

Лабораторная работа №6 по курсу «Радиотехнические устройства и системы»

Моделирование S-параметров

Кузнецов В.В., ассистент кафедры ЭИУ1-КФ

24 ноября 2013 г.

1 Цель работы

Цель данного лабораторной работы — изучение моделирования S-параметров в программе Qucs.

Данная программа основана на вновь разработанном ядре схемотехнического моделирования (разработка совместно с Берлинским институтом высокочастотной техники) и работает под управлением операционных систем (ОС) Linux и Windows. В данной программе возможно моделирование аналоговых и цифровых схем, моделирование на постоянном и переменном токе и моделирование переходного процесса. Недостатком программы является разделение аналогового и цифрового моделирования.

Родной операционной системой для Qucs является Linux, и при работе на этой системе следует ожидать наибольшей производительности. Настоятельно рекомендуется использовать для работы программы ОС Linux.

Версию Qucs для Linux можно установить в один клик, используя пакетный менеджер, а версию для Windows можно скачать бесплатно с сайта разработчика <http://qucs.sourceforge.net>.

2 Краткое введение в анализ высокочастотных схем

2.1 S-параметры четырёхполюсника

Четырёхполюсником является любая электронная схема, имеющая один вход и один выход: усилитель, фильтр, аттенюатор. Активный четырёхполюсник содержит источники питания и может усиливать входной сигнал. Активный четырёхполюсник как правило содержит биполярный или полевой транзистор, интегральный операционный усилитель и т.п. схемы. Пассивный четырёхполюсник не имеет источников питания, и не может усиливать сигнал. К пассивным четырёхполюсникам относятся LC- и RC- фильтры, которые содержат только индуктивность, ёмкость и сопротивление.

В радиотехнике для того, чтобы охарактеризовать четырёхполюсник применяется матрица S-параметров, или иначе матрица рассеяния. S-параметры устанавливают связь между нормированными амплитудами напряжения и тока на входе и на выходе четырёхполюсника. Если вход четырёхполюсника подключен к источнику переменного тока (генератору колебаний) с некоторым выходным сопротивлением Z_1 , то часть энергии от источника передаётся на вход, а часть — отражается от входа. Пусть нормированная амплитуда падающей на вход волны равна a_1 , а отражённой волны b_1 .

Такое же рассуждение справедливо и для выхода четырёхполосника, к которому подключена нагрузка с сопротивлением Z_2 . Часть энергии, поступающей с выхода четырёхполосника, поглощается нагрузкой, а часть энергии — отражается от неё и поступает обратно в четырёхполосник. Пусть нормированная амплитуда падающей на нагрузку волны равна a_2 , а отражённой от нагрузки волны b_2 .

Нормированные амплитуды падающей и отражённой волны на входе и на выходе связаны через матрицу рассеяния:

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \quad (1)$$

$$b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \quad (2)$$

Физический смысл S-параметров следующий:

S_{11} — коэффициент отражения Γ_1 от входа четырёхполосника. Показывает степень согласования между источником входного сигнала (генератором колебаний) и входными цепями четырёхполосника. Если $S_{11} = 0$, то вся энергия от источника входного сигнала проходит на вход четырёхполосника без отражения.

S_{12} — коэффициент обратной передачи. Показывает степень передачи энергии с выхода четырёхполосника на вход. Характеризует степень развязки между входом и выходом, что показывает устойчивость активных четырёхполосников.

S_{21} — коэффициент передачи. Равен коэффициенту усиления по мощности четырёхполосника. Для активных четырёхполосников может быть больше единицы, а для пассивных — всегда меньше единицы.

S_{22} — коэффициент отражения Γ_2 от нагрузки. Показывает степень передачи энергии с выхода в нагрузку. Если $S_{22} = 0$, то вся энергия с выхода четырёхполосника поглощается нагрузкой без отражения.

Для пассивных четырёхполосников всегда $S_{21} = S_{12}$ и $S_{11} = S_{22}$, так как внутрь четырёхполосника не поступает дополнительная энергия от источников питания.

2.2 Коэффициент стоячей волны — КСВ

Коэффициент стоячей волны (КСВ) (SWR — Standing wave ratio) 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.

