

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

Институт микроприборов и систем управления имени Л.Н. Преснухина

Лабораторная работа №1

«Статические характеристики и цепи питания и смещения транзисторных усилителей»

**По курсу
«Моделирование приёмопередающих устройств в среде Keysight
Advanced Design System»**

Москва, Зеленоград

2023

Оглавление

Оглавление	2
Введение.....	2
Теоретические сведения	3
Методика выполнения работы.....	3
Подключение библиотек компонентов	3
Определение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.....	6
Схема расчета цепи питания и смещения.....	23
Проверочная схема питания и смещения.....	27
Анализ температурной зависимости цепей питания и смещения	31
Задание на выполнение.....	32
Требования к отчёту.....	33
Задание на самостоятельную работу	34
Контрольные вопросы	35
Литература	35



Введение

Цель работы: научиться моделировать усилительные устройства на биполярном транзисторе по постоянному току в среде Keysight Advanced Design System (ADS).

Используемое оборудование или ПО: Keysight Advanced Design System 2020

Продолжительность работы: 4 часа.

Предполагается, что студент практически не знаком с приемами работы в ADS. Подробно показаны базовые приемы работы в ADS.

	показывает места, за которыми надо особенно следить и где легко совершить ошибку
	показывает приемы, значительно упрощающие или ускоряющие использование ADS

Теоретические сведения

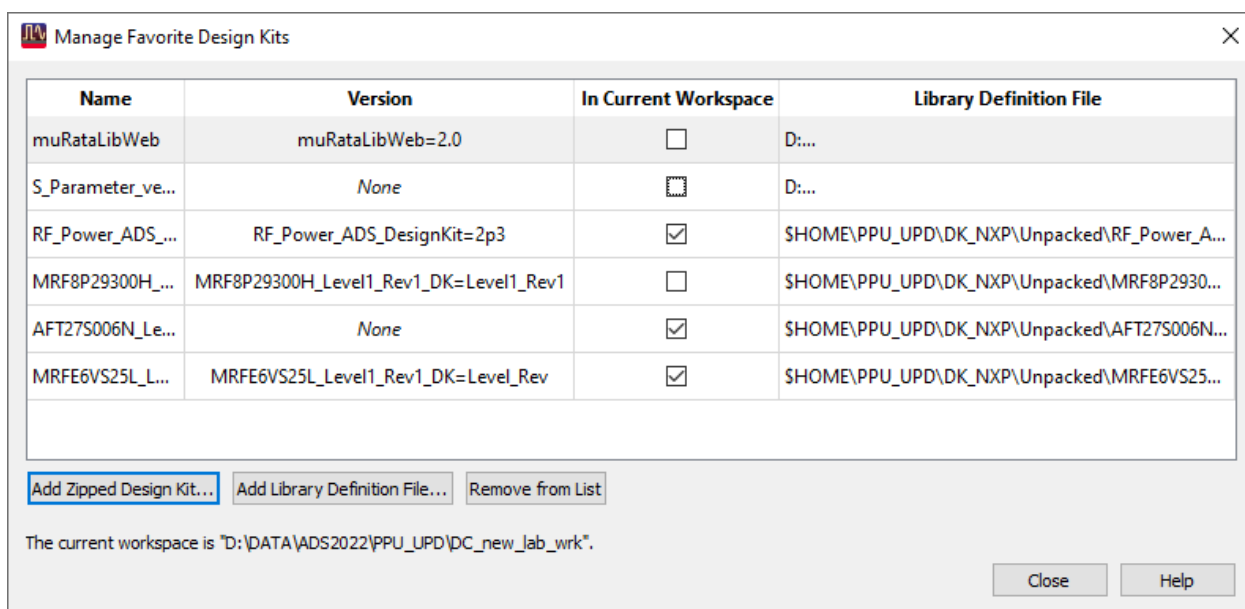
TODO

Методика выполнения работы

Подключение библиотек компонентов

В работе используются нелинейные модели транзисторов от Infineon [6].

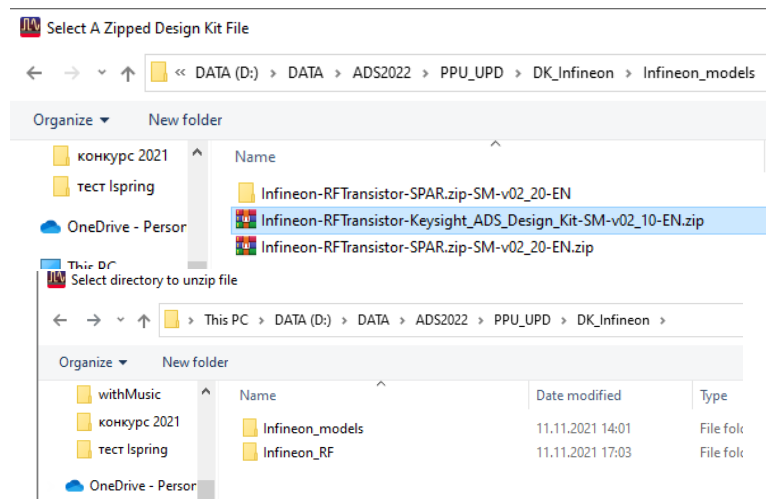
Библиотеки компонентов в ADS могут распространяться в нескольких видах. Принятым вариантом распространения библиотек дискретных компонентов от производителей (Vendor Libraries) являются библиотеки в виде Design Kits. Это особым образом сконфигурированные проекты в ADS. Для их подключения к текущему проекту служит окно, вызываемое из основного окна ADS по команде DesignKits – Manage Favorite Design Kits.



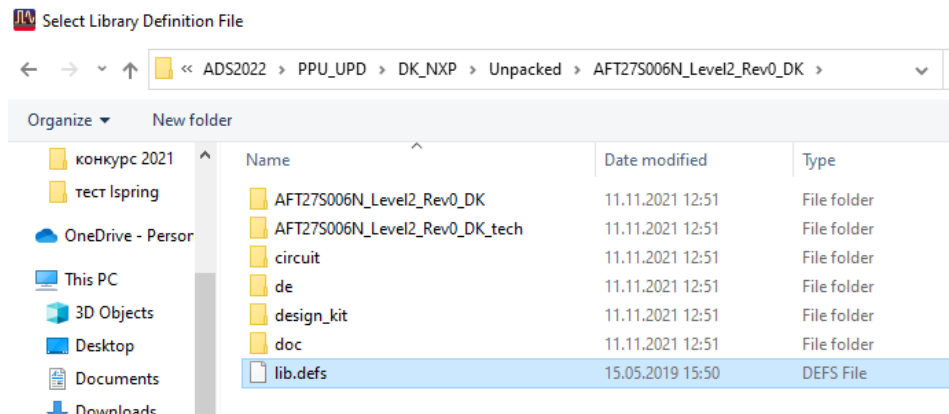
В данном окне отображаются все установленные на текущем рабочем месте библиотеки компонентов. Добавить библиотеку в текущий проект можно установив галку «In Current Workspace».

Установить библиотеку на рабочее место можно несколькими способами:

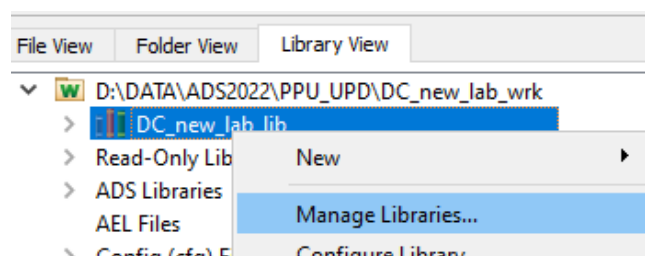
- От производителей библиотеки обычно поставляются в виде zip- или 7z-архивов. Для быстрой разархивации с загрузкой на рабочее место нужно запустить команду Add Zipped Design Kit; далее указать архив библиотеки компонентов и место для разархивирования; дать название библиотеки в списке; при открытом проекте можно сразу подключить библиотеку к текущему проекту.

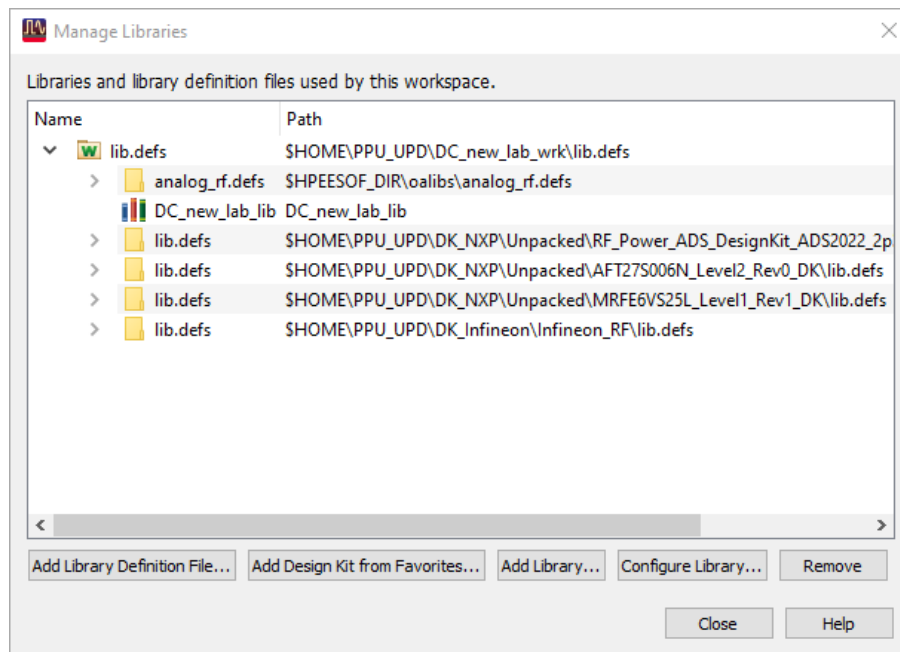


- Если библиотека разархивирована, то по кнопке Add Library Definition File нужно в папке с разархивированной библиотеки указать файл «lib.defs»; дать название библиотеки в списке; при открытом проекте можно сразу подключить библиотеку к текущему проекту.

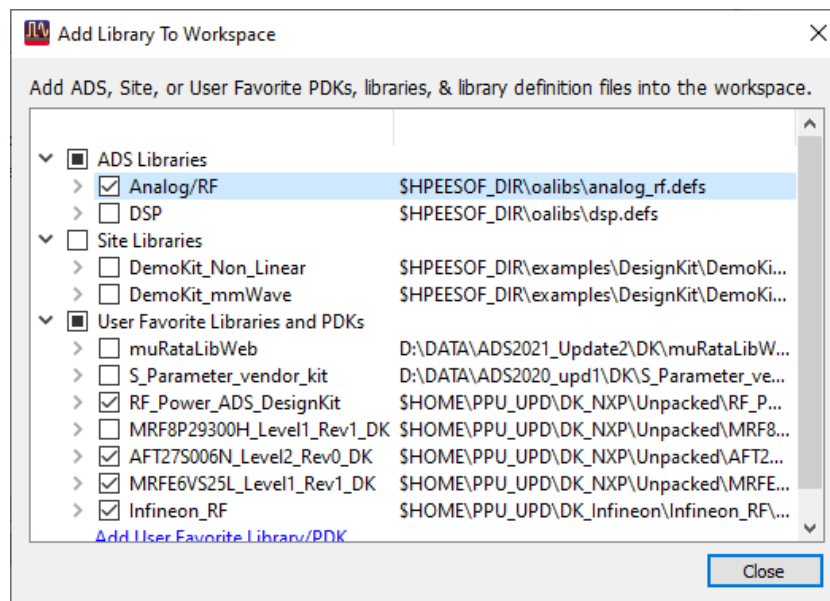


Также есть окно для более полного контроля за содержанием библиотек текущего проекта. Запускается оно из основного окна ADS по команде DesignKits – Manage Libraries или из основного окна ADS при отображении проекта в виде Library View по корневой библиотеке проекта ПКМ – Manage Libraries.







В этом окне по кнопке Add Design Kit from Favorites можно подключать библиотеки из списка установленных на рабочем месте, а также управлять подключением встроенных системных библиотек (Analog/RF и DSP) без переконфигурации маршрута проектирования на рабочем месте.

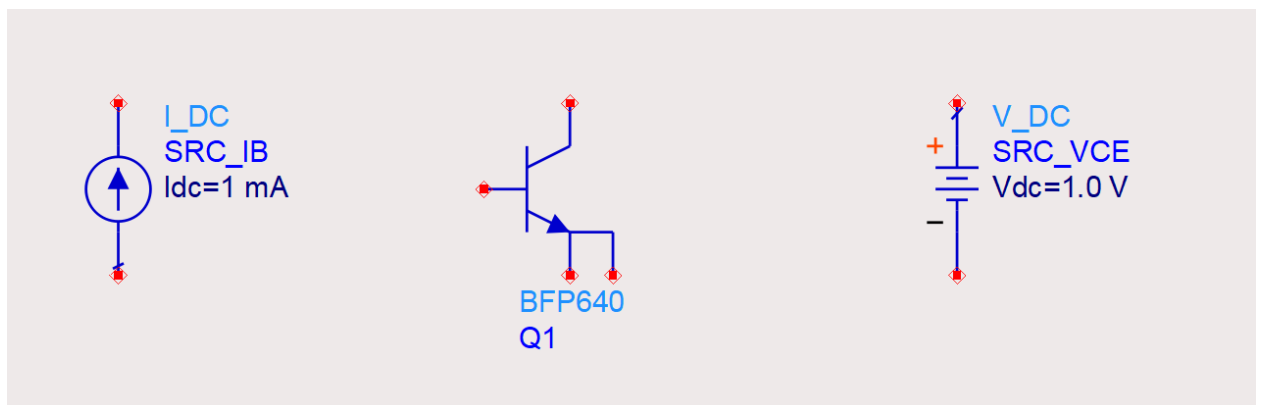




Определение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

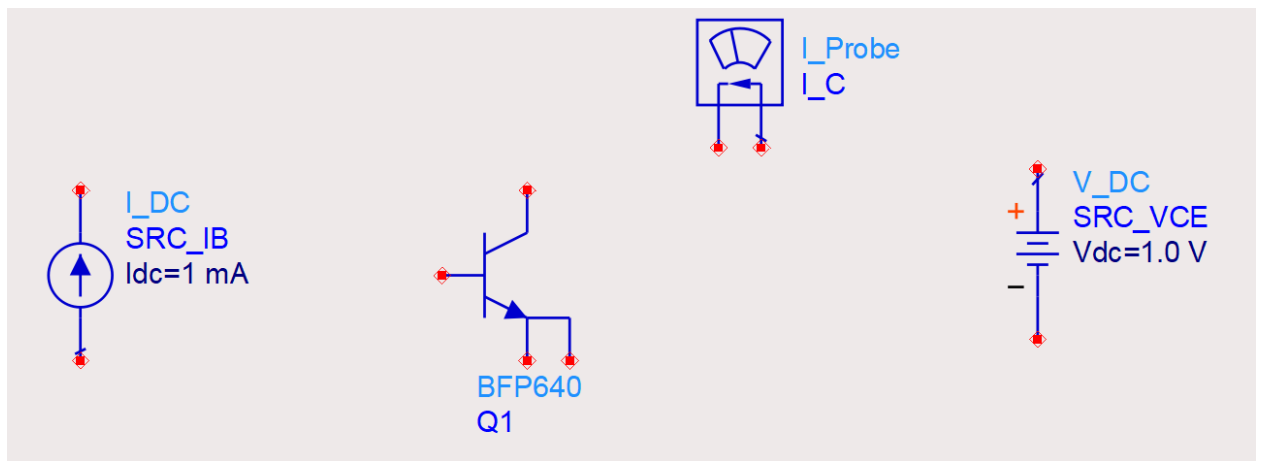
Создадим схему для получения статических характеристик используемого транзистора (BFP640). Пусть схема называется DC_Curves. Статические характеристики биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером обычно снимаются как семейство зависимостей выходного коллекторного тока от напряжения коллектор-эмиттер при различных токах базы.

