

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра конструирования узлов и деталей радиоэлектронной аппаратуры
(КУДР)

Е.И. Тренкаль
В.С. Поздняков
М.В. Синогин

ПЕРЕКРЕСТНЫЕ ПОМЕХИ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной
работы по дисциплине
«Конструирование быстродействующих цифровых устройств»

Томск 2026

УДК 621.37
ББК 32.844
Т66

Рецензент:
Попкович А.А., директор ООО НПК "ТАИР".

Тренкаль, Евгений Игоревич

Т66 Перекрестные помехи в высокоскоростных цифровых устройствах: методические указания к выполнению лабораторной и самостоятельной работы по дисциплине «Конструирование быстродействующих цифровых устройств» / Е.И. Тренкаль, В.С. Поздняков, М.В. Синогин. – Томск: ТУСУР, 2026. – 21 с.

Методические указания предназначены для обеспечения качественного проведения лабораторных занятий и организации самостоятельной работы студентов.

Авторами данных методических указаний являются профессорско-преподавательский состав кафедры конструирования узлов и деталей РЭА (Е.И. Тренкаль и В.С. Поздняков), а также сотрудник профильного предприятия, главный конструктор ООО "НПК "ТАИР", г. Томск, М.В. Синогин.

Одобрено на заседании каф. КУДР, протокол № 264 от 15.05.2026 г.

УДК 621.37
ББК 32.844

©Тренкаль Е.И., Поздняков В.С.,
Синогин М.В. 2026
© Томск. гос. ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2026

Оглавление

Введение	4
1 Теория и практика обеспечения таймингов в высокоскоростных цифровых устройствах	5
1.1 Применяемое оборудование.....	9
1.2 Используемые компоненты для моделирования	9
2 Порядок выполнения работы	11
Контрольные вопросы	13
Приложение А Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам	14
Приложение Б Памятка по расчету во временной области	15
Приложение В Памятка электродинамического моделирования	18

Введение

В высокоскоростных цифровых устройствах одной из наиболее сложных и трудноуловимых проблем является перекрёстная помеха (crosstalk) – нежелательное влияние сигналов одной линии передачи на сигналы соседних. По мере роста тактовых частот и сокращения длительностей фронтов эта проблема становится всё более острой, поскольку именно скорость нарастания сигнала, а не тактовая частота, является истинным драйвером высокочастотных эффектов.

При быстрых фронтах каждый элемент печатной платы взаимодействует с соседними. В этих условиях перекрёстные помехи возникают из-за паразитных связей между сигнальными трассами и могут приводить к ложным срабатываниям, сокращению шумовых запасов и полной неработоспособности устройства.

В настоящей лабораторной работе предполагается изучение влияния перекрестных помех в высокоскоростных цифровых устройствах.

1 ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТАЙМИНГОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Перекрестными помехами называют явление наведения нежелательного сигнала на соседние цепи. Причиной является связь по ближним электрическим и магнитным полям между проводниками. Связь по электрическому полю обусловлена взаимной ёмкостью проводников, связь по магнитному полю – взаимной индукцией между контурами (рисунок 1.1).

