

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

ТАЙМИНГИ 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 Тайминги 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. – 26 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	6
1.1 Топологические линий задержки	8
1.2 Применяемое оборудование.....	11
1.3 Используемые компоненты для моделирования	12
2 Порядок выполнения работы	14
Приложение А Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам	18
Приложение Б Памятка по расчету во временной области	20
Приложение В Памятка электродинамического моделирования	23

Введение

Современное развитие цифровой электроники характеризуется неуклонным повышением тактовых частот и сокращением длительностей фронтов сигналов. Одним из ключевых аспектов высокоскоростного конструирования становится обеспечение точных временных соотношений (таймингов) между сигналами. Особенно остро эта проблема проявляется в системах с синхронными шинами, распределёнными тактовыми сигналами и многоканальной передачей данных. Любое значимое рассогласование по времени приводит к неверному срабатыванию схемы – цифровые интерфейсы, операции чтения, записи, вычисления перестают срабатывать в нужный момент.

Типичное рассмотрение задач тайминга ассоциируется с выбором элементной базы, логическим проектированием и задержкой сигнала в межсоединениях печатной платы. Проектировщик часто может видеть только малую часть всех факторов, которые нарушают временные соотношения в системе. Задержки распространения сигналов в линиях передачи, разброс параметров элементов, перекрёстные помехи и частотная дисперсия – всё это вносит вклад в неопределённость временных положений сигналов (так называемую *расфазировку*).

Для компенсации этих эффектов применяются различные методы выравнивания таймингов: регулируемые элементы задержки на логических вентилях, сосредоточенные LC-цепи, специализированные тактовые буферы и схемы фазовой подстройки, чаще – топологические элементы в виде линии задержки. Каждый из способов имеет свою область применения, преимущества и недостатки.

В настоящей лабораторной работе предполагается комплексное изучение вопроса таймингов в высокоскоростных цифровых устройствах. Результатом работы должно стать формирование у обучающихся целостного представления о том, как физическая топология, свойства материалов и

методы выравнивания задержек влияют на надёжность высокоскоростных цифровых систем.

1 ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТАЙМИНГОВ В ВЫСОКОСКОРОСТНЫХ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВАХ

Как известно, сигнал в печатных платах распространяется с конечной скоростью. В отличие от идеализированной модели цифровых схем, где логические переходы считаются мгновенными, в реальных физических средах электромагнитная волна требует конечного времени для прохождения расстояния от передатчика к приёмнику.

Скорость распространения v определяется диэлектрической ϵ_r и магнитной проницаемостью μ_r материалов:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \epsilon_r \mu_0 \mu_r}},$$

где $\epsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м – электрическая постоянная;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная.

В задаче проектирования печатных плат в большинстве случаев $\mu_r = 1$. Если вокруг линии передачи расположены несколько диэлектриков с различными значениями ϵ_r , их характеризуют эффективной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{r \text{эфф}}$ (ϵ_{reff}). Тогда скорость распространения сигнала может быть определена:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{r \text{эфф}}}},$$

где $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитной волны в вакууме.

Для внешних слоёв печатной платы при использовании классического материала FR-4 задержка распространения τ будет составлять около 5,3 пс/мм. Соответственно, для линии передачи длиной $L = 5$ см общая задержка составит около 260 пс. Для низкочастотных схем, работающих на частотах менее 100 МГц, эта задержка остаётся незаметной: менее 2,6% от одного периода тактового сигнала и 10–25% от длительности фронта t_r при $f = 100$ МГц.

В качестве критерия «значительности» часто используют термин «сосредоточенный» элемент тракта. Если выполняется условие:

$$L < \frac{1}{6} \cdot \frac{t_r}{\tau},$$

то считается, что длина линии слишком мала относительно сигнала, эффектами в линии, включая задержку, можно пренебречь.

