

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «Московский институт электронной техники».

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Лабораторная работа №6

«Средства моделирования комплексной огибающей в ADS»

**Модуль
«Моделирование приёмопередающих устройств»**

**По курсу
«Моделирование СВЧ-устройств в САПР»**

Москва, Зеленоград

2024

Оглавление

Оглавление	2
Введение.....	3
Теоретические сведения	4
Методика выполнения работы.....	6
Создание и первоначальная настройка проекта	6
Работа на ВЧ-сигнале без переноса частоты	6
Работа с модулированным сигналом.....	19
Работа с амплитудным детектором	26
Задание на выполнение.....	31
Требования к отчёту.....	37
Задание на самостоятельную работу.....	38
Контрольные вопросы	39
Литература	40



Введение

Цель работы: научиться использовать средства моделирования комплексной огибающей ВЧ-устройств в среде Keysight Advanced Design System (ADS).

Используемое оборудование или ПО: Keysight Advanced Design System 2023

Продолжительность работы: 4 часа.

В разделе «Методика выполнения» приведены только необходимые действия по выполнению лабораторной работы. Подробно описываются только новые приемы работы в ADS. Предполагается, что студент выполнил предыдущие лабораторные работы.

Lab1	показывает места, которые подробно описаны в предыдущих лабораторных работах
	показывает новые приемы, значительно упрощающие или ускоряющие использование ADS
	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку

Теоретические сведения

Временной анализ позволяет получить все возможные характеристики исследуемой системы: временную форму сигнала, анализ переходных процессов, с применением преобразования Фурье, частотные характеристики устройства и спектральные характеристики сигнала. Однако у временного анализа есть большой недостаток – большое количество точек для расчета, а значит и большее время анализа. Причем, верхняя граница шага симуляции четко задана в соответствии с теоремой Котельникова и не должна превышать $1/2f_{\max}$, где f_{\max} – максимальная частотная составляющая в спектре. Очевидно, что при моделировании СВЧ сигналов, которые задаются сотнями мегагерц – гигагерцами, шаг симуляции определяется нано и пикосекундами. В то же время СВЧ сигналы модулируются низкочастотными сигналами с частотами порядка единиц – десятков мегагерц, что означает, что длительность симуляции для того, чтобы за это время уложился хотя бы один период, должна составлять микросекунды, а это сотни тысяч – миллионы точек для расчета.

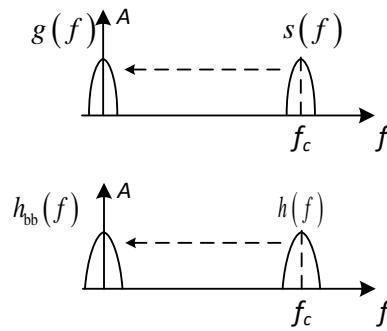
Количество частотных составляющих в спектре сигнала при дискретном преобразовании равно количеству временных отсчетов, а значит разрешение по частоте равно отношению частоты дискретизации к количеству частотных составляющих:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{1}{\Delta t \cdot N} = \frac{1}{T}, \text{ т.е. обратно пропорционально времени симуляции/}$$

Частично избежать этого недостатка позволяет метод моделирования комплексной огибающей. Сама по себе комплексная огибающая – это метод разделения высокочастотного модулированного сигнала $s(t)$ на baseband-сигнал $g(t)$ (на нулевой несущей частоте) с информацией и несущую частоту f_c . Между собой они тогда соотносятся как:

$$s(t) = \operatorname{Re} [g(t) \exp(j \cdot 2\pi f_c t)]$$

В этом случае временной шаг моделирования определяется уже частотными свойствами baseband-сигнала.



Аналогично сигналам можно сопоставлять и частотные свойства системы $h(t)$ ее baseband-эквиваленту $h_{bb}(t)$:

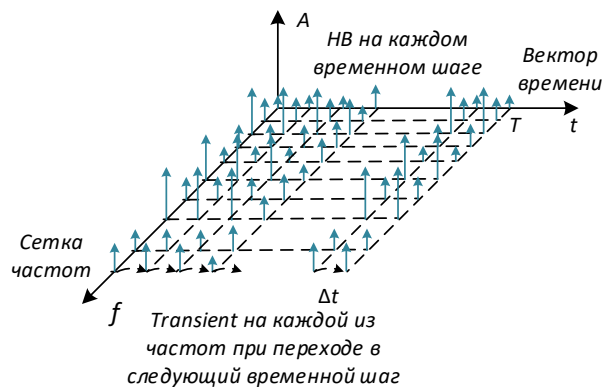
$$h(t) = \text{Re} [h_{bb}(t) \exp(j \cdot 2\pi f_c t)]$$

Исходя из этого, можно рассчитывать выходной сигнал ВЧ-системы $y(t)$, работая с baseband-представлениями

$$y(t) = h(t) \otimes s(t) \Leftrightarrow y_{bb}(t) = h_{bb}(t) \otimes g(t)$$

В Advanced Design System метод моделирования комплексной огибающей построен на комбинации частотного и временного анализа.

На каждом временном шаге происходит перебалансировка комплексных векторов сигналов на заданной сетке частот методом Harmonic Balance. Далее методом переходных процессов происходит переход в следующий момент времени сигналов для каждой из гармоник.



Выходными результаты метода моделирования Envelope являются сигналы в форме двумерных комплексных массивов с зависимостью от вектора времени time и сетки частот freq. При фиксировании частоты (номера гармоники) можно получить временную зависимость огибающей от выбранной гармоники. При фиксировании времени можно получить мгновенный спектр в выбранный момент времени.

Методика выполнения работы

Создание и первоначальная настройка проекта

Lab1

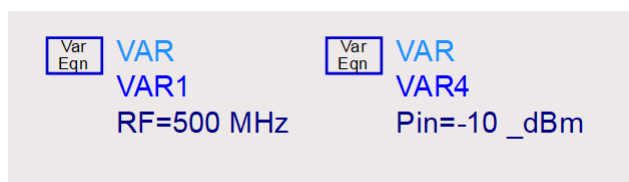
Текущая работа не использует никаких дополнительных подключаемых библиотек. Для сохранения совместимости с остальными проектами курса, рекомендовано при создании проекта использовать стандартную технологию, что и в остальных работах, в том числе:

- В качестве библиотеки слоев необходимо дополнительно к библиотеке назначения слоев схемы «ads_schematic_layer» выбрать «ads_standard_layers» (назначение топологических слоев);
- единицы длин проекта – мм, с разрешением 10000 точек/мм.

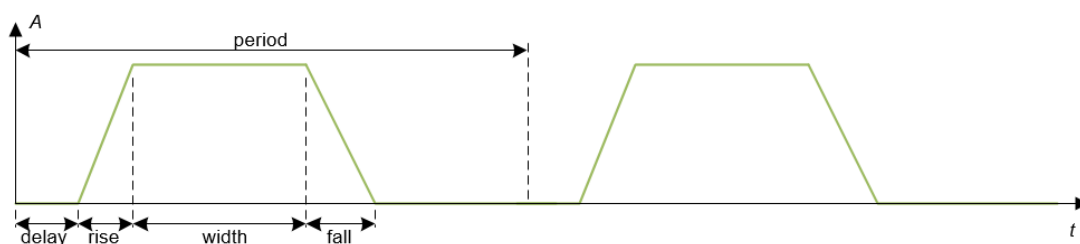
Работа на ВЧ-сигнале без переноса частоты

Научимся на простой схеме корректно задавать параметры моделирования методом комплексной огибающей. Соберем схему ENV_PulseAmp, в которой пропустим радиоимпульс через имитационную модель усилителя мощности.

Пусть несущая частота радиоимпульса равна 500 МГц, мощность импульсного сигнала равна –10 дБм.



При работе с импульсными сигналами необходимо четко понимать, о какой мощности идет речь, т.к. в пределах периода повторения амплитуда сигнала меняется. Это может быть средняя мощность за период или пиковая (импульсная) мощность. В используемом источнике PtRF_Pulse задается мощность сигнала в пределах импульса.

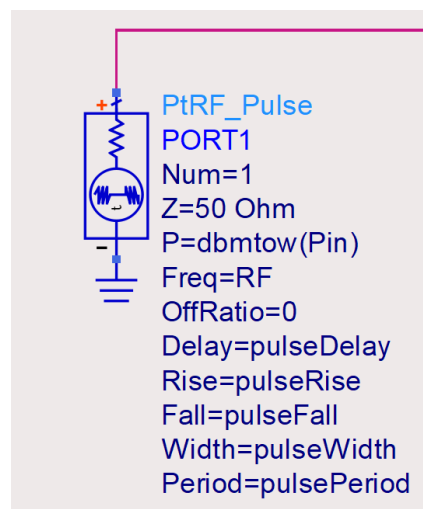


Определим временную форму огибающей радиоимпульса:

- длительность $\text{pulseWidth} = 40 \text{ нс}$;
- длительность переднего фронта $\text{pulseRise} = 5 \text{ нс}$;
- длительность заднего (спадающего) фронта $\text{pulseFall} = 10 \text{ нс}$;
- период повторения радиоимпульса $\text{pulsePeriod} = 120 \text{ нс}$;
- задержка от начала периода $\text{pulseDelay} = 5 \text{ нс}$.

```
Var VAR
Eqn VAR2
pulseWidth=40 nsec
pulseRise=5 nsec
pulseFall=10 nsec
pulsePeriod=120 nsec
pulseDelay=5 nsec
```

С помощью определённых выше переменных зададим параметры источника радиосигнала `PtRF_Pulse`. Также укажем параметр `OffRatio = 0`, чтобы между импульсами уровень сигнала был равен 0.

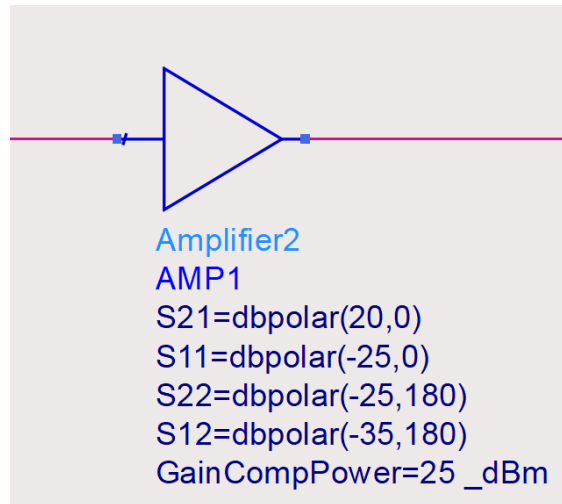


Модель усилителя будем использовать `Amplifier2`. Пусть он имеет коэффициент усиления 20 дБ, хорошее согласование по входу и по выходу (-25 дБ), а также малое обратное усиление (-35 дБ). Зададим ему точку однодецибельной компрессии равной 25 дБм.



По умолчанию в модели `Amplifier2` для `S21` подставляется преобразование `dbpolar()` для формирования комплектного числа с одновременным пересчетом амплитуды из дБ в разы, а вот для `S11` и

S22 - polar() без пересчета из дБ в разы. Нужно следить за корректностью ввода значений.

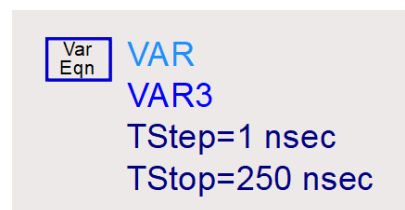


Определим теперь временные параметры расчета, шаг TStep и длительность TStop.

Шаг расчета по времени берется исходя из Теоремы Котельникова с некоторым запасом. Полосу baseband-сигнала для радиоимпульса определяет длительность фронтов. У нас передний фронт 5 нс, задний фронт 10 нс, передний фронт короче. Получается, что для достоверной передачи формы огибающей радиоимпульса по Теореме Котельникова шаг должен быть меньше, чем $\text{pulseRise}/2$, увеличим запас до 1/5. TStep определим равным 1 нс.

Если бы полосу baseband-сигнала удобнее было смотреть в частотной области, то проще работать с соотношением $1/(5 \cdot BW)$, где BW – полоса baseband-сигнала.

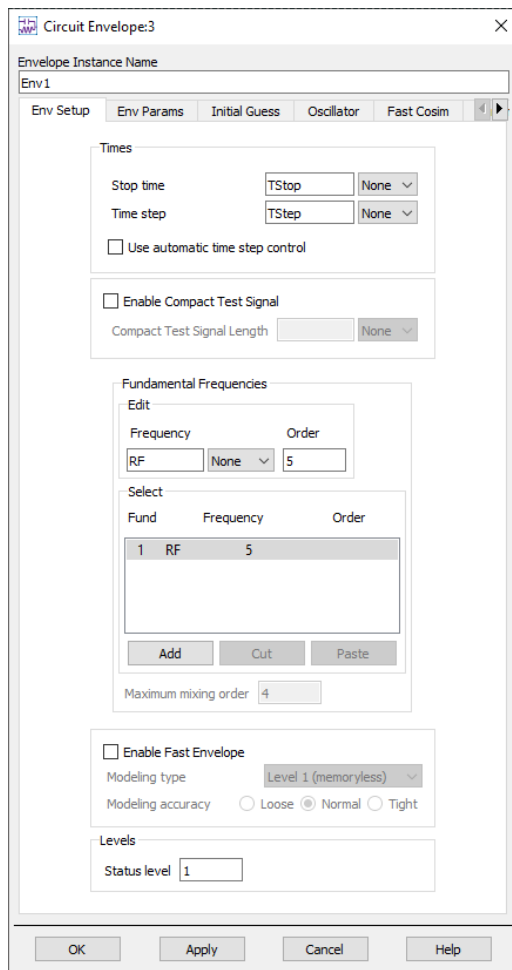
Длительность симуляции TStop = 250 нс выберем как два периода повторения радиоимпульса с небольшим запасом.



