

Моделирование высокочастотных схем в частотной области при помощи САПР Qucs

Вадим КУЗНЕЦОВ
ra3xdh@gmail.com

В статье рассматриваются возможности симулятора электронных схем Qucs для моделирования высокочастотных электронных схем: моделирование S-параметров, расчет комплексных входных и выходных сопротивлений, использование диаграмм Смита. Подробно описываются встроенные математические функции для работы с матрицей рассеяния. Приведен обзор новых функций для синтеза СВЧ-фильтров, добавленных в версии 0.0.19.

Введение

Qucs [1, 2] — это кросс-платформенная легковесная САПР с открытым исходным кодом для моделирования электронных схем. Она распространяется бесплатно под лицензией GPL и предназначена для моделирования цифровых и аналоговых схем во временной и частотной области от постоянного тока до СВЧ-частот. Qucs работает на всех совре-

менных популярных ОС (Linux, Windows и MacOS). Особенность Qucs состоит в том, что данный симулятор имеет расширенные возможности для анализа электронных схем в частотной области. Эти возможности содержат:

1. Специальный вид моделирования «Моделирование S-параметров».
2. Модели длинных линий: коаксиальных линий, волноводов, микрополосковых линий (МПЛ), подложка.

3. Постпроцессор, включающий функции преобразования матрицы S-параметров, комплексных сопротивлений, анализ устойчивости усилителей.

4. Систему визуализации, имеющую возможность построения диаграмм Смита для сопротивлений и проводимости и диаграмм на комплексной плоскости.

5. Утилиты для расчета параметров МПЛ и синтеза фильтров на МПЛ.

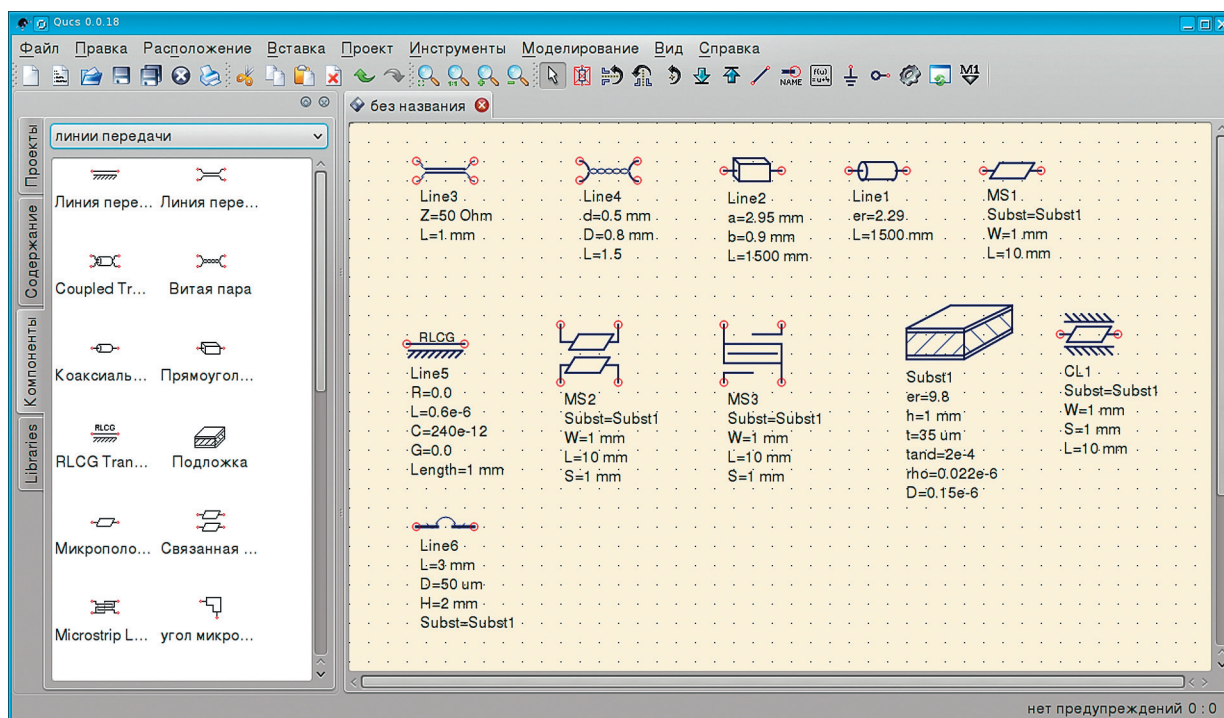


Рис. 1. Модели длинных линий, используемые в Qucs. Слева направо и сверху вниз: двухпроводная линия, витая пара, прямоугольный волновод, коаксиальная линия, отрезок МПЛ, RLCG-линия, связанные МПЛ, мост Ланге, подложка МПЛ, копланарный волновод, соединительный проводник

