

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

В. Д. Дмитриев
Д. С. Брагин

Лабораторная работа №4
«Полевые транзисторы»

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

Томск
2020

УДК 621.382.3
ББК 32.84
Д 534

Рецензент(ы):

Фамилия И. О., должность, ученая степень

Бахтин А.А., заведующий кафедрой телекоммуникационных систем
национального исследовательского университета МИЭТ, канд. техн. наук

Дмитриев, Владимир Дмитриевич

Д 534 Лабораторная работа №4 «Полевые транзисторы»: Методические указания по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств» для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратура 11.04.01 – «Радиотехника», 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» / В. Д. Дмитриев, Д. С. Брагин. – Томск: Томск. Гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2020. – 17 с.

Представлены методические указания по выполнению лабораторной работы №4 «Полевые транзисторы» по дисциплине «Автоматизированное проектирование СВЧ устройств» для студентов, обучающихся по направлению подготовки магистратура 11.04.01 – «Радиотехника», 11.04.02 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Одобрено на заседании каф. Телекоммуникаций и основ радиотехники,
протокол № 3 от 26.11. 2020 г. _____

УДК 621.382.3
ББК 32.84

© Дмитриев В. Д., Брагин Д. С.,
2020

© Томск. Гос. Ун-т систем упр. и
радиоэлектроники, 2020

Оглавление

Введение.....	4
1 Теоретические сведения	5
2 Расчетное задание	8
2.1 Перевод S-параметров в классические Y-параметры.....	8
2.2 Определение входного и выходного сопротивления	8
2.3 Оценка усилительных свойств четырехполюсника на фиксированной частоте	9
2.4 Определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора ...	10
3 Пример расчета.....	11
4 Задание на лабораторную работу	13
4.1 Настройка проекта и создание схемы	13
4.2 Моделирование основных характеристик полевого транзистора.....	15
Приложение А	17

Введение

Целью работы является расчет основных параметров СВЧ четырехполюсников, определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора и моделирование характеристик полевого транзистора в системе автоматизированного проектирования NI AWRDE.

1 Теоретические сведения

Частотные потенциальные возможности применения СВЧ транзисторов оцениваются граничной частотой f_T и максимальной частотой генерации f_{MAX} . Граничная частота f_T определяется как частота, на которой модуль коэффициента передачи по току $|h_{21}|$ равен единице. Максимальная частота генерации f_{MAX} определяется как наибольшая, на которой способен генерировать транзистор в схеме автогенератора. При этом, f_{MAX} находится из условия равенства входной и выходной мощности транзистора и обычно превышает частоту f_T . Для определения f_T и f_{MAX} используют схему с общим эмиттером (ОЭ), для биполярных транзисторов и с общим истоком (ОИ) для полевых. Коэффициент передачи по току $|h_{21}|$ определяется как параметры четырёхполюсников (рисунок 1.1).

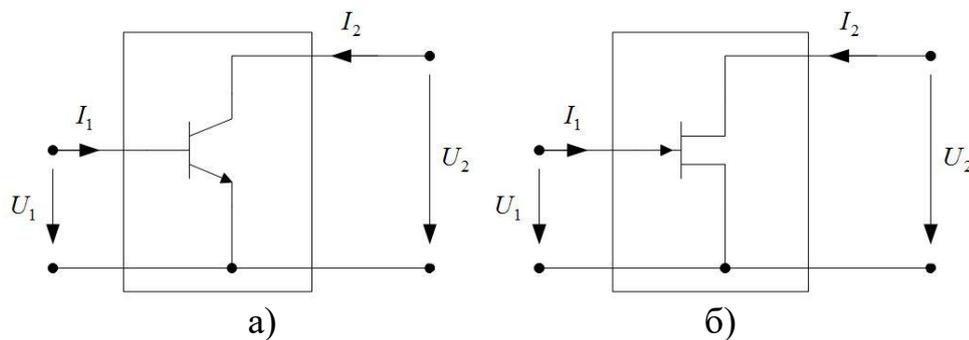


Рисунок 1.1 - Схема представления биполярного транзистора по схеме ОЭ (а) и полевого транзистора на схеме с ОИ (б).

Напряжение и токи связаны соотношениями:

$$\begin{cases} U_1 = h_{11}I_1 + h_{12}U_2 \\ I_2 = h_{21}I_1 + h_{22}U_2 \end{cases} \quad (1.1)$$

Коэффициент передачи по току h_{21} , равный отношению выходного тока I_2 к входному I_1 , определяется при условии короткого замыкания на выходе ($U_2 = 0$):

$$h_{21} = I_2 / I_1 \Big|_{\text{КЗ НА ВЫХ}} \quad (1.2)$$

Частотная зависимость $|h_{21}|$ для схем с ОЭ и ОИ, имеет вид, представленной на рисунке 1.2.

