

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

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

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 Влияние паразитных параметров компонентов на высоких частотах: 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. – 18 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 Сопротивление и эквивалентные схемы компонентов	5
1.1 Эквивалентные схемы реальных компонентов.....	7
1.2 Применяемое оборудование.....	10
1.3 Используемые компоненты для моделирования	11
2 Порядок выполнения работы	12
Контрольные вопросы	14
Приложение А Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам	15
Приложение Б Анализ во временной области в AWR DE.....	16

Введение

На низких частотах все электронные компоненты ведут себя в соответствии со своими идеализированными моделями: резистор имеет постоянное сопротивление, конденсатор – ёмкость, катушка индуктивности – индуктивность. Однако по мере роста у компонентов начинают проявляться паразитные свойства, которые кардинально меняют их поведение и могут привести к непредсказуемой работе устройства. Причина этого явления кроется в том, что любой реальный компонент представляет собой сложную структуру с распределёнными параметрами, и на высоких частотах его паразитные реактивности начинают доминировать над основным номиналом. Это явление лежит в основе многих проблем целостности сигналов, с которыми сталкиваются разработчики высокоскоростных цифровых устройств.

Одной из задач проектирования высокоскоростных печатных плат является учет полного сопротивления каждого из элементов, влияющих на целостность сигнала. Уточнение выполняется через эквивалентные электрические схемы. Часть передовых производителей электронных компонентов предоставляют уже готовые библиотеки (SPICE-модели) собственных компонентов, в которые включены их паразитные составляющие.

В рамках лабораторной работы студентам предлагается экспериментально и с помощью моделирования исследовать проявление паразитных свойств компонентов.

1 СОПРОТИВЛЕНИЕ И ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ СХЕМЫ КОМПОНЕНТОВ

При работе с базовыми реальными компонентами (резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности) разработчикам приходится учитывать их мощность, отклонение от номиналов, эффекты при изменениях температуры. В технике СВЧ к этому ряду добавляется необходимость учета полного сопротивления. Электрофизические свойства любого компонента проявляются в виде трех составляющих: сопротивления, ёмкости и индуктивности.

Для каждого из базовых элементов может быть определена зависимость напряжения U и тока I через их импеданс Z .

Сопротивление идеальных компонентов во временной области.

Для идеального резистора полное сопротивление будет равно:

$$Z_R = \frac{U}{I} = R,$$

где R – сопротивление резистора, Ом.

Ряд выражений, характеризующих свойства и сопротивление идеального конденсатора:

$$C = \frac{Q}{U},$$

$$I = \frac{dQ}{dt},$$

$$Z_C = \frac{U}{C(dU / dt)},$$

где C – ёмкость конденсатора, Ф;

Q – заряд между пластинами, Кл.

При отсутствии изменения напряжения (т.е. при постоянном токе) сопротивление стремится к бесконечности. При изменении напряжения конденсатор ведет себя так, как будто через него протекает ток. Полное сопротивление зависит от формы напряжения на нём. При высокой крутизне

напряжения его полное сопротивление мало.

Для идеальной катушки индуктивности:

$$U = L \frac{dI}{dt},$$
$$Z_L = \frac{L(dI / dt)}{I},$$

где L – индуктивность катушки, Гн.

Большое значение индуктивности означает, что малое изменение тока формирует большое напряжение на индуктивности. Для постоянного тока сопротивление катушки равно нулю.

Сопротивление идеальных компонентов в частотной области

В частотной области описание идеального компонента рассматривается при воздействии синусоидального сигнала, описываемого через три параметра: частоту f (Гц), амплитуду A (В), фазу φ (радианы). Все базовые элементы цепи – линейные устройства. Это означает, что при воздействии на них синусоидального сигнала не возникает новых частотных составляющих. Соответственно, в результате воздействия может измениться только пара параметров: амплитуда и фаза. Оба параметра описываются в частотной области через комплексную плоскость.

Сопротивление идеального резистора в частотной области:

$$U = I_0 \sin(\omega t),$$
$$Z_R = \frac{U}{I} = \frac{I_0 \sin(\omega t) R}{I_0 \sin(\omega t)} = R,$$

где $\omega = 2\pi f$, рад/с.

Для идеального резистора полное сопротивление не зависит от частоты, сдвиг фаз равен нулю.

