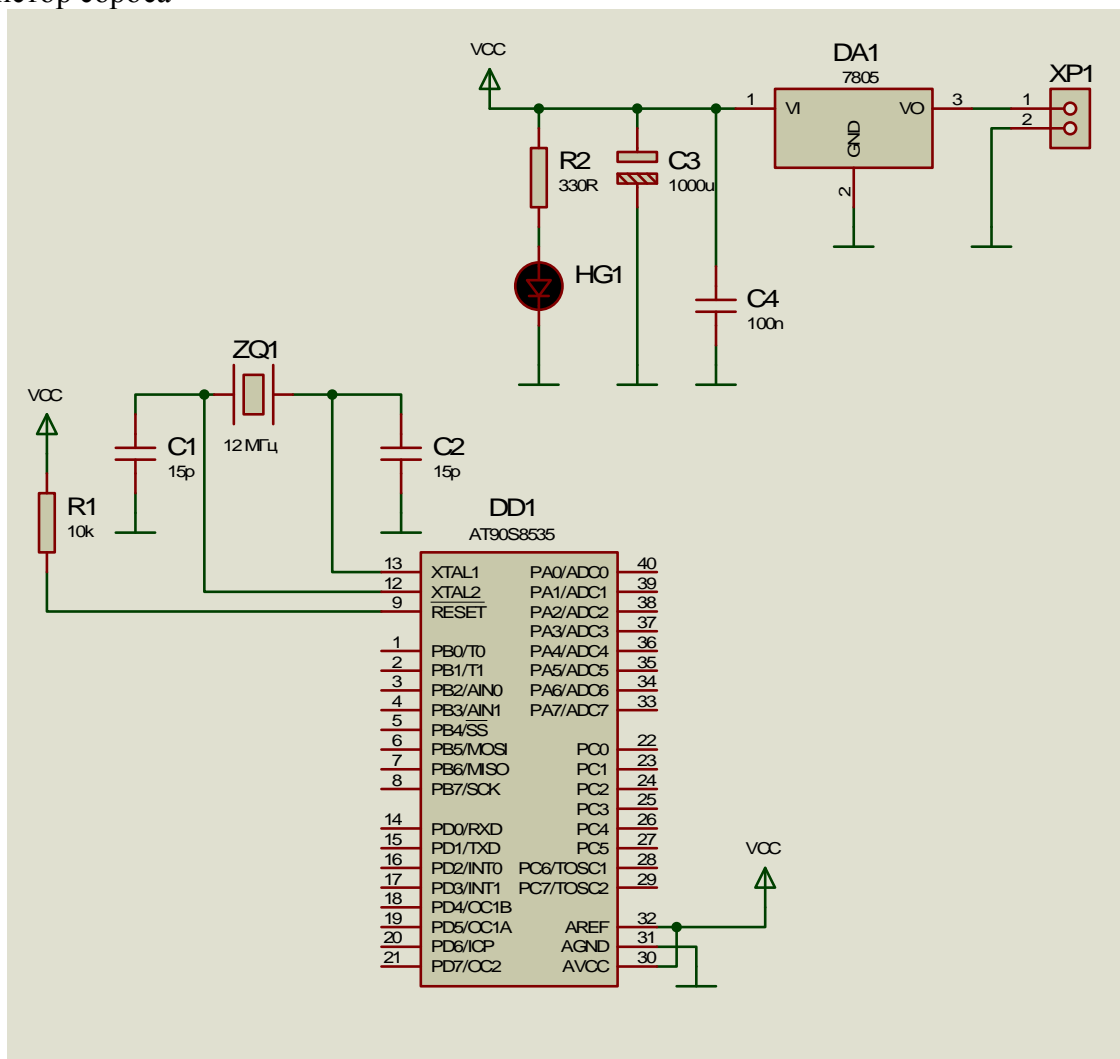


12.	Почёпко Петр Павлович	Папка Laba 5 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводятся значения, полученные с АЦП в Вольтах с двумя знаками после запятой
13.	Прастакон Александр Сергеевич	Папка Laba 8 Схема2 Напишите программу, при выполнении которой двигатель поворачивается на угол 180 градусов, затем останавливается на 5 сек. Затем меняет направление движения и поворачивается в обратную сторону на 90 градусов, затем пауза 5 сек направление меняется и процесс повторяется.
14.	Ратомская Анастасия Михайловна	Папка Laba 6 Схема3 Напишите программу, при выполнении которой при нажатии на клавиатуре первой кнопки на клавиатуре первого микроконтроллера на втором микроконтроллере загораются все светодиоды, второй кнопки – все светодиоды гаснут, при нажатии третьей кнопки начинаю мигать с частотой 2Гц
15.	Рудак Дмитрий Васильевич	Папка Laba 7 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой на экран выводится значение только с первого датчика. 5 сек, затем на 5 сек выводится ВАША фамилия
16.	Толкач Олег Александрович	Папка Laba 6 Схема 2 Напишите программу, при выполнении которой после принятия символа 'R' все четные светодиоды мигают 5 секунд с частотой 1 Гц и прием сигнала с UART прекращается.
17.		

Содержание проекта

Базовая (типовая) схема ВСЕХ заданий содержит :

1. Источник питания, стабилизатор, фильтр, светодиод для индикации напряжения питания)
2. Кварцевый резонатор и конденсаторы возле него
3. Резистор сброса

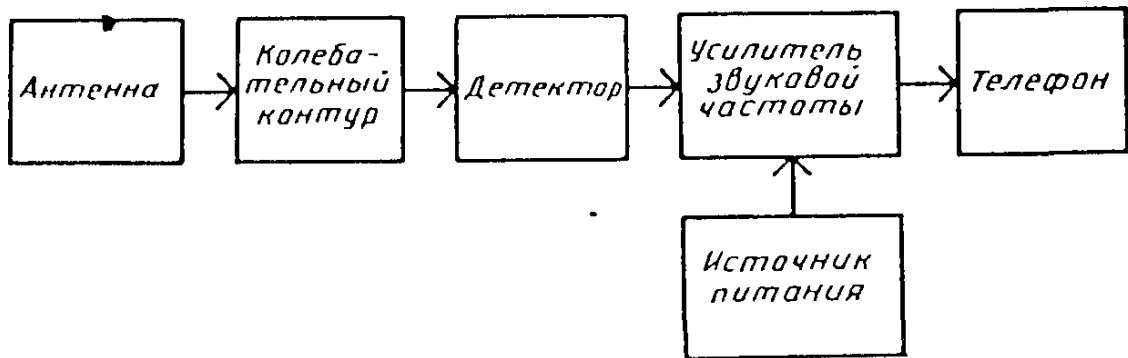


Введение, должно раскрывать основополагающие моменты применения микроконтроллеров в РЭА, их основные достоинства и особенности. Необходимо рассказать о основных преимуществах применения микроконтроллеров в РЭА и установить предпосылки для использования МК в разрабатываемой РЭА.

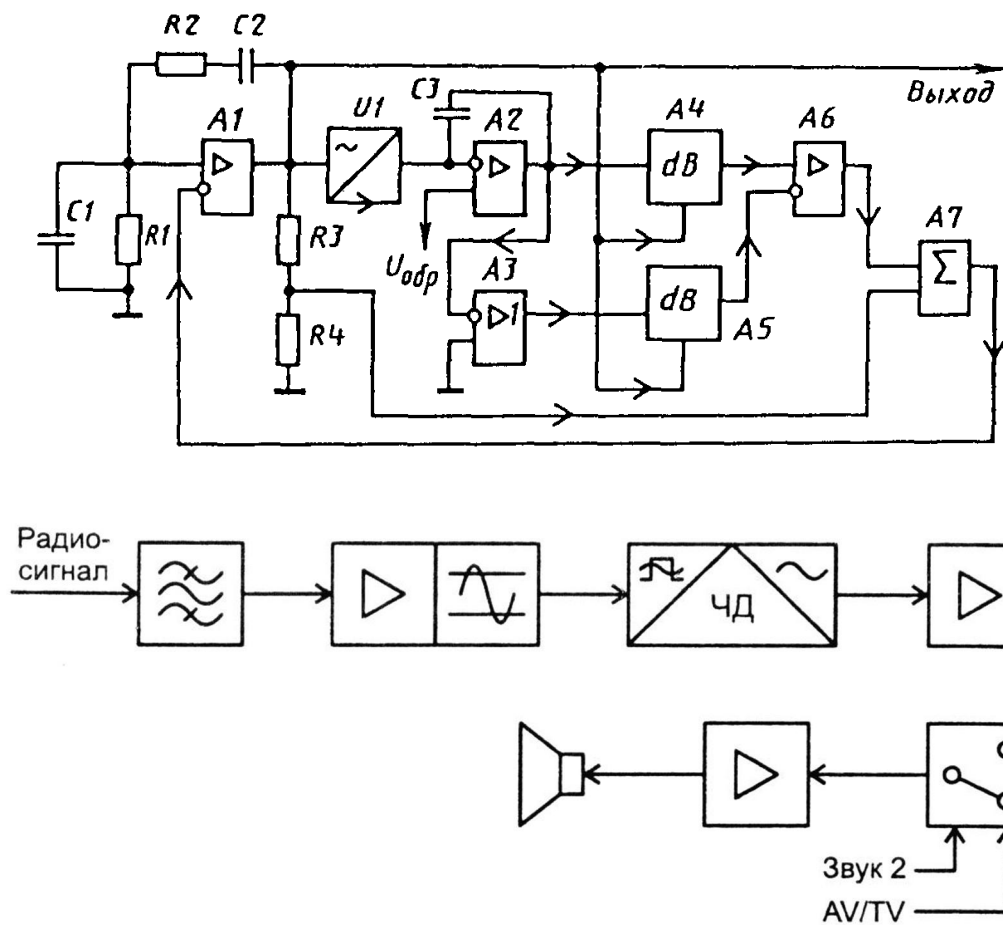
1. Разработка структурной схемы и функциональной схемы устройства

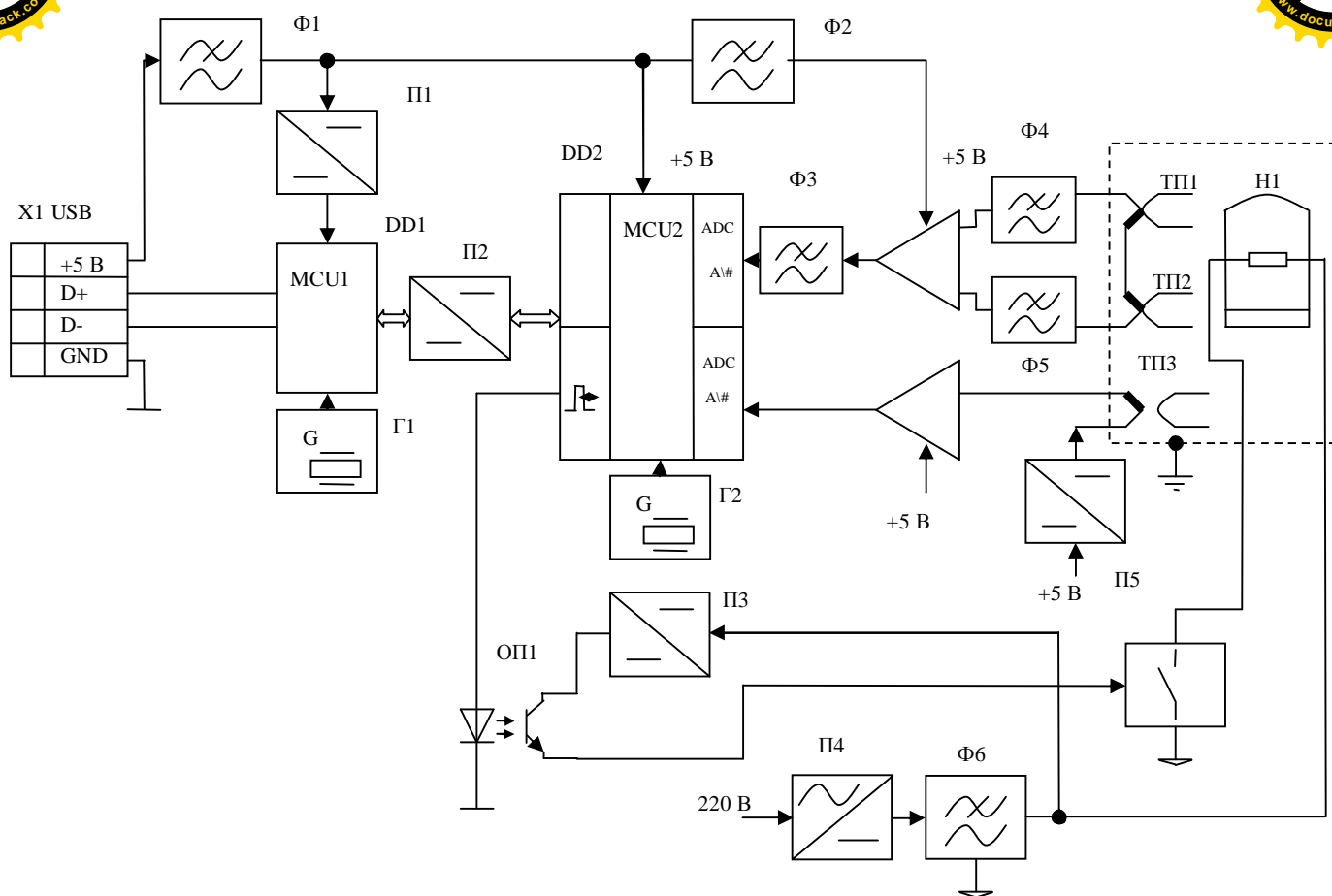
1.2. Описание работы электрической принципиальной схемы.

На основании описания работы схемы разработать структурную и функциональную схему устройства. Определить тип топологии и архитектуры проектируемого устройства. Указать на типы интерфейсов и характеристик входных и выходных сигналов



Пример выполнения структурной схемы



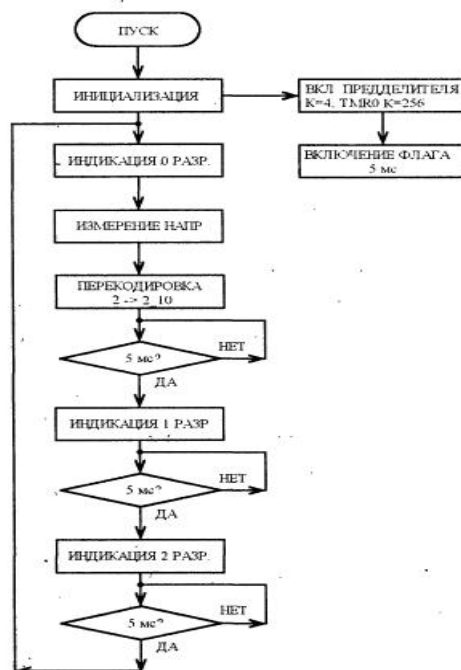


Примеры выполнения функциональных схем

2. Разработка программного обеспечения

2.1 Разработка алгоритма функционирования устройства.

Разработать общий алгоритм функционирования устройства и его составных алгоритмов. Должен быть выполнен чертеж алгоритмов. Примерный вид приведен на рисунке.



2.2 Ввод и отладка программной части

Используя материалы из папок с названием Laba №...и средство разработки CVAVR1255.составить программу и скомпилировать для получения hex – файла
Описать этот процесс

3. Ввод электрической схемы и моделирование работы.

3.1 Описание характеристик и имитация входных воздействий и сигналов.

3.2 Описание характеристик и выбор способа контроля выходных сигналов.

3.3 Выбор точек контроля электрических параметров схемы.

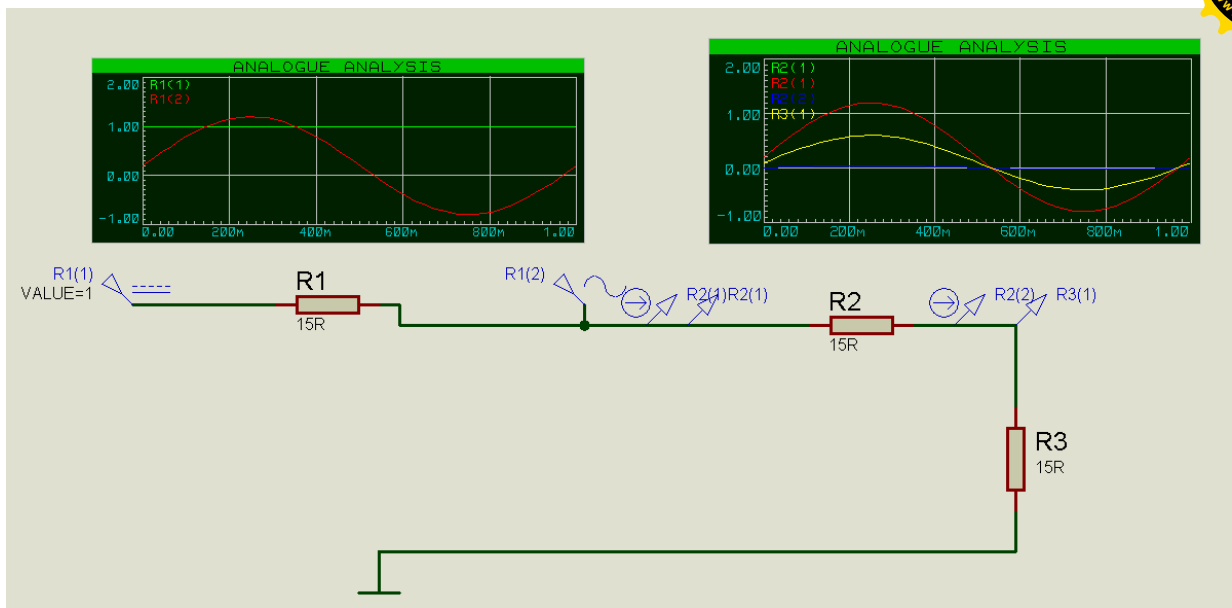
3.4 Результаты моделирования.

Выполнить предварительный выбор или создание элементов проектируемого устройства, ввод схемы и моделирование. Обратить внимание на имитацию входных сигналов и получение выходных результатов. Результатом моделирования являются:

- Файл со схемой моделирования (может не соответствовать ГОСТ по правилам оформления);
- Графики, поясняющие процессы по сигналам в соответствии с функциональной (структурной схемой);
- Скриншоты фрагментов работающей схемы;
- Таблица с данными сигналов, полученными в результате моделирования.

В таблицу привести экстремальные (минимальные и максимальные) значения рабочих токов, частот, напряжений и т.д. в пределах функциональных групп.

Пример



характеристики:

Точка	Параметры
Разъем N ₁ -C ₁	V: 686 mV V(p-p): 4.01 mV V(rms): 686 mV V(dc): 686 mV I: 1.20 uA I(p-p): 252 nA I(rms): 1.08 uA I(dc): 1.07 uA Частота: 10.0 kHz
Разъем N ₂ -R ₆	V: 0 V V(p-p): 0 V V(rms): 0 V V(dc): 0 V I: -259 uA I(p-p): 12.1 uA I(rms): 259 uA I(dc): -259 uA Частота: 10.0 kHz
Разъем C ₁ R ₁ -Q ₁	V: 686 mV V(p-p): 4.01 mV V(rms): 686 mV V(dc): 686 mV I: 1.20 uA I(p-p): 252 nA I(rms): 1.08 uA I(dc): 1.07 uA Частота: 10.0 kHz
Разъем Q ₁ - Q ₂ Q ₃	V: 2.31 V V(p-p): 45.5 mV V(rms): 2.31 V V(dc): 2.31 V I: 297 uA I(p-p): 260 uA I(rms): 337 uA I(dc): 325 uA Частота: 10.0 kHz
Разъем R ₈ -R ₆	V: 686 mV V(p-p): 4.01 mV V(rms): 686 mV V(dc): 686 mV I: -7.01 uA I(p-p): 19.5 uA I(rms): 10.5 uA I(dc): -7.93 uA Частота: 10.0 kHz
Разъем R ₆	V: 1.16 V V(p-p): 1.32 V V(rms): 1.31 V V(dc): 1.22 V I: 36.0 mA I(p-p): 41.9 mA I(rms): 40.8 mA I(dc): 38.0 mA Частота: 10.0 kHz
Разъем R ₈	V: 686 mV V(p-p): 4.01 mV V(rms): 686 mV V(dc): 686 mV I: 1.20 uA I(p-p): 252 nA I(rms): 1.08 uA I(dc): 1.07 uA Частота: 10.0 kHz

4. Выбор элементной базы

4.1 Описание требований к элементной базе по группам по результатам моделирования и требований конструкции.

Приводится сравнительный анализ различных марок ЭРЭ, их конструктивных особенностей, эскизов. Выбор элементной базы производить с максимальным использованием поверхностно-монтируемых элементов. В случае если в библиотеке для микроконтроллера нет такого корпуса, его следует выбрать из библиотеки стандартных корпусов и переназначить выводы согласно данным справочной литературы. Выбор базы следует сопровождать рекомендациями создателя (разработчика) схемы. Результат выбора представить в табличной форме, где привести:

- границы диапазонов номиналов (с указанием ряда),
- рабочих параметров (мощность, напряжение, и т.п).

В заключительной части привести данные соответствия выбранной элементной базы по группам.

4.2 Сравнительный анализ элементной базы различных групп.

4.3 Результаты выбора и характеристики элементов

Пример

§ Резисторы и конденсаторы [5]

Таблица 3.1 – Характеристики резисторов применяемых в устройстве

Элемент	Мощность, Вт	Типоразмер	Номинал	Количество
R1	2 Вт	0805	75 Ом	1
R2			6,6 кОм	1
R3,R4			6,8 кОм	2
R5,R19-R21	12 кОм		4	
R6, R35-R38	5,6 кОм		5	
R7	100 Ом		1	
R8,R13,R18	22 кОм		3	
R9,R10,R12	4,3 кОм		3	
R11	1 кОм		1	
R14,R15	2 Вт		3 кОм	2
R16,R23-R26	0,125Вт		510 Ом	5
R17 высоковольтный резистор	2 Вт		10 МОм	1
R22	0,125Вт		43 кОм	1
R27-R34			5,1 кОм	8

Таблица 3.2 – Характеристики конденсаторов применяемых в устройстве

Элемент	Типоразмер	Номинал	Количество
C1	1206	470 мкФ*450 В	1
C2		0,047 мкФ*400 В	1
C3		100 мкФ*100 В	1
C4-C6		220 мкФ*16 В	3
C7		100мкФ*16В	1
C8	1812	2000 пФ	1
C9	1206	0,047 мкФ*630 В	1
C10-C15		2200 пФ*10 кВ	5
C16,C18		2,2 мкФ*16 В	2
C17	1812	0,1 мкФ	1
C19-C25		1000 пФ	7

Таблица 3.3 – Размеры посадочных мест для резисторов и конденсаторов

Типоразмер	Элемент					Посадочное место				
	A max	B max	B max	Г min	Г max	a	b	К	Т	М
0805	2,15	1,4	1,7	0,2	0,6	1	1,3	0,34	2,3	3,3
1812	4,7	3,4	1,8	0,25	0,75	1,5	4	1,25	3,8	5,3
1206	3,4	1,8	1,8	0,4	1	2,15	1,6	0,5	3,75	5,9



5. Размещение и трассировка.

5.1 Анализ условий работы устройства и выбор материала печатного узла (узлов).

Исходя из условий эксплуатации и требований конструкции потенциального устройства выбирается материал ПП. Условия выбора варьируются от приоритетных требований:

Электрические характеристики

Технологичность

Механические характеристики

Стоимость

Доступность

Количество слоев и класс точности при изготовлении и тд.

1. Основа (reinforcement)

Стеклоткань. Наиболее широко используемый материал основания. Прост в технологии. Доступен в разных вариантах плетения и толщины. Является основой для материалов класса FR-4. Дешев.

Нетканое стекловолокно. Представляет собой войлок из стекловолокна. Часто используется с эпоксидным или фторопластовым заполнением. Также является основой для материалов класса СЕМ-3. Дешев.

Арамидная ткань. Имеет отрицательный коэффициент теплового расширения по осям x-y. В сочетании с эпоксидным наполнением обеспечивает коэффициент теплового расширения, приближенный к керамике. Недостатком является большой коэффициент теплового расширения по оси z.

Арамидная бумага. Все более широко используется для многослойных применений. Имеет все преимущества арамидной ткани, но легче в производстве и применении. Хорошо сочетается с лазерным или плазменным сверлением.

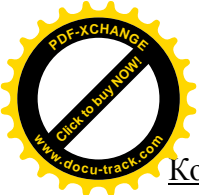
Полиимидная пленка. Используется в качестве внешних слоев в платах HDI (High Density Interconnections) наряду с эпоксидной смолой и арамидной бумагой. Легко травится химически для формирования переходных отверстий, подходит для лазерного сверления.

