

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Томский государственный университет  
систем управления и радиоэлектроники

В. Д. Дмитриев

**Определение характеристик полевого транзистора на основе нелинейной модели**

Методические указания по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.01 – «Радиотехника», 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Томск  
2022

УДК 621.372  
ББК 32.84  
Д 534

**Рецензент:**

**Богомолов С. И.**, доцент кафедры телекоммуникаций и основ радиотехники ТУСУР, канд техн. наук,

**Дмитриев, Владимир Дмитриевич**

Д 534 Определение характеристик полевого транзистора на основе нелинейной модели: Методические указания по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств» для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.01 – «Радиотехника», 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / В. Д. Дмитриев. – Томск: Томск. гос. ун-т систем управления и радиоэлектроники, 2022. – 27 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Определение характеристик полевого транзистора на основе нелинейной модели» по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств».

Предназначено для студентов обучающихся по направлению подготовки магистратура 11.04.01 – «Радиотехника», 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Одобрено на заседании кафедры ТОР, протокол № 5 от 17 февраля 2022 г.

УДК 621.372  
ББК 32.84

© Дмитриев В. Д., 2022  
© Томск. гос. ун-т систем управления  
и радиоэлектроники, 2022

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	4
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ.....	5
1 Создание модели полевого транзистора .....	5
2 Построение вольт-амперной и проходной характеристик .....	10
3 Построение S-параметров (параметров рассеяния) .....	13
4 Построение зависимости мощностей .....	14
5 Построение графиков коэффициента шума.....	16
6 Варианты заданий .....	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	27

## **ВВЕДЕНИЕ**

Целью дисциплины «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств» является освоение общих принципов построения и функционирования СВЧ устройств, этапов расчета и проектирования узлов, методов расчета характеристик этих узлов, а также вопросов их проектирования с помощью современных программ САПР. Кроме того, ознакомление с современными российскими и международными разработками СВЧ устройств для систем связи, радиолокации, радионавигации.

AWRDE (AWR Design Environment) – система автоматизированного проектирования (САПР) разработанная компанией National Instruments. САПР AWRDE способна решать широкий спектр задач сквозного проектирования сложных радиотехнических устройств и систем связного назначения.

Данная работа посвящена изучению методов задания параметров полевого транзистора на основе нелинейной модели ТОМ1. Цель лабораторной работы получить характеристики полевого транзистора с помощью проектирования и построения графиков.

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА НА ОСНОВЕ НЕЛИНЕЙНОЙ МОДЕЛИ

## Цель работы:

- Ознакомиться с программным пакетом AWR Design Environment.
- Изучить методы задания параметров полевого транзистора на основе нелинейной модели TOM1.
- Получить характеристики полевого транзистора с помощью проектирования и построения графиков.

## Описание метода проектирования

1. Создание модели полевого транзистора
2. Построение ВАХ и определение рабочей точки
3. Получение S-параметров
4. Получение зависимости выходной мощности от входной
5. Построение коэффициента шума
6. Определение оптимального коэффициента шума

## Исходные данные

Исходными данными для выполнения работы являются:

- таблицы со значениями параметров транзистора;
- диапазон рабочих частот;
- таблица с электрическими параметрами.

## Порядок выполнения работы

### 1 Создание модели полевого транзистора

После ознакомления с исходными данными своего варианта необходимо запустить AWR Design Environment, далее нажать на кнопку Add New Schematic на панели инструментов и подтвердить создание:

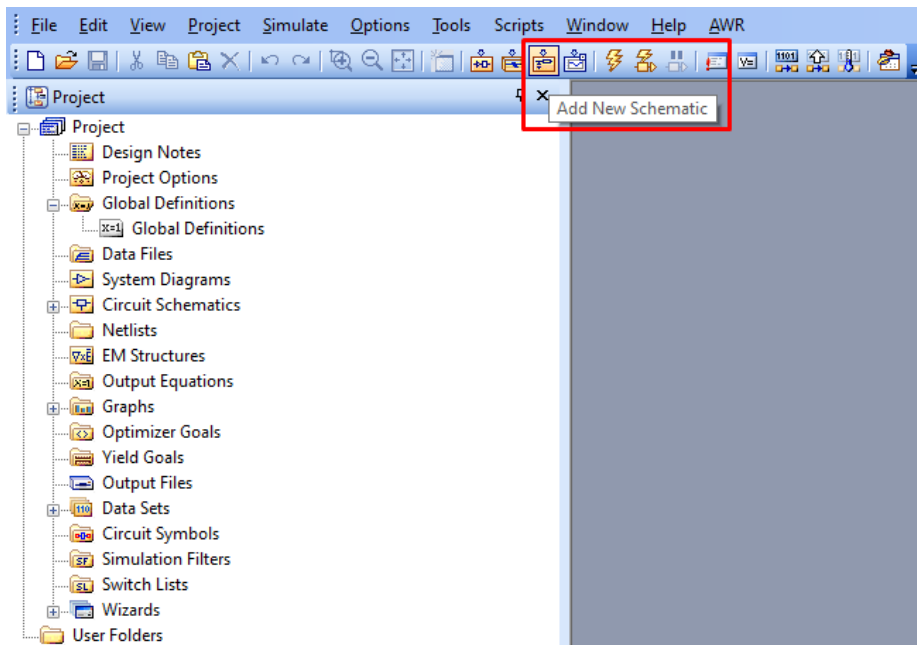


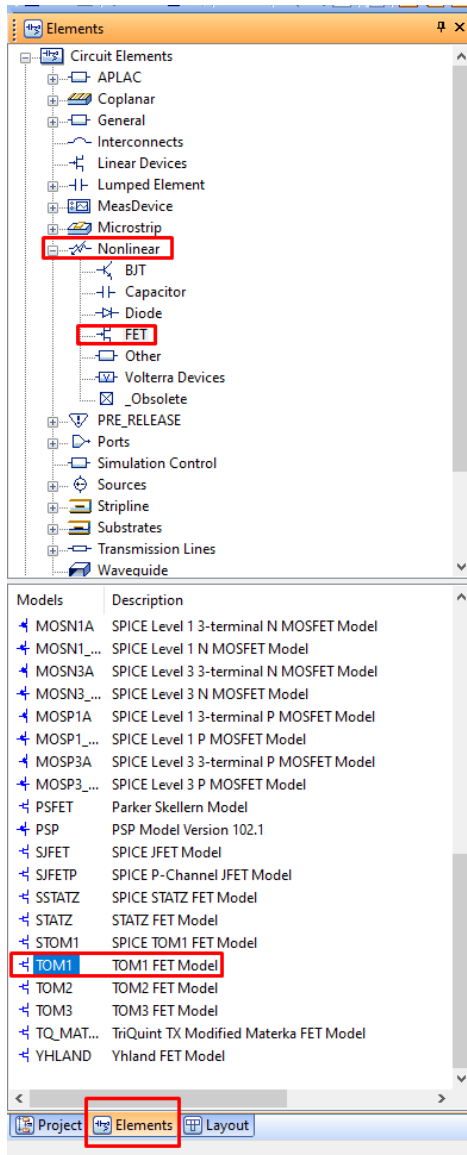
Рисунок 1.1 – Кнопка для создания схемы

После этого появится область, в которой будет проводиться работа.