Таким образом, Qucs имеет функции, которые присущи таким проприетарным САПР, как AWR MicrowaveOffice. Рассмотрим подробнее способы анализа высокочастотных электронных схем при помощи Qucs. Данная статья основана на курсе лабораторных работ [3, 4] «Радиотехнические устройства и системы», который был создан автором для обучения студентов специальности «Проектирование и технология РЭС» в Калужском филиале МГТУ им. Н.Э. Баумана. Основы работы в Qucs описаны в предыдущей статье [5].

Модели СВЧ-элементов, используемые в Qucs

Отличие Qucs заключается в большом количестве встроенных моделей различных длинных линий. Кратко перечислим эти модели:

1. Двухпроводная линия.
2. Витая пара.
3. Коаксиальная линия.
4. Связанные линии.
5. Прямоугольный волновод.
6. Различные виды МПЛ: отрезок МПЛ, связанные МПЛ, направленный ответвитель Ланге, скачок ширины МПЛ, переходные отверстия, зазоры в МПЛ.
7. Подложка МПЛ.
8. Копланарные волноводы.
9. Соединительные проводники.
10. RLCG-линия с параметрами, задаваемыми пользователем.

Данные модели реализованы в виде специальных компонентов, которые расположены в группе «Линии передачи» (Transmission Lines) в выпадающем списке типов компонентов в главном окне программы. Обозначения моделей наиболее часто используемых линий показаны на рис. 1.

Рассмотрим более подробно модели МПЛ, используемые в Qucs. Как видно из рис. 1, модели МПЛ требуют задавать своим первым параметром имя специального компонента, называемого «Подложка» (Substrate). Этот компонент описывает геометрические размеры подложки и физические свойства материала подложки: относительную диэлектрическую проницаемость диэлектрика, потери в диэлектрике и сопротивление металлизации. Диалог задания свойств материала подложки можно видеть на рис. 2 (открывается двойным щелчком по компоненту). В свойствах подложки задается толщина линий МПЛ.

В библиотеке компонентов Qucs (открывается через пункт главного меню программы «Инструменты»->«Библиотека компонентов») доступны различные материалы подложек, которые можно использовать в своих схемах (рис. 3). Данные материалы находятся в библиотеке Substrates.

Кроме материала подложки, в свойствах МПЛ-компонентов следует задать геометрические размеры МПЛ: ширину и длину линий, зазор между линиями для связанных МПЛ.