Характеристики базовых материалов

Ниже приведены некоторые важные характеристики, которые необходимо учитывать при выборе марки базового материала и проектировании печатной платы для конкретного электронного изделия или применения.

Диэлектрическая постоянная (dielectric constant, Dk), тангенс угла диэлектрических потерь (dissipation factor Df). Эти характеристики необходимо учитывать при проектировании высокочастотных схем, линий связи контролируемого импеданса. Чем меньше диэлектрическая постоянная Dk, тем выше скорость передачи сигналов по печатным проводникам, тем больше импеданс проводника с той же геометрией. Чем меньше Df, тем лучше целостность сигналов и меньше потери на высоких частотах.

Температура стеклования (Glass Transition Temperature, Tg). Очень важный параметр материала, особенно для многослойных плат. Это точка излома линейной характеристики теплового расширения материала. До температуры Tg материал расширяется линейно с определенным углом наклона характеристики (коэффициентом теплового расширения), после Tg характеристика расширения становится либо нелинейной, либо приближенно линейной, но с гораздо большим наклоном характеристики. Эффект особенно заметен при расширении по оси z, так как по осям x-y эффект частично нивелируется основой (стеклотканью). Это явление обусловлено процессом размягчения связующего наполнения материала (смол), разрывом полимерных связей и постепенного перехода к жидкому состоянию. Чем выше значение Tg, тем меньше выражен эффект коробления печатной платы, тем выше надежность металлизированных переходных отверстий.



Коэффициент теплового расширения (Coefficient of Thermal Expansion, CTE). Имеет разл. значение для осей x-y и z. Для последней значение CTE всегда больше. Имеет решающее значение при выборе материала для электронного изделия, функционирующего в широком диапазоне рабочих температур. При прочих равных, рекомендуется выбирать материал с меньшим значением CTE.

Влагопоглощение (Moisture or Water Absorption). Большинство органических материалов гигроскопичны и поглощают влагу относительно быстро. Величина влагопоглощения в процентах определяется как относительное увеличение веса материала или изделия при выдержке его во влажной среде с определенными показателями относительной влажности и температуры. Поглощенная материалом влага испаряется в процессе пайки и может привести к короблению печатной платы и вспучиванию материала.

2 КАТЕГОРИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

Выбор конструкции печатной платы является важным фактором, определяющим механические характеристики при использовании устройства в целом. Для изготовления печатных плат используются материалы различного уровня качества. Наиболее подходящим и удобным для разработчика будет, если изготовитель печатных плат находится неподалеку. В этом случае легко осуществить контроль удельного сопротивления и диэлектрической постоянной - основных параметров материала печатной платы. К сожалению, этого бывает недостаточно и часто необходимо знание других параметров, таких как воспламеняемость, высокотемпературная стабильность и коэффициент гигроскопичности. Эти параметры может знать только производитель материалов, используемых при производстве печатных плат.

Слоистые материалы обозначаются индексами FR (flame resistant, сопротивляемость к воспламенению) и G. Материал с индексом FR-1 обладает наибольшей горючестью, а FR-5 - наименьшей. Материалы с индексами G10 и G11 обладают особыми характеристиками. Материалы печатных плат приведены в табл. 1.

FR-1/FR-2

Класс материалов FR-1 и FR-2 по классификации NEMA. Эти материалы изготавливаются на фенольно-бумажной основе и используются только для производства ОПП. FR-1 и FR-2 имеют схожие характеристики, FR-2 отличается от FR-1 лишь использованием модифицированной фенольной смолы с более высокой температурой стеклования в качестве связующего. Ввиду схожести характеристик и области применения FR-1 и FR-2, большинство производителей материалов выпускают лишь один из этих материалов, чаще FR-2. Отлично обрабатывается механически (фрезерование, штамповка). Дешев. Класс горючести UL94-V0 или V1.

Разделяется на следующие подклассы:

стандартный;

безгалогенный, без содержания фосфора и сурьмы, нетоксичный;

влагостойкий

FR-4



Семейство материалов под общим названием FR-4 по классификации NEMA (National Electrical Manufacturers Association, USA). Данные материалы являются наиболее распространенными для производства ДПП, МПП а также ОПП с повышенными требованиями к механической прочности. FR-4 представляет собой материал на основе стеклоткани с эпоксидной смолой в качестве связующего (стеклотекстолит). Обычно матового желтоватого цвета или прозрачный, привычный зеленый цвет ему придает паяльная маска, наносимая на поверхность печатной платы. Класс горючести UL94-V0.

В зависимости от свойств и области применения FR-4 разделяется на следующие подклассы: стандартный, с температурой стеклования $T_g \sim 130^\circ\text{C}$, с ультрафиолетовой блокировкой (UV blocking) или без нее. Наиболее распространенный и широко используемый тип, одновременно наименее дорогой из FR-4;

с высокой температурой стеклования, $T_g \sim 170^\circ\text{C}-180^\circ\text{C}$;

безгалогенный;

с нормируемым трекинг-индексом, $CTI \geq 400, \geq 600$;

высокочастотный, с низкой диэлектрической проницаемостью $\epsilon \leq 3,9$ и малым тангенсом угла диэлектрических потерь $df \leq 0,02$.

Не используйте печатную плату категории FR-1. Есть много примеров использования печатных плат FR-1, на которых имеются повреждения от теплового воздействия мощных компонентов. Печатные платы этой категории более похожи на картон.

FR-4 часто используется при изготовлении промышленного оборудования, в то время как FR-2 используется в производстве бытовой техники. Эти две категории стандартизованы в промышленности, а печатные платы FR-2 и FR-4 часто подходят для большинства приложений. Но иногда неидеальность характеристик этих категорий заставляет использовать другие материалы. Например, для очень высокочастотных приложений в качестве материала печатных плат используются фторопласт и даже керамика. Однако, чем экзотичнее материал печатной платы, тем выше может быть цена.

Виды и параметры материалов для многослойных печатных плат					
Вид	Состав	Tg	Dk	Стоимость	Наименование
FR4	Стеклотекстолит (слоистый эпоксидный материал из стекловолокна)	> 135°C	4,7	1 (базовая)	S1141
FR4 halogen free	Стеклотекстолит, не содержит галогена, сурьмы, фосфора и др., не выделяет опасных веществ при горении	> 140°C	4,7	1,1	S1155
FR4 High Tg, FR5	Материал со сшитой сеткой, повышенная термостойкость (RoHS-совместимый)	> 160°C	4,6	1,2...1,4	S1170, S1141 170
RCC	Эпоксидный материал без стеклянной тканой основы	> 130°C	4,0	1,3...1,5	S6015
PD	Полиимидная смола с арамидной основой	> 260°C	4,4	5...6,5	Arlon 85N
CBЧ (PTFE)	CBЧ-материалы (политетрафлуорэтилен со стеклом или керамикой)	240–280°C	2,2–10,2	32...70	Ro3003, Ro3006, Ro3010
CBЧ(Non-PTFE)	CBЧ-материалы, не основанные на PTFE	240–280°C	3,5	10	Ro4003, Ro4350, TMM
PI (полиимид)	Материал для производства гибких и гибко-жестких плат	195–220°C	3,4		Dupont Pyralux, Taiflex

Tg — температура стеклования (разрушения структуры)

Dk — диэлектрическая постоянная

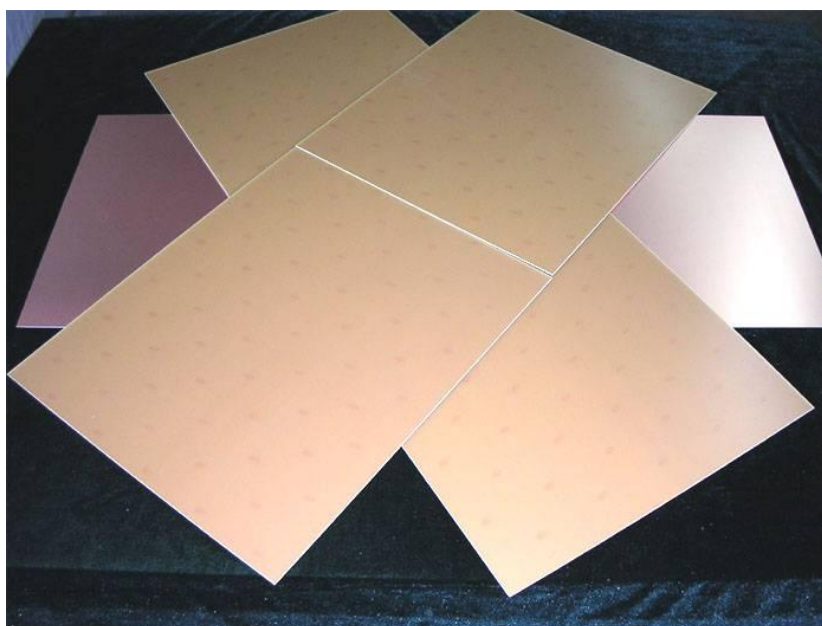
Типовые конструкции печатных плат основаны на применении стандартного стеклотекстолита типа FR4, с рабочей температурой от –50 до +110 °С, и температурой стеклования Tg (размягчения) около 135 °С. При повышенных требованиях к термостойкости или при монтаже плат в печи по бессвинцовой технологии (t до 260 °С) применяется высокотемпературный FR4 High Tg или FR5. При требованиях к постоянной работе на высоких температурах или при резких перепадах температур применяется полиимид. Кроме того, полиимид используют для изготовления плат повышенной надежности, для военных применений, а также в случаях, когда требуется повышенная электрическая прочность. Для плат с СВЧ-цепями (более 2 ГГц) применяются отдельные слои СВЧ-материала, или плата целиком делается из СВЧ-материала. Наиболее известные поставщики специальных материалов — фирмы Rogers, Arlon, Taconic, Dupont. Стоимость этих материалов выше, чем FR4, и условно показана в предпоследнем столбце таблицы относительно стоимости FR4.

Классификация

Наименование по NEMA	Связующее	Основа	Класс горючести
XPC	фенольная смола	целлюлозная бумага	UL94-HB
XXXPC	модифицированная фенольная смола	целлюлозная бумага	UL94-HB
FR-1	огнеупорная фенольная смола	целлюлозная бумага	UL94-V0, UL94-V1
FR-2	огнеупорная модифицированная фенольная смола	целлюлозная бумага	UL94-V0, UL94-V1
FR-3	эпоксидная смола	целлюлозная бумага	UL94-V0
FR-4	эпоксидная модифицированная смола или немодифицированная	стеклоткань	UL94-V0
CEM-1	эпоксидная модифицированная смола или немодифицированная	стеклоткань/целлюлозная бумага	UL94-V0
CEM-3	эпоксидная модифицированная смола или немодифицированная	стеклоткань/нетканое стекловолокно	UL94-V0

CEM-3

Семейство материалов CEM-3 по классификации NEMA. Композитный материал на стекловолоконно-эпоксидной основе обычно молочно-белого цвета или прозрачный. Состоит из двух наружных слоев стеклоткани, между которыми помещено нетканое стекловолокно (войлок из стекловолокна). Широко применяется при производстве ДПП с металлизацией. По своим свойствам очень близок к FR-4 и отличается, по большому счету, лишь меньшей механической прочностью. Является прекрасной дешевой альтернативой FR-4 для абсолютного большинства применений. Отлично обрабатывается механически (фрезерование, штамповка). Класс горючести UL94-V0.



В зависимости от свойств и области применения CEM-3 разделяется на следующие подклассы: стандартный, с ультрафиолетовой блокировкой (UV blocking) или без нее; высокотемпературный, совместимый с технологиями бессвинцового лужения и пайки; безгалогенный, без содержания фосфора и сурьмы;

с нормируемым трекинг-индексом, $CTI \geq 600$

CEM-1

Класс материалов CEM-1 по классификации NEMA. Эти композитные материалы изготавливаются на бумажной основе с двумя слоями стеклоткани снаружи. Обычно молочно-белого, молочно-желтого или коричнево-бурого цвета. Несовместимы с процессом металлизации отверстий, поэтому используются только для производства ОПП. Диэлектрические свойства близки к FR-4, механические свойства несколько хуже. CEM-1 является хорошей альтернативой FR-4 при производстве односторонних печатных плат, когда цена является определяющим фактором. Отлично обрабатывается механически (фрезерование, штамповка). Класс горючести UL94-V0.

Разделяется на следующие подклассы:

стандартный;

высокотемпературный, совместимый с технологиями бессвинцового лужения и пайки;

безгалогенный, без содержания фосфора и сурьмы;

с нормируемым трекинг-индексом, $CTI \geq 600$

влагостойкий, с повышенной стабильностью размеров

При выборе материала печатной платы обращайтесь особое внимание на его гигроскопичность, поскольку этот параметр может оказать сильный негативный эффект на желаемые характеристики платы - поверхностное сопротивление, утечки, высоковольтные изоляционные свойства (пробои и искрения) и механическая прочность. Также обращайте внимание на рабочую температуру. Участки с высокой температурой могут встречаться в неожиданных местах, например, рядом с большими цифровыми интегральными схемами, переключения которых происходят на высокой частоте. Если такие участки расположены непосредственно под аналоговыми компонентами, повышение температуры может сказаться на изменении характеристик аналоговой схемы.

Таблица 1

Категория	Компоненты, комментарии
FR-1	бумага, фенольная композиция: прессование и штамповка при комнатной температуре, высокий коэффициент гигроскопичности
FR-2	бумага, фенольная композиция: применимый для односторонних печатных плат бытовой техники, невысокий коэффициент гигроскопичности
FR-3	бумага, эпоксидная композиция: разработки с хорошими механическими и электрическими характеристиками
FR-4	стеклоткань, эпоксидная композиция: прекрасные механические и электрические свойства
FR-5	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность при повышенных температурах, отсутствие воспламенения
G10	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокие изоляционные свойства, наиболее высокая прочность стеклоткани, низкий коэффициент гигроскопичности
G11	стеклоткань, эпоксидная композиция: высокая прочность на изгиб при повышенных температурах, высокая сопротивляемость растворителям

После того, как материал печатной платы выбран, необходимо определить толщину фольги печатной платы. Этот параметр в первую очередь выбирается исходя из максимальной величины протекающего тока. По возможности, старайтесь избегать применения очень тонкой фольги.

3. Финишные покрытия печатных плат

Для сохранения паяемости печатных плат после хранения, обеспечения надежного монтажа электронных компонентов и сохранения при эксплуатации свойств паяных или сварных соединений необходимо защищать медную поверхность контактных площадок печатной платы

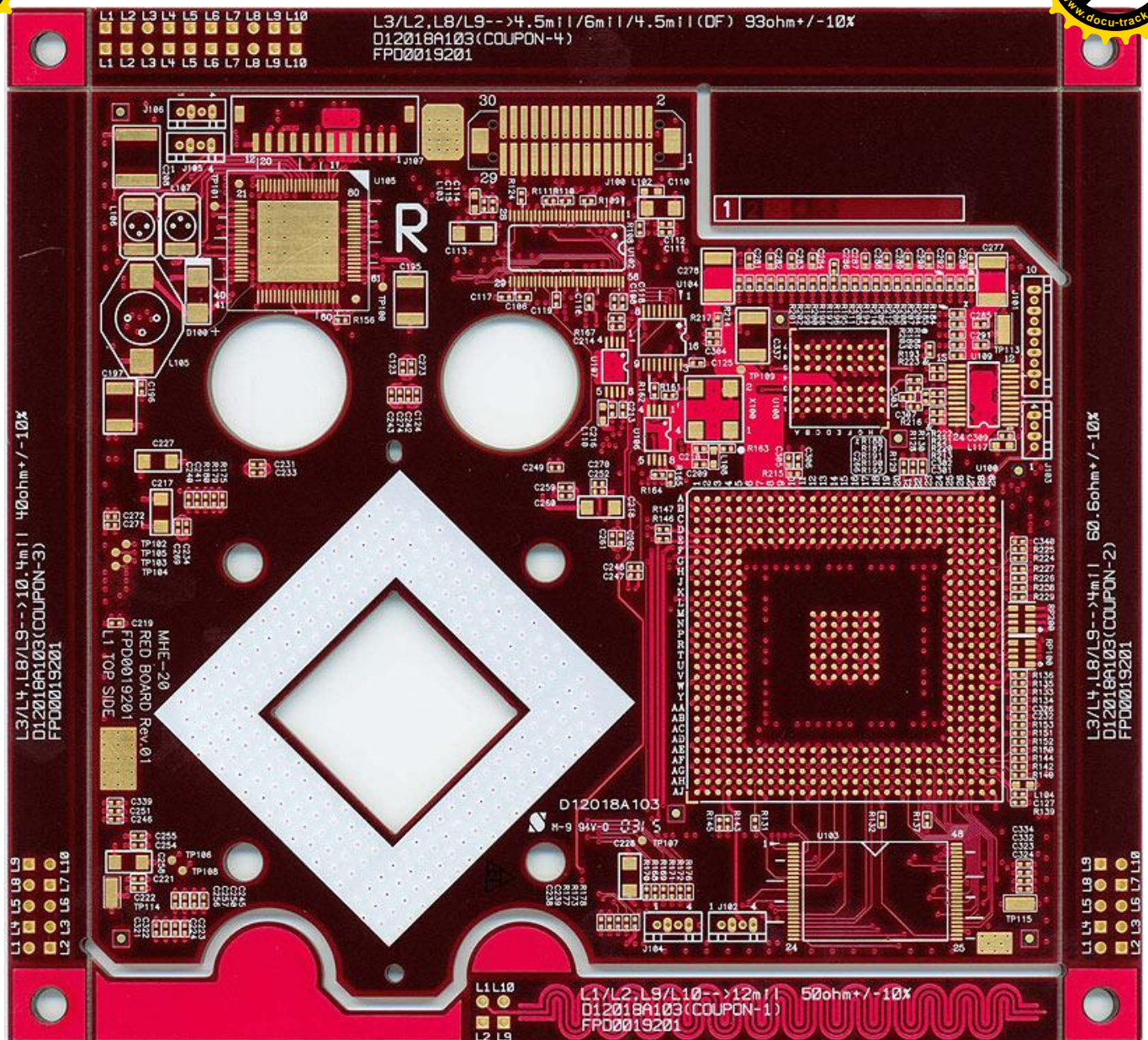
следующим поверхностным покрытием, так называемым финишным покрытием. Мы предлагаем Вашему вниманию широкий перечень финишных покрытий, который позволяет оптимальным образом сделать выбор в пользу одного или даже одновременно нескольких из них при производстве Ваших печатных плат.

HAL или HASL (от английского Hot Air Leveling или Hot Air Solder Leveling - выравнивание горячим воздухом) с использованием припоев на основе сплава олово-свинец (Sn/Pb), например, ОС61, ОС63, и выравниванием воздушным ножом. Наносится в конечной стадии изготовления на уже сформированную печатную плату с нанесенной паяльной маской путем окунания ее в ванну с расплавом и последующим выравниванием и удалением излишков припоя с помощью воздушного ножа. Это покрытие, на данный момент самое распространенное, является классическим, наиболее известным и давно используемым. Обеспечивает отличную паяемость печатных плат даже после длительного хранения. Покрытие HAL технологично и недорого. Совместимо со всеми известными методами монтажа и пайки - ручной, пайки волной, оплавлением в печи и пр. К минусам данного вида финишного покрытия можно отнести наличие свинца - одного из наиболее токсичных металлов, запрещенного к использованию на территории Европейского Союза директивой RoHS (Restriction of Hazardous Substances Directives - директива о запрете на использование опасных и токсичных веществ), а также то, что покрытие HAL не удовлетворяет условиям плоскостности контактных площадок для монтажа микросхем с очень высокой степенью интеграции. Покрытие непригодно для технологии разварки кристаллов на плату (COB - Chip on board) и нанесения на концевые контакты (ламели).

HAL бессвинцовый - вариант покрытия HAL, но с использованием бессвинцовых припоев, например, Sn100, Sn96,5/Ag3/Cu0,5, SnCuNi, SnAgNi. Покрытие полностью удовлетворяет требованиям RoHS и имеет очень хорошую сохранность и паяемость. Это финишное покрытие наносится при более высокой температуре чем HAL на основе ПОС, что накладывает повышенные требования к базовому материалу печатной платы и электронным компонентам по температуре. Покрытие совместимо со всеми способами монтажа и пайки как с использованием бессвинцовых припоев (что наиболее рекомендуется), так и с использованием оловянно-свинцовых припоев, но требует внимательного отношения к температурному режиму пайки. По сравнению с HAL на основе Sn/Pb, данное покрытие является более дорогим за счет большей стоимости бессвинцовых припоев а также за счет большей энергоемкости.

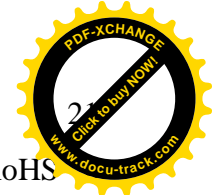
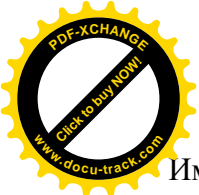
Основная проблема, связанная с покрытием HAL, - это существенная неравномерность толщины покрытия. Проблема особенно актуальна для компонентов с малым шагом выводов, например QFP с шагом 0,5 мм и менее, BGA с шагом 0,8 мм и менее. Толщина покрытия может варьироваться от 0,5 мкм до 40 мкм в зависимости от геометрических размеров контактной площадки и от неравномерности воздействия воздушного ножа. Также в результате термоудара при нанесении HASL возможно коробление печатной платы в виде прогиба/кривизны. Это особенно актуально для плат с толщиной <1,0 мм и для плат с несимметричным стеком слоев, несбалансированных по меди, имеющих несимметричные по слоям сплошные медные заливки, ряды металлизированных отверстий, а также для бессвинцового покрытия.

Иммерсионное золото (ENIG - Electroless Nickel/Immersion Gold) - покрытие семейства Ni/Au. Толщина покрытия: Ni 3-7 мкм, Au 0,05-0,1 мкм. Наносится химическим способом через окна в паяльной маске. Широко распространенное бессвинцовое покрытие, обеспечивающее плоскостность контактных площадок, хорошую паяемость, высокую поверхностную проводимость контактных площадок и длительный срок хранения. Отлично подходит для применения компонентов с мелким шагом а также для внутрисхемного тестирования. Покрытие полностью удовлетворяет требованиям RoHS. Совместимо со всеми способами монтажа и пайки. Более дорогое, по сравнению с HASL.



Имеется множество производителей химикатов для нанесения иммерсионного золота, технологии его нанесения различаются от производителя к производителю химикатов. Конечный результат также зависит от выбора химикатов и техпроцесса нанесения. Некоторые химикаты могут не сочетаться с конкретным типом паяльной маски. Данный тип покрытия склонен к образованию двух типов критических дефектов - "черной площадки" (black pad, несмачиваемости поверхности площадки припоем) и растрескивания при механических или термических нагрузках (растрескивание происходит между слоем никеля и меди, по слою интерметаллида). Также при нанесении покрытия следует контролировать количество золота для предотвращения охрупчивания паяного соединения. Точное следование технологии нанесения иммерсионного золота и своевременная замена растворов гарантируют качество покрытия и отсутствие дефекта black pad. Для предотвращения растрескивания при механических нагрузках можно рекомендовать увеличение толщины печатной платы до 2,0 мм и более при использовании BGA корпусов размером более 25x25 мм или при размере платы более 250 мм. Увеличение толщины платы уменьшает механические нагрузки на компоненты при изгибании платы.

Gold Fingers - покрытие семейства Ni/Au. Толщина покрытия: Ni 3-5 мкм, Au 0,5-1,5 мкм. Наносится электрохимическим осаждением (гальваника). Используется для нанесения на концевые контакты и ламели. Имеет высокую механическую прочность, стойкость к истиранию и неблагоприятному воздействию окружающей среды. Незаменимо там, где важно обеспечить надежный и долговечный электрический контакт.



Иммерсионное олово - химическое покрытие, удовлетворяющее требованиям RoHS обеспечивающее высокую плоскостность печатных площадок платы. Технологичное покрытие совместимое со всеми способами пайки. Вопреки распространенному неверному мнению, основанному на опыте использования устаревших типов покрытия, иммерсионное олово обеспечивает хорошую паяемость после достаточно длительного хранения - гарантийный срок хранения 6 мес. (паяемость покрытия сохраняется до года и более при правильном хранении). Такие длительные сроки сохранения хорошей паяемости обеспечиваются введением подслоя органометалла в качестве барьера между медью контактных площадок и непосредственно оловом. Барьерный подслоя предотвращает взаимную диффузию меди и олова, образование интерметаллидов и рекристаллизацию олова. Финишное покрытие иммерсионным оловом с подслоем органометалла, при толщине около 1 мкм, имеет ровную, плоскую поверхность, сохраняет паяемость и возможность нескольких перепаек даже после достаточно длительного хранения.