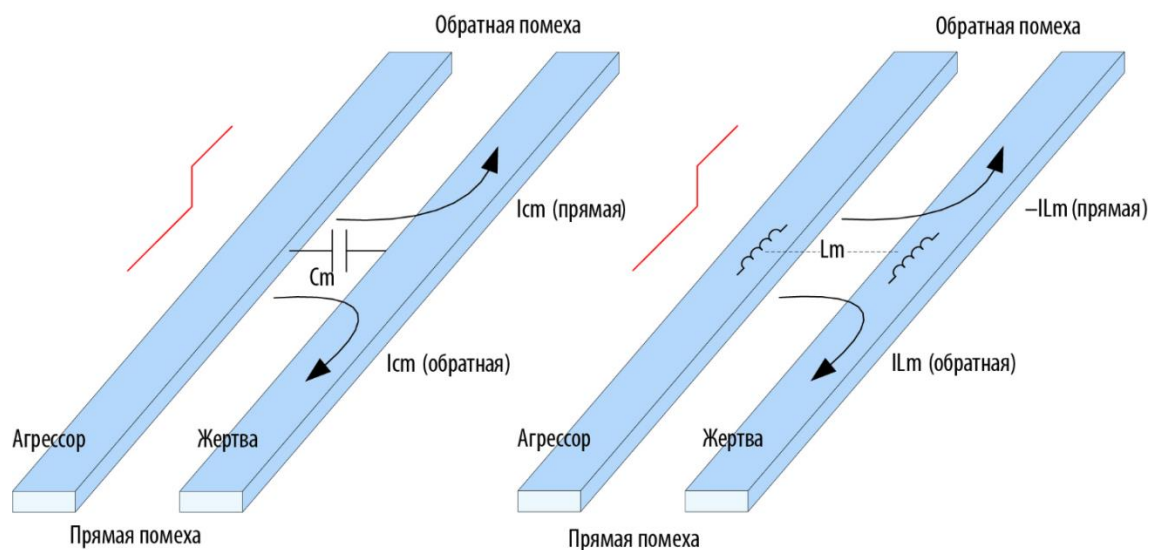


Рисунок 1.1 – Ёмкостная и индуктивная связь как источник перекрестных помех

На рисунке 1.1 показана паразитная ёмкостная связь между соседними цепями. Эта связь называется взаимной емкостной связью. Электрические поля, создаваемые напряжениями, действующими в одной цепи, воздействуют на другую цепь. С увеличением расстояния между цепями коэффициент взаимной связи быстро уменьшается. Коэффициент взаимной электрической связи двух цепей называется их взаимной емкостью и измеряется в фарадах.

Взаимная емкость C_M обуславливает появление в соседней цепи тока I_M , мгновенное значение которого пропорционально скорости изменения напряжения U . Приближенная формула оценки величины тока помехи:

$$I_M = C_M \frac{dU}{dt}.$$

Формула справедлива если: 1) ток связи через емкость значительно меньше тока основного сигнала; 2) напряжение помехи меньше (до 10%), чем напряжение основного сигнала; 3) реактивное сопротивление конденсатора превышает реактивное сопротивление соседней цепи по отношению к земле.

При заданной длительности фронта t_r сигнала помехи и импедансе соседней цепи Z_2 может быть определена перекрестная помеха (в относительных единицах):

$$\text{перекрестная помеха} = \frac{Z_2 C_M}{t_r}.$$

При моделировании цепей с несколькими источниками помех попарно оцениваются взаимные емкости всех элементов, после чего источники для каждой цепи суммируются. Например, если в схеме на ТТЛ-логике имеется пять источников помех, то при перекрестной помехе всего в 2% суммарный уровень составит 500 мВ, что превышает номинальный запас по помехозащищенности ТТЛ-логики.

Между контурами с током возникает взаимная индуктивность, измеряемая в Гн. Магнитное поле, создаваемое током, протекающим в одном из контуров, воздействует на другой контур. Взаимная связь также быстро ослабевает с увеличением расстояния.

Взаимная индуктивность L_M вызывает появление в соседней цепи помехи, мгновенное напряжение которой Y связано со скоростью изменения силы тока:

$$Y = L_M \frac{dI}{dt}.$$

Резкие изменения тока индуцируют большие напряжения. Учет взаимной индуктивной связи имеет важное значение при конструировании высокоскоростных цифровых устройств. Формула также является приближением и справедлива при выполнении условий: 1) напряжение наводимой помехи мало по сравнению с первичным сигналом; 2) ток помехи меньше тока исходного сигнала; 3) импеданс, обусловленный взаимной индуктивностью, мал по сравнению с импедансом цепи к земле, в которой

индуцируется сигнал. Помеха, вызванная взаимной индуктивной связью, может иметь противоположную полярность относительно возбуждающего сигнала.