При повышении тактовой частоты свыше 100 МГц длительность фронтов заметно снижается, ситуация кардинально меняется. Для тактовой частоты 3 000 МГц (уже обыденность для цифровых систем) задержка в линии длиной $L = 5$ см уже сравнима с периодом сигнала.

На практике это приводит к следующим проблемам:

- сбои при чтении/записи памяти (неправильная выборка данных по фронту тактового сигнала);
- потеря синхронизации в последовательных интерфейсах;
- уменьшения временного запаса (timing margin) до значений ниже допустимых, что влечет к нестабильности и чувствительности к любым изменениям: температуры, напряжения или разбросу параметров компонентов.

Для обеспечения корректной работы высокоскоростных цифровых устройств применяется ряд методов, позволяющих согласовать времена прихода сигналов к различным приёмникам и обеспечить требуемые фазовые соотношения.

Основные из них:

- дискретные элементы задержки и активные регулируемые элементы – цепи на основе LC-фильтров или специальных микросхем с фиксированной или программируемой задержкой, буферы с управляемой задержкой. Обеспечивают более стабильный результат, но занимают площадь, вносят дополнительные потери, повышают стоимость устройства. Например, программируемая линии задержки Microchip Technology Inc. SY100EP195V позволяет настроить задержку от 2,1 нс до 10,8 нс с шагом 10 пс.

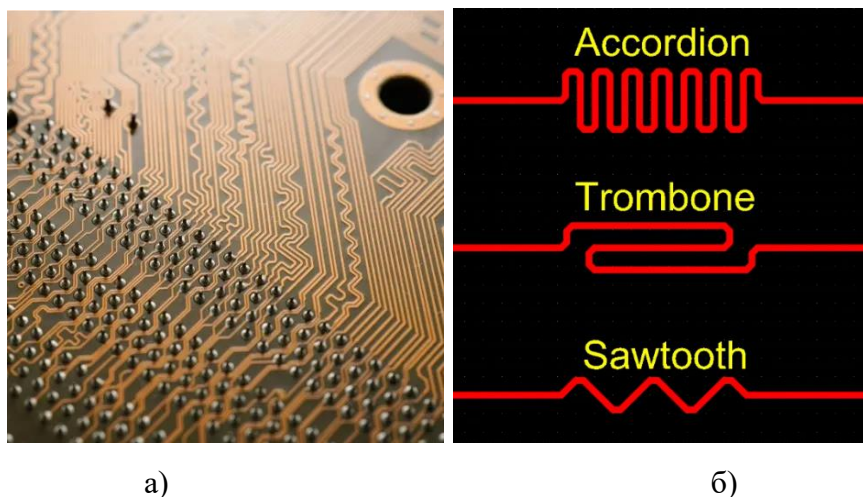
– топологические линии задержки (меандры) – удлинение сигнальной дорожки путём её зигзагообразной трассировки. Простой и дешёвый метод, однако, при малых зазорах между параллельными сегментами возникают ёмкостная и индуктивная связи, которые не только изменяют эффективную задержку, но и вносят искажения в форму сигнала. Этот подход широко применяется для шин памяти (DDR) и высокоскоростных параллельных интерфейсов, однако требует тщательного контроля волнового сопротивления и минимизации паразитных связей.

Каждый из перечисленных методов имеет свою область применения, достоинства и ограничения. Выбор конкретного способа определяется требуемой точностью, допустимой стоимостью, доступной площадью и частотным диапазоном.

1.1 Топологические линий задержки

Меандровая линия задержки представляет собой топологический элемент, формируемый на печатной плате путём зигзагообразной трассировки сигнального проводника. Основное назначение такого элемента – внесение дополнительной задержки распространения сигнала для выравнивания таймингов в многоканальных или многосинхронных системах, согласования длин трасс в параллельных интерфейсах. Такой тип линий повсеместно практикуется при разработке высокоскоростных печатных плат (рисунок 1.1а).