OSP (от английского Organic Solderability Preservatives) - группа органических финишных покрытий, наносимых непосредственно на медь контактных площадок и обеспечивающих защиту медной поверхности от окисления в процессе хранения и пайки. С уменьшением шага компонентов интерес к покрытиям, обеспечивающим необходимую плоскостность, и, в частности, к OSP, постоянно растет. В последнее время покрытия OSP бурно прогрессируют, появились разновидности покрытий, обеспечивающих многопроходную пайку без окисдации меди даже при достаточно больших перерывах по времени между проходами (дни). Различают тонкое, около 0,01 мкм, покрытие и относительно толстое покрытие 0,2 - 0,5 мкм и более. Для обеспечения двух- или многопроходной пайки следует выбирать толстое покрытие. OSP обеспечивает плоскую поверхность контактных площадок, не содержит свинца и удовлетворяет требованиям RoHS, при соблюдении правил хранения и обращения обеспечивает очень надежное паяное соединение. Тонкое покрытие OSP стоит дешевле, чем HAL. Толстое - практически столько же, сколько и HAL.

Вместе с тем, OSP не обеспечивает покрытие торцов медной контактной площадки припоем в процессе оплавления. Растекаемость припоя по поверхности хуже, чем при покрытии HASL. Поэтому при нанесении пасты отверстия в трафарете следует делать размером, равным контактной площадке. Иначе не вся поверхность площадки будет покрыта припоем (хотя этот дефект является только косметическим, надежность соединения остается очень хорошей). Непокрытая припоем медная поверхность со временем окисляется, что может повлиять негативно на проведение ремонта. Также существует проблема смачивания металлизированных отверстий при пайке волной. Необходимо наносить достаточно большое количество флюса перед пайкой, флюс должен попасть в отверстия, чтобы припой смочил отверстие изнутри и образовал галтель на обратной стороне платы. К недостаткам данного покрытия также относятся: малое время хранения перед использованием, несовместимость с терпеновыми растворителями, ограничения по тестопригодности при внутрисхемном и функциональном тестах (что частично решается нанесением паяльной пасты на контрольные точки). Если вы остановили свой выбор на OSP, рекомендуем применять покрытия ENTEK фирмы Enthone (ENTEK PLUS, ENTEK PLUS HT), как обеспечивающие лучшее сочетание смачиваемости, надежности соединения и многопроходности.

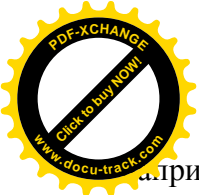
4. Защитные и другие виды покрытий печатной платы

Рассмотрим функциональное назначение и материалы покрытий печатной платы.

- Паяльная маска — наносится на поверхность платы для защиты проводников от случайного замыкания и грязи, а также для защиты стеклотекстолита от термоударов при пайке. Маска не несет другой функциональной нагрузки и не может служить защитой от влаги, плесени, пробоя и т. д. (за исключением случаев применения специальных видов масок).

- Маркировка — наносится на плату краской поверх маски для упрощения идентификации самой платы и расположенных на ней компонентов.

- Отслаиваемая маска — наносится на заданные участки платы, которые надо временно защитить,



...например, от пайки. В дальнейшем ее легко удалить, так как она представляет собой резиноподобный компаунд и просто отслаивается.

- Карбоновое контактное покрытие — наносится в определенные места платы как контактные поля для клавиатур. Покрытие имеет хорошую проводимость, не окисляется и износостойко.

- Графитовые резистивные элементы — могут наноситься на поверхность платы для выполнения функции резисторов. К сожалению, точность выполнения номиналов невысока — не точнее $\pm 20\%$ (с лазерной подгонкой — до 5%).

- Серебряные контактные перемычки — могут наноситься как дополнительные проводники, создавая еще один проводящий слой при недостатке места для трассировки. Применяются в основном для однослойных и двусторонних печатных плат.

Итогом данного пункта является обоснованный выбор и указание технических характеристик материала ПП и финишного покрытия.

5.2 Выбор способа монтажа и особенности размещения и маркировки элементов.

Печатная плата - компонент схемы. Лишь в редких случаях печатная плата аналоговой схемы может быть разведена так, чтобы вносимые ею воздействия не оказывали никакого влияния на работу схемы. В то же время, любое такое воздействие может быть минимизировано так, чтобы характеристики аналоговой схемы устройства были такими же, как и характеристики модели и прототипа.

Макетирование

Разработчики цифровых схем могут скорректировать небольшие ошибки на изготовленной плате, дополняя ее перемычками или, наоборот, удаляя лишние проводники, внося изменения в работу программируемых микросхем и т.п., переходя очень скоро к следующей разработке. Для аналоговой схемы дело обстоит не так. Некоторые из распространенных ошибок, обсуждаемых в этой статье, не могут быть исправлены дополнением перемычек или удалением лишних проводников. Они могут и будут приводить в нерабочее состояние печатную плату целиком.

Очень важно для разработчика цифровых схем, использующего такие способы исправления, прочесть и понять материал, заблаговременно, до передачи проекта в производство. Немного внимания, уделенного при разработке, и обсуждение возможных вариантов помогут не только предотвратить превращение печатной платы в утильсырье, но и уменьшить стоимость из-за грубых ошибок в небольшой аналоговой части схемы. Поиск ошибок и их исправление может привести к потерям сотен часов. Макетирование может сократить это время до одного дня или менее. Макетируйте все свои аналоговые схемы.

Источники шума и помех. Шум и помехи являются основными элементами, ограничивающими качественные характеристики схем. Помехи могут как излучаться источниками, так и наводиться на элементы схемы. Аналоговая схема часто располагается на печатной плате вместе с быстродействующими цифровыми компонентами, включая цифровые сигнальные процессоры (DSP).

Высокочастотные логические сигналы создают значительные радиочастотные помехи (RFI). Количество источников излучения шума огромно: ключевые источники питания цифровых систем, мобильные телефоны, радио и телевидение, источники питания ламп дневного света, персональные компьютеры, грозовые разряды и т.д. Даже если аналоговая схема работает в звуковом частотном диапазоне, радиочастотные помехи могут создавать заметный шум в выходном сигнале.

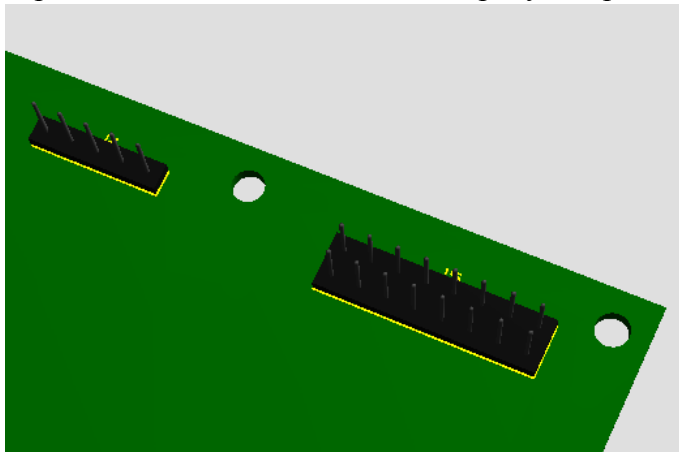
Этап 1 Выбор способа монтажа.

Произвести суммирование установочной площади выбранной элементной базы и умножив на коэффициент неплотности (1,2 – 1,5) определить требуемую площадь печатной платы.

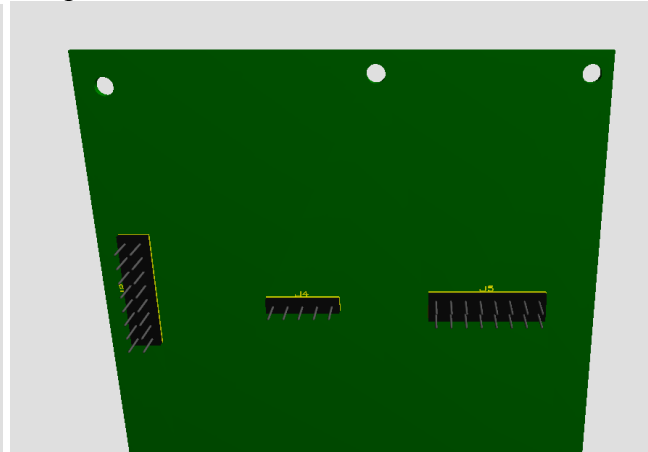
Исходя из размеров и конфигурации платы необходимо выбрать способ установки элементов для вариантов техпроцесса. Особенности технологических схем монтажа электронных компонентов изложены в книге Грачев А. А., Мельник А. А., Панов Л. И. **КОНСТРУИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОННОЙ АППАРАТУРЫ** на основе поверхностного монтажа компонентов NT Press Москва, 2006 стр175 - 182

Этап 2 Анализ и выделение элементов фиксации, коммутации, управления, индикации

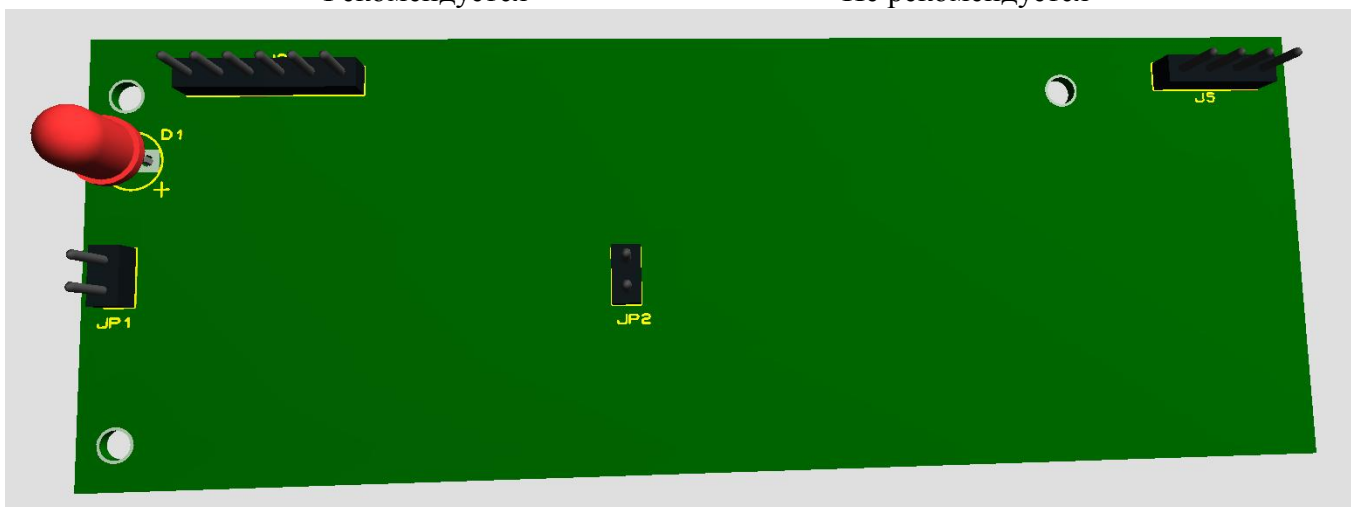
Размещение 1: Элементы фиксации (отверстия и зажимы) обеспечивают требуемую жесткость узлу. Препятствуют расшатыванию элементов. Их количество и конфигурация – предмет отдельных конструкторских расчетов. В проекте следует отталкиваться от предложенных вариантов на шаблонах плат или предусматривать их размещение с собственным обоснованием.



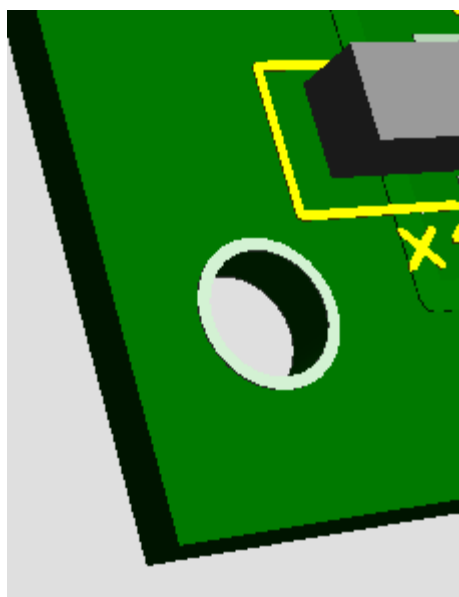
Рекомендуется



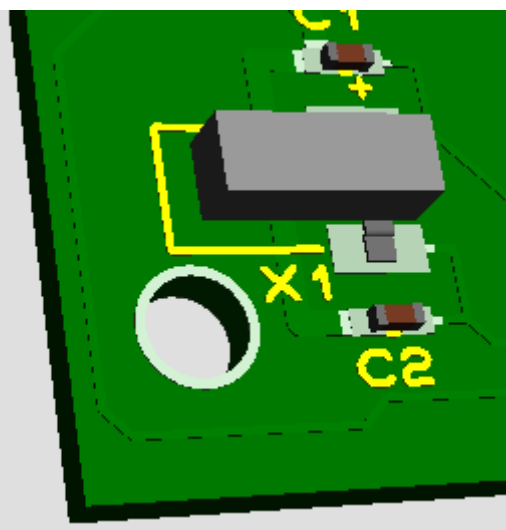
Не рекомендуется



Размещение 2 Элементы коммутации (разъемы) и управления (кнопки) располагают в непосредственной близости к элементам крепления для исключения прогиба. В районе крепления на платах рекомендуется предусматривать защитную зону от трассировки либо выполнять в экранирующем (заземляющем) слоях

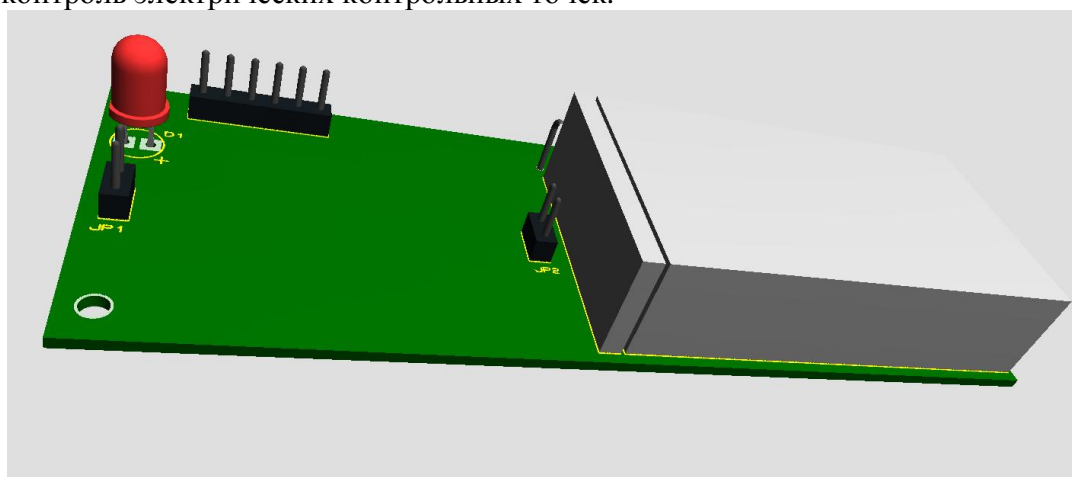


Рекомендуется

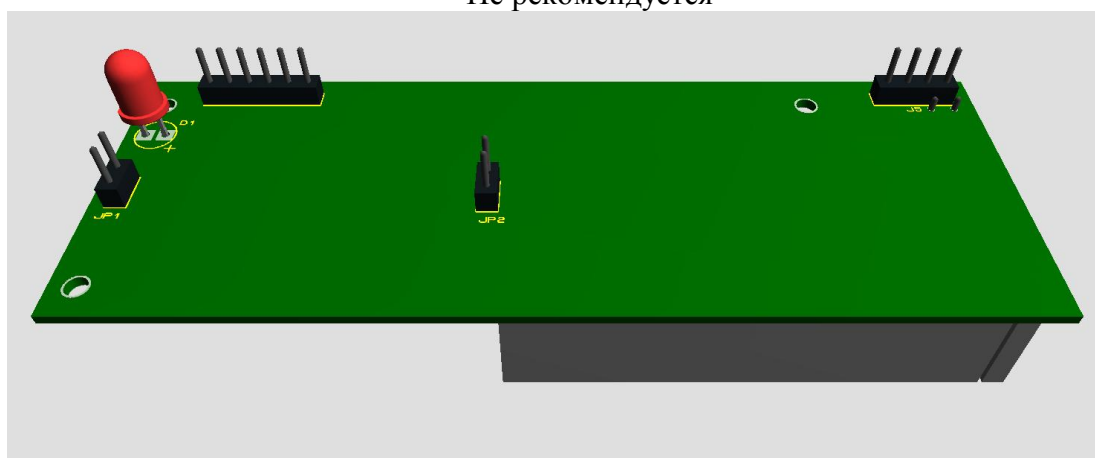


Не рекомендуется

Размещение 3 Массивные элементы следует располагать ближе к краю платы или вводить дополнительные элементы крепления. Они не должны закрывать органы крепления и коммутации и затруднять контроль электрических контрольных точек.



Не рекомендуется

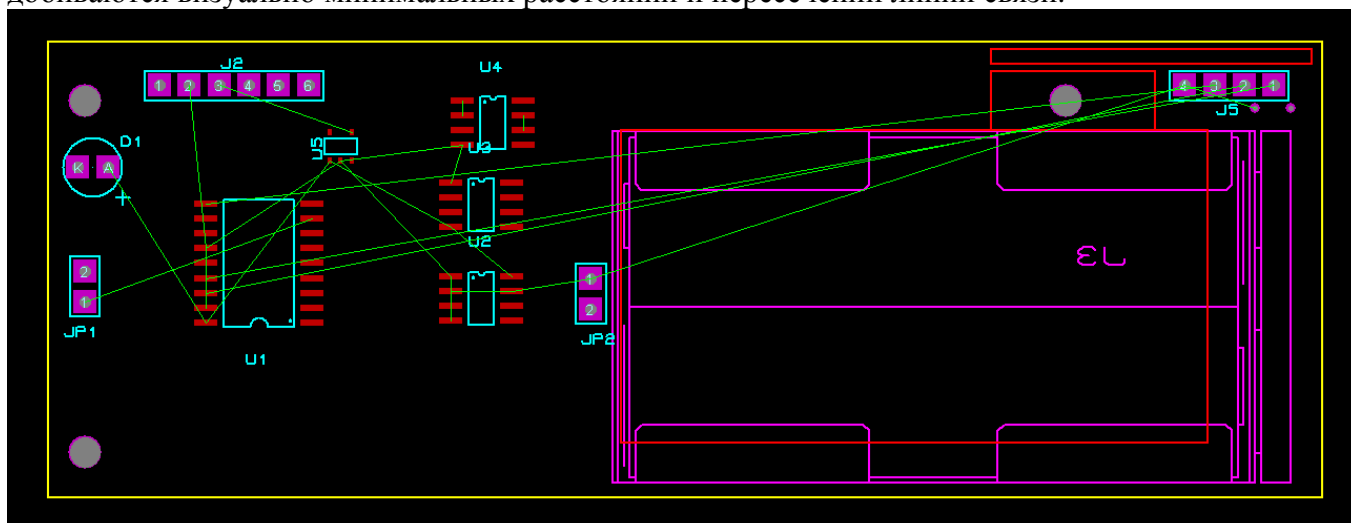


Рекомендуется

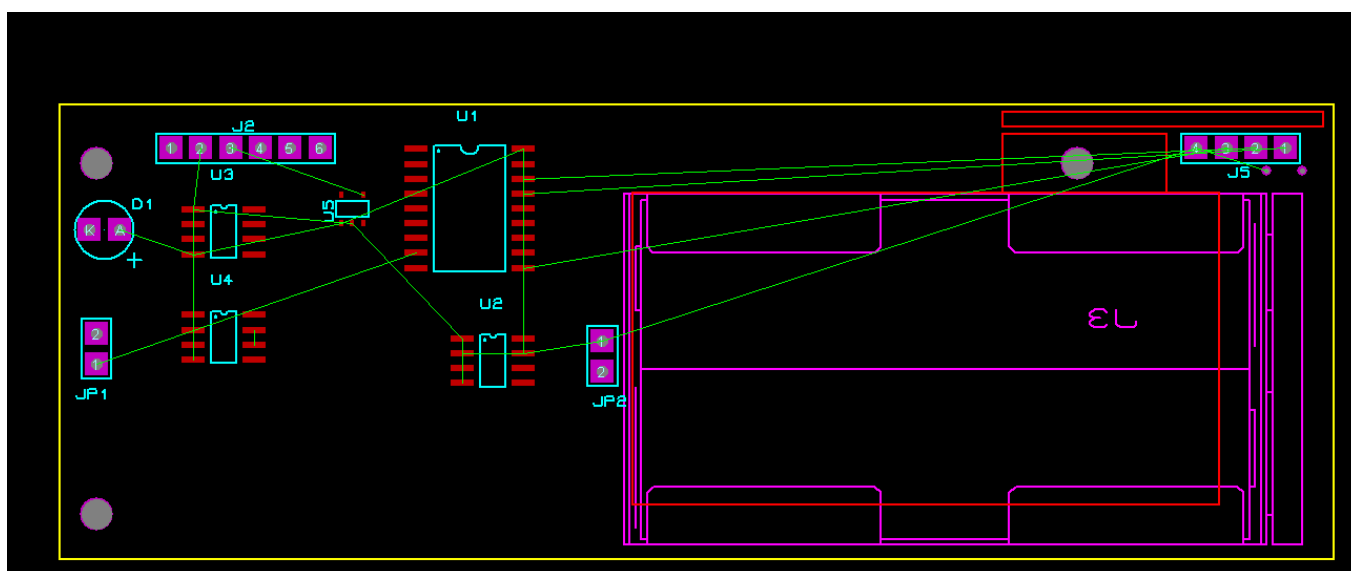
Габаритные элементы сильно выступающие над платой размещают в стороне от элементов коммутации и управления, переносят на другую сторону или выносят за плату.

Размещение 4 Микросхемы и нагруженные (тепловые и электрические элементы)

Располагая начиная с элементов с максимальным количеством выводом и вращая 1, добиваются визуально минимальных расстояний и пересечении линий связи.

