



Кафедра ИУ6

Компьютерные системы и сети

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

Конструирование и технология производства вычислительной техники

Весна 2026





Кафедра ИУ6

Компьютерные системы и сети

Московский государственный технический университет
им. Н.Э. Баумана

Разработка топологии печатных плат. Компоновка ПП, правила размещения компонентов



СТРУКТУРА ЛЕКЦИИ

- полный цикл разработки топологии ПП (от принципиальной схемы до Gerber файла);
- классификация компонентов ПП;
- приоритет и последовательность размещения **КОМПОНЕНТОВ.**

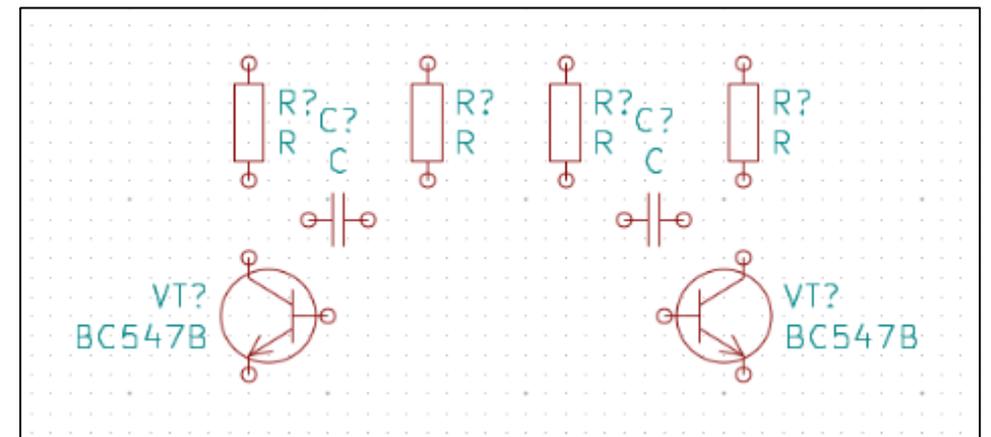
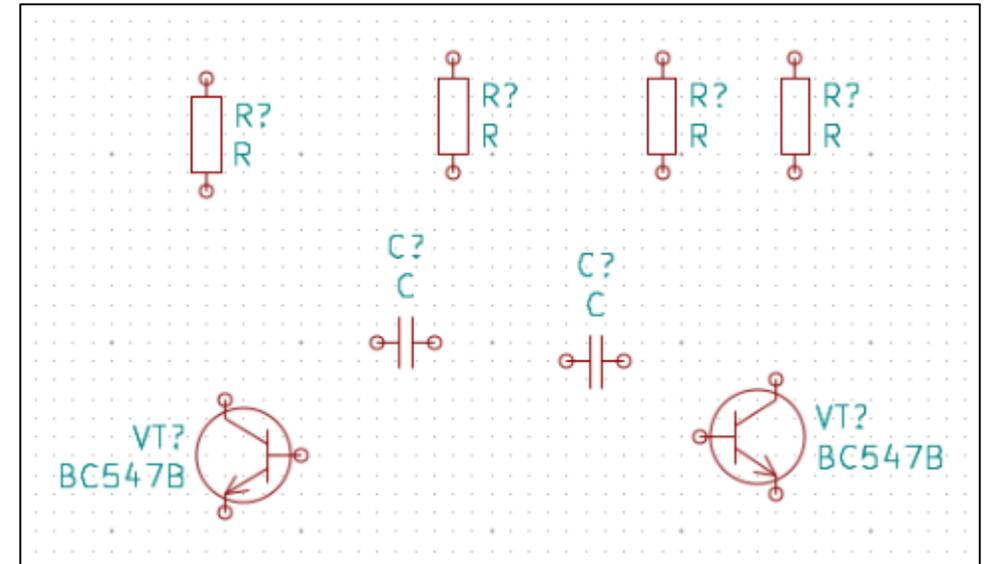
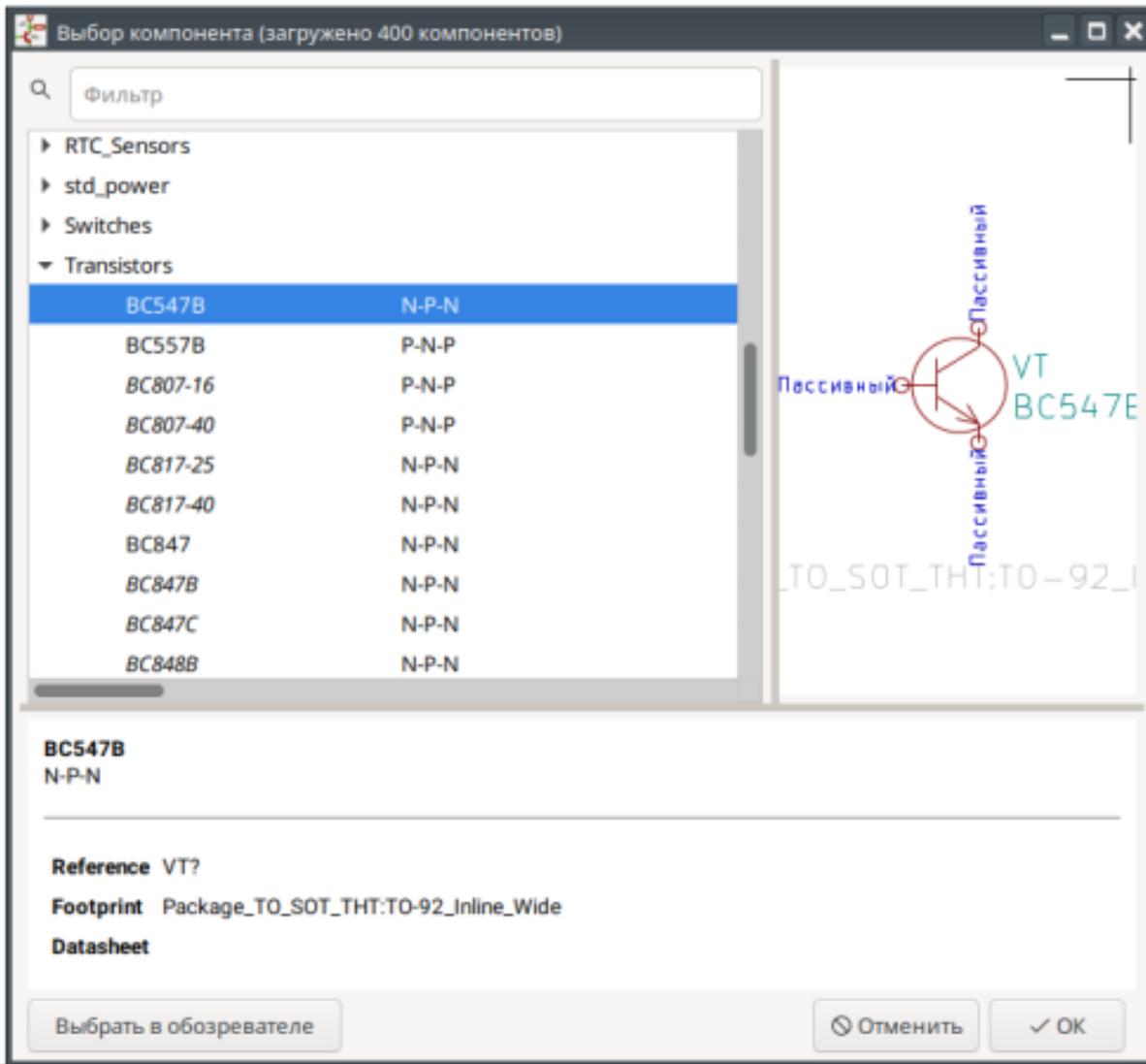
ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

1. Схема электрическая принципиальная (ЭЗ) как основной документ.
2. Конструкторские требования:
 - Габариты устройства;
 - Расположения разъемов и органов управления;
 - Крепежные отверстия.
3. Техническое задание, в особенности условия эксплуатации:
 - Температура;
 - Вибрация;
 - Влажность.

СОЗДАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ В САПР

1. Размещение (добавление) компонентов на схему. ЛР № 1.2

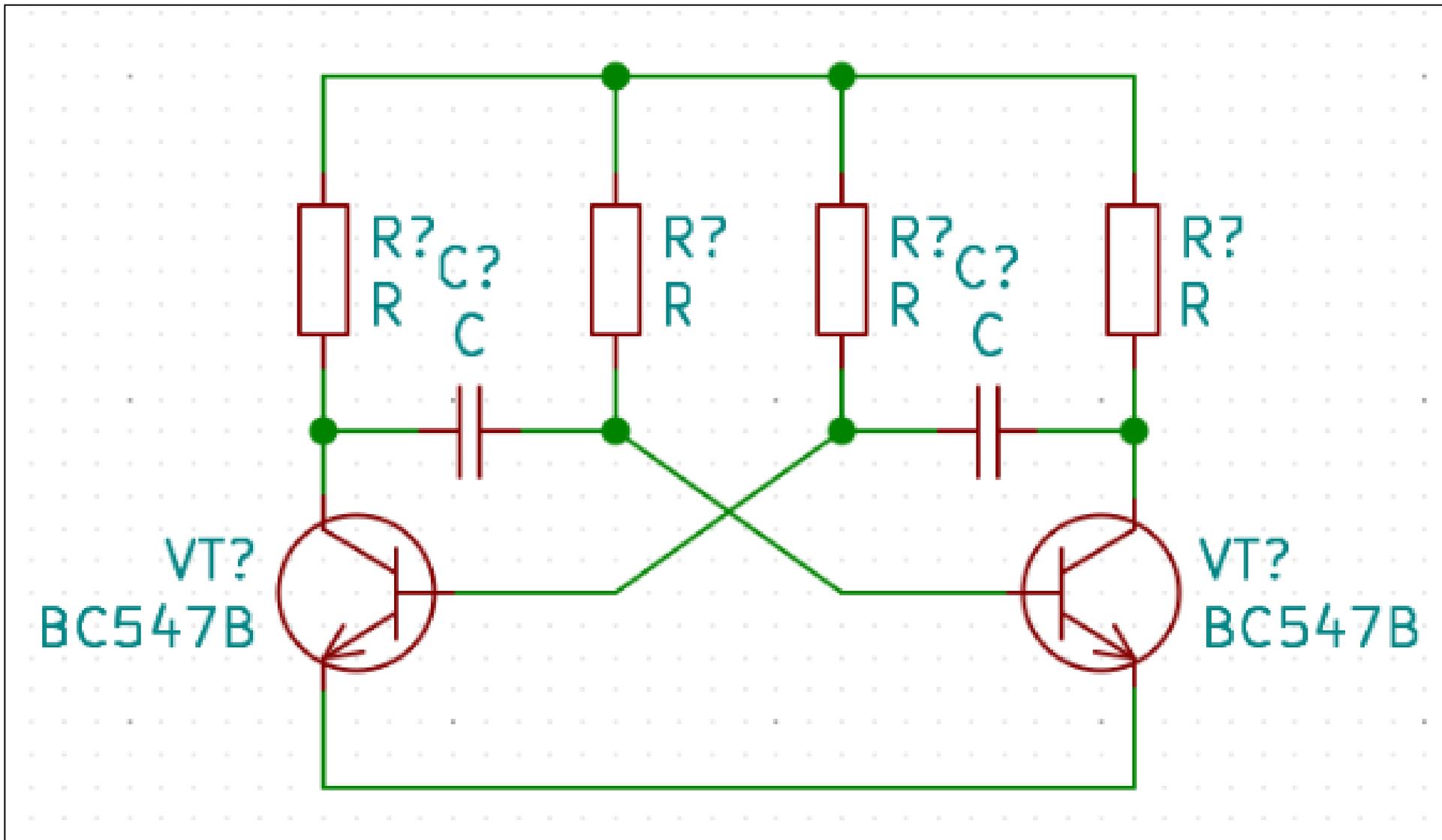
полный цикл разработки ПП



СОЗДАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ В САПР

2. Соединение элементов схемы.

ЛР № 1.2

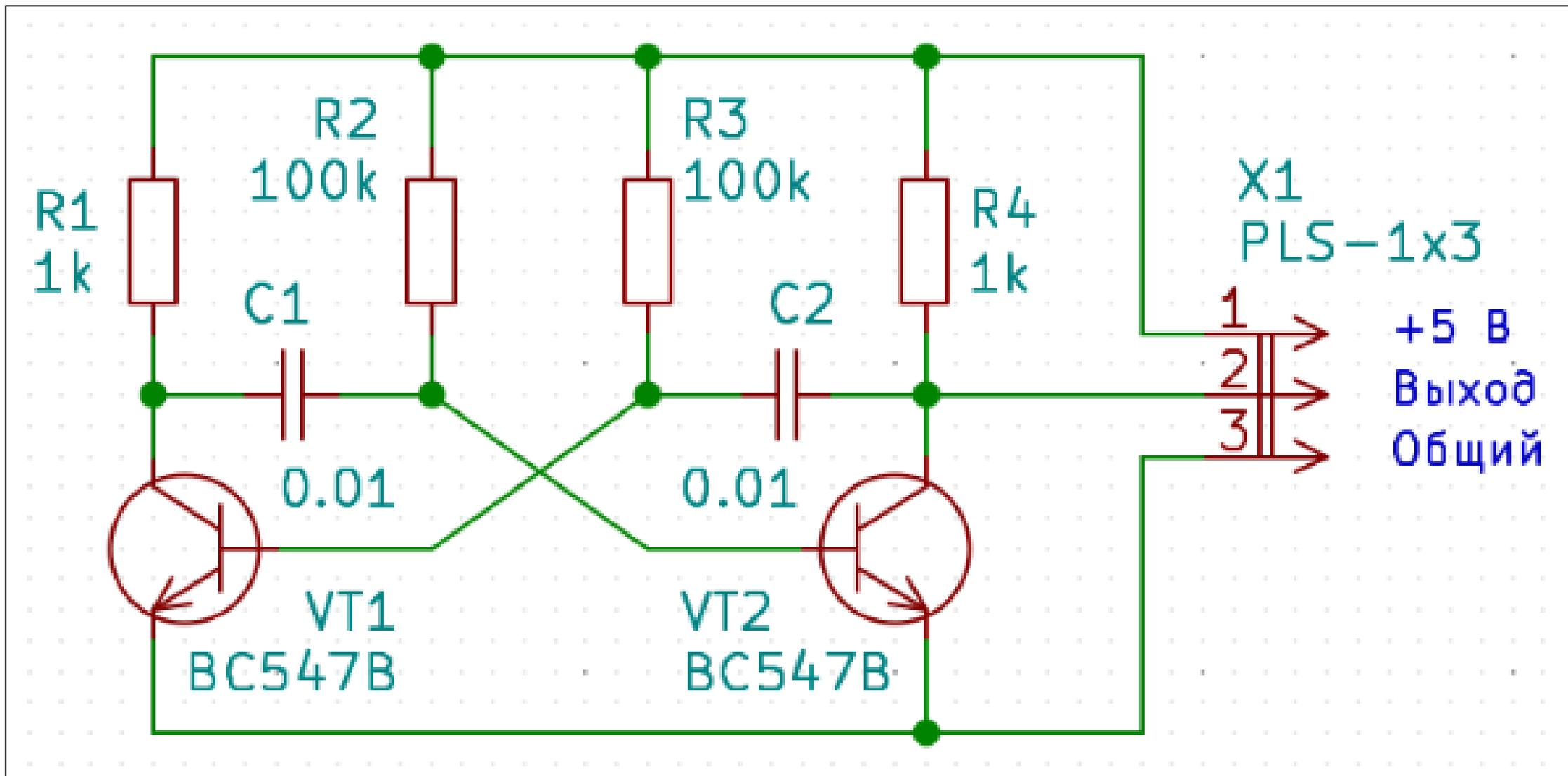


Источник: <https://dzen.ru/a/YZSaaJp81FDmWcUe>

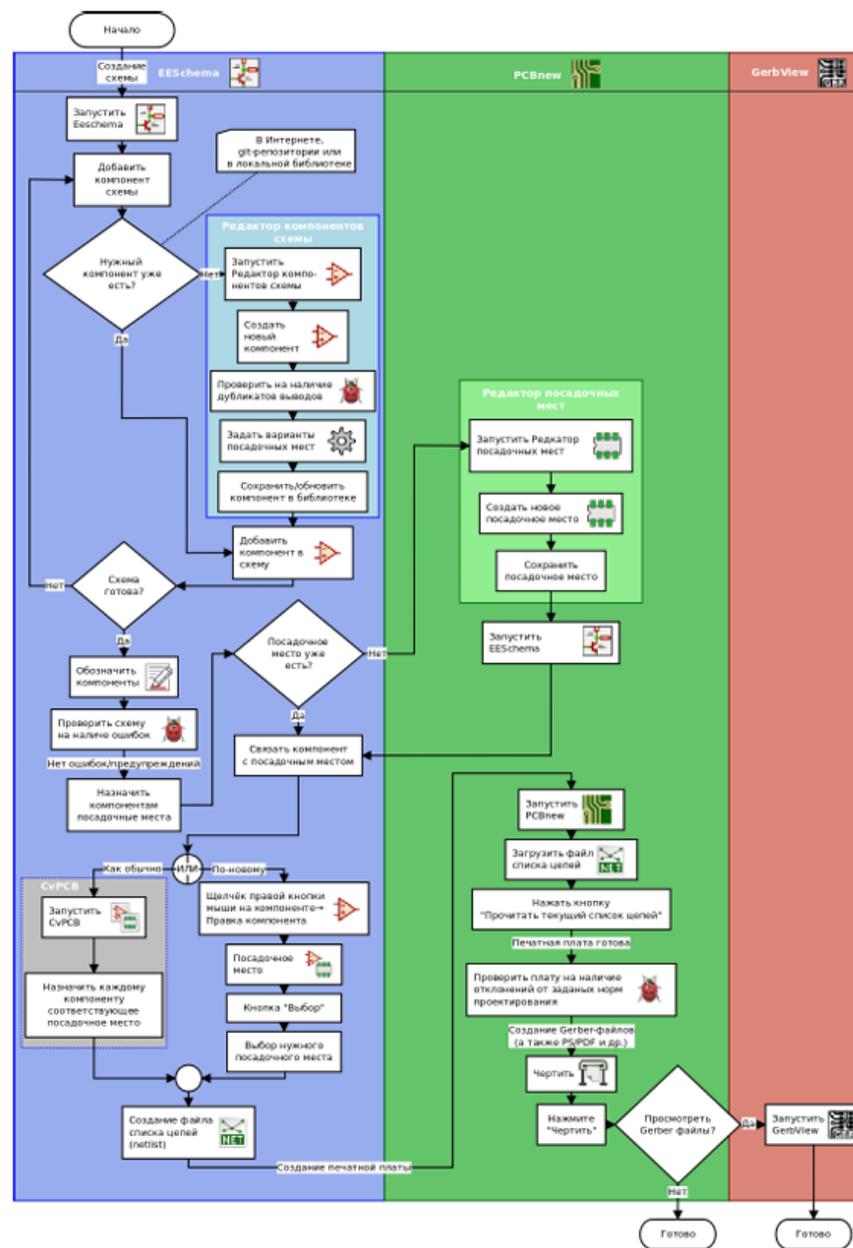
СОЗДАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ В САПР

3. Обозначение элементов схемы.

