

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

В. Д. Дмитриев

Интермодуляционные искажения полевого транзистора

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 Интермодуляционные искажения полевого транзистора: 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. – 31 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы «Интермодуляционные искажения полевого транзистора» 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
ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА	5
1. Теоретический материал.....	5
2. Ход работы.....	7
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	22
ПРИЛОЖЕНИЕ А. ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ	23

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.

Цель работы:

- Определение интермодуляционных искажений 3-ого порядка, нахождение коэффициентов степенного полинома нелинейной крутизны G_m и выходной проводимости G_0 .
- Определение на основе нелинейной модели ТОМ1 изменение IP_3 (точки пересечения 3-ого порядка) и IP_2 (точки пересечения 2-ого порядка) при режимах транзистора в соответствии с вариантом задания в частотном диапазоне для соответствующей модели ПТШ.
- Построение зависимости основной и интермодуляционной составляющей на фиксированной частоте от уровня входной мощности.

ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ ПОЛЕВОГО ТРАНЗИСТОРА

1. Теоретический материал

Выходной сигнал линейных устройств пропорционален входному воздействию и не зависит от уровня входного воздействия, в то время как выходной сигнал нелинейных устройств имеет зависимость от амплитуды входного воздействия, в случае с усилителями, он имеет ограничение по уровню в следствии насыщения. Нелинейность амплитудной характеристики вызывает возникновение дополнительных спектральных составляющих, кратных частоте сигнала входного воздействия, на выходе усилителя. Данные нелинейные продукты вызывают повышение уровня шума в системе. На рисунке 1.1 приведены амплитудные характеристики линейных и нелинейных систем.

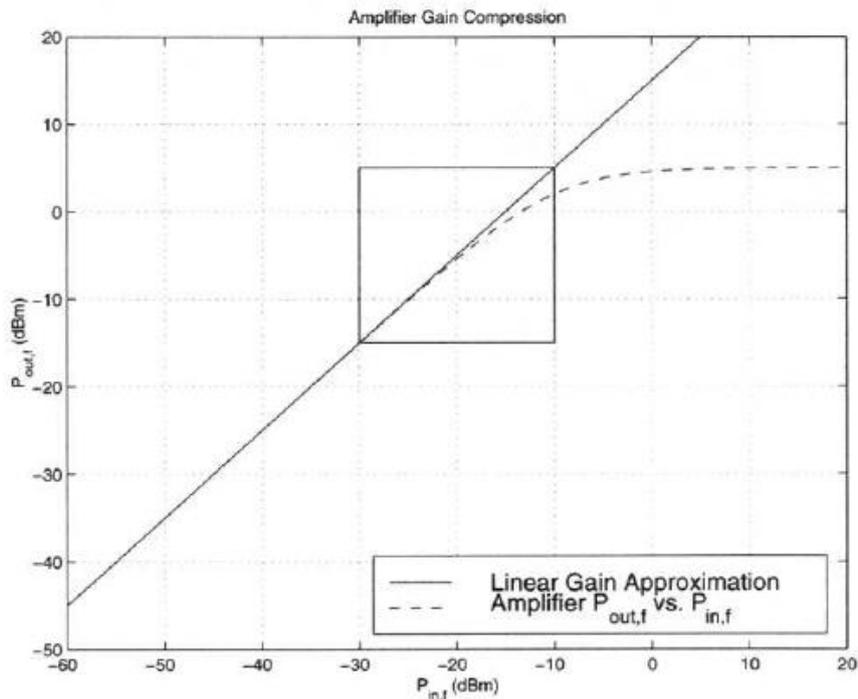


Рисунок 1.1 – Амплитудная характеристика линейного (сплошная линия) и нелинейного (пунктирная линия) устройства

В случае воздействия на нелинейный элемент двухчастотным воздействием (рисунок 1.2) появляется большой ряд комбинационных частот нелинейных продуктов разного порядка. В таблице 1.1 приведены формулы расчета комбинационных частот для второго и третьего порядка, спектрограмма комбинационных частот приведена на рисунке 1.3.

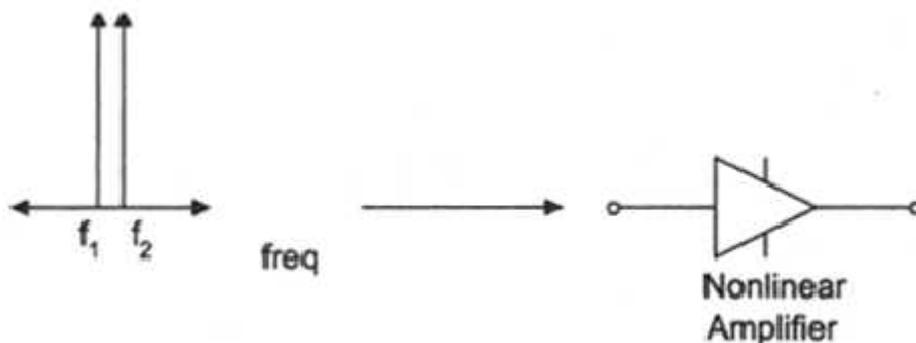


Рисунок 1.2 – Пример двухчастотного воздействия на нелинейный усилитель

Таблица 1.1 – Комбинационные частоты при двухчастотном воздействии

Входное воздействие	Второй порядок	Третий порядок
одночастотное	DC, $2 \cdot f_0$	$f_0, 3 \cdot f_0$
двухчастотное	DC, $2 \cdot f_1, 2 \cdot f_2,$ $f_1 + f_2, f_1 - f_2$	$f_1, f_2, 2 \cdot f_1 + f_2, 2 \cdot f_2 + f_1,$ $2 \cdot f_1 - f_2, 2 \cdot f_2 - f_1$

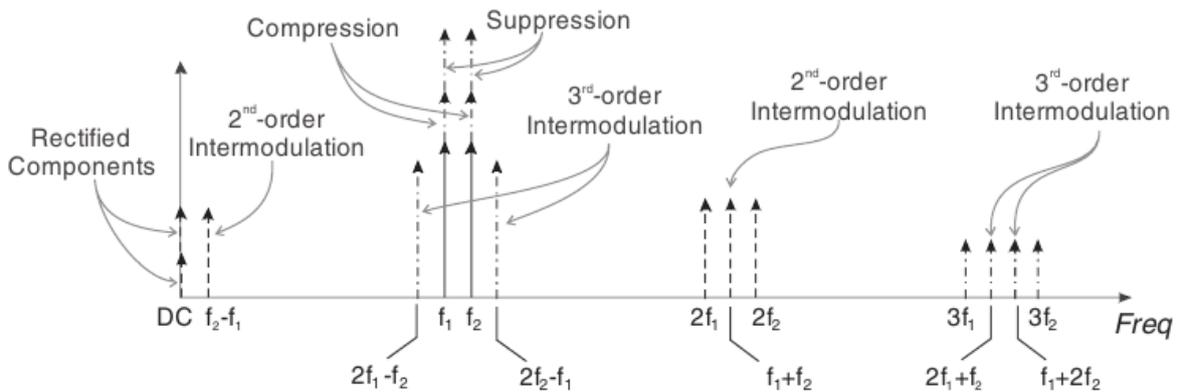


Рисунок 1.3 – Комбинационные частоты различных порядков на выходе усилителя

По рисунку 1.3 видно, что наиболее проблемными являются продукты третьего порядка, ибо их составляющие располагаются наиболее близко к основному сигналу. В случае, когда входной сигнал является широкополосным, нелинейные продукты вызывают расширение спектра что может привести к нежелательным проникновениям помех в соседний радио- канал.

Для описания нелинейных эффектов используются следующие характеристики:

- точка компрессии по уровню 1 дБ (P1dB) описывает момент начала перехода в область насыщения (ограничения);
- точка пересечения второго порядка (IP2) описывает взаимосвязь между амплитудами основного тона и интермодуляционной составляющей второго порядка.
- точка пересечения третьего порядка (IP3) описывает взаимосвязь между амплитудами основного тона и интермодуляционной составляющей третьего порядка.

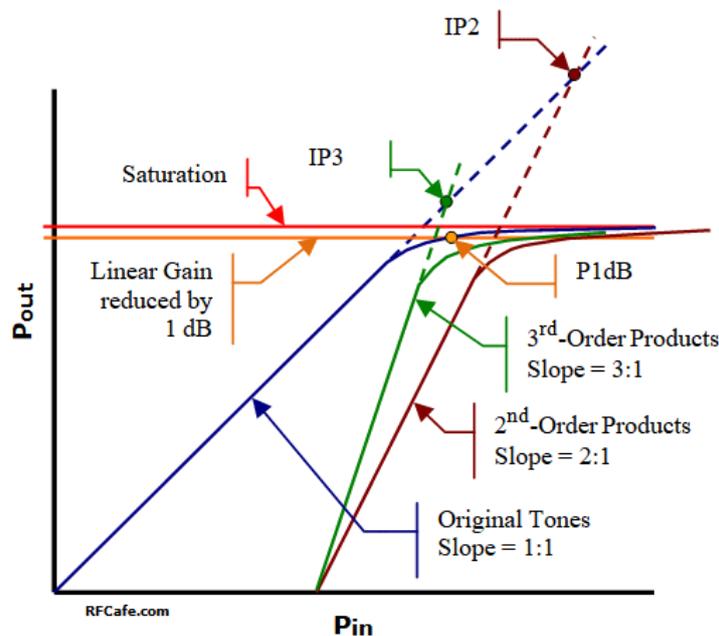


Рисунок 1.4 – Амплитудная характеристика нелинейных продуктов второго и третьего порядка

2. Ход работы

1) Построить выходные ВАХ (IVCURVE) и проходную (зависимость I_c от напряжения на затворе U_g) (IVCURVE2). При этом шаг изменения U_g сделать 0.01 В, чтобы были более плавные коэффициенты G_m .

