

# Лабораторная работа №13 по курсу «Радиотехнические устройства и системы» Моделирование усилителя СВЧ сигнала

Кузнецов В.В., доцент кафедры ЭИУ1-КФ

9 июня 2015 г.

## 1 Цель работы

Цель данного руководства — рассмотрение способов моделирование схем, содержащих цепи с распределёнными параметрами (длинные линии) в Qucs.

## 2 Сведения из теории длинных линий

### 2.1 Сопротивление длинной линии

Входным сопротивлением  $Z_{\text{вх}}$  длинной линии (цепи с распределёнными параметрами) называется такое сосредоточенное сопротивление, подключение которого вместо линии к зажимам источника не изменит режим работы последнего.

В общем случае для линии с произвольной нагрузкой  $Z_{\text{н}}$  для входного сопротивления можно записать на основе анализа решения телеграфных уравнений

$$Z_{\text{вх}} = \frac{U_1}{I_1} = Z_{\text{в}} \frac{Z_{\text{н}} + jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)}{Z_{\text{в}} + jZ_{\text{н}} \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right)} \quad (1)$$

Рассмотрим случаи, часто встречающиеся на практике:

1. Полуволновой повторитель  $l = n\lambda/2$  :  $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{н}}$
2. Четвертьволновой трансформатор  $l = \lambda/4$  :

$$Z_{\text{вх}} = \frac{Z_{\text{в}}^2}{Z_{\text{н}}} \quad Z_{\text{в}} = \sqrt{Z_{\text{н}} Z_{\text{вх}}} \quad (2)$$

Длина волны в линии:

$$\lambda = \frac{c}{f} K_y \quad (3)$$

Коэффициент укорочения:

$$K_y = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \mu}} \quad (4)$$

Для режимов холостого хода (ХХ)  $Z_{\text{н}} = \infty$  и короткого замыкания (КЗ)  $Z_{\text{н}} = 0$ , т.е. случаев, когда потребляемая нагрузкой активная мощность равна нулю, соответственно получаем:

$$Z_{\text{вх.хх}} = -jZ_{\text{в}} \operatorname{ctg} \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right) \quad (5)$$

$$Z_{\text{вх.кз}} = jZ_{\text{в}} \operatorname{tg} \left( \frac{2\pi}{\lambda} l \right) \quad (6)$$

График зависимости входного сопротивления длинной линии от длины линии показан на рис.1

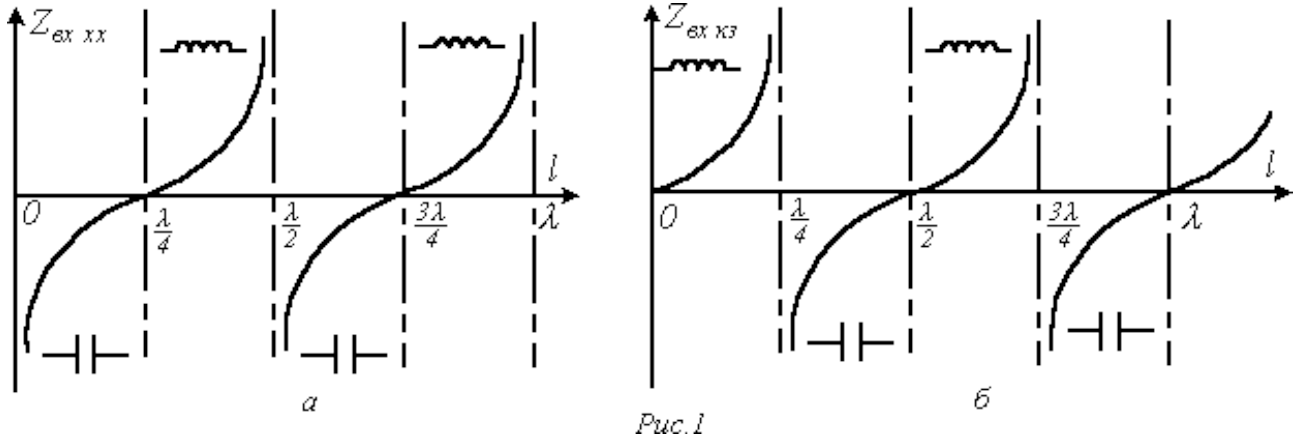


Рис. 1. Входное сопротивление длинной линии

Точки,  $Z_{\text{вх}} = 0$  соответствуют резонансу напряжений, а точки  $Z_{\text{вх}} \rightarrow \infty$  - резонансу токов.

Таким образом, изменяя длину линии без потерь, можно имитировать емкостное и индуктивное сопротивления любой величины. Поскольку длина волны есть функция частоты, то аналогичное изменение можно обеспечить не изменением длины линии, а частоты генератора. При некоторых частотах входное сопротивление цепи с распределенными параметрами также становится вещественным. Такие частоты называются резонансными. Таким образом, резонансными называются частоты, при которых в линии укладывается целое число четвертей волны.

## 2.2 Коэффициент отражения

Коэффициентом отражения  $\rho$  называется отношение амплитуды отражённой от нагрузки волны к амплитуде падающей волны:

$$\rho = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}} \quad (7)$$

Коэффициент отражения зависит от сопротивления нагрузки следующим образом:

$$\rho = \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{в}}}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{в}}} \quad (8)$$

Для линии, нагруженной на сопротивление, равное волновому  $Z_{\text{н}} = Z_{\text{в}}$  отражение нет  $\rho = 0$ . Для КЗ линии и разомкнутой линии  $\rho = \pm 1$ .