Режимом моделирования комплексной огибающей управляет контроллер Envelope (из палитры Simulation-Envelope).

Временные параметры расчета введем определённые выше. Частотные параметры определяются аналогично контроллеру Harmonic Balance, т.е.

задаются фундаментальные частоты и порядок гармоник от них. У нас в схеме одна несущая частота RF, пусть считается 5 гармоник от нее.



ENVELOPE

Envelope

Env1

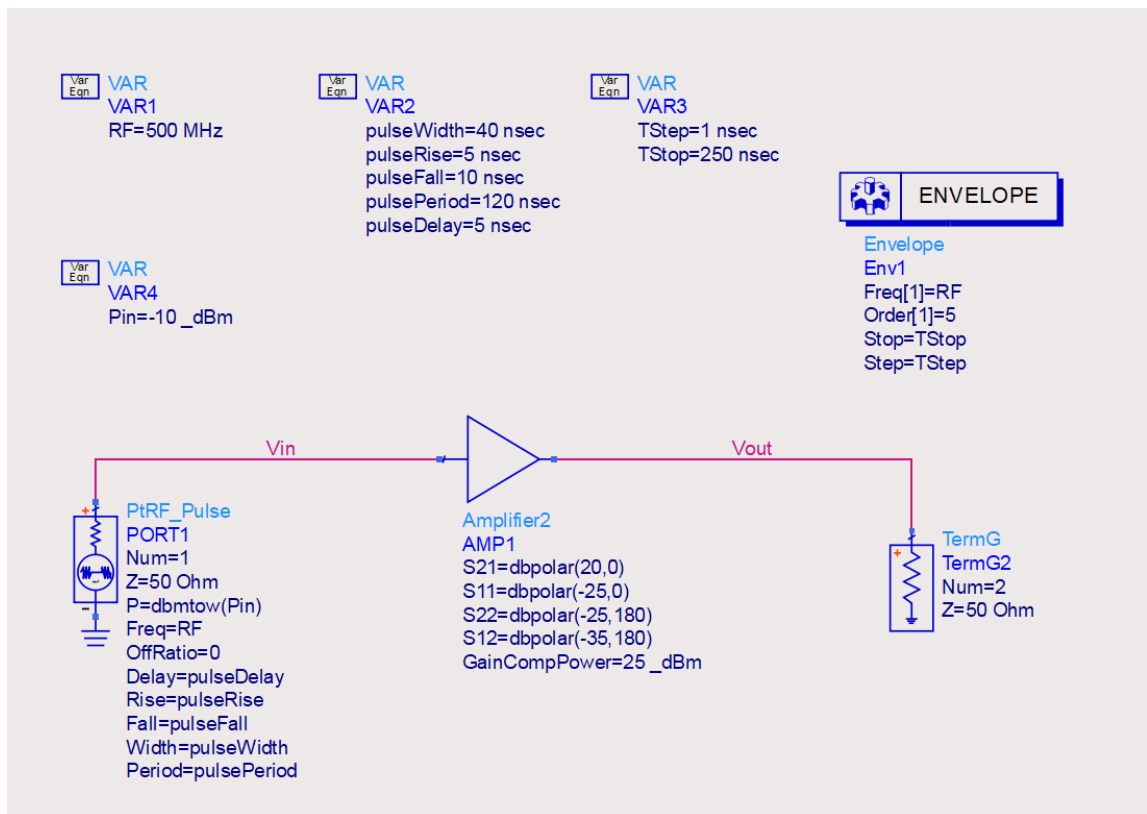
Freq[1]=RF

Order[1]=5

Stop=TStop

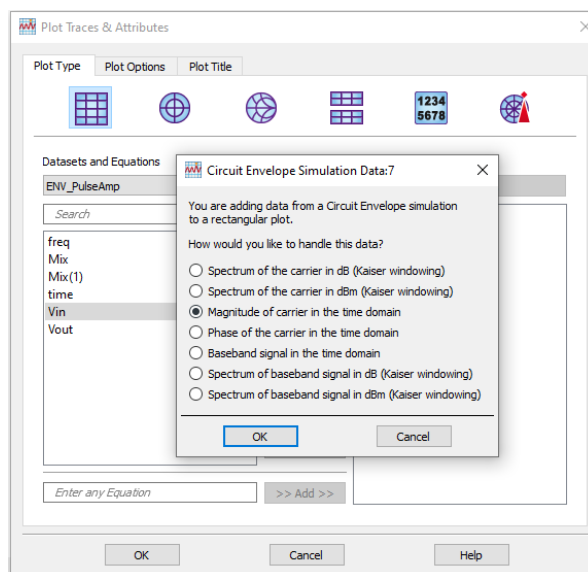
Step=TStep

Контроллер симуляции Envelope имеет дело с сигналами, поэтому поименуем входную цепь как Vin, а выходную как Vout. Схема перед запуском должна иметь следующий вид:

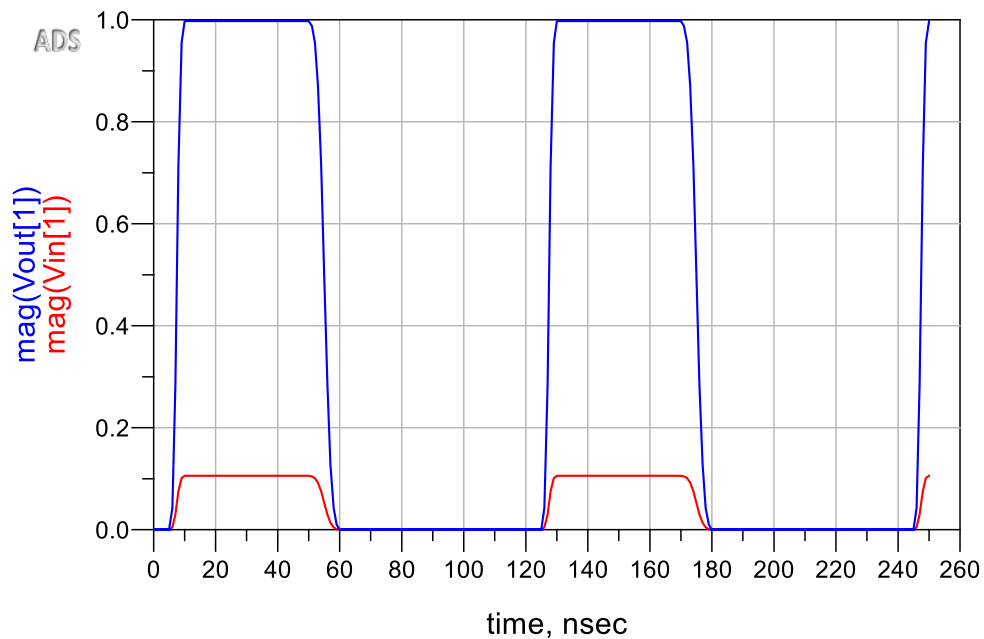


В области графиков построим на одном графике временные формы огибающих по входу V_{in} и по выходу V_{out} .

При попытке вывести сигнал с комплексной огибающей на прямоугольный график, обработчик спросит, какое из сечений надо отобразить. Нас интересует зависимость амплитуды огибающей от времени, выбираем Magnitude of carrier in the time domain.

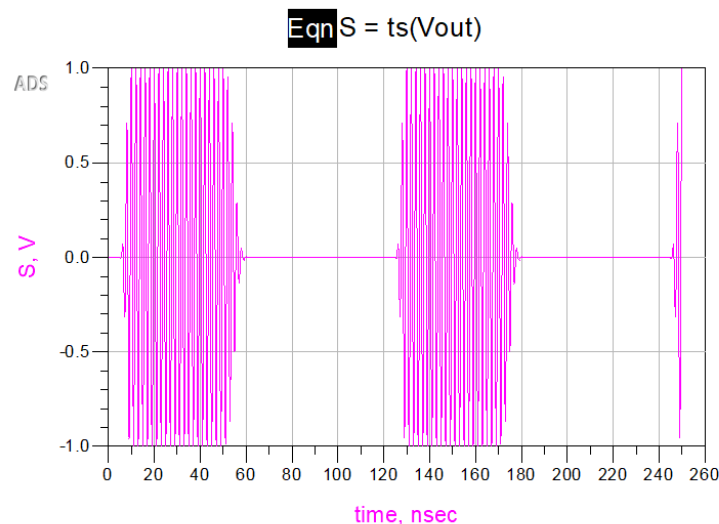


На этот же график выведем временную зависимость амплитуды огибающей по выходу V_{out} .



Данный запрос корректно работает, т.к. в расчете одна несущая и она имеет в сетке частот номер «1». При работе со схемами с переносом частоты необходимый номер не обязательно 1 и там измерительные выражения надо собирать с учетом сетки частот.

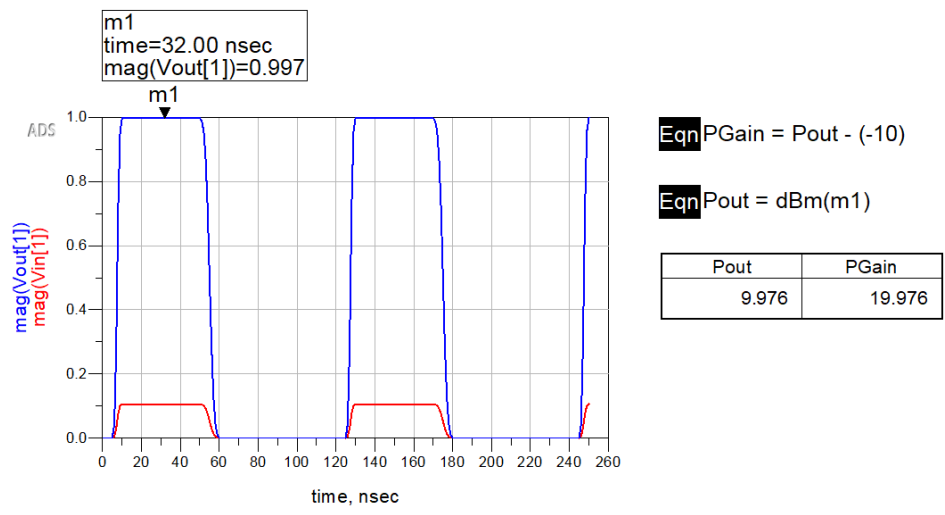
Также можно создать график полной временной формы модулированного сигнала с помощью функции `ts()`.



Функция `ts()` в указанном запросе строит действительный сигнал в $2 \times 16(f_{\max}/f_{\min}) + 1$ числе временных точек. Чтобы избежать переполнения памяти, максимальная длительность действительного сигнала, которую можно сформировать с помощью функции `ts()`, сверху ограничена 10001 отсчетом. Если этой длительности не хватает, то с помощью

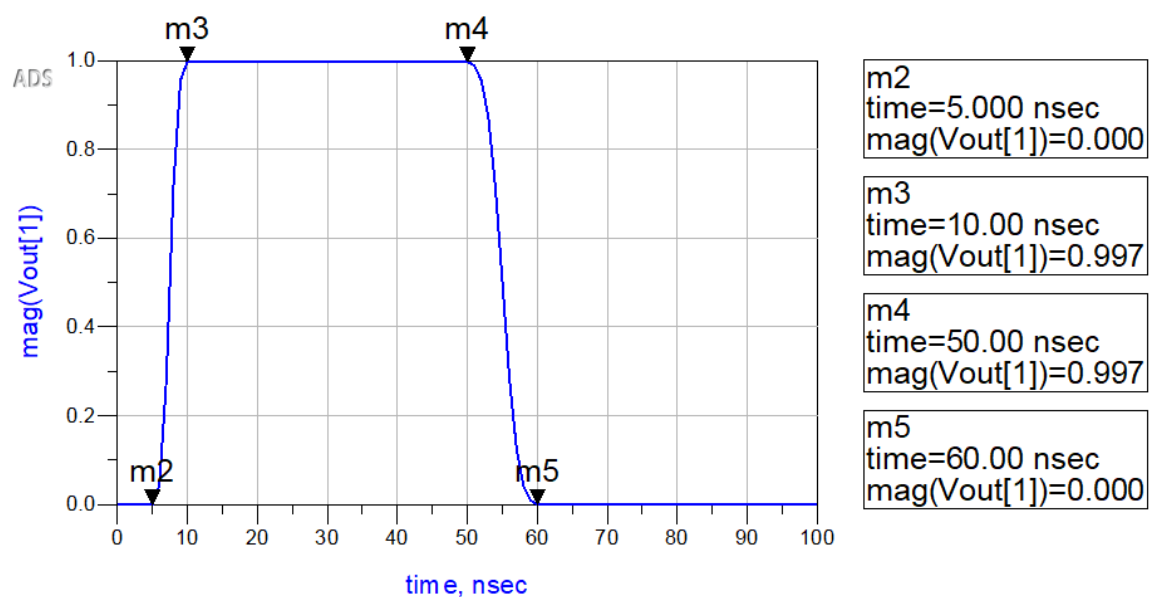
дополнительных аргументов в функции `ts()` можно ограничивать гармоники, с которых берутся данные для сборки действительного сигнала.