Величина перекрестной помехи в относительных единицах также может быть оценена:

$$\text{перекрестная помеха} = \frac{L_M}{Z_2 t_r}.$$

Для нескольких источников помех суммарная помеха оценивается так же, как и для ёмкости.

В высокоскоростных цифровых схемах взаимная индуктивная связь зачастую представляет собой более серьезную проблему, чем взаимная емкостная связь.

Одним из способов снижения перекрестной помехи при разработке печатных плат является использования слоёв земли и питания. Зависимость уровня помехи между соседними дорожками от расстояния для структур с сплошной землей (рисунок 1.2) равна:

$$\text{перекрестная помеха} \approx \frac{K}{1 + (D/H)^2},$$

где K – коэффициент связи;

D – расстояние между проводниками;

H – толщина слоя печатной платы.

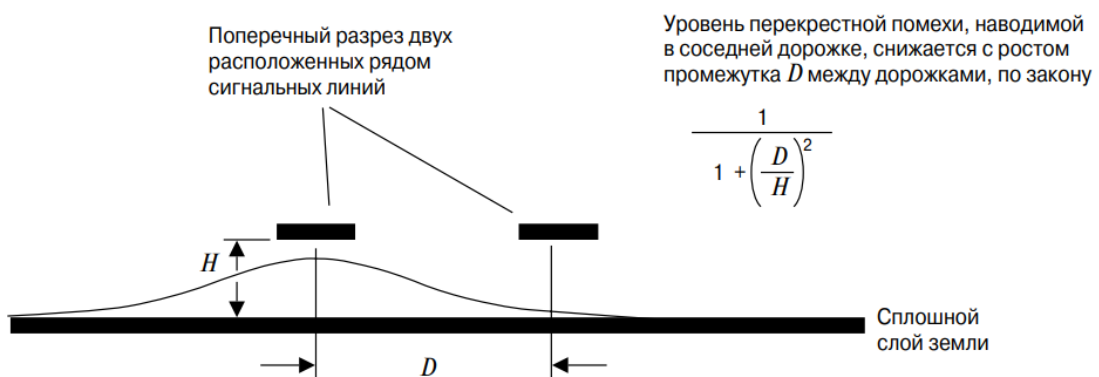


Рисунок 1.2 – Разрез слоя печатной платы

На рисунке 1.3 показана форма и уровень перекрестной помехи в

зависимости от толщины слоя печатной платы. Как видно из рисунка, уменьшением толщины слоя можно значительно уменьшить уровень перекрестной помехи. Приближение опорного слоя к сигнальной трассе снижает как взаимную индуктивность, так и взаимную ёмкость между соседними проводниками, что приводит к уменьшению перекрёстных помех.