По документации [7] у данного транзистора разумный диапазон напряжений V_{ce} до 5 В. Чтобы график был плавный, пусть шаг будет порядка 0,01 В. Ток базы I_b в документации обычно не указывается, но есть данные по току коллектора I_c , который связан с током базы через коэффициент усиления по постоянному току порядка 150 (β , H_{fe}). Т.е. разумный предел тока базы порядка 250 мкА. Шаг тока базы пусть будет порядка 25 мкА.

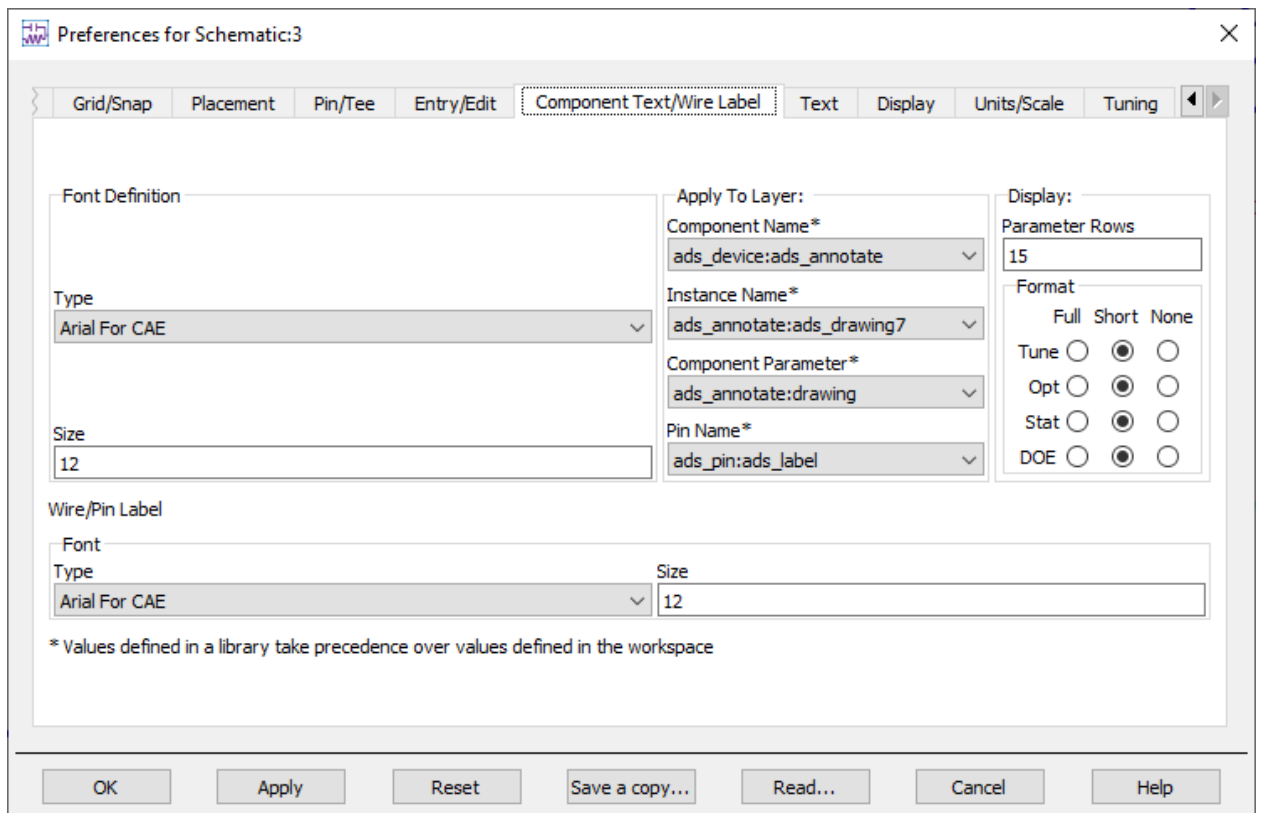
Разместим используемый транзистор BFP640. Напряжение коллектор-эмиттер будет создавать источник постоянного напряжения V_{DC} , а ток базы источник постоянного тока I_{DC} . Оба компонента расположены в палитре Sources-Time Domain. Обозначим источник постоянного напряжения как SRC_VCE, а источник постоянного тока базы SRC_IB (изменив им позиционное обозначение).



Для измерения тока коллектора установим пробник тока I_{Probe}  (палитра Probe Components). Обозначим его I_C . Также, т.к. для NPN-транзисторов ток коллектора втекает, то отзеркалим его слева направо по команде Edit – Mirror About Y  (или ПКМ - Mirror About Y, или SHIFT+Y).

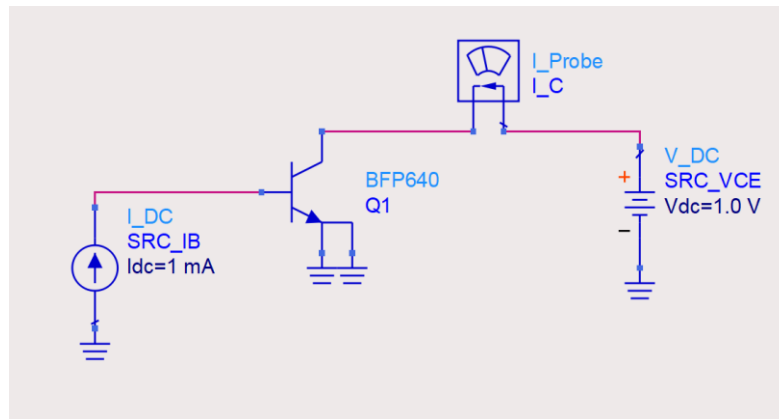



В ADS использован не самый удачный шрифт по умолчанию (Arial For CAE). В нем графически плохо различимы I и l, 0 и O, одинаковые по начертанию русские и английские символы и пр. В настройках Options – Preferences на вкладках Component Text/Wire Label и Text можно для схем настроить более удачный шрифт. Отдельно это можно сделать для редактора символа и топологии.



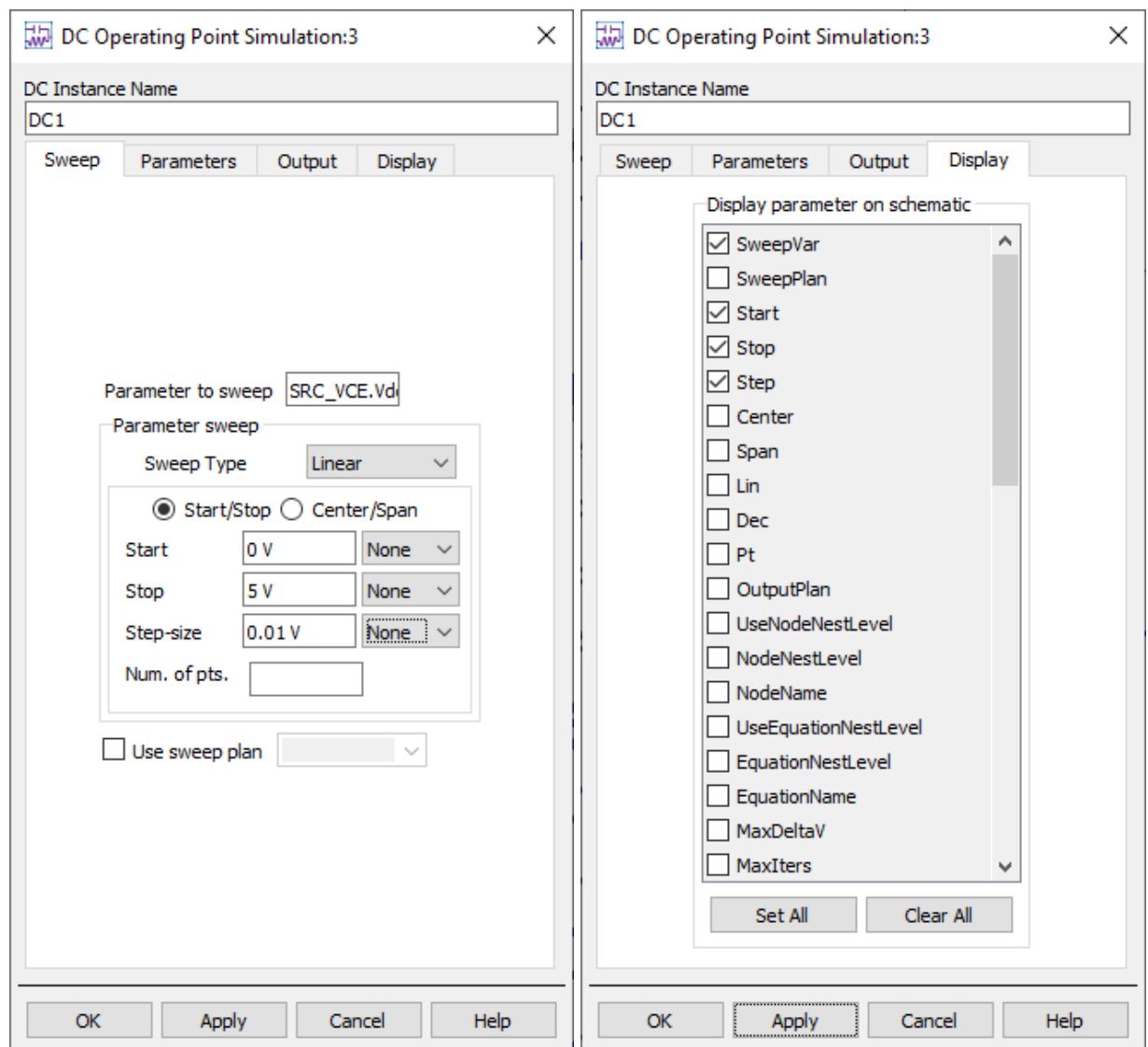
Соединим цепи как показано на рисунке и заземлим источники и эмиттеры транзистора. Земляной контакт ставится по команде Insert – Ground





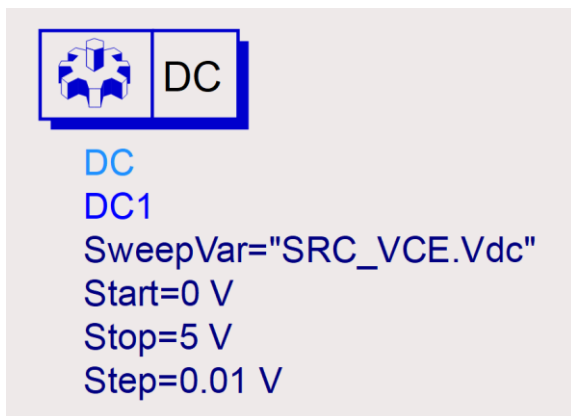
В ADS нужно в схему добавлять контроллер выбранного вида симуляции. Для режима симуляции по постоянному току используется контроллер DC . Находится он в палитре Simulation-DC.


У контроллеров симуляции параметров обычно очень много и для отображения на схему по умолчанию вынесены только самые типовые. При редактировании параметров внутри они сгруппированы по вкладкам.





В контроллере DC1 нам нужно указать, что мы хотим свипать напряжение коллектор-эмиттер. Для этого на вкладке Sweep в поле Parameter to sweep указываем название переменной SRC_VCE.Vdc, тип свипа Linear, сетка в режиме Start/Stop от 0 В до 5 В с шагом 0,01 В.


На вкладке Display определяется, какие параметры контроллера симуляции будут отображены на схеме.

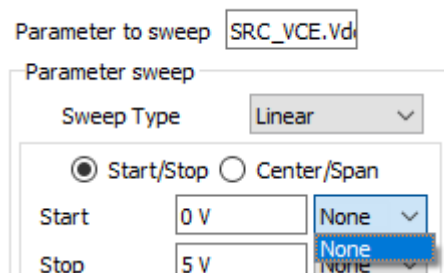


! При указании переменной для свипа можно использовать как отдельную переменную в схеме (заданную через блок типа VAR , будет показано позднее), либо напрямую обращаясь к свойству компонента через синтаксис *ИмяКомпонента.ИмяПеременной*.


 При внесении строк в переменные (а имя переменной для свипа – это строка) находясь внутри контроллера симуляции – строка указывается без кавычек. А при редактировании на схеме – оборачивается в двойные кавычки.