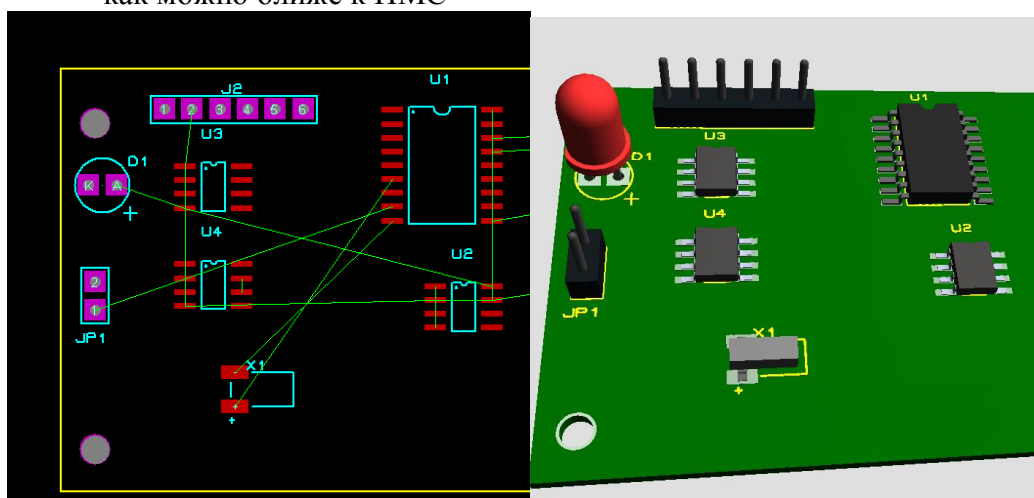


Не рекомендуется

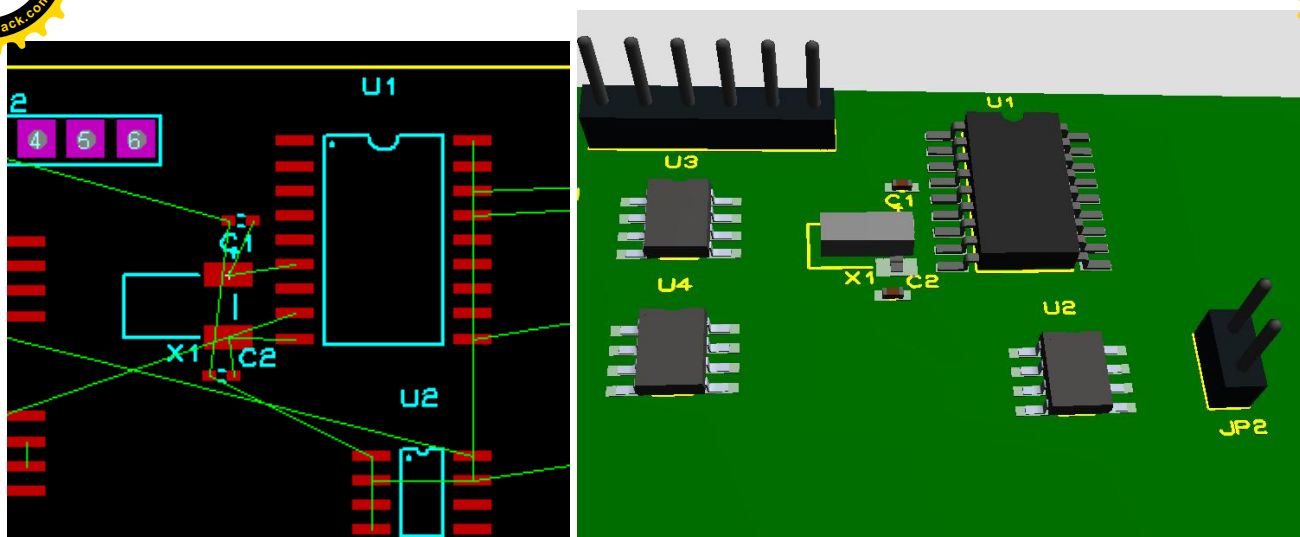


Рекомендуется

Кварцевые резонаторы и частотоподающие элементы (конденсаторы) располагают как можно ближе к ИМС

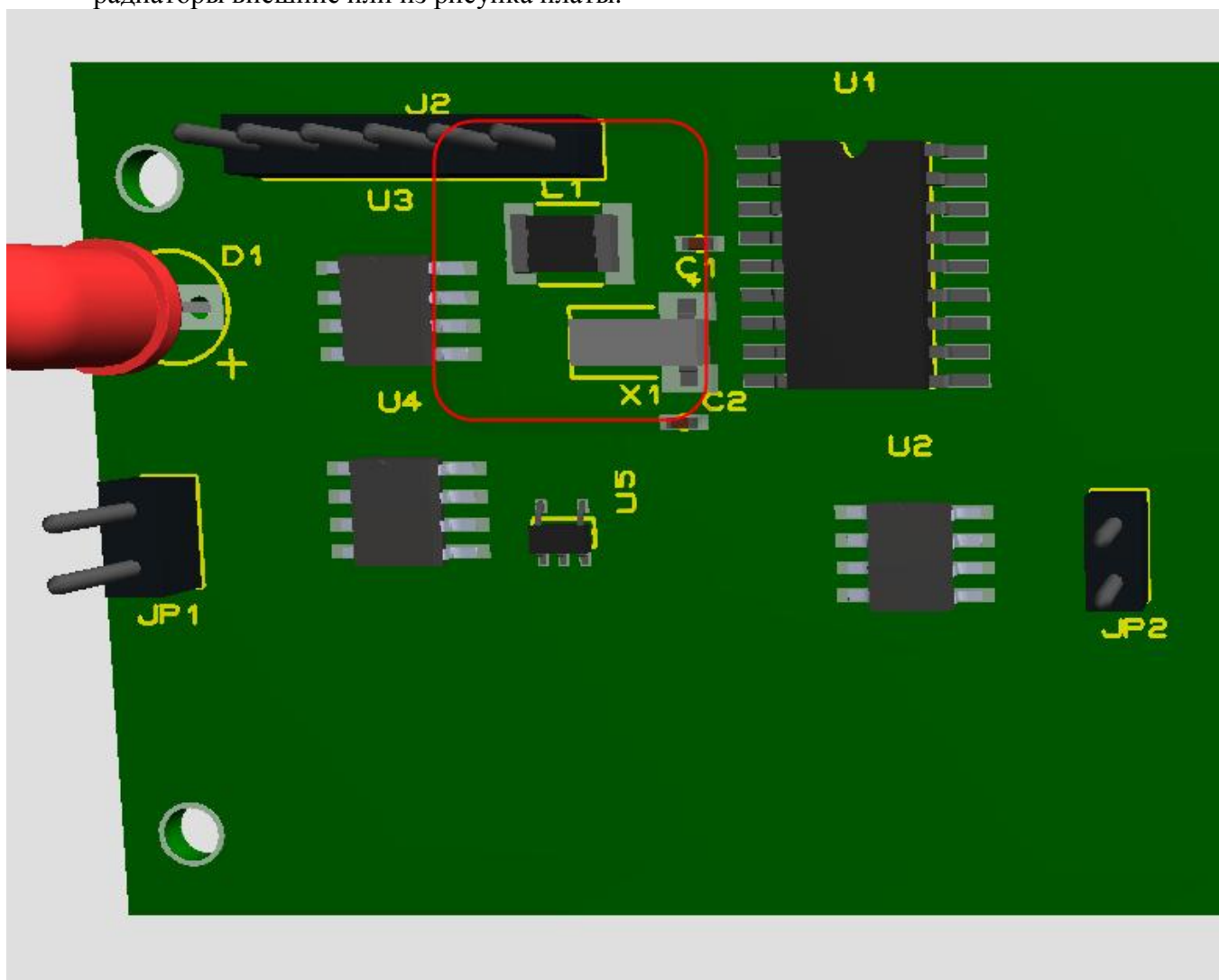


Не рекомендуется

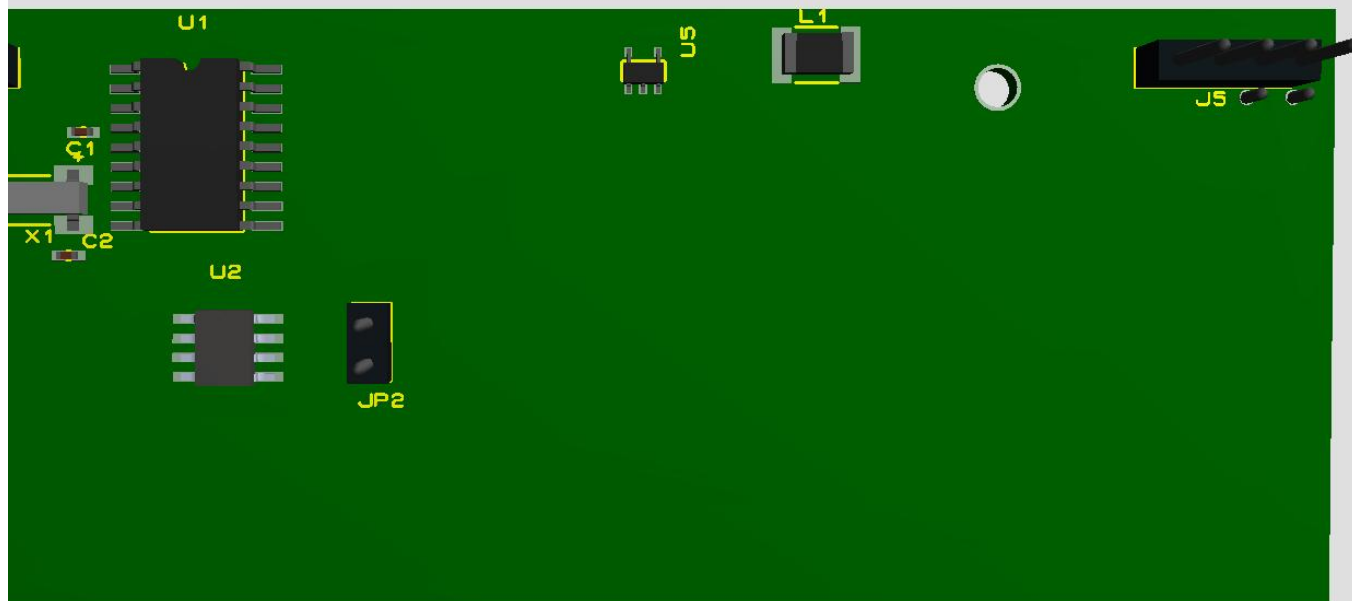


Рекомендуется

Сильнонагревающиеся элементы и элементы излучающие сильные электромагнитные поля устанавливают подальше от основных и предусматривают радиаторы внешние или из рисунка платы.

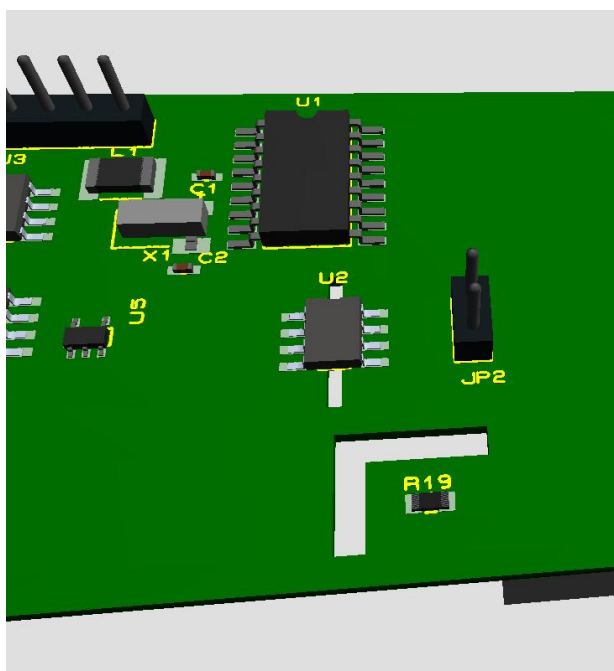


Не рекомендуется

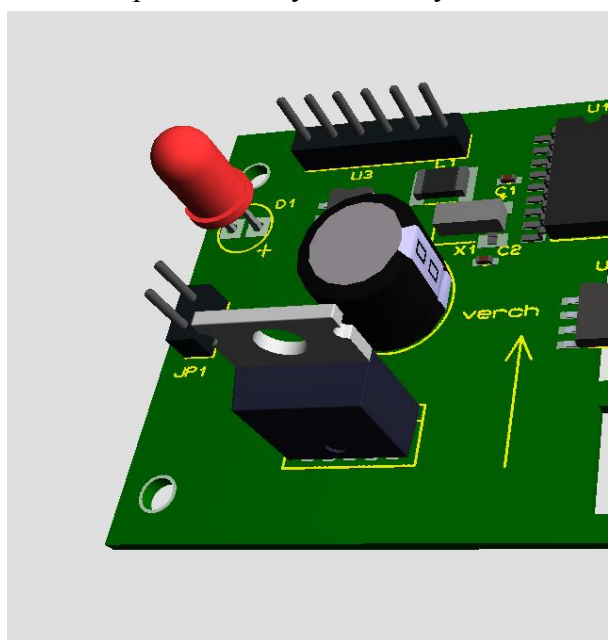


Рекомендуется

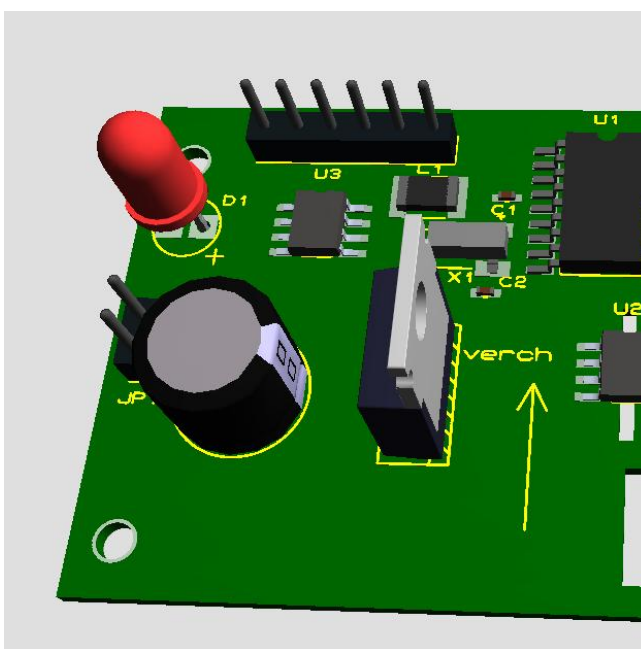
. Высоковольтные элементы устанавливают на максимальном расстоянии и отделяют просечкой в плате



Размещение 5 Электролитические конденсаторы не выдерживают высоких температур – поэтому их следует относить от греющихся элементов и следить чтобы поток горячего воздуха не обдувал их



Не рекомендуется



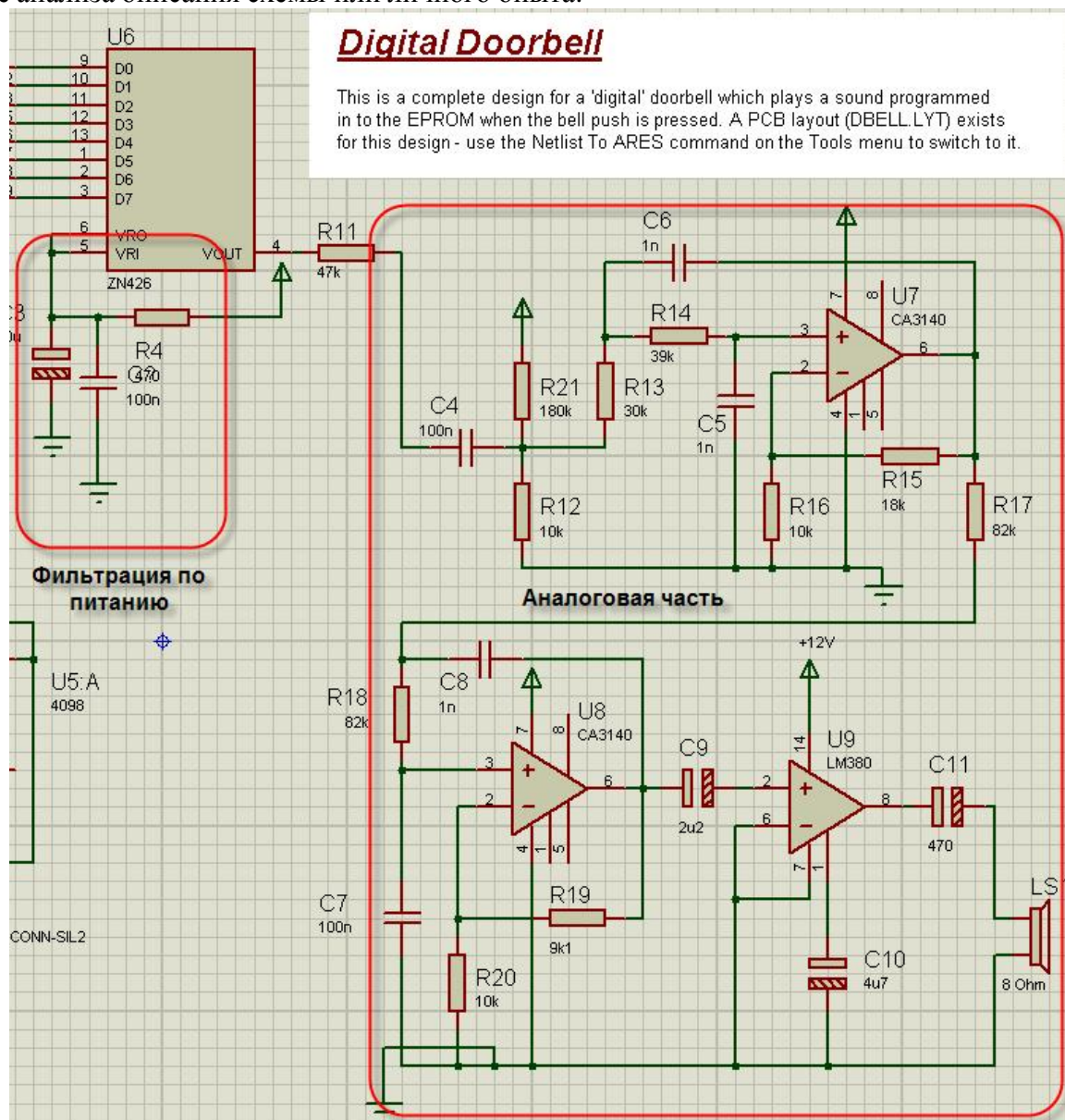
Рекомендуется



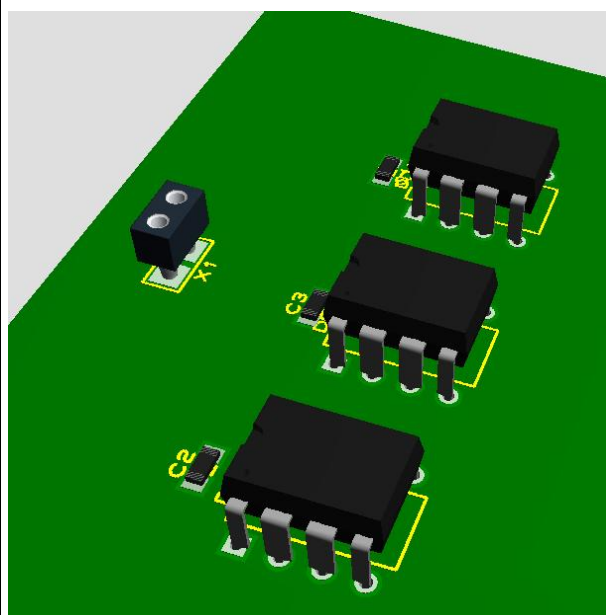
Размещение 6 Размещение аналоговых и фильтрующих элементов по питанию

Размещение элементов аналоговых групп следует проводить с обеспечением минимального расстояния от источника к приемнику.

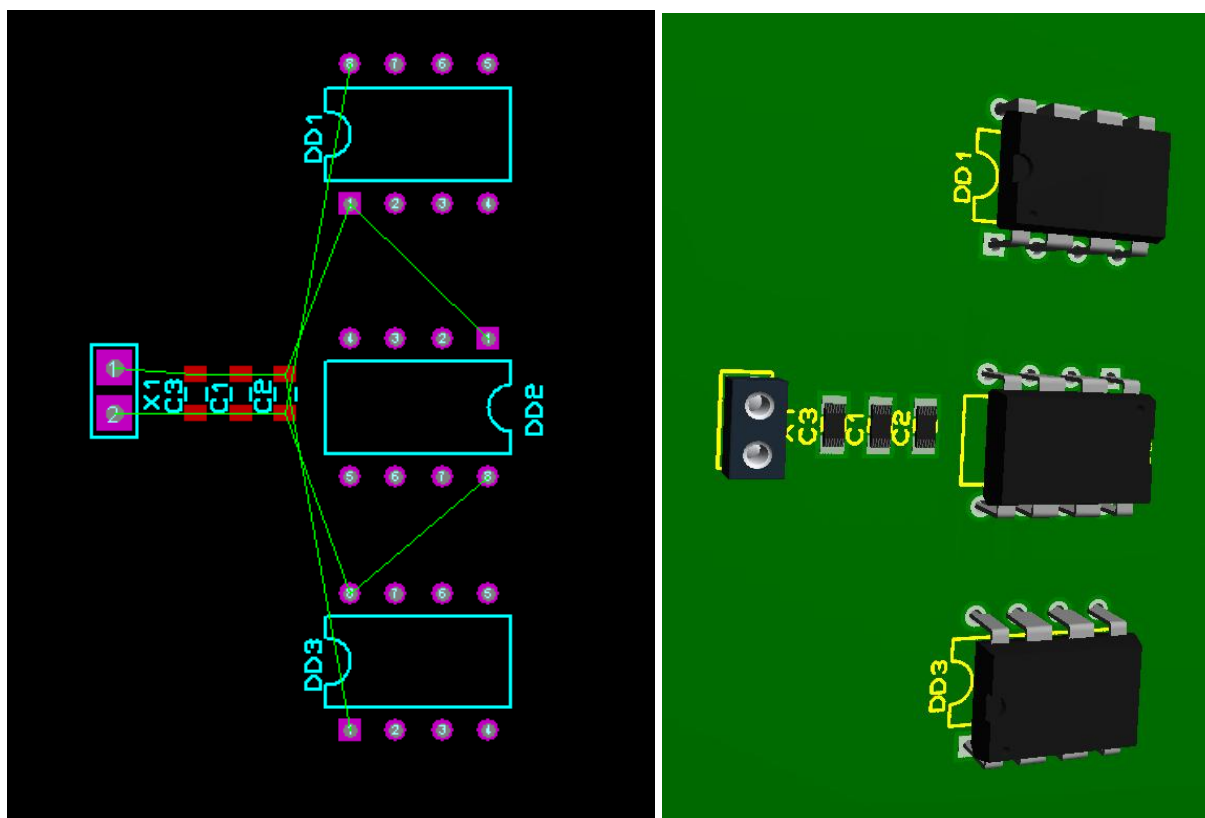
Размещение элементов фильтрации по питанию – напротив в непосредственной близости к нагрузке. Понять какой из элементов какой части принадлежит можно лишь на основе анализа описания схемы или личного опыта.



Итак предположим имеется схема



Правильное



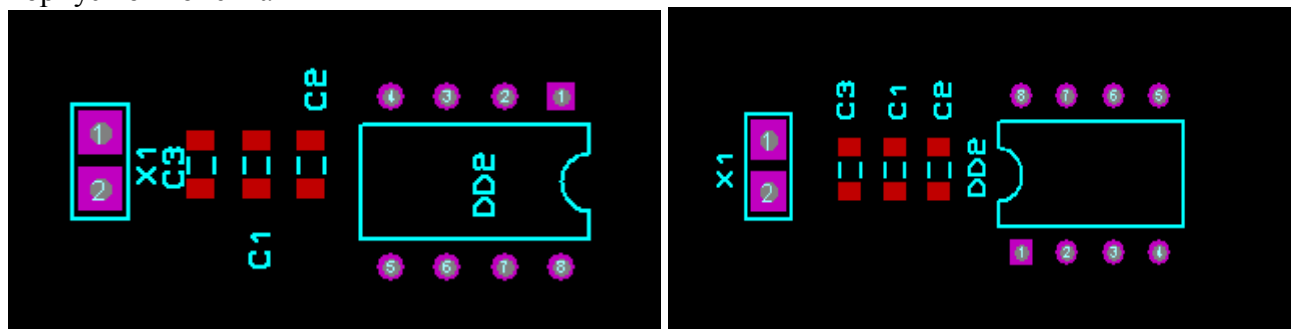
Неправильное

Размещение 7 Остальные элементы.

Их расположение обусловлено минимальными расстояниями и электромагнитной экранировкой. Возможно использование автоматического размещения

Этап 3 Маркировка.

