

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 №3**

### **«Имитационное моделирование RF-моделей»**

**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.....	5
Создание и первоначальная настройка проекта .....	5
Базовый расчет системы методом гармонического баланса .....	5
Определение точки однодецибельной компрессии .....	16
Автоматический поиск точки однодецибельной компрессии .....	22
Определение интермодуляционных искажений третьего порядка .....	24
Анализ фазовых шумов .....	27
Коэффициент шума приемной ячейки .....	30
Задание на выполнение.....	36
Требования к отчёту.....	40
Задание на самостоятельную работу .....	41
Контрольные вопросы .....	42
Литература .....	43



## Введение

**Цель работы:** научиться проводить имитационное моделирование ВЧ-цепей 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.

<b>Lab1</b>	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

В работе проектируется Приемный канал приемо-передающего модуль (ППМ) общего назначения. В состав модуля усилитель мощности, смеситель, малошумящий усилитель и полосно-пропускающий фильтр.

Структурная схема модуля представлена на рисунке ниже.

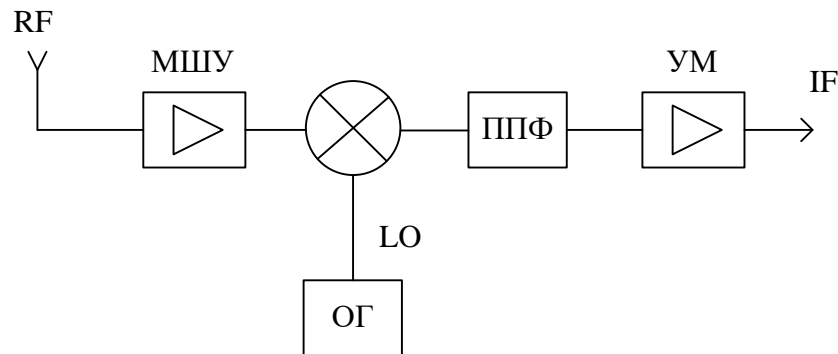


Рисунок - Структурная схема приёмного модуля

Состав приемного модуля как правило следующий:

- Входной полосно-пропускающий фильтр (ППФ) – включают при необходимости, т.к. значительно снижает шумовые характеристики;
- Малошумящий усилитель (МШУ) – характеризуется коэффициентом усиления и коэффициентом шума;
- Опорный генератор (гетеродин) – необходим для получения высокостабильного опорного сигнала для смесителя, характеризуется отдаваемой мощностью и фазовыми шумами;
- Смеситель – устройство, необходимое для переноса входного сигнала на низкую частоту, характеризуется потерями на проход;
- Усилитель мощности (УМ) – характеризуется коэффициентом усиления и отдаваемой мощностью.

Существуют и иные конфигурации приемных модулей.

В состав ADS входит группа библиотек, позволяющая использовать в качестве ячеек высокочастотного устройства эквивалентные модели. Каждая из моделей описывается достаточным набором свойств и может быть использована при анализе всей системы для первого приближения при проектировании новой системы.

## 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.

### Базовый расчет системы методом гармонического баланса

Промоделируем приемную часть системы, структурная схема которой представлена на рисунке ниже (ячейка ImitRF\_Channel). Частота входного сигнала 2,4 ГГц, выходного 70 МГц, опорный генератор выдает 2,33 ГГц. Полоса принимаемого сигнала равна 20 МГц (определяет параметры фильтра). Линейный подсчет ожидаемой мощности на выходе дает ~0,9 дБм.

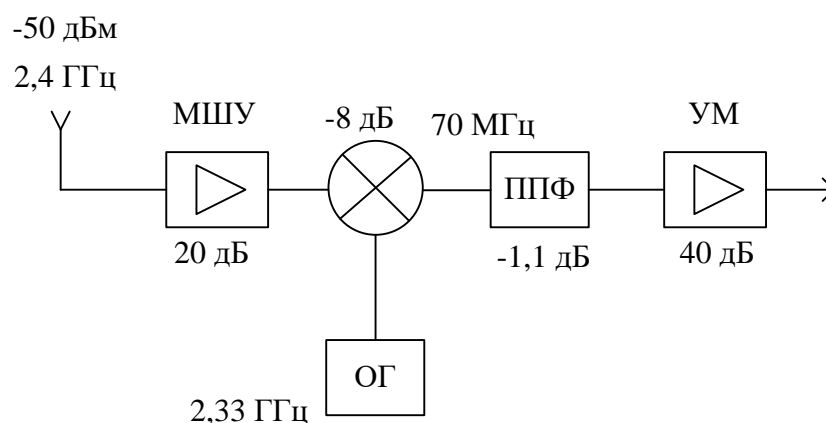


Рисунок - Структурная схема приемного модуля

Модель МШУ представлена блоком Amplifier2 из вкладки System-Amps & Mixers. Имеет коэффициент усиления 20 дБ, коэффициент шума 1,1 дБ, точку однодецибелной компрессии по выходу P1dBout = 15 дБм и уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по выходу IP3out = 30 дБм. Также будем считать МШУ хорошо согласованным и имеющим малое обратное усиление ( $S_{11}$ ,  $S_{22}$  и  $S_{12} \rightarrow 0$ ).

Параметры матрицы рассеяния модели Amplifier2 задаются в размах. Для автоматизации пересчета из дБ в разы удобно использовать функцию dbpolar(dB, Phase). Коэффициент шума соответствует параметру NF. Точка однодецибельной компрессии и уровень интермодуляционных искажений третьего порядка по умолчанию определяются относительно выхода, задаются в дБм. При этом в строке dBm не показывается, т.к. ADS не знает единицы dBm.



По умолчанию в модели Amplifier2 для S21 подставляется преобразование dbpolar() для формирования комплексного 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.

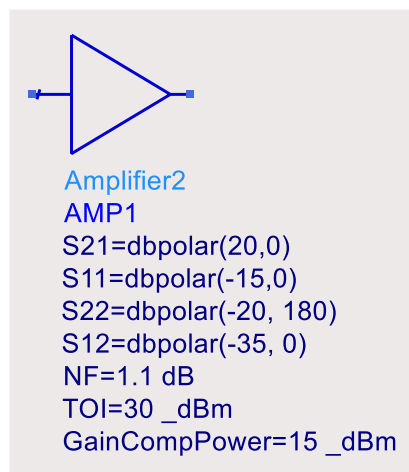


Рисунок – Модель МШУ



Для удобства идентификации задаваемых в дБм значений можно воспользоваться символом комментария «\_» для формирования подписи единиц вида «\_dBm». Данная подпись после значений игнорируется вычислительным ядром.

Смеситель – модель Mixer из вкладки System-Amps & Mixers, у которого нет подавления зеркальных каналов (SideBand = BOTH), с потерями на проход 8 дБ (преобразование ConvGain) и хорошими переходными ослаблениями 35 дБ (коэффициенты xx\_Rej). Также зададим ему двусторонний коэффициент шума 8 дБ (NF).

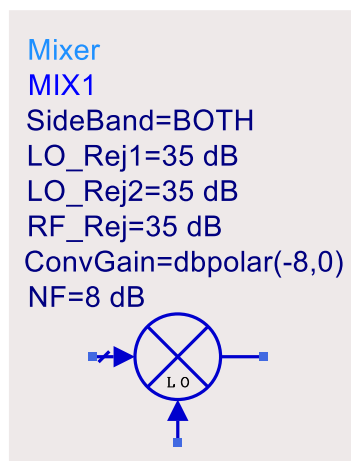


Рисунок - Модель смесителя

Выделением выходной частоты IF будет заниматься ППФ. Пусть это будет модель ППФ с аппроксимацией Чебышева (BPF\_Chebyshev из вкладки Filters-Bandpass) с центральной частотой полосы пропускания 70 МГц (частота IF), полосой пропускания 20 МГц (полоса сигнала), с допустимым уровнем колебаний в полосе пропускания 0,1 дБ, полосой запираания 40 МГц (удвоенная полоса сигнала) и уровнем в полосе запираания 40 дБ, потерями на проход 1 дБ.

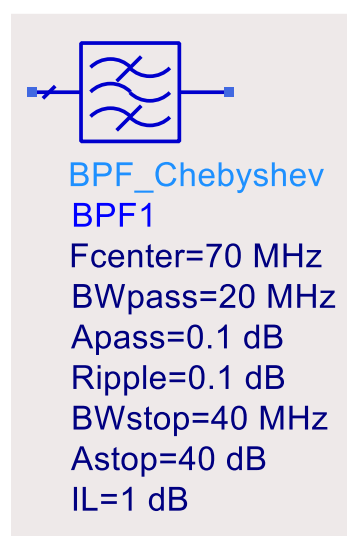


Рисунок - Модель ППФ

Усилитель мощности состоит из двух одинаковых каскадов с усилением 20 дБ, коэффициентом шума 3 дБ,  $P_{1dBout} = 22$  дБм,  $IP_{3out} = 40$  дБм. Эти каскады также пусть будут хорошо согласованы и почти не имеющие обратного коэффициента передачи.

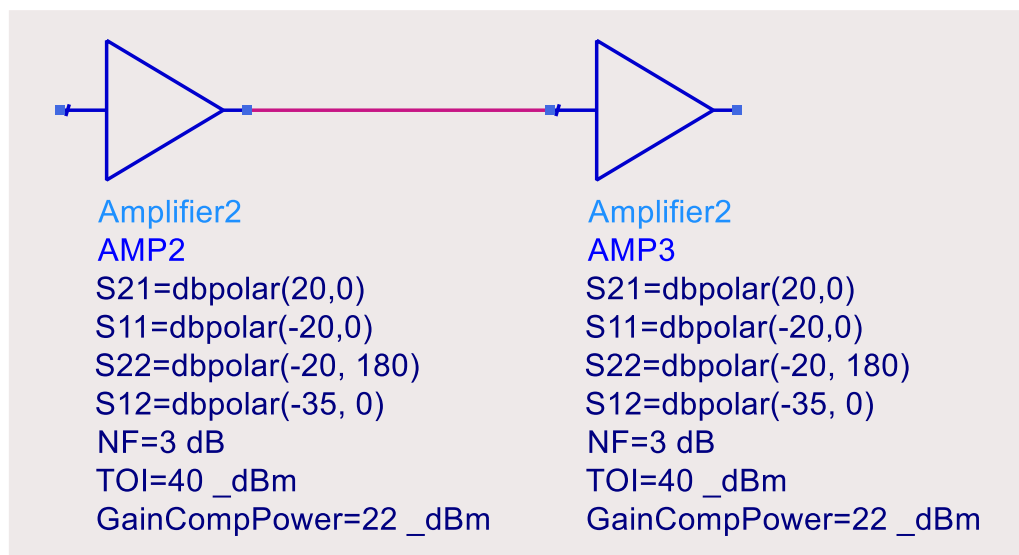


Рисунок - Модель УМ

Моделирование будет проводиться в режиме гармонического баланса, поэтому источником RF-сигнала будет P\_1Tone из вкладки Sources-Freq Domain, отдающий -50 дБм на частоте 2,4 ГГц.

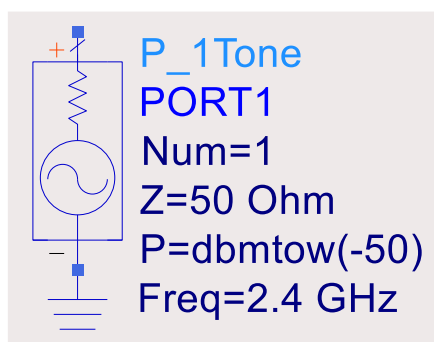


Рисунок – Источник RF

❗ Источник сигнала P\_1Tone при редактировании уровня выдаваемой мощности поддерживает автоматическое преобразование из дБм или дБВт в Вт. При использовании этой функции введенное в поле значение оборачивается в соответствующую преобразующую функцию. Например, dbmtow() для преобразования дБм в Вт.



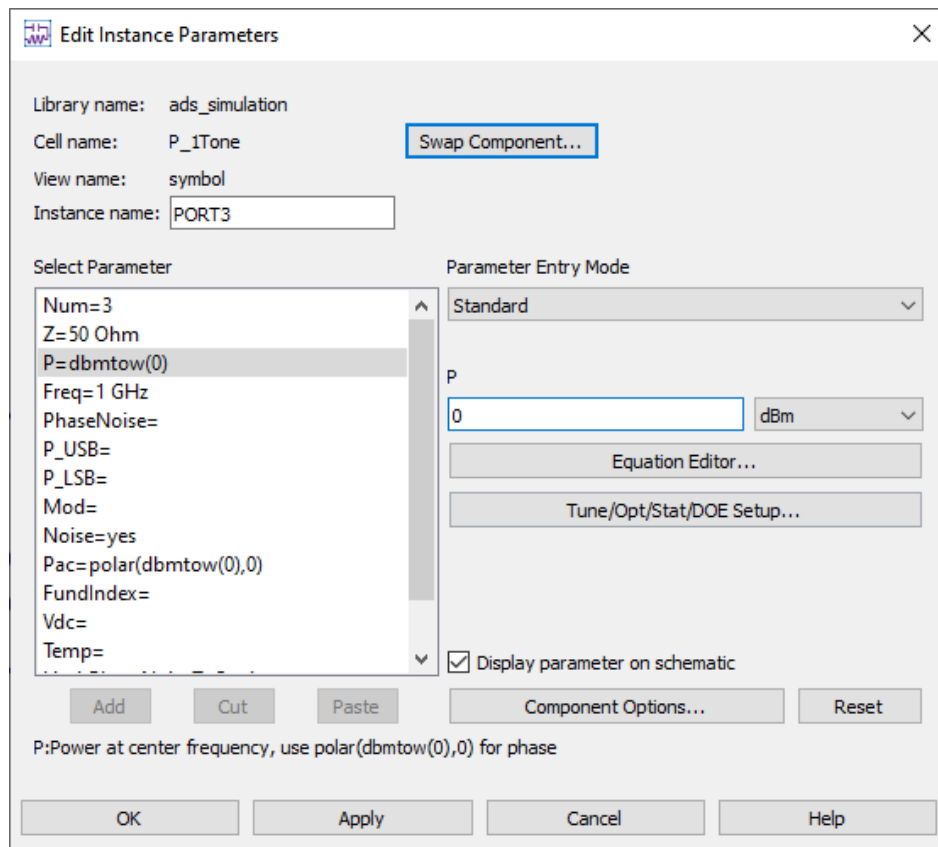


Рисунок – к настройкам источника сигнала P\_1Tone

Опорным генератором LO будет модель опорного генератора OSCwPhNoise из вкладки Sources-Freq Domain, включающая источник фазовых шумов. Частота сигнала 2,33 ГГц, мощность –7 дБм, фазовые шумы заданы списком PhaseNoise (попарные значения, собранные в список list()).