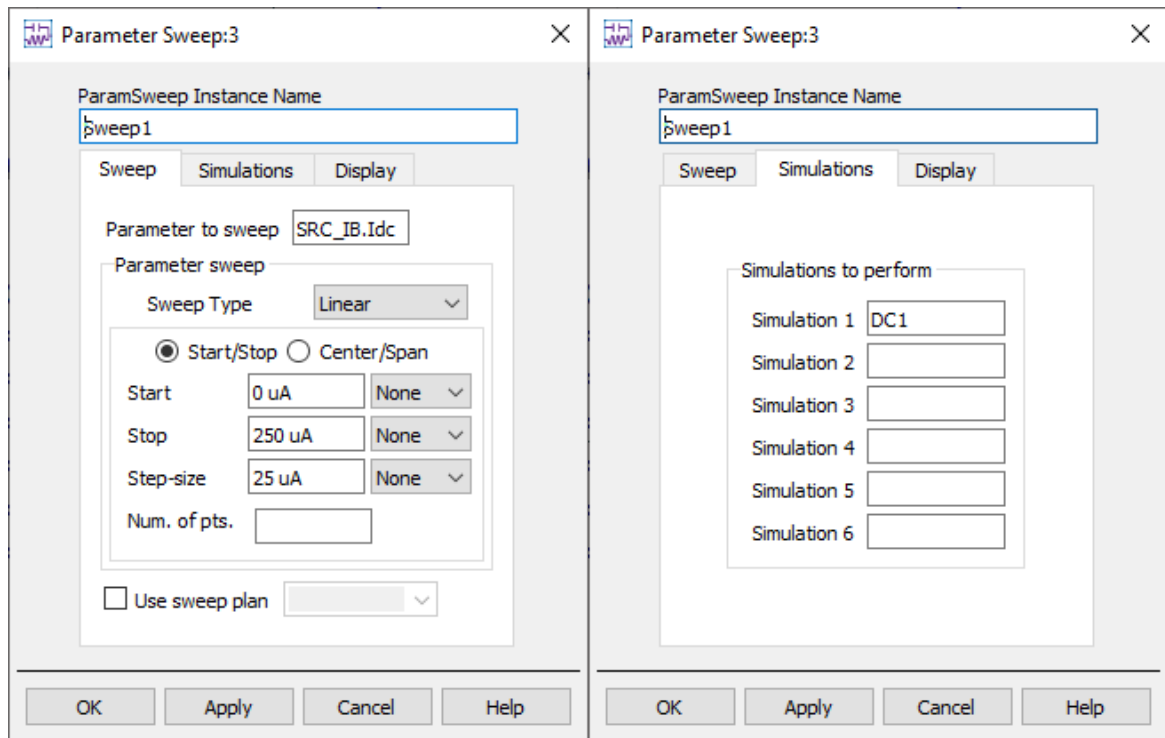
Parameter to sweep SRC_VCE.Vdc  DC1
SweepVar="SRC_VCE.Vdc"

 Контроллер не знает тип переменной «SRC_VCE.Vdc», поэтому не предлагает в выпадающем списке единицу со множителем. Поэтому ее нужно указывать в основном поле через пробел от цифр.



Текущая схема будет выдавать одномерные результаты, т.к. задана только одна независимая переменная SRC_VCE.Vdc. Для получения

семейства зависимостей от тока базы нужно поверх наложить еще один свип по току базы SRC_IB.Idc. Для этого используется второй контроллер симуляции ParamSweep . Просвипаем в диапазоне от 0 мкА до 250 мкА с шагом 25 мкА. Также контроллеру ParamSweep на вкладке Simulations нужно указывать, поверх какой базовой симуляции он проводится (DC1). Такой подход позволяет получать сложносоставные многомерные результаты.



При использовании некоторых библиотек компонентов в схему также должен быть установлен компонент типа Neltist Include. Он обычно находится первым в основной палитре библиотеки компонентов. Для библиотеки Infineon это компонент Infineon_Include_RF.

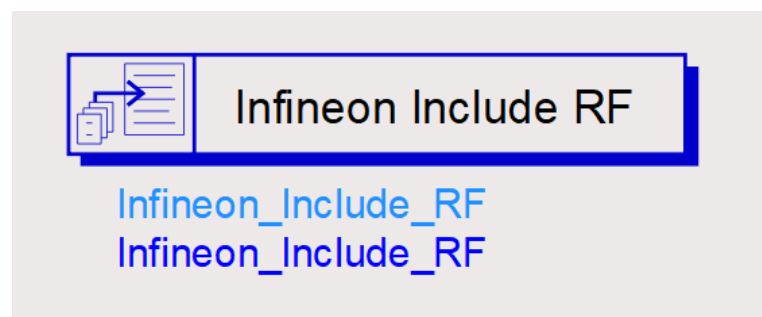
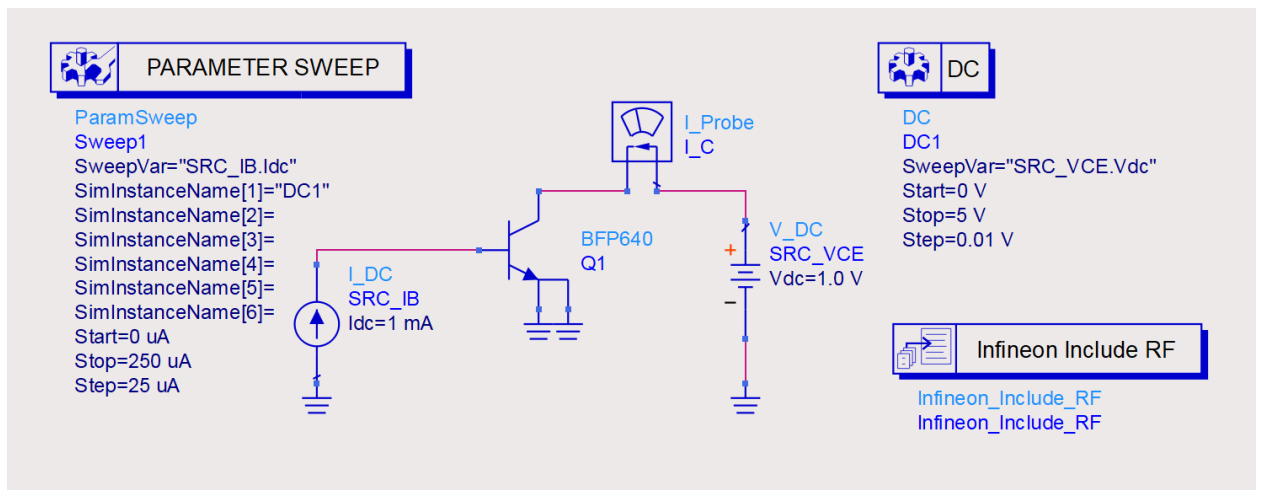

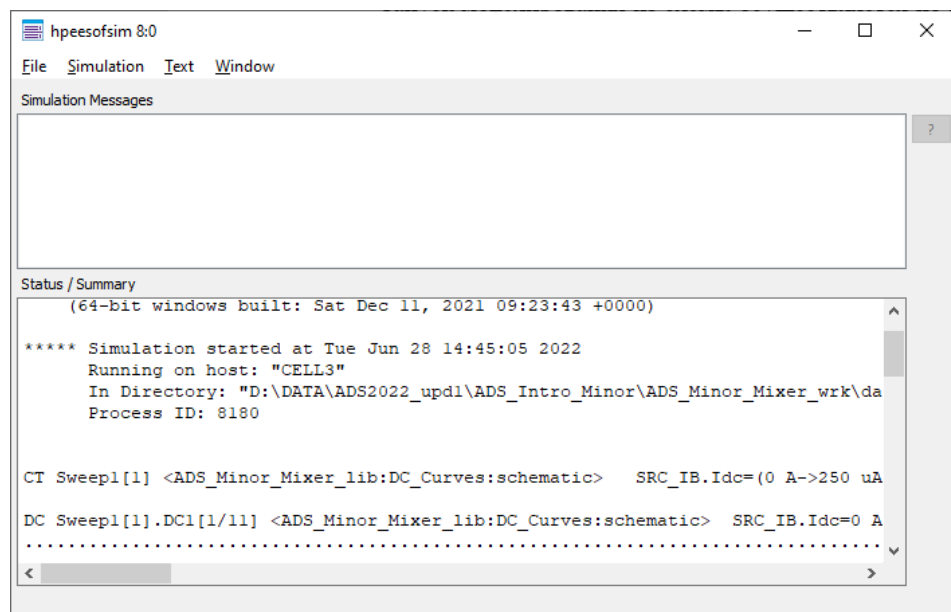


Схема для моделирования собрана. В общем виде она должна выглядеть следующим образом.



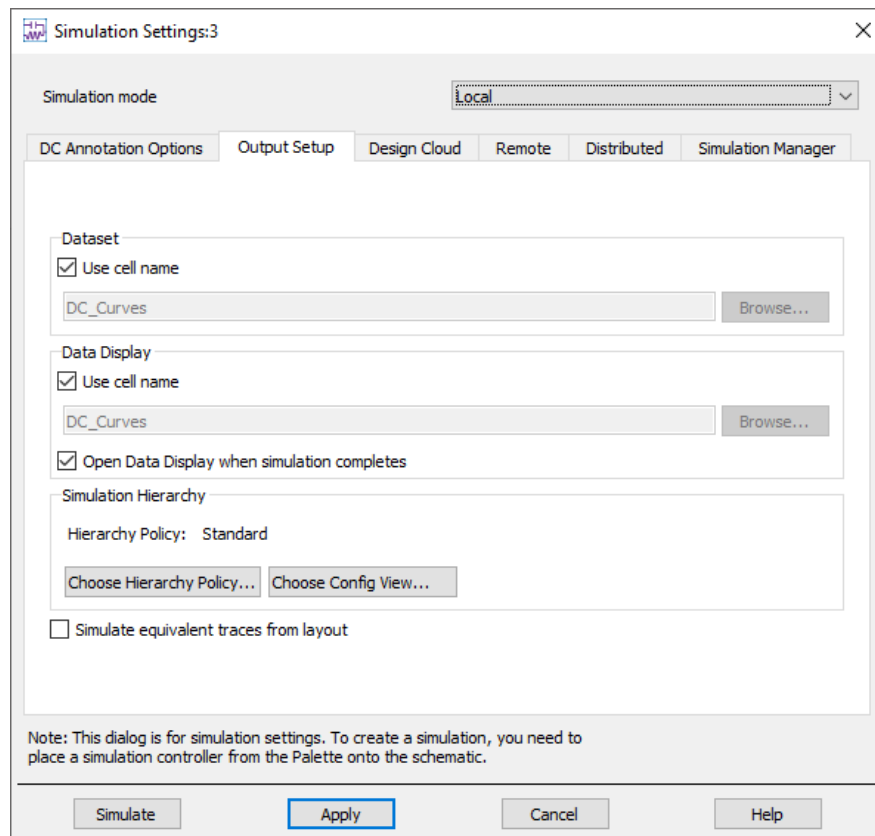
Запуск моделирования из схемы осуществляется по команде Simulate – Simulate  (клавиша «F7»).

Во время симуляции открывается окно логгера симуляций hpeesofsim. В него вводится текущий лог симуляции, а также вся необходимая информация при наличии предупреждений и ошибок.

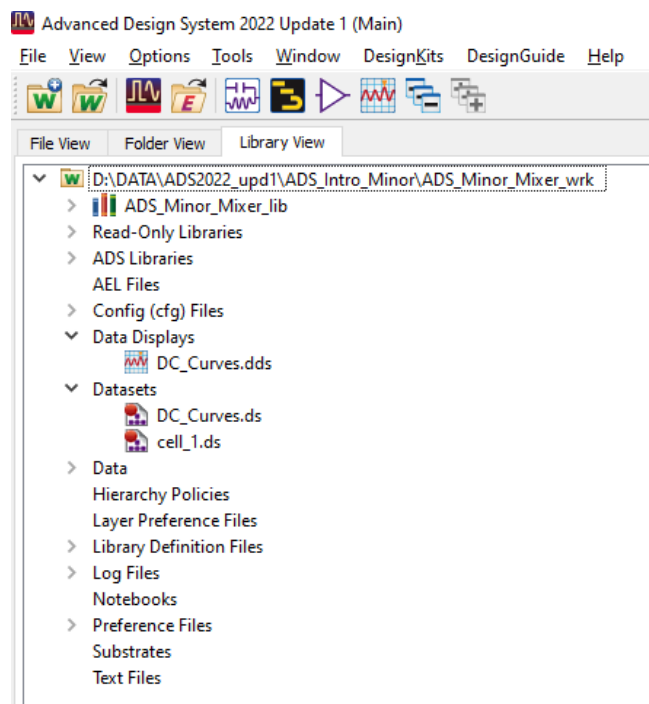


В ADS при настройках симуляции умолчанию контроллер симуляции после расчета создает результат расчета (датасет, файл с расширением *.ds) и автоматически открывается окно графиков (файл с расширением *.dds) с привязанным базовым датасетом. Все они по умолчанию имеют одинаковое имя, по имени ячейки.

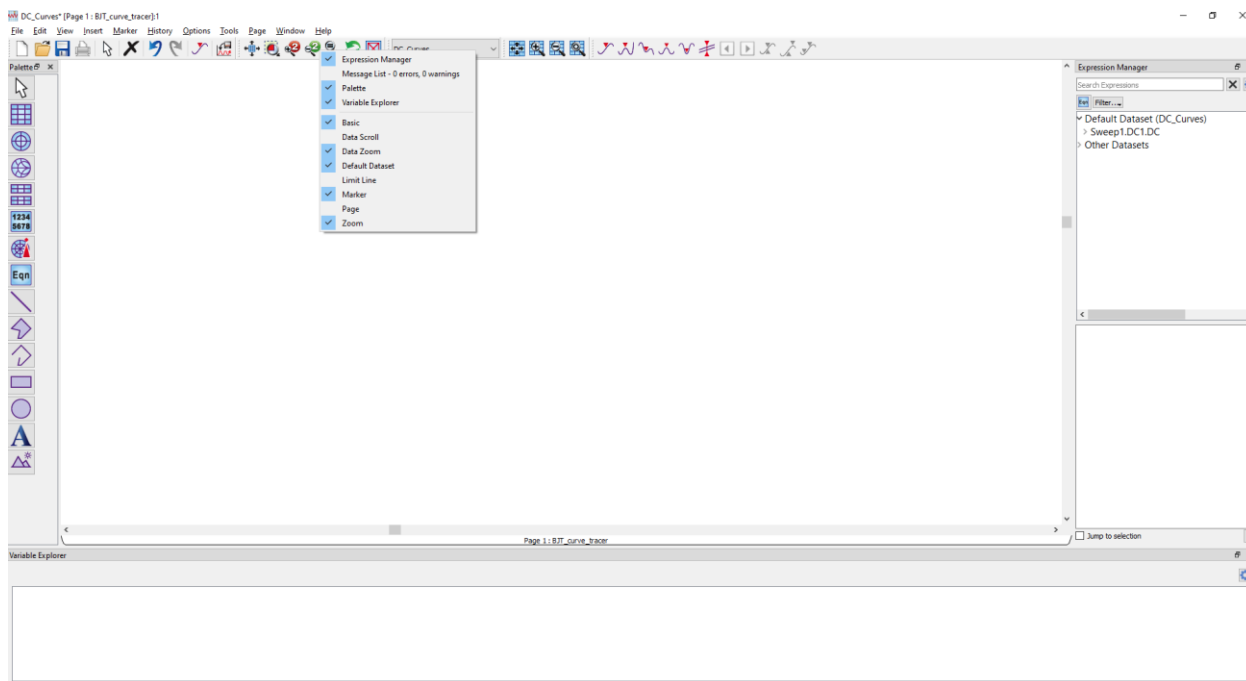
Можно настроить так, чтобы схема писала результаты в разные датасеты. В какой датасет будет писаться результат расчета и будет ли автоматом создано окно графиков, определяется настройками Simulate – Simulation Setting на вкладке Output Setup.