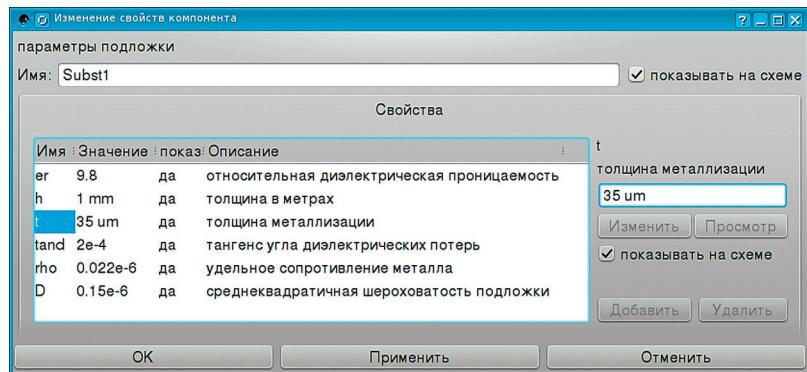


Рис. 2. Диалоговое окно свойств подложки

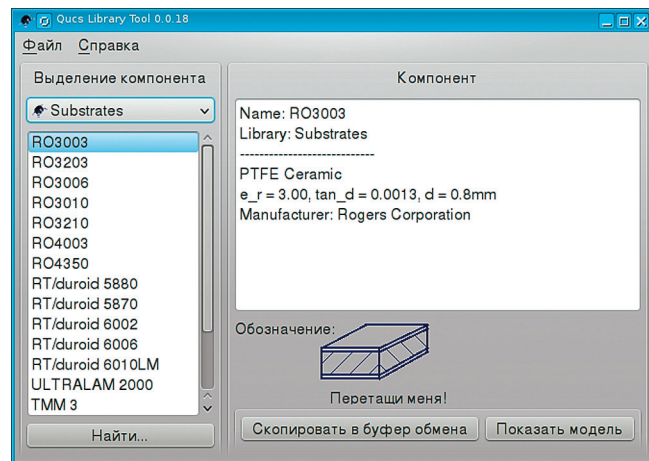


Рис. 3. Библиотечные материалы подложек в Qucs

Анализ СВЧ-схем

Существует несколько подходов к моделированию схем СВЧ-устройств. Они включают как методы с применением анализа схемы на компонентах с сосредоточенными параметрами, так и методы, использующие электромагнитный симулятор [6].

Для анализа устройств СВЧ-электроники в Qucs предусмотрен специальный вид моделирования «Моделирование S-параметров» (S-parameter simulation), который производит расчет матрицы рассеяния многопортовой схемы в частотной области. В качестве параметров моделирования (рис. 4) нужно задать начальную (Start) и конечную (Stop) частоты и количество точек расчета (Points).

Для того чтобы выполнить моделирование S-параметров, необходимо к каждому из портов схемы подключить специальный источник, называемый «Источник питания» (Power source) и находящийся в группе «Источники». С обычным источником переменного напряжения (AC voltage source) моделирование S-параметров функционировать не будет (рис. 5).

Моделирование S-параметров

SP1
Type = lin
Start = 1 GHz
Stop = 10 GHz
Points = 19

Рис. 4. Компонент «Моделирование S-параметров» и его параметры

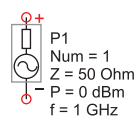


Рис. 5. Источник переменного напряжения для моделирования S-параметров и его параметры