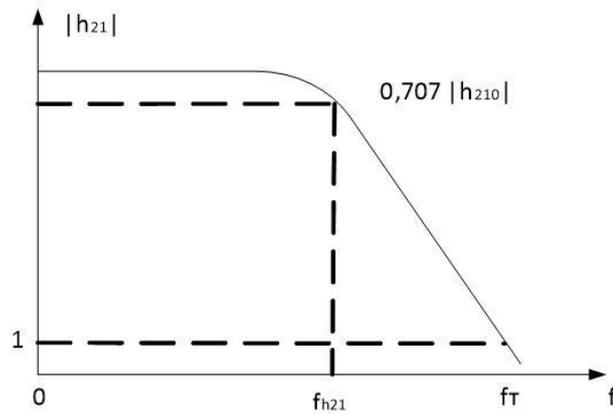


Рисунок - 1.2 частотная зависимость $|h_{21}|$ для транзисторов по схеме ОЭ и ОИ.

В низкочастотной области определяются предельная частота $f_{h_{21}}$, на которой коэффициент h_{21} уменьшается до уровня 0,707(-3 дБ) от величины $|h_{210}|$ на постоянном токе. Предельная частота $f_{h_{21}}$ для биполярных транзисторов обозначается как f_{β} , так как коэффициент усиления на постоянном токе для схемы с ОЭ $\beta = I_{K0} / I_{B0}$ (отношение тока коллектора к току базы) на частоте $f_{h_{21}}$ также уменьшается на 3дБ.

Предельная частота $f_{h_{21}}$ обычно используется при расчётах низкочастотных схем. СВЧ транзисторы чаще характеризуют частотой f_T , на которой $|h_{21}|$ равен единице.

Экспериментальное определение непосредственно $|h_{21}|$ для СВЧ транзисторов практически невозможно, так как режим короткого замыкания делает их потенциально неустойчивыми и приводит к генерации. Поэтому для определения частотной зависимости $|h_{21}|$ используют косвенный метод через [S]-параметры, которые измеряют в нагруженном по входу и выходу тракте (рис.1.1) при этом, коэффициент $|h_{21}|$ определяется:

$$|h_{21}| = \left| -S_{21} / [(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12}S_{21}] \right| \quad (1.3)$$

Таким образом, производя измерения S-параметров транзистора в широкой полосе частот на основе соотношения (1.3) можно построить частотную зависимость $|h_{21}|$ с целью определения $f_{h_{21}}$ и f_T . Однако следует отметить, что на высоких частотах возрастает погрешность измерения S-параметров, поэтому для определения f_T и f_{MAX} ограничиваются измерениями S-параметров до нескольких ГГц.

Известно, что начиная с частоты, превышающей в несколько (3-5) раз частоту $f_{h_{21}}$ уменьшается со скоростью в 6 дБ на октаву(октава соответствует соотношению частот двум), что позволяет определить ее методом экстраполяции. На основе этого, практическое определение граничной частоты сводится к определению $|h_{21}|$ на частоты выше $5 f_{h_{21}}$ и она рассчитывается по формуле:

$$f_T = |h_{21}| \cdot f_{ИЗМ} \quad (1.4)$$

Максимальная частота генерации f_{MAX} связана с нахождением максимального однонаправленного коэффициента усиления по мощности $K_{P_{\text{max max}}}$. На максимальной частоте генерации f_{MAX} коэффициент $K_{P_{\text{max max}}}$ равен единице. Известно, что на частоте выше $0,1f_T$ коэффициент $K_{P_{\text{max max}}}$ также уменьшается со скоростью в 6 дБ на октаву, поэтому для нахождения максимальной частоты генерации f_{MAX} достаточно определить величину $K_{P_{\text{max max}}}$ на одной частоте, которая выше $0,1f_T$. При этом, частота f_{MAX} ...определяется простым соотношением:

$$f_{\text{max}} = |K_{P_{\text{max}}}| f_{\text{ИЗМ}} \quad (1.5)$$

Таким образом, определения частотных параметров СВЧ транзисторов производиться в следующем порядке:

1. Измеряются S-параметры биполярного транзистора по схеме с ОЭ, полевого по схеме ОИ в низкочастотной области (от единицы до нескольких сотен мегагерц). Рассчитывается по формуле (1.3) $|h_{21}|$ и строится график его зависимости от частоты. Определяется предельная частота $f_{h_{21}}$, соответствующая значению $|h_{21}|$ равного 0,707 от $|h_{210}|$ -низкочастотного значения (на частоте 1-10 МГц).