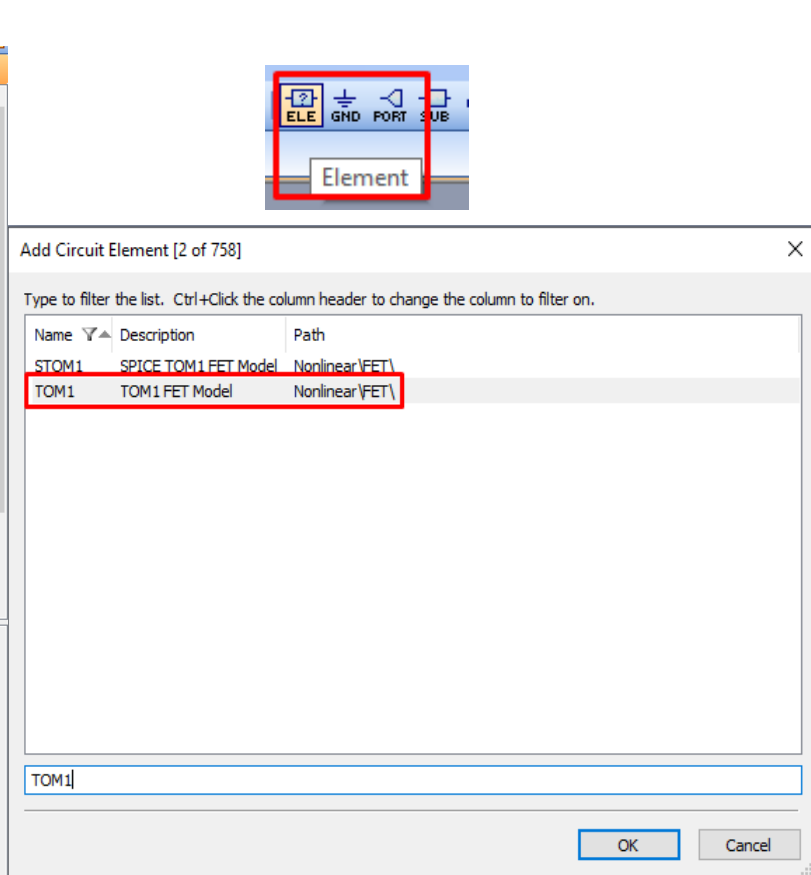
Далее необходимо вынести в область работы модель нелинейного транзистора TOM1. Это можно сделать двумя способами:

А) В левом нижнем углу перейти на вкладку Elements, далее выбрать Nonlinear, FET и затем выбрать модель TOM1, после чего вынести ее в область работы и щелкнуть мышью для подтверждения;

Б) На верхней панели найти кнопку Element, написать в строке TOM1 и также вынести транзистор в область работы.



а)



б)

Рисунок 1.2 – Расположение модели TOM1: а) через вкладку Elements; б) с помощью кнопки Element и поиска по названию

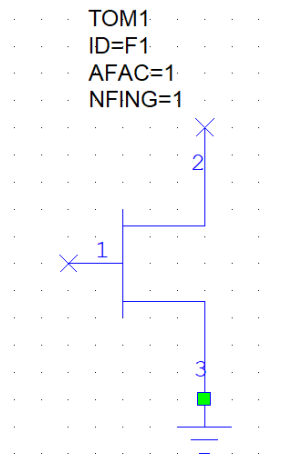


Рисунок 1.3 – Вид TOM1 в САПР AWR Design Environment

Затем необходимо задать параметры транзистора, которые заданы в таблице. Для этого необходимо дважды щелкнуть мышью по транзистору, затем нажать Show Secondary и записывать в соответствующие строки значения параметров.

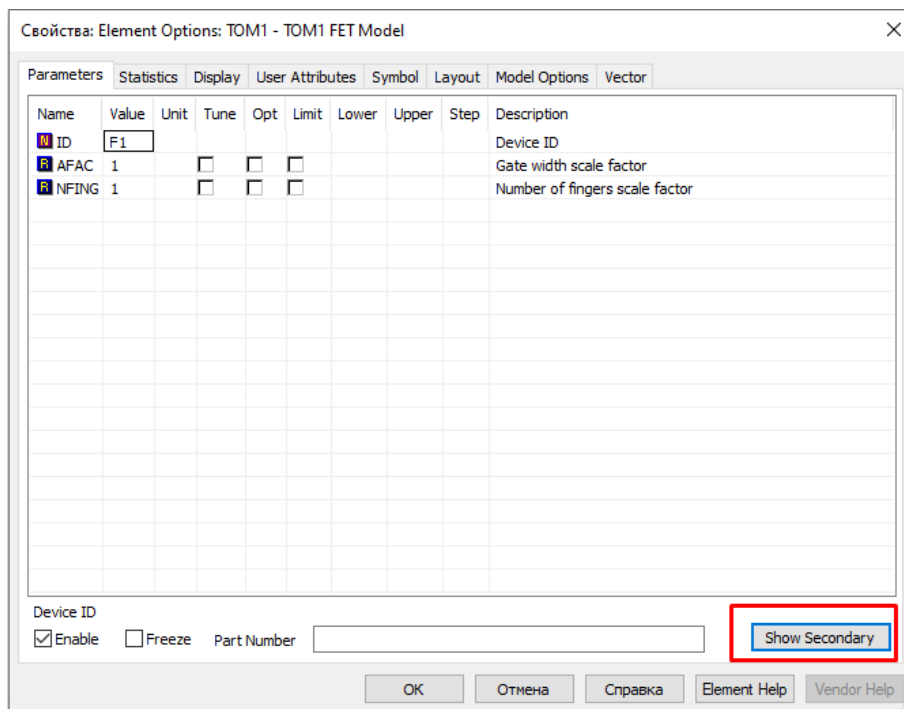


Рисунок 1.4 – Панель параметров модели TOM1

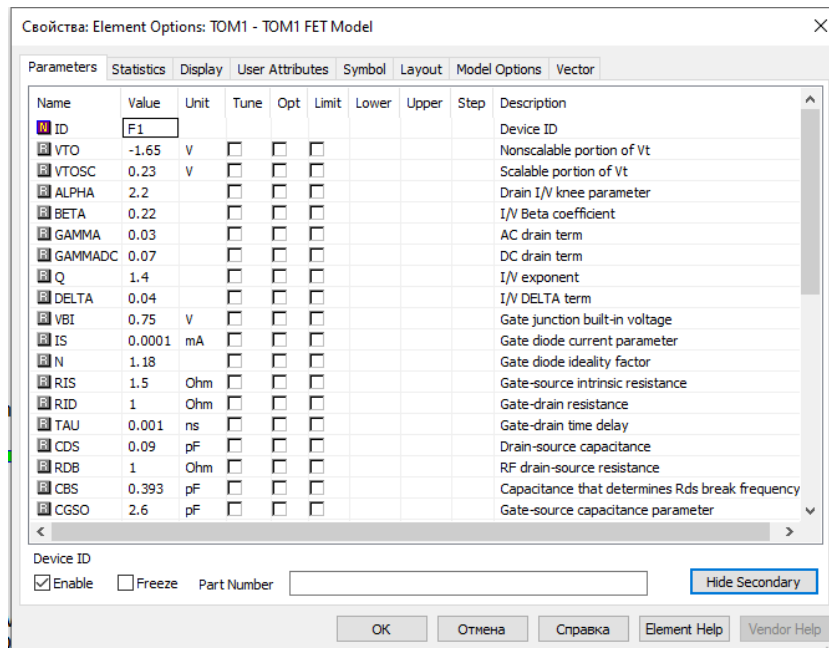


Рисунок 1.5 – Окно задания параметров модели TOM1

В поле Project Options необходимо задать диапазон частот, с которым будет проводиться работа. Во вкладке Frequencies задаем начальную частоту в поле Start конечную частоту в поле Stop и шаг в поле Step.