КСВ вычисляется через коэффициент отражения Γ , который определяется через амплитуды падающей $U_{\text{пад}}$ и отражённой $U_{\text{отр}}$ волны. Эти амплитуды можно измерить при помощи направленных ответвителей. Прибор для измерения КСВ называется КСВ-метром.

$$\Gamma = \frac{U_{\text{отр}}}{U_{\text{пад}}} \quad (3)$$

$$\text{SWR} = \frac{1 + \Gamma}{1 - \Gamma} \quad (4)$$

КСВ можно вычислить и зная выходное сопротивление генератора $Z_{\text{вых}}$ и сопротивление нагрузки $Z_{\text{н}}$. В этом случае коэффициент отражения вычисляется по следующей формуле:

$$\Gamma = \left| \frac{Z_{\text{н}} - Z_{\text{вых}}}{Z_{\text{н}} + Z_{\text{вых}}} \right| \quad (5)$$

Вычисленный по указанной формуле коэффициент отражения затем подставляется в формулу (4) и вычисляется КСВ.

3 Расчёт S-параметров пассивного четырёхполюсника

3.1 Расчёт П-контура

Рассмотрим пример применения S-параметров при расчёте пассивных схем. Одной из таких схем является П-контур, применяемый для согласования выходного каскада передатчика с антенной, каскадов передатчика между собой и т.п.

Выходное сопротивление R_0 транзисторного усилителя мощности (УМ) передатчика составляет менее 10 Ом, а лампового — свыше 2000 Ом. Сопротивление R_a антенны, которая подключается к выходу УМ всегда равно 50 или 75 Ом. Если подключить антенну к выходу УМ напрямую, то из-за того что входное сопротивление антенны несогласованно с выходным сопротивлением передатчика, происходит отражение мощности от антенны и в эфир излучается неполная мощность передатчика. Для устранения этого явления нужно согласовать антенну и выходной каскад УМ. Для этой цели применяется в том числе П-контур (схема — рис.1).

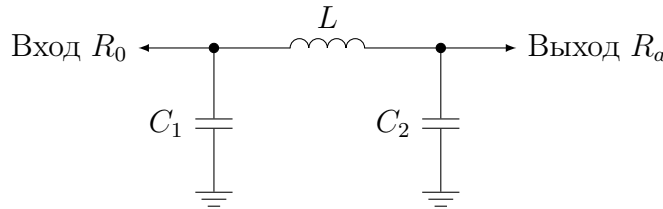


Рис. 1. Схема электрическая принципиальная П-контура

Чтобы рассчитать П-контур, нужно знать выходное сопротивление оконечного каскада УМ R_0 , сопротивление антенны R_a (обычно 50 или 75 Ом), рабочую частоту f_0 и добротность Q (обычно принимают $Q = 10 - 20$).

Определяют средние значения сопротивления нагрузки ρ :

$$\rho = \sqrt{R_0 R_a} \quad (6)$$

И реактивные сопротивления конденсаторов X_{C1} и X_{C2} и катушки X_L :

$$X_{C1} = -\frac{\rho + R_0}{Q} \quad (7)$$

$$X_{C2} = -\frac{\rho + R_a}{Q} \quad (8)$$

$$X_L = -(X_{C1} + X_{C2}) \quad (9)$$

Затем, зная реактивные сопротивления, рассчитывают индуктивность и ёмкость для рабочей частоты П-контура f_0 :

$$C = -\frac{1}{2\pi f_0 X_C} \quad (10)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f_0} \quad (11)$$

3.2 Моделирование П-контура

Для примера промоделируем П-контур, предназначенный для согласования выхода ампового передатчика с выходным сопротивлением $R_0 = 2000 \text{ Ом}$ с антенной со входным сопротивлением $R_a = 50 \text{ Ом}$.

Сначала собираем схему, показанную на рис.2. На схеме размещаем два источника питания (по входу и по выходу П-контура). Узел, к которому подключен источник питания, названы P1 при моделировании будет считаться входом схемы, а узел к которому подключен источник питания P2 — выходом схемы. Оба источника имеют частоту 7 МГц и уровень сигнала +20дБмВт. Источник на входе П-контура имеет выходной импеданс 2000 Ом, а на выходе П-контура 50 Ом.