ЛР № 1.2



БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD



Источник: https://docs.kicad.org/5.1/ru/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD



EESchema — это графический редактор принципиальных схем в KiCad.

На этом этапе создаётся электрическая схема устройства:

- размещаются компоненты (резисторы, конденсаторы, микросхемы и т. д.) из библиотек;
- соединяются компоненты проводниками, обозначаются цепи;
- проводится проверка схемы (ERC — Electrical Rules Check);
- формируется список цепей (netlist) — файл с описанием соединений между компонентами.

Результат: готовая принципиальная схема в формате .sch

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD

ERC — **Electrical Rules Check** — это методология проверки электрической целостности и соответствия конструкции печатной платы набору заранее определённых электрических правил. Цель — выявить потенциальные проблемы или нарушения, которые могут повлиять на функциональность и производительность платы.

Некоторые проверки:

- Ошибки формирования цепей — соединение в одну цепь неправильных комбинаций типов контактов (например, в цепи соединены лишь одни выходные или только входные контакты).
- Неподключённые выводы — информация о всех свободных контактах.
- Неподключённые проводники — информация о неподключённых элементах цепей.
- Правила шины/цепи — информация о цепях, которые только один раз встречаются в шинах (цепь входит в шину, но далее не используется).
- Правила компонентов — информация о компонентах, которые дважды находятся на одном и том же месте (друг на друге).
- Правила связности — информация об ошибках соединений, которые могут быть связаны с неправильным объединением или переименованием цепей.
- Правила иерархии — информация об ошибках в иерархических элементах принципиальной схемы.

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD



PCBnew — редактор топологии печатных плат.

Здесь происходит переход от схемы к физической разводке платы:

- загружается список цепей (.net), созданный в EESchema;
- назначается посадочное место (footprint) для каждого компонента (с помощью Cvrpcb);
- рисуется контур платы (границы, крепёжные отверстия);
- размещаются компоненты на плате (вручную или автоматически);
- выполняется трассировка — прокладываются токопроводящие дорожки между компонентами (ручная, автоматическая или полуавтоматическая);
- проводится проверка платы (DRC — Design Rules Check) на соответствие правилам проектирования;
- создаётся печатная зона (залитка медью, маркировка).

Результат: топология печатной платы в формате .brd

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD

DRC — **Design Rules Check** — это процесс автоматизированной проверки соответствия проекта печатной платы (PCB) определённым правилам проектирования. Эти правила устанавливаются производителем печатных плат. Цель DRC — убедиться, что проект PCB соответствует технологическим возможностям производителя и обеспечит надёжное функционирование устройства.

Некоторые общие правила DRC:

- Минимальная ширина проводника.
- Минимальный зазор между проводниками.
- Минимальный диаметр отверстия для установки компонентов.
- Размер площадки под пайку для обеспечения надёжного соединения компонента с платой.
- Зазоры вокруг компонентов — минимальные расстояния между компонентами и краями платы.

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD



GerbView — программа для просмотра и проверки Gerber-файлов (фотошаблонов платы).

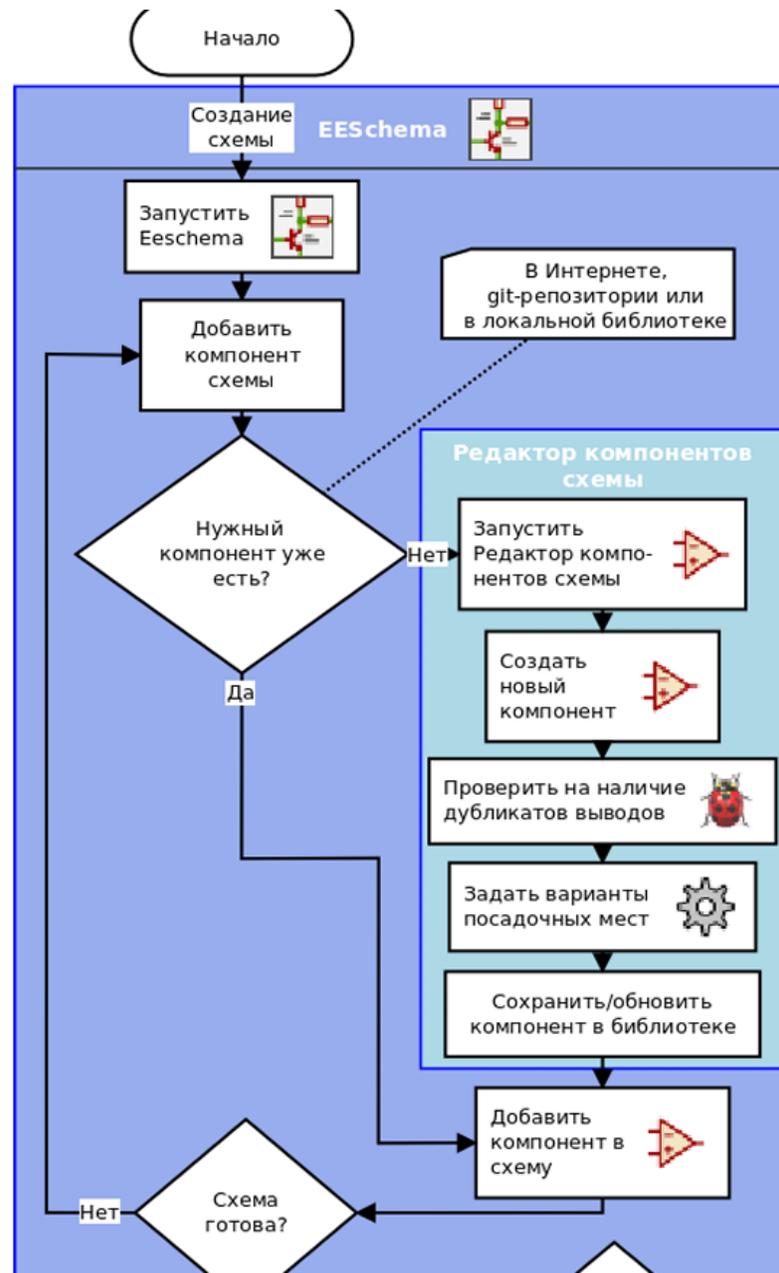
На этом этапе:

- из PCBnew генерируются Gerber-файлы — набор файлов для каждого слоя платы (медь, маска, шёлкография, контур и т. д.) в формате .GBR;
- GerbView позволяет визуально проверить корректность разводки, убедиться, что все слои совпадают, нет ошибок;
- также создаются файлы для сверлильного станка (список координат отверстий).

Результат: комплект Gerber-файлов, готовых для передачи на производство печатных плат.

СОЗДАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ В САПР

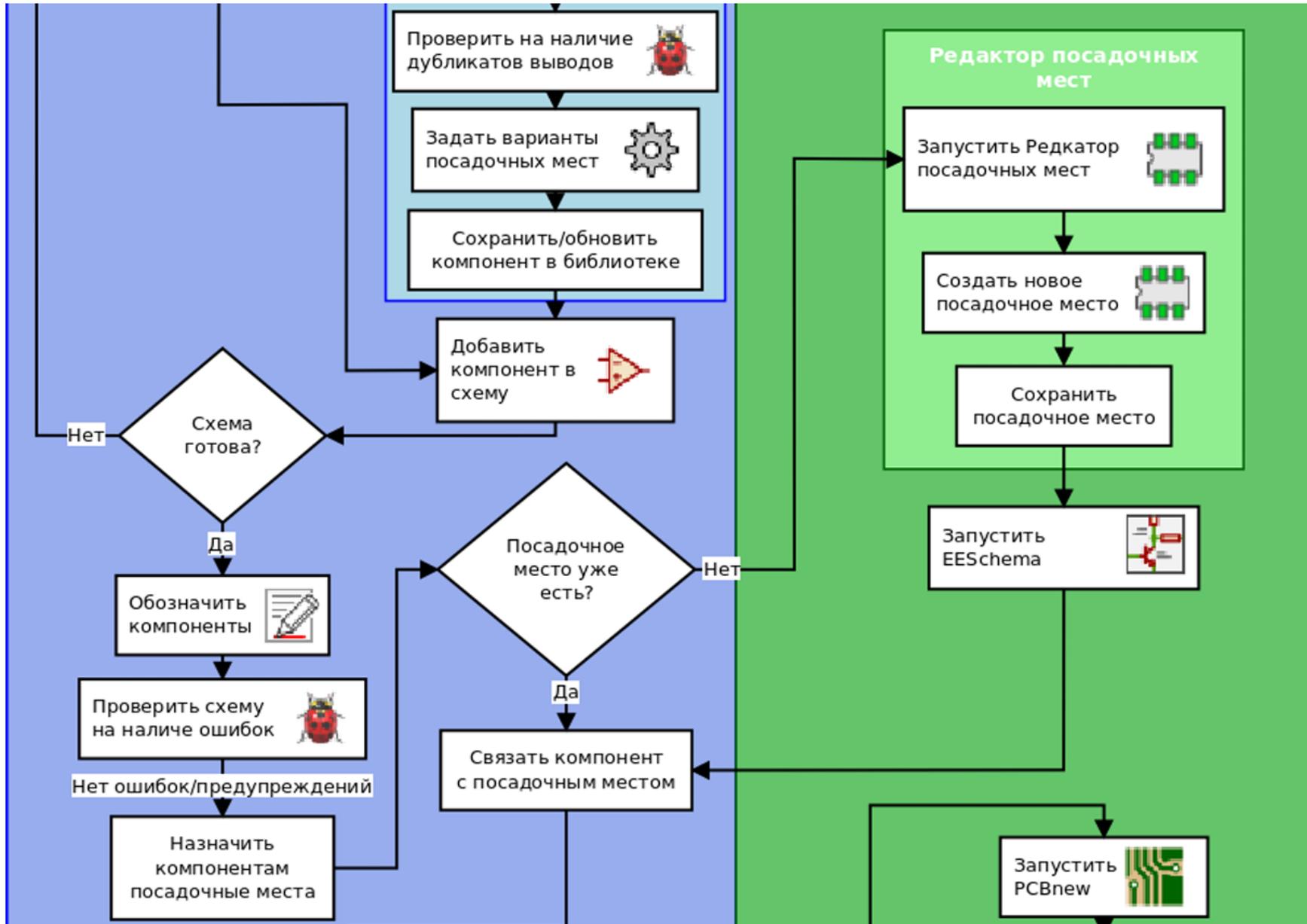
Это наша лабораторная работа №1.2



Источник: https://docs.kicad.org/5.1/ru/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD

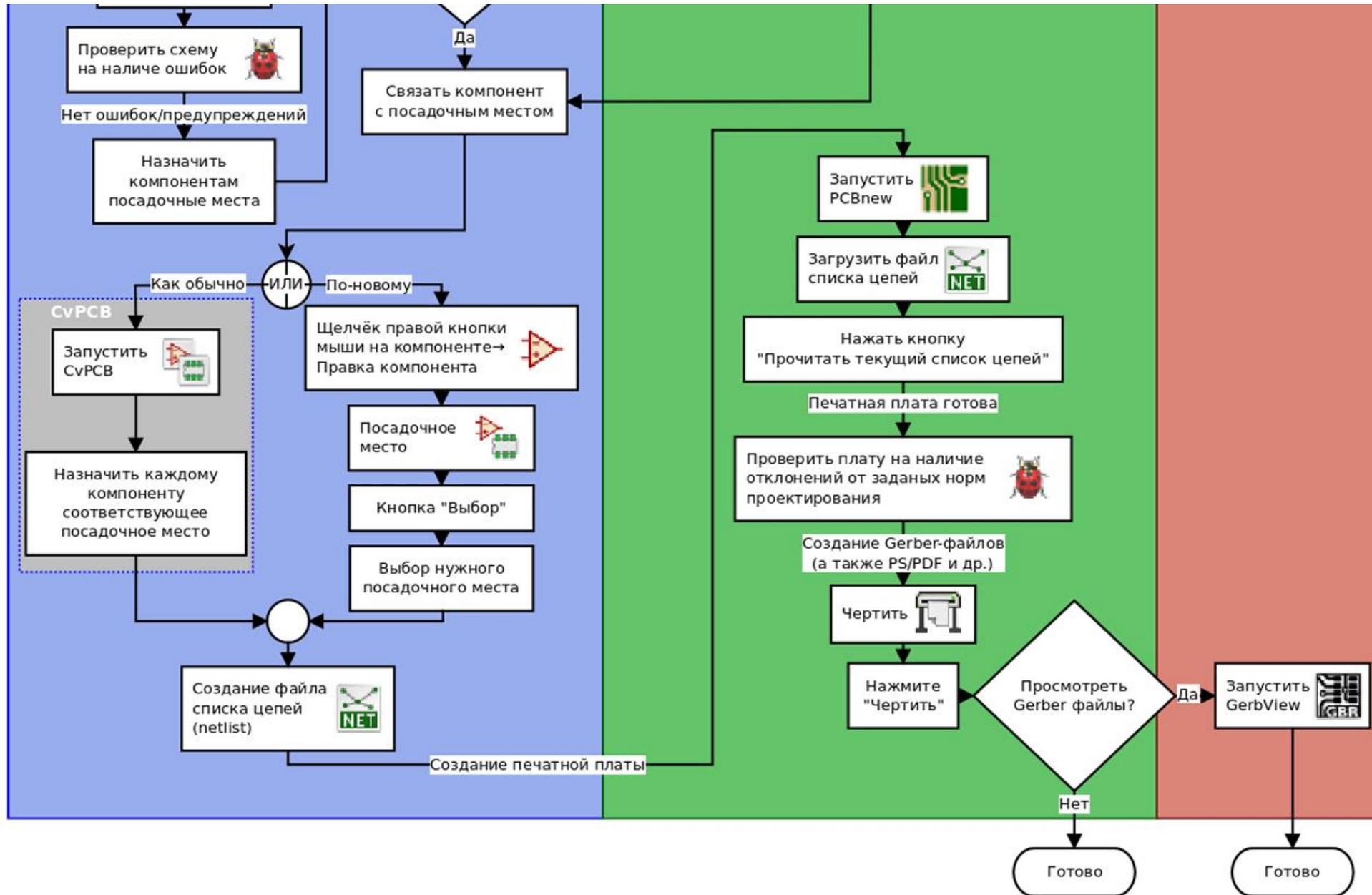
полный цикл разработки ПП



Источник: https://docs.kicad.org/5.1/ru/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf

БЛОК-СХЕМА ЭТАПОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ В САПР KICAD

полный цикл разработки ПП

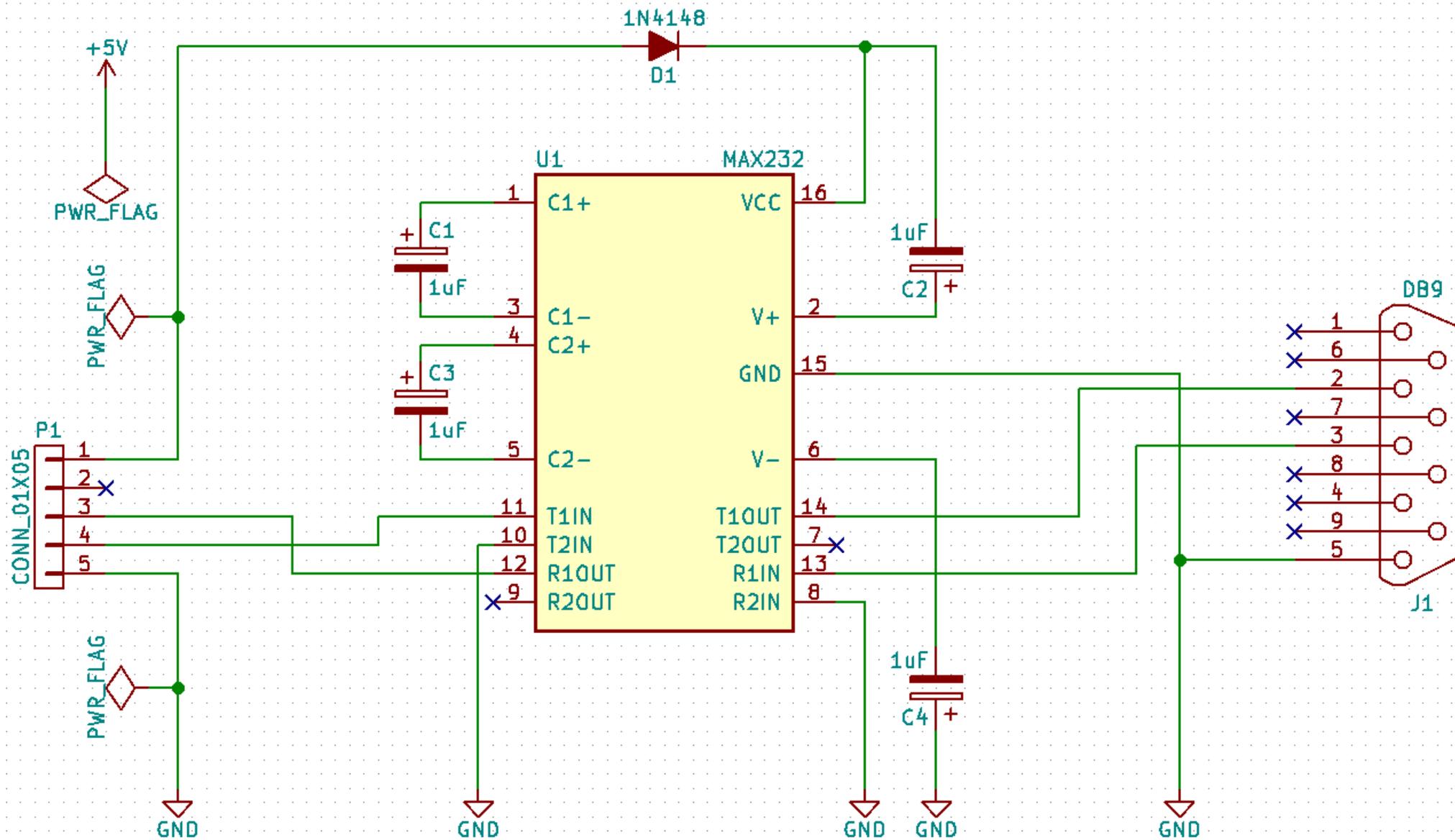


Источник: https://docs.kicad.org/5.1/ru/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf

ПОЛНЫЙ ЦИКЛ РАЗРАБОТКИ ПП

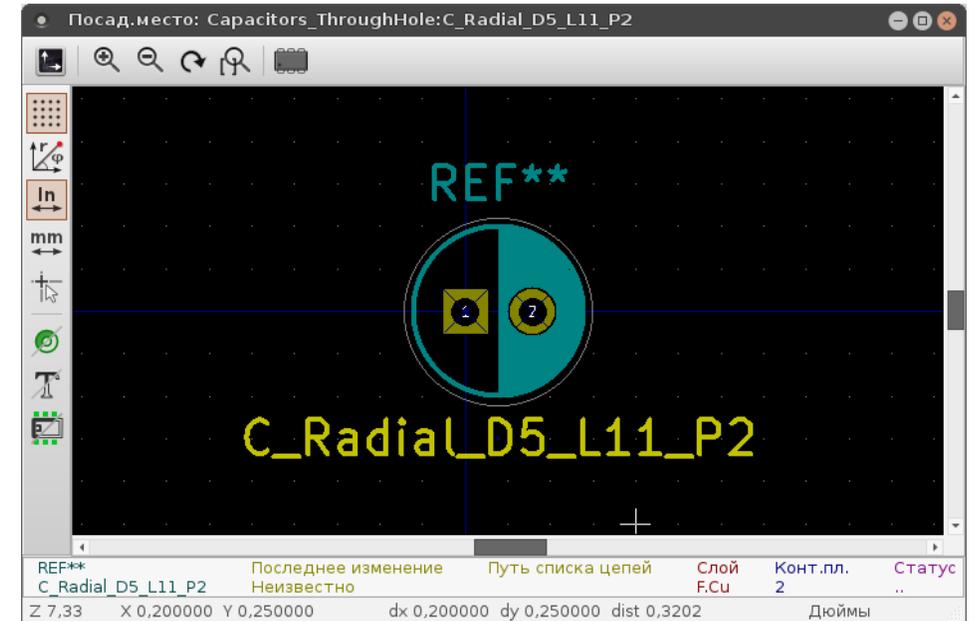
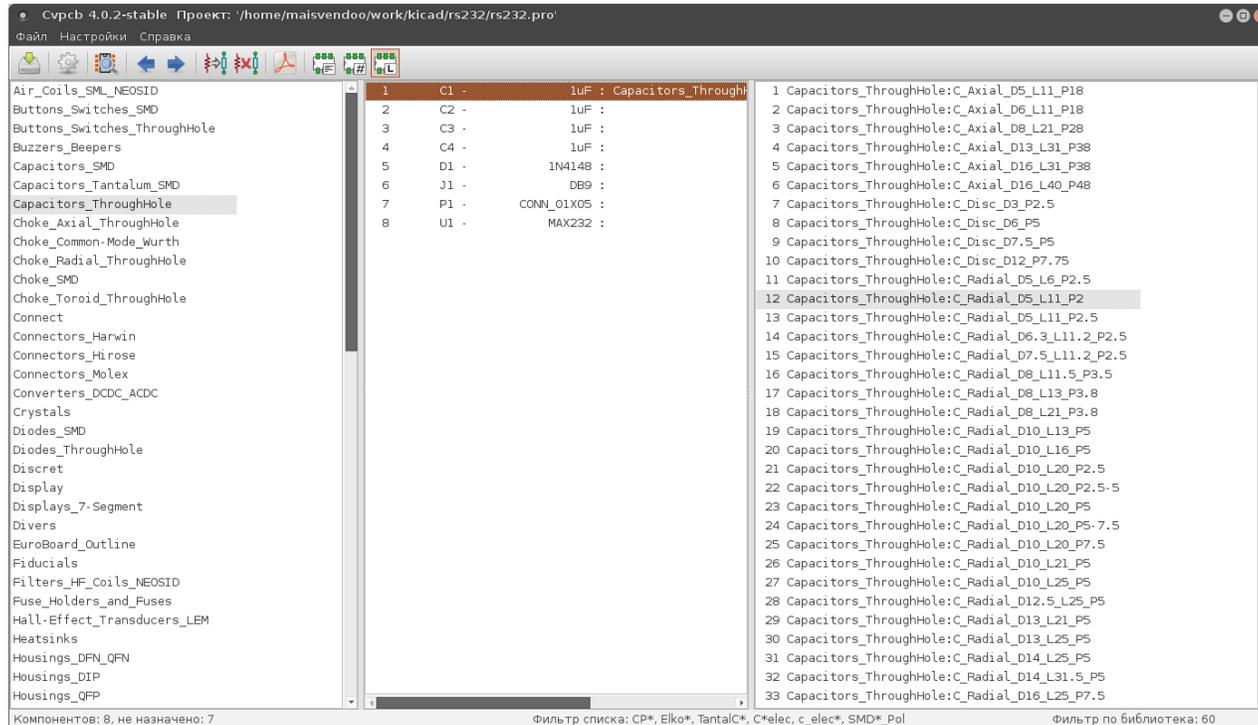
1. Создание схемы электрической принципиальной в САПР:
 - Выбор библиотечных компонентов или создание собственных;
 - Назначение посадочных мест компонентам (Footprint);
 - Соединение компонентов.
2. Разработка геометрии платы:
 - Определение формы и размеров платы;
 - Размещение крепежных отверстий и конструктивных элементов.
3. Компоновка - разнесение компонентов по печатной плате в соответствии с п.2.
4. Трассировка проводников и проектирование слоев питания и заземления.
5. Верификация проекта (ERC, DRC).
6. Подготовка выходных файлов (Gerber, Excellon, Drill files, файлы сверловки).\
7. Схемы по ГОСТ:
 - Топология печатной платы;
 - Сборочный чертеж.

СОЗДАНИЕ СХЕМЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРИНЦИПАЛЬНОЙ В САПР