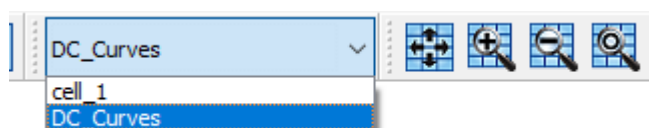
Все созданные в текущем проекте датасеты и окна графиков можно увидеть в основном окне ADS в режиме отображения Library View в списках Datasets и Data Displays. Физически файлы датасеты хранятся в подпапке \data. Файлы окон графиков в корневой папке проекта _wrk.




Так же, как и у окна редактора схем, внешний вид (включенные тулбары и боковые панели) определяются по ПКМ по области тулбаров.



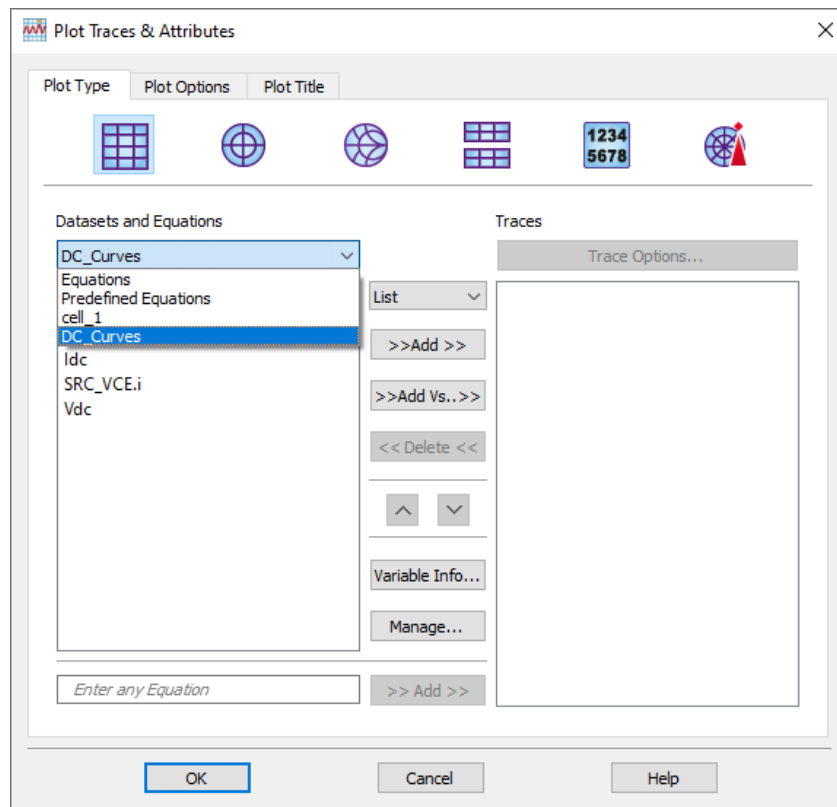
Привязанный к области графиков датасет выбирается в выпадающем списке в тулбаре Default Dataset.



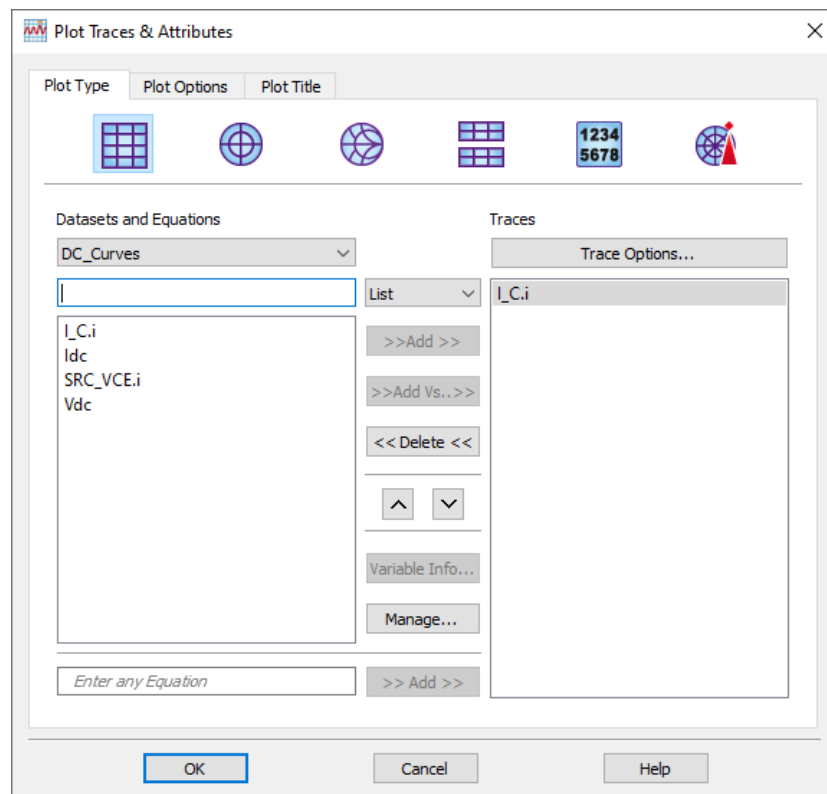
Создадим прямоугольное полотно для семейства графиков статических характеристик. Полотно графика создается из боковой панели Palette. Для

прямоугольного полотна это .

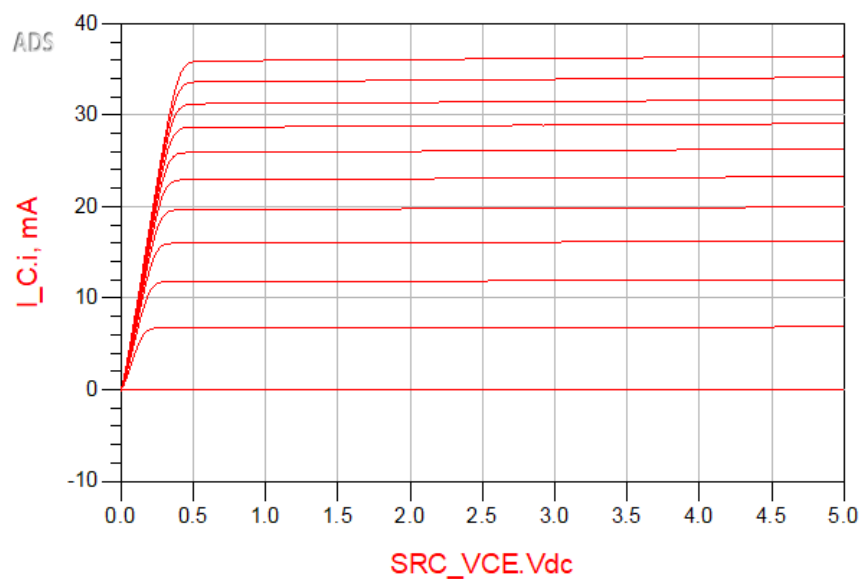
После размещения полотна графика, откроется окно Plot Traces & Attributes, где будет предложен выбор данных для отображения на полотне. В верхней части под выбором типа полотна графика есть выпадающий список «Datasets and Equations». Он позволяет на одно полотно выводить графики из разных датасетов. По умолчанию, в этом списке выведен датасет, привязанный к схеме.



Для переноса результата на полотно графика нужно выбрать результат «I_C.i» нажать кнопку «>>Add>>» (или ДЛКМ по результату). В правой части в списке «Traces» появится выражение «I_C.i».

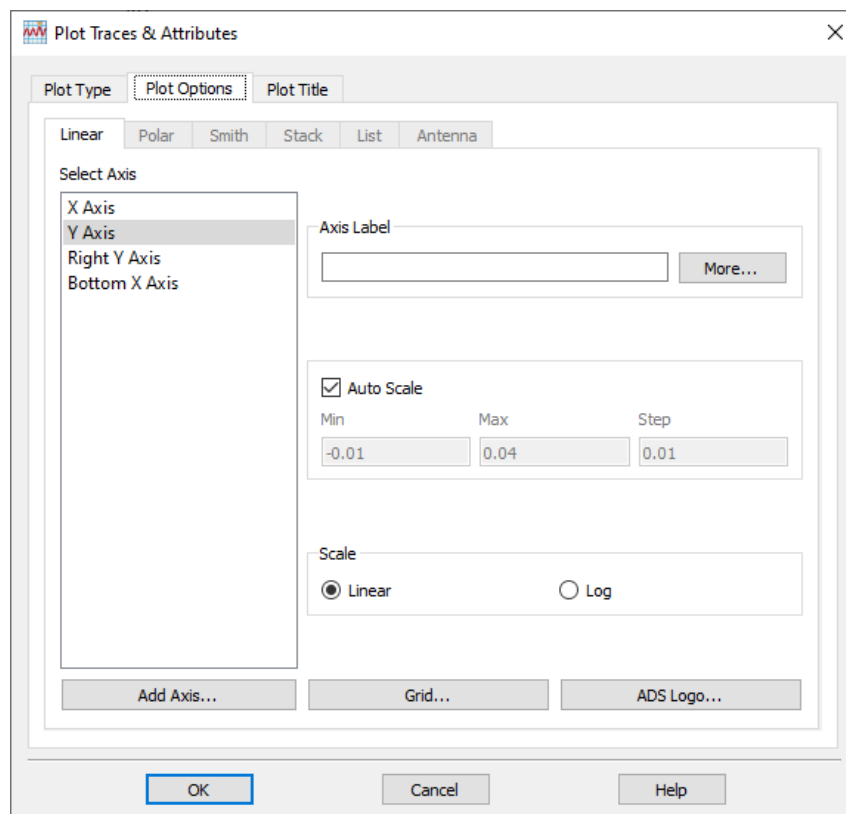


После нажатия на «ОК» появился прямоугольное полотно графиков.



Дополнительно можно настроить стиль отображения как всего полотна, так и отдельных графиков на нем. Вход в настройки полотна осуществляется по команде в свободной части полотна графика ПКМ – Item Options (или ДЛКМ).

При переходе на вкладки Plot Options можно управлять осями на графике (диапазон, шаг, логарифмический или линейный масштаб, подписи осей, числовой формат осей, добавить правую или верхнюю дополнительную ось и пр.).



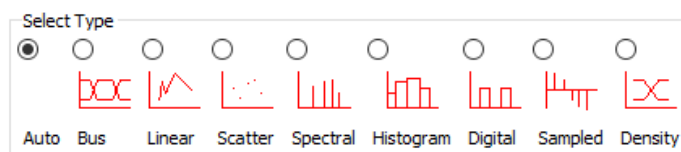
На вкладке Plot Title можно задать подпись всему графику.

На вкладке Plot Type можно нажатием на стиль полотна в заголовке сконвертировать график в полярный, диаграмму Смита, таблицу и пр.



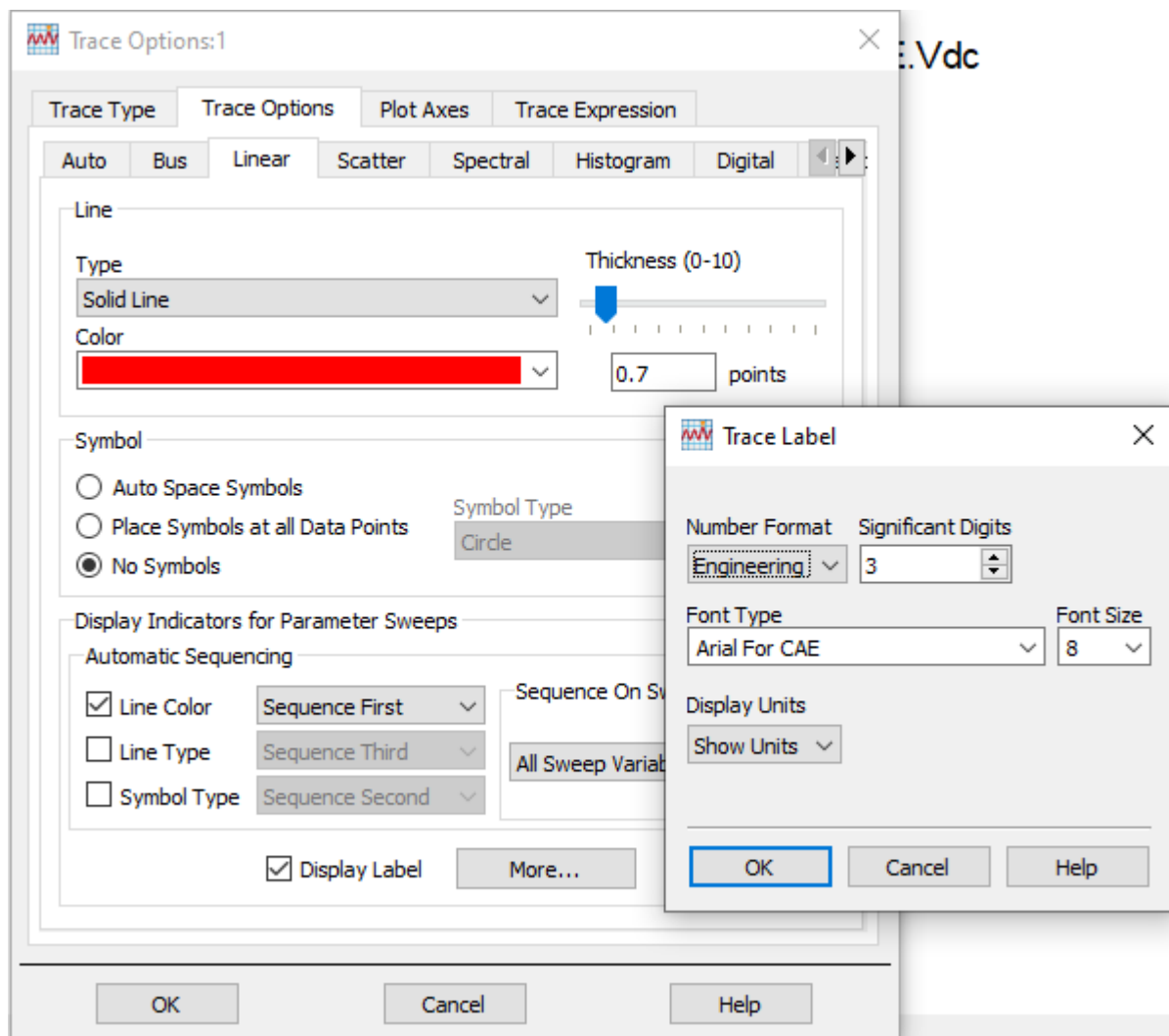
Настройки отдельных графиков осуществляются по кнопке Trace Options при выбранном графике в списке Traces (или ДЛКМ по выражению в или ДЛКМ точно по линии или заголовку графика в полотне графиков).