Автоматизированное проектирование таких элементов реализовано во многих современных САПР, например, Altium Designer, Cadence Allegro и др. Встроенный функционал предоставляет возможность динамической оптимизации и управления длинами цепей. Как правильно, доступны три варианта шаблонов: Accordion, Trombone и Sawtooth (рисунок 1.1, б). В текущей работе будут использованы первые два варианта шаблона.



а) – Фотография фрагмента печатной платы с коррекцией таймингов;
 б) – Стили шаблонов для подстройки таймингов в Altium Designer

Рисунок 1.1 – Примеры меандровых линий

В рамках данной лабораторной работы для формирования комплексного понимания физических основ реализация и анализ линий задержек будет выполнена «вручную». Параметры и эффекты, которые должны быть рассмотрены и учтены при проектировании:

1) Волновое сопротивление Z_0 . Для корректной передачи высокоскоростных сигналов необходимо обеспечить постоянство импеданса по всей длине трассы, включая изогнутые участки меандра. Любое отклонение приводит к отражениям сигнала, ухудшению целостности и дополнительным временным искажениям, что сказывается на коэффициентах S_{11} и S_{21} . Основная сложность – в отличие от простой прямой трассы, зигзагообразная топология вносит дополнительные паразитные эффекты, связанные с взаимодействием соседних сегментов проводника. При малых зазорах между параллельными участками меандра возникает ёмкостная и индуктивная связь, которая не только снижает волновое сопротивление, но и искажает форму передаваемого сигнала, внося перекрёстные помехи. Расчет Z_0 может быть выполнен с применением утилиты TXLine. Для микрополосковой линии расчет волнового сопротивления может быть выполнен по приближенной формуле:

$$Z_0 \approx \frac{87}{\sqrt{\varepsilon_r + 1,41}} \ln \left(\frac{5,98h}{0,8w+t} \right),$$

где h – толщина подложки;

w – ширина проводника;

t – толщина проводника.

Расчет для полосковой линии:

$$Z_0 \approx \frac{60}{\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \left[\frac{4h}{0,67\pi(0,8w+t)} \right].$$

Корректность расчета может быть верифицирована по модулю коэффициента отражения S_{11} , который для согласованной линии передачи должен стремиться к $-\infty$ дБ;

2) Эффективная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_{r \text{ эфф}}$. Для микрополосковой линии электромагнитное поле частично проходит через воздух, частично – через материал подложки. Эффективная диэлектрическая проницаемость для микрополоска всегда меньше относительной диэлектрической проницаемости материала и может быть приближённо оценена как:

$$\varepsilon_{r \text{ эфф}} = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r + 1}{2} \cdot \left(1 + 12 \frac{h}{w} \right)^{-1/2}.$$

Полосковая линия находится во внутреннем слое печатной платы и полностью окружена диэлектриком. Если диэлектрик однородный, то $\varepsilon_{r \text{ эфф}} = \varepsilon_r$. Для неоднородного диэлектрика $\varepsilon_{r \text{ эфф}}$ в упрощенном случае рассчитывается как средневзвешенная величина, зависящая от проницаемости и толщины всех слоев, в уточненном – применяют аналитические методы, такие как метод конформных отображений и метод частичных ёмкостей.

3) Реальное значение ε_r материалов (в особенности FR-4) может существенно отличаться от типового значения 4,5 (на 10 % и более). Кроме того, значение на высоких частотах может заметно отличаться от значения на низких частотах. Данный эффект называется дисперсией. Он проявляется на

характеристике группового времени запаздывания (ГВЗ), описанного далее. Это необходимо учитывать при проектировании, особенно при работе с высокими частотами.

4) При прохождении сигнала через изгиб (поворот) трассы (рисунок 1.2) происходит локальное изменение эффективной ширины проводника, что приводит к увеличению сопротивления и паразитной ёмкости в области угла. Этот эффект создаёт отражения и искажения сигнала (S_{11} увеличивается, затухание снижается). Для минимизации искажений применяются либо скругление, либо скос углов под 45° (обычно по уровню 57%), что обеспечивает точную подстройку ёмкости в области изгиба для сохранения заданного Z_0 .



