

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

ЦИФРОВЫЕ СИГНАЛЫ И ИХ СПЕКТРЫ

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

Томск 2026

УДК 621.37
ББК 32.844
Т 66

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

Тренкаль, Евгений Игоревич

Т 66 Цифровые сигналы и их спектры: 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 Представление сигналов в частотной области.....	5
1.1 Применяемое оборудование.....	10
1.2 Используемые команды и элементы для моделирования.....	10
2 Порядок выполнения работы	11
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

Современные высокоскоростные цифровые системы предъявляют всё более жёсткие требования к полосе пропускания каналов передачи данных. Тактовые частоты в таких системах уже давно превысили отметку в несколько гигагерц, а длительности фронтов сигналов сократились до десятков и даже единиц пикосекунд. В этих условиях проектировщик сталкивается с фундаментальной проблемой: любой реальный канал связи – печатная плата, соединительный кабель, микросхемы – обладают ограниченной полосой пропускания и вносят частотные искажения в передаваемый сигнал.

Природу этих искажений можно понять через спектральный анализ, который позволяет рассматривать любой сигнал как сумму гармонических составляющих. В рамках лабораторной работы студентам предлагается экспериментально и с помощью моделирования исследовать связь между формой сигнала во временной области и его спектром.

1 ПРЕДСТАВЛЕНИЕ СИГНАЛОВ В ЧАСТОТНОЙ ОБЛАСТИ

В основе спектрального представления лежит простейший монохроматический (гармонический) сигнал – синусоидальное (рисунок 1.1) или косинусоидальное колебание с постоянной частотой $f_0 = 1/T_0$:

$$U(t) = U_m \cos(\omega t + \varphi),$$

где $\omega = 2\pi f_0$ – круговая частота, рад/с;

U_0 – амплитуда гармонического сигнала;

φ – фаза сигнала;

T_0 – период сигнала.

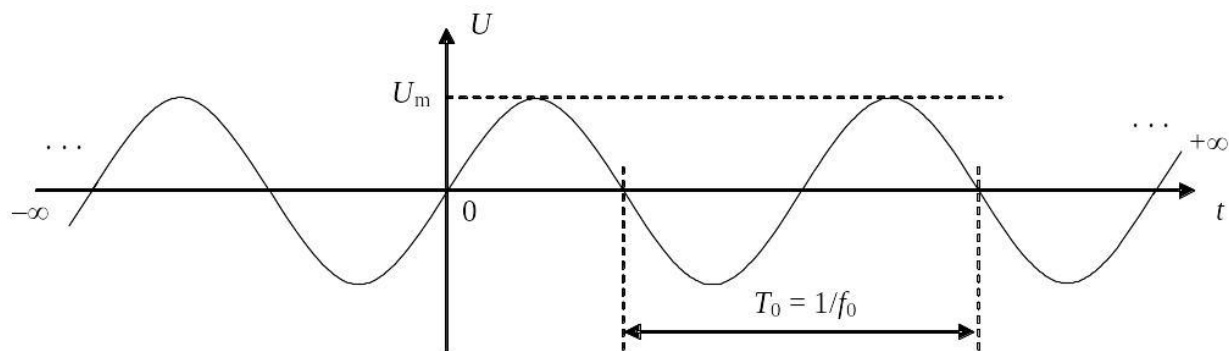


Рисунок 1.1 – Временная форма гармонического сигнала

Любой сложный сигнал может быть представлен в виде суммы гармонических составляющих с различными частотами, амплитудами и начальными фазами – спектральных составляющих. На рисунке 1.2 показан пример формирования прямоугольного сигнала из набора кратных гармоник с частотами $f, 3f, 5f, \dots$

