

РАЗРАБОТКА ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

к.т.н. Никаноров А.В.

План

- Общие сведения **о помехах**
- **Проводники** - линии передачи сигналов ПП
 - организация проводных соединений
 - расчет характеристик проводников
 - реализация скоростных интерфейсов
- **Паразитные связи**, создаваемые проводниками ПП
 - рассмотрение механизмов их возникновения
 - методы устранения негативного влияния
- **Многоуровневые** ПП
- **Применение IBIS** моделей для анализа топологий ПП
 - анализ целостности сигналов, питания, тепла, ЭМС

Решаемые задачи

при разработке топологии печатных плат

- При разработке топологии ПП решаются следующие взаимосвязанные между собой задачи:
 - 1) **конструктивные** - размещение элементов на ПП, контактные разъемы/шлейфы, температурный режим работы;
 - 2) **схемотехнические** – разработка структуры и схем;
 - 3) **топологические** – трассировка печатных проводников, минимизация слоев;
 - 4) **радиотехнические** – устранение паразитных помех, определение параметров линий проводников, целостность сигналов, целостность питания, электромагнитная совместимость;
 - 5) **технологические** - выбор метода изготовления, защита и др.

Разработка топологии ПП – этап процесса конструирования высокоскоростных цифровых устройств, из которого мы выделим и детально рассмотрим методы решения радиотехнических задач (3)

Электромагнитные помехи

По типу источника помех

- Естественные
- Искусственные
 - Создаваемые функциональными источниками
 - Создаваемые **НЕ**функциональными источниками

Среда распространения

- Индуктивные (Radiated Emission)
- Кондуктивные (Conducted Emission)
 - Провод-земля
 - Провод-провод

Спектральные характеристики

- Узкополосные
- Широкополосные

Область частот

- Низкочастотные 0..9 кГц
- Высокочастотные (радиочастотные 150кГц..2ГГц; СВЧ несколько ГГц)

Электромагнитные помехи

Характер проявления

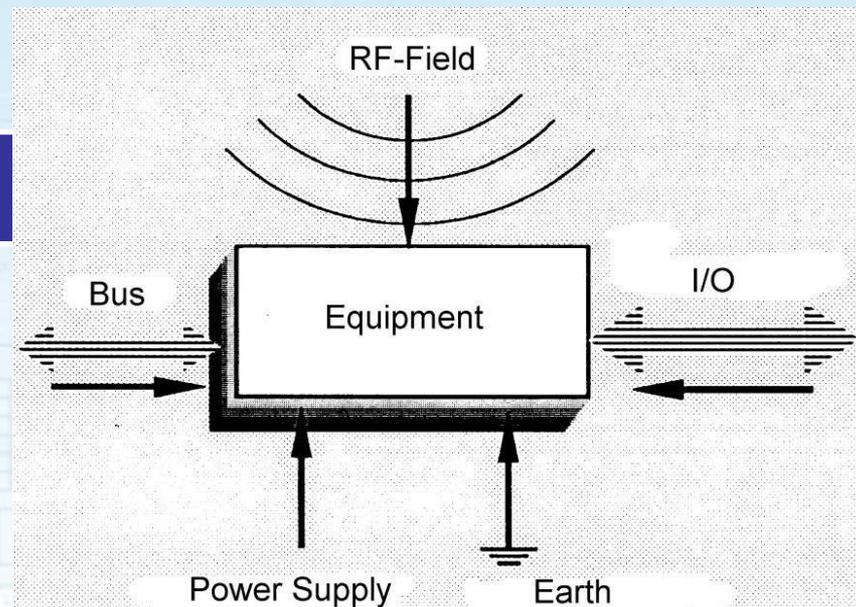
- Нарушения синхронизации
- Помехи в цепях связи
- Нестабильность электропитания
- Импульсные помехи в системах электропитания

Причина наведения

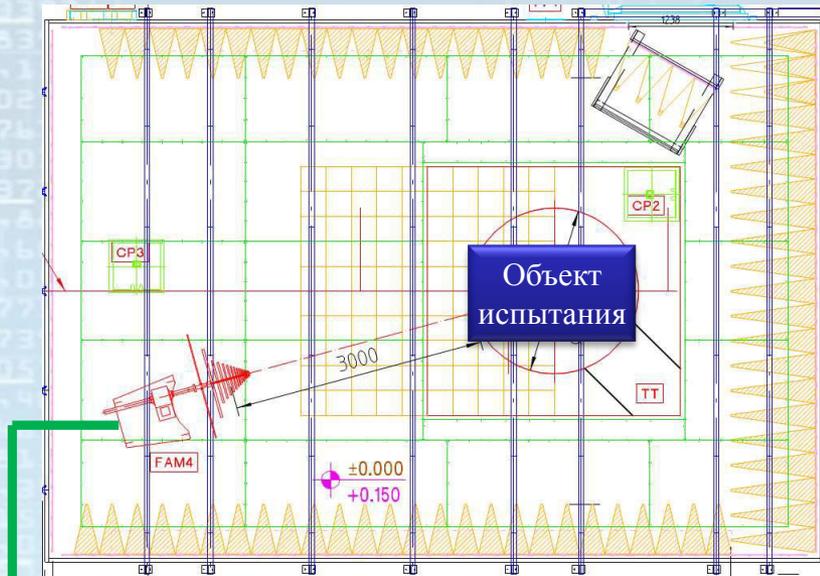
- Электромагнитная связь
- Индуктивная связь
- Емкостная связь
- Гальваническая связь

Пути распространения

- Цепи синхронизации
- Цепи электропитания
- Цепи связи
- Цепи заземления
- Эфир



Испытания в безэховой камере

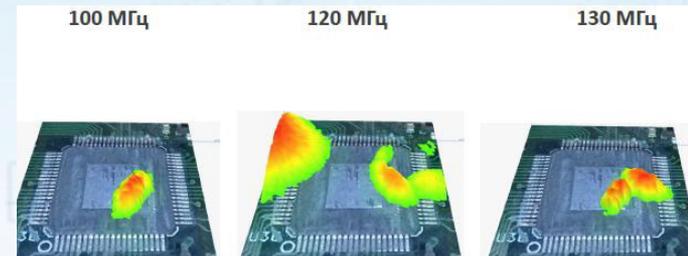
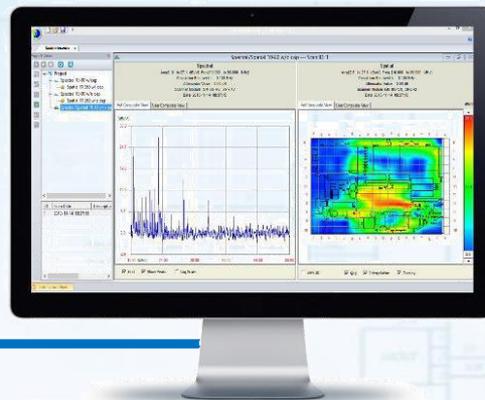
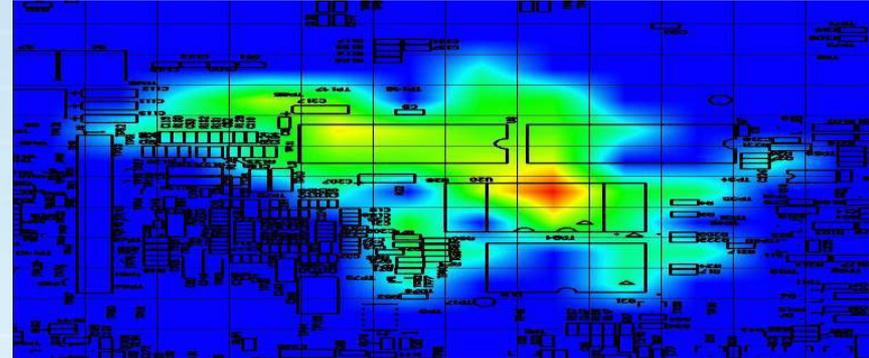
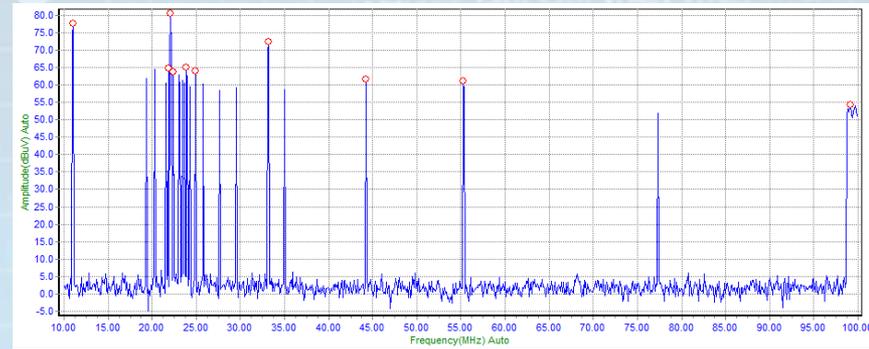


- Испытания на устойчивость к излучаемым помехам
- Измерение помехоэмиссии в безэховой камере (БЭК)



Анализатор печатных плат

- **Спектральный анализ**
 - Определение проблемных частот
- **Пространственное сканирование**
 - Определение мест излучения
- **Частоты: 150 кГц–8 ГГц**
- **Разрешение: 3,75 –0,1 мм**
- **Функция накопления пиков**
- **Генератор автоматических отчетов**
- **Функции сравнения и наложения результатов**



Критерии качества функционирования

Критерий А

- Воздействие не отражается на функциональных характеристиках аппаратуры. (Для аппаратуры высокой надежности)

Критерий В

- Допускается временное ухудшение функциональных характеристик в момент воздействия. После снятия воздействия функциональность восстанавливается без вмешательства персонала

Критерий С

- Как В, но допускает вмешательство персонала для восстановления работоспособности. (Не для ответственных систем)

Критерий D

- Физическое повреждение аппаратуры под воздействием помехи

Идеальная линия передачи

- Два идеальных проводника
 - с нулевым сопротивлением
 - одинаковым поперечным сечением по всей длине
 - бесконечной длины
- Сигнал, поданный на вход идеальной линии передачи, распространяется в ней сколь угодно долго с постоянной скоростью, без искажений и ослаблений.

Постоянная задержки

$$\Delta t = \Delta x \sqrt{LC}$$

Волновое сопротивление

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \sqrt{L_{\text{отн}} / C_{\text{отн}}}$$

В формуле относительные L и C (приведенные на расстояние)

Линия передачи

- Реальная линия передачи имеет активное сопротивление

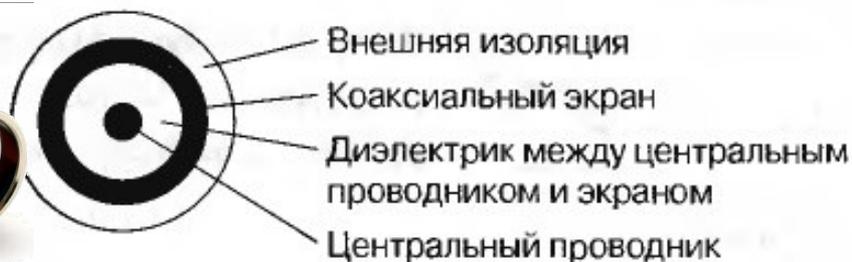
- Ослабление (потери)

- Искажение распространяемого сигнала

- Волновое сопротивление Z_0 зависит от частоты (ω)

$$Z_0(\omega) = \sqrt{\frac{R + \omega L}{\omega C}}$$

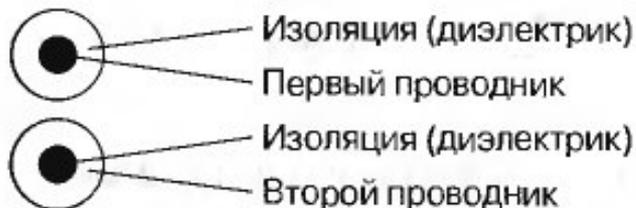
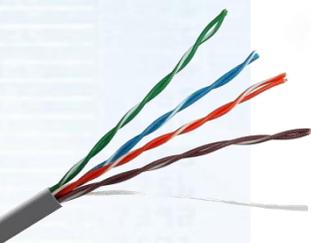
Коаксиальный кабель



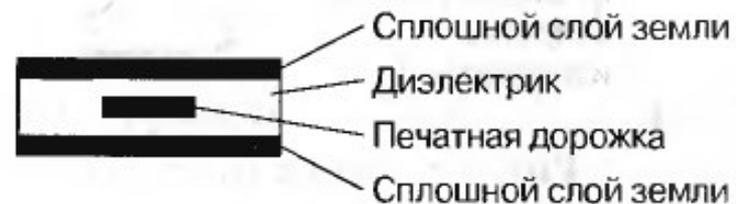
Микрополосковая линия



Витая пара

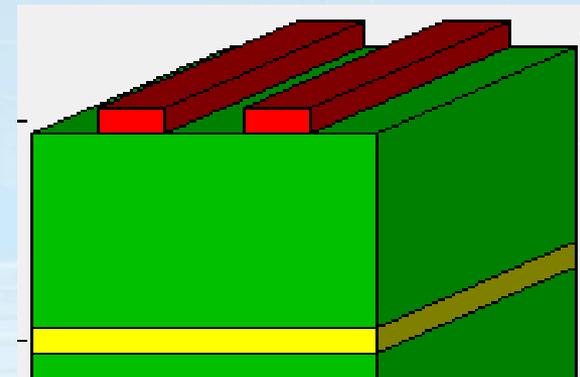
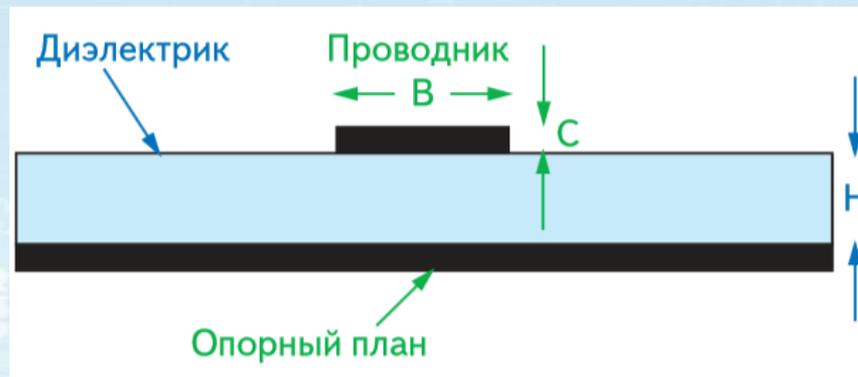


Полосковая линия



Линии передачи ПП - **microstrip**

- Микрополосковая линия - проводник на поверхности печатной платы, под которым расположен опорный слой плана «земли» или питания. Такую линию также называют просто микрополосок.