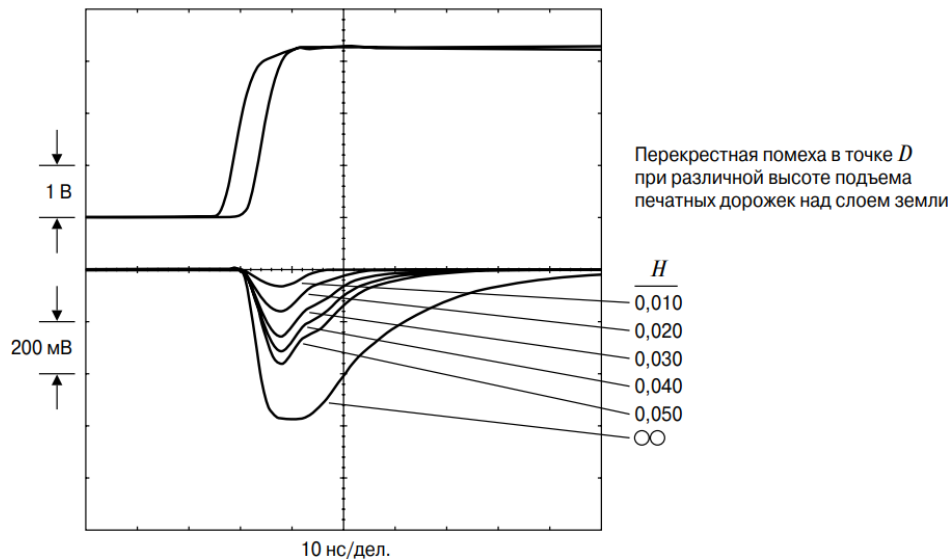


Рисунок 1.3 – Перекрестная помеха при воздействии ступенчатого входного сигнала

Далее представлены несколько правил и рекомендаций по уменьшению перекрестных помех:

- зазор между соседними дорожками должен составлять три ширины трассы для обеспечения приемлемого уровня помех.
- в условиях высокой плотности трассировки выполнение предыдущего правила может быть затруднено. В таких случаях компромиссным решением является уменьшение толщины диэлектрика между сигнальным и опорным слоем;
- выбор материала с меньшей диэлектрической проницаемостью также позволяет снизить взаимную ёмкость между трассами;
- перекрёстная помеха нарастает с увеличением длины параллельного участка проводников, поэтому важно минимизировать длину участков, где трассы идут параллельно.

Перекрестная помеха может быть оценена в частотной и временной

области. Для измерения к «активному» проводнику прикладывают возбуждающий сигнал и измеряют уровни напряжения на соседней дорожке, выражая результат как отношение амплитуды наведенного напряжения к напряжению источника. В данной лабораторной работе будет необходимо с помощью эксперимента и моделей выполнить оценку уровня перекрестных помех в соседних проводниках.

1.1 Применяемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы будет использоваться следующее оборудование:

- лабораторный макет №4 (Crosstalk), содержащий связанные линии передачи.
- генератор импульсов пикосекундной длительности. Имеет три выхода. На выходе №1 генерируется импульс Гаусса длительностью около 250 пс (по уровню 0,5); на выходе №2 – моноцикл Гаусса длительностью 450 пс; на выходе №3 – прямоугольный импульс длительностью 1,5 нс, длительностью фронтов 500 пс. В данной работе используются выходы №1 и №3.
- векторный анализатор цепей (ВАЦ);
- генератор тактового сигнала и осциллограф.

1.2 Используемые компоненты для моделирования

Для создания модели линии передачи в AWR Design Environment на схеме использовать следующие компоненты:

- для частотного анализа – PORT, для временного – источники сигнала из категории Sources->Signals древа Elements;
- для микрополосковой (внешней) линии: MLIN с подложкой MSUB, MNCLIN для моделирования связанных линий, MCURVE – для поворотов;
- для полосковой (внутренней) линии: SLIN с подложкой SSUB, SNCLIN для

моделирования связанных линий, SCURVE – для поворотов.

Поиск компонентов можно выполнять в категориях в древе Elements или по названию после вызова меню Add Circuit Element на схеме.

Построение графиков S_{11} , S_{21} : в меню Projects->Graph->New Graph->Rectangular->Linear->Port Parameters->S. Выбрать входные/выходные порты.

