

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
Статические характеристики активных элементов.....	3
Статические характеристики биполярного транзистора .....	3
Статические характеристики полевого транзистора .....	8
Выбор рабочей точки.....	10
Методика выполнения работы.....	12
Запуск ADS и создание проекта .....	12
Подключение библиотек компонентов .....	15
Определение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером.....	18
Схема расчета цепи питания и смещения.....	38
Проверочная схема питания и смещения.....	42
Анализ температурной зависимости цепей питания и смещения .....	46
Задание на выполнение.....	52
Требования к отчёту.....	54
Задание на самостоятельную работу.....	55
Контрольные вопросы .....	56
Литература .....	57



## 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 2023

**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

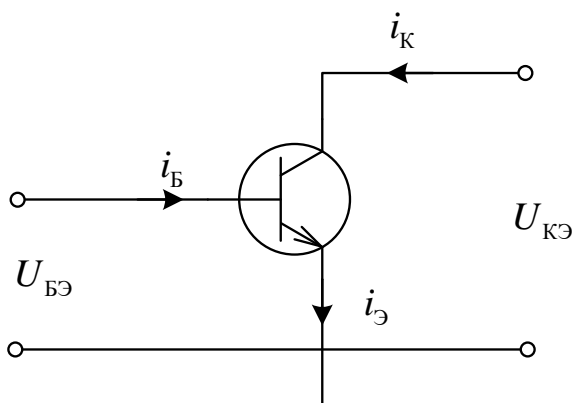
### Статические характеристики активных элементов

Для схем транзисторов можно определить четыре семейства статических характеристик, определяемых по постоянному току при отсутствии нагрузки:

1. Входные статические характеристики  $I_{\text{BX}} = f(U_{\text{BX}})|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$  ;
2. Выходные статические характеристики  $I_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{BX}} = \text{const}}$  ;
3. Характеристики обратной связи по напряжению  $U_{\text{BX}} = f(U_{\text{ВЫХ}})|_{I_{\text{BX}} = \text{const}}$  ;
4. Характеристики передачи по току  $I_{\text{ВЫХ}} = f(I_{\text{BX}})|_{U_{\text{ВЫХ}} = \text{const}}$  .

В справочниках обычно приводят только выходные и входные характеристики, связано это с тем, что возможен пересчет остальных характеристик по этим двум.

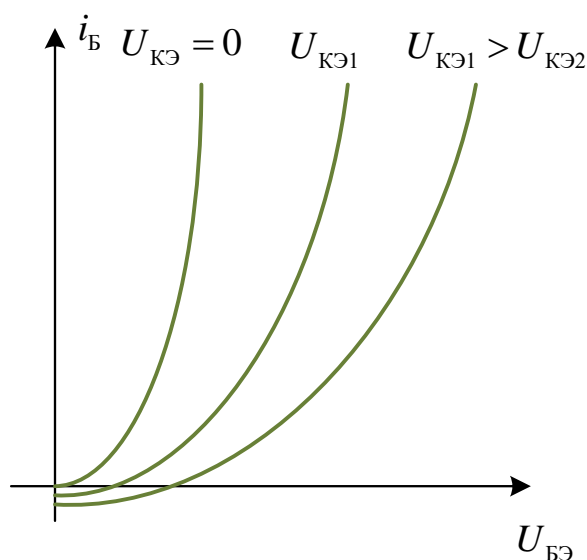
### Статические характеристики биполярного транзистора



Для биполярного п-р-п транзистора для схемы с общим эмиттером входные статические характеристики определяются по следующему правилу:

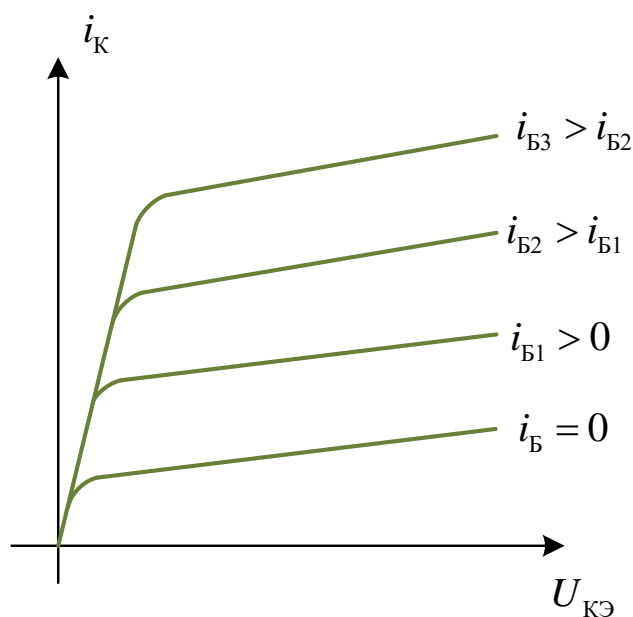
$$i_{\text{Б}} = f(U_{\text{БЭ}})|_{U_{\text{КЭ}} = \text{const}} .$$

Типовой вид входных статических характеристик биполярного п-р-п транзистора в схеме общим эмиттером имеет следующий вид:



При  $U_{КЭ} = 0$  эта характеристика представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода. При этом коллекторный переход оказывается включенным в прямом направлении. При увеличении  $U_{КЭ}$  проходит смещение вольтамперной характеристики за счет обратного коллекторного тока. На практике в справочниках и моделях значением этого тока, как правило, пренебрегают и считают входные статические характеристики выходящими из центра координат.

Выходные характеристики определяются как  $i_K = f(U_{КЭ})|_{i_B = \text{const}}$  и имеют следующий типовой вид:

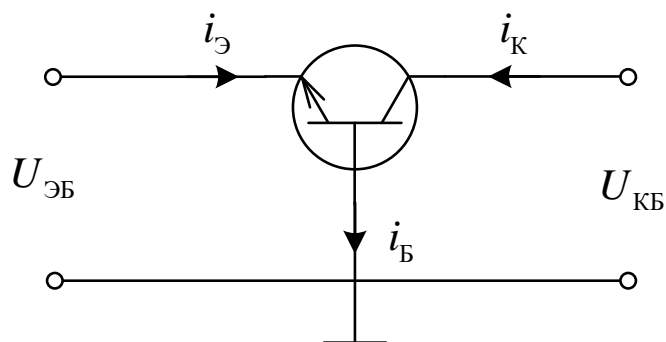


При  $i_B = 0$  эта характеристика представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики коллекторного перехода. При  $i_B > 0$  характеристики

имеют большую крутизну в области малых значений  $U_{кэ}$ , т. к. коллекторный переход включен в прямом направлении; поэтому сопротивление его незначительно и достаточно небольшого изменения напряжения на нем, чтобы ток  $i_k$  изменился значительно. Более того, все характеристики кроме начальной исходят не из начала координат, а ниже, так как ток коллекторного перехода в этом случае является прямым и имеет направление противоположное по отношению к обычному току коллектора. Но этим маленьким смещением характеристик пренебрегают и в справочниках представлены характеристики, исходящие из начала координат.

При больших значениях  $U_{кэ}$  характеристики идут значительно положе, так как практически все носители, инжектированные из эмиттера в базу, принимают участие в образовании коллекторного тока и дальнейшее увеличение  $U_{кэ}$  не приводит к пропорциональному росту тока  $i_k$ . Однако небольшой наклон характеристики все же имеется, так как с увеличением  $U_{кэ}$  увеличивается ширина коллекторного перехода, а ширина базовой области, с учетом ее и без того малой величины, уменьшается. Это приводит к уменьшению числа рекомбинаций инжектированных в базу носителей и, следовательно, к увеличению количества носителей, переброшенных в область коллектора. Кроме того, по этой же причине несколько снижается базовый ток  $i_b$ , а поскольку характеристики снимаются при условии  $i_b = \text{const}$ , то при этом необходимо несколько увеличивать напряжение  $U_{бэ}$ , что приводит к некоторому возрастанию тока эмиттера  $i_e$  и, следовательно, тока коллектора  $i_k$ . Еще одной причиной некоторого роста  $i_k$  является то, что с увеличением  $U_{кэ}$  возрастает и та его часть, которая приложена к эмиттерному переходу в прямом направлении. Это тоже приводит к некоторому увеличению тока эмиттера  $i_e$  и, следовательно, тока коллектора  $i_k$ .

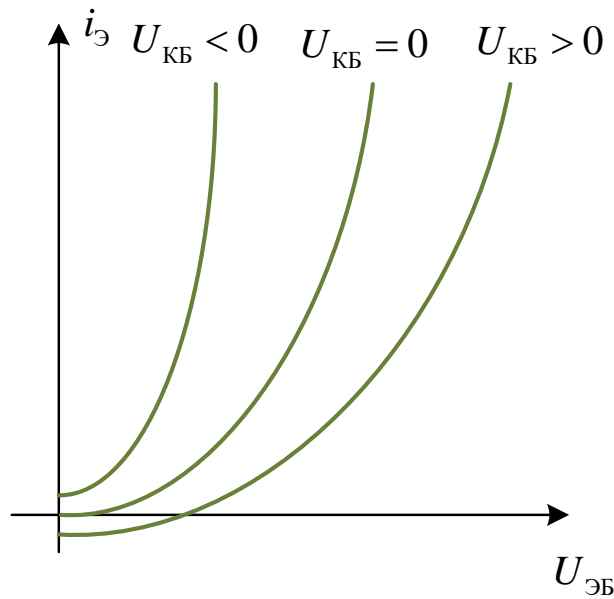
Характеристики передачи по току (называемые переходными характеристиками) определяются как  $i_k = f(i_b)|_{U_{кэ} = \text{const}}$  и могут быть высчитаны из входных и выходных характеристик.



Для биполярного n-p-n транзистора для схемы с общей базой входные статические характеристики определяются по следующему правилу:

$$i_{\text{Э}} = f(U_{\text{ЭБ}}) \Big|_{U_{\text{КБ}} = \text{const}}.$$

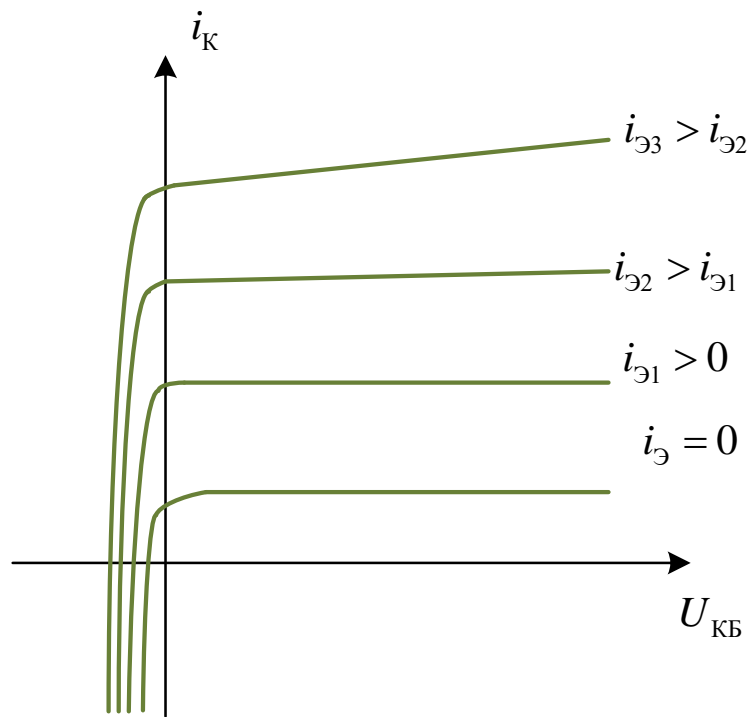
При  $U_{\text{КБ}} = 0$  входная характеристика представляет собой прямую ветвь вольт-амперной характеристики эмиттерного перехода. При  $U_{\text{КБ}} < 0$  данная характеристика смещается немного выше оси абсцисс, т. к. при отсутствии входного сигнала через запертый коллекторный переход протекает маленький обратный ток, который создает на объемном сопротивлении базовой области падение напряжения, приложенное к эмиттерному переходу в прямом направлении. Именно это падение напряжения и обуславливает протекание через эмиттерный переход маленького прямого тока и смещение вверх входной характеристики. При  $U_{\text{КБ}} > 0$  коллекторный переход смещается в прямом направлении, через него протекает прямой ток и, следовательно, падение напряжения на сопротивлении базы изменит полярность на противоположную, что вызовет при отсутствии входного сигнала протекание через эмиттерный переход маленького обратного тока и, следовательно, смещение входной характеристики вниз.



Выходные характеристики в схеме с общей базой определяются как

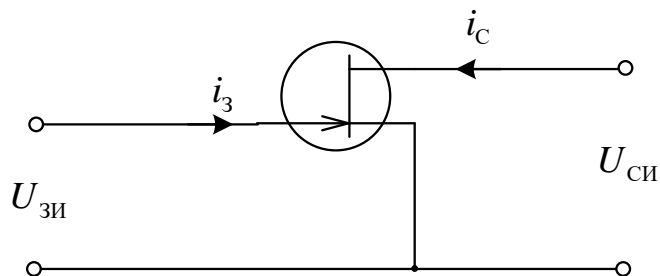
$$i_{\text{к}} = f(U_{\text{кб}}) \Big|_{i_{\text{э}} = \text{const}}.$$

Если  $i_{\text{э}} = 0$ , то выходная характеристика представляет собой обратную ветвь вольт-амперной характеристики коллекторного перехода. При  $i_{\text{э}} > 0$  ток в коллекторной цепи будет протекать даже при отсутствии источника коллекторного питания за счет экстракции инжектированных в базу носителей полем коллекторного перехода. При увеличении напряжения  $U_{\text{кб}}$  коллекторный ток практически не меняется, т. к. количество инжектированных в базу носителей не меняется  $i_{\text{э}} = \text{const}$ , а возрастает только скорость их перемещения через коллекторный переход. Чем больше уровень тока  $i_{\text{э}}$ , тем больше и коллекторный ток  $i_{\text{к}}$ . При изменении полярности  $U_{\text{кб}}$  на противоположную, меняется и включение коллекторного перехода с обратного на прямое. Поэтому ток  $i_{\text{к}}$  вначале очень быстро снижается до нуля, а затем изменяет свое направление на противоположное.



### Статические характеристики полевого транзистора

У полевого транзистора можно определить выходные (стоковые) и управляющие (стокозависимые) статические характеристики. Практически полное отсутствие входного тока убирает необходимость определения входных и обратных характеристик.



Управляющие характеристики показывают управляющее действие затвора и представляют собой зависимость тока стока от напряжения на затворе при постоянстве напряжения стока:

$$i_C = f(U_{ЗИ}) \Big|_{U_{СИ} = \text{const} > U_{СИ \text{ нас}}}.$$

Выходные характеристики представляет собой зависимость тока стока от напряжения стока при неизменном напряжении на затворе:

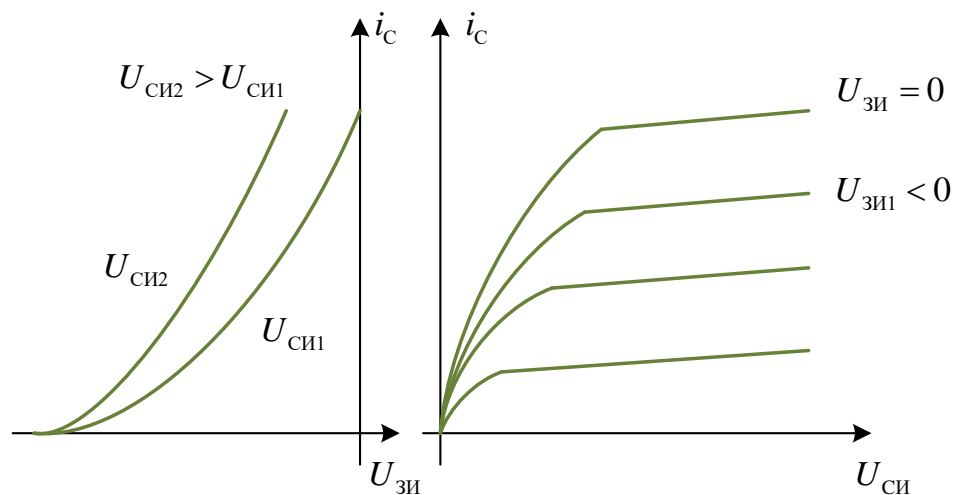
$$i_C = f(U_{СИ}) \Big|_{U_{ЗИ} = \text{const}}.$$

С увеличением  $U_{СИ}$  ток сначала растет довольно быстро, но затем его рост замедляется и наступает явление, напоминающее насыщение, хотя с

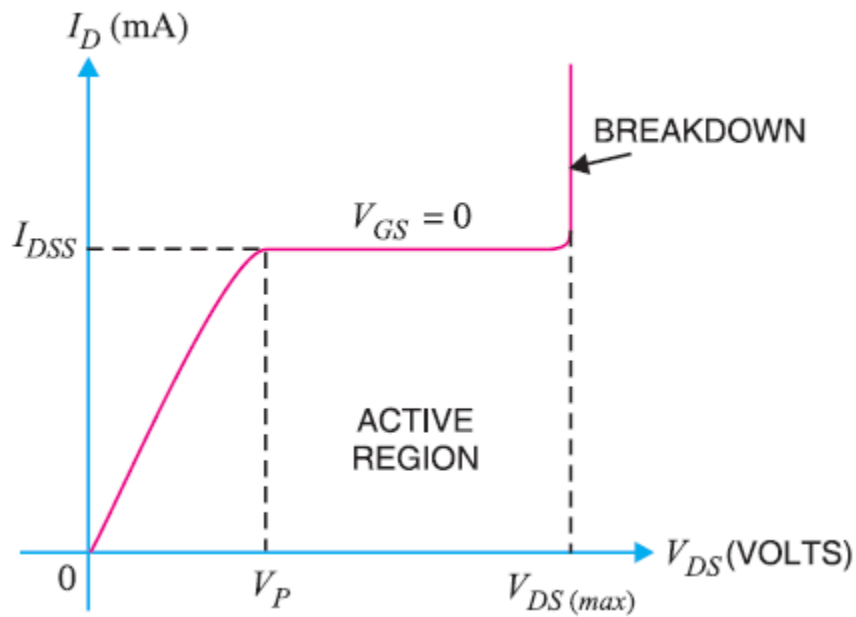


ростом  $U_{\text{си}}$  ток стока так же должен возрастать. Это объясняется тем, что с ростом  $U_{\text{си}}$  возрастает обратное напряжение на р-п-переходе и увеличивается ширина запирающего слоя, а ширина канала соответственно уменьшается. Это приводит к увеличению его сопротивления и уменьшению тока  $i_c$ . Таким образом, происходит два взаимно противоположных влияния на ток, в результате чего он остается почти неизменным. Чем больше запирающее напряжение подается на затвор, тем ниже идет выходная характеристика. Повышение напряжения стока, в конце концов, может привести к электрическому пробоя р-п-перехода, и ток стока начинает лавинообразно нарастать. Напряжение пробоя является одним из предельных параметров полевого транзистора.

Типовые статические характеристики полевого транзистора n-типа приведены на рисунке



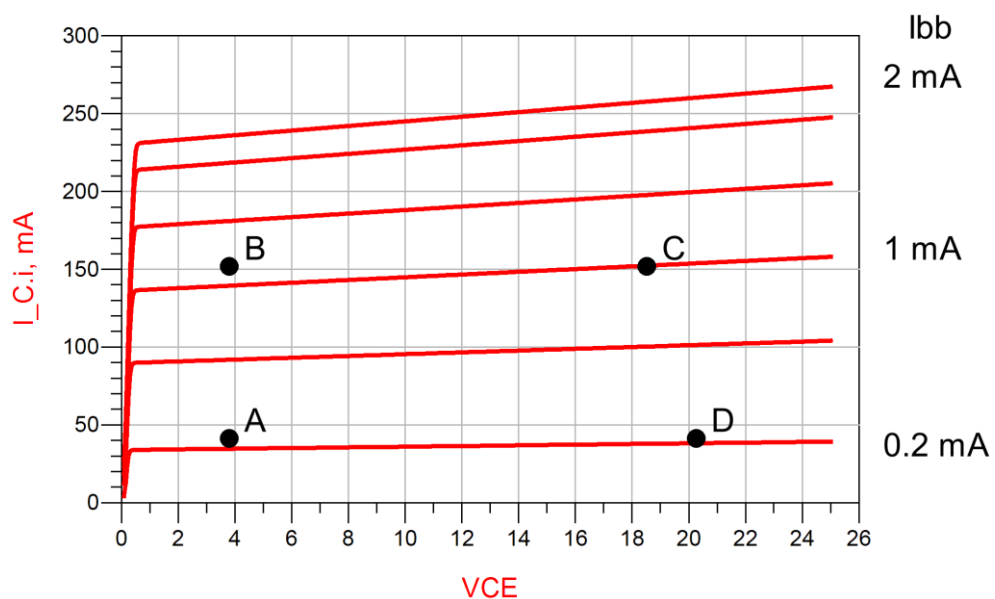
Важной статической линией полевого транзистора является выходная статическая характеристика при  $U_{\text{зи}} = 0$ . С помощью этой линии определяются границы линейного (оммического) участка  $U_p$ , участка насыщения и пробоя сток-исток  $U_{(BR)DS}$ . Также отсюда определяется ток насыщения стока  $I_{DSS}$ . Для определения тока стока в зависимости от напряжения затвор-исток может использоваться формула  $I_{DS} = I_{DS} \left( 1 - \frac{V_{GS}}{V_{GS(off)}} \right)^2$ .