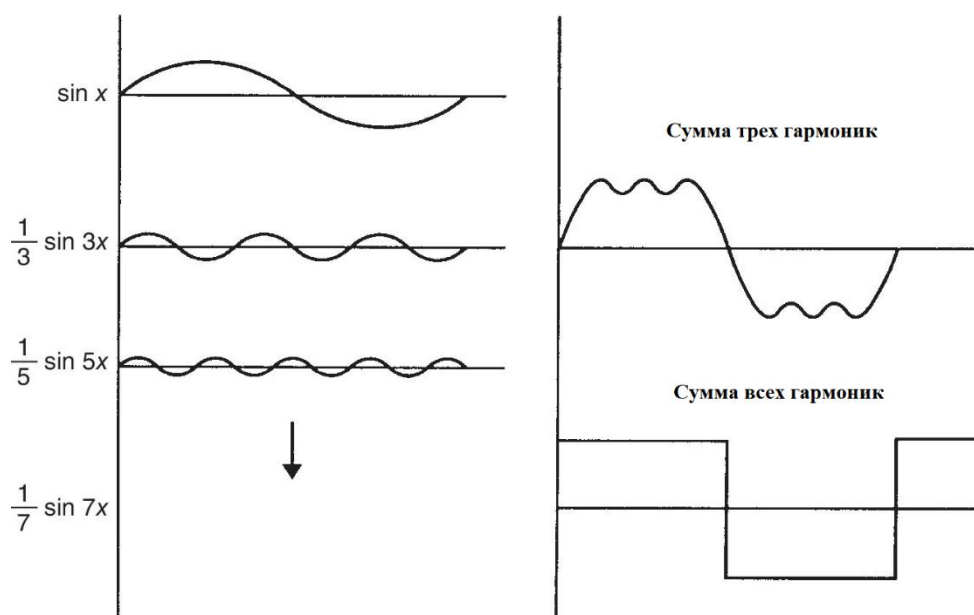


Рисунок 1.2 – Получение прямоугольного сигнала путем суммы набора гармонических сигналов

Спектр является формой представления сигнала через сумму его спектральных составляющих. Для его изображения на оси абсцисс располагают частоту, на оси ординат – амплитуду. Соответственно, спектр гармонического сигнала представляет собой единственную (без учета зеркальной) спектральную линию на частоте f_0 , амплитуда которой равна амплитуде сигнала A_0 (рисунок 1.3).

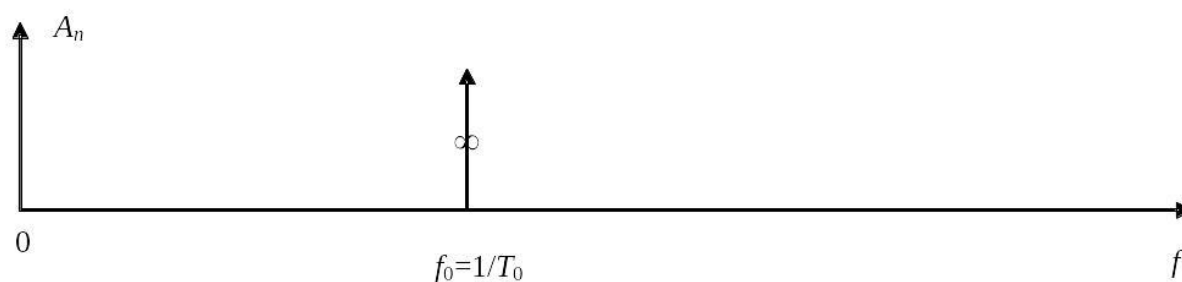


Рисунок 1.3 – Спектр гармонического сигнала

Для каждой гармоники также существует значение фазы, которую представляют на отдельной, фазовой характеристике.

Более сложные сигналы представляются набором дискретных линий различных частот и амплитуд (рисунок 1.4). Форма сигнала во временной области полностью определяется его спектром, и наоборот. Изменение

спектра всегда приводит к изменению формы сигнала. Часто спектры изображают непрерывной линией, являющейся огибающей дискретных линий. На рисунке 1.5 показан набор сигналов различной формы и их спектральное представление, наглядно демонстрируется связь формы и длительности с входящими в сигнал частотами.

