

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ
И ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторного практикума
для студентов очной формы
обучения специальности
11.05.01 «Радиоэлектронные системы и комплексы»

Севастополь
СевГУ
2025

УДК 621.3.049.77:535-12(076.5)
ББК 32.844.1я73
П791

Р е ц е н з е н т :

А. А. Савочкин - канд. техн. наук, доцент

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин - д-р техн. наук, профессор,
заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

Составители: В. В. Вертегел, А. С. Манько

П791 Проектирование интегральных схем радиочастотного диапазона :
учебно-методическое пособие по выполнению лабораторного практикума
для студентов очной формы обучения специальности 11.05.01 «Радиоэлек-
тронные системы и комплексы» / Севастопольский государственный уни-
верситет ; сост.: В. В. Вертегел, А. С. Манько. – Севастополь : СевГУ,
2025. – 63 с. – Текст : электронный.

Цель методических указаний – оказание помощи обучающимся очной формы обучения в подготовке и выполнении лабораторного практикума по дисциплине «Проектирование интегральных схем радиочастотного диапазона», а также в получении ими теоретических знаний и приобретении практических навыков исследования устройств радиочастотного диапазона.

УДК 621.3.049.77:535-12(076.5)
ББК 32.844.1я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры
«Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 6 от 28 ноября 2024 г.

© Вертегел В. В., Манько А.С., сост., 2025
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2025

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1. Лабораторная работа № 1. Моделирование и исследование характеристик малошумящего усилителя РЧ-диапазона.....	7
1.1. Цели работы	7
1.2. Теоретические сведения	7
1.2.1. Частотные параметры	7
1.2.2. Динамический диапазон	9
1.2.3. Шумовые характеристики	10
1.3. Подготовка к выполнению лабораторных работ	10
1.4. Выполнение лабораторной работы	14
1.4.1. Подготовка схемы к моделированию.....	14
1.4.2. Исследование коэффициента усиления и спектра выходного сигнала	16
1.4.3. Исследование частотных параметров	20
1.4.4. Исследование динамического диапазона	23
1.4.5. Исследование шумовых свойств	25
1.4.6. Исследование способов понижения коэффициента шума.....	25
1.5. Содержание отчёта	27
1.6. Контрольные вопросы	27
2. Лабораторная работа № 2. Моделирование и исследование характеристик активного смесителя РЧ-диапазона.....	29
2.1. Цели работы	29
2.2. Теоретические сведения	29
2.2.1. Принцип преобразования частоты	29
2.2.2. Основные характеристики смесителей	30
2.3. Выполнение лабораторной работы	31
2.3.1. Подготовка схемы к моделированию.....	31
2.3.2. Исследование коэффициента преобразования.....	33
2.3.3. Исследование переходного ослабления сигнала гетеродина	39
2.3.4. Исследование шумовых свойств	40

2.3.5. Исследование динамического диапазона	42
2.4. Содержание отчёта	43
2.5. Контрольные вопросы	44
3. Лабораторная работа №3 «Моделирование и исследование характеристик опорного генератора РЧ-диапазона»	46
3.1. Цели работы	46
3.2. Теоретические сведения	46
3.2.1. Принцип формирования опорной частоты	46
3.2.2. Основные характеристики генератора	47
3.3. Выполнение лабораторной работы	48
3.3.1. Подготовка схемы к моделированию	48
3.3.2. Исследование частоты генерации	49
3.3.3. Исследование спектра выходного сигнала	52
3.3.4. Исследование фазового шума и джиттера сигнала	54
3.3.5. Исследование характеристик при перестройке частоты	57
3.3.6. Исследование способов понижения уровня фазовых шумов	58
3.4. Содержание отчёта	60
3.5. Контрольные вопросы	61
Библиографический список	62
Приложение А. Образец оформления титульного листа отчёта по лабораторной работе	63

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Проектирование интегральных схем радиочастотного диапазона» изучается студентами специальности 11.05.01 Радиозлектронные системы и комплексы очной формы обучения в десятом семестре.

При изучении дисциплины обучающиеся выполняют и защищают цикл из трёх лабораторных работ, которые нацелены на получение практических навыков моделирования и исследования характеристик интегральных схем радиочастотного диапазона, к которым относятся малошумящие усилители, смесители и опорные генераторы.

После изучения дисциплины «Проектирование интегральных схем радиочастотного диапазона» студент должен знать:

- основные понятия интегральной схемотехники радиочастотного диапазона;
- структурные и схемные решения различных типов интегральных схем (ИС) радиочастотного диапазона;
- методы расчёта основных узлов ИС радиочастотного диапазона;
- порядок работы в одной из профессиональных систем автоматического проектирования (САПР), используемой в профессиональной деятельности;
- методики определения характеристик ИС радиочастотного диапазона;
- методики оптимизации заданных характеристик ИС.

В результате изучения данной дисциплины студент должен уметь:

- выбрать по заданным требованиям необходимую структуру ИС или её функционального блока;
- составить принципиальную схему ИС в пакете САПР;
- рассчитать элементы принципиальной схемы ИС;
- выполнить симуляцию разработанной ИС и определить её характеристики с помощью пакета САПР;
- выполнить исследование характеристик разработанной ИС и оптимизацию её характеристик;
- оформить техническую документацию на ИС в соответствии с действующими стандартами.

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом индивидуально каждым студентом. Все задания выполняются с использованием пакета программ *Cadence IC Virtuoso Design*.

На выполнение каждой из лабораторных работ отводится по шесть часов.

Каждая лабораторная работа выполняется в два этапа. На первом этапе студенты самостоятельно должны изучить по конспекту лекций и рекомендованной литературе, приведенной в библиографическом списке, основные теоретические положения лабораторной работы.

На втором этапе, выполняемом в лаборатории университета, студенты должны:

- выполнить программу лабораторной работы, демонстрируя преподавателю промежуточные результаты выполнения и сохраняя полученные результаты в виде числовых данных и графиков в черновую версию отчёта;

- оформить отчёт по лабораторной работе в соответствии с указаниями, которые приводятся в конце описания каждой лабораторной работы;
- защитить отчёт по лабораторной работе.

Отчёт по лабораторной работе должен содержать: титульный лист, цель и задачи работы, принципиальную схему исследуемого узла ИС, описание хода выполнения работы, полученные результаты, сводную таблицу измеренных и исследованных характеристик исследуемого узла ИС и выводы.

Образец титульного листа отчёта по лабораторной работе представлен в приложении А.

Отчёт по лабораторной работе оформляется в соответствии с методическими указаниями по оформлению текстовых работ [1] независимо каждым студентом с использованием персонального компьютера (ПК) и печатается с помощью принтера. По усмотрению преподавателя допускается представление оформленного отчёта в электронном виде на ПК.

По краям листа должны быть оставлены поля: левое — 25 мм; верхнее и нижнее — 20 мм; правое — 15 мм. Рисунки и таблицы должны быть пронумерованы и сопровождаться подписями и пояснениями.

При выполнении лабораторных работ и подготовке к защите рекомендуется использовать учебную и справочную литературу [2—9].

Лабораторная работа № 1

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МАЛОШУМЯЩЕГО УСИЛИТЕЛЯ РЧ-ДИАПАЗОНА

1.1. Цели работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо изучить методы, применяемые в САПР *Cadence IC Virtuoso Design* для моделирования и анализа характеристик усилительных схем на примере малошумящего усилителя (МШУ). Необходимо проанализировать следующие характеристики:

- коэффициент усиления и спектр выходного сигнала МШУ;
- частотные зависимости S -параметров и коэффициента стоячей волны по напряжению по входу и выходу;
- динамический диапазон;
- шумовые свойства.

В ходе выполнения лабораторной работы также необходимо исследовать способы понижения коэффициента шума усилительного каскада.

1.2. Теоретические сведения

1.2.1. Частотные параметры

Радиочастотный диапазон (РЧ — RF, сокр. от «Radio Frequencies») характеризуется рядом отличительных особенностей, которые необходимо учитывать при моделировании и исследовании характеристик.

Из курса теории цепей известно, что существует три вида согласования четырёхполюсников:

- согласование по напряжению;
- согласование по току;
- **согласование по мощности.**

Для устройств диапазона РЧ и СВЧ (сверхвысоких частот) наиболее характерен последний вид согласования. Для согласования двух четырёхполюсников по мощности, при котором из первого четырёхполюсника (источника) во второй четырёхполюсник (нагрузка) передаётся максимальная мощность, необходимо обеспечить равенство между комплексным внутренним сопротивлением источника $Z_{\text{ист}}$ и комплексно-сопряжённым сопротивлением нагрузки $Z_{\text{н}}^*$:

$$Z_{\text{ист}} = Z_{\text{н}}^*.$$

В связи с этим, при анализе РЧ и СВЧ устройств используются параметры матрицы рассеяния, называемые также **S -параметрами** (*scattering*). Они позволяют описать соотношения между мощностью, передаваемой в нагрузку, и мощностью, отражённой от входа четырёхполюсника обратно в направлении источника сигнала. Матрица S -параметров имеет следующий вид:

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix},$$

где S_{11} — коэффициент отражения по входу, характеризующий долю мощности, отражённую от входа четырёхполюсника;
 S_{21} — коэффициент передачи по мощности;
 S_{22} — коэффициент отражения по выходу, характеризующий долю мощности, отражённую от нагрузки четырёхполюсника;
 S_{12} — обратный коэффициент передачи.

В инженерной практике для оценки степени согласования четырёхполюсника зачастую применяется более удобная характеристика, называемая **коэффициентом стоячей волны по напряжению (КСВН)**, который определяется через модуль коэффициента отражения Γ ($|S_{11}|$ или $|S_{22}|$ — по входу или выходу) в соответствии с выражением

$$K_{\text{СВН}} = \frac{1 - \Gamma}{1 + \Gamma}.$$

Удовлетворительным можно считать согласование, при котором **КСВН во всём диапазоне рабочих частот не превышает значения 2,0**. Этот случай соответствует передаче не менее 90 % от максимальной мощности, поступившей в нагрузку.

Для оценки согласованности четырёхполюсника по входу/выходу строят зависимость КСВН от частоты в декартовой системе координат, либо частотную зависимость коэффициента отражения Γ в форме **диаграммы Вольперта — Смита**, пример варианта которой приведен на рис. 1.1.

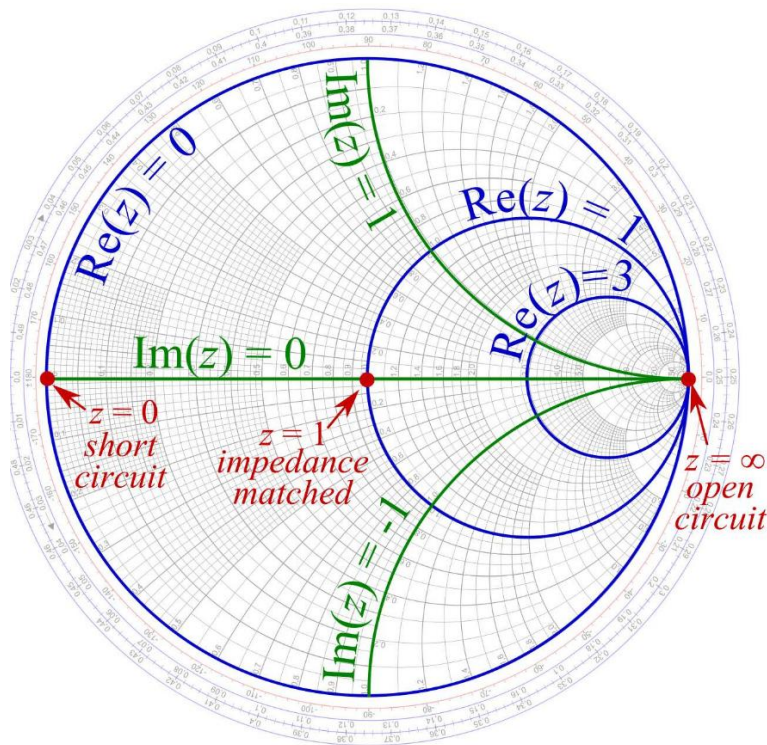


Рис. 1.1 — Демонстрация диаграммы Вольперта — Смита

Более подробные сведения о работе с диаграммами Вольперта — Смита содержатся в [3].

1.2.2. Динамический диапазон

Усилители, которые представляют собой класс принципиально нелинейных устройств, неизбежно вносят нелинейные искажения в форму входного сигнала, насыщая спектр сигнала на выходе новыми гармониками.

Диапазон значений входной мощности, в пределах которого усиление можно считать относительно линейным при заданном допустимом коэффициенте нелинейных искажений, называют **динамическим диапазоном** усилителя. Приблизительную оценку динамического диапазона и нелинейных свойств можно осуществить по виду **амплитудной характеристики** усилителя, которая приведена на рис. 1.2.

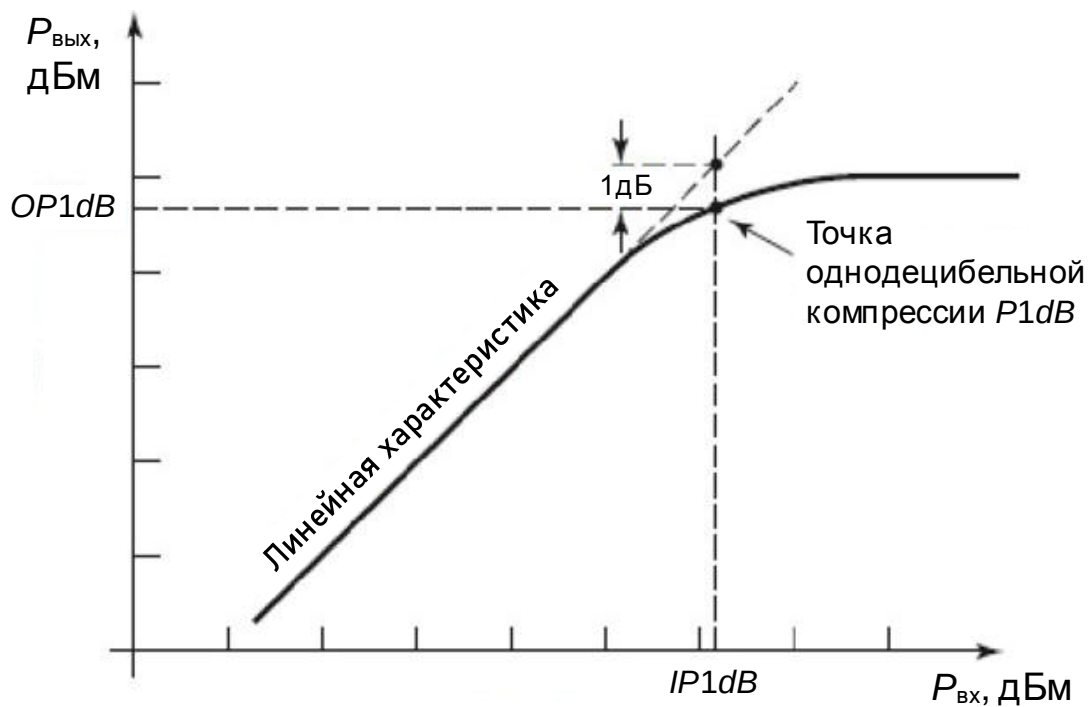


Рис. 1.2 — Амплитудная характеристика усилителя

По мере увеличения входной мощности всё более проявляются нелинейные свойства усилителя. Это приводит к постепенному переходу в область насыщения транзистора и возникновению значительных нелинейных искажений в форме выходного сигнала.

По амплитудной характеристике усилителя можно определить нелинейные параметры усилителя, к которым прежде всего относятся точка однопдецибельной компрессии усилителя и точка пересечения с интермодуляционной характеристикой 3-го порядка.

Точка однопдецибельной компрессии $P1dB$ — это параметр, соответствующий такому уровню мощности, при котором коэффициент усиления уменьшается на 1 дБ сравнительно с усилением в режиме малых сигналов. Она может определяться как по входу (соответствует уровню входной мощности) — **$IP1dB$ (Input $P1dB$)**, так и по выходу — **$OP1dB$** .

Точка пересечения с интермодуляционной характеристикой 3-го порядка $IP3$ — это параметр, соответствующий такому уровню мощности, при

котором идеальная амплитудная характеристика интермодуляционной составляющей 3-го порядка пересекается с идеальной амплитудной характеристикой усилителя. Эта величина определяется для двухтональных сигналов, т.е. содержащих две близких друг к другу в спектре частоты, и может служить как исключительно теоретическая мера оценки меры нелинейности усиления.

1.2.3. Шумовые характеристики

При проектировании входных усилителей в приёмных трактах особое внимание уделяется шумовым свойствам усилителя, которые в значительной степени определяют итоговый коэффициент шума всего тракта, и как следствие, чувствительность приёмника.

Шумовые свойства РЧ и СВЧ усилителей, как правило, характеризуются **коэффициентом шума** (*Noise Figure* — *NF*). Эта величина показывает, во сколько раз при прохождении аддитивной смеси сигнала и шума через многополюсник уменьшается отношение сигнал/шум по мощности (*Signal-to-Noise Ratio* — *SNR*):

$$NF = 10 \lg \left(\frac{SNR_{\text{вх}}}{SNR_{\text{вых}}} \right).$$

При проектировании усилительных каскадов на входе приёмного радиотракта стараются добиться как можно меньшего значения коэффициента шума в диапазоне рабочих частот. Такие усилители получили название **малозумящих усилителей (МШУ)** — *Low Noise Amplifier (LNA)*.

Для уменьшения внутренних шумов каскадов могут использоваться следующие рекомендации:

- оптимальное по критерию минимального коэффициента шума согласование МШУ с источником сигнала, которое, как правило, осуществляют с использованием методики подстройки входного импеданса *Load Pull* [3];
- подбор оптимальных величин рабочих токов транзисторных каскадов, что приводит к понижению уровня фликкер-шумов;
- минимальное использование омических сопротивлений, вносящих существенный вклад в итоговый уровень шума из-за тепловых шумов;
- по возможности для построения МШУ следует использовать биполярные транзисторы, поскольку уровень их собственных шумов ниже, чем у аналогичных по характеристикам полевых транзисторов.

1.3. Подготовка к выполнению лабораторных работ

1.3.1. Запустите с рабочего стола менеджер управления виртуальными машинами **Oracle VM Virtual Box**. Выберите виртуальную машину **CentOS_5_Student** и нажмите *Запустить*.

1.3.2. В окне авторизации введите учётные данные пользователя — логин и пароль, — которые выдаются преподавателем.

1.3.3. Для запуска среды проектирования *Cadence IC Design Environment* нажмите **правой кнопкой мыши** по рабочему столу и выберите **Open Terminal**.

1.3.4. В результате откроется окно *Terminal*, в котором необходимо выбрать пункт версию *IC 5.141 USR 5 Design Tools*, как показано на рис. 1.3. Для этого следует **нажать «1»**.

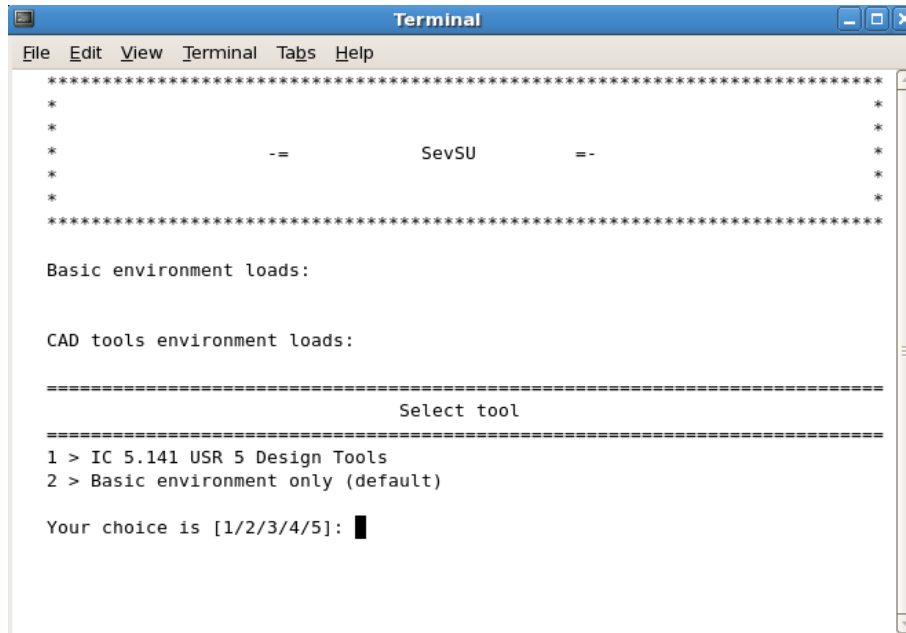


Рис. 1.3 — Окно выбора версии среды проектирования

1.3.5. После выбора версии САПР необходимо выбрать технологическую библиотеку **XFAB (XB06)**, которая подключает файлы технологической библиотеки полупроводниковой фабрики *X-Fab* с проектной нормой 0,6 мкм и применением биполярных и КМОП-транзисторов (БиКМОП 0,6 мкм). Для этого снова **нажмите «1»**, как показано на рис. 1.4.