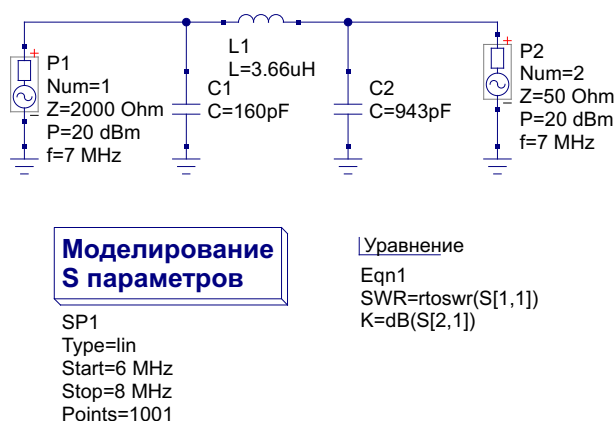


Рис. 2. Схема П-контура в программе Qucs

На схеме размещён компонент SP1, который отвечает за моделирование S-параметров. Установка параметров этого вида моделирования напоминает параметры для моделирования на переменном токе (AC-analysis). Параметры моделирования для нашего случая показаны на рис.3.

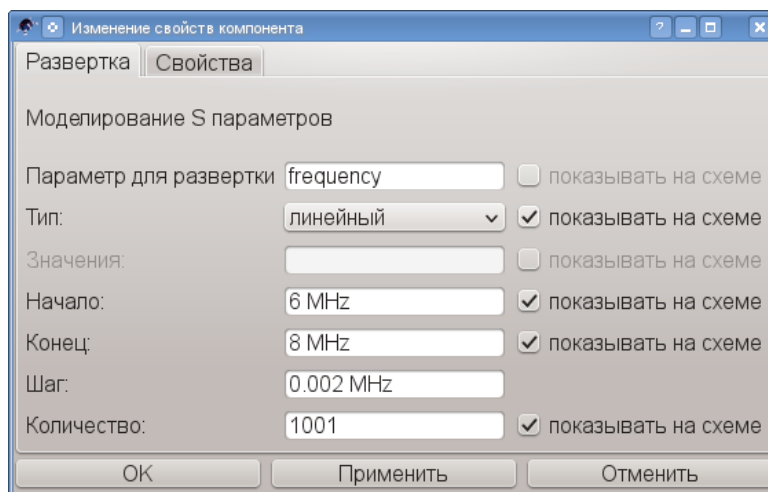


Рис. 3. Установки для моделирования S-параметров

Нам нужно рассчитать КСВ П-контура по входу. Для этого служит компонент Уравнение1 (см. рис.1). Чтобы рассчитать КСВ по коэффициенту отражения, служит функция `rtoswr()`. Коэффициент отражения по входу равен параметру S_{11} , поэтому в качестве параметра передаём функции $S[1,1]$.

Коэффициент передачи К схемы соответствует параметру S_{21} , выраженному в децибелах.

Запускаем моделирование нажатием на клавишу F2, переходим на страницу просмотра и строим графики зависимости S-параметров от частоты.

