

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

РАСПРОСТРАНЕНИЕ СИГНАЛОВ В НЕРЕГУЛЯРНЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ

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 Распространение сигналов в нерегулярных линиях передачи: 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. – 17 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 применения учета паразитных параметров компонентов.....	5
1.1 Применяемое оборудование.....	9
1.2 Используемые компоненты для моделирования	10
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

Введение

Современные высокоскоростные цифровые устройства предъявляют жёсткие требования к целостности сигналов в линиях передачи. В идеальном случае на высоких частотах сигнальный тракт должен представлять собой регулярную линию передачи – структуру с неизменными в продольном направлении поперечным сечением и электромагнитными свойствами заполняющей среды. Однако на практике любой реальный тракт содержит неоднородности, нарушающие его регулярность.

При проектировании высокоскоростных цифровых систем необходимо учитывать влияние всех элементов тракта: от переходных отверстий и соединительных разъёмов до локальных изменений ширины проводника и разрывов опорного слоя. Эти неоднородности становятся источниками отражённых волн, ухудшают целостность сигнала и могут приводить к сбоям в работе цифровых устройств.

В настоящей лабораторной работе изучается распространение сигналов в нерегулярных линиях передачи — структурах, содержащих как локальные, так и распределённые неоднородности.

1 ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ УЧЕТА ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ КОМПОНЕНТОВ

В соответствии с теорией линий передачи, регулярной называется линия, у которой в продольном направлении неизменны поперечное сечение и электромагнитные свойства заполняющих сред. Такая линия обладает постоянными погонными параметрами: индуктивностью L и ёмкостью C , а следовательно — неизменной задержкой распространения и постоянным волновым сопротивлением:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Нерегулярной называется линия, у которой хотя бы одно из условий регулярности нарушено. Если изменение параметров происходит на коротком участке (много меньше длины волны сигнала), неоднородность классифицируется как локальная; если же параметры изменяются на протяжении значительной длины — как распределённая.

Волновое сопротивление (характеристический импеданс) линии передачи является фундаментальной характеристикой, определяющей отношение амплитуд падающих волн напряжения и тока. Для однородной линии это отношение постоянно в любом сечении. При появлении неоднородности возникает отражение части энергии сигнала, что приводит к искажению его формы во временной области и ухудшению частотных характеристик.

Наиболее наглядный случай локальной неоднородности — соединение двух линий с разными волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_2 . При прохождении электромагнитной волны через такой стык часть энергии отражается, а часть проходит во вторую линию. Коэффициент отражения по напряжению определяется выражением:

$$\Gamma = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1}.$$

Выражение для коэффициента передачи:

$$T = 1 + \Gamma = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2}.$$

Важно отметить, что при $Z_2 > Z_1$ коэффициент передачи может превышать единицу – это не нарушает закона сохранения энергии в связи с уменьшением значения тока. В этом случае мощность остается неизменной. При $Z_1 = Z_2$ отражение отсутствует, что соответствует согласованному режиму.

При известных коэффициентах отражения и передачи может быть определена амплитуда прошедшего $U_{\text{пр}}$ и отраженного сигнала $U_{\text{отр}}$:

$$U_{\text{отр}} = U_{\text{пад}} \cdot \Gamma,$$

$$U_{\text{пр}} = U_{\text{пад}} \cdot T,$$

где $U_{\text{пад}}$ – амплитуда исходного сигнала.

Любое включение в линию компонентов также приводит к рассогласованию. Установка резистора, конденсатора или катушки индуктивности в разрыв линии создаёт локальную неоднородность с комплексным коэффициентом отражения. Особенно критичны такие включения на высоких частотах, где паразитные параметры компонентов (индуктивность выводов, ёмкость корпуса) начинают доминировать.

Поворот линии или переходное отверстие в многослойной печатной плате также представляет собой локальную неоднородность, обладающую собственной паразитной ёмкостью и индуктивностью. Каждое переходное отверстие вносит искажения в форму сигнала, особенно заметные при частотах выше 100 МГц.

Разрыв опорного слоя под сигнальной трассой нарушает путь возврата сигнального тока, увеличивая индуктивность петли и создавая дополнительное отражение. Это один из наиболее распространённых источников проблем целостности сигнала в реальных платах.