1.1) Для начала нужно собрать схемы

1.2) После сборки схем, создайте график в разделе Graphs.

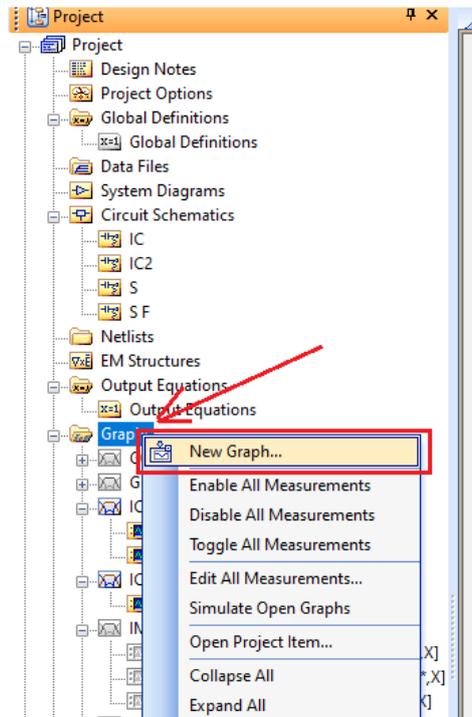


Рисунок 2.1 – Создание нового графика

1.3) Добавьте на созданный график измерение.

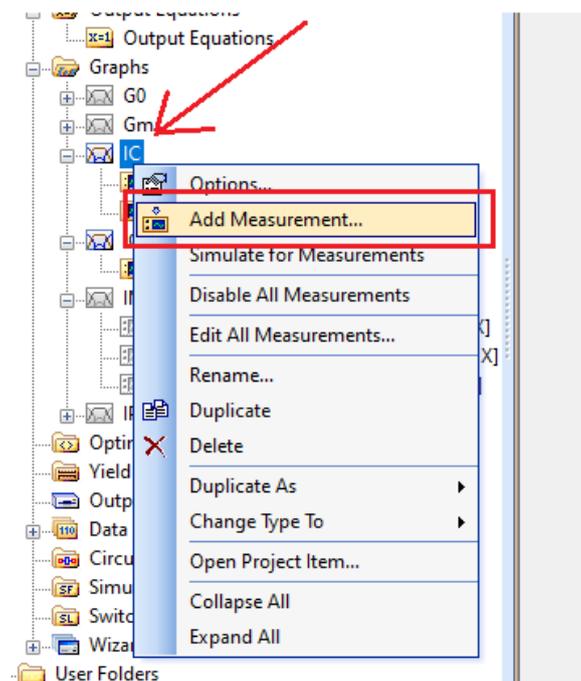


Рисунок 2.2 – Добавление измерений на график

1.4) Настройте измерение для получения выходной ВАХ для вашей схемы.

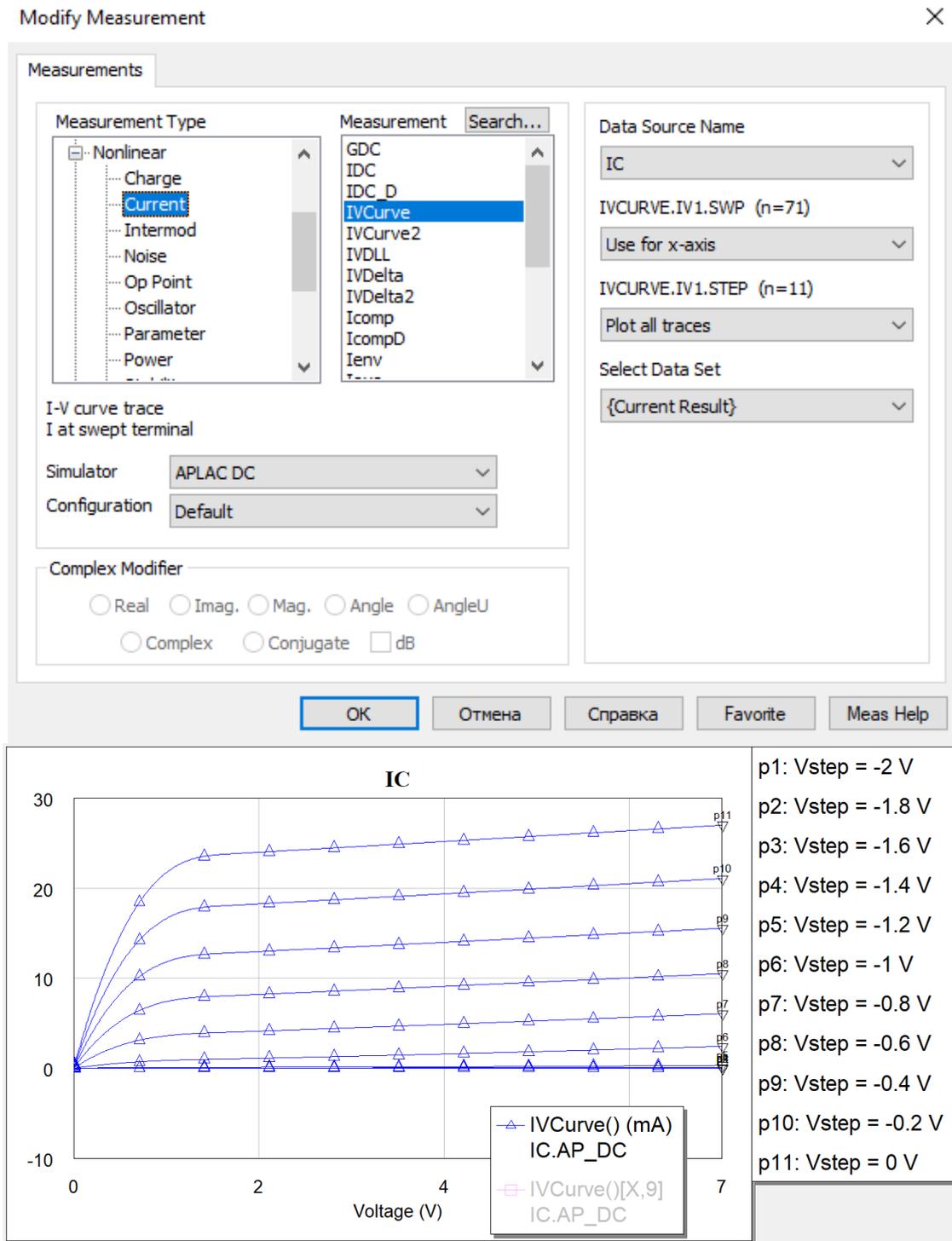


Рисунок 2.3 – Настройка выходной ВАХ

1.5) Для получения графика проходной ВАХ, создайте ещё 1 график для другой схемы и добавьте на него измерение проходной ВАХ.