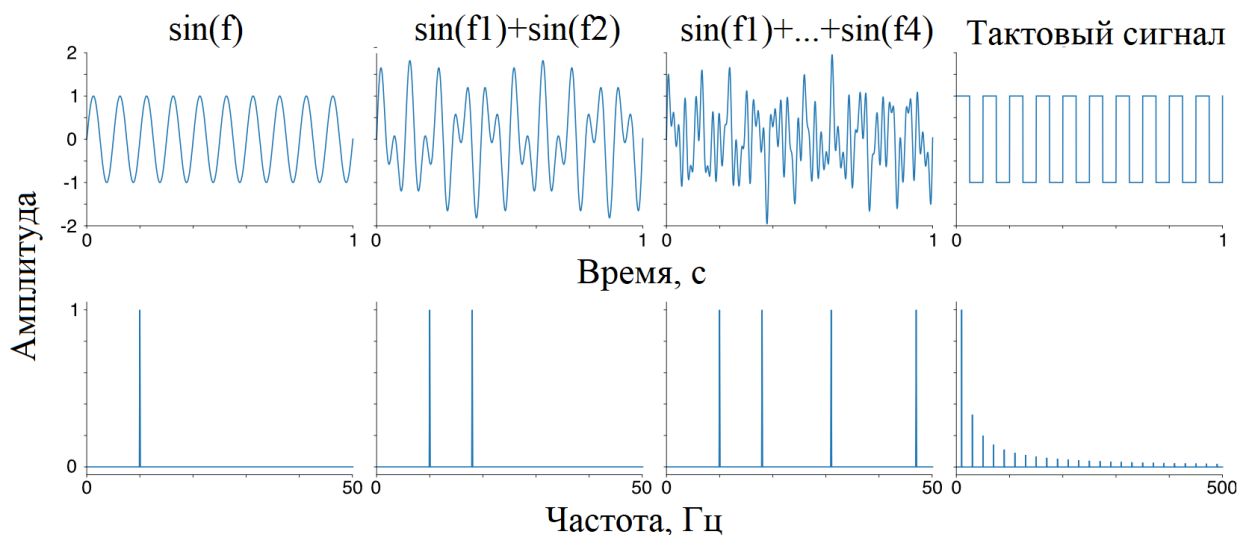


Рисунок 1.4 – Временное и спектральное представление некоторых сигналов

Для перехода из одной формы представления в другую используют прямое и обратное преобразование Фурье. Чаще для вычислений перехода от одной к другой форме используют быстрое преобразование Фурье – FFT и IFFT.