### Выбор рабочей точки

Под рабочей точкой схемы с общим эмиттером на биполярном транзисторе понимают пару  $U_{КЭ}$  и  $I_K$ , относительно которой определяется режим работы активного элемента. В зависимости от назначения усилителя известны следующие характерные рабочие точки:

- A – маломощный малозумящий усилитель (малый коллекторный ток);
- B – мощный малозумящий усилитель;
- C – мощный усилитель в линейном режиме (класс A);
- D – мощный усилитель с повышенным КПД (класс АВ, В).



Под рабочей точкой усилителя на полевом транзисторе понимают пару  $U_{СИ}$  и  $I_C$ , относительно которой определяется режим работы активного элемента. В зависимости от назначения усилителя известны следующие характерные рабочие точки:

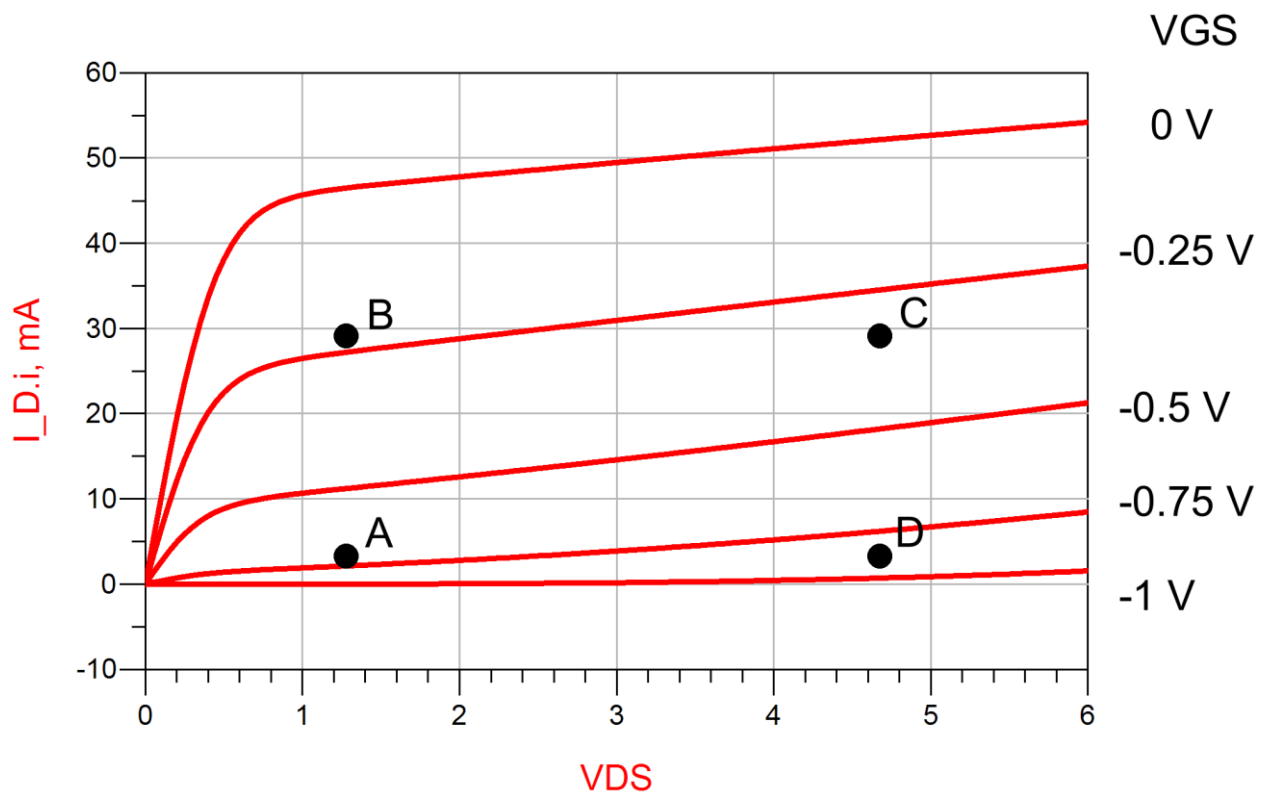
А – маломощный малошумящий усилитель (малый ток стока  $I_{СИ} \approx 0,15I_{СИ\text{ нас}}$ );

В – мощный малошумящий усилитель (большой ток стока  $I_{СИ} \approx 0,9I_{СИ\text{ нас}}$ );

С – мощный усилитель в линейном режиме (класс А,  $I_{СИ} \approx 0,5I_{СИ\text{ нас}}$ );

D – мощный усилитель с повышенным КПД (класс АВ, В).

В нелинейных моделях для моделирования часто точка напряжения пробоя сток-исток  $U_{(BR)DS}$  не задана, в этом случае для выбора точки С рекомендуется пользоваться ограничениями из даташита.

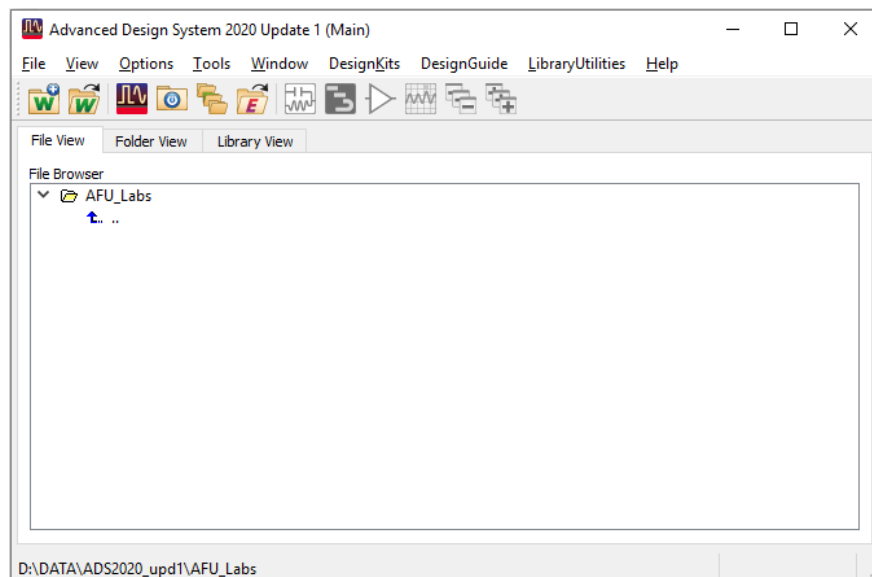


Производителем часто указываются оптимальные рабочие точки в зависимости от типа проектируемого усилителя и назначения транзистора.


## Методика выполнения работы

### Запуск ADS и создание проекта

Основное приложение ADS называется «Advanced Design System».



В этом окне создается проект, идет работа с содержимым открытого проекта, находятся глобальные настройки ADS, подключаются библиотеки компонентов (DesignKits и libs) и различного вида расширения (DesignGuides и APPs), а также вызывается справка и примеры.

Для создания проекта нужно вызвать команду File – New Workspace . При создании нового проекта запускается мастер. На первом этапе нужно указать папку, где будет храниться проект и имя проекта.

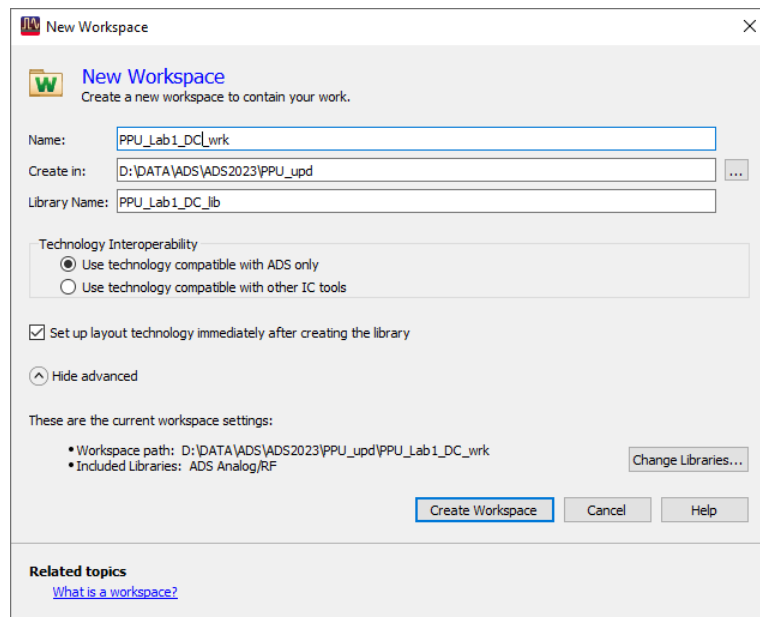
Проект является папкой с суффиксом «\_wrk». Кроме того, к проекту сразу привязывается базовая библиотека проекта (подпапка с суффиксом «\_lib»), в которую будут сохраняться все схемы в текущем проекте.



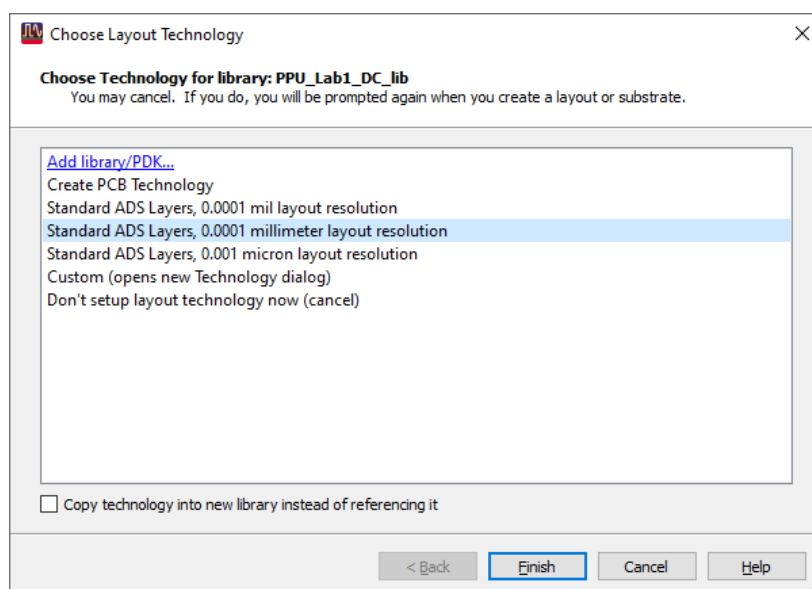
Проект должен находиться по пути, где нет неанглийских символов, пробелов и иных спецзнаков. Назван он тоже должен быть по этим же правилам.

При создании нового проекта можно сразу задать технологию его базовой библиотеки (назначение топологических слоев, единицу длины и ее разрешение) и подключить внешние к проекту библиотеки.

Библиотеку компонентов мы подключим позже. Сейчас надо определить технологию (галка Set up layout technology immediately after creating the library). Т.к. работать мы планируем только в ADS, то можно оставить выбор Technology Interoperability = Use technology compatible with ADS only.

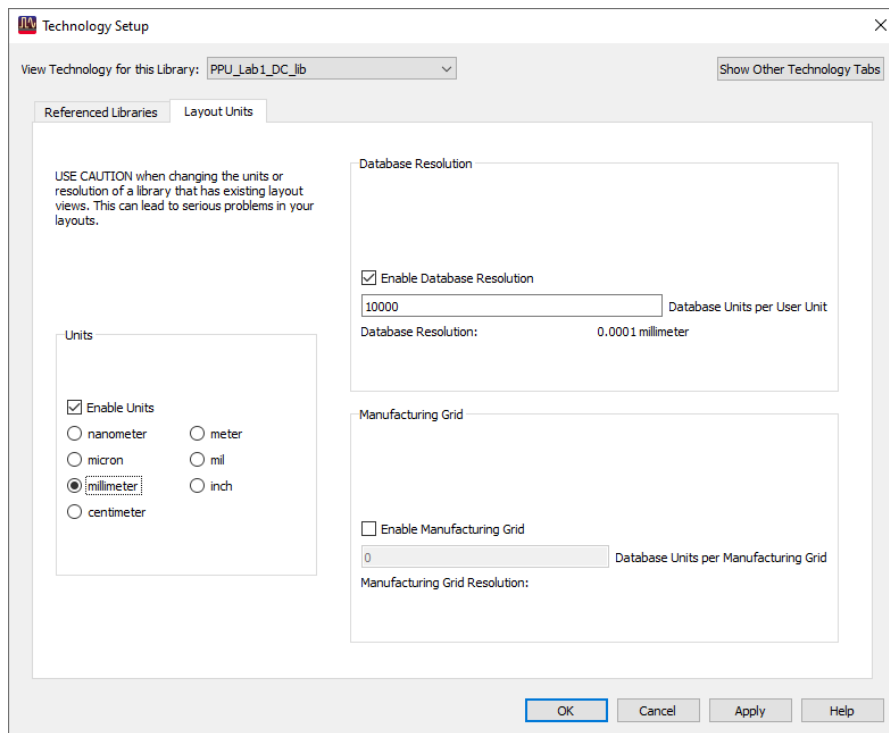


В окне Choose Layout Technology выбираем стандартную библиотеку ADS, в мм, с разрешением 0,0001мм.

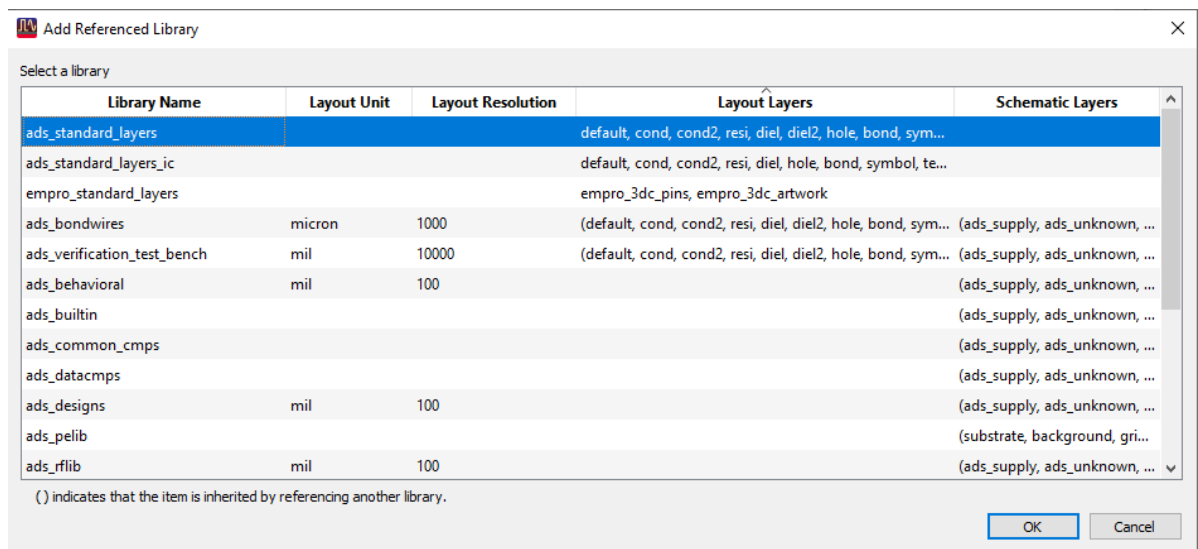


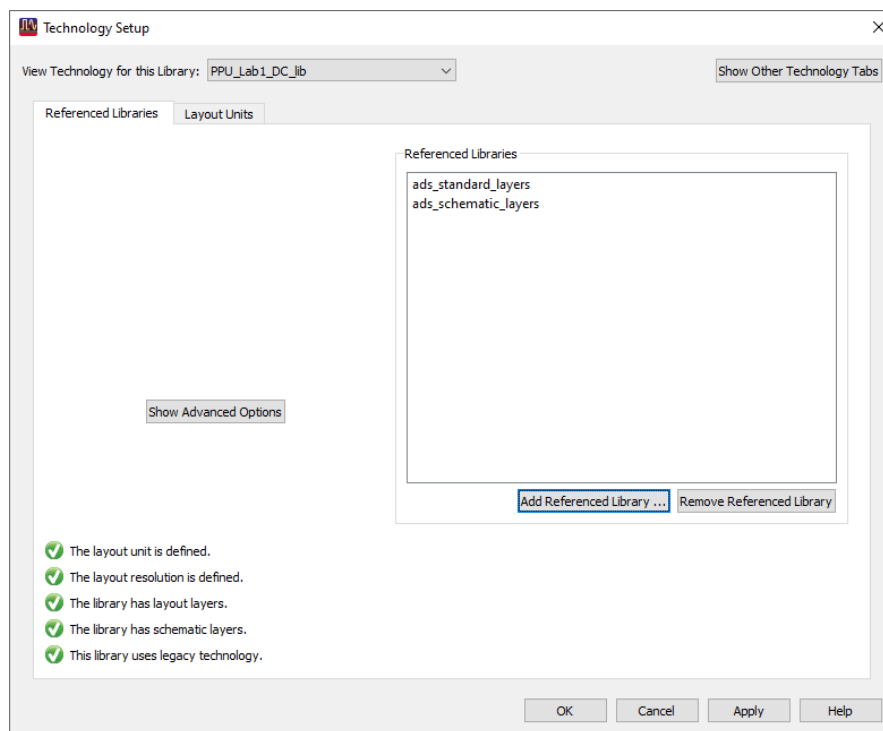
Если при создании проекта данные этапы были пропущены, то все это можно задать вручную. В основном окне ADS по команде Options - Technology – Technology Setup для базовой библиотеки проекта на вкладке Layout Units нужно:

- в группе Units включить галку Enable Units и выбрать миллиметры;
- в группе Database Resolution включить галку Enable Database Resolution и ввести точность 10000 на единицу длины, так чтобы разрешение стало 0,0001 мм.



На вкладке Reference Libraries в группе Referenced Libraries по кнопке Add Referenced Library в списке найти и добавить библиотеку «ads\_standard\_layers».



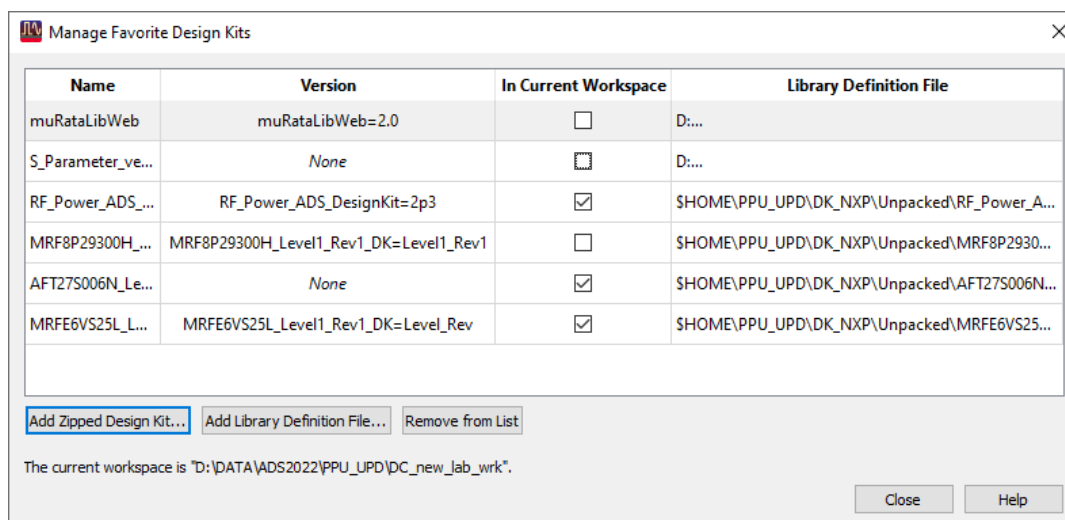


В списке Referenced Libraries должны остаться библиотеки «asd\_standard\_layer» (назначение топологических слоев) и «ads\_schematic\_layer» (назначение слоев для отображения в схемах). Для выбранного маршрута этого достаточно.