Определим коэффициент усиления с помощью графика огибающей выходного сигнала. Поставим маркер на V_{in} в пределах импульса. Значение в маркере имеет размерность напряжения, значит можно воспользоваться преобразованием `dBm()` для пересчета в мощность и вычесть уровень входной мощности $P_{in} = -10$ дБм.



Полученный коэффициент усиления совпадает с заданным в модель усилителя.

Пройдемся теперь маркером по характерным точкам огибающей выходного сигнала.



- маркер m2 показывает задержку начала радиоимпульса 5 нс;
- от m2 до m3 проходит 5 нс, что соответствует переднему фронту;
- от m3 до m4 проходит 40 нс, что соответствует длительности радиоимпульса;
- от m4 до m5 проходит 10 нс, что соответствует заднему фронту радиоимпульса.

Видно, что временные точки стоят там, где ожидаемо.

В дальнейшей работе надо хорошо понимать структуру результатов, выдаваемым режимом моделирования Envelope. Для любого сигнала можно вывести таблицу с запросом what(), которая покажет, что результат зависит от вектора частот freq и временного вектора time, а также то, что сигнал имеет комплексные значения. Понимание порядка независимых переменных и типа данных принципиально для корректного формирования измерительных выражений.

what(Vout)
Dependency : [time,freq]
Num. Points : [251, 6]
Matrix Size : scalar
Type : Complex

Как было сказано ранее, расчет ведется в два этапа – сначала НВ, потом переход в новую временную точку time. Вектор time соответствует свипу верхнего уровня, соответственно у него размерность только относительно себя.

time
0.0000 sec
1.000 nsec
2.000 nsec
3.000 nsec
4.000 nsec
5.000 nsec
6.000 nsec

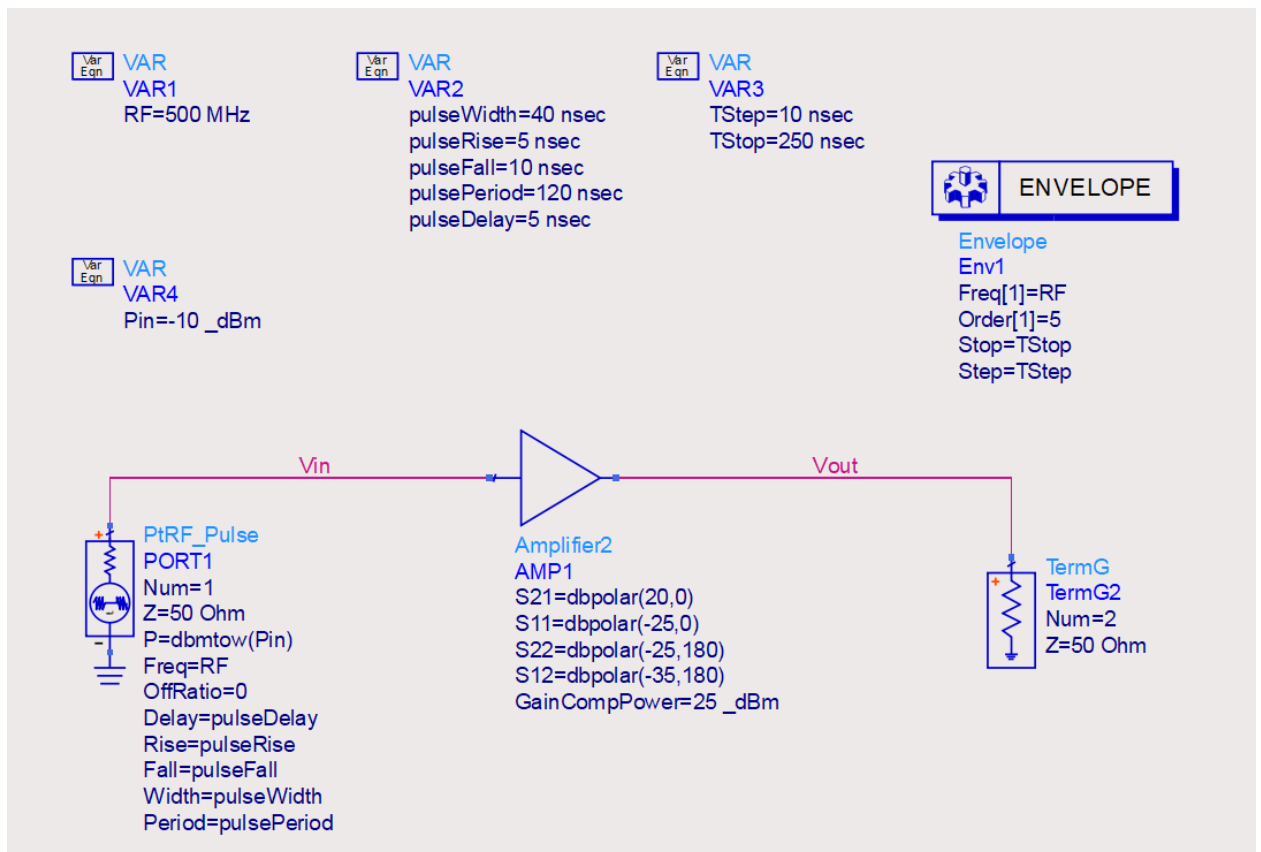
Поверх сетки частот freq накладывается вектор времени, поэтому для отображения частотной сетки можно зафиксировать какой-нибудь момент времени (например, 0).

freq[0, ::]
0.0000 Hz
500.0 MHz
1.000 GHz
1.500 GHz
2.000 GHz
2.500 GHz

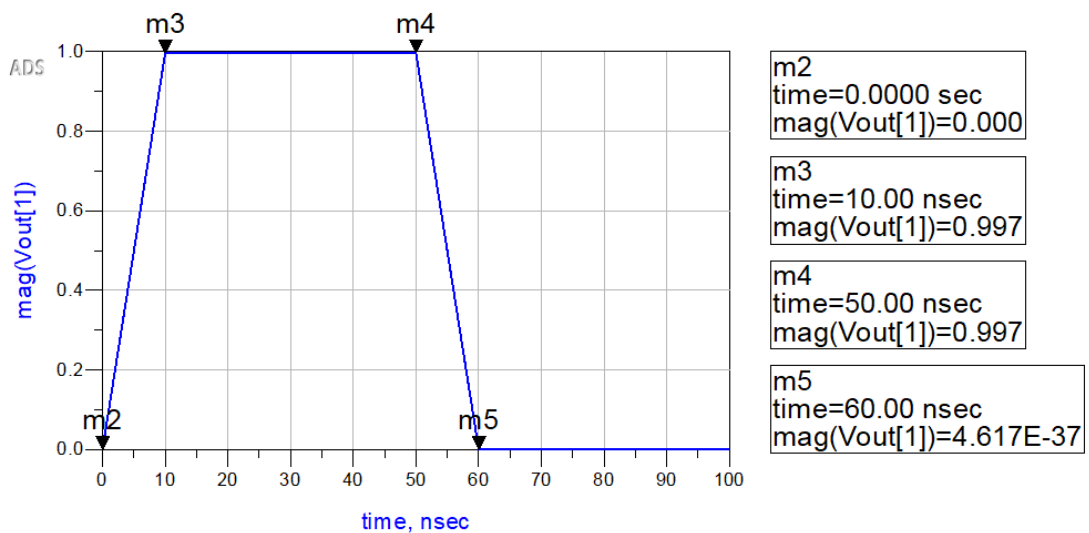
Аналогично режиму моделирования Harmonic Balance можно отобразить результат Mix, показывающий, как какая частота появилась из фундаментальных частот. Т.к. Mix относится к частотной части расчета, то для него тоже необходимо зафиксировать какой-нибудь момент времени.

freq	Mix[0, ::]
0.0000 Hz	0
500.0 MHz	1
1.000 GHz	2
1.500 GHz	3
2.000 GHz	4
2.500 GHz	5

Посмотрим, как будет вести себя моделирование, если нарушить условия Теоремы Котельникова. Установим шаг расчета вдвое большим, чем передний фронт радиоимпульса TStep = 10 нс.



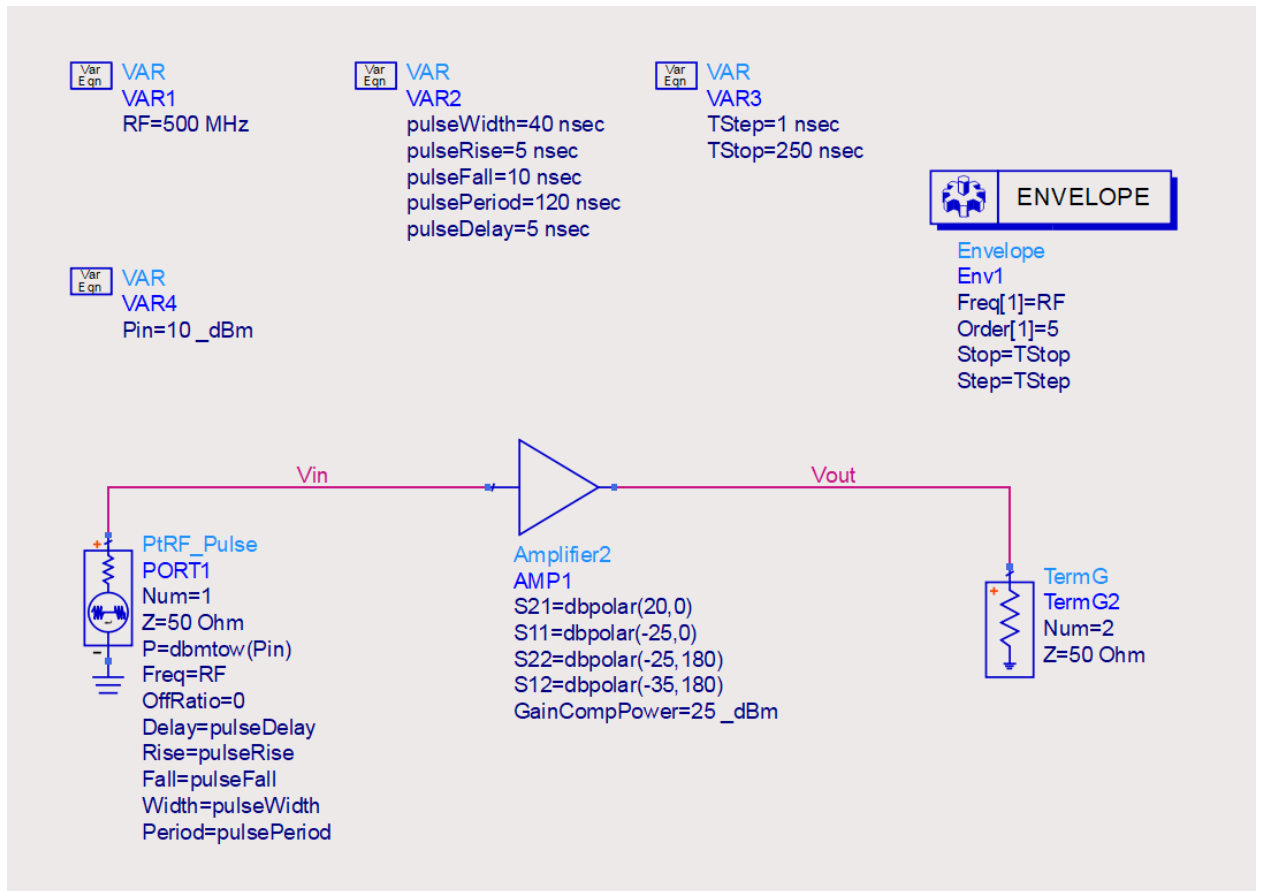
Посмотрим временные точки огибающей по выходу.



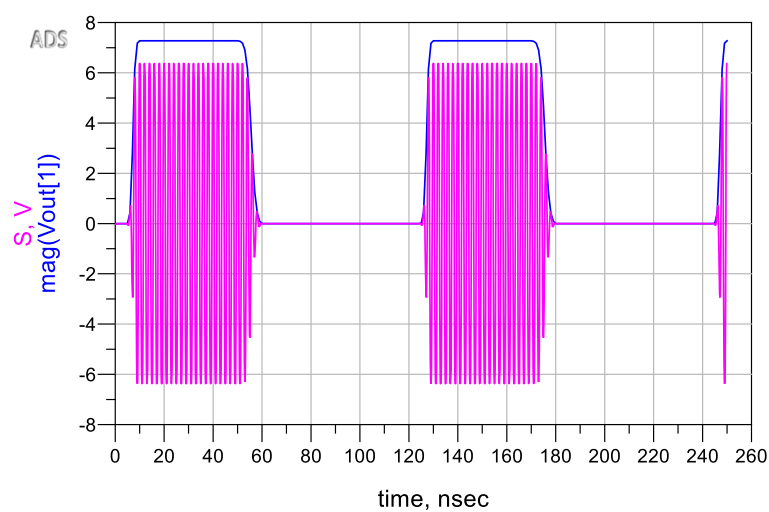
Видно, что временные точки не соответствуют ожидаемым. При этом симулятор не выдал никаких ошибок или предупреждений. За настройкой временного шага при использовании метода моделирования Envelope нужно аккуратно следить.

Вернем шаг расчета к корректному TStep = 1 нс, но теперь отправим усилитель в гарантированную компрессию. С учетом коэффициента

усиления усилителя 20 дБ и его точкой однодецибельной компрессии по выходу $P_{1dBout} = 25$ дБм, для ухода в компрессию ему достаточно на вход подать $P_{in} = 10$ дБм.