2. После определения частоты $f_{h_{21}}$ измеряются S-параметры транзисторов на частоте, превышающей $5f_{h_{21}}$, и рассчитывается граничная частота f_T в соответствии с выражением (1.4).

3. С учетом найденного значения f_T производиться измерение S-параметров транзисторов на частоте равной $0,1f_T$, на которой определяется максимальной однонаправленный коэффициент усиления по мощности $K_{P_{\text{max max}}}$.

2 Расчетное задание

В ходе выполнения расчетного задания необходимо выполнить расчет основных параметров полевого транзистора, как четырехполюсника, в соответствии с вариантами, приведенными в приложении А. Пример расчета приведен в пункте 3.

2.1 Перевод S-параметров в классические Y-параметры

Перевод выполняется по следующим формулам (2.1 – 2.4)

$$Y_{11} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{(1-S_{11})(1+S_{22})+S_{12} \cdot S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12} \cdot S_{21}} \right] \quad (2.1)$$

$$Y_{12} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{-2 \cdot S_{12}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12} \cdot S_{21}} \right] \quad (2.2)$$

$$Y_{21} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{-2 \cdot S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12} \cdot S_{21}} \right] \quad (2.3)$$

$$Y_{22} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{(1-S_{22})(1+S_{11})+S_{12} \cdot S_{21}}{(1+S_{11})(1+S_{22})-S_{12} \cdot S_{21}} \right] \quad (2.4)$$

где $\rho = 50 \text{ Ом}$ – волновое сопротивление.

2.2 Определение входного и выходного сопротивления

Последовательное представление входного сопротивления определяется на основе коэффициента отражения по входу S_{11} по выражениям 2.5, 2.6

$$\text{Re}(Z_{\text{вх}}) = \rho \cdot \frac{1-|S_{11}|^2}{1-2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} \quad (2.5)$$

$$\text{Im}(Z_{\text{вх}}) = \rho \cdot \frac{2 \cdot |S_{11}| \cdot \sin \varphi_{11}}{1-2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} \quad (2.6)$$

Реальная часть входного сопротивления равняется резистивному сопротивлению, а элементы мнимой составляющей определяются через частоту, на которой были определены S-параметры. Емкость соответствует отрицательному значению мнимой части, а индуктивность – положительному.

$$C_{\text{вх}} = \frac{1}{\omega \cdot \text{Im}(Z_{\text{вх}})}, \quad L_{\text{вх}} = \frac{\text{Im}(Z_{\text{вх}})}{\omega} \quad (2.7)$$

При параллельном представлении входного сопротивления необходимо определить комплексную проводимость $Y_{\text{вх}} = 1/Z_{\text{вх}}$, при этом реальная и мнимая составляющие будут равны:

$$\text{Re}(Y_{\text{вх}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1-|S_{11}|^2}{1+2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} \quad (2.8)$$

$$\text{Im}(Y_{\text{вх}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{2 \cdot |S_{11}| \cdot \sin \varphi_{11}}{1+2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} \quad (2.9)$$

Сопротивление будет равно: $R = 1/\text{Re}(Y_{\text{вх}})$, ёмкость $C = \text{Im}(Y_{\text{вх}})/\omega$, индуктивность $L = 1/(\omega \cdot \text{Im}(Y_{\text{вх}}))$. Ёмкость соответствует положительному значению мнимой части, а индуктивность – отрицательному.

Подобным образом определяются и выходные сопротивления четырехполюсника, при этом коэффициент отражения по входу S_{11} заменяется на коэффициент отражения по выходу S_{22} .

$$\text{Re}(Z_{\text{вых}}) = \rho \cdot \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 - 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} \quad (2.10)$$

$$\text{Im}(Z_{\text{вых}}) = \rho \cdot \frac{2 \cdot |S_{22}| \cdot \sin \varphi_{22}}{1 - 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} \quad (2.11)$$

$$\text{Re}(Y_{\text{вых}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 + 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} \quad (2.12)$$

$$\text{Im}(Y_{\text{вых}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{2 \cdot |S_{22}| \cdot \sin \varphi_{22}}{1 + 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} \quad (2.13)$$

2.3 Оценка усилительных свойств четырехполюсника на фиксированной частоте

В СВЧ-диапазоне усилительные возможности активных приборов принято характеризовать коэффициентом передачи по мощности, который в общем случае определяют по формуле 2.14.

$$K_p = P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}} \quad (2.14)$$

где: $P_{\text{вых}}$ – мощность на выходе четырехполюсника,

$P_{\text{вх}}$ – мощность на входе четырехполюсника.