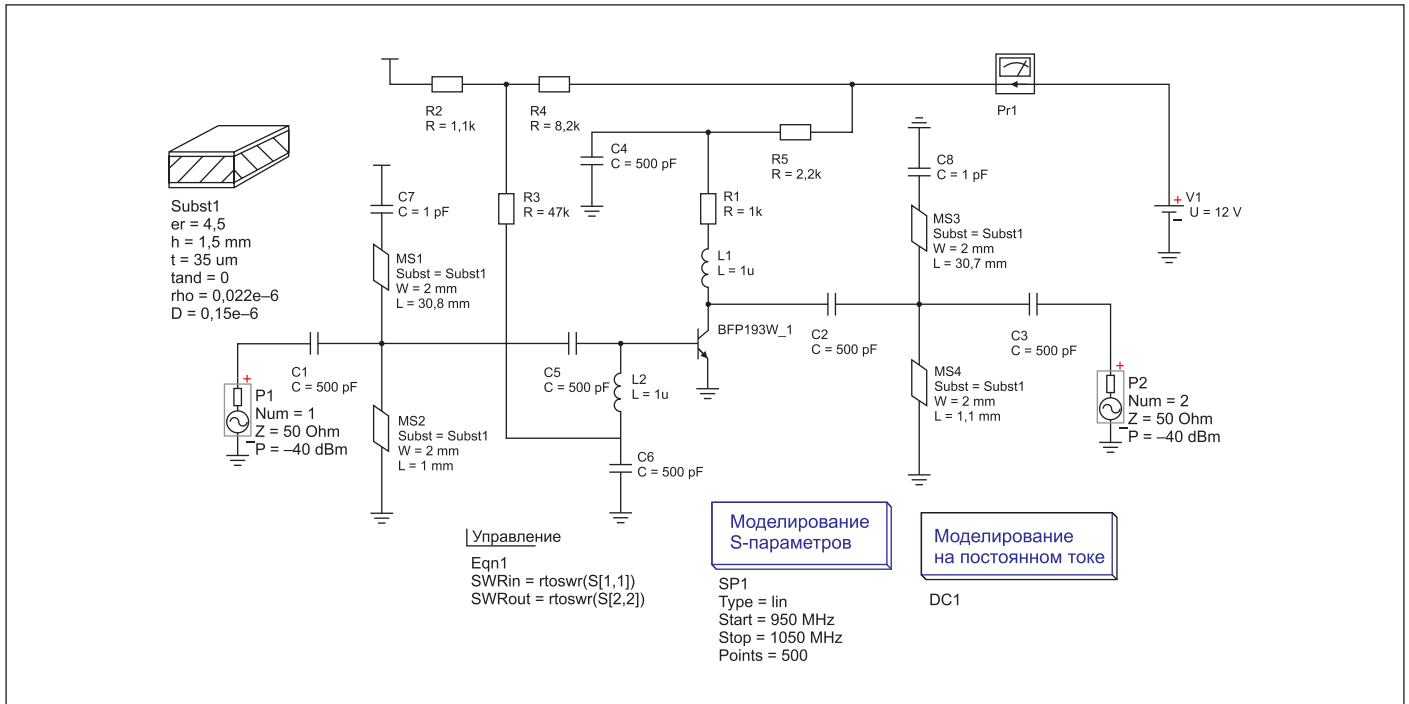


Рис. 6. Схема усилителя СВЧ-сигнала на частоту 1 ГГц

В качестве параметров источника следует задать номер порта (Num), сопротивление порта (Z , должно быть действительным числом) в Ом, мощность синусоидального сигнала (P) в дБмВт и частоту (f) в Гц.

После моделирования создается специальная переменная S , в которой хранится матрица S -параметров. В уравнениях можно об-

ращаться к компонентам этой матрицы, записав индексы в квадратных скобках $S[1,1]$, $S[2,1]$ и т.д. Для схемы, содержащей N портов, размерность матрицы будет $N \times N$.

Матрицу S -параметров можно преобразовывать в матрицы Y - и Z -параметров и переключать для другого опорного сопротивления при помощи следующих встроенных ма-

тематических функций (в квадратных скобках приведены необязательные параметры):

- $\text{stos}(s, zref[,z0])$ — преобразует матрицу S -параметров в матрицу S -параметров с другим эталонным полным сопротивлением ($z0$);
- $\text{stoy}(s[,zref])$ — преобразует матрицу S -параметров в матрицу Y -параметров;