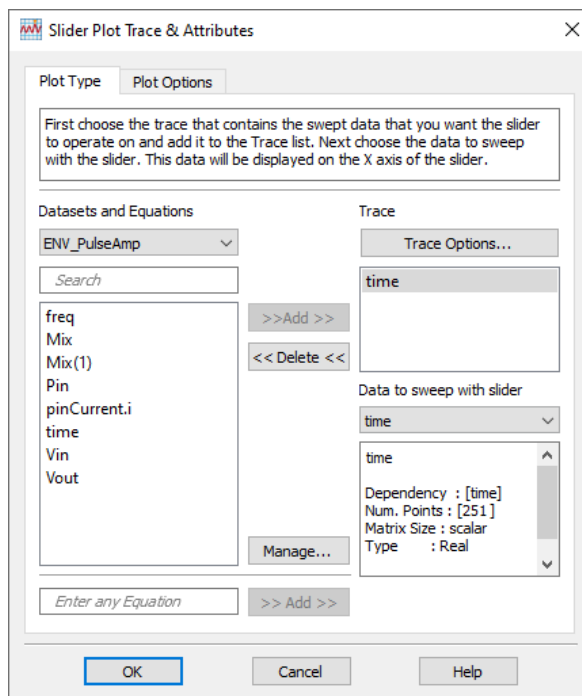


Совместим на одном графике огибающую выходного сигнала V_{out} и действительный выходной сигнал.

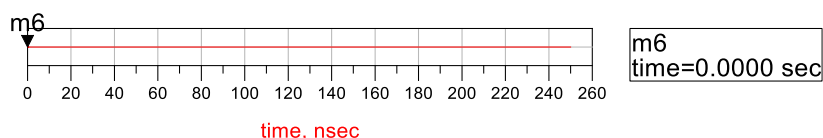


Огибающая по первой гармонике имеет большее значение, чем действительный сигнал. Объясним данный эффект с помощью спектрального представления выходного сигнала (мгновенного спектра). Для автоматизации

выбора момента времени для отображения мгновенного спектра воспользуемся слайдером. По команде Insert – Slider добавляем слайдер и в открывшемся окне в левом списке выбираем независимую переменную, к которой привяжем слайдер time. По кнопке >>Add>> добавим его в правый список.

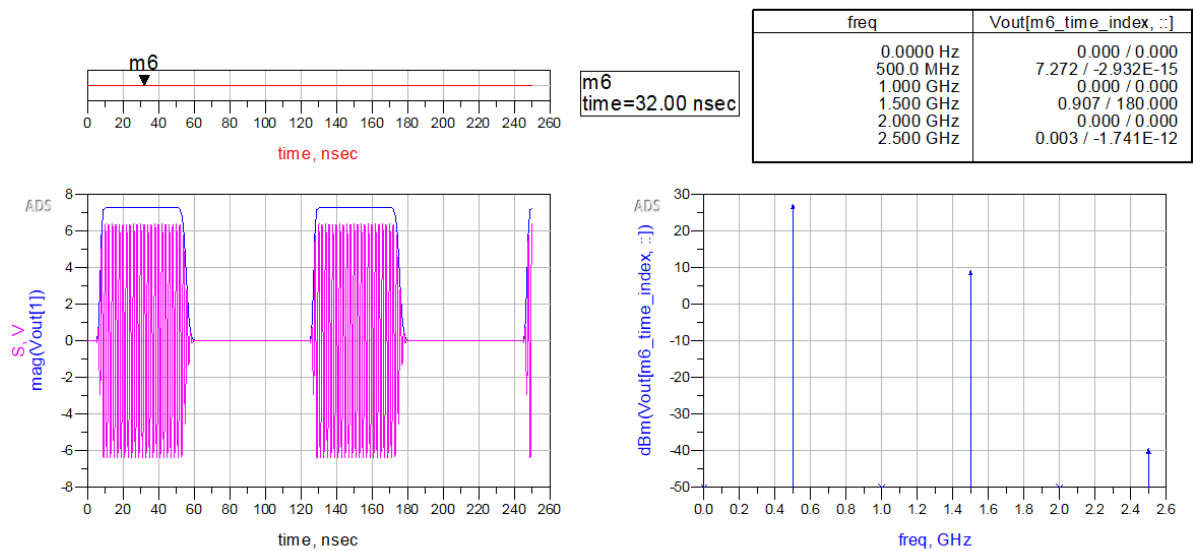


В области графиков появится слайдер по time с размещенным в нем маркером.



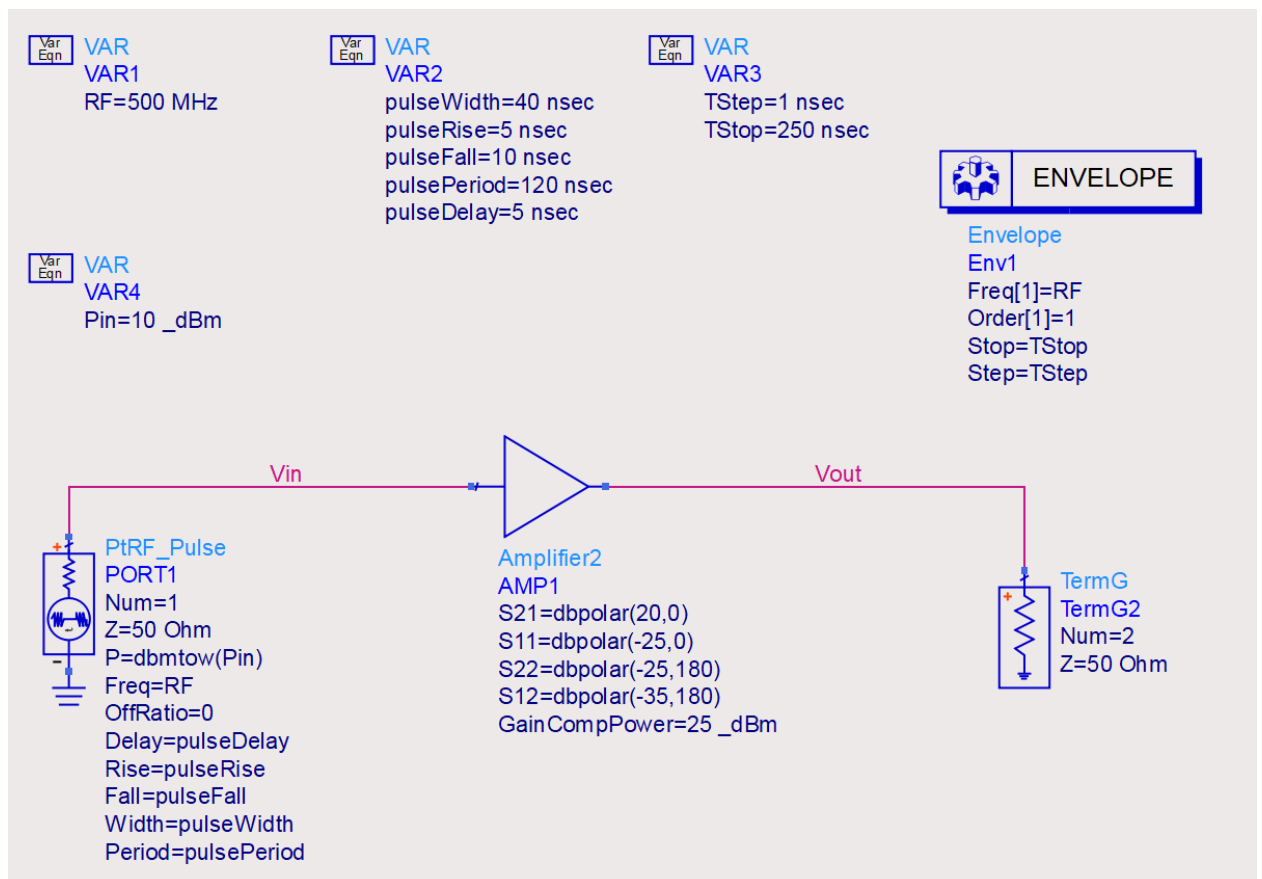
Автоматически к маркеру в области графиков создастся связанное с положением маркера в слайдере значение вида «mName_sweemName_index» («m6_time_index» в примере), в котором будет индекс текущего положения маркера в данных на слайдере. Используем этот индекс для получения зависимости мгновенного спектра выходного сигнала Vout от момента времени time. Ранее мы уже определили порядок независимых переменных в результате.

Установим маркер на слайдере в пределах основной части радиоимпульса, 30 нс в примере.

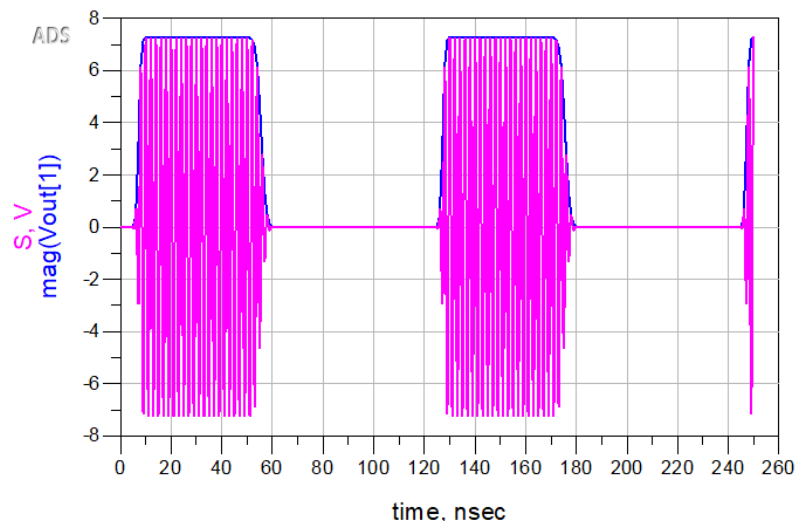


На графике мгновенного спектра видно, что нечетные гармоники имеют относительно большое значение. Если их спектральное представление таблицей, то также можно увидеть, третья гармоника находится в противофазе к основной гармонике, и, собственно, поэтому падает уровень выходного сигнала.

В модели установим порядок расчета гармоник 1.



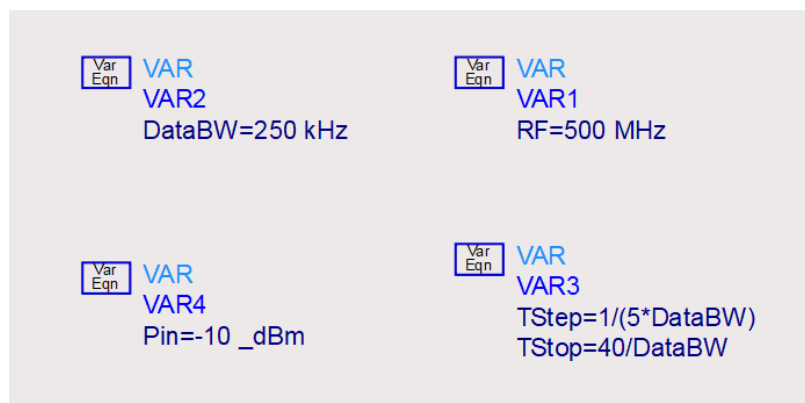
На изучаемых ранее графиках теперь видно, что огибающая первой гармоники совпадает с амплитудой действительного сигнала. Это явно некорректные результаты для усилителя мощности, работающего в компрессии.



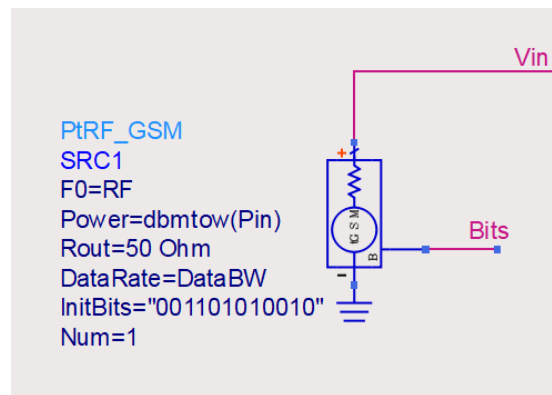
Данное небольшое сравнение говорит о том, что и частотные параметры режима моделирования Envelope необходимо корректно задавать.

Работа с модулированным сигналом

Соберем схему (ENV_ModulatedAmp), в которой через усилитель пропустим GSM-модулированный сигнал. Несущая частота будет $RF = 500$ МГц, частота следования символов $DataBW = 250$ кГц. Полоса информационной составляющей GSM-сигнала определяется частотой следования символов $DataBW$, поэтому параметры временного расчета будем брать относительно него. Мощность входного сигнала пусть будет -10 дБм, чтобы работать в линейном участке усилителя мощности.