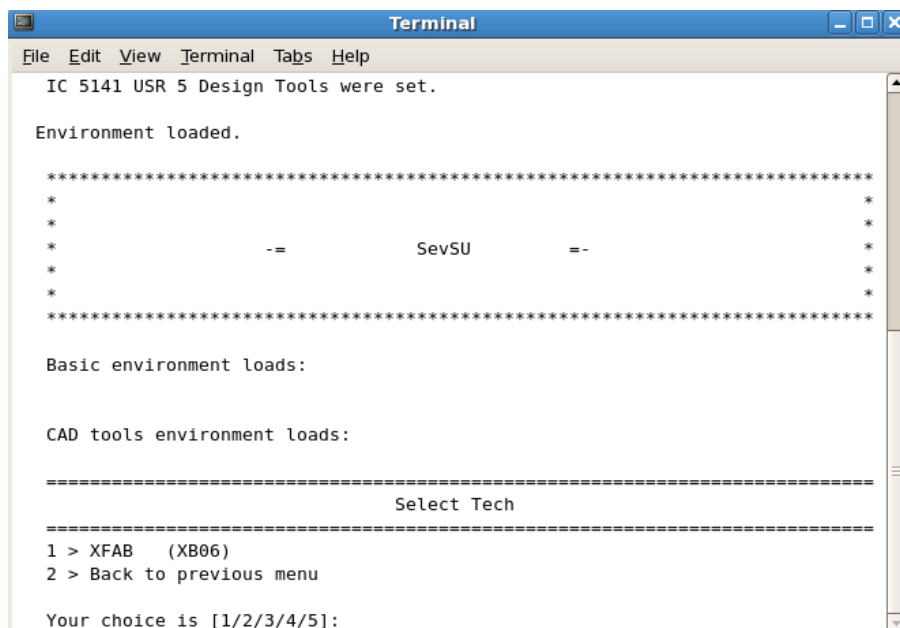


Рис. 1.4 — Окно выбора технологической библиотеки

1.3.6. В результате откроется окно *icfb*, которое является основным окном рабочей среды проектирования (рис. 1.5). Также откроется окно ***Library Manager***, в котором осуществляется работа с технологическими и пользовательскими библиотеками. Повторный вызов окна *Library Manager* можно осуществить в окне *icfb* из меню ***Tools — Library Manager***. После запуска программы окно *What's New* можно закрыть.

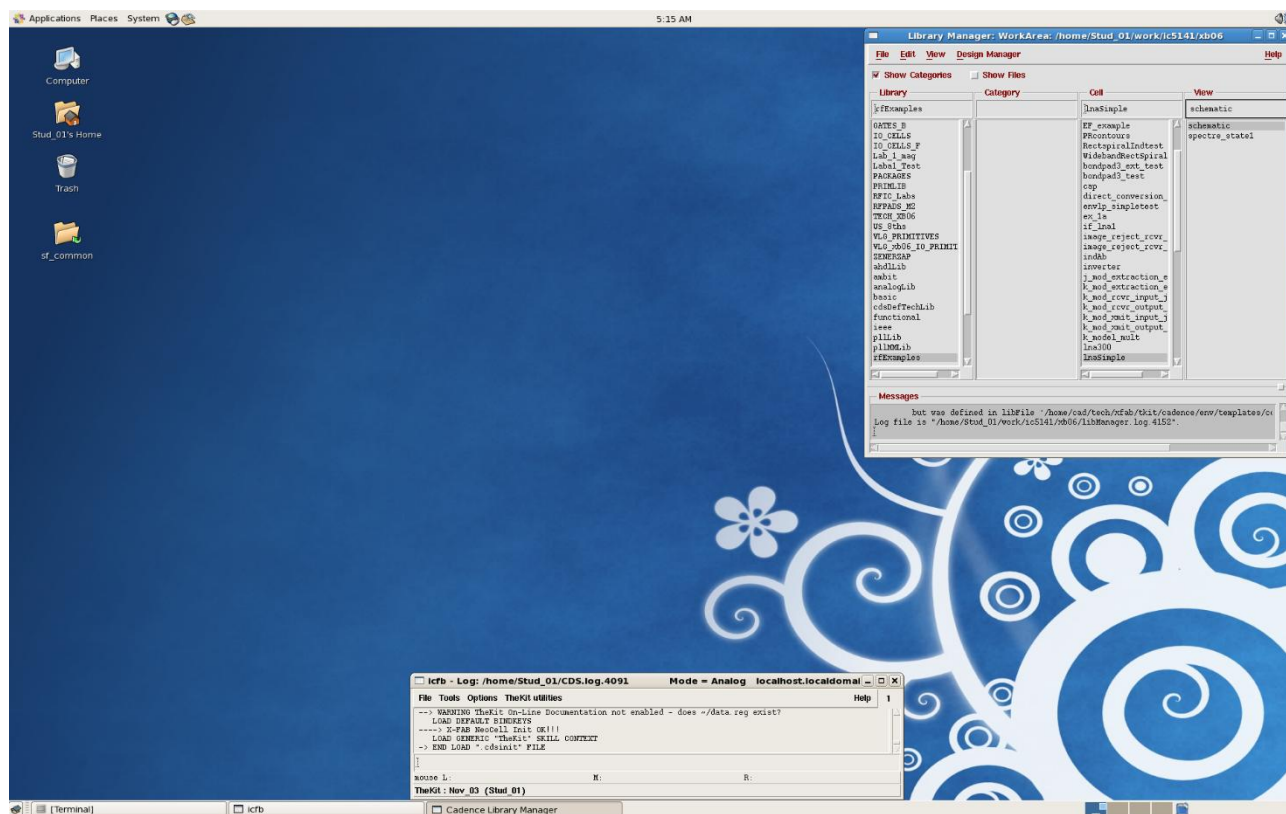


Рис. 1.5 — Вид окна виртуальной машины после запуска

1.3.7. Создайте свою рабочую библиотеку для выполнения лабораторных работ. Для этого в окне **Library** найдите библиотеку **RFIC_Labs** и выполните её копирование: **зажмите правой кнопкой мыши** название библиотеки и выберите **Copy** (рис. 1.6).

**ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ.
ЗАПРЕЩАЕТСЯ РАБОТАТЬ С ИСХОДНОЙ БИБЛИОТЕКОЙ
«RFIC Labs» БЕЗ ЕЁ КОПИРОВАНИЯ**

**Эта библиотека выступает в качестве эталонной для других студентов.
Её содержимое должно оставаться неизменным в ходе выполнения
лабораторного практикума.**

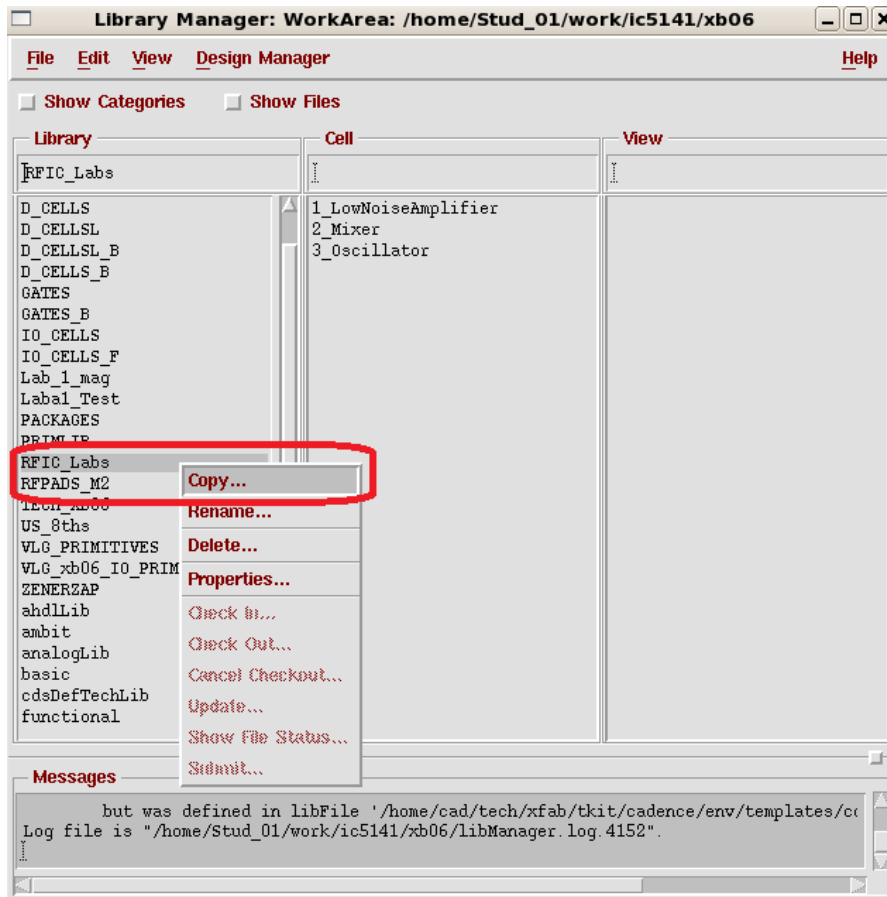


Рис. 1.6 — Пояснение к копированию библиотеки в окне менеджера библиотек

1.3.8. В окне *Copy Library* задайте имя своей копии библиотеки с указанием своей фамилии в формате «{Фамилия}_RFIC», как показано на рис. 1.7. Нажмите **OK**.

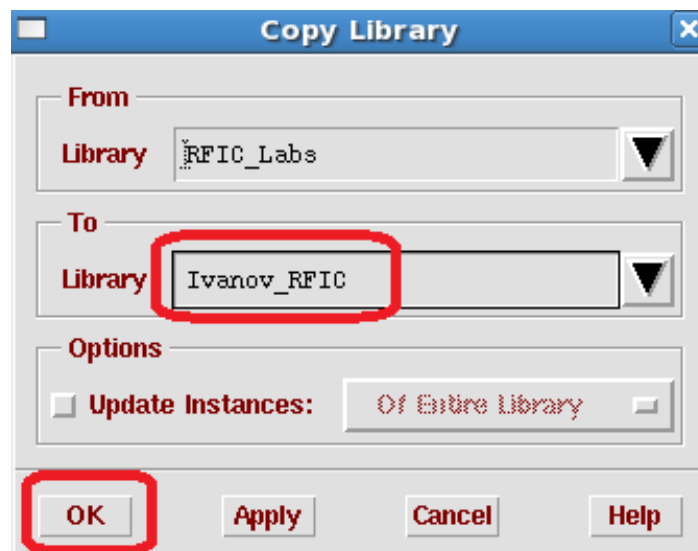


Рис. 1.7 — Окно копирования библиотеки

1.3.9. В окне *New Library* нажмите **OK**. В появившемся окне убедитесь в том, что выбрана опция *Attach to an existing techfile*, и нажмите **OK**. К вашей библиотеке должны прикрепиться технологические файлы **TECH_XB06**. После проверки правильности выбора нажмите **OK**.

1.4. Выполнение лабораторной работы

1.4.1. Подготовка схемы к моделированию

1.4.1.1. Откройте менеджер библиотек. В скопированной библиотеке *{Фамилия}_RFIC* выберите в поле *Cell* ячейку **1_LowNoiseAmplifier** и откройте её двойным щелчком по **schematic** в поле *View*.

1.4.1.2. В результате откроется редактор принципиальных схем **Virtuoso Schematic Editing**, в котором отобразится принципиальная схема модели исследуемого малошумящего усилителя, которая приведена на рис. 1.8.

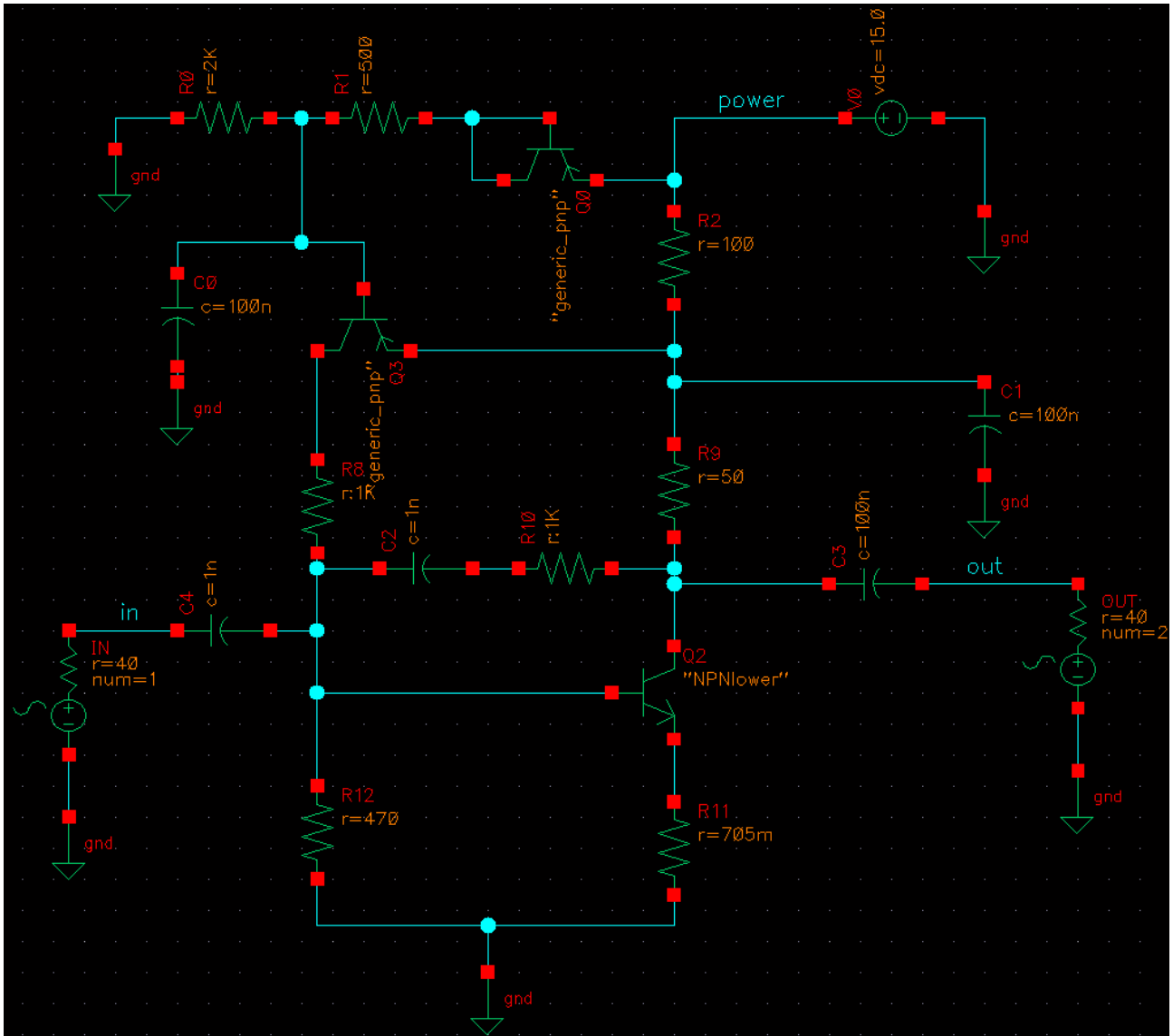


Рис. 1.8 — Принципиальная схема модели исследуемого МШУ

1.4.1.3. Исследуемая схема представляет собой **усилительный каскад**, построенный на **биполярном транзисторе** по схеме с **общим эмиттером**. Изучите принцип его работы и назначение элементов принципиальной схемы.

1.4.1.4. Выберите **входной порт IN** в левой части схемы и **нажмите «Q»** для просмотра его свойств. Убедитесь, что параметры порта настроены правильным образом, как показано на рис. 1.9:

- сопротивление порта (*Resistance*) — **40 Ом**;
- тип источника (*Source*) — синусоидальный (*sine*);
- входная мощность в дБм (*Amplitude (dBm)*) — *prf*;
- частота входного сигнала (*frequency*) — **900 МГц**.

Примечание. В САПР *Cadence IC Virtuoso Design* при вводе значения переменной по умолчанию применяется кратность 10^0 (например, частота указывается в герцах (Гц), ёмкость в фарадах (Ф)). Поэтому при необходимости указания другой кратности необходимо после ввода численного значения в поле переменной ввести букву, соответствующую желаемой кратности. Так, для указания значения частоты **900 МГц** в поле переменной следует ввести «**900M**». Для указания кратности 10^{-6} , что соответствует приставке СИ «микро», следует использовать букву «*u*».

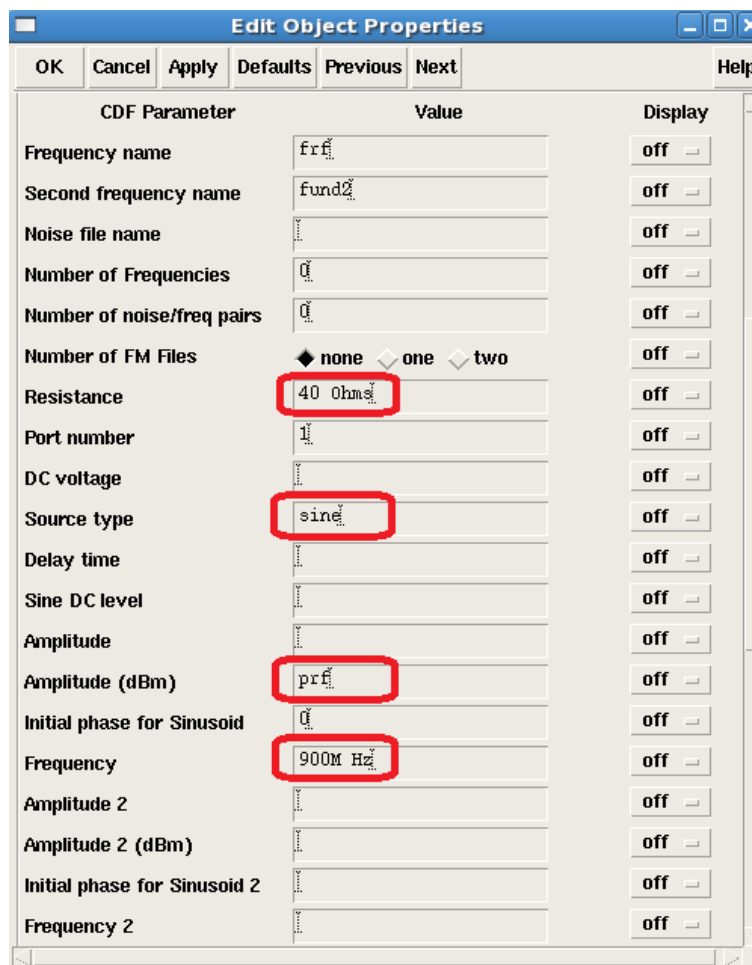


Рис. 1.9 — Настройки параметров входного порта

1.4.1.5. Для измерения характеристик схемы в окне *Virtuoso Schematic Editing* выберите в левом верхнем углу **Tools** — **Analog Environment**. В результате откроется окно моделирования **Virtuoso Analog Design Environment**, вид которого показан на рис. 1.10.

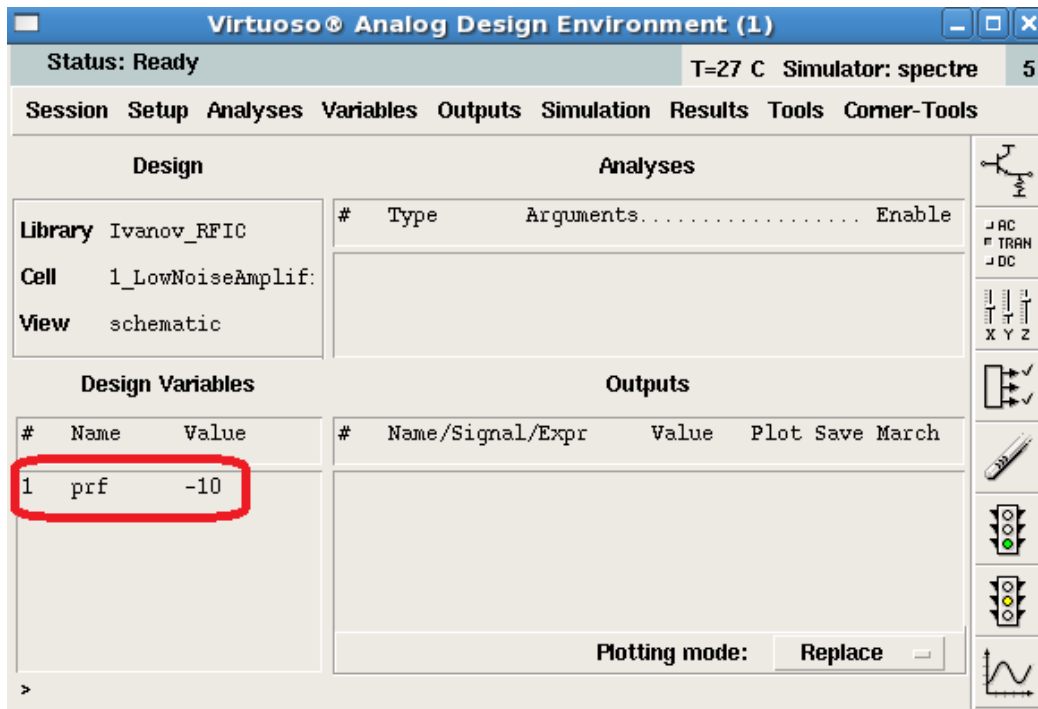


Рис. 1.10 — Вид окна моделирования

1.4.1.6. Убедитесь, что в поле **Design Variables** присутствует переменная **prf**, значение которой должно составлять **–10** (уровень мощности входного сигнала, выраженный в дБм).

1.4.2. Исследование коэффициента усиления и спектра выходного сигнала

1.4.2.1. Для исследования спектральных и нелинейных характеристик усилителей используется **PSS-анализ** (*Periodic Steady State Analysis* — анализ периодических установившихся процессов).

Для этого в окне **Analog Design Environment (ADE)** выберите **Analyses — Choose**. В результате появится окно выбора типа анализа, в котором необходимо выбрать пункт **pss**, как показано на рис. 1.11.