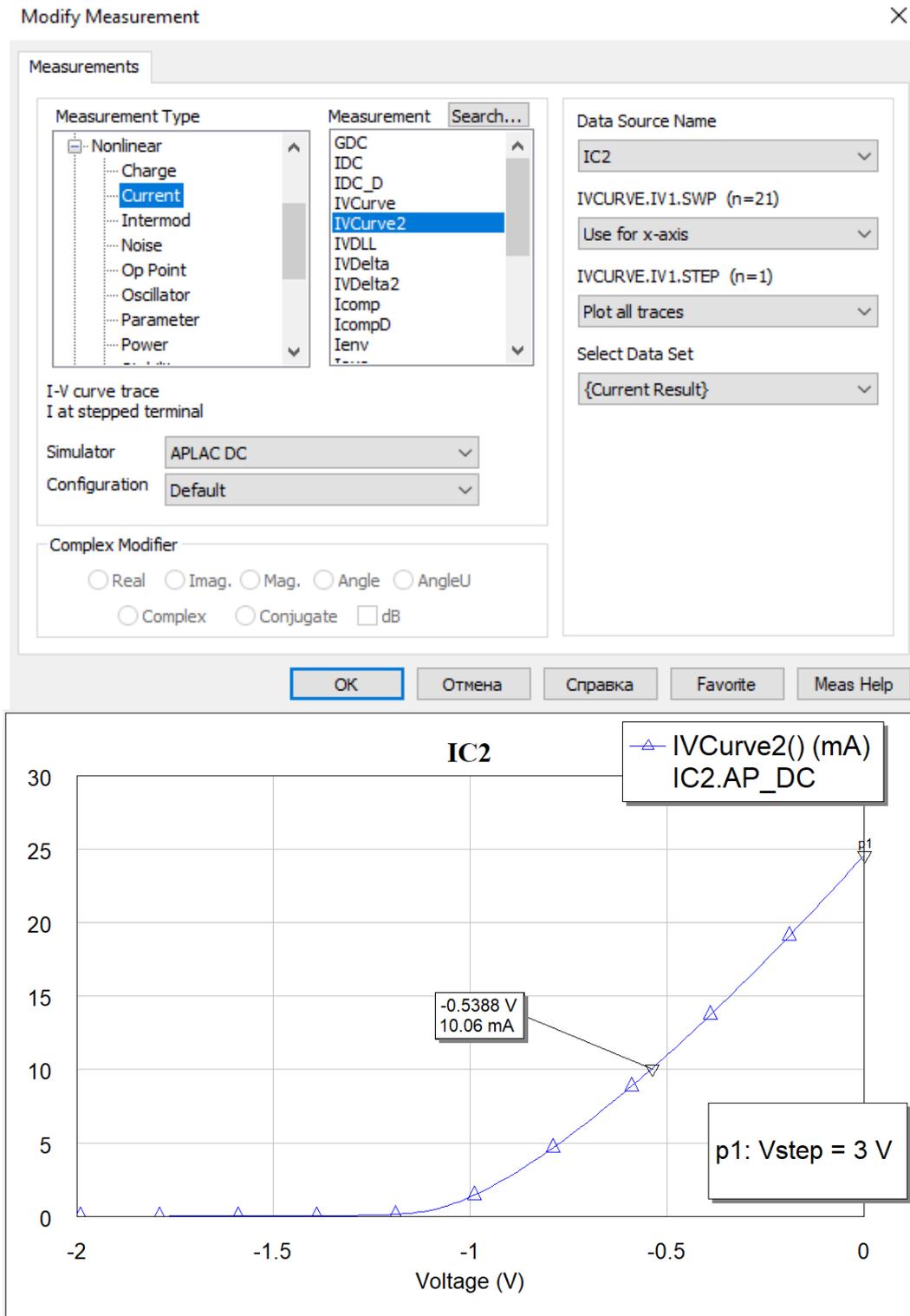


Рисунок 2.4 – Проходная ВАХ

1.6) Для изменения шага измерения нужно на схеме изменить параметр VSWEET_step

```
IVCURVE
ID=IV1
VSWEEP_start=0 V
VSWEEP_stop=7 V
VSWEEP_step=0.01 V
VSTEP_start=-2 V
VSTEP_stop=0 V
VSTEP_step=0.2 V
```

Рисунок 2.5 – Шаг измерения

- 2) Рассчитать коэффициенты G_m , G_{m2} , G_{m3} и построить графики их изменения от U_g .
Метками обозначить G_m , G_{m2} , G_{m3} для U_g в рабочей точке
- 2.1) Создать во вкладке Output Equations, выходные измерения

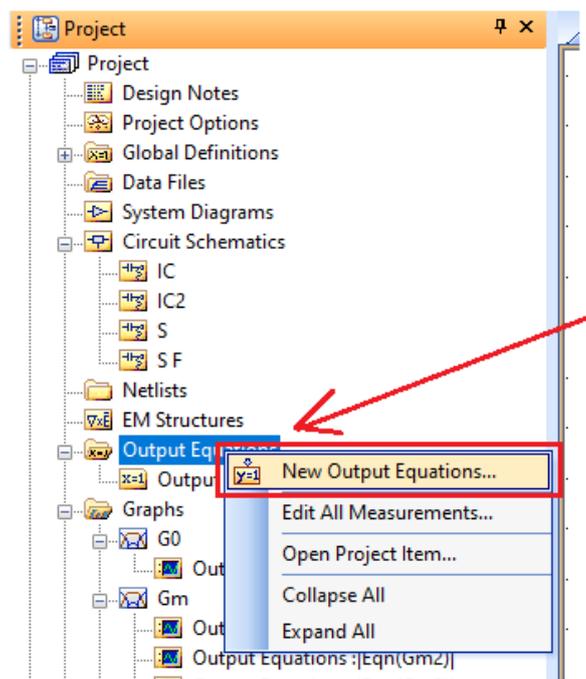


Рисунок 2.6 – Вкладка Output Equations

- 2.2) Перенесите в открывшееся окно уравнение для IVCURVE2.

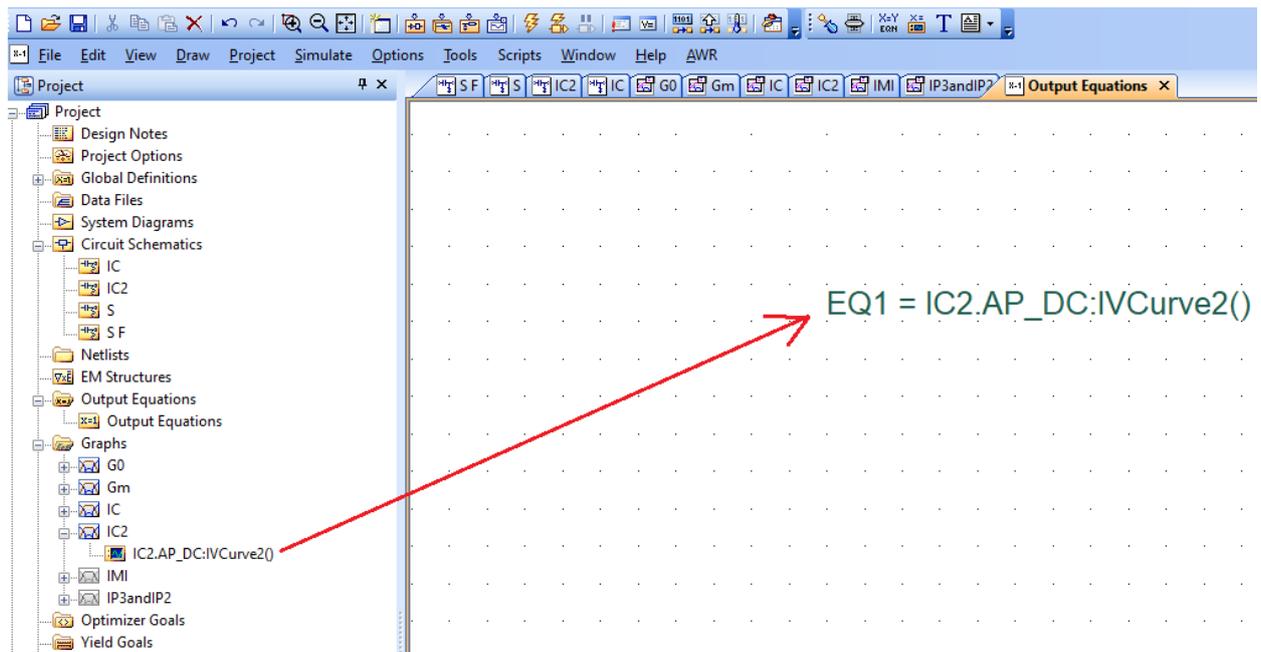


Рисунок 2.7 – Перенос уравнения

2.3) Добавить уравнения для G_m , G_{m2} , G_{m3}

$$G_m = \frac{dI_c}{dU_g}, G_{m2} = \frac{1}{2} * \frac{dG_m}{dU_g}, G_{m3} = \frac{1}{3} * \frac{dG_{m2}}{dU_g}.$$

При этом значения U_g должны полностью совпадать со значением строк VSWEEP на схеме для проходной ВАХ.

Der – производная.

$$EQ1 = IC2.AP_DC:IVCurve2()$$

$$U_g = stepped(-2, 0, 0.01)$$

$$G_m = der(EQ1, U_g) \quad G_m:$$

$$G_{m2} = der(G_m, U_g) * 1/2 \quad G_{m2}:$$

$$G_{m3} = der(G_{m2}, U_g) * 1/3 \quad G_{m3}:$$

Рисунок 2.8 – Уравнения для G_m , G_{m2} , G_{m3}

2.4) Выведите график зависимости коэффициентов G_m , G_{m2} , G_{m3} от значения U_g .