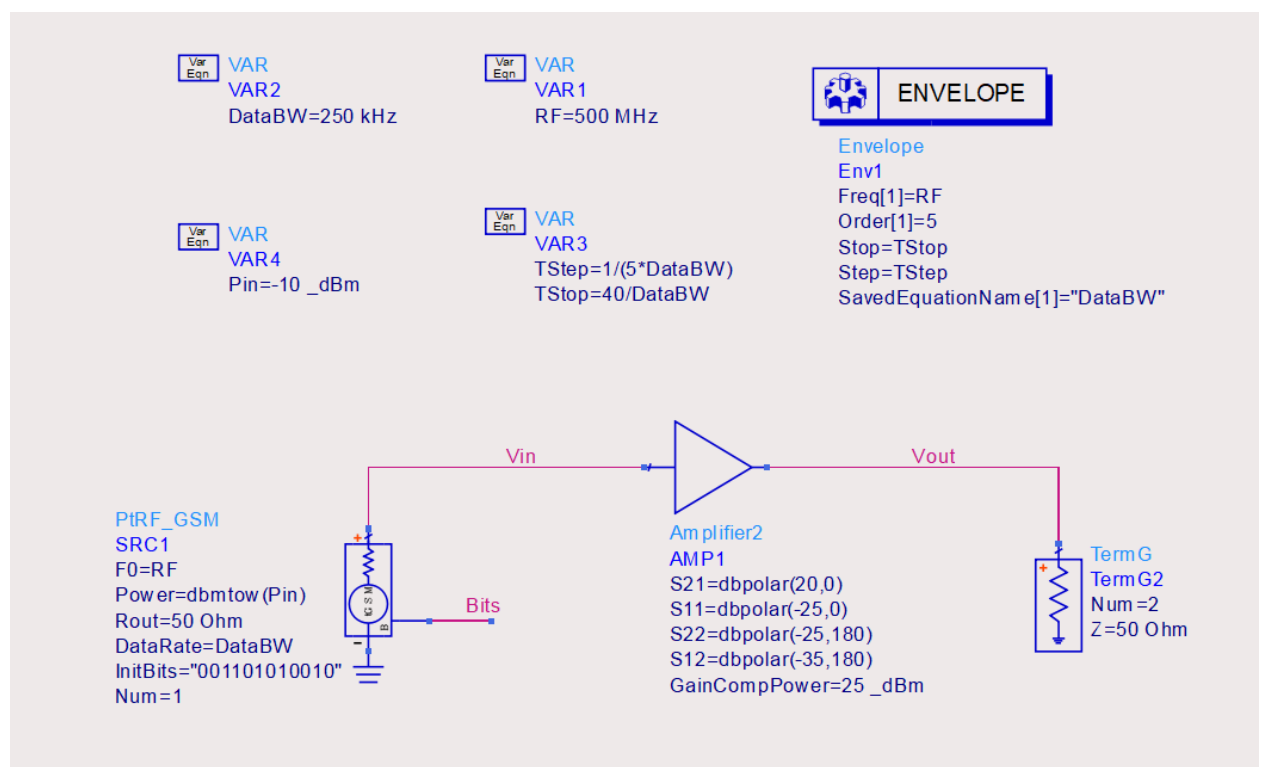


В качестве источника сигналов будем использовать источник модулированных GSM-сигналов PtRF_GSM из палитры Sources-Modulated. Данный источник еще выдает с отдельного порта цифровую модулирующую последовательность, поименуем ее как Bits.

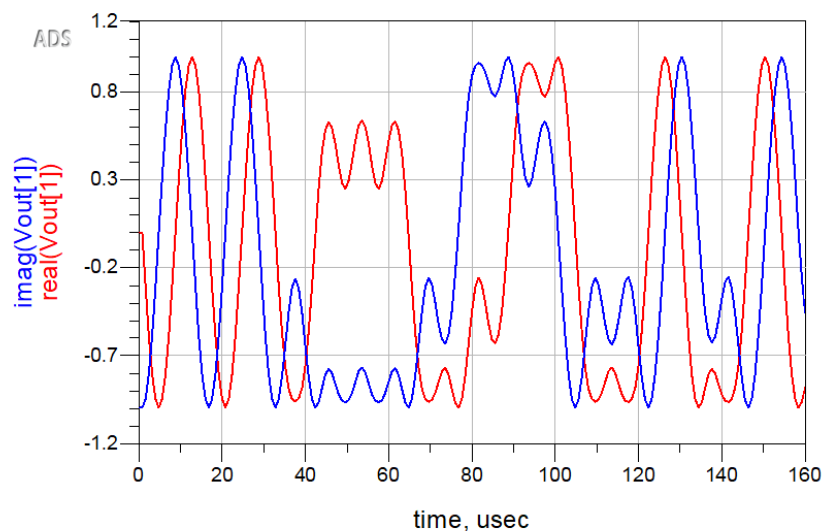


Также в расчетах на графиках понадобится полоса информационного сигнала. Добавим в сохраняемые в результат переменную DataBW.

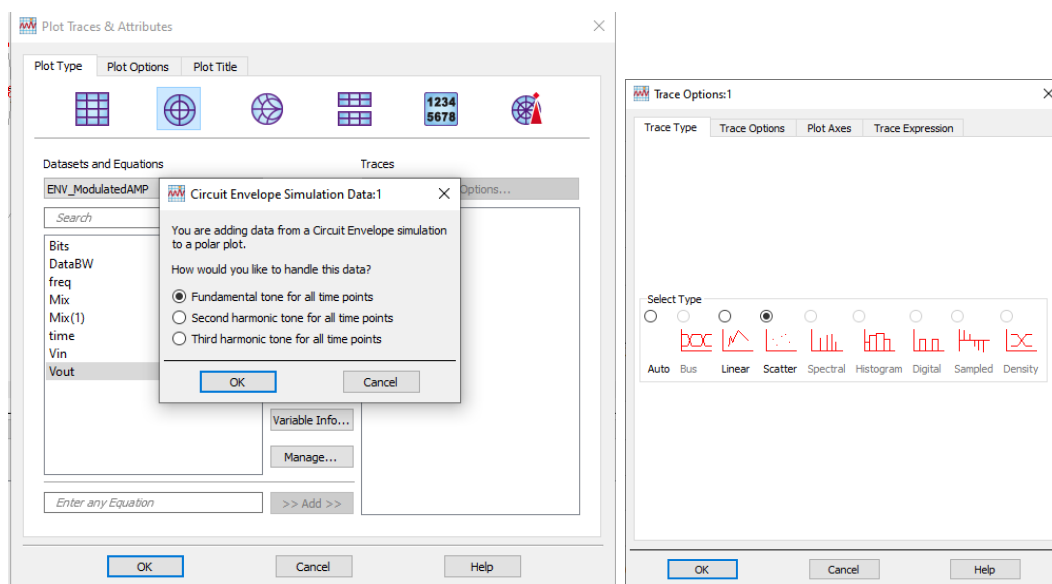
Модель перед запуском должна выглядеть следующим образом.



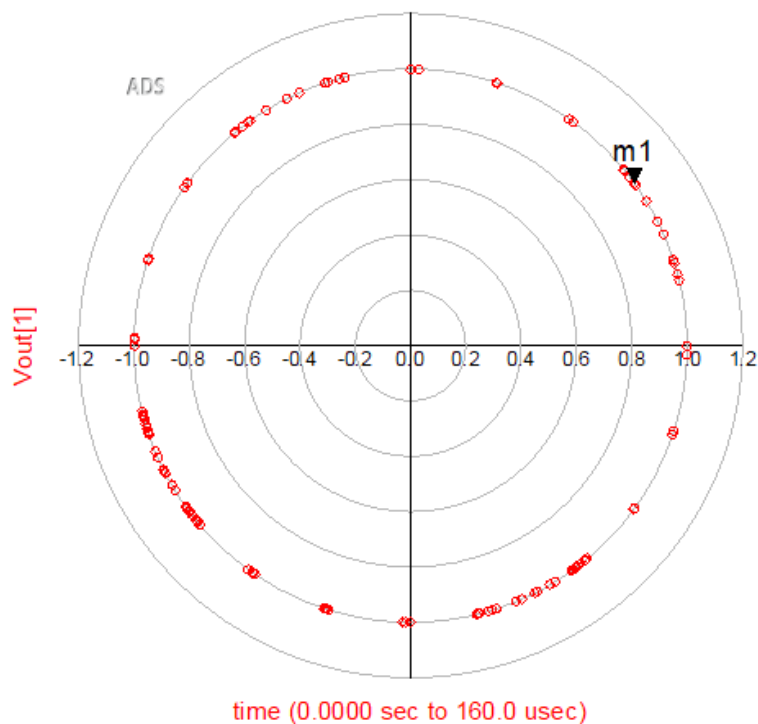
В области графиков выведем действительную и мнимую часть огибающей первой гармоники выходного сигнала Vout.



Модулированный GSM-сигнал относится к модуляциям с постоянной амплитудой. Выведем на полярный график созвездие сформированного GSM_сигнала. При установке на полярный график необходимо выбрать предложение показать точки по основной гармонике, а также выбрать тип графика Scatter



Разместив маркер на точках созвездия, можно провести расчет выходной мощности (в точке).



m1
time=11.20 usec
Vout[1]=0.997 / 36.000

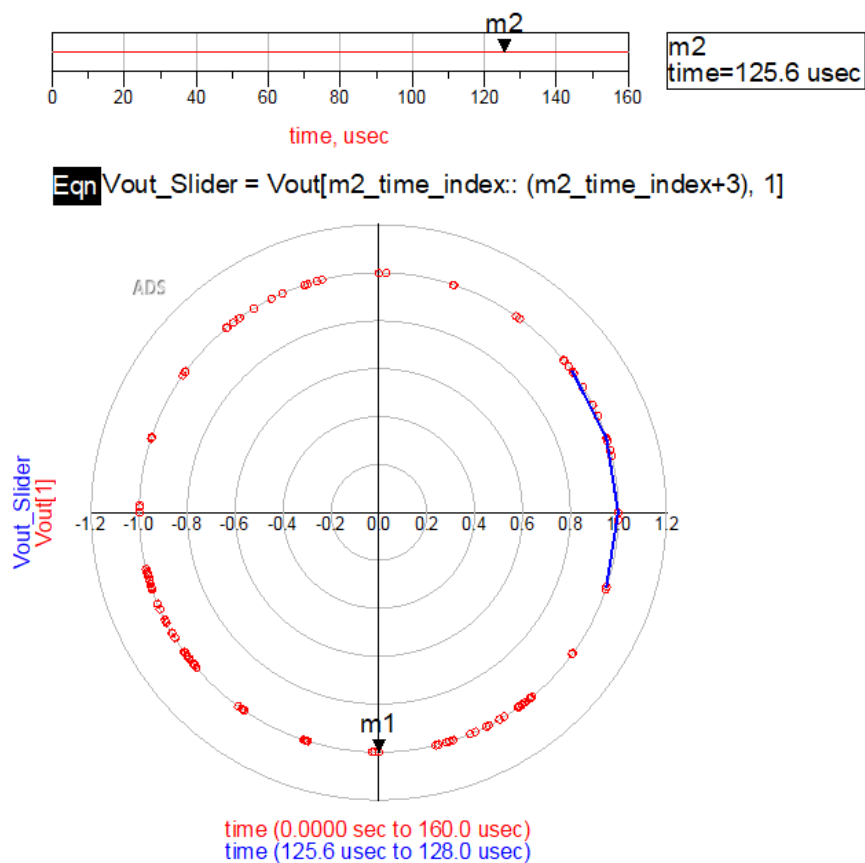
Eqn Pout_Peak = dBm(m1)

time	Pout_Peak
11.20 usec	9.976

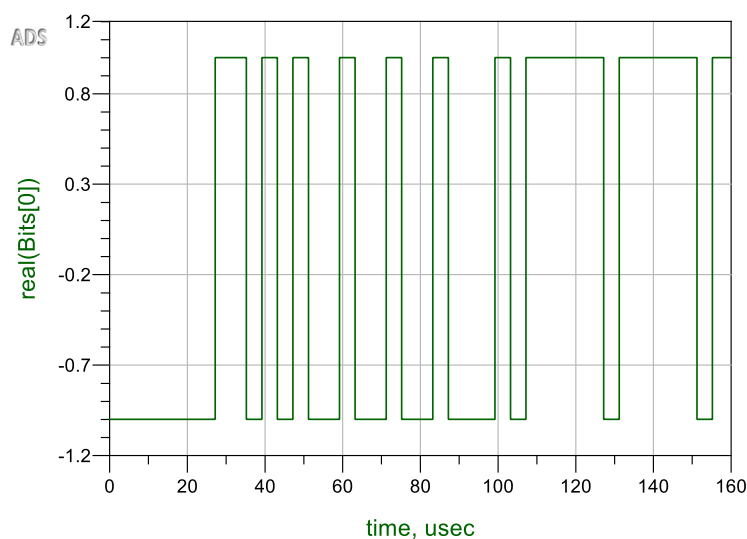
Усиление получается $10 - (-10) = 20$ дБ, что соответствует заданным свойствам усилителя.

Маркер m1 можно подвигать по меткам времени и увидеть, как baseband-сигнал перемещается по комплексной плоскости.

Данное перемещение можно анимировать с помощью слайдера по времени time. С его помощью можно вырезать 3..4 последовательных отсчета из Vout на первой гармонике и затем, сдвигая положение маркера на слайдере, получить анимацию.