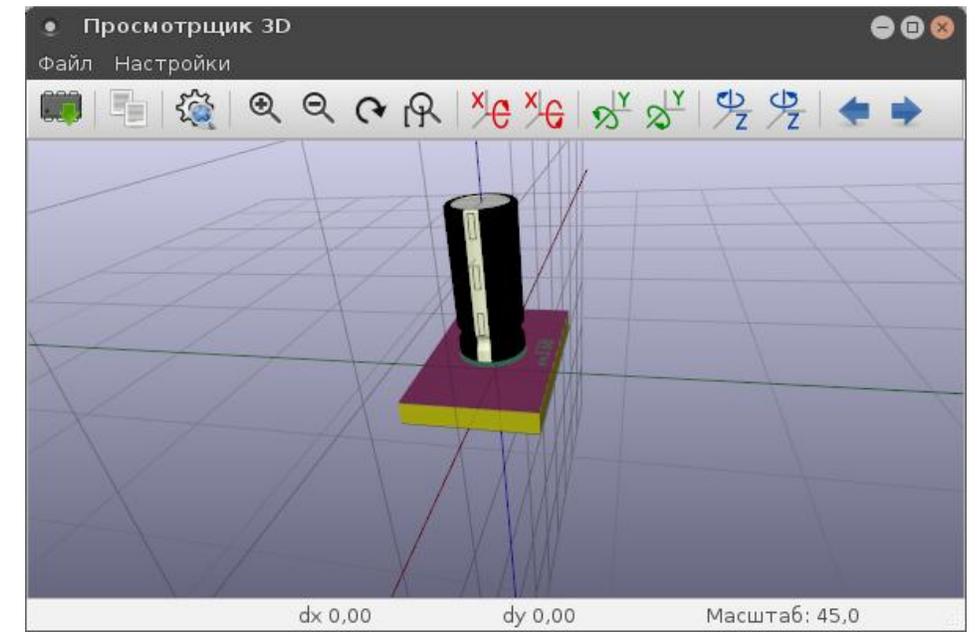
полный цикл разработки ПП

СВЯЗЫВАНИЕ КОМПОНЕНТОВ И ИХ ПОСАДОЧНЫХ МЕСТ

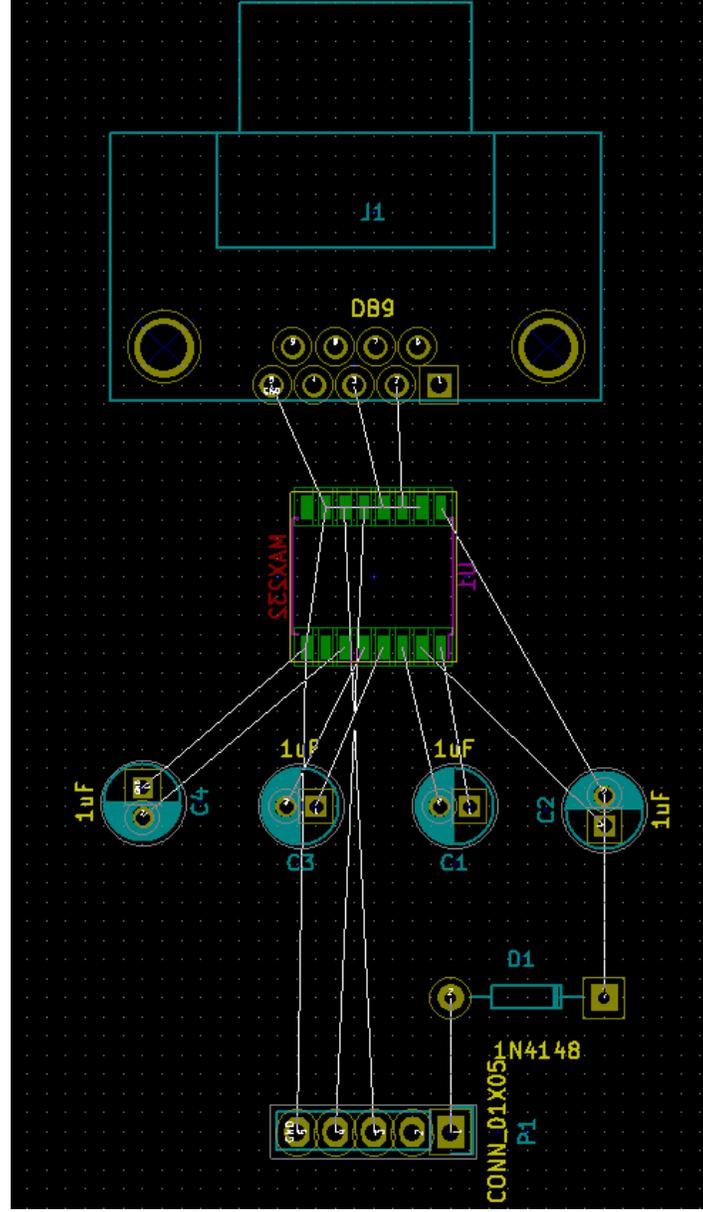


19

Источник: <https://habr.com/ru/articles/395933/>

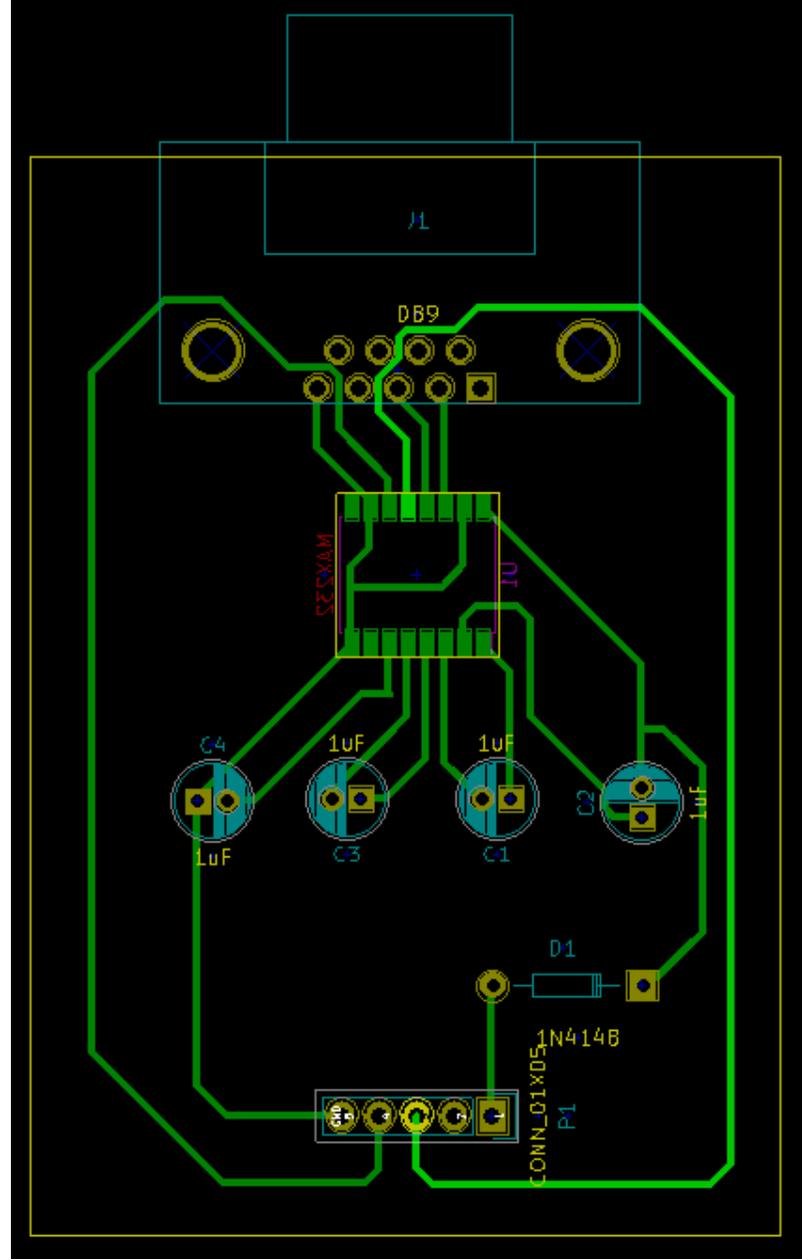


КОМПОНОВКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ



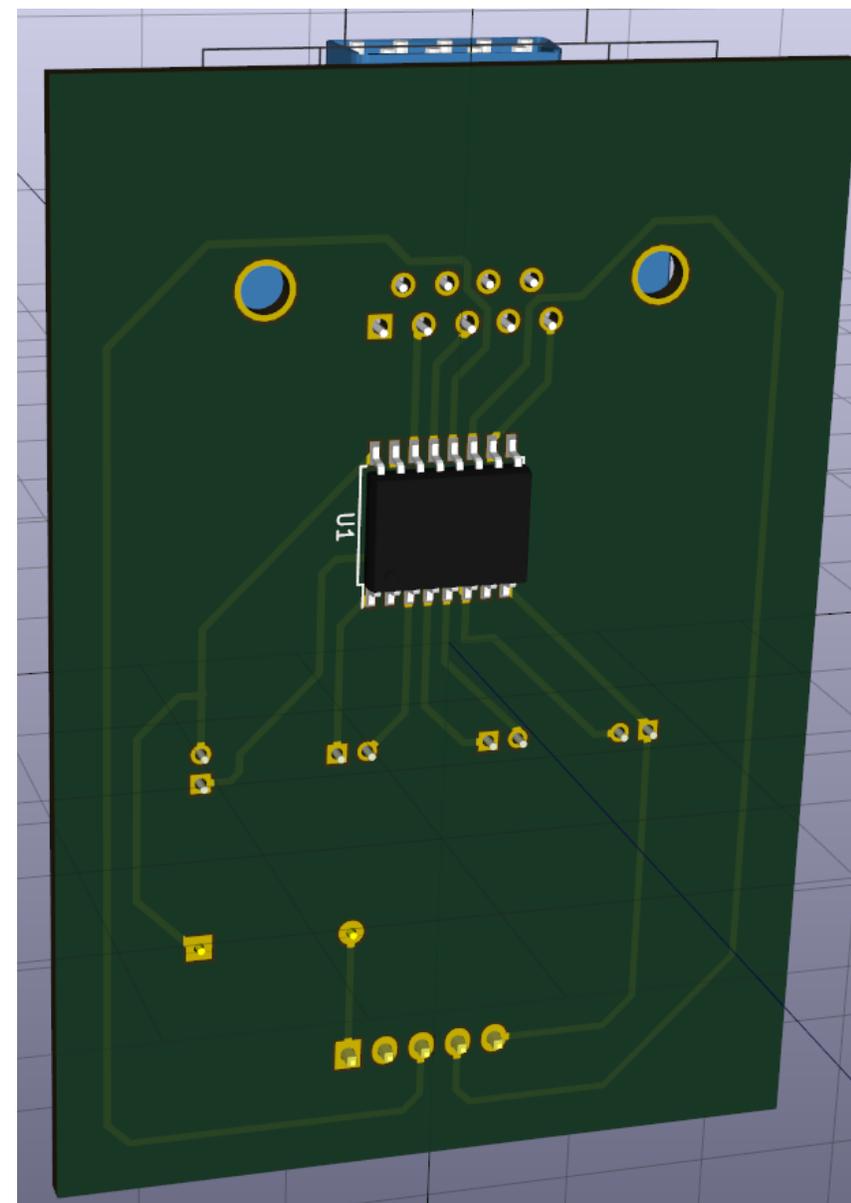
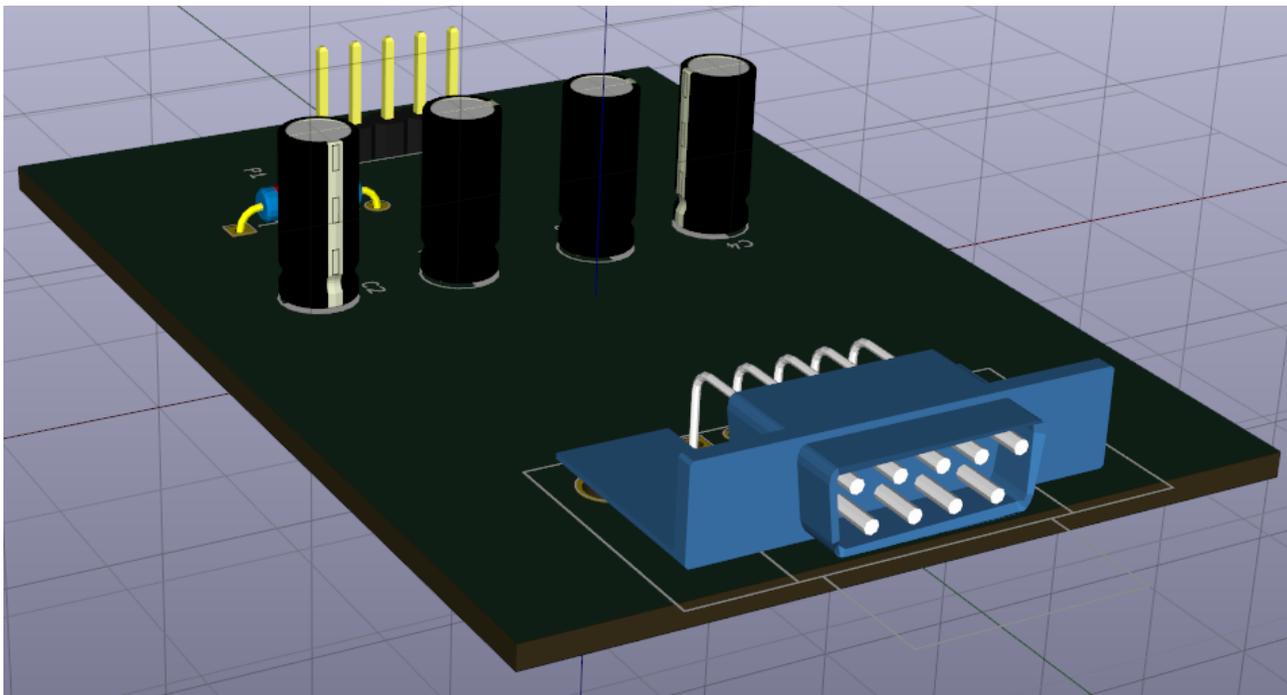
Источник: <https://habr.com/ru/articles/395933/>

ТРАССИРОВКА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ

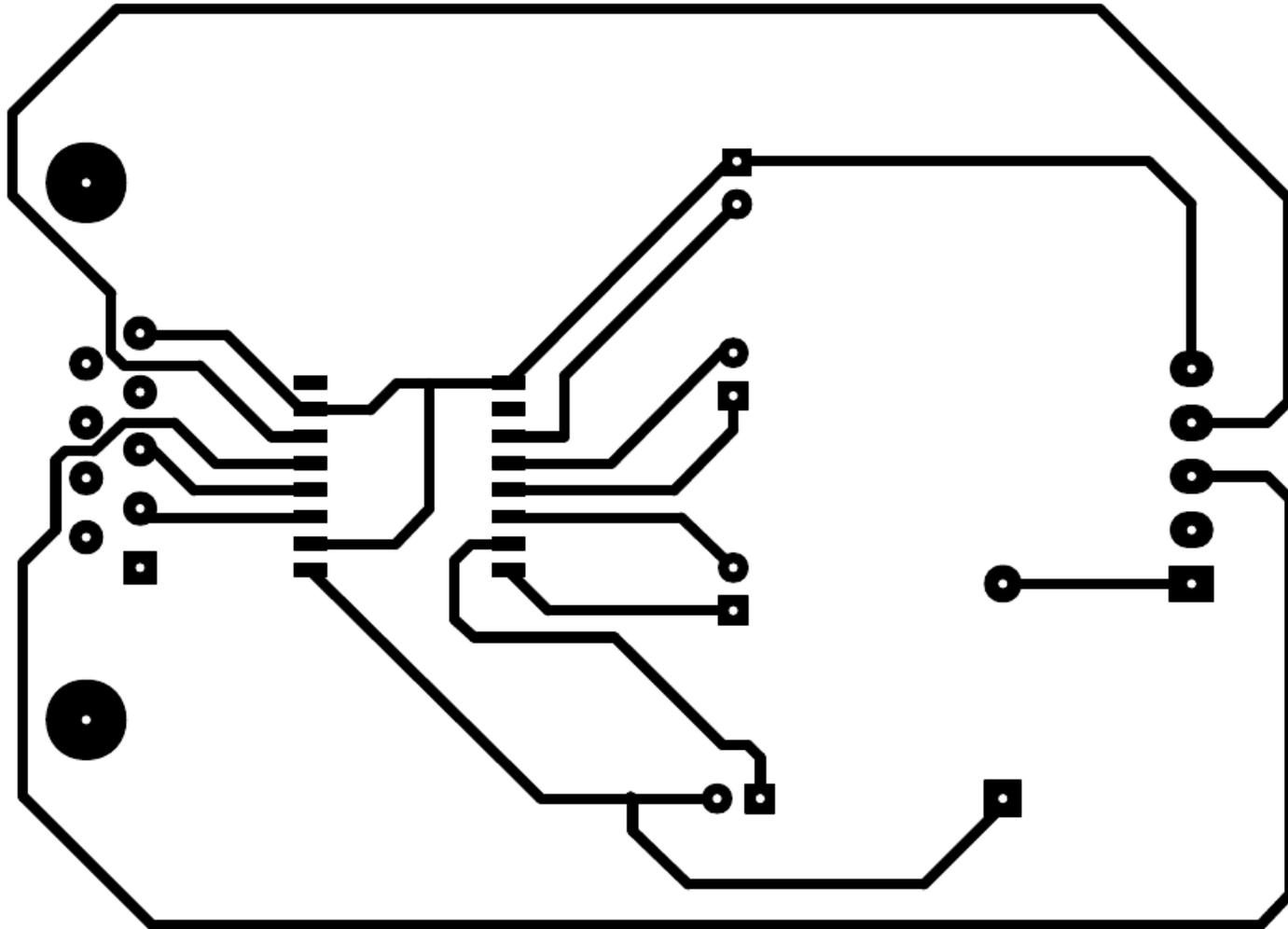


Источник: <https://habr.com/ru/articles/395933/>

3D ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ



ЛУТ-ШАБЛОН



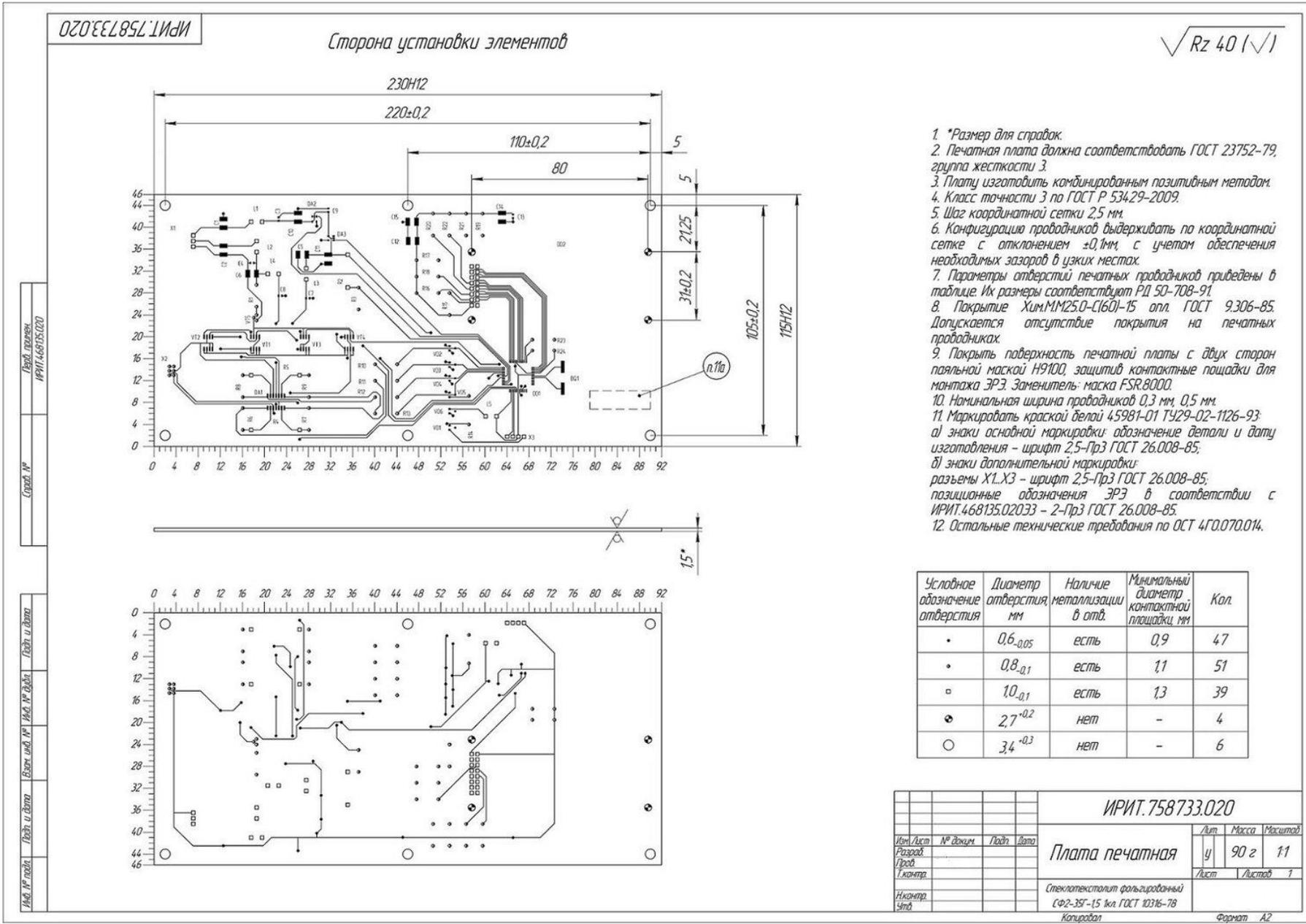
Шаблон для изготовления печатной платы методом ЛУТ (лазерно-утюжной технологии) — это рисунок, напечатанный на лазерном принтере, который переносится на медное покрытие текстолита посредством нагрева утюгом (термоперенос).

Рисунок наносится на термотрансферную бумагу — глянцевую, чтобы тонер принтера не проникал в текстуру, а оставался на поверхности и впоследствии полностью переходил на текстолит.

В основе ЛУТ лежит механизм, при котором тонер, используемый для печати на лазерных принтерах, при высоких температурах плавится и фиксируется на поверхности бумаги. Этот же механизм используется для переноса рисунка на текстолит.

Источник: <https://habr.com/ru/articles/395933/>

ТОПОЛОГИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ПО ГОСТУ



ТОПОЛОГИЯ ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЫ ПО ГОСТУ

Сборочный чертёж печатной платы (монтажная схема) — это документ, который содержит позиционные обозначения элементов платы согласно спецификации и технические требования к проведению сборочно-монтажных операций.

Основой для разработки чертежа являются электрическая принципиальная схема, перечень элементов и разработанная в соответствии с ней печатная плата.

полный цикл разработки ПП

Лист 1 из 1

Стр. №

Лист 1 из 1

Лист 1 из 1

Лист 1 из 1

Лист 1 из 1

Установка CLCB

Установка CH, CT9

Установка D1, D3, D5

Установка D4

Установка D6

Установка R1R3, R36, R37, R39, R40

Установка R35

Установка R38

Установка V01, V05

Установка V07

Установка X1

1. *Размеры для справок
2. Габаритные размеры даны по наибольшему размеру выступающих деталей
3. Монтаж выполнять согласно схеме электрической принципиальной
4. Установку КМД осуществлять согласно ГОСТ Р МЭК 61192-1-2010.
5. Пайку штыревых соединений производить по С-61 ГОСТ 21930-76 согласно ГОСТ 23592-96.
6. Контроль паяных соединений производить визуально-оптическим методом ГОСТ 24.715-81.
7. Печатные проводники условно не показаны.
8. Маркировать заводской номер шрифт 2,5-Пр3 26.020-80 ПФ-115 делая ГОСТ 6465-76 4X/12.
9. Клеяма ОТК
10. Покрытие после проверки работоспособности лак ЭП-572, ТУ6-10-1539-76.
11. Остальные технические требования по ОСТ4.ГО.070.015-75.

| Изм. | Лист | № докум. | Подп. | Дата | Лит. | Масса | Масштаб |
|---------|------|----------|-------|------|------|--------|---------|
| | | | | | | | 1:1 |
| | | | | | Лист | Листов | 1 |
| Исполн. | | | | | | | |
| Удп. | | | | | | | |

Копирован Формат А2

СТАНДАРТЫ

Самый известный в мире набор стандартов — дерево стандартов **IPC**. Это разветвлённая система документации, из которой основным для разработчика плат является IPC-2221, «Основные стандарты проектирования печатных плат». Также полезными будут:

1. IPC-600H — «Критерии приёмки печатных плат»;
2. IPC-6012 — «Качество и производительность жёстких печатных плат»
3. IPC-6011 — «Качество и производительность печатных плат» и другие.

СТАНДАРТЫ

- ГОСТ 23752-79 Платы печатные. Общие технические условия.
- ГОСТ Р 55490-2013 Платы печатные. Общие технические требования к изготовлению и приемке.
- ГОСТ Р 53429-2009 Платы печатные. Основные параметры конструкции.
- ГОСТ Р 51040-97 Платы печатные. Шаги координатной сетки.
- ГОСТ 11284-75 Отверстия сквозные под крепежные детали. Размеры (с Изменением N 1).
- ГОСТ 25347-2013 (ISO 286-2:2010) Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Ряды допусков, предельные отклонения отверстий и валов.

ПОЧЕМУ ПРАВИЛЬНОЕ РАЗМЕЩЕНИЕ КОМПОНЕНТОВ ТАК ВАЖНО?

Размещение компонентов на печатной плате — это **отправная точка** качественного монтажа и дизайна печатной платы. Расположение ключевых компонентов, таких как интегральные схемы, силовые приборы и разъемы влияет на качество сигнала, распределение тепла и общую надежность платы.

Неправильное размещение **усложняет** всё в дальнейшем.

Маршрутизация становится тесной, длина проводников увеличивается и вероятность проблем из-за электромагнитного излучения возрастает. Это также увеличивает производственный риск, приводя к проблемам с пайкой, более высокому уровню брака и необходимости доработки.

Простое и логичное размещение компонентов помогает **контролировать производительность и производство**.

ТИПЫ КЛАССИФИКАЦИЙ КОМПОНЕНТОВ

1. **Функциональное разделение** подразумевает размещение компонентов в соответствии с их предназначением. Силовые цепи, цифровая логика, аналоговые сигналы, радиочастотные секции и интерфейсы ввода/вывода должны иметь свои собственные зоны на печатной плате.
2. **Разделение шумных и чувствительных цепей.** Физическое разделение помогает уменьшить помехи, защищает качество сигнала и значительно упрощает контроль электромагнитных помех в дальнейшем.
3. **По очереди размещения компонентов.**

Также нельзя забывать при размещении о **габаритных** и **монтажных** проблемах.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ

1. Силовые цепи;
2. Цифровые цепи;
3. Аналоговые сигналы;
4. Радиочастотные компоненты;
5. Интерфейсы ввода/вывода.

ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ РАЗДЕЛЕНИЕ

Силовые цепи — это часть электрической схемы, предназначенная для передачи, коммутации и преобразования энергии от источника к нагрузке. В отличие от цепей управления и обработки сигналов (слаботочных, информационных), силовые цепи работают с большими токами и напряжениями. Именно здесь возникают основные потери мощности, выделяется тепло и генерируются наиболее интенсивные электромагнитные помехи.

Цепи управления — это «интеллект» устройства. Они работают с малыми токами, главная задача при их разводке — целостность сигналов и защита от помех.

Силовые цепи - это «мышцы» устройства. Они работают с большими токами, а главная задача при разводке — обеспечение токонесущей способности, отвод тепла и минимизация паразитных параметров (индуктивности, сопротивления), которые являются источниками помех и потерь.