Обычно, коэффициент передачи по мощности принято определять в децибелах (дБ):

$$K_p (\text{дБ}) = 10 \cdot \lg(K_p) \quad (2.15)$$

Однонаправленный коэффициент передачи транзистора, который можно реализовать с помощью согласующих цепей, определяется по формуле

$$K_{p \max} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2) \cdot (1 - |S_{22}|^2)} \quad (2.16)$$

В случае идеального согласования ($S_{11} = S_{22} = 0$) коэффициент передачи определяется как $K_{p \max} = |S_{21}|^2$.

Наряду с отмеченным выше коэффициентом передачи используется однонаправленный коэффициент передачи с нейтрализацией обратной связи $K_{p \max \max}$, который является максимально возможным при двухстороннем комплексно-сопряженным согласовании транзистора. Данный коэффициент связан с коэффициентом устойчивости K_y .

$$K_y = \frac{1 + |\Delta S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 \cdot |S_{12}| \cdot |S_{21}|} \quad (2.17)$$

где $\Delta S = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21}$ – определитель матрицы [S].

При $K_y > 1$ транзистор считается устойчивым, т.е. не будет самовозбуждаться. При этом $K_{p \max \max}$ рассчитывается по формуле 2.19

$$K_{p \max \max} = \frac{|S_{21} / S_{12} - 1|^2}{2 \cdot K_y \cdot |S_{21} / S_{12}| - 2 \cdot \operatorname{Re}(S_{21} / S_{12})} \quad (2.18)$$

Примечание: при расчете варианта, если коэффициент устойчивости ($K_y > 1$), то расчет $K_{p \max \max}$ производить не нужно.

2.4 Определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора

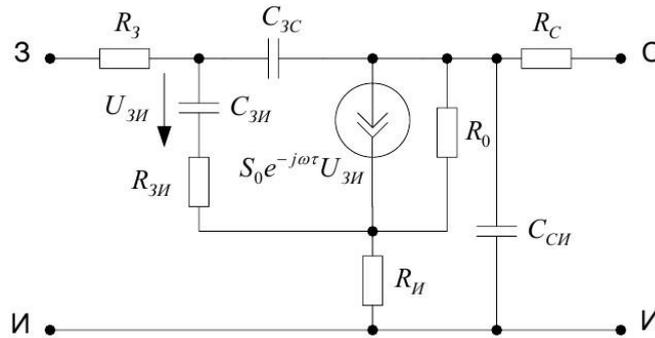


Рисунок 2.1 – Эквивалентная схема полевого транзистора

Элементы эквивалентной схемы полевого транзистора определяются на основе Y-параметров. Поэтому вначале нужно перевести S-параметры в Y-параметры. Основные элементы эквивалентной схемы полевого транзистора определяются по следующим выражениям 2.19 – 2.25.

$$C_{3C} = -\operatorname{Im}(Y_{12}) / \omega \quad (2.19)$$

$$C_{3И} = [\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12})] / \omega \quad (2.20)$$

$$S_0 = \sqrt{(\operatorname{Re}(Y_{21} - Y_{12}))^2 + (\operatorname{Im}(Y_{21} - Y_{12}))^2} \quad (2.21)$$

$$\tau = C_{3И} / S_0 \quad (2.22)$$

$$R_0 = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_{22}) + \operatorname{Re}(Y_{12})} \quad (2.23)$$

$$C_{СИ} = (\operatorname{Im}(Y_{22}) + \operatorname{Im}(Y_{12})) / \omega \quad (2.24)$$

$$R_{3И} = \frac{|\operatorname{Re}(Y_{11})|}{(\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12}))^2 + \operatorname{Re}(Y_{11})^2} \quad (2.25)$$

$$f_T = \frac{S_0}{2\pi \cdot (C_{3И} + C_{3C})} \quad (2.26)$$

Контактные сопротивления R_3 и R_C при расчете принимаются равными 1 Ом, а сопротивление $R_{И} = 0.1$ Ом.