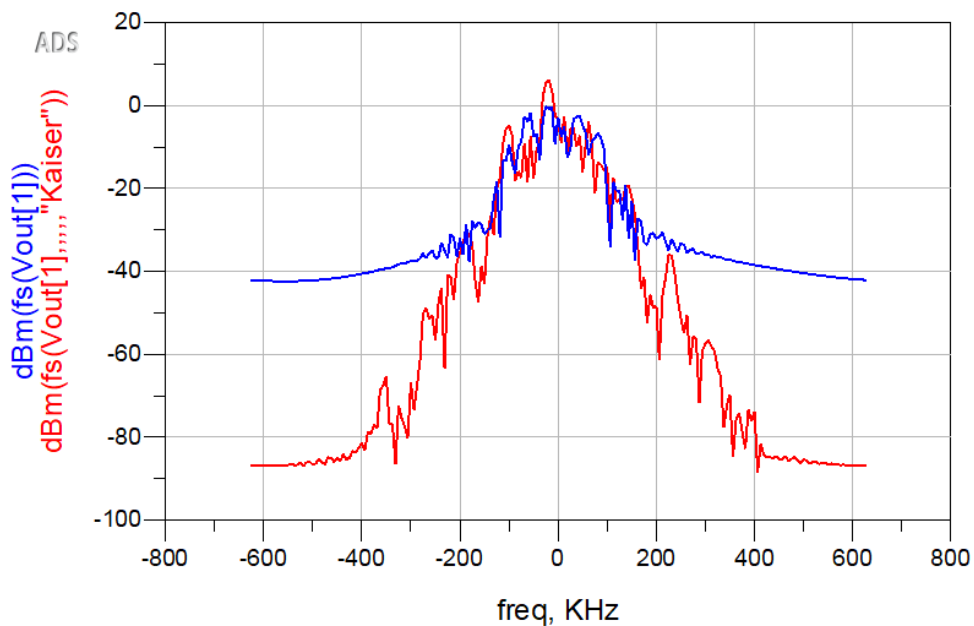


Для контроля цифрового сигнала можно вывести цифровой поток Bits. При создании графика нужно выбрать постобработку Baseband signal in the time domain и тип графика Digital.



Также можно вывести амплитудный спектр основной гармоники огибающей выходного сигнала. Для создания спектра со взвешиванием при создании графика нужно выбрать постобработку Spectrum of the carrier in dBm (Kaiser windowing). Также в этот график выведем спектр без

взвешивания. Взвешивание при спектральном анализе необходимо при работе с непериодическими сигналами и для уменьшения влияния несовпадения кратности частот дискретизации и частот в сигнале.



С учетом того, что анализируется модулированный сигнал, то практический смысл имеет понятие канальной мощности (Channel Power) как интеграла в некотором рабочем диапазоне частот, а не на одной спектральной составляющей. Для этого воспользуемся функцией `channel_power_vr()`. Эта функция возвращает канальную мощность в заданном частотном диапазоне в ваттах. Для преобразования в дБм обернем результат в `wtodbm()`.

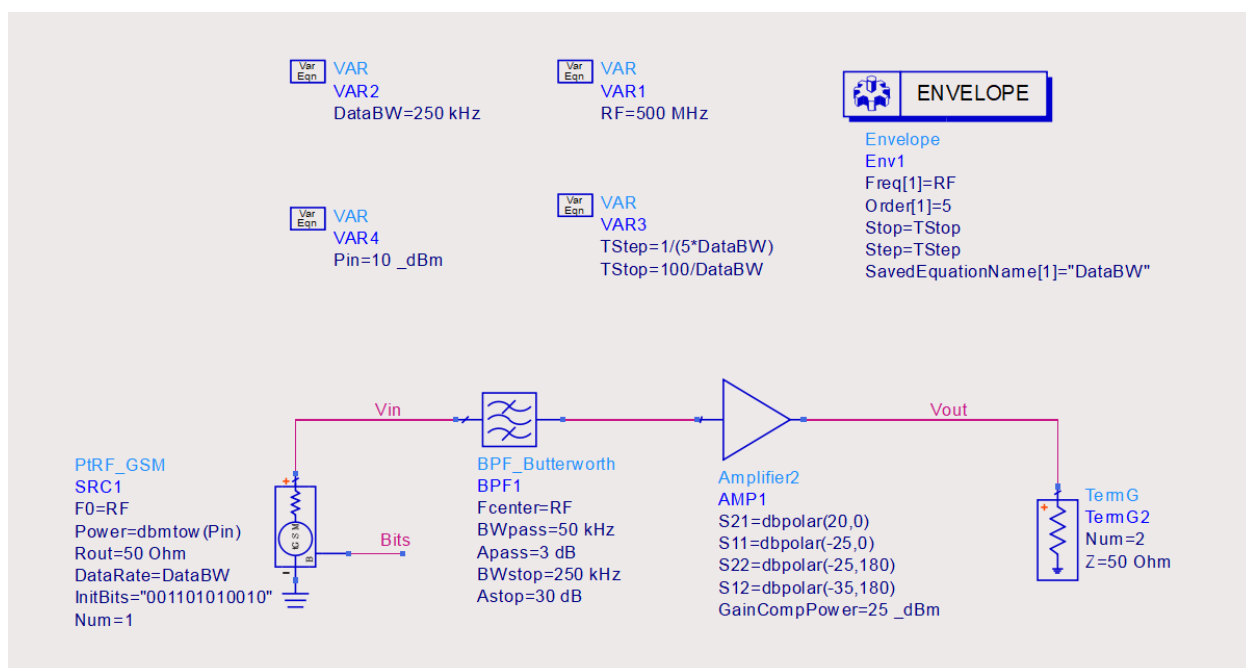
Для использования функции `channel_power_vr` необходимо знать индекс частоты (в текущем случае 1), волновое сопротивление линии (50 Ом), границы частотного канала (в Гц, отстройку от центральной частоты) и оконную функцию с параметром (необязательно). Ширина полосы сигнала определяется частотой следования символов `DataBW`, которую пробросили из расчета.

$$\text{Eqn ChPw} = \text{wtodbm}(\text{channel_power_vr}(Vout[1], 50, \{-DataBW/2, DataBW/2\}, "Kaiser"))$$

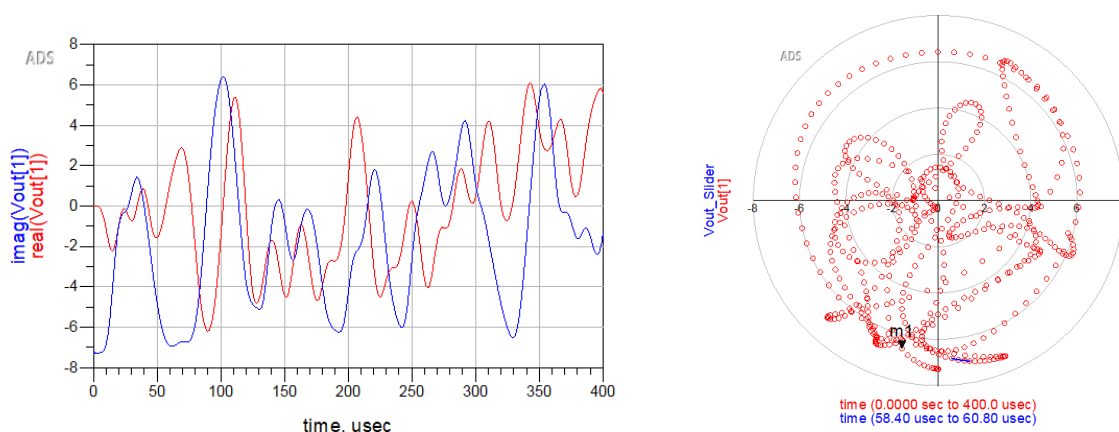
ChPw
9.964

Получаем выходную канальную мощность 10 дБм, что соответствует ожидаемым $-10+20$ дБм.

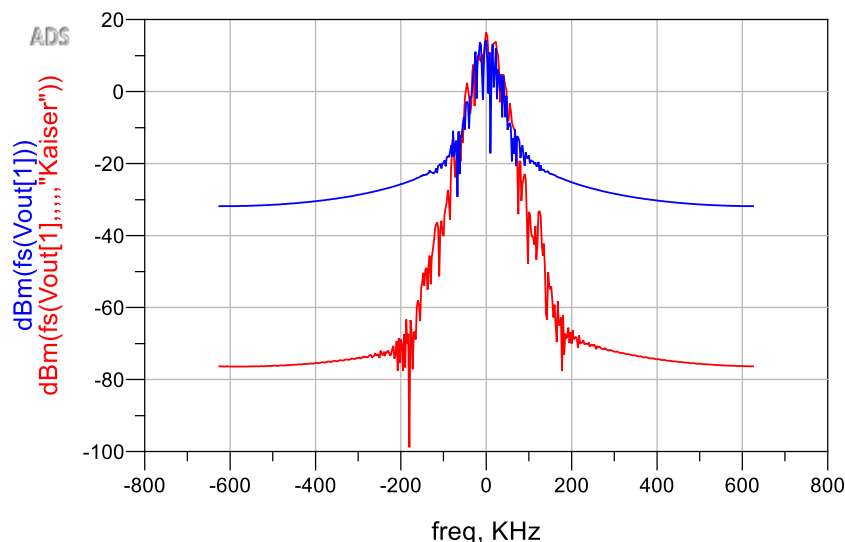
Испортим теперь канал, поставив перед усилителем мощности фильтр с полосой пропускания в 5..6 раз уже, чем полоса сигнала DataBW. Также отправим усилитель в компрессию, подав на вход 10 дБм. Чтобы в полной мере пронаблюдать эффекты искажения сигнала, длительность расчета TStop необходимо увеличить в 3..4 раза.



В области графиков по форме огибающей первой гармоники и созвездию будет хорошо видно, как сигнал исказился.



По спектральному представлению это будет не так видно, но, если посчитать канальную мощность, то усиление выйдет всего 13 дБ вместо ожидаемых 20 дБ (23–10).



Eqn ChPw = wtodbm(channel_power_vr(Vout[1], 50, {-DataBW/2, DataBW/2}, "Kaiser"))

Работа с амплитудным детектором

Построим модель с переносом на нулевую частоту в виде детектора огибающей (схема ENV_EnvDet). В данной схеме будем использовать логарифмический детектор огибающей LodACDemod.

Данный детектор работает как управляемый напряжением источник тока по следующей формуле:

$$I_{\text{det}} = A_{\text{sl}} \lg \left(\frac{V_{\text{in}}}{V_{\text{int}}} \right)$$

где A_{sl} - угол наклона выходной характеристики в логарифмическом масштабе, А/декада;

V_{in} - амплитуда напряжения входного сигнала, В;

V_{int} - чувствительность детектора, определяется как значение V_{in} при котором I_{det} выдается как 0, В.

Использование логарифмической характеристики детектора позволяет получать выходной сигнал линейно зависимым от входной мощности, заданной в дБм.

Определим характеристики детектора исходя из того, что он должен обрабатывать диапазон входных мощностей P_{in} от -50 дБм до 10 дБм и выдавать выходной сигнал V_{det} пропорционально входной мощности, где 0 В соответствует -50 дБм, а 5 В соответствует 10 дБм.

Чтобы получать выходной сигнал детектора в виде напряжения, необходимо его умножить на выходное сопротивление детектора $V_{\text{det}} = R_{\text{det}} I_{\text{det}}$. Пусть оно является $R_{\text{det}} = 50 \text{ Ом}$. Также, пусть детектор согласован по входу на $R_{\text{in}} = 50 \text{ Ом}$

Определим A_{sl} и V_{int} . Т.к. большая входная мощность соответствует большему выходному сигналу, то наклон кривой положительный $A_{\text{sl}} > 0$. Выходному сигналу $V_{\text{det}} = 0 \text{ В}$ соответствует точка $V_{\text{in}} = V_{\text{int}}$. Она должна соответствовать входной мощности $P_{\text{in}} = -50 \text{ дБм}$. Пересчитаем P_{in} в V_{in} (по входному импедансу детектора $R_{\text{in}} = 50 \text{ Ом}$)

$$P_{\text{in}} [\text{дБм}] = 10 \lg \left(\frac{V_{\text{in}}^2}{2R_{\text{in}} \times 1 \text{ мВт}} \right) \text{ или } V_{\text{in}} = 10^{\frac{P_{\text{in}} [\text{дБм}]}{20}} \sqrt{2R_{\text{in}} \times (1 \text{ мВт})}.$$

Получается $V_{\text{int}} = 1 \text{ мВ}$.