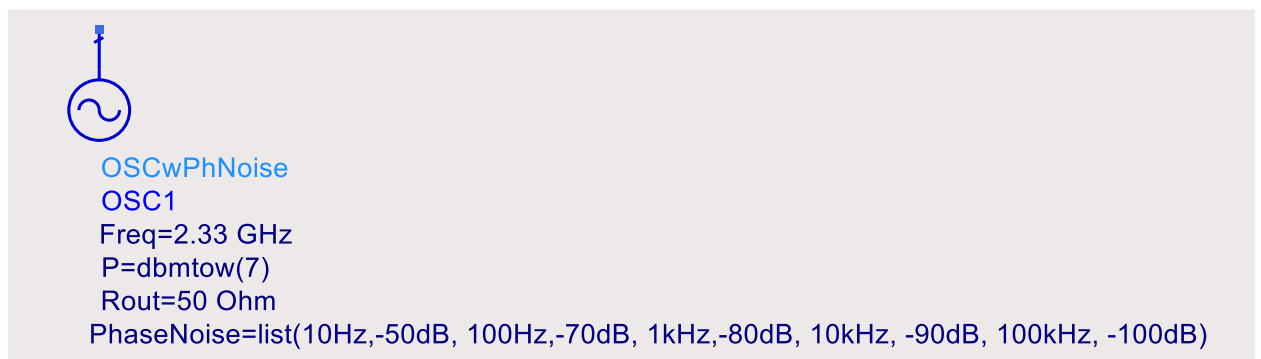


Рисунок – Опорный генератор с фазовыми шумами

Выходной сигнал будет сниматься с нагрузки 50 Ом. В качестве нее будем использовать согласованную нагрузку Term.

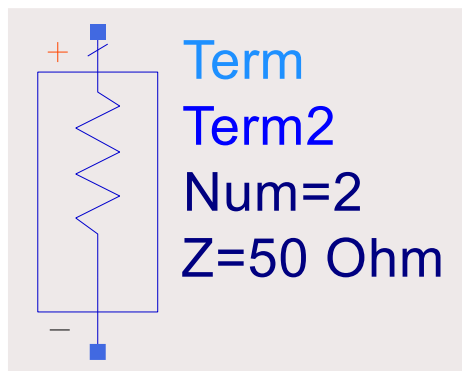


Рисунок – Выходная нагрузка

Контроллер симуляции – Harmonic Balance (НВ) из палитры Simulation-НВ. Т.к. есть два источника разных частот на 2,4 ГГц и 2,33 ГГц, то необходимо указать их в контроллере в качестве фундаментальных частот. Максимальные номера рассчитываемых гармоник ( $\text{Order} = 5$ ) и межгармоник ( $\text{MaxOrder} = 4$ ) также необходимо задать.

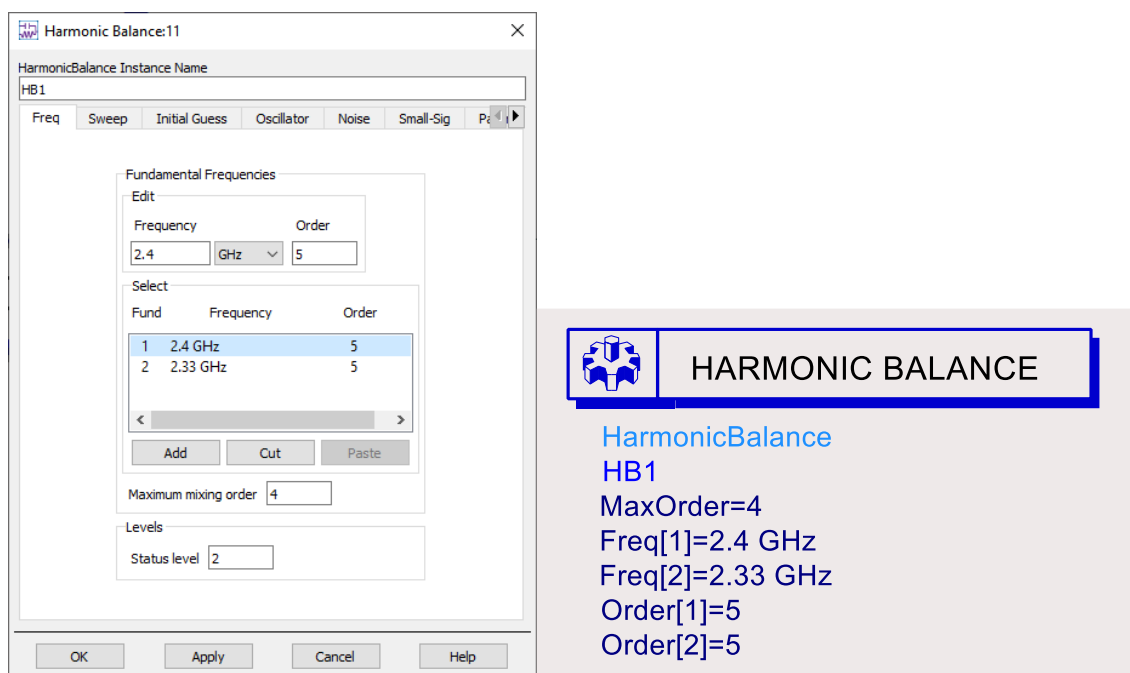


Рисунок – Настройки контроллера симуляции НВ

## Lab1

Котроллер симуляции НВ имеет дело с сигналами, чтобы их можно было получить в результатах, цепи необходимо поименовать. Пусть входной сигнал называется  $V_{in}$ , после первого МШУ  $V_{lna}$ , после смесителя  $V_{mix}$ , после фильтра  $V_{filt}$  и окончательно выходной  $V_{out}$ .

Вся собранная схема имеет вид, показанный на рисунке ниже.

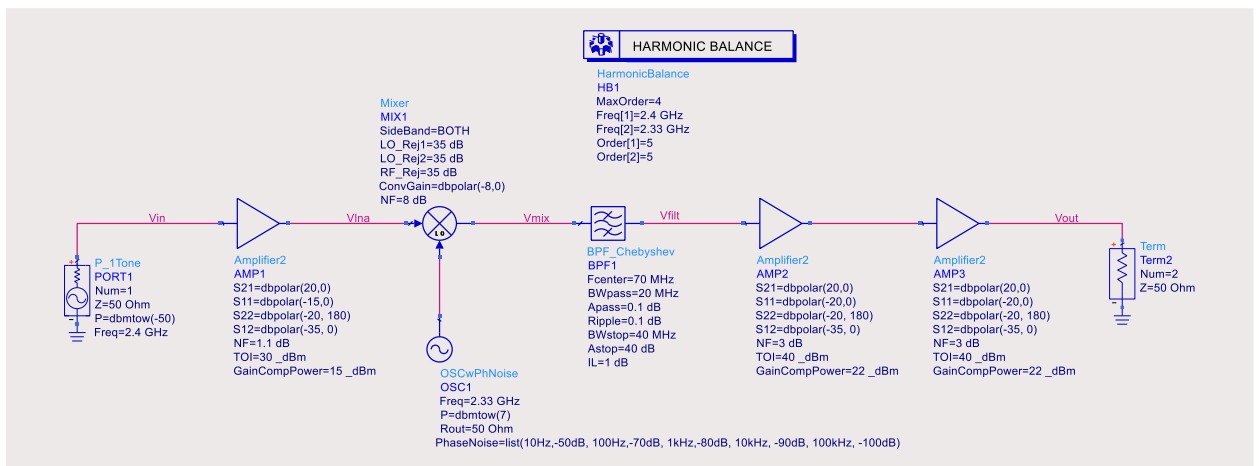


Рисунок - Схема приемника



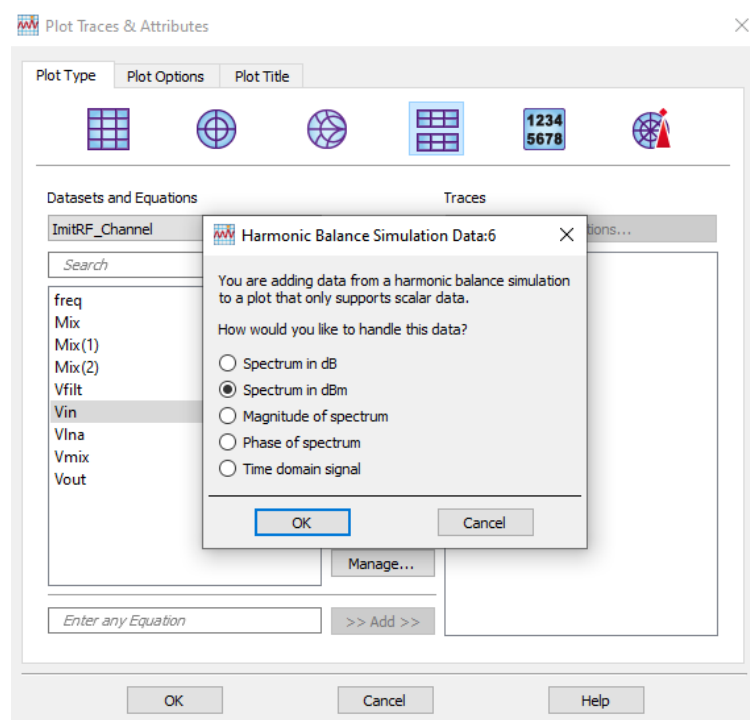
При составлении схем нужно следить, чтобы у всех портов и терминаторов не было висящих вторых выводов. В текущей работе они всегда должны быть подключены к земле

Контроллер симуляции НВ возвращает результат в частотной области. Для удобного сопоставления сигналов отобразим на графиках типа Stacked



Rectangular Plot сигналы. Сигналы до смесителя ( $V_{in}$  и  $V_{lna}$ ) интересуют нас на входной частоте RF.

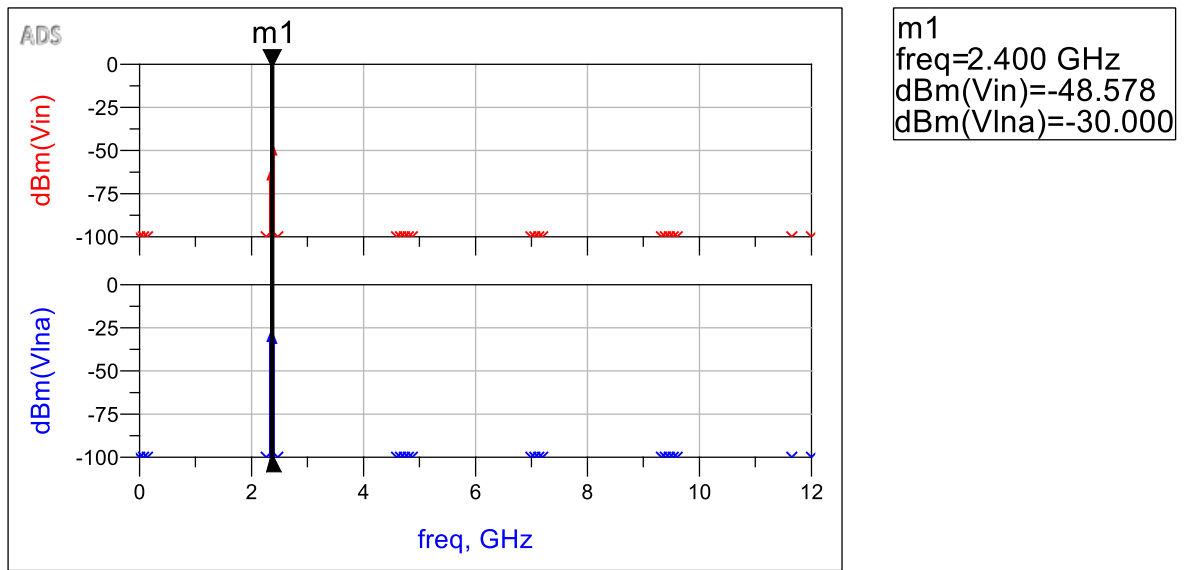
При отсутствии свипа при попытке вывести значение на прямоугольный график, будет предложен вариант отображения спектра в дБм, что соответствует оборачиванию результата в функцию dBm().