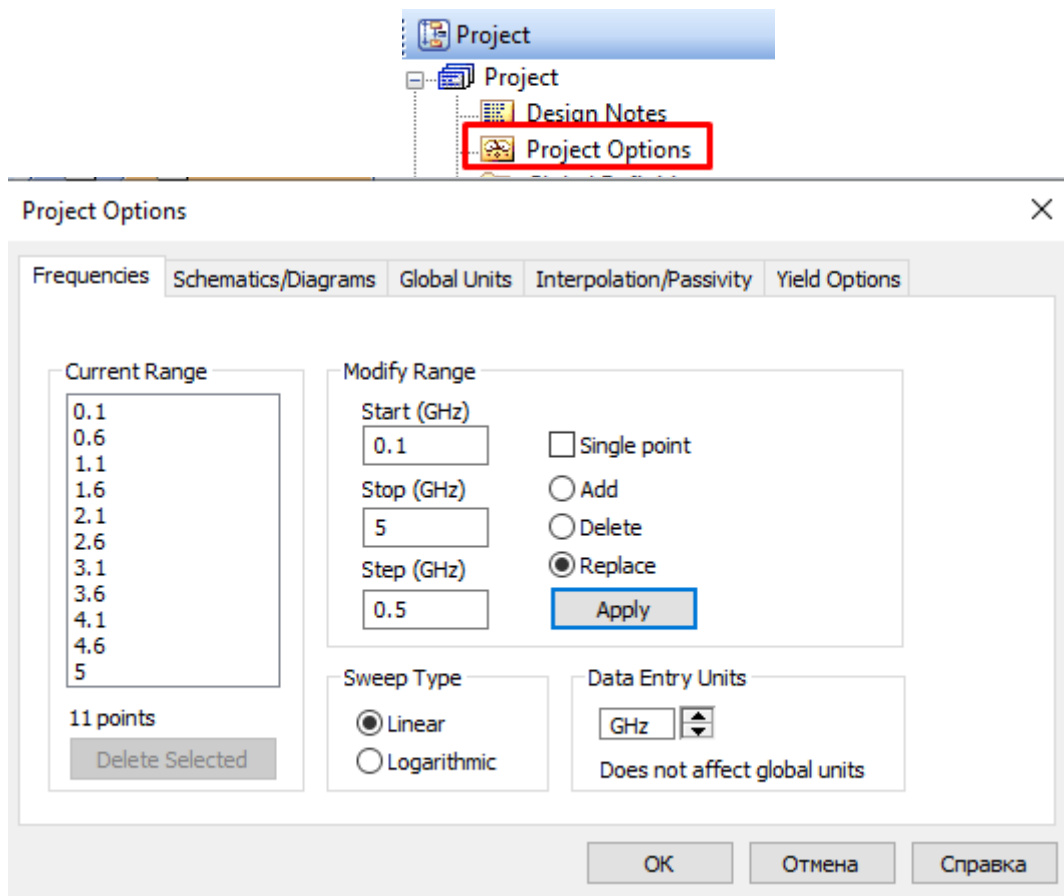


Рисунок 1.6 – Задание частоты для всего проекта



Также частоту можно задать для конкретной схемы. Для этого необходимо нажать правой кнопкой на иконку схемы на левой панели и выбрать Options. Задание значений аналогично предыдущему методу.

Помимо этого, есть метод с использованием элемента SWPFRQ. Элемент находится на вкладке Elements правой панели в подразделе Simulation Control.

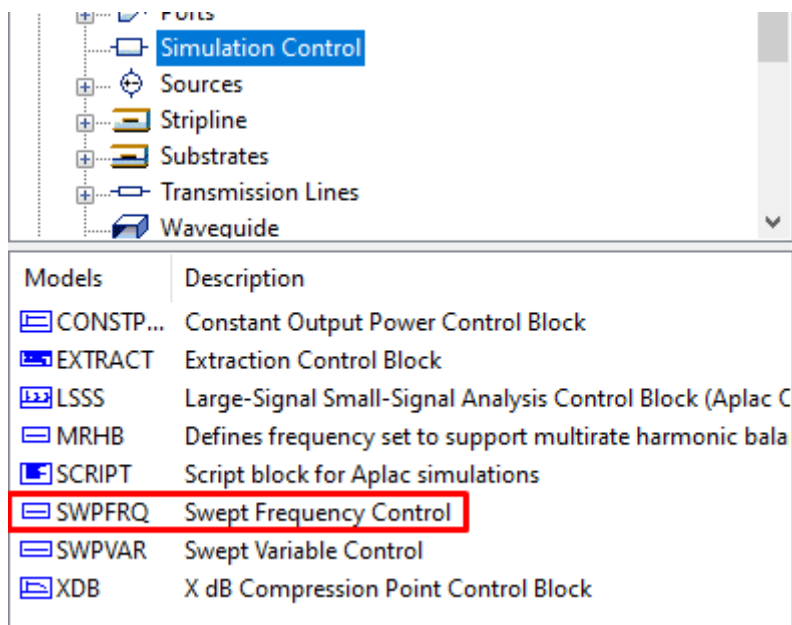


Рисунок 1.7 – Расположение элемента SWRFRQ

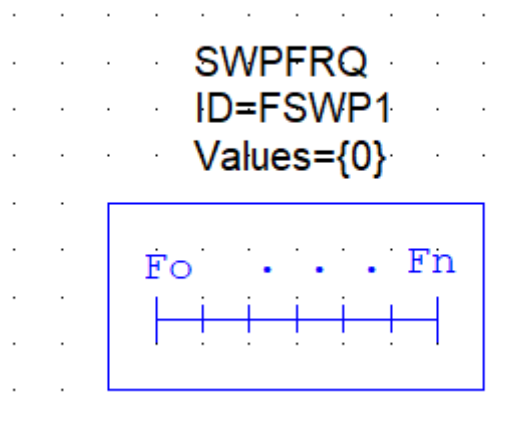


Рисунок 1.8 – Вид SWPFRQ на схеме

Для задания частоты этим способом необходимо записывать значения вручную через запятую в строку Values. Значения необходимо записывать в формате числа в степени через экспоненту, так как элемент записывает частоты в ГГц, а необходимо в ГГц или МГц (к примеру 0.5 ГГц – 5e8).

Для проведения данной работы в Project Options-Frequendes необходимо выбрать Single Point и ввести значение частоты, равное значению из режима измерения мощности. Для схем, где необходимо работать с диапазоном частот нужно использовать контроллер частоты SWPFRQ.

## 2 Построение вольт-амперной и проходной характеристик

Большую информацию о свойствах и качестве транзистора можно узнать из его вольт-амперных характеристик. По этим характеристикам можно определить ряд параметров и их зависимость от режима, часть из которых не приводится в технических условиях или справочных материалах.

Для определения рабочей точки, необходимо построить вольт-амперные характеристики транзистора.

Чтобы построить ВАХ и переходную характеристику нужно взять измеритель IVCURVE из раздела MeasDevice, подраздела IV. И подключить его таким образом, как указано ниже на рисунке. Земля также находится на панели инструментов.

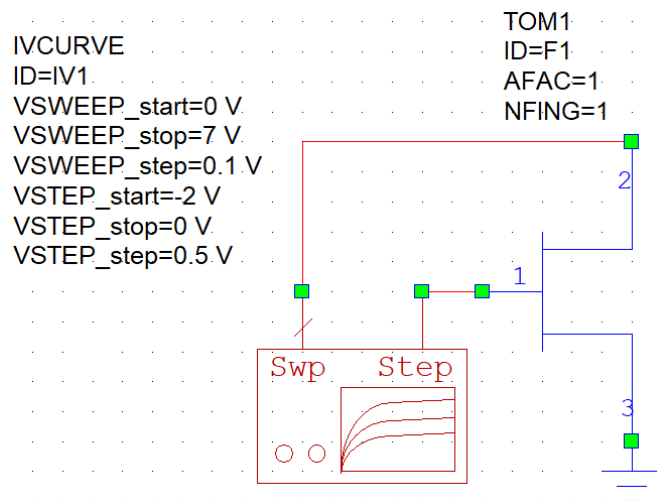


Рисунок 2.1 – Схема подключения измерителя «IVCURVE» для построения ВАХ

Значения VSTEP задаются согласно варианту следующим образом:

VSTEP\_start – задаем значение при самой нижней кривой;

VSTEP\_stop – задаем значение при самой верхней кривой;

VSTEP\_step - задаем шаг кривых;

Значения VSWEEEP задаются согласно варианту следующим образом:

VSWEEEP\_start – задаем начальную точку по оси абсцисс;

VSWEEEP\_stop – задаем конечную точку по оси абсцисс;

VSWEEEP\_step - задаем шаг;

Далее нажимаем на панели инструментов Add New Graph и подтверждаем добавление.



Рисунок 2.2 – Кнопка создания графиков

Чтобы построить график семейства ВАХ нужно нажать правой кнопкой мыши на график на левой панели и выбрать Add New Measurement, после чего выбрать в окне такие же настройки как на рисунке ниже:

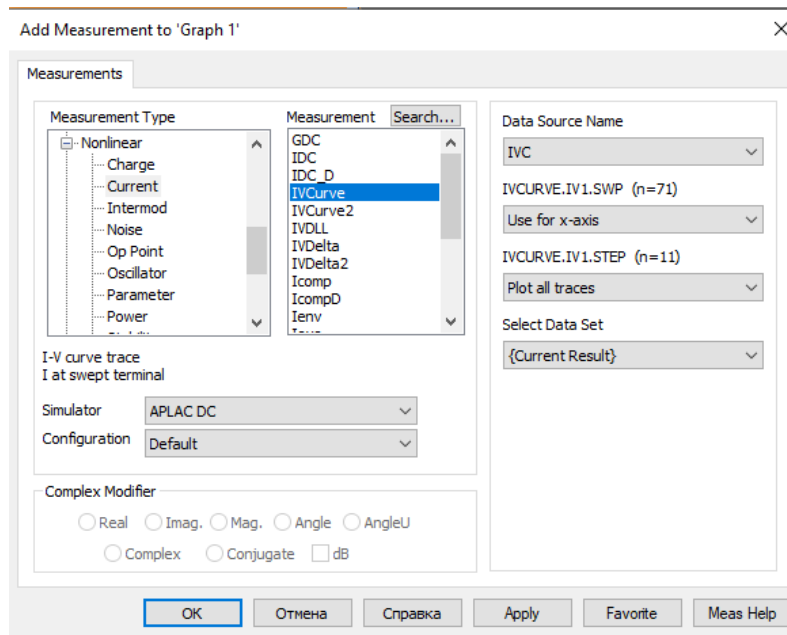


Рисунок 2.3 – Окно создания графика

После принятых изменений необходимо запустить симуляцию нажав на кнопку Analyze на панели инструментов.