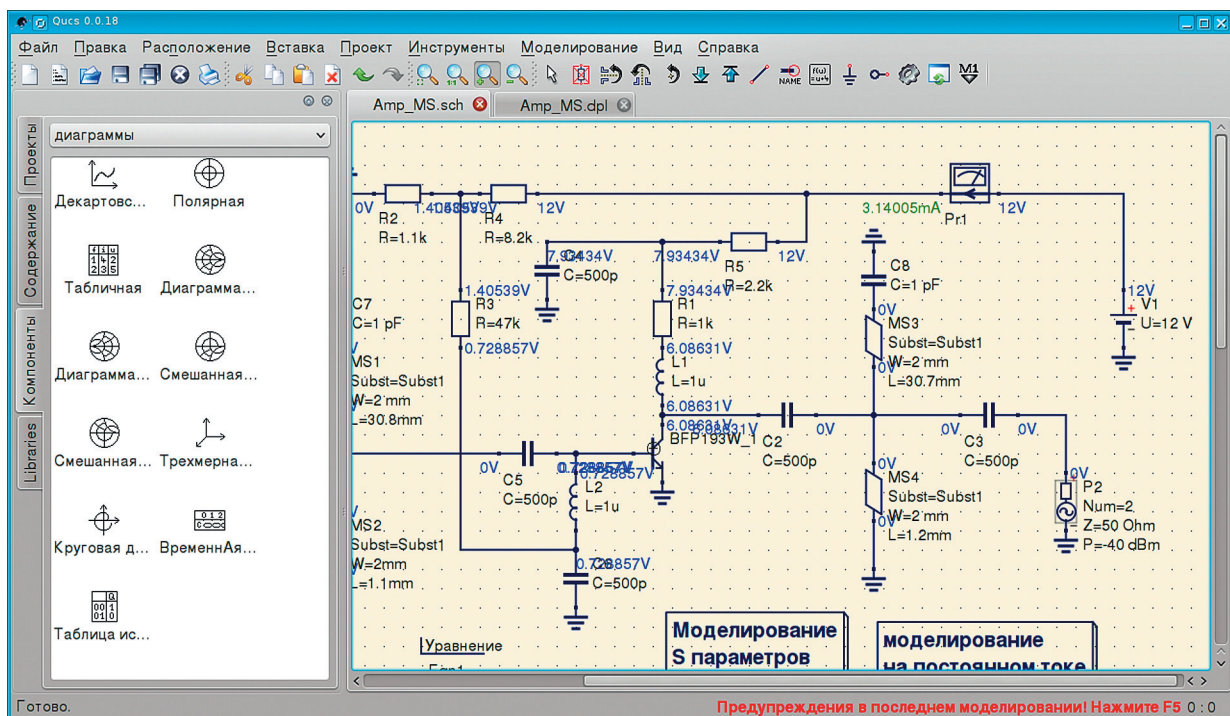


Рис. 7. Результаты расчета рабочей точки усилителя по постоянному току

- $\text{stoz}(s[,zref])$ — преобразует матрицу S-параметров в матрицу Z-параметров;
- $\text{twoport}(m,from,to)$ — преобразует двухпортовую матрицу из одного представления в другое, возможные значения для $from$ и to равны 'Y', 'Z', 'H', 'G', 'A', 'S' и 'T';
- $\text{ytop}(y[,z0])$ — преобразует матрицу Y-параметров в матрицу S-параметров;
- $\text{ytop}(y)$ — преобразует матрицу Y-параметров в матрицу Z-параметров;
- $\text{ztop}(z[,z0])$ — преобразует матрицу Z-параметров в матрицу S-параметров;
- $\text{ztop}(z)$ — преобразует матрицу Z-параметров в матрицу Y-параметров.

К компонентам матрицы S-параметров можно применять все встроенные математические функции постпроцессора Qucs. В частности, можно рассчитывать КСВ при помощи функции $\text{rtoswr}()$, если задать в качестве параметра ей коэффициент отражения (например, $S[1,1]$). Например, выражение $\text{rtoswr}(S[1,1])$ рассчитывает КСВ по порту № 1 моделируемой схемы. Перечислим остальные функции данной группы:

- $\text{rtoswr}(x)$ — преобразует коэффициент отражения в коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН);
- $\text{rto}(x[,zref])$ — преобразует коэффициент отражения в полную проводимость; по умолчанию $zref$ равно 50 Ом;
- $\text{rtoz}(x[,zref])$ — преобразует коэффициент отражения в полное сопротивление; по умолчанию $zref$ равно 50 Ом;
- $\text{ytop}(x[,zref])$ — преобразует полную проводимость в коэффициент отражения; по умолчанию $zref$ равно 50 Ом;
- $\text{ztop}(x[,zref])$ — преобразует полное сопротивление в коэффициент отражения; по умолчанию $zref$ равно 50 Ом.

Рассмотрим пример моделирования. Про моделируем схему усилителя СВЧ-сигнала на биполярном транзисторе на частоту 1 ГГц. Усилитель работает на 50-Ом нагрузку. Схема электрическая принципиальная усилителя показана на рис. 6. В качестве резонансной системы применены отрезки МПЛ на текстолите FR-4. Используется модель СВЧ биполярного транзистора BFP193W из стандартной библиотеки компонентов Qucs. В ходе моделирования необходимо выполнить следующие задачи:

1. Про моделировать схему усилителя (рис. 6). Провести моделирование на постоянном токе. Найти рабочую точку и ток покоя усилителя. Рабочая точка устанавливается резисторами R2, R3, R4.
2. Провести моделирование S-параметров в диапазоне частот от 950 до 1050 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. Найти, чему равен коэффициент усиления усилителя на резонансной частоте.
3. Построить графики тех же S-параметров на диаграмме Смита.

4. Определить входное и выходное сопротивление усилителя на частоте резонанса.

Как видно из рис. 6, схема имеет два порта (P1 — вход, P2 — выход) с опорным сопротивлением 50 Ом. Компонент «уравнение» иллюстрирует использование функций преобразования матрицы S-параметров. При помощи функции $\text{rtoswr}()$ вычисляется КСВ по входу (SWRin) и по выходу (SWRout) системы. Моделирование на постоянном токе нужно для расчета рабочей точки усилителя.