### Подключение библиотек компонентов

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

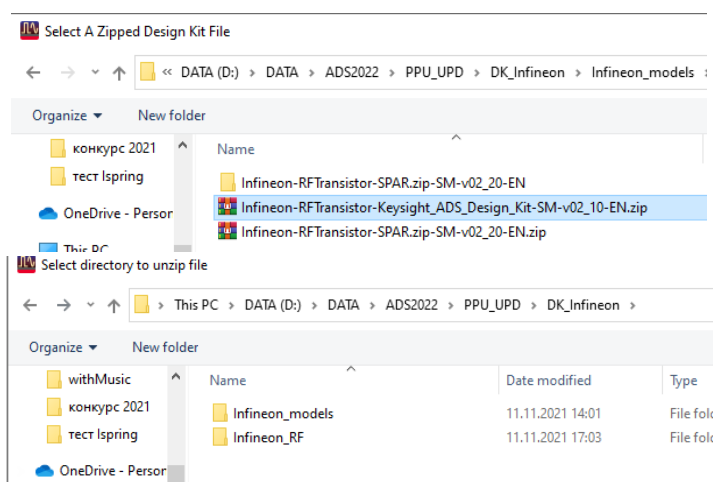
Библиотеки компонентов в ADS могут распространяться в нескольких видах. Принятым вариантом распространения библиотек дискретных компонентов от производителей (Vendor Libraries) являются библиотеки в виде Design Kits. Это особым образом сконфигурированные проекты в ADS. Для их подключения к текущему проекту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



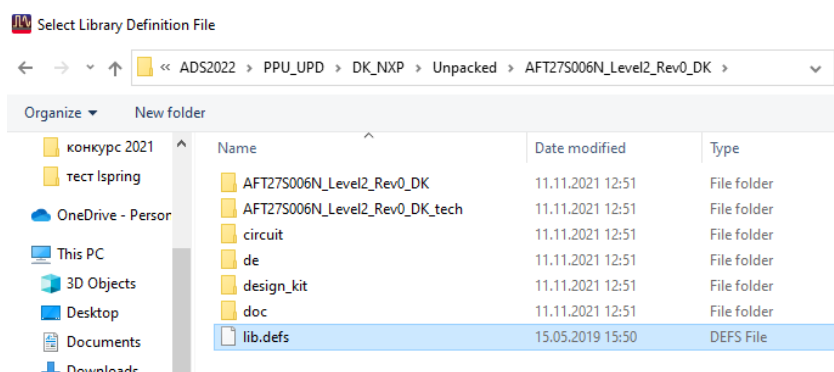
В данном окне отображаются все установленные на текущем рабочем месте библиотеки компонентов. Добавить библиотеку в текущий проект можно установив галку «In Current Workspace».

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.

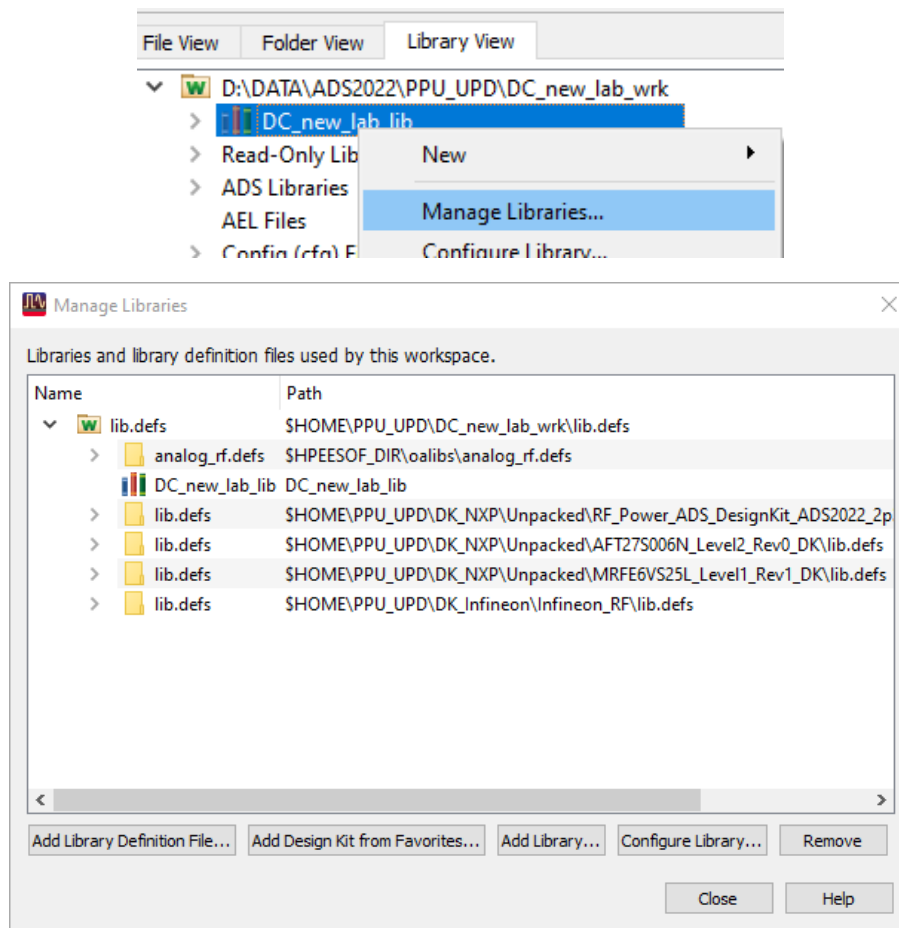


- Если библиотека разархивирована, то по кнопке Add Library Definition File нужно в папке с разархивированной библиотеки указать файл «lib.defs»; дать название библиотеки в списке; при открытом проекте можно сразу подключить библиотеку к текущему проекту.

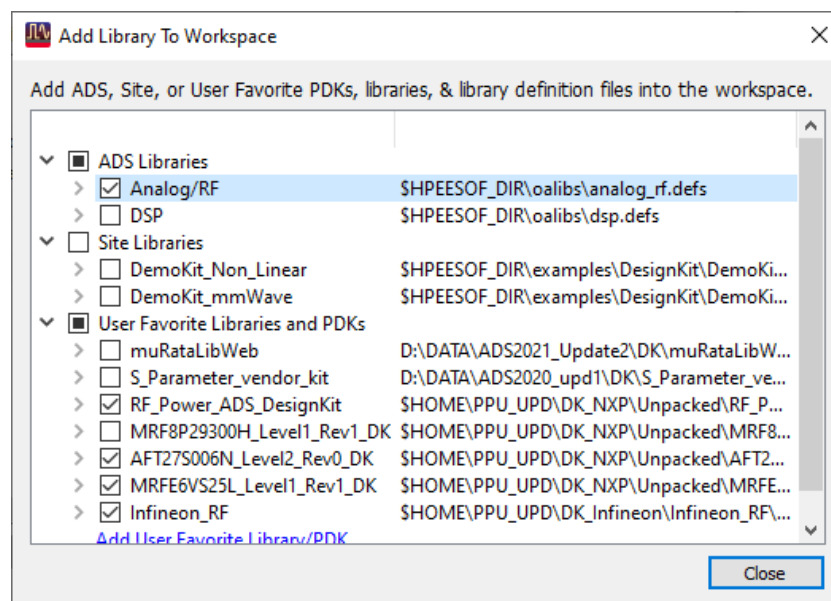


Также есть окно для более полного контроля за содержанием библиотек текущего проекта. Запускается оно из основного окна ADS по команде DesignKits – Manage Libraries или из основного окна ADS при отображении проекта в виде Library View по корневой библиотеке проекта ПКМ – Manage Libraries.






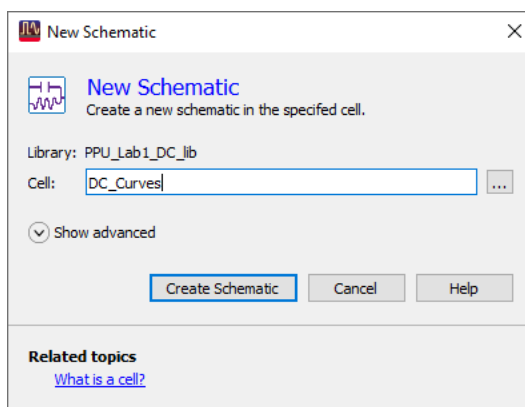
В этом окне по кнопке Add Design Kit from Favorites можно подключать библиотеки из списка установленных на рабочем месте, а также управлять подключением встроенных системных библиотек (Analog/RF и DSP) без переконфигурации маршрута проектирования на рабочем месте.



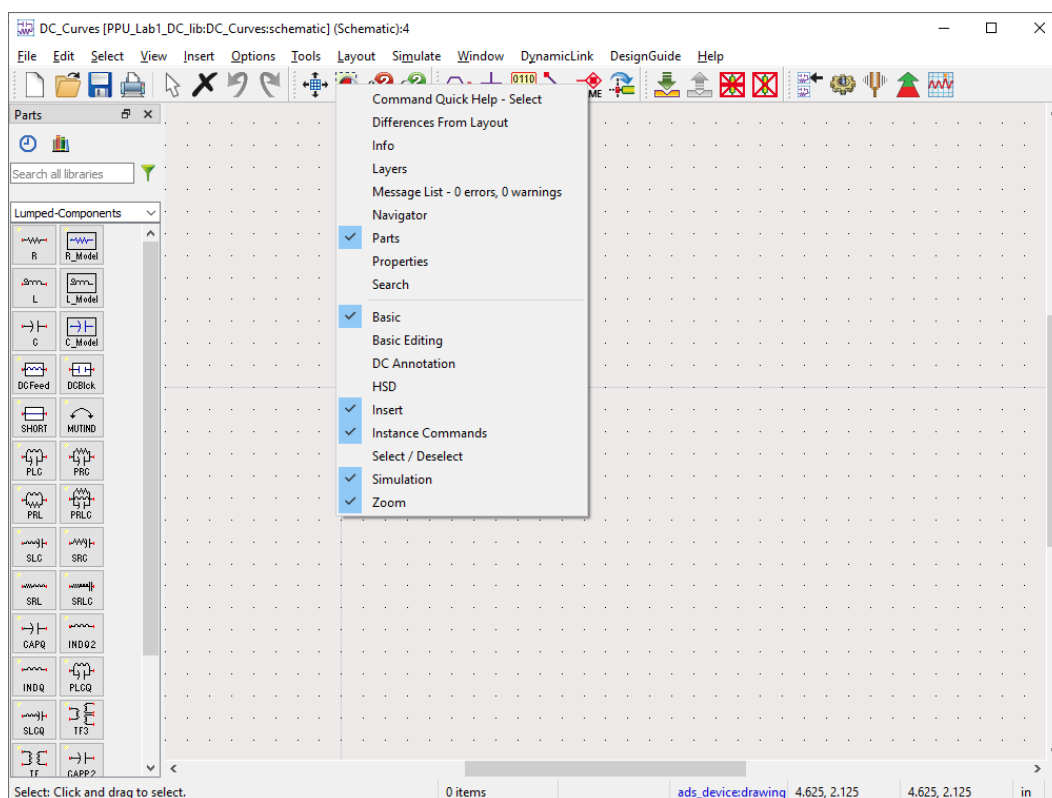
## Определение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером

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.

Создание новой схемы делается по команде File – New – Schematic . Каждая новая схема создается в ячейке (Cell, единица структурирования в библиотеке проекта). По умолчанию, каждая новая схема хранится в новой ячейке. Назовем «DC\_Curves».

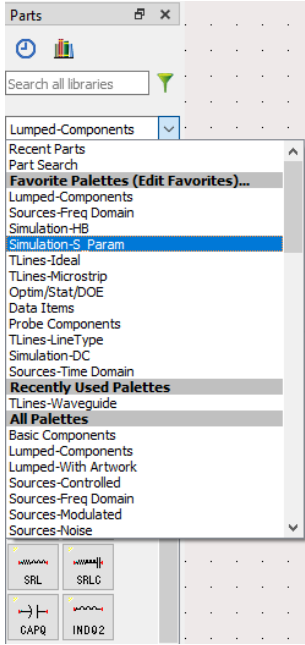



Откроется новое окно редактора схемы.



Настройка отображения тулбаров и боковых окон осуществляется либо по командам в меню View – Docking Windows, либо по ПКМ в области тулбаров.

Компоненты добавляются из бокового окна (панели) Parts. Большая часть компонентов расположена в различных палитрах. Палитра выбирается по выпадающему списку.



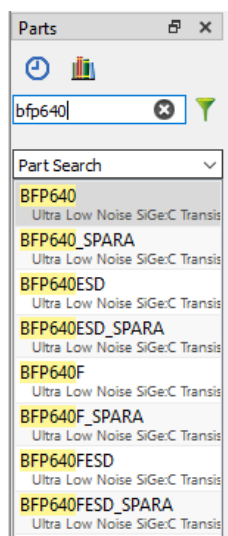
Если компонент не добавлен в какую-либо палитру или неизвестно его точное имя, то можно открыть окно Library Browser  (Insert – Component – Component Library, быстрая клавиша «I»), где можно осуществлять поиск и подбор по описанию.

Component Library


Component	Description	Library	Vendor	Placement	Availability	Url	License
5G_FBMC_Rx_AWGN_Analysis	5G FBMC Rx AWGN Analysis VTB	ads_verification...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
5G_FBMC_Tx_Analysis	5G FBMC Tx Analysis VTB	ads_verification...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
5G_FBMC_Tx_Source_Analysis	5G FBMC Tx Source Analysis VTB	ads_verification...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AC	AC Small-Signal Simulation	Simulation-AC		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ACPR_Measurement_Analysis	ACPR Measurement Analysis VTB	ads_verification...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ACPWD5_MDS		ads_tlines		Both	Available	N/A	N/A
ACPWDL_MDS		ads_tlines		Both	Available	N/A	N/A
actHilnOut		ads_schematic...		Both	Available	N/A	N/A
actHilnp		ads_schematic...		Both	Available	N/A	N/A
actHilpOut		ads_schematic...		Both	Available	N/A	N/A
ADS_Diode_Model	ADS_Root Diode Model	Devices-Diodes		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADS_FET	ADS_Root field effect transistor	Devices-GaAs		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADS_FET_Model	ADS_Root field effect transistor Model	Devices-GaAs		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADS_MOS	ADS_Root MOS Transistor	Devices-MOS		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADS_MOS_Model	ADS_Root MOS Transistor Model	Devices-MOS		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADSDiode	ADS_Root Diode	Devices-Diodes		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADSHBT_Model	ADS Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADSHBT_NPN	ADS Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
ADSHBT_NPN_Th	ADS Heterojunction Bipolar Transistor w/ Therna...	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
Advanced_Curtice2_Model	Advanced_Curtice GaAsFET Model	Devices-GaAs		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AGC_Amp	Voltage-controlled amplifier	System-Amps ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AGC_PwrControl	AGC loop power control	System-Amps ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AgilentHBT_Model	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor Model	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AgilentHBT_NPN	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor, NPN	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AgilentHBT_NPN_Th	Agilent Heterojunction Bipolar Transistor w/ Ther...	Devices-BJT		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AIRIND1	Libra Aircore Inductor (Wire Dia.)	Passive-RF Circ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AIRIND2	Libra Aircore Inductor (Wire Gauge.)	Passive-RF Circ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AM_DemodTuned	AM Demodulator, Tuned	System-Mod/D...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AM_ModTuned	AM Modulator, Tuned	System-Mod/D...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AmpHIH2	Amplifier model based on 1st and 2nd harmonic ...	System-Data M...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AmpHIH2_Setup	AmpHIH2 setup	System-Data M...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
Amplifier		ads_behavioral		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
Amplifier2	RF System Amplifier, Polynomial Model for Nonli...	System-Amps ...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A
AmplifierP2D	P2D File Amplifier (FDD-based model for single c...	System-Data M...		NOLAYOUT	Available	N/A	N/A



Download Libraries... 2492 items found

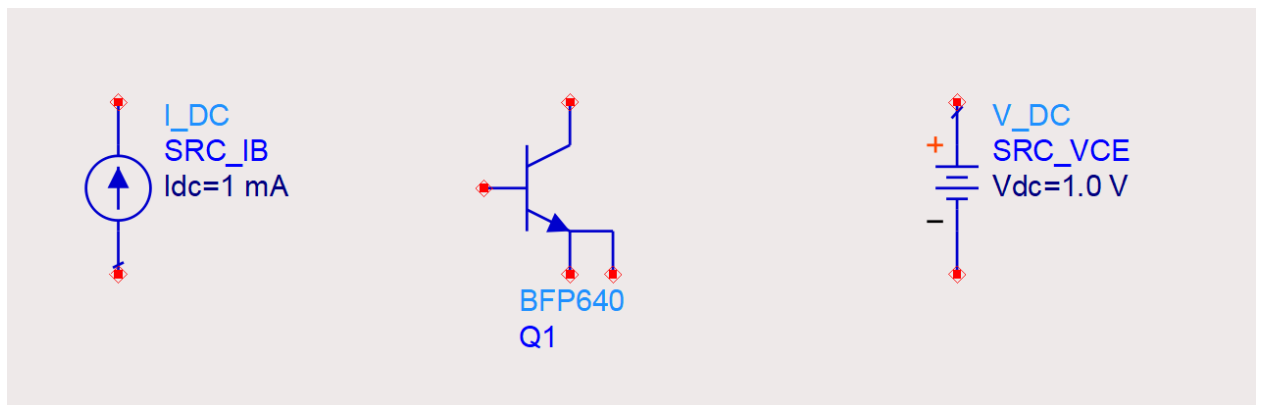
Также в панели Parts доступен режим поиска по имени компонента Part Search.




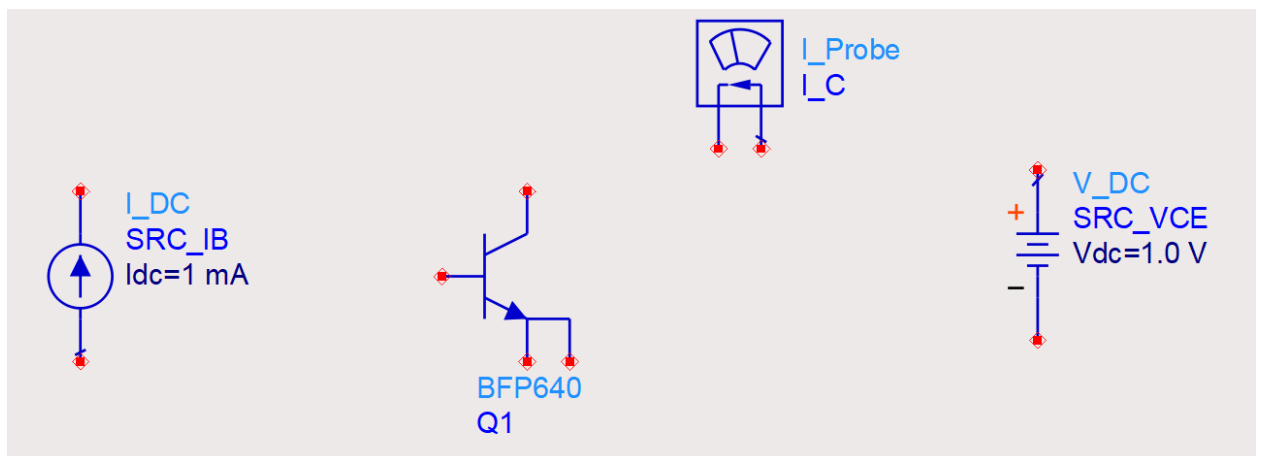
По документации [7] у данного транзистора разумный диапазон напряжений VCE от 0 В до 5 В (дано предельное напряжения VCEO = 4.1 В при открытой базе). Чтобы график был плавный, пусть шаг будет 0,01 В. Ток базы IB в документации обычно не указывается, но есть данные по предельному току коллектора IC = 50 мА. Он связан с током базы через коэффициент усиления по постоянному току ( $\beta$  или Hfe), у BFP640 порядка 180. Округлим до разумного предела тока базы IB в 250 мкА. Шаг тока базы установим 25 мкА.

Разместим используемый транзистор BFP640 . Его нелинейная модель (работающая, в том числе, по постоянному току) расположена в палитре Infineon RF Components. У данной модели также присутствует два эмиттера, их обоих надо будет подключить на землю.