2 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с теоретическим материалом, представленным в разделе 1. Подготовиться к ответам на контрольные вопросы.
2. Изучить используемое в лабораторной работе оборудование и правила его использования. Ознакомиться с индивидуальным заданием.
3. Получить допуск у преподавателя к экспериментальной части лабораторной работы.
4. Выполнить измерения в частотной области на векторном анализаторе цепей (ВАЦ) с использованием лабораторного макета №4 (Crosstalk):
 - 4.1. Выполнить калибровку векторного анализатора цепей.
 - 4.2. Выполнить измерение S-параметров, связанных линии передачи согласно варианту индивидуального задания. Записать результаты измерения в комплексном представлении в файл.
5. Выполнить измерения во временной области:
 - 5.1. Подготовить к эксперименту следующее оборудование: генератор опорного тактового сигнала; генератор импульсов пикосекундной длительности; осциллограф.
 - 5.2. Выполнить измерение осциллограмм на выходах генератора импульсов. Записать результаты измерений в файл.
 - 5.3. Выполнить измерение осциллограмм, связанных линии передачи согласно варианту индивидуального задания. Записать результаты измерения в файл.
6. Выполнить обработку полученных данных в частотной и временной области в Mathcad. Оценить влияние частоты и скорости изменения сигнала на уровень перекрестной помехи.
7. В AWR Design Environment выполнить моделирование:
 - 7.1. Связанных линий во временной области согласно индивидуальному варианту. Оценить влияние длительности фронта сигнала на уровень перекрестной помехи. Варьировать величину фронта в диапазоне:

10 пс–250 пс.

7.2.Выполнить оценку влияния протяженности участка связанных линий.

7.3.Выполнить электродинамическое моделирование связанных линий.

8. Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое перекрёстная помеха?
2. Какие основные физические механизмы возникновения перекрёстных помех?
3. Как зависит величина перекрёстной помехи от скорости изменения сигнала?
4. Опишите основные рекомендации по борьбе с перекрёстными помехами.
5. Как зависит амплитуда перекрёстной помехи от зазора между проводниками?
6. Что такое векторный анализатор цепей? Калибровка векторных анализаторов цепей.
7. Как влияет длина параллельного участка проводников на уровень перекрёстной помехи?
8. Как диэлектрическая проницаемость материала подложки влияет на перекрёстные помехи?
9. Как влияет расстояние до полигона земли на перекрёстную помеху?
10. Как по S-параметрам понять уровень перекрёстной помехи?

Приложение А

Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам

Таблица А.1 – Индивидуальные требования

Вариант №	Номер ЛП из группы №1 макета	Номер ЛП из группы №2 макета	Зазор для модели, мм	Тип линии
1	1	1	0,05	Внешн.
2	2	2	0,1	Внутр.
3	3	3	0,15	Внешн.
4	4	1	0,2	Внутр.
5	1	2	0,25	Внешн.
6	2	3	0,05	Внутр.
7	3	1	0,1	Внешн.
8	4	2	0,15	Внутр.
9	1	3	0,2	Внешн.
10	2	1	0,25	Внутр.
11	3	2	0,05	Внешн.
12	4	3	0,1	Внутр.
13	1	1	0,15	Внешн.
14	2	2	0,2	Внутр.
15	3	3	0,25	Внешн.
16	4	1	0,05	Внутр.
17	1	2	0,1	Внешн.
18	2	3	0,15	Внутр.
19	3	1	0,2	Внешн.
20	4	2	0,25	Внутр.
21	1	3	0,05	Внешн.
22	2	1	0,1	Внутр.
23	3	2	0,15	Внешн.
24	4	3	0,2	Внутр.
25	1	1	0,25	Внешн.
26	2	2	0,05	Внутр.
27	3	3	0,1	Внешн.
28	4	1	0,15	Внутр.
29	1	2	0,2	Внешн.
30	2	3	0,25	Внутр.

Приложение Б

Памятка по расчету во временной области.

Анализ во временной области в AWR DE

1. Выбор источника сигнала и настройка частоты повторения сигнала

Для анализа во временной области в AWR DE доступны различные источники сигналов. Все они находятся на панели **Elements** в ветви **Sources**. Выбор конкретного типа зависит от того, какой сигнал необходимо смоделировать.