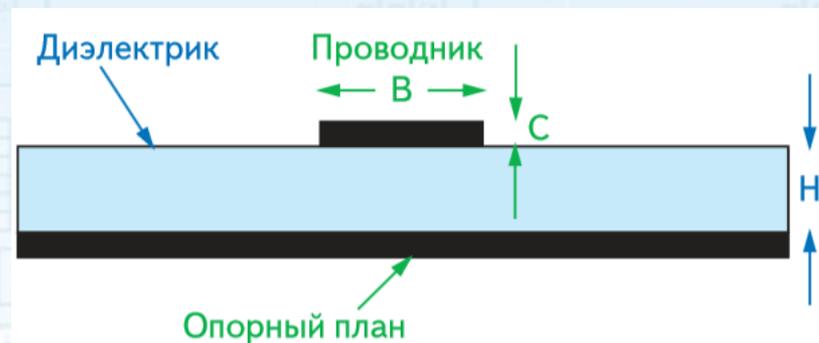
Это неидеальная линия передачи. Данный проводник обладает ненулевым сопротивлением, и может иметь собственную индуктивность и емкость в зависимости от параметров печатной дорожки

Формулы величин поверхностной микрополоски

- Z_0 - волновое сопротивление, в омах

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1,41}} \times \text{Ln} \frac{5,98H}{0,8B + C},$$

где ϵ_r — диэлектрическая проницаемость материала (около 4,4 для FR4 на 100 МГц), B — ширина проводника, C — толщина меди, H — толщина диэлектрика (расстояние до опорного плана).

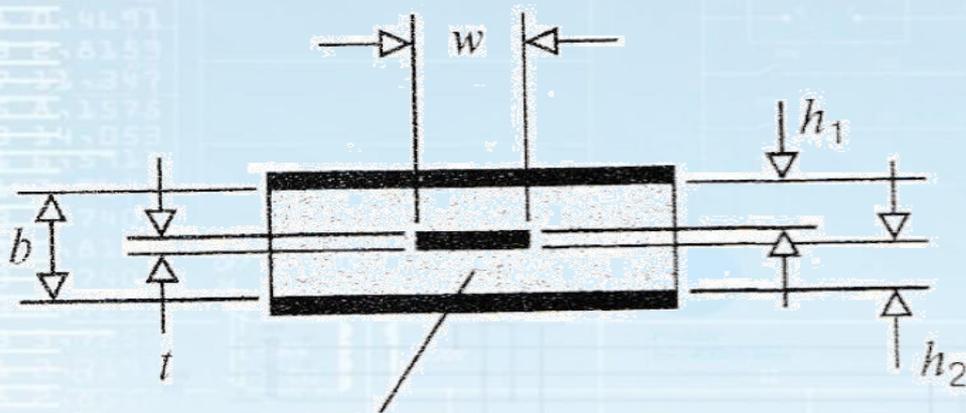


Электрические характеристики поверхностной микрополоски

- Эффективная диэлектрическая проницаемость среды
- Эффективная электрическая ширина дорожки
- Волновое сопротивление микрополосковой линии
- Постоянная задержки микрополосковой линии
- Полная индуктивность микрополосковой линии заданной длины
- Полная емкость микрополосковой линии заданной длины

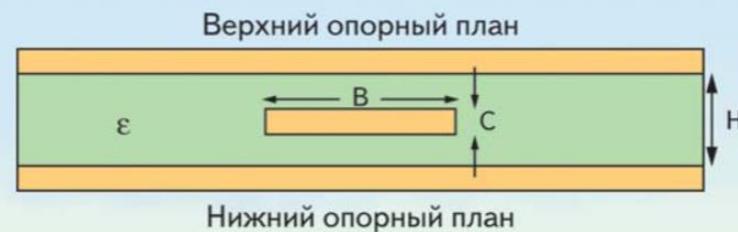
Линии передачи ПП - Stripline

- Полосковая линия передачи - проводник во внутренних слоях платы, расположенный относительно двух опорных планов «земли» или питания.



Эффективная относительная диэлектрическая проницаемость, ϵ_T

Симметричная



Эта линия передачи медленнее, чем поверхностная.

Это неидеальная линия передачи, обладает ненулевым сопротивлением, и имеет собственную индуктивность и емкость в зависимости от параметров печатной дорожки.

Формулы величин внутренней полоски проводника

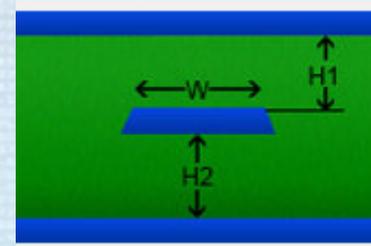
- Z_0 - волновое сопротивление симметричного проводника, в омах

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \times \operatorname{Ln} \frac{1,9H}{0,8B + C}$$

где ϵ_r — диэлектрическая проницаемость материала (около 4,4 для FR4 на 100 МГц),
 B — ширина проводника, C — толщина меди,
 H — толщина диэлектрика (расстояние до опорного плана).

Стандартные функции величин внутренней полосковой линии

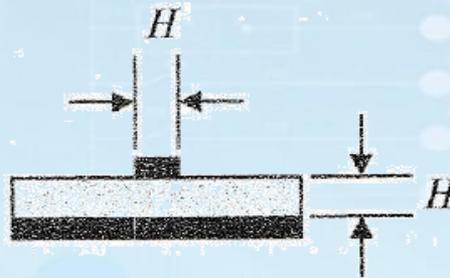
- Волновое сопротивление полосковой линии
- Волновое сопротивление смещенной полосковой линии
- Полная индуктивность полосковой линии заданной длины
- Полная индуктивность смещенной полосковой линии заданной длины
- Полная емкость полосковой линии заданной длины
- Полная емкость смещенной полосковой линии заданной длины



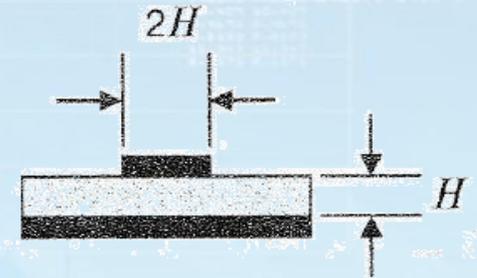
Геометрические пропорции высокоскоростных линий передач

Ниже представлены соотношения профилей поперечного сечения линий передачи, при которых их волновое сопротивление составляет 50 Ом и 75 Ом.

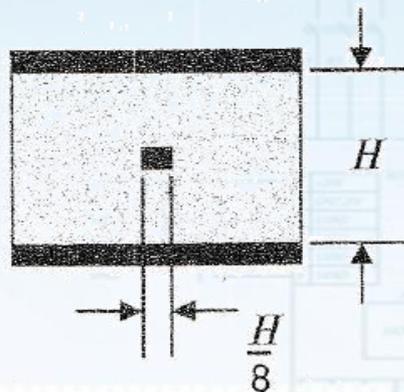
Микрополосковая линия, 75 Ом



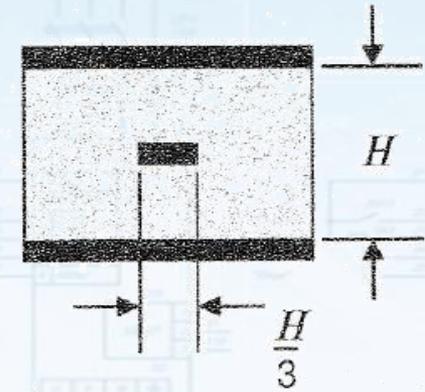
Микрополосковая линия, 50 Ом



Полосковая линия, 75 Ом



Полосковая линия, 50 Ом



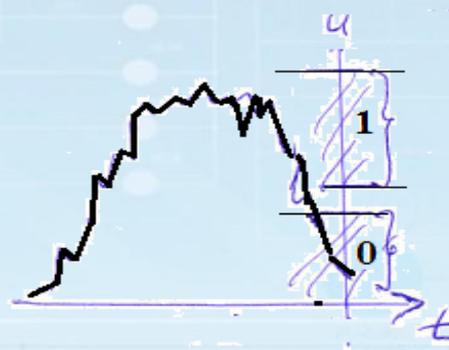
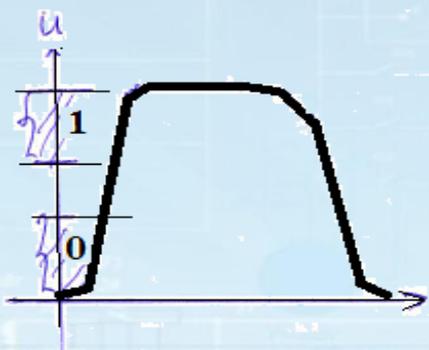
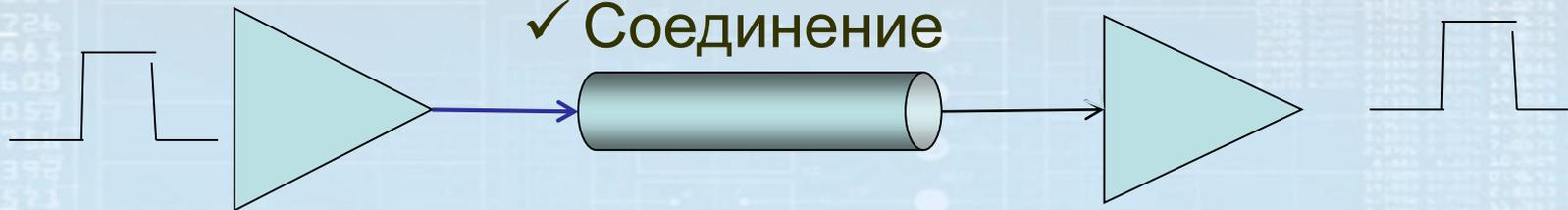
Точность
соблюдения
номинального
значения Z_0
составляет $\pm 30\%$

Компоненты соединений

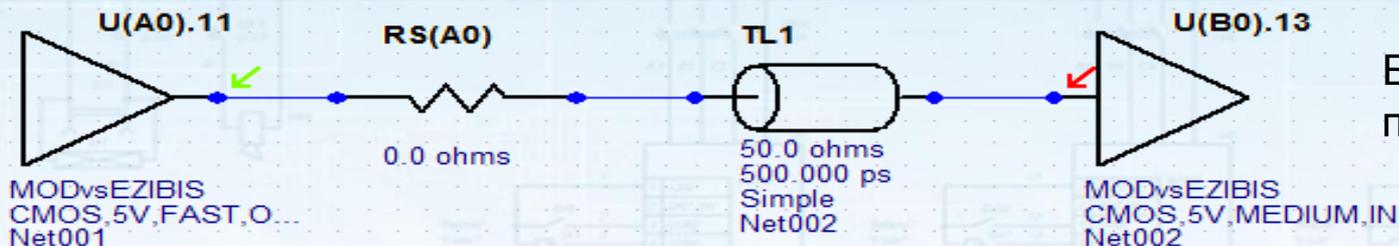
✓ Передатчик

✓ Приемник

✓ Соединение



Буфер передатчика



Буфер приемника

Простая IBIS модель шины данных, адресов, сигналов управления

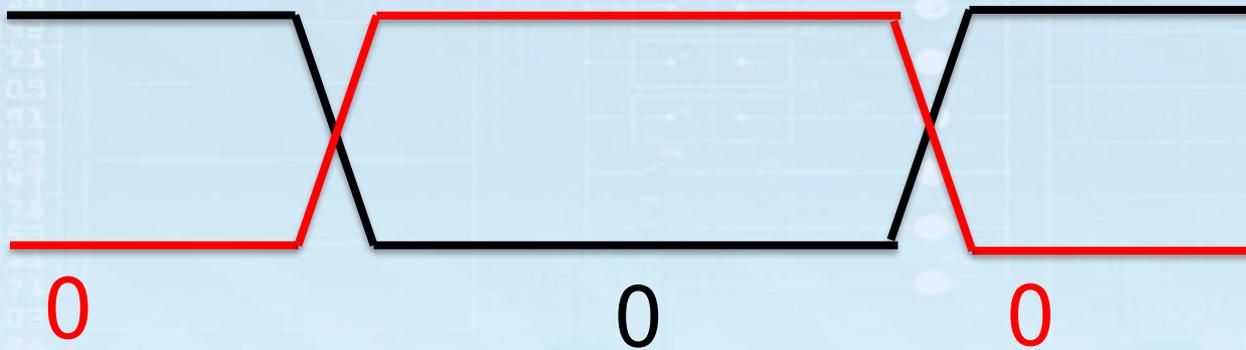
Конфигурация цифровых сигналов

Цифровой поток

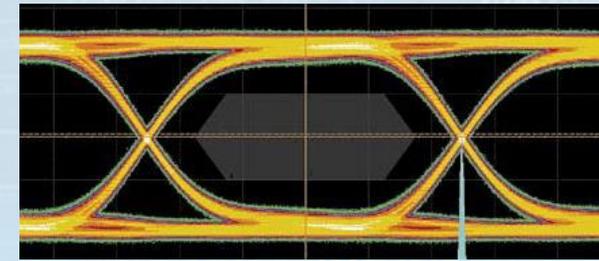
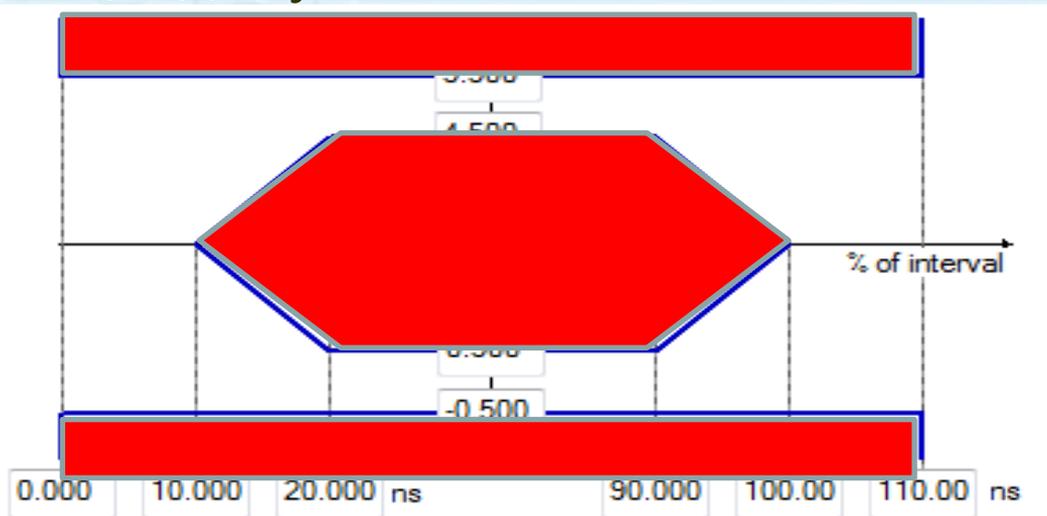
1

1

1



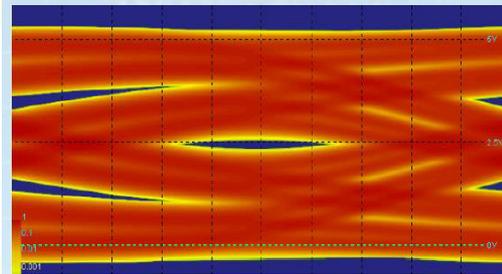
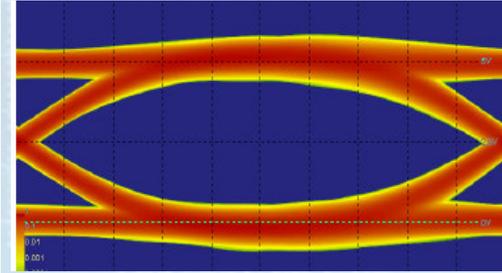
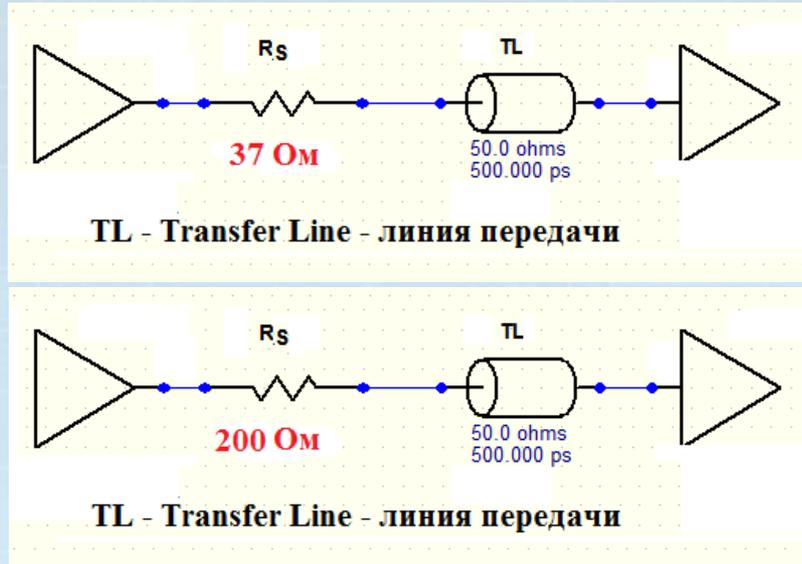
Границы допуска