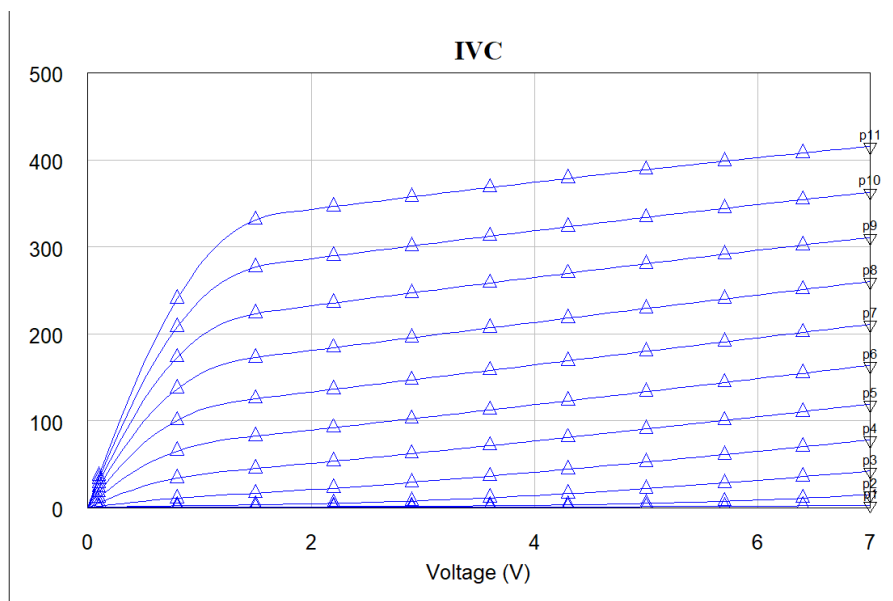


Рисунок 2.4 – Пример вида ВАХ

Для построения проходной характеристики необходимо переподключить измеритель к транзистору, поменяв каналы местами.

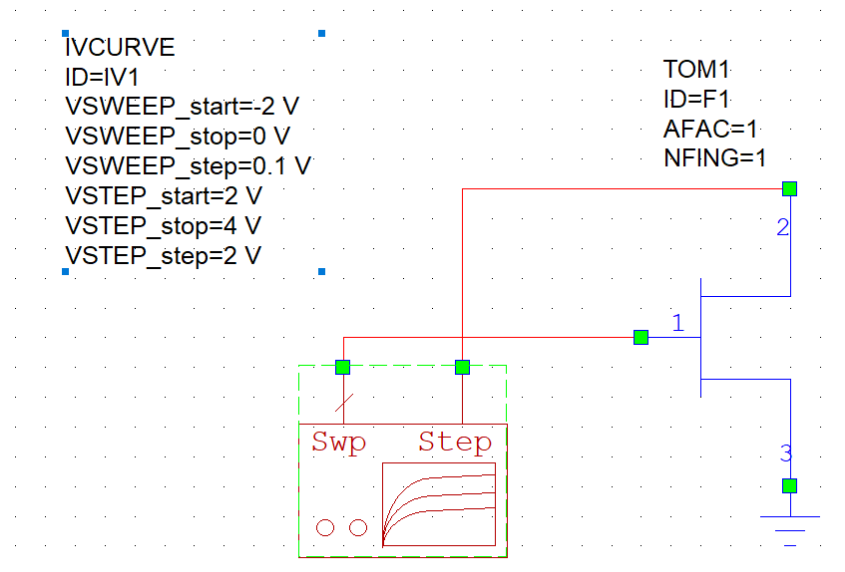


Рисунок 2.5 – Схема подключения измерителя IVCURVE для построения проходной характеристики

Значения VSTEP задаются согласно варианту следующим образом:  
 VSTEP\_start – задаем значение при самой нижней кривой;  
 VSTEP\_stop – задаем значение при самой верхней кривой;  
 VSTEP\_step - задаем шаг кривых;  
 Значения VSWEEP задаются согласно варианту следующим образом:  
 VSWEEP\_start – задаем начальную точку по оси абсцисс;  
 VSWEEP\_stop – задаем конечную точку по оси абсцисс;  
 VSWEEP\_step - задаем шаг.

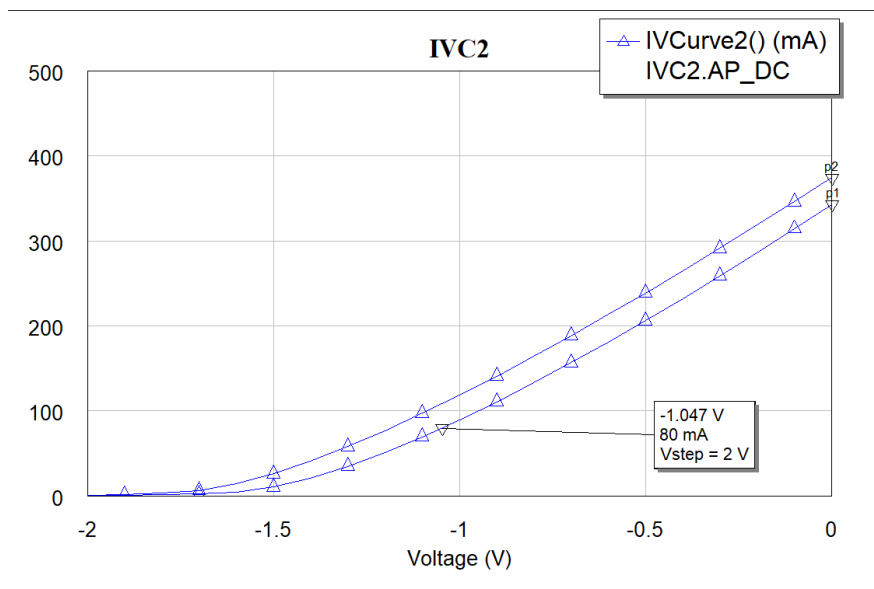


Рисунок 2.6 – Возможный вид проходной характеристики с определенной рабочей точкой

С помощью проходной характеристики можно найти рабочую точку. Для этого в таблице рабочих надо найти режим измерения и в нем найти значения напряжения и на кривой, соответствующей значению напряжения найти ток и с помощью этого найти напряжение рабочей точки.