Для задания частоты повторения сигнала выбранного источника в древе проекта двойным нажатием ЛКМ щёлкните по пункту **Project Options**. В открывшемся окне перейдите на вкладку **Frequencies** и задайте параметры частотного диапазона, указав в полях **Start** и **Stop** начальную и конечную частоты, а в поле **Step** – шаг изменения частоты. Или же, если анализ производится на одной частоте, установите галочку **Single Point** и задайте нужную частоту. **Важное замечание: настройки частоты, заданные таким образом, являются глобальными, то есть используется по умолчанию для всех схем.** Задать частотные настройки для конкретной схемы можно, кликнув на неё ПКМ в древе проекта. В контекстном меню выбрать **Options**, затем перейти на вкладку **Frequencies** и снять галочку с пункта **Use project defaults**, после чего задать нужные вам настройки.

2. Создание графика

2.1. В древе проекта выберите пункт **Graphs**, и нажатием ПКМ вызовите контекстное меню, в котором выберите команду **New Graph...**

2.2. В открывшемся окне в поле **Graph name** введите название, например, Pulse gen

2.3. В области **Graph Type** выберите **Rectangular**

2.4. Нажмите **ОК**. В древе проекта появится новый график.

3. Добавление измерения

- 3.1.Щёлкните ПКМ по созданному графику и выберите команду **Add Measurements**
- 3.2.В открывшемся окне выберите тип измерения **Voltage** для этого раскройте ветвь **Nonlinear** (см. п.1 рис. Б.1).
- 3.3.В появившемся списке выберите измерение **Vtime** (см. п.2 рис. Б.1)
- 3.4.В выпадающем списке **Data Source Name** выберите имя нужной вам схемы (см. п.3 рис. Б.1)
- 3.5.В **Measurement Component** выберите из списка пробник (V_PROBE) или узел, напряжение на котором вы хотите увидеть (см. п.4 рис. Б.1).
- 3.6.Убедитесь, что в выпадающем списке **Simulator** выбран **APLAC Trans** (см. п.5 рис. Б.1).
- 3.7.После настройки нажмите **Apply**, чтобы добавить измерение, а после **ОК**, чтобы закрыть окно.

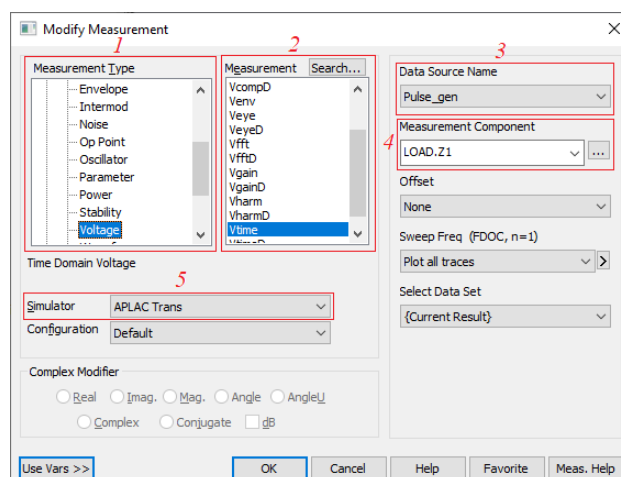


Рисунок Б.1 – Окно выбора измерения и его настройки

4. Настройка симулятора APLAC Transient

- 4.1.На панели инструментов, в верхней части окна AWR DE найдите и нажмите на кнопку **Options**. В появившемся списке выберите пункт **Default Circuit Options...**
- 4.2.В открывшемся окне перейдите на вкладку **APLAC Sim**. Перед вами появится список с настройками симулятора APLAC (см. рис Б.2.). Основные настройки задаются в пункте **Transient Options**. Для их

отображения необходимо снять галочку напротив пункта **Use HB settings**.

Stop time отвечает за общую длительность симуляции. Данное значение рекомендуется выбирать кратным нескольким периодам сигнала, чтобы переходные процессы в схеме успевали затухнуть.

Start time определяет момент времени с которого начинается отображение результатов расчёта.