### Рисунок – К созданию графика спектра сигнала

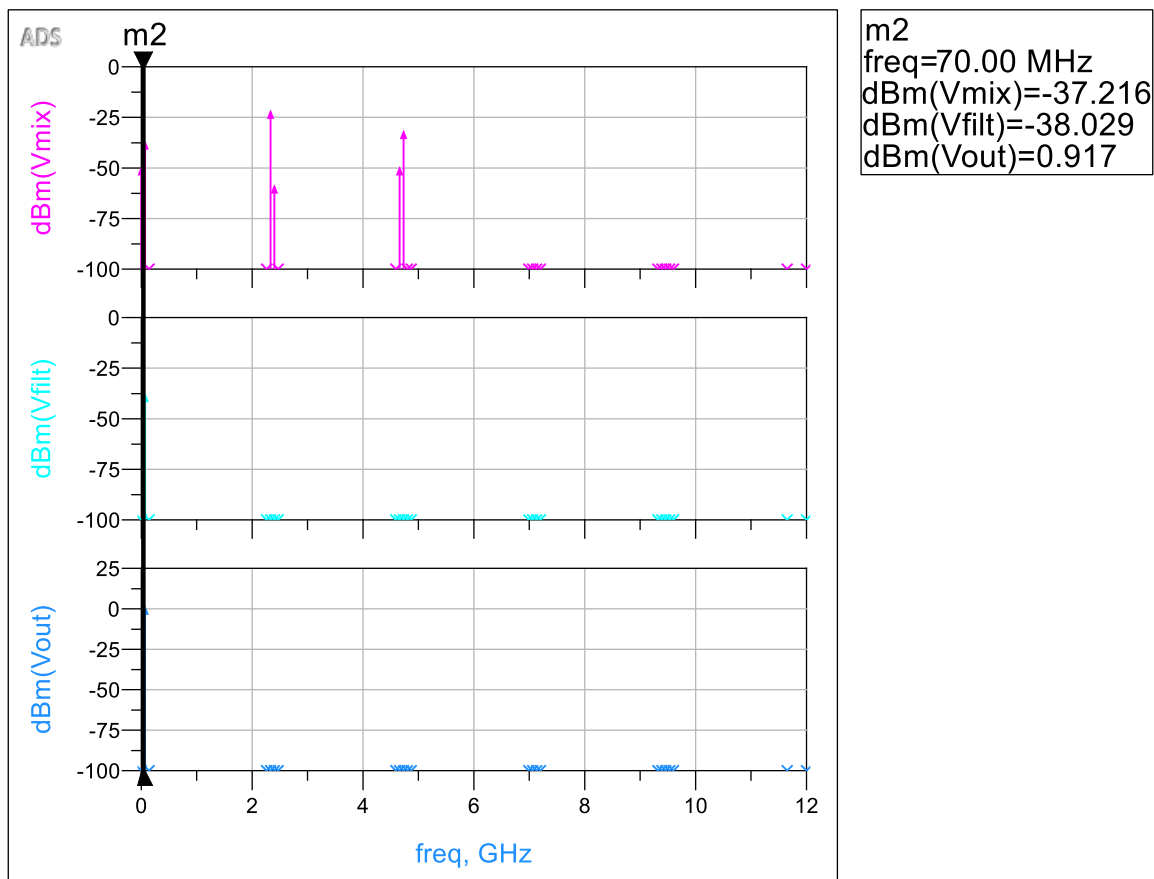
При данном преобразовании происходит преобразование из Вольт в дБм. При этом по умолчанию мощность снимается с нагрузки 50 Ом. Переопределить сопротивление нагрузки можно, дописав в преобразование другое сопротивление как  $\text{dBm}(V, Z)$ .

Поставив линейный маркер на частоту 2,4 ГГц видно поведение рабочего сигнала до смесителя. Видно, что МШУ дает 20 дБ усиления на центральной частоте, кроме того обратный сигнал через МШУ добавляет некоторый уровень ко входной мощности.



Рисунок

Сигналы после смесителя показаны на рисунке ниже. Теперь интересует поведение на выходной частоте 70 МГц.



Рисунок

По полученным уровням сигнала видно, что канал построен в соответствии с линейным подсчетом. С учетом того, что подавалось  $-50$  дБм, то можно почитать коэффициент усиления канала по мощности

$$PGain = 0,9 - (-50) = 50,9 \text{ дБ}$$

В дальнейшей работе надо хорошо понимать структуру результатов, выдаваемых режимом моделирования НВ. Если вывести в таблицу, например,  $V_{out}$ , то можно получить следующую картинку. В ней видно, что значения в результате имеют комплексные значения (в форме амплитуда/фаза\_град) и выдаются относительно некоторой частотной сетки freq.

freq	Vout
0.0000 Hz	1.186E-17 / 0.000
70.00 MHz	0.351 / -21.962
140.0 MHz	2.413E-17 / -62.068
2.260 GHz	5.133E-18 / 175.291
2.330 GHz	4.425E-16 / 89.275
2.400 GHz	1.122E-17 / 98.223
2.470 GHz	1.368E-17 / -81.067
4.590 GHz	6.963E-18 / 140.803
4.660 GHz	3.751E-18 / -144.319
4.730 GHz	3.618E-18 / -176.348
4.800 GHz	7.874E-18 / 145.358
4.870 GHz	2.997E-18 / -121.908
6.990 GHz	9.491E-18 / -115.627
7.060 GHz	3.907E-18 / -45.876
7.130 GHz	4.186E-18 / 156.927
7.200 GHz	1.168E-17 / -163.207
9.320 GHz	1.148E-17 / -40.018
9.390 GHz	2.404E-17 / -109.722
9.460 GHz	1.356E-17 / -133.899
9.530 GHz	1.512E-17 / -107.922
9.600 GHz	6.141E-18 / -62.655
11.65 GHz	9.579E-18 / -95.976
12.00 GHz	4.921E-18 / -96.826

Рисунок

Данная частотная сетка freq формируется исходя из фундаментальных частот анализа ( $f_1$  и  $f_2$ ) перебором всех возможных комбинаций вида  $\pm nf_1 \pm mf_2$ , где  $n$  и  $m$  берется в диапазоне от 0 до максимальных указанных в параметрах Order и MaxOrder. Сформированная сетка частот при моделировании сортируется по возрастанию и сохраняется в датасет в независимую переменную freq. Увидеть, как какая частота была сформирована из фундаментальных частот, можно выведя в таблицу Mix.

При задании параметров контроллера симуляции НВ первой фундаментальной частотой задавалась частота RF 2,4 ГГц, а второй LO 2,33 ГГц. Из этой таблицы видно, что, например, входная частота RF 2,4 ГГц формируется как  $1 \times 2,4 \text{ ГГц} + 0 \times 2,33 \text{ ГГц}$ , а выходная IF 70 МГц как  $1 \times 2,4 \text{ ГГц} - 1 \times 2,33 \text{ ГГц}$ .

freq	Mix	
	Mix(1)	Mix(2)
0.0000 Hz	0	0
70.00 MHz	1	-1
140.0 MHz	2	-2
2.260 GHz	-1	2
2.330 GHz	0	1
2.400 GHz	1	0
2.470 GHz	2	-1
4.590 GHz	-1	3
4.660 GHz	0	2
4.730 GHz	1	1
4.800 GHz	2	0
4.870 GHz	3	-1
6.990 GHz	0	3
7.060 GHz	1	2
7.130 GHz	2	1
7.200 GHz	3	0
9.320 GHz	0	4
9.390 GHz	1	3
9.460 GHz	2	2
9.530 GHz	3	1
9.600 GHz	4	0
11.65 GHz	0	5
12.00 GHz	5	0

Рисунок – Таблица Mix

Также для анализа результатов часто нужно знать индекс интересующей частоты в сетке частот freq. Можно просто вывести таблицу freq или Mix и посчитать номер строки с интересующей частотой. Учтите, в массивах в ADS нумерация идет с 0. В примере входная частота RF 2,4 ГГц имеет индекс 5, частота опорного генератора LO 2,33 ГГц имеет индекс 4, а выходная частота IF 70 МГц имеет индекс 1. Нулевая частота (или постоянный ток) всегда имеет индекс 0.

Чтобы автоматизировать определение индекса, можно воспользоваться функцией find\_index(data, value)

**Eqn**idx\_RF = find\_index(freq, 2.4 GHz)

**Eqn**idx\_LO=find\_index(freq, 2.33 GHz)

**Eqn**idx\_IF=find\_index(freq, 70 MHz)

idx_RF	idx_LO	idx_IF
5	4	1

freq[idx_RF]	freq[idx_LO]	freq[idx_IF]
2.400 GHz	2.330 GHz	70.00 MHz

## Рисунок

Мы этими инструментами будем регулярно пользоваться.

### Определение точки однодецибельной компрессии

Точка однодецибельной компрессии по выходу (P1dBout) определяется как значение мощности (в дБм) на рабочей гармонике, при которой мощность на рабочей гармонике по выходу на 1 дБ меньше, чем была бы при сохранении линейной зависимости. У усилителей P1dB задают обычно по выходу мощности, у смесителей - по входу.

Компрессию можно определять и по другим уровням. Встречается по уровню 5 дБ, 3 дБ или даже 0,1 дБ.

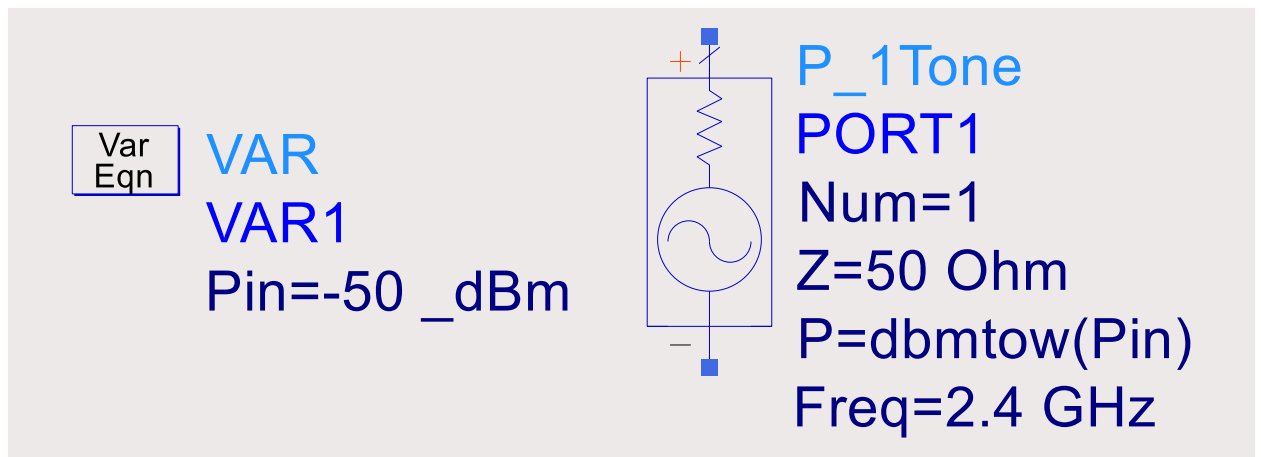
P1dBout связана с P1dBin по формуле

$$P1dBout \text{ [дБмВт]} = P1dBin \text{ [дБмВт]} + Kp \text{ [дБ]} - 1,$$

где  $Kp$  [дБ] – коэффициент передачи в линейном режиме.

Для определения однодецибельной компрессии по выходу надо провести следующие действия (ячейка ImitRF\_P1dB)

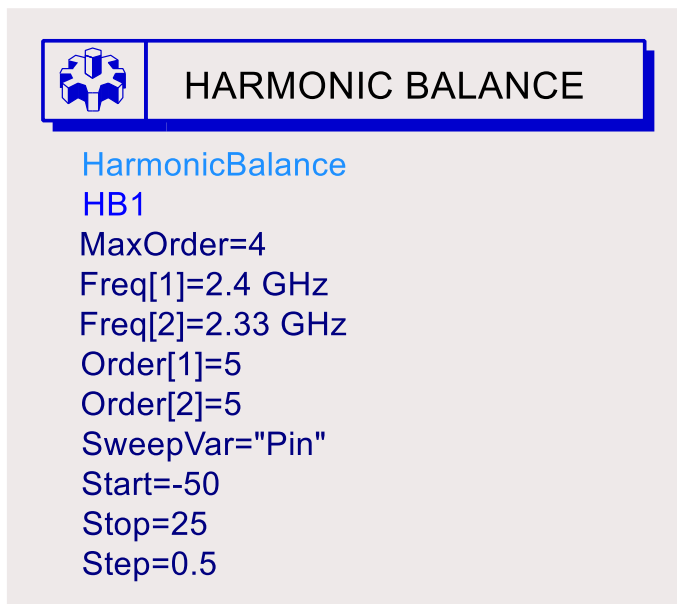
Ввести новую переменную  $P_{in}$ , которая будет задавать уровень мощности на входе (в дБм) и внести ее в мощность входного порта.