Идеальный конденсатор:

$$I = C \frac{d[U_0 \sin(\omega t)]}{dt} = C\omega U_0 \cos(\omega t),$$

$$Z_C = \frac{U_0 \sin(\omega t)}{C \omega U_0 \cos(\omega t)} = \frac{1}{\omega C} \frac{\sin(\omega t)}{\cos(\omega t)}.$$

Ток расчет с частотой, полное сопротивление уменьшается. Сдвиг фаз напряжения и тока равен -90° , или $-j$ в комплексном виде. Пример: для $f = 1$ ГГц сопротивление конденсатора ёмкостью 10 нФ будет равен $\sim 0,016$ Ом.

Идеальная индуктивность:

$$U = L \frac{d[I_0 \sin(\omega t)]}{dt} = L \omega I_0 \cos(\omega t),$$

$$Z_L = \frac{L \omega I_0 \cos(\omega t)}{I_0 \sin(\omega t)} = \omega L \frac{\cos(\omega t)}{\sin(\omega t)}.$$

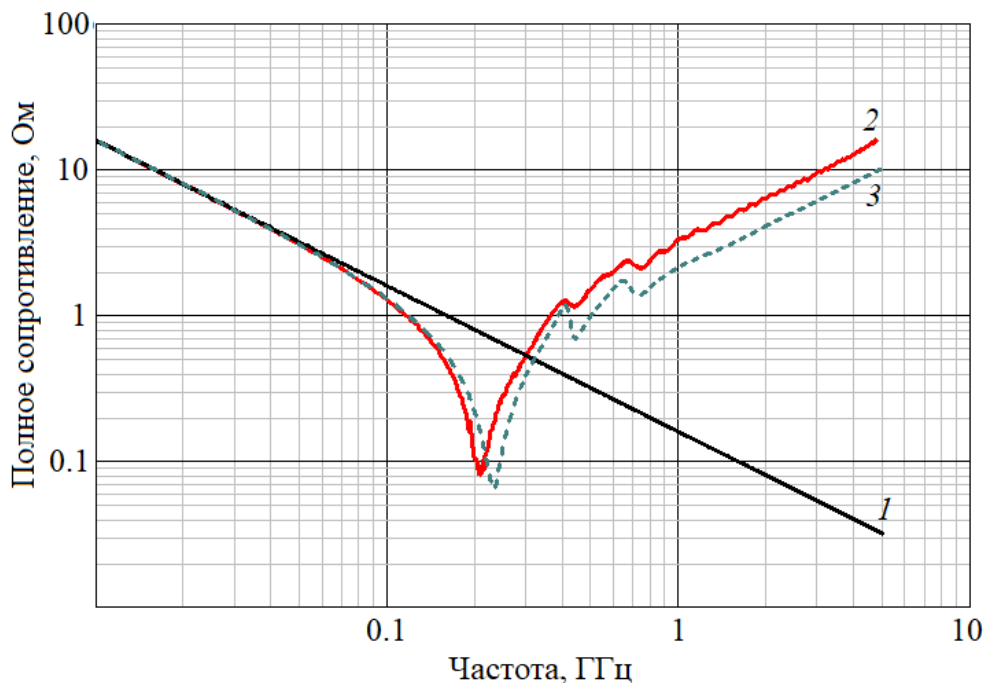
Модуль полного сопротивления растет с частотой, разность фаз напряжения и тока равна $+90^\circ$, $+j$ в комплексном виде. Пример: для $f = 1$ ГГц сопротивление катушки индуктивности со значением 2 нГн будет равно 12 Ом.

1.1 Эквивалентные схемы реальных компонентов

Как было сказано ранее, электрофизические свойства реальных компонентов определяют их параметры через три составляющие: сопротивление, ёмкость и индуктивность. Любые компоненты имеют индуктивность выводов, межвыводную ёмкость, внутреннее сопротивление. Рассмотренное выше значение индуктивности является близкой величиной к индуктивности выводов SMD-компонентов. Т.е. используя на частоте 1 ГГц конденсатор типоразмера 0805 его сопротивление будет в большей степени индуктивное, чем ёмкостное (12 Ом против 16 мОм соответственно).

Для учета этих влияний используют эквивалентные схемы. Для каждой модели необходимо иметь ввиду её область применения и адекватность для текущего рассматриваемого случая. Для низких частот применяют идеальные модели компонентов, или модели первого порядка. Для диапазона СВЧ – модели второго порядка, учитывающие остальные параметры. Пример

результатов измерений в диапазоне 0,01–5 ГГц конденсатора ёмкостью 1 нФ в сравнении с моделью первого и второго порядка представлен на рисунке 1.1. Видно, что модель первого порядка остается приемлемой только до частоты 70 МГц.