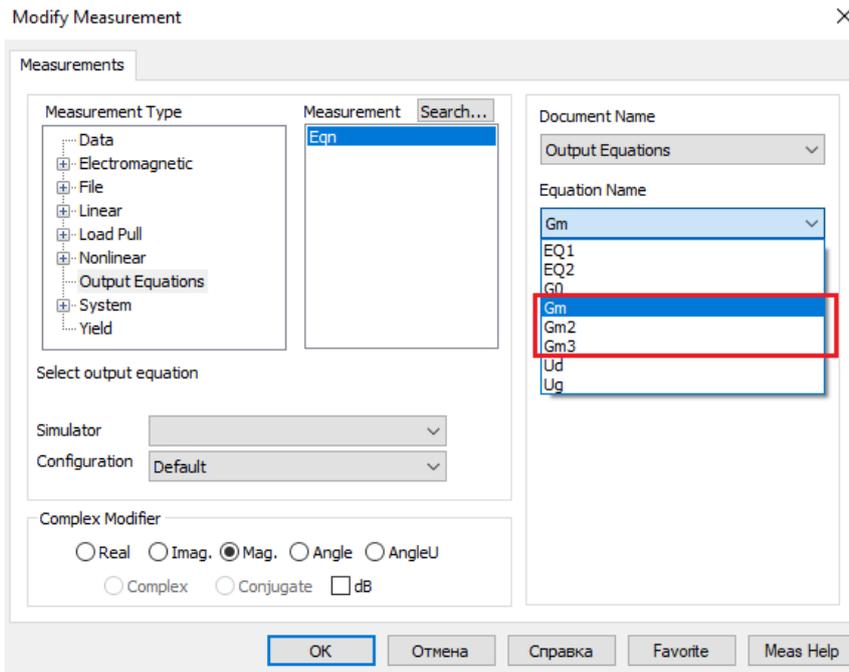


Рисунок 2.9 – Окно настройки графиков

2.5) Обозначьте метками значения этих коэффициентов в рабочей точке U_g

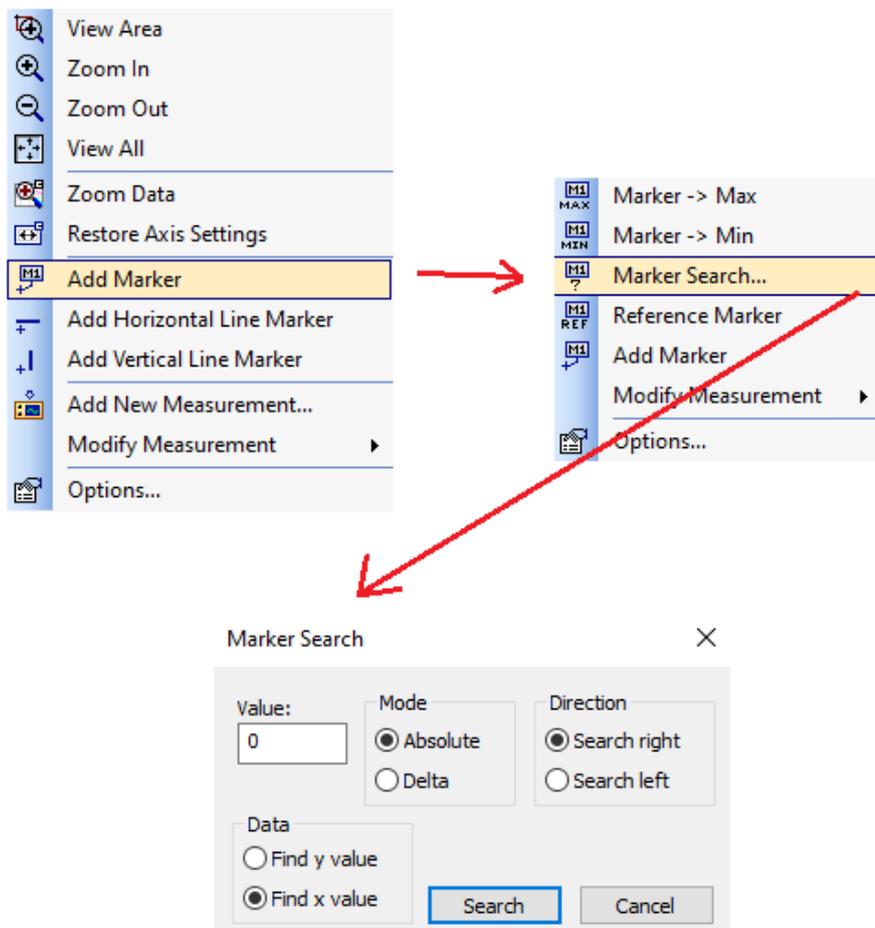


Рисунок 2.10 – Добавление маркеров

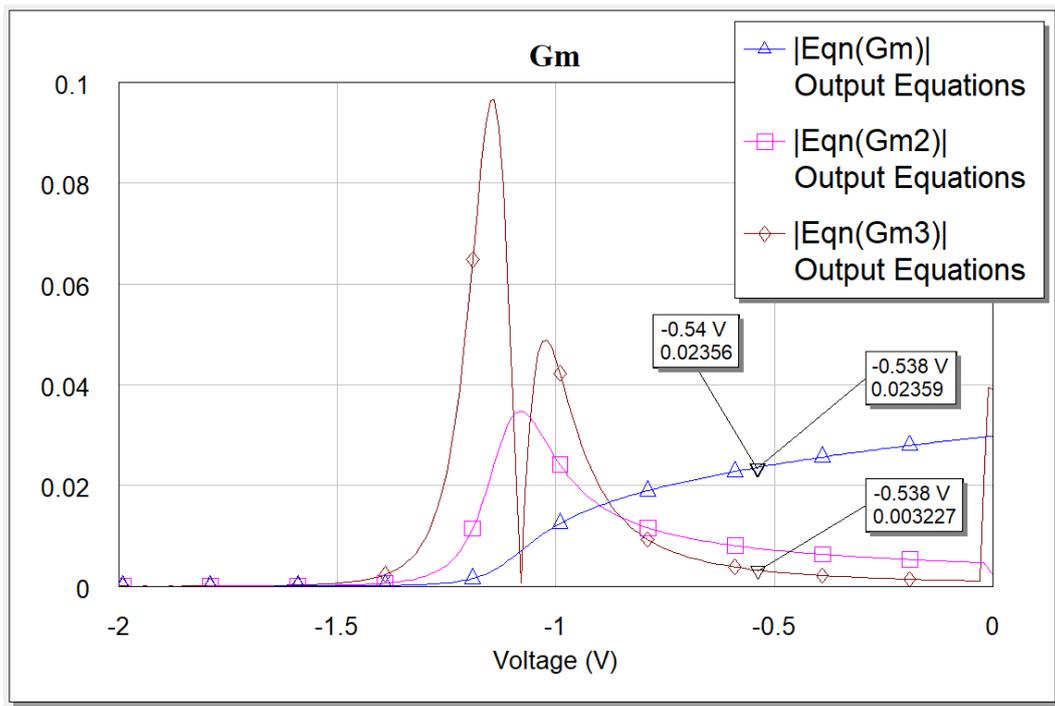


Рисунок 2.11 – График зависимости коэффициентов Gm, Gm2, Gm3 от значения Ug

3) Рассчитать и построить график выходной проводимости G0.

3.1) Для выходных ВАХ выделить кривую наиболее близкую Ug в рабочей точке. И построить график ее изменения от напряжения на стоке Ud.

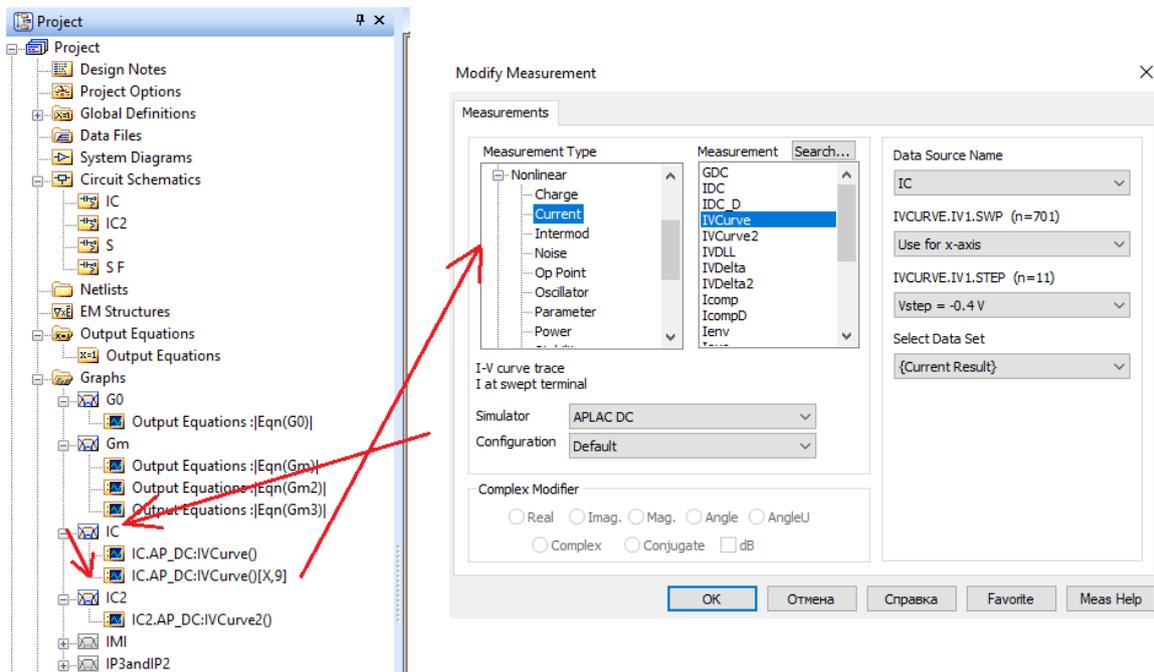


Рисунок 2.12 – Настройка графиков

3.2) Перенести полученные значения в Output Equations и определить выходную проводимость $G_0 = \frac{dI_c}{dU_d}$.