Глазковая
диаграмма

Глазковая диаграмма (Eye Diagram)

Результаты
моделирования от
изменения
сопротивления
линии



- 1,25Gbps
Maximum eye opening 0.864 V at 0.4 ns
Eye width 0.539 ns or 0.673 UI at 0.0152 V
Period that makes the smallest eye opening: 550
- 2,5Gbps
Maximum eye opening 0.012 V at 0.2 ns
Eye width 0.0118 ns or 0.0295 UI at 0.0243 V
Period that makes the smallest eye opening: 600

Результаты
моделирования
от изменения
частоты

Скоростные интерфейсы

LVDS и M-LVDS

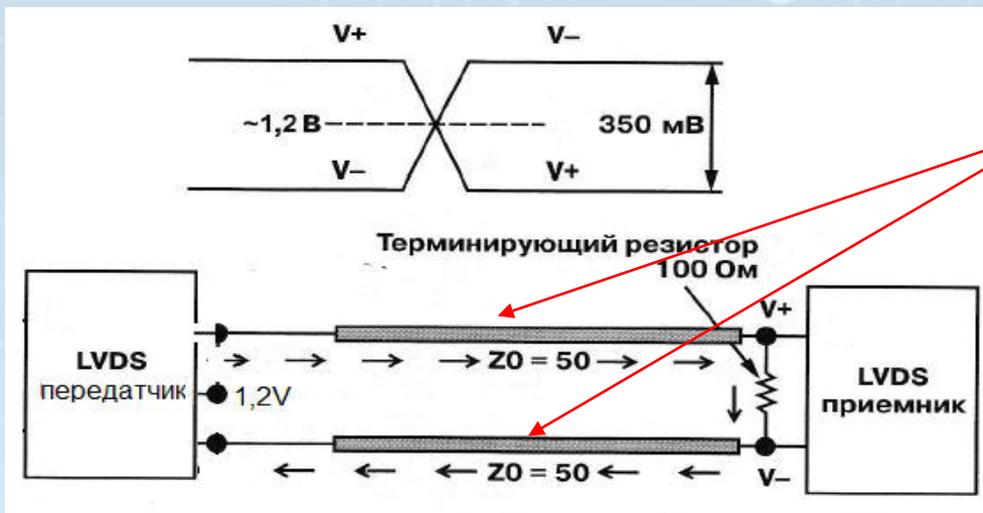
LVDS - Low-Voltage Differential Signaling или дифференциальный метод передачи с использованием сигналов низкого уровня:

M-LVDS - Multipoint-LVDS или многоточечный двунаправленный способ обмена информацией.

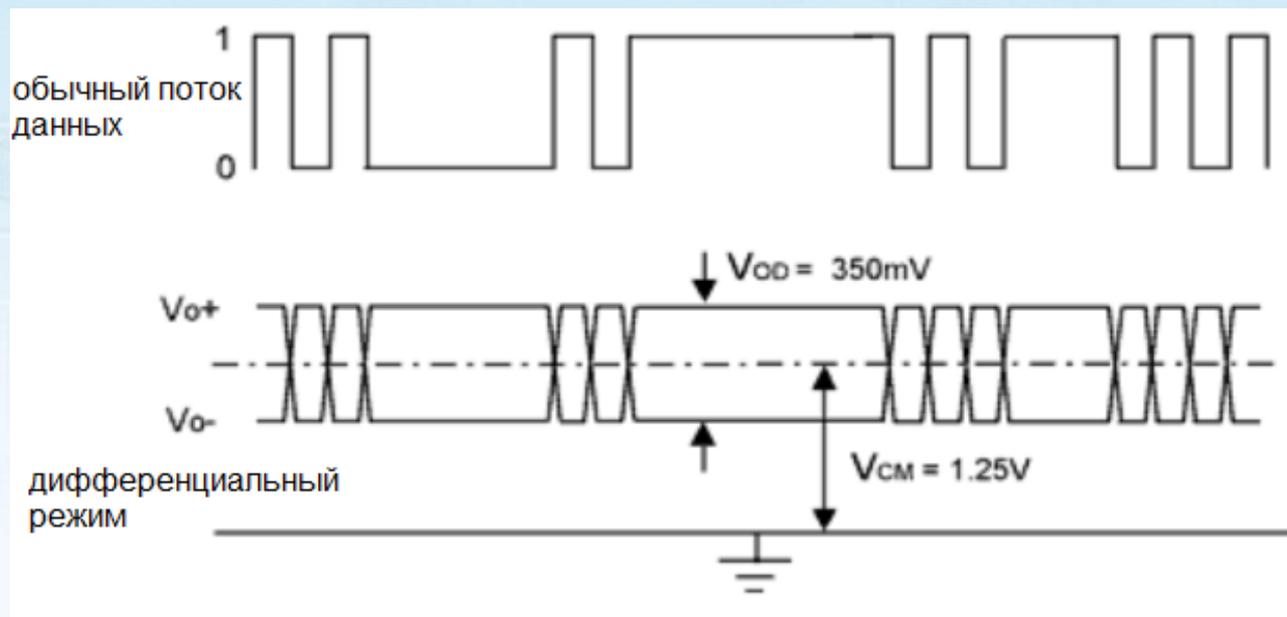
Эти интерфейсы позволяют организовать **сверхскоростной обмен** между микросхемами на печатной плате, а также эффективное взаимодействие между блоками и стойками.

Умея организовать проводники линий передач на ПП с сопротивлением $Z_0=50$ Ом, можно соединять передатчик и приемник LVDS следующим образом:

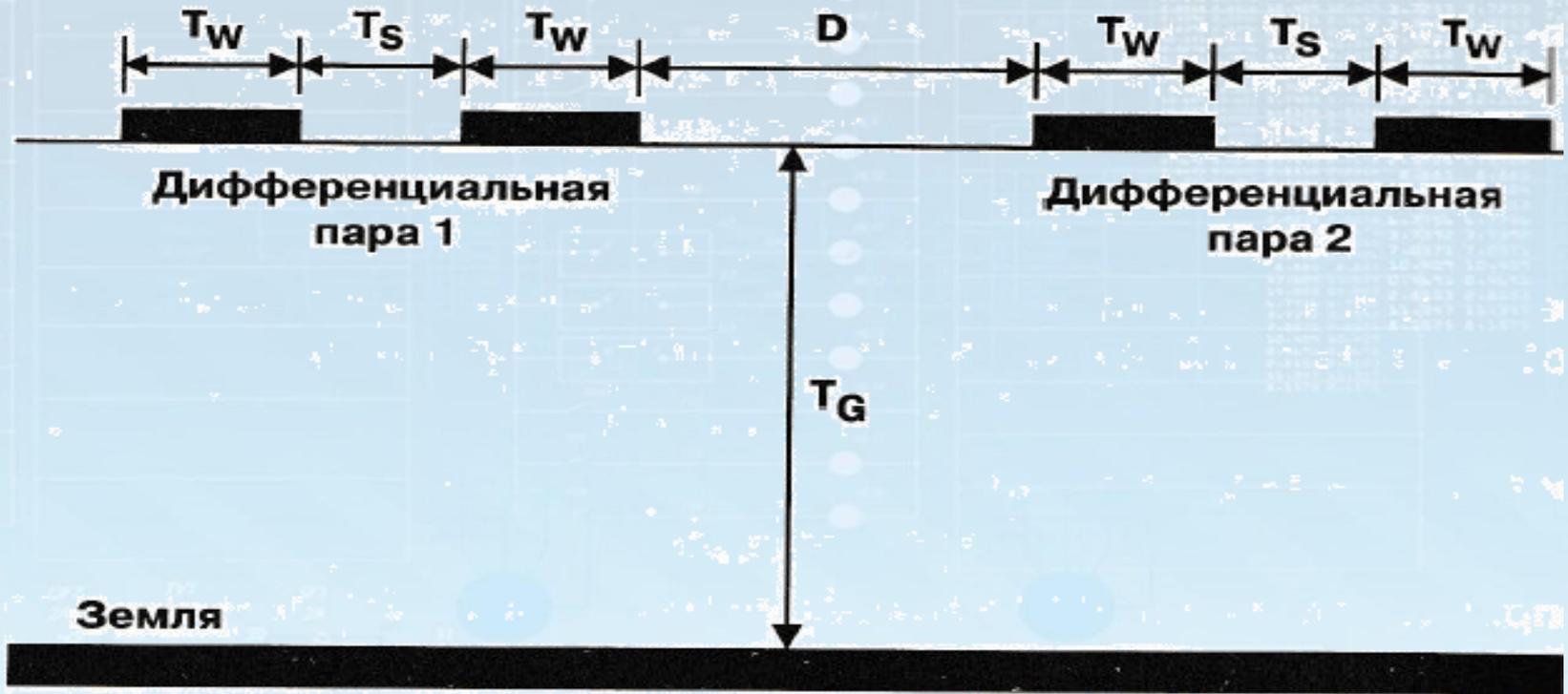
Передатчик и приемник LVDS



Микрополосковая
или полосковая
 $Z_0 = 50$ Ом линии
передачи ПП



Печатные микроволновые линии для двух пар сигналов LVDS



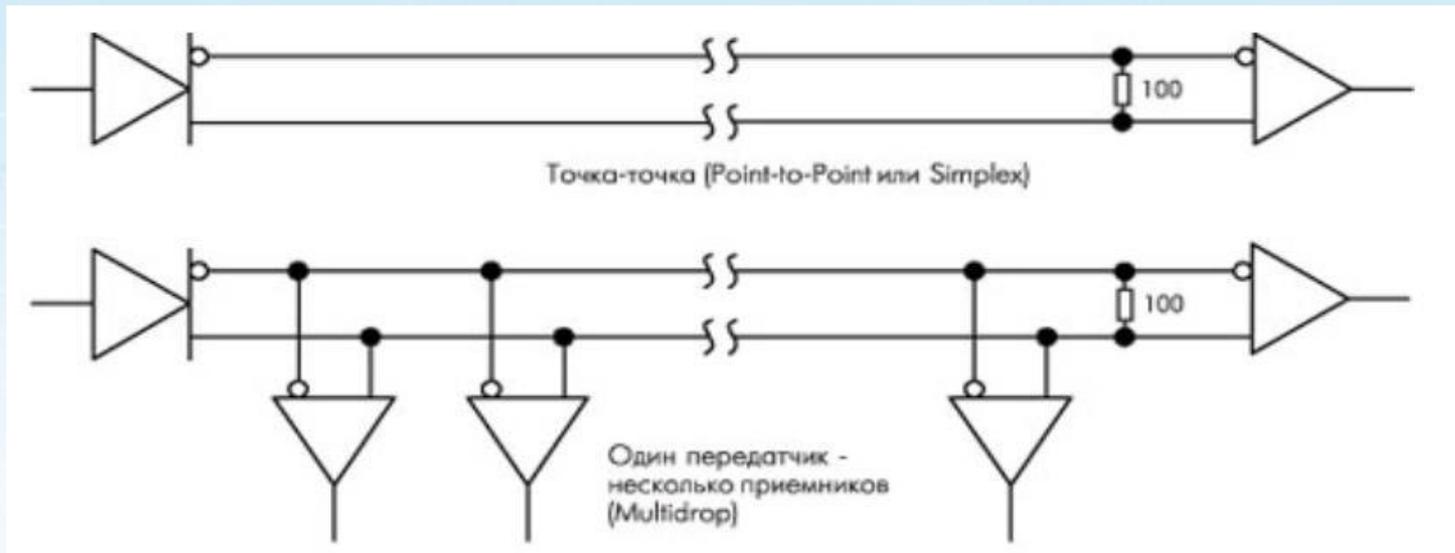
Практические советы по конструированию микро-полосковых линий:

- Выбирайте T_w и T_g так, чтобы характеристический импеданс $Z_0 \sim 50 \text{ Ом}$
- Сохраняйте постоянство T_w , T_s , D по всей длине линии
- Соблюдайте условия: $T_s \sim < 2T_w$; $D > 2T_s$
- Избегайте применение переходных отверстий и поворотов $= 90^\circ$

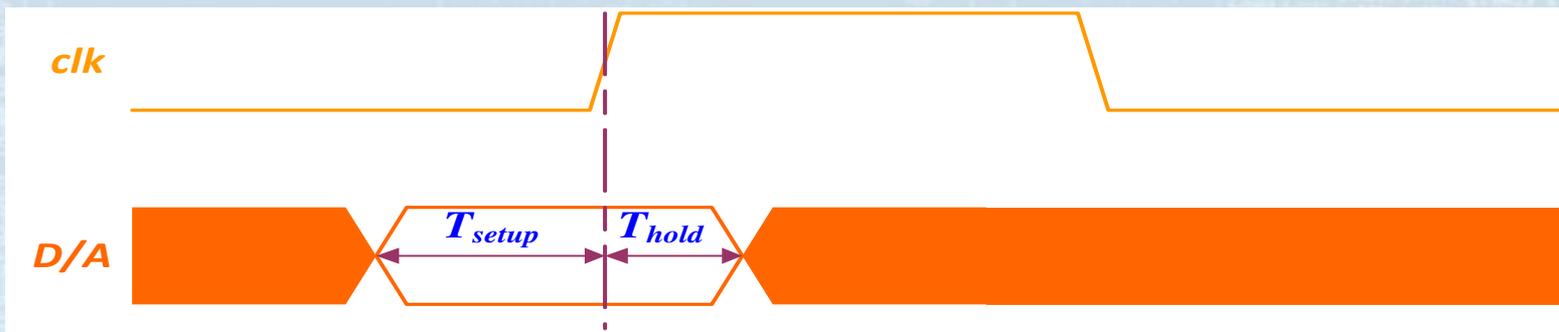
Варианты сверхбыстрого взаимодействия

Правильные геометрические параметры микро-полосковой или полосковой проводников линий передачи ПП, позволяют реализовывать различные способы обмена данными/ сигналами между микросхемами и элементами как установленными на ПП, так и для внешних высокоскоростных интерфейсов:

1) только для передачи в одну сторону, например, для подачи к элементам ПП тактового сигнала **CLK**:



Синхронизация передачи данных

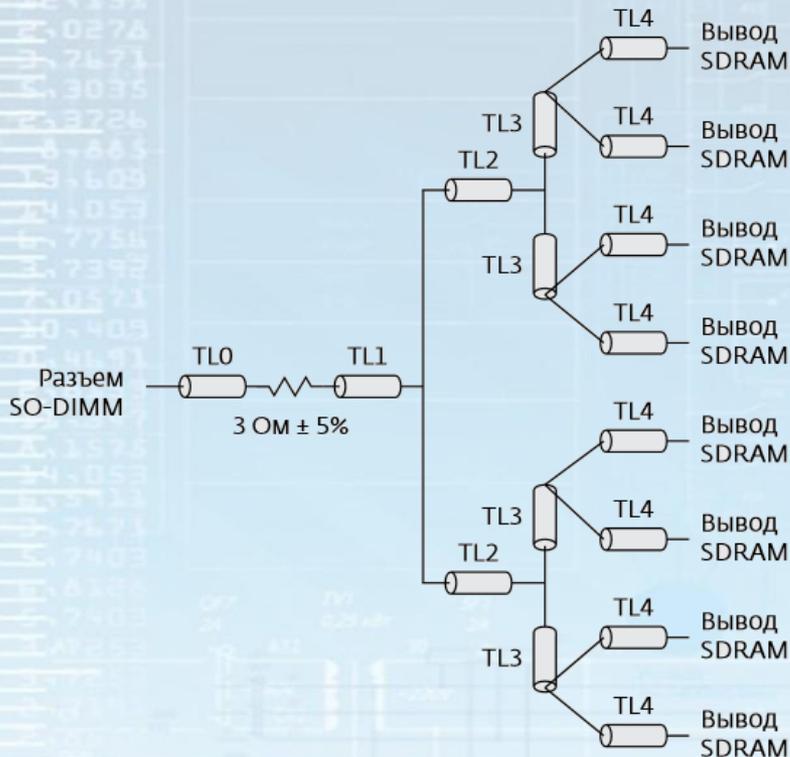


Сигналы с данными должны быть представлены до начала фронта тактового импульса входного сигнала, чтобы гарантировать успешный захват данных. Минимальный промежуток времени до начала фронта известен как время установки, **T_{setup}** .