1 – модель первого порядка; 2 – модель второго порядка; 3 – экспериментальные результаты

Рисунок 1.1 – Сравнение результатов моделирования конденсатора с экспериментальными данными

На рисунке 1.2 представлены модели первого и второго порядка для резисторов, конденсаторов и катушек индуктивности. Примечателен резонанс, обусловленный сменой характера сопротивления с ёмкостного на индуктивный. Частота резонанса для цепей, содержащих ёмкость и индуктивность, может быть рассчитана из формулы Томсона по выражению:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

Следует иметь ввиду, что существуют и используются не только представленные схемы замещения.

При использовании моделей более высоких порядков импеданс может быть рассчитан с использованием стандартного аппарата теории цепей для

последовательного и параллельного включения сопротивлений.

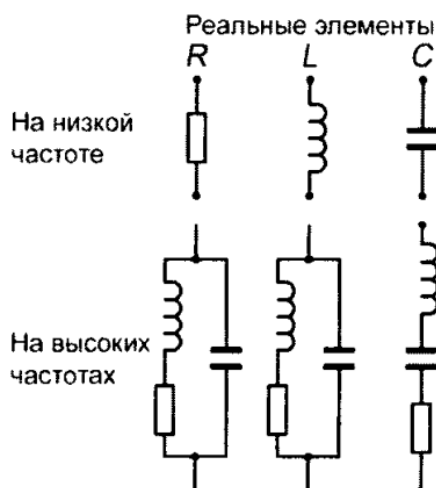


Рисунок 1.2 – Простейшие модели компонентов на низких и высоких частотах

Типичные значения индуктивности выводов для компонентов представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Ориентировочные значения паразитной индуктивности выводов компонентов

Тип корпуса	Индуктивность выводов, нГн
Выводной	2–10 нГн
1206	0,9–1,2
0805	0,7–1,0
0603	0,4–0,6
0402	0,2–0,4

Паразитная индуктивность может быть обусловлена не только выводами компонента или микросхемы, но и внутренним строением, как это происходит, например, у электролитических конденсаторов. В таблице 1.2 представлена информация об индуктивности конденсаторов в зависимости от их типа.

Таблица 1.2 – Ориентировочные значения паразитной индуктивности конденсаторов

Тип конденсатора	Паразитная индуктивность (ESL), нГн
Алюминиевые электролитические	5–30, зависит от габаритов
Алюминиевые полимерные SMD	3–6
Танталовые SMD	2–5
Керамические SMD, MLCC (0402–1206)	По таблице 1.1

В текущей лабораторной работе будет необходимо выполнить измерение S-параметров SMD и выводных компонентов, определить их паразитные параметры, экспериментально определить их влияние на форму сигналов. Второй частью работы является моделирование с созданием эквивалентных моделей компонентов 1-го и 2-го порядка и их сравнение с SPICE-моделями, предоставляемыми производителями компонентов.

1.2 Применяемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы будет использоваться следующее оборудование:

- лабораторный макет №2 (Components), содержащий линии передачи с установленными компонентами различных видов: резисторами, конденсаторами, катушками индуктивности;
- векторный анализатор цепей (ВАЦ), набор для калибровки, нагрузки;
- 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.

– 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 компонентов: RES – сопротивление, CAP – ёмкость, IND – индуктивность, SPICE-модели (Netlists) производителей;

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 №2 (Components):
 - 4.1. Выполнить калибровку векторного анализатора цепей.
 - 4.2. Выполнить измерение S-параметров всех линий передачи, содержащих компоненты 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; делитель мощности; осциллограф.
 - 5.2. Подключить выход №1 ко входу делителя мощности. Первый выход делителя мощности подключить ко входам линий передачи согласно варианту индивидуального задания, второй – ко входу осциллографа для регистрации отраженного сигнала. Выходы линий передачи подключить ко второму входу осциллографа. Выполнить одновременное измерение двух осциллограмм для каждой линии, записать результаты измерений в файл.
6. В AWR Design Environment выполнить моделирование:
 - 6.1. Добавить и вывести результаты измерений в AWR DE. Используя формулу Томсона вычислить значения паразитных параметров измеренных компонентов;
 - 6.2. Разработать модели 1-го для измеренных компонентов. Выполнить

сравнение с экспериментальными данными во временной и частотной области.