## Рисунок

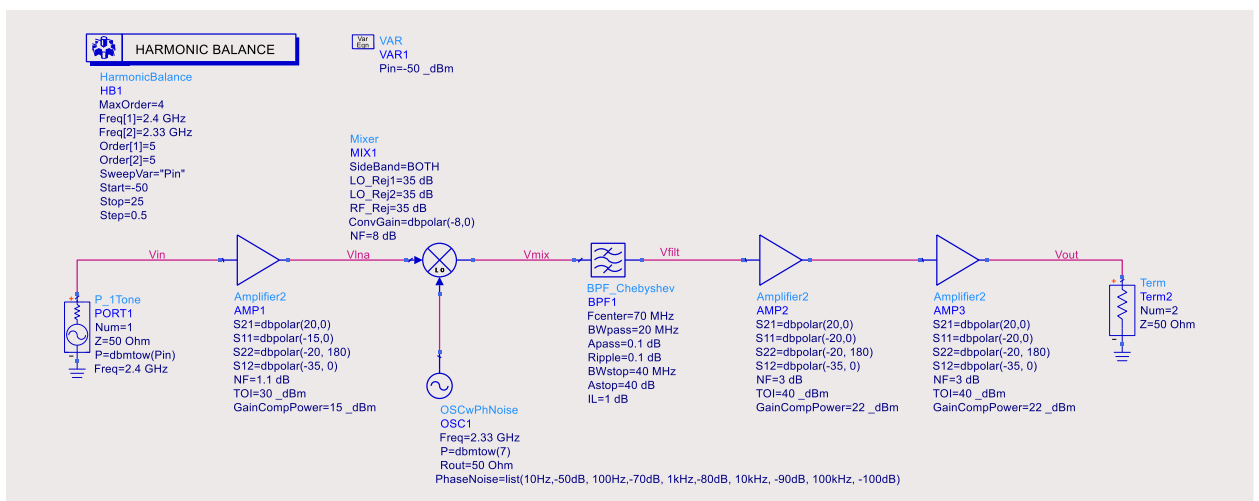
Контроллеру НВ указать свип переменной  $P_{in}$  в некоторых разумных пределах, пусть будет от -50 дБм до 25 дБм с шагом 0,5 дБм.





Рисунок

Схема перед запуском должна выглядеть следующим образом.



Рисунок

Дальнейшие действия проводятся в области результатов. Необходимо построить зависимость мощности на выходе  $V_{out}$  на частоте IF 70 МГц в зависимости от мощности входного сигнала  $P_{in}$  и на том же графике линейную зависимость. А потом найти точку, при которой эти графики разойдутся на 1 дБ.

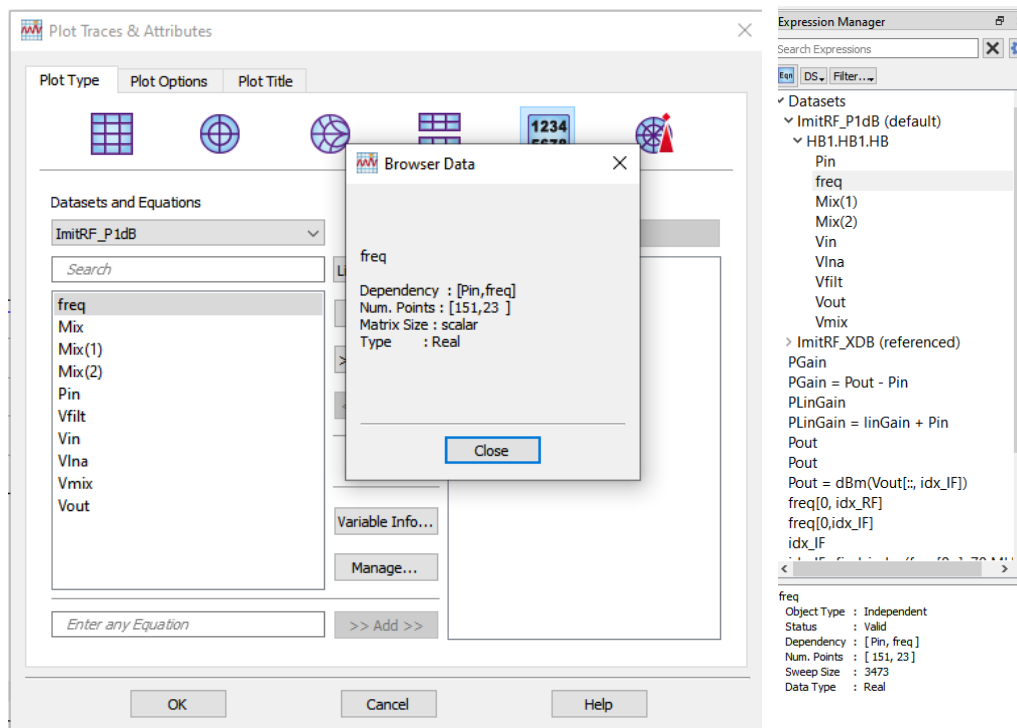
Для этого надо определить, какой номер частоты в расчете у 70 МГц. С учетом того, что поверх базовой сетки частот  $freq$  накладывается свип по мощности  $P_{in}$ , у нас получается две независимых переменных. Изначально, для определения зависимостей в результатах можно воспользоваться функцией `what()`. Построим таблицу `what(freq)`

what(freq)	
Dependency :	[Pin,freq]
Num. Points :	[151,23 ]
Matrix Size :	scalar
Type :	Real

Рисунок

Мы теперь знаем размер матрицы freq (151x23) и порядок зависимостей результата от независимых переменных.

! Эту же информацию можно получить, если при создании графиков в окне Plot Traces & Attributes выбрать интересующий результат и нажать на кнопку Variable Info. Также аналогичное показывается в панели Expression Manager при выборе интересующего результата в датасете.



Рисунок

Т.к. при изменении мощности Pin сетка частот не меняется, то можно зафиксировать индекс входной мощности idx\_Pin на любое значащее значение (например, 0) и получить сечение сетки частот. Для перебора всех значений по сечению используется оператор «::».

Воспользовавшись функцией find\_index(), определим индексы частот RF 2,4 ГГц и IF 70 МГц.

$$\text{Eqn } \text{idx\_RF} = \text{find\_index}(\text{freq}[0, :], 2.4 \text{ GHz})$$

$$\text{Eqn } \text{idx\_IF} = \text{find\_index}(\text{freq}[0, :], 70 \text{ MHz})$$

idx_IF	freq[0,idx_IF]	idx_RF	freq[0, idx_RF]
1	70.00 MHz	5	2.400 GHz

Рисунок

Построим теперь график зависимости мощности на выходе  $V_{out}$  на гармонике IF 70 МГц в зависимости от  $P_{in}$ . Для этого определим выражение для зависимости выходной мощности  $P_{out}$  от входной мощности  $P_{in}$  на гармонике  $\text{idx\_IF}$ .

$$\text{Eqn } P_{out} = \text{dBm}(V_{out}[:, \text{idx\_IF}])$$

Рисунок

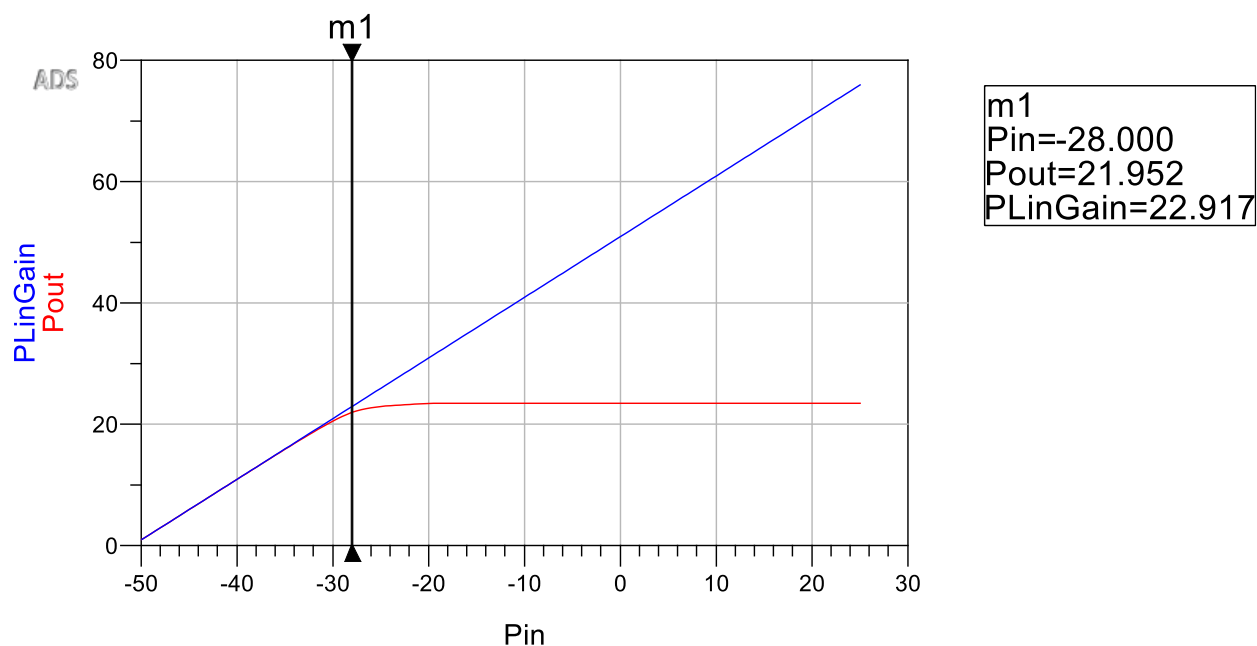
Линейный коэффициент усиления  $\text{linGain}$  определяется в линейном участке, т.е. на малых уровнях  $P_{in}$ , например, в начале отсчета по  $P_{in}$  (индексе 0). И чтобы получить линейную зависимость  $P_{\text{LinGain}}$ , достаточно сложить полученный линейный коэффициент усиления  $\text{linGain}$  со свипом входной мощности  $P_{in}$ .

$$\text{Eqn } \text{linGain} = P_{out}[0] - P_{in}[0]$$

$$\text{Eqn } P_{\text{LinGain}} = \text{linGain} + P_{in}$$

Рисунок

Отобразим на одном графике реальную зависимость выходной мощности  $P_{out}$  и линейную  $P_{\text{LinGain}}$  от входной мощности  $P_{in}$ . И найдем с помощью линейного маркера на этом графике точку, где разница между графиками станет в 1 дБ.



Рисунок

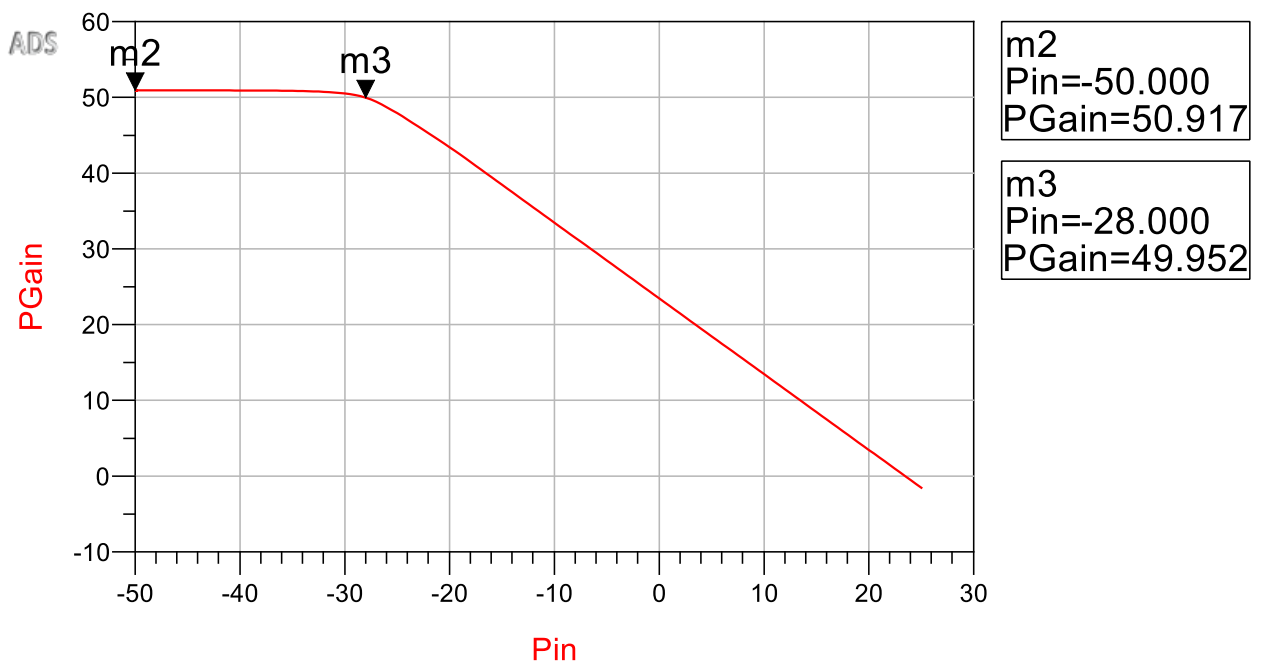
По графику получается точка однодецибельной компрессии, где выходная мощность соответствует P1dBout ~ 22 дБм, а входная мощность P1dBin ~ -28 дБм.