### 3 Построение S-параметров (параметров рассеяния)

Чтобы построить S-параметры необходимо сначала построить схему, показанную на рисунке ниже:

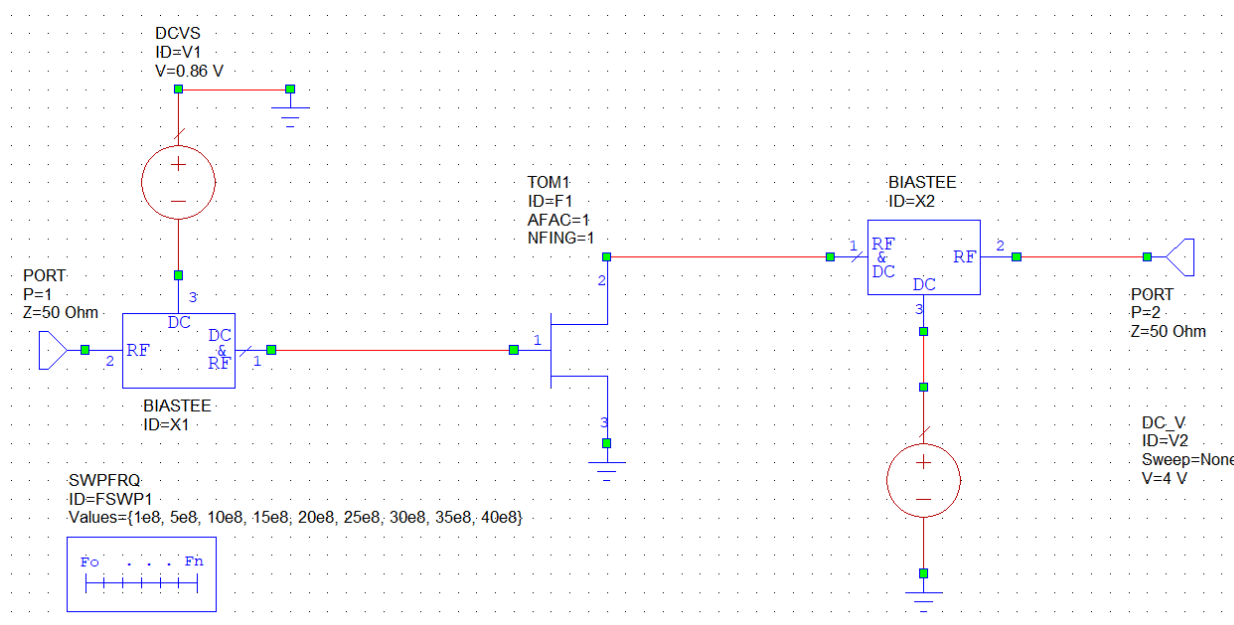


Рисунок 3.1 – Схема для получения S-параметров

Элемент PORT расположен на панели инструментов. Элемент BIASTEE выполняет собой роль элементов цепи. Он находится по пути General\Passive\Other. Источники питания DCVS и DC\_V находятся в разделе элементов Sources, DC. Значения напряжений в источниках берутся на основе данных, полученных при построении ВАХ – в DCVS записывается значение точки на графике, в DC\_V – значение, равное Vstep этой кривой. Затем, после того как была собрана схема необходимо построить графики S-параметров.

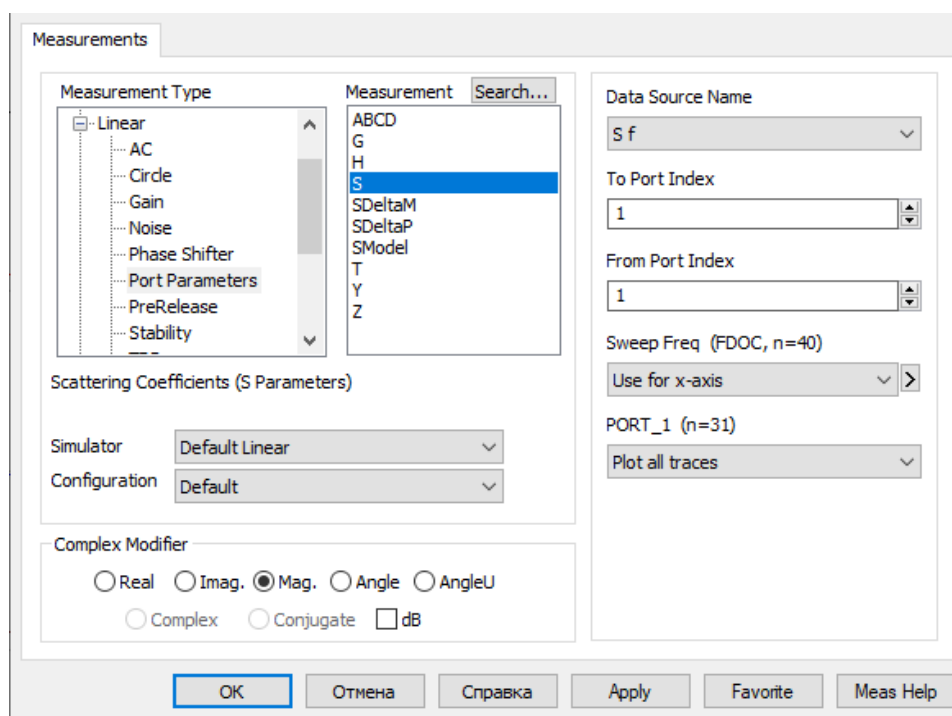


Рисунок 3.2 – Окно настройки графиков S-параметров

Для того, чтобы график строился по значениям элемента SWPFRQ необходимо в строке Sweep Freq нажать на боковую стрелку и выбрать этот элемент, как показано на рисунке:

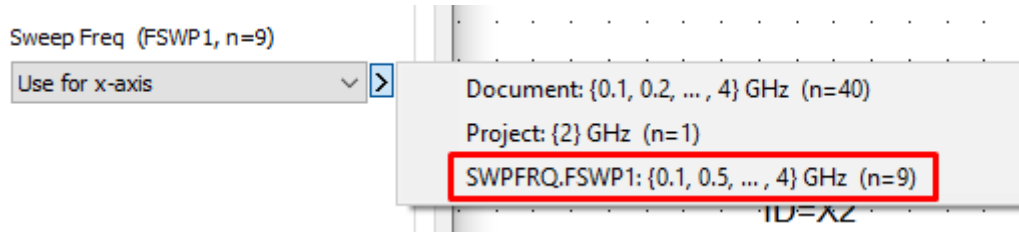


Рисунок 3.3 – Задание частоты через SWPFRQ

Меняя значения от 1 до 2 в строках To Port Index и From Port Index выбираются S11, S22, S12 и S21 соответственно. Для добавления графиков необходимо нажимать Apply. В окне Complex Modifier можно настроить необходимое отображение S-параметров:

- 1) Mag – построение в разгах;
- 2) Angle – построение фазы;
- 3) Mag и Db – построение в децибелах.

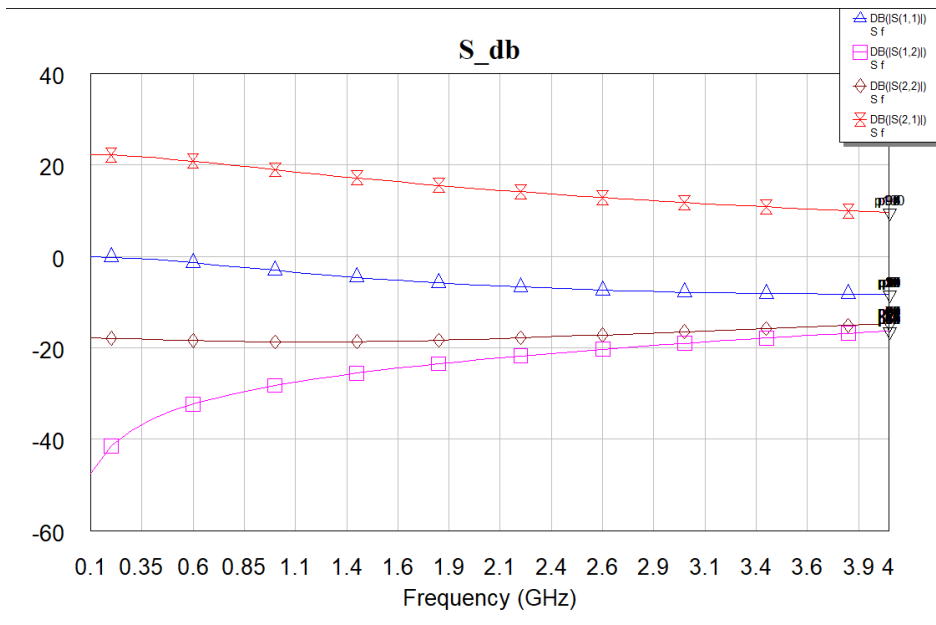


Рисунок 3.4 – Возможный вид S-параметров

#### 4 Построение зависимости мощностей

Для того, чтобы построить зависимость мощностей, необходимо собрать схему как показано на рисунке ниже.

