

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники (ТОР)

В. Д. Дмитриев

СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ СВЧ-ДИАПАЗОНА

**Методические указания
по выполнению контрольной работы
для студентов направления подготовки 11.03.02
«Инфокоммуникационные технологии и системы связи»,
обучающихся с применением ДОТ
(уровень бакалавриата)**

Томск 2018

Корректор: А. Н. Миронова

Дмитриев В. Д.

Системы автоматизированного проектирования СВЧ-диапазона : методические указания по выполнению контрольной работы по направлению подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (уровень бакалавриата) / В. Д. Дмитриев. – Томск : ФДО, ТУСУР, 2018. – 18 с.

© Дмитриев В. Д., 2018

© Оформление.

ФДО, ТУСУР, 2018

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Контрольная работа «Расчет СВЧ-четырёхполюсников и определение параметров моделей»	5
1.1 Порядок выполнения контрольной работы.....	5
1.2 Методические указания для выполнения контрольной работы.....	6
1.2.1 Перевод S -параметров в классические Y - и H -параметры.....	7
1.2.2 Определение входного и выходного сопротивления транзистора (биполярного и полевого) как четырёхполюсника через коэффициенты отражения S_{11} и S_{22}	7
1.1.3 Оценка усилительных свойств четырёхполюсника (транзистора) на фиксированной частоте.....	9
1.1.4 Определение элементов эквивалентной модели биполярного транзистора	11
1.1.5 Определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора.....	13
2.1 Примеры расчета.....	14
Рекомендуемая литература.....	18

ВВЕДЕНИЕ

Дисциплина «Системы автоматизированного проектирования СВЧ-диапазона» относится к вариативной части обязательных дисциплин Блока 1 направления подготовки 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» (уровень бакалавриата).

При изучении дисциплины обучающиеся должны выполнить одну контрольную работу по определению основных параметров СВЧ биполярных или полевых транзисторов, а также элементов эквивалентных моделей.

Целью выполнения контрольной работы является закрепление теоретических знаний и получение практических навыков исследования активных СВЧ-устройств. В основе расчетов используются экспериментальные S -параметры биполярных и полевых СВЧ-транзисторов.

Методические указания включают задание на контрольную работу по определению основных параметров транзисторов: входное и выходное сопротивление, коэффициенты усиления и устойчивости. Кроме того, необходимо определить взаимосвязь S -параметров с классическими параметрами (Y -параметрами и H -параметрами) и элементы эквивалентных моделей, необходимые для автоматизированного расчета СВЧ-устройств.

Выполнение контрольной работы предполагает наличие базы знаний по таким дисциплинам, как «Информатика», «Теория электрических цепей», «Физика», «Электроника», «Метрология и технические измерения».

Требования к оформлению отчета по контрольной работе

При оформлении отчетов по текстовым работам (контрольным и лабораторным) следует руководствоваться требованиями образовательного стандарта вуза ОС ТУСУР 01–2013. Работы студенческие по направлениям подготовки и специальностям технического профиля. Общие требования и правила оформления. Режим доступа: <https://regulations.tusur.ru/documents/70>

1 КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

«РАСЧЕТ СВЧ-ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ»

1.1 Порядок выполнения контрольной работы

Цель работы: рассчитать основные параметры СВЧ-четырёхполосников (транзисторов) и определить элементы эквивалентной модели биполярного или полевого транзистора. В процессе работы следует:

1) рассчитать на одной частоте на основе S -параметров классические параметры Y и H СВЧ четырёхполосников;

2) определить входное сопротивление (в последовательном представлении) и выходное (в параллельном виде) для СВЧ-транзисторов на основе S -параметров;

3) определить коэффициенты усиления по мощности и коэффициент устойчивости транзисторов на соответствующей варианту частоте;

4) определить элементы эквивалентной модели биполярного или полевого СВЧ-транзистора в соответствии с вариантом контрольной работы.