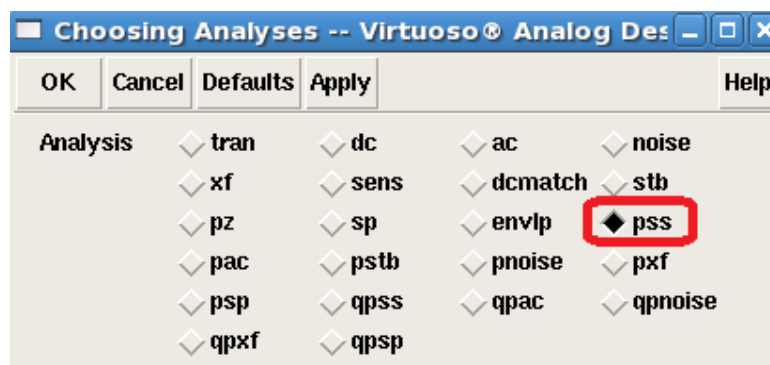


Рис. 1.11 — Окно выбора вида анализа

1.4.2.2. Необходимо настроить PSS-анализ, как показано на рис. 1.12. Для этого выполните следующие действия:

— в качестве ядра (*Engine*) для расчётов выбрать **Shooting**;

— выбрать автоматический расчёт фундаментальной частоты, поставив галочку в поле **Auto Calculate**, в результате чего в качестве первой гармоники будет выбрана частота входного сигнала 900 МГц;

— в поле **Number of harmonics** задать число выходных гармоник, подлежащих расчёту, **равным 10**, в результате чего симулятор проведёт анализ для 10 гармоник, кратных фундаментальной частоте (900 МГц, 1800 МГц, ... 9000 МГц);

— точность расчётов **Accurate Defaults (errpreset)** задать умеренной (**moderate**);

— убедиться, что в поле **Enabled** поставлена галочка; **при необходимости отключения анализа в дальнейшем галочку можно будет убрать.**

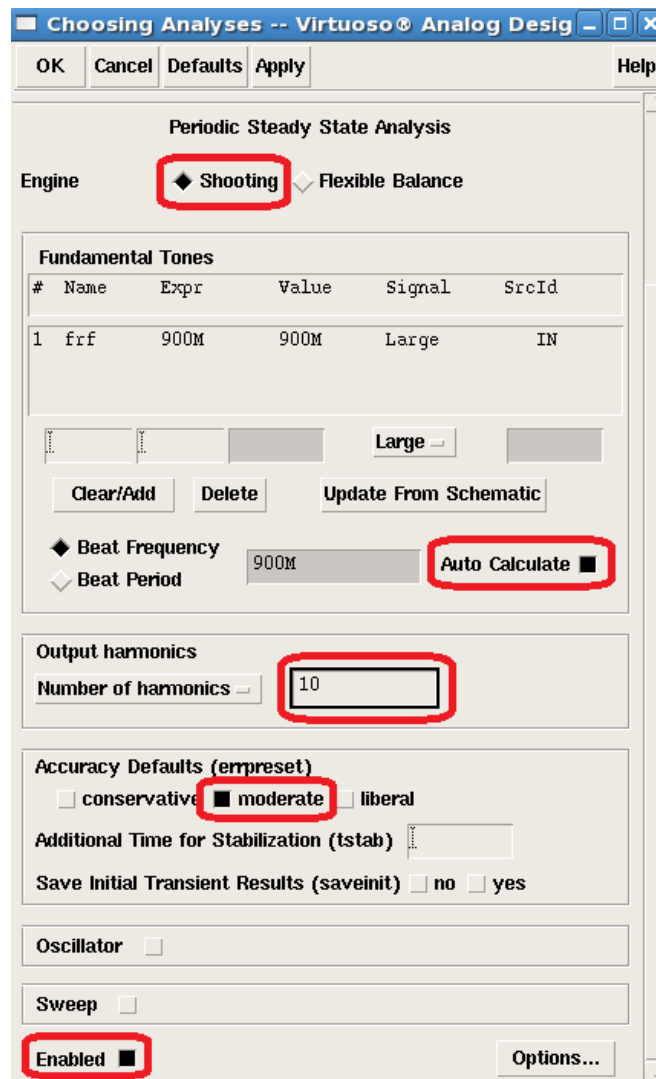


Рис. 1.12 — Окно настройки анализа PSS

1.4.2.3. После настройки анализа закройте окно нажатием на **OK**. Для запуска симуляции в окне *Virtuoso ADE* нажмите **Simulation — Netlist and Run**, после чего дождитесь окончания расчётов. В случае успешного выполнения расчётов отобразится окно, вид которого показан на рис. 1.13.

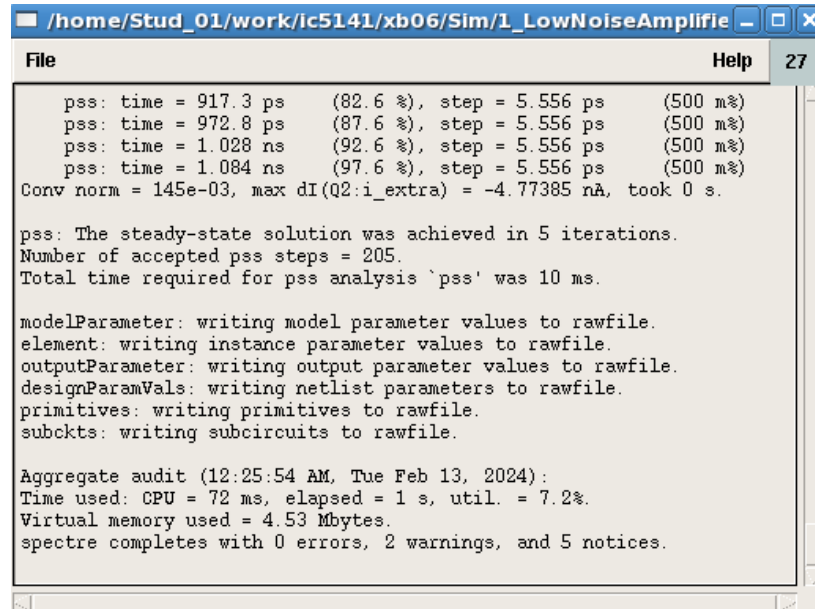
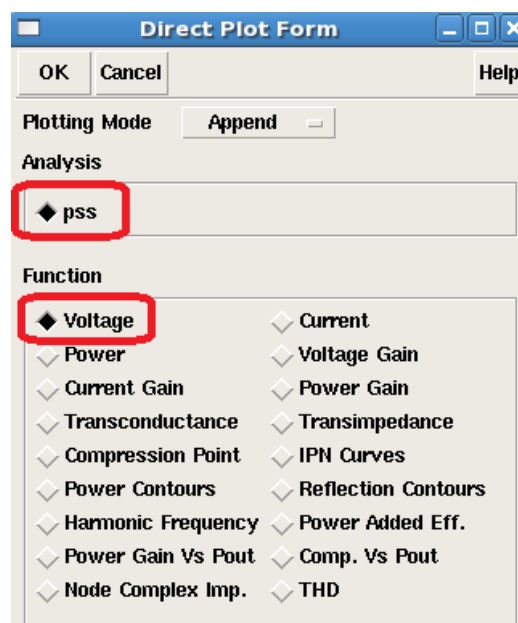


Рис. 1.13 — Содержимое окна при успешном выполнении расчётов

ПОЯСНЕНИЕ.
ПОСЛЕ ИЗМЕНЕНИЯ СХЕМЫ НЕОБХОДИМО СОХРАНЯТЬ ЕЁ НА-
ЖАТИЕМ КНОПКИ «☒» В ЛЕВОМ ВЕРХНЕМ УГЛУ,
ИНАЧЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕ ЗАПУСТИТСЯ

1.4.2.4. Для просмотра характеристик в окне *ADE* выберите *Results — Direct Plot — Main Form ...*. В результате откроется окно *Direct Plot Form*, в котором необходимо осуществить выбор измеряемой характеристики из множества представленных, как показано на рис. 1.14. Выберите для измерения характеристику **Voltage**, что соответствует напряжению.

Рис. 1.14 — Вид окна *Direct Plot Form*

1.4.2.5. Выберите способ отображения напряжения в децибелах, поставив галочку в поле **dB20**. Затем сверните окно *Direct Plot Form*, перейдите к схеме и **нажмите по выходному проводнику out**.

1.4.2.6. В результате откроется окно *Graph Window*, в которое выводятся графические зависимости измеряемых величин. Перед сохранением графиков необходимо выполнить предварительную настройку.

Для этого дважды **нажмите по имени графика** в левом верхнем углу *Graph Window*, либо по самому графику, после чего должно открыться окно *Trace Attributes*. В отобразившемся окне, вид которого показан на рис. 1.15, следует выполнить следующие действия:

- в поле **Name** задайте **осмысленное название**, например, для спектра выходного напряжения МШУ можно задать имя *Output Voltage Spectrum*;
- в поле **Type/Style** задайте тип линии сплошной **Solid** и жирный **Bold**;
- в поле **Foreground** при необходимости можно выбрать более подходящий цвет линий.

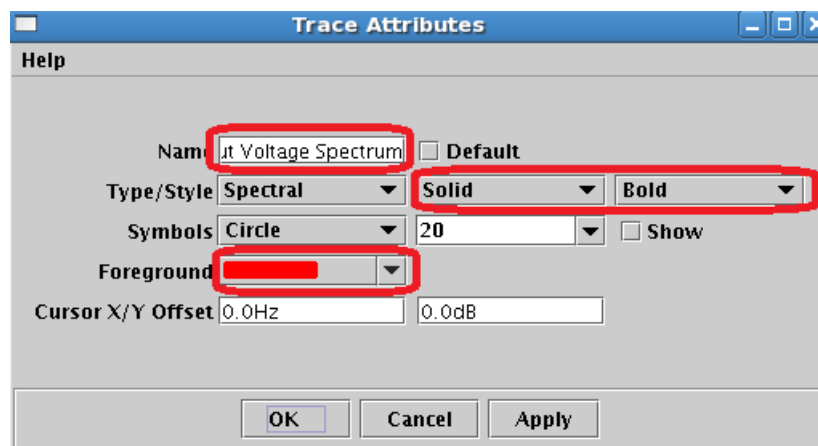


Рис. 1.15 — Вид настроенного окна *Trace Properties*

1.4.2.7. Выполните сохранение исследуемого графика средствами *Windows*, используя инструмент «Ножницы» или комбинацию клавиш **Win + Shift + S**, после чего закройте окно графика.

1.4.2.8. Вернитесь к окну *Direct Plot Form* и выберите **Voltage Gain** для измерения коэффициент усиления по напряжению. Выберите способ вывода коэффициента усиления в децибелах в поле **dB20**, а в качестве исследуемой гармоники в поле **Input Harmonic** укажите частоту 1-й гармоники, равную 900 МГц, как показано на рис. 1.16.

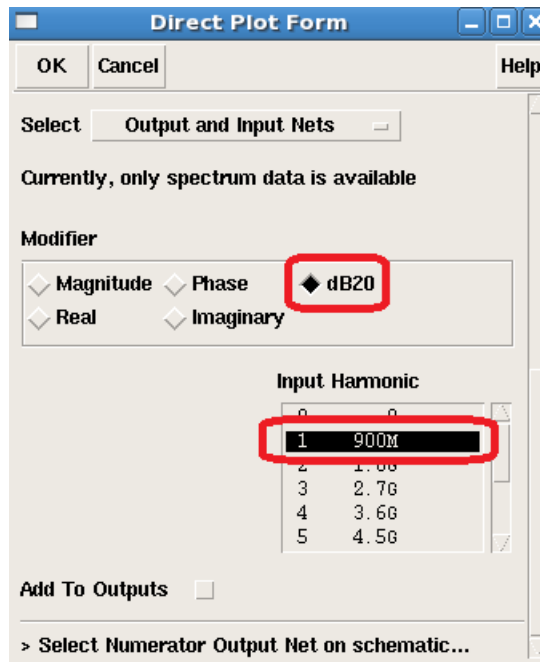


Рис. 1.16 — Вид настроенного окна *Direct Plot Form*

1.4.2.9. Сверните окно *Direct Plot Form* и вернитесь к исследуемой схеме. Нажмите по очереди на выходной проводник **out**, а затем на входной проводник **in**. В результате откроется окно графика зависимости коэффициента усиления от частоты.

1.4.2.10. После настройки графика наведите мышку на первую гармонику (900 МГц) и **установите маркер нажатием кнопки M**. Сохраните значение коэффициента усиления и вид графика в черновую версию отчёта.

1.4.3. Исследование частотных параметров

1.4.3.1. Из окна *Virtuoso ADE* вновь перейдите к меню выбора анализа нажатием *Analyses — Choose*. Выберите анализ **sp**, который используется для исследования малосигнальных S-параметров и КСВН.

1.4.3.2. В окне, вид которого показан на рис. 1.17, укажите следующие настройки для анализа:

- в качестве перестраиваемой переменной необходимо выбрать частоту, для чего в поле **Sweep Variable** укажите **Frequency**;
- в поле **Sweep Range** задайте тип перестройки частоты **Start-Stop** в пределах от 100 МГц до 1,2 ГГц;
- тип перестройки **Sweep Type** укажите линейным **Linear**, и затем поставьте галочку в поле **Number of Steps**, выбрав тем самым перестройку с заданным количеством точек;
- укажите **количество точек** для перестройки, **равным 100**, тогда линейный шаг перестройки частоты *Step* будет определяться как

$$Step = \frac{1200 \text{ МГц} - 100 \text{ МГц}}{100} = 1,1 \text{ МГц.}$$

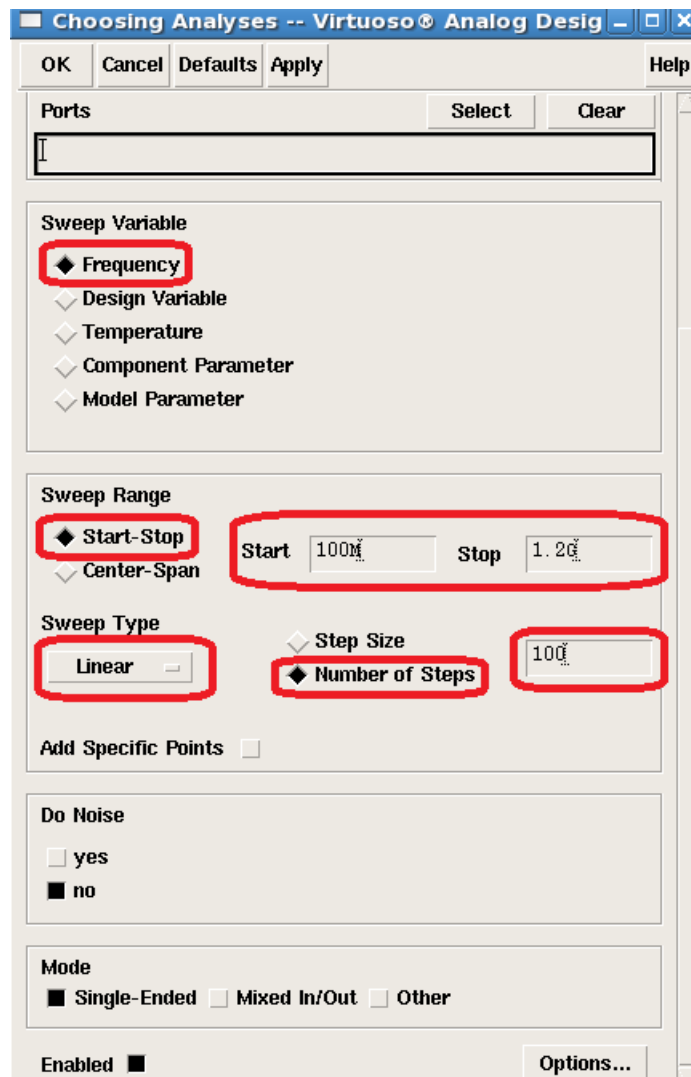


Рис. 1.17 — Окно настройки анализа SP

1.4.3.3. Нажмите **OK** и выполните моделирование исследуемой схемы.

1.4.3.4. Перейдите к окну выбора измеряемых характеристик *Direct Plot Form* и выберите в нём тип анализа **sp**.

1.4.3.5. В поле **Function** в качестве измеряемой функции выберите **SP**, которая предназначена для получения малосигнальных S-параметров. В качестве типа графика **Plot Type** укажите график в декартовой (прямоугольной) системе координат **Rectangular**. Выберите вывод S-параметров **в децибелах**.

Внизу окна выберите требуемую зависимость S-параметров и постройте её, нажав соответствующую кнопку из предложенных **S11/S12/S21/S22**.

1.4.3.6. Выведите на один график по очереди **все указанные S-параметры**. Затем нажмите кнопку «» в левом верхнем углу *Graph Window* для разнесения графиков в разные окна, расположенные друг под другом.

После настройки толщины и цвета линий сохраните скриншот графиков, как показано на рис. 1.18.

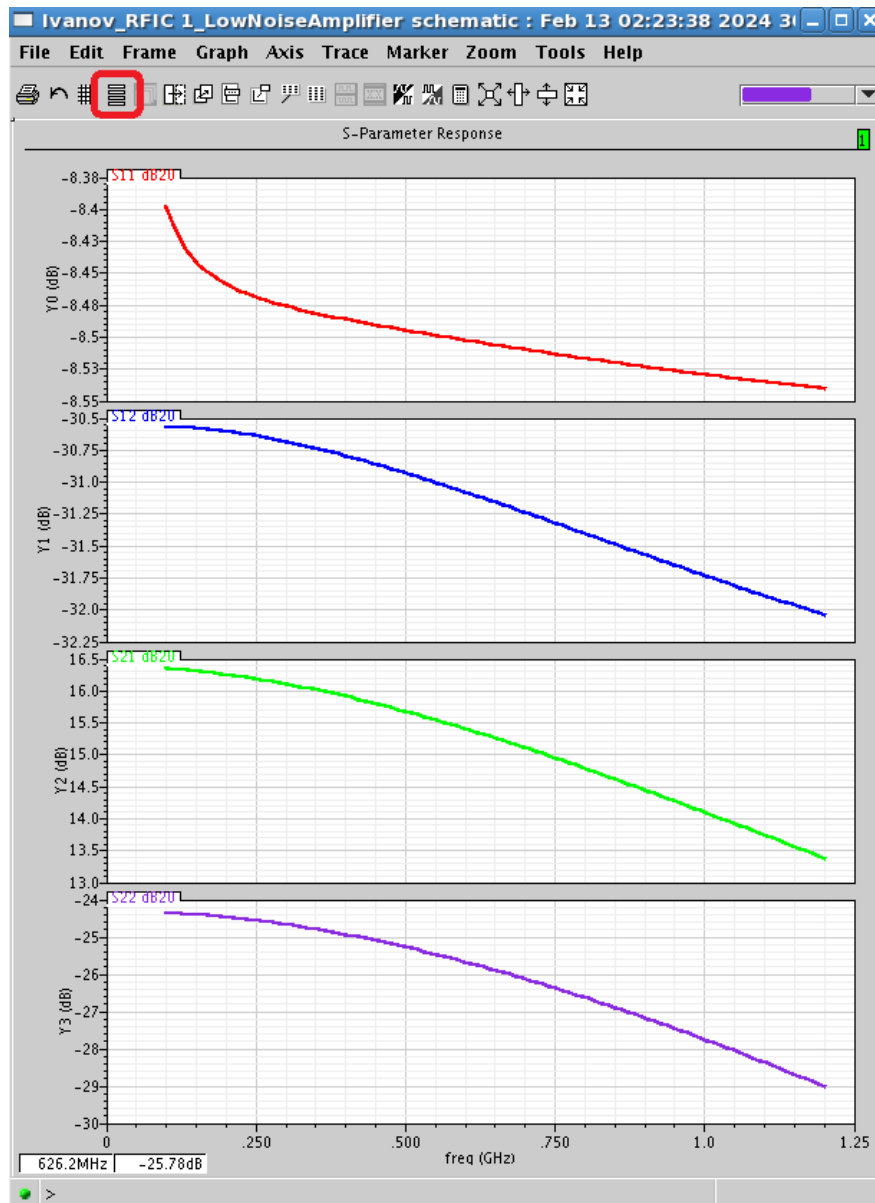


Рис. 1.18 — Измеренные S-параметры в декартовой системе координат

1.4.3.7. Проанализируйте полученные частотные зависимости и сделайте выводы о качестве согласования усилителя, а также о неравномерности его амплитудно-частотной характеристики (АЧХ).

1.4.3.8. В окне *Direct Plot Form* постройте параметры S_{11} и S_{22} в форме диаграммы Вольперта — Смита. Для этого в поле *Plot Type* выберите **Z-Smith** и повторите построения графиков. В результате должен получиться график, как показано на рис. 1.19, который необходимо сохранить в черновую версию отчёта.

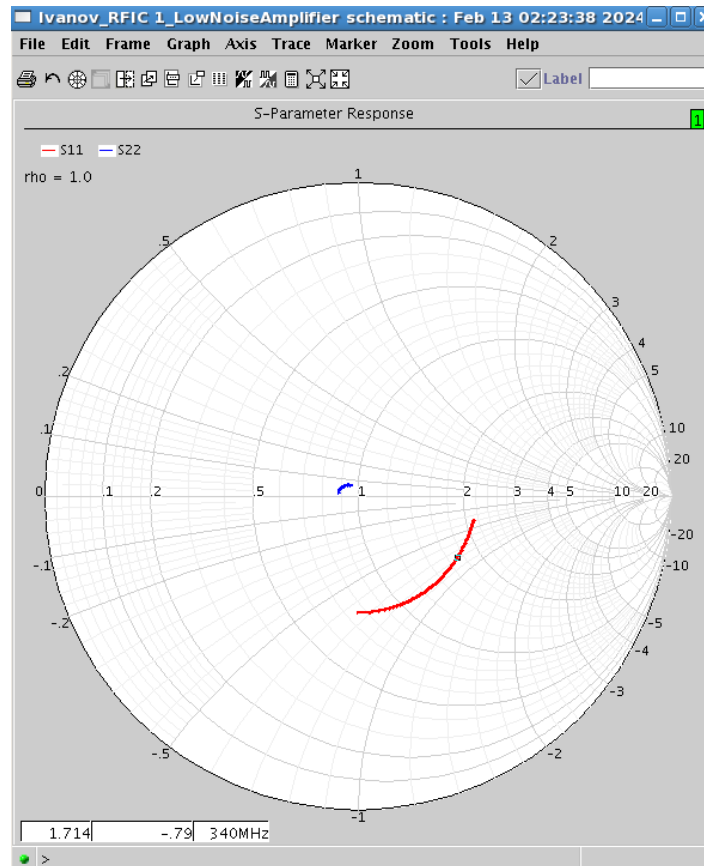


Рис. 1.19 — Измеренные параметры S_{11} и S_{22} на диаграмме Вольперта — Смита

1.4.3.9. Измерьте частотные зависимости КСВН по входу и выходу. Для этого в окне *Direct Plot Form* в поле **Function** выберите **VSWR**, укажите способ вывода в размах **Magnitude** и по очереди нажмите **VSWR1** и **VSWR2**.