Можно проверить эти значения на основе правил пересчета выше:

$$22 \approx -28 + 50,9 - 1$$

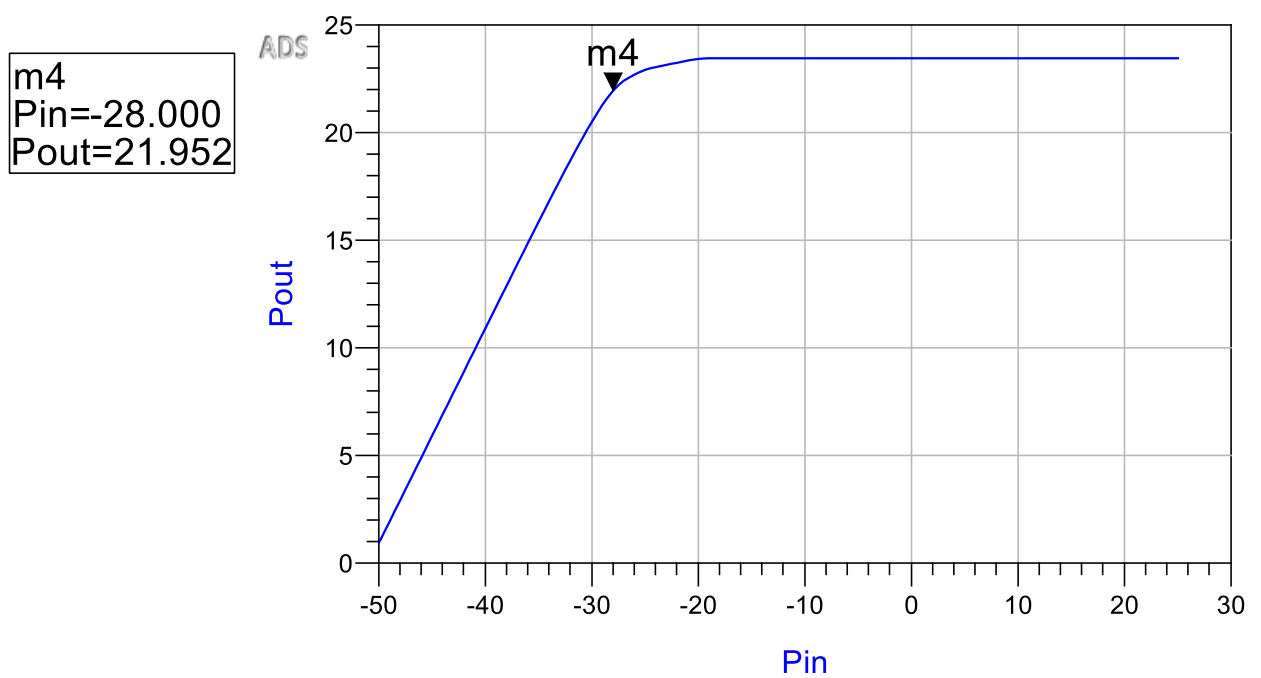
Также эту точку можно получить с графиков зависимости реального коэффициента усиления PGain и выходной мощности Pout от входной мощности Pin. На графике PGain ищется такое значение Pin, при котором PGain уменьшается на 1 дБ относительно линейного участка. Это значение Pin = -28 дБм и является точкой P1dBin.

$$\text{Eqn} \text{ PGain} = \text{Pout} - \text{Pin}$$



Рисунок

Затем на графике зависимости выходной мощности  $P_{out}$  от  $P_{in}$  ставится маркер в определенное выше значение  $P_{1dBin} = -28$  дБм. Значение  $P_{out} = 22$  дБм в этой точке будет значением  $P_{1dBout}$ .



Рисунок

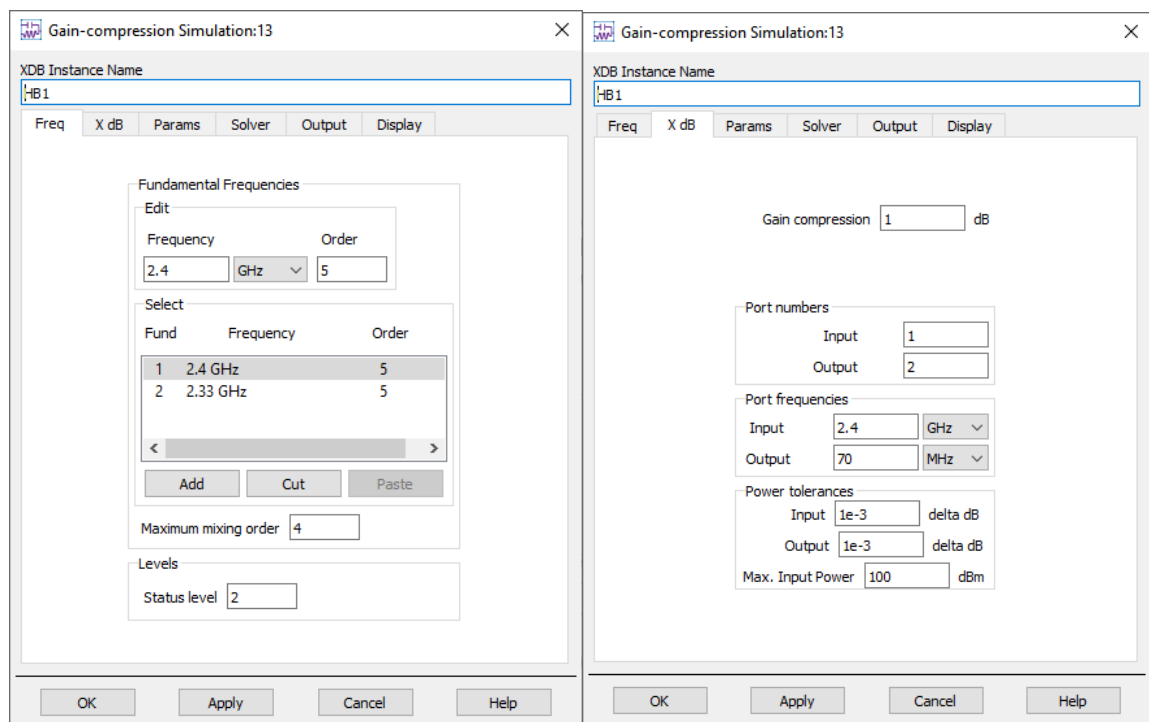
## Автоматический поиск точки однодецибельной компрессии

Также точку компрессии можно быстро определить через использование контроллера XDB из палитры Simulation-XDB (Ячейка ImitRF\_XDB).

Данный контроллер XDB по сути является модифицированным контроллером HB, который сам выполняет свип по входной мощности, находит нужные индексы в сетке частот и вычисляет точку компрессии.

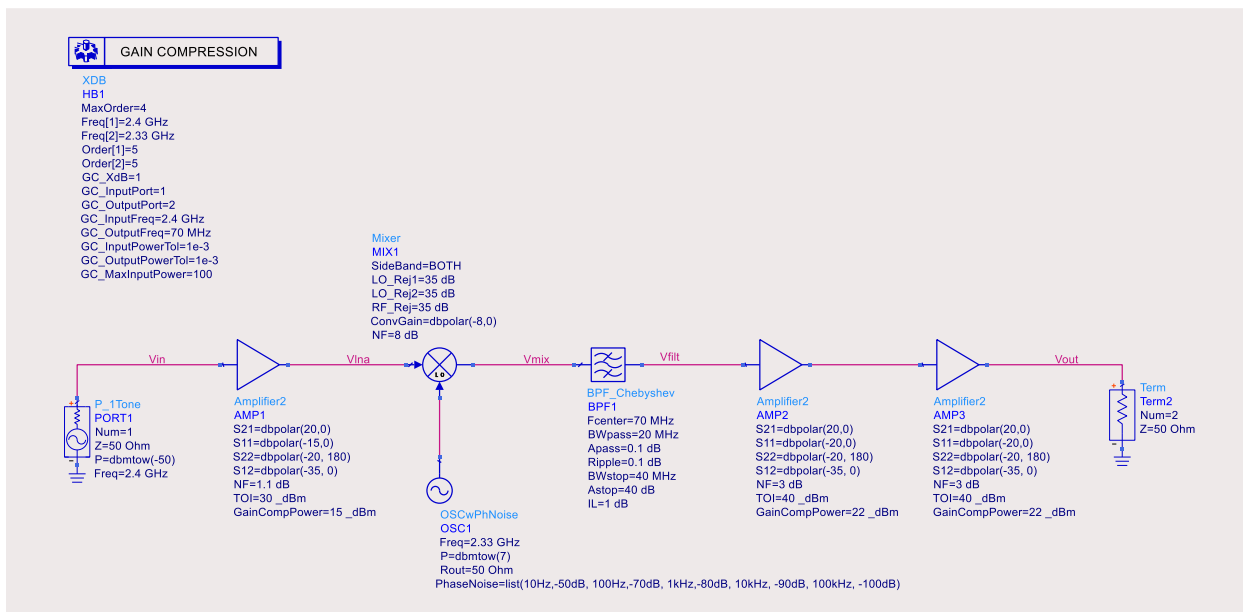
При настройке контроллера XDB необходимо аналогично контроллеру HB на вкладке Freq указать фундаментальные частоты и максимальный порядок их расчета. На вкладке X dB определяются параметры поиска компрессии:

- уровень компрессии, нам нужен 1 дБ;
- нумерация входного и выходного портов (определяется параметром Num в свойствах портов);
- входные и выходные частоты (2,4 ГГц и 70 МГц соответственно);
- максимальный допустимый входной уровень мощности (можно оставить по умолчанию 100 дБм).



Рисунок

Модель перед запуском должна иметь следующий вид.



Рисунок

В область результатов выдаются значения мощностей на входе (inpwr) и выходе (outpwr), при которых наступает компрессия.

inpwr	outpwr
-27.92 dBm	22.00 dBm

Рисунок

Также в результат контроллер XDB передают уровни мощностей по входу (inpwr\_lin) и выходу (outpwr\_lin) той точки, по которой он определял линейный коэффициент усиления.

$$EqnlinGain = outpwr\_lin - inpwr\_lin$$

inpwr_lin	outpwr_lin	linGain
-80.00 dBm	-29.08 dBm	50.919

Рисунок



Контроллер XDB ищет компрессию только для указанных в настройках входной и выходной частот. Но при этом он является модифицированным контроллером НВ и результаты в датасет должен передавать относительно сетки частот freq. Полную таблицу inpwr и outpwr нельзя интерпретировать как найденные зависимости точки компрессии на

различных частотах, достоверны эти результаты только для заданных в контроллере XDB частот.

freq	inpwr	outpwr
0.0000 Hz	-27.92 dBm	22.00 dBm
70.00 MHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
140.0 MHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
2.260 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
2.330 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
2.400 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
2.470 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
4.590 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
4.660 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
4.730 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
4.800 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
4.870 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm
6.990 GHz	-27.92 dBm	22.00 dBm

Рисунок

### Определение интермодуляционных искажений третьего порядка

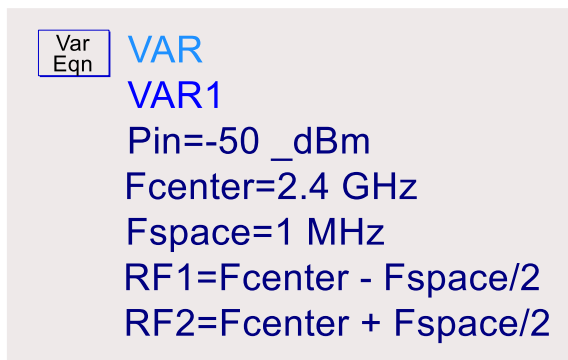
Одной из важных характеристик, описывающих нелинейные свойства устройства является уровень интермодуляционных искажений третьего порядка (TOI, IP3). Из теории известно, что подать на нелинейное устройство двух-тоновый сигнал (частоты  $f_1$  и  $f_2$ ,  $\Delta f = f_2 - f_1$ ), то на его выходе появится бесконечное число интермодуляционных составляющих вида  $\pm n f_1 \pm m f_2$ , где  $m$  и  $n$  – целые числа.

Третьи гармоники двух-тонового сигнала вида  $2f_1 - f_2$  и  $2f_2 - f_1$  оказываются близко к исходным частотам (на расстоянии  $\Delta f$  выше и ниже) и неизбежно попадают в рабочий частотный диапазон.

Измерение IP3 предполагает собой следующий подход (ячейка ImitRF\_IP3):

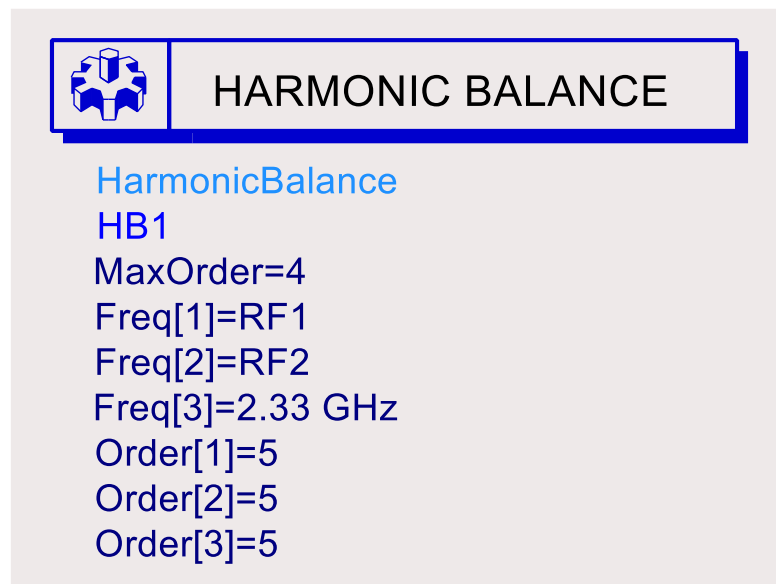
- На вход устройства подается два тона, отстоящих друг от друга на небольшую величину, пусть будет  $F_{space} = 1$  МГц, расположенных симметрично относительно центральной входной частоты RF 2,4 ГГц. Уровень подаваемой мощности должен быть такой, чтобы устройство работало в линейном режиме, пусть будет  $-50$  дБм. Удобно определить эти параметры через переменные.