Варианты контрольной работы представлены в таблицах 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Варианты задания для биполярного транзистора

№ вар.	$ S_{11} $	$\varphi_{11гр.}$	$ S_{12} $	$\varphi_{12гр.}$	$ S_{21} $	$\varphi_{21гр.}$	$ S_{22} $	$\varphi_{22гр.}$	f , МГц	$I_{\text{э}}$, мА
1	0.85	−30	0.013	64	23.2	158	0.93	−11	100	10
2	0.58	−112	0.035	44	12.2	109	0.62	−30	500	10
3	0.49	−156	0.044	43	6.7	85	0.5	−33	1000	10
4	0.49	−178	0.056	47	4.6	71	0.46	−36	1500	10
5	0.5	−160	0.068	47	3.4	59	0.45	−41	2000	10
6	0.65	−46	0.01	59	33	150	0.89	−15	100	20

Окончание табл. 1.1

№ вар.	$ S_{11} $	$\varphi_{11гр.}$	$ S_{12} $	$\varphi_{12гр.}$	$ S_{21} $	$\varphi_{21гр.}$	$ S_{22} $	$\varphi_{22гр.}$	f , МГц	$I_э$, мА
7	0.46	–137	0.025	56	13.2	100	0.57	–26	500	20
8	0.43	–175	0.038	58	6.8	80	0.52	–29	1000	20
9	0.44	–163	0.048	61	4.6	67	0.51	–32	1500	20
10	0.47	–148	0.062	60	3.5	56	0.5	–37	2000	20

Таблица 1.2 – Варианты задания для полевого транзистора

№ вар.	$ S_{11} $	$\varphi_{11гр.}$	$ S_{12} $	$\varphi_{12гр.}$	$ S_{21} $	$\varphi_{21гр.}$	$ S_{22} $	$\varphi_{22гр.}$	f , МГц
11	0.97	–30	0.043	74	2.1	154	0.77	–11	4000
12	0.96	–33	0.054	70	2.05	147	0.76	–15	5000
13	0.93	–48	0.09	57	4.37	140	0.6	–39	4000
14	0.92	–53	0.1	53	4.2	135	0.58	–43	4500
15	0.925	–41	0.047	70	5.6	150	0.11	–126	1000
16	0.82	–73	0.08	57	4.7	126	0.2	–148	2000
17	0.73	–101	0.1	45	3.8	107	0.25	–169	3000
18	0.94	–50	0.05	60	9.3	147	0.4	–49	1000
19	0.85	–89	0.07	41	7.4	122	0.36	–85	2000
20	0.78	–133	0.1	18	4.9	93	0.31	–128	4000

1.2 Методические указания для выполнения контрольной работы

Для выполнения контрольной работы по дисциплине «Системы автоматизированного проектирования СВЧ-диапазона» необходимы следующие аналитические выражения и расчетные соотношения.

1.2.1 Перевод S -параметров в классические Y - и H -параметры

$$Y_{11} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.1)$$

$$Y_{12} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{-2S_{12}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.2)$$

$$Y_{21} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{-2S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.3)$$

$$Y_{22} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{(1 - S_{22})(1 + S_{11}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.4)$$

$$H_{11} = \rho \cdot \left[\frac{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.5)$$

$$H_{12} = \left[\frac{2S_{12}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.6)$$

$$H_{21} = \left[\frac{-2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.7)$$

$$H_{22} = \frac{1}{\rho} \cdot \left[\frac{(1 - S_{11})(1 - S_{22}) - S_{12}S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right], \quad (1.8)$$

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

1.2.2 Определение входного и выходного сопротивления транзистора (биполярного и полевого) как четырехполюсника через коэффициенты отражения S_{11} и S_{22}

Последовательное представление (рис. 1.1) входного сопротивления определяется на основе коэффициента отражения по входу S_{11} :

$$\text{Re}(Z_{\text{BX}}) = \rho \frac{1 - |S_{11}|^2}{1 - 2|S_{11}|\cos\varphi_{11} + |S_{11}|^2}, \quad (1.9)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{BX}}) = j \frac{2|S_{11}|\sin \varphi_{11}}{1 - 2|S_{11}|\cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2}. \quad (1.10)$$

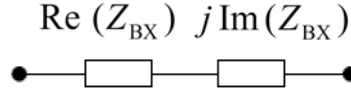


Рис. 1.1 – Последовательное представление входного сопротивления четырёхполюсника

Реальная часть входного сопротивления равняется резистивному сопротивлению, а элементы мнимой составляющей определяются через частоту, на которой были определены S -параметры:

$$C_{\text{BX}} = \frac{1}{\omega \cdot \operatorname{Im}(Z_{\text{BX}})}, \quad L_{\text{BX}} = \frac{\operatorname{Im}(Z_{\text{BX}})}{\omega}. \quad (1.11)$$

Емкость соответствует отрицательному значению мнимой составляющей входного сопротивления, а индуктивность – положительному.