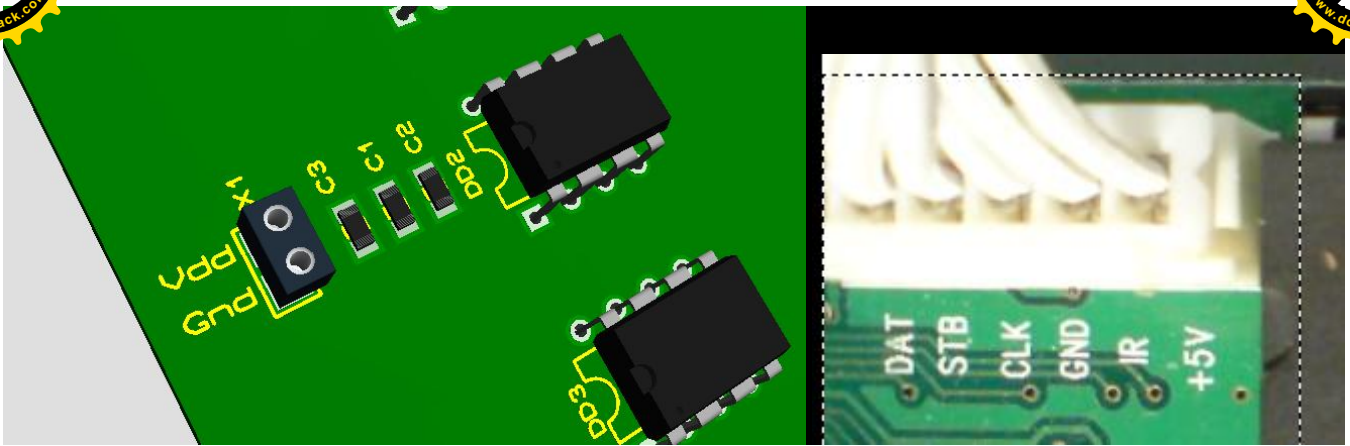
Нанесение маркировки должно быть наглядным. Надписи должны располагаться в одинаковых плоскостях. Группироваться по одинаковому признаку и не должны попадать под корпус компонента



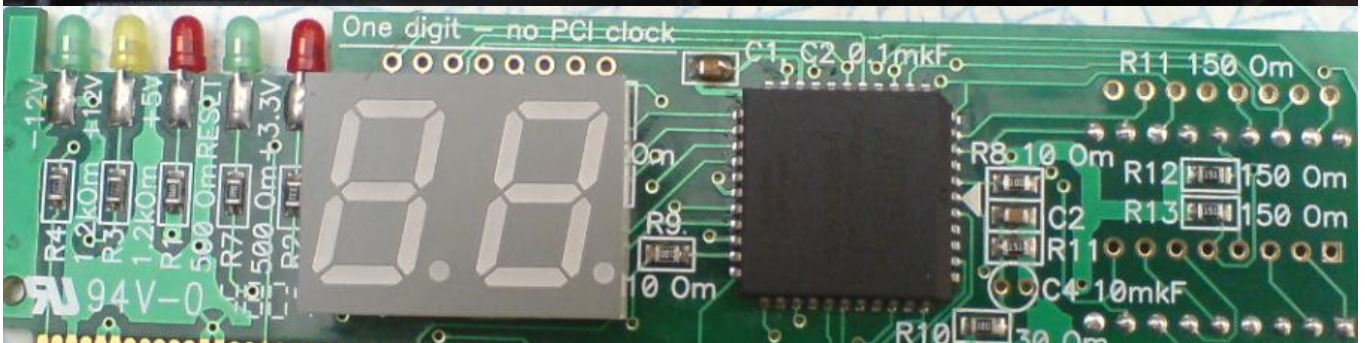
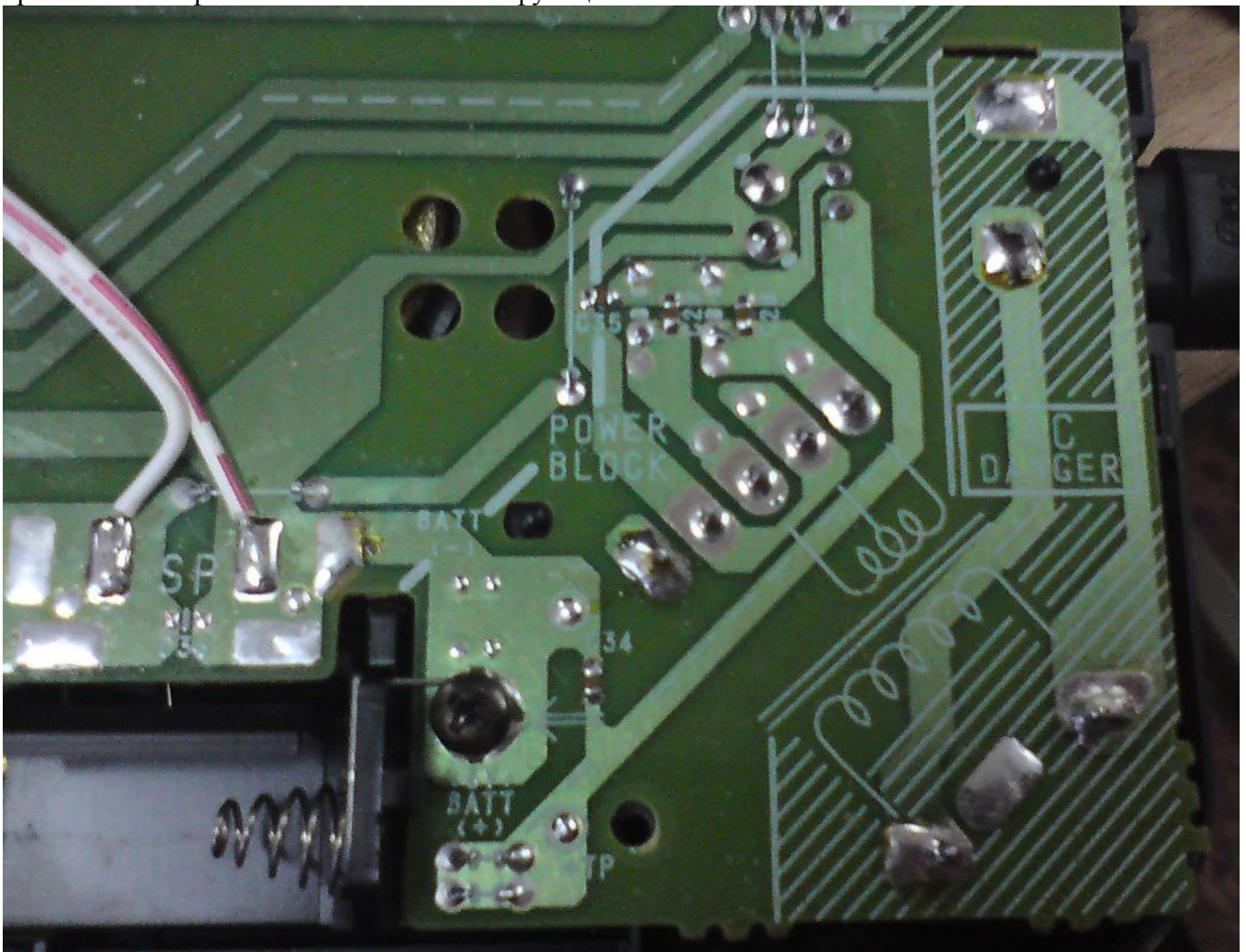
Неправильное

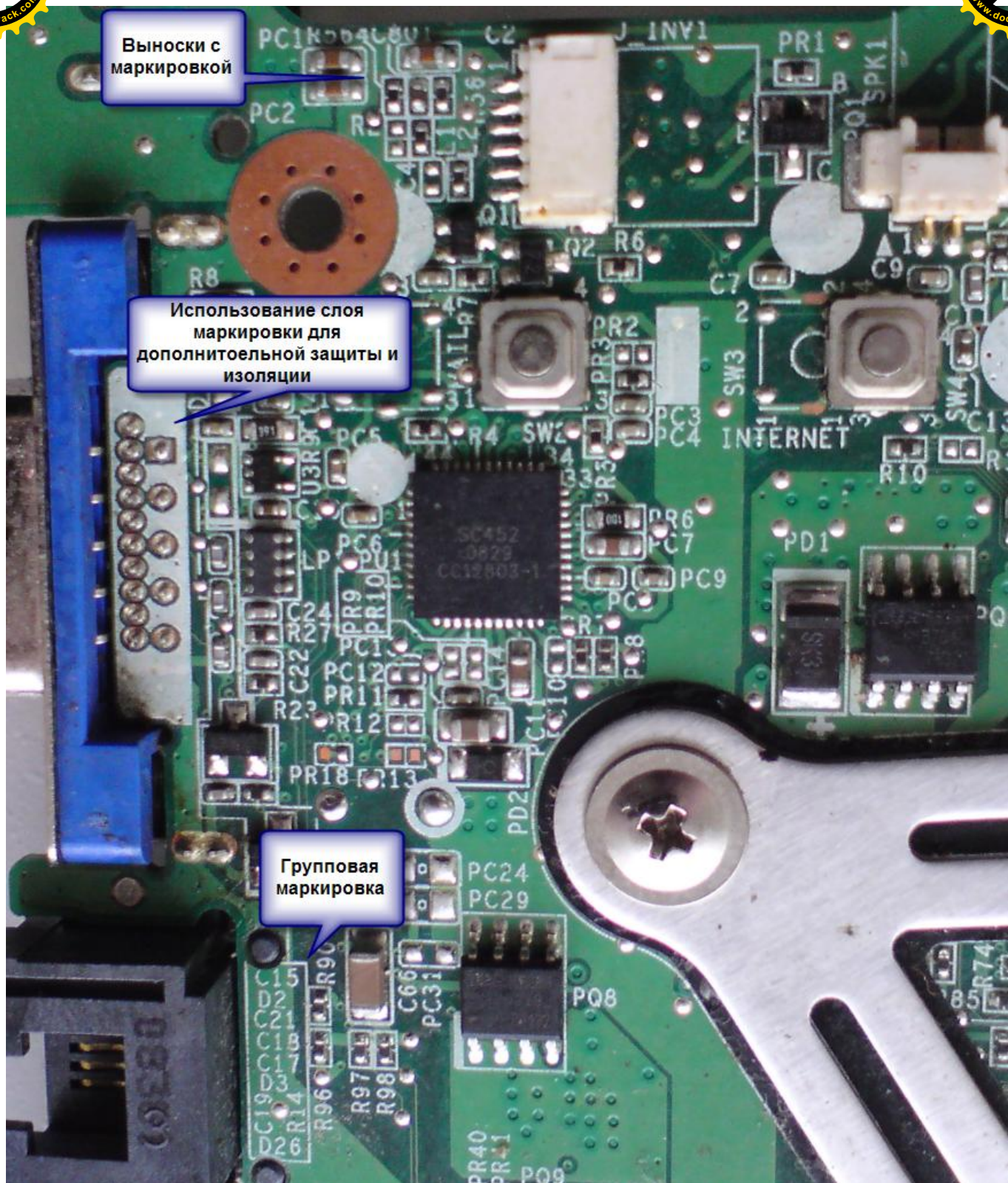
Правильное

Возле разъемов следует приводить надписи соответствующие его функциональному назначению.

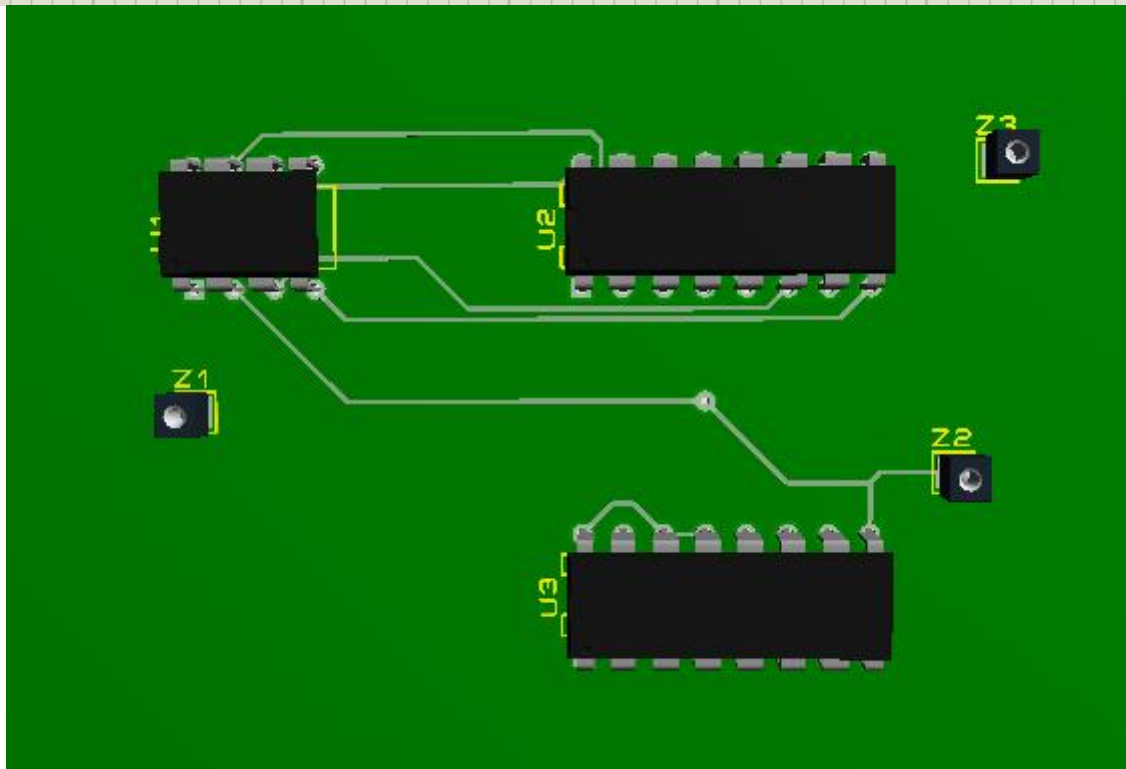
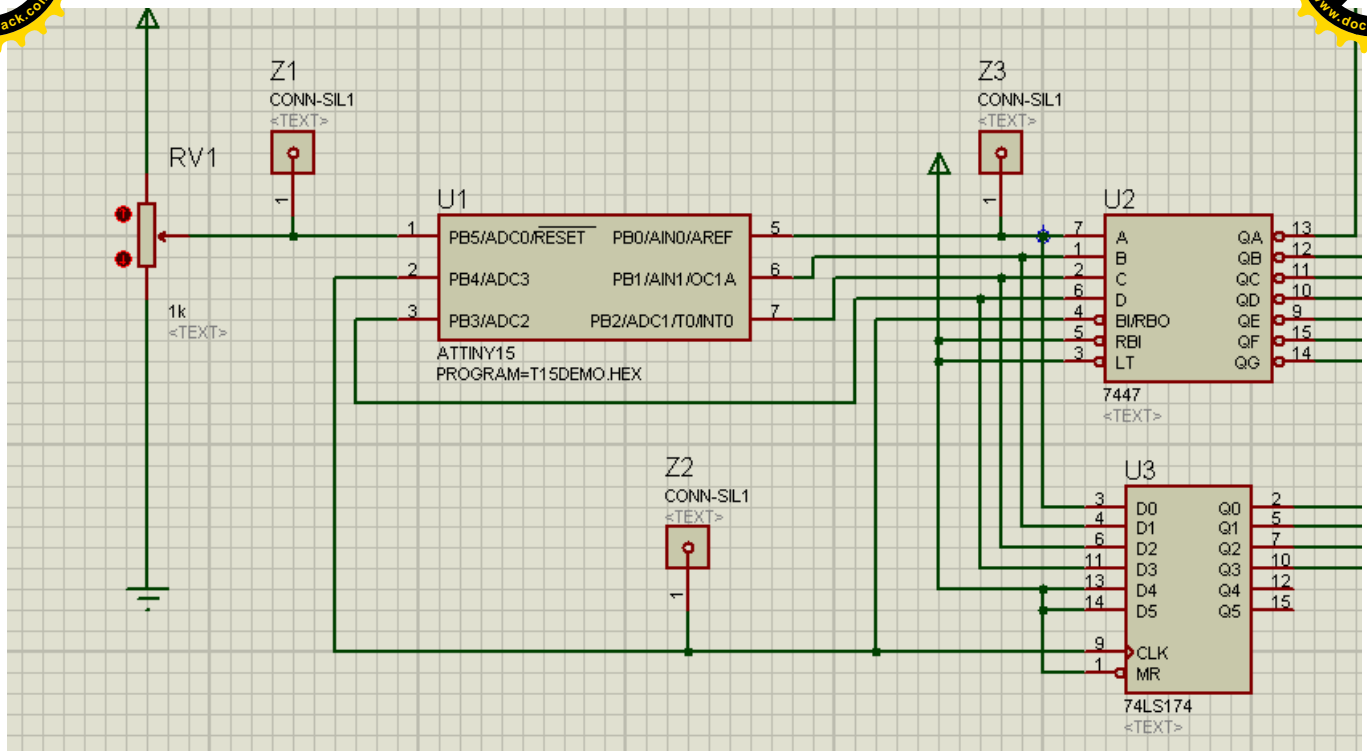


Опасные участки с высоким напряжением обводят для привлечения внимания. Указывают места крепления и марки винтов. Указывается функциональное назначение блока.





На печатной плате обязательно должны быть созданы и обозначены контрольные точки буквами Z (смотри контрольную КИП). Проще всего их создать поместив на схему разъемы типа sil



5.3 Расчет элементов печатного монтажа.

5.3.1 Результаты данных моделирования.

В этом пункте привести таблицу с перечислением основных цепей и результатов моделирования:

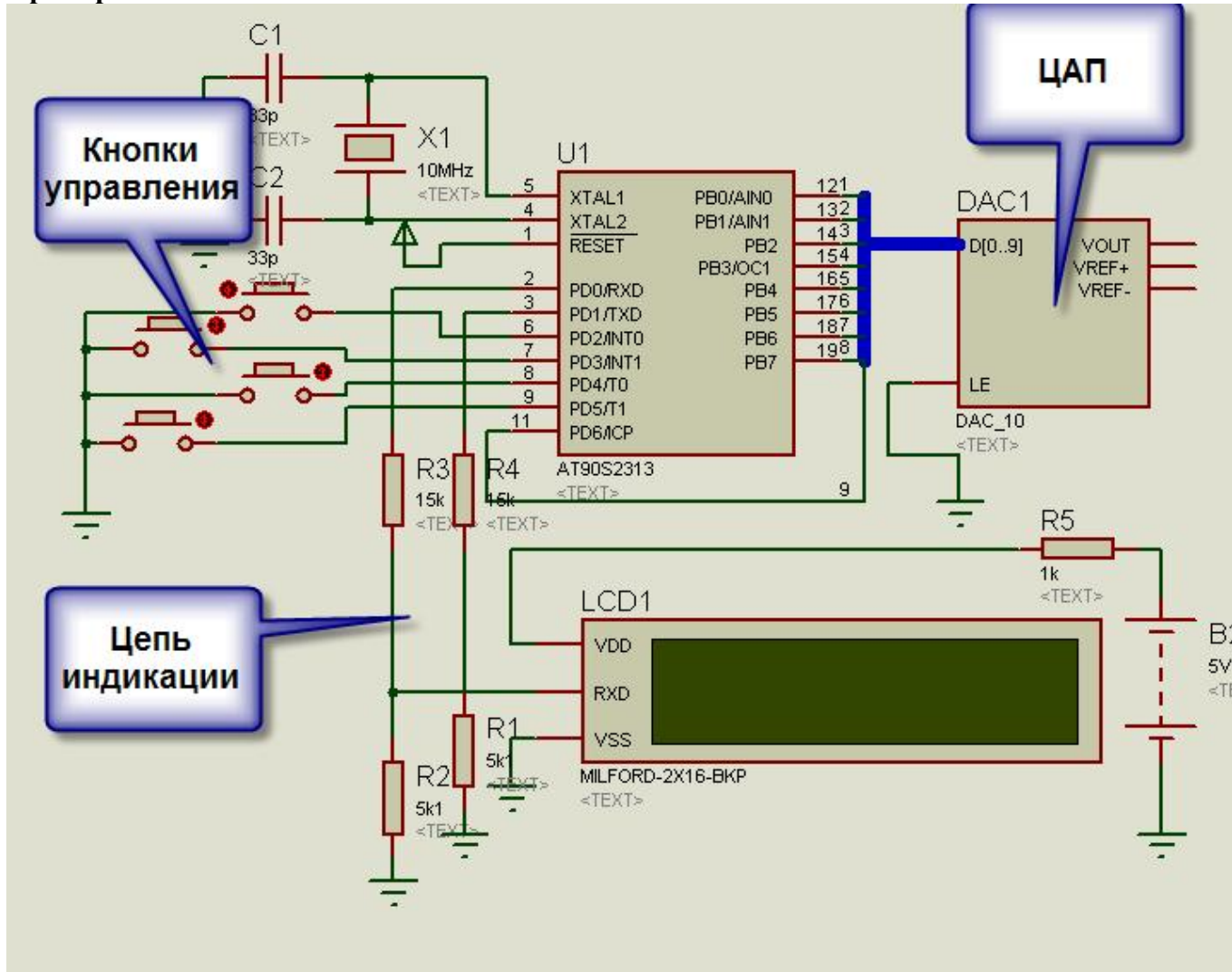
	Максимальный ток	Максимальное напряжение	Максимальная частота
Сигнальные аналоговые			
Сигнальные цифровые			
Питания (по напряжениям)			

3.2 Расчет токов и напряжений на выводах микросхем.

Существенным недостатком Proteus является то что при моделировании не учитываются токи потребления микроконтроллера (из-за сложности моделирования). Поэтому вы должны проанализировав схему и документацию на МК просчитать максимально возможные токи и напряжения у микроконтроллера и микросхем. **Сделать это можно в следующей последовательности:**

1. Анализируется алгоритм работы устройства и описание принципиальной схемы с целью выяснения количества портов и режима их работы

Пример 1:



Читая документацию на МК удалось выяснить:

DC Characteristics

$T_A = -40^{\circ}\text{C}$ to 85°C , $V_{CC} = 2.7\text{V}$ to 6.0V (unless otherwise noted)

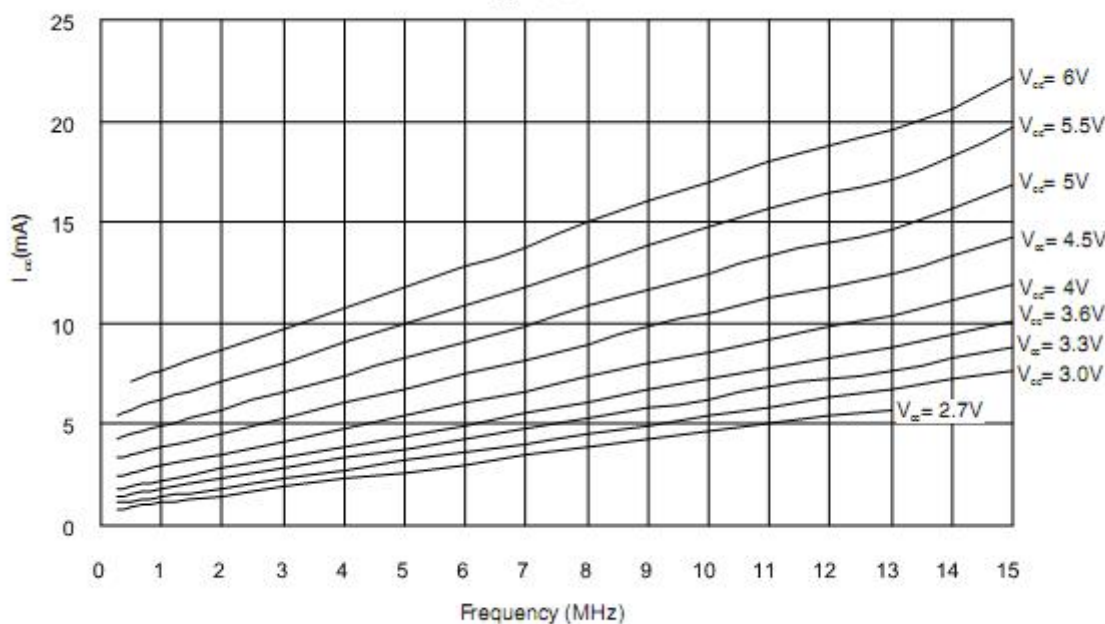
Symbol	Parameter	Condition	Min	Typ	Max	Units
V_{IL}	Input Low Voltage	(Excl.)			$0.3 V_{CC}^{(1)}$	V
V_{IL1}	Input Low Voltage	(XTAL)			$0.3 V_{CC}^{(1)}$	V
V_{IH}	Input High Voltage	(Excl.)			$V_{CC} + 0.5$	V
V_{IH1}	Input High Voltage	(XTAL)				
V_{IH2}	Input High Voltage	(RESET)	$0.85 V_{CC}^{(2)}$			
V_{OL}	Output Low Voltage ⁽³⁾ (Ports B, D)	$I_{OL} = 20\text{ mA}$, $V_{CC} = 5\text{V}$ $I_{OL} = 10\text{ mA}$, $V_{CC} = 3\text{V}$				
V_{OH}	Output High Voltage ⁽⁴⁾ (Ports B, D)	$I_{OH} = -3\text{ mA}$, $V_{CC} = 5\text{V}$ $I_{OH} = -1.5\text{ mA}$, $V_{CC} = 3\text{V}$	4.3 2.3			V
I_{IL}	Input Leakage Current I/O pin	$V_{CC} = 6\text{V}$, pin low (absolute value)			1.5	μA
I_{IH}	Input Leakage Current I/O pin	$V_{CC} = 6\text{V}$, pin high (absolute value)				nA
RRST	Reset Pull-up Resistor					k Ω
R _{IO}	I/O Pin Pull-up Resistor					k Ω
I_{CC}	Power Supply Current	Active Mode, $V_{CC} = 3\text{V}$, 4 MHz Idle Mode $V_{CC} = 3\text{V}$, 4 MHz			3.0 1.0	mA
I_{CC}	Power-down Mode ⁽⁵⁾	WDT enabled, $V_{CC} = 3\text{V}$ WDT disabled, $V_{CC} = 3\text{V}$		9.0 <1.0	15.0 2.0	μA
V_{ACIO}	Analog Comparator Input Offset Voltage	$V_{CC} = 5\text{V}$ $V_{in} = V_{CC}/2$			40.0	mV
I_{ACLK}	Analog Comparator Input Leakage Current	$V_{CC} = 5\text{V}$ $V_{in} = V_{CC}/2$	-50.0		50.0	nA
t_{ACPD}	Analog Comparator Propagation Delay	$V_{CC} = 2.7\text{V}$ $V_{CC} = 4.0\text{V}$		750.0 500.0		ns