Сначала проведем расчет рабочей точки усилителя по постоянному току. Для этого собираем схему и выбираем пункт меню «Моделирование->Расчет рабочей точки по постоянному току» (или нажимаем клавишу F8). Напряжения на узлах схемы и токи через измерители тока отображаются на схеме в рабочем поле программы. Видим, что ток покоя усилителя равен 3,14 мА, а напряжение на коллекторе составляет около 6 В (рис. 7). Транзистор работает в активном режиме.

Теперь нужно построить зависимости S-параметров, входного Z_{11} и выходного Z_{22}

сопротивлений от частоты в декартовых координатах и на диаграмме Смита. Для этого моделируем схему («Моделирование->Моделировать», F2), переходим на страницу просмотра (F4) и размещаем там декартовскую диаграмму. Диаграмму можно поместить и непосредственно на рабочем поле схемы. В свойствах диаграммы следует выбрать, какие переменные нужно построить. Компоненты матрицы S-параметров отображаются как $S[1,1]$, $S[1,2]$, $S[2,1]$, $S[2,2]$. Чтобы построить частотные зависимости S-параметров, их надо выбрать в диалоге свойств диаграммы (рис. 8). Поскольку схема имеет два порта, мы получили четыре S-параметра. Полученные частотные зависимости S-параметров показаны на рис. 9.

Диаграммы Смита также могут быть использованы для анализа частотных зависимостей S-параметров. Способ построения диаграммы Смита ничем не отличается, нужно только разместить на странице просмотра или на схеме компонент «Диаграмма Смита» для сопротивлений. Возможно по-