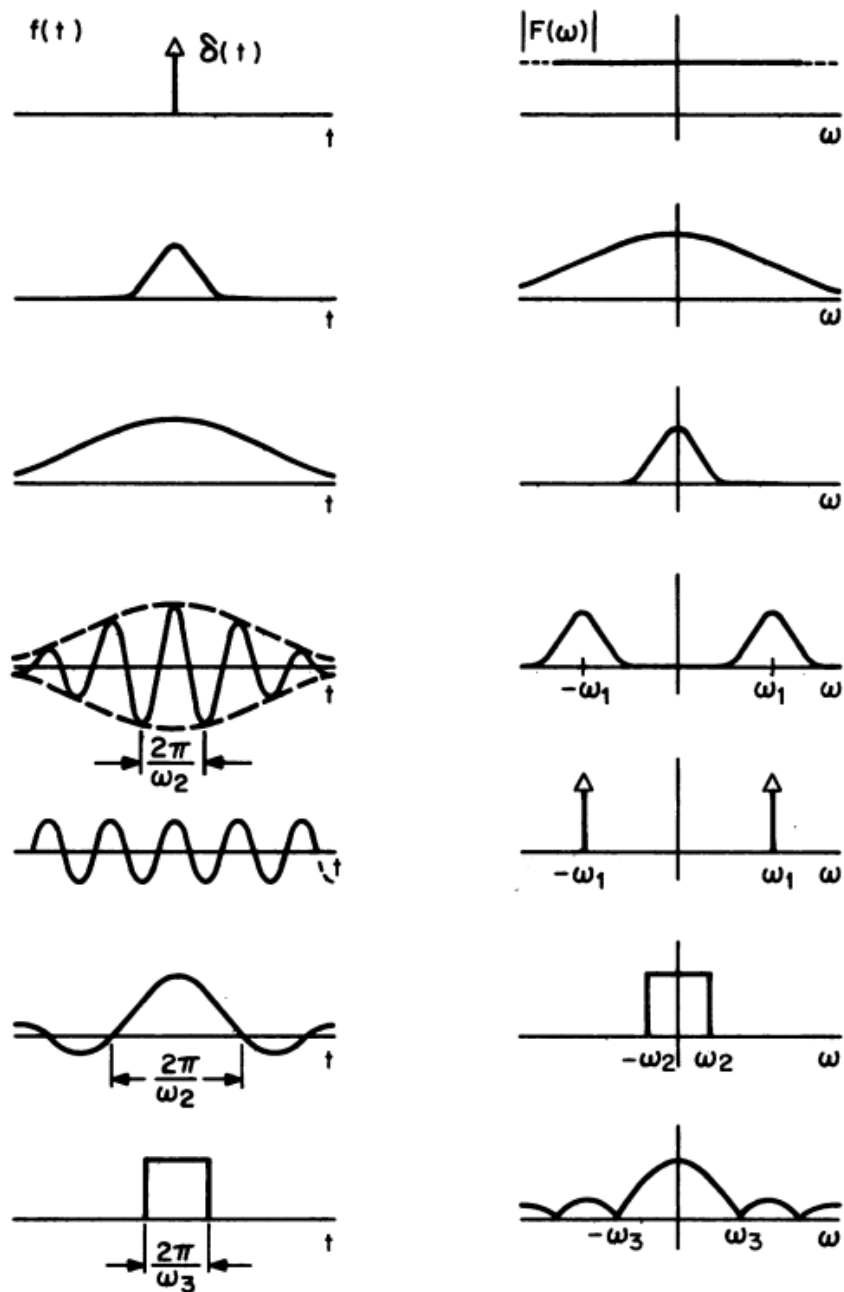


Рисунок 1.5 – Набор сигналов и их амплитудных спектров

В результате прямого преобразования Фурье для каждой дискретной частоты будет получено комплексное число (рисунок 1.6) – альтернативный вариант представления гармонического сигнала: $s = a + jb$, где $a = \text{Re}(s)$ – реальная часть, $b = \text{Im}(s)$ – мнимая часть. Тогда амплитуда (модуль) и фаза (аргумент) спектральной составляющей определяется:

$$|s| = \sqrt{\text{Re}^2(s) + \text{Im}^2(s)},$$

$$\arg(s) = \arctan \left[\frac{\operatorname{Im}(s)}{\operatorname{Re}(s)} \right].$$

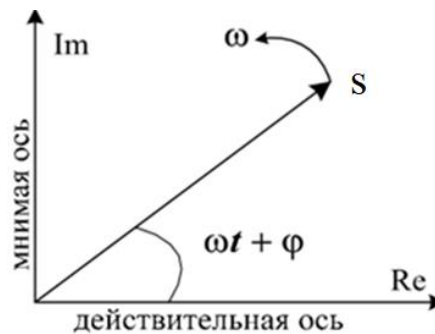


Рисунок 1.6 – Представление сигнала на комплексной плоскости

Согласно рисунку 1.6, каждая спектральная составляющая частотой f имеет амплитуду – длина вектора, и текущую фазу – угол относительно положительной части действительной оси.

По амплитудному спектру можно судить о частотном распределении энергии сигнала, которая описывается площадью под его огибающей. Согласно рисунку 1.5, основная энергетика сигнала (наибольшая площадь) расположена в его низкочастотной части. Высокочастотные составляющие определяет крутизну фронтов прямоугольного сигнала. При этом спектр прямоугольного сигнала бесконечен, т.е. содержит гармоники до бесконечно высоких частот. Однако, на частотах выше определенной амплитуды гармоник становятся пренебрежимо малыми. Граничная частота устанавливается выражением:

$$F_{knee} = \frac{0,5}{t_r},$$

где t_r – длительность фронта прямоугольного сигнала.