Графикам в зависимости от стиля полотна можно назначать допустимые виды (линии, точки, спектральный, гистограмма и пр.). Определяется на вкладке Trace Type.

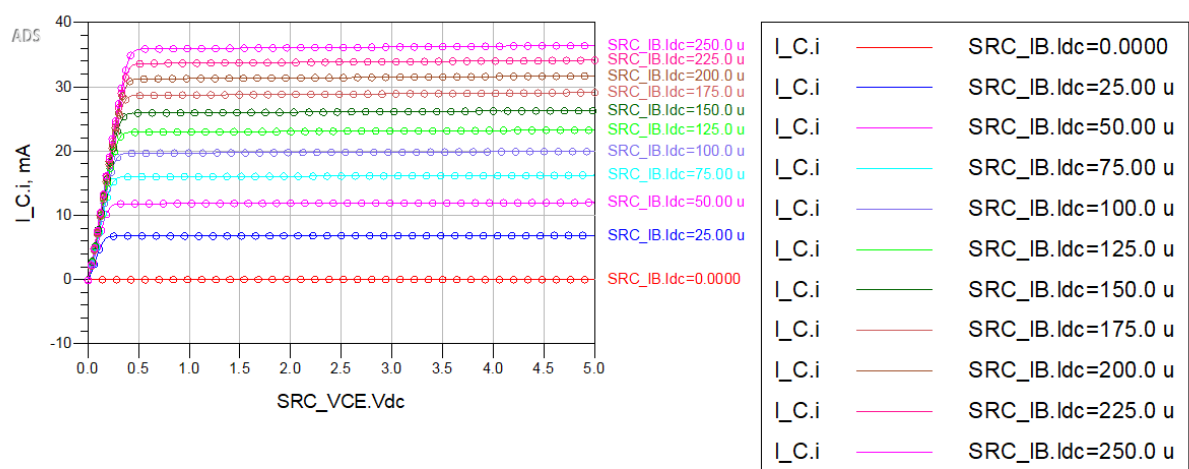


На вкладке Trace Options идут управление выбранным стилем графика (толщина и стиль линии, метки, дополнительная цветовая индикация для многомерных результатов и пр.).

Например, поставим непрерывную линию Solid Line толщиной 0,7px1, стиль промежуточных меток Circle. Для различения графиков на семействе включим галку Display Label и галку Line Color, также по кнопке More установим числам инженерный формат отображения (относительно базовых множителей u, m, G и пр.).

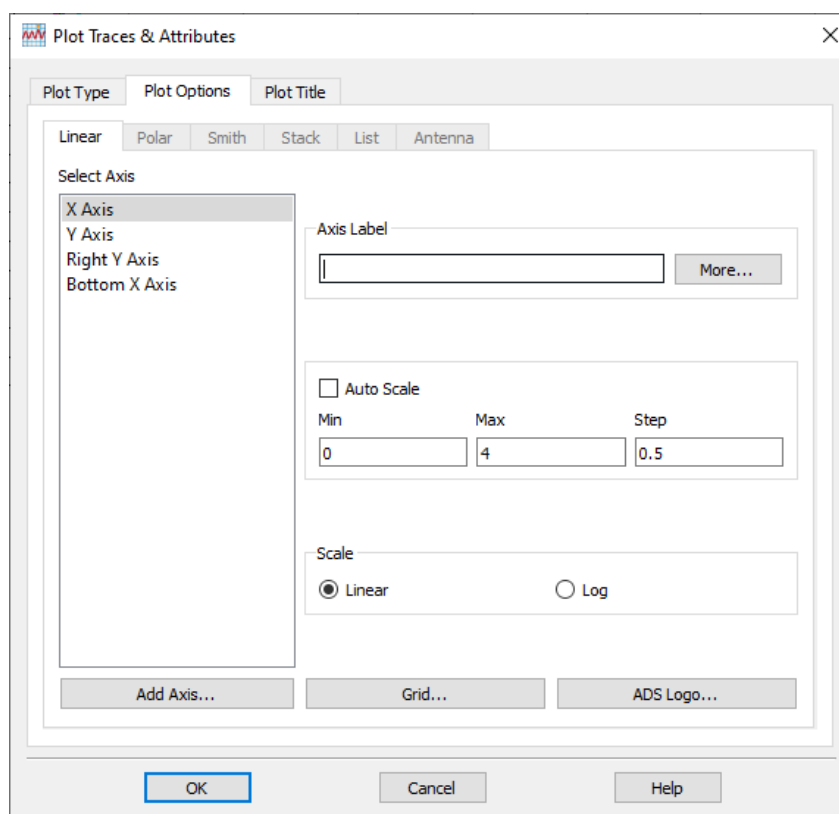


Для отображения легенды в отдельном окне нужно в свободном месте полотна ПКМ – Insert Legend. У этого окна также есть настройки численных форматов.

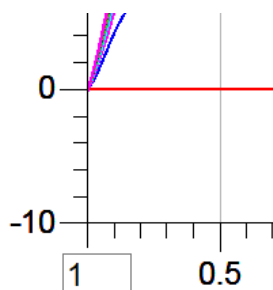


Управлять диапазонами осей можно несколькими путями:

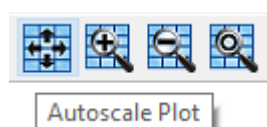
1. В настройках полотна на вкладке Plot Options, выбрав нужную ось в списке Select Axes и выставив диапазон и шаг (сняв галку Auto Scale).



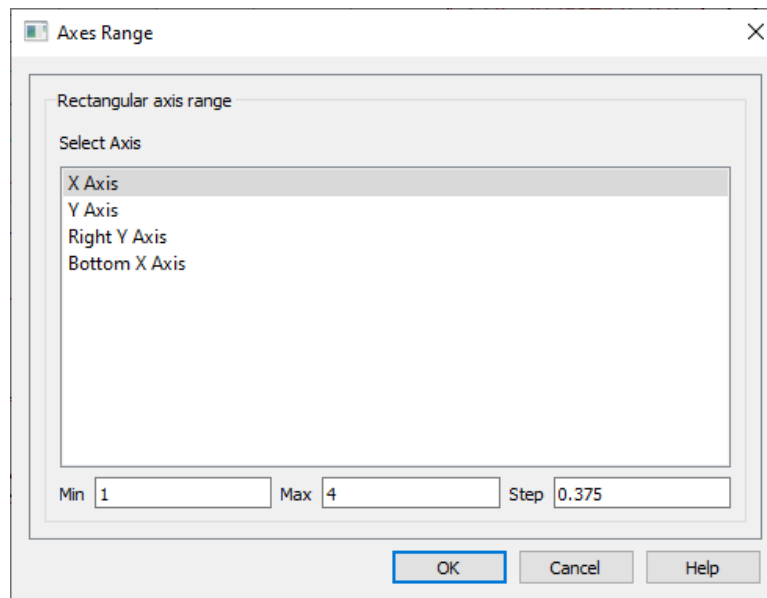
2. На уровне окна графика (щелкнув по крайним значениям X- и Y-диапазонов и введя нужное число).




3. С помощью команд меню View – Zoom Data. Они же расположены в тулбаре Data Zoom.

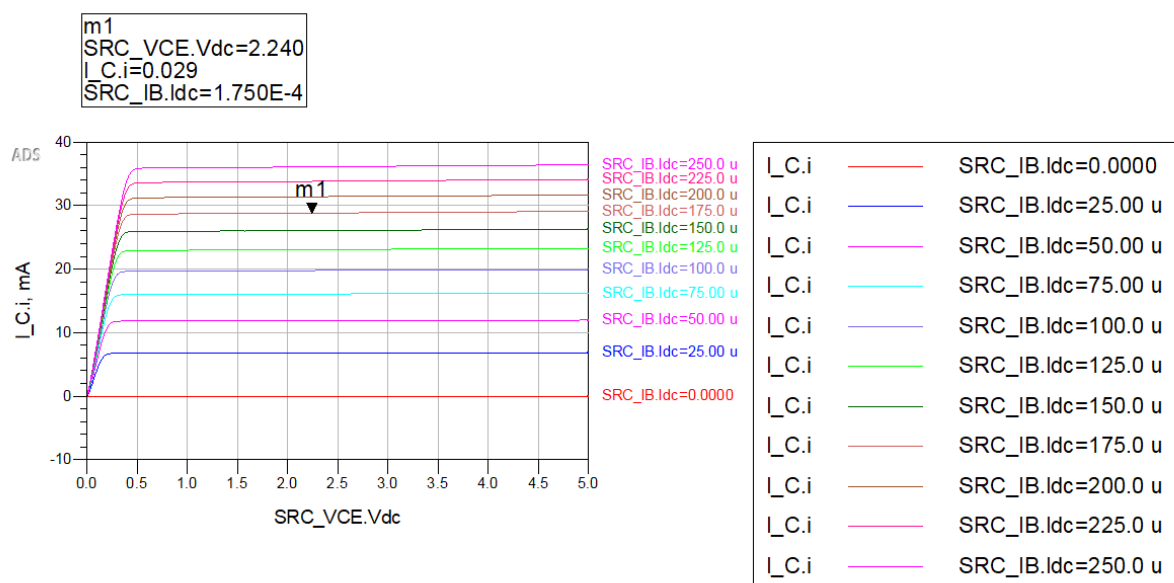



4. В свободном месте полотна ПКМ – Axes – Range



Для чтения данных с графика используются маркеры. Маркеры ставятся по команде Marker – New (Ctrl+M) или по команде Insert A New Marker  из тулбара Marker.

При установке маркера ему автоматически присваивается имя вида **m+номер** и добавляется поле с описанием этого маркера.

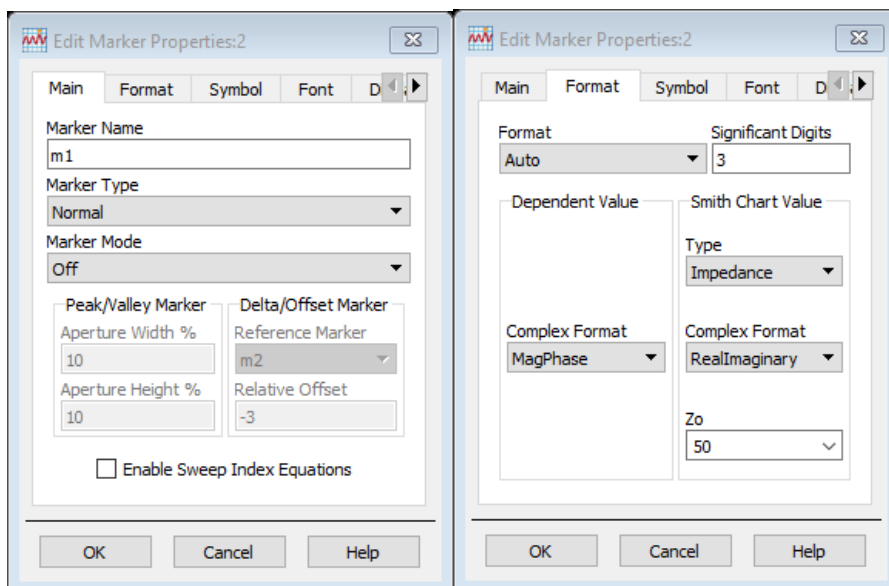


Маркер можно двигать как мышкой, так и по клавишам «Влево/Вправо», а также по командам  из тулбара Marker. Маркер двигается только по точкам, существующим в датасете (пропуская промежуточные интерполированные для непрерывного отображения участки).


Если нужно поставить маркер в точное положение по независимой переменной (ось X в прямоугольных графиках), то можно вручную ввести желаемое положение.

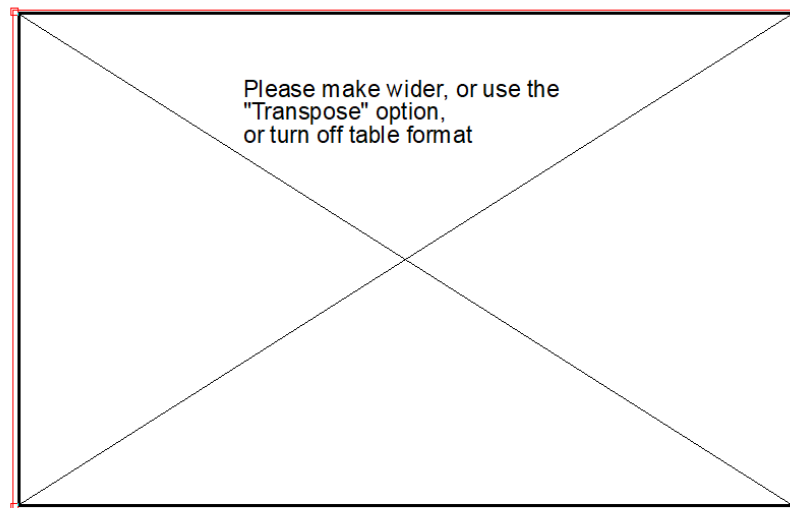
```
m1
SRC_VCE.Vdc: 2.310
I_C.i=0.029
SRC_IB.Idc=1.750E-4
```

Для настроек формата отображения можно по ДЛКМ зайти в свойства маркера. На вкладке Main можно изменить имя маркера, изменить тип (минимум, максимум, офсет и т.д.).