В результате интерференции отражённой и падающей волн в линии образуется стоячая волна. Коэффициент стоячей волны (КСВ) показывает отношение наибольшего значения амплитуды стоячей волны к наименьшему.

$$\text{КСВ} = \frac{U_{\text{пад}} + U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}} - U_{\text{отр}}} \quad (9)$$

КСВ связан с коэффициентом отражения  $\rho$ .

$$\text{SWR} = \frac{1 + |\rho|}{1 - |\rho|} \quad (10)$$

Вычисленный коэффициент отражения затем подставляется в (10) и вычисляется КСВ.

В симуляторе электронных схем Qucs выполнять вычисления КСВ по этим формулам не нужно. Для этого служит встроенная функция `rtoswr()`. Она автоматически пересчитывает значения S-параметров (коэффициентов отражения) в КСВ. Например, чтобы найти КСВ по входу нужно использовать функцию `rtoswr(S[1,1])`

В режиме согласования (в режиме бегущей волны) КСВ равен 1; это означает, что отражённая волна отсутствует, и  $|\rho| = 0$ . При появлении отражённой волны (в режиме смешанной волны) значение КСВ возрастает. В режиме стоячей волны, когда амплитуды отражённой и падающей волн равны, значение  $|\rho| = 1$ , и КСВ стремится к бесконечности.

Коэффициент стоячей волны (КСВ) показывает степень согласования генератора с нагрузкой. КСВ всегда больше единицы. Оптимальным значением является  $\text{SWR}=1$ . При этом вся энергия генератора поглощается нагрузкой. Если  $\text{SWR} > 1$ , то часть энергии отражается от нагрузки и направляется в генератор. Эта энергия может вывести генератор из строя.

### 3 Усилитель СВЧ-сигнала с микрополосковыми резонаторами

В диапазоне СВЧ использование для построения резонансных цепей традиционных компонентов с распределенными параметрами затруднительно, так как их номиналы становятся слишком малыми на СВЧ, а потери из-за паразитных параметров — слишком большими.

На рис.2 показана схема усилителя СВЧ-сигнала. В схеме используется специальный СВЧ транзистор BFP193W с граничной частотой до 8 ГГц. В качестве резонаторов используются отрезки микрополосковых линий (находятся в группе компонентов *Линии передачи*). В качестве подложки (Subst1) используется стеклотекстолит.

### 4 Задание для самостоятельной работы

1. Промоделировать схему усилителя рис.2. Провести моделирование на постоянном токе. Найти рабочую точку и ток покоя усилителя.

2. Провести моделирование S-параметров в диапазоне частот от 440 МГц до 490 МГц. Построить графики зависимостей коэффициента передачи усилителя  $S_{21}$ , коэффициента обратной передачи  $S_{12}$ , коэффициентов отражения по входу  $S_{11}$  и по выходу  $S_{22}$  от частоты. Чему равен коэффициент усиления усилителя на резонансной частоте? На защите объяснить резонансный характер АЧХ усилителя.

3. Построить графики тех же S-параметров на диаграмме Смита.

4. Добавить уравнения для расчёта КСВ усилителя по входу и по выходу и построить частотные зависимости КСВ на декартовой диаграмме.

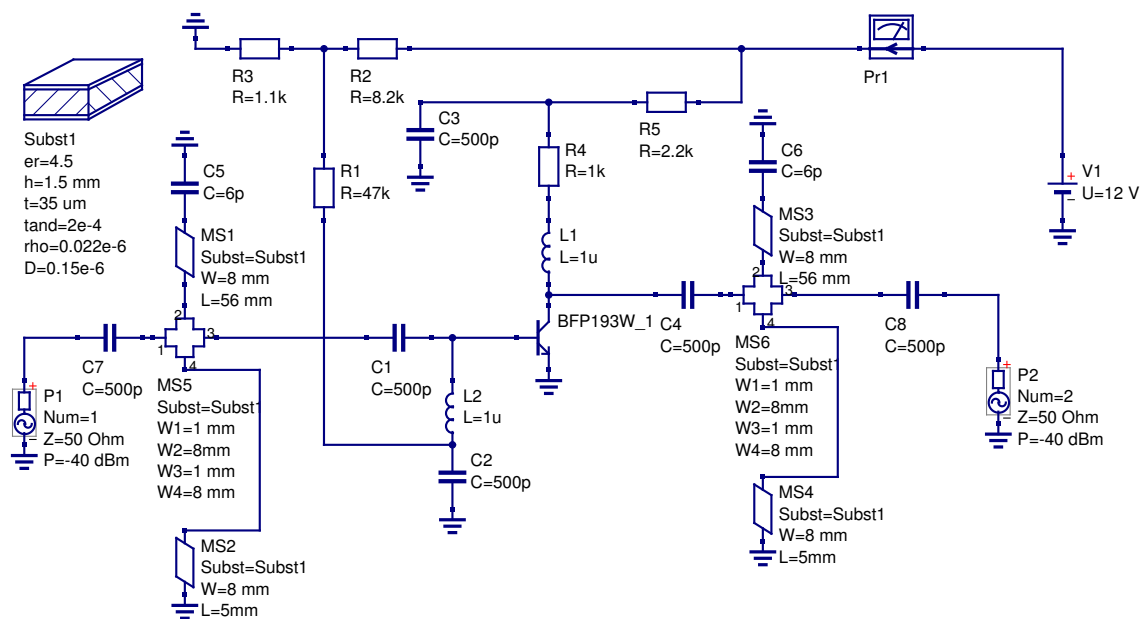


Рис. 2. Усилитель СВЧ-сигнала с микрополосковыми линиями.

4. Заменить транзистор на транзистор общего назначения BC847C. Чему теперь равен коэффициент усиления? Выполняет ли усилитель свои функции? Чем объясняется это различие?

## 5 Заключение

В результате выполнения лабораторной работы произведено моделирования схемы, использующей частотные свойства цепей с распределенными параметрами.