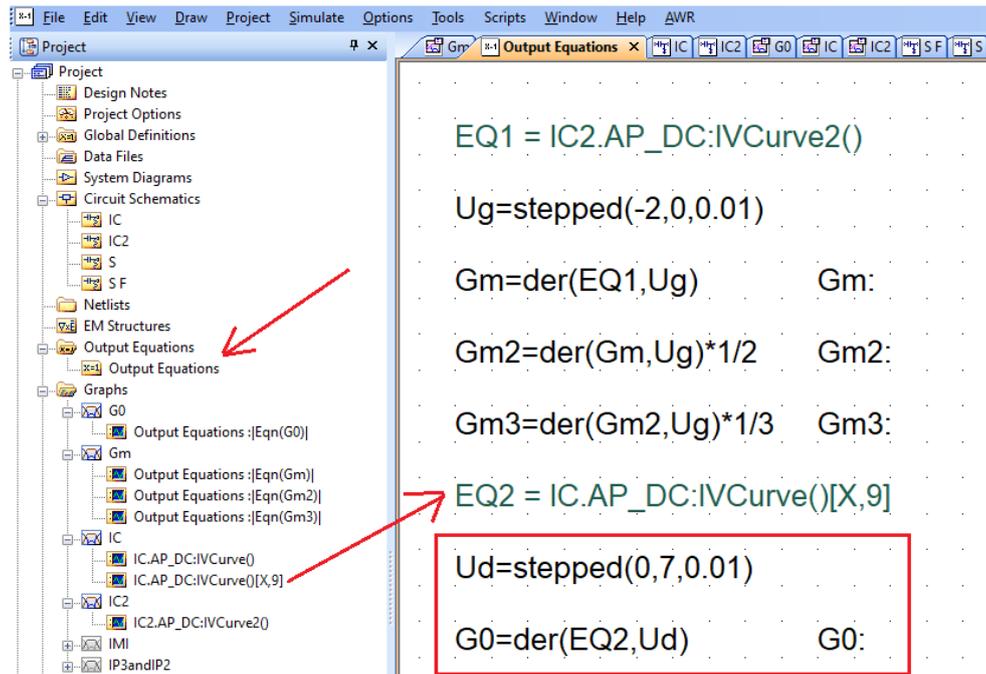


Рисунок 2.13 – Перенос значения во вкладку Output Equations

3.3) Построить график ее изменения и обозначить меткой значение G0 соответствующее напряжению Ud в рабочей точке.

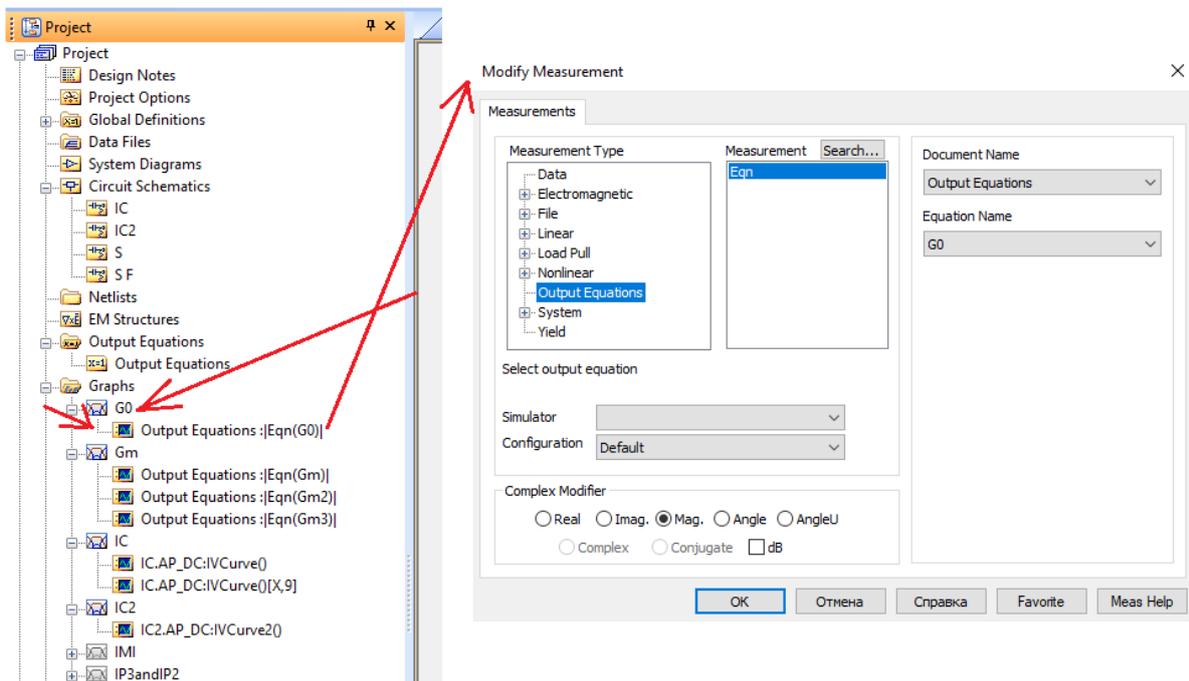


Рисунок 2.14 – Настройка графика

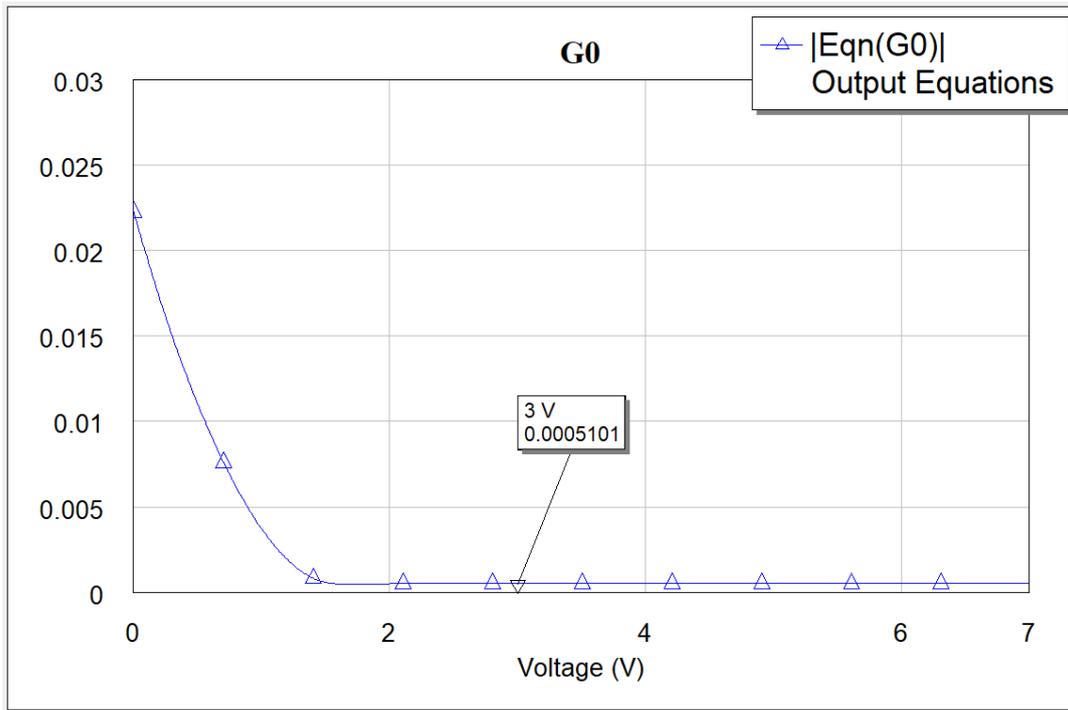


Рисунок 2.15 – График выходной проводимости

- 4) Определить точку пересечения $IP3$ на основе полученных коэффициентов:

$$IP3 = \frac{2}{3} * \frac{Gm^3 * Z}{Gm^3}, \text{ где } Z0=50\text{Ом.}$$

Перевести $IP3$ в dBm $IP3(dBm) = 10 * \log IP3 + 30$

- 5) Создать схему S и построить графики основной частоты $f1$ интермодуляции $2f1-f2$ и $IP3$

- 5.1) Создать схему S с использованием Biastee и источников напряжения.

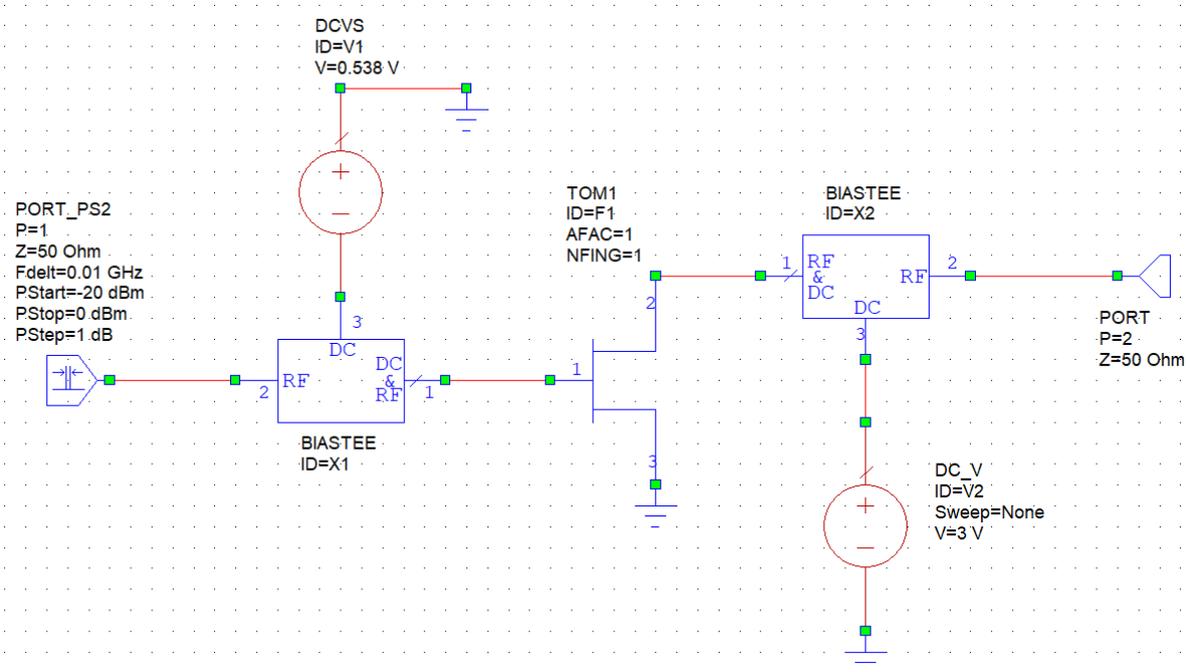


Рисунок 2.16 – Схема для получения S-параметров

- 5.2) В Project Options задать одну частоту (в соответствии с вариантом)