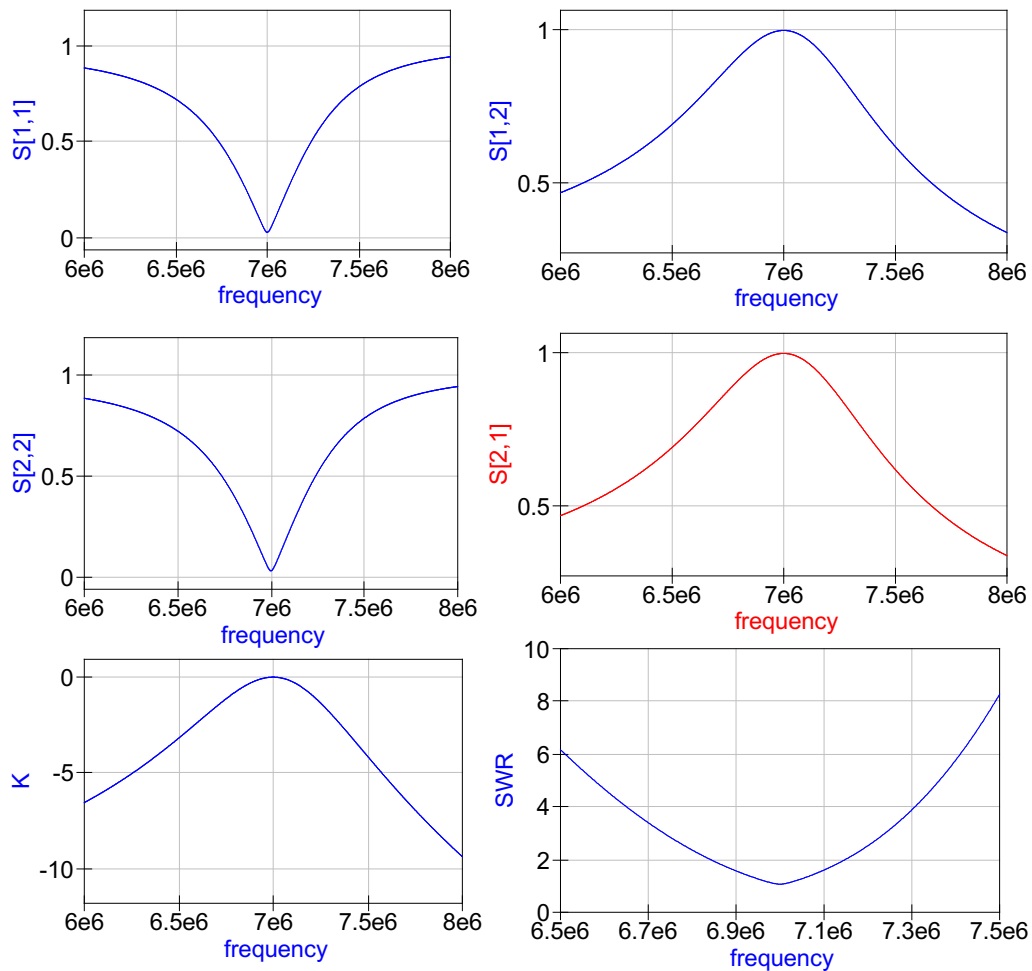


Рис. 4. Результаты моделирования П-контура

Из графиков видим, что на резонансной частоте П-контура (7 МГц) коэффициент отражения S_{11} минимален (приближается к нулю), а КСВ приближается к единице, то есть отражённая волна отсутствует и обеспечивается согласование передатчика с антенной. Коэффициент передачи $K = S_{21}$ на этой частоте максимален. Вся мощность от передатчика проходит в антенну.

Так как П-контур является пассивным четырёхполюсником, то $S_{11} = S_{21}$ и $S_{21} = S_{12}$.

Задание. Установить импеданс антенны равным 75 Ом и подбором ёмкости конденсаторов C1 и C2 обеспечить согласование (КСВ=1) на частоте 7 МГц. Учесть, что конденсатор C1 сдвигает резонансную частоту, а конденсатор C2 изменяет КСВ.

4 Расчёт S-параметров активного четырёхполюсника

Теперь произведём моделирование S-параметров активного четырёхполюсника. В качестве объекта исследований выбираем транзисторный широкополосный усилитель высокой частоты с обратной связью на ВЧ трансформаторе. Сначала собираем схему усилителя (см. рис.5).