При параллельном представлении входного (рис. 1.2) сопротивления необходимо определить комплексную проводимость $Y_{\text{BX}} = 1/Z_{\text{BX}}$, при этом реальная и мнимая составляющие будут равны:

$$\operatorname{Re}(Y_{\text{BX}}) = \frac{1}{\rho} \cdot \frac{1 - |S_{11}|^2}{1 + 2|S_{11}|\cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2}, \quad (2.12)$$

$$\operatorname{Im}(Y_{\text{BX}}) = -\frac{1}{\rho} \frac{2|S_{11}|\sin \varphi_{11}}{1 + 2|S_{11}|\cos \varphi_{11} + |S_{11}|^2}. \quad (2.13)$$

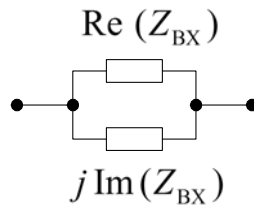


Рис. 1.2 – Параллельное представление входного сопротивления четырёхполюсника

Сопротивление будет равно: $1/\operatorname{Re}(Y_{\text{BX}})$, а ёмкость $C = \operatorname{Im}(Y_{\text{BX}})/\omega$, индуктивность $L = 1/\omega \operatorname{Im}(Y_{\text{BX}})$. При этом положительное значение мнимой составляющей Y_{BX} соответствует ёмкости, а отрицательное – индуктивности.

Подобным образом определяются и выходные сопротивления четырёхполюсника, при этом коэффициент отражения по входу $\dot{S}_{11}$ заменяется на коэффициент отражения по выходу $\dot{S}_{22}$:

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{ВЫХ}}) = \rho \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}, \quad (1.14)$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{ВЫХ}}) = \rho \frac{2|S_{22}|\cos\varphi_{22}}{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}, \quad (1.15)$$

$$\operatorname{Re}(Y_{\text{ВЫХ}}) = \frac{1}{\rho} \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}, \quad (1.16)$$

$$\operatorname{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}) = -j \frac{1}{\rho} \frac{2|S_{22}|\cos\varphi_{22}}{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}. \quad (1.17)$$

1.1.3 Оценка усилительных свойств четырехполюсника (транзистора) на фиксированной частоте

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

$$K_p = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}, \quad (1.17)$$

где $P_{\text{ВЫХ}}$ – выходная мощность, а $P_{\text{ВХ}}$ – входная мощность.

Коэффициент передачи по мощности принято определять в децибелах (дБ):

$$K_p (\text{дБ}) = 10 \lg(K_p). \quad (1.18)$$

При отсутствии согласующих цепей на входе и выходе коэффициент передачи по мощности в 50-омном тракте определяется простым соотношением:

$$K_p = |S_{21}|^2. \quad (1.19)$$

Однако данный коэффициент передачи не отражает усилительные возможности транзистора, которые можно реализовать с помощью согласующих цепей. Повышение коэффициента передачи за счет согласующих цепей оценивается на основе максимального однонаправленного коэффициента передачи $K_{p_{\max}}$ [1]:

$$K_{p_{\max}} = \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)}. \quad (1.20)$$

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

$$K_y = \frac{1 + |\Delta S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}||S_{21}|}, \quad (1.21)$$

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

Обязательным условием для обеспечения комплексно-сопряженного согласования по входу и выходу является коэффициент устойчивости, больший единицы ($K_y > 1$). При этом $K_{p_{\max \max}}$ будет равен:

$$K_{p_{\max \max}} = \frac{\left| \frac{S_{21}}{S_{12}} - 1 \right|^2}{2K_y \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| - 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S_{21}}{S_{12}} \right)}. \quad (1.22)$$