Шина данных должна оставаться в течение минимального промежутка времени после поступления фронта тактового импульса, чтобы гарантировать надежный захват данных. Этот интервал времени называется время удержания, **T_{hold}** .

Временные задержки до всех узлов шины должны быть **выровнены**.

Выравнивание временных задержек

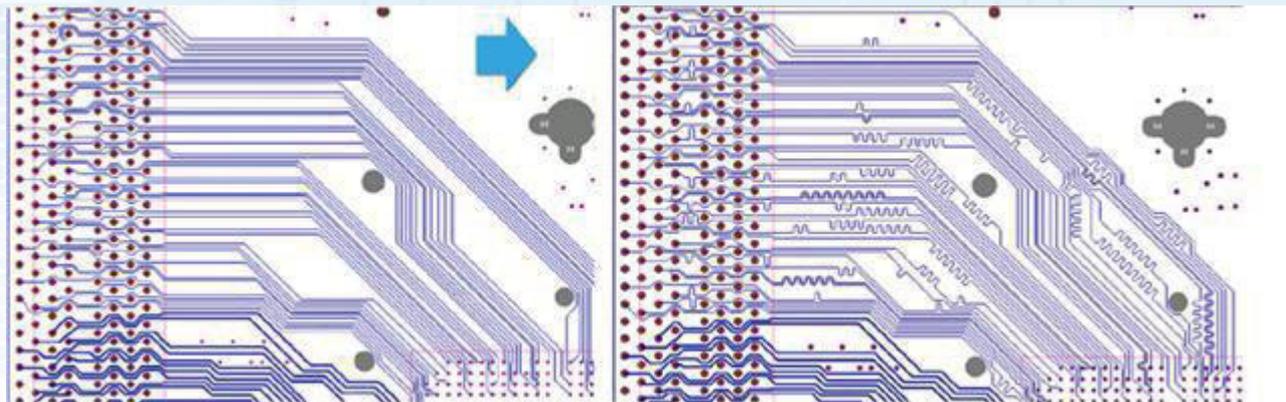
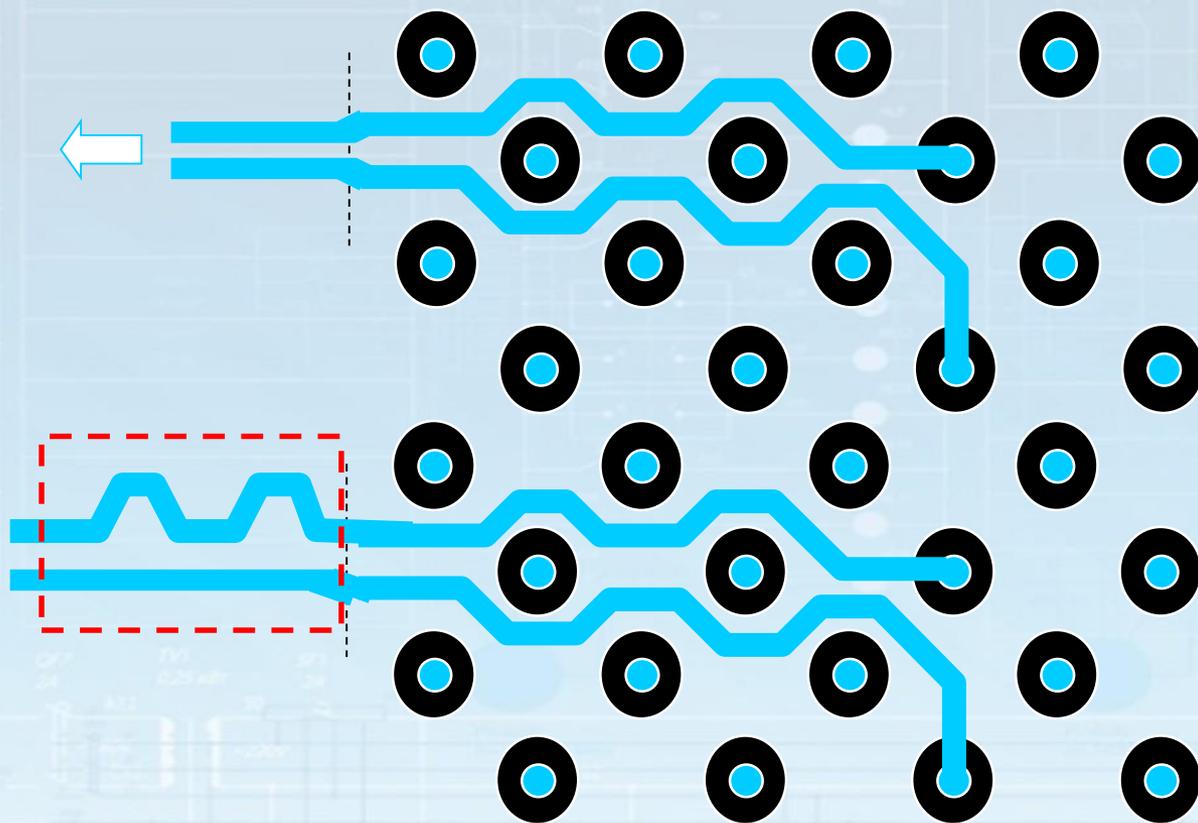


Балансировка дерева требует существенных дополнительных ресурсов площади.

Обычно на плате требуется выровнять задержки для десятков и даже сотен сигналов, поэтому нерациональность подобного подход в условиях дефицита свободного пространства очевидна.

Учет расположения и конфигурации проводников при расчете задержки сигнала, регулирование задержек сигналов осуществляется в основном **за счет изменения длин проводников.**

Выравнивание временных задержек



Конфигурация проводника



При формировании зигзагообразных линий следует учитывать наличие перекрестных связей между соседними изломами проводника. Перекрестные связи в длинных изломах приводят к значительным искажениям сигнала.

Если изломы короткие, искажения, вызванные перекрестной связью, мало влияют на форму переднего фронта, но ускоряют появление сигнала на выходе.

Пример: Для импульса с длительностью переднего фронта 1 нс (диэлектрик FR-4) рекомендуется предельно допустимый излом не более 25,4 мм, а при длительности переднего фронта 0,1 нс предельно допустимая длина излома – 2,5 мм. В противном случае, сигналы будут иметь значительные искажения за счет паразитных перекрестных связей.

Устранимые источники паразитных шумов в проводниках

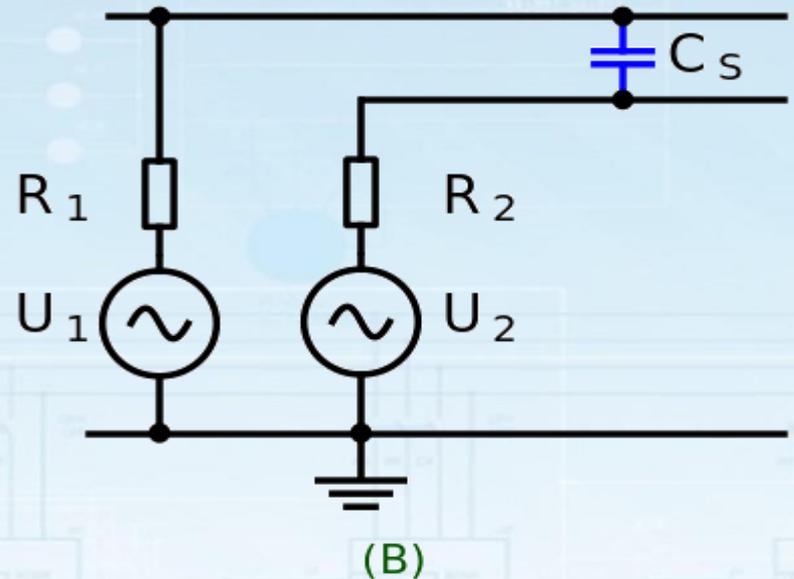
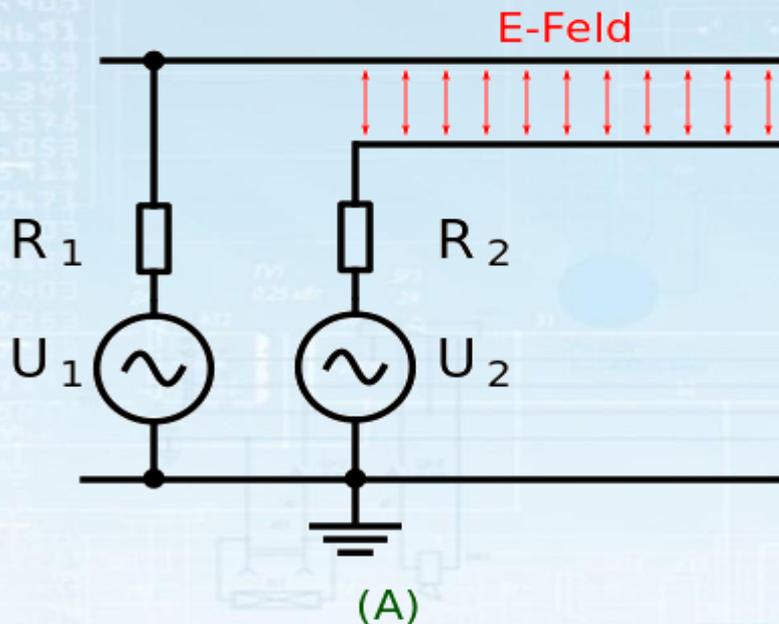
- 1) **Перекрестная помеха** является результатом влияния энергии одной линии на другую с помощью:
 - Взаимной емкости (электрическое поле)
 - Взаимной индуктивности (магнитное поле)
- 2) **Поверхностный (skin) эффект** – изменение сопротивления и перераспределение плотности токов в линии проводника при увеличении частоты сигналов
- 3) **Отражение** сигналов в проводниках ПП
- 4) **Резонансные** явления

Эти паразитные явления могут быть устранены на предварительном этапе разработки топологии ПП при использовании средств анализа и моделирования целостности сигналов на базе IBIS моделей.

Ёмкостная связь

- передача энергии от одного проводника к другому из-за разности потенциалов между контурами, образующих электрическое поле (E-Field).

Принцип ёмкостной связи может быть описана:



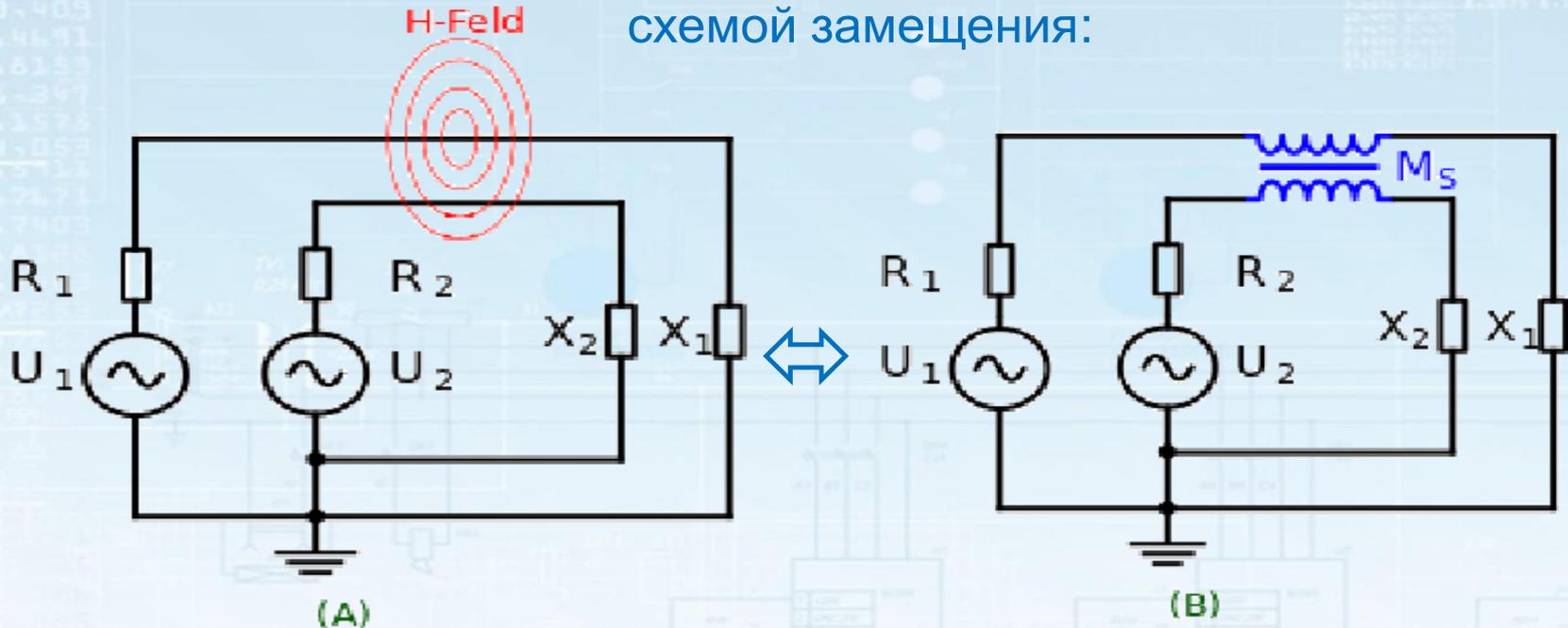
(A) электрическим полем

и (B) электрической моделью

Индуктивная связь

- взаимная индуктивность, известная как магнитная связь соседних электрических цепей, индицируется (наводится) от одного контура, с переменным источником, во второй, образуя переменное магнитное поле (H-Field).