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ

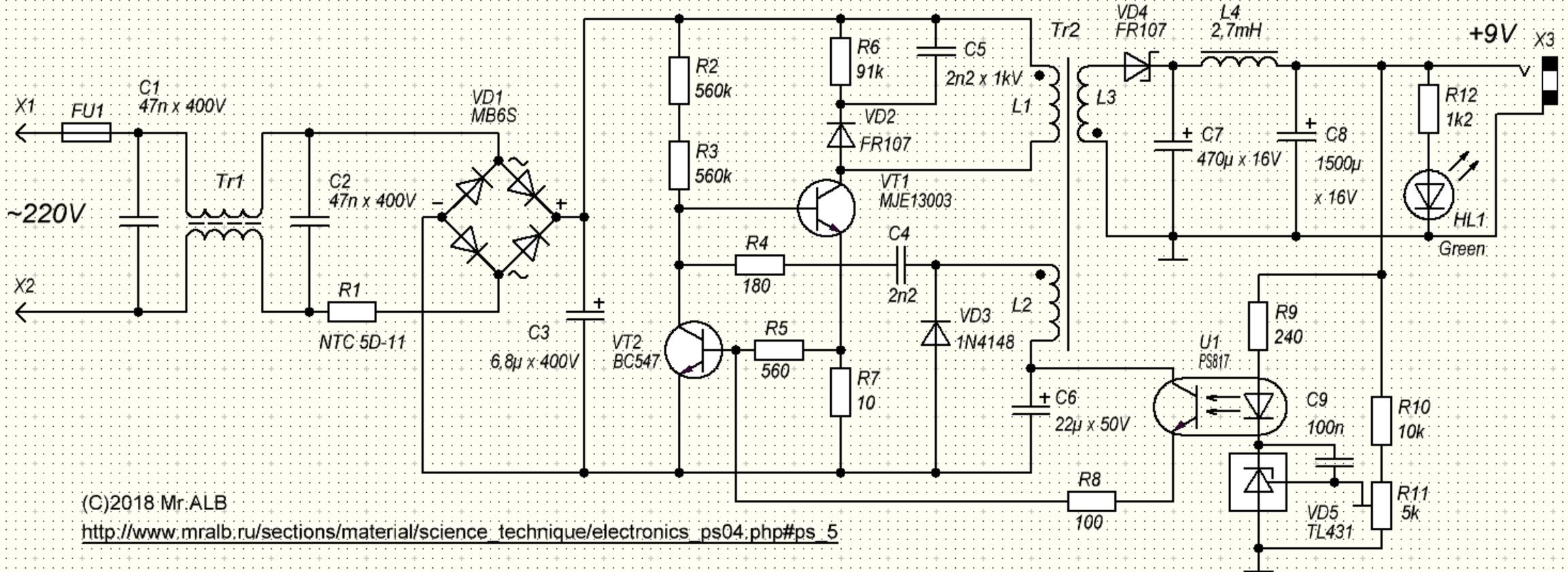
1. Цепи первичного и вторичного электропитания

Это самый распространенный класс в современной электронике. Их задача преобразовать входное напряжение (от сети, аккумулятора, внешнего адаптера) в стабилизированное напряжение для питания остальных компонентов устройства.

- Импульсные источники питания;
- Линейные стабилизаторы;
- DC-DC преобразователи;
- AC-DC преобразователи;
- и т.д.

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ

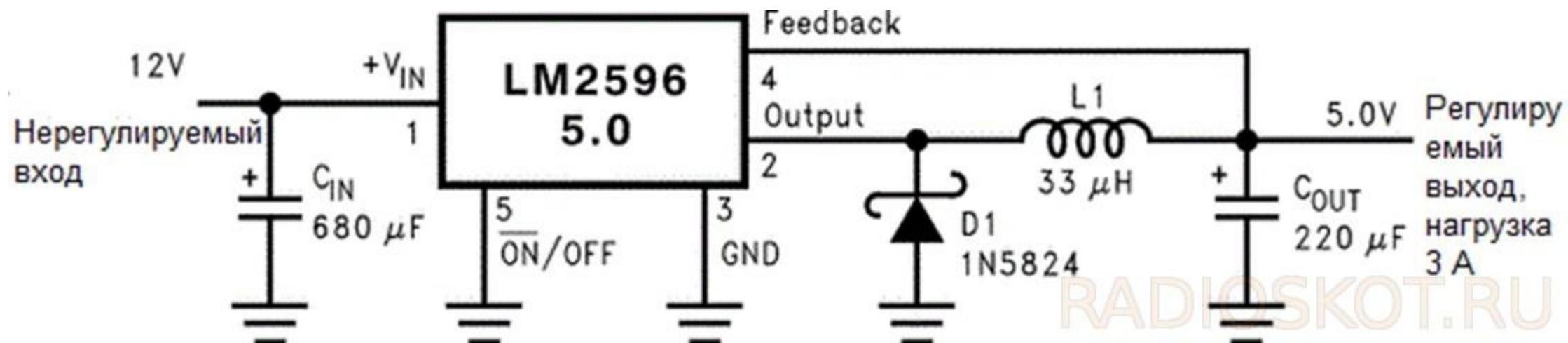
Импульсный блок питания на +9V



(C)2018 Mr.ALB

http://www.mralb.ru/sections/material/science_technique/electronics_ps04.php#ps_5

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ



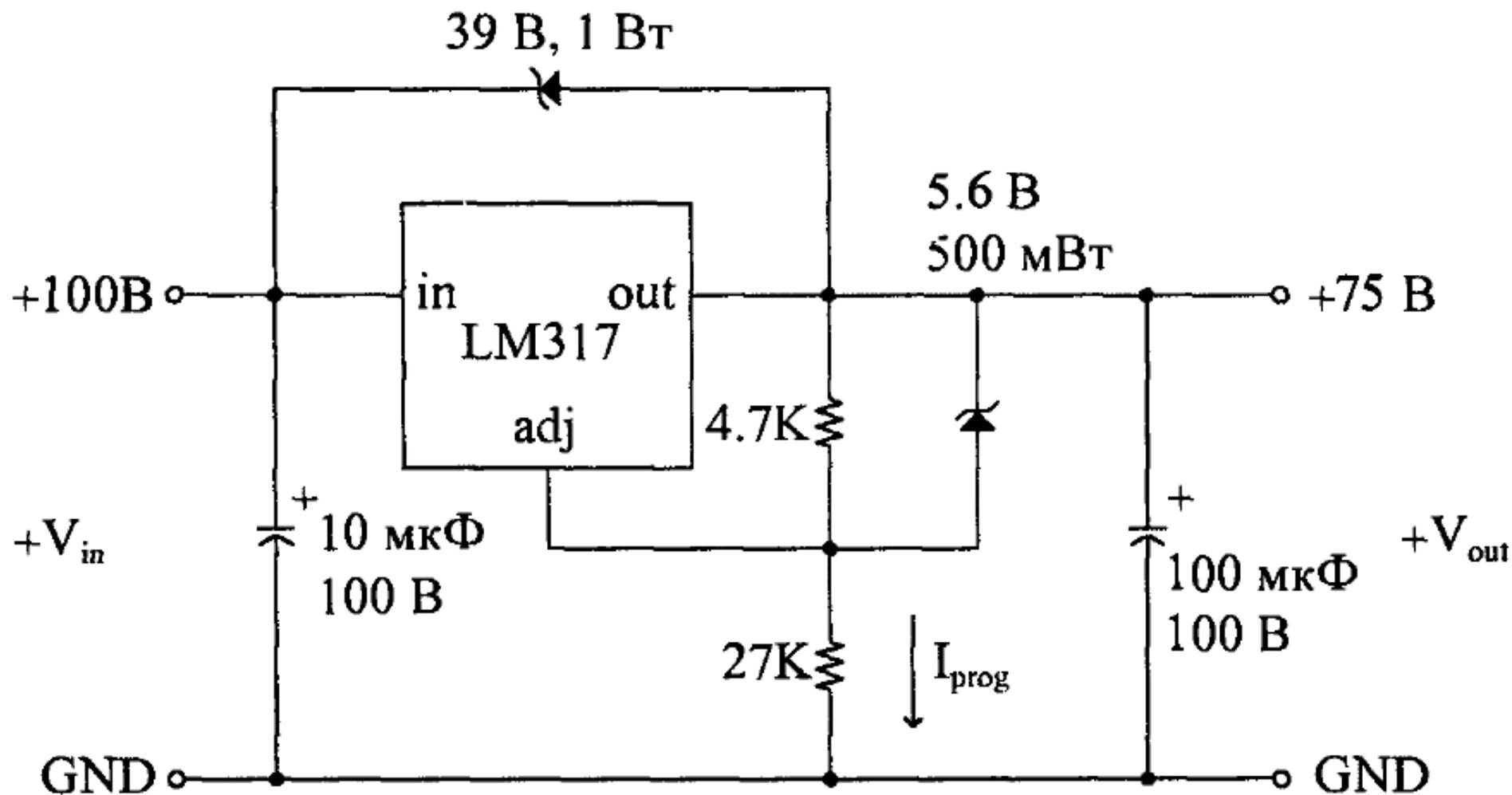
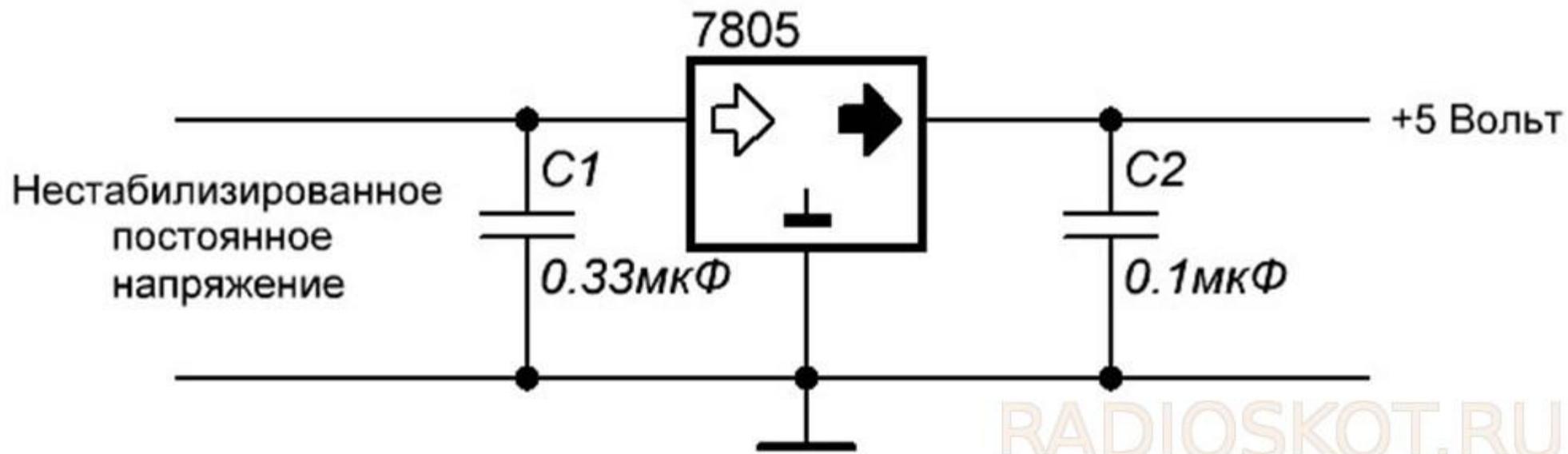


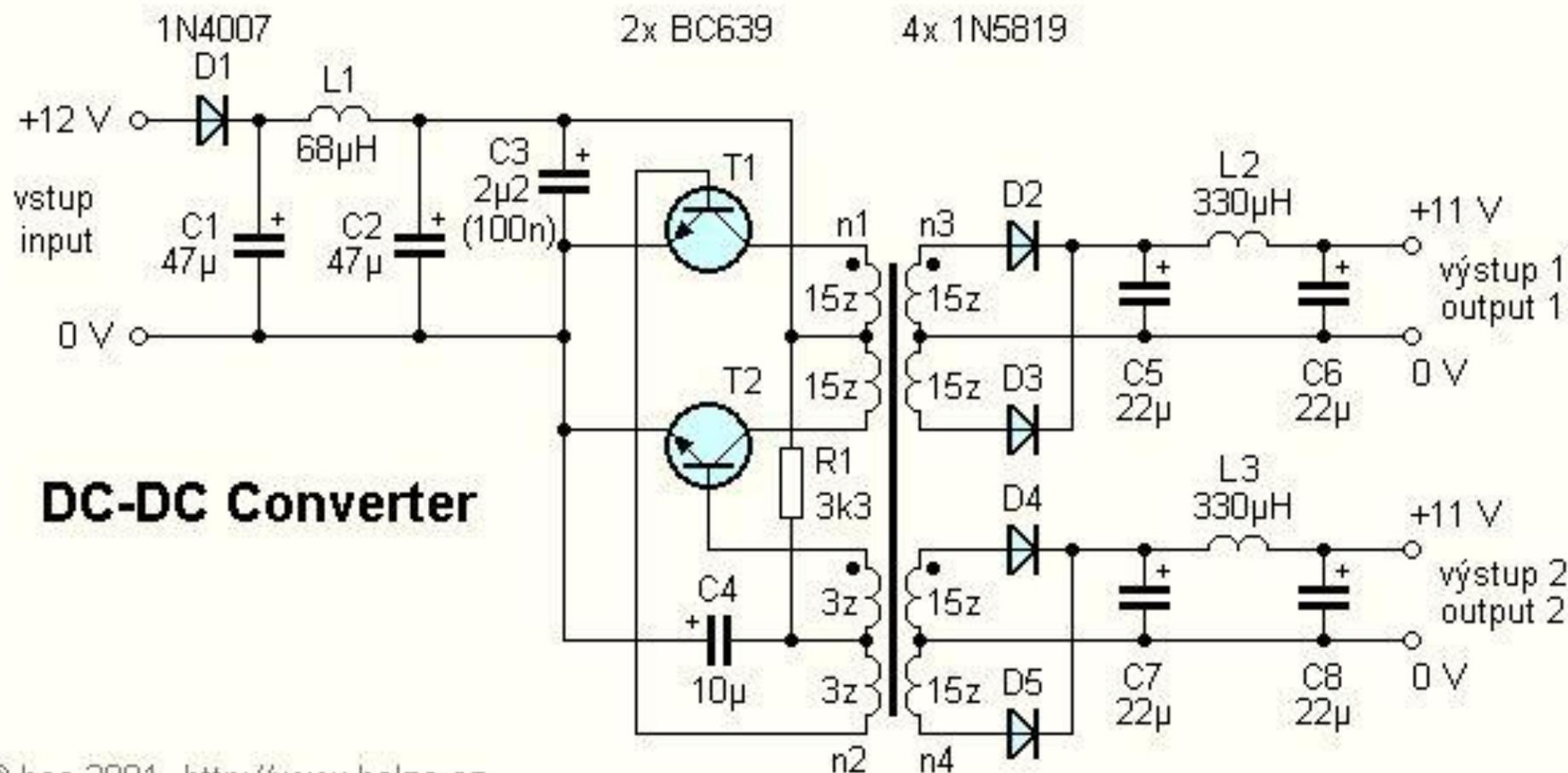
Рис. 2.8. Линейный стабилизатор высокого напряжения с незаземленным выходом

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ



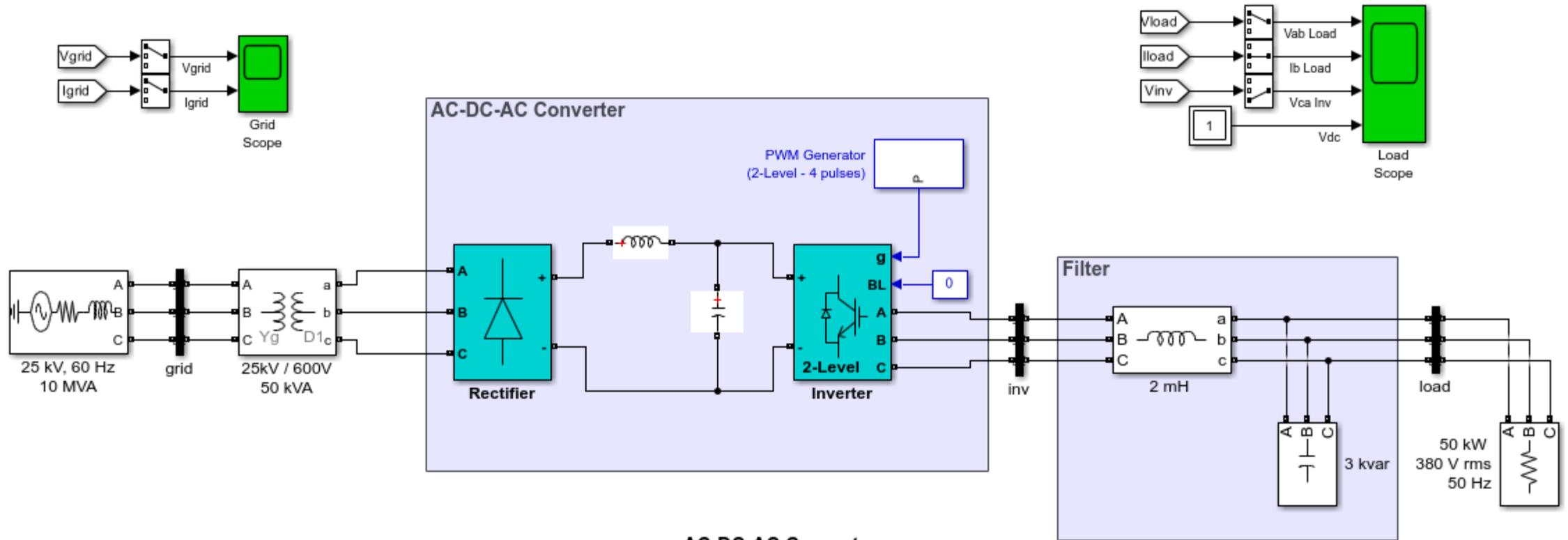
RADIO SKOT.RU

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ



© bcs 2001 <http://www.belza.cz>

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ



Discrete
4e-06 s.
powergui

AC-DC-AC Converter

This example shows the operation of an AC-DC-AC converter to feed a 50 Hz, 50 kW load from a 60Hz 600V source.

[Learn more](#) about this example.

СИЛОВЫЕ ЦЕПИ

2. Входные и выходные цепи фильтрации и защиты

Эти цепи присутствуют практически в любом устройстве, подключенном к внешним проводам.

Типовые схемы:

- Входная защита: Предохранитель, варистор (для защиты от перенапряжения), TVS-диоды (для защиты от статики), диод для защиты от переполюсовки.
- Входные фильтры: LC- или π -фильтры (конденсаторы + дроссели) для подавления электромагнитных помех, приходящих извне, и для предотвращения попадания помех от устройства в сеть питания.