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

1.1.4 Определение элементов эквивалентной модели биполярного транзистора

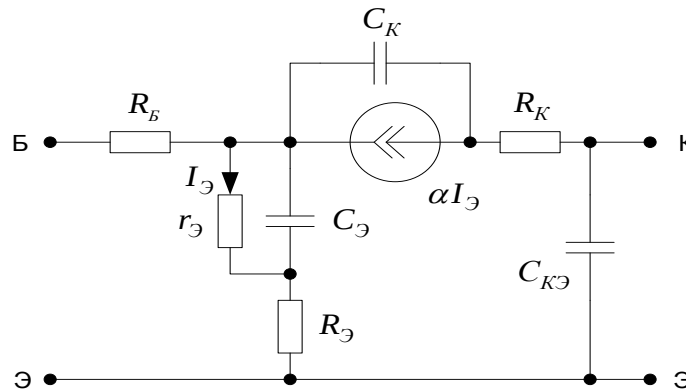


Рис. 1.3 – Эквивалентная схема биполярного транзистора

На рисунке 1.3 указаны следующие элементы эквивалентной схемы: R_B – сопротивление базы; $r_Э$ – дифференциальное сопротивление эмиттера; $R_Э$ – контактное сопротивление эмиттера; C_K – ёмкость перехода коллектор – база; R_K – контактное сопротивление коллектора; $C_{КЭ}$ – ёмкость коллектор – эмиттер; α – коэффициент усиления по току в схеме с общей базой.

Дифференциальное сопротивление определяется известным соотношением через ток эмиттера $I_Э$:

$$r_Э = \varphi_m / I_Э, \quad (1.23)$$

где $\varphi_m = 26$ мВ – температурный потенциал.

Для определения других параметров требуется нахождение предельной частоты по схеме с ОЭ f_T ($\omega_T = 2\pi f_T$) и f_α ($\omega_\alpha = 2\pi f_\alpha$) – предельная частота для схемы с ОБ. Частота f_T определяется через модуль $|H_{21}|$ в виде:

$$f_T = |H_{21}| \cdot f, \quad (1.24)$$

где f – частота, на которой определяется H_{21} (частота варианта).

Предельная частота f_α связана с f_T простым соотношением:

$$f_\alpha = \sqrt{2} \cdot f_T. \quad (1.25)$$

Элементы эквивалентной схемы (рис. 1.3) находятся по следующим выражениям:

$$C_K = \frac{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}{Z_0(1 - |S_{22}|)\omega_T}, \quad (1.26)$$

где $Z_0 = 50$ Ом.

$$R_\Sigma + r_\Sigma = 1/\omega'_T C_0, \quad (1.27)$$

$$\text{где } \omega'_T = \frac{\omega_T \alpha}{\alpha + \omega_T C_K Z_0},$$

$$C_0 = \frac{1}{\omega(R_0 + Z_0)\operatorname{tg}(\varphi_{21} - 90)},$$

$$R_0 = \frac{2Z_0\omega'_T - Z_0\omega|S_{21}|}{\omega|S_{21}|}.$$

Коэффициент усиления по току α для схемы с ОБ определяется через $|H_{21}|$:

$$\alpha = |H_{21}| / (1 + |H_{21}|), \quad (1.28)$$

$$R_b = \frac{Z_0(1 - |S_{11}|)}{1 - 2|S_{11}|\cos\varphi_{11} + |S_{11}|^2}, \quad (1.29)$$

$$R_K = mR_b, \quad (1.30)$$

где $m = 0,35 \dots 0,5$.

$$C_\Sigma = 1/\omega_\alpha(R_\Sigma + r_\Sigma), \quad (1.31)$$

$$C_{K\Sigma} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{Z_0} \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right]. \quad (1.32)$$

1.1.5 Определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора

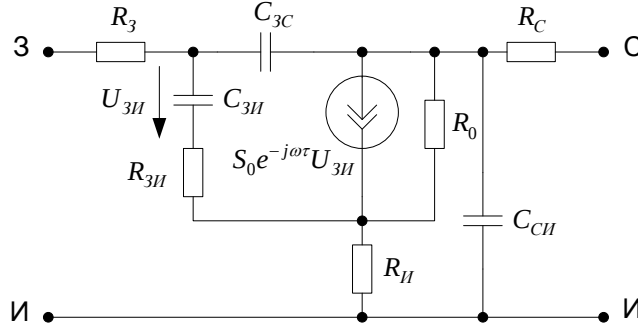


Рис. 1.4 – Эквивалентная схема полевого транзистора

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:

$$C_{3C} = -\text{Im}(Y_{21}) / \omega, \quad (1.33)$$

$$C_{3И} = [\text{Im}(Y_{11}) + \text{Im}(Y_{12})] / \omega, \quad (1.34)$$

$$S_0 = \sqrt{(\text{Re}(Y_{21} - Y_{12}))^2 + (\text{Im}(Y_{21} - Y_{12}))^2}, \quad (1.35)$$

$$\tau = C_{3И} / S_0, \quad (1.36)$$

$$R_0 = \frac{1}{\text{Re}(Y_{22}) + \text{Re}(Y_{12})}, \quad (1.37)$$

$$C_{СИ} = (\text{Im}(Y_{22}) + \text{Im}(Y_{12})) / \omega, \quad (1.38)$$

$$R_{3И} = \frac{|\text{Re}(Y_{11})|}{(\text{Im}(Y_{11}) + \text{Im}(Y_{12}))^2 + \text{Re}(Y_{11})^2}. \quad (1.39)$$

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

2.1 Примеры расчета

Пример 1. Входное и выходное сопротивление четырехполюсника.

Даны S -параметры на частоте $f = 1$ ГГц:

$$|S_{11}| = 0,72; \varphi_{11} = -147^\circ; |S_{12}| = 0,065; \varphi_{12} = -4^\circ;$$

$$|S_{21}| = 2,33; \varphi_{21} = 77^\circ; |S_{22}| = 0,2; \varphi_{22} = -101^\circ.$$

Требуется определить входные и выходные сопротивления транзистора.

Входное сопротивление транзистора представим в виде последовательного соединения элементов, а выходное – в виде параллельного соединения. В соответствии с выражением (1.12) и (1.13) реальная и мнимая составляющие входного сопротивления будут равны:

$$\operatorname{Re}(Z_{\text{BX}}) = 50 \frac{1 - 0,72^2}{1 - 2 \cdot 0,72 \cos(-147) + 0,72^2} = 8,83 \text{ Ом.}$$

$$\operatorname{Im}(Z_{\text{BX}}) = 50 \frac{2 \cdot 0,72 \cdot \sin(-147)}{1 - 2 \cdot 0,72 \cdot \cos(-147) + 0,72^2} = -14,4 \text{ Ом.}$$

Учитывая, что мнимая составляющая отрицательная, вход транзистора можно представить в виде последовательного соединения резистора и ёмкости, величина которой будет равна:

$$C_{\text{BX}} = \frac{1}{\operatorname{Im}(Z_{\text{BX}})\omega} = 11,1 \text{ пФ.}$$

Выходное сопротивление определим по формулам (1.16), (1.17).

$$\operatorname{Re}(Y_{\text{ВЫХ}}) = \frac{1}{50} \cdot \frac{1 - |S_{22}|^2}{1 + 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2} = 0,019 \text{ См.}$$

$$\operatorname{Im}(Y_{\text{ВЫХ}}) = -j \frac{1}{50} \frac{2|S_{22}|\sin\varphi_{22}}{1 + 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2} = j0,11 \text{ См.}$$

Таким образом, выход транзистора на данной частоте представляет собой параллельное соединение сопротивления $R_{\text{ВЫХ}} = 1 / \text{Re}(Y_{\text{ВЫХ}}) = 52 \text{ Ом}$

и емкости $C_{\text{ВЫХ}} = \frac{\text{Im}(Y_{\text{ВЫХ}})}{\omega} = 1,8 \text{ пФ}$ (рис. 2.1).

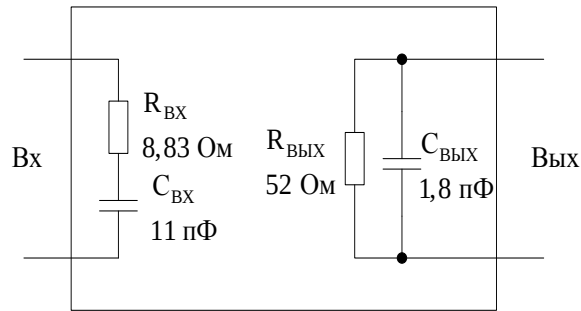


Рис. 2.1 – Представление входного и выходного сопротивления СВЧ-транзистора на частоте $f = 1 \text{ ГГц}$

Пример 2. Коэффициент усиления по мощности четырёхполюсников.