Теперь определим A_{sl} . Точка $V_{\text{int}} (P_{\text{in}} = 10 \text{ дБм}) = 1 \text{ В}$. Подставив в логарифмическую характеристику детектора, получаем

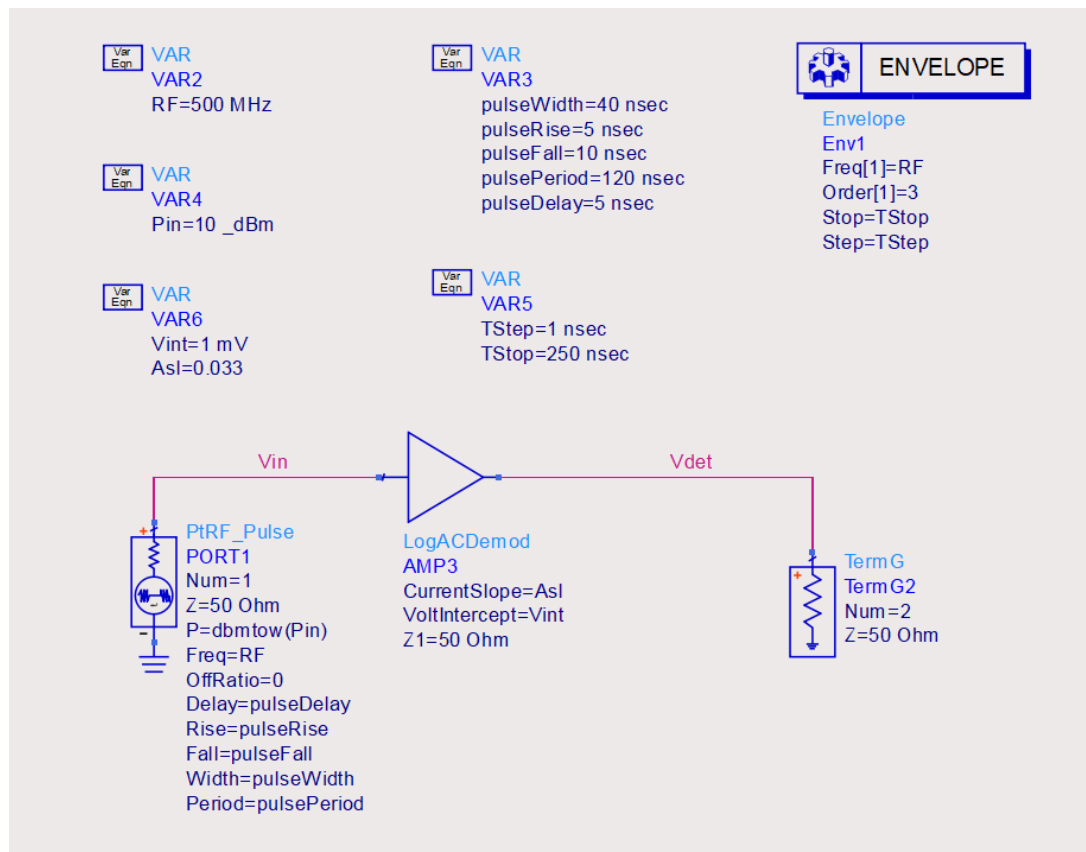
$$I_{\text{det}} (P_{\text{in}} = 10 \text{ дБм}) = A_{\text{sl}} \lg \left(\frac{1 \text{ В}}{1 \text{ мВ}} \right) = A_{\text{sl}} \times 3.$$

С другой стороны, $I_{\text{det}} (P_{\text{in}} = 10 \text{ дБм}) \times R_{\text{det}} = 5 \text{ В}$. Отсюда,

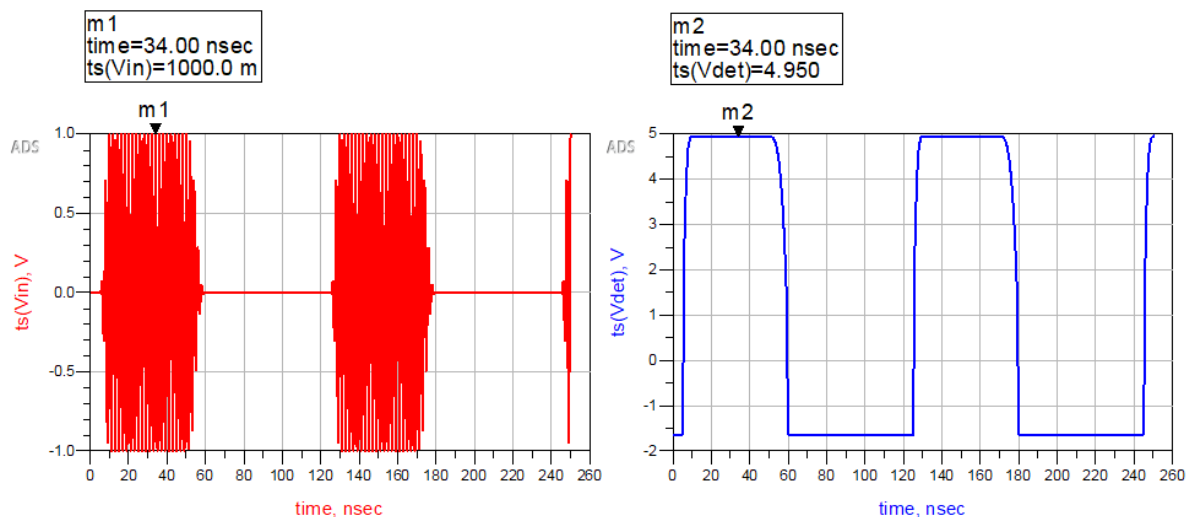
$$A_{\text{sl}} = \frac{V_{\text{det}} (P_{\text{in}} = 10 \text{ дБм})}{R_{\text{det}} \lg \left(\frac{V_{\text{in}} (P_{\text{in}} = 10 \text{ дБм})}{V_{\text{int}}} \right)} = \frac{5}{50 \times \lg \left(\frac{1 \text{ В}}{1 \text{ мВ}} \right)} = 0,033$$

Данные логарифмического детектора посчитаны. Соберем схему. Временные диаграммы огибающей возьмем аналогично схеме ENV_PulseAmp.

Сначала построим модель на входную мощность 10 дБм – верхнюю границу работы детектора.

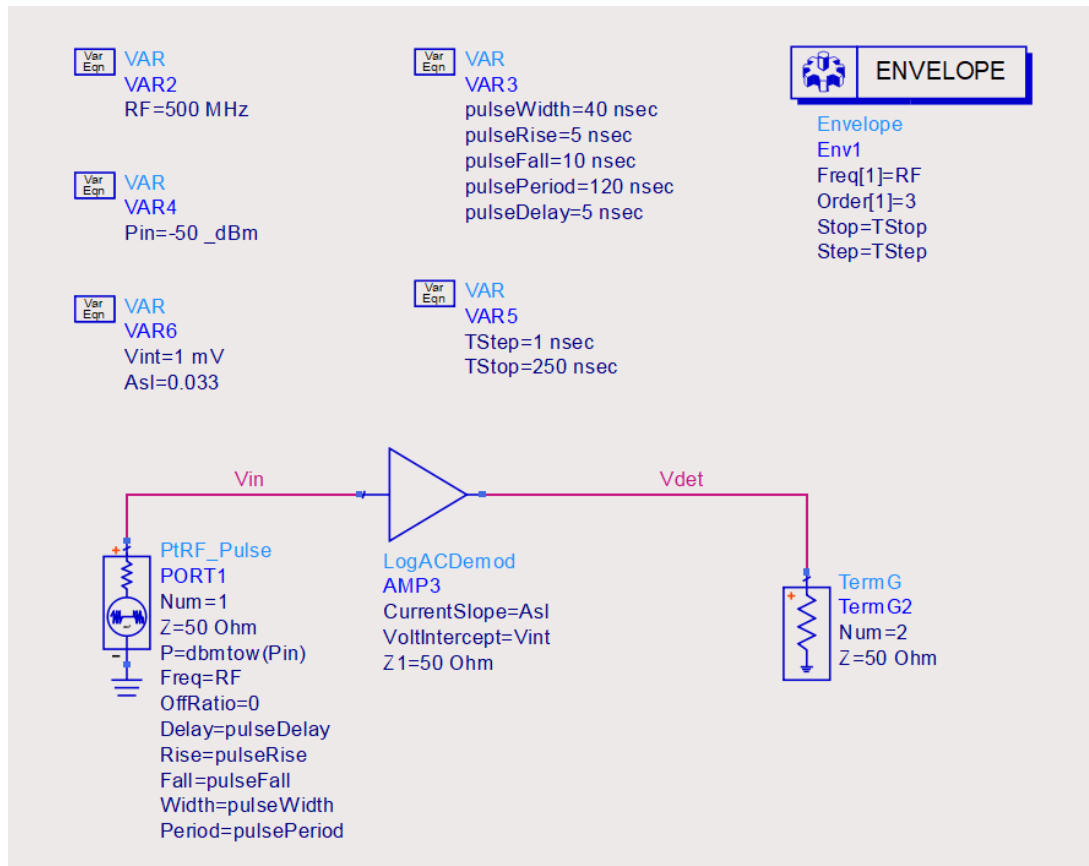


На соседние графики выведем временные формы моделированного и детектированного сигналов.

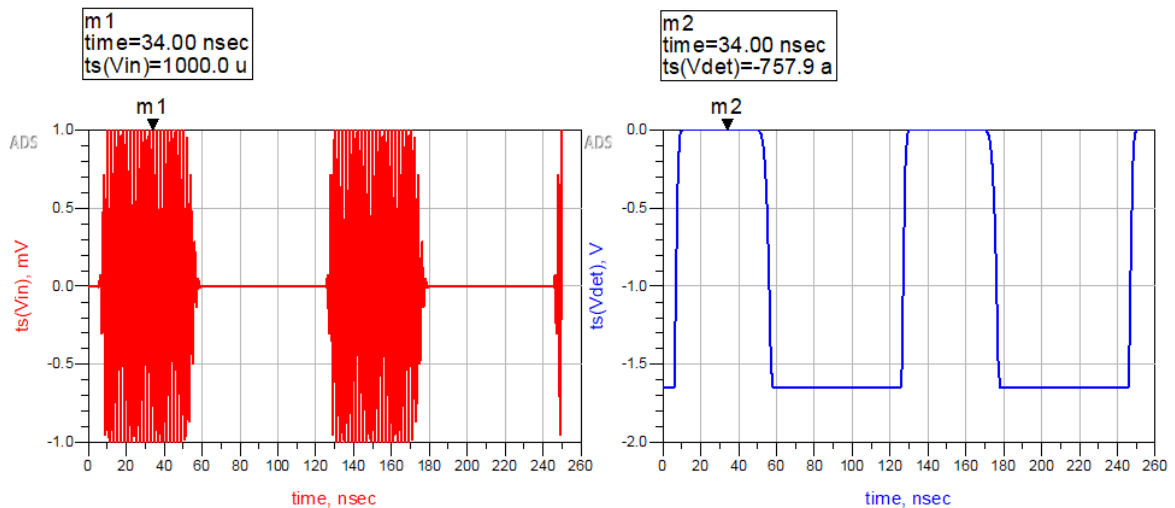


Видны соответствия ожидаемых входных V_{in} (1 В) и выходного уровня V_{det} (5 В). При этом, в промежутках между импульсами появляется отрицательное значение. Оно связано с тем, что в эти моменты $V_{in} \ll V_{int}$ и значение логарифма отрицательное. Данные с этих моментов некорректны и их нельзя учитывать.

Проведем моделирование при входной мощности -50 дБм.



Результаты также соответствуют ожидаемым $V_{in} = 1$ мВ и $V_{det} = 0$ В.

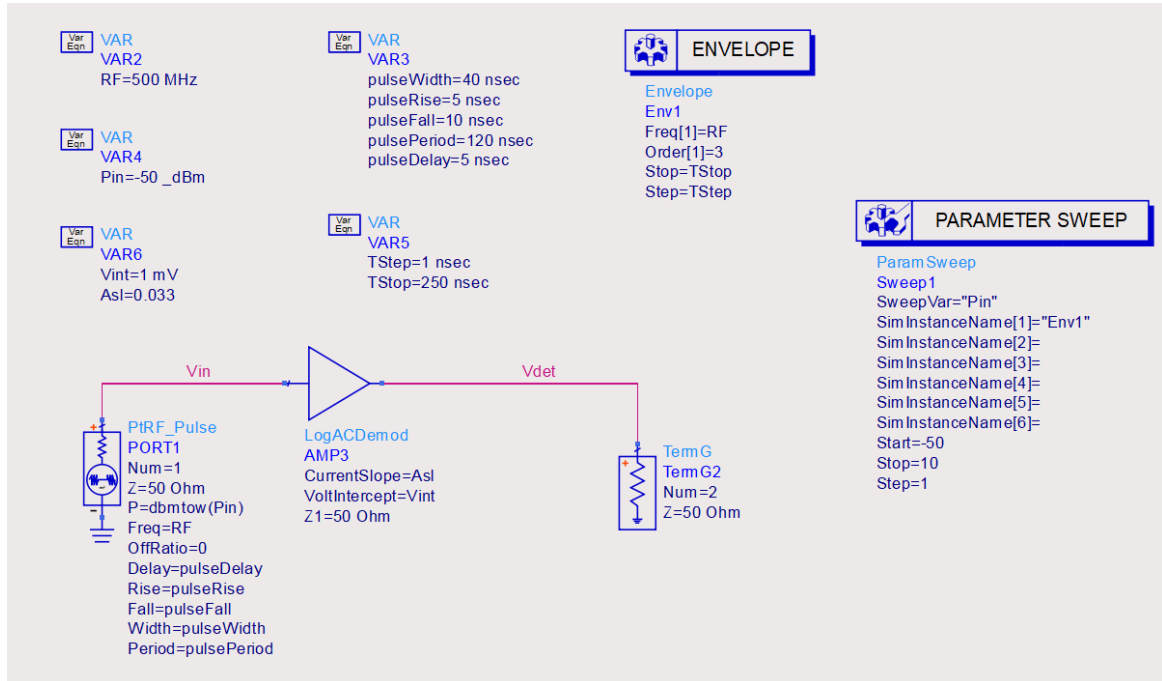


Построим логарифмическую характеристику детектора. Определять выходной сигнал нужно где-то в пределах импульса. Выше маркеры стоят в момент времени 34 нс, это удобная точка. Определим, какому индексу в векторе time этот момент времени соответствует и используем этот индекс.

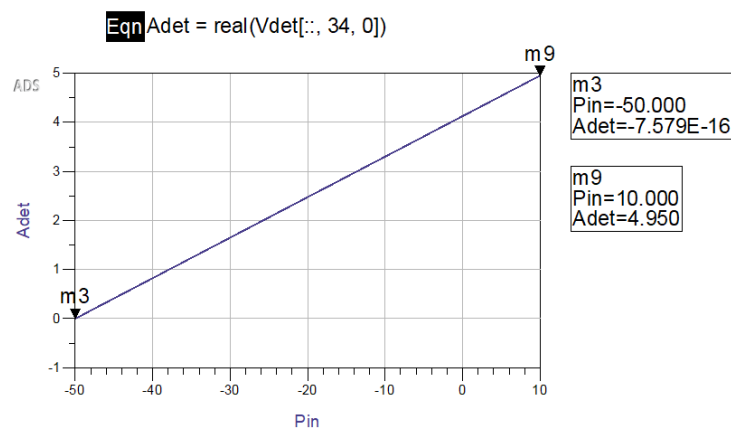
Eqn t_idx = find_index(time, 34 nsec)

t_idx
34

Добавим свип Pin в диапазоне от -50 дБм до 10 дБм.