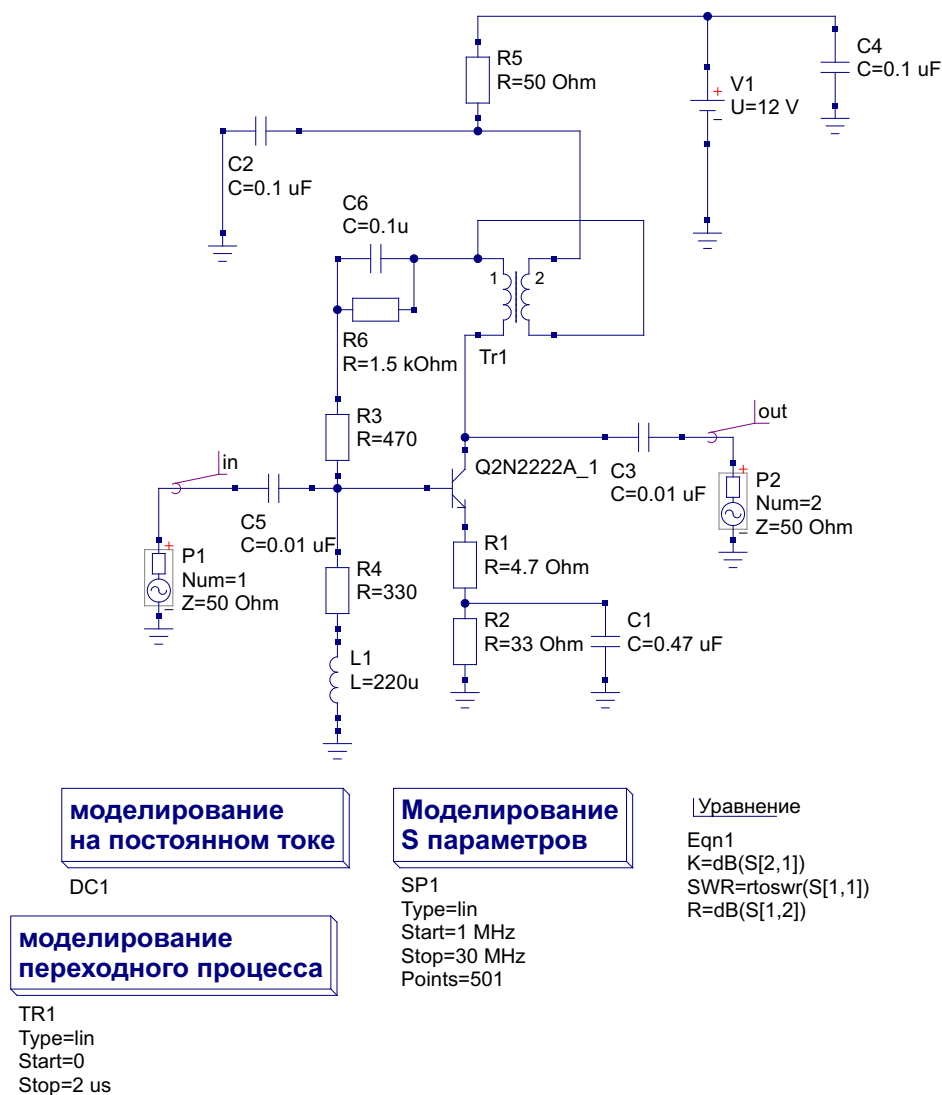


Рис. 5. Схема широкополосного усилителя ВЧ

Параметры трансформатора Tr1 на данной схеме выбрать следующие: индуктивность первичной обмотки $L1=100$ мкГн, индуктивность вторичной обмотки $L2=100$ мкГн, коэффициент связи $k=0.99$. Уровень мощности сигнала источников $P=-10$ дБмВт. Частота обоих источников $f=10$ МГц.

Данный усилитель не содержит резонансных контуров и относится к широкополосным усилителям. Его АЧХ равномерна в диапазоне от 1 до 30 МГц. На верхних частотах происходит завал АЧХ из-за влияния паразитных емкостей транзистора и монтажа.

Коэффициент усиления по мощности G_p зависит от сопротивления в цепи обратной связи R_f ($R3=470$ Ом на рис.5) и сопротивления в цепи эмиттера $r_э$ ($R1=4,7$ Ом на рис.5) и приближённо определяется по формуле:

$$G_p = \sqrt{\frac{R_f}{r_э}} = \sqrt{\frac{470}{4.7}} \approx 10 \quad (12)$$

Входное сопротивление Z_{in} равно выходному Z_{out} и также зависит от R_f и $r_э$ и приближённо определяется по формуле:

$$Z_{in} = Z_{out} = \sqrt{R_f r_э} = \sqrt{470 \text{ Ом} \cdot 4.7 \text{ Ом}} \approx 47 \text{ Ом} \quad (13)$$

Входное сопротивление оптимизировано под стандартное волновое сопротивление ВЧ и СВЧ схемотехники 50 Ом.

Коэффициент усиления и входные и выходные сопротивления также зависят и от конструкции ВЧ трансформатора. Для достижения наилучших результатов должен применяться трансформатор намотанный отрезком двухпроводной линии на кольце из высокочастотного феррита.

Параметры моделирования приведены на рис.5. Число точек для расчёта переходного процесса выбрать равным 501.

Запускаем моделирование по нажатию на клавишу F2, переходим на страницу просмотра и строим графики зависимости параметров S_{11} , S_{12} , S_{21} , S_{22} от частоты. Если схема собрана правильно, то должны получиться результаты, показанные на рис.6 и рис.7. Ещё нужно построить по результатам моделирования переходного процесса осциллограммы напряжения на входе и на выходе усилителя.