Если линия содержит длинный участок с волновым сопротивлением Z_2 , отличным от сопротивления основного тракта Z_1 , то отражения возникают на

обоих концах участка (рисунок 1.1). При этом, в отличие от локальной неоднородности, интерференция между отражёнными волнами приводит к частотно-зависимым эффектам, которые могут как усиливать, так и ослаблять отражённый сигнал в зависимости от длины участка.

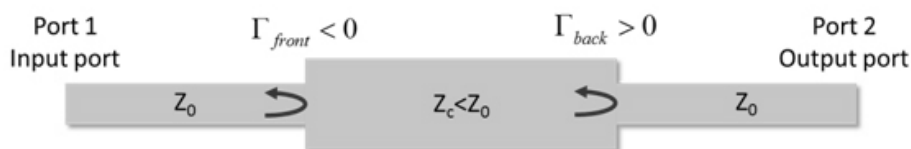


Рисунок 1.1 – Распределенный участок с отличным волновым сопротивлением

Характер искажения сигнала при прохождении неоднородного участка существенно зависит от соотношения его длины l и длины фронта сигнала в пространстве, зависящего от его длительности во времени t_r . При короткой неоднородности (значительно меньшей длины, чем пространственная протяжённость фронта) отражённый импульс сливается с фронтом падающей волны. В результате наблюдается "заваливание" фронта – уменьшение его крутизны. Короткие неоднородности вносят в основном ёмкостную или индуктивную нагрузку, которая модифицирует фронт, но не создаёт отдельной отражённой волны, различимой во времени.

При протяжённой неоднородности, сравнимой или большей, чем длина фронта сигнала, отражённая волна становится различимой как отдельный импульс. В этом случае:

- возникает чётко наблюдаемое отражение сигнала, приходящее с задержкой, зависящей от протяженности участка;
- в линии формируются многократные отражения: сигнал начинает переотражаться между локальными участками рассогласования. На рисунке 1.2 показан пример лишь небольшой части сигналов, которые могут существовать в структуре с одной распределенной неоднородностью.
- сигнал на входе и выходе представляет собой интерференцию прямой и многократно отражённых волн.

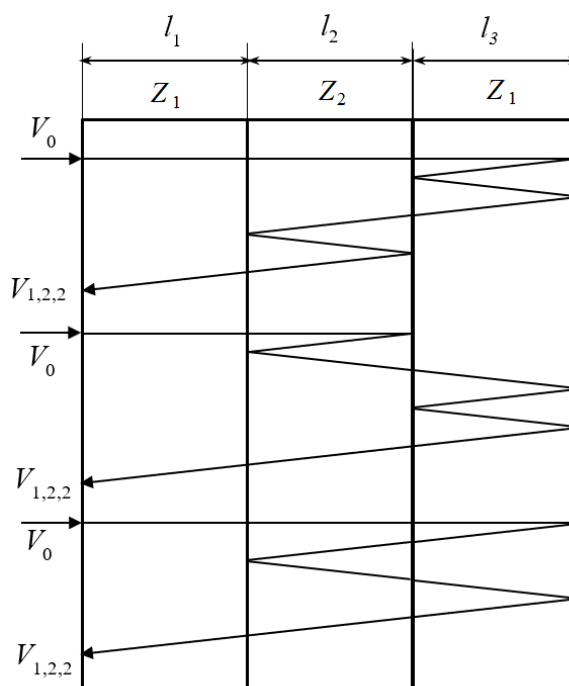


Рисунок 1.2 – Распространение переотраженных сигналов второго порядка в структуре из трёх сегментов

В таблице 1.1 представлены наиболее распространенные виды рассогласований, способы расчета их импедансов и коэффициентов отражения.

Любой компонент, расположенный в линии передачи, может быть охарактеризован некоторым импедансом $Z(f)$, при этом, согласно таблице 1.1, значение коэффициента является частотно-зависимым. Это легко доказывается на примере конденсаторов или катушек индуктивности, имеющих разное сопротивление при воздействии разных частот. Таким образом, при необходимости учета влияния неоднородности на сигнал во временной области необходимо провести анализ в частотной области, после чего, воспользовавшись преобразованием Фурье, можно получить итоговую форму сигнала.