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

1. Минимизация паразитных параметров:

В силовых цепях ключевое значение имеют паразитная индуктивность (ESL) и сопротивление (ESR) проводников. Любой проводник на печатной плате — это не идеальный провод, а катушка индуктивности и резистор.

При коммутации больших токов на высокой частоте (ШИМ) паразитная индуктивность дорожек приводит к возникновению выбросов напряжения, которые могут пробить транзисторы, и к сильным электромагнитным помехам (EMI).

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

2. Главный принцип компоновки: "силовые контуры минимальной площади"

В любом импульсном преобразователе есть два ключевых контура, по которым протекают высокочастотные переменные токи:

- Входной высокочастотный контур (Cin – верхний ключ – нижний ключ): Ток в этом контуре имеет форму высокочастотных пиков. Площадь контура должна быть минимально возможной.
- Выходной высокочастотный контур (нижний ключ – дроссель – Cout): Ток здесь также переменный, но более сглаженный дросселем.

Как это выглядит на практике:

- Компактное размещение: Верхний ключ (или сток/исток транзисторов) и конденсаторы (Cin, Cout) должны располагаться максимально близко друг к другу, чтобы соединяющие их дорожки были максимально короткими и широкими.
- Соединение истока верхнего ключа, стока нижнего ключа и вывода дросселя часто рекомендуется выполнять в виде единой медной площадки, чтобы свести к минимуму паразитную индуктивность в этой критической точке (коммутационный узел).

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

3. Токонесущая способность и терморежим:

- Дорожки, по которым протекают большие токи (особенно в цепях питания и на выходе), должны иметь достаточную ширину (или толщину меди), чтобы не перегреваться. Для токов от 5-10 А и выше (до 50-80 А) требуется тщательный расчет ширины дорожек или использование полигонов металлизации;
- Мощные компоненты (транзисторы, дроссели) выделяют тепло. При компоновке необходимо предусмотреть пути для отвода тепла (широкие дорожки, массивные полигоны, тепловые переходные отверстия).

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ

4. Разделение "земли" (GND) для силовой и сигнальной частей

В схемах с высокой мощностью (например, в H-мостах или импульсных источниках) через силовую землю протекают огромные переменные токи.

Если сигнальная земля (общий провод микросхемы управления) будет подключена к этому участку силовой земли с большим током, на ней из-за сопротивления дорожки наведется помеха, которая нарушит работу всей схемы.

Силовая и сигнальная земля должны быть физически разделены и соединяться в одной точке (обычно на выводе выходного конденсатора), чтобы шум от силового тока не попадал в цепи управления

ЦИФРОВЫЕ ЦЕПИ

Цифровые схемы (Digital Circuits) — это электронные схемы, предназначенные для обработки дискретных сигналов, представленных в двоичном коде (логический «0» и логическая «1»). В отличие от аналоговых, они оперируют не непрерывным напряжением, а двумя (или тремя) четко определенными состояниями, соответствующими определенным диапазонам напряжений.

Принцип работы основан на переключении транзисторов между состояниями отсечки (закрыт) и насыщения (открыт). Для разных логических семейств используются различные уровни напряжения:

- TTL (транзисторно-транзисторная логика): напряжение питания 5 В, «0» — 0–0.8 В, «1» — 2–5 В .
- CMOS (комплементарная логика на полевых транзисторах): более широкий диапазон напряжений питания, низкое статическое энергопотребление, высокая помехоустойчивость.

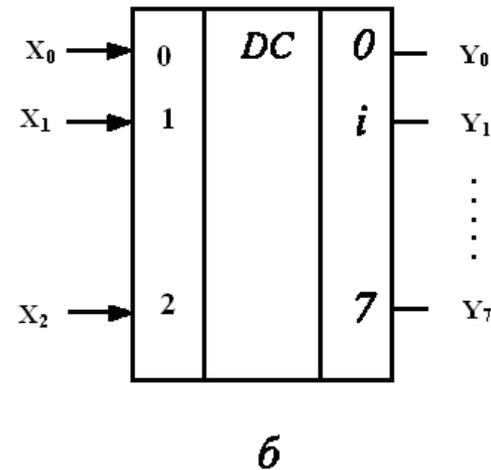
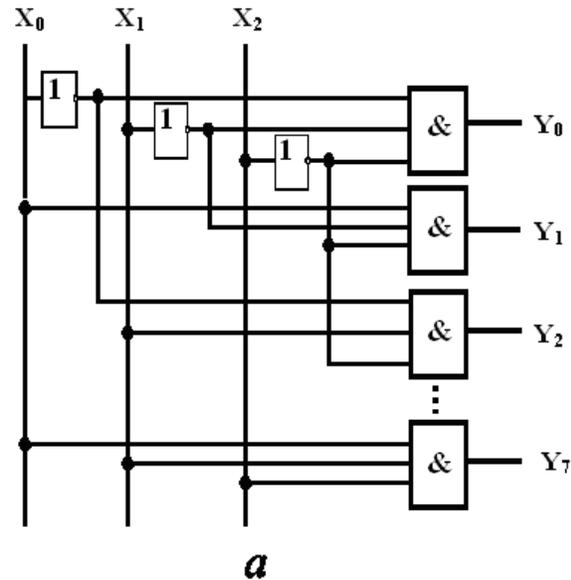
Ключевые характеристики цифровых схем: быстродействие (задержка распространения сигнала), потребляемая мощность (динамическая и статическая) и помехоустойчивость (шумовой запас — noise margin).

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ЦИФРОВЫХ ЦЕПЕЙ

1. Комбинационные логические схемы:

Выходной сигнал зависит только от текущей комбинации входных сигналов.

- Логические элементы (И, ИЛИ, НЕ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ);
- Шифраторы/дешифраторы;
- Мультиплексоры/демультиплексоры;
- Сумматоры;
- Схемы сравнения (компараторы кодов).



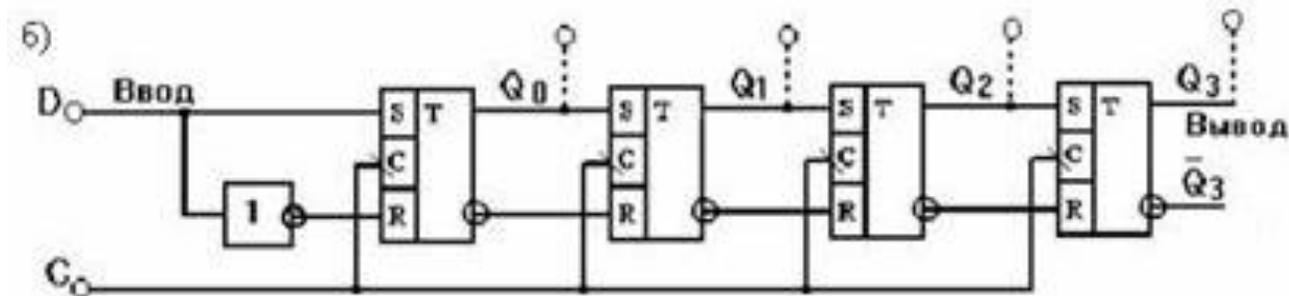
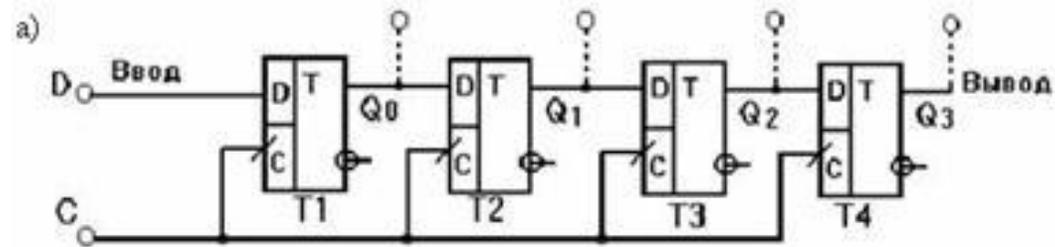
ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ЦИФРОВЫХ ЦЕПЕЙ

2. Последовательностные логические схемы:

Выходной сигнал зависит не только от текущих входов, но и от предыдущего состояния (имеют память).

- Триггеры (RS, D, T, JK): элементарные ячейки памяти;
- Регистры: накопительные (для хранения) и сдвиговые (для преобразования последовательного кода в параллельный и обратно);
- Счетчики: асинхронные/синхронные, двоичные/десятичные, реверсивные;
- Таймеры: на основе счетчиков для формирования временных интервалов, генераторы ШИМ-сигналов.

46



ТИПОВЫЕ СХЕМЫ ЦИФРОВЫХ ЦЕПЕЙ

3. Сложные функциональные узлы:

узлы:

- Микропроцессоры (MPU) и микроконтроллеры (MCU). Содержат ядро, память, периферийные модули.
- Запоминающие устройства (RAM, ROM, Flash).
- Программируемые логические интегральные схемы (ПЛИС, FPGA).
- Цифровые сигнальные процессоры (DSP): оптимизированы для задач цифровой обработки сигналов (фильтрация, БПФ).

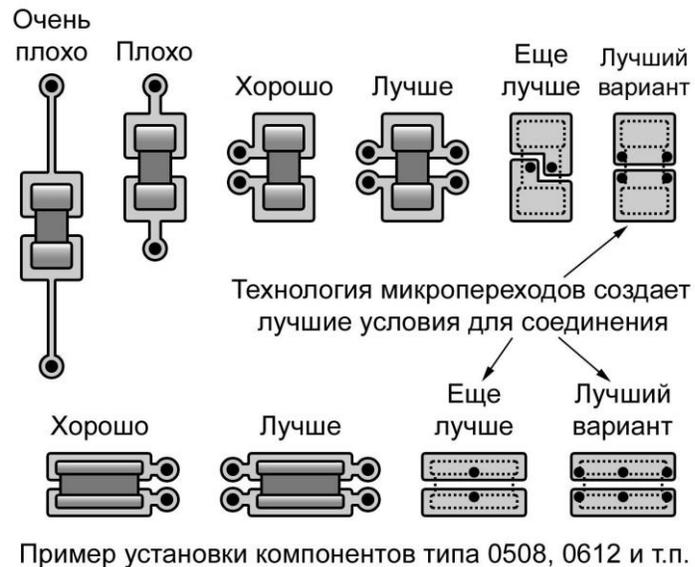
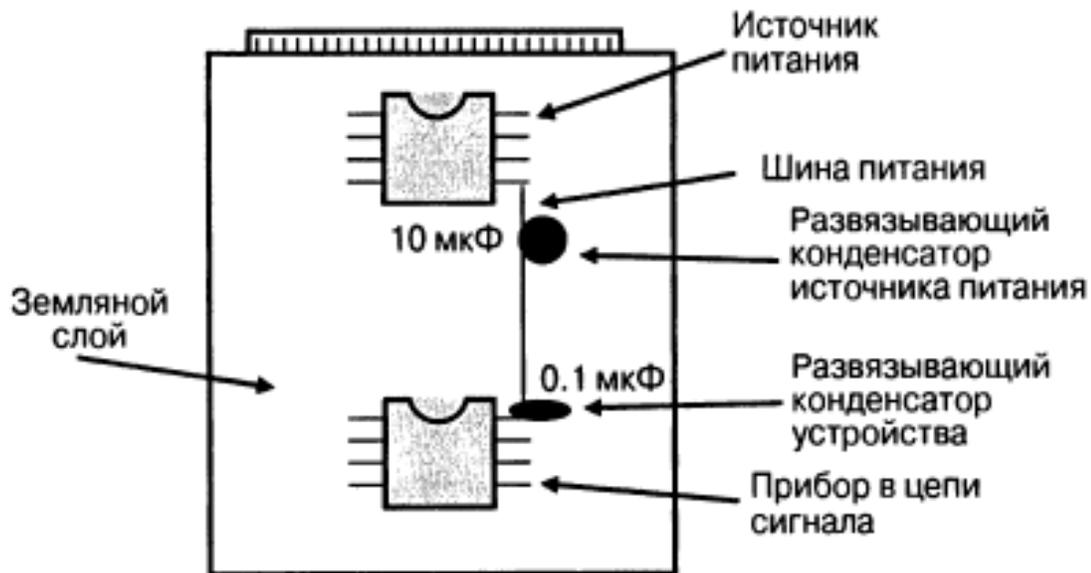


СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ ЦЕПИ

1. Размещение развязывающих конденсаторов

Критическое правило компоновки: каждый развязывающий конденсатор должен располагаться на минимальном расстоянии от соответствующего вывода питания микросхемы, а дорожка, соединяющая их, должна быть максимально короткой и широкой. Это минимизирует паразитную индуктивность, которая сводит на нет эффект развязки на высоких частотах.

Как правило, ёмкость такого конденсатора выбирается равной 0,1 мкФ, хотя иногда используют и конденсаторы ёмкостью 1 мкФ (в низкочастотных цепях) или 0,01 мкФ (в высокочастотных). Ещё один конденсатор следует установить вблизи точки подключения источника питания, обычно его ёмкость составляет около 10 мкФ. Вопросы выбора подходящей ёмкости конденсатора относятся к схемотехнике.



Примеры установки поверхностно-монтируемых развязывающих конденсаторов

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ ЦЕПИ

2. Минимизация длины высокоскоростных линий

Чем выше частота сигнала, тем критичнее становится длина проводника.

Длинные линии работают как антенны (излучают помехи) и как линии передачи с отражениями. При компоновке необходимо располагать взаимодействующие компоненты (например, процессор и память) как можно ближе друг к другу.

3. Контроль волнового сопротивления

На очень высоких частотах (сотни МГц – ГГц) дорожки должны рассматриваться как линии передачи с определенным волновым сопротивлением (обычно 50 Ом или 100 Ом для дифференциальных пар).

Компоновка должна обеспечивать возможность трассировки таких линий без изломов и с соблюдением геометрии.

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ ЦЕПИ

4. Разделение цифровой и аналоговой "земли"

Цифровые схемы создают мощные импульсные помехи по цепям питания и "земли". Если "цифровая земля" и "аналоговая земля" будут объединены не в одной точке, цифровой шум проникнет в чувствительные аналоговые цепи, сделав их работу невозможной.

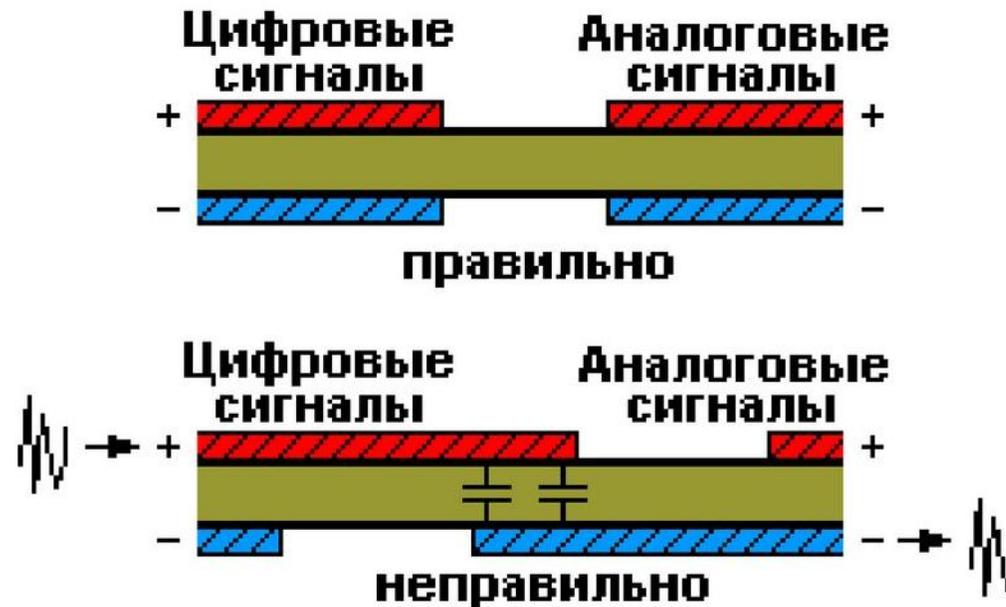
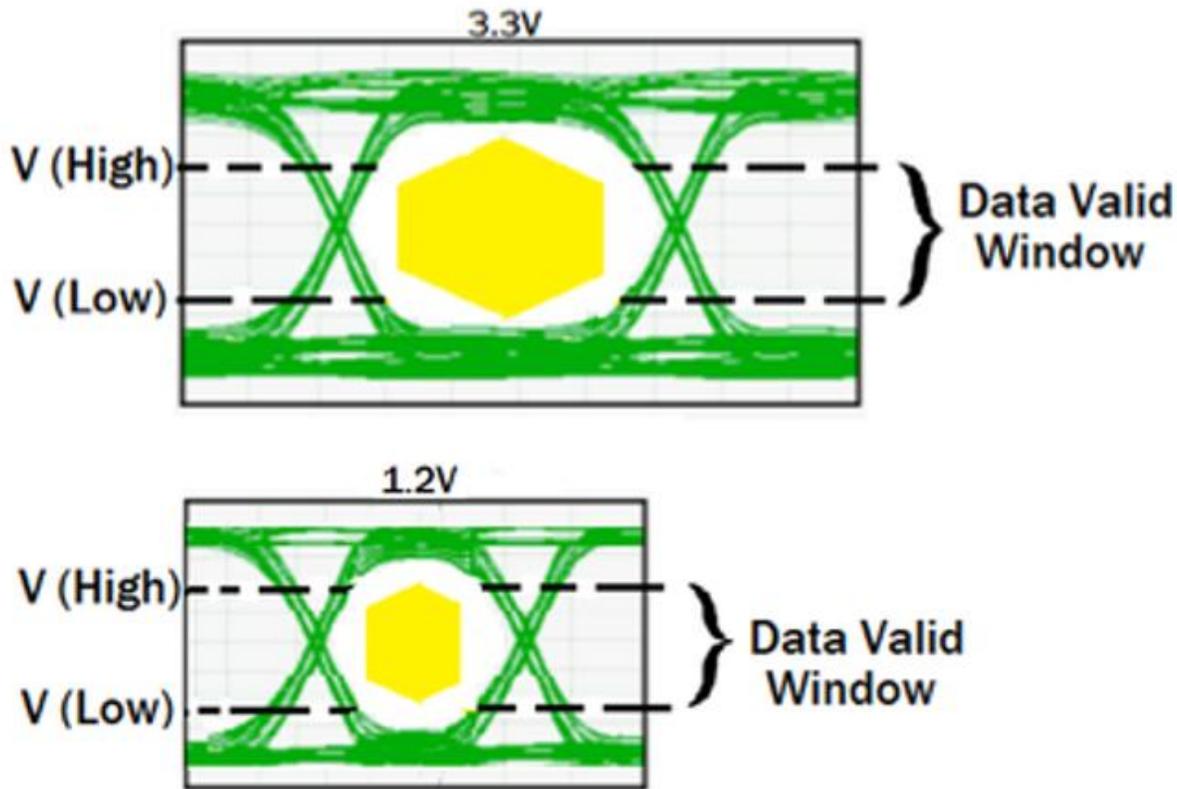


Рис.1. Размещение полигонов аналоговых и цифровых сигналов

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ ЦИФРОВОЙ ЦЕПИ

5. Обеспечение целостности сигнала (Signal Integrity)

При компоновке необходимо учитывать топологию соединений для высокоскоростных шин (например, DDR-памяти). Здесь важны согласование длин проводников в группе (чтобы все биты приходили одновременно).