6.3. Разработать модель 2-го порядка. Сравнить результаты с результатами, полученными ранее;

6.4. Заменить модель 2-го порядка SMD-компонентов на SPICE-модели от производителя. Сравнить результаты с результатами, полученными ранее.

7. Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое импеданс?
2. Чем обусловлена разница характеристик сопротивления идеальных и реальных компонентов?
3. В чем разница между моделями компонентов 1-го и 2-го порядка?
4. Изобразите модель второго порядка для резистора. Чем физически обусловлено наличие индуктивности и ёмкости?
5. Изобразите модель второго порядка для катушки индуктивности. Чем физически обусловлено наличие сопротивления и ёмкости?
6. Изобразите модель второго порядка для конденсатора. Чем физически обусловлено наличие сопротивления и индуктивности?
7. Что описывает формула Томсона?
8. Чему равно сопротивление идеального конденсатора на постоянном токе? Сопротивление идеальной катушки индуктивности?
9. На какой частоте будет расположен резонанс для конденсатора ёмкостью 1 нФ и индуктивностью выводов 1 нГн?
10. У каких типоразмеров индуктивность выводов выше, 1206 или 0603?
11. Что такое векторный анализатор цепей? Калибровка векторных анализаторов цепей.
12. Что такое S-параметры? Амплитуда и фаза сигнала, комплексное представление. Получение амплитуды и фазы из комплексного представления. Единицы измерения амплитуды и фазы.
13. Что такое SPICE-модель? Каким образом описывает параметры компонентов?

Приложение А

Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам

Таблица А.1 – Индивидуальные требования

Вариант №	Номер из группы RES	Номер из группы CAP	Номер из группы IND
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	3	3
4	4	4	4
5	5	5	1
6	1	6	2
7	2	1	3
8	3	2	4
9	4	3	1
10	5	4	2
11	1	5	3
12	2	6	4
13	3	1	1
14	4	2	2
15	5	3	3
16	1	4	4
17	2	5	1
18	3	6	2
19	4	1	3
20	5	2	4
21	1	3	1
22	2	4	2
23	3	5	3
24	4	6	4
25	5	1	1
26	1	2	2
27	2	3	3
28	3	4	4
29	4	5	1
30	5	6	2

Приложение Б

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.

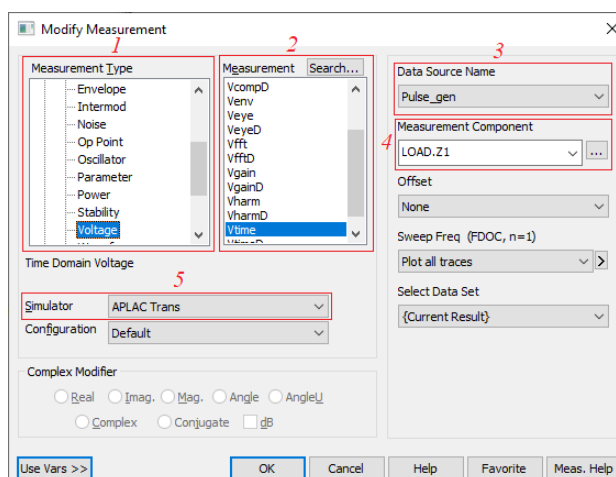


Рисунок Б.1 – Окно выбора измерения и его настройки

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.

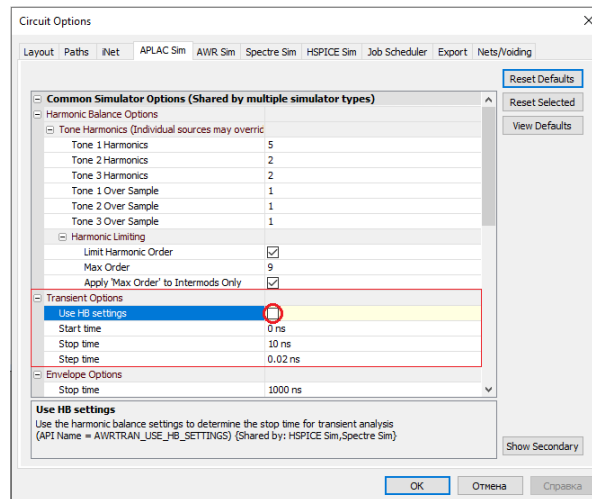


Рисунок Б.2 – Окно настройки симулятора APLAC