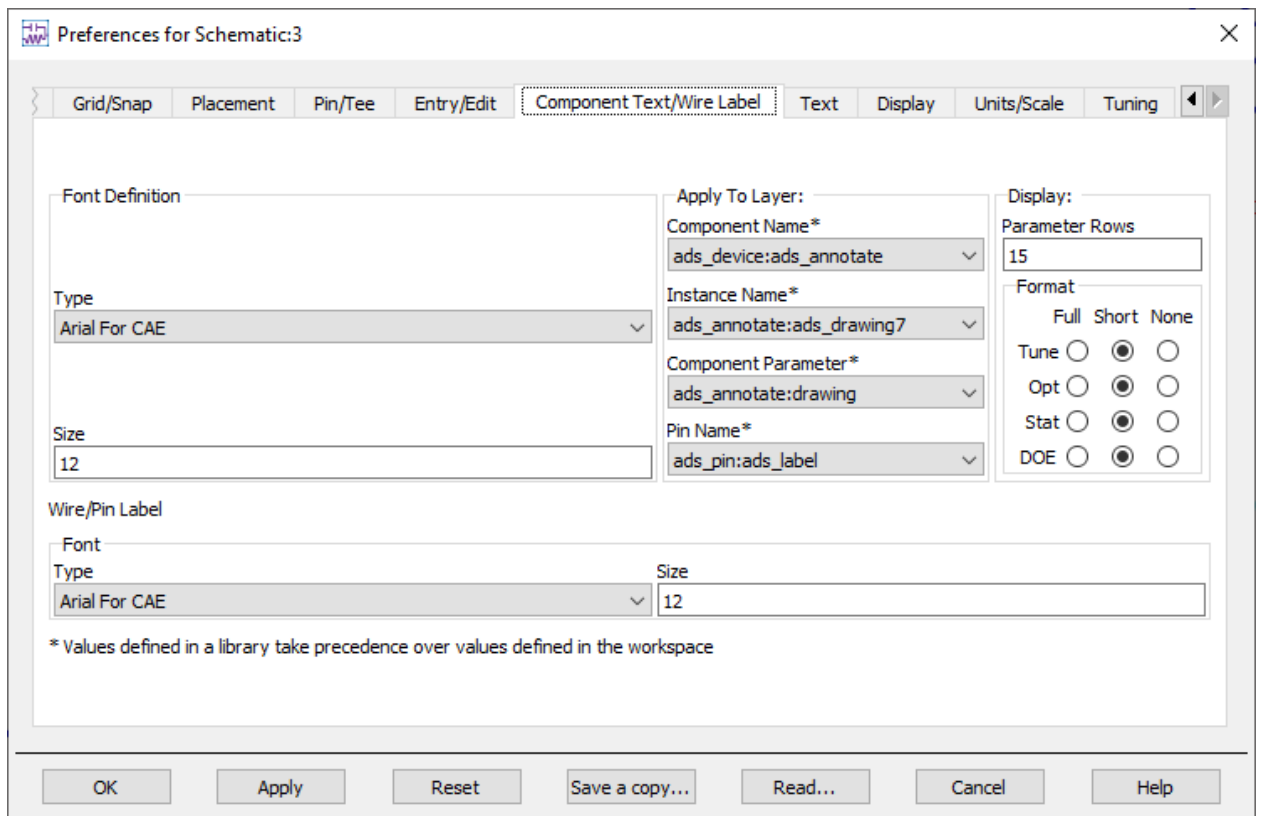
Напряжение коллектор-эмиттер будет создавать источник постоянного напряжения V\_DC , а ток базы источник постоянного тока I\_DC . Оба компонента расположены в палитре Sources-Time Domain. Их направление определяется использованием NPN-транзистора BFP640. Обозначим источник постоянного напряжения как 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 в транзистор, то отзеркалим его слева направо по команде Edit – Mirror About Y  (или ПКМ - Mirror About Y, или SHIFT+Y).



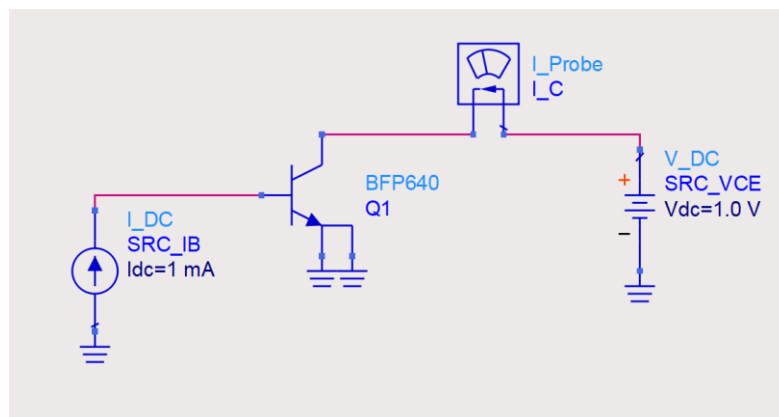
В ADS использован не самый удачный шрифт по умолчанию (Arial For CAE). В нем графически плохо различимы I и l, 0 и O, одинаковые по начертанию русские и английские символы и пр. В настройках Options – Preferences на вкладках Component Text/Wire Label и Text можно для схем настроить более удачный шрифт.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



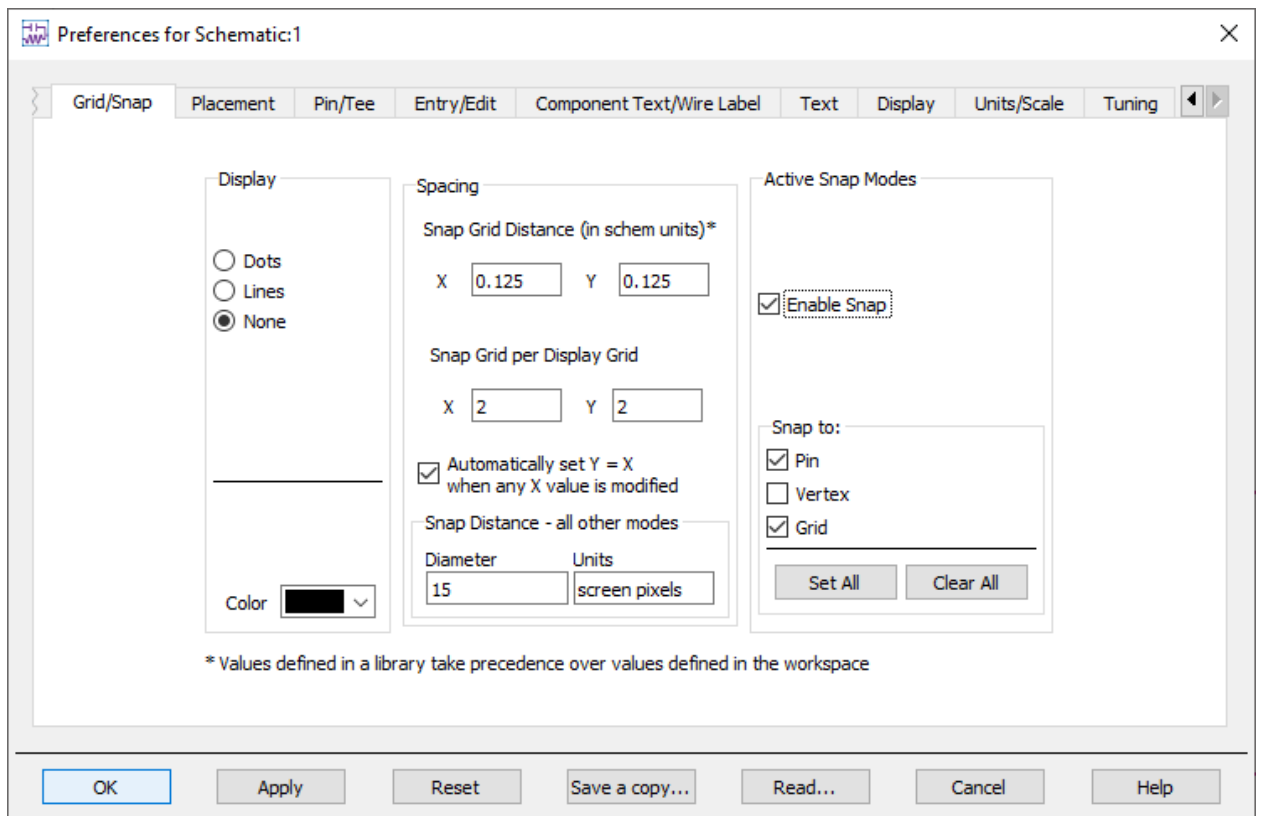
Соединим цепи как показано на рисунке и заземлим источники и эмиттеры транзистора. Земляной контакт ставится по команде Insert – Ground




. Цепи ставятся по команде Insert – Wire  (Ctrl+W).



При работе со схемой может начаться странное поведение, когда цепи и компоненты перестают размещаться по сетке, цепи не привязываются к выводам компонентов и пр. Связанно это с тем, что и для схемы, и для топологии есть единый шоткат CTRL+E, который включает/выключает привязку по сетке и пинам. Проверить текущее состояние привязки можно в настройках Options – Preferences, вкладка Grid/Span, галка Enable Snap. Там же в группе Display можно выбрать стиль отображения сетки. Т.к. для схем отображение сетки не имеет особого смысла, ее отображение часто отключают (выбор Display = None).



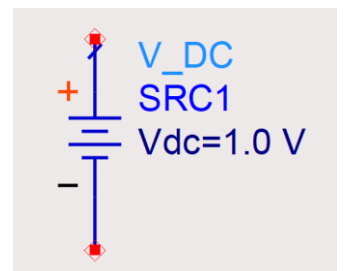
В ADS нужно в схему добавлять контроллер выбранного вида симуляции. Для режима симуляции по постоянному току используется контроллер DC . Находится он в палитре Simulation-DC.

Каждый компонент после установки в схему рядом со своим обозначением имеет несколько строк:

- Светло-голубая «V\_DC» строка (при настройках цветов по умолчанию) – это краткое имя компонента (аналогично поиску в панели Part).

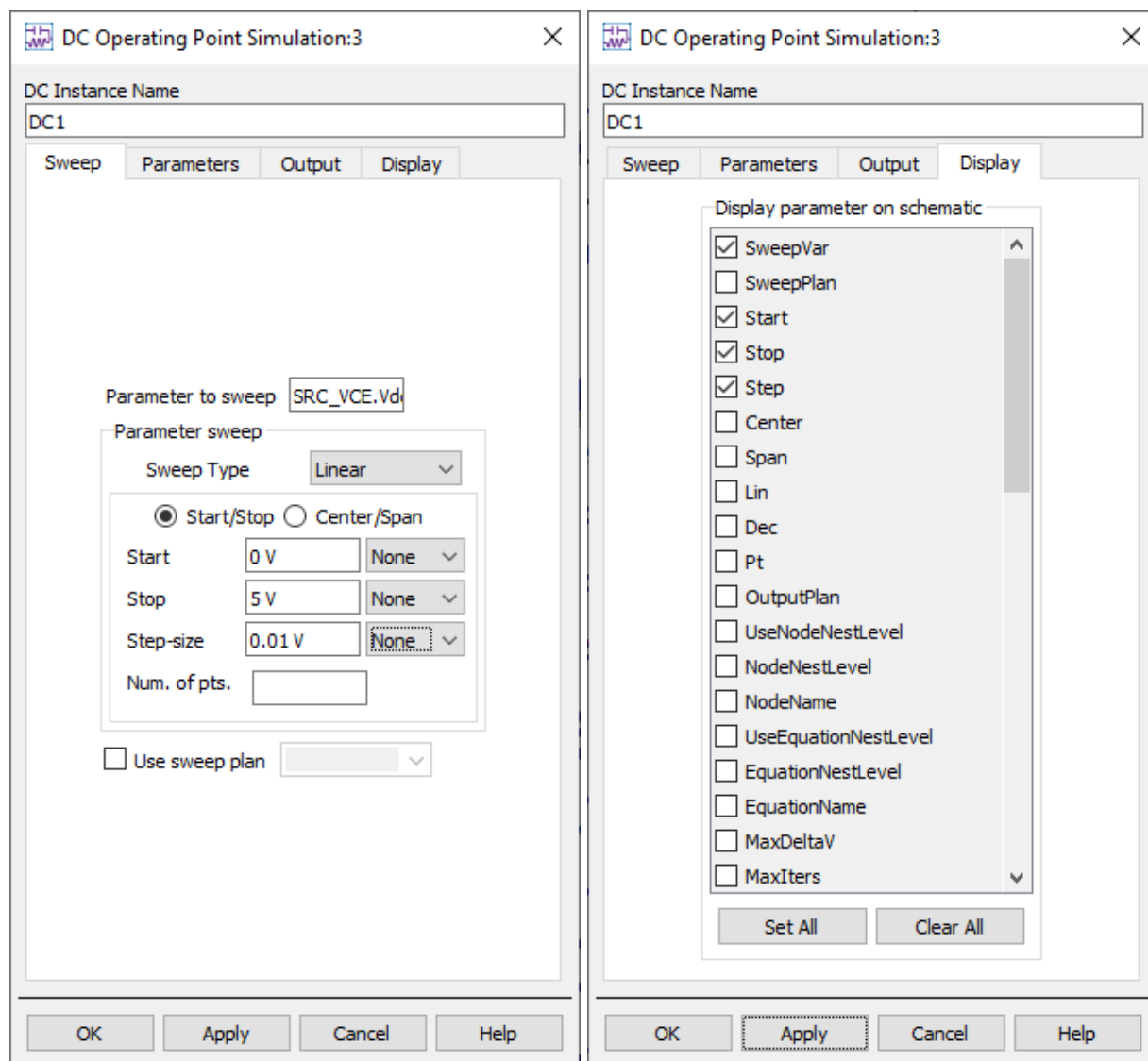
- Синяя строка «SRC1» - позиционное обозначение компонента (Instance name, RefDes). Обычно имеет формат «Имя + порядковый номер». Можно свободно менять для удобства.

- Одна или несколько темно-синих строк («Vdc=1.0 V») – это вынесенные для отображения в схеме параметры компонента.



Параметры можно задавать, как находясь внутри компонента (ДЛКМ по компоненту или ПКМ – Component – Edit Component Parameters), так и снаружи. Снаружи можно менять только те параметры, которые вынесены для отображения.

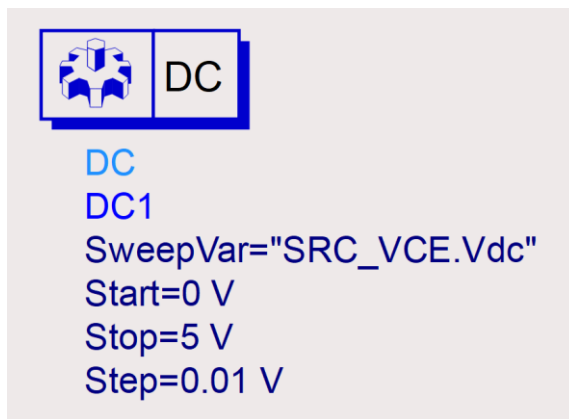
У контроллеров симуляции параметров обычно очень много и для отображения на схему по умолчанию вынесены только самые типовые. При редактировании параметров внутри блока они сгруппированы по вкладкам.





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.




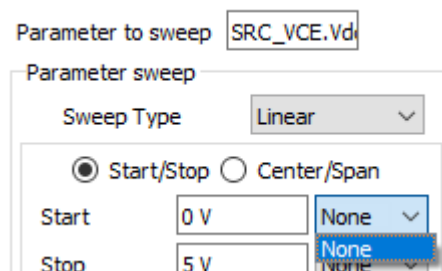



! При указании переменной для свипа можно использовать как отдельную переменную в схеме (заданную через блок типа VAR ) , либо напрямую обращаясь к свойству компонента через синтаксис *ИмяКомпонента.ИмяПеременной*

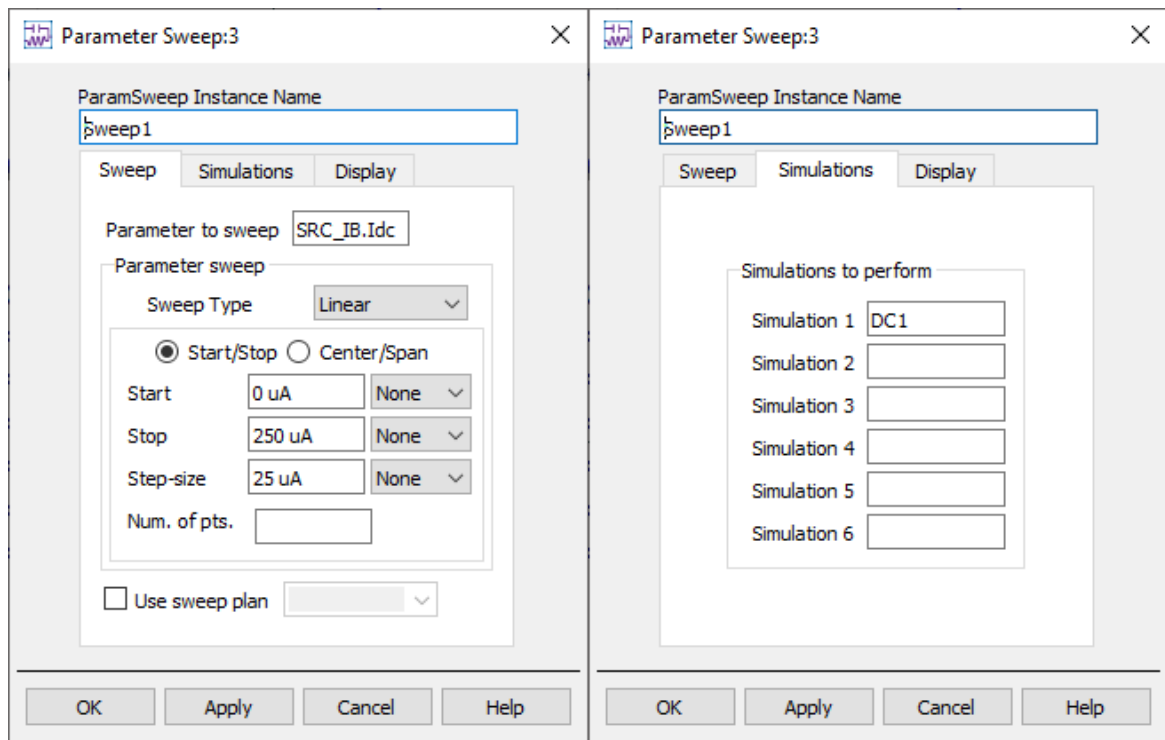
 При внесении строк в переменные (а имя переменной для свипа имеет вид строки) находясь внутри контроллера симуляции – имя указывается без кавычек. А при редактировании на схеме – оборачивается в двойные кавычки.

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. сейчас задан свип только по одной независимой переменной 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 компонентов из библиотек 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  в палитре Infineon RF Components.

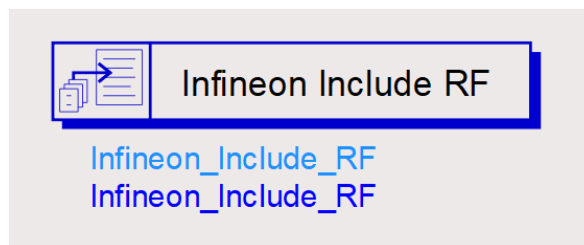
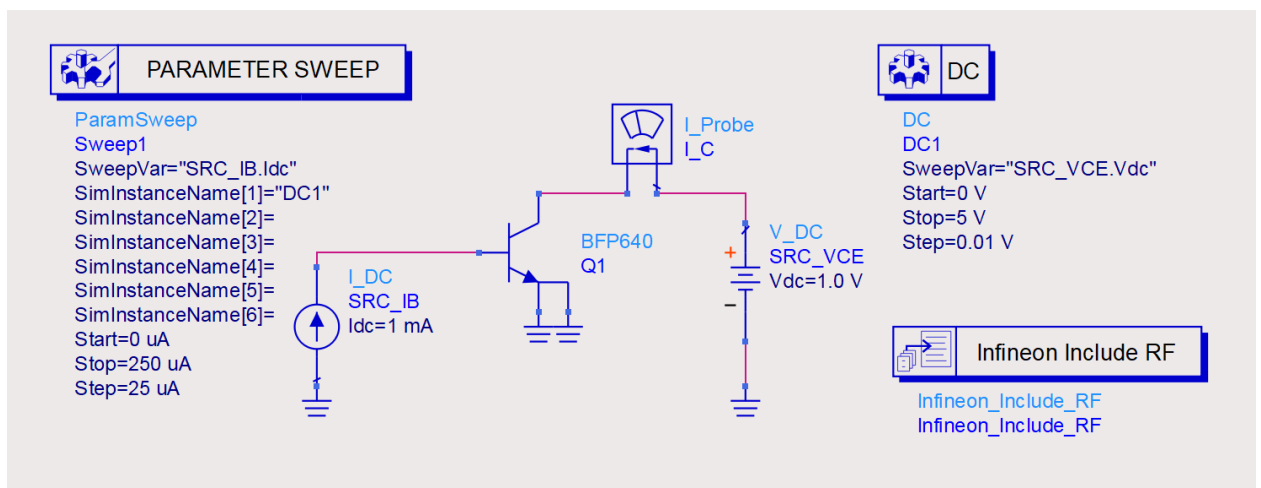



Схема для моделирования собрана. В общем виде она должна выглядеть следующим образом.