3 Пример расчета

Исходные данные:

$$f = 4000 \text{ МГц};$$

$$|S_{11}| = 0,97, \quad \varphi_{11} = -30;$$

$$|S_{12}| = 0,043, \quad \varphi_{12} = 74;$$

$$|S_{21}| = 2,1, \quad \varphi_{21} = 154;$$

$$|S_{22}| = 0,77, \quad \varphi_{22} = -11.$$

1. Преобразование S-параметров в алгебраическую форму.

$$\begin{aligned} S_{11} &= |S_{11}| \cdot (\cos(\varphi_{11}) + j \cdot \sin(\varphi_{11})) = \\ &= 0,97 \cdot (\cos(-30) + j \cdot \sin(-30)) = 0,84 - j \cdot 0,485 \end{aligned}$$

$$S_{12} = 0,012 + j \cdot 0,041$$

$$S_{21} = -1,887 + j \cdot 0,921$$

$$S_{22} = 0,756 - j \cdot 0,147$$

2. Расчет Y-параметров по формулам 2.1 – 2.4.

$$Y_{11} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 237,871 \cdot 10^{-6} + j \cdot 4,804 \cdot 10^{-3}$$

$$Y_{12} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{-2 \cdot S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 18,938 \cdot 10^{-6} + j \cdot 507,263 \cdot 10^{-6}$$

$$Y_{21} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{-2 \cdot S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 24,558 \cdot 10^{-6} - j \cdot 3,391 \cdot 10^{-3}$$

$$Y_{22} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{-2 \cdot S_{22}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 2,245 \cdot 10^{-6} + j \cdot 1,321 \cdot 10^{-3}$$

3. Расчет входного сопротивления

В последовательном представлении:

$$\text{Re}(Z_{\text{вх}}) = \rho \cdot \frac{1 - |S_{11}|^2}{1 - 2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} = 11,33$$

$$\text{Im}(Z_{\text{вх}}) = \rho \cdot \frac{2 \cdot |S_{11}| \cdot \sin \varphi_{11}}{1 - 2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} = -185,959$$

$$R_{\text{вх}} = \text{Re}(Z_{\text{вх}}) = 11,33, \quad C_{\text{вх}} = \frac{1}{\omega \cdot \text{Im}(Z_{\text{вх}})} = 0,213 \text{ пФ}$$

В параллельном представлении:

$$\text{Re}(Y_{\text{вх}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - |S_{11}|^2}{1 + 2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} = 0,326 \cdot 10^{-3}$$

$$\text{Im}(Y_{\text{вх}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{2 \cdot |S_{11}| \cdot \sin \varphi_{11}}{1 + 2 \cdot |S_{11}| \cdot \cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2} = -5,358 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{\text{вх.посл}} = 1 / \text{Re}(Y_{\text{вх}}) = 3063, \quad C_{\text{вх}} = \frac{\text{Im}(Y_{\text{вх}})}{\omega} = 0,213 \text{ пФ}$$

4. Расчет выходного сопротивления

В последовательном представлении:

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{вых}}) = \rho \cdot \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 - 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} = 250.695$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{вых}}) = \rho \cdot \frac{2 \cdot |S_{22}| \cdot \sin \varphi_{22}}{1 - 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} = -180.953$$

$$R_{\text{вых.паралл}} = \operatorname{Re}(Z_{\text{вых}}) = 250.695, \quad C_{\text{вых.паралл}} = \frac{1}{\omega \cdot \operatorname{Im}(Z_{\text{вых}})} = 0.219 \text{ пФ}$$

В параллельном представлении:

$$\operatorname{Re}(Y_{\text{вых}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 + 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} = 2.623 \cdot 10^{-3}$$

$$\operatorname{Im}(Y_{\text{вых}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{2 \cdot |S_{22}| \cdot \sin \varphi_{22}}{1 + 2 \cdot |S_{22}| \cdot \cos \varphi_{22} + |S_{22}|^2} = -1.893 \cdot 10^{-3}$$

$$R_{\text{вых}} = 1 / \operatorname{Re}(Y_{\text{вых}}) = 381.308, \quad C_{\text{вых}} = \frac{\operatorname{Im}(Y_{\text{вых}})}{\omega} = 0.213 \text{ пФ}$$

5. Расчет коэффициента передачи

Без согласующих цепей, в тракте 50 Ом:

$$K_{p \max} = |S_{21}|^2 = 4.41$$

С учетом согласующих цепей:

$$K_{p \max} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2) \cdot (1 - |S_{22}|^2)} = 183.295$$
$$10 \cdot \log_{10}(K_{p \max}) = 22.632$$

6. Расчет коэффициента устойчивости

$$\Delta S = S_{11} \cdot S_{22} - S_{12} \cdot S_{21} = 0.624 - j \cdot 0.422$$

$$K_y = \frac{1 + |\Delta S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2 \cdot |S_{12}| \cdot |S_{21}|} = 0.191$$