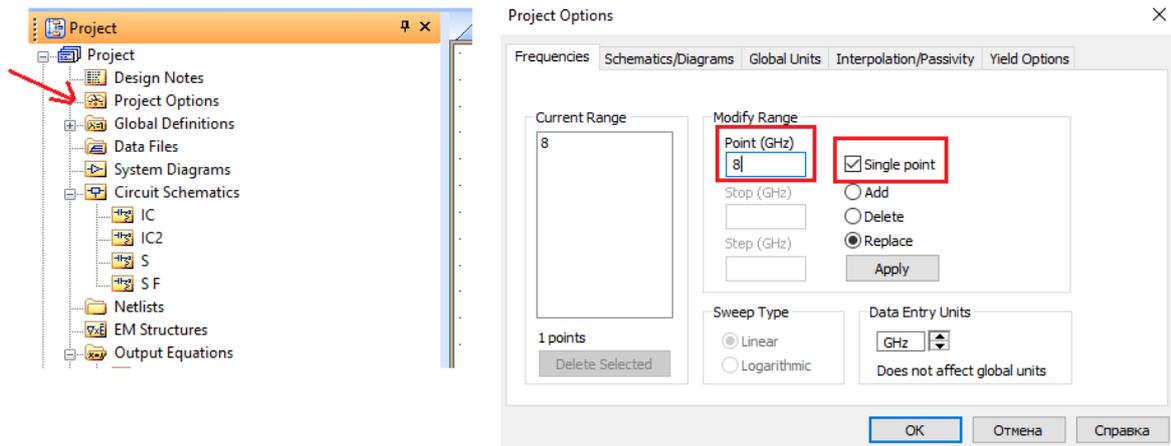


Рисунок 2.17 – Настройка частоты

5.3) Включить на вход с 2-частотным сигналом. Мощность от -20 дВт до 0 дВт. Разнос 10 МГц.

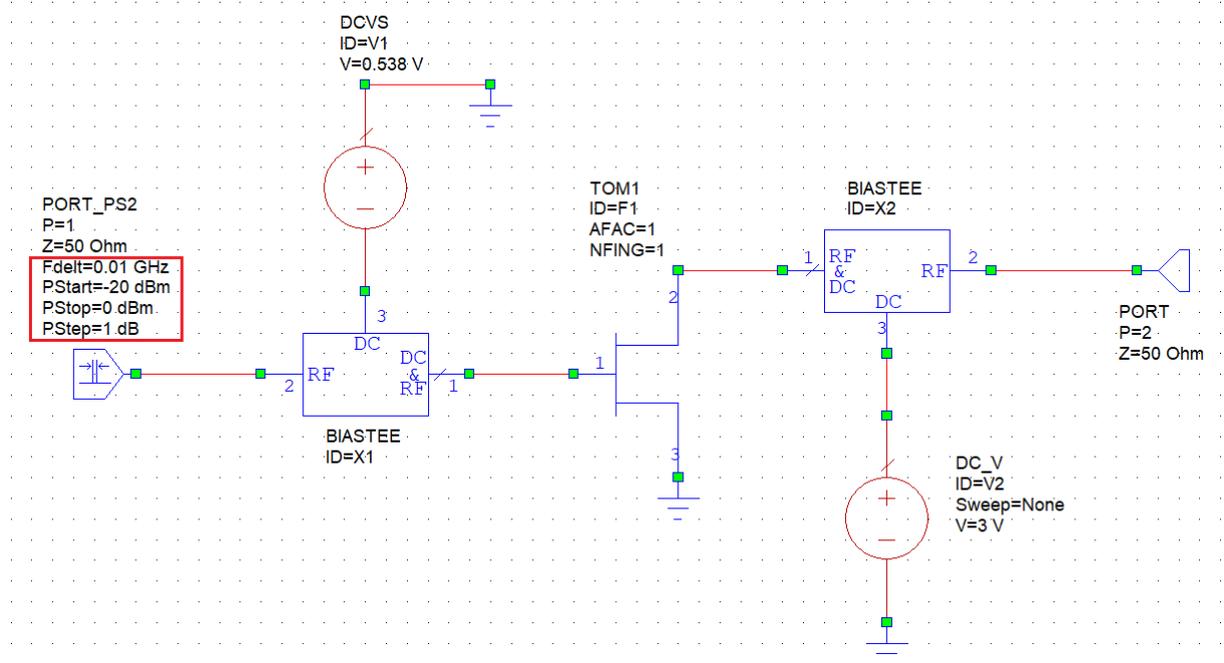


Рисунок 2.18 – Схема для получения S-параметров

5.4) Построить графики основной частоты f_1 интермодуляции $2f_1-f_2$ и IP_3

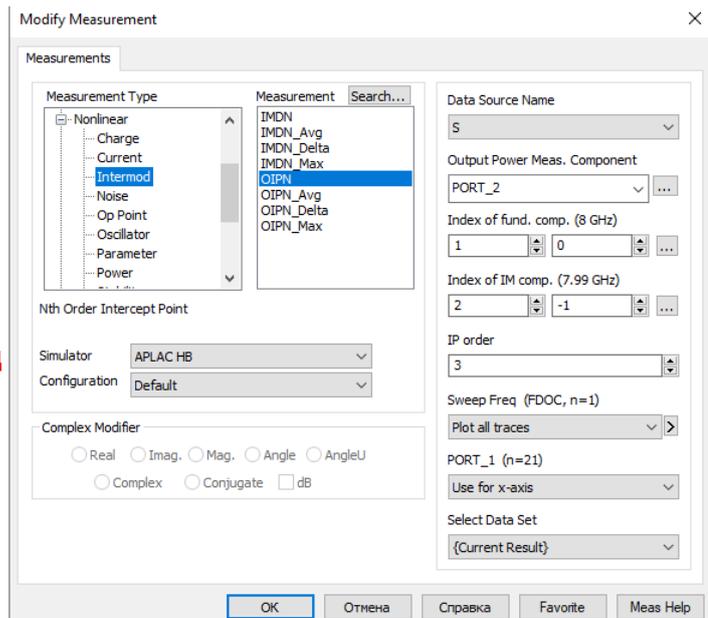
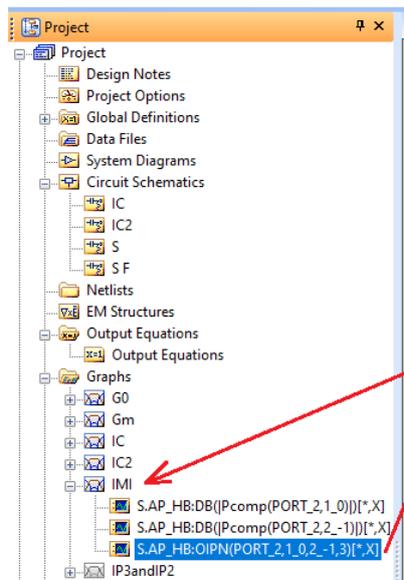
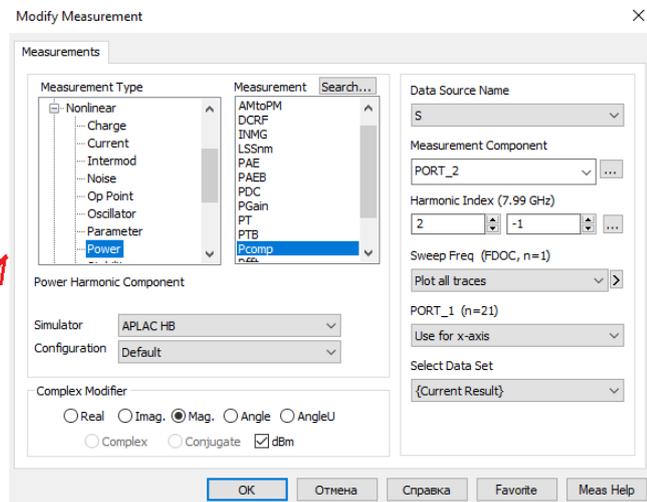
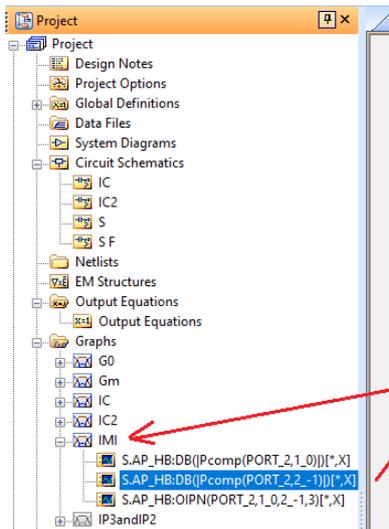
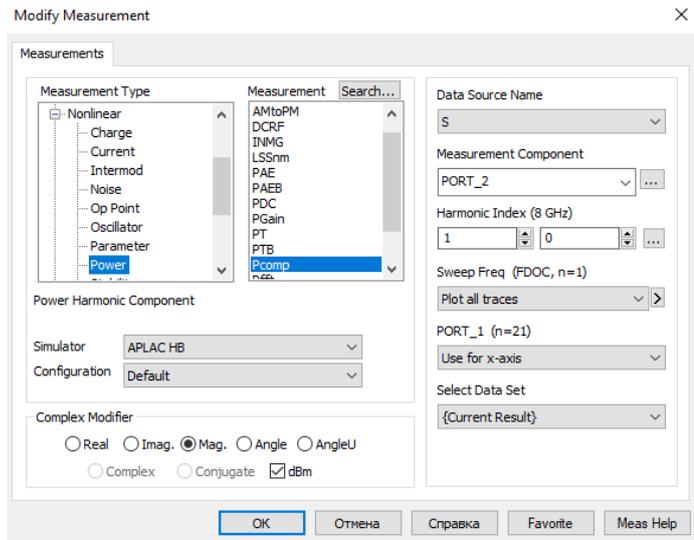
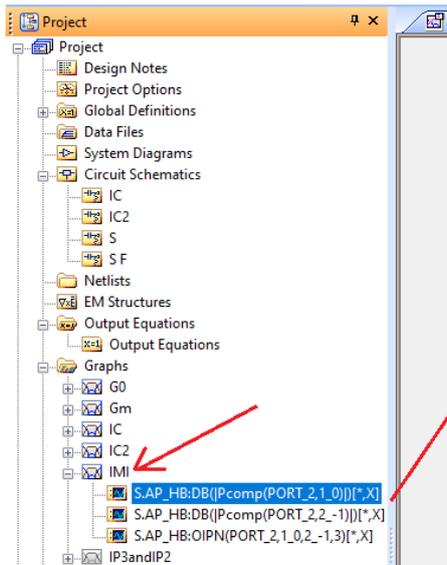