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

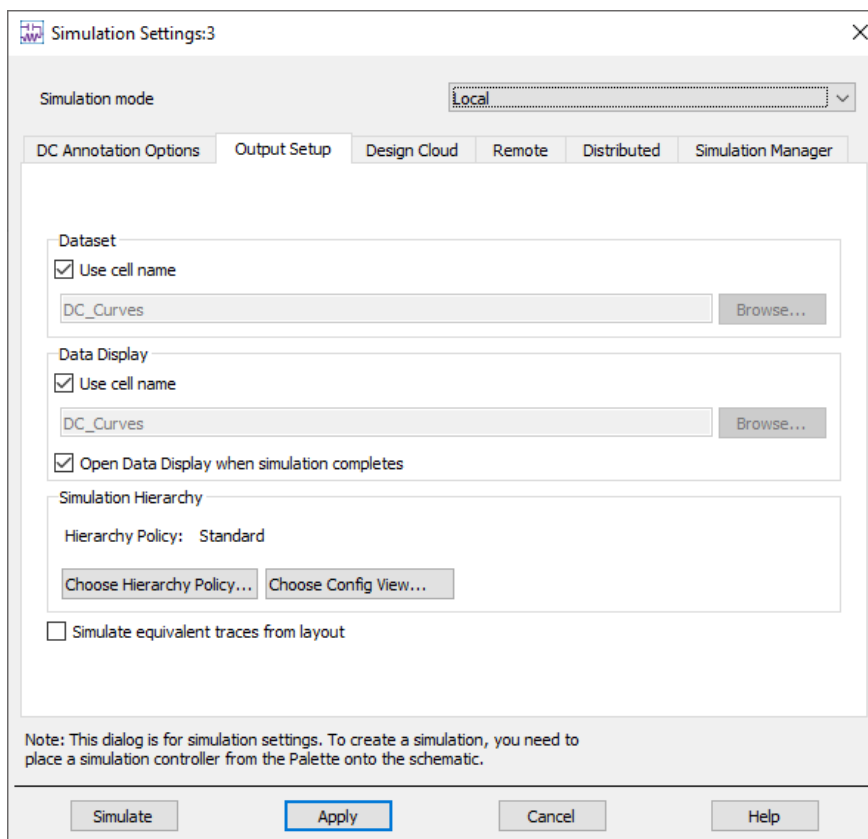


При наличии свипа может возникнуть ошибка о том, что значение независимой переменной по умолчанию недопустимо, даже если в диапазон свипа это значение не попадает. ADS при начале симуляции проверяет допустимость значения по умолчанию. Например, если в схеме DC\_Curves оставить значение  $SRC\_IB.Idc = 1\text{ A}$  (которое не попадает в диапазон свипа), это может привести к ошибке.

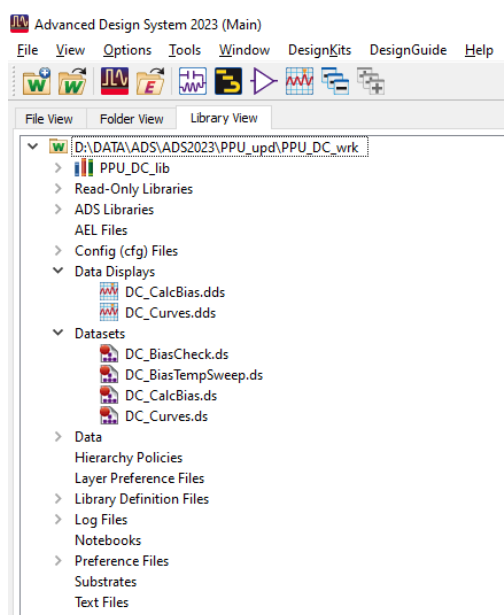
Во время симуляции открывается окно логгера симуляций hpeesofsim. В него вводится текущий лог симуляции, а также вся необходимая информация при наличии предупреждений и ошибок.

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.

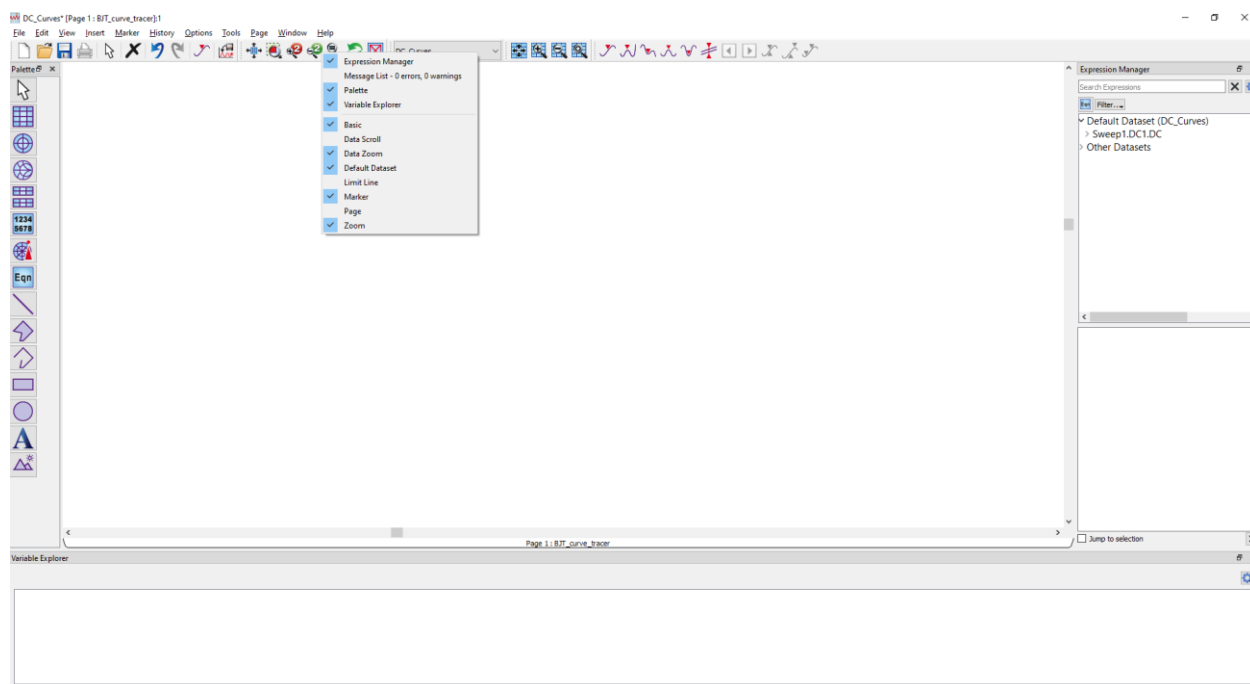
Можно настроить так, чтобы схема писала результаты в разные датасеты. В какой датасет будет писаться результат расчета и будет ли автоматом создано окно графиков, определяется настройками Simulate – Simulation Setting на вкладке Output Setup.



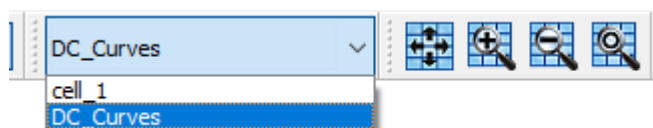
Все созданные в текущем проекте датасеты и окна графиков можно увидеть в основном окне ADS в режиме отображения Library View в списках Datasets и Data Displays. Физически файлы датасетов хранятся в подпапке \data. Файлы окон графиков в корневой папке проекта \_wrk.




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

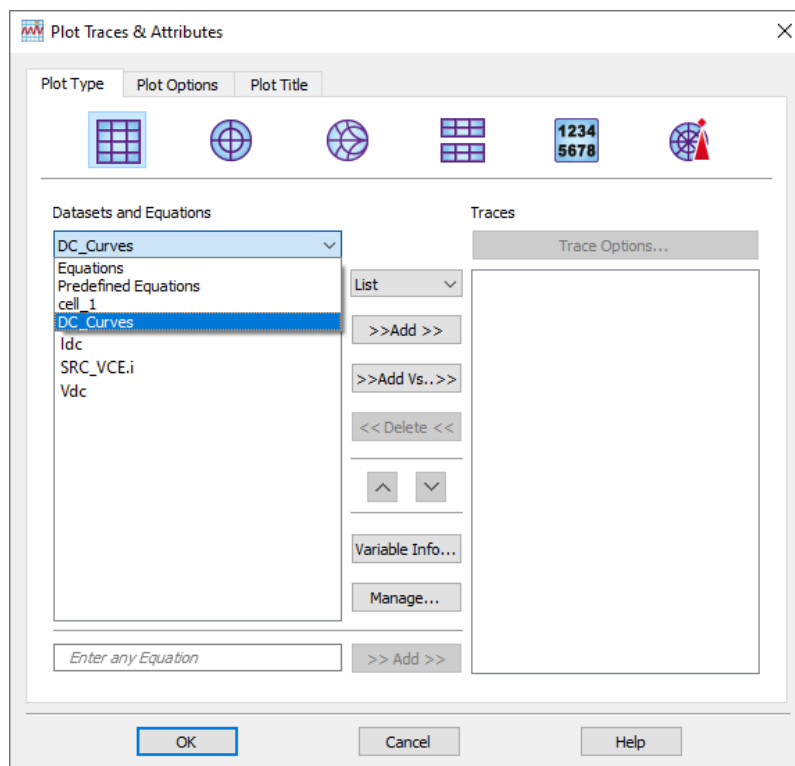


Привязанный к области графиков датасет выбирается в выпадающем списке в тулбаре Default Dataset.

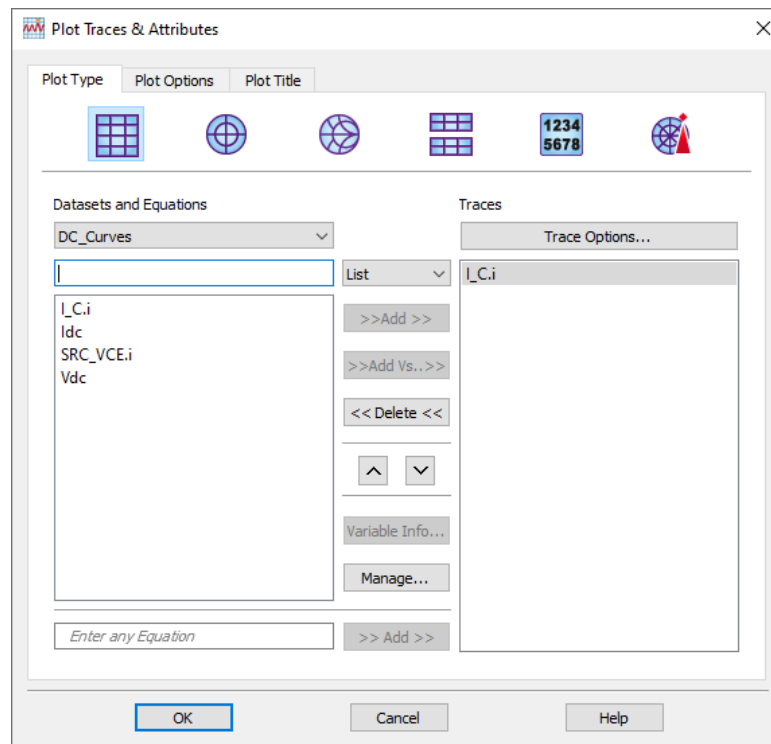


Создадим прямоугольное полотно для семейства графиков статических характеристик. Полотно графика создается из боковой панели Palette. Для прямоугольного полотна это .

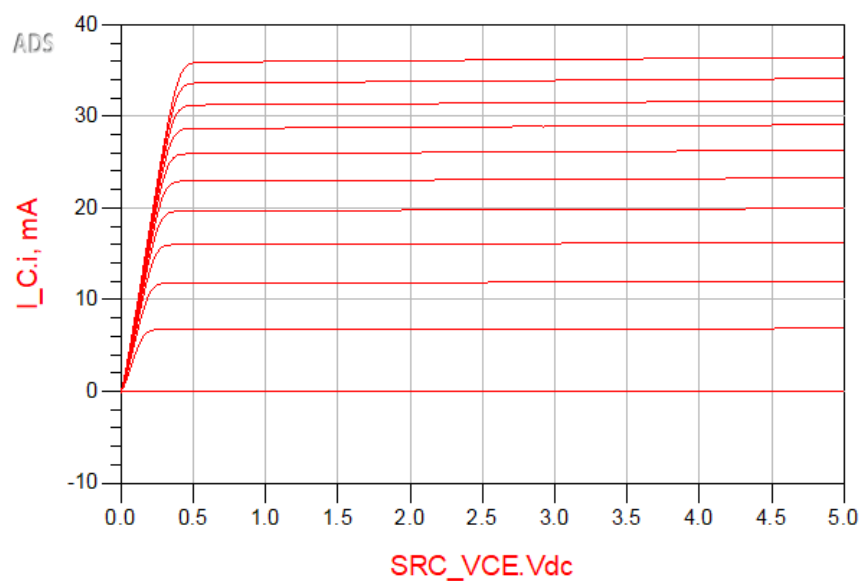
После размещения полотна графика, откроется окно Plot Traces & Attributes, где будет предложен выбор данных для отображения на полотне. В верхней части под выбором типа полотна графика есть выпадающий список «Datasets and Equations». Он позволяет на одно полотно выводить графики из разных датасетов.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

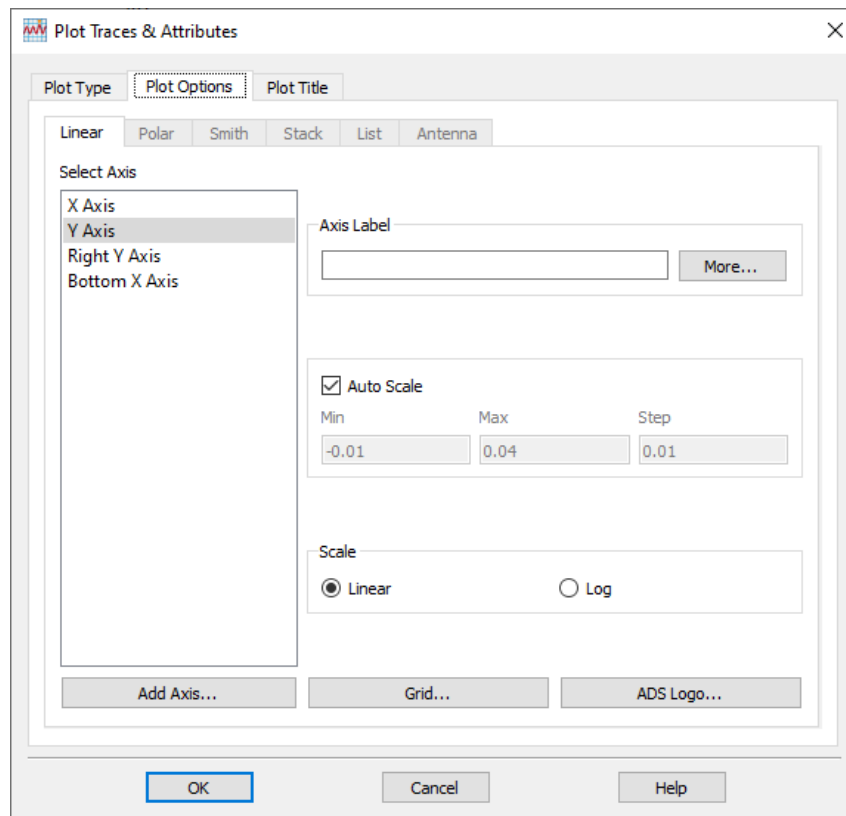


После нажатия на «ОК» появился прямоугольное полотно графиков.



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.).



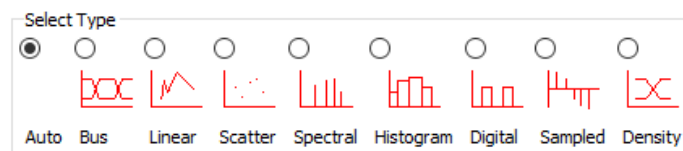
На вкладке Plot Title можно задать подпись всему графику.

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).

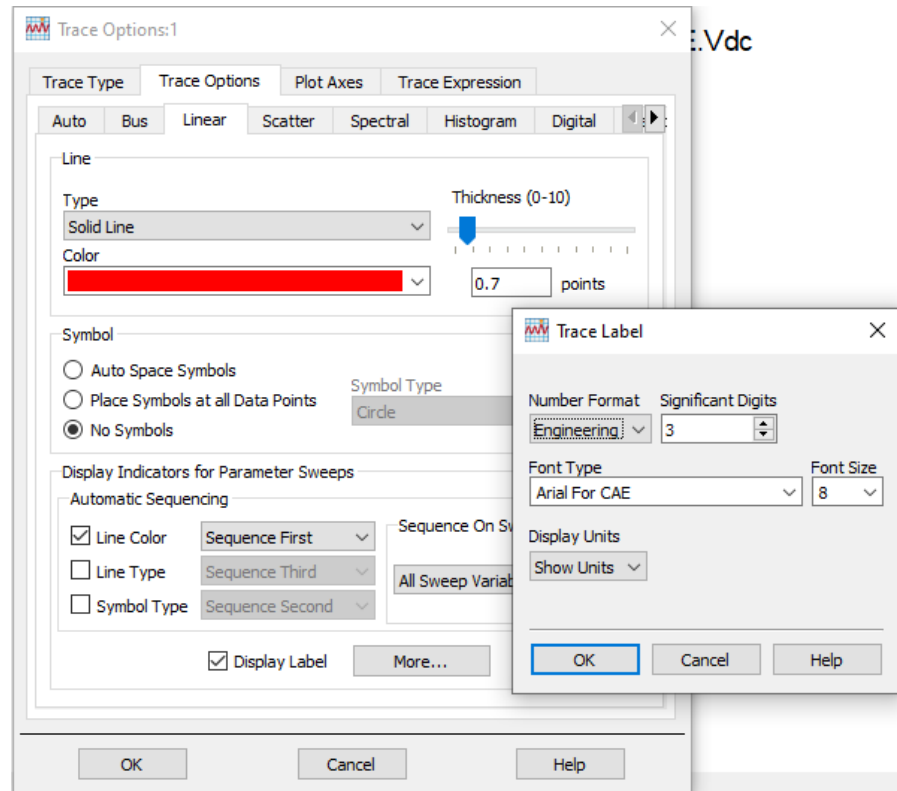
Графикам в зависимости от стиля полотна можно назначать допустимые виды (линии, точки, спектральный, гистограмма и пр.). Определяется на вкладке Trace Type.



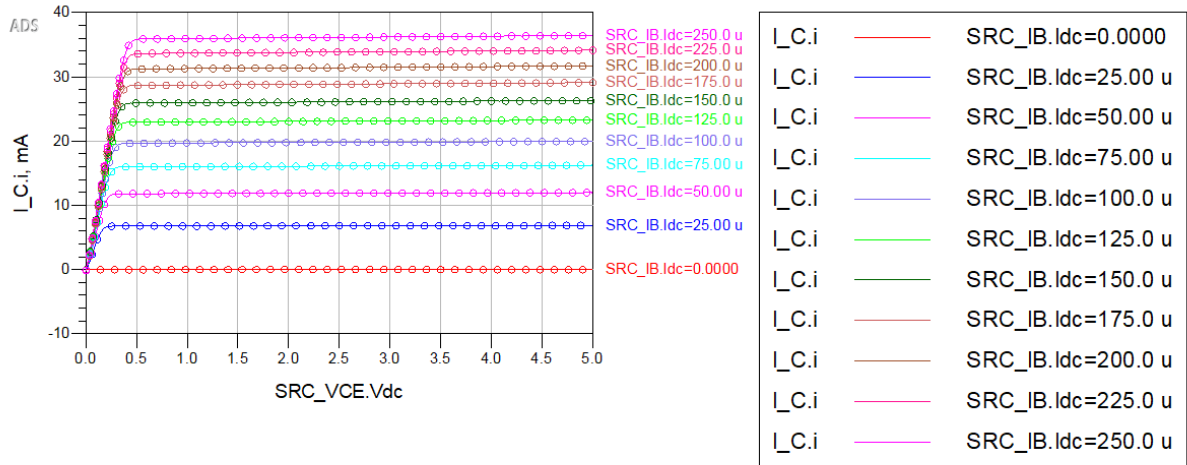
На вкладке Trace Options идут управление выбранным стилем графика (толщина и стиль линии, метки, дополнительная цветовая индикация для многомерных результатов и пр.).