Даны S -параметры на частоте $f = 1 \text{ ГГц}$:

$$|S_{11}| = 0,72; \varphi_{11} = -147^\circ; |S_{12}| = 0,065; \varphi_{12} = -4^\circ;$$

$$|S_{21}| = 2,33; \varphi_{21} = 77^\circ; |S_{22}| = 0,2; \varphi_{22} = -101^\circ.$$

Коэффициент передачи по мощности в 50-омном тракте:

$$K_p = 10 \lg |S_{21}|^2 = 7,35 \text{ дБ}.$$

Максимально достигаемый однонаправленный коэффициент усиления в 50-омном тракте в соответствии с выражением:

$$K_{p_{\text{max}}} = 10 \lg \frac{|S_{21}|^2}{(1 - |S_{11}|^2)(1 - |S_{22}|^2)} = 10,87 \text{ дБ}.$$

Прежде чем найти $K_{p_{\text{max max}}}$, определим коэффициент устойчивости K_y :

$$K_y = \frac{1 + |\Delta S|^2 - |S_{11}|^2 - |S_{22}|^2}{2|S_{12}||S_{21}|} = 1,386.$$

Поскольку коэффициент устойчивости больше единицы, на данной частоте можно добиться комплексно-сопряженного согласования по входу и выходу, при этом $K_{P_{\max \max}}$ будет равен:

$$K_{P_{\max \max}} = \frac{\left| \frac{S_{21}}{S_{12}} - 1 \right|^2}{2K_y \left| \frac{S_{21}}{S_{12}} \right| - 2 \operatorname{Re} \left(\frac{S_{21}}{S_{12}} \right)} = 15,5 \text{ дБ.}$$

Пример 3. *Определение элементов эквивалентной модели полевого транзистора.*

$$f = 4 \text{ ГГц}; \quad \omega = 2\pi f = 25.13 \cdot 10^9 \text{ рад/с}; \quad \rho = R_T = 50 \text{ Ом};$$

$$\varphi_{11} = -26.1^\circ; \quad \varphi_{12} = 74^\circ; \quad \varphi_{21} = 154^\circ; \quad \varphi_{22} = -11.05^\circ;$$

$$S_{11} = 0.976; \quad S_{12} = 0.0431; \quad S_{21} = 2.074; \quad S_{22} = 0.776.$$

Переход с S -параметров в Y -параметры:

$$Y_{11} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{(1 - S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) + S_{12} \cdot S_{21}}{(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = -30 \cdot 10^{-6} + j5.98 \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{12} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{-2 \cdot S_{12}}{(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 0.0000264 - j5 \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{21} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{-2 \cdot S_{21}}{(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = -2.64 \cdot 10^{-5} - j5 \cdot 10^{-3};$$

$$Y_{22} = \frac{1}{\rho} \left[\frac{(1 - S_{22}) \cdot (1 + S_{11}) + S_{12} \cdot S_{21}}{(1 + S_{11}) \cdot (1 + S_{22}) - S_{12} \cdot S_{21}} \right] = 2.3 \cdot 10^{-3} + j2.43 \cdot 10^{-3}.$$

$$C_{3C} = \frac{-\operatorname{Im}(Y_{12})}{\omega} = 0.019 \text{ пФ};$$

$$C_{3и} = \frac{\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12})}{\omega} = 0.182 \text{ пФ}; \quad C_{си} = \frac{\operatorname{Im}(Y_{21}) + \operatorname{Im}(Y_{12})}{\omega} = 0.076 \text{ пФ}.$$

$$S_0 = \sqrt{\left[\operatorname{Re}(Y_{21}) - \operatorname{Re}(Y_{12}) \right]^2 + \left[\operatorname{Im}(Y_{21}) - \operatorname{Im}(Y_{12}) \right]^2} = 24 \text{ мА/В};$$

$$R_{3И} = \left| \frac{\operatorname{Re}(Y_{11})}{[\operatorname{Im}(Y_{11}) + \operatorname{Im}(Y_{12})]^2 + [\operatorname{Re}(Y_{11})]^2} \right| = 1.434 \text{ Ом};$$