Параметры портов в режиме
выхода

Параметры
портов в режиме
ввода

Потребление ядра
контроллера

ACTIVE SUPPLY CURRENT vs. FREQUENCY
 $T_A = 25^{\circ}\text{C}$

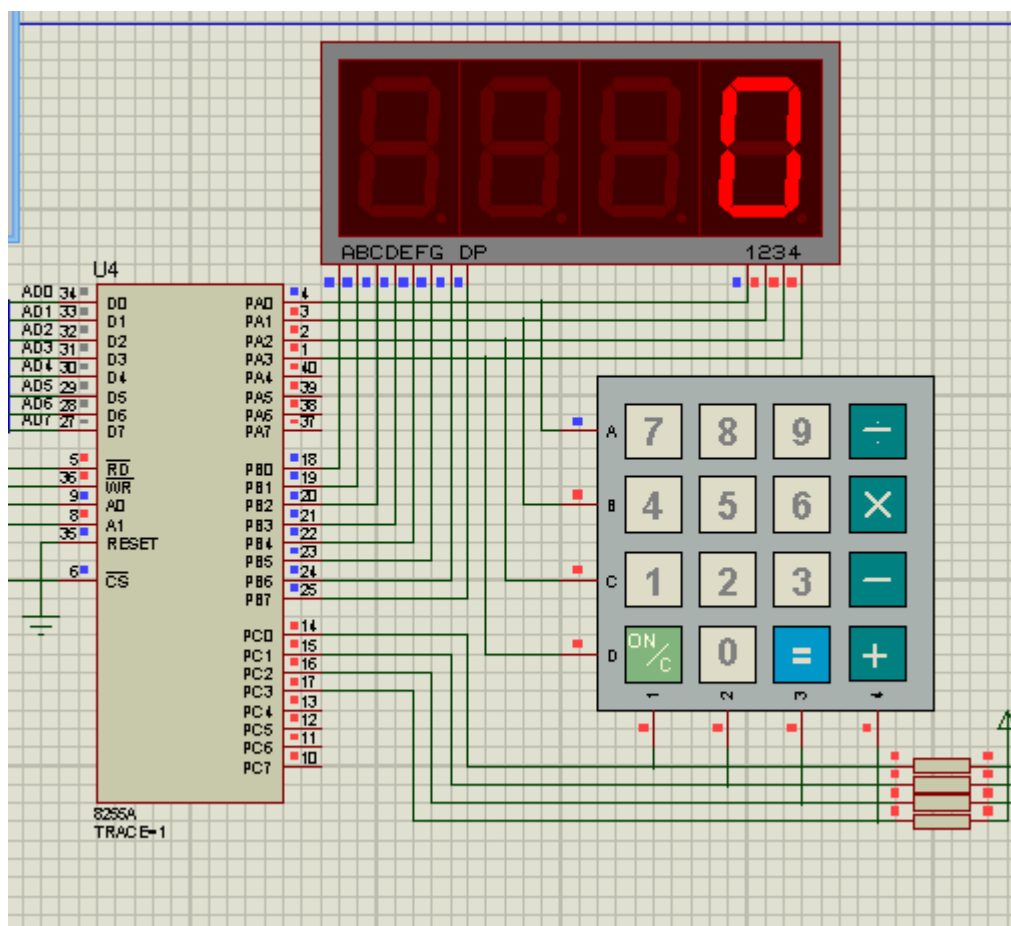


Анализируя схему выяснили:

- тактовая частота 10 МГц что означает потребление ядра при 5 Вольтах 12,5 мА

- Порт PD0-PD1 – работают в режиме выхода на индикатор формируя выходное напряжение через МК. (до 20 mA на порт но с учетом схемы на последовательных резисторах $15\text{ кОм} + 5\text{ кОм} = 20\text{ кОм}$ ток составит $5\text{В} / 20\text{ кОм} = 0.1\text{ мА}$ каждый итого 0,2 мА)
- Порт PD2-PD5 работают в режиме выхода на кнопки через внутренний резистор формируя выходное напряжение через МК. Максимальное значение тока при замыкании кнопки на корпус 20мА. ($4 \times 20 = 80\text{ мА}$)
- Порт PD6 и Порт PB0-PB7 работают в режиме выхода на ЦАП формируя выходное напряжение через МК. Уточнив узнаем что входной ток ЦАП по паспорту не более 1 мА значит $(8 \times 1 = 8\text{ мА})$
- Общее максимальное потребление тока $12,5 + 0,2 + 80 + 8 = 100,7\text{ мА}$

Пример 2



Согласно рисунка видно

Порты PA0-PA3 – выходные для индикатора и клавиатуры

Порты PB0-PB7 – входные для индикатора

PC0-PC3 – входные для клавиатуры

Значит в общем токе будет фигурировать лишь ток портов PA0-PA3

Далее расчет аналогичен

5.3.3. Группировка цепей по функциональному признаку.

Здесь рекомендуется определиться со стратегией трассировки задаваемой в ARES/

Предусматривается три стратегии:

Power (цепи питания)

Signal (цепи аналоговые и частото задающие)

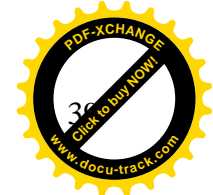
Bus (шина - выходы на индикаторы, АЦП, ЦАП, и порты ввода вывода).

Требуется сгруппировать цепи по принципу указанному на рисунке



Результатам расчета должны стать:

- 38



5.4 Трассировка.

5.4.1 Описание особенностей трассировки узлов устройства

5.4.2 Решение вопросов заземления и экранирования

Рекомендуемая литература

МЕТОДЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ АППАРАТНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Уолт Кестер

НИЗКОВОЛЬТНЫЕ ИНТЕРФЕЙСЫ

Этан Бордо, Иоханнес Хорват, Уолт Кестер

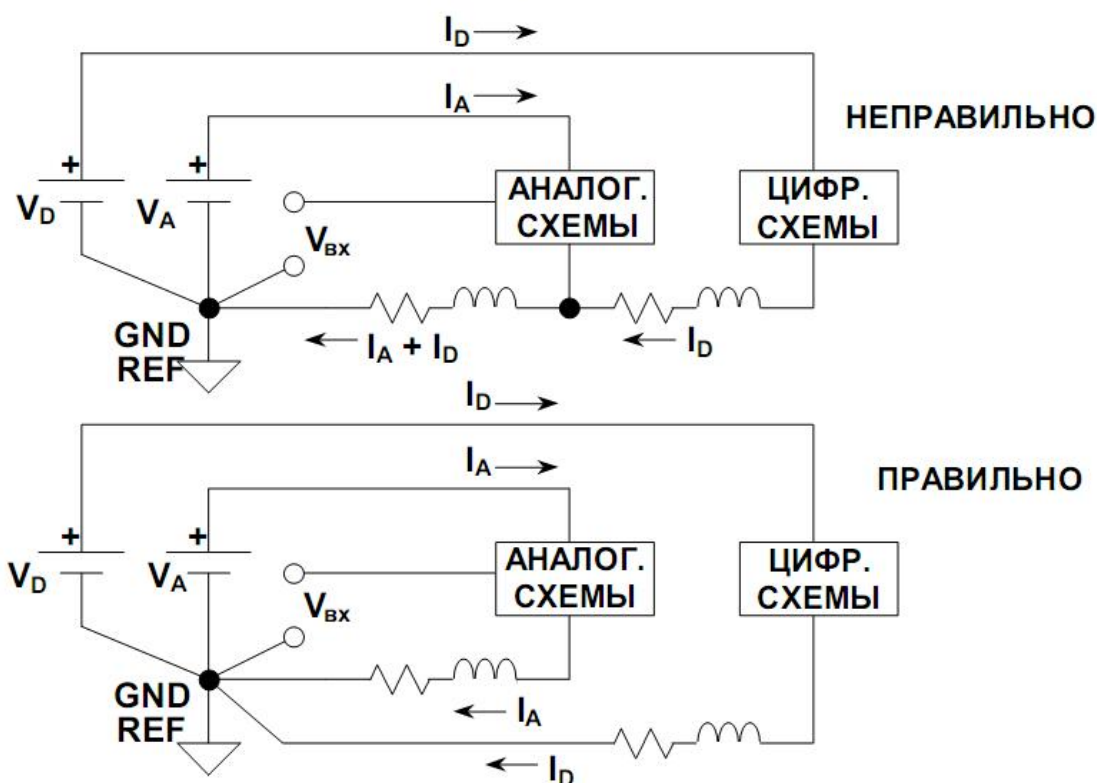
Серия «Библиотека ЭМС»

Л.Н. Кечиев

Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры



ЦИФРОВЫЕ ТОКИ, ПРОХОДЯЩИЕ ПО АНАЛОГОВОМУ ВОЗВРАТНОМУ ТРАКТУ, СОЗДАЮТ НАПРЯЖЕНИЕ ОШИБКИ



КОЛИЧЕСТВО СЛОЕВ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

В зависимости от общей сложности схемы и качественных требований разработчик должен определить количество слоев печатной платы.

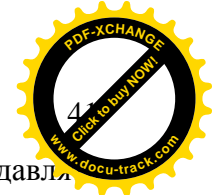
Однослойные печатные платы

Очень простые электронные схемы выполняются на односторонних платах с использованием дешевых фольгированных материалов (FR-1 или FR-2) и часто имеют много перемычек, напоминая двухсторонние платы. Такой способ создания печатных плат рекомендуется только для низкочастотных схем. По причинам, которые будут описаны ниже, односторонние печатные платы в большой степени восприимчивы к наводкам. Хорошую одностороннюю печатную плату достаточно сложно разработать из-за многих причин. Тем не менее хорошие платы такого типа встречаются, но при их разработке требуется очень многое обдумывать заранее.

Двухслойные печатные платы

На следующем уровне стоят двухсторонние печатные платы, которые в большинстве случаев используют в качестве материала подложки FR-4, хотя иногда встречается и FR-2. Применение FR-4 предпочтительнее, поскольку в печатных платах из этого материала отверстия получаются лучшего качества. Схемы на двухсторонних печатных платах разводятся гораздо легче, т.к. в двух слоях проще осуществить разводку пересекающихся трасс. Однако для аналоговых схем пересечение трасс выполнять не рекомендуется. Где возможно, нижний слой (bottom) необходимо отводить под полигон земли, а остальные сигналы разводить в верхнем слое (top). Использование полигона в качестве земляной шины дает несколько преимуществ:

- общий провод является наиболее часто подключаемым в схеме проводом; поэтому резонно иметь "много" общего провода для упрощения разводки.
- увеличивается механическая прочность платы
- уменьшается сопротивление всех подключений к общему проводу, что, в свою очередь, уменьшает шум и наводки



- увеличивается распределенная емкость для каждой цепи схемы, помогая подавлять излучаемый шум.
- полигон, являющийся экраном, подавляет наводки, излучаемые источниками, расположенными со стороны полигона.

Двухсторонние печатные платы, несмотря на все свои преимущества, не являются лучшими, особенно для малосигнальных или высокоскоростных схем. В общем случае, толщина печатной платы, т.е. расстояние между слоями металлизации, равняется 1,5 мм, что слишком много для полной реализации некоторых преимуществ двухслойной печатной платы, приведенных выше. Распределенная емкость, например, слишком мала.

Многослойные печатные платы

Для ответственных схемотехнических разработок требуются многослойные печатные платы (МПП). Некоторые причины их применения очевидны:

- такая же удобная, как и для шины общего провода, разводка шин питания; если в качестве шин питания используются полигоны на отдельном слое, то довольно просто с помощью переходных отверстий осуществить подводку питания к каждому элементу схемы
- сигнальные слои освобождаются от шин питания, что облегчает разводку сигнальных проводников;
- между полигонами земли и питания появляется распределенная емкость, которая уменьшает высокочастотный шум.

Кроме этих причин применения многослойных печатных плат существуют другие, менее очевидные:

- лучшее подавление электромагнитных (EMI) и радиочастотных (RFI) помех благодаря эффекту отражения (image plane effect), известному еще во времена Маркони. Когда проводник размещается близко к плоской проводящей поверхности, большая часть возвратных высокочастотных токов будет протекать по плоскости непосредственно под проводником. Направление этих токов будет противоположно направлению токов в проводнике. Таким образом, отражение проводника в плоскости создает линию передачи сигнала. Поскольку токи в проводнике и в плоскости равны по величине и противоположны по направлению, создается некоторое уменьшение излучаемых помех. Эффект отражения эффективно работает только при неразрывных сплошных полигонах (ими могут быть как полигоны земли, так и полигоны питания). Любое нарушение целостности будет приводить к уменьшению подавления помех.

- снижение общей стоимости при мелкосерийном производстве. Несмотря на то, что изготовление многослойных печатных плат обходится дороже, их возможное излучение меньше, чем у одно- и двухслойных плат. Следовательно, в некоторых случаях применение лишь многослойных плат позволит выполнить требования по излучению, поставленные при разработке, и не проводить дополнительных испытаний и тестирований. Применение МПП может снизить уровень излучаемых помех на 20 дБ по сравнению с двухслойными платами.

Порядок следования слоев

У неопытных разработчиков часто возникает некоторое замешательство по поводу оптимального порядка следования слоев печатной платы. Возьмем для примера 4-слойную плату, содержащую два сигнальных слоя и два полигонных слоя - слой земли и слой питания. Какой порядок следования слоев лучший? Сигнальные слои между полигонами, которые будут служить экранами? Или же сделать полигонные слои внутренними, чтобы уменьшить взаимовлияние сигнальных слоев?

При решении этого вопроса важно помнить, что часто расположение слоев не имеет особого значения, поскольку все равно компоненты располагаются на внешних слоях, а шины, подводящие сигналы к их выводам, порой проходят через все слои. Поэтому любые экранные эффекты представляют собой лишь компромисс. В данном случае лучше позаботиться о создании большой распределенной емкости между полигонами питания и земли, расположив их во внутренних слоях.

Другим преимуществом расположения сигнальных слоев снаружи является доступность сигналов для тестирования, а также возможность модификации связей. Любой, кто хоть раз

менял соединения проводников, располагающихся во внутренних слоях, оценит возможность.

Для печатных плат с более, чем четырьмя слоями, существует общее правило располагать высокоскоростные сигнальные проводники между полигонами земли и питания, а низкочастотным отводить внешние слои.

ЗАЗЕМЛЕНИЕ

Хорошее заземление - общее требование насыщенной, многоуровневой системы. И оно должно планироваться с первого шага дизайнерской разработки.

Основное правило: разделение земли.

Разделение земли на аналоговую и цифровую части - один из простейших и наиболее эффективных методов подавления шума. Один или более слоев многослойной печатной платы обычно отводится под слой земляных полигонов. Если разработчик не очень опытен или невнимателен, то земля аналоговой части будет непосредственно соединена с этими полигонами, т.е. аналоговый возвратный ток будет использовать такую же цепь, что и цифровой возвратный ток. Авторазводчики работают примерно также и объединяют все земли вместе.

Если переработке подвергается ранее разработанная печатная плата с единым земляным полигоном, объединяющим аналоговую и цифровую земли, то необходимо сначала физически разделить земли на плате (после этой операции работа платы становится практически невозможной). После этого производятся все подключения к аналоговому земляному полигону компонентов аналоговой схемы (формируется аналоговая земля) и к цифровому земляному полигону компонентов цифровой схемы (формируется цифровая земля). И лишь после этого в источнике производится объединение цифровой и аналоговой земли.

Другие правила формирования земли:

- Шины питания и земли должны находиться под одним потенциалом по переменному току, что подразумевает использование конденсаторов развязки и распределенной емкости.

- Не допускайте перекрытий аналоговых и цифровых полигонов (рис. 1). Располагайте шины и полигоны аналогового питания над полигоном аналоговой земли (аналогично для шин цифрового питания). Если в каком-либо месте существует перекрытие аналогового и цифрового полигона, распределенная емкость между перекрывающимися участками будет создавать связь по переменному току, и наводки от работы цифровых компонентов попадут в аналоговую схему. Такие перекрытия аннулируют изоляцию полигонов.



Рис.1. Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов

- Разделение не означает электрической изоляции аналоговой от цифровой земли (рис. 2). Они должны соединяться вместе в каком-то, желательно одном, низкоимпедансном узле. Правильная, с точки зрения земли, система имеет только одну землю, которая является выводом заземления для систем с питанием от сетевого переменного напряжения или общим выводом для систем с питанием от постоянного напряжения (например, аккумулятора). Все сигнальные токи и токи питания в этой схеме должны возвращаться к этой земле в одну точку, которая будет служить системной землей. Такой точкой может быть вывод корпуса устройства. Важно понимать, что при подсоединении общего вывода схемы к нескольким точкам корпуса могут образовываться земляные контуры. Создание единственной общей точки объединения земель является одним из наиболее трудных аспектов системного дизайна.

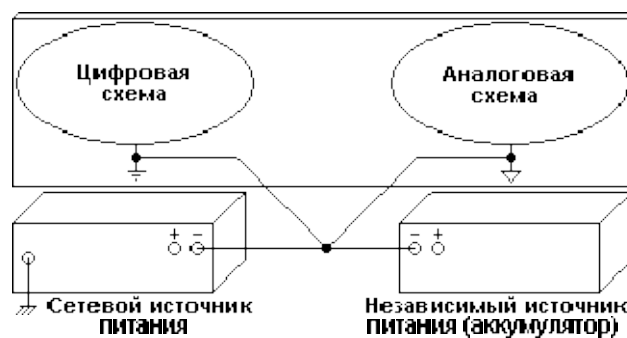


Рис.2. Разделение аналоговой и цифровой земли

- По возможности разделяйте выводы разъемов, предназначенные для передачи возвратных токов - возвратные токи должны объединяться только в точке системной земли. Старение контактов разъемов, а также частая расстыковка их ответных частей приводит к увеличению сопротивления контактов, следовательно, для более надежной работы необходимо использование разъемов с некоторым количеством дополнительных выводов. Сложные цифровые печатные платы имеют много слоев и содержат сотни или тысячи проводников. Добавление еще одного проводника редко создает проблему в отличие от добавляемых дополнительных выводов разъемов. Если это не удастся сделать, то необходимо создавать два проводника возвратного тока для каждой силовой цепи на плате, соблюдая особые меры предосторожности.
- Важно отделять шины цифровых сигналов от мест на печатной плате, где расположены аналоговые компоненты схемы. Это предполагает изоляцию (экранирование) полигонами, создание коротких трасс аналоговых сигналов и внимательное размещение пассивных компонентов при наличии расположенных рядом шин высокоскоростных цифровых и ответственных аналоговых сигналов. Шины цифровых сигналов должны разводиться вокруг участков с аналоговыми компонентами и не перекрываться с шинами и полигонами аналоговой земли и аналогового питания. Если этого не делать, то разработка будет содержать новый непредусмотренный элемент - антенну, излучение которой будет воздействовать на высокоимпедансные аналоговые компоненты и проводники (рис. 3).



Рис.3. Излучение проводниками печатной платы

Почти все сигналы тактовых частот являются достаточно высокочастотными сигналами, поэтому даже небольшие емкости между трассами и полигонами могут создавать значительные связи. Необходимо помнить, что может вызывать проблему не только основная тактовая частота, но и ее высшие гармоники.

- Хорошей концепцией является размещение аналоговой части схемы близко к входным/выходным соединениям платы. Разработчики цифровых печатных плат, использующие мощные интегральные схемы, часто склонны разводить шины шириной 1 мм и длиной несколько сантиметров для соединения аналоговых компонентов, полагая, что малое сопротивление трассы поможет избавиться от наводок. То, что при этом получается, представляет собой протяженный пленочный конденсатор, на который будут наводиться паразитные сигналы от цифровых компонентов, цифровой земли и цифрового питания, усугубляя проблему.

Пример хорошего размещения компонентов

На рисунке 4 показан возможный вариант размещения всех компонентов на плате, включая источник питания. Здесь используются три отделенных друг от друга и изолированных полигона земли/питания: один для источника, один для цифровой схемы и один для аналоговой. Цепи земли и питания аналоговой и цифровой частей объединяются только в источнике питания. Высокочастотный шум отфильтровывается в цепях питания дросселями. В этом примере высокочастотные сигналы аналоговой и цифровой частей далеко отстоят друг от друга. Такой дизайн имеет очень высокую вероятность на благоприятный исход, поскольку обеспечено хорошее размещение компонентов и следование правилам разделения цепей.

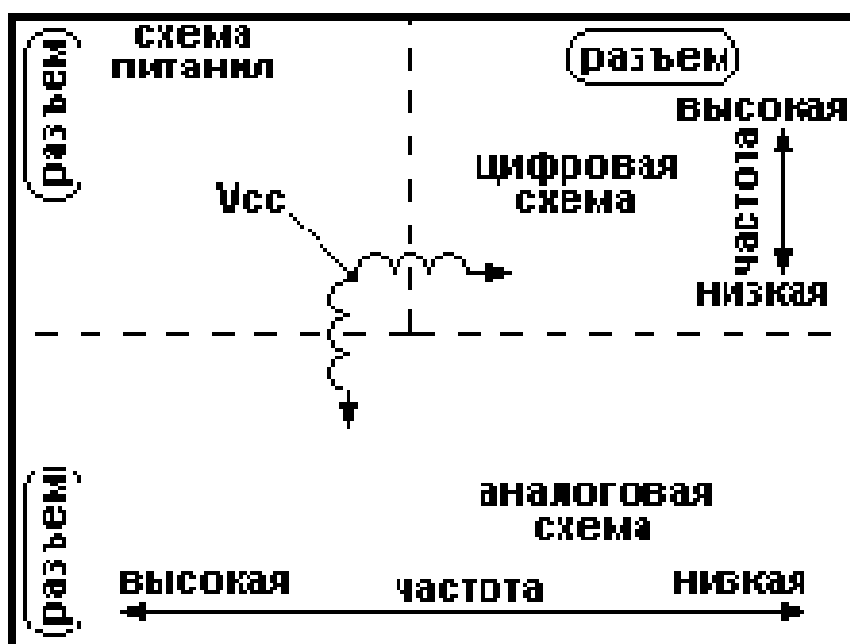


Рис.4. Пример хорошего размещения компонентов на плате

Имеется лишь один случай, когда необходимо объединение аналоговых и цифровых сигналов над областью полигона аналоговой земли. Аналого-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи размещаются в корпусах с выводами аналоговой и цифровой земли. Принимая во внимание предыдущие рассуждения, можно предположить, что вывод цифровой земли и вывод аналоговой земли должны быть подключены к шинам цифровой и аналоговой земли соответственно. Однако в данном случае это не верно.

Названия выводов (аналоговый или цифровой) относятся лишь к внутренней структуре преобразователя, к его внутренним соединениям. В схеме эти выводы должны быть подключены к шине аналоговой земли. Соединение может быть выполнено и внутри интегральной схемы, однако получить низкое сопротивление такого соединения довольно сложно из-за топологических ограничений. Поэтому при использовании преобразователей предполагается внешнее соединение выводов аналоговой и цифровой земли. Если этого не сделать, то параметры микросхемы будут значительно хуже приведенных в спецификации.

Необходимо учитывать то, что цифровые элементы преобразователя могут ухудшать качественные характеристики схемы, привнося цифровые помехи в цепи аналоговой земли и аналогового питания. При разработке преобразователей учитывается это негативное воздействие так, чтобы цифровая часть потребляла как можно меньше мощности. При этом помехи от переключений логических элементов уменьшаются. Если цифровые выводы преобразователя не сильно нагружены, то внутренние переключения обычно не вызывают особых проблем. При разработке печатной платы, содержащей АЦП или ЦАП, необходимо должным образом отнестись к развязке цифрового питания преобразователя на аналоговую землю.

Немного из теории антенн

Одним из основных типов антенн является штырь или прямой проводник. Такая антенна работает, потому что прямой проводник обладает паразитной индуктивностью и поэтому может концентрировать и улавливать излучение от внешних источников. Полный импеданс прямого проводника имеет резистивную (активную) и индуктивную (реактивную) составляющие:

$$Z = R + j\omega L$$

На постоянном токе или низких частотах преобладает активная составляющая. При повышении частоты реактивная составляющая становится все более и более значимой. В диапазоне от 1 кГц до 10 кГц индуктивная составляющая начинает оказывать влияние, и проводник более не является низкоомным соединителем, а скорее выступает как катушка индуктивности.

Формула для расчета индуктивности проводника печатной платы выглядит следующим образом:

$$L(\text{нГн}) = 0,0002X \cdot \left[\ln\left(\frac{2X}{W+H}\right) + 0,2235\left(\frac{W+H}{X}\right) + 0,5 \right], \text{ где}$$

X - длина проводника
W - ширина проводника
H - толщина проводника

Обычно, трассы на печатной плате обладают значениями от 6 нГн до 12 нГн на сантиметр длины. Например, 10-сантиметровый проводник обладает сопротивлением 57 мОм и индуктивностью 8 нГн на см. На частоте 100 кГц реактивное сопротивление становится равным 50 мОм, а на более высоких частотах проводник будет представлять собой скорее индуктивность, чем активное сопротивление.

Правило штыревой антенны гласит, что она начинает ощутимо взаимодействовать с полем при своей длине около 1/20 от длины волны, а максимальное взаимодействие происходит при длине штыря, равной 1/4 от длины волны. Поэтому 10-сантиметровый проводник из примера в предыдущем параграфе начнет становиться довольно хорошей антенной на частотах выше 150 МГц. Необходимо помнить, что несмотря на то, что генератор тактовой частоты цифровой схемы может и не работать на частоте выше 150 МГц, в его сигнале всегда присутствуют высшие гармоники. Если на печатной плате присутствуют компоненты со штыревыми выводами значительной длины, то такие выводы также могут служить антеннами.