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.).



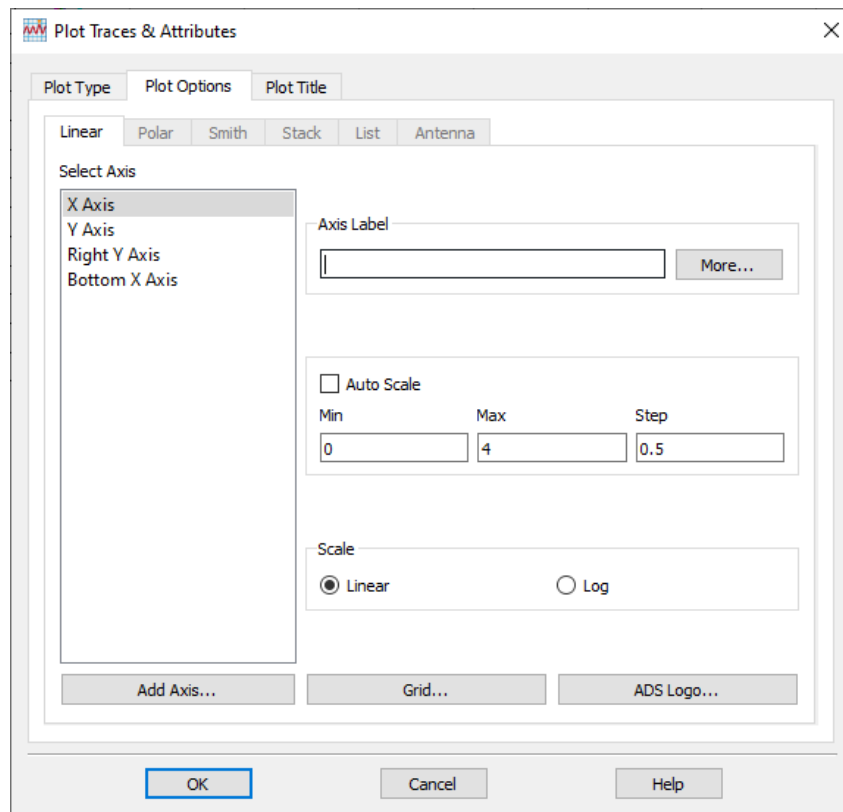
Для отображения легенды в отдельном окне нужно в свободном месте полотна ПКМ – Insert Legend. У этого окна также есть настройки численных форматов.



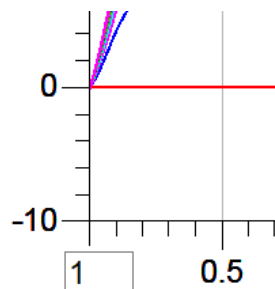
Управлять диапазонами осей можно несколькими путями:

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

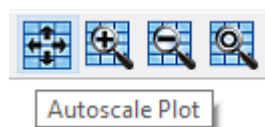




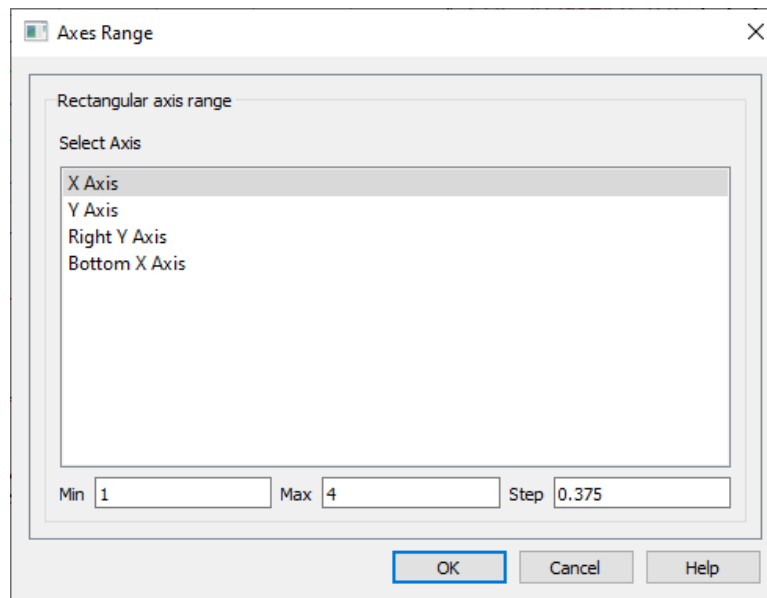
2. На уровне окна графика (щелкнув по крайним значениям X- и Y-диапазонов и введя нужное число).




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

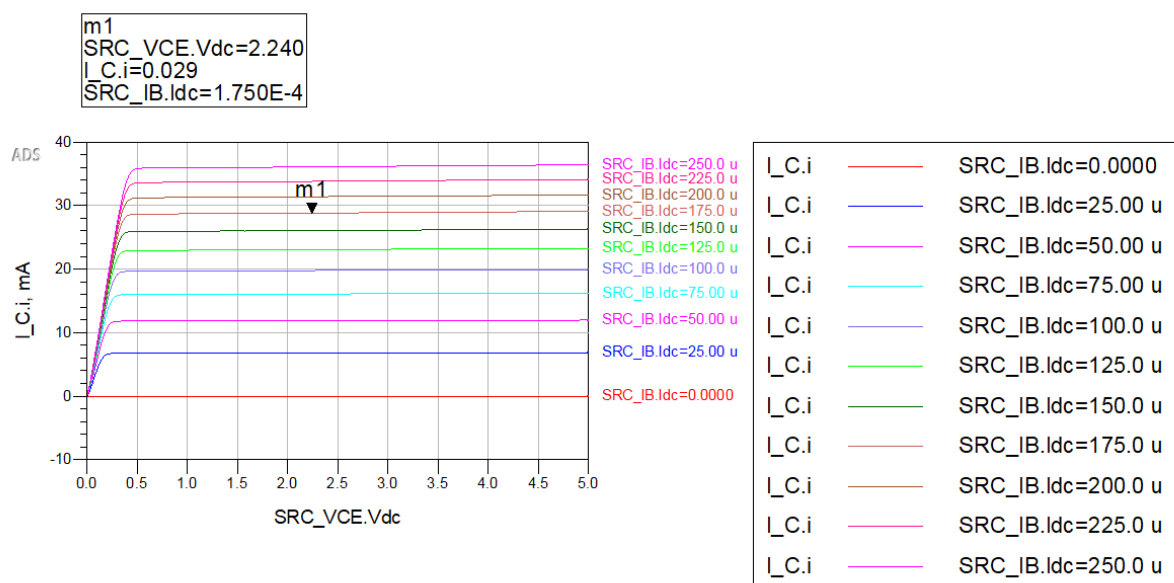



4. В свободном месте полотна ПКМ – Axes – Range



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 содержанием этого маркера.

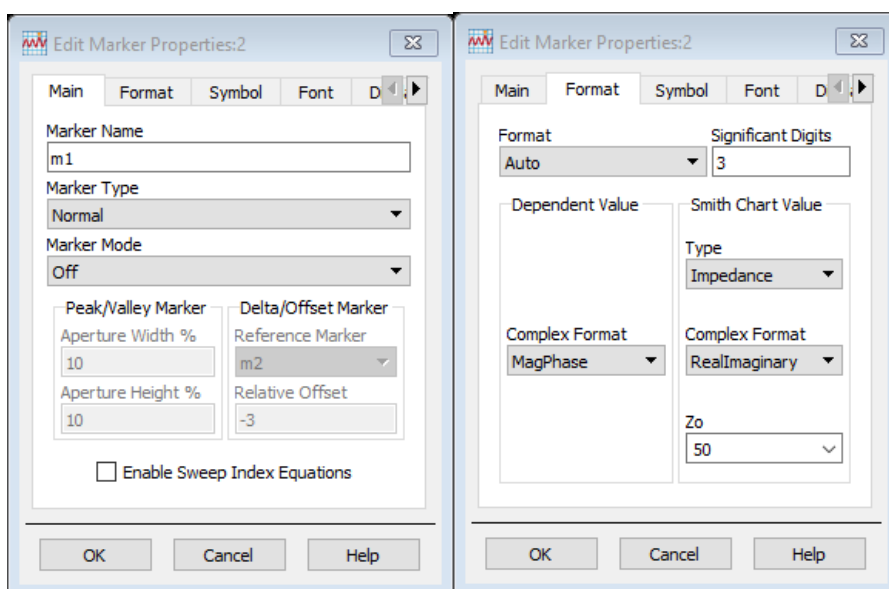


Маркер можно двигать как мышкой, так и по клавишам «Влево/Вправо», а также по командам  из тулбара Marker. Маркер двигается только по точкам, существующим в датасете (пропуская промежуточные интерполированные для непрерывного отображения участка).


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

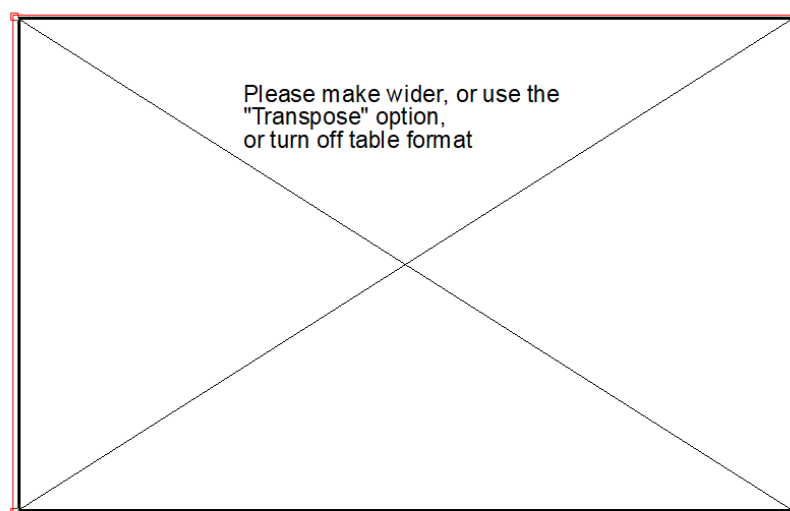
```
m1
SRC_VCE.Vdc: 2.310
I_C.i=0.029
SRC_IB.Idc=1.750E-4
```

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.).

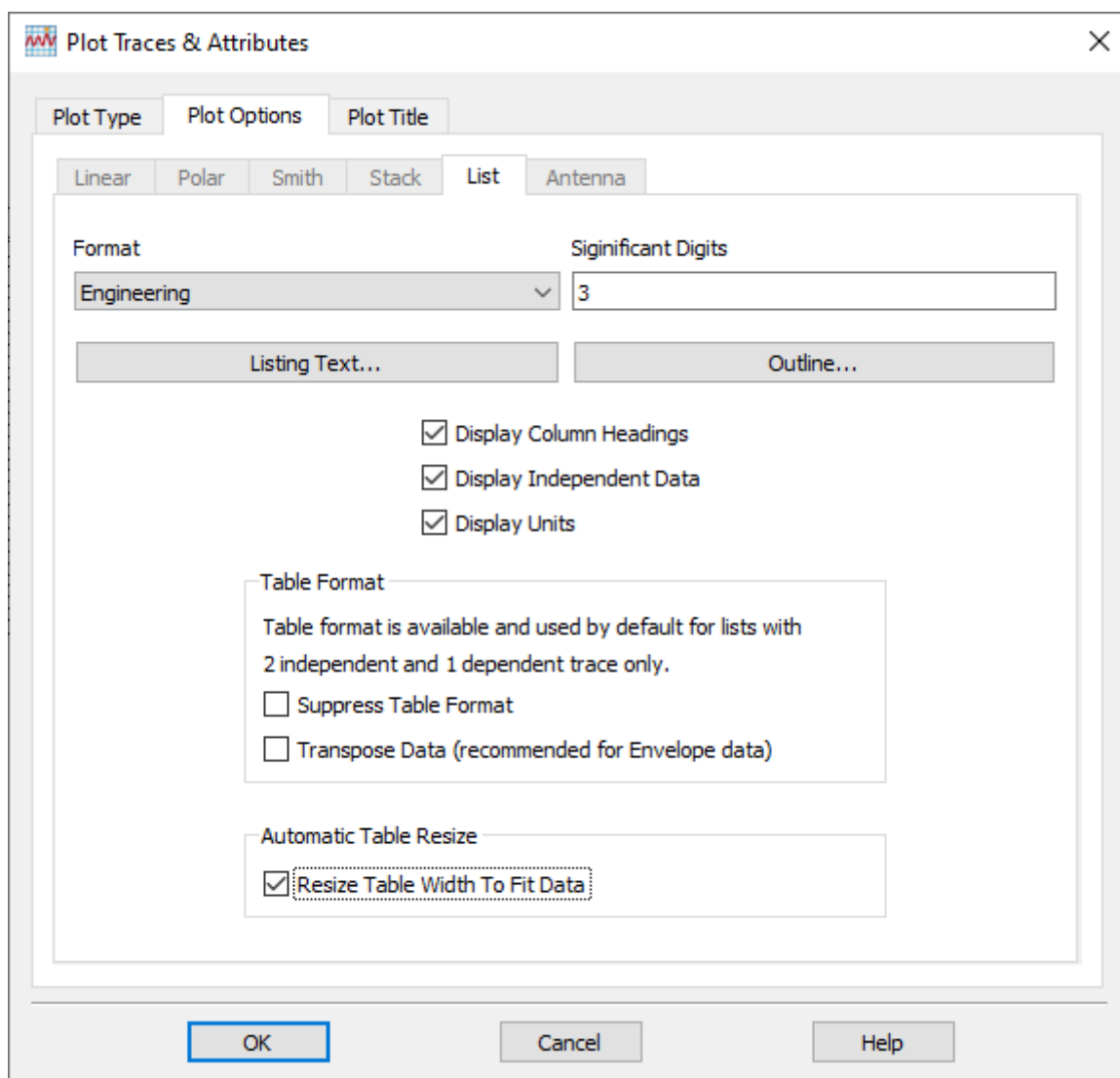


На вкладке Format определяется формат отображения чисел (число знаков после запятой, стиль отображения мантиссы и пр.), в том числе комплексных чисел (амплитуда/фаза в градусах, амплитуда/фаза в радианах, действительная/мнимая часть и пр.) и связанных данных на диаграмме Смита.

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	19.94 fA	299.9 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	2.505 mA	2.954 mA	3.255 mA	3.448 mA	3.599 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	4.233 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	5.659 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	5.794 mA	6.599 mA	7.125 mA	7.503 mA	7.793 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	7.359 mA	7.935 mA	8.345 mA	8.694 mA	8.919 mA	9.129 mA	9.307 mA	9.460 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 свипом относительно младшей независимой переменной (SRC\_CE.Vdc в текущем случае), а значения второй и последующих независимых переменных становятся подзаголовками (в данном случае, SRC\_IB.Idc).

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

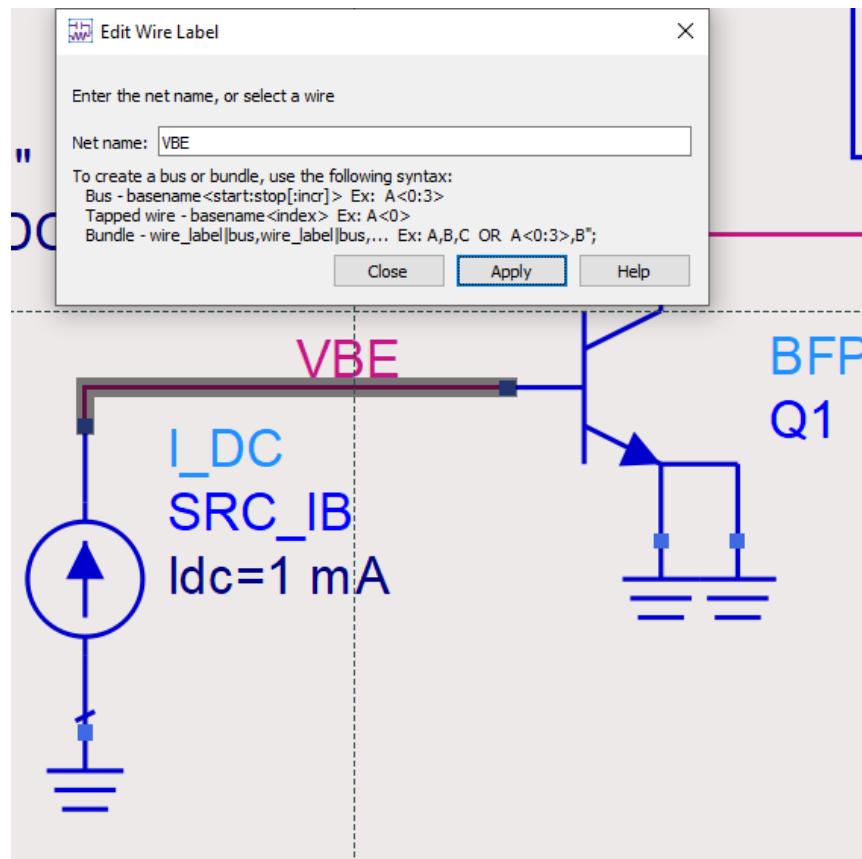
Для текущего проекта выбрана рабочая точка  $V_{CE} = 2$  В,  $I_C = 20$  мА. По таблице или с графика можно определить, что эта точка соответствует току базы  $I_B \approx 100$  мкА.

В последних версиях ADS появились новые приемы быстрого создания, настройки и контроля отображения результатов, выражений, графиков и прочих элементов, 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 [12, 13]

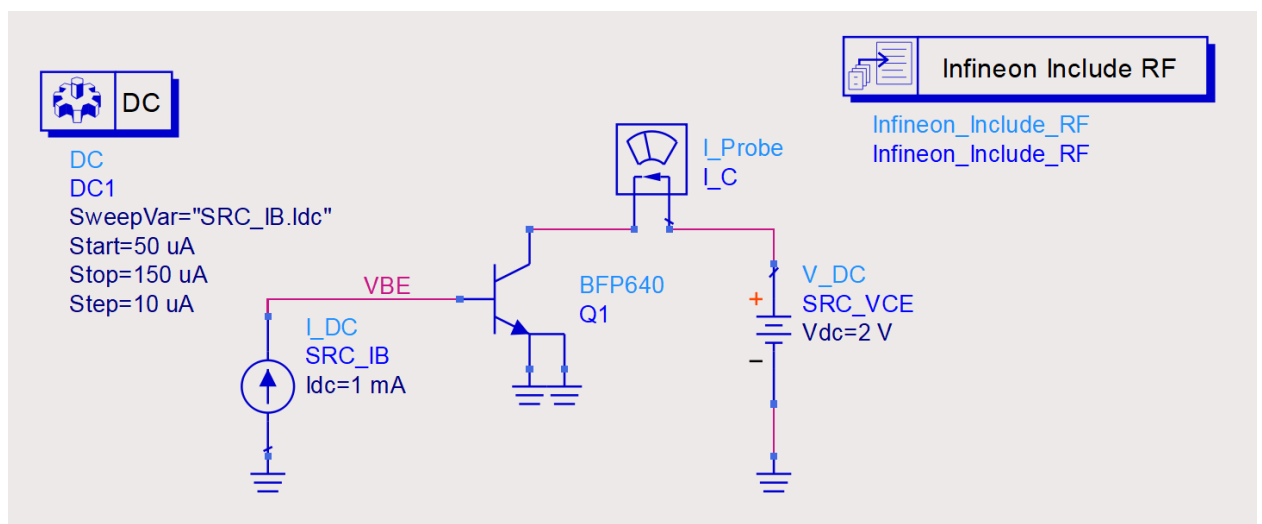
### Схема расчета цепи питания и смещения

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. Именование 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. В контроллере DC1 меняем sweep на sweep тока базы SRC\_IB.Idc от 50 мкА до 150 мкА с шагом 10 мкА (чтобы попасть на ранее определенное  $I_B = 100 \mu\text{A}$ ). Устанавливаем напряжение источника SRC\_VCE равным 2 В.



Симулируем.