Рисунок 1.2 – Типы применяемых поворотов линий передачи

5) Для меандровых линий критически важно выдерживать достаточное расстояние между соседними параллельными сегментами. При сближении проводников возрастает ёмкостная и индуктивная связь, что снижает эффективное волновое сопротивление и увеличивает перекрёстные помехи. Данный эффект следует проанализировать при выполнении текущей лабораторной работы.

1.2 Применяемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы будет использоваться следующее оборудование:

– лабораторный макет №1 (Timing), содержащий линии передачи, распределенные по трём группам: группа №1 – прямые линии передачи;

группа №2 – меандровые линии передачи; группа №3 – составная линия 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.

1.3 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.

ГВЗ $\tau_g(f)$ характеризует временную задержку сигнала при прохождении через передающую цепь. Значение задержки зависит от частоты. При равномерной $\tau_g(f)$ во всей полосе частот для идеальной линии передачи форма сигнала не претерпевает изменений, при наличии дисперсии сигнал «распадается» – отдельные составляющие приходят на выход цепи в разные моменты времени. Построение ГВЗ: в меню Projects->Graph->New Graph-

>Rectangular->Linear->GD. Для построения ГВЗ выбираются два разных порта.

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 №1 (Timing):
 - 4.1. Выполнить калибровку векторного анализатора цепей.
 - 4.1.1. Выполнить измерение S-параметров линии передачи (далее ЛП) согласно варианту индивидуального задания (группа ЛП №1 макета). Записать результаты измерения в комплексном представлении в файл.
 - 4.1.2. Выполнить измерение S-параметров ЛП с формой в виде меандра (далее ЛПМ) №6 и №7 (группа ЛП №2 макета). 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 одновременное измерение двух осциллограмм: на выходе генератора импульсов (выход №1, далее Γ_B) и на тактовом выходе (выход №3, далее Γ_T). Записать результаты измерений в файл. Определить относительную задержку сигналов на выходах.
 - 5.3. Подключить Γ_B к ЛП из группы №1 согласно индивидуальному варианту. Выполнить одновременное измерение двух осциллограмм: на выходе ЛП и Γ_T . Выполнить аналогичные измерения для другой ЛП из группы №1. Записать результаты измерений в файлы. Определить

- относительную задержку сигналов на выходах. По двум измерениям ЛП вычислить задержку сигнала в разъемах. Вычислить время распространения сигнала в ЛП, учитывая задержку сигнала в разъемах. Определить эффективную диэлектрическую проницаемость микрополосковой ЛП. Рассчитать относительную диэлектрическую проницаемость основания печатного узла лабораторного макета.
- 5.4. Выполнить аналогичные измерения для двух ЛПМ из группы №2. Определить относительную задержку сигналов на выходах.
- 5.5. На основе полученных данных выполнить расчет требуемой длины ЛП для обеспечения задержки согласно варианту индивидуального задания.
6. С использованием перемычек на ЛПМ (группа ЛП №3 макета), основываясь на указанных на макете значениях длин сегментов, задать рассчитанную задержку.
7. Выполнить измерения полученной ЛП в частотной и временной области. Записать результаты измерений в файлы.
8. В AWR Design Environment выполнить моделирование:
- 8.1. Прямой ЛП без изгибов без учета требований по габаритным ограничениям. Для задания модели использовать параметры, полученные на предыдущих шагах и в индивидуальном задании. Рассчитать S_{11} , S_{21} , ГВЗ. Обеспечить соответствие требованиям индивидуального задания. Выполнить моделирование во временной области (подробнее в приложении Б). Построить осциллограмму для прямоугольного сигнала с длительностью фронтов 50 пс (средняя длительность фронтов тактового сигнала частотой 5 ГГц).
- 8.2. ЛПМ с изгибами, учитывая габаритные ограничения. Величина зазора между соседними линиями должна составлять 5 мм, 3 мм, 1 мм, 0,1 мм. Для каждого из вариантов рассчитать и выполнить анализ S_{11} , S_{21} , ГВЗ. Выполнить моделирование во временной области с параметрами, обозначенными ранее.

9. Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое линия передачи?
2. Что такое волновое сопротивление?
3. Чему равна скорость распространения электромагнитного сигнала в свободном пространстве? В диэлектрической среде? В неоднородной среде? Какие параметры диэлектрической среды определяют скорость распространения электромагнитного сигнала?
4. Опишите модель идеальной линии передачи.
5. Опишите модель линии передачи с потерями. Какие механизмы обуславливают потери в линии передачи?
6. Что такое векторный анализатор цепей? Калибровка векторных анализаторов цепей.
7. Что такое спектр сигнала?
8. Как связан спектр сигнала с его временной формой?
9. Что такое S-параметры? Амплитуда и фаза сигнала, комплексное представление. Получение амплитуды и фазы из комплексного представления. Единицы измерения амплитуды и фазы.
10. Что такое полная фаза? Что такое ГВЗ?

Приложение А

Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам

Структура многослойной печатной платы (МПП) представлена на рисунке А.1.

Материалы	Слой	Толщина	Тип слоя
Маска защитная RS-2000 ROHS	Маска Top	0,11	Слой маски
Медная фольга	Верхний слой (Top)	0,02	Сигнальный слой
Core R04350B		0,25	Слой диэлектрика
Медная фольга	Слой 1 (INT1)	0,02	Сигнальный слой
PP R04450F		0,11	Слой диэлектрика
Медная фольга	Слой 2 (INT2)	0,02	Сигнальный слой
Core IT-180A		0,45	Слой диэлектрика
Медная фольга	Слой 3 (INT3)	0,02	Сигнальный слой
PP R04450F		0,19	Слой диэлектрика
Медная фольга	Слой 4 (INT4)	0,02	Сигнальный слой
Core IT-180A		0,25	Слой диэлектрика
Медная фольга	Нижний слой (Bottom)	0,02	Сигнальный слой
Маска защитная RS-2000 ROHS	Маска Bottom	0,18	Solder Mask
Общая толщина: 1,65			

Рисунок А.1 – Структура МПП

Общие требования:

- полоса частот: 0 – 6 ГГц;
- допуск задержки: ± 50 пс;
- неравномерность ГВЗ, не более: 50 пс;
- возвратные потери, не более: –20 дБ;
- затухание, не более: –1 дБ;
- размер площадки, не более: 30 x 30 мм.

Таблица А.1 – Индивидуальные требования

Вариант №	Номер ЛП из группы №1 макета	Слой проектируемой ЛПМ	Волновое сопротивление, Ом	Тип линии
1	1	1	25	Accordion
2	2	2	50	Accordion
3	3	3	75	Accordion
4	4	4	100	Accordion
5	5	5	25	Accordion
6	1	6	50	Accordion
7	2	1	75	Accordion
8	3	2	100	Accordion
9	4	3	25	Accordion
10	5	4	50	Trombone
11	1	5	75	Trombone
12	2	6	100	Trombone
13	3	1	25	Trombone
14	4	2	50	Trombone
15	5	3	75	Trombone
16	1	4	100	Trombone
17	2	5	25	Trombone
18	3	6	50	Trombone
19	4	1	75	Accordion
20	5	2	100	Accordion
21	1	3	25	Accordion
22	2	4	50	Accordion
23	3	5	75	Accordion
24	4	6	100	Accordion
25	5	1	25	Accordion
26	1	2	50	Accordion
27	2	3	75	Accordion
28	3	4	100	Trombone
29	4	5	25	Trombone
30	5	6	50	Trombone

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 **OK**. 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.