Другой основной тип антенн - петлевые антенны. Индуктивность прямого проводника сильно увеличивается, когда он изгибается и становится частью дуги. Увеличивающаяся индуктивность понижает частоту, на которой начинает происходить взаимодействие антенны с линиями поля.

Опытные дизайнеры печатных плат, достаточно хорошо разбирающиеся в теории петлевых антенн, знают, что нельзя создавать петли для критичных сигналов. Некоторые разработчики, однако, не задумываются об этом, и проводники возвратного и сигнального тока в их схемах представляют собой петли. Создание петлевых антенн легко показать на примере (рис. 8). Кроме того, здесь показано и создание щелевой антенны.

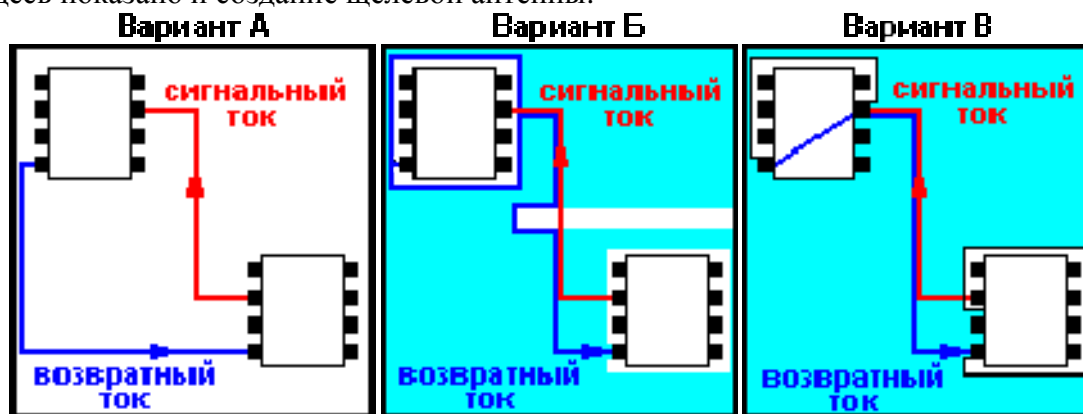


Рис.8. Образование петли и щелевой антенны при некорректной разводке

Рассмотрим три случая:

Вариант А - пример скверного дизайна. В нем вовсе не используется полигон аналоговой земли. Петлевой контур формируется земляным и сигнальным проводником. При прохождении тока возникают электрическое и перпендикулярное ему магнитное поля. Эти поля образуют основу петлевой антенны. Правило петлевой антенны гласит, что для наибольшей эффективности длина каждого проводника должна быть равно половине длины волны принимаемого излучения. Однако, не следует забывать, что даже при 1/20 от длины волны петлевая антенна все еще остается достаточно эффективной.

Вариант Б лучше варианта А, но здесь присутствует разрыв в полигоне, вероятно, для создания определенного места для разводки сигнальных проводников. Пути сигнального и возвратного токов образуют щелевую антенну. Другие петли образуются в вырезах вокруг микросхем.

Вариант В - пример лучшего дизайна. Пути сигнального и возвратного тока совпадают, сводя на нет эффективность петлевой антенны. Заметьте, что в этом варианте также присутствуют вырезы вокруг микросхем, но они отделены от пути возвратного тока.

Теория отражения и согласования сигналов находится близко к теории антенн.

Когда проводник печатной платы поворачивает на угол 90° , может возникнуть отражение сигнала. Это происходит, главным образом, из-за изменения ширины пути прохождения тока. В вершине угла ширина трассы увеличивается в 1.414 раза, что приводит к рассогласованию характеристик линии передачи, особенно распределенной емкости и собственной индуктивности трассы. Довольно часто необходимо повернуть на печатной плате трассу на 90° . Многие современные САД-пакеты позволяют сглаживать углы проведенных трасс или проводить трассы в виде дуги. На рисунке 9 показаны два шага улучшения формы угла. Только последний пример поддерживает постоянную ширину трассы и минимизирует отражения.

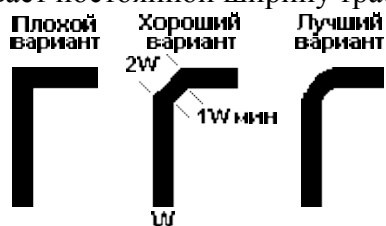


Рис.9. Сглаживание углов проводников

Совет для опытных разводчиков печатных плат: оставляйте процедуру сглаживания на последний этап работ перед созданием каплеобразных выводов и заливкой полигонов. Иначе САД-пакет будет производить сглаживание дольше из-за более сложных вычислений.

ПАРАЗИТНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

Между проводниками печатной платы, находящимися на разных слоях, возникает емкостная связь, когда они пересекаются. Иногда это может создать проблему. Проводники, находящиеся друг над другом на смежных слоях, создают длинный пленочный конденсатор. Емкость такого конденсатора рассчитывается по формуле, приведенной на рисунке 10.

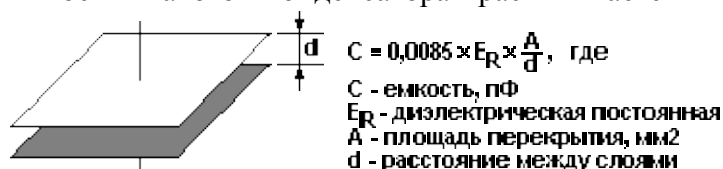


Рис.10. Расчет межслойной емкости

Например, печатная плата может обладать следующими параметрами:

- 4 слоя; сигнальный и слой полигона земли - смежные,
- межслойный интервал - 0,2 мм,
- ширина проводника - 0,75 мм,
- длина проводника - 7,5 мм.

Типовое значение диэлектрической постоянной ER для FR-4 равняется 4.5.

Подставив все значения в формулу, получим значение емкости между этими двумя шинами, равное 1,1 пФ. Даже такая, казалось бы, небольшая емкость для некоторых приложений

яется недопустимой. Рисунок 11 иллюстрирует эффект от емкости в 1 пФ, возникающий при подключении ее к инвертирующему входу высокочастотного операционного усилителя.

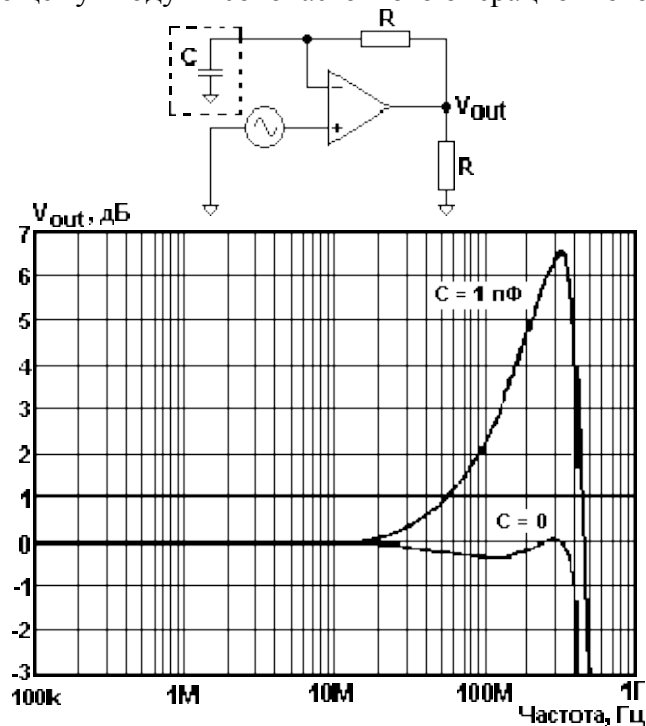


Рис.11. Эффект от емкости на инвертирующем входе операционного усилителя

Видно, что происходит удвоение амплитуды выходного сигнала на частотах, близких к верхнему пределу частотного диапазона ОУ. Это, в свою очередь, может привести к генерации, особенно на рабочих частотах антенны (выше 180 МГц).

Этот эффект порождает многочисленные проблемы, для решения которых, тем не менее, существует много способов. Самый очевидный из них - уменьшение длины проводников. Другой способ - уменьшение их ширины. Нет причины применения проводника такой ширины для подводки сигнала к инвертирующему входу, т.к. по этому проводнику протекает очень небольшой ток. Уменьшение длины трассы до 2,5 мм, а ширины до 0,2 мм приведет к уменьшению емкости до 0,1 пФ, а такая емкость уже не приведет к столь значительному подъему частотной характеристики. Еще один способ решения проблемы - удаление части полигона под инвертирующим входом и под проводником, подходящим к нему.

Инвертирующий вход операционного усилителя, особенно высокоскоростного, в большой степени склонен к генерации в схемах с высоким коэффициентом усиления. Это происходит из-за нежелательной емкости входного каскада ОУ. Поэтому крайне важно уменьшить паразитную емкость и располагать компоненты обратной связи настолько близко к инвертирующему входу, насколько это возможно. Если, несмотря на принятые меры, происходит возбуждение усилителя, то необходимо пропорционально уменьшить сопротивление резисторов обратной связи для изменения резонансной частоты цепи. Также может помочь и увеличение резисторов, правда, значительно реже, т.к. эффект возбуждения зависит и от импеданса схемы. При изменении резисторов обратной связи нельзя забывать и об изменении емкости корректирующего конденсатора. Также нельзя забывать и о том, что при уменьшении сопротивления резисторов увеличивается потребляемая мощность схемы.

Ширину проводников печатной платы невозможно бесконечно уменьшить. Предельная ширина определяется как технологическим процессом, так и толщиной фольги. Если два проводника проходят близко друг к другу, то между ними образуется емкостная и индуктивная связь (рис. 12)

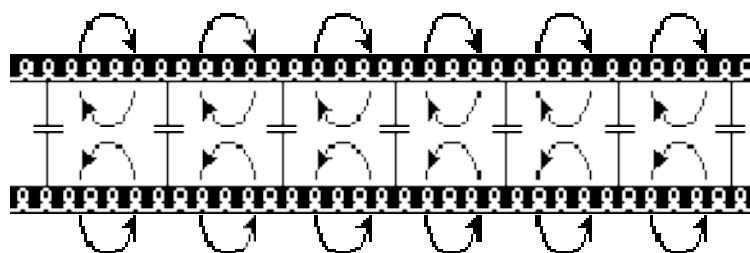


Рис.12. Взаимосвязь между параллельными сигнальными проводниками

Зависимости, описывающие эти паразитные эффекты, достаточно сложны, чтобы их приводить в этой статье, но их можно найти в литературе, посвященной линиям передачи и полосковым линиям.

Сигнальные проводники не должны разводиться параллельно друг другу, за исключением случая разводки дифференциальных или микрополосковых линий. Зазор между проводниками должен быть минимум в три раза больше ширины проводников.

Емкость между трассами в аналоговых схемах может создать затруднения при больших сопротивлениях резисторов (несколько МОм). Относительно большая емкостная связь между инвертирующим и неинвертирующим входами операционного усилителя легко может привести к самовозбуждению схемы.

Всякий раз, когда при разводке печатной платы появляется необходимость в создании переходного отверстия, т.е. межслойного соединения (рис. 13), необходимо помнить, что при этом также возникает паразитная индуктивность. При диаметре отверстия после металлизации d и длине канала h индуктивность можно вычислить по следующей приближенной формуле:

$$L \approx \frac{h}{5} \times \left(1 + \ln\left(\frac{4h}{d}\right)\right) \text{ нГн}$$

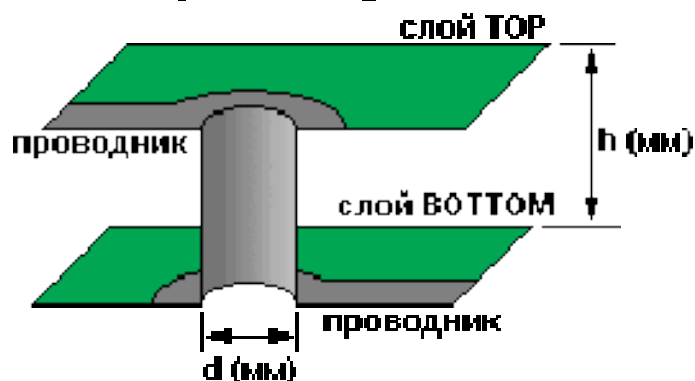


Рис.13. Индуктивность переходного отверстия

Например, при $d=0,4$ мм и $h=1,5$ мм (достаточно распространенные величины) индуктивность отверстия равна 1,1 нГн.

Имейте в виду, что индуктивность отверстия вместе с такой же паразитной емкостью формируют резонансный контур, что может сказаться при работе на высоких частотах. Собственная индуктивность отверстия достаточно мала, и резонансная частота находится где-то в гигагерцовом диапазоне, но если сигнал в течение своего пути вынужден проходить через несколько переходных отверстий, то их индуктивности складываются (последовательное соединение), а резонансная частота понижается. Вывод: старайтесь избегать большого числа переходных отверстий при разводке ответственных высокочастотных проводников аналоговых схем. Другое негативное явление: при большом количестве переходных отверстий в полигоне земли могут создаваться петлевые участки. Наилучшая аналоговая разводка - все сигнальные проводники располагаются на одном слое печатной платы.

Кроме рассмотренных выше паразитных эффектов существуют еще такие, которые связаны с недостаточно чистой поверхностью платы.

Помните, что, если в схеме присутствуют большие сопротивления, то особое внимание следует уделить очистке платы. На заключительных операциях изготовления печатной платы должны удаляться остатки флюса и загрязнений. В последнее время при монтаже печатных плат достаточно часто применяются водорастворимые флюсы. Являясь менее вредными, они легко удаляются водой. Но при этом отмывка платы недостаточно чистой водой может привести к дополнительным загрязнениям, которые ухудшают диэлектрические характеристики. Следовательно, очень важно производить отмывку печатной платы с высокоимпедансной схемой свежей дистиллированной водой.

РАЗВЯЗКА СИГНАЛОВ

Как уже отмечалось, помехи могут проникать в аналоговую часть схемы через цепи питания. Для уменьшения таких помех применяются развязывающие (блокировочные) конденсаторы, уменьшающие локальный импеданс шин питания.

Если необходимо развести печатную плату, на которой имеются и аналоговая, и цифровая части, то необходимо иметь хотя бы небольшое представление об электрических характеристиках логических элементов.

Типовой выходной каскад логического элемента содержит два транзистора, последовательно соединенные и расположенные между цепями питания и земли (рис. 14)

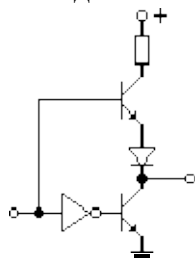


Рис.14. Структура выходного каскада логического элемента

Эти транзисторы в идеальном случае работают строго в противофазе, т.е. когда один из них открыт, то в этот же момент времени второй закрыт, формируя на выходе либо сигнал логической единицы, либо логического нуля. В установившемся логическом состоянии потребляемая мощность логического элемента невелика.

Ситуация кардинально меняется, когда выходной каскад переключается из одного логического состояния в другое. В этом случае в течение короткого промежутка времени оба транзистора могут быть открыты одновременно, а ток питания выходного каскада сильно увеличивается, поскольку уменьшается сопротивление участка пути тока от шины питания до шины земли через два последовательно соединенных транзистора. Потребляемая мощность скачкообразно возрастает, а затем быстро убывает, что приводит к локальному изменению напряжения питания и возникновению резкого, кратковременного изменения тока. Такие изменения тока приводят к излучению радиочастотной энергии. Даже на сравнительно простой печатной плате могут быть десятки или сотни рассмотренных выходных каскадов логических элементов, поэтому суммарный эффект от их одновременной работы может быть очень большим.

Невозможно точно предсказать диапазон частот, в котором будут находиться эти выбросы тока, поскольку частота их возникновения зависит от множества причин, в том числе и от задержки распространения переключений транзисторов логического элемента. Задержка, в свою очередь, также зависит от множества случайных причин, возникающих в процессе производства. Шум от переключений имеет широкополосное распределение гармонических составляющих во всем диапазоне. Для подавления цифрового шума существует несколько способов, применение которых зависит от спектрального распределения шума.

В таблице 2 представлены максимальные рабочие частоты для распространенных типов конденсаторов.

Тип	Максимальная частота
алюминиевый электролитический	100 кГц
танталовый электролитический	1 МГц
слюдяной	500 МГц
керамический	1 ГГц

Из таблицы очевидно, что танталовые электролитические конденсаторы применяются для частот ниже 1 МГц, на более высоких частотах должны применяться керамические конденсаторы. Необходимо помнить, что конденсаторы имеют собственный резонанс, и их неправильный выбор может не только не помочь, но и усугубить проблему. На рисунке 15 показаны типовые собственные резонансы двух конденсаторов общего применения - 10 мкФ танталового электролитического и 0,01 мкФ керамического.

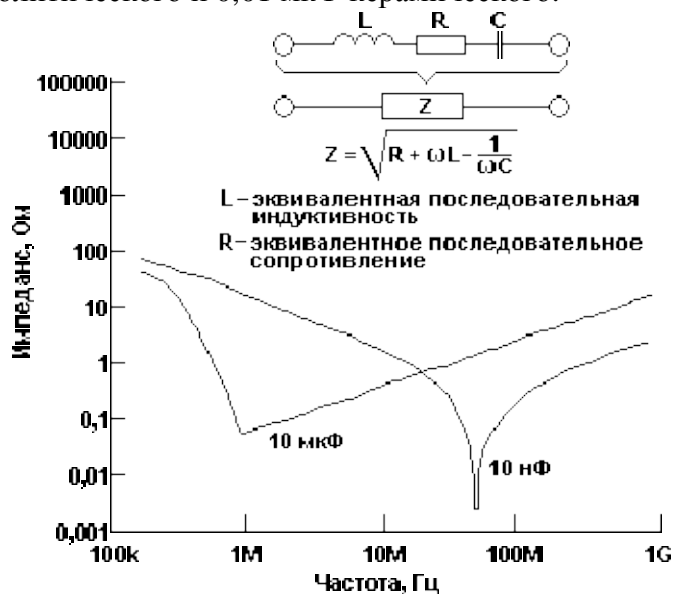


Рис.15. Собственный резонанс конденсатора

Реальные характеристики могут отличаться у различных производителей и даже от партии к партии у одного производителя. Важно понимать, что для эффективной работы конденсатора подавляемые им частоты должны находиться в более низком диапазоне, чем частота собственного резонанса. В противном случае характер реактивного сопротивления будет индуктивным, а конденсатор перестанет эффективно работать.

Не стоит заблуждаться относительно того, что один 0,1 мкФ конденсатор будет подавлять все частоты. Небольшие конденсаторы (10 нФ и менее) могут работать более эффективно на более высоких частотах.

Развязка питания ИС

Принцип развязки питания интегральных схем с целью подавления высокочастотного шума состоит в применении одного или нескольких конденсаторов, подключенных между выводами питания и земли. Важно, чтобы проводники, соединяющие выводы с конденсаторами, были короткими. Если это не так, то собственная индуктивность проводников будет играть заметную роль и сводить на нет выгоды от применения развязывающих конденсаторов.

Развязывающий конденсатор должен быть подключен к каждому корпусу микросхемы, независимо от того, сколько операционных усилителей находится внутри корпуса - 1, 2 или 4. Если ОУ питается двухполярным питанием, то, само собой разумеется, что развязывающие конденсаторы должны располагаться у каждого вывода питания. Значение емкости должно быть тщательно выбрано в зависимости от типа шумов и помех, присутствующих в схеме.

В особо сложных случаях может появиться необходимость добавления индуктивности, включенной последовательно с выводом питания. Индуктивность должна располагаться до, а не после конденсаторов.

Другим, более дешевым способом является замена индуктивности резистором с малым сопротивлением (10...100 Ом). При этом вместе с развязывающим конденсатором резистор образует низкочастотный фильтр. Этот способ уменьшает диапазон питания операционного усилителя, который к тому же становится более зависимым от потребляемой мощности.

Обычно для подавления низкочастотных помех в цепях питания бывает достаточно применить один или несколько алюминиевых или танталовых электролитических конденсаторов у входного разъема питания. Дополнительный керамический конденсатор будет подавлять высокочастотные помехи от других плат.

РАЗВЯЗКА ВХОДНЫХ И ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ

Множество шумовых проблем является результатом непосредственного соединения входных и выходных выводов. В результате высокочастотных ограничений пассивных компонентов реакция схемы на воздействие высокочастотного шума может быть достаточно непредсказуемой.

В ситуации, когда частотный диапазон наведенного шума в значительной степени отличается от частотного диапазона работы схемы, решение просто и очевидно - размещение пассивного RC-фильтра для подавления высокочастотных помех. Однако при применении пассивного фильтра надо быть осторожным: его характеристики (из-за неидеальности частотных характеристик пассивных компонентов) утрачивают свои свойства на частотах, в 100...1000 раз превышающих частоту среза (f_{3db}). При использовании последовательно соединенных фильтров, настроенных на разные частотные диапазоны, более высокочастотный фильтр должен быть ближайшим к источнику помех. Также для подавления шума могут применяться индуктивности на ферритовых кольцах; они сохраняют индуктивный характер сопротивления до некоторой определенной частоты, а выше их сопротивление становится активным.

Наводки на аналоговую схему могут быть настолько большими, что избавиться от них (или, по крайней мере, уменьшить) возможно только с помощью применения [экранов](#). Для эффективной работы они должны быть тщательно спроектированы так, чтобы частоты, создающие наибольшие проблемы, не смогли попасть в схему. Это означает, что экран не должен иметь отверстия или вырезы с размерами, большими, чем $1/20$ длины волны экранируемого излучения. Хорошая идея отводить достаточное место под предполагаемый экран с самого начала проектирования печатной платы. При использовании экрана можно дополнительно использовать ферритовые кольца (или бусинки) для всех подключений к схеме.

КОРПУСА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

В одном корпусе обычно размещаются один, два или четыре операционных усилителя



(рис. 16). Рис.16. Цоколевка операционных усилителей

Одиночный ОУ часто также имеет дополнительные входы, например, для регулировки напряжения смещения. Сдвоенные и счетверенные ОУ имеют лишь инвертирующий и неинвертирующий входы и выход. Поэтому при необходимости иметь дополнительные регулировки надо применять одиночные операционные усилители. При использовании дополнительных выводов необходимо помнить, что по своей структуре они являются вспомогательными входами, поэтому управление ими должно осуществляться аккуратно и в соответствии с рекомендациями производителя.

В одиночном ОУ выход располагается на противоположной стороне от входов. Это может создать затруднения при работе усилителя на высоких частотах из-за протяженных проводников обратной связи. Один из путей преодоления этого состоит в размещении усилителя и компонентов обратной связи на разных сторонах печатной платы. Это, однако, приводит к появлению как минимум двух дополнительных отверстий и вырезов в полигоне земли. Иногда стоит использовать сдвоенный ОУ для разрешения данной проблемы, даже если второй усилитель не

используется (при этом его выводы должны быть подключены должным образом). Рисунок иллюстрирует уменьшение длины проводников цепи обратной связи для инвертирующего включения.

Сдвоенные ОУ особенно часто используются в стереофонических усилителях, а счетверенные - в схемах многокаскадных фильтров. Однако в этом есть довольно значительный минус. Несмотря на то, что современная технология обеспечивает приличную изоляцию между сигналами усилителей, расположенных на одном кремниевом кристалле, между ними все же существуют некоторые перекрестные помехи. Если необходимо иметь очень малую величину таких помех, то необходимо использовать одиночные операционные усилители. Перекрестные помехи возникают не только при использовании сдвоенных или счетверенных усилителей. Их источником может служить очень близкое расположение пассивных компонентов разных каналов.

Сдвоенные и счетверенные ОУ, кроме вышесказанного, позволяют осуществить более плотный монтаж. Отдельные усилители как бы зеркально расположены друг относительно друга (рис. 18).

На рисунках 17 и 18 показаны не все подключения, требуемые для нормальной работы, например, формирователь среднего уровня при однополярном питании. На рисунке 19 приведена схема такого формирователя при использовании счетверенного усилителя

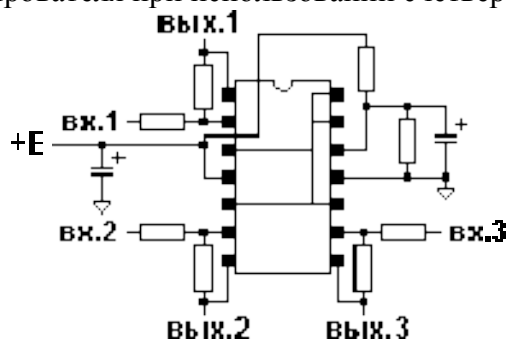


Рис.19. Счетверенный ОУ с формирователем половины напряжения питания

На схеме показаны все необходимые подключения для реализации трех независимых инвертирующих каскадов. Необходимо обратить внимание на то, что проводники формирователя половины напряжения питания располагаются непосредственно под корпусом интегральной схемы, что позволяет уменьшить их длину. Этот пример иллюстрирует не то, как должны быть выполнены подключения, а то, что должно быть сделано с размещением компонентов и трассировкой. Напряжение среднего уровня, например, могло бы быть единым для всех четырех усилителей. Пассивные компоненты могут быть соответствующего размера. Например, планарные компоненты типоразмера 0402 соответствуют расстоянию между выводами стандартного корпуса SO. Это позволяет сделать длину проводников для высокочастотных приложений очень короткой.