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

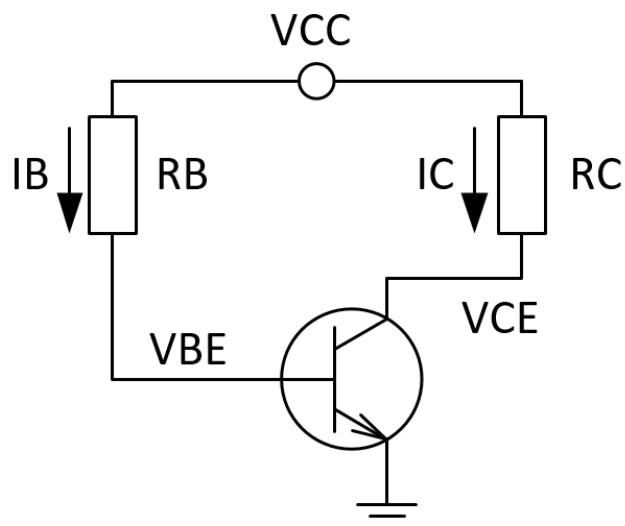
SRC_IB.Idc	I_C.i	VBE
50.00 u	11.87 mA	806.3 mV
60.00 u	13.63 mA	811.6 mV
70.00 u	15.29 mA	816.2 mV
80.00 u	16.86 mA	820.2 mV
90.00 u	18.34 mA	823.8 mV
100.0 u	19.76 mA	827.1 mV
110.0 u	21.12 mA	830.0 mV
120.0 u	22.42 mA	832.8 mV
130.0 u	23.67 mA	835.3 mV
140.0 u	24.88 mA	837.7 mV
150.0 u	26.05 mA	839.9 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 +1,5..2 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 необходимого  $V_{CE} = 2$  В пусть питание всей схемы будет от  $V_{CC} = 5$  В.


Выбранная схема питания и смещения по постоянному току выглядит, как показано ниже.



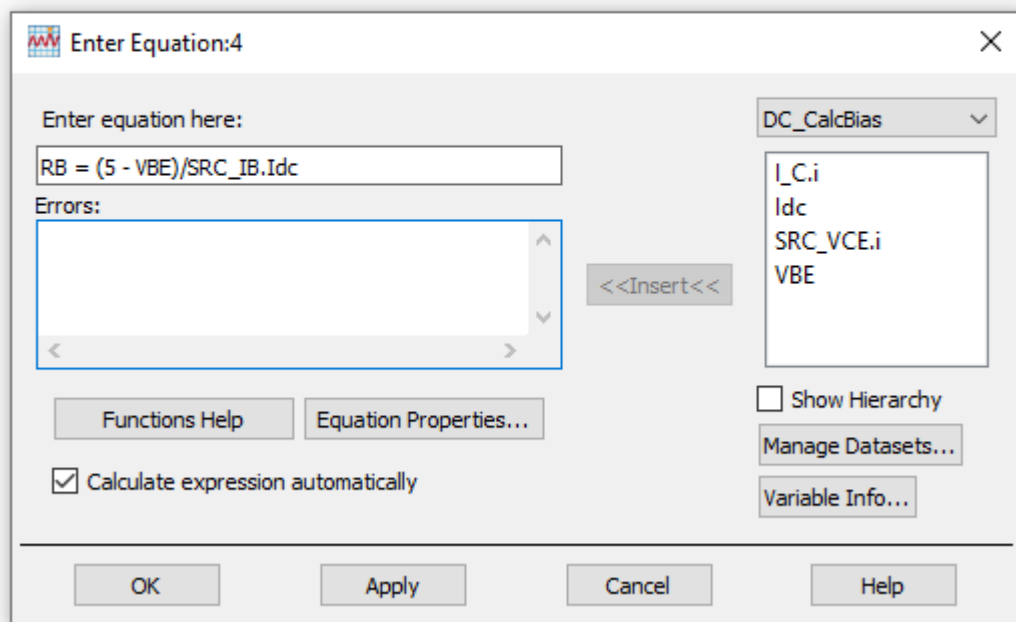
Отсюда можно посчитать номиналы сопротивлений как  $R_C = (V_{CC} - V_{CE}) / I_C$  и  $R_B = (V_{CC} - V_{BE}) / I_B$ .

$R_C = (5 - 2) / 0,02 = 150$  Ом, и не зависит от  $I_B$ . Для расчета  $R_B$  воспользуемся возможностями выражений в области графиков ADS.



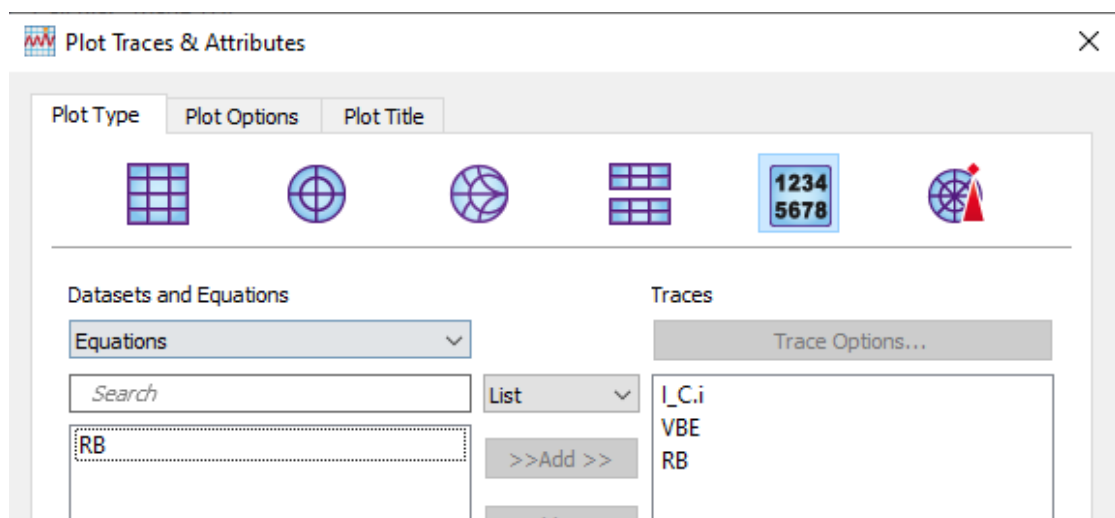
Создаем выражение по Insert – Equation . В открывшемся окне пишем выражение следующего вида  $RB = (5 - VBE)/SRC\_IB.Idc$ , где 5 – это напряжение VCC.


**Eqn**  $RB = (5 - VBE)/SRC\_IB.Idc$



В данном окне показываются найденные ошибки при наборе выражений, а также информациях 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 RB



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

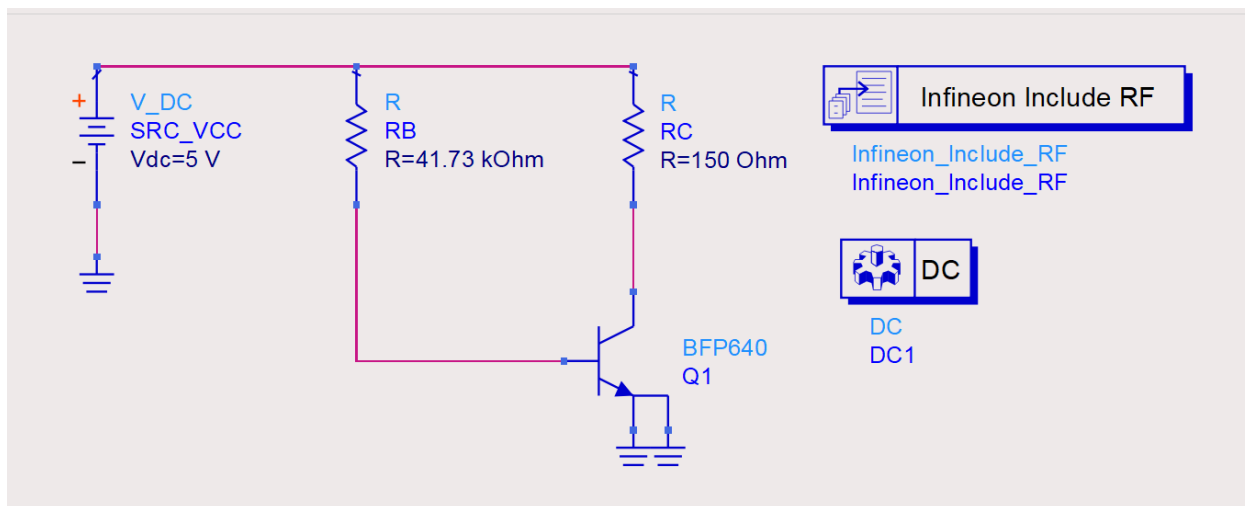
SRC	IB.Idc	I_C.i	VBE	RB
	50.00 u	11.87 mA	806.3 mV	83.87 k
	60.00 u	13.63 mA	811.6 mV	69.81 k
	70.00 u	15.29 mA	816.2 mV	59.77 k
	80.00 u	16.86 mA	820.2 mV	52.25 k
	90.00 u	18.34 mA	823.8 mV	46.40 k
	100.0 u	19.76 mA	827.1 mV	41.73 k
	110.0 u	21.12 mA	830.0 mV	37.91 k
	120.0 u	22.42 mA	832.8 mV	34.73 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

RB определен равным 41,73 кОм.

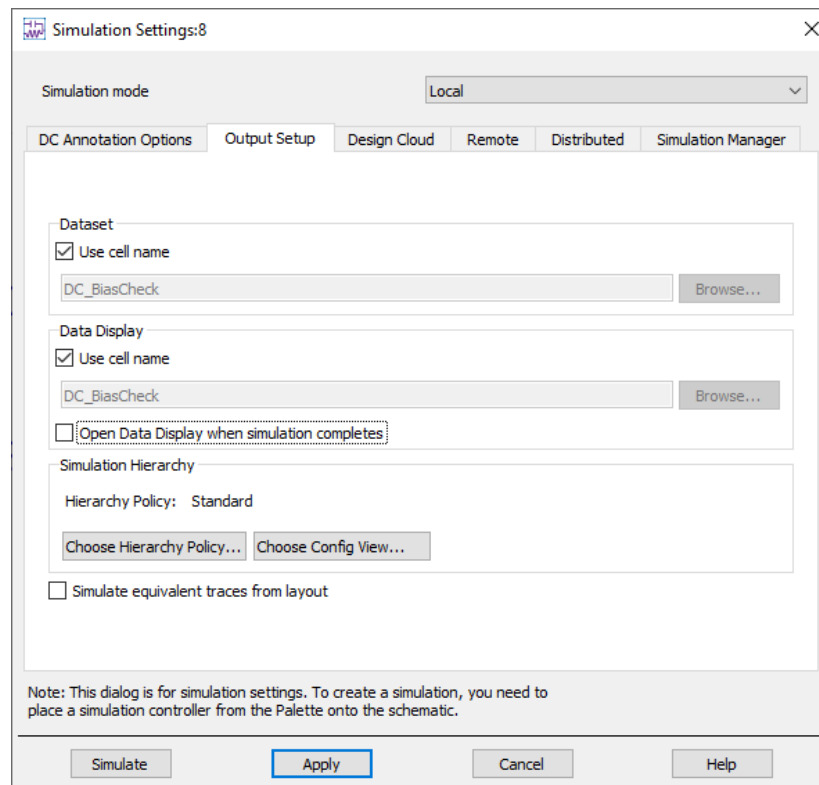
### Проверочная схема питания и смещения



Создадим проверочную схему DC\_BiasCheck, в которой проверим все наши выкладки и при необходимости подстроим номиналы резисторов, привязав их к ряду E24 (10%), E48 (5%) или E96 (2,5%).

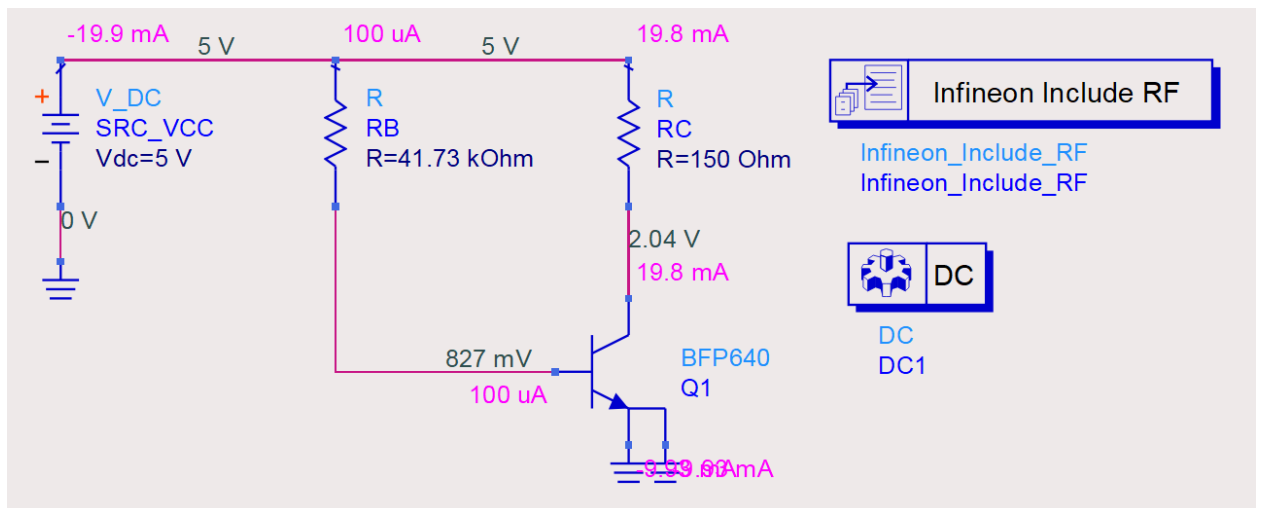
Т.к. расчет идет по одной точке, то в контроллере DC1 не должен быть настроен свип (параметр Parameter to sweep пустой).



Для отображения токов и напряжений воспользуемся аннотацией на схеме без использования графиков. 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.



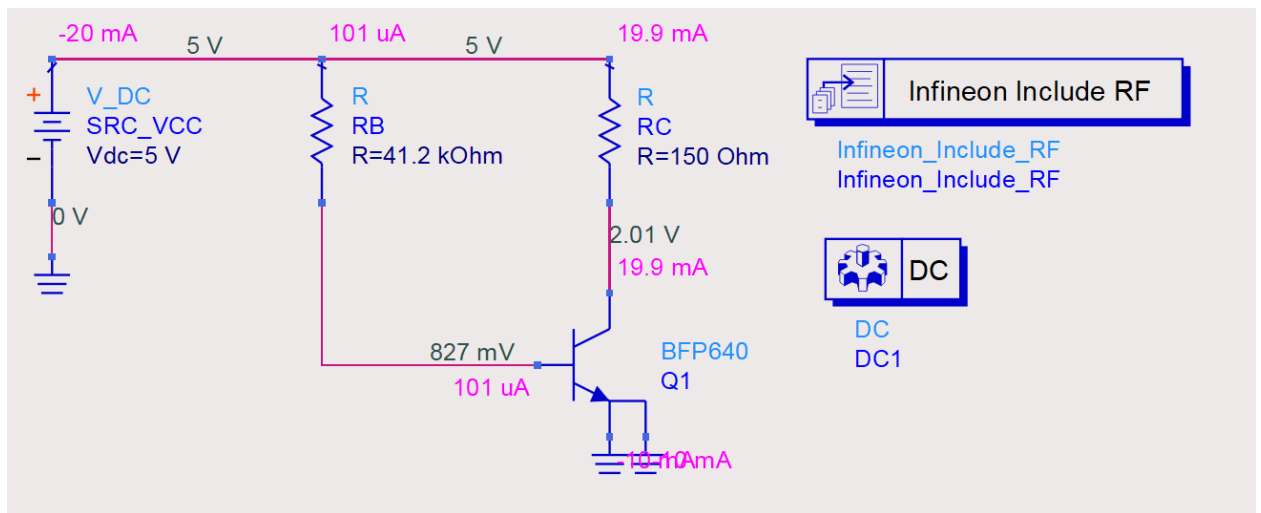
Получаемые значения  $V_{CE} = 2,04 \text{ V}$  и  $I_C = 19,8 \text{ mA}$  близки к требуемым  $2 \text{ V}@20 \text{ mA}$ .

Далее необходимо округлить расчетные  $R_B$  и  $R_C$  к существующим рядам номиналов. Ряды стандартных номиналов обозначаются в формате E24, E48 и пр., где цифра – число экспоненциально распределенных значений в пределах декады. Ряд E24 имеет шаг  $\sim 10\%$ , E48  $\sim 5\%$ , E96  $\sim 2,5\%$ . При выборе компонентов сначала стоит смотреть более грубые ряды, переходя к более точным только по необходимости. Значения рядов приведены в таблице 1.

**Таблица 1. Ряды номиналов E24, E48 и E96**

<b>Ряд E24</b>							
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
<b>Ряд E48</b>							
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
<b>Ряд E96</b>							
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

RC = 150 Ом точно попадает в ряд E24. А вот RB = 41,73 кОм далековато от ряда E24, округление до ближайших в этом ряду значений 39 кОм и 43 кОм уводит рабочую точку далеко от желаемой (не более 2% от желаемого VCE). Ближайшие из ряда E48 40,2 кОм и 42,2 кОм также не подходят. Из ряда E96 ближайший номинал 41,2 кОм. Его использование дает отличный результат.

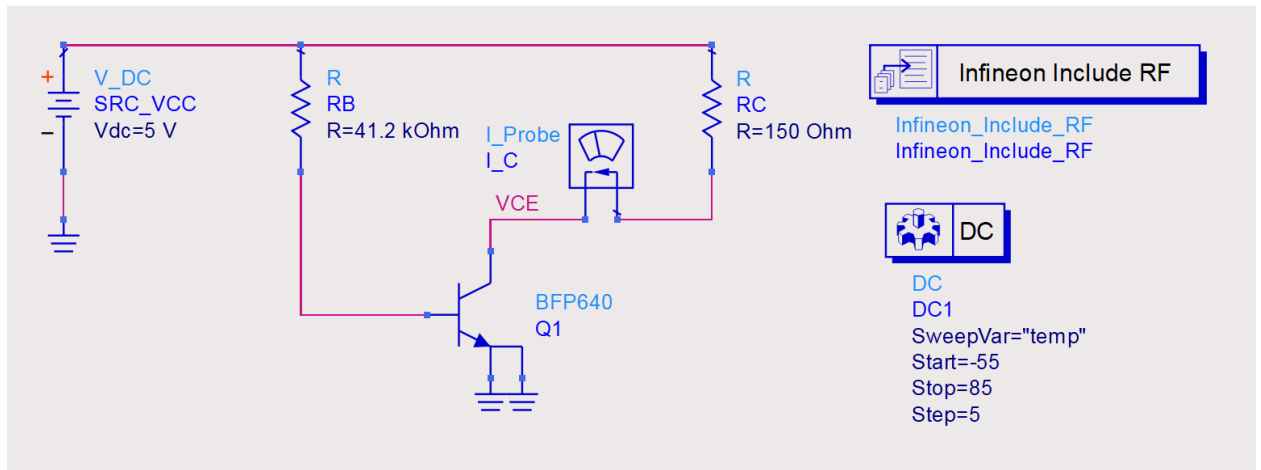


Цепи питания и смещения по постоянному току посчитаны. При дальнейшем проектировании возможны только минимальные правки по результатам проектирования ВЧ-цепей для учета возможных дополнительных омических потерь в них.

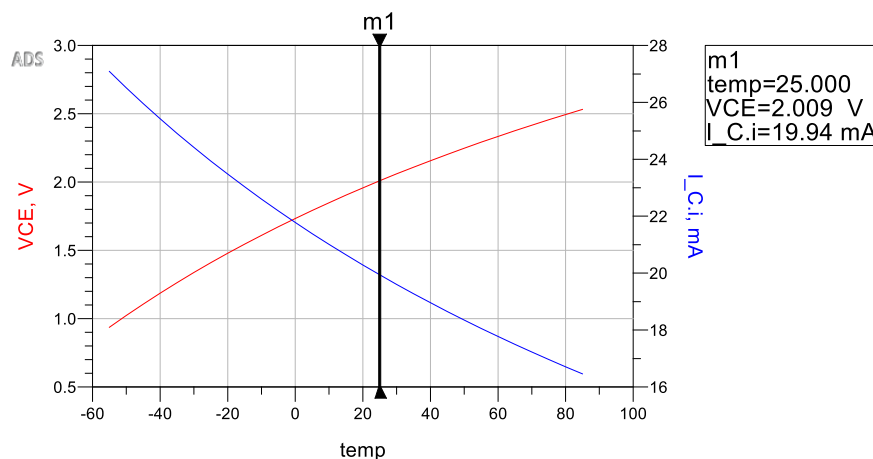
## Анализ температурной зависимости цепей питания и смещения


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, которая задается в градусах Цельсия. Просвипаем ее в контроллере DC1 в диапазоне от -55°C до 85°C с шагом 5°C.



В области графиков выведем зависимости VCE и IC на один график, при этом IC 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.