Принцип индуктивной связи может быть описан схемой замещения:



(A) моделью с переменным магнитным полем H

(B) моделью с использованием взаимной индуктивности M_s

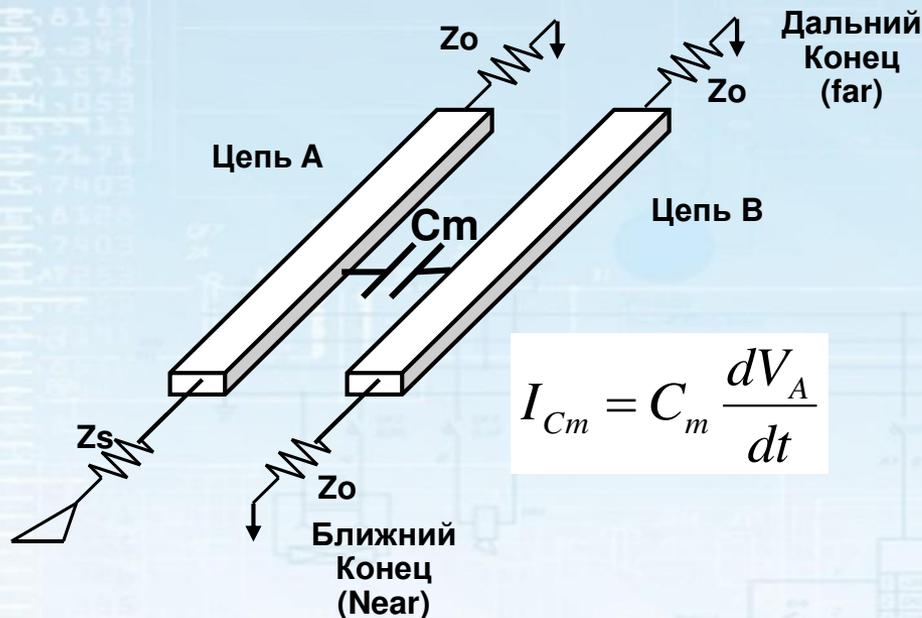
Inductive coupling

Перекрестные помехи

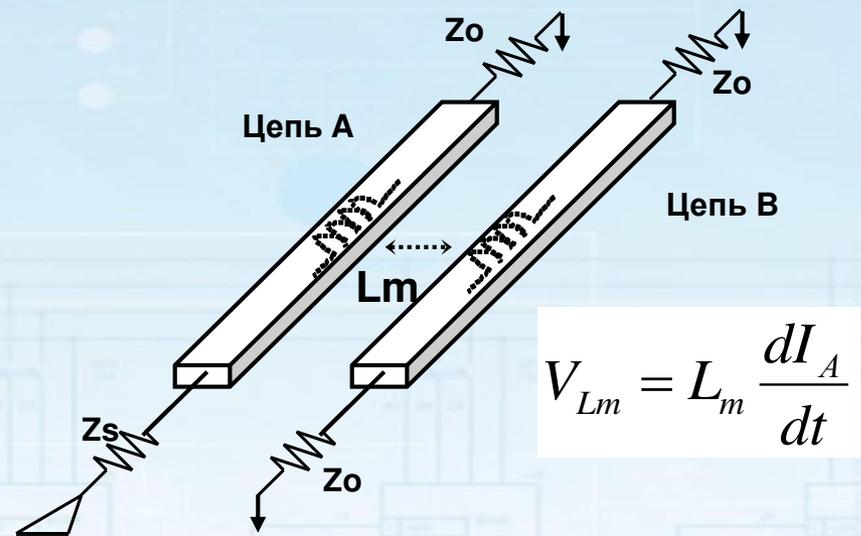
Взаимная индуктивность и емкость в проводниках ПП

Влияние энергии одной линии на другую с помощью:

- взаимной емкости C_m (электрическое поле)
- взаимной индуктивности L_m (магнитное поле)



Взаимная емкость
Mutual Capacitance, C_m



Взаимная индуктивность
Mutual Inductance, L_m

Примеры неправильной разработки топологии

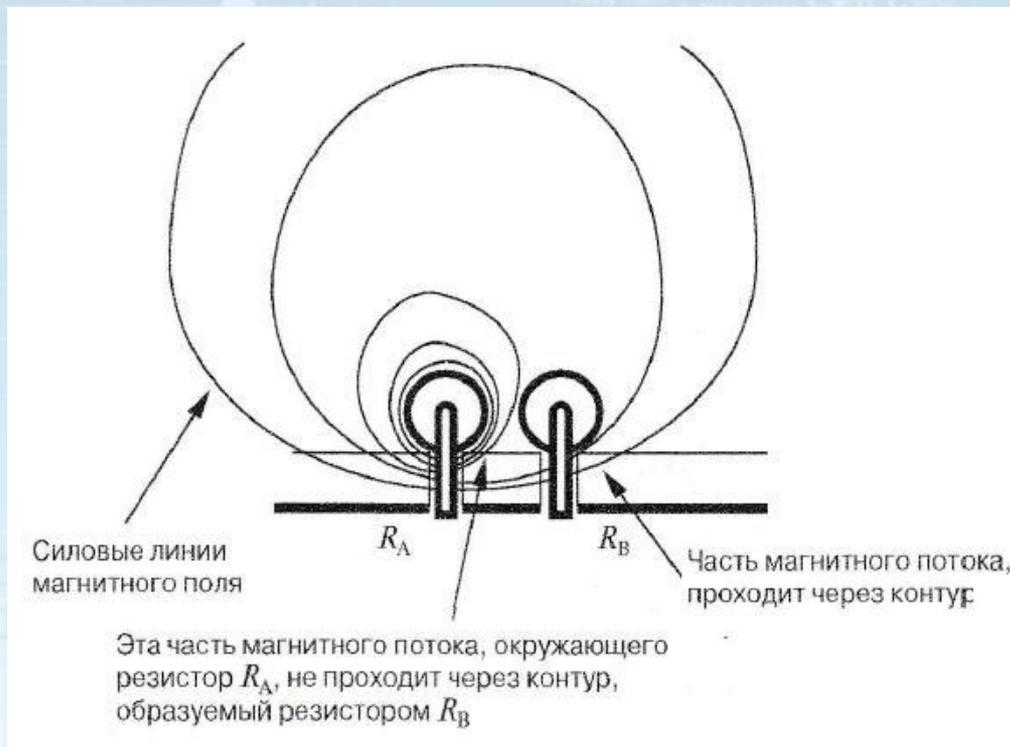
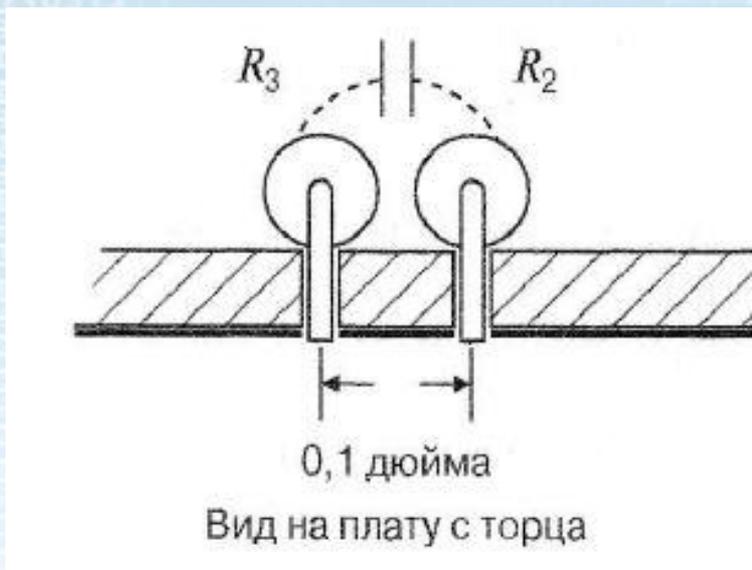
1) Перекрывание аналоговой и цифровой полигонов земли



Возникновение перекрестного цифрового шума в аналоговых цепях, что недопустимо

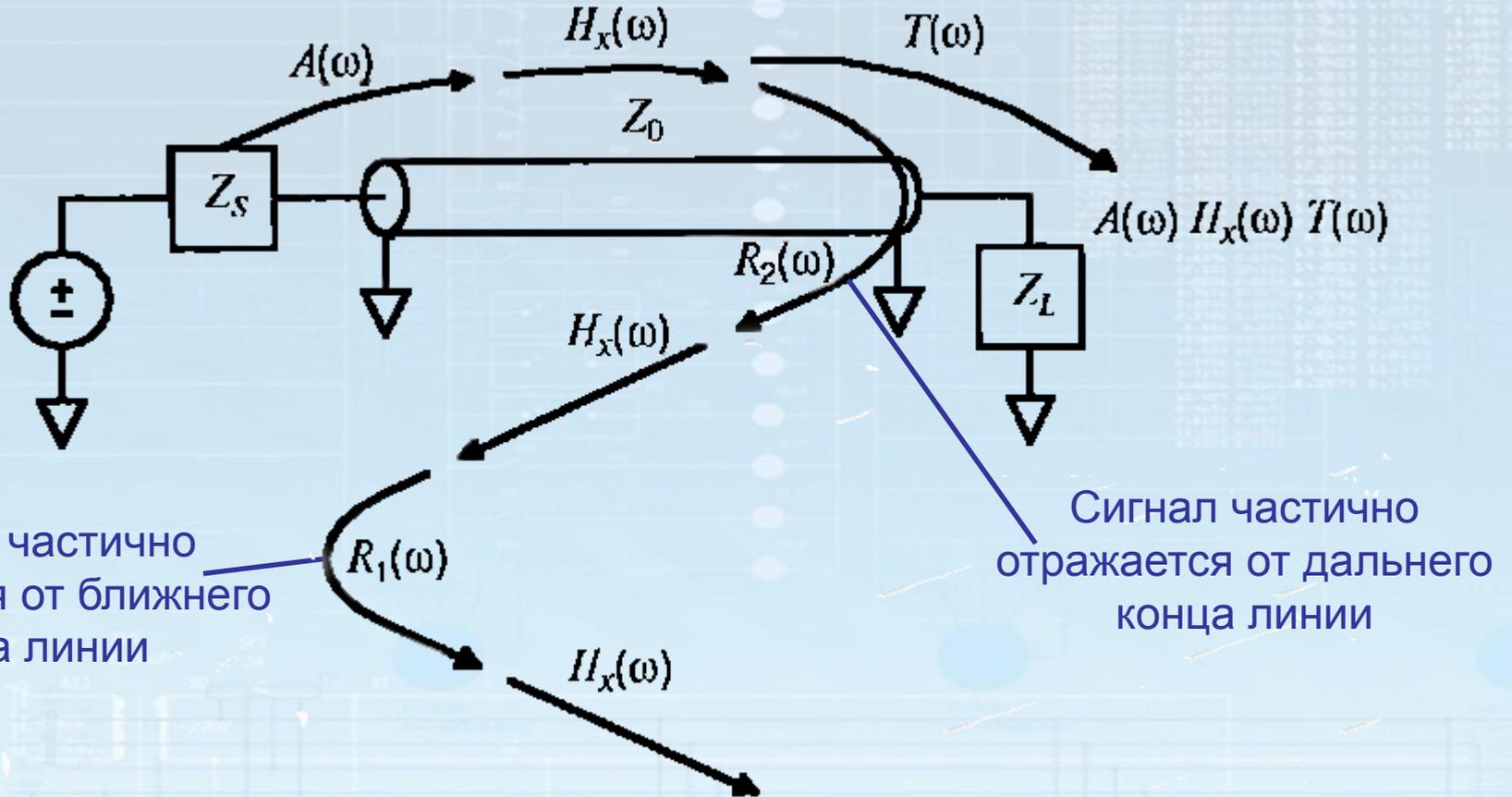
Паразитные связи близко расположенных элементов

2) Взаимная емкость и паразитная индуктивность элементов, на примере резисторов



Близко расположены контактные площадки элементов ПП
Высокая плотность контактных площадок в топологии приводит к возникновению перекрестным помехам

Отражение и прохождение сигнала



Коэффициент передачи цепи с выхода источника сигнала на вход линии передачи

$$A(\omega) = \frac{Z_0(\omega)}{Z_S(\omega) + Z_0(\omega)}$$

Ослабление сигнала

$$H_x(\omega)$$

Коэффициент передачи цепи с выхода линии передачи в нагрузку

$$T(\omega) = \frac{2Z_L(\omega)}{Z_L(\omega) + Z_0(\omega)}$$

Отражение сигнала - специальные случаи

А: Сопротивление нагрузки равно Z_0



$$\rho = \frac{Z_0 - Z_0}{Z_0 + Z_0} = 0$$

В: Замкнутая цепь



$$\rho = \frac{0 - Z_0}{0 + Z_0} = -1$$

С: Открытая цепь



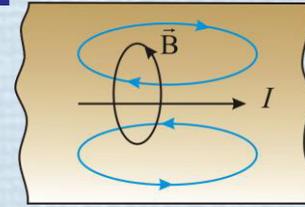
$$\rho = \frac{\infty - Z_0}{\infty + Z_0} = 1$$

Z_s – импеданс источника

ρ – коэффициент отражения

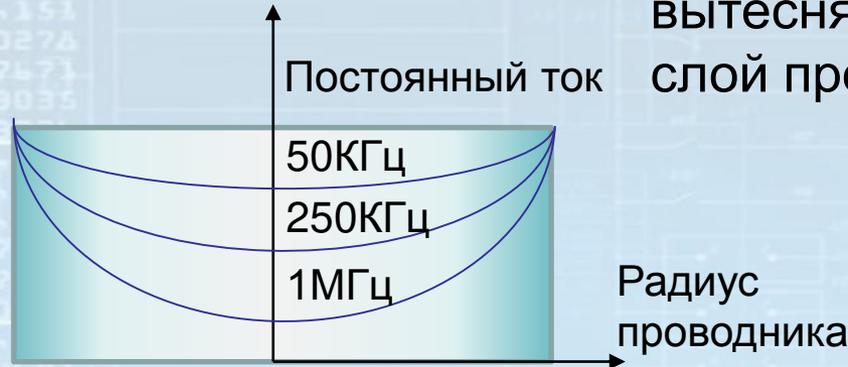
$\tau = 1 + \rho$ коэффициент прохождения