Рисунок 2.19 – Настройка графиков

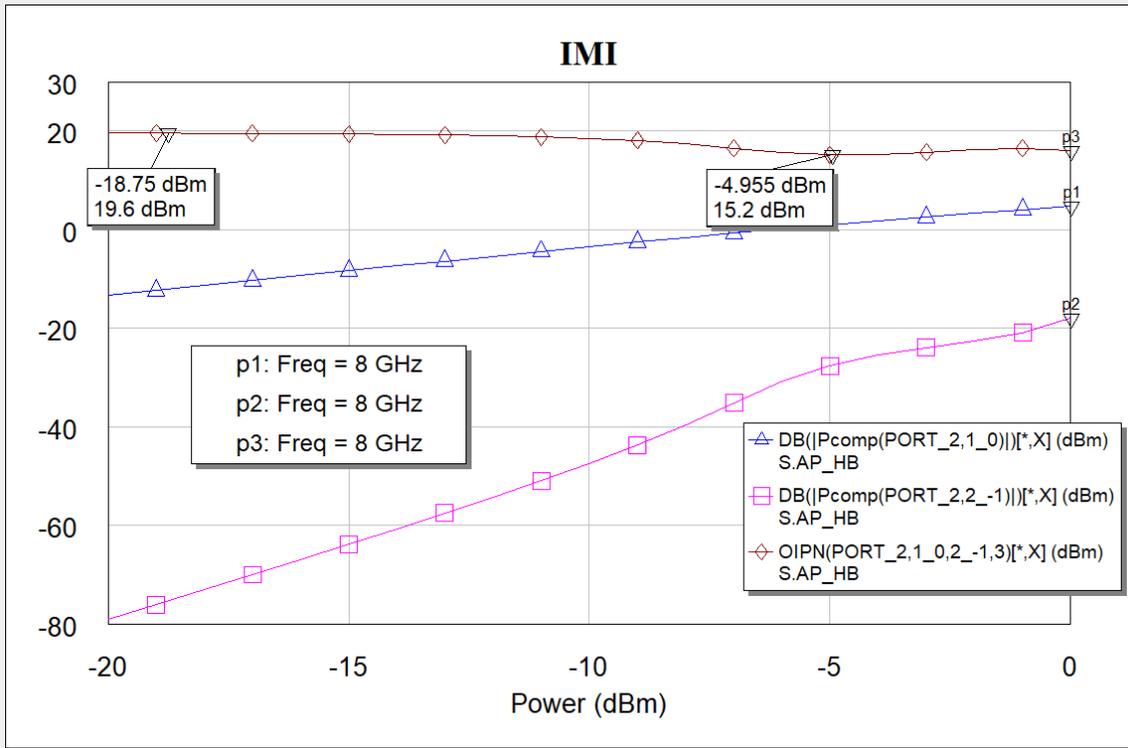


Рисунок 2.20 – Графики основной частоты f_1 интермодуляции $2f_1-f_2$ и IP_3

- б) Нажать на схему правой клавишей мышь и в Options задать частоты, соответствующие транзистору с шагом 0.1 ГГц. Входной порт как и п.5 только мощность равна -20 дБм (фиксированная). Построить графики IP_3 и IP_2 от частоты. IP_2 считать для частоты f_1+f_2 .
- б.1) Продублировать схему S назвать SF.

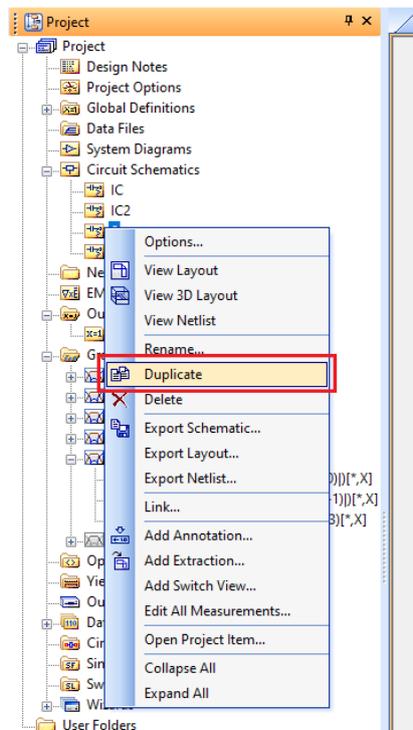


Рисунок 2.21 – Создание копии схемы

- б.2) Включить в схему SWPFRQ, который находится в Elements→Simulation Control.

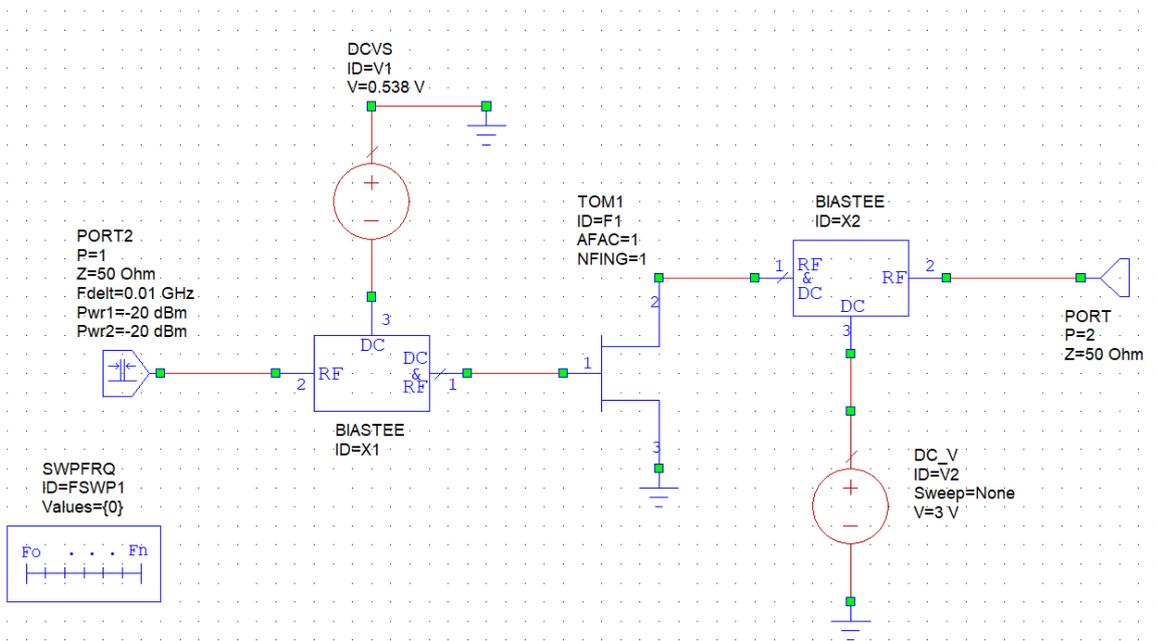
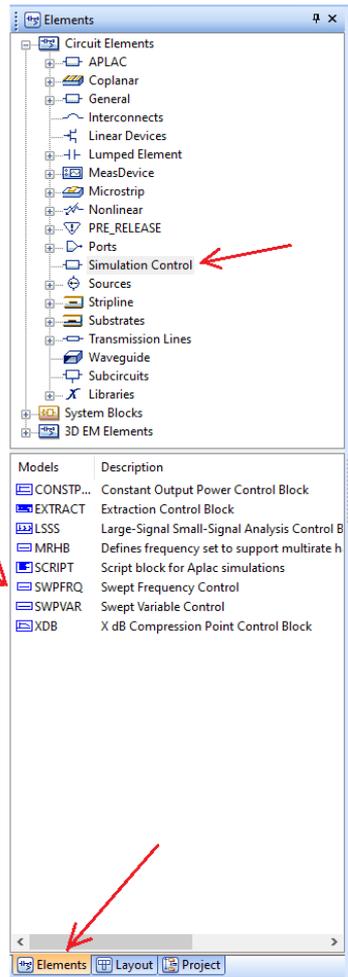


Рисунок 2.22 – Изменение схемы

6.3) Нажать на схему правой клавишей мышь и в Options задать частоты, соответствующие транзистору с шагом 0.1 ГГц.