Даже при соблюдении условия регулярности (согласованности по всей длине) линий передачи в печатной плате следует помнить, что нагрузка и генератор также могут иметь сопротивление, немного или значительно отличающееся от волнового сопротивления линии. Любой логический

элемент или выходной каскад транзистора, как правило, имеет отличное от 50 Ом выходное сопротивление. Кроме того, это сопротивление еще и меняется в зависимости от текущего состояния. Любое подобное рассогласование приводит к наличию отраженных составляющих и искажению форм сигналов.

В связи с этим при работе на высоких частотах цепи часто согласуют как со стороны входа, так и со стороны выхода. Резистивные согласующие нагрузки устраняют проблему отражений и “звона”.

Таблица 1.1 – Виды локальных неоднородностей

Вариант №	1	2	3	4	5
Наименование	Изменение геометрии проводников	Изменение диэлектрика	Параллельная нагрузка	Последовательная нагрузка	Бинарный референс
Вариант исполнения					
Расчет коэффициента отражения	$\Gamma = \frac{Z - Z_0}{Z + Z_0}$	$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_{r0}} - \sqrt{\epsilon_{r1}}}{\sqrt{\epsilon_{r0}} + \sqrt{\epsilon_{r1}}}$	$\Gamma(f) = -\frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_n(f)}$	$\Gamma(f) = -\frac{Z_n(f)}{Z_n(f) + 2Z_0}$	$\Gamma^1 = \frac{Z_1 - Z_0}{Z_1 + Z_0}, \Gamma^2 = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}$
Расчет параметра неоднородности	$Z_i = -Z_0 \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}$	$\epsilon_{r1} = \epsilon_{r0} \frac{(\Gamma - 1)^2}{(\Gamma + 1)^2}$	$Z_n(f) = -Z_0 \frac{\Gamma(f) + 1}{2\Gamma(f)}$	$Z_n(f) = -Z_0 \frac{\Gamma(f) + 1}{2\Gamma(f)}$	$Z_1 = -Z_0 \frac{\Gamma + 1}{\Gamma - 1}$
Напряжение на выходе	$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (1 + \Gamma)$		$U_{\text{вых}}(f) = U_{\text{вх}}(f)(1 + \Gamma(f))$		$U_{\text{вых}} \geq U_{\text{вх}} (1 - \Gamma^2) e^{aj}$

В рамках данной лабораторной работы предлагается ознакомиться с эффектами отражения и переотражения сигналов в цепях и их влиянием на целостность сигнала.

1.1 Применяемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы будет использоваться следующее оборудование:

– лабораторный макет №3 (Irregularity), содержащий линии передачи с различными локальными и регулярными неоднородностями: участки изменения волнового сопротивления различной длины, локальные

компоненты, переходные отверстия, разрывы полигона земли;

– 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.

1.2 Используемые компоненты для моделирования

Для создания модели линии передачи в AWR Design Environment на схеме использовать следующие компоненты MLIN, MSUB.

Построение графиков выполнять согласно приложению Б.

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 во временной области:
 - 4.1. Подготовить к эксперименту следующее оборудование: генератор опорного тактового сигнала; генератор импульсов пикосекундной длительности; осциллограф.
 - 4.2. Выполнить измерение осциллограммы на выходе генератора импульсов (выход №1, далее Г_В)
 - 4.3. Поочередно подключить к Г_В фильтры согласно индивидуальному варианту по следующей схеме: выход Г_В подключить к входу делителя мощности, выход №1 делителя мощности к первому каналу осциллографа, выход №2 делителя мощности ко входу исследуемой линии передачи с элементом рассогласования, выход линии – ко второму каналу осциллографа. Выполнить одновременное измерение двух осциллограмм. Записать результаты измерений в файлы.
 - 4.4. Повторить измерения по аналогичной схеме с использованием выхода №2 генератора.
 - 4.5. Повторить измерения по аналогичной схеме с использованием выхода №3 генератора.
5. AWR Design Environment:
 - 5.1. Во временной области выполнить моделирование с использованием сигналов, близких по параметрам к экспериментальным.
 - 5.2. Построить осциллограммы сигналов на входе и выходе линий передачи без и с распределенным неоднородным участком, имеющем

длины, указанные в индивидуальном варианте.

5.3. Оценить степень влияния длины неоднородного участка на форму коротких и длинных импульсных сигналов.

6. Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое волновое сопротивление линии передачи?
2. Что такое неоднородность? Коэффициент отражения и передачи.
3. Как рассчитать величину сигнала, отраженное/прошедшего через неоднородность? Две неоднородности?
4. Вычислите уровень импульсного сигнала на выходе 50 Ом линии без потерь с распределенным рассогласованным участком с волновым сопротивлением 100 Ом.
5. Перечислите источники рассогласования при проектировании печатных узлов.
6. Чему равен импеданс конденсатора ёмкостью 1 нФ на частоте 1 ГГц? Какой будет коэффициент отражения от этого конденсатора при включении его как шунт в 50 Ом линию передачи?
7. Что происходит с сигналом при прохождении через электрически короткие и электрически длинные рассогласованные участки?
8. Что такое спектр сигнала?
9. Что такое интерференция сигналов?
10. Что такое входное сопротивление генератора? Выходное сопротивление нагрузки?

Приложение А

Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам

Таблица А.1 – Индивидуальные требования

Вариант №	ЛП из группы №1 (рассогл.)	ЛП из группы №2 (регулярный участок)	ЛП из группы №3 (компонент, отв.)	Длина участка для модели, мм		
				№1	№2	№3
1	1	1	1	50	10	1
2	2	2	2	60	12	1,5
3	3	3	3	70	14	2
4	1	4	4	80	16	2,5
5	2	1	5	90	18	1
6	3	2	1	100	10	1,5
7	1	3	2	50	12	2
8	2	4	3	60	14	2,5
9	3	1	4	70	16	1
10	1	2	5	80	18	1,5
11	2	3	1	90	10	2
12	3	4	2	100	12	2,5
13	1	1	3	50	14	1
14	2	2	4	60	16	1,5
15	3	3	5	70	18	2
16	1	4	1	80	10	2,5
17	2	1	2	90	12	1
18	3	2	3	100	14	1,5
19	1	3	4	50	16	2
20	2	4	5	60	18	2,5
21	3	1	1	70	10	1
22	1	2	2	80	12	1,5
23	2	3	3	90	14	2
24	3	4	4	100	16	2,5
25	1	1	5	50	18	1
26	2	2	1	60	10	1,5
27	3	3	2	70	12	2
28	1	4	3	80	14	2,5
29	2	1	4	90	16	1
30	3	2	5	100	18	1,5

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 **OK**, чтобы закрыть окно.

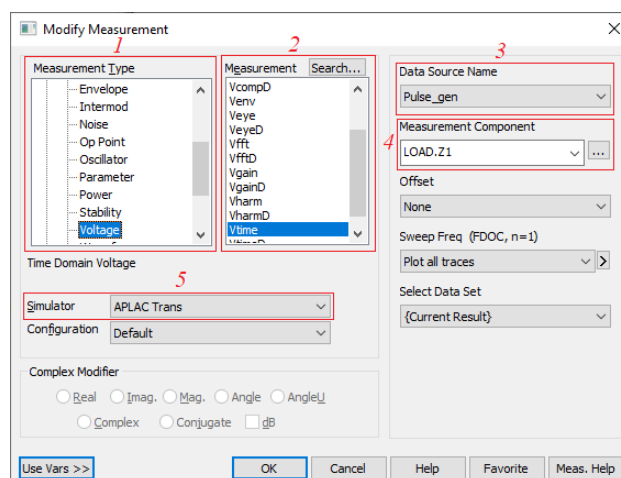


Рисунок Б.1 – Окно выбора измерения и его настройки

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.

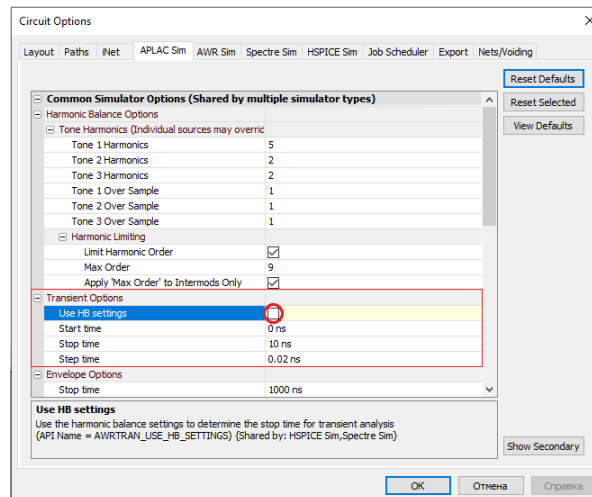


Рисунок Б.2 – Окно настройки симулятора APLAC