Типы корпусов операционных усилителей включают в себя, в основном, DIP (dual-in-line) и SO (small-outline). Вместе с уменьшением размера корпуса уменьшается и шаг выводов, что позволяет применять меньшие по размеру пассивные компоненты. Уменьшение размеров схемы в целом уменьшает паразитные индуктивности и позволяет работать на более высоких частотах. Однако это приводит также к возникновению более сильных перекрестных помех из-за увеличения емкостной связи между компонентами и проводниками.

ОБЪЕМНЫЙ И ПОВЕРХНОСТНЫЙ МОНТАЖ

При размещении операционных усилителей в корпусах типа DIP и пассивных компонентов с проволочными выводами требуется наличие на печатной плате переходных отверстий для их монтажа. Такие компоненты в настоящее время используются, когда нет особых требований к размерам печатной платы; обычно они стоят дешевле, но стоимость печатной платы в процессе изготовления возрастает из-за сверловки дополнительных отверстий под выводы компонентов.

Кроме того, при использовании навесных компонентов увеличиваются размеры платы, длины проводников, что не позволяет схеме работать на высоких частотах. Переходные отверстия обладают собственной индуктивностью, что также накладывает ограничения на динамические характеристики схемы. Поэтому навесные компоненты не рекомендуется применять для реализации высокочастотных схем или для аналоговых схем, размещенных рядом с высокоскоростными логическими схемами.

Некоторые разработчики, пытаясь уменьшить длину проводников, размещают резисторы вертикально. С первого взгляда может показаться что, это сокращает длину трассы. Однако при этом увеличивается путь прохождения тока по резистору, а сам резистор представляет собой петлю (виток индуктивности). Излучающая и принимающая способность возрастают многократно.

При поверхностном монтаже не требуется размещения отверстия под каждый вывод компонента. Однако возникают проблемы при тестировании схемы, и приходится использовать переходные отверстия в качестве контрольных точек, особенно при применении компонентов малого типоразмера.

НЕИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СЕКЦИИ ОУ

При использовании вдвоенных и счетверенных операционных усилителей в схеме некоторые их секции могут остаться незадействованными и должны быть в этом случае корректно подключены. Ошибочное подключение может привести к увеличению потребляемой мощности, большому нагреву и большому шуму используемых в этом же корпусе ОУ. Выводы неиспользуемых операционных усилителей могут быть подключены так, как изображено на рис. 20а. Подключение выводов с дополнительными компонентами (рис. 20б) позволит легко использовать этот ОУ при наладке.



Рис. 20. Правильное подключение выводов неиспользуемого ОУ

Разводка питания и развязка по питанию для печатных плат

Хорошие способы развязки позволяют сократить количество развязывающих конденсаторов.

Главным является правильный выбор конденсаторов и грамотная разводка.

1. ТОКИ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ЛОГИЧЕСКИХ КОМПОНЕНТОВ

Не секрет, что при смене логических состояний у большинства цифровых устройств возникает большой бросок тока, который следует сразу за фронтом тактового сигнала (рис. 1).

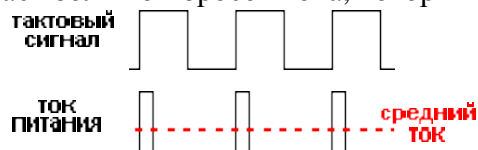


Рис. 1. Мгновенный ток цифровой схемы

Например, схеме, работающей на частоте 100 МГц и потребляющей в среднем около 4 А, реально может потребоваться 20 А тока в течение первых нескольких наносекунд тактовой последовательности. (Причина возникновения больших токов при смене логических состояний рассмотрена в статье Б. Картера "Техника разводки печатных плат") Очевидно, что питание этой схемы от 20-амперного источника увеличит размеры и стоимость изделия. Менее очевидно, что паразитные последовательные индуктивности соединительных проводов, проводников печатной платы и выводов компонентов могут сделать невозможным быструю ответную реакцию мощного источника питания на мгновенные изменения тока. С другой стороны, недостаточная нагрузочная способность источника будет приводить к возникновению нестабильных падений напряжений на шинах питания и земли. Это явление обычно проявляется как высокочастотный шум.

2. ПРИМЕНЕНИЕ КОНДЕНСАТОРОВ В КАЧЕСТВЕ ЭЛЕМЕНТОВ РАЗВЯЗКИ ПИТАНИЯ

Применение развязывающих конденсаторов позволяет распределить рабочий ток между потребителями, используя низкоимпедансные (т.е. низкоиндуктивные для токов ВЧ) пути прохождения тока. Практически это означает, что развязывающие конденсаторы непосредственно обслуживают цифровые компоненты, в то время как источник питания занимается их перезарядом. Ключом к созданию работоспособной и удачной схемы развязки является правильный выбор применяемых конденсаторов и правильная разводка цепей их подключения.

Использование конденсаторов в качестве элементов развязки требует понимания основ их работы. На рисунке 2а показан идеальный конденсатор - емкость для накопления и хранения заряда и для освобождения от него. На рисунке 3 приведена частотная зависимость импеданса идеального конденсатора - монотонное уменьшение значения при увеличении частоты. Поскольку основной шум цифровых систем является высокочастотным шумом (>50 МГц), уменьшение импеданса на высоких частотах хорошо соответствует задаче развязки цепей питания.

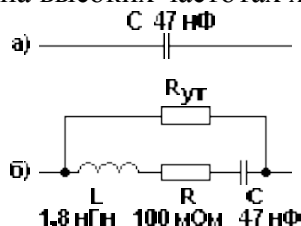


Рис.2. Идеальный (а) и реальный (б) конденсатор

К сожалению, поведение реального конденсатора не такое простое; его модель показана на рисунке 2б. Физическое устройство реального конденсатора включает в себя эквивалентное последовательное сопротивление (ESR) и эквивалентную последовательную индуктивность (ESL). К тому же, реальный конденсатор обладает сопротивлением утечки. Сумма этих паразитных эффектов приводит к изменению характера частотной зависимости импеданса (рис. 3).

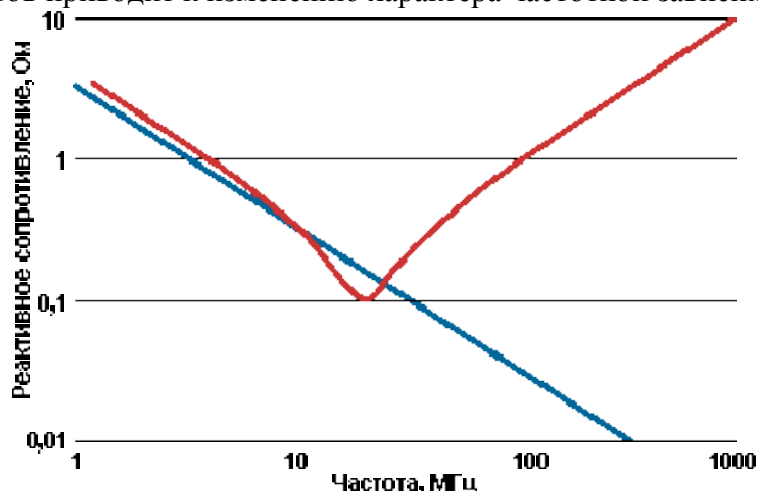


Рис.3. Зависимость импеданса от частоты для идеального и реального конденсатора

Низшая точка импедансной зависимости известна как частота собственного резонанса. Разработчики часто пытаются подобрать конденсаторы с собственной резонансной частотой, находящейся близко от рабочей частоты системы. Однако, параметры реальных конденсаторов делают этот подбор нецелесообразным при тактовой частоте, превышающей 100 МГц. Важное правило, которое следует помнить: развязывающие конденсаторы допустимо использовать на частотах более низких, чем частота их собственного резонанса, до тех пор, пока их импеданс на этих частотах остается достаточно низким.

Падение напряжения на эквивалентном последовательном сопротивлении конденсатора пропорционально протекающему через него току. Поскольку важным является поддержание питающего напряжения стабильным, желательным является использование в цепях развязки

конденсаторов с малым ESR (т.е. с меньшим, чем 200 мОм). Эквивалентная последовательная индуктивность определяет скорость реагирования конденсатора на изменения тока - конденсаторы с более низким значением ESL будут реагировать более быстро на изменения протекающего тока, что очень важно для цепей высокочастотной развязки. Несмотря на то, что, как параметр ESR более широко описан и изучен, ESL, наверное, более важен. Все конденсаторы для поверхностного монтажа, приведенные в таблице 1, обладают достаточно низкими значениями ESL.

Эквивалентное сопротивление и индуктивность конденсаторов		
Типоразмер	ESL min (нГн)	ESL max (нГн)
0402	0,54	1,90
0603	0,54	1,95
0805	0,70	1,94
1206	1,37	2,26
1210	0,61	1,55
1812	0,91	2,25
с радиальными выводами	6,0	15,0
с осевыми выводами	12,0	20,0

Конденсаторы с материалом типа I в качестве диэлектрика не ухудшают свои характеристики от времени и воздействия температуры, но малое значение диэлектрической постоянной делает их использование в качестве компонентов развязки неэффективным. Конденсаторы с материалом II типа (т.е. X7R) являются более хорошим выбором из-за хорошей долговременной стабильности (10% потерь в течение 10 лет), температурных характеристик и высокого значения диэлектрической постоянной. Материал типа III обладает наивысшим значением диэлектрической постоянной и плохими температурными показателями (от 50 до 75% потерь при работе на предельных температурах) и плохой долговременной стабильностью (20% потерь в течение 10 лет). Среди популярных диэлектриков многослойная керамика и синтетика обладают небольшими эквивалентными последовательными индуктивностью и сопротивлением. Керамические конденсаторы более легко доставаемы. Танталовые конденсаторы часто используются как общие элементы развязки по низкой частоте, однако они не подходят для локальной развязки.

В таблице 1 показаны типичные значения ESL для различных типов корпусов конденсаторов. Типоразмер является определяющим элементом эквивалентной последовательной индуктивности - обычно конденсатор меньшего размера обладает меньшим значением ESL при таком же значении емкости. Конденсаторы с большими значениями ESL не годятся для использования в качестве элементов развязки.

В общем случае, правильной стратегией является поиск конденсатора с наибольшей емкостью при наименьших габаритных размерах (это верно лишь с точки зрения ESL, но не всегда правильно с точки зрения другого важнейшего параметра конденсаторов - диэлектрической абсорбции - прим. переводчика). Однако при таком выборе необходимо быть внимательным. Высота корпуса конденсатора в достаточно значительной мере оказывает влияние на ESL. Для перекрывающихся диапазонов ESL в таблице 1 возможен выбор корпуса с меньшим посадочным местом на печатной плате. Однако значение ESL может оказаться большим. Поэтому при выборе типа конденсатора необходимо руководствоваться параметрами производителя для определения лучшего компромиссного варианта.

3. ИНДУКТИВНОСТЬ ПРОВОДНИКА

При разводке компонентов и цепей основным препятствием хорошей развязки является индуктивность. С весьма грубыми приближениями можно считать, что индуктивность трассы с волновым сопротивлением 50 Ом на материале FR-4 будет составлять около 9 пГн на каждые

25 мм длины. Индуктивность одиночного переходного отверстия примерно равняется 500 пГн и зависит от геометрической конфигурации.

Индуктивность пропорциональна длине, поэтому важно минимизировать длину проводника между выводами компонента и развязывающего конденсатора. Индуктивность обратно пропорциональна ширине трассы, поэтому широкие проводники более предпочтительны, чем узкие.

Помните, что путь тока всегда представляет собой петлю, и эта петля должна быть минимизирована. Уменьшение расстояния между выводом питания компонента и выводом конденсатора может и не уменьшить общую индуктивность. Как правильно расположить конденсатор? Ближе к выводу питания компонента? Или ближе к выводу земли? Или посередине между этими выводами? Некоторые источники рекомендуют располагать конденсатор вблизи от вывода, наиболее удаленного от полигона питания или земли.

4. ВАРИАНТЫ РАЗВОДКИ КОНДЕНСАТОРОВ РАЗВЯЗКИ

Хорошая разводка чрезвычайно важна для эффективной работы цепей развязки. Как видно из таблицы 1, конденсаторы со значением эффективной последовательной индуктивности менее 1 нГн вполне доступны. Добавление всего лишь 2 нГн утроит значение ESL конденсатора. Рисунок 4 демонстрирует изменение частоты собственного резонанса и увеличение интегрального реактивного сопротивления при добавлении индуктивности проводника в 2 нГн к собственной индуктивности ($0,8 \text{ нГн}$) конденсатора емкостью $4,7 \text{ нФ}$.

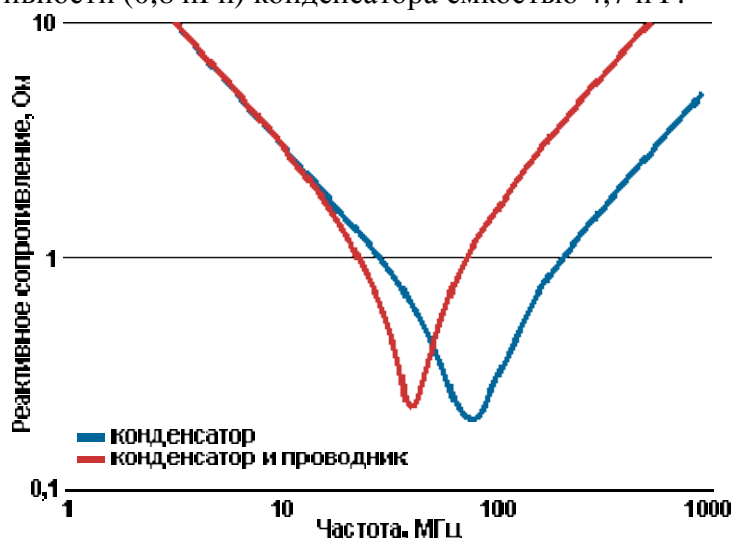


Рис.4. Воздействие индуктивности проводника на характеристики конденсатора

На рисунке 5 показано несколько методов размещения и подключения конденсатора развязки. Для упрощения на схемах показаны лишь выводы конденсатора и вывод питания активного компонента. Соединению между выводом конденсатора и общим выводом питания компонента также должно быть уделено значительное внимание.

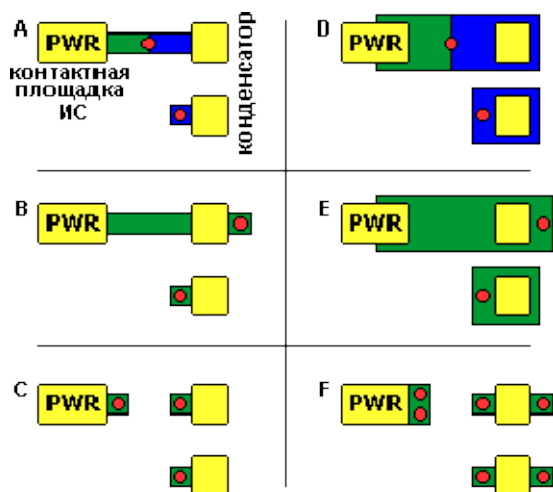


Рис.5. Варианты подсоединения развязывающего конденсатора

На рисунке 5А показана наиболее часто встречающаяся конфигурация разводки. Вывод питания компонента подключен коротким проводником к шине питания во внутреннем слое через переходное отверстие. Конденсатор развязки, расположенный на другой стороне платы, подключен к этому же переходному отверстию. Несмотря на то, что такой подход часто обуславливается простотой разводки, он позволяет эффективно работать цепям развязки и экономит пространство разводки. Два одиночных отверстия добавляют в цепь развязки около 1 нГн паразитной индуктивности.

Если конденсатор расположен на расстоянии 50 мил (1,27 мм) от вывода компонента, то добавляемая индуктивность в лучшем случае составит около 0,9 нГн. При более удаленном размещении конденсатора от активного компонента проводники будут более длинными, а паразитная индуктивность будет иметь большее значение.

Вариант В представляет собой значительное улучшение варианта А с размещением конденсатора развязки и активного компонента на одной стороне печатной платы. Конденсатор подключен после паразитной индуктивности переходного отверстия. При достаточно коротких проводниках схема развязки вносит дополнительно менее 1 нГн паразитной индуктивности.

Вариант D представляет собой развитие варианта А - для уменьшения собственной индуктивности и увеличения распределенной емкости проводники сделаны шире, что также улучшает характеристики цепи развязки.

Вариант Е - модификация варианта В с более широкими проводниками и более хорошими характеристиками.

На первый взгляд кажется, что вариант С совершенно не подходит для разводки цепей развязки, поскольку нет проводников, напрямую подключающих активный компонент к конденсатору развязки; фактически они оба подключены через отверстия к полигонам питания и земли, которые расположены во внутренних слоях. При четырех отверстиях к цепям развязки добавится минимум 2 нГн паразитной индуктивности. Однако очень широкие проводники питания и земли практически не будут добавлять индуктивности при не очень большой длине. Такой вариант разводки пригоден, когда конденсатор развязки не может быть размещен достаточно близко к активному компоненту.

Вариант F - улучшение варианта С добавлением дополнительных параллельных отверстий. Такое добавление приводит к уменьшению паразитной индуктивности переходных отверстий в два раза, позволяет улучшить качественные характеристики схемы и должно использоваться всякий раз, когда позволяет место.

5. ПРИМЕНЕНИЕ СОСТАВНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ

Поскольку емкости при параллельном соединении суммируются, а результирующая индуктивность уменьшается, то параллельное соединение двух небольших конденсаторов с одинаковыми значениями емкости может привести к качественному выигрышу, по сравнению с применением одного большого конденсатора. Конечным результатом будет такая же емкость развязки и меньшая паразитная эквивалентная последовательная индуктивность.

На практике обычно избегают использования конденсаторов с разными значениями емкостей для создания локальной развязки. Составные конденсаторы с разными емкостями обладают частотной зависимостью импеданса, складывающейся из частотных зависимостей импедансов отдельных конденсаторов. Пример показан на рисунке 6.

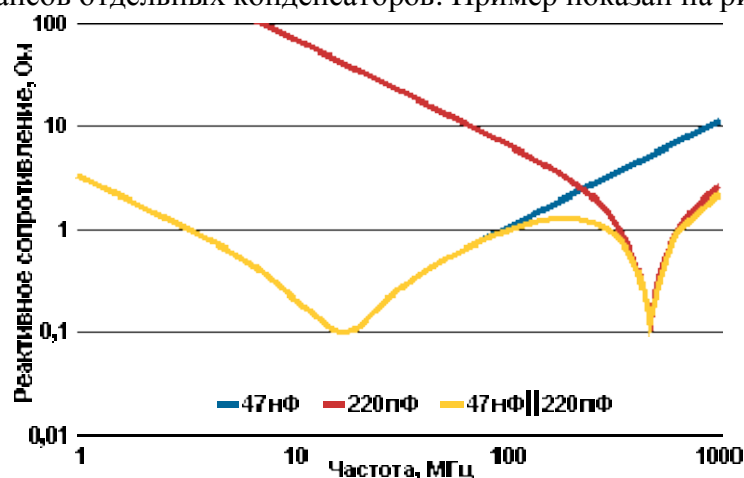


Рис.6. Ожидаемый результат объединения конденсаторов с разными значениями емкости – уменьшение импеданса

Конденсатор емкостью 47 нФ используется для развязки низких частот, а конденсатор емкостью 150 пФ - для высоких. На первый взгляд, можно предположить, что параллельное соединение этих конденсаторов позволит улучшить импедансную характеристику.

К сожалению, это не так. Такое соединение может породить существенные проблемы на частотах, находящихся между собственными резонансными частотами конденсаторов. На рисунке 7 видно, что комбинация двух конденсаторов создает антирезонансный пик (а, следовательно, повышенное сопротивление) на суммарной частотной характеристике.

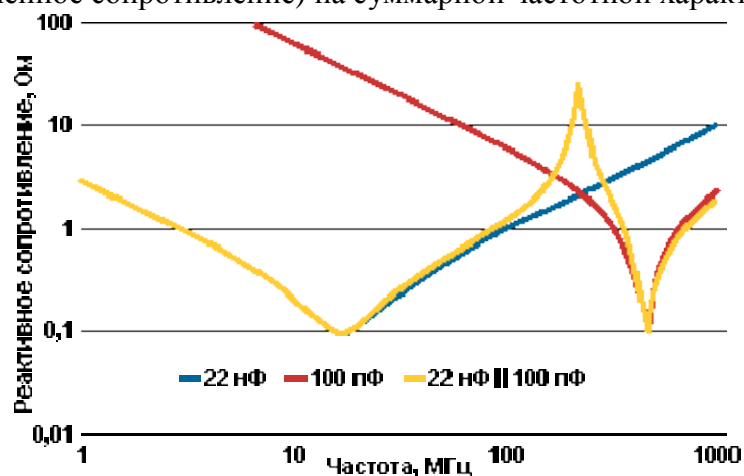


Рис.7. Фактический результат объединения конденсаторов с разными значениями емкости – резонансный пик

Источник данной проблемы легко определяется при рассмотрении эквивалентной схемы, показанной на рисунке 8. Результатом соединения паразитных компонентов конденсаторов является классический резонансный контур.

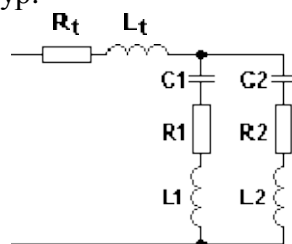
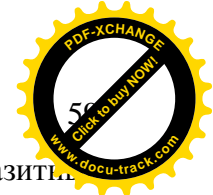


Рис.8. Параллельное соединение конденсаторов – образование резонансного контура

Тем не менее, составные конденсаторы, используемые в качестве элементов развязки, достаточно широко используются в прецизионных схемах. В этом случае к выбору конденсаторов



Необходимо подходить с большой тщательностью, моделируя схемы, включающие все паразитные компоненты.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Помните следующие основные моменты и постоянно соблюдайте их при проектировании и разводке аналоговых схем.

Общие:

- думайте о печатной плате как о компоненте электрической схемы;
 - имейте представление и понимание об источниках шума и помех;
 - моделируйте и макетируйте схемы.

Печатная плата:

- используйте печатные платы только из качественного материала (например, FR-4);
- схемы, выполненные на многослойных печатных платах, на 20 дБ менее восприимчивы к внешним помехам, чем схемы, выполненные на двухслойных платах;
- используйте разделенные, неперекрывающиеся полигоны для различных земель и питаний;
 - располагайте полигоны земли и питания на внутренних слоях печатной платы.

Компоненты:

- осознавайте частотные ограничения, вносимые пассивными компонентами и проводниками платы;
 - старайтесь избегать вертикального размещения пассивных компонентов в высокоскоростных схемах;
 - для высокочастотных схем используйте компоненты, предназначенные для поверхностного монтажа;
 - проводники должны быть чем короче, тем лучше;
 - если требуется большая длина проводника, то уменьшайте его ширину;
 - неиспользуемые выводы активных компонентов должны быть правильно подключены.

Разводка:

- размещайте аналоговую схему вблизи разъема питания;
- никогда не разводите проводники, передающие логические сигналы, через аналоговую область платы, и наоборот;
- проводники, подходящие к инвертирующему входу ОУ, делайте короткими;
- удостоверьтесь, что проводники инвертирующего и неинвертирующего входов ОУ не располагаются параллельно друг другу на большом протяжении;
- старайтесь избегать применения лишних переходных отверстий, т.к. их собственная индуктивность может привести к возникновению дополнительных проблем;
- не разводите проводники под прямыми углами и сглаживайте вершины углов, если это возможно.

Развязка:

- используйте правильные типы конденсаторов для подавления помех в цепях питания;
- для подавления низкочастотных помех и шумов используйте танталовые конденсаторы у входного разъема питания;
- для подавления высокочастотных помех и шумов используйте керамические конденсаторы у входного разъема питания;
- используйте керамические конденсаторы у каждого вывода питания микросхемы; если необходимо, используйте несколько конденсаторов для разных частотных диапазонов;
- если в схеме происходит возбуждение, то необходимо использовать конденсаторы с меньшим значением емкости, а не большим;
- в трудных случаях в цепях питания используйте последовательно включенные резисторы малого сопротивления или индуктивности;
- развязывающие конденсаторы аналогового питания должны подключаться только к аналоговой земле, а не к цифровой.