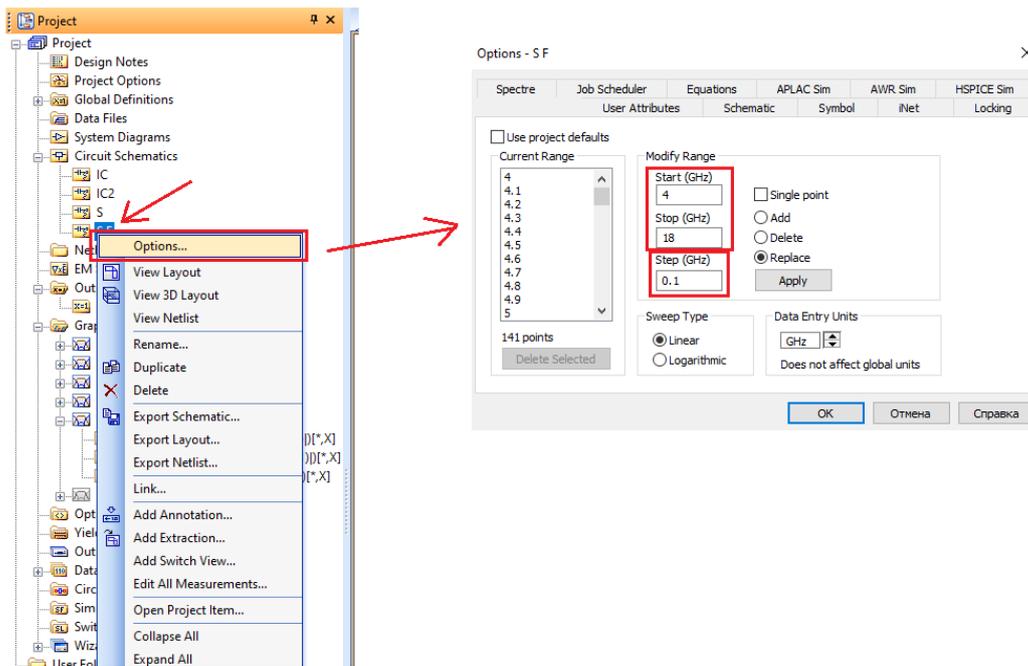


Рисунок 2.23 – Настройка частот

- 6.4) Входной порт, как и п.5 только мощность равна -20 дВм (фиксированная).
 6.5) Построить графики IP3 и IP2 от частоты.
 IP2 считать для частоты f_1+f_2

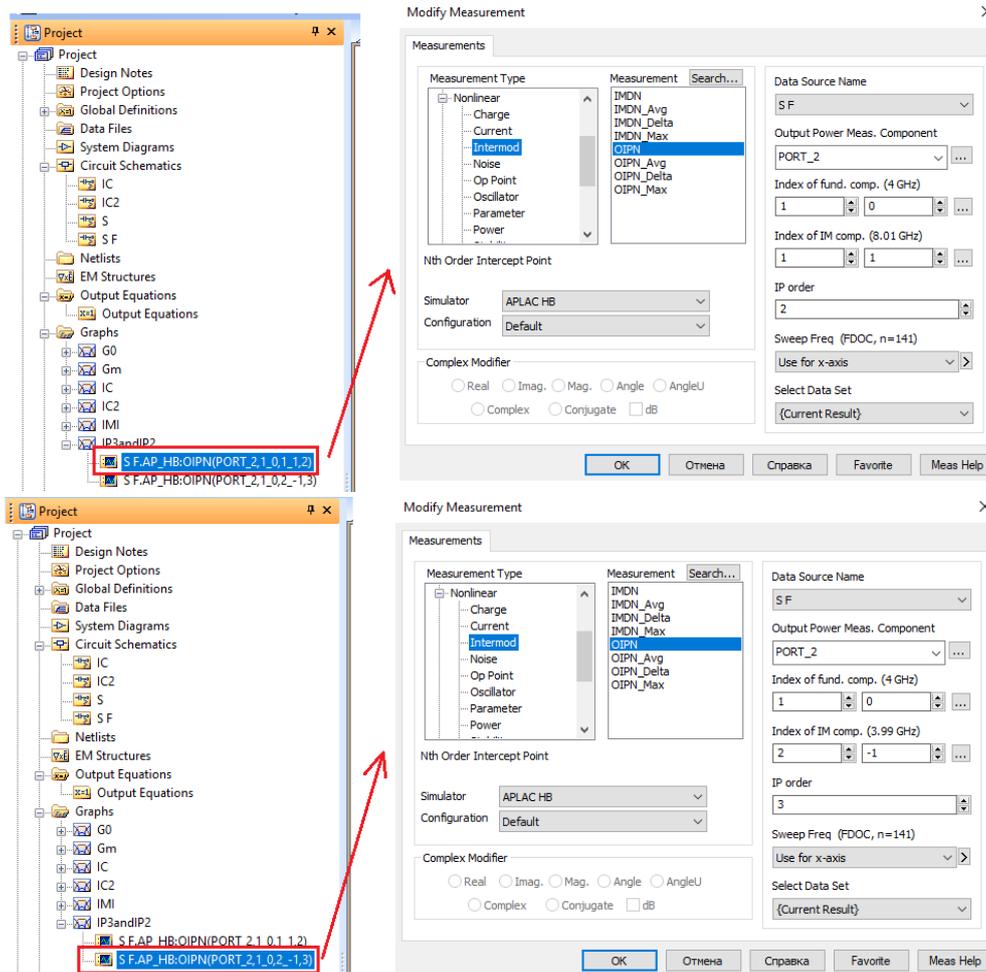


Рисунок 2.24 – Настройка графиков

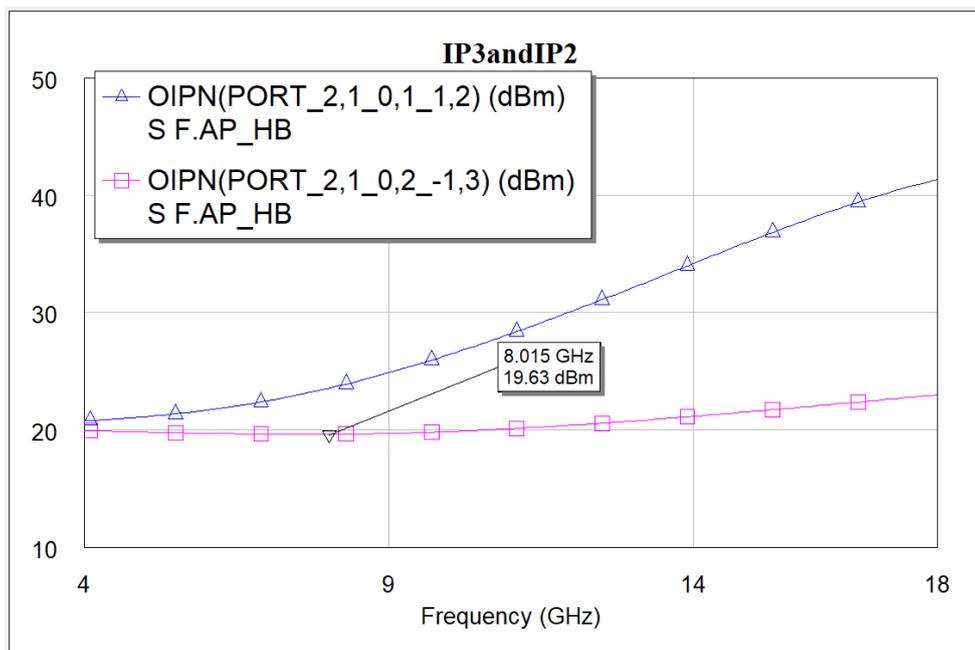


Рисунок 2.25 – Графики IP3 и IP2

- 7) Сделать вывод на основе полученных результатов, а именно:
- сравнить расчет IP3 по коэффициентам и моделировании
 - объяснить частотную зависимость IP3 и IP2

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 (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)

**ПРИЛОЖЕНИЕ А.
ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЙ**

Таблица А.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 А.2 – Вариант 1

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
RivivET	Ом	0.001
LS	нГн	0.35
LG	нГн	0.45
LD	нГн	0.1
TNOM	-	50°C

Таблица А.3 – Вариант 2

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
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 А.4 – Вариант 3

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
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 А.5 – Вариант 4

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
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 А.6 – Вариант 5

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
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 А.7 – Вариант 6

Том 1		
Обозн.	Размерн.	Значение
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 А.8 – Вариант 7

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 А.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	$U_{си} = 2 \text{ В}; I_c = 80 \text{ мА}$