Step time определяет интервал между расчётными точками. Чем меньше шаг, тем выше разрешение графика и точнее отображение крутых фронтов сигнала. Слишком большой шаг приводит к ступенчатому отображению графика и к искажениям.

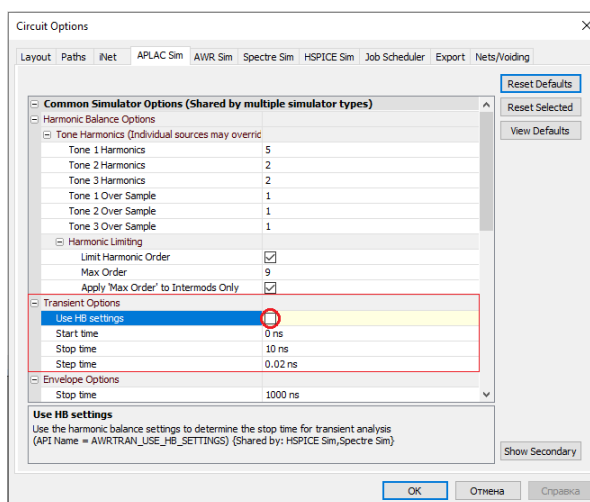


Рисунок Б.2 – Окно настройки симулятора APLAC

Приложение В

Памятка электродинамического моделирования

Для электродинамического моделирования в AWR DE ключевое значение имеет правильный выбор решателя. Большинство практических задач можно решить с помощью трех основных инструментов – AXIEM, Analyst и EMSight, каждый из которых ориентирован на свой класс структур и предлагает разный баланс между скоростью, точностью и универсальностью.

AXIEM – современный планарный решатель на основе метода моментов (MoM), предназначенный для микрополосковых и щелевых линий, фильтров, направленных ответвителей и планарных антенн. Является оптимальным для подавляющего большинства плоских многослойных структур.

Analyst – 3D-решатель на базе конечных элементов, применяемый для объёмных объектов, которые не укладываются в планарную модель: волноводные тракты, рупорные или проволочные антенны, резонаторы, разъёмы.

EMSight – это тоже планарный решатель, который сегодня в основном используется для поддержки унаследованных проектов или в специфических случаях, когда моделирование требуется в замкнутом металлическом экране. На данный момент его полностью заменяет **AXIEM**.

Для данной лабораторной работы оптимальным выбором является AXIEM.

Создать электромагнитную структуру можно двумя способами: «с нуля» в редакторе топологии или автоматически из элементов принципиальной схемы.

Создание электромагнитной структуры «с нуля»

1. Добавление новой ЕМ-структуры

1.1. В дереве проекта найдите раздел **EM Structures** и щёлкните по нему

ПКМ, в контекстном меню выберите команду **Add EM Structure....**

1.2. В открывшемся диалоге в поле **Name** введите имя структуры.

1.3. Убедитесь, что в поле **Simulator** выбран **AXIEM-Async**

1.4. Нажмите **ОК** – откроется окно редактора топологии вашей новой структуры.

2. Настройка стека подложки

2.1. В дереве проекта под ветвью созданной ЕМ-структуры двойным нажатием ЛКМ откройте раздел **Enclosure**

2.2. В открывшемся окне на вкладке **Enclosure** можно выбрать нужный вам шаг сетки, от которого зависит точность и время моделирования.

2.3. Перейдите на вкладку **Material Defs..** Она служит для определения и редактирования свойств материалов (проводников и диэлектриков), которые будут использоваться в стеке. Чтобы добавить новый материал или отредактировать существующий, используйте соответствующие кнопки (Add, Remove, Advanced).

2.4. На вкладке **Dielectric Layers** определяется последовательность и толщина диэлектрических слоёв вашей подложки. Для каждого слоя необходимо задать его имя (**Name**), материал (**Material**) и толщину (**Thickness**).