1.4.3.10. Разнесите частотные зависимости КСВН по отдельным окнам, как было описано в п.п. 1.4.3.6, и сохраните их в черновую версию отчёта. Сделайте выводы о качестве согласования усилителя по входу и выходу.

1.4.4. Исследование динамического диапазона

1.4.4.1. Для исследования динамического диапазона МШУ используется PSS-анализ с перестройкой уровня входной мощности.

Для измерения параметра $P1dB$ последовательно выполните следующие действия:

- в окне *Virtuoso ADE* в поле *Analyses* дважды щёлкните по ранее настроенному анализу **pss**;

- снимите галочку с опции **Auto Calculate** и укажите в поле **Beat Frequency** частоту 1-й гармоники, равную 100 МГц, при этом количество гармоник *Number of harmonics* оставьте прежним (10);

- в качестве параметра для перестройки задайте входную мощность, для чего нажмите на **Select Design Variable**, в появившемся окне выберите переменную **prf** и нажмите **OK**;

- в поле **Sweep Range** укажите перестройку от –30 до 10 дБм;

- задайте линейную перестройку (**Sweep Type** — **Linear**) с шагом **Step Size** 5 дБм, после чего нажмите **OK**.

1.4.4.2. Выполните моделирование схемы и в окне *Direct Plot Form* в меню анализа *pss* сделайте следующие действия:

- в поле *Function* выберите измеряемую характеристику ***Compression Point***;
- в поле ***Gain Compression (dB)*** задайте **1**, что соответствует точке однодецибельной компрессии;
- в поле ***Input Power Extrapolation Point (dBm)*** введите значение **–25**;
- выберите опцию ***Input Referred 1dB Compression***, что выведет соответствующее однодецибельной компрессии значение входной мощности;
- в поле ***1st Order Harmonic*** выберите частоту **900 МГц**;
- перейдите к схеме и щёлкните по выходному порту, в результате чего должна быть построена амплитудная характеристика усилителя с указанием точки *IP1dB*.

1.4.4.3. Сохраните полученный график и сделайте выводы о величине динамического диапазона усилителя.

1.4.4.4. Для измерения *IP3* сперва необходимо изменить входной сигнал с однотонового (гармонического) на двухтоновый.

Для этого выберите **входной порт** и откройте его свойства нажатием «*Q*». Задайте частоту второго сигнала ***Frequency 2*** равной **920 МГц**, а его мощность ***Amplitude 2 (dBm)*** равной ***prf***, как показано на рис. 1.20.

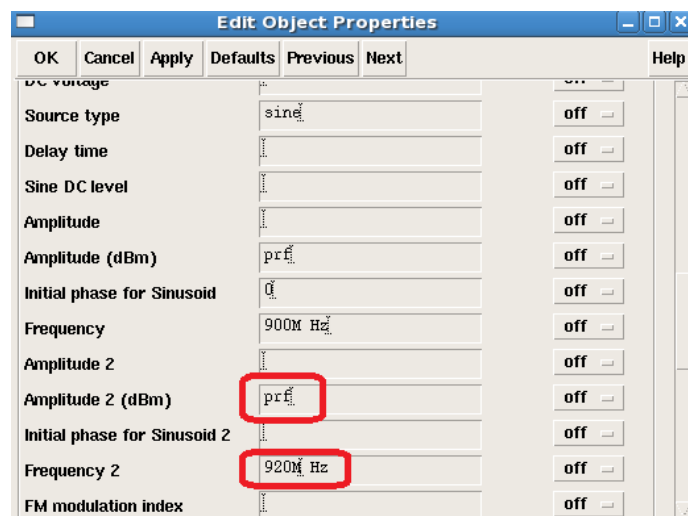


Рис. 1.20 — Настройка входного порта для задания двухтонового сигнала

1.4.4.5. Обязательно выполните сохранение схемы. В окне настройки анализа *pss* поставьте галочку в опции ***Auto Calculate***. Обратите внимание, что теперь фундаментальная частота стала равной **20 МГц**.

1.4.4.6. Рассчитайте **частоты гармоник интермодуляционных искажений 3-го порядка** в соответствии с выражениями

$$f_{IM1} = 2f_1 - f_2; \quad f_{IM2} = 2f_2 - f_1,$$

где f_1 — частота первого тона, равная 900 МГц;
 f_2 — частота второго тона, равная 920 МГц.

1.4.4.7. В связи с тем, что значение фундаментальной частоты уменьшилось до 20 МГц, необходимо значительно увеличить общее число выходных гармоник, подлежащих расчёту. В поле **Number of harmonics** укажите число выходных гармоник **60**. В таком случае последовательность частот выходных гармоник будет иметь вид {20, 40, 60 ... 1180, 1200} МГц.

Это связано с тем, что теперь для представления в спектре кратных частот 900 МГц и 920 МГц требуется гораздо меньшая гармоника, которая в данном случае равна наибольшему общему делителю двух чисел — 20 МГц.

1.4.4.8. Нажмите **OK** и выполните моделирование. Перейдите в окно *Direct Plot Form* и для анализа *pss* выберите характеристику **IPN Curves**.

Последовательно проделайте следующие действия:

- в поле **Circuit Input Power** выберите **Variable Sweep (“prf”)**;
- в поле **Single Point Input Power Value (dBm)** укажите уровень входной мощности, равный **–25 дБм**;
- выберите опцию **Input Referred IP3**, что рассчитает значение входной мощности *IP3*, в поле **Order** укажите **3rd**.
- в поле **3rd Order Harmonic** укажите одну из рассчитанных ранее частот интермодуляционных искажений (любую из частот f_{IM1} или f_{IM2});
- в поле **1st Order Harmonic** укажите любую из двух входных частот;
- после выбора всех опций нажмите кнопку **Replot**.

1.4.4.9. Сохраните полученный график. Сделайте выводы о применимости величины *IP3* и о том, что она показывает.

1.4.5. Исследование шумовых свойств

1.4.5.1. В окне выбора вида анализа отключите анализ *pss*, убрав галочку с опции **Enabled** и нажав кнопку **OK**.

1.4.5.2. Перейдите к параметрам входного порта и удалите значения уровня мощности и частоты сигнала второго тона (*Amplitude 2 (dBm)* и *Frequency 2*). Сохраните схему.

1.4.5.3. В окне настройки анализа *sp* в поле **Do Noise** задайте опцию **yes**, благодаря чему появляется возможность исследования шумовых свойств. Появятся поля **Output Port** и **Input Port**. Последовательно нажмите **Select** и укажите соответствующие порты. Нажмите **OK** и выполните моделирование схемы.

1.4.5.4. Постройте зависимость коэффициента шума от частоты. Для этого в окне *Direct Plot Form* выберите функцию **NF**, укажите способ вывода в децибелах и нажмите **Plot**.

1.4.5.5. Проанализируйте полученную зависимость. Установите маркер на частоте 900 МГц и сохраните график.

1.4.6. Исследование способов понижения коэффициента шума

1.4.5.6. Исследуйте влияние импеданса источника сигнала (сопротивления входного порта схемы) на коэффициент шума. Для этого последовательно выполните следующие действия:

- перейдите во входной порт и в поле **Resistance** задайте сопротивление в качестве переменной **Zin**, после чего сохраните схему;

- в окне *Virtuoso ADE* нажмите **Variables — Copy From Cellview**, после чего в левом нижнем углу окна появится переменная **Zin**;
- дважды щёлкните по переменной **Zin** и задайте значение, равное **40 Ом**, после чего нажмите **OK**;
- перейдите в окно параметрического моделирования, для чего нажмите **Tools — Parametric Analysis**, как показано на рис. 1.21;
- в поле **Variable Name** укажите **Zin**;
- задайте перестройку входного импеданса от 30 до 70 Ом (**From/To**);
- в поле **Step Control** укажите **Linear Steps**, при этом величину шага **Step Size** задайте равной **5 Ом**;
- запустите параметрическое моделирование, выбрав **Analysis — Start**.

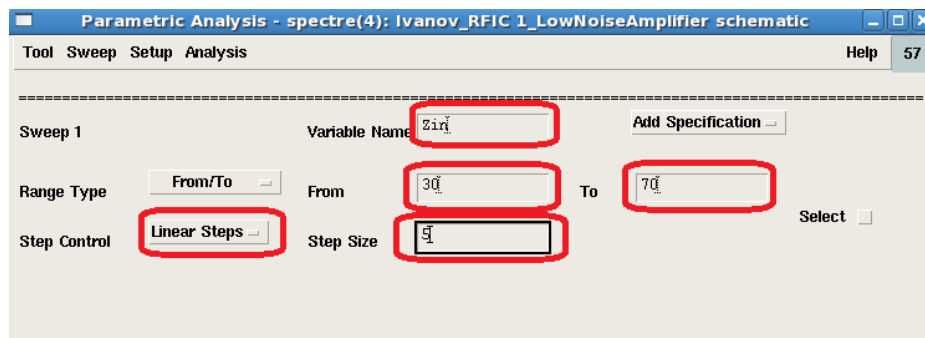


Рис. 1.21 — Окно настройки параметрического моделирования

1.4.5.7. После окончания параметрического моделирования постройте частотные зависимости коэффициента шума. В результате в одном окне будет выведено семейство графиков при различных значениях входного импеданса.

Нажмите в окне графика клавишу «V», в результате чего появится **вертикальный маркер**. Перемещая его, установите маркер на приблизительное значение входной частоты **900 МГц**.

Определите с его помощью, при каком значении **входного импеданса $Z_{\text{опт}}$** наблюдается **минимальный коэффициент шума** на частоте входного сигнала. Зафиксируйте это значение и сделайте скриншот графиков.

1.4.5.8. В окне *Virtuoso ADE* установите значение входного импеданса **Zin** равным измеренному ранее значению **$Z_{\text{опт}}$** .

1.4.5.9. Исследуйте **влияние тока коллектора** усилителя на **коэффициент шума**. Для этого последовательно выполните следующие действия:

- замените в исходной схеме резистор **R2** с номиналом 100 Ом на **идеальный источник тока**, нажав клавишу **Ctrl + I**, при этом ток источника **DC Current** задайте в виде переменной **Ic**; сохраните скриншот полученной схемы;

- аналогично проделанным ранее действиям, задайте в окне *Virtuoso ADE* значение переменной **Ic** по умолчанию равным **25 мА (25m)**;

- запустите параметрическое моделирование, перестраивая значение тока коллектора **Ic** в пределах от 5 до 40 мА с **линейным шагом 5 мА**.

1.4.5.10. Осуществите измерения, аналогичные описанным в п.п. 1.4.5.7. Определите **оптимальное значение тока коллектора**, при котором будет наблюдаться **минимальный коэффициент шума**.

Зафиксируйте это значение и сохраните графики в черновую версию отчёта. Проанализируйте, оказывает ли влияние величина тока коллектора на другие характеристики усилительного каскада.

1.5. Содержание отчёта

1.5.1. Цели и задачи работы.

1.5.2. Ход выполнения работы с приведением всех указанных промежуточных результатов, включая исследуемые схемы, полученные графические зависимости с комментариями, расчёты и промежуточные выводы.

1.5.3. Сводная таблица, пример которой представлен в таблице 1.1, в которую занесены результаты измерения и исследования характеристик МШУ.

1.5.4. Подробные выводы, в которых отражены основные положения, полученные из проведённых исследований, и приведены пояснения полученных результатов.

Таблица 1.1 — Рекомендуемое оформление сводной таблицы измеренных характеристик малошумящего усилителя

Параметр (на частоте 900 МГц)		Значение	Ед. изм.
Коэффициент усиления по напряжению G			
КСВН	по входу $K_{\text{СВН } 1}$		
	по выходу $K_{\text{СВН } 2}$		
Модуль коэффициента отражения	по входу S_{11}		
	по выходу S_{22}		
Модуль коэффициента передачи S_{21}			
Точка односторонней компрессии по входу $IP1dB$			
Точка пересечения с интермодуляционной составляющей третьего порядка по входу $IIP3$			
Коэффициент шума	исходный NF_0		
	итоговый $NF_{\text{опт}}$		
Оптимальный входной импеданс $Z_{\text{вх опт}}$			
Оптимальный ток коллектора $I_{\text{к опт}}$			

1.6. Контрольные вопросы

1.6.1. Перечислите основные характеристики, определяемые для усилителей РЧ/СВЧ диапазона.

1.6.2. Назовите и дайте подробную оценку частотным характеристикам РЧ/СВЧ усилителей.

1.6.3. Поясните принципы построения диаграммы Вольперта — Смита. Проиллюстрируйте с её помощью примеры качественного и некачественного согласования.

1.6.4. Перечислите и поясните основные нелинейные характеристики РЧ усилителей, включая понятие динамического диапазона.

1.6.5. Раскройте понятие шумовых характеристик РЧ усилителей и объясните, для чего они используются.

1.6.6. Предложите способы понижения коэффициента шума усилителя. Поясните, какой тип транзисторов следует использовать при построении малошумящих схем и почему.

1.6.7. Поясните назначение элементов принципиальной схемы исследуемого малошумящего усилителя.

1.6.8. Перечислите и опишите основные методы анализа, используемые в данной лабораторной работе для исследования характеристик, МШУ.

1.6.9. Объясните методику измерения динамического диапазона, раскрыв суть проделанного анализа и пояснив измеряемые величины.

1.6.10. Поясните методику минимизации коэффициента шума, которая применялась в данной лабораторной работе.

Лабораторная работа № 2

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК АКТИВНОГО СМЕСИТЕЛЯ РЧ-ДИАПАЗОНА

2.1. Цели работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо изучить методы, которые применяются в САПР *Cadence IC Virtuoso Design* для моделирования и анализа характеристик смесителей на примере активного транзисторного смесителя. Необходимо проанализировать следующие характеристики:

- спектр выходного сигнала и коэффициент преобразования;
- переходное ослабление сигнала гетеродина в спектре выходного сигнала промежуточной частоты;
- шумовые свойства;
- динамический диапазон.

В ходе выполнения лабораторной работы также необходимо исследовать зависимость характеристик смесителя от мощности сигнала гетеродина.

2.2. Теоретические сведения

2.2.1. Принцип преобразования частоты

Смесителем называют устройство, выполняющее преобразование частоты с переносом спектра входного сигнала на некоторую **промежуточную частоту (ПЧ)**, как показано на рис. 2.1. Для преобразования частоты используется третий опорный сигнал с известной частотой, за формирование которого отвечает опорный генератор, называемый также **гетеродином**.

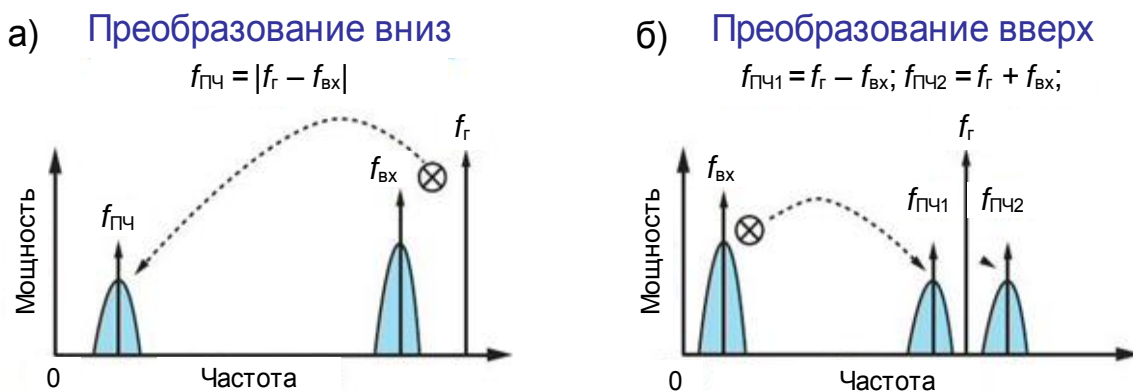


Рис. 2.1 — Пояснение принципа работы смесителя:
преобразование частоты с переносом вниз (а) и вверх (б)

Таким образом, РЧ смеситель представляет собой **шестиполюсник** со следующими портами:

- вход сигнала **радиочастоты (RF — Radio Frequency)**, под которым понимают источник входного сигнала, спектр которого подлежит переносу;
- вход сигнала **опорной частоты гетеродина (LO — Local Oscillator)**;
- выход сигнала промежуточной частоты (**IF — Intermediate Frequency**).

Операция преобразования частоты возможна за счёт использования нелинейности полупроводниковых приборов, в частности, транзисторов и диодов. При подаче на входы смесителя двух сигналов с частотами f_{RF} и f_{LO} происходит операция аналогового перемножения, в результате чего в спектре выходного сигнала возникают множественные комбинационные составляющие $f_{\text{вых}}$:

$$f_{\text{вых}} = |\pm m \cdot f_{RF} \pm n \cdot f_{LO}|; \quad m, n = 1, 2, \dots$$

При преобразовании частоты промежуточной частотой f_{IF} в зависимости от назначения считаются **суммарная** либо **разностная частота**

$$f_{IF} = f_{RF} \pm f_{LO}.$$

Смесители, которые выполняют операцию преобразования частоты вверх, также называют **модуляторами**. Они нашли применение в передающих трактах РЧ устройств. В свою очередь, под непосредственно **смесителями** обычно подразумевают многополюсники, выполняющие преобразование частоты вниз в приёмных трактах.

При этом, как правило, на выходе смесителя используется **полосно-пропускающий фильтр (ППФ)**, который осуществляет селекцию необходимой суммарной либо разностной гармоники из полного спектра комбинационных составляющих выходного сигнала.

2.2.2. Основные характеристики смесителей

К основным характеристикам смесителей относят следующие:

- коэффициент преобразования, представляющий собой отношение выходной мощности ПЧ ко входной мощности РЧ;
- динамический диапазон, определяемый значениями $P1dB$ и $IP3$;
- частотные параметры согласования с портами;
- коэффициент шума;
- переходное ослабление сигнала гетеродина, равная отношению мощности гармоники опорной частоты в спектре выходного сигнала к мощности сигнала гетеродина;
- требуемая мощность гетеродина.

На параметры смесителя существенное влияние оказывает **мощность гетеродина**. При проектировании смесителей стараются найти компромисс между минимально требуемой мощностью гетеродина и коэффициентом преобразования, а также нелинейными и шумовыми характеристиками.

Для увеличения развязки сигналов между портами обычно на входах смесителя применяют **полосно-заграждающие фильтры (ПЗФ)**, называемые также режекторными фильтрами.

Особое внимание при проектировании смесителей уделяют переходному ослаблению сигнала гетеродина. Поскольку его мощность в значительной степени превышает мощность входного сигнала, гармоника на частоте гетеродина в спектре выходного сигнала имеет ощутимый уровень мощности, что вынуждает применять дополнительные схемы фильтрации.

Для борьбы с проникновением сигнала гетеродина могут использоваться **балансные схемы смесителей**, которые за счёт использования симметричной схемы реализуют подавление сигнала гетеродина.

2.3. Выполнение лабораторной работы

2.3.1. Подготовка схемы к моделированию

2.3.1.1. Откройте менеджер библиотек. В скопированной ранее библиотеке *{Фамилия}_RFIC* откройте ячейку **2_Mixer**, дважды нажав по полю **schematic**. В результате откроется редактор, в котором содержится принципиальная схема модели исследуемого смесителя, которая приведена рис. 2.2.

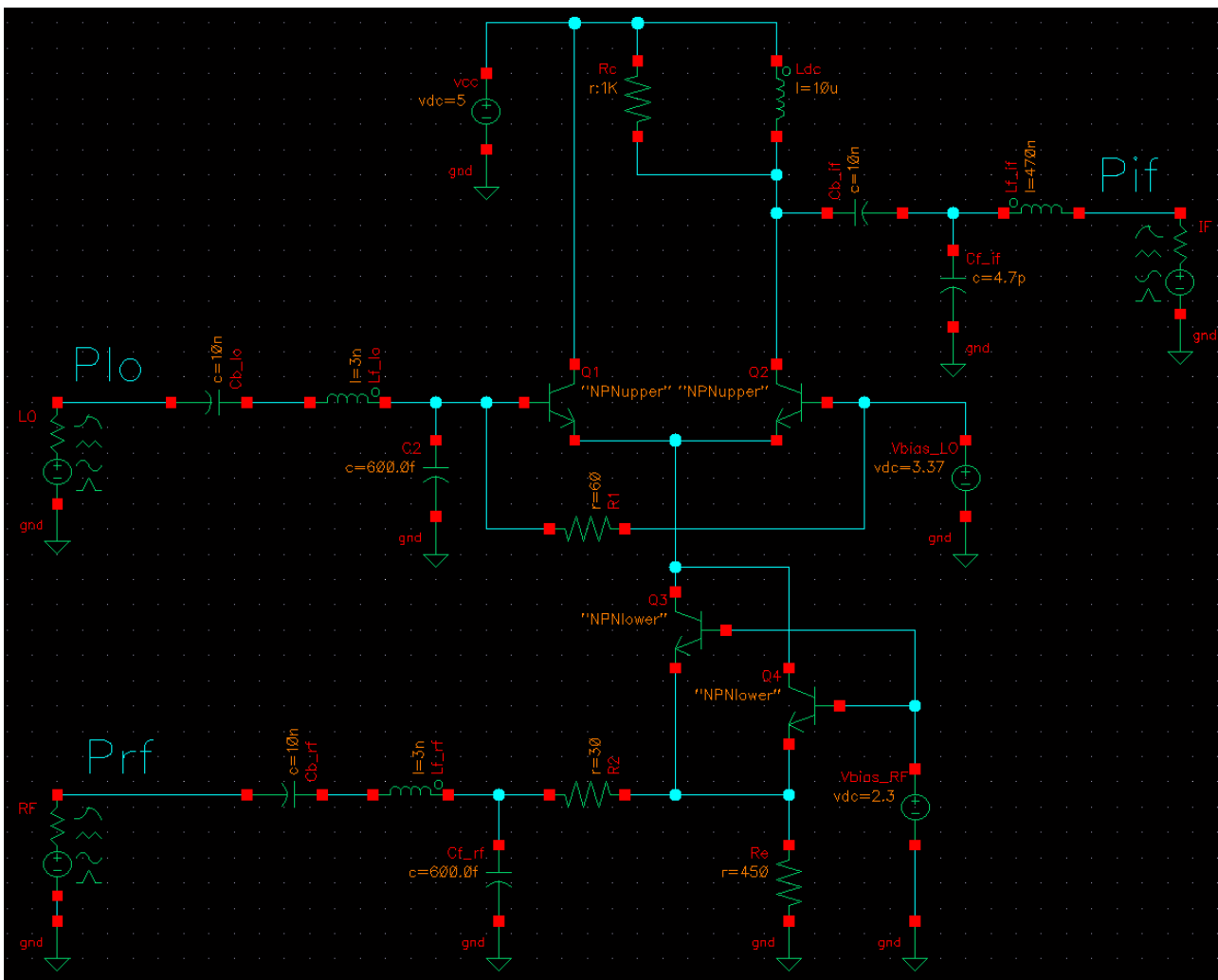


Рис. 2.2 — Принципиальная схема модели исследуемого смесителя

2.3.1.2. Данный смеситель представляет собой **активный транзисторный смеситель**, построенный на основе схемы **аналогового перемножителя**. Изучите принцип его работы и назначение элементов принципиальной схемы, опираясь на сведения, приведённые в [4].