$$R_{СИ} = \frac{1}{\operatorname{Re}(Y_{22}) + \operatorname{Re}(Y_{12})} = 427.3 \text{ Ом};$$

$$\tau = \frac{C_{3И}}{S_0} = 7.4 \text{ пс.}$$

Пример 4. *Определение элементов эквивалентной модели биполярного транзистора.*

Транзистор NE856 при режиме $U_{КЭ} = 10 \text{ В}$ и $I_{Э} = 30 \text{ мА}$ на частоте $f = 60 \text{ МГц}$ имеет следующие S -параметры:

$$|S_{11}| = 0,618; \varphi_{11} = -66^\circ; |S_{12}| = 0,016; \varphi_{12} = 79^\circ;$$

$$|S_{21}| = 16,3; \varphi_{21} = 149^\circ; |S_{22}| = 0,79; \varphi_{22} = -27^\circ.$$

$$H_{21} = \left[\frac{-2S_{21}}{(1 - S_{11})(1 + S_{22}) + S_{12}S_{21}} \right] = 23.385;$$

$$f_T = |H_{21}| \cdot f = 1.4 \text{ ГГц}; f_\alpha = \sqrt{2} \cdot f_T = 1.98 \text{ ГГц}; \alpha = |H_{21}| / (1 + |H_{21}|) = 0.959;$$

$$C_K = \frac{1 - 2|S_{22}|\cos\varphi_{22} + |S_{22}|^2}{Z_0(1 - |S_{22}|)\omega_T} = 1.3 \text{ пФ}; R_B = \frac{Z_0(1 - |S_{11}|)}{1 - 2|S_{11}|\cos\varphi_{11} + |S_{11}|^2} = 35.2 \text{ Ом};$$

$$r_{Э} = \varphi_m / I_{Э} = 0.866 \text{ Ом}; \omega'_T = \frac{\omega_T \alpha}{\alpha + \omega_T C_K Z_0} = 5.518 \cdot 10^9 \text{ рад/с};$$

$$R_0 = \frac{2Z_0\omega'_T - Z_0\omega|S_{21}|}{\omega|S_{21}|} = 39.8 \text{ Ом}; C_0 = \frac{1}{\omega(R_0 + Z_0)\operatorname{tg}(\varphi_{21} - 90)} = 17.71 \text{ пФ};$$

$$R_{Э} + r_{Э} = 1 / \omega'_T C_0 = 10.193 \text{ Ом}; C_{Э} = 1 / \omega_\alpha (R_{Э} + r_{Э}) = 7.57 \text{ пФ};$$

$$C_{КЭ} = \frac{1}{\omega} \operatorname{Im} \left[\frac{1}{Z_0} \frac{(1 + S_{11})(1 - S_{22}) + S_{12}S_{21}}{(1 + S_{11})(1 + S_{22}) - S_{12}S_{21}} \right] = 5.98 \text{ пФ}.$$

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Романовский М. Н. Компьютерное моделирование процессов в РЭС : учеб. пособие / М. Н. Романовский. – Томск, 2016. – 101 с.
2. Дмитриев В. Д. Разработка устройств для систем беспроводной связи : учеб.-метод. пособие для практических занятий и самостоятельной работы / В. Д. Дмитриев, Е. В. Рогожников, А. А. Шибельгут. – Томск : ТУСУР, 2014. – 37 с.
3. Артищев С. А. Компьютерное проектирование РЭС : учеб.-метод. пособие по практической и самостоятельной работе студентов / С. А. Артищев. – Томск : ТУСУР, 2018. – 69 с.
4. Гупта К. Машинное проектирование СВЧ-устройств : пер. с англ. / К. Гупта, Р. Гарж, Р. Чадха. – М. : Радио и связь, 1987. – 428 с.
5. Гасанов Л. Г. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л. Г. Гасанов, А. А. Липатов, В. В. Марков, Н. А. Могильченко. – М. : Радио и связь, 1988. – 288 с.
6. Шварц Н. З. Линейные транзисторные усилители СВЧ / Н. З. Шварц. – М. : Радио и связь, 1987. – 386 с.
7. Глазов Г. Н. Современные технологии и системы автоматизированного измерения на СВЧ / Г. Н. Глазов. – Томск : ТУСУР, 2012. – 246 с.