2.5. Вкладка **Materials** отвечает исключительно за физические параметры проводящих слоёв, которые будут использованы в стеке. На данной вкладке задаётся имя конкретного слоя металла (**Name**), физическая толщина проводника (**Thickness**), угол травления (**Etch Angle**) и шероховатость поверхности (**Roughness**).

2.6. Вкладка **EM Layer Mapping** определяет, как геометрические фигуры, нарисованные на слоях в макете, будут сопоставляться с физическими слоями подложки, определёнными в стеке.

2.7. На вкладке **Line Type** определяются тип линии передачи и привязка сигнального проводника к заземляющим слоям.

2.8. Вкладки **Parameters** и **Display** нужны для более тонкой настройки

процесса моделирования и управления визуальным отображением различных слоёв и материалов.

2.9. После настройки всех нужных параметров, нажмите кнопку **ОК**.

Создание электромагнитной структуры с помощью макроса

На панели инструментов в верхней части окна проекта выберите раздел **Scripts**, затем пункт **ЕМ**, после команду **Create_Stackup**. В появившемся окне выберите подложку, для которой будет создан стек с настройками ЕМ-структуры. Задайте шаг сетки и после нажмите кнопку **ОК**. На принципиальной схеме появятся два элемента **STACKUP** и **EXTRACT**. Элемент **STACKUP** используется для настройки стека и содержит все те же настройки, что были в разделе **Enclosure**. **EXTRACT** объединяет выбранные компоненты схемы в группу и автоматически формирует на их основе топологию в ЕМ-симуляторе с настройками, указанными в элементе **STACKUP**. При нажатии на элемент **EXTRACT** выбранные компоненты подсвечиваются красным цветом (рис. В.1). Если нужный компонент не подсвечен, нужно выделить его и нажать ПКМ. В появившемся меню выбрать пункт **Properties**, после чего откроется окно с настройками компонента, в данном окне перейти на вкладку **Model Options** и установить галочку **Enable** в поле **ЕМ Extraction Options**. После запуска симуляции автоматически формируется ЕМ-модель, и все результаты, представленные на графиках, будут соответствовать именно этой электромагнитной структуре, а не идеализированным схемным элементам.

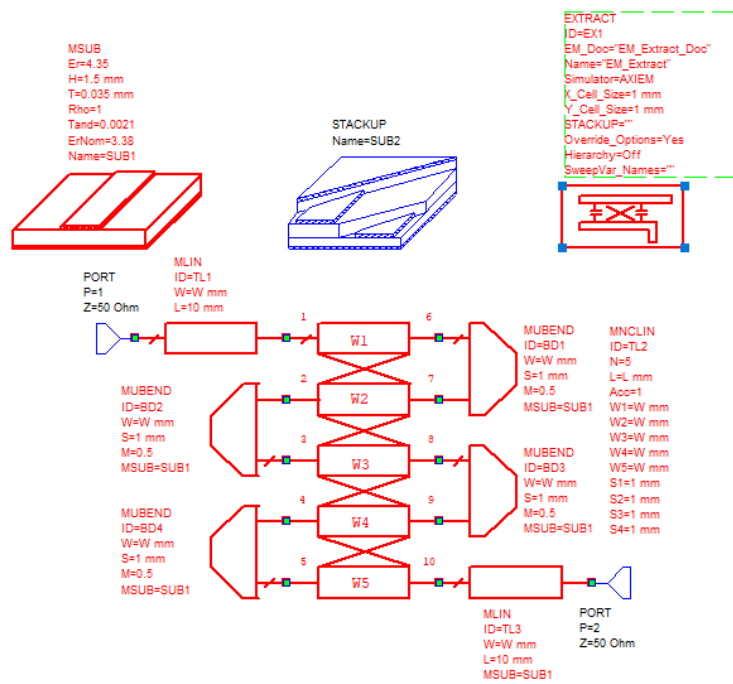


Рисунок В.1 – Выбранные компоненты для ЕМ-модели