2.3.1.3. Перейдите в окно **Virtuoso Analog Design Environment (ADE)**.

Загрузите файл с предварительными настройками анализа. Для этого в появившемся окне в левом верхнем углу выберите **Session — Load State**. В окне

загрузки в поле *Load State Option* выберите опцию **Cellview**. Убедитесь, что в качестве загружаемого файла в поле *State* выбрано **Mixer_Analysis**, как показано на рис. 2.3, после чего нажмите **OK**.

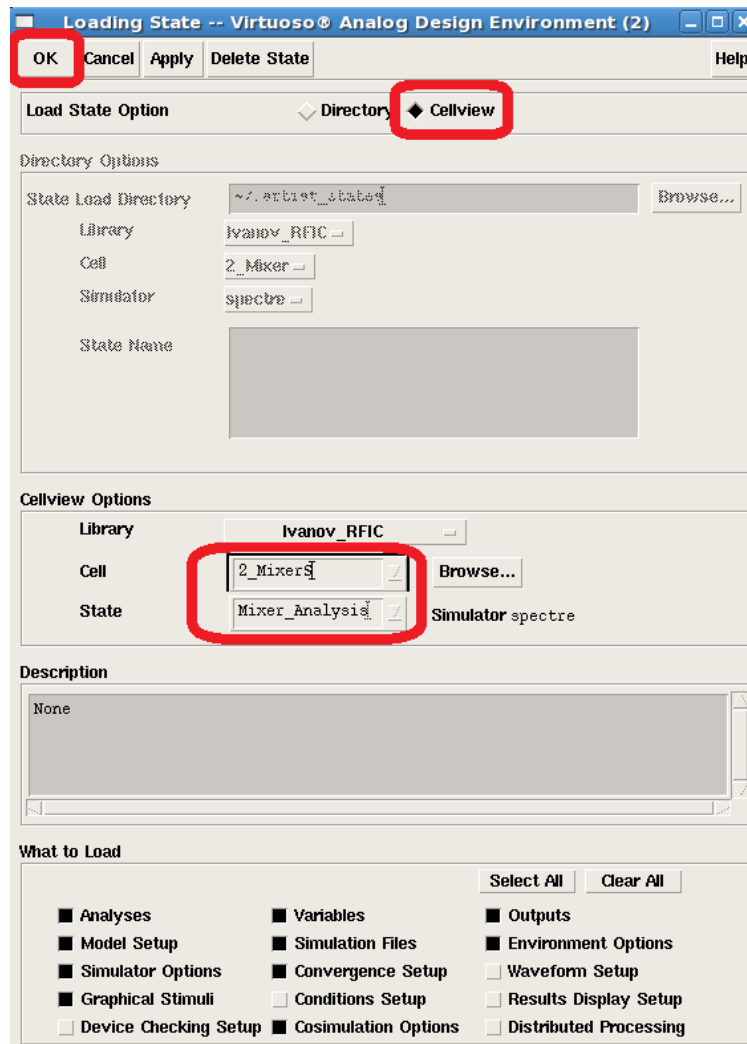


Рис. 2.3 — Окно загрузки файла с предварительными настройками

2.3.1.4. В результате откроется окно *Virtuoso ADE* с настройками следующих переменных, как показано на рис. 2.4. Для этого выполните следующие действия:

- $prf = -30$ дБм — мощность сигнала РЧ;
- $frf = 900$ МГц — частота сигнала РЧ;
- $flo = 1$ ГГц — частота сигнала гетеродина;
- $plo = -10$ дБм — мощность сигнала гетеродина.

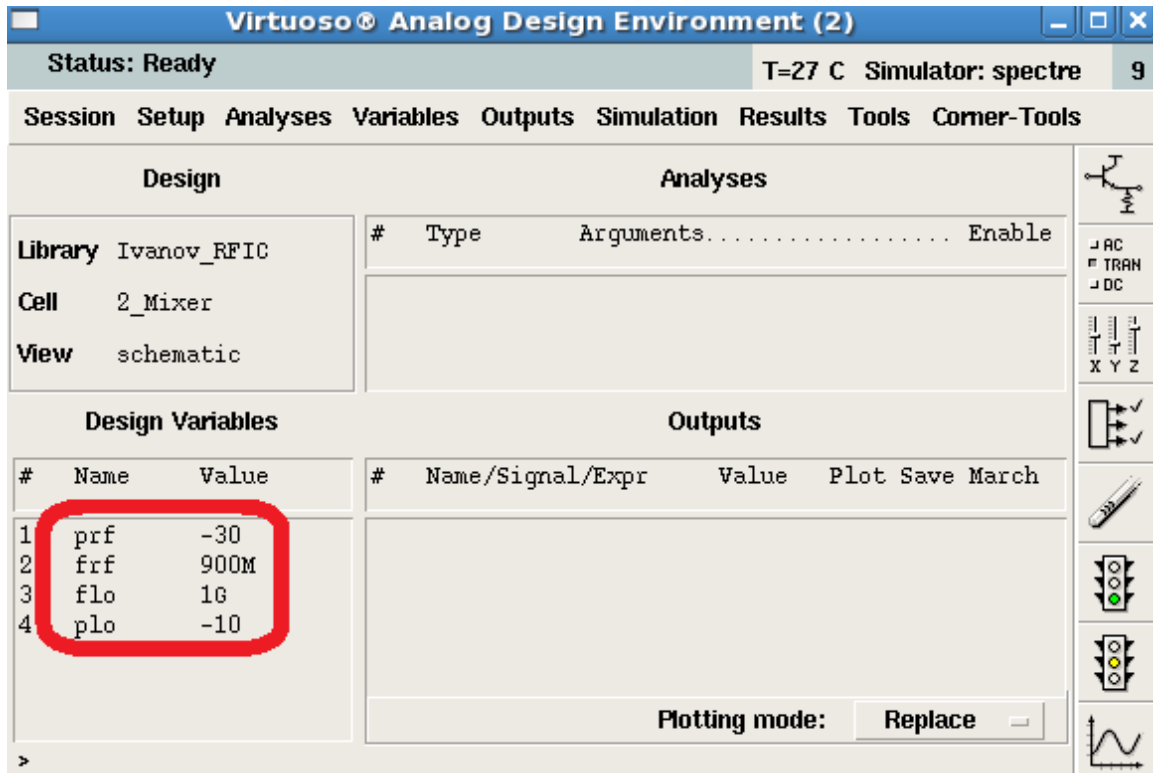


Рис. 2.4 — Окно *Virtuoso ADE* с загруженными предварительными настройками

2.3.2. Исследование коэффициента преобразования

2.3.2.1. Для исследования характеристик смесителя главным образом используется *PSS*-анализ.

Перейдите в окно выбора вида анализа и укажите ***pss***. Настройте как показано на рис. 2.5. Для этого выполните следующие действия:

- выберите автоматический расчёт фундаментальной гармоники, выбрав ***Auto Calculate***;
- в поле ***Output harmonics*** укажите **20** гармоник для анализа;
- в поле ***Accuracy Defaults*** укажите умеренную точность расчёта ***moderate***.

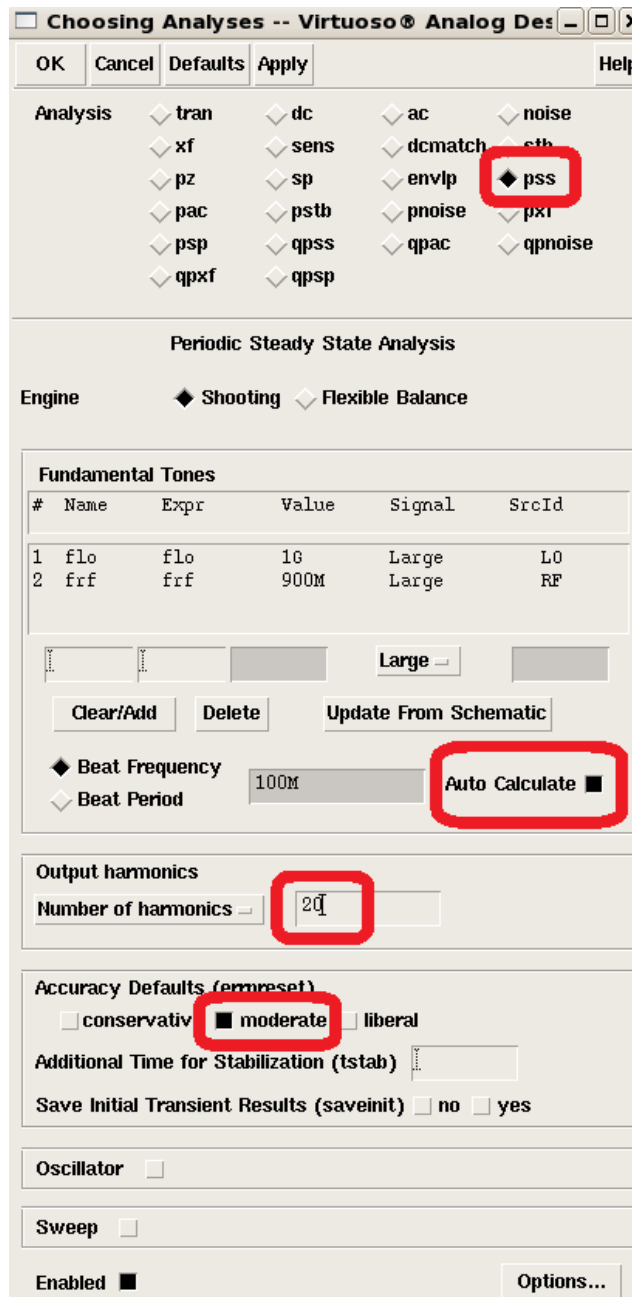


Рис. 2.5 — Окно настройки PSS-анализа

2.3.2.2. Выполните моделирование. Для измерения характеристик используйте окно *Direct Plot Form*.

Выведите **спектр мощности** сигнала РЧ, сигнала гетеродина и сигнала ПЧ. Для этого сделайте следующие действия, как показано на рис. 2.6:

- выберите в окне *Direct Plot Form* измеряемую функцию **Power**;
- в поле **Select** выберите **Port (fixed R(port))**;
- в поле **Modifier** укажите способ вывода в **dBm**;
- поставьте галочку в поле **Add To Outputs**, в результате чего выводимые графики будут автоматически добавляться в поле *Outputs* в окне *ADE*, что упрощает их мониторинг и дальнейшее использование.

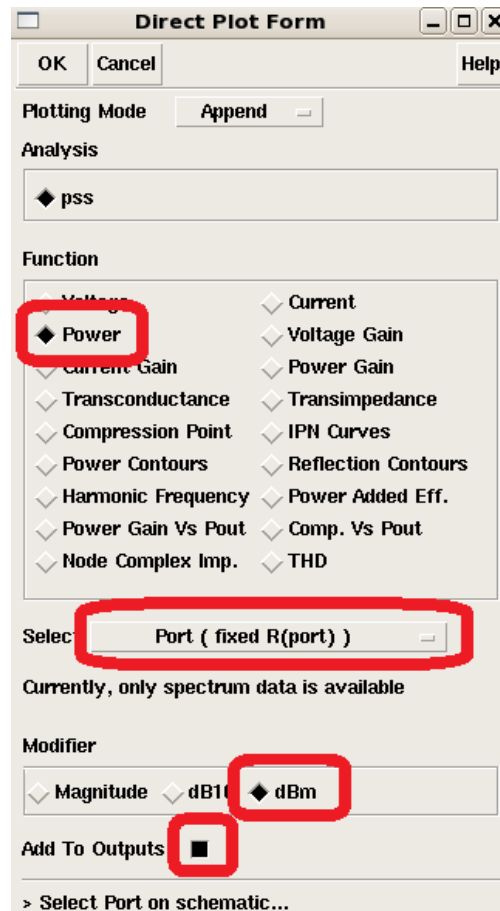


Рис. 2.6 — Окно настройки *Direct Plot Form* для вывода спектрограмм

2.3.2.3. Сверните окно *Direct Plot Form* и поочерёдно нажмите на порты сигнала РЧ ***RF***, сигнала гетеродина ***LO*** и сигнала ПЧ ***IF***.

2.3.2.4. В результате откроется окно со спектрограммами сигналов. Поставьте **маркеры** (нажатием «*m*») на следующих частотах:

- в спектрограмме РЧ сигнала на частоте f_{RF} ;
- в спектрограмме сигнала гетеродина на частоте f_{LO} ;
- в спектрограмме ПЧ сигнала на частоте f_{IF} .

Приведите графики к правильному виду (изменив их названия, а также цвет и толщину линий) и сохраните их.

2.3.2.5. Перейдите в окно *ADE*. В поле ***Outputs*** дважды щёлкните по одному из появившихся сигналов. Откроется окно редактирования выходных результатов ***Setting Outputs***, в котором можно задавать их имя *Name (opt.)*, выражение для расчёта *Expression* и выбирать, будет ли выводиться результат *Plotted/Evaluated*.

Задайте осмысленное название выходным результатам, например, для спектрограммы сигнала РЧ задайте имя ***RF Spectrum***, и для принятия изменений нажмите ***Change***, как показано на рис. 2.7. Для остальных результатов сделайте аналогичные действия.

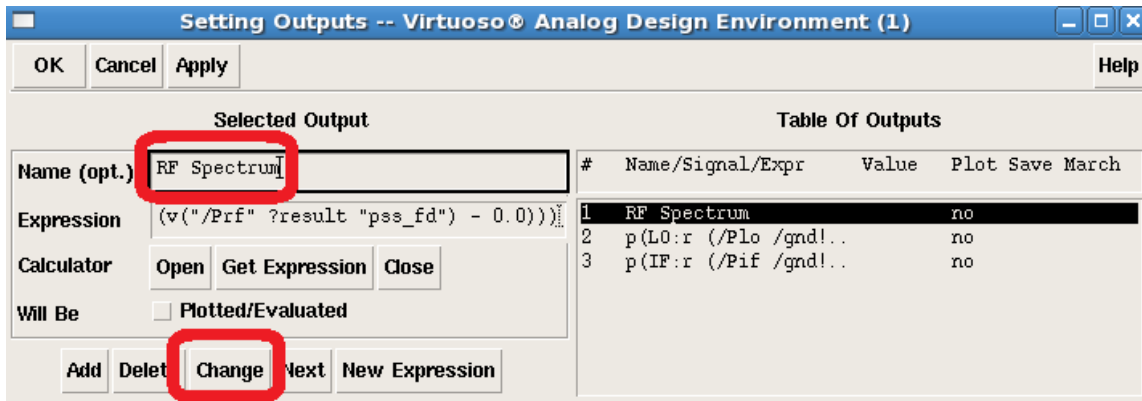


Рис. 2.7 — Окно настройки выходных результатов

2.3.2.6. В том же окне в поле **Calculator** нажмите **Open**. Откроется окно **калькулятора**, который позволяет осуществлять обработку полученных выходных результатов с помощью большого количества функций. К наиболее полезным и часто применяемым функциям можно отнести следующие:

- *average* — расчёт усреднённого значения;
- *cross* — определение значения по оси абсцисс, при котором функция принимает указанное значение;
- *value* — вывод значения функции в указанной точке.

Примечание.

В окне **Setting Outputs** для копирования и вставки используйте только комбинации **Ctrl + Insert** и **Shift + Insert**, иначе окно закроется.

Для копирования и вставки в окне **Calculator** используются традиционные комбинации клавиш **Ctrl + C** и **Ctrl + V** соответственно.

Используя калькулятор, получите два значения спектральной мощности: в спектре сигнала РЧ на частоте f_{RF} и в спектре сигнала ПЧ на частоте f_{IF} .

Примечание. Здесь и далее под калькулятором подразумевается инструмент **Calculator** в составе САПР *Cadence IC Virtuoso Design*.

Для этого последовательно проделайте следующие действия:

- в окне настройки выходных результатов **Setting Outputs** выберите результат **RF Spectrum** и выделите полное выражение, содержащееся в поле **Expression**; убедитесь в том, что **выделили выражение полностью**;
- **скопируйте** выделенное выражение, нажав **Ctrl + Insert**;
- перейдите в окно калькулятора и **вставьте** скопированное выражение в поле для выражения, нажав **Ctrl + V**, в результате чего в поле должна появиться строка следующего содержания:

```
dbm(spectralPower(((v("/Prf" ?result "pss_fd") - 0.0) / resultParam("RF:r" ?result "pss_fd")) (v("/Prf" ?result "pss_fd") - 0.0)))
```

- в окне выбора функций калькулятора выберите **value**, после чего в поле **Interpolate At** введите **VAR("frf")** и нажмите **OK**, как показано на рис. 2.8;

таким образом, вы получите значение функции спектральной мощности на частоте сигнала РЧ f_{RF} ;

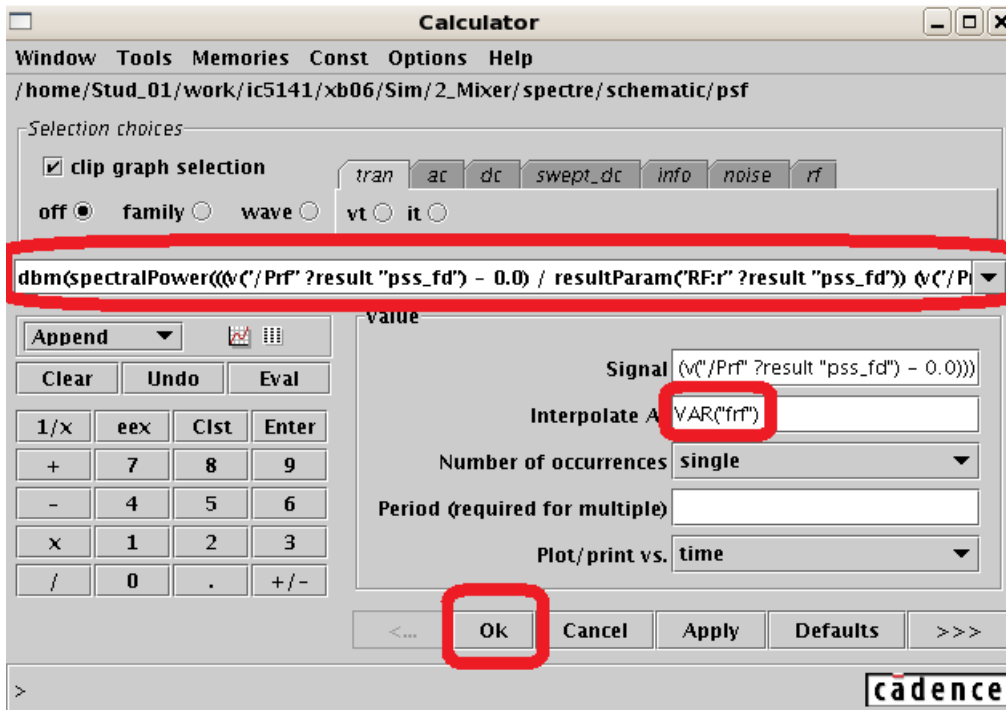


Рис. 2.8 — Окно настройки функции *value*

— выражение в поле калькулятора изменится; **полностью его выделите** и скопируйте, нажав комбинацию клавиш **Ctrl + C**;

— в окне *Setting Outputs* нажмите **New Expression**, в результате чего появится поле для описания нового выходного результата, как показано на рис. 2.9;

— назовите новый результат **RF Power**, а в поле **Expression** с помощью комбинации клавиш **Shift + Insert** вставьте ранее скопированное выражение;

— поставьте галочку в поле **Plotted/Evaluated** и нажмите **Add**.

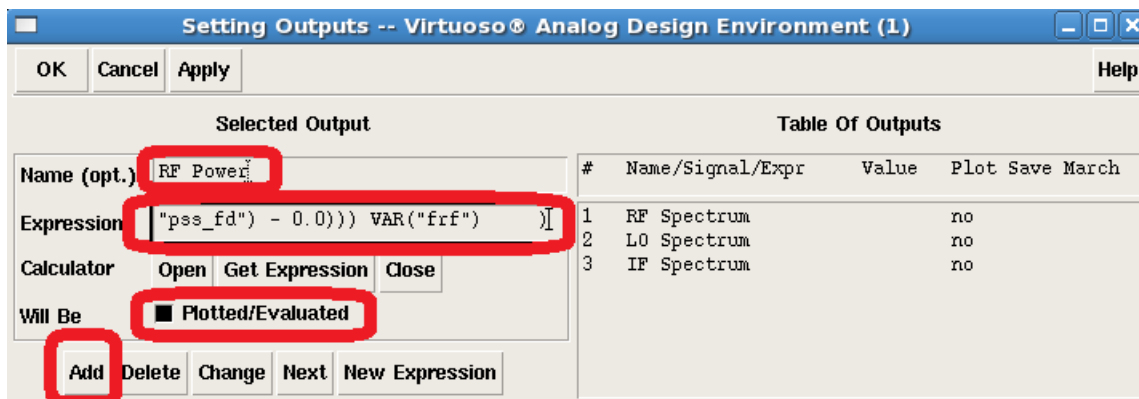


Рис. 2.9 — Окно добавления нового выходного результата

2.3.2.7. Аналогичным образом определите значение спектральной мощности в спектрограмме сигнала ПЧ на частоте f_{IF} . Для этого используйте результат **IF Spectrum**, в поле *Interpolate At* введите **VAR("flo")–VAR("frf")**, а результат назовите **IF Power**.