Иерархия независимых переменных теперь следующая [Pin, time, freq]. Нам нужно построить зависимость выходного сигнала по постоянному току (гармонике номер 0) в момент времени 34 нс (индекс 34, определен выше) при свипе Pin.



Полученная характеристика соответствует заданной в детекторе.

Задание на выполнение

В соответствии с вариантом промоделировать несколько схем с использованием режима моделирования комплексной огибающей.

В таблицах 1-4 приведены параметры основных блоков моделей и параметров сигналов по вариантам для соответствующих этапов лабораторной работы.

Таблица 1 – Параметры усилителя мощности

Вариант	Кр, дБ	S11, дБ/°	S22, дБ/°	S12, дБ/°	P1dBOut, дБм
1	22	-22/0	-23/180	-30/180	20
2	23	-23/0	-24/180	-31/180	21
3	25	-24/0	-25/180	-29/180	19
4	24	-21/0	-26/180	-28/180	22
5	19	-25/0	-22/180	-32/180	26
6	18	-22/0	-23/180	-30/180	20
7	26	-23/0	-24/180	-31/180	21
8	27	-24/0	-25/180	-29/180	19
9	30	-21/0	-26/180	-28/180	22
10	29	-25/0	-22/180	-32/180	26

Таблица 2 – Параметры радиоимпульса

Вариант	Несущая, RF, МГц	Задержка, pulseDelay, нс	Передний фронт, pulseRise, нс	Длительность, pulseWidth, нс	Задний фронт, pulseFall, нс	Период, pulsePeriod, нс
1	280	2	2	8	4	30
2	300	2	2	7	4	28
3	320	2	2	7	4	28
4	340	1,5	1,5	7	3	28
5	360	1,5	1,5	6	3	24
6	380	1,5	1,5	6	3	24
7	400	1	1	6	1	22
8	420	1	1	5	1	22
9	440	1	1	5	1	20
10	460	1	1	5	1	18

Таблица 3 – Параметры GSM-сигнала

Вариант	Несущая, RF, МГц	Полоса baseband-сигнала, DataBW, кГц
1	280	200
2	300	210
3	320	220
4	340	230
5	360	240
6	380	260
7	400	270
8	420	280
9	440	290
10	460	300

Таблица 4 – Логарифмическая характеристика детектора

Вариант	Нижний диапазон измеряемой мощности Pin, дБм	Верхний диапазон измеряемой мощности Pin, дБм	Нижний диапазон детектированного сигнала Vdet, В	Верхний диапазон детектированного сигнала Vdet, В	Входное сопротивление детектора мощности, Rin, Ом	Выходное сопротивление детектора мощности, Rdet, Ом
1	-60	15	0	3,0	50	50
2	-55	20	0	3,3	50	50
3	-45	25	0	2,5	50	50
4	-53	0	0	1,8	50	50
5	-40	23	0	5	50	50
6	-35	7	0	3,0	50	50
7	-52	18	0	3,3	50	50
8	-57	13	0	2,5	50	50
9	-47	0	0	1,8	50	50
10	-37	27	0	5	50	50

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

Каждый крупный этап рекомендовано делать в отдельных ячейках (схемах), т.к. при выполнении работы возможно придется возвращаться к предыдущим этапам. Рекомендовано использовать использованное в методике именование схем.

Этапы выполнения

1. Моделирование прохождения радиоимпульса через имитационную модель усилителя мощности (ячейка ENV_PulseAmp):

- параметры усилителя мощности задать из таблицы вариантов заданий (табл.1);
- параметры радиоимпульса задать из таблицы вариантов заданий (табл.2);
- уровень входной мощности P_{in} задать в гарантированного линейном участке ($P_{1dBOut} - K_p - 20..30$);
- сетка частот анализа контроллера ENV определяется несущей частотой входного сигнала RF, порядок расчета гармоник установить 5;
- временной шаг TStep моделирования определить исходя из $\min(pulseRise, pulseFall)/5$ с округлением до 0,1 нс;
- длительность моделирования TStop установить на 2-3 периода повторения радиоимпульса pulsePeriod с небольшим запасом;
- поименовать входной Vin и выходной Vout сигналы;
- построить на одном графике временные формы огибающих по первой гармонике входного Vin и выходного Vout сигналов;
- вывести временную форму с помощью функции ts();
- с помощью маркеров на огибающих первой гармоники входного Vin и выходного Vout сигналов определить коэффициент усиления усилителя мощности;
- с помощью маркеров на огибающей выходного сигнала Vout по первой гармонике определить характерные моменты времени и их соответствие заданному в параметрах входного сигнала;
- определить структуру результатов, выдаваемых контроллером Envelope с помощью таблицы what(Vout), вектора time, сечений freq и Mix в произвольный момент времени;
- изменить параметры моделирования, установив шаг моделирования TStep вдвое большим, чем $\max(pulseRise, pulseFall)$ с округлением до 0,1 нс;

- пронаблюдать искажение временной формы первой гармоники выходного сигнала V_{out} по отношению к заданным и сделать выводы о корректности симуляции;

- вернуть шаг моделирования $TStep$ к корректному, но теперь подать на вход мощность P_{in} , достаточную для компрессии усилителя ($P_{1dBOut} - K_p + 5$);

- пронаблюдать на одном графике огибающую выходного сигнала V_{out} и действительный выходной сигнал;

- с помощью слайдера по вектору времени $time$ вывести мгновенный спектр выходного сигнала V_{out} и исследовать мгновенный спектр в различные моменты времени;

- установить порядок расчета гармоник 1 и пронаблюдать на одном графике огибающую выходного сигнала V_{out} и действительный выходной сигнал, а также новые значения мгновенного спектра в различные моменты времени;

- сделать выводы о требованиях к параметрам моделирования $Envelope$.

2. Моделирование прохождения GSM-модулированного сигнала через имитационную модель усилителя мощности (ячейка $ENV_ModulatedAmp$):

- параметры усилителя мощности задать из таблицы вариантов заданий (табл.1);

- параметры GSM-сигнала задать из таблицы вариантов заданий (табл.3);

- уровень входной мощности P_{in} задать в гарантированного линейном участке ($P_{1dBOut} - K_p - 20..30$);

- сетка частот анализа контроллера ENV определяется несущей частотой входного сигнала RF , порядок расчета гармоник установить 5;

- временной шаг $TStep$ моделирования определить исходя из $1/(5*DataBW)$;

- длительность моделирования $TStop$ установить на 40-50 символов GSM-сигнала;

- поименовать входной V_{in} и выходной V_{out} сигналы, а также цифровой поток Bits;
- вывести действительную и мнимую часть огибающей первой гармоники выходного сигнала V_{out} ;
- вывести созвездие первой гармоники выходного сигнала на полярный график в режиме Scatter;
- с помощью маркера определить уровень выходной мощности и определить коэффициент усиления усилителя мощности;
- с помощью слайдера по вектору time показать анимацию движения baseband-сигнала по комплексной плоскости;
- вывести цифровой поток Bits;
- построить графики амплитудного спектра выходного сигнала со взвешиванием окном Кайзера и без;
- с помощью функции `channel_power_vr()` рассчитать канальную мощность выходного сигнала V_{out} и сравнить с ожидаемой;
- подать на вход мощность P_{in} , достаточную для компрессии усилителя ($P_{1dBOut} - K_p + 5$) и установить перед усилителем мощности имитационную модель ППФ с полосой в 5..6 раз уже, чем полоса сигнала DataBW;
- пронаблюдать по формам огибающей первой гармоники и созвездию как исказился сигнал;
- с помощью функции `channel_power_vr()` рассчитать новую канальную мощность выходного сигнала V_{out} и оценить полученный коэффициент усиления.

2. Моделирование прохождения радиоимпульса через логарифмический детектор мощности (ячейка ENV_EnvDet):

- рассчитать параметры логарифмического детектора мощности Asl и V_{int} исходя из требований на логарифмическую характеристику детектора мощности (табл.4);
- для параметров радиоимпульса задать параметры из таблицы вариантов заданий (табл.2);

- уровень входной мощности P_{in} задать как верхнюю границу детектируемой мощности (табл.4);
- сетка частот анализа контроллера ENV определяется несущей частотой входного сигнала RF, порядок расчета гармоник установить 5;
- временной шаг TStep моделирования определить исходя из $\min(\text{pulseRise}, \text{pulseFall})/5$ с округлением до 0,1 нс;
- длительность моделирования TStop установить на 2-3 периода повторения радиоимпульса pulsePeriod с небольшим запасом;
- поименовать входной Vin и выходной Vout сигналы;
- построить на соседних графиках с помощью функции ts() действительные сигналы входного Vin и детектированного Vdet сигналов;
- с помощью маркеров определить уровни Vin и Vdet и их соответствие заданию при верхней границе P_{in} ;
- изменить уровень входной мощности P_{in} на нижнюю границу детектируемой мощности (табл.4);
- с помощью маркеров определить уровни Vin и Vdet и их соответствие заданию при нижней границе P_{in} ;
- выбрать момент времени в пределах импульса и определить его индекс в векторе time;
- включить перебор по уровням входной в линейном диапазоне от нижней до верхней границ детектируемой мощности P_{in} ;
- построить логарифмическую зависимость детектора мощности от входной мощности.

Требования к отчёту

Отчет о выполненной лабораторной работе должен представлять из себя структурированное описание всей выполненной работы, в том числе должен содержать:

- Титульный лист, с наименованием работы, указанием исполнителя и даты выполнения.
- Цель (-и) работы.
- Список использованных инструментов в лабораторной работе.
- Разделы работы, которые рекомендовано формировать в соответствии с этапами выполнения (аналогично методике и заданию на выполнение).
- Для каждого этапа необходимо привести все выполненные расчеты, подготовленные модели, результаты и анализ результатов.

Подробность описания этапов выполненной работе студент определяет самостоятельно. Самое простое правило, которому надо следовать – человек, незнакомый с выполненной работой (но знакомый с использованным инструментом) должен быть в состоянии по отчету повторить данную работу и понять, что в ней происходит.

Готовый отчет необходимо экспортировать в pdf.

Архив проекта ADS лучше всего делать встроенным инструментом File – Archive Workspace из основного окна ADS. При архивации проекта можно выбрать, какие составляющие проекта добавлять в архив. Если какие-то ячейки или результаты расчета не нужны, то их можно исключить из архивирования.

По окончании выполнения лабораторной работы и подготовки отчета, отчет и архив проекта надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию ЗЛР (Защита лабораторных работ). Именование отчета и архива проекта должно давать возможность точно понять, к какой лабораторной работы они относятся (Например, PPU_Lab6_Env вместо непонятного Lab6 или Workspace6).

Задание на самостоятельную работу

1) Подготовка к лабораторному занятию

При подготовке к выполнению лабораторной работы необходимо продумать шаблон отчета, при необходимости внести краткие теоретические сведения, продумать и наметить количество, вид и расположение таблиц и графиков с измеренными данными. Для получения допуска необходимо подробно изучить теоретический материал.

2) С использованием навыков, полученных в лабораторной работе, выполнить соответствующий этап БДЗ.

Контрольные вопросы

1. Какие результаты позволяет получать временной анализ?
2. Что такое комплексная огибающая сигнала?
3. Какой критерий необходимо учитывать при выборе шага при временном анализе; при использовании метода комплексной огибающей?
4. В чем преимущество метода комплексной огибающей перед временным анализом?
5. За какие параметры в спектральной области сигнала отвечают шаг и время моделирования?
6. Какова зависимость модулированного высокочастотного колебания от комплексной огибающей?
7. Найти значение комплексной огибающей для сигнала, заданного преподавателем. Построить спектр комплексной огибающей и сигнала.

Литература

1. Банков, С. Е. Электродинамика для пользователей САПР СВЧ : учебник / С. Е. Банков, А. А. Курушин. — Москва : СОЛОН-Пресс, 2017. — 316 с. — ISBN 978-5-91359-236-1. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/107661> (дата обращения: 02.02.2021). — Режим доступа: для авториз. пользователей.

Перечень ресурсов сети «Интернет»

2. Сборник примеров работы в ADS «ADS Example Book: Focused on RF and Microwave Design», доступен после свободной регистрации <https://www.keysight.com/main/editorial.jsp?cc=RU&lc=rus&ckey=2704333&id=2704333&cmpid=zzfindeesof-ads-rfmw-examples>

3. База знаний Образовательного центра Keysight EEsof EDA Knowledge Center, доступен после свободной регистрации, <http://edadocs.software.keysight.com/display/support/Knowledge+Center>

4. Тематический раздел «Rf & Microwave Design» форума electronix.ru, доступен после свободной регистрации, <https://electronix.ru/forum/index.php?showforum=63>

5. Интернет-энциклопедия разработчиков СВЧ-аппаратуры «Microwaves101» <https://www.microwaves101.com>

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

6. Канал youtube образовательного центра Keysight EEsof EDA <https://www.youtube.com/user/KeysightEESOF>

7. Канал youtube Anurag Bhargava образовательного центра <https://www.youtube.com/user/BhargavaAnurag>

8. Канал youtube Keysight EEsof EDA Field <https://www.youtube.com/c/EEsofAETips>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.