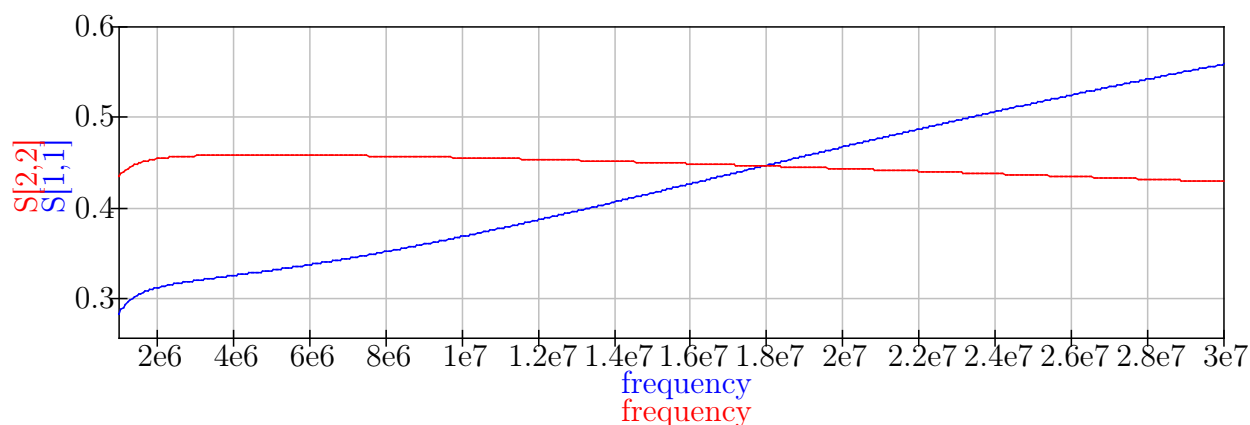


Рис. 6. Зависимость параметров S_{11} и S_{22} от частоты

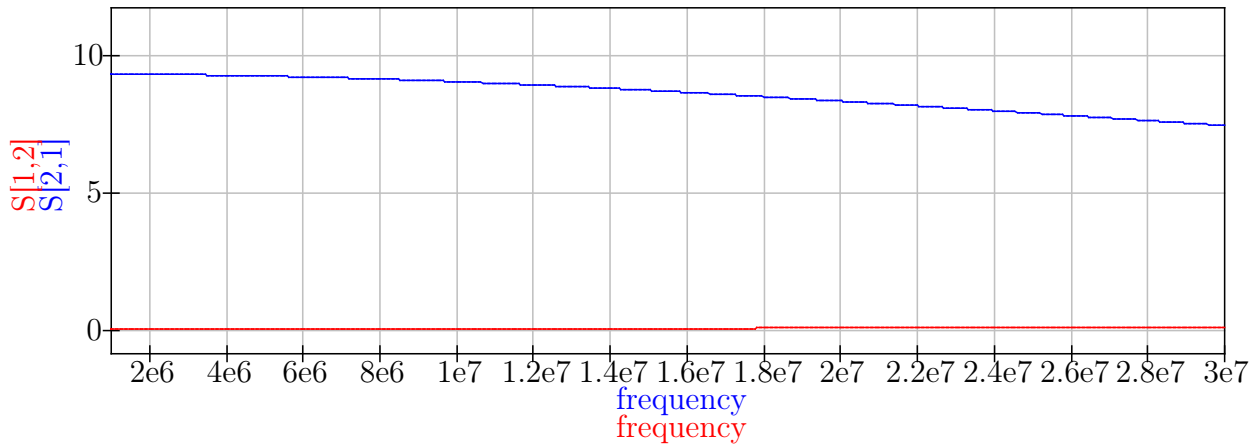


Рис. 7. Зависимость параметров S_{21} и S_{12} от частоты

Из полученных графиков видим, что для активной схемы $S_{11} \neq S_{22}$, то есть коэффициент отражения по входу не равен коэффициенту отражения по выходу. Также $S_{21} \neq S_{12}$ и причём S_{21} значительно превышает S_{12} . Это означает, что сигнал распространяется только в направлении со входа на выход. Коэффициент передачи сигнала со входа на выход S_{21} приближается к 10, что подтверждает расчёт усилителя по формуле (12).

5 Заключение

В результате выполнения лабораторной работы произведен анализ работы активных и пассивных четырёхполюсников при помощи S-параметров.