При искажении или ослаблении частот выше F_{knee} форма сигнала будет изменяться незначительно. Используя параметр F_{knee} , следует помнить о том, что он является грубой оценкой верхней частотной границы спектра цифрового сигнала. Использование значения частоты излома в качестве ориентира помогает разделить частотно-зависимые эффекты на не

оказывающие абсолютно никакого влияния, оказывающие заметное влияние, но допустимые, и недопустимые. В большинстве случаев при проектировании цифровых устройств это именно то, что нужно знать.

1.1 Применяемое оборудование

Для выполнения лабораторной работы будет использоваться следующее оборудование:

- векторный анализатор цепей (ВАЦ), набор для калибровки, нагрузки, делитель мощности;
- 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;
- фильтры следующих типов: ФНЧ, ФВЧ, полосовой, режекторный.

1.2 Используемые команды и элементы 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 добавление фильтров – General->Filters;
- 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.

Функции в Mathcad: для загрузки файла: READPRN, для расчета спектра: fft/iff или cfft/icfft.

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 согласно индивидуальному варианту на векторном анализаторе цепей (ВАЦ):
 - 4.1. Выполнить калибровку векторного анализатора цепей.
 - 4.2. Выполнить измерение S-параметров фильтров 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, фильтры.
 - 5.2. Выполнить измерение осциллограмм на выходе генератора импульсов (выход №1, далее Γ_B)
 - 5.3. Поочередно подключить к Γ_B фильтры согласно индивидуальному варианту по следующей схеме: выход Γ_B подключить к входу делителя мощности, выход №1 делителя мощности к первому каналу осциллографа, выход №2 делителя мощности ко входу фильтра, выход фильтра ко второму каналу осциллографа. Выполнить одновременное измерение двух осциллограмм. Записать результаты измерений в файлы.
 - 5.4. Повторить измерения по аналогичной схеме с использованием выхода №2 генератора.
 - 5.5. Повторить измерения по аналогичной схеме с использованием выхода

№3 генератора.

6. В Mathcad выполнить обработку измеренных данных:

- 6.1. Подгрузить измеренные данные с помощью команды READPRN("Имя.csv"). В случае возникновения ошибок удалить из файла с данными лишнюю информацию (описание), оставив только столбцы значений.
- 6.2. Построить графики измеренных S-параметров фильтров и осциллограмм выходных сигналов генератора.
- 6.3. Определить параметры фильтров: частоту среза, полосу, крутизну и др.
- 6.4. Построить спектры осциллограмм с использованием функции fft (временной массив размером, кратным 2) или cfft (временной массив). Определить массив частот с правильным шагом и диапазоном для построения спектра амплитуд ($1/dt/N$, где N – число точек, dt – шаг дискретизации).
- 6.5. Для каждого спектра сигнала генератора и фильтра выполнить расчет выходного сигнала путем перемножения спектра на коэффициенты S_{21} фильтра. Выполнить построение и анализ полученных спектров.
- 6.6. Выполнить обратный перевод полученных спектров во временную область командой ifft(спектр) или icfft(спектр). В качестве шага дискретизации использовать dt . Полученные осциллограммы в дальнейшем будут сравниваться с измеренными экспериментальными характеристиками на выходе фильтров.
- 6.7. Выполнить построение осциллограмм экспериментальных данных, измеренных на выходе фильтров. Сравнить экспериментальные осциллограммы с полученными в п. 6.6.
- 6.8. Выполнить построение спектров осциллограмм на выходе фильтров. Сравнить полученные спектры со спектрами, рассчитанными в п. 6.5.

7. AWR Design Environment:

- 7.1. В частотной области выполнить моделирование фильтров с

использованием компонентов из категории Filters (полосно-пропускающие Bandpass, полосно-заграждающие Bandstop, ФВЧ Highpass, ФНЧ Lowpass). Параметры фильтров задать согласно полученным экспериментальным данным.

7.2. Во временной области выполнить моделирование с использованием сигналов, близких по параметрам к экспериментальным. Построить осциллограммы сигналов на выходе линий передачи без и с включением фильтра. Сравнить результат с данными, полученными ранее.