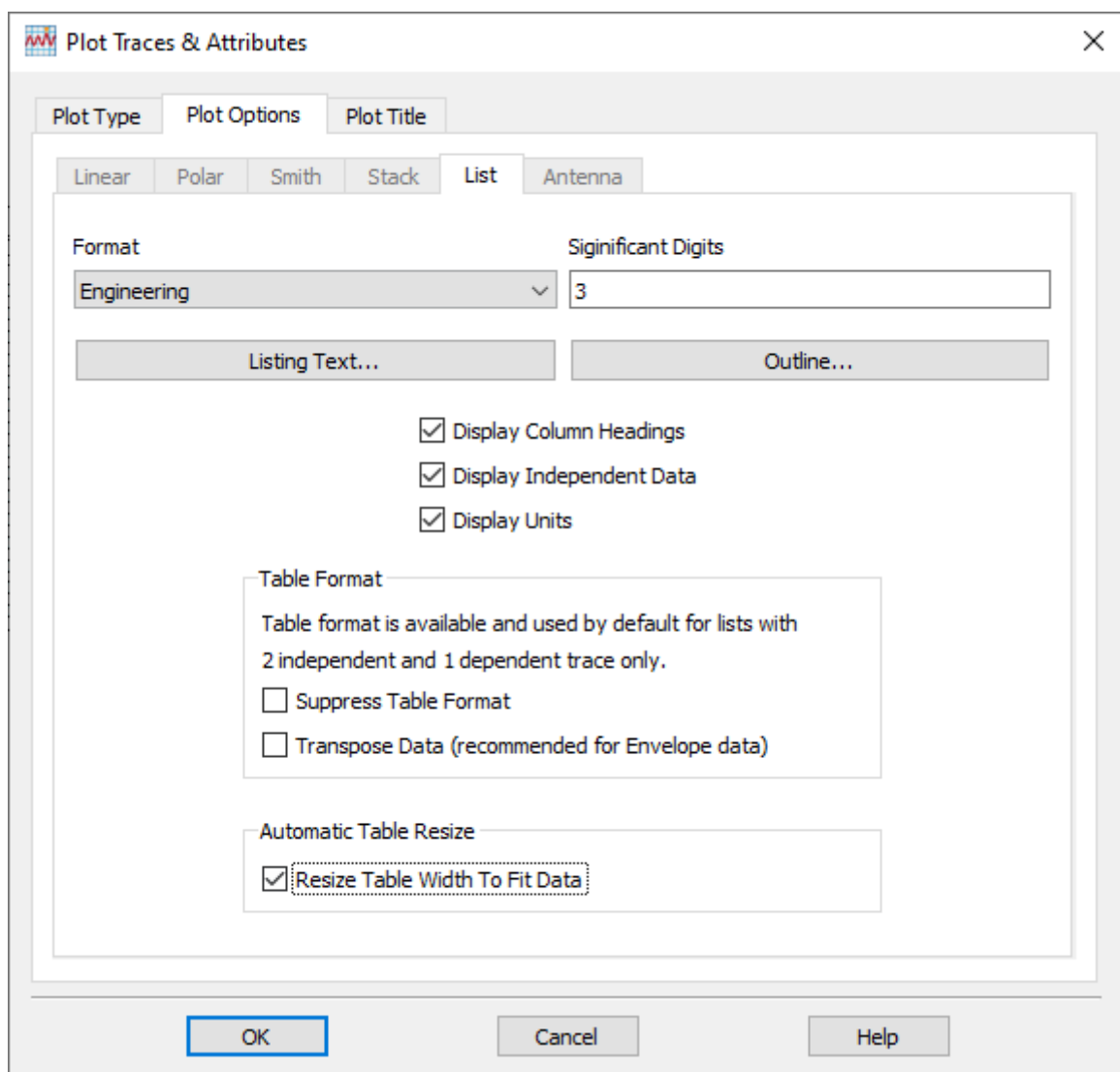


На вкладке Format определяется формат отображения чисел (число знаков после запятой, стиль отображения мантиссы и пр.), в том числе комплексных чисел (амплитуда/фаза в градусах, амплитуда/фаза в радианах, действительная/мнимая часть и пр.) и связанных данных на диаграмме Смита.

Данные можно выводить и в формате таблиц . В случае, если данные не помещаются в таблицу по ширине, то можно либо значительно ее расширить, либо изменить режим отображения.



Например, результат I_C.i не помещается по ширине (по размерности независимой переменной SRC_IB.Idc). Для автоматической установки ширины свойствах таблицы на вкладке Plot Options – List можно поставить галку Resize Table Width To Fit Data.



SRC_VCE.Vdc	I_C.i										
	SRC_IB.Idc=0.0000	SRC_IB.Idc=25.00 u	SRC_IB.Idc=50.00 u	SRC_IB.Idc=75.00 u	SRC_IB.Idc=100.0 u	SRC_IB.Idc=125.0 u	SRC_IB.Idc=150.0 u	SRC_IB.Idc=175.0 u	SRC_IB.Idc=200.0 u	SRC_IB.Idc=225.0 u	SRC_IB.Idc=250.0 u
0.0000	0.0000 A	-16.78 uA	-29.43 uA	-40.24 uA	-49.95 uA	-58.89 uA	-67.25 uA	-75.15 uA	-82.69 uA	-89.91 uA	-96.87 uA
10.00 m	18.64 fA	298.8 uA	419.9 uA	491.4 uA	538.7 uA	575.0 uA	601.9 uA	623.2 uA	640.4 uA	654.4 uA	665.1 uA
20.00 m	36.50 fA	655.9 uA	913.4 uA	1.056 mA	1.170 mA	1.247 mA	1.307 mA	1.356 mA	1.396 mA	1.430 mA	1.459 mA
30.00 m	53.85 fA	1.050 mA	1.448 mA	1.678 mA	1.836 mA	1.953 mA	2.045 mA	2.119 mA	2.181 mA	2.233 mA	2.278 mA
40.00 m	70.89 fA	1.476 mA	2.012 mA	2.322 mA	2.532 mA	2.688 mA	2.810 mA	2.908 mA	2.990 mA	3.060 mA	3.121 mA
50.00 m	87.75 fA	1.925 mA	2.595 mA	2.994 mA	3.255 mA	3.448 mA	3.589 mA	3.721 mA	3.822 mA	3.909 mA	3.983 mA
60.00 m	104.5 fA	2.391 mA	3.221 mA	3.688 mA	4.000 mA	4.230 mA	4.408 mA	4.553 mA	4.673 mA	4.775 mA	4.864 mA
70.00 m	121.3 fA	2.865 mA	3.853 mA	4.400 mA	4.763 mA	5.029 mA	5.235 mA	5.402 mA	5.540 mA	5.658 mA	5.760 mA
80.00 m	138.2 fA	3.338 mA	4.494 mA	5.125 mA	5.540 mA	5.840 mA	6.077 mA	6.285 mA	6.421 mA	6.554 mA	6.669 mA
90.00 m	155.1 fA	3.802 mA	5.139 mA	5.859 mA	6.329 mA	6.669 mA	6.930 mA	7.140 mA	7.315 mA	7.462 mA	7.590 mA
100.00 m	172.1 fA	4.249 mA	5.784 mA	6.599 mA	7.125 mA	7.503 mA	7.783 mA	8.025 mA	8.218 mA	8.380 mA	8.520 mA
110.0 m	189.4 fA	4.670 mA	6.421 mA	7.335 mA	7.935 mA	8.345 mA	8.594 mA	8.795 mA	8.958 mA	9.100 mA	9.260 mA
120.0 m	206.8 fA	5.058 mA	7.049 mA	8.077 mA	8.729 mA	9.190 mA	9.540 mA	9.819 mA	10.05 mA	10.24 mA	10.41 mA
130.0 m	224.5 fA	5.405 mA	7.652 mA	8.808 mA	9.530 mA	10.04 mA	10.42 mA	10.72 mA	10.97 mA	11.18 mA	11.36 mA
140.0 m	242.4 fA	5.707 mA	8.233 mA	9.528 mA	10.33 mA	10.88 mA	11.30 mA	11.63 mA	11.90 mA	12.12 mA	12.31 mA

В случае, если отображение результата в двумерном формате не очень нужно, а лучше видеть рядом несколько результатов для одной точки по независимым переменным, то более удобным становится формат отображения Suppress Table Format. Тогда данные показываются относительно первой независимой переменной (SRC_CE.Vdc в текущем случае), а значения второй и последующих независимых переменных становятся подзаголовками.

SRC_VCE.Vdc	I_C.i
SRC_IB.Idc=0.0000	
0.0000	0.0000 A
10.00 m	18.64 fA
20.00 m	36.50 fA
30.00 m	53.85 fA
40.00 m	70.89 fA
50.00 m	87.75 fA
60.00 m	104.5 fA
70.00 m	121.3 fA
80.00 m	138.2 fA
90.00 m	155.1 fA
100.00 m	172.1 fA
110.0 m	189.4 fA
120.0 m	206.8 fA
130.0 m	224.5 fA
140.0 m	242.4 fA
150.0 m	260.6 fA
160.0 m	279.1 fA
170.0 m	297.9 fA
180.0 m	317.1 fA

В пределах таблицы можно листать результаты по ПКМ – Scroll Data. Те же кнопки находятся в тулбаре Data Scroll.


SRC_VCE.Vdc	I_C.i
SRC_IB.Idc=0.0000	
0.0000	0.0000 A
10.00 m	18.64 fA
20.00 m	36.50 fA
30.00 m	
40.00 m	
50.00 m	
60.00 m	
70.00 m	
80.00 m	138.2 fA
90.00 m	155.1 fA
100.00 m	172.1 fA
110.0 m	189.4 fA
120.0 m	206.8 fA
130.0 m	224.5 fA
140.0 m	242.4 fA
150.0 m	260.6 fA
160.0 m	279.1 fA
170.0 m	297.9 fA
180.0 m	317.1 fA

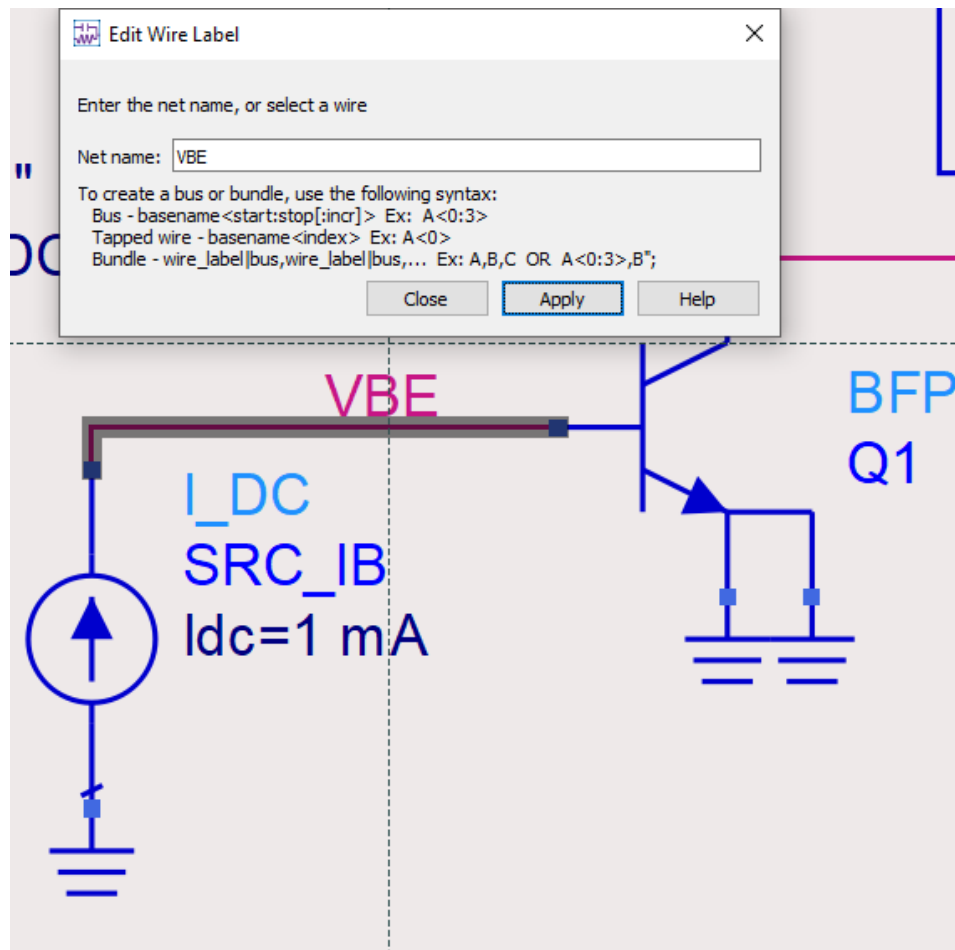
Для текущего проекта выбрана рабочая точка $V_{ce} = 2 \text{ В}$, $I_c = 20 \text{ мА}$. По таблице или с графика можно определить, что эта точка соответствует току базы $I_b \approx 100 \text{ мкА}$.

В последних версиях ADS появились новые приемы быстрого создания, настройки и контроля сущностей (результатов, выражений, графиков и пр), располагаемых в области графиков с помощью новых панелей Expression Manager и Variable Explorer. Хороший видео-обзор этих новых возможностей располагается на Youtube-канале евангелиста Keysight по имени Anurag Bhargava [11, 12]

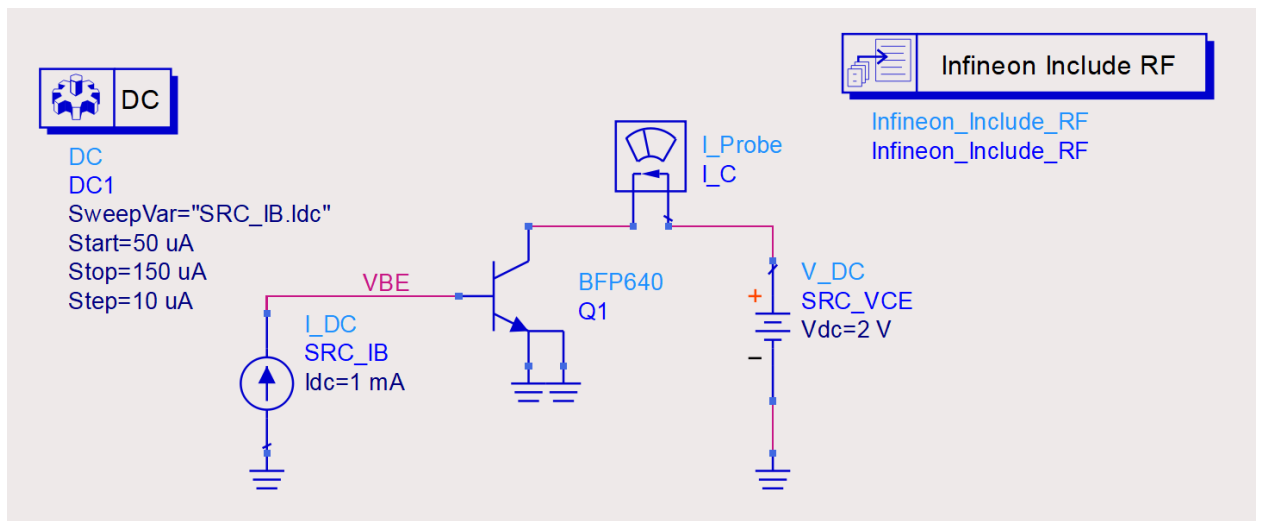
Схема расчета цепи питания и смещения

Создадим на основе схемы DC_Curves схему для расчета цепи питания и смещения. Чтобы не пересобирать схему в основном окне ADS по ячейке DC_Curves выполним команду ПКМ – Copy Cell. Имя новой ячейки DC_CalcBias.

Нам пригодится напряжение база-эмиттер. Для его получения необходимо поименовать цепь базы. При именовании цепей в результат идут потенциалы цепей относительно земли. Именованье цепи можно сделать по команде Insert Wire/Pin Label  или ДЛКМ по цепи. В окне вносим имя цепи VBE.