7. Определение элементов эквивалентной модели

$$C_{3C} = -\operatorname{Im}(Y_{12}) / \omega = 0.02 \text{ пФ}$$

$$C_{3И} = [\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12})] / \omega = 0.17 \text{ пФ}$$

$$S_0 = \sqrt{(\operatorname{Re}(Y_{21} - Y_{12}))^2 + (\operatorname{Im}(Y_{21} - Y_{12}))^2} = 0.024$$

$$\tau = C_{3И} / S_0 = 6.92 \text{ пс}$$

$$R_0 = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_{22}) + \operatorname{Re}(Y_{12})} = 409.209$$

$$C_{СИ} = (\operatorname{Im}(Y_{22}) + \operatorname{Im}(Y_{12})) / \omega = 0.032 \text{ пФ}$$

$$R_{3И} = \frac{|\operatorname{Re}(Y_{11})|}{(\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12}))^2 + \operatorname{Re}(Y_{11})^2} = 12.842$$

$$f_T = \frac{S_0}{2\pi \cdot (C_{3И} + C_{3C})} = 20.57 \text{ ГГц}$$

4 Задание на лабораторную работу

В ходе выполнения лабораторной работы необходимо выполнить моделирование основных параметров полевого транзистора, элементы эквивалентной схемы которого были определены во время выполнения расчетного задания.

4.1 Настройка проекта и создание схемы

Установите начальную и конечную частоту моделирования в настройках проекта в соответствии с рисунком 4.1.

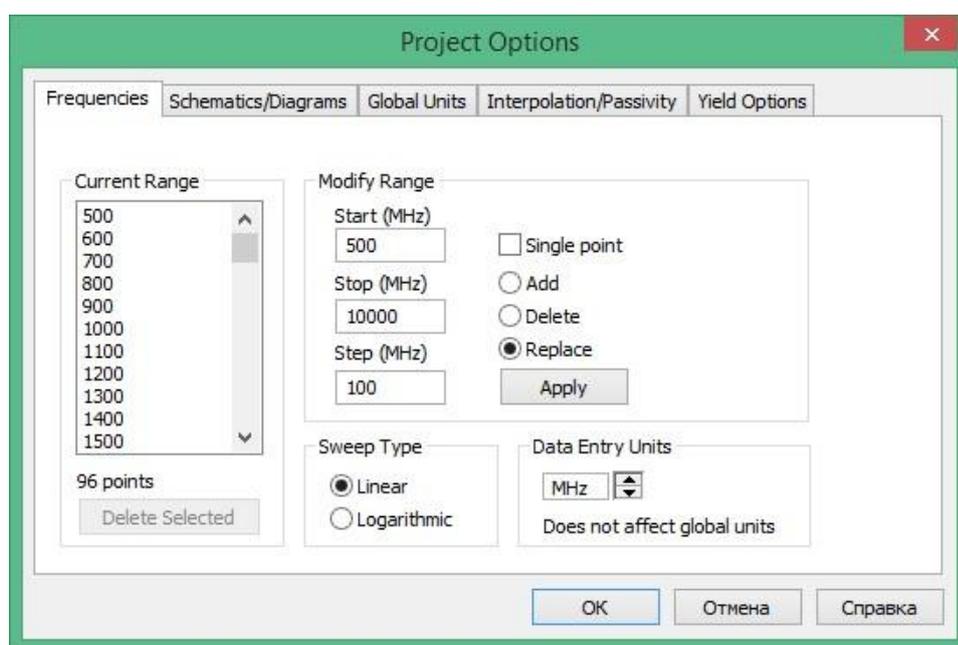


Рисунок 4.1 – Настройки частот моделирования

Для построения схемы необходимо использовать линейную модель полевого транзистора Elements->Circuit Elements->Linear Devices->FET. Первый порт подключается к затвору транзистора (1), второй к стоку (2), вывод истока соединяется с общим проводом (3). На рисунке 4.2 приведена схема подключения модели транзистора, в таблице 4.1 приведены соответствия между рассчитанными параметрами и параметрами модели транзистора, на рисунке 4.2 приведен пример определения параметров модели транзистора.