2.3.2.8. В окне *ADE* в правом нижнем углу нажмите на кнопку «» (*Plot Outputs*), в результате чего будут рассчитаны значения добавленных ранее результатов, как показано на рис. 2.10.

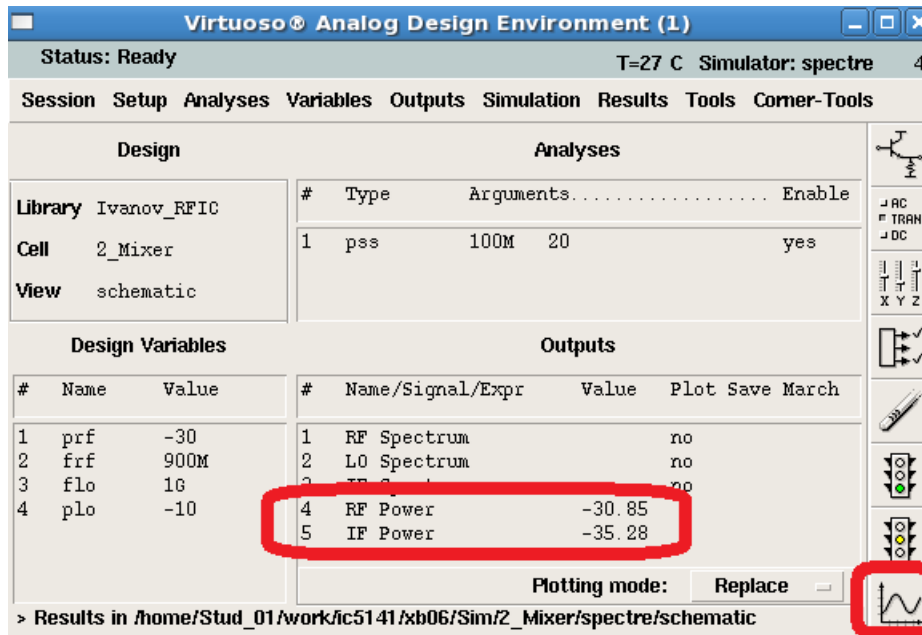


Рис. 2.10 — Вид окна *ADE* после успешного расчёта добавленных результатов

2.3.2.9. Используя калькулятор, рассчитайте коэффициент преобразования смесителя, который равен отношению мощности сигнала ПЧ к мощности сигнала РЧ, либо их разности в логарифмическом масштабе.

Для этого проделайте следующие действия:

— откройте окно калькулятора;

— выполните в него копирование поля *Expression* для результата **IF Power**;

— в поле калькулятора после скопированного выражения **поставьте знак минус**, нажав на «-»;

— после знака минус вставьте выражение, скопированное из поля *Expression* для результата **RF Power**;

— комбинацией клавиш **Ctrl + A** выделите всё выражение в калькуляторе и скопируйте его;

— в окне *Setting Outputs* создайте новый результат клавишей *New Expression* и **вставьте** в него **скопированное выражение**; результат назовите **Conversion Gain**, после чего нажмите **Add**.

2.3.2.10. Нажав на кнопку *Plot Outputs*, убедитесь, что полученное значение коэффициента преобразования составляет **–4,431 дБм**.

2.3.2.11. Исследуйте зависимость коэффициента преобразования смесителя от мощности гетеродина. Для этого используйте **параметрическое моделирование**, выбрав его в окне *ADE* кнопками *Tools — Parametric Analysis*. Изменяйте переменную мощности гетеродина **plo** в пределах **от –10 до 10 дБм** с линейным шагом **2 дБм**, как показано на рис. 2.11.

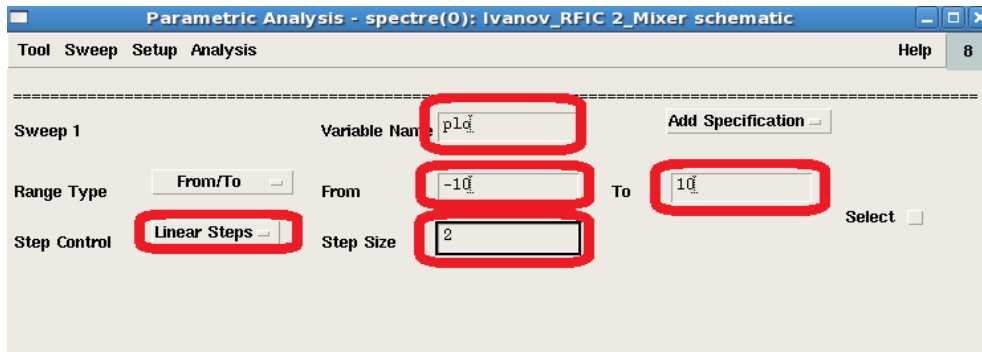


Рис. 2.11 — Окно настройки параметрического моделирования с изменением мощности гетеродина

2.3.2.12. Выполните моделирование через меню *Analysis — Start*. В результате вместо одного значения *Conversion Gain* будет построена его зависимость от мощности гетеродина *plo*.

На графике зависимости коэффициента усиления от мощности гетеродина установите **маркеры** на следующих точках:

- при минимальном уровне мощности гетеродина $P_{LO} = -10$ дБм;
- при максимальном коэффициенте преобразования $G_{\max}$;
- выберите и установите маркер на **оптимальном** по результатам исследований **уровне мощности гетеродина**, при которой коэффициент преобразования будет близок к максимальному значению (с разницей между оптимальным и максимальным значениями не более 0,2 дБ), и при этом требуется обеспечить как можно меньший уровень мощности гетеродина.

Проанализируйте полученную зависимость и сохраните её в черновую версию отчёта.

2.3.3. Исследование переходного ослабления сигнала гетеродина

2.3.3.1. Рассчитайте переходное ослабление сигнала гетеродина, используя калькулятор. По описанной ранее методике с использованием функции *value* рассчитайте и выведите результат под именем **Output LO Power**, в котором содержится значение **спектральной мощности в спектре ПЧ сигнала на частоте f_{LO}** ($\text{VAR}("flo")$). При правильной настройке анализа полученное значение должно составлять **-50,37 дБм**.

2.3.3.2. В поле для выражения калькулятора начните вводить:

`VAR("plo")-`

и вставьте после знака «минус» выражение из поля *Expression*, которое определяется для результата *Output LO Power*. Создайте новую переменную с названием **LO-IF Rejection** и вставьте в него полное выражение, набранное в окне калькулятора.

2.3.3.2. Выполните моделирование и убедитесь, что значение переходного ослабления сигнала гетеродина составляет **40,37 дБ**.

2.3.3.3. Используя кнопку **Plotted/Evaluated** в окне *Setting Outputs*, **отключите вывод предыдущих результатов**, оставив только *LO-IF Rejection*.

2.3.3.4. Выполните параметрическое моделирование с настройками, аналогичными описанным в п.п. 2.3.2.11. Проанализируйте вид полученной зависимости переходного ослабления сигнала гетеродина K_{LO-IF} от уровня мощности гетеродина P_{LO} и установите **маркеры в тех же точках**, что и на ранее полученной зависимости коэффициента преобразования. Сохраните график в черновую версию отчёта.

2.3.4. Исследование шумовых свойств

2.3.4.1. Для исследования шумовых свойств устройств, выполняющих операцию преобразования частоты, необходимо использовать анализ **pnoise**.

В окне схемы перейдите в настройки порта РЧ сигнала **RF** и в поле тип порта **Source Type** укажите **dc**, после чего **сохраните схему**. Это нужно для того, чтобы шумовые свойства смесителя не изменялись в зависимости от частоты и мощности входного сигнала. В таком случае коэффициент шума будет представлять собой зависимость лишь от элементов схемы и параметров сигнала гетеродина.

2.3.4.2. В окне настройки анализа **pss** убедитесь в том, что рассчитанная фундаментальная частота **Beat Frequency** после расчёта составляет **1 ГГц**. В поле **Number of harmonics** укажите **0**, что означает проведение анализа исключительно на первой гармонике фундаментальной частоты.

2.3.4.3. Выберите вид анализа **pnoise** и настройте его так, как показано на рис. 2.11:

— в поле **Output Frequency Sweep Range** укажите изменение частоты в пределах от **1 кГц** до **2 ГГц**;

— в поле **Sweep Type** укажите логарифмический способ перестройки частоты **Logarithmic** с количеством точек на декаду **Points Per Decade**, равным **20** (1 декада соответствует увеличению частоты в 10 раз);

— поставьте галочку в поле **Add Specific Points** и укажите **100 МГц**; это гарантирует, что частота 100 МГц, соответствующая сигналу ПЧ, обязательно будет рассчитана вне зависимости от указанных диапазона и шага перестройки;

— в поле **Sidebands** выберите **Maximum sideband** и впишите значение, которое равняется числу гармоник **Number of harmonics** при анализе в п.п. 2.3.2.1;

— в поле **Output** выберите **voltage** и в качестве **Positive Output Node** укажите в схеме проводник, названный **Pif**;

— в поле **Input Source** выберите **port** и укажите в схеме входной порт РЧ сигнала **RF**;

— в поле **Reference side-band** впишите **-1**; в этом поле значение **-1** указывается при анализе схем с преобразованием частоты вниз, **+1** — для схем преобразованием частоты вверх, **0** — для схем без преобразования частоты.

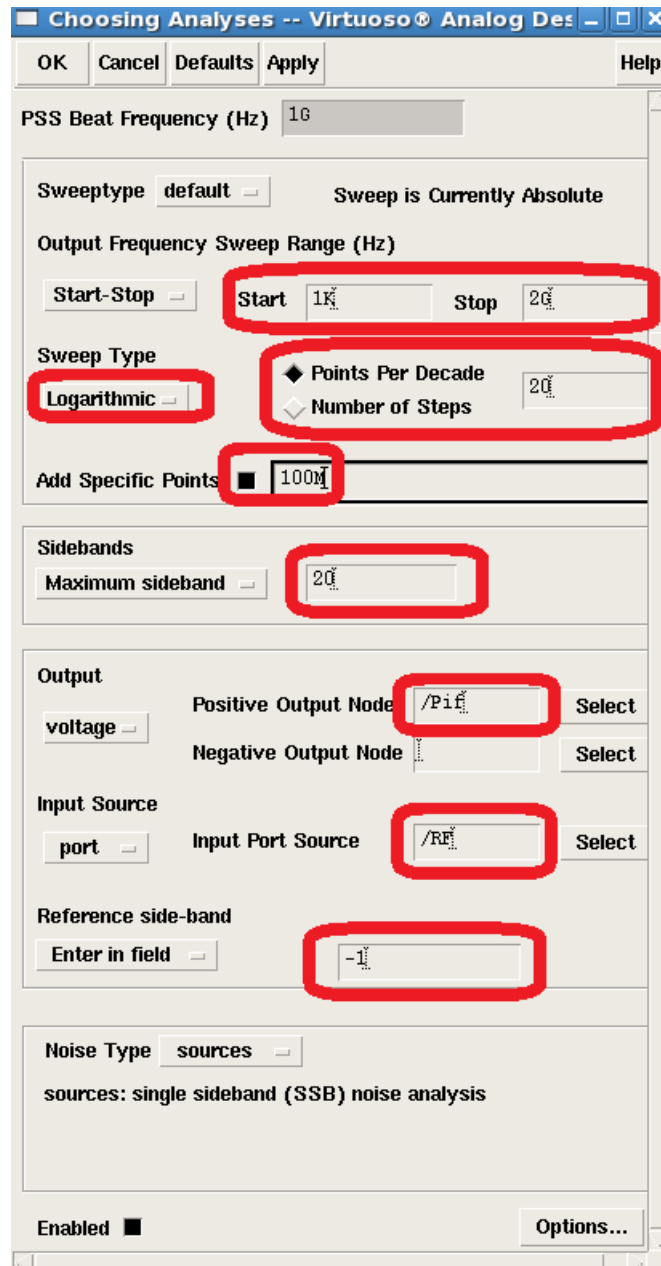


Рис. 2.11 — Окно настройки параметрического моделирования с изменением мощности гетеродина

2.3.4.4. Отключите вывод результата *LO-IF Rejection* и выполните моделирование. Для вывода коэффициента шума перейдите в окно *Direct Plot Form*, выберите ***pnoise***, укажите ***Noise Figure***, выберите опцию ***Add To Outputs*** и нажмите ***Plot***.

2.3.4.5. В результате откроется график зависимости коэффициента шума в указанном ранее диапазоне частот. Установите **маркер** на частоте ПЧ сигнала и сохраните график.

Примечание. Зависимость коэффициента шума от частоты имеет несколько выраженных зон, которые отображены на рис. 2.12. Ознакомьтесь с теоретическим объяснением этих зон:

— **зона 1** — преобладает низкочастотный фликкер-шум (дробовый шум) с сильно выраженной зависимостью $1/f$;

- **зона 2** — преобладают тепловые шумы, которые прямо пропорциональны частоте f ;
- **зона 3** — коэффициент шума повышается из-за того, что по мере увеличения частоты растут потери преобразования смесителя;
- **зона 4** — высокий уровень шумов на частоте гетеродина f_{LO} , вызванный переносом фликкер-шумов $1/f$ в окрестность частоты f_{LO} ;
- **зона 5** — фликкер-шумы $1/f$, которые увеличиваются по мере приближения к частоте второй гармоники гетеродина $2f_{LO}$.

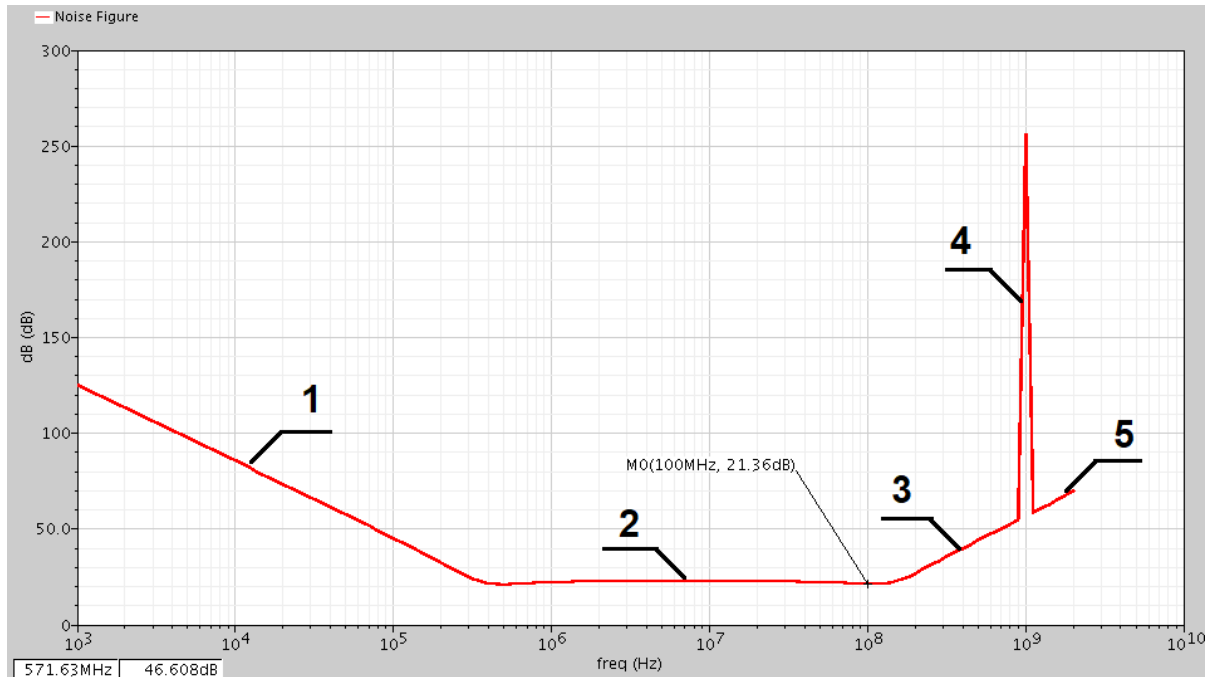


Рис. 2.12 — Частотная зависимость коэффициента шума смесителя

2.3.4.5. Используя калькулятор, рассчитайте и выведите в отдельный результат значение коэффициента шума на частоте $VAR("flo")-VAR("frf")$. Назовите результат как **Noise Figure**, а построенный ранее график удалите, используя **Delete** в окне настройки результатов.

2.3.4.6. Выполните параметрическое моделирование с настройками, аналогичными описанным в п.п. 2.3.2.11. Установите **маркеры в тех же точках**, что и на ранее полученной зависимости коэффициента преобразования, а также на **следующих точках**:

- при минимальном уровне мощности гетеродина $P_{LO} = -10$ дБм;
- при минимальном коэффициенте шума $NF = \min$.

Проанализируйте вид полученной зависимости коэффициента шума NF от мощности гетеродина P_{LO} и сохраните график.

2.3.5. Исследование динамического диапазона

2.3.5.1. Для упрощения процедуры анализа выполним измерения значения точки одностенной компрессии по входу $IP1dB$ без измерения интермодуляционных искажений.

Для этого сперва **отключите** вывод ранее полученных результатов, а также отключите анализ *noise*. Измените **тип входного порта** обратно на ***sine***.

2.3.5.2. Прделайте действия, аналогичные описанным ранее в п.п. 1.4.4.1—1.4.4.2. В окне настройки PSS-анализа укажите расчёт **первой выходной гармоники**, поставьте галочку в поле ***Sweep***, и укажите перестройку уровня мощности ***prf*** в пределах **от –30 до 10 дБм с линейным шагом 5 дБм**.

2.3.5.3. В окне *Direct Plot Form* при измерениях укажите в качестве ***Input Power Compression Point (dBm)*** значение **–25**, а в качестве ***1st Order Harmonic*** выберите частоту ПЧ сигнала. Убедитесь в наличии установленной галочки в поле ***Add To Outputs***.

2.3.5.4. Сохраните полученную зависимость. Перейдите в окно *ADE*. После измерения точки компрессии были добавлены два результата: *CompressionCurves* и *Input Referred 1dB Compression Point*. **Удалите** первый результат, а второй переименуйте в ***IP1dB***.

2.3.5.5. Выполните параметрическое моделирование с настройками, аналогичными описанным в п.п. 2.3.2.11. Установите **маркеры в тех же точках**, что и на ранее полученной зависимости коэффициента преобразования, а также на **следующих точках**:

- при минимальном уровне мощности гетеродина $P_{LO} = -10$ дБм;
- при максимальной точке компрессии $IP1dB_{max}$.

Проанализируйте вид полученной зависимости от уровня мощности гетеродина P_{LO} и сохраните график в черновую версию отчёта.

2.4. Содержание отчёта

2.4.1. Цели и задачи работы.

2.4.2. Ход выполнения работы с приведением всех указанных промежуточных результатов, включая исследуемые схемы, полученные графические зависимости с комментариями, расчёты и промежуточные выводы.

2.4.3. Сводная таблица, пример которой представлен в таблице 2.1, в которую занесены результаты измерения и исследования характеристик смесителя, в том числе результаты выбора оптимального уровня мощности гетеродина.

Примечания.

1) Под исходным значением параметра понимается значение, измеренное при исходном уровне мощности гетеродина $P_{LO} = -10$ дБм.

2) Под **оптимальным уровнем мощности гетеродина $P_{LO_{opt}}$** понимается значение, при котором на основании анализа измеренных зависимостей характеристик смесителя от уровня мощности гетеродина с вашей точки зрения соблюдается наилучший компромисс между характеристиками смесителя в соответствии со следующими критериями:

- требуется как можно меньший уровень мощности гетеродина, что соответствует более высокой энергоэффективности смесителя;
- обеспечивается как можно больший коэффициент преобразования, что позволяет уменьшить потери мощности при преобразовании;

— обеспечивается как можно большее переходное ослабление сигнала гетеродина, что обеспечивает более качественное подавление гармоник мощного сигнала гетеродина в спектре выходного сигнала ПЧ;

— обеспечивается как можно меньший коэффициент шума, что позволяет улучшить шумовые свойства смесителя;

— обеспечивается как можно большее значение точки однодецибелной компрессии, что позволяет увеличить динамический диапазон смесителя.

2.5.4. Подробные выводы, в которых отражены основные положения, полученные из проведённых исследований, и приведены пояснения полученных результатов.

Таблица 2.1 — Рекомендуемое оформление сводной таблицы измеренных характеристик смесителя

Параметр		Значение P_{LO} , дБм	Значение парам.	Ед. изм.
Исходные и граничные значения				
Коэффициент преобразования	исходный G_0	–10		
	максимальный $G_{\max}$			
Коэффициент шума	исходный NF_0	–10		
	минимальный $NF_{\min}$			
Точка однодецибелной компрессии по входу	исходная $IP1dB_0$	–10		
	максимальная $IP1dB_{\max}$			
Переходное ослабление сигнала гетеродина в спектре ПЧ-сигнала	исходное K_{LO-IF0}	–10		
	максимальное $K_{LO-IF\max}$			
Значения, полученные в результате выбора $P_{LO \text{ опт}} = \text{___}$ дБм				
Коэффициент преобразования	итоговый G_0			
Коэффициент шума	итоговый NF_0			
Точка однодецибелной компрессии по входу	итоговая $IP1dB_0$			
Переходное ослабление сигнала гетеродина в спектре ПЧ-сигнала	итоговое K_{LO-IF0}			

2.5. Контрольные вопросы

2.5.1. Приведите классификацию смесителей, поясните достоинства и недостатки различных типов смесителей.

2.5.2. Перечислите основные характеристики, определяемые для смесителей РЧ/СВЧ диапазона.

2.5.3. Что определяет характеристика, называемая переходным ослаблением сигнала гетеродина, и чем она важна? Предложите возможные способы повышения переходного ослабления.

2.5.4. Поясните принцип преобразования частоты, реализуемый в смесителях. Какие элементы для этого используются?