Поверхностный скин-эффект

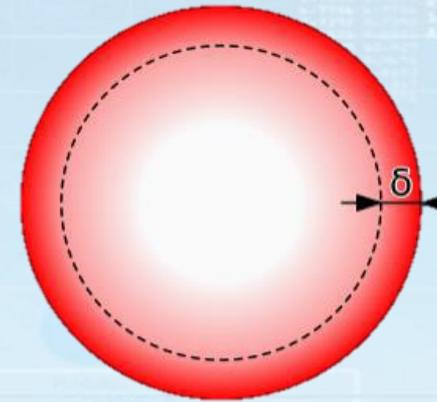


Плотность тока A/m^2

С повышением частоты ток вытесняется в поверхностный слой проводника



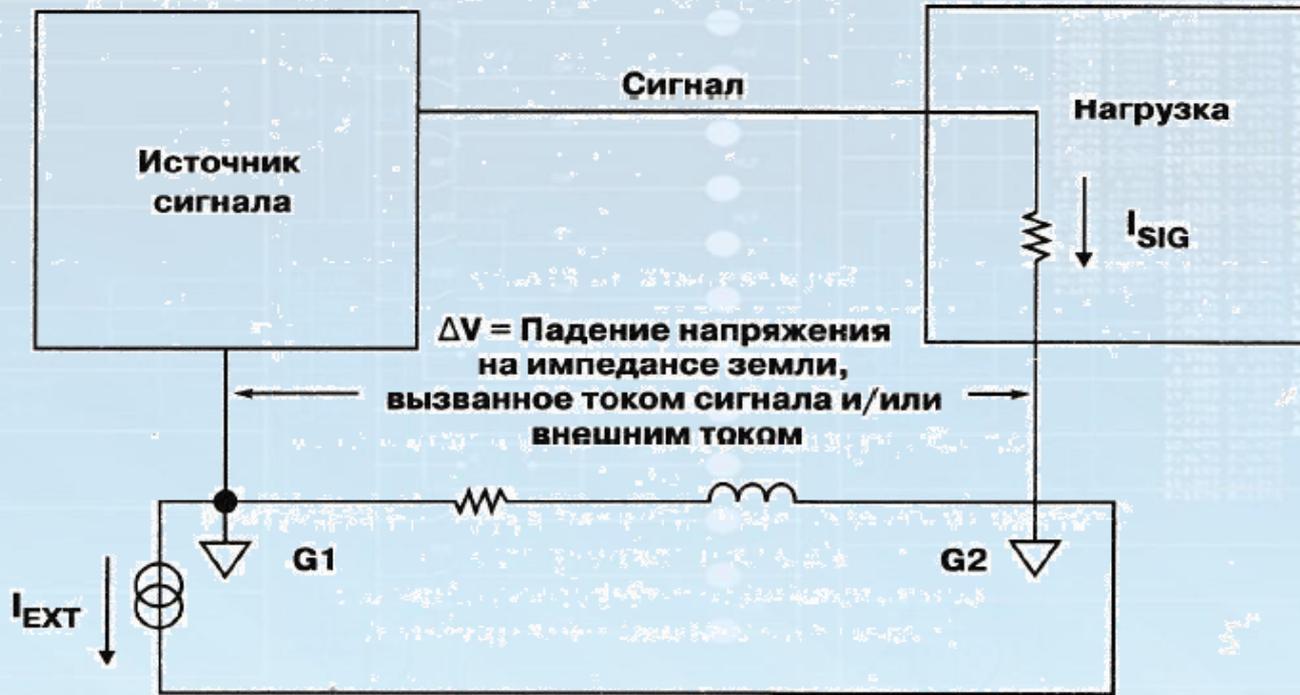
$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}$$



Толщина проводящего слоя δ - глубина скин-слоя и фактическое распределение тока в поперечном сечении проводника, показано градиацией красного цвета

частота	глубина проникновения	частота	глубина проникновения
5 Гц	29.7 мм	5 МГц	29,7 мкм
16 Гц	16.6 мм	16 МГц	16.6 микрон
50 Гц	9,38 мм	50 МГц	9,38 мкм
160 Гц	5,24 мм	160 МГц	5.24 мкм
500 Гц	2,97 мм	500 МГц	2.97 мкм
1.6kHz	1.66 мм	1.6GHz	1.66 мкм
5 кГц	938 микрон	5 ГГц	938 нм
16 кГц	524 микрон	16 ГГц	524nm
50 кГц	297 микрон	50 ГГц	297 нм
160 кГц	166 микрон	160 ГГц	166 нм
500 кГц	93,8 мкм	500 ГГц	93,8 нм
1.6MHz	52,4 мкм	1.6 ТГц	52,4 нм

Реалистичный взгляд на импеданс земляной шины



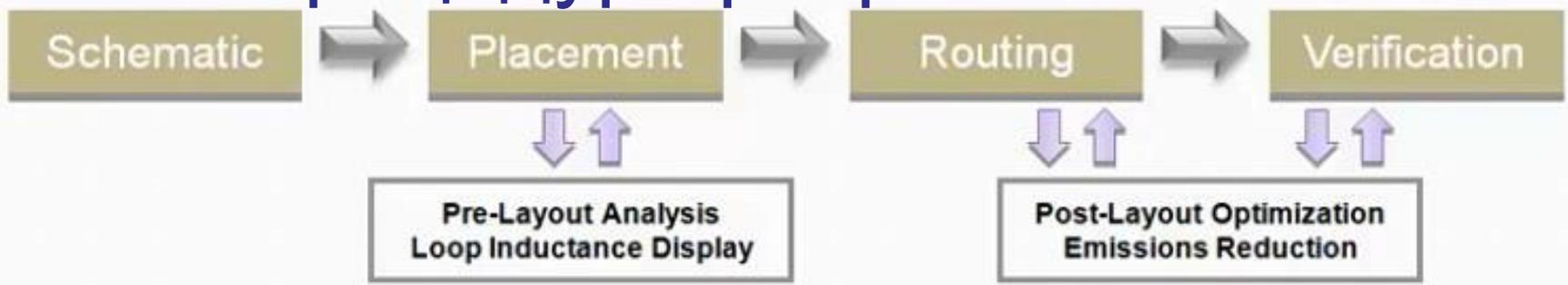
Шина земли никогда не имеет нулевой импеданс, у неё всегда есть сопротивление и индуктивность, даже если она представляет собой большую и достаточно толстую поверхность в одном из слоев печатной платы. Величина импеданса может быть малой, но она никогда не равна нулю. А ток, протекающий через импеданс, вызывает падение напряжения. Соответственно, два значка земли никогда не имеют одинаковый потенциал.

При высокой частоте сигнала важно учесть не только сопротивление земли, но и её индуктивность.

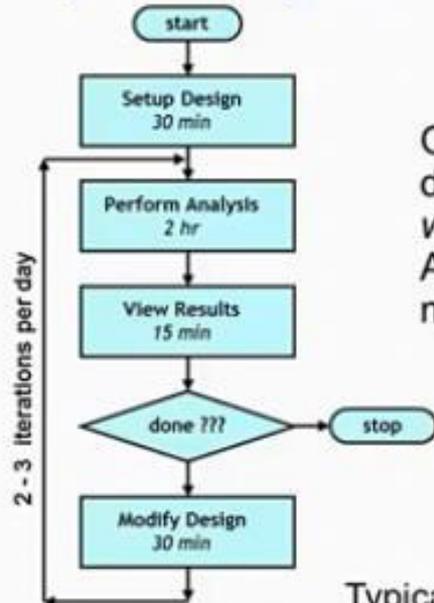
Целостность сигналов

- **Целостность сигналов** — наличие достаточных условий для безошибочной передачи электрического сигнала и отсутствия влияния на другие компоненты.
1. **Предтопологический анализ** - предварительное исследование системы на наличие в ней проблем с целостностью сигналов (еще не известны точные геометрические размеры системы и точное взаимное расположение компонентов системы).
 2. **Посттопологический анализ** - максимально полное исследование системы на наличие проблем целостности сигналов с учетом реальной трассировки, геометрических размеров и положений компонентов, взаимного расположения компонентов.

Процедура разработки ПП

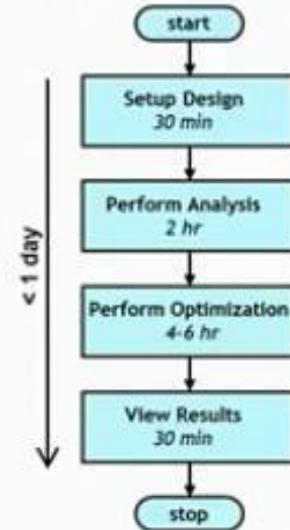


Typical Analysis: Manual
Analysis-based design flow

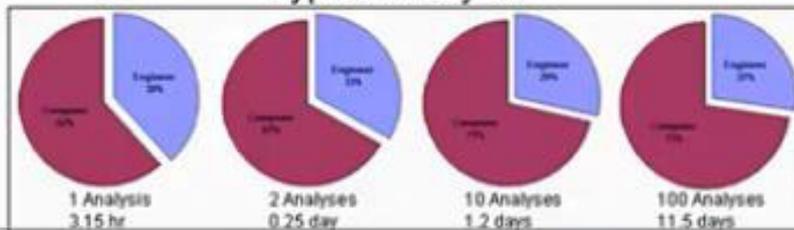


OptimizePI explores the entire decap design space in the same *wall-clock* time as 2-3 Typical Analysis design iterations, with much less *engineering* time.

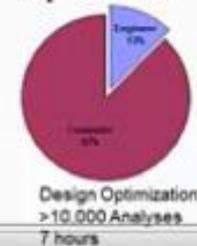
OptimizePI: Automation
Task-focused, automated flow



Typical Analysis



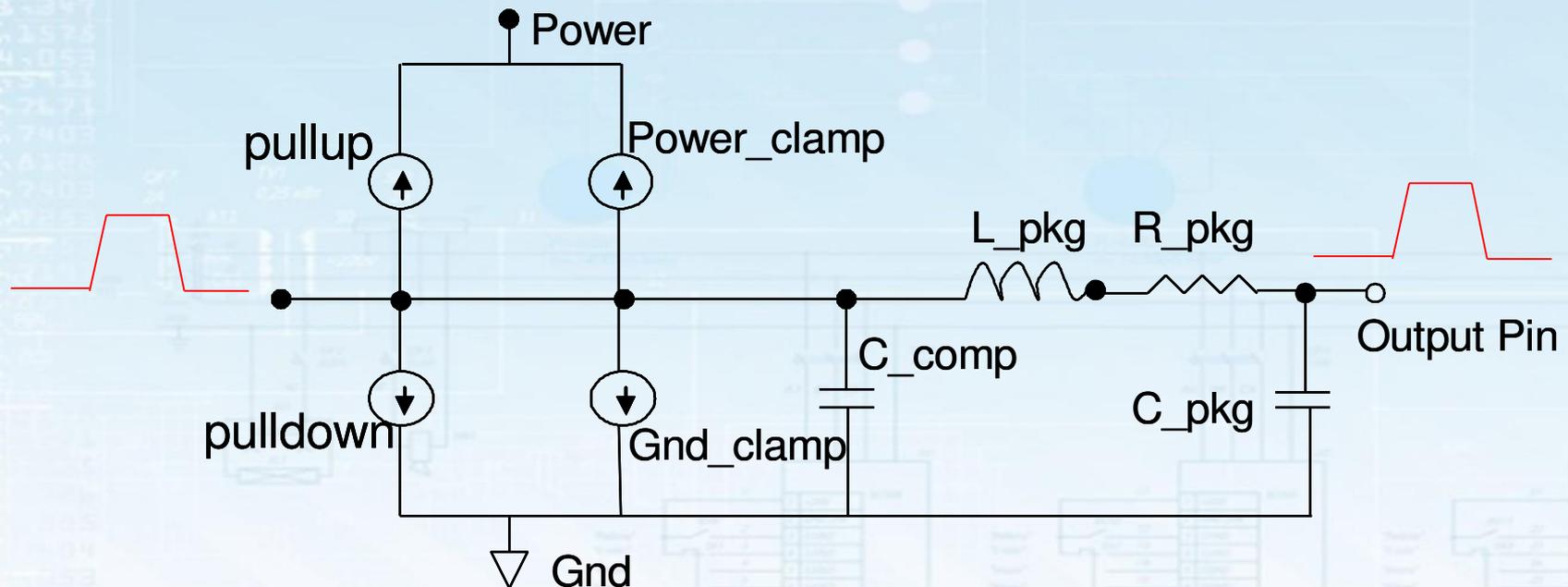
OptimizePI



IBIS (I/O Buffer Information Specification) моделирование

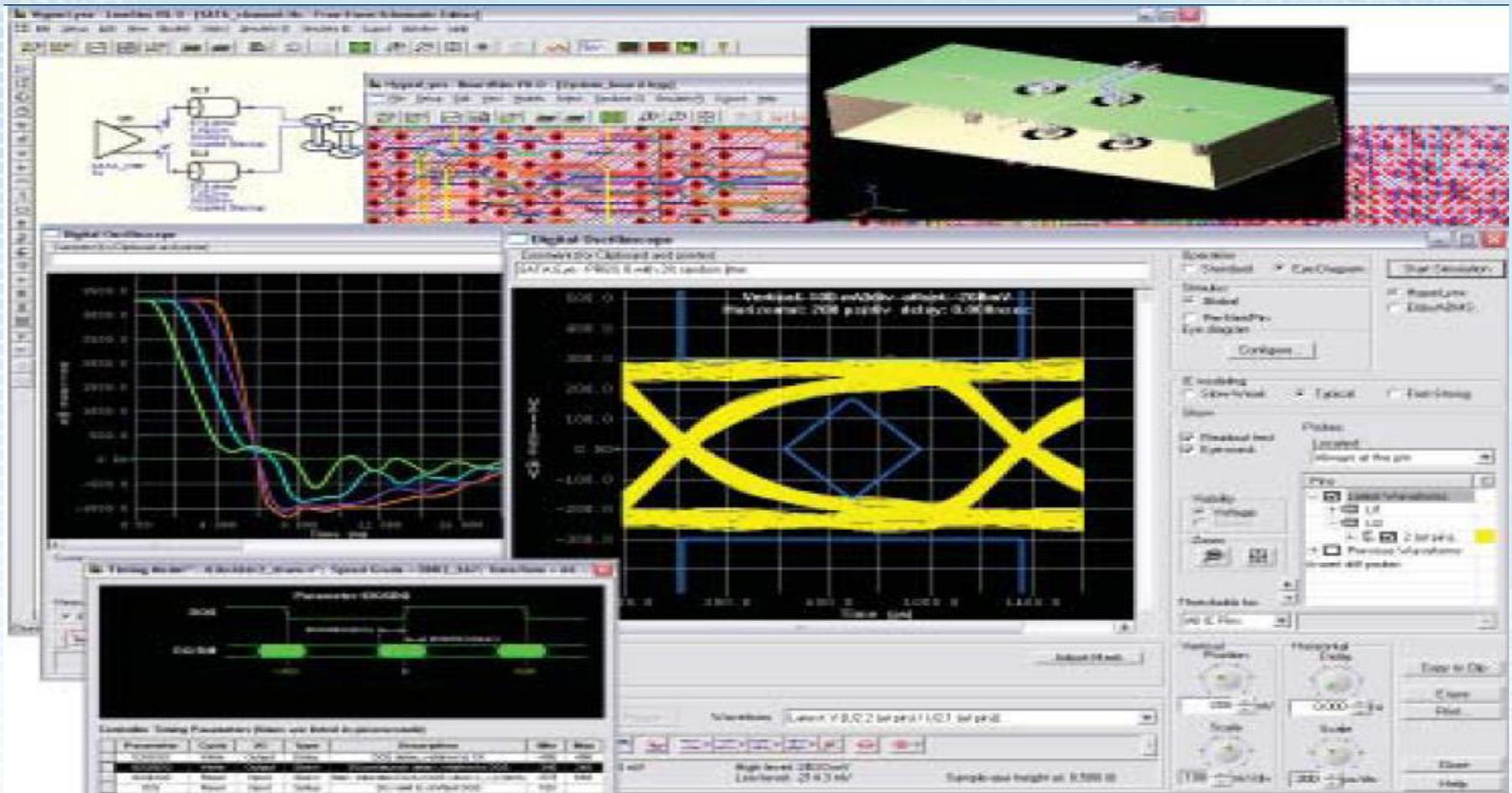
IBIS является быстрым и точным поведенческим методом моделирования входных выходных/буферов на основе данных V / I , полученные из реальных измерений или полного моделирования схемы производителем.