Чем выше частота, тем ниже напряжение, а значит и меньше размер глазка данных.

АНАЛОГОВЫЕ ЦЕПИ

Аналоговая схема (Analog Circuit) — это электронная схема, обрабатывающая сигналы, изменяющиеся непрерывно во времени и по амплитуде. В отличие от цифровых, аналоговые схемы оперируют с непрерывным диапазоном значений, что позволяет точно воспроизводить физические процессы (звук, температуру, давление и т.д.).

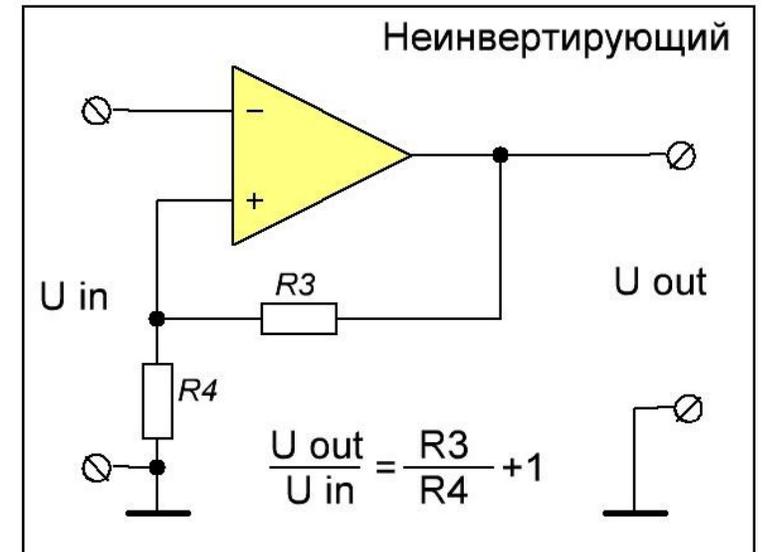
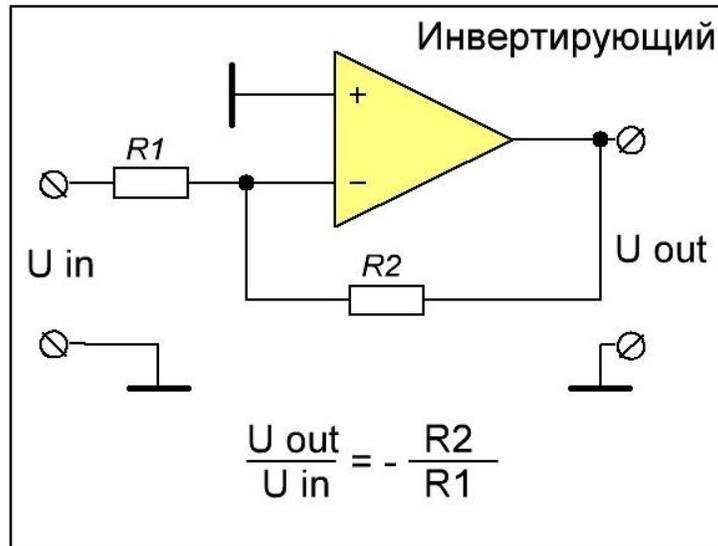
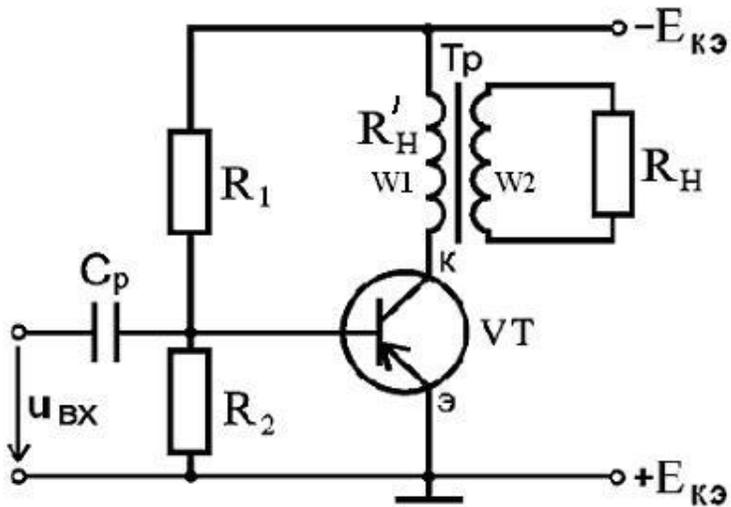
Характеристики аналоговых схем описываются:

- Амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ) и фазо-частотной характеристикой (ФЧХ).
- Коэффициентом усиления (gain).
- Уровнем шумов (noise level).
- Нелинейными искажениями (THD — nonlinear distortion).
- Динамическим диапазоном (dynamic range).

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АНАЛОГОВЫХ ЦЕПЕЙ

1. Усилители:

- на биполярных и полевых транзисторах (усилительные каскады);
- на операционных усилителях (ОУ): инвертирующие, неинвертирующие, дифференциальные, инструментальные (измерительные);
- мощности (звуковой частоты, выходные каскады передатчиков);
- радиочастоты (входные каскады приемников).



ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АНАЛОГОВЫХ ЦЕПЕЙ

2. Фильтры:

- Пассивные фильтры: RC, LC, RLC-цепи.
- Активные фильтры: на основе операционных усилителей с RC-цепями в обратной связи (фильтры нижних/верхних частот, полосовые, режекторные).
- Пьезоэлектрические и электромеханические фильтры.

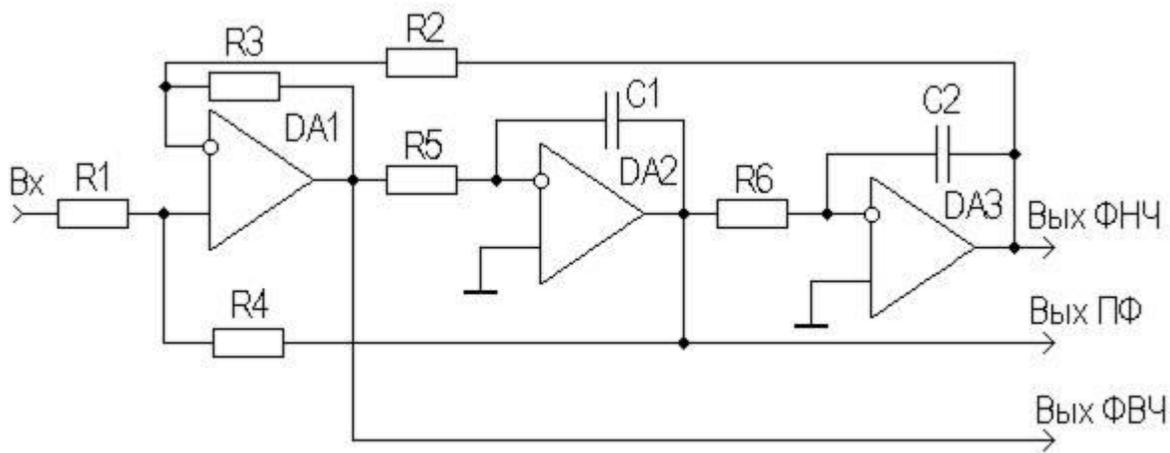
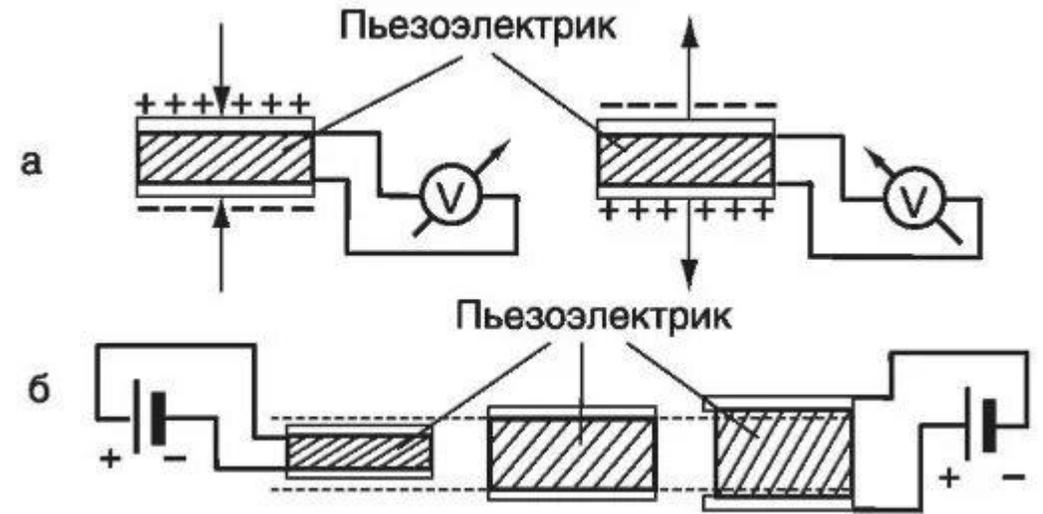


Рисунок 7.19 - Универсальный активный фильтр



ТИПОВЫЕ СХЕМЫ АНАЛОГОВЫХ ЦЕПЕЙ

3. Генераторы сигналов:

- LC-генераторы, RC-генераторы, кварцевые генераторы.

4. Источники питания (линейные):

- линейные стабилизаторы на основе ОУ и мощного проходного транзистора (применяются там, где критически важны малошумящие и чистые напряжения питания (аналоговые части аудиотрактов, ВЧ-блоки, АЦП/ЦАП).

5. Преобразователи сигналов

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ АНАЛОГОВОЙ ЦЕПИ

1. Минимизация паразитных параметров

В аналоговых схемах (особенно высокоомных и высокочастотных) паразитные емкости и индуктивности дорожек могут кардинально изменить работу схемы. Например, паразитная емкость в узле обратной связи ОУ может превратить усилитель в генератор. При компоновке длины связей должны быть минимальны, особенно в цепях обратной связи.

2. "Звезда" заземления

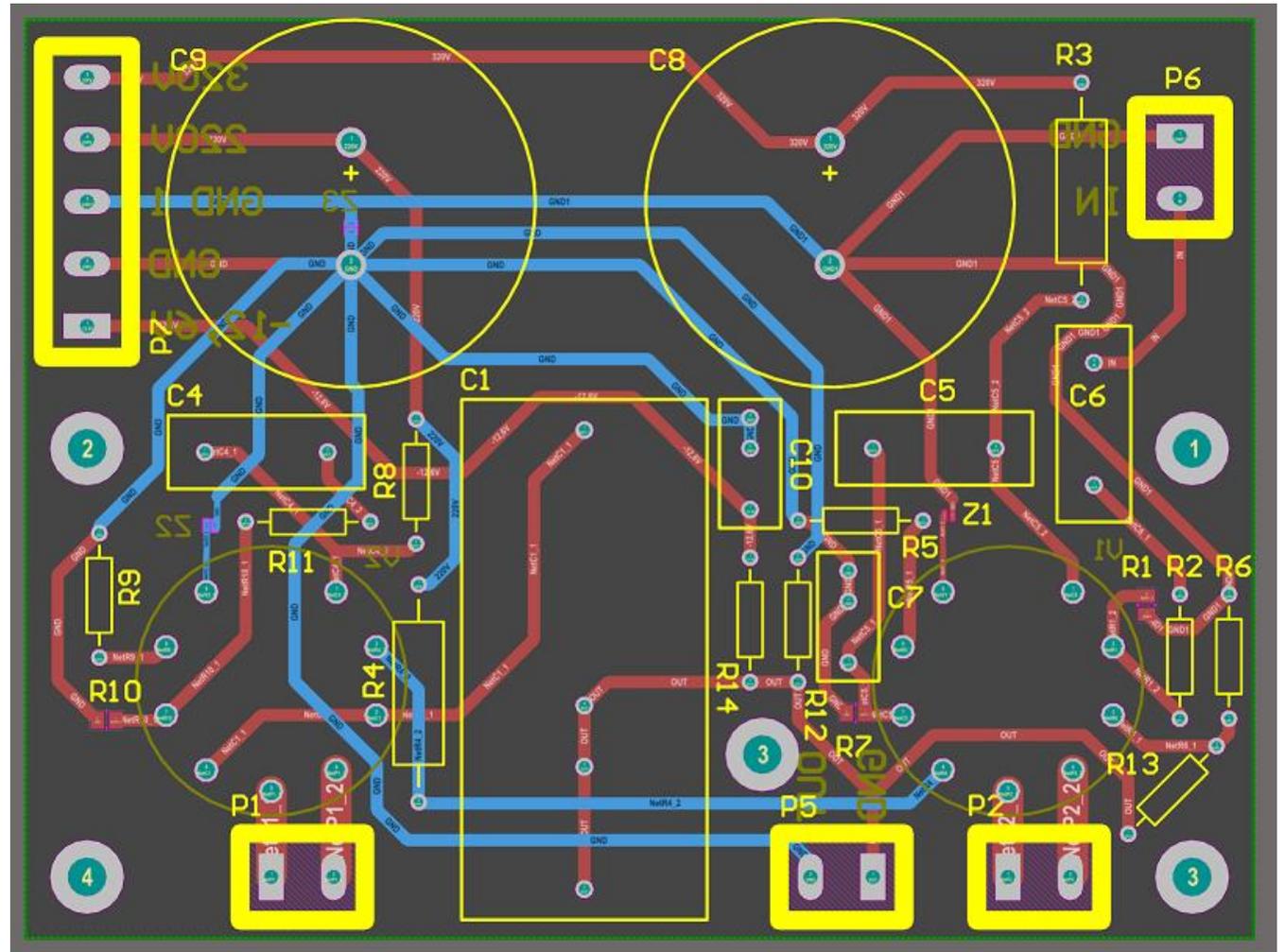
Это святое правило аналоговой компоновки. Все "земляные" выводы компонентов должны сходиться в одной физической точке ("звезде"), чтобы токи сигналов не протекали по общим участкам "земли", создавая паразитную обратную связь. Для мощных и слабосигнальных цепей используются отдельные "звезды".

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ АНАЛОГОВОЙ ЦЕПИ

Соединение земли в виде звезды

(**StarPointGrounding**) – это метод разводки земляной (GND) шины на печатной плате, при котором все основные цепи или подсистемы печатной платы имеют собственные пути для возврата тока обратно к единственной общей точке, называемой «звездой» или «нулевой точкой».

Представьте себе звезду: в центре – одна точка, а от неё лучами расходятся отдельные дорожки к разным частям схемы (аналоговая часть, цифровая часть, силовая часть, питание и т.д.). Эти лучи не соединяются друг с другом где-либо ещё, кроме как в центральной точке.