Сweep по напряжению коллектор-эмиттер SRC_VCE теперь не нужен, т.к. оно зафиксировано на 2 В. Удаляем контроллер ParamSweep, контроллер DC1 меняем на sweep тока базы SRC_IB.Idc от 50 мкА до 150 мкА с шагом 10 мкА, и устанавливаем напряжение источника SRC_VCE равным 2 В.



Симулируем.

Выведем в одну таблицу ток коллектора и напряжение VBE. Зависимость строится от независимой переменной Ib.

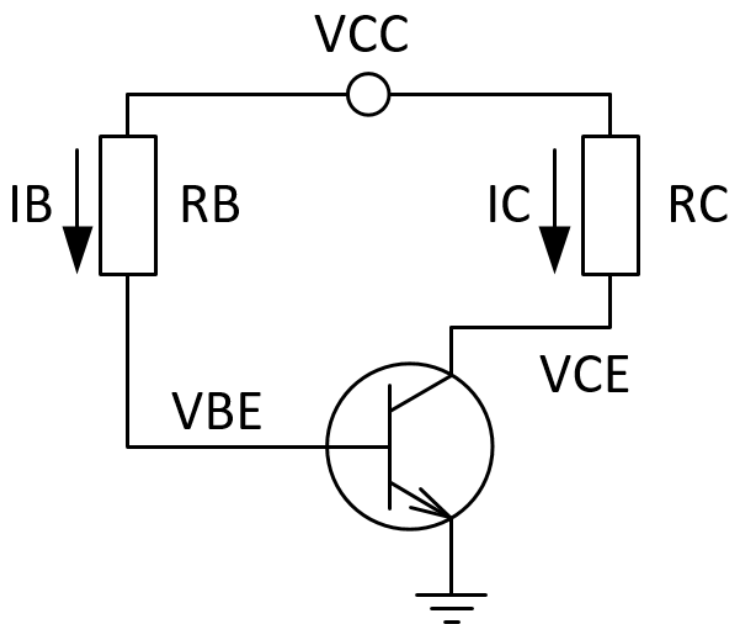
SRC_IB.Idc	I_C.i	VBE
50.00 u	11.87 mA	806.3 mV
60.00 u	13.63 mA	811.6 mV
70.00 u	15.29 mA	816.2 mV
80.00 u	16.86 mA	820.2 mV
90.00 u	18.34 mA	823.8 mV
100.0 u	19.76 mA	827.1 mV
110.0 u	21.12 mA	830.0 mV
120.0 u	22.42 mA	832.8 mV
130.0 u	23.67 mA	835.3 mV
140.0 u	24.88 mA	837.7 mV
150.0 u	26.05 mA	839.9 mV

Известно, что для компенсации дрейфа параметров транзистора используют резистивные цепи питания и смещения. Поэтому разумным будет взять питание всей схемы VCC где-то минимум от +0,5..1 В (с увеличением в 1,5-2 раза) от VCE с округлением до стандартных номиналов питания.


Диапазон стандартных номиналов питания VCC стоит брать из ряда 2, 3, 3,3, 3,5, 5, 7, 10, 12, 15 и 20 В. Данные значения часто встречаются в фиксированных вторичных источниках питания.

С учетом выбранного VCE = 2 В пусть питание всей схемы будет от 5 В.

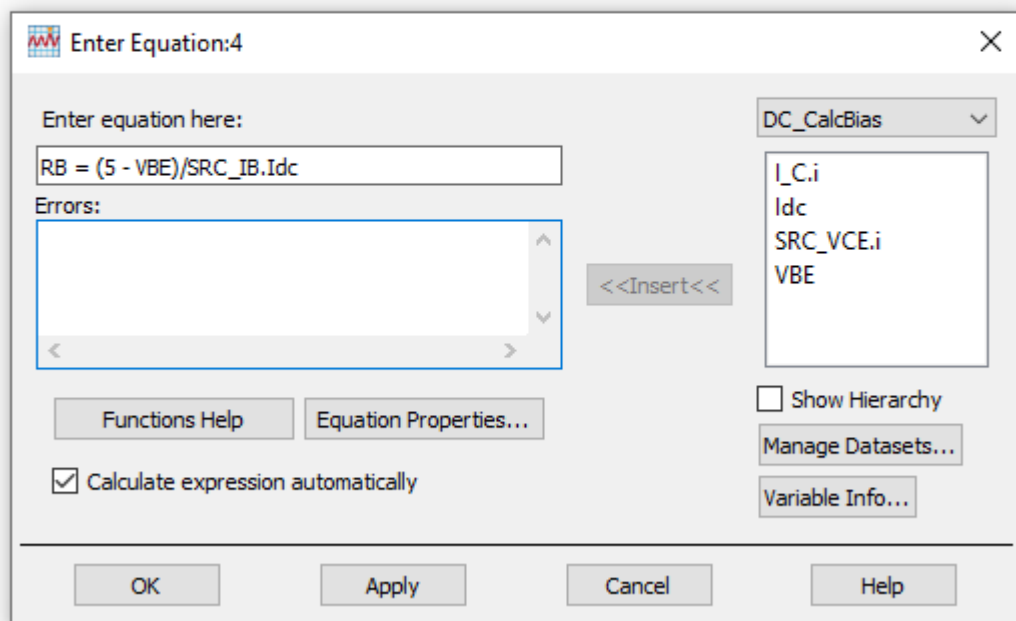
Выбранная схема питания и смещения будет выглядеть, как показано ниже.



Отсюда можно посчитать номиналы сопротивлений $R_C = (V_{CC} - V_{CE}) / I_C$ и $R_B = (V_{CC} - V_{BE}) / I_B$. R_C получается 150 Ом. Для расчета R_B воспользуемся возможностями выражений в области графиков ADS.

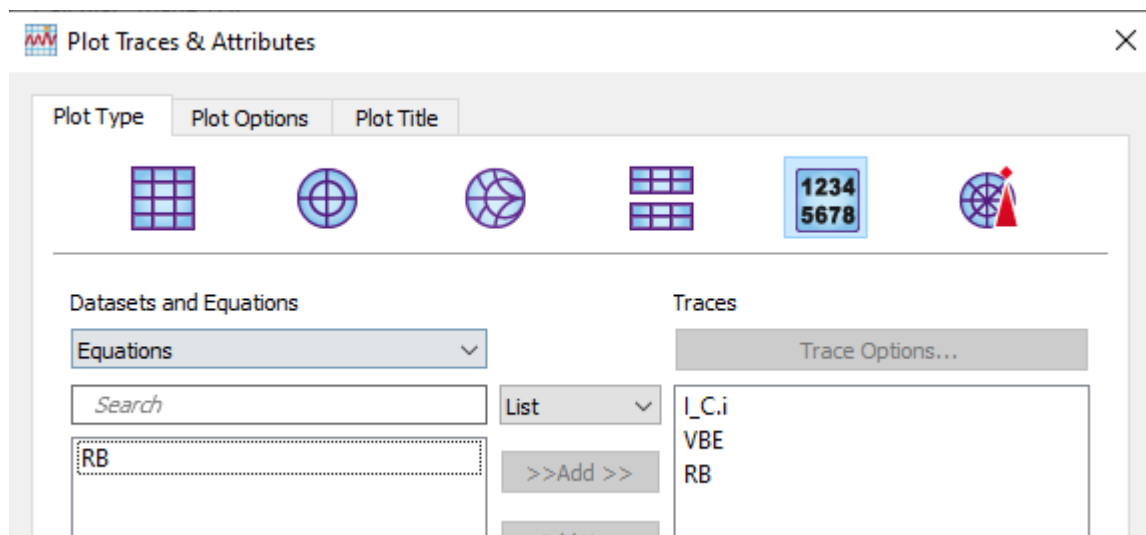
Создаем выражение по Insert – Equation . В открывшемся окне пишем выражение следующего вида $R_B = (5 - V_{BE}) / SRC_IB.Idc$


Eqn $R_B = (5 - V_{BE}) / SRC_IB.Idc$



В данном окне показываются найденные ошибки при наборе выражений, а также информация о доступных существующих переменных и результатах в датасетах.

Чтобы вывести на полотно графика выражение, определенное в окне графиков, нужно в списке Datasets and Equations выбрать датасет Equations. В нем расположены все определенные в текущем окне графиков выражения, а также маркеры. Добавим в таблицу посчитанный R_B



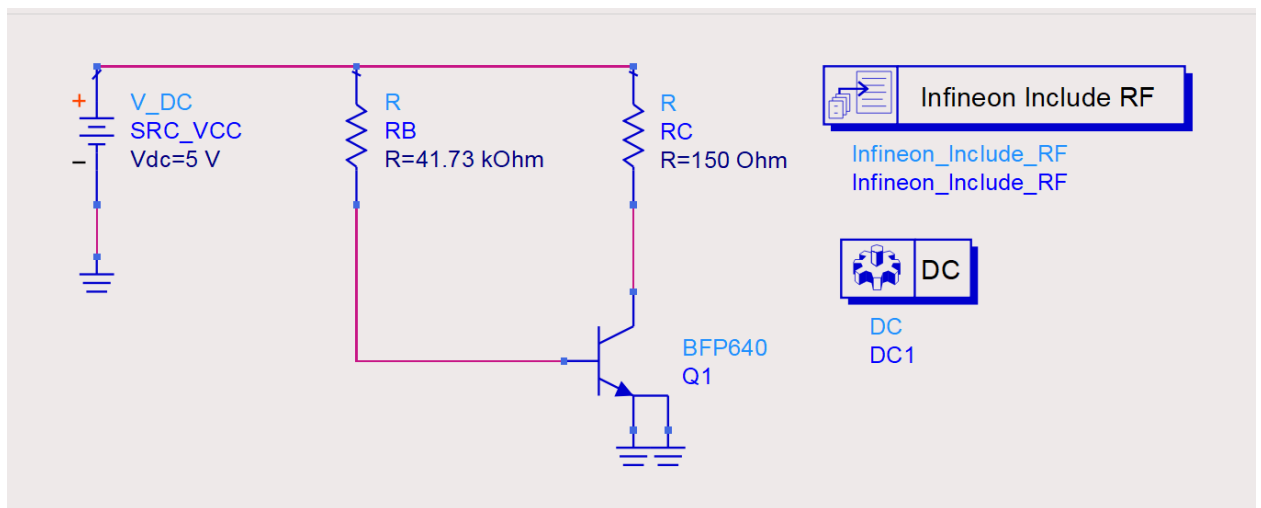
Поверх полученной таблицы наложим графику прямоугольника (Insert – Rectangle  так, чтобы выделить необходимую нам строку.

SRC_IB.Idc	I_C.i	VBE	RB
50.00 u	11.87 mA	806.3 mV	83.87 k
60.00 u	13.63 mA	811.6 mV	69.81 k
70.00 u	15.29 mA	816.2 mV	59.77 k
80.00 u	16.86 mA	820.2 mV	52.25 k
90.00 u	18.34 mA	823.8 mV	46.40 k
100.0 u	19.76 mA	827.1 mV	41.73 k
110.0 u	21.12 mA	830.0 mV	37.91 k
120.0 u	22.42 mA	832.8 mV	34.73 k
130.0 u	23.67 mA	835.3 mV	32.04 k
140.0 u	24.88 mA	837.7 mV	29.73 k
150.0 u	26.05 mA	839.9 mV	27.73 k

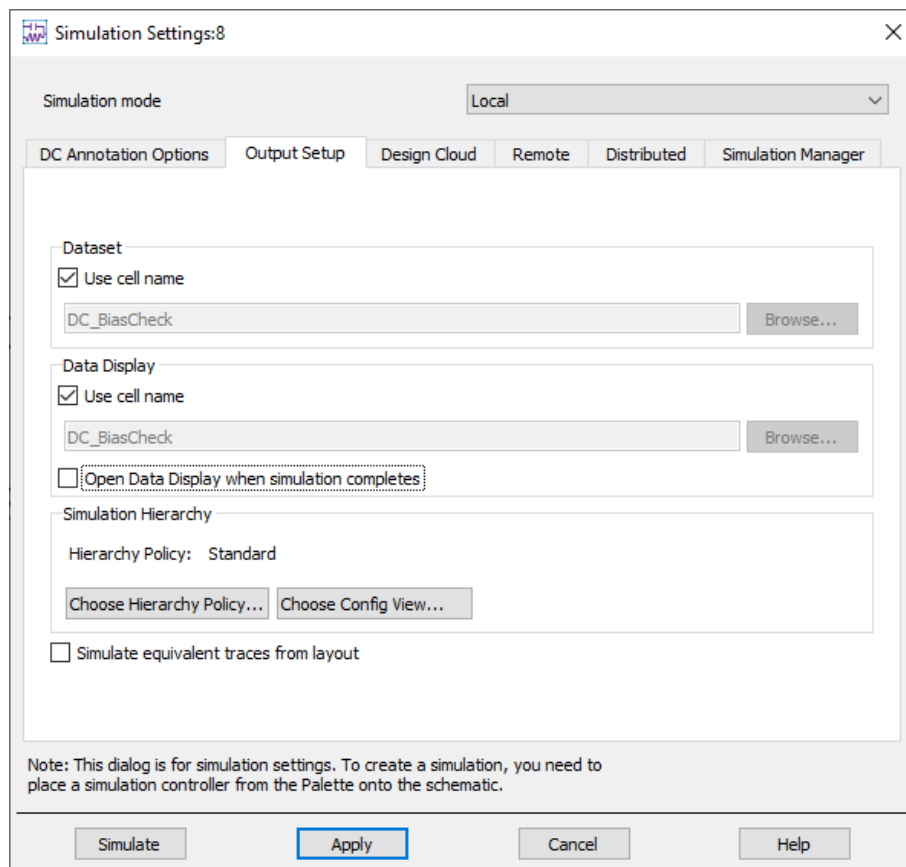
Проверочная схема питания и смещения



Создадим проверочную схему DC_BiasCheck, в которой проверим все наши выкладки и при необходимости подстроим номиналы резисторов, привязав их к ряду E24 (5%), E48 (2%) или E96 (1%).