Каков бы не был производитель цифровых микросхем, порты ввода – вывода описываются единственной моделью:



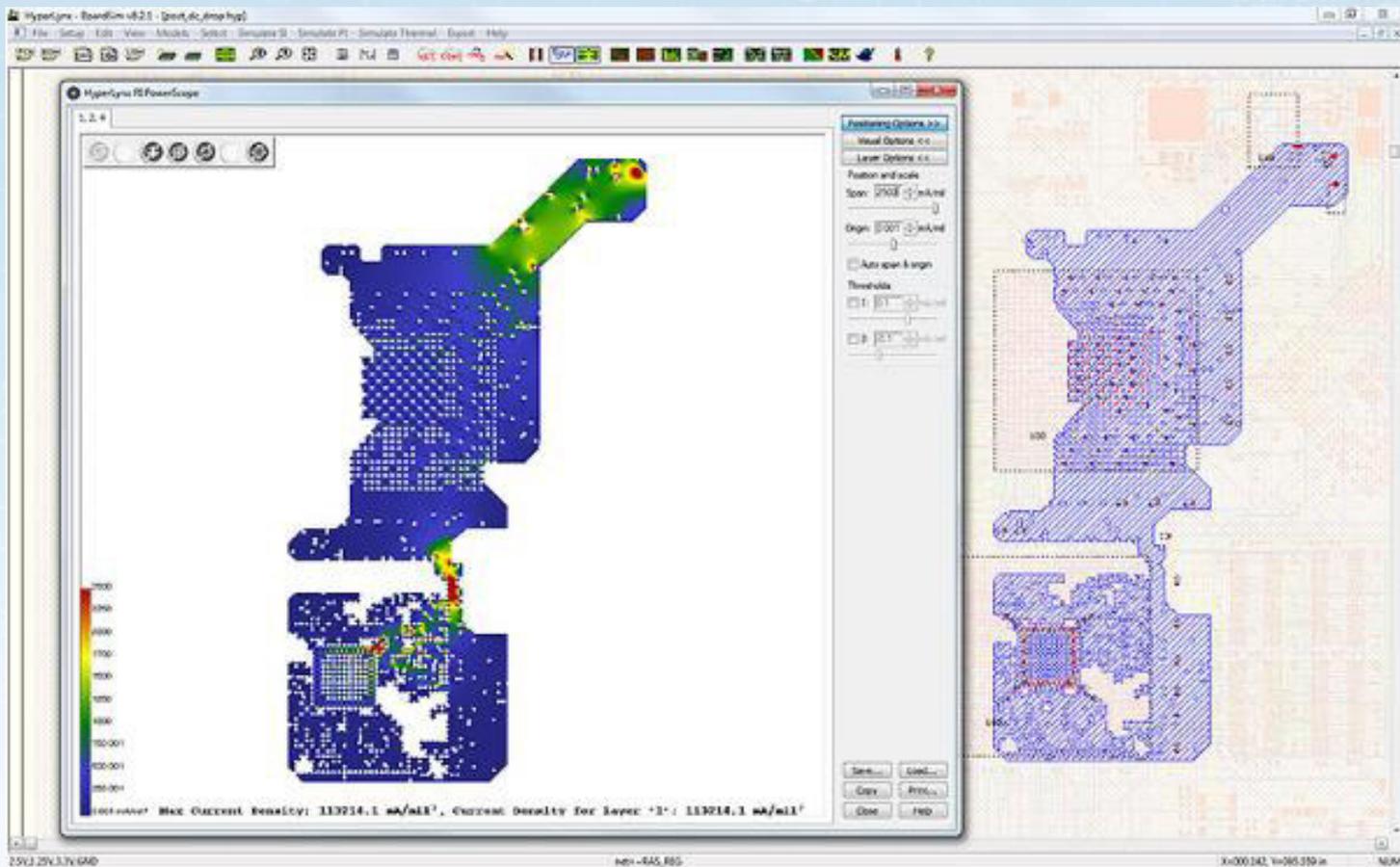
HyperLynx SI — анализ целостности сигналов на печатной плате

HyperLynx SI (Signal Integrity) обеспечивает быстрый, простой и точный анализ целостности сигналов в проекте ПП и помогает инженерам эффективно настраивать и ограничивать параметры во время проведения анализа.



HyperLynx PI — анализ целостности цепи питания

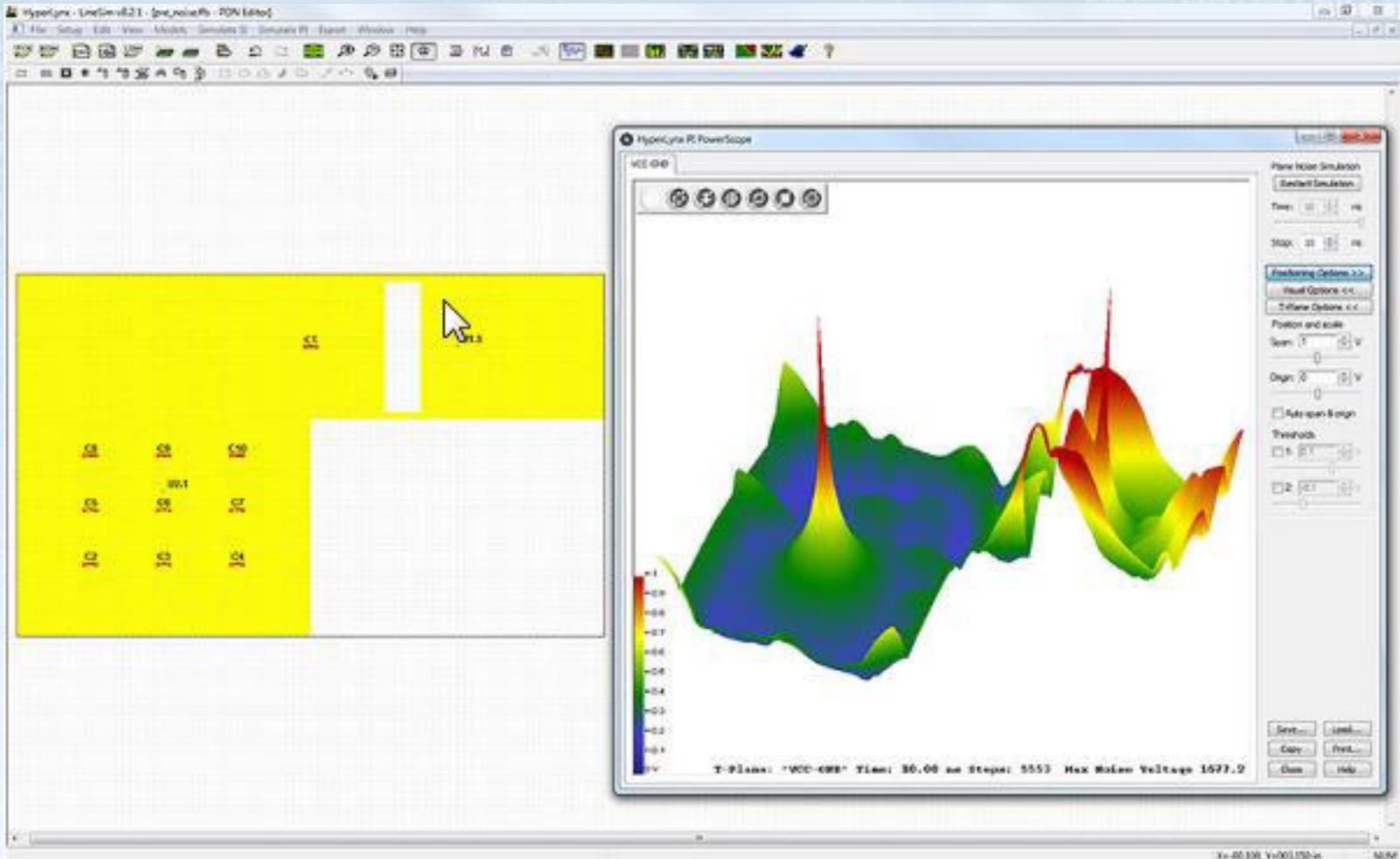
HyperLynx PI (**Power Integrity**) позволяет в интуитивно понятной среде быстро и точно выявить проблемы целостности силовой сети, устранить возможное влияние помех/шумов на сигнальные цепи и обеспечить правильную работу проектируемой платы.



Определяет места с высокой плотностью тока

Моделирование различного шума

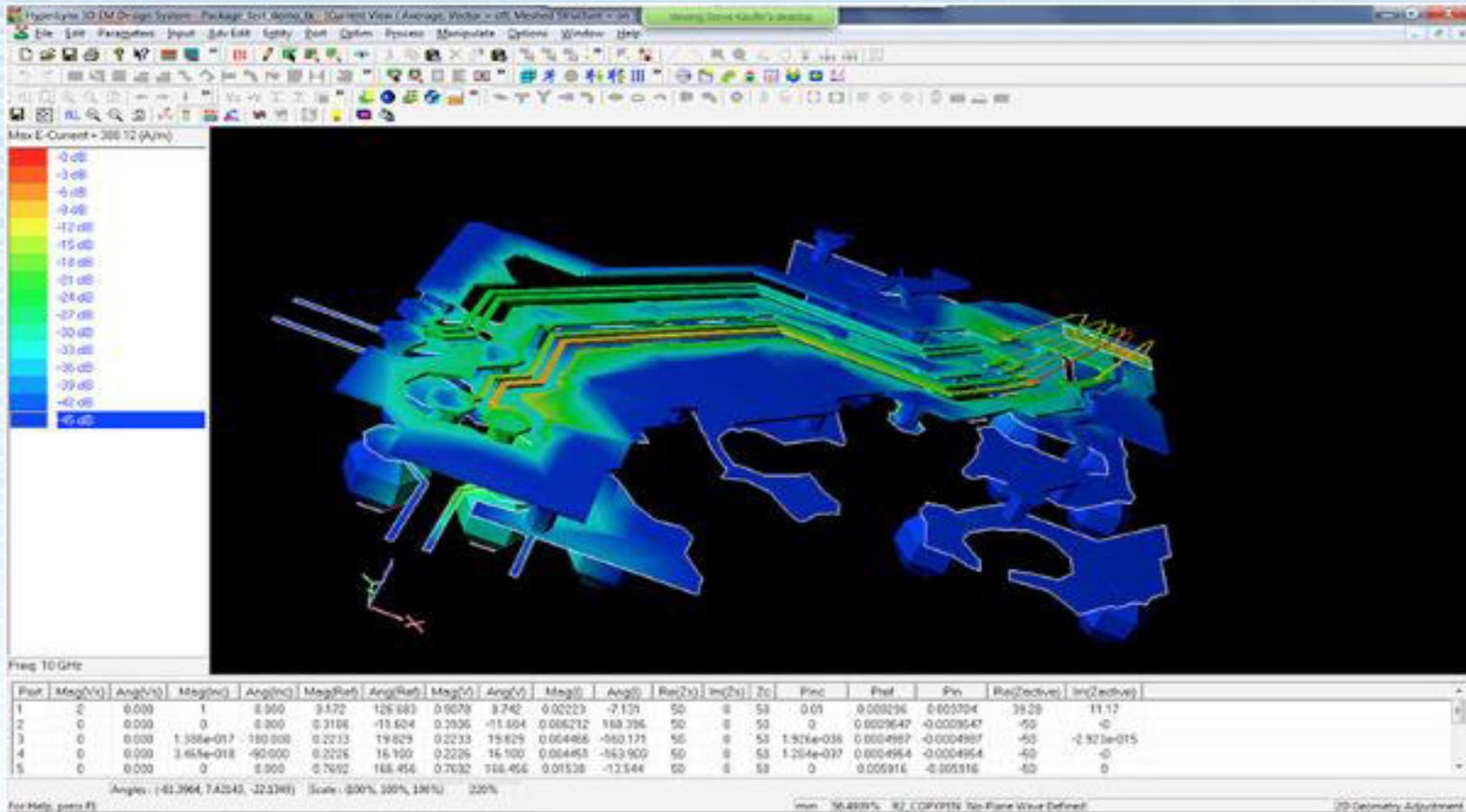
Simulate IC switching noise для имитации эффекта шума от переключения интегральных схем (ИС) по мере его распространения по всем слоям и переходным отверстиям платы;



Шум от переключения микросхем

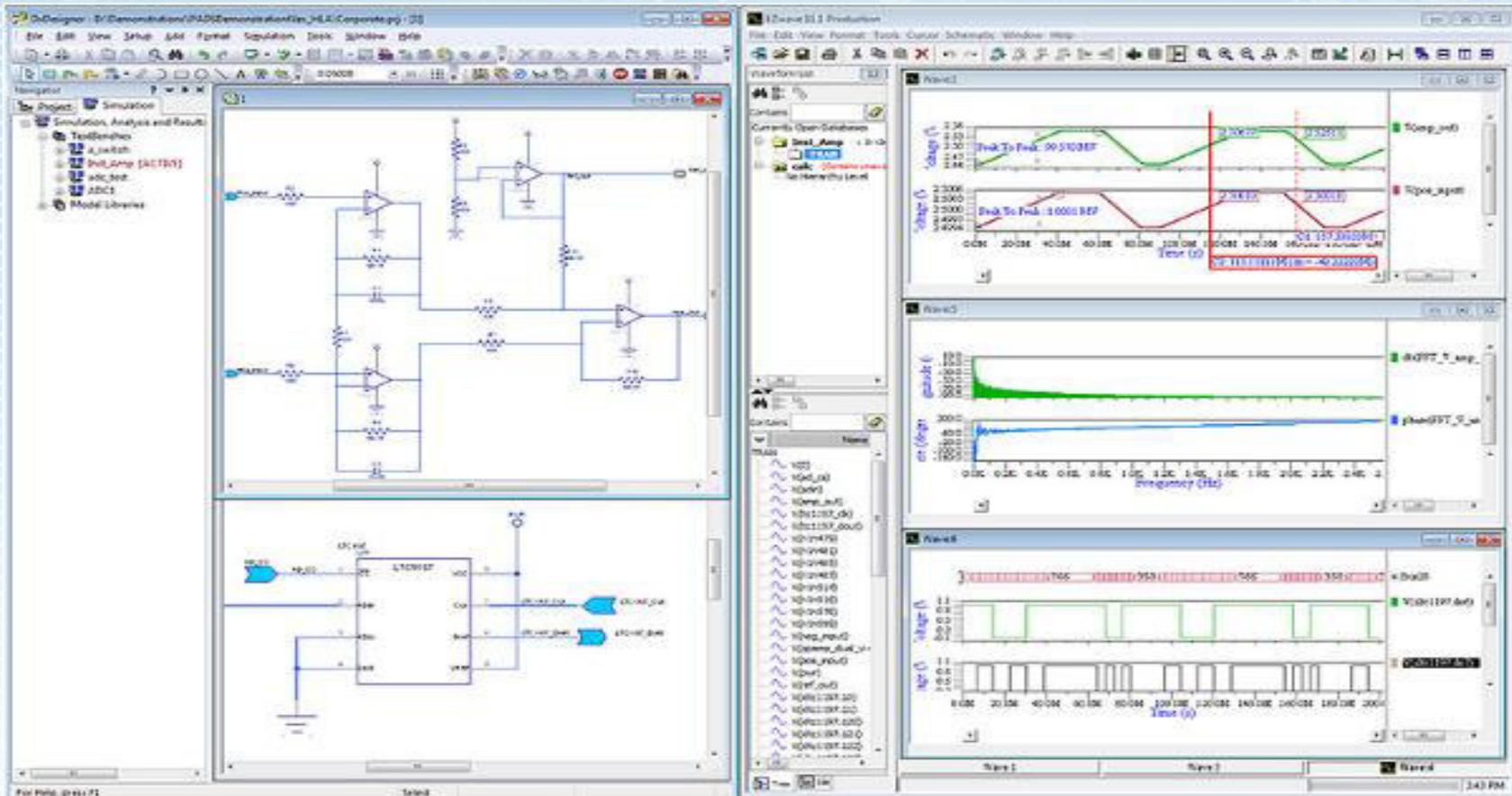
HyperLynx 3D EM — анализ электромагнитной СОВМЕСТИМОСТИ

HyperLynx 3D EM — полноволновой (full-wave) 3D-симулятор, предоставляющий полный набор средств для электромагнитного (EM) анализа проектов печатных плат, конструкций, проектов ВЧ/СВЧ ИС и планарных антенн с учетом самых высоких требований пользователя к моделям компонентов и схеме проекта.