2.5.5. Приведите принципиальную схему транзисторного аналогового перемножителя сигналов и поясните принцип её работы.

2.5.6. Перечислите и опишите основные методы анализа, используемые в данной лабораторной работе для исследования характеристик смесителя.

2.5.7. Поясните методику определения коэффициента шума смесителя, применяемую в данной лабораторной работе. Охарактеризуйте полученный вид частотной зависимости коэффициента шума смесителя.

2.5.8. Поясните методику выбора оптимального значения мощности гетеродина, которая применялась в данной лабораторной работе.

2.5.9. Поясните назначение элементов принципиальной схемы исследуемого смесителя.

Лабораторная работа № 3

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРНОГО ГЕНЕРАТОРА РЧ-ДИАПАЗОНА

3.1. Цели работы

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо изучить методы моделирования опорного генератора в САПР *Cadence IC Virtuoso Design* и анализа следующих его характеристик:

- частота генерации;
- уровень фазовых шумов;
- джиттер;

В ходе выполнения лабораторной работы также необходимо исследовать способы уменьшения уровня фазовых шумов опорного генератора.

3.2. Теоретические сведения

3.2.1. Принцип формирования опорной частоты

В основе генератора, формирующего периодические колебания любой формы, лежит принцип использования усилительных каскадов с **положительной обратной связью (ПОС)**. Согласно теории радиотехнических цепей и сигналов, возникновение установившегося автоколебательного процесса возможно при одновременном соблюдении двух условий:

— **баланс фаз** — разность фаз $\Delta\varphi$ между условно входным сигналом (в генераторах отсутствует понятие входа в классическом понимании) и выходным сигналом должна быть **кратна 2π** , что соответствует наличию ПОС:

$$\Delta\varphi = 2\pi n; n = 0, 1, 2, \dots$$

— **баланс амплитуд** — кольцевой коэффициент усиления K_0 должен **превышать 1**, иначе будет наблюдаться затухающий автоколебательный процесс:

$$K_0 = K_{yc} \cdot K_{oc} \geq 1.$$

Для возникновения автоколебаний генератору необходим первоначальный «толчок», который инициирует рост амплитуды до некоторого установившегося значения. Как правило, в роли условного входа генератора выступает **источник шума**, либо **колебания питания**, вызванные переходным процессом при его включении. Напряжение теплового шума, вызванного броуновским движением частиц, благодаря наличию цепи ПОС многократно усиливается, пока усилительный каскад не переходит в **насыщение**, ограничивая уровень установившегося напряжения, что показано на рис. 3.1.

Для генерирования гармонических колебаний необходимо выделить требуемую гармонику из общего спектра выходных усиленных шумов. Для этого в нагрузку усилителя включается **колебательный контур**. Возможно применение

ние низкодобротных контуров на основе моста Вина, либо применение высокодобротных контуров на основе **LC-цепи** или объёмного резонатора СВЧ.

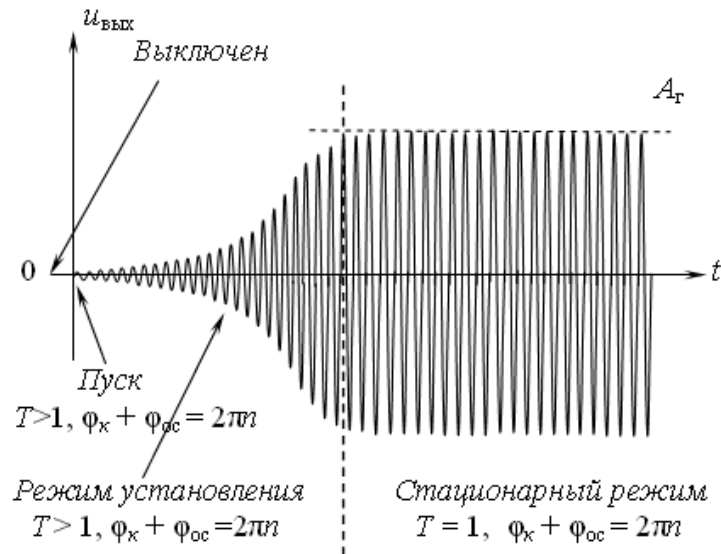


Рис. 3.1 — Временная диаграмма выходного сигнала генератора при самовозбуждении

3.2.2. Основные характеристики генератора

Кроме формы сигнала и частоты установившихся колебаний, наиболее важной характеристикой опорного генератора является шум генератора, главной составляющей которого представляется **фазовый шум**. Эта величина позволяет характеризовать **кратковременную стабильность** опорной частоты генератора, которая выражается во флуктуациях мгновенных значений частоты.

Идеальное синусоидальное колебание в частотной области описывается дискретной спектральной компонентой на частоте колебаний, однако в спектре реального сигнала вблизи частоты генерации присутствуют **боковые полосы**, которые приводят к возникновению **паразитной фазовой модуляции**, что проиллюстрировано на рис. 3.2.

Спектральная плотность мощности (СПМ) боковой полосы опорного колебания характеризуется уровнем фазовых шумов. При указании фазового шума приводят СПМ, выраженную в децибелах относительно несущей на герц (**дБн/Гц**), а также указывается частота отстройки от несущей, на которой было измерено значение.

Например, для генератора с частотой 10 ГГц, уровень фазовых шумов **–120 дБн/Гц** при отстройке от несущей на 1 МГц означает, что уровень СПМ на частотах 10 ГГц ± 1 МГц на 120 дБ меньше, чем уровень СПМ на частоте генерации 10 ГГц. При этом обычно рассматривается только одна боковая полоса, поскольку боковые полосы полностью идентичны.

Во временной области фазовый шум проявляется в виде «**дрожания**» синуса, которое характеризуется величиной среднеквадратического отклонения (СКО) периода сигнала — **джиттера** $T_{дж}$.

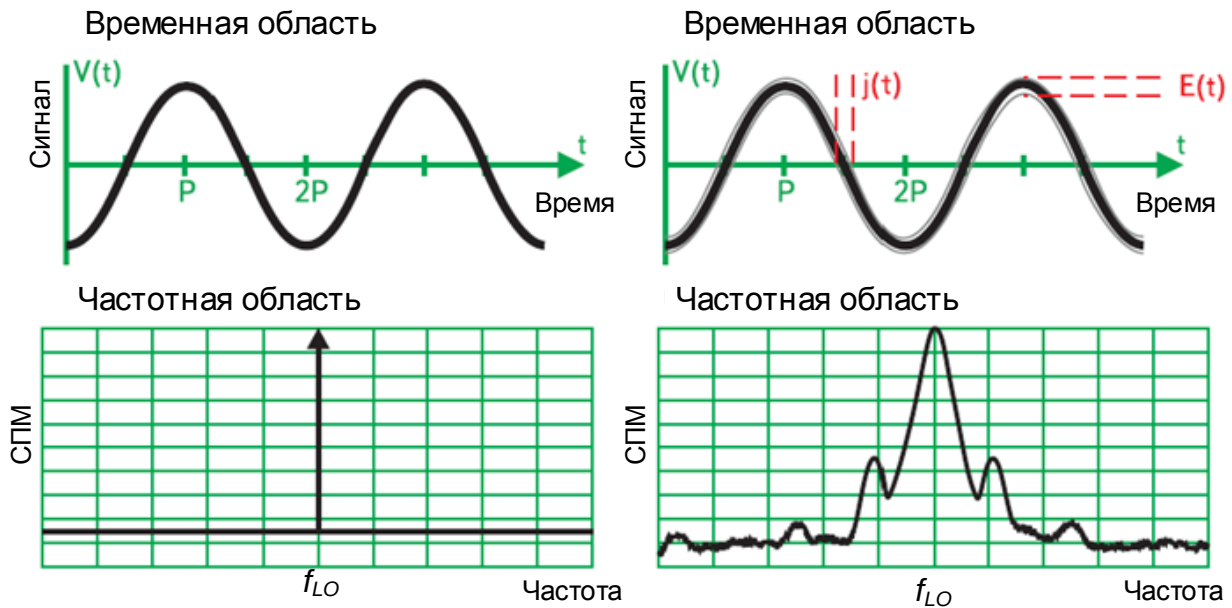


Рис. 3.2 — К пояснению о фазовом шуме генератора (СПМ — спектральная плотность мощности)

К основным способам понижения уровня фазовых шумов РЧ генераторов можно отнести следующие [5]:

- уменьшение уровня боковой полосы в спектре сигнала за счёт использования высокодобротного полосно-пропускающего фильтра (LC -контура);
- использование в основе генератора активных приборов с более низким уровнем собственных шумов, например, биполярных транзисторов;
- понижение уровня шумов активного прибора за счёт выбора линейного режима работы и линеаризации усиления каскада;
- повышение отношения сигнал/шум в автогенераторе за счёт увеличения мощности колебаний путём компромиссного выбора между коэффициентом усиления и нелинейными искажениями.

3.3. Выполнение лабораторной работы

3.3.1. Подготовка схемы к моделированию

3.3.1.1. Откройте менеджер библиотек. В скопированной ранее библиотеке `{Фамилия}_RFIC` откройте вид ***schematic*** ячейки ***3_Oscillator***. В результате откроется редактор, в котором содержится исследуемая схема генератора, как показано на рис. 3.3.

3.3.1.2. Данная схема представляет собой **дифференциальный опорный генератор**, построенный на основе схемы **генератора с емкостной трёхточкой**. За выделение гармонической составляющей отвечает колебательный **LC -контур**. В качестве ёмкости контура используется идеальный конденсатор C_{tune} , который имитирует ёмкость полупроводникового **варикапа**.

Как известно, барьерная ёмкость полупроводникового p - n -перехода зависит от ширины обеднённой зоны, которая в свою очередь определяется падением напряжения анод-катод образующегося диода. Таким образом, изменяя ве-

личину управляющего напряжения, возможно добиться **перестройки опорной частоты генератора** за счёт изменения резонансной частоты контура.

Изучите принцип работы исследуемого генератора и назначение элементов принципиальной схемы.

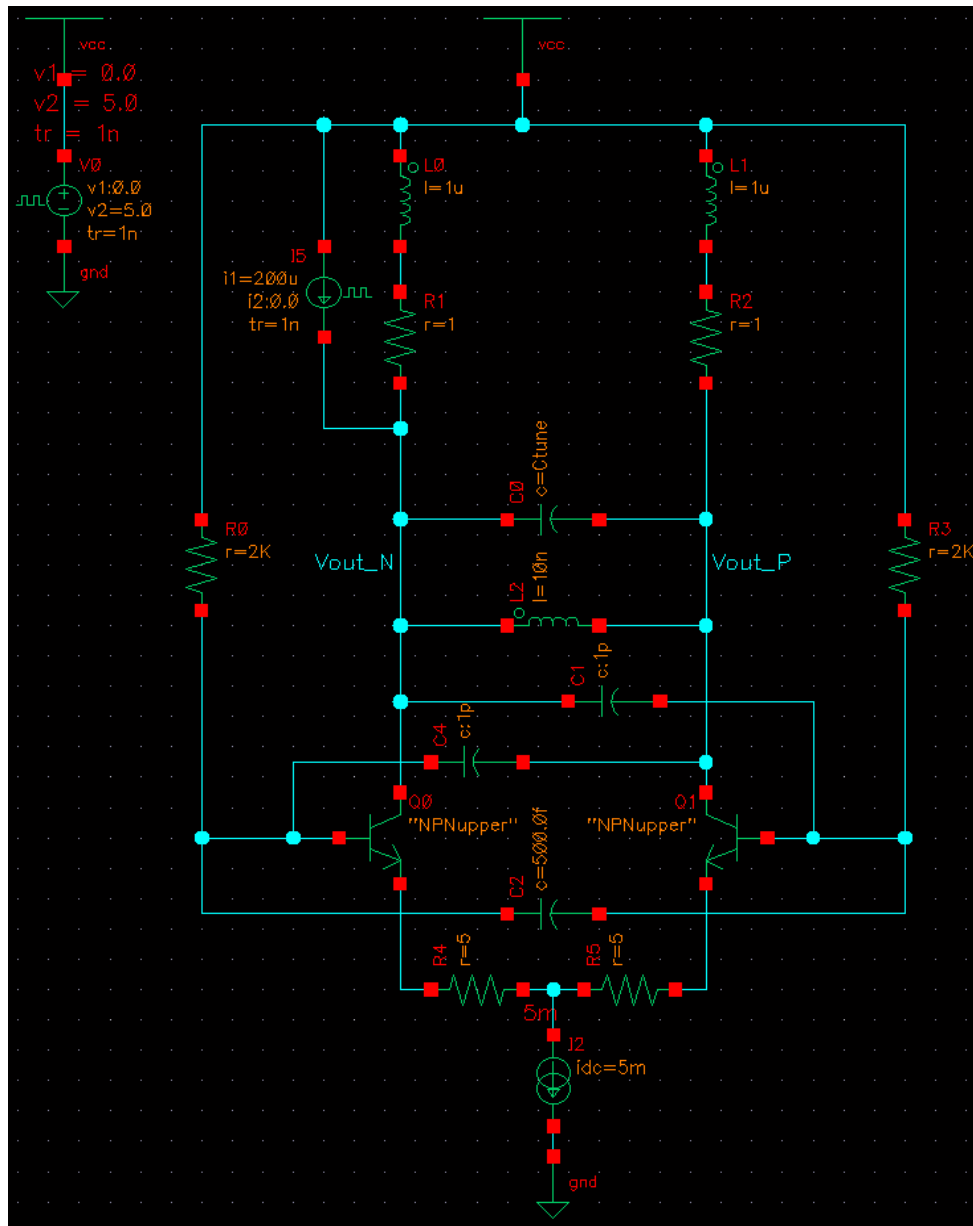


Рис. 3.3 — Принципиальная схема модели исследуемого генератора

3.3.2. Исследование частоты генерации

3.3.2.1. Для исследования характеристик опорного генератора главным образом используются виды анализа **pss** и **pnoise**. Особенность, которая возникает при анализе характеристик генераторов, заключается в том, что частота сигнала заранее неизвестна, из-за чего определить фундаментальную гармонику *Beat Frequency* невозможно. В таком случае для определения частоты генерации следует использовать временной анализ **tran**.

Для этого в окне **ADE** в поле **Variables** выведите переменную **Ctune**, которая представляет собой ёмкость колебательного контура генератора, и укажите

её значение равным **1,72 пФ**. Пренебрегая влиянием ёмкостей схемы и паразитных ёмкостей транзисторов, приблизительно оцените **резонансную частоту** f_0 колебательного контура в соответствии с выражением:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{tune}}}.$$

Зная резонансную частоту f_0 , по известной формуле, определите период резонансных колебаний T_0

$$T_0 = \frac{1}{f_0}.$$

3.3.2.2. Перейдите в окно выбора вида анализа и укажите **tran**. Поскольку процесс установления колебаний занимает некоторое время, необходимо осуществить моделирование множества периодов.

В поле **Stop Time** укажите значение, рассчитанное как **100· T_0** (с округлением), что соответствует времени наблюдения, равному порядка 100 периодов выходной частоты.

Примечание. При моделировании опорного генератора и исследовании его характеристик с помощью различных видов анализа настоятельно рекомендуется использовать повышенную точность расчётов. Для этого в поле **Accuracy Defaults** выберите **conservative**, что соответствует высокой точности расчётов.

3.3.2.3. Выполните моделирование. Используя окно *Direct Plot Form*, выведите осциллограмму выходного напряжения со следующими настройками, как показано на рис. 3.4. Для этого выполните следующее:

- выберите измеряемую характеристику **Voltage**;
- в поле **Select** укажите **Differential Nets**; это необходимо для корректного вывода выходного дифференциального сигнала генератора;
- поставьте галочку в поле **Add To Outputs**;
- перейдите к схеме и последовательно нажмите на проводники **Vout_P**, а затем на **Vout_N**.

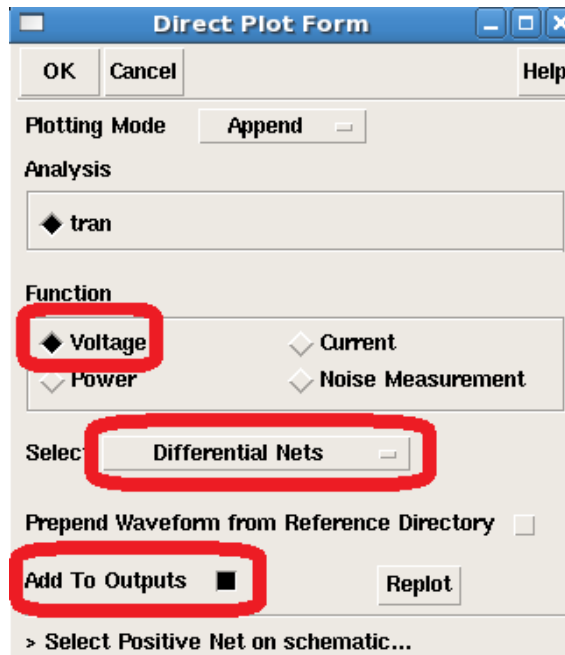


Рис. 3.4 — Вид настроенного окна для измерения осциллограммы выходного дифференциального напряжения

3.3.2.4. В результате моделирования в окне результатов отобразится осциллограмма дифференциального выходного напряжения генератора. Для **увеличения масштаба графика** зажмите правую кнопку мыши и выделите область, которую хотите рассмотреть. Для возвращения исходного масштаба нажмите клавишу «F».

Убедитесь в наличии факта генерации. Проанализируйте вид зависимости и сохраните в черновую версию отчёта **три скриншота**:

- временная диаграмма в полном масштабе;
- временная диаграмма от нулевого момента времени, демонстрирующая исключительно переходные процессы до установления стационарного режима (в левой части графика);
- временная диаграмма нескольких периодов установившегося напряжения ближе к окончанию времени анализа (в правой части графика).

3.3.2.5. В окне **Outputs** задайте название появившемуся результату **Output Diff Voltage** и поставьте галочку в поле **Plotted/Evaluated**.

Примечание. При дальнейших изменениях схемы настоятельно рекомендуется всегда контролировать факт наличия самовозбуждения и генерации по осциллограмме выходного напряжения, поскольку определить этот факт, используя другие виды анализа, затруднительно.

3.3.2.6. Используя функцию **freq** в калькуляторе, определите **частоту** выходных колебаний результата **Output Diff Voltage**. При настройке функции **freq** все поля оставьте по умолчанию. Назовите новый результат **Frequency Plot** и нажатием кнопки **Plot Outputs** выведите его.

3.3.2.7. В результате будет выведена временная диаграмма, отображающая изменение частоты сигнала со временем. В данном случае интерес представляет лишь частота установившегося колебания.

Используя функцию **value** в калькуляторе, определите значение от результата *Frequency Plot* в точке, соответствующей установившемуся режиму колебаний (время ближе к концу моделирования). Назовите новый результат **Output Frequency** и выведите его. Результат *Frequency Plot* далее можно удалить.

3.3.2.8. Зафиксируйте рассчитанное значение частоты колебаний опорного генератора f_{LO} , которое должно составлять **1 ГГц**. Рассчитайте значение периода колебаний T_{LO} и в поле **Stop Time** в окне настройки анализа *tran* укажите значение $100 \cdot T_{LO}$.

3.3.3. Исследование спектра выходного сигнала

3.3.3.1. Настройте анализ *pss*, как показано на рис. 3.5. Для этого выполните следующие действия:

- в поле **Beat Frequency** впишите измеренное ранее значение частоты генерации f_{LO} ;

- в поле **Number of harmonics** укажите **10** выходных гармоник, подлежащих расчёту;

- в поле **Accuracy Defaults** выберите высокую точность расчётов (**conservative**);

- в поле **Additional Time for Stabilization (tstab)** задайте значение $90 \cdot T_{LO}$; это время, начиная с которого *PSS*-анализ обсчитывает установившийся процесс на выходе; в случае, если его не указать, анализ может привести к получению некорректных результатов из-за учёта начальных процессов самовозбуждения;

- в поле **Oscillator** поставьте галочку, что соответствует анализу генератора;

- в качестве **Oscillator node** укажите на схеме проводник **Vout_P**;

- в качестве **Reference node** укажите на схеме проводник **Vout_N**.

Periodic Steady State Analysis

Engine ☒ Shooting ☐ Flexible Balance

Fundamental Tones

#	Name	Expr	Value	Signal	SrcId

☒ Beat Frequency ☐ Beat Period

 ☐ Auto Calculate

Output harmonics

Number of harmonics

Accuracy Defaults (errpreset)

☒ conservative ☐ moderate ☐ liberal

Additional Time for Stabilization (tstab)

Save Initial Transient Results (saveinit) ☐ no ☐ yes

Oscillator ☒

Oscillator node

Reference node

Osc initial condition ☒ default ☐ linear

Sweep ☐

Enabled ☒

Рис. 3.5 — Вид настроенного окна анализа *pss*

3.3.3.2. Выполните моделирование схемы. С помощью функции *Voltage* в окне *Direct Plot Form* выведите спектр дифференциального (*Differential Nets*) выходного сигнала **в вольтах** (в поле ***Modifier*** указано ***Magnitude***). Галочка в поле *Add To Outputs* не требуется.

Проанализируйте распределение напряжения по гармоникам в спектре. Сохраните полученный график.

3.3.3.3. Измерьте с помощью временных диаграмм **амплитуду напряжения** $U_{уст}$ и сравните со значением, полученном в спектре на частоте первой гармоники.

Примечание. Полученные несоответствия могут объясняться явлением «растекания» спектра. Анализ спектра при *pss*-анализе осуществляется путём вычисления быстрого преобразования Фурье для гармоник, кратных частоте *Beat Frequency*. Эта частота указывается пользователем при настройке *pss*-анализа, и она представляет собой приближенное значение частоты генерации f_{LO} , которое было получено в результате оценки на основе временных диаграмм.

Для правильного вычисления значения гармоник частоты генерации необходимо, чтобы значение *Beat Frequency* было равно абсолютному значению f_{LO} , точное измерение которого заведомо не представляется возможным. В связи с этим, вычисленный уровень гармоник является приближённым измеренным значением.