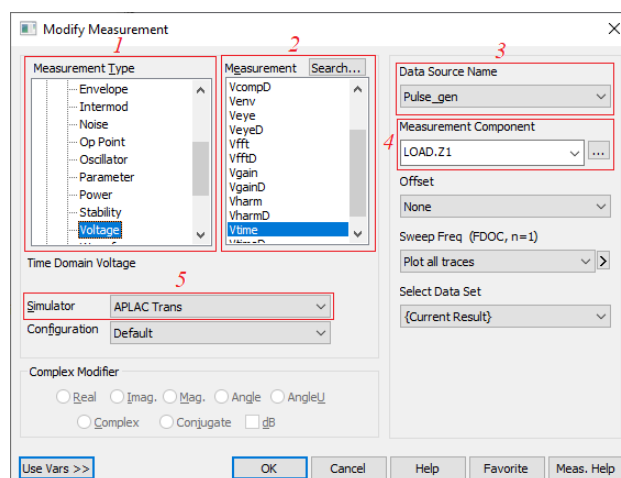


Рисунок Б.1 – Окно выбора измерения и его настройки

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.

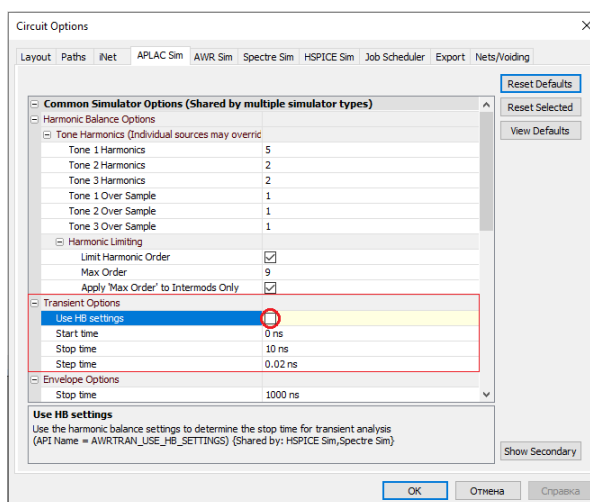


Рисунок Б.2 – Окно настройки симулятора APLAC

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.

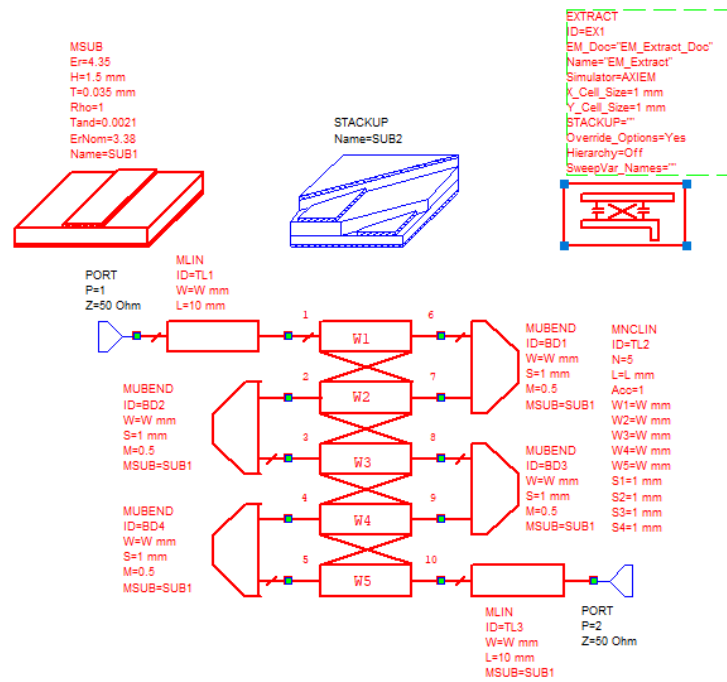


Рисунок В.1 – Выбранные компоненты для ЕМ-модели