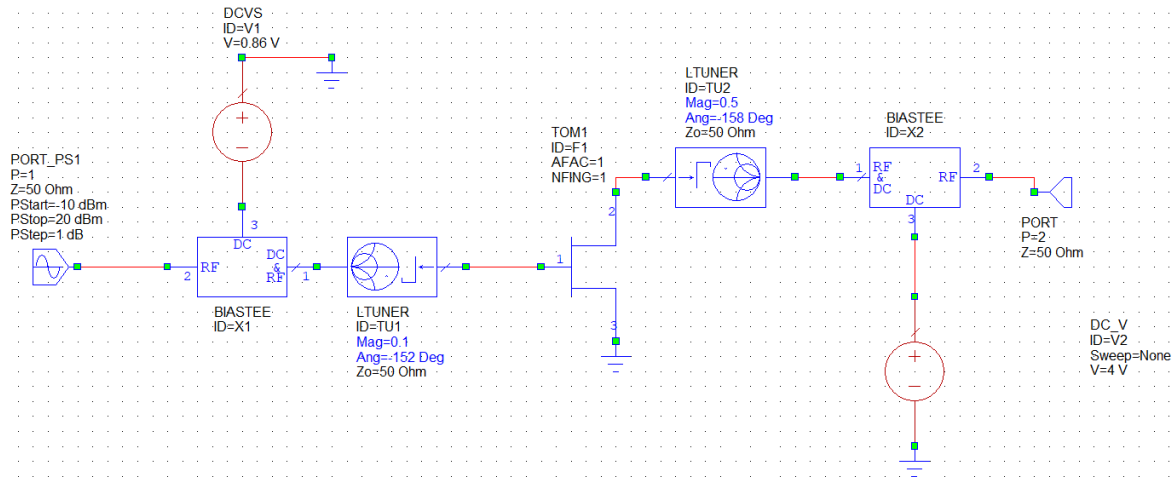


Рисунок 4.1 – Схема для построения зависимости выходной мощности

Элемент LTUNER служит для регулировки графиков по фазе и амплитуде. Находится в разделе General\Passive\Other. Далее создаем график по примеру. Используя Tune необходимо график Pcomp POWER регулировать до получения амплитудного значения на заданной частоте. Для использования Tune необходимо на панели инструментов нажать Tune Tool и затем нажать на строки Mag и Ang, после чего можно будет регулировать их, нажав Tune и двигая ползунки. В окне Variable Tuner для значений Mag выставить границы регулировки от 0 до 1 с шагом в 0.1; значения Ang регулировать в диапазоне от -180 до 180 с шагом 1. Также для правильной работы схемы в данном случае необходимо настроить схему на нужную частоту, к примеру, на 2 ГГц. Для этого необходимо в настройках схемы выбрать Single Point и ввести частоту, заданную вариантом в таблице (частота находится в режиме измерения).

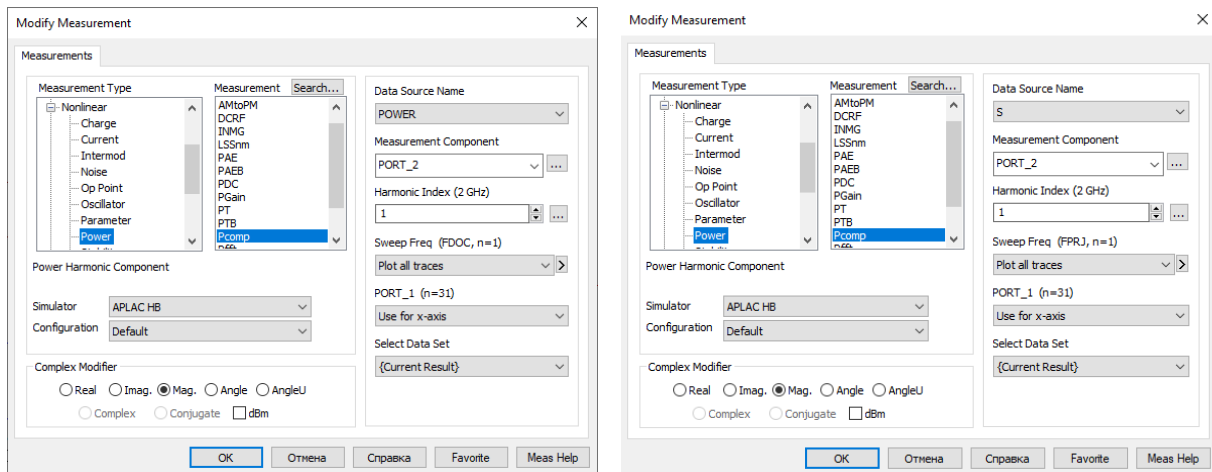


Рисунок 4.2 – Настройка графиков

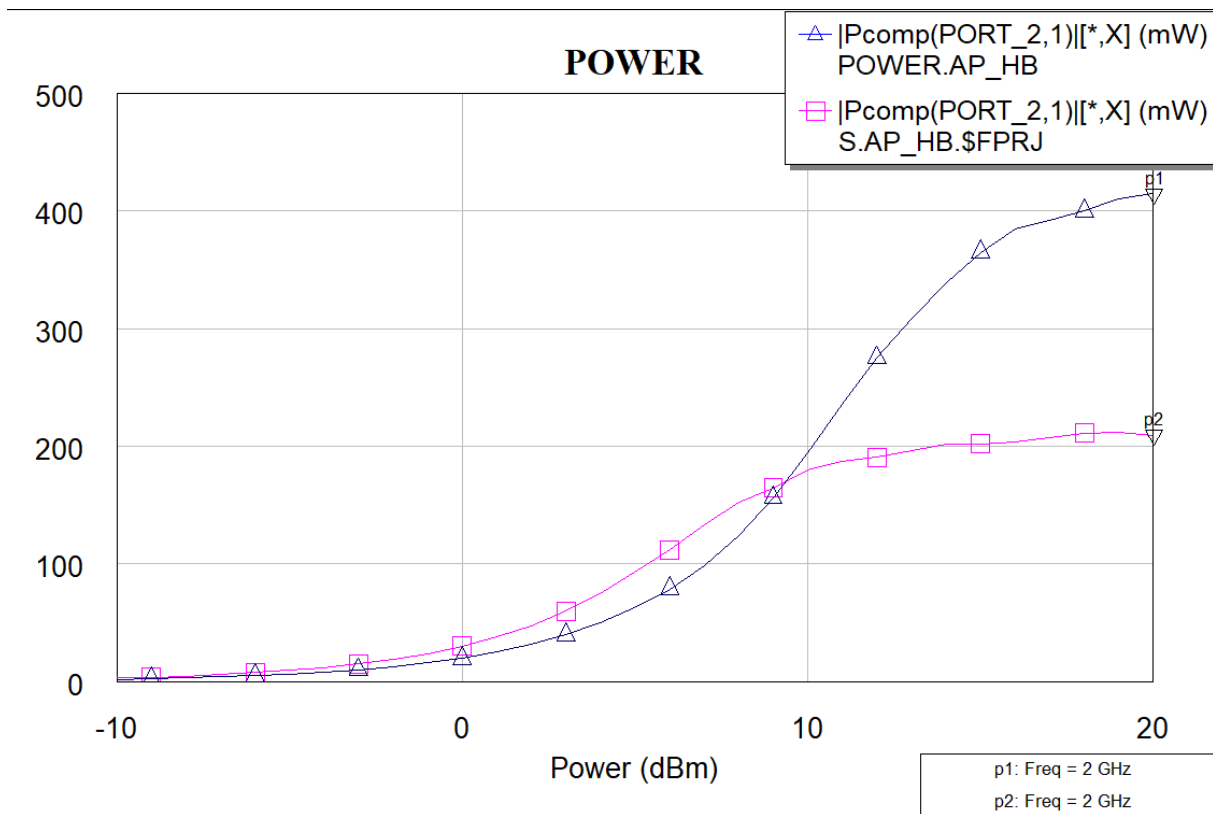


Рисунок 4.3 – Возможный вид зависимости выходной мощности

## 5 Построение графиков коэффициента шума

Необходимо создать схему как на рисунке ниже:

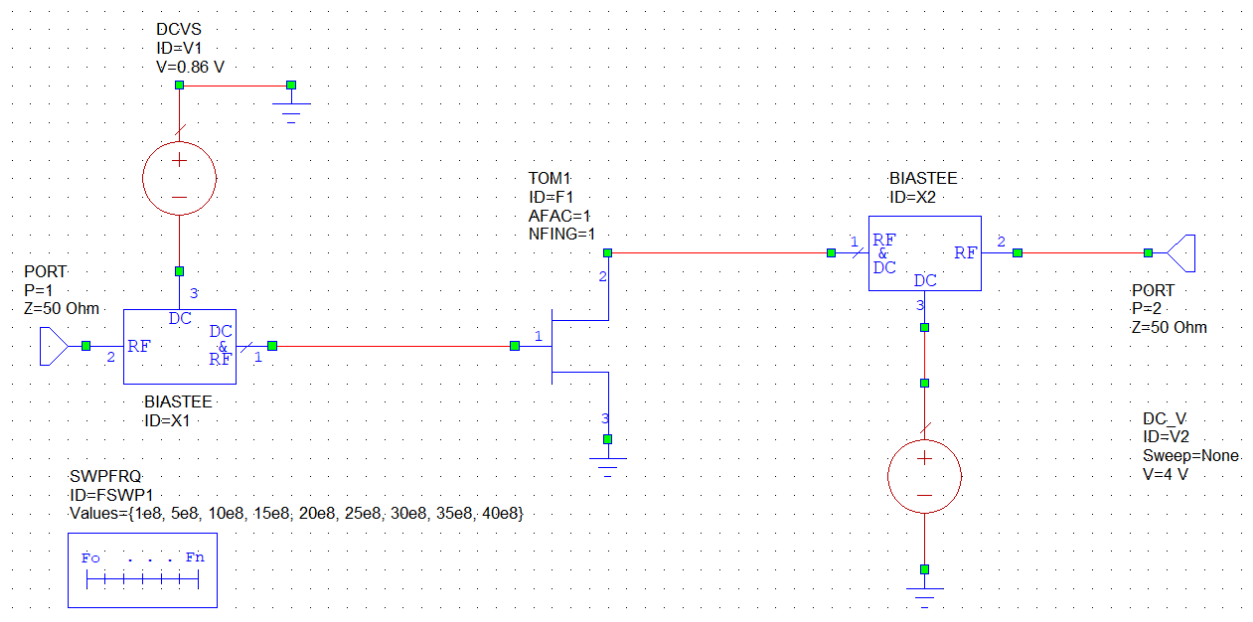


Рисунок 5.1 – Схема для построения коэффициента шума

Для построения используются следующие настройки:



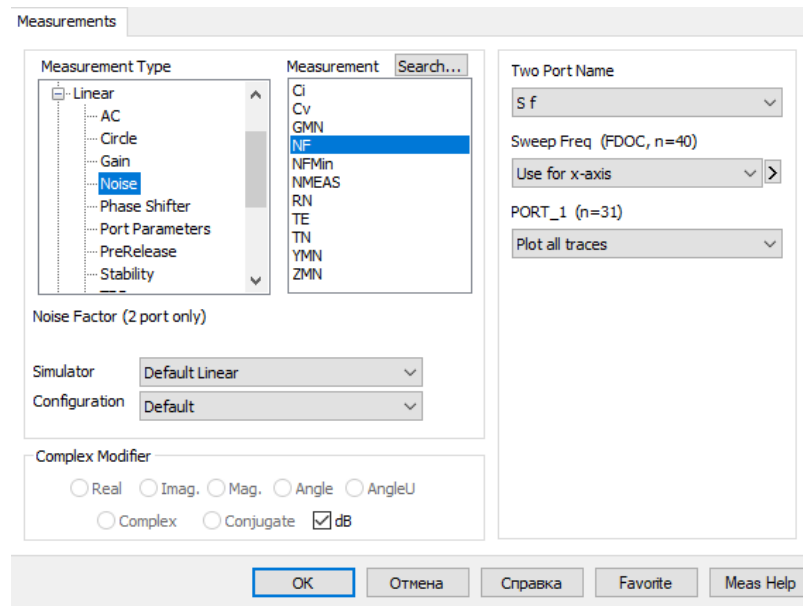


Рисунок 5.2 – Настройка графиков коэффициента шума

Из данного подраздела нам нужны 2 измерения – NF и NFMin. Это коэффициент шума реальной схемы (собранный) и идеальный коэффициент шума соответственно.

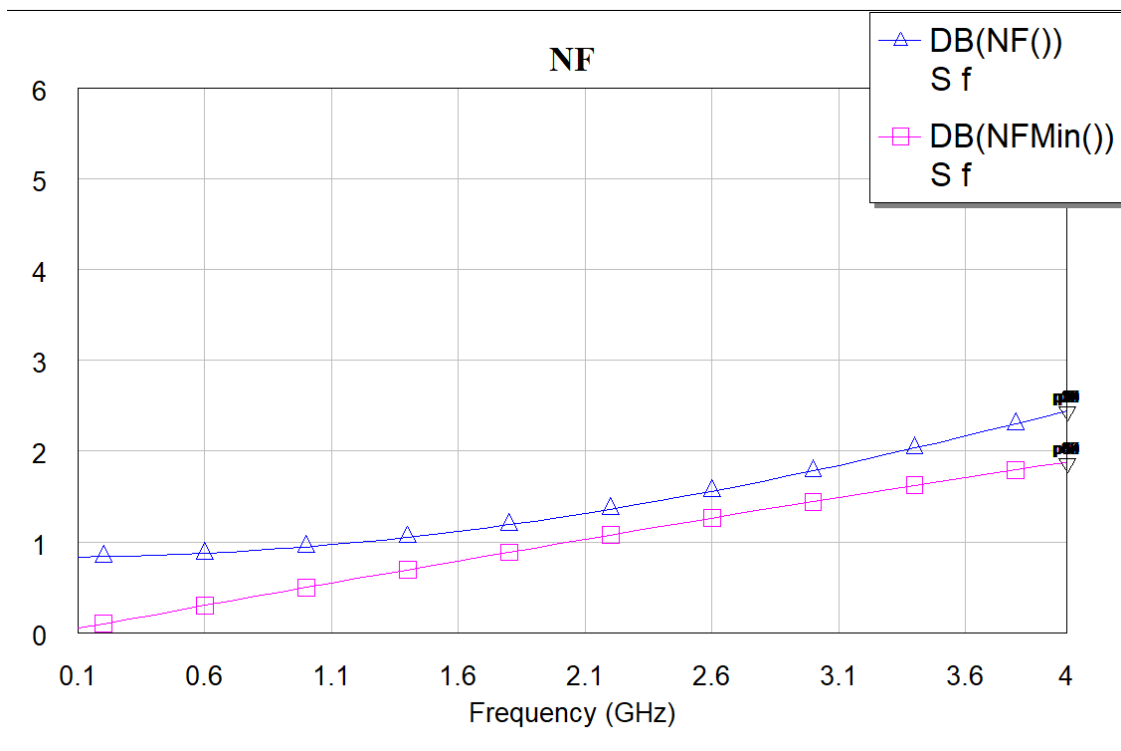


Рисунок 5.3 – График зависимости коэффициента шума от частоты

## 6 Варианты заданий

Таблица 6.1 – Электрические параметры транзисторов

Номер варианта	Диапазон частот	Коэффициент шума		Выходная мощность	
		Режим измерения	Значение	Режим измерения	Значение
1	0.5 – 4 ГГц	Uси = 2 В; Iс = 80 мА; f = 1 ГГц	дБ	Uси = 6 В; Iс = 150 мА; f = 1 ГГц	мВт
2	1-8 ГГц	Uси = 3 В; Iс = 20 мА; f = 4 ГГц	дБ	Uси = 2 В; Iс = 20 мА; f = 4 ГГц	мВт
3	4-18 ГГц	Uси = 3 В; Iс = 10 мА; f = 12 ГГц	дБ	Uси = 3 В; Iс = 10 мА; f = 12 ГГц	мВт
4	4-12 ГГц	Uси = 2 В; Iс = 10 мА; f = 8 ГГц	дБ	Uси = 2 В; Iс = 10 мА; f = 8 ГГц	мВт
5	1-10 ГГц	Uси = 2 В; Iс = 40 мА; f = 4 ГГц	дБ	Uси = 5 В; Iс = 60 мА; f = 4 ГГц	мВт
6	8-14 ГГц	Uси = 2 В; Iс = 10 мА; f = 12 ГГц	дБ	Uси = 2 В; Iс = 10 мА; f = 12 ГГц	мВт
7	0.5-4 ГГц	Uси = 2 В; Iс = 80 мА; f = 2 ГГц	дБ	Uси = 4 В; Iс = 150 мА; f = 2 ГГц	мВт