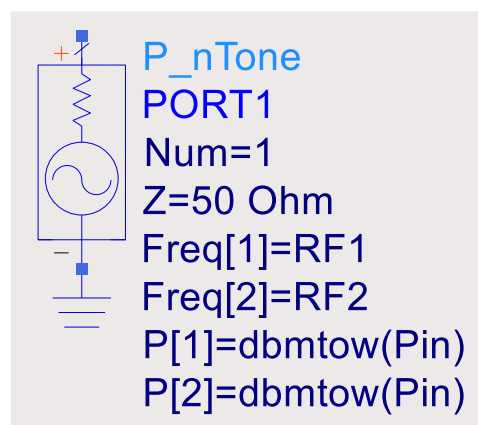
Рисунок

- Эти частоты RF1 и RF2 вместе с частотой гетеродина LO объявляются фундаментальными в контроллере НВ. Центральная входная частота RF 2,4 ГГц из этого списка исключается.



Рисунок

- Источником двух-тонового сигнала является блок P\_nTone из вкладки Sources-Freq Domain. В нем необходимо указать частоты входных сигналов и их мощности.

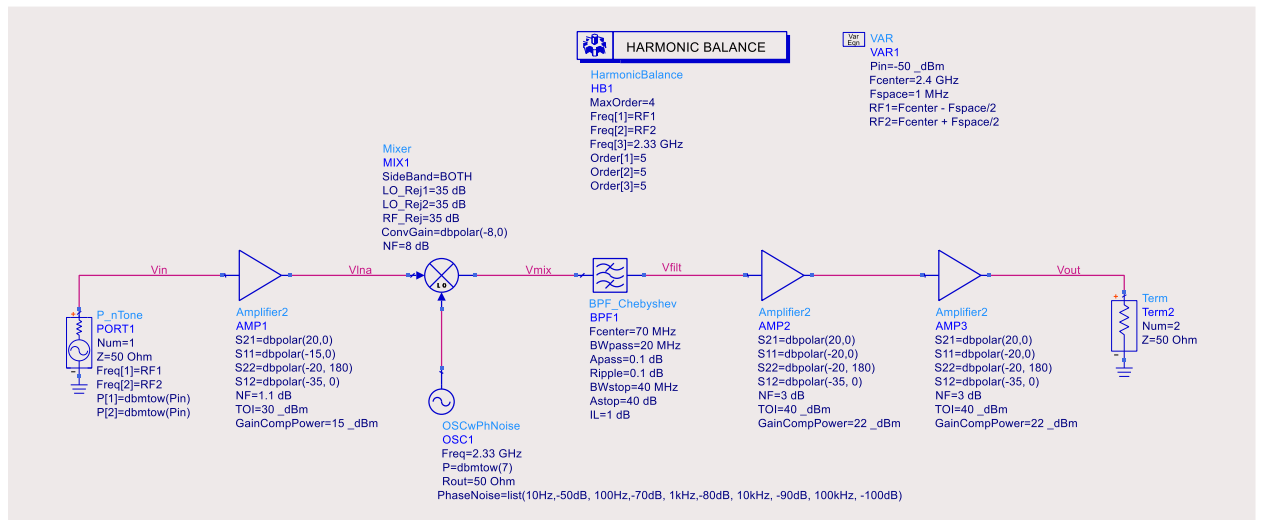


## Рисунок



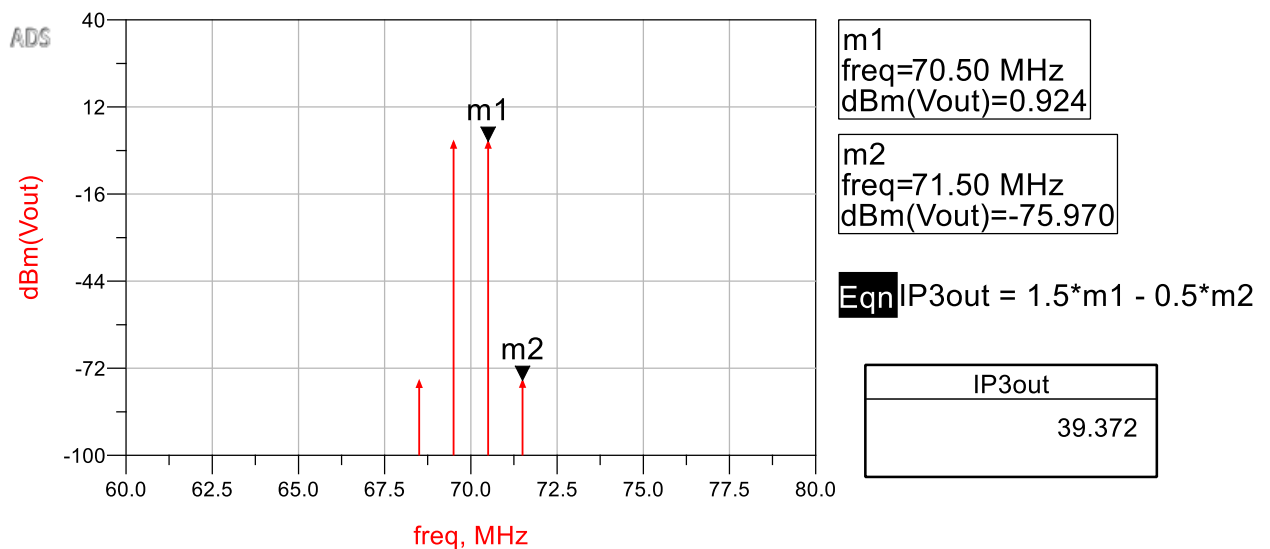
Если данная схема построена на основе других существующих в проекте, то нужно проследить за несколькими пунктами. В первую очередь, что в источнике P\_nTone заданы и обе частоты, и обе входные мощности. В контроллере НВ при этом отключен свип по входной мощности.

Модель перед запуском должна иметь следующий вид.



## Рисунок

В окне результатов расчета необходимо вывести гармоническое представление выходного сигнала (dBm(Vout)) в прямоугольном графике. Изменением масштаба показать область вокруг центральной выходной частоты IF 70 МГц. Поставив маркеры на одну следующим образом и воспользовавшись известным соотношением  $IP3_{out} = 1,5P_{f_2} - 0,5P_{2f_2-f_1}$ , можно получить  $IP3_{out}$  (в дБм). Маркеры можно поставить и на левую пару составляющих.



Рисунок

Данный расчет также можно провести автоматически с использованием функции `ip3_out(Vout, fundOutFreq, imOutFreq)`. Она для расчета требует знание того, как из фундаментальных частот появились выходная основная гармоника (маркер M1 в примере выше) и третья ближняя межгармоника (маркер M2). Воспользуемся для этого поиском индекса. Основная выходная гармоника на частоте 70,5 МГц, третья ближняя межгармоника на частоте 71,5 МГц.

**Eqn** F2\_idx = find\_index(freq, 70.5 MHz)

**Eqn** F2im\_idx=find\_index(freq, 71.5 MHz)

**Eqn** F2\_Mix = Mix[IF2\_idx]

**Eqn** F2im\_Mix=Mix[IF2im\_idx]

**Eqn** P3out\_calc = ip3\_out(Vout, IF2\_Mix, IF2im\_Mix)

IP3out_calc
39.372

Рисунок

### Анализ фазовых шумов

Для приемных ячеек важным является анализ фазовых шумов, определяемый в первую очередь, стабильностью опорного генератора в

гетеродине (ячейка ImitRF\_PhaseNoise). В исследуемой ячейке стабильность опорного генератора LO 2,33 ГГц задана с помощью спектральной плотности фазовых шумов.



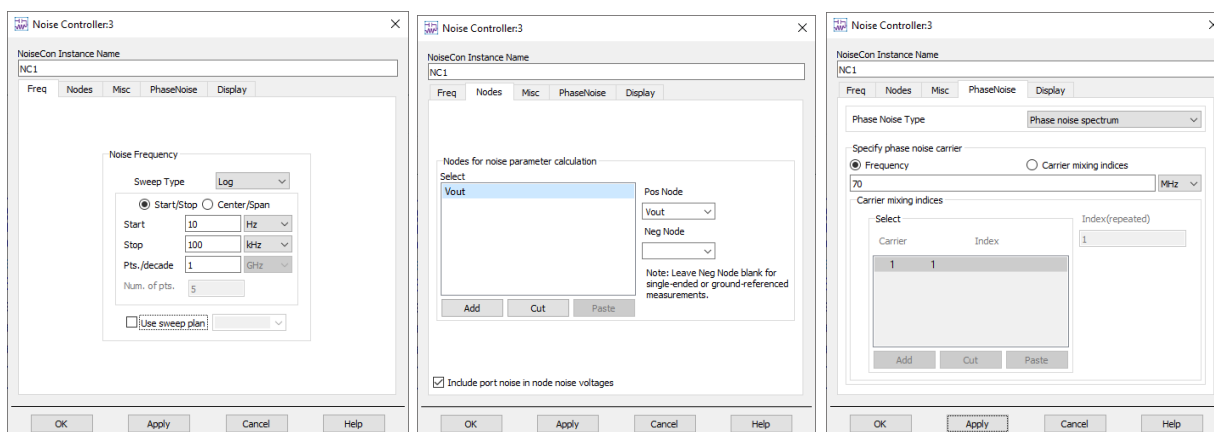
Рисунок

Для удобства указания моделирования вида шумов на основе существующего контроллера НВ удобно использовать дополнительный контроллер NoiseCon из вкладки Simulation-НВ. Его параметры должны быть выставлены следующим образом:

- На вкладке Freq указывается сетка относительных частот, для которых будут рассчитаны фазовые шумы (группа Noise Frequency). Зададим в логарифмическом масштабе (Sweep Type = Log), от 10 Гц до 100 кГц с 1 точкой на декаду (те же отстройки, на которых заданы фазовые шумы опорного генератора 10 Гц, 100 Гц, 1 кГц, 10 кГц и 100 кГц).

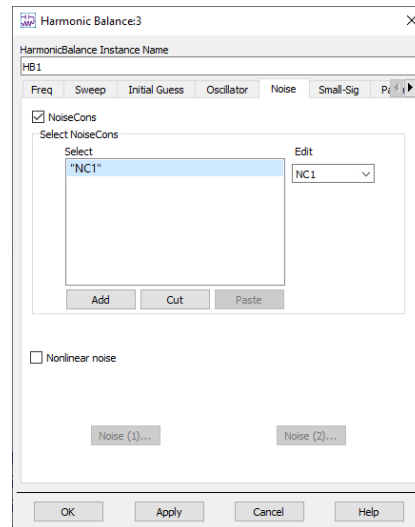
- На вкладке Nodes указывается выходной узел расчета Pos Node = Vout. Узел Neg Node оставляем пустым, т.к. расчет идет относительно земли, кнопкой Add добавить в список.

- На вкладке PhaseNoise указываем тип расчета – Phase noise spectrum и значение несущей, относительно которой рассчитываются фазовые шумы – выходная частота (70 МГц).



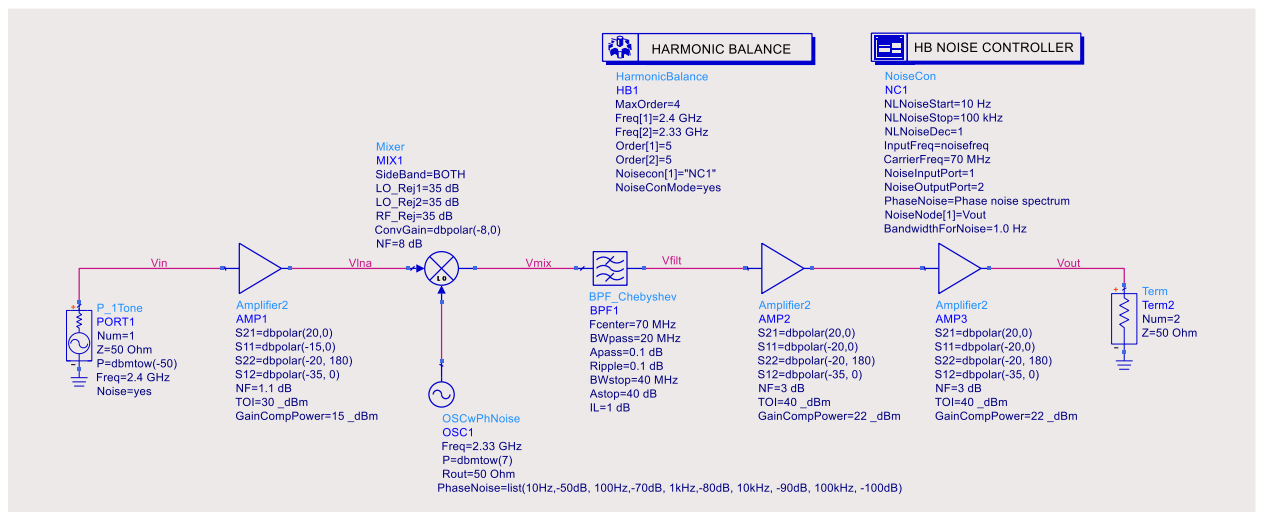
Рисунок

Главным контроллером анализа является HB1, ему необходимо подключить NoiseCon для анализа шумов. Для этого в HB1 на вкладке Noise надо включить анализ шумов (NoiseCons), в списке выбрать NC1 и добавить его кнопкой Add.