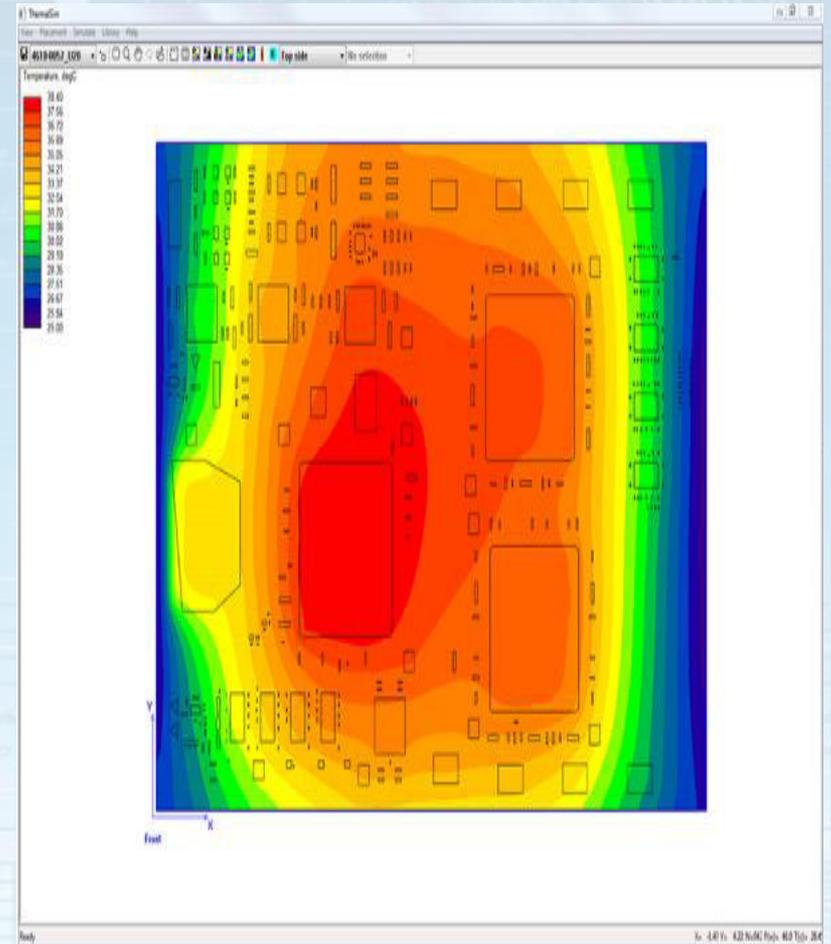
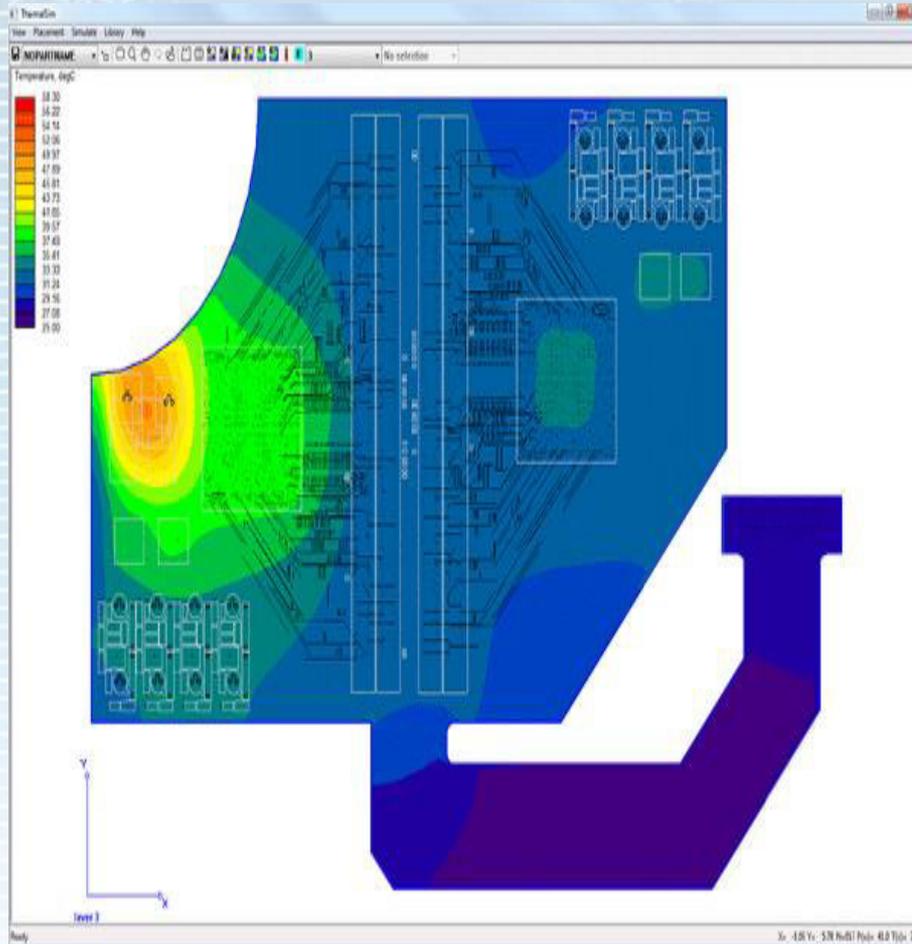
HyperLynx Analog — моделирование схем проекта

HyperLynx Analog — средство анализа работоспособности схемы проекта электронного изделия, ее проверки на различные внешние воздействия и изменения параметров в широком диапазоне, что позволяет инженерам на ранней стадии проектирования создать запас для надежной работы устройства в будущем.



HyperLynx Thermal — анализ распределения тепла

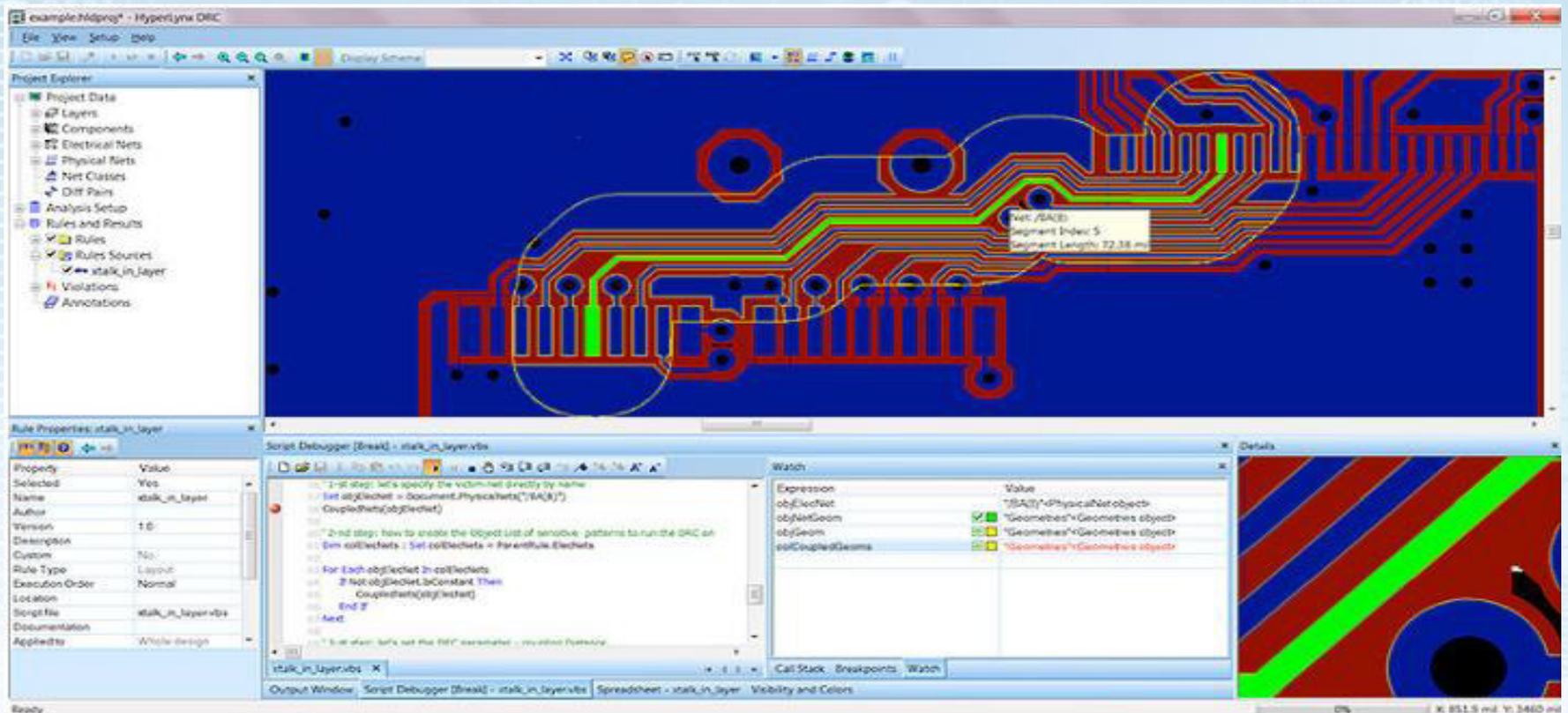
HyperLynx Thermal позволяет анализировать распределение тепла на поверхности частично или полностью разведенной печатной платы.



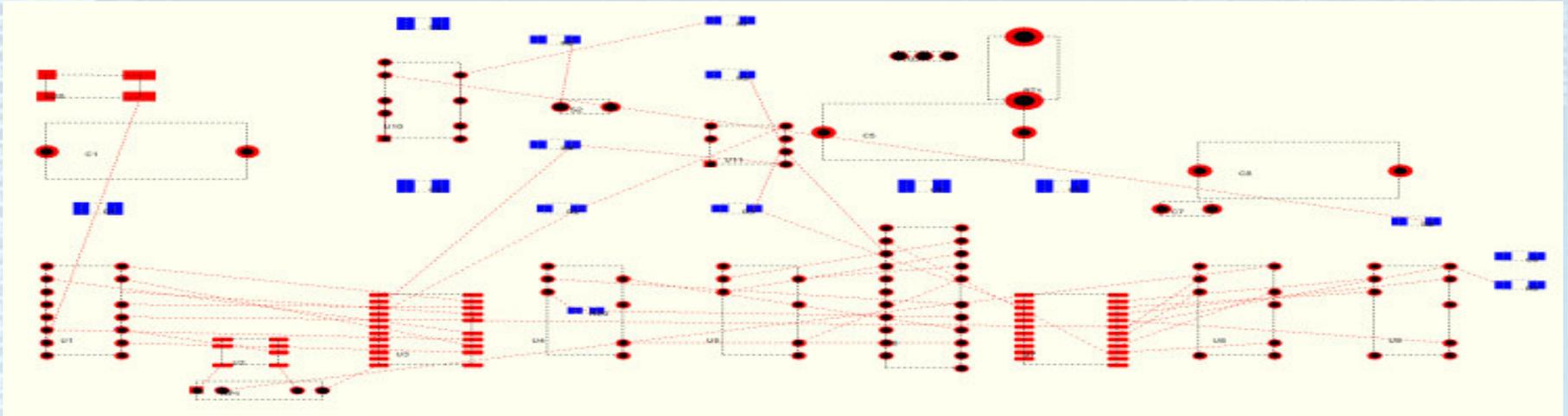
HyperLynx DRC — контроль правил проектирования

HyperLynx DRC выполняет контроль правил проектирования (DRC) печатных плат в области электромагнитных помех и совместимости EMI/EMC (Electromagnetic Interference/Electromagnetic Compatibility), целостности цепей сигналов и питания.

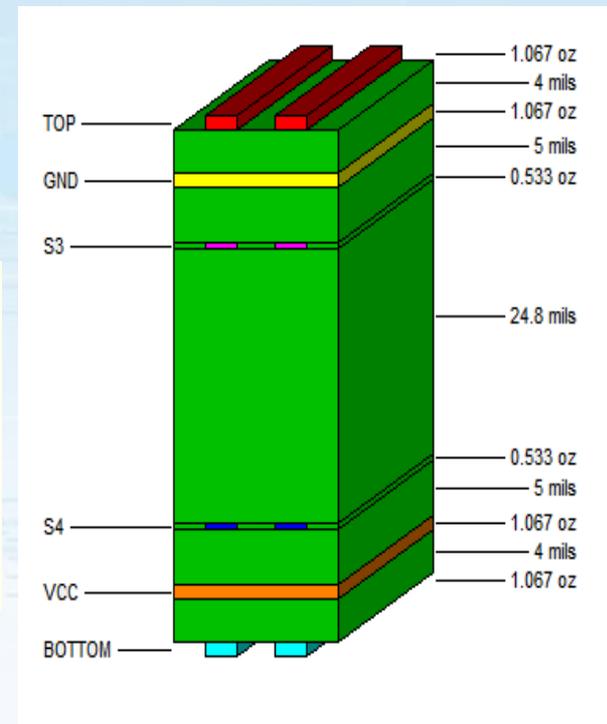
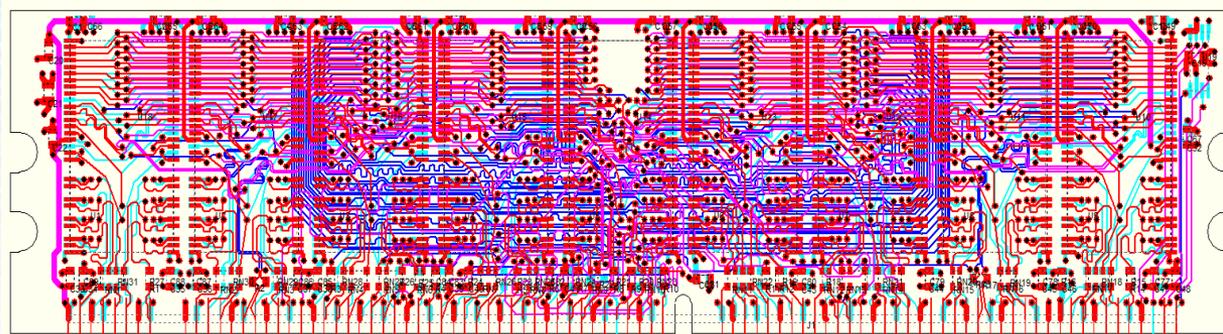
HyperLynx DRC предоставляет базовый набор проверок правил проектирования и предлагает обширные возможности по их настройке.



ПП без трассировки и с топологией



Топология ПП модуля памяти DIM - DDR SDRAM



Литература

- Конструирование высокоскоростных цифровых устройств. Начальный курс магии. Говард Джонсон, Мартин Грэхем