## Параметры эквивалентных схем

Таблица 6.2 – 1 Вариант (ЗП618)

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
VTO	В	-1.65
VTOSC	В	0.23
ALPHA	-	2.2
BETA	мА/В	220.0
GAMMA	-	0.03
GAMMADC	-	0.07
Q	-	1.4
DELTA	-	0.04
VBI	В	0.75
Is	мкА	0.1
N	-	1.18
RIS	Ом	1.5
RID	Ом	1.0
TAU	нс	0.001
CDS	пФ	0.09
RDB	Ом	1
CBS	пФ	0.393
CGSO	пФ	2.6
CGDO	пФ	0.11
DELTA1	-	0.2
DELTA2	-	0.3
FC	-	0.5
VBR	В	9.2
RG	Ом	2.5
RD	Ом	1.0
RS	Ом	0.4
RGMET	Ом	0.001
LS	нГн	0.35
LG	нГн	0.45
LD	нГн	0.1
TNOM	-	50°C

Таблица 6.3 – 2 Вариант (ЗПЗ73 А,Б)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-1.5
VTOSC	В	0
ALPHA	-	1.7
BETA	мА/В	70.0
GAMMA	-	0.001
GAMMADC	-	0.01
Q	-	1.2
DELTA	-	0
VBI	В	0.7
Is	мкА	0.16
N	-	1
RIS	Ом	2.5
RID	Ом	1.61
TAU	нс	0.001
CDS	пФ	0.0166
RDB	Ом	150
CBS	пФ	9.0
CGSO	пФ	0.78
CGDO	пФ	0.091
DELTA1	-	0.3
DELTA2	-	0.2
FC	-	0.5
VBR	В	10
RG	Ом	1.5
RD	Ом	1.0
RS	Ом	1.2
RGMET	Ом	2.0
LS	нГн	0.051
LG	нГн	0.358
LD	нГн	0.239
AFAC	-	1
NFING	-	1

Таблица 6.4 – 3 Вариант (ЗПЗ74)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-1.05
VTOSC	В	0
ALPHA	-	2
BETA	мА/В	24
GAMMA	-	0.001
GAMMADC	-	0.02
Q	-	1.4
DELTA	-	0
VBI	В	0.7
Is	мкА	0.02
N	-	1
RIS	Ом	4
RID	Ом	1
TAU	нс	0.0018
CDS	пФ	0.0438
RDB	Ом	450
CBS	пФ	3.4
CGSO	пФ	0.209
CGDO	пФ	0.0184
DELTA1	-	0.3
DELTA2	-	0.2
FC	-	0.5
VBR	В	10
RG	Ом	1.2
RD	Ом	3
RS	Ом	3.75
RGMET	Ом	2
LS	нГн	0.053
LG	нГн	0.36
LD	нГн	0.36
AFAC	-	1
NFING	-	1

Таблица 6.5 – 4 Вариант(ЗПЗ98А-5)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-0.9
VTOSC	В	0
ALPHA	-	2.5
BETA	мА/В	0.074
GAMMA	-	0.002
GAMMADC	-	0.02
Q	-	1.2
DELTA	-	0.2
VBI	В	0.7
Is	мкА	0.02
N	-	1
RIS	Ом	3.5
RID	Ом	1
TAU	нс	1.5
CDS	пФ	0.095
RDB	Ом	315
CBS	пФ	5
CGSO	пФ	0.336
CGDO	пФ	0.0448
DELTA1	-	0.3
DELTA2	-	0.2
FC	-	0.5
VBR	В	10
RG	Ом	1.25
RD	Ом	1.875
RS	Ом	0.625
RGMET	Ом	0.5
LS	нГн	0
LG	нГн	0
LD	нГн	0
AFAC	-	1
NFING	-	1

Таблица 6.6 – 5 Вариант(ЗП618В)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-1.15
VTOSC	В	0.28
ALPHA	-	3.0
BETA	мА/В	86.0
GAMMA	-	0.03
GAMMADC	-	0.06
Q	-	2.1
DELTA	-	0.56
VBI	В	1.2
Is	мкА	0.05
N	-	1.18
RIS	Ом	3.5
RID	Ом	2.5
TAU	нс	0.001
CDS	пФ	0.09
RDB	Ом	1
CBS	пФ	0.293
CGSO	пФ	0.941
CGDO	пФ	0.05
DELTA1	-	0.2
DELTA2	-	0.3
FC	-	0.5
VBR	В	9.2
RG	Ом	4.0
RD	Ом	2.0
RS	Ом	0.8
RGMET	Ом	2.0
LS	нГн	0.001
LG	нГн	0.27
LD	нГн	0.04
Tg	-	50°C

Таблица 6.7 – 6 Вариант(ЗПЗ98Б)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-0.88
VTOSC	В	0
ALPHA	-	2.5
BETA	мА/В	0.05
GAMMA	-	0.002
GAMMADC	-	0.015
Q	-	1.03
DELTA	-	0.2
VBI	В	0.7
Is	мкА	0.02
N	-	1
RIS	Ом	2.5
RID	Ом	1
TAU	нс	1.3
CDS	пФ	0.041
RDB	Ом	400
CBS	пФ	5
CGSO	пФ	0.205
CGDO	пФ	0.022
DELTA1	-	0.3
DELTA2	-	0.2
FC	-	0.5
VBR	В	10
RG	Ом	3
RD	Ом	2
RS	Ом	1.3
RGMET	Ом	0.5
LS	нГн	0
LG	нГн	0
LD	нГн	0
AFAC	-	1
NFING	-	1



Таблица 6.8 – 7 Вариант(ЗП618А,Б)

<b>Том 1</b>		
<b>Обозн.</b>	<b>Размерн.</b>	<b>Значение</b>
VTO	В	-1.65
VTOSC	В	0.23
ALPHA	-	2.2
BETA	мА/В	220.0
GAMMA	-	0.03
GAMMADC	-	0.07
Q	-	1.4
DELTA	-	0.04
VBI	В	0.75
Is	мкА	0.1
N	-	1.18
RIS	Ом	1.5
RID	Ом	1.0
TAU	нс	0.001
CDS	пФ	0.09
RDB	Ом	1
CBS	пФ	0.393
CGSO	пФ	2.6
CGDO	пФ	0.11
DELTA1	-	0.2
DELTA2	-	0.3
FC	-	0.5
VBR	В	9.2
RG	Ом	2.5
RD	Ом	1.0
RS	Ом	0.4
RGMET	Ом	0.001
LS	нГн	0.35
LG	нГн	0.45
LD	нГн	0.1
TNOM	-	50°C

Таблица 6.9 – Значения рабочих точек

Вариант	Режим измерения
1	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 80 \text{ мА}$
2	$U_{си} = 3 \text{ В}; I_c = 20 \text{ мА}$
3	$U_{си} = 3 \text{ В}; I_c = 10 \text{ мА}$
4	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 10 \text{ мА}$
5	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 50 \text{ мА}$
6	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 10 \text{ мА}$
7	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 80 \text{ мА}$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дмитриев Е.Е. Основы моделирования в Microwave Office 2009. [Электронный ресурс]:- 2011. – 176с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: [http://www.eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev\\_mwo\\_2009\\_1.pdf](http://www.eurointech.ru/products/AWR/Dmitriev_mwo_2009_1.pdf) (дата обращения: 15.02.2022).
2. Компьютерное моделирование процессов в РЭС: Учебное пособие / Романовский М. Н. 2016. – 101 с. [Электронный ресурс] - Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/5916> (дата обращения: 15.02.2022).
3. Проектирование СВЧ устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В.Д. Разевига. – М. Солон-Пресс, 2003. – 496с.
4. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи/ Л.Г. Гасанов, А.А, Липатов, В.В. Марков, Н.А. Могильченко.-М.: Радио и связь, 1988. – 288с.
5. Машинное проектирование СВЧ устройств: Пер. с англ./ К.Гупта, Р. Гарж, Р.Чадха. М.: Радио и связь, 1987. – 428с.
6. Современные технологии и системы автоматизированного измерения на СВЧ: Конспект лекций / Глазов Г. Н. 2012. – 246 с. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://edu.tusur.ru/publications/1108> (дата обращения: 29.01.2022)