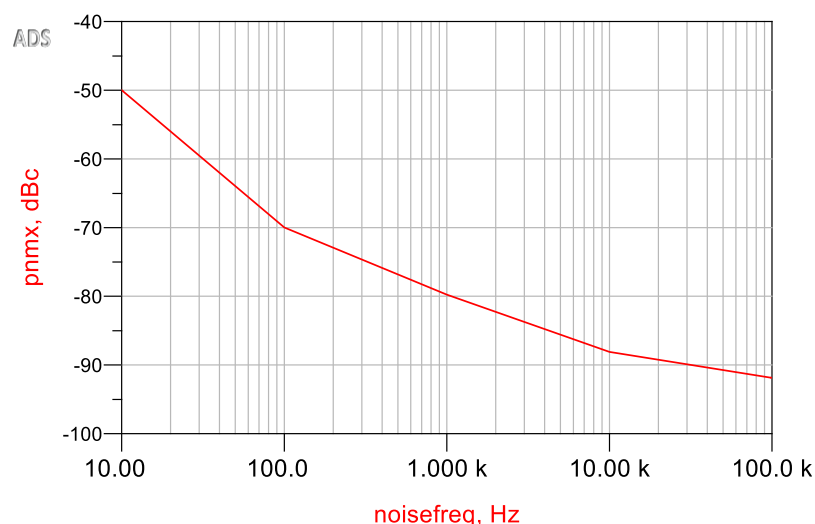
Рисунок

Модель перед запуском должна иметь следующий вид.



Рисунок

После анализа в прямоугольный график необходимо добавить результат rnmх (спектральная плотность фазовых шумов). Обычно графики спектральной плотности фазовых шумов строят в логарифмическом масштабе по оси X (noisefreq, отстройка частоты от несущей). Характер наклона уровня фазовых шумов в различных диапазонах отстроек от несущей имеет различное происхождение и характерные значения наклона.



Рисунок

Единица dBc (дБн) определяется как уровень спектральной составляющей по отношению к мощности на несущей частоте.

Данный уровень спектральной плотности мощности довольно плохой. Покажем влияние их на коэффициент шума приемного канала.

### Коэффициент шума приемной ячейки

Промоделируем коэффициент шума приемной ячейки (схема ImitRF\_Noise).

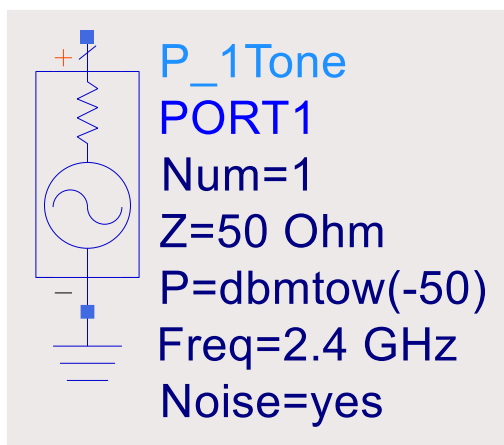
При анализе шумовых свойств устройств с переносом частоты нужно различать односторонний (NFSSB – Single SideBand) или (NFDSB – Double Side Band) двусторонний коэффициент шума. Какое из двух определений имеет смысл – определяется тем, подавляется ли в схеме смесителя зеркальная составляющая или нет.

Если зеркальная составляющая не подавляется (смеситель общего вида), то полезный сигнал переносится с потерями преобразования смесителя. А вот шум переносится не только с основного канала, но также и с зеркального, т.е. удваивается. В этом случае говорят об одностороннем коэффициенте шума NFSSB.

Если используется смеситель с прямым преобразованием (когда baseband сигнал присутствует с обеих сторон от нуля в спектре), то уровень полезного сигнала суммарно удваивается. В этом случае говорят об двустороннем коэффициенте шума NFDSB и он на 3 дБ меньше NFSSB.

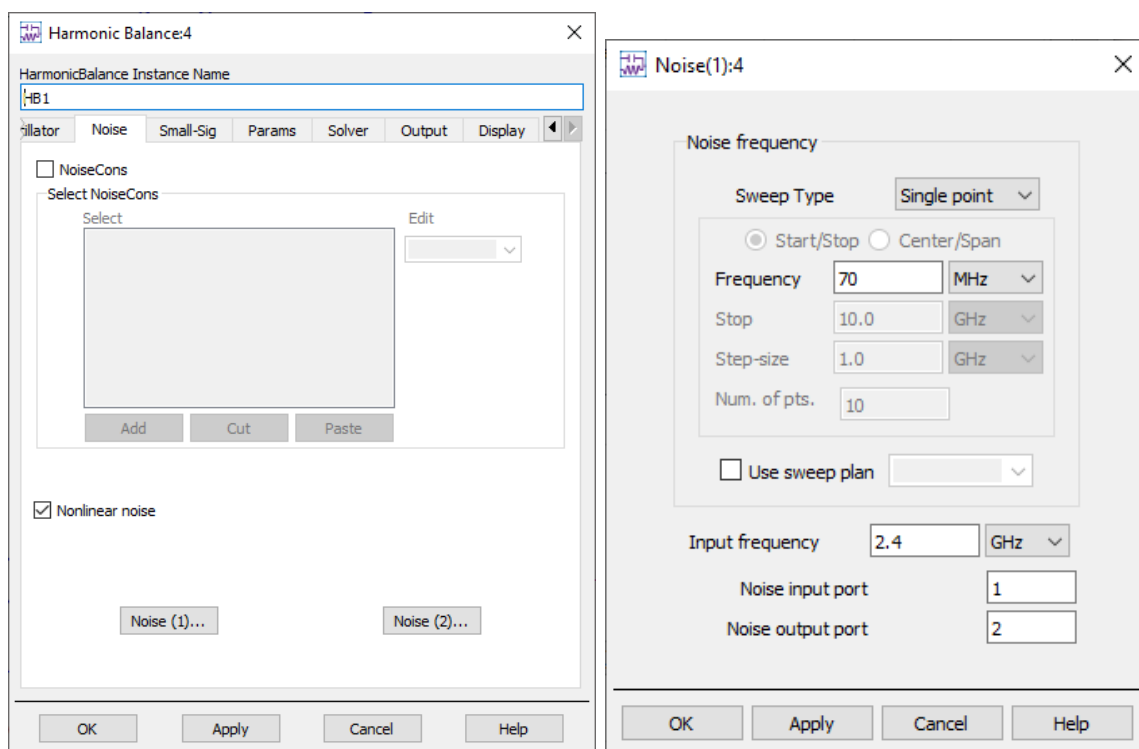
Коэффициент шума приемной ячейки критично зависит от стабильности опорного генератора. Сначала промоделируем модель с идеальным опорным генератором.

Для включения расчета влияния шумов необходимо убедиться, что во входном порте включена генерация теплового шума (Noise = yes).

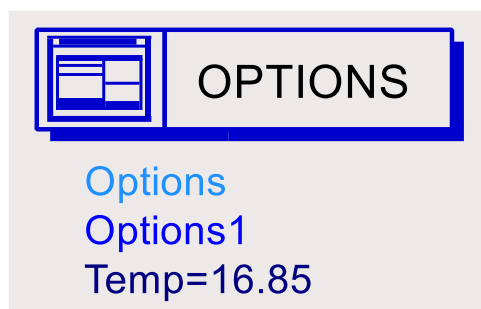


Рисунок

В контролере НВ необходимо на вкладке Noise включить расчет нелинейных шумов (галка Nonlinear noise) и по кнопке Noise (1) указать частоты расчета. Смотреть коэффициент шума мы будем по выходу, поэтому Noise frequency = 70 МГц, входная частота сигнала Input frequency = 2,4 ГГц, нумерация портов входной 1 и выходной 2.

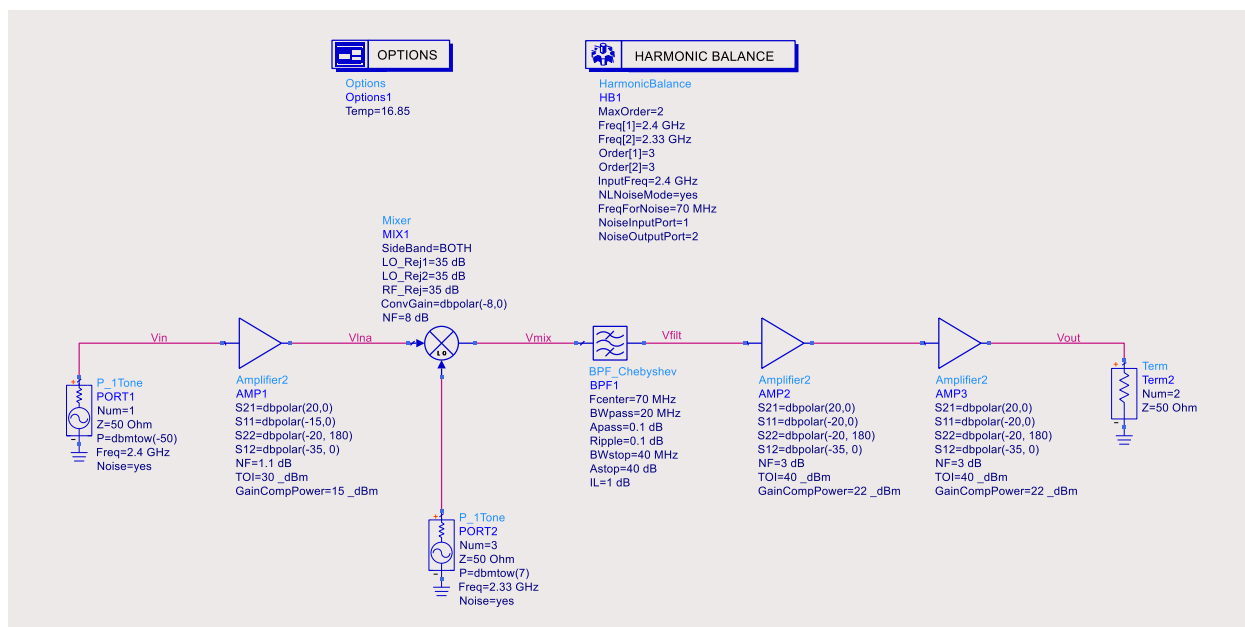


Коэффициент шума по определению считается при температуре моделирования 290 К (16,85°C). Добавим блок Options (находится во многих палитрах симуляторов, в том числе Simulation-HB) и установим температуру расчета 16.85.



Рисунок

Перед расчетом модель должна иметь следующий вид:



Рисунок



При запуске данной модели может предупреждение о неоднозначности частотной сетки. Возникает она из-за того, что возможно наложение сетки частот, сгенерированной на основе фундаментальных частот расчета, на сетку расчета шумовых частот. И симулятор в этом случае не гарантирует достоверных шумовых расчетов. Чтобы этого избежать, можно либо понизить порядки генерируемых гармоник (Order и MaxOrder), либо сдвинуть частоты расчета шумовых частот (FreqForNoise и InputFreq) на малое значение ~1-2 Гц, либо одну из фундаментальных частот расчета также сдвинуть на малое значение ~1-2 Гц,



так, чтобы частотные сетки не пересекались. В работе уменьшается порядок расчета гармоник (Order и MaxOrder).

В результатах моделирования выведем NFssb и NFdsb.

noisefreq	NFdsb	NFssb
70.00 MHz	1.433	4.443

Рисунок

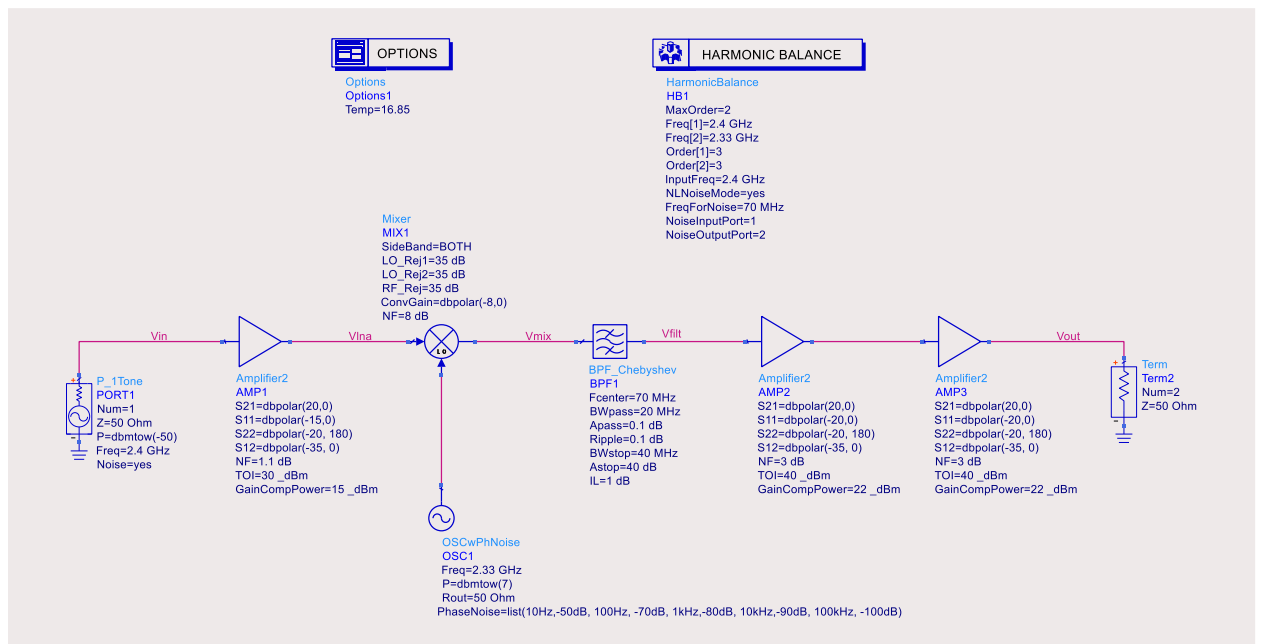
Т.к. в модели смеситель используется без подавления зеркальных составляющих, то адекватным для текущей ячейки будет коэффициент шума  $NF_{ssb} = 4,5$  дБ. Он получается как каскадное соединение четырехполюсников. При этом в расчете потери на смесителе считаются как 8 дБ, а коэффициент шума смесителя берется односторонний  $8 + 3 = 11$  дБ.