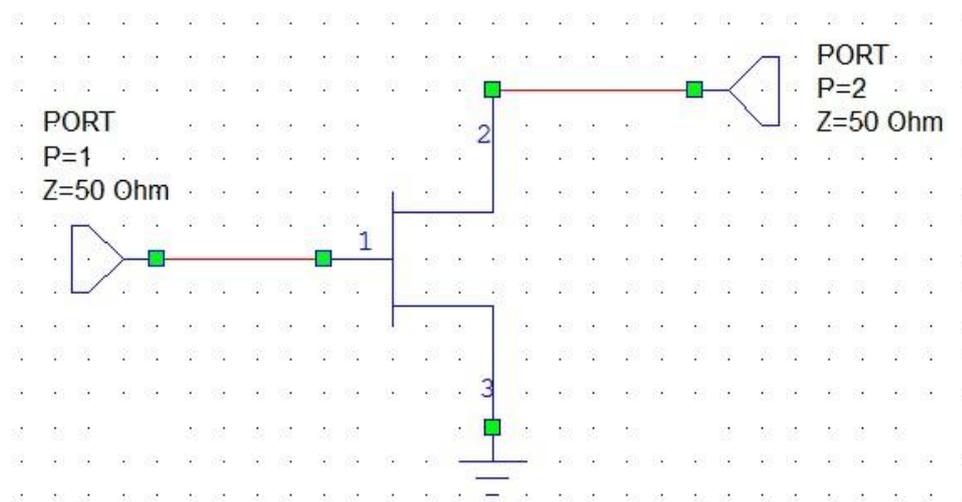


Рисунок 4.2 – Схема подключения модели транзистора

Таблица 4.1 – Таблица соответствия

Расчетный параметр	Параметр модели	Расчетный Параметр	Параметр модели
$C_{зс}$	CDG	R_0	RDS
$C_{зи}$	CGS	$C_{си}$	CDC, CDS
S_0	G	$R_{зи}$	RI
τ	T	f_T	F
$R_{и} = 0.1$	RS	Всегда равен 0	GGs

Name	Value	Unit	Tune	Opt	Limit	Lower	Upper	Step	Description
ID	F1								Element ID
G	0.024	S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Magnitude of transconductance at DC (beta)
T	0.007	ns	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Time delay of the transconductance
F	20600	MHz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Roll off frequency of the transconductance
CGS	0.17	pF	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Gate to source capacitance
GGs	0	S	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Gate to source conductance
RI	13	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Channel resistance
CDG	0.020	pF	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Drain to gate capacitance
CDC	0.032	pF	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Dipole layer capacitance
CDS	0.032	pF	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Drain to source capacitance
RDS	409	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Drain to source resistance
RS	0.1	Ohm	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>				Source resistance

Рисунок 4.3 – Пример определения параметров модели

4.2 Моделирование основных характеристик полевого транзистора

Необходимо выполнить построение следующих графиков: S-параметры транзистора (S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22}) в линейном формате, входной и выходной импедансы транзистора.

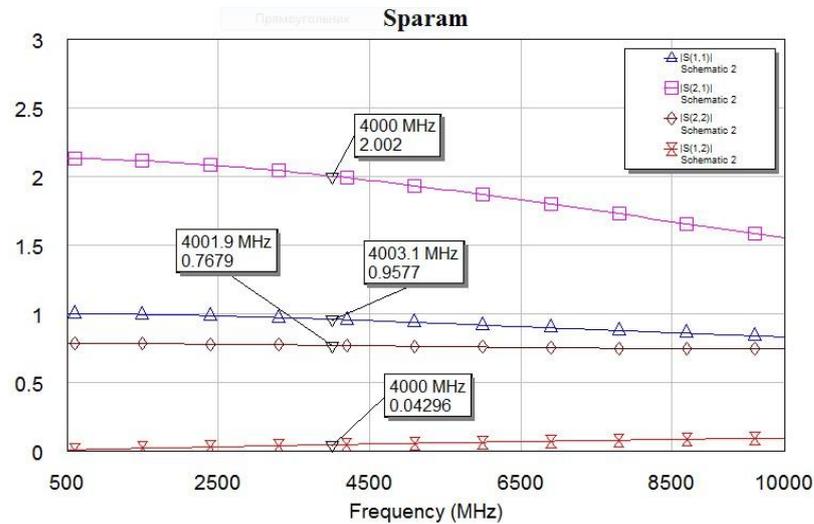


Рисунок 4.4 – Пример S-параметров полевого транзистора

Для построения графиков входного и выходного импеданса необходимо при добавлении измерения на график выбрать Measurement Type->Linear и Measurement->ZIN. Входному импедансу будет соответствовать Port Index 1, выходному Port Index 0. Необходимо вывести реальную (Real) и мнимую (Imag) часть импедансов. На рисунке 4.5 приведен пример параметров выбора измерений, на рисунке 4.6 приведены примеры графиков входного и выходного импедансов.