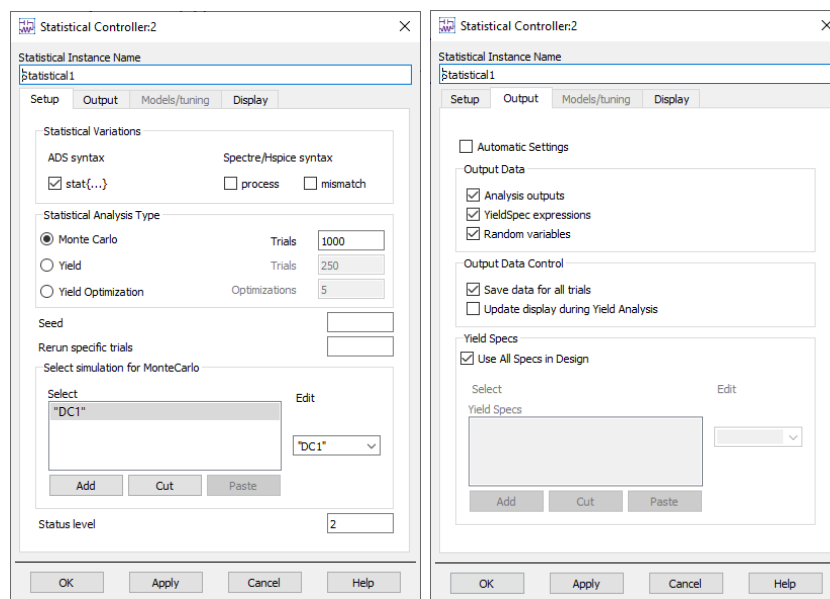
## Параметрическая чувствительность цепей питания и смещения

Проведем анализ чувствительности цепи питания и смещения на вариации номинала питания VCC и резисторов цепи RB и RC. Соберем схему DC\_BiasSens. В ней будем смотреть только чувствительность. Процент выхода годных смотреть не будем.

В контроллере DC расчет должен идти на одной точке, т.е. свип отключён.

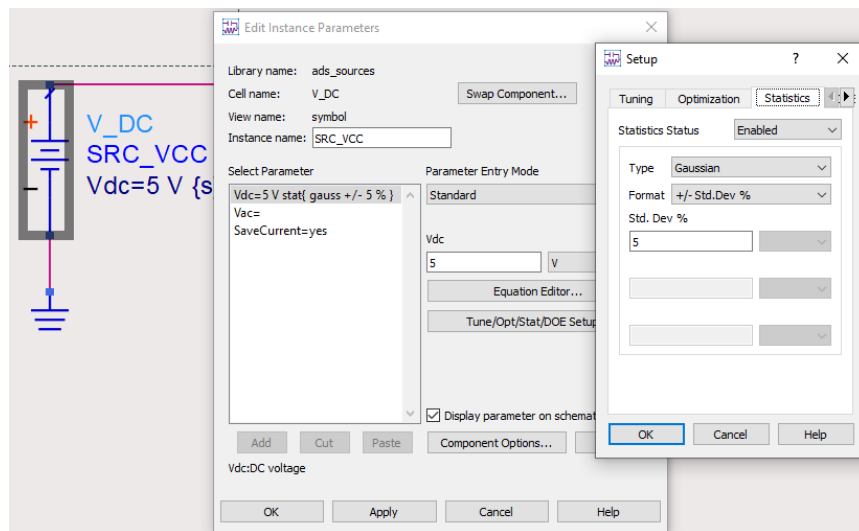
В последних версиях ADS основными видами статистического анализа (в том числе, анализом чувствительности) можно управлять с помощью единого контроллера симуляции Statistical  (палитра Optim/Stat/DOE), вместо отдельных контроллеров Sensitivity , Monte Carlo  или Yield .

Режим статистического моделирования выбран Монте Карло, т.к. нужно набрать массив результатов с вариациями параметров без оценки результатов (ее будем проводить в области графиков). Число попыток пусть будет 1000, т.к. схема для моделирования простая. Базовый контроллер DC1. В результаты пусть сохраняется все. Т.к. целей нет, то список Yield Specs будет пустой.

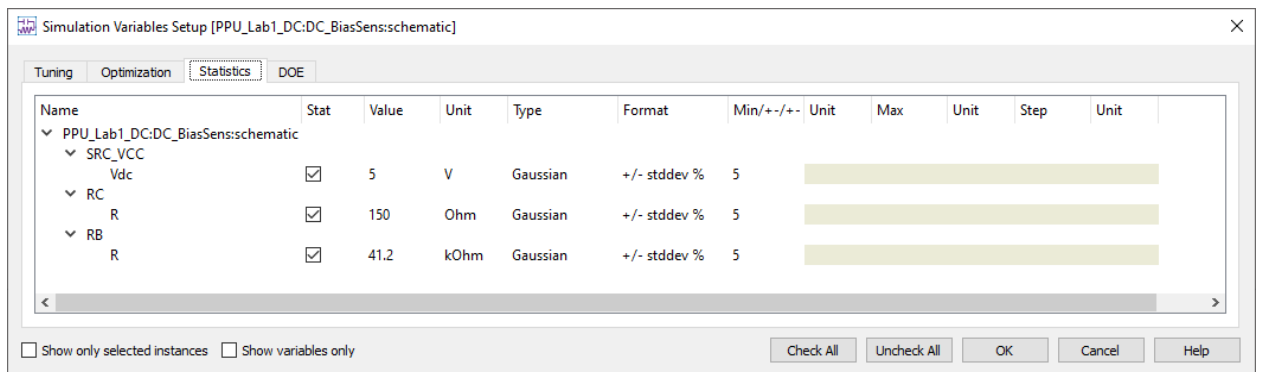


Вариацию параметров зададим в пределах 5% по гауссу. Задать нужно вариацию номинала питания VCC и номиналов резисторов RB и RC.

Задать их можно индивидуально для каждого параметра через настройки компонента по кнопке Tune/Opt/Stat/DOE Setup (вкладка Statistics).



Также вариацию параметров можно настроить сразу для всей схемы через окно Simulate – Simulation Variables Setup.



Переменные, разрешенные к вариации (аналогично разрешенным к туну и оптимизации), на уровне схемы получают сокращенный суффикс {s}, который при щелчке по нему, раскроется в полную строку с расшифровкой вариации.

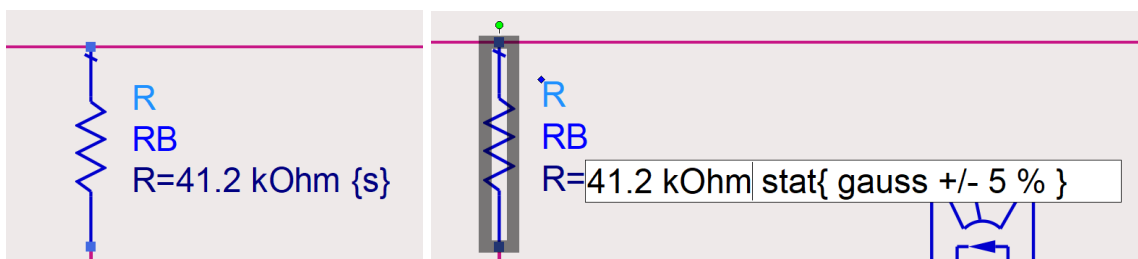
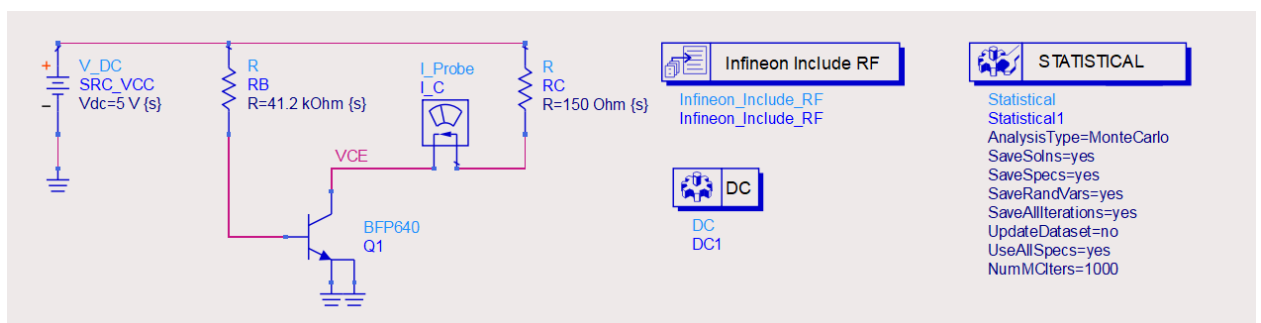


Схема перед запуском должна иметь следующий вид.





В области графиков проведем исследование гистограммой чувствительности с использованием функции `histogram_sens()`. Она формирует подготовленные для отображения в виде гистограммы данные. Имеет следующий синтаксис:

```
y = histogram_sens(data, sensitivityVar, goalMin, goalMax, innermostIndepLow, innermostIndepHigh, numBins)
```

где `data` – результат для анализа (действительного типа);

`sensitivityVar` – переменная, зависимость по которой надо посчитать;

`goalMin` – минимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`goalMax` – максимальное значение результата, при котором он считается подходящим;

`innermostIndepLow` – нижняя граница независимой переменной результата, позволяет, например, выбрать частотный поддиапазон;

`innermostIndepHigh` – аналогично, верхняя граница независимой переменной результата;

`numBins` – число столбиков (бинов) гистограммы.

У нас 2 отклика VCE и IC и три переменные VCC, RB и RC. Чтобы не писать 6 измерительных выражений, определим запрос через дополнительные переменные.

Пусть допустим уход рабочей точки на  $\pm 5\%$ . Т.е. получаются приемлемые диапазоны  $VCE = 2,0 \pm 0,1$  В и  $IC = 20 \pm 1$  мА. Расчет велся на одной точке, вырезать поддиапазоны первой независимой переменной не надо. Число попыток большое, число бинов можно указать порядка 15-20.

Пропишем переменную для исследования SensVar, допустимые диапазоны VCE и IC, и число бинов гистограммы.

**Eqn** SensVar = SRC\_VCC.Vdc

**Eqn** VCE\_min = 1.9 V

**Eqn** IC\_min = 19 mA

**Eqn** ~~SensVar = RB.R~~


**Eqn** VCE\_max = 2.1 V

**Eqn** IC\_max = 21 mA

**Eqn** ~~SensVar = RC.R~~

**Eqn** NumBins = 15



Неиспользуемые выражения в области графиков можно отключать по команде Edit – Toggle Activation  (также присутствует в тулбаре Zoom). При этом становится допустимо дублирование именования результата.

! Т.к. вариация параметров при моделировании задана не через переменные VAR, а через свойства блоков напрямую, то использован синтаксис *ИмяБлока.ИмяПараметра*

Сформируем выражение гистограмм чувствительности с использованием определенных промежуточных переменных. Неиспользуемые аргументы в функциях остаются пустыми.

**Eqn**SensHistVCE=histogram\_sens(VCE, SensVar, VCE\_min, VCE\_max, , , NumBins)

**Eqn**SensHistIC = histogram\_sens(IC.i, SensVar, IC\_min, IC\_max, , , NumBins)

Как читать данные с гистограмм чувствительности:

- В случае, если значение гистограммы чувствительности практически одинаково для всех значений переменной - это как правило означает, что приемлем или не приемлем результат, практически не зависит от этого значения переменной, а определяется комбинацией других переменных.

- Там, где гистограмма собирается в горб или провал – это значит, что присутствует чувствительность по данной переменной. Горб означает положительную чувствительность (желательные значения переменной), провал – наоборот запрещенные значения.

- При наличии чувствительности по ширине горба можно оценить, какой уход от номинального значения допустим.

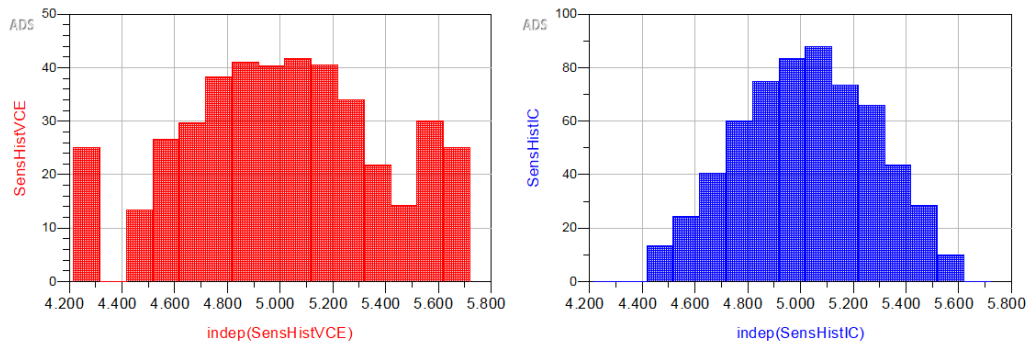
- Также при наличии чувствительности по положению пика горба оценить, смещено ли оптимальное значение переменной относительно номинального значения или нет. И если смещенно, то насколько.

- Надо учитывать, что несмотря на 1000 попыток, это все-таки вероятностная модель, и возможны локальные отклонения и перекосы.

Построим два прямоугольных графика в формате гистограмм.

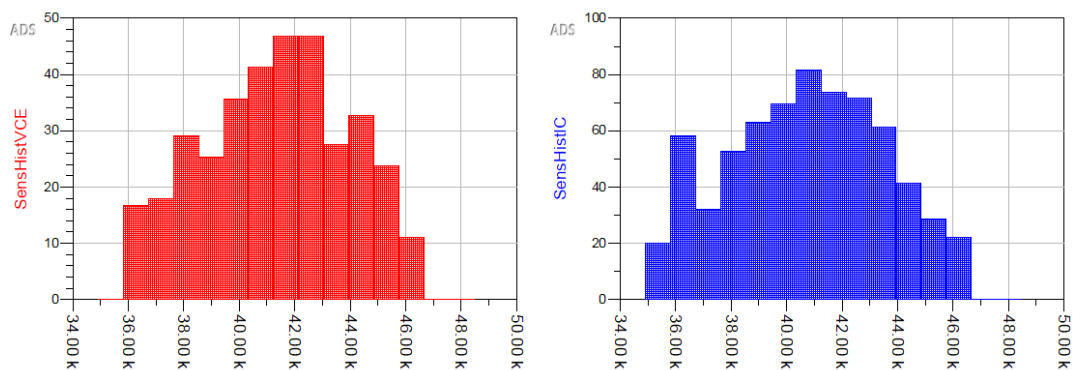
Чувствительность по номиналу VCC. Видно, что присутствует чувствительность по точности номинала питания, как для VCE, так и для IC, причем по VCE чувствительность ниже. Смещения оптимального значения VCC нет. Также на чувствительности VCE горб довольно широкий, т.е. VCE выдерживает заметно большее отклонение VCC от номинального значения, чем IC.

$$\text{Eqn SensVar} = \text{SRC\_VCC.Vdc}$$



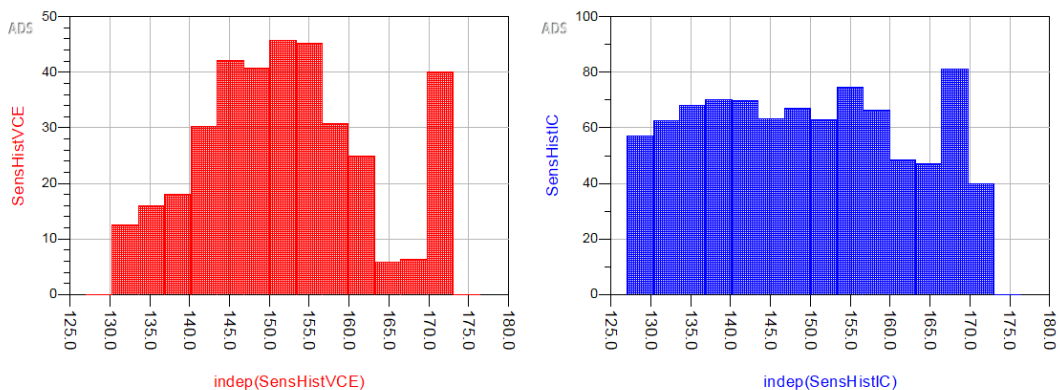
Чувствительность по номиналу резистора базы RB. Видно, что присутствует приблизительно одинаковая чувствительность по точности номинала резистора базы, как для VCE, так и для IC. Смещения оптимального значения RB нет.

$$\text{Eqn SensVar} = \text{RB.R}$$



Окончательно, по номиналу резистора коллектора RC. Видно, напряжение VCE чувствительно к резистору коллектора, а вот ток коллектора IC – нет. При этом смещения оптимального значения RC нет. У горба VCE довольно широкая вершина, т.е. уход RC допустим довольно сильно.

$$\text{Eqn SensVar} = \text{RC.R}$$



## Задание на выполнение

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

Варианты заданий приведены в таблице 2.

При выполнении ориентироваться на методику выполнения.

**Таблица 2. Варианты заданий**

№ Варианта	Биполярный транзистор (библиотека Infineon)	Рабочая точка		№ Варианта	Биполярный транзистор (библиотека Infineon)	Рабочая точка	
		VCE, В	IC, мА			VCE, В	IC, мА
1	BFP520	2,0	2,0	6	BFP182W	5,0	5,0
2	BFP420	2,0	5,0	7	BFR92P	6,0	3,0
3	BFP405	2,0	5,0	8	BFR182	8,0	5,0
4	BFP183W	8,0	10,0	9	BFP181	8,0	3,0
5	BFR35AP	8,0	5,0	10	BFR181W	8,0	4,0

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

### **Этапы выполнения:**

1. Подключение библиотеки моделей транзисторов:

- (при необходимости) установить на рабочее место библиотеку компонентов Infineon [6];
- подключить к текущему проекту библиотеку компонентов.

2. Схема DC\_Curves. Построение выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером:

- по документации на заданный компонент определить диапазон изменения VCE и IB;
- построить схему для моделирования выходных статических характеристик биполярного транзистора в схеме с общим эмиттером;
- по результатам определить ток базы IC для заданной рабочей точки.

3. Схема DC\_CalcBias. Расчет резистивной части цепи питания и смещения:

- 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. Схема DC\_BiasCheck. Проверочная схема цепи питания и смещения:

- 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 ( $V_{CE@IC}$ ) не более 2%.

5. Схема DC\_BiasTempSweep. Анализ температурной зависимости цепи питания и смещения:

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

6. Схема DC\_BiasSens. Анализ чувствительности цепи питания и смещения по номиналам питания и резисторов:

- собрать схему для анализа чувствительности цепи питания и смещения;
- диапазон вариации питания VCC и резисторов RB и RC брать  $\pm 5\%$  по гауссу;
- провести в области графиков анализ чувствительности с помощью гистограмм чувствительности;
- допустимый диапазон ухода для рабочей точки брать  $\pm 5\%$  по  $V_{CE}$  и IC;
- по результатам анализа вывести рекомендации по устойчивой работе цепи питания и смещения.

## 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\_Lab1\_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) Проведите исследование устойчивости спроектированной цепи питания и смещения при уходе напряжения питания  $V_{CC}$  от номинального. К каким проблемам и начиная с какого уровня ухода  $V_{CC}$  от номинального начинаются проблемы?

## Контрольные вопросы

1. Нарисуйте типовые статические характеристики активных элементов (биполярного транзистора, полевого транзистора).
2. Продемонстрируйте правила аппроксимации статических характеристик биполярного и полевого транзисторов кусочно-линейными аппроксимациями.
3. Почему для статических характеристик ламп и транзисторов возможен одинаковый подход к кусочно-линейной аппроксимации?
4. Продемонстрируйте правила пересчета одних статических характеристик транзисторов в другие.
5. Чем отличаются динамические и статические характеристики активных элементов друг от друга?
6. Почему статические характеристики полевых транзисторов задаются меньшим числом параметров, чем у биполярных транзисторов?
7. Нарисуйте схему смещения для усилителя с полевым транзистором с отдельной подачей питания. Есть ли принципиальное значение, в каком порядке подавать питание?
8. Поясните принцип расчета резистивной части цепи питания и смещения с отдельным питанием для биполярного транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером.
9. Что такое анализ чувствительности отклика по вариациям параметров цепи?
10. Что такое гистограмма чувствительности? Как можно по ее виду определить наличие или отсутствие чувствительности по вариации параметра? А как можно определить оптимальное значение по вариации параметра?



## 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/>

8. Репозиторий с методическими указаниями по лабораторным работам <https://github.com/dee3mon/Keysight-ADS-RFDevices-methodic/>

### *Каналы Youtube с видеоуроками по Keysight Advanced Design System*

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

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

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

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

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

**Разработчик:**

Ст. преподаватель Института МПСУ

Приходько Д.В.