Заменяем теперь сигнал опорного генератора на источник с фазовыми шумами.



Рисунок

Схема перед моделированием.



Рисунок

И получаем отвратительный результат в 34,4 дБ. Связано это с тем, что нестабильность опорного генератора перемножается с входным сигналом и порождает очень плохой коэффициент шума у смесителя.

noisefreq	NFdsb	NFssb
70.00 MHz	31.369	34.379

Рисунок

Побороться с этим можно двумя способами:

- Можно изменить конфигурацию приемного канала так, чтобы смеситель стоял подальше, после усилителей. На основании правил расчёта коэффициента шума каскадного соединения четырехполюсников, добавка коэффициента шума смесителя в общий коэффициент шума становится значительно меньше и можно получить приемлемый результат. Но при этом, нужно следить за уровнями сигналов в узлах, чтобы контролировать возможный уход компонентов в компрессию.

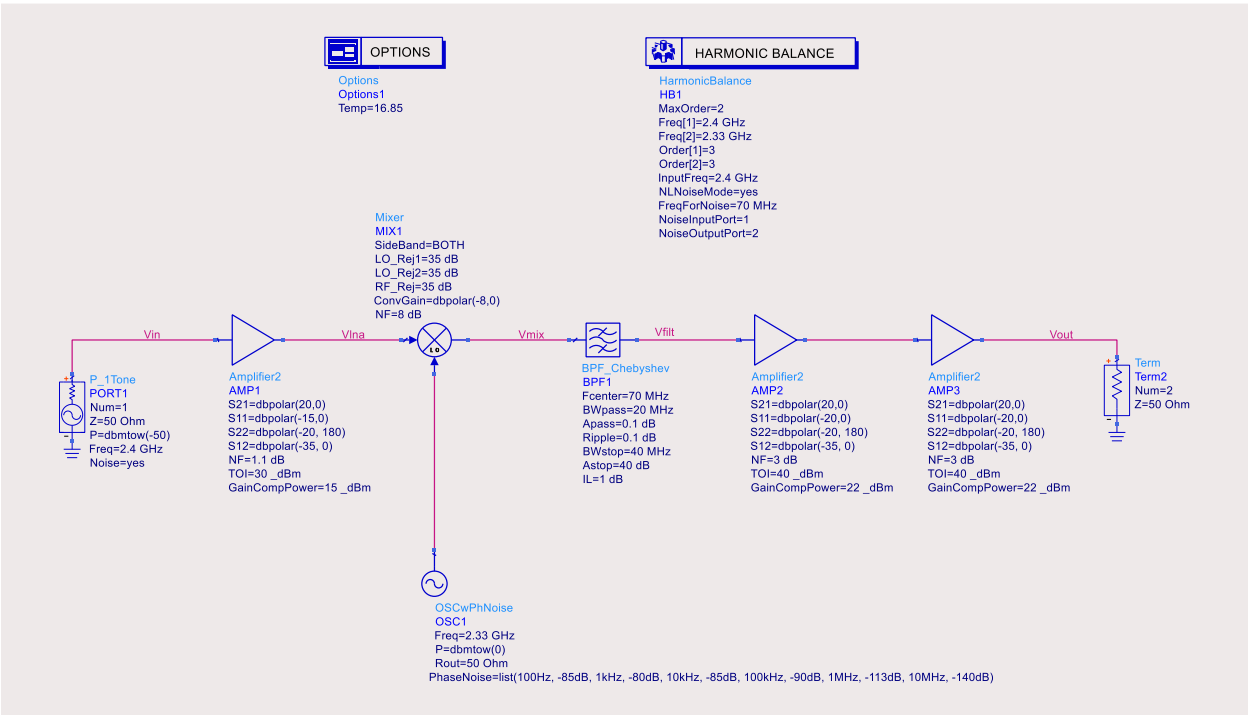
- Можно попробовать улучшить свойства генератора опорного сигнала по фазовым шумам, в примере он довольно плохой. Попробуем второй вариант.

Заменим опорный генератор на имеющий значительно лучшие характеристики.



Рисунок

Схема перед моделированием



Рисунок

Результаты дают гораздо лучший коэффициент шума, всего на 0,1 дБ меньше достижимого при идеальном опорном генераторе.

noisefreq	NFdsb	NFssb
70.00 MHz	1.548	4.558

Рисунок

### Задание на выполнение

В соответствии с вариантом промоделировать имитационную модель приемного канала.

В таблице 1 приведении параметры основных блоков моделей по вариантам.

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.

**Таблица 1 – Вариант задания**

Вариант	МШУ	УМ	Частоты RF и IF, полоса сигнала
1	$K_p = 13$ дБ, $K_{ш} = 2,8$ дБ, TOI = 38 дБм, P1dB = 21 дБм	$K_p = 17$ дБ, $K_{ш} = 3,2$ дБ, TOI = 45,5 дБм, P1dB = 19 дБм	$f_{RF} = 2,2$ ГГц, $f_{IF} = 70$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 20$ МГц
2	$K_p = 15$ дБ, $K_{ш} = 1,5$ дБ, TOI = 37 дБм, P1dB = 22 дБм	$K_p = 19,8$ дБ, $K_{ш} = 2,6$ дБ, TOI = 45 дБм, P1dB = 20 дБм	$f_{RF} = 2,3$ ГГц, $f_{IF} = 90$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 17$ МГц
3	$K_p = 20$ дБ, $K_{ш} = 1,1$ дБ, TOI = 31 дБм, P1dB = 17 дБм	$K_p = 21$ дБ, $K_{ш} = 2,5$ дБ, TOI = 40 дБм, P1dB = 21 дБм	$f_{RF} = 2,4$ ГГц, $f_{IF} = 120$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 21$ МГц
4	$K_p = 13$ дБ, $K_{ш} = 2,3$ дБ, TOI = 38 дБм, P1dB = 22 дБм	$K_p = 21,5$ дБ, $K_{ш} = 2,5$ дБ, TOI = 41 дБм, P1dB = 21 дБм	$f_{RF} = 2,5$ ГГц, $f_{IF} = 135$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 33$ МГц
5	$K_p = 19$ дБ, $K_{ш} = 0,9$ дБ, TOI = 33 дБм, P1dB = 19 дБм	$K_p = 17$ дБ, $K_{ш} = 3$ дБ, TOI = 37 дБм, P1dB = 22 дБм	$f_{RF} = 2,6$ ГГц, $f_{IF} = 80$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 25$ МГц

6	$K_p = 17$ дБ, $K_{III} = 1,5$ дБ, TOI = 30 дБм, P1dB = 18 дБм	$K_p = 17$ дБ, $K_{III} = 3,2$ дБ, TOI = 45,5 дБм, P1dB = 19 дБм	$f_{RF} = 2,7$ ГГц, $f_{IF} = 95$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 38$ МГц
7	$K_p = 15$ дБ, $K_{III} = 1,8$ дБ, TOI = 25 дБм, P1dB = 13 дБм	$K_p = 19,8$ дБ, $K_{III} = 2,6$ дБ, TOI = 45 дБм, P1dB = 20 дБм	$f_{RF} = 2,8$ ГГц, $f_{IF} = 105$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 44$ МГц
8	$K_p = 15$ дБ, $K_{III} = 1,5$ дБ, TOI = 37 дБм, P1dB = 22 дБм	$K_p = 21$ дБ, $K_{III} = 2,5$ дБ, TOI = 40 дБм, P1dB = 21 дБм	$f_{RF} = 2,9$ ГГц, $f_{IF} = 140$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 12,5$ МГц
9	$K_p = 13$ дБ, $K_{III} = 2,3$ дБ, TOI = 38 дБм, P1dB = 22 дБм	$K_p = 21,5$ дБ, $K_{III} = 2,5$ дБ, TOI = 41 дБм, P1dB = 21 дБм	$f_{RF} = 3$ ГГц, $f_{IF} = 150$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 84$ МГц
10	$K_p = 18$ дБ, $K_{III} = 1$ дБ, TOI = 33 дБм, P1dB = 19 дБм	$K_p = 17$ дБ, $K_{III} = 3$ дБ, TOI = 37 дБм, P1dB = 22 дБм	$f_{RF} = 3,2$ ГГц, $f_{IF} = 160$ МГц, $\Delta f_{-3dB} = 36$ МГц

### **Этапы выполнения**

1. Создание и расчет базовой схемы (ячейка ImitRF\_Channel):

- для входного МШУ и выходных УМ задать параметры из таблицы вариантов заданий (табл.1)

- частоты анализа контроллера НВ определяются частотами входного сигнала  $f_{RF}$  и гетеродина  $f_{LO} = f_{RF} - f_{IF}$ . Эти же частоты задаются в порты-источники

- фильтр модифицировать таким образом, чтобы он пропускал рабочую полосу ( $A_{pass} = 0,1$  дБ) и не пропускал сигналы в полосе вдвое большей рабочей ( $A_{stop} = 40$  дБ). Указать также дополнительные потери  $IL = 1$  дБ/

- смеситель оставить по умолчанию (потери преобразования 8 дБ и двусторонний коэффициент шума 8 дБ).

- фазовые шумы и мощности портов источников оставить по умолчанию.

- провести анализ прохождения полезного сигнала методом гармонического анализа.

- вывести структуру частотной сетки `freq`, освоить принципу построения частотной сетки с помощью `Mix` и освоить инструмент поиска индексов в результате `find_index()`

2. Расчет точки одностенцибельной компресии канала (ячейки `ImitRF_P1dB` и `ImitRF_XDB`):

- подготовить схему `ImitRF_P1dB` со свипом входной мощности `Pin`.

- построить графики зависимости выходной мощности `Pout` от входной мощности `Pin` и найти на ней точку одностенцибельной компресии как разность на 1 дБ от линейной зависимости `PLinGain`.

- построить графики зависимости коэффициента усиления `PGain` и выходной мощности `Pout` от входной мощности и найти точку одностенцибельной компресии с их помощью.

- подготовить схему автоматизированного поиска точки одностенцибельной компресии `ImitRF_XDB` и с найти точку одностенцибельной компресии с ее помощью.

3. Расчет интермодуляционных искажений третьего порядка (ячейка `ImitRF_IP3`):

- подготовить схему с подачей двухтонового входного сигнала с малой отстройкой (~1 МГц).

- схема должна работать в линейном режиме.

- используя составляющие спектра вокруг выходного сигнала, рассчитать `IP3out`.

4. Анализ фазовых шумов (ячейка `ImitRF_PhaseNoise`):

- подготовить схему к моделированию фазовых шумов.

- получить спектральную плотность фазовых шумов.

5. Коэффициент шума приемной ячейки с переносом частоты (ячейка `ImitRF_Noise`):

- подготовить схему для моделирования коэффициента шума приемной ячейки.

- в качестве источника опорного сигнала брать модель P\_1Tone, не имеющую фазовых шумов.

- как результат коэффициента шума приемной ячейки брать результат NFssb – односторонний коэффициент шума, т.к. использован сместитель без подавления зеркального канала.

- заменить источник опорного сигнала на модель OSCwPhNoise с исходным списком уровней фазовых шумов. Получить новый результат коэффициента шума приемной ячейки. Сравнить с исходным.

- заменить в модели опорного генератора список фазовых шумов на улучшенный. Получить новый результат коэффициента шума приемной ячейки. Сравнить с предыдущими результатами.

## 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\_Lab3\_ImitRF вместо непонятного Lab3 или Workspace3).



### **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. Что подразумевается под имитационным моделированием ВЧ-канала?
2. Какие основные параметры задают линейные свойства усилителя?
3. Какие основные параметры задают нелинейные свойства усилителя?
4. Опишите стандартную методику измерения интермодуляционных искажений третьего порядка.
5. Каким образом определяется точка однодецибелной компрессии нелинейного устройства?
6. В какой (временной или частотной) области получают значения узловых напряжений при расчете нелинейных цепей методом гармонического баланса?
7. Поясните разницу между односторонним и двусторонним коэффициентом шума устройства с переносом частоты? Какой из них использовался в работе и почему?
8. Приведите пример, как фазовые шумы опорного генератора влияют на коэффициент шума приемной ячейки с переносом частоты?
9. Поясните структуру значений freq и Mix? Как они связаны с настройками моделирования?
10. Почему при настройке режима моделирования гармонического баланса в качестве фундаментальных частот необходимо указывать несущие частоты источников 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.