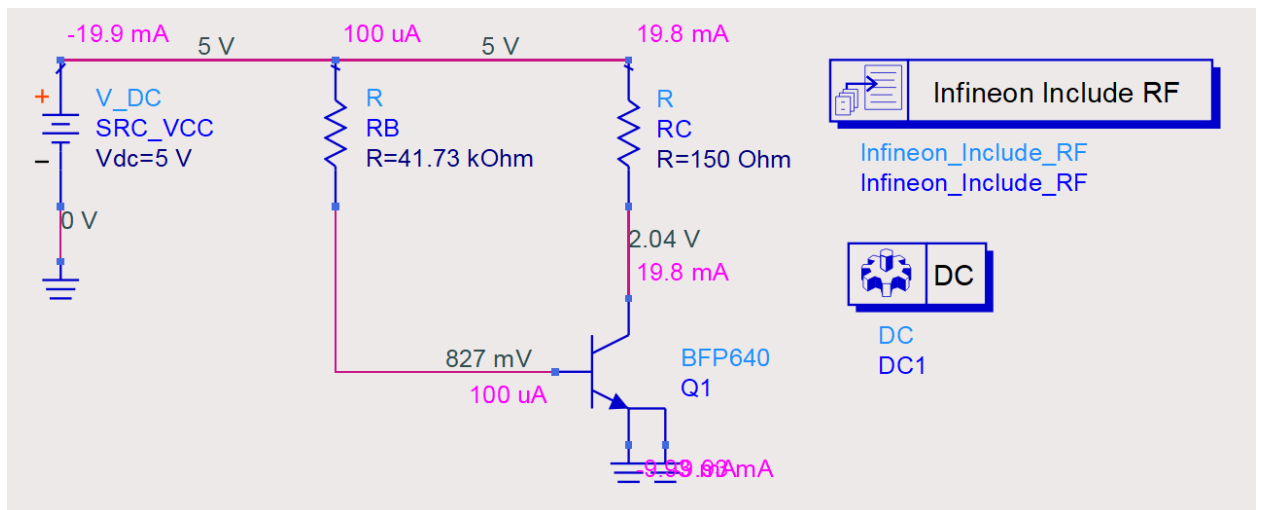
Т.к. расчет идет по одной точке, то в контроллере DC1 не должен быть настроен свип.



Здесь для отображения токов и напряжений воспользуемся аннотацией на схеме. Автоматическое создание графиков не нужно. По команде Simulate – Simulation Setting снимем галку Open Data Display when simulation completes.



После выполненной симуляции по командам Simulate – DC Annotation – Annotate Voltage  и Annotate Pin Currents  отобразим на схеме нужные аннотации.



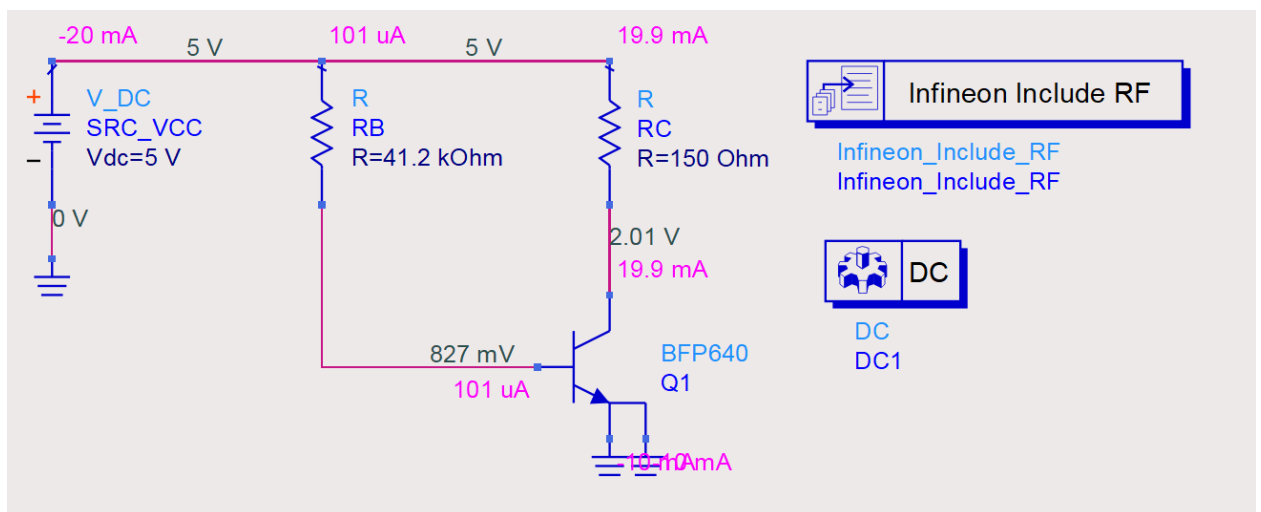
Значения V_{ce} и I_c близки к требуемым. Только номинал резистора смещения R_B далек от ряда E24.

Таблица 1. Ряды номиналов E24, E48 и E98.

E24					
1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6
1,8	2,0	2,2	2,4	2,7	3,0
3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1
5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1
E48					
1,0	1,05	1,1	1,15	1,21	1,27
1,33	1,4	1,47	1,54	1,62	1,69
1,78	1,87	1,96	2,05	2,15	2,26
2,37	2,49	2,61	2,74	2,87	3,01
3,16	3,32	3,48	3,65	3,83	4,02
4,22	4,42	4,64	4,87	5,11	5,36
5,62	5,9	6,16	6,49	6,81	7,15
7,5	7,87	8,25	8,66	9,09	9,53
E96					
1,0	1,02	1,05	1,07	1,1	1,13
1,15	1,18	1,21	1,24	1,27	1,3
1,33	1,37	1,4	1,43	1,47	1,5

1,54	1,58	1,62	1,65	1,69	1,74
1,78	1,82	1,87	1,91	1,96	2
2,05	2,1	2,15	2,21	2,26	2,32
2,37	2,43	2,49	2,55	2,61	2,67
2,74	2,8	2,87	2,94	3,01	3,09
3,16	3,24	3,32	3,4	3,48	3,57
3,65	3,74	3,83	3,92	4,02	4,12
4,22	4,32	4,42	4,53	4,64	4,75
4,87	4,99	5,11	5,23	5,36	5,49
5,62	5,76	5,9	6,04	6,19	6,34
6,49	6,65	6,81	6,98	7,15	7,32
7,5	7,68	7,87	8,06	8,25	8,45
8,66	8,87	9,09	9,31	9,53	9,76

Округление до ближайших в ряде E24 значений 39 кОм и 43 кОм уводит рабочую точку далеко от желаемой (до 5% от V_{ce}). Из ряда E96 ближайший номинал 41,2 кОм. Его использование дает отличный результат.



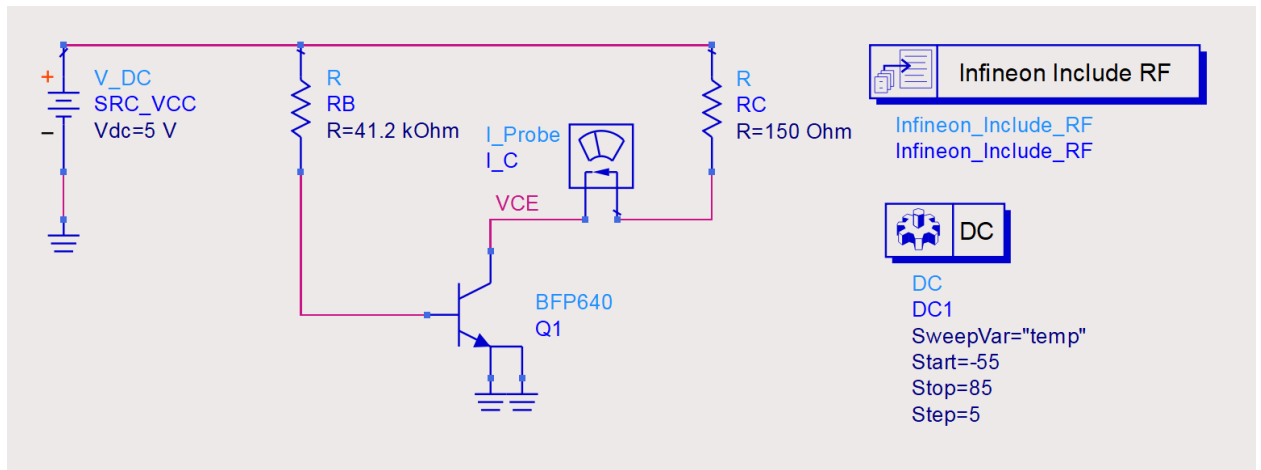
НЕТЕЛЬНЫХ

Цепи питания и смещения по постоянному току посчитаны. При дальнейшем проектировании возможны только минимальные правки по результатам проектирования ВЧ-цепей для учета возможных дополнительных потерь в них.

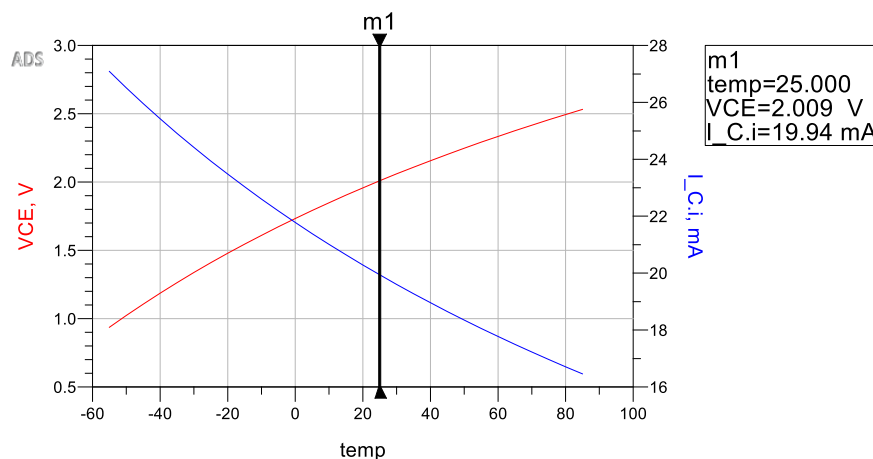
Анализ температурной зависимости цепей питания и смещения


Проанализируем, как поведут себя цепи питания и смещения при изменении температуры (как может уплыть рабочая точка). Проведем этот анализ в новой схеме DC_BiasTempSweep.

Температура задается системной переменной temp (задается в градусах Цельсия). Просвижаем ее в контроллере DC1 в диапазоне от -55°C до 85°C с шагом 5°C .



В области графиков выведем зависимости V_{CE} и I_C на один график, при этом I_C отправим на правую ось (в свойствах графика I_C.i на вкладке Plot Axes выставим Y axis = Right Y Axis).



Для одновременного отображения нескольких значений по одной X-координате удобно использовать маркер типа Line .

По графику видно, что цепь питания и смещения получается сильно температурно-зависимой, рабочая точка уплывает очень далеко. Это надо учитывать в разработке. И либо ограничивать температурный диапазон, при котором будет работать активное устройство. Либо вносить цепи термокомпенсации.

Задание на выполнение

В соответствии с вариантом спроектировать резистивную часть цепи подачи питания и смещения для биполярного транзистора.

Варианты заданий приведены в таблице 2.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

Таблица 2. Варианты заданий

№ Варианта	Биполярный транзистор (библиотека Infineon)	Рабочая точка	
		U _{ce} , В	I _b , мА
1	BFP520	2	2
2	BFP420	2	20
3	BFP405	2	5
4	BFP183W	8	5
5	BFR35AP	8	15
6	BFP182W	6	3
7	BFR92P	6	2
8	BFR182	8	3
9	BFP181	8	5
10	BFP181W	8	2

Каждый крупный этап рекомендовано делать в отдельных ячейках (схемах), т.к. при выполнении работы возможно придется возвращаться к предыдущим этапам.

Этапы выполнения:

1. Подключение библиотеки моделей транзисторов Infineon.

Установить на рабочее место и подключить к текущему проекту библиотеку компонентов.

2. Построение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером (схема DC_Curves).

- по документации на заданных компонент определить диапазон изменения U_{ce} и I_b.

- построить схему для моделирования выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.

- по результатам определить ток базы I_b для заданной рабочей точки.

3. Расчет резистивной части цепи питания и смещения (схема DC_CalcBias)

- собрать схему для расчета резисторов в цепи питания и смещения.
- выбрать номинал питания схемы VCC.
- по результатам моделирования с использованием выражений рассчитать RC и RB.

4. Проверочная схема цепи питания и смещения (DC_BiasCheck).

- собрать схему проверки цепи питания и смещения.
- ввести рассчитанные номиналы RC и RB.
- вывести в режиме аннотации токов и напряжений результаты DC-анализа на схему.
- округлить значения RC и RB до значений в рядах E24, E48 или E96. Преимущественно выбирать номиналы из более грубого ряда.
- добиться ошибки по рабочей точке не более 2%.

5. Анализ температурной зависимости цепи питания и смещения (схема DC_BiasTempSweep).

- собрать схему для анализа температурной зависимости цепи питания и смещения.
- диапазон температур выбрать от -55°C до $+85^{\circ}\text{C}$.
- проанализировать результаты моделирования.

Требования к отчёту

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

- Титульный лист, с наименованием работы, указанием исполнителя и даты выполнения.
- Цель (-и) работы.
- Список использованных инструментов в лабораторной работе.
- Разделы работы, которые рекомендовано формировать в соответствии с этапами выполнения (аналогично методике и заданию на выполнение).

- Для каждого этапа необходимо привести все выполненные расчеты, подготовленные модели, результаты и анализ результатов.

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

Готовый отчет необходимо экспортировать в pdf.

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

По окончании выполнения лабораторной работы и подготовки отчета, отчет и архив проекта надо выложить в ОРИОКС в домашнее задание в дисциплину, привязав к контрольному мероприятию ЗЛР (Защита лабораторных работ). Именование отчета и архива проекта должно давать возможность точно понять, к какой теме лабораторной работы они относятся (Например, PPU_Lab_DC вместо непонятного Lab1 или Workspace1).

Задание на самостоятельную работу

1) Подготовка к лабораторному занятию

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

2) Дополнительная самостоятельная работа

- В работе не показаны схемы измерения входных и переходных статических характеристик биполярных и полевых транзисторов. Для более полного понимания темы студенту рекомендуется продемонстрировать такое моделирование.

- В работе не показан анализ устойчивости приведенных схем смещения относительно параметров транзисторов, температурной зависимости, работы на повышенных частотах. Для более полного понимания темы студенту рекомендуется продемонстрировать такое проектирование.

Контрольные вопросы

//TODO

Литература

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

Перечень ресурсов сети «Интернет»

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

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

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

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

6. Производитель ЭКБ Infineon <https://www.infineon.com/>

7. Документация на биполярный транзистор BFP640 <https://www.infineon.com/cms/en/product/rf/rf-transistor/low-noise-rf-transistors/bfp640/>

Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System

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

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

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

11. Новые приемы работы в области графиков ADS2021 Top10 - Data Display Enhancements <https://youtu.be/ltkDbFiLsqw>

12. Приемы быстрого создания графиков с использованием панели Expression Manager <https://youtu.be/7XiIV6cbJLk>

Разработчик:

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.