8. Подготовить отчет о проделанной работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое гармонический сигнал? Какими параметрами описывается?
2. Что такое спектр сигнала? Как выглядит спектр гармонического сигнала?
3. Как выглядит спектр прямоугольного сигнала? Что определяют низкочастотные и высокочастотные составляющие спектра во временной области?
4. Что такое преобразование Фурье? Как выполнить преобразование и какой будет результат?
5. Как сигналы описываются через комплексные числа? Что такое комплексная плоскость?
6. Как связан спектр сигнала с его временной формой?
7. Что такое S-параметры? Амплитуда и фаза сигнала, комплексное представление. Получение амплитуды и фазы из комплексного представления. Единицы измерения амплитуды и фазы.
8. В чем разница между S-параметрами и спектрами? Что они описывают?
9. Что такое фильтр? Какими параметрами характеризуется?
10. Как зависит спектр сигнала от длительности фронта?

Приложение А

Варианты выполнения индивидуального задания и требования к параметрам

Таблица А.1 – Индивидуальные требования

Вариант №	Номер первого фильтра	Номер второго фильтра
1	Ф1	Ф4
2	Ф2	Ф5
3	Ф3	Ф6
4	Ф4	Ф7
5	Ф5	Ф8
6	Ф6	Ф9
7	Ф7	Ф10
8	Ф8	Ф11
9	Ф9	Ф12
10	Ф10	Ф1
11	Ф11	Ф2
12	Ф12	Ф3
13	Ф1	Ф7
14	Ф2	Ф8
15	Ф3	Ф9
16	Ф4	Ф10
17	Ф5	Ф11
18	Ф6	Ф12
19	Ф7	Ф1
20	Ф8	Ф2
21	Ф9	Ф3
22	Ф10	Ф4
23	Ф11	Ф5
24	Ф12	Ф6
25	Ф1	Ф9
26	Ф2	Ф10
27	Ф3	Ф11
28	Ф4	Ф12
29	Ф5	Ф1
30	Ф6	Ф2

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.

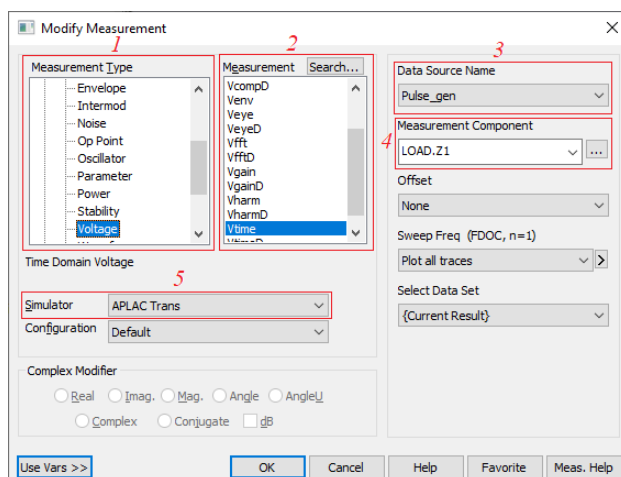


Рисунок Б.1 – Окно выбора измерения и его настройки

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.

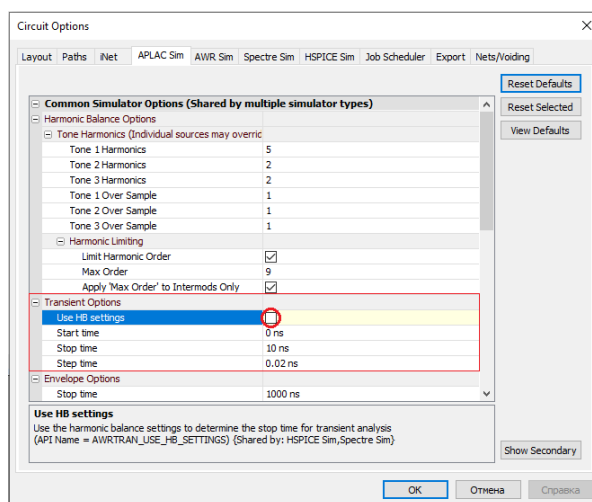


Рисунок Б.2 – Окно настройки симулятора APLAC