3.3.4. Исследование фазового шума и джиттера сигнала

3.3.4.1. Выберите вид анализа *pnoise* и настройте его проведение, как показано на рис. 3.6. Для этого выполните следующие действия:

- в поле *Sweep type* укажите *relative*, а в качестве фундаментальной гармоники анализа *Relative Harmonic* укажите **1**, выбрав первую гармонику f_{LO} ;
- диапазон перестройки частоты укажите **от 100 Гц до 200 МГц**;
- тип перестройки задайте **логарифмическим** с количеством точек на декаду *Points Per Decade*, равным **10**;
- в поле *Maximum sideband* укажите то же число гармоник, что было выбрано для PSS-анализа — **10**;
- в поле *Output* выберите тип выходного сигнала *Voltage*;
- в качестве *Positive Output Node* укажите проводник *Vout_P*;
- в качестве *Negative Output Node* укажите проводник *Vout_N*;
- в поле *Input Source* выберите *None*;
- в поле *Noise Type* укажите *jitter*.

3.3.4.2. Выполните моделирование схемы. После этого перейдите в окно *Direct Plot Form* и выберите анализ *pnoise*. Выберите измеряемую характеристику *Phase Noise*, поставьте галочку в поле *Add To Outputs* и выведите график нажатием кнопки *Plot*.

3.3.4.3. Проанализируйте полученную зависимость фазового шума от отстройки от частоты несущей и сохраните её.

Используя окна *Outputs* и *Calculator*, настройте два выходных результата:

- *Phase Noise* — результат, содержащий построенную ранее зависимость фазового шума от отстройки частоты;
- *PNL 100k* — результат, содержащий значение фазового шума при отстройке от несущей на 100 кГц.

Зафиксируйте полученный результат фазового шума *PNL 100k*.

Periodic Noise Analysis

PSS Beat Frequency (Hz) 10

Sweep Type **Logarithmic**

Relative Harmonic 1

Output Frequency Sweep Range (Hz)

Start-Stop Start 100 Stop 200M

Points Per Decade 10

Number of Steps 10

Add Specific Points ☐

Sidebands

Maximum sideband 10

Output

voltage Positive Output Node /Vout_P Select

Negative Output Node /Vout_N Select

Input Source

none

Noise Type **jitter**

jitter: jitter measurement at the output

FM jitter for autonomous circuit

Enabled ☒ Options...

Рис. 3.6 — Вид настроенного окна измерения для анализа *pnoise*

3.3.4.4. В окне *Direct Plot Form* выберите анализ ***pnoise jitter*** и настройте его, как показано на рис. 3.7. Для этого выполните следующие действия:

- выберите измеряемую характеристику ***Jcc*** (*Jitter Cycle-Cycle*), что позволяет измерить джиттер между периодами сигнала;
- в поле ***Number of Cycles [k]*** укажите **1**;
- в поле ***Signal Level*** выберите ***rms***, что соответствует СКО (действующему значению) джиттера;
- в поле ***Modifier*** укажите ***ppm***, что выведет джиттер в *ppm* (одна миллионная доля, 10^{-6}) относительно периода колебаний T_{LO} ;
- в поле ***Freq. Multiplier*** укажите **1**;
- в поле ***Integration Limits*** укажите диапазон частот от **40 кГц** до **10 МГц**, в пределах которого уровень фазовых шумов убывает по закону -20 дБ/декада;
- поставьте галочку в поле ***Add To Outputs***.

Direct Plot Form

OK Cancel Help

Plotting Mode Append

Analysis

tran pss
pnoise pnoise modulated
pnoise jitter

Function

Phase Noise -20dB/dec Line
Jc **Jcc**

Number of Cycles [k] 1

Signal Level **rms** peak-to-peak

Modifier

Second UI **ppm**

Freq. Multiplier 1

Integration Limits

Start Frequency (Hz) 40k

Stop Frequency (Hz) 10M

Add To Outputs ☒ Plot

> Press plot button on this form...

Рис. 3.7 — Вид настроенного окна измерения для анализа *pnoise jitter*

3.3.4.5. Нажмите **Plot**. В результате полученные значения джиттера будут выведены на графике фазового шума в виде текстовых меток. В поле *Outputs* назовите этот результат как **Jitter [ppm]**.

Джиттер $T_{j ppm}$, выраженный в *ppm*, определяется через период генерации T_{LO} и СКО периода σ_{TLO} в соответствии с выражением

$$T_{j ppm} = \frac{\sigma_{TLO}}{T_{LO}} \cdot 10^6.$$

При этом в соответствии с нормальным законом распределения, статистическое распределение значений периода T_{LO} будет лежать в интервале от $T_{LO \min}$ до $T_{LO \max}$, которые определяются как

$$T_{LO \min} = T_{LO} - 3\sigma_{TLO}; \quad T_{LO \max} = T_{LO} + 3\sigma_{TLO}.$$

Тогда интервал значений частоты генерации можно определить как

$$f_{LO \min} = \frac{1}{T_{LO \max}}; \quad f_{LO \max} = \frac{1}{T_{LO \min}}.$$

Используя приведённые выше выкладки, **рассчитайте минимальную и максимальную частоты генерации**, а также определите **максимальное отклонение частоты Δf_{LO}** от опорного значения f_{LO} .

3.3.5. Исследование характеристик при перестройке частоты

3.3.5.1. Исследуйте, как изменяются характеристики опорного генератора при перестройке частоты генерации.

Для этого используйте параметрическое моделирование переменной **Ctune**, отвечающей за ёмкость варикапа колебательного контура. Настройте параметрический анализ, как показано на рис. 3.8:

- укажите диапазон перестройки **от 1,32 до 2,28 пФ**;
- тип перестройки укажите **Linear** с количеством шагов **4**;
- в поле **Add Specification** укажите **Inclusion List** и в появившемся окне введите значение **1,72 пФ**; таким образом, вне зависимости от шага перестройки эта точка точно будет рассчитываться при моделировании.

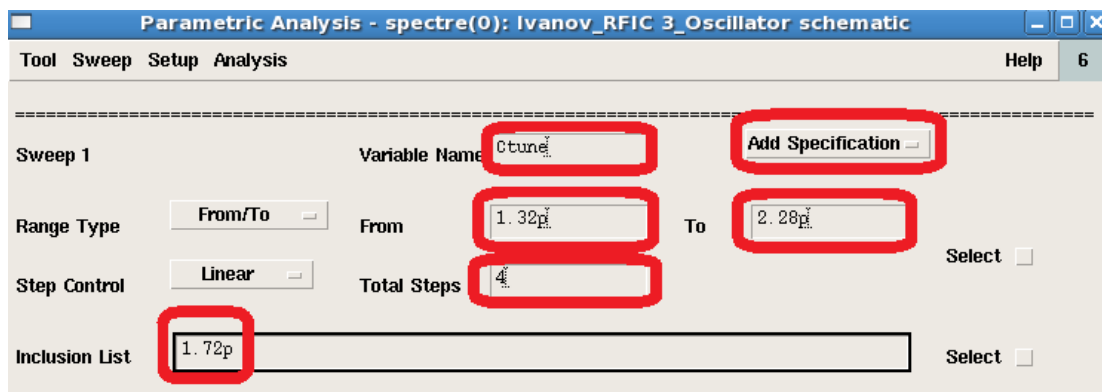


Рис. 3.8 — Вид настроенного окна параметрического анализа для перестройки частоты генерации

3.3.5.2. Выполните моделирование и проанализируйте полученные зависимости. Удалите все окна, кроме окна с графиками **Output Frequency** и **PNL 100k**.

Разнесите оставшиеся графики по разным окнам, нажав кнопку **New Subwindow** («») в верхней части окна и мышкой перетащите график **PNL 100k** в отдельное окно. Сохраните эти графики.

3.3.5.3. Рассчитайте нелинейность характеристики перестройки генератора.

Для этого, используя в калькуляторе функцию **deriv** (производная), рассчитайте новый результат **Output Frequency Deriv**.

3.3.5.4. Оцените нелинейность перестройки частоты генерации $\delta f_{\text{пер}}$.

Производная от характеристики перестройки позволяет судить о степени нелинейности функции. Производная от идеальной линейной функции является

постоянной, в то время как нелинейность характеристики приводит к изменению значения производной.

Используя график **Output Frequency Deriv**, измерьте с помощью маркеров минимальное $\delta f'_{\min}$ и максимальное $\delta f'_{\max}$ значения производной и рассчитайте **нелинейность перестройки $\delta f_{\text{пер}}$** в соответствии с выражением

$$\delta f_{\text{пер}} = \frac{\delta f'_{\max}}{\delta f'_{\min}}.$$

3.3.6. Исследование способов понижения уровня фазовых шумов

3.3.6.1. Исследуйте влияние коэффициента усиления каскада на уровень фазовых шумов. Коэффициент усиления транзисторного каскада регулируйте, изменяя ток в цепи эмиттера.

Для этого в схеме выберите идеальный источник тока **I2** и задайте его ток **DC Current** с помощью переменной **Ie**. Сохраните схему.

3.3.6.2. Используя параметрическое моделирование, изменяйте ток эмиттера **Ie** в диапазоне значений **от 5 мА до 35 мА с линейным шагом 5 мА**. Выполните моделирование.

3.3.6.3. Проанализируйте вид полученных зависимостей и сохраните графики. Определите **оптимальное значение тока эмиттера $I_{\text{э, опт}}$** , при котором уровень фазовых шумов при отстройке частоты на 100 кГц (**PNL 100k**) будет **минимальным**. Установите значение тока эмиттера равным $I_{\text{э, опт}}$.

3.3.6.4. Исследуйте влияние режима работы транзистора на уровень фазовых шумов. Режим работы транзистора регулируйте, изменяя напряжение база-эмиттер $U_{\text{бэ}}$ биполярных транзисторов (см. п.п. 3.3.6.6).

Проанализируйте любым способом (например, используя виды анализа *tran* или *dc*) текущее значение напряжения база-эмиттер $U_{\text{бэ}0}$ в данной схеме и запишите его в черновую версию отчёта.

3.3.6.5. Дополните схему резистивными делителями напряжения, как показано на рис. 3.9, которые необходимы для регулирования напряжения база-эмиттер. Задайте сопротивление резисторов в нижнем плече делителя равным переменной **Rdiv**.

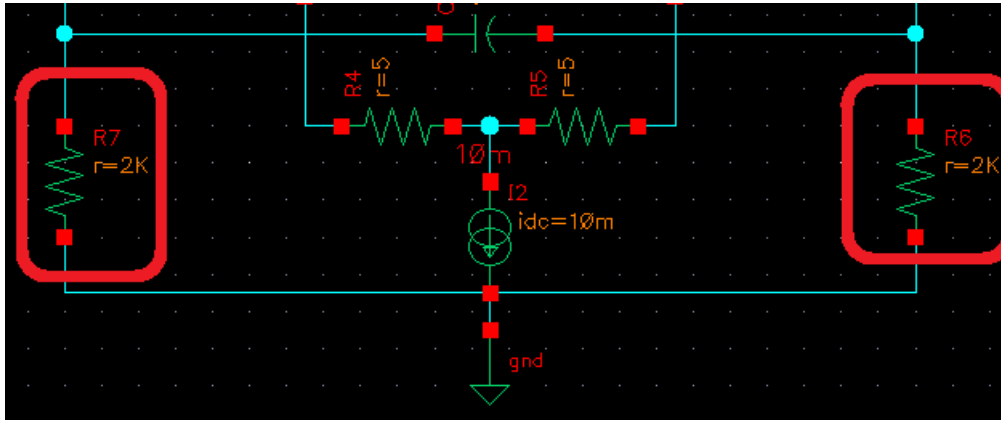


Рис. 3.9 — Дополненная схема с резистивными делителями для задания напряжения база-эмиттер

3.3.6.6. Используя параметрическое моделирование, изменяйте сопротивление нижнего плеча делителя R_{div} в диапазоне значений:

0,5; 1; 1,5; 2; 3; 5; 7,5; 10; 20 кОм.

Для этого в окне параметрического анализа укажите перестройку от 0,5 до 20 кОм с количеством шагов 2, а также укажите в поле **Inclusion List** все промежуточные значения, как показано на рис. 3.10.

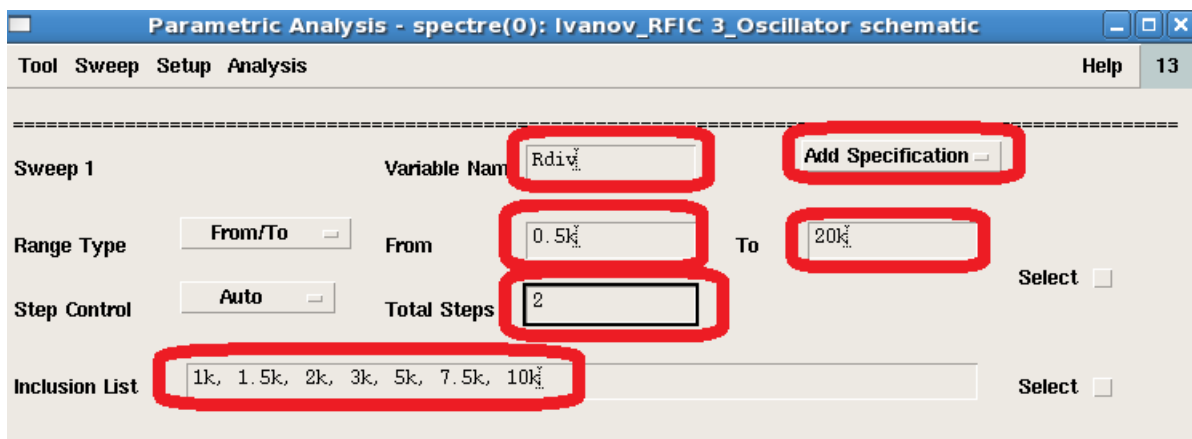


Рис. 3.10 — Вид окна настроенного параметрического анализа

3.3.6.7. Выполните моделирование. Проанализируйте и сохраните полученные зависимости. Определите **оптимальное значение сопротивления нижнего плеча делителя $R_{дел\ опт}$** , при котором уровень фазовых шумов при отстройке частоты на 100 кГц ($PNL\ 100k$) будет минимальным.

3.3.6.8. Рассчитайте по формуле ниже оптимальное значение напряжения база-эмиттер $U_{бэ\ опт}$ и запишите его в черновую версию отчёта. Проанализируйте, **какому режиму работы транзистора** оно соответствует.

Напряжение база-эмиттер, формируемое делителем напряжения $R_0 = 2\text{ кОм}$ и $R_{дел}$ из напряжения питания $U_{пит} = 5\text{ В}$, определяется как

$$U_{бэ} = U_{пит} \cdot \frac{R_{дел}}{R_{дел} + R_0}.$$

3.3.6.9. Исследуйте влияние добротности фильтра на уровень фазового шума. Для этого дополните схему двумя резисторами, имитирующими **сопротивления потерь** ёмкости и индуктивности в контуре, как показано на рис. 3.11. Укажите их значения равными **1 Ом**.

Такая схема включения реактивных элементов эквивалентна использованию индуктивности L с добротностью $Q_L = 2\pi f_{LO}L/R \approx 63$ и конденсатора C с добротностью $Q_C = 1/2\pi f_{LO}RC \approx 93$ на частоте генерации $f_{LO} = 1$ ГГц.

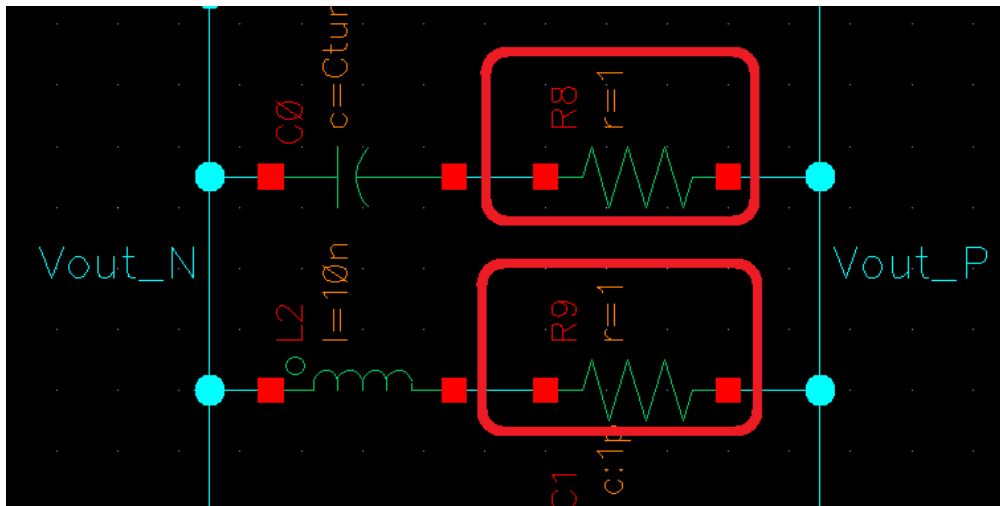


Рис. 3.11 — Дополненная схема с резисторами, имитирующими сопротивление потерь реактивных элементов

3.3.6.10. Выполните моделирование. Проанализируйте вид полученных зависимостей и сохраните их в черновую версию отчёта. Сделайте соответствующие выводы о влиянии добротности селективной системы.

3.4. Содержание отчёта

3.4.1. Цели и задачи работы.

3.4.2. Ход выполнения работы с приведением всех указанных промежуточных результатов, включая исследуемые схемы, полученные графические зависимости с комментариями, расчёты и промежуточные выводы.

3.4.3. Сводная таблица, пример которой представлен в таблице 3.1, в которую занесены результаты измерения и исследования характеристик опорного генератора.

Примечание. Под исходными характеристиками понимаются значения, измеренные для исходной схемы в процессе выполнения п. 3.3.2—3.3.5. Под итоговыми характеристиками понимаются значения, измеренные для схемы в процессе проведения исследований в п. 3.3.6.

3.5.4. Подробные выводы, в которых отражены основные положения, полученные из проведённых исследований, и приведены пояснения полученных результатов.

Таблица 3.1 — Рекомендуемое оформление сводной таблицы измеренных характеристик опорного генератора

Параметр		Значение	Ед. изм.
Частота генерации f_{LO} (при исходном значении ёмкости 1,72 пФ)			
Диапазон перестройки частоты генерации $f_{LO \min} \dots f_{LO \max}$ при перестройке значения ёмкости от $C_{\min}$ до $C_{\max}$			
Нелинейность перестройки частоты генерации $\delta f_{\text{пер}}$			
Уровень фазовых шумов при отстройке частоты на 10 кГц (вблизи несущей)	исходный PL_0		
	итоговый $PL_{\text{опт}}$		
Джиттер сигнала	исходный T_{j0}		
	итоговый $T_{j \text{ опт}}$		
Максимальное отклонение частоты генерации	исходное $\Delta f_{LO 0}$		
	итоговое $\Delta f_{LO \text{ опт}}$		
Оптимальное значение тока эмиттера $I_{э \text{ опт}}$			
Оптимальное значение напряжения база-эмиттер $U_{бэ \text{ опт}}$			

3.5. Контрольные вопросы

3.5.1. Поясните принцип работы автогенератора. Какие режимы автоколебаний выделяются?

3.5.2. Поясните условия возникновения автоколебаний. Каким образом их добиваются в схемах генератора?

3.5.3. Перечислите основные характеристики, определяемые для генераторов РЧ диапазона.

3.5.4. Перечислите и опишите основные методы анализа, используемые в данной лабораторной работе для исследования характеристик генератора.

3.5.5. Поясните назначение элементов принципиальных схемы исследуемого генератора.

3.5.6. Раскройте понятие фазового шума и механизм возникновения «дрожаний» периода сигнала (джиттера).

3.5.7. Охарактеризуйте виды шума и причины, которые приводят к возникновению фазовых шумов.

3.5.8. Предложите методы понижения уровня фазовых шумов генератора.

3.5.9. Поясните методику минимизации уровня фазовых шумов, которая применялась в данной лабораторной работе.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Оформление текстовых работ : учебно-методическое пособие для преподавателей и обучающихся всех форм обучения по всем направлениям и специальностям кафедры «Радиоэлектронные системы и технологии» / Севастопольский государственный университет ; сост. В. Г. Слёзкин. — Севастополь : Издательство СевГУ, 2024. — 29 с.
2. *Virtuoso SpectreRF Simulation Option User Guide / Cadence Design Systems Inc.* — San Jose (USA) : Cadence Design Systems, 2006. — 1600 p.
3. Дудкевич, С. *Load-pull* измерения на базе векторного анализатора цепей / С. Дудкевич // Компоненты и технологии. — 2013. — № 8. — С. 156—160.
4. Сипп, К. Смесители и модуляторы в высокоскоростных системах связи / К. Сипп. // Электронные компоненты. — 2011. — № 4. — С. 90—95.
5. Ченакин, А. Фазовые шумы в СВЧ-генераторах. Методы решения проблемы / А. Ченакин // Элементная база электроники. — 2011. — №4. — С. 52—61.
6. *LNA Design Using SpectreRF / Cadence Design Systems Inc.* — San Jose (USA) : Cadence Design Systems, 2007. — 77 p.
7. Лаврентьев, Б. Ф. Схемотехника электронных средств : учеб. пособие / Б. Ф. Лаврентьев. — М. : Академия, 2010. — 336 с.
8. Пряшников, В. А. Электроника : полный курс лекций : учеб. пособие / В. А. Пряшников. — СПб : Корона-Век, 2010. — 416 с.
9. Наундорф, У. Аналоговая электроника : основы, расчет, моделирование : пер. с нем. / У. Наундорф. — М. : Техносфера, 2008. — 472 с.

Приложение А**ОБРАЗЕЦ ОФОРМЛЕНИЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА
ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и интеллектуальных технических систем

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЁТ

по лабораторной работе №__

«_____»

по дисциплине

«Проектирование интегральных схем радиочастотного диапазона»

Выполнил: студент _____

Группа: _____

Отметка о защите: _____

Принял: _____

Севастополь

20__

Учебное издание

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ
РАДИОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

Учебно-методическое пособие

Составители: **Вертегел** Валерий Викторович,
Манько Александр Сергеевич

В авторской редакции

Изд. № 165/2024. Объем 4 п.л. Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,92.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»