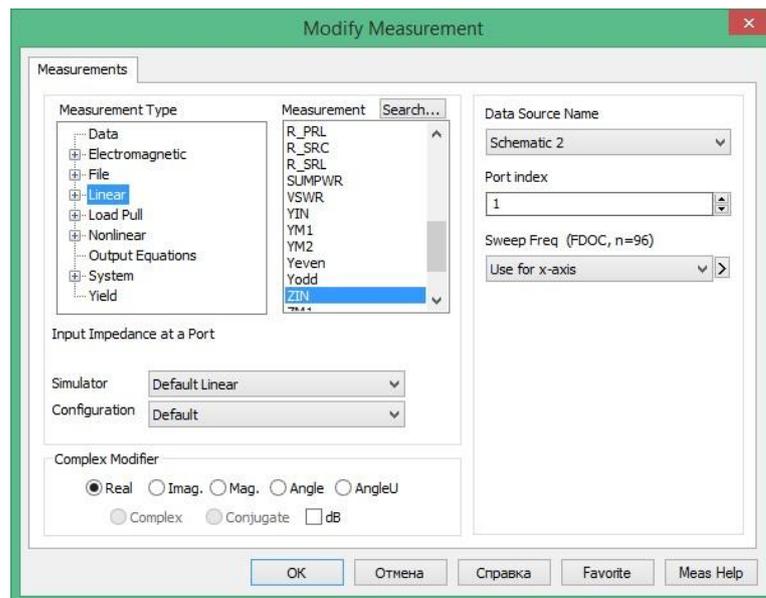


Рисунок 4.5 - Вывод графика реальной части входного импеданса

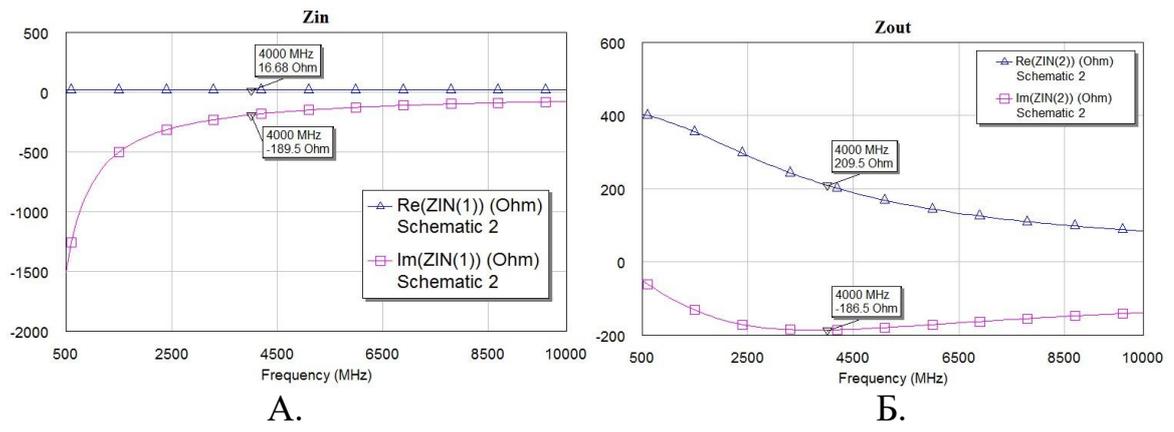


Рисунок 4.6 – Пример графика входного (А) и выходного (Б) импедансов транзистора

Приложение А

Таблица А.1 – Варианты расчетных заданий

№	$ S_{11} $	$\varphi_{11гр}$	$ S_{12} $	$\varphi_{12гр}$	$ S_{21} $	$\varphi_{21гр}$	$ S_{22} $	$\varphi_{22гр}$	f, МГц
1	0.977	-26	0.043	74	2.07	154	0.77	-11	4000
2	0.96	-33	0.054	70	2.05	147	0.76	-15	5000
3	0.93	-48	0.09	57	4.37	140	0.6	-39	4000
4	0.92	-53	0.1	53	4.2	135	0.58	-43	4500
5	0.925	-41	0.047	70	5.6	150	0.11	-126	1000
6	0.82	-73	0.08	57	4.7	126	0.2	-148	2000
7	0.73	-101	0.1	45	3.8	107	0.25	-169	3000
8	0.94	-50	0.05	60	9.3	147	0.4	-49	1000
9	0.85	-89	0.07	41	7.4	122	0.36	-85	2000
10	0.78	-133	0.1	18	4.9	93	0.31	-128	4000