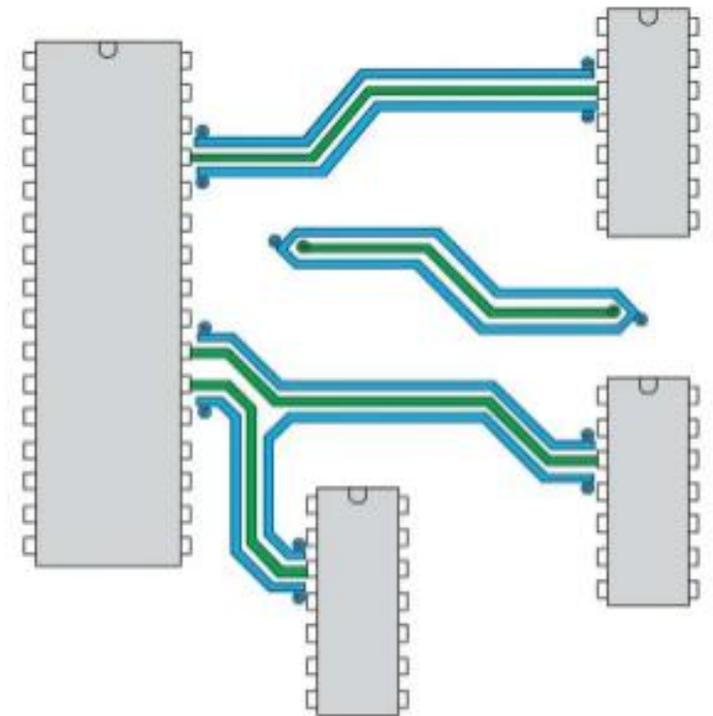
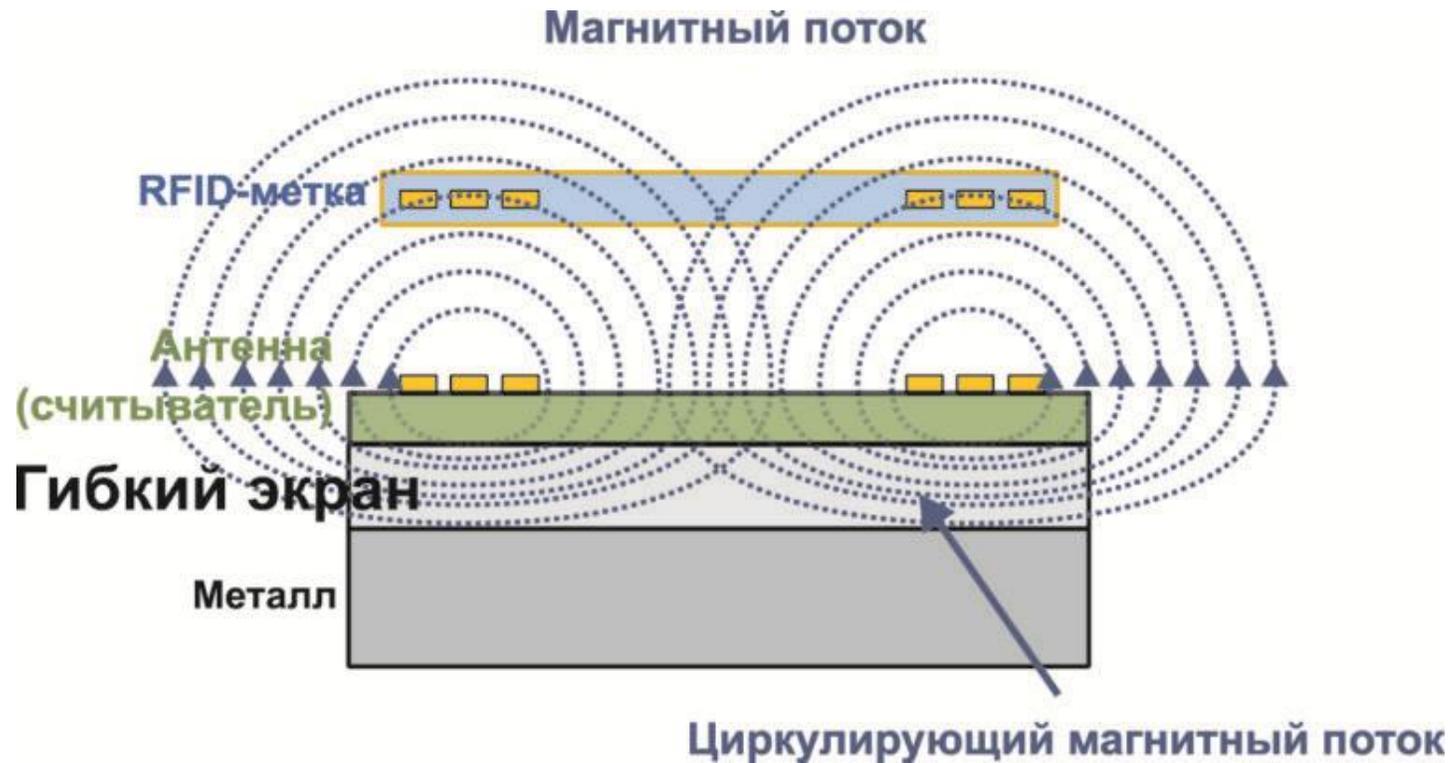


Источник: <https://habr.com/ru/companies/electroconnect/articles/963122/>

СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ АНАЛОГОВОЙ ЦЕПИ

3. Защита от наводок (экранирование):

Чувствительные аналоговые цепи (входы усилителей, цепи обратной связи) должны быть экранированы от источников помех (цифровых линий, силовых ключей). Это достигается размещением их на значительном расстоянии или использованием защитных дорожек ("охранных колец" — guard rings), подключенных к "чистой" земле.



СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ АНАЛОГОВОЙ ЦЕПИ

3. Терморазвязка

Мощные компоненты (линейные стабилизаторы, выходные транзисторы) выделяют тепло, которое может влиять на точные элементы (резисторы делителя, ОУ). Их необходимо разносить, чтобы градиент температуры не вызывал дрейф параметров.

4. Развязка питания

Аналоговые микросхемы (особенно ОУ) также требуют развязывающих конденсаторов по питанию, установленных максимально близко. Питание аналоговой части должно подаваться через отдельные фильтры (LC или ферритовые бусины) от "шумной" цифровой шины питания .

РАДИОЧАСТОТНЫЕ ЦЕПИ

Радиочастотные (ВЧ/СВЧ) цепи — это класс электронных схем, работающих на высоких частотах (от сотен кГц до сотен ГГц), где длина волны сигнала становится соизмерима с геометрическими размерами проводников на плате. В этом случае обычные соединения (дорожки) перестают быть просто проводниками и начинают вести себя как линии передачи, антенны, резонаторы.

Ключевые понятия в ВЧ-схемотехнике:

- Волновое сопротивление (Z_0): сопротивление линии передачи (обычно 50 Ом или 75 Ом), которое должно быть согласовано с импедансом источника и нагрузки для передачи максимальной мощности и минимизации отражений.
- Согласование: обеспечение равенства импедансов источника, линии и нагрузки. Рассогласование ведет к отражениям, возникновению стоячих волн и потерям мощности.
- КСВН (коэффициент стоячей волны по напряжению): показатель качества согласования.
- S-параметры: способ описания ВЧ-устройств через параметры рассеяния (отражение и прохождение сигнала).

ТИПОВЫЕ СХЕМЫ РАДИОЧАСТОТНЫХ ЦЕПЕЙ

1. Входные цепи приемников

Входные фильтры, усилители радиочастоты (УРЧ), малошумящие усилители (МШУ — LNA).

2. Преобразователи частоты

3. Генераторы, управляемые напряжением (ГУН — VCO)

LC-генераторы с варикапами (для перестройки частоты напряжением), генераторы на диодах Ганна (на СВЧ).

4. Усилители мощности (Power Amplifiers) - многотактные усилители на мощных биполярных или полевых транзисторах.

5. Фильтры (частотно-селективные цепи)

LC-фильтры, полосковые и микрополосковые фильтры (выполненные прямо на плате в виде рисунка дорожек), фильтры на поверхностных акустических волнах (ПАВ — SAW).

6. Синтезаторы частоты

Системы ФАПЧ (PLL) с делителями частоты и цифровым управлением.

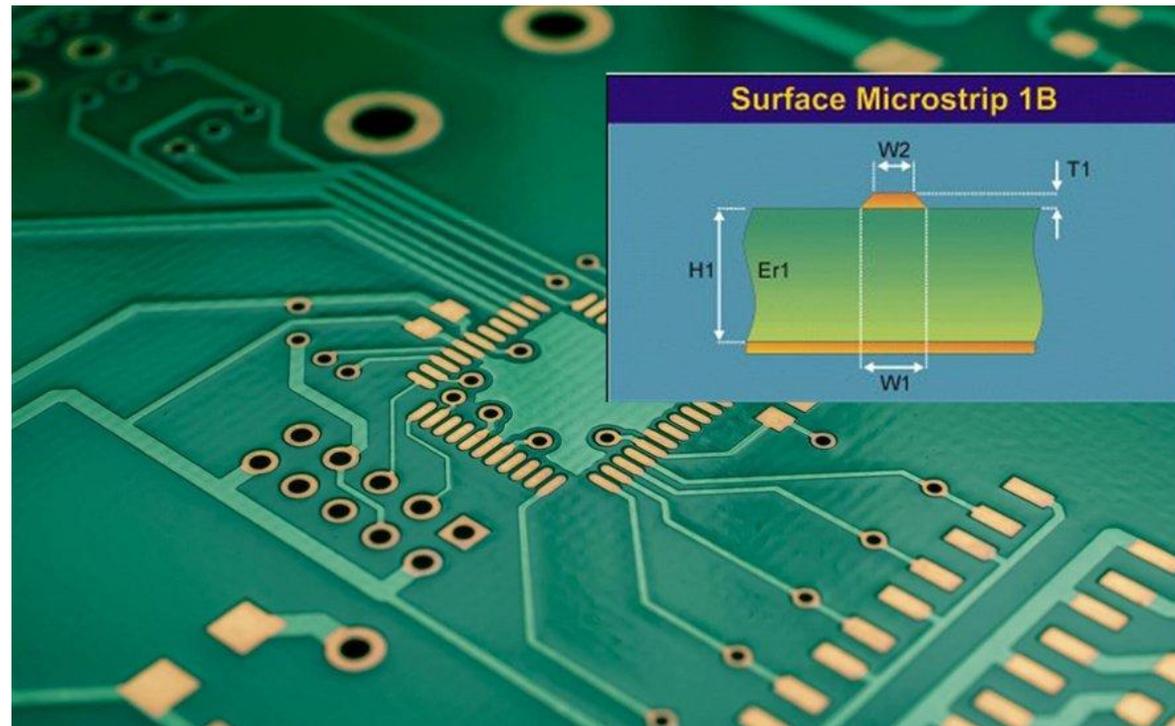
СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ЦЕПИ

Неправильное размещение компонентов может полностью разрушить работу ВЧ-устройства.

1. Расчет волнового сопротивления

ВЧ-дорожки (линии передачи) должны иметь строго контролируемые геометрические размеры (ширину, расстояние до слоя земли) для получения заданного волнового сопротивления (чаще всего 50 Ом).

Компоновщик обязан обеспечить возможность трассировки таких линий без изломов и резких изменений ширины.



СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ЦЕПИ

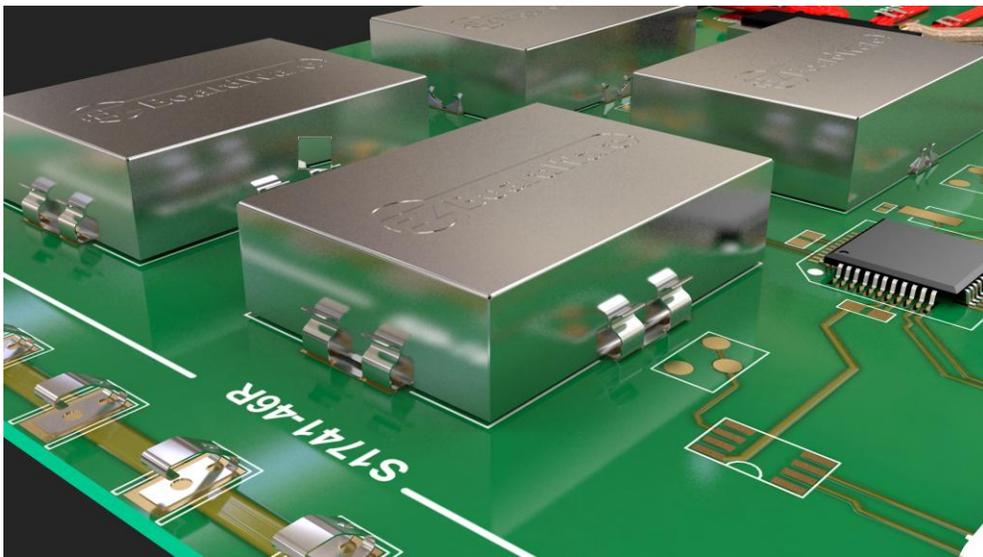
2. Минимизация длины и использование цепей согласования

Все соединения в ВЧ-тракте должны быть максимально короткими. Согласующие цепи (LC-элементы) должны располагаться максимально близко к выводам микросхем/транзисторов, чтобы паразитная индуктивность дорожек не нарушила согласование.

3. Экранирование каскадов

ВЧ-каскады (особенно усилители мощности и гетеродины) могут создавать мощные поля, которые будут наводиться на соседние цепи. Поэтому между каскадами часто размещают экранирующие перегородки (connected to ground), а сами блоки помещают в экранирующие корпуса. На плате необходимо предусматривать место для таких экранов.

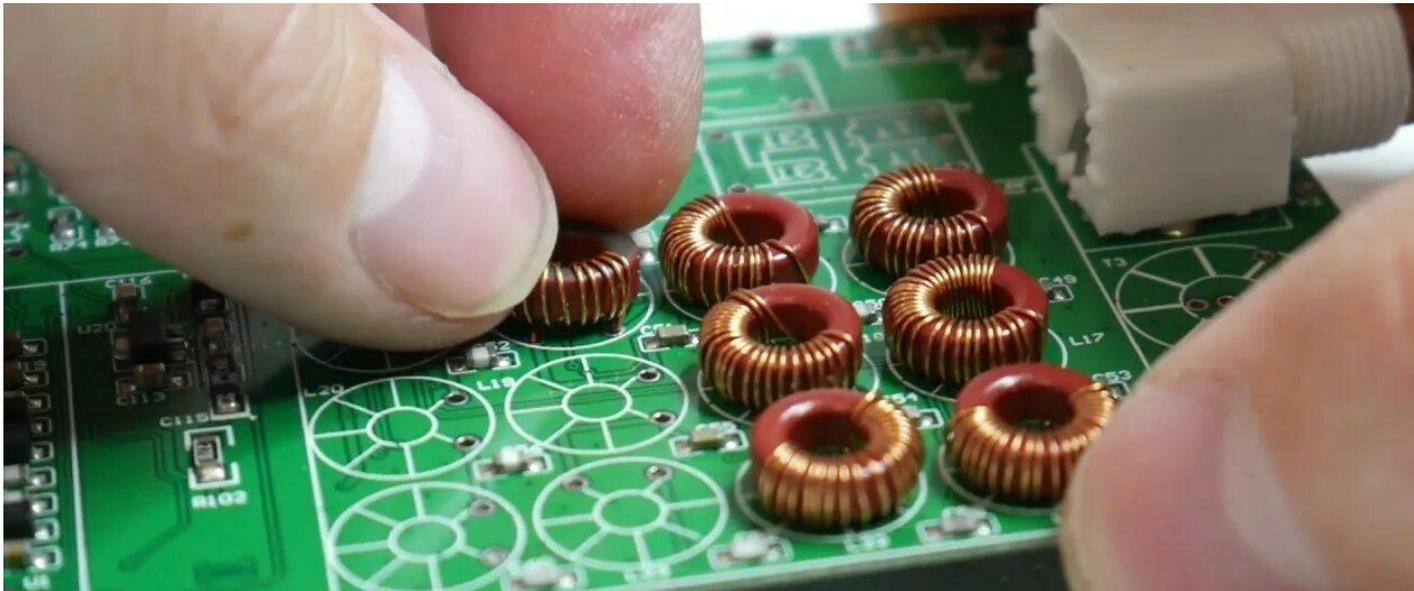
63



СВЯЗЬ КОМПОНОВКИ И РАБОТЫ РАДИОЧАСТОТНОЙ ЦЕПИ

4. Развязка питания

Питание на ВЧ-активные компоненты подается через специальные ВЧ-дрессели (RF choke) и развязывающие конденсаторы, которые должны располагаться так, чтобы ВЧ-сигнал не проникал



5. Целостность опорной земли

Под ВЧ-линиями передачи должен быть сплошной слой металлизации (земли) без разрывов. Любой разрыв или прорезь в земляном полигоне под линией кардинально меняет ее волновое сопротивление и вызывает потери.

ПРИОРИТЕТ И ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ

1. Размещение неподвижных и механических компонентов в первую очередь

Необходимо начинать с компонентов, имеющих фиксированное положение, таких как разъемы, переключатели, светодиоды и компоненты, связанные с монтажом. Эти компоненты часто привязаны к корпусу или пользовательскому интерфейсу, поэтому их расположение обычно не может быть гибким. Размещение их в первую очередь задаёт физические ограничения для остальной части макета.

2. Размещение основных интегральных схем и силовых компонентов

Далее необходимо разместить основные микросхемы, такие как микроконтроллеры, процессоры и модули питания. Они являются ядром схемы и должны быть расположены таким образом, чтобы минимизировать критические длины сигналов и обеспечить чистое питание. Их расположение существенно влияет на маршрутизацию и общую производительность платы.

3. Размещение вспомогательных компонентов

После установки основных устройств необходимо добавить вспомогательные компоненты, так называемая «обвязка». Эти компоненты следует размещать как можно ближе к выводам, которые они обслуживают, чтобы обеспечить стабильную работу и снизить уровень шума.

4. Заполнение пространства пассивными компонентами

Пассивные компоненты: резисторы, конденсаторы, и индукторы. Необходимо обеспечить их организованное расположение, выравнивание и удобство прокладки. Аккуратное размещение пассивных компонентов повышает эффективность сборки и упрощает осмотр и обслуживание печатной платы.

ИСТОЧНИКИ

1. https://docs.kicad.org/5.1/ru/getting_started_in_kicad/getting_started_in_kicad.pdf
2. <https://dzen.ru/a/YZSaaJp81FDMWCuE>
3. <https://habr.com/ru/articles/395933/>
4. <https://www.globalwellpcba.com/ru/оптимальное-размещение-компонентов/>
5. <https://www.globalwellpcba.com/ru/pcb-layout-всестороннее-руководство/>
6. <https://a-contract.ru/informacija/spravochnik/konstruktorsko-tehnologicheskoe-proektirovanie-pechatnykh-plat>
7. <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294833/4294833372.pdf>
8. <https://a-contract.ru/informacija/spravochnik/komponenty-pechatnykh-plat>
9. <https://intellektinteh.ru/prakticheskoe-rukovodstvo-po-celostnosti-signala-v-vysokoskorostnyh-prilozhenijah-serdes-chast-1/>
10. <https://habr.com/ru/companies/electroconnect/articles/963122/>

ИСТОЧНИКИ (БУДЕТ ПОЛЕЗНО И ИНТЕРЕСНО)

1. <https://engineer.yadro.com/article/pcb-history/>
2. <https://habr.com/ru/articles/395933/>
3. <https://hilelectronic.com/ru/power-electronics/>
4. <https://kit-e.ru/trassirovka-silovyh-czepej-na-pechatnyh-platah-fr4-rekomendaczii-i-ogranicheniya/>
5. <https://www.wonderfulpcb.com/ru/blog/beginners-guide-pcb-layout-design/>
6. <https://www.fs-pcba.com/ru/how-to-read-a-pcba/>
7. <https://www.pcbtok.com/ru/gerber-файлы/>
8. <https://pcbrussia.ru/gerberfayly-polnyy-gid-po-formatu-prosmotru-i-eksportu/>

Спасибо за внимание!