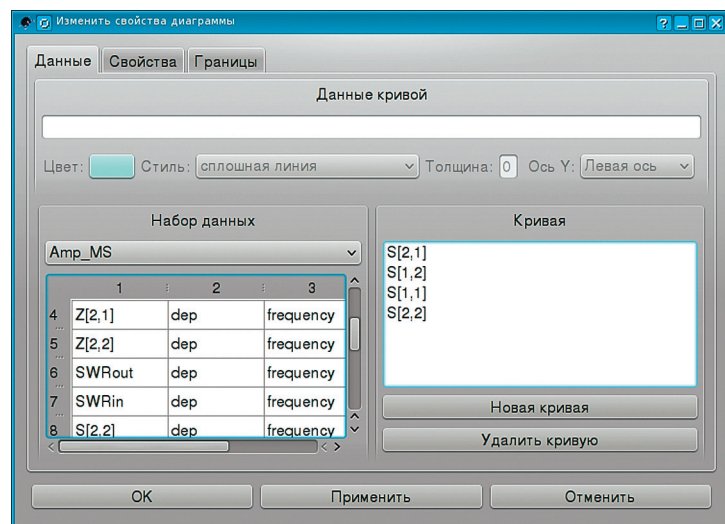


Рис. 8. Диалог свойств диаграммы. Выбор S-параметров

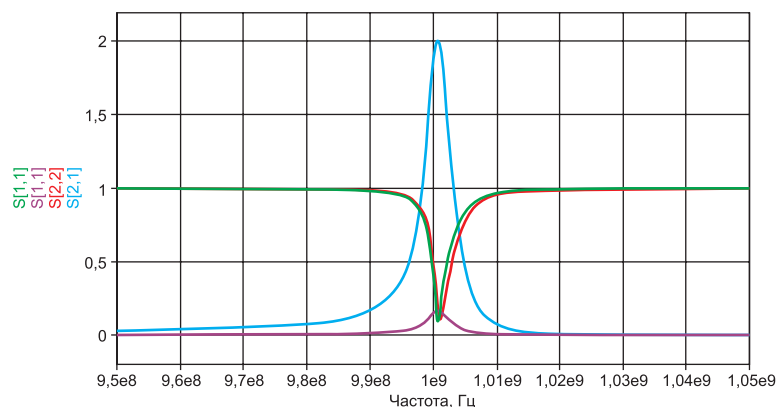


Рис. 9. Зависимость S-параметров усилителя от частоты

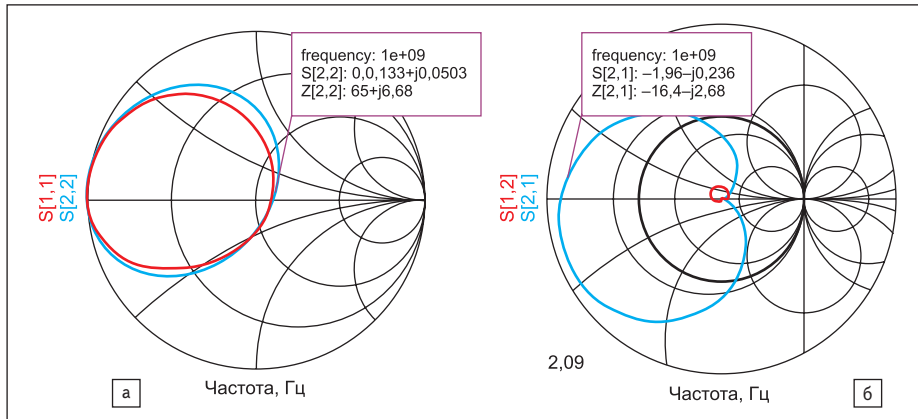


Рис. 10. Частотные зависимости на диаграмме Смита: а) коэффициенты отражения по входу и по выводу S11 и S22; б) коэффициенты передачи S12 и S21

строение диаграммы Смита для проводимостей. Диаграммы Смита показаны на рис. 10. На правой диаграмме построены зависимости S_{21} и S_{12} , а на левой — зависимости S_{11} и S_{22} . При помощи диаграммы Смита в Qucs можно определять входные и выходные сопротивления. Для этого требуется установить маркер на диаграмме. Значение входного/выходного сопротивления отображается рядом со значением S-параметра. Из рис. 10 видно, что в точке резонанса коэффициент отражения по выводу равен $0,133 + j0,05$, а выходное сопротивление равно $65 + j6,68$ Ом.

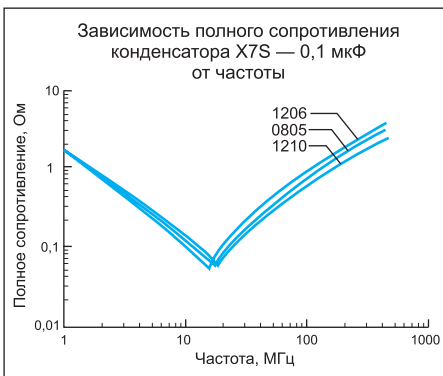


Рис. 11. Частотная зависимость импеданса конденсатора

Теперь проанализируем КСВ по входу и по выводу усилителя. Графики частотных зависимостей КСВ показаны на рис. 11. Видно, что на частоте резонанса КСВ приближается к единице. Отсюда можно сделать вывод, что усилитель согласован по входу и по выводу.

Таким образом, рассмотренный пример показывает, что Qucs позволяет моделировать усилительные схемы СВЧ-диапазона, строить частотные зависимости S-параметров, анализировать их согласование.

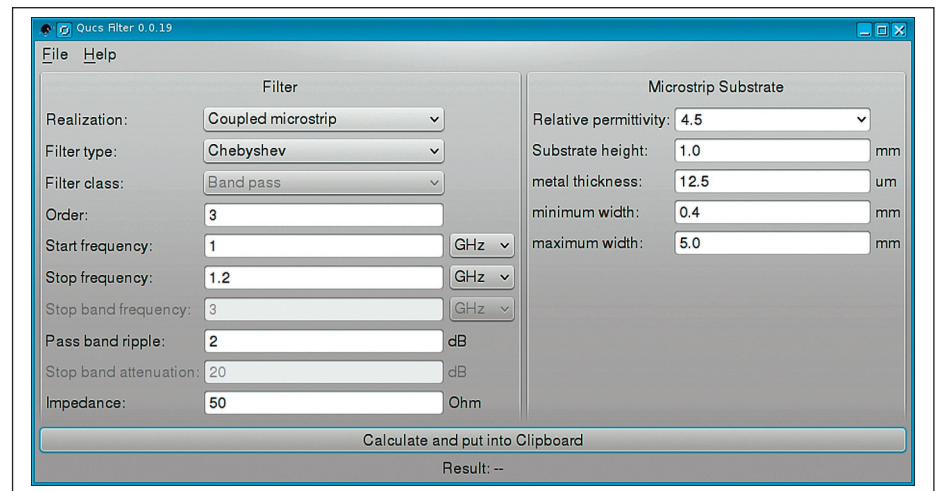


Рис. 13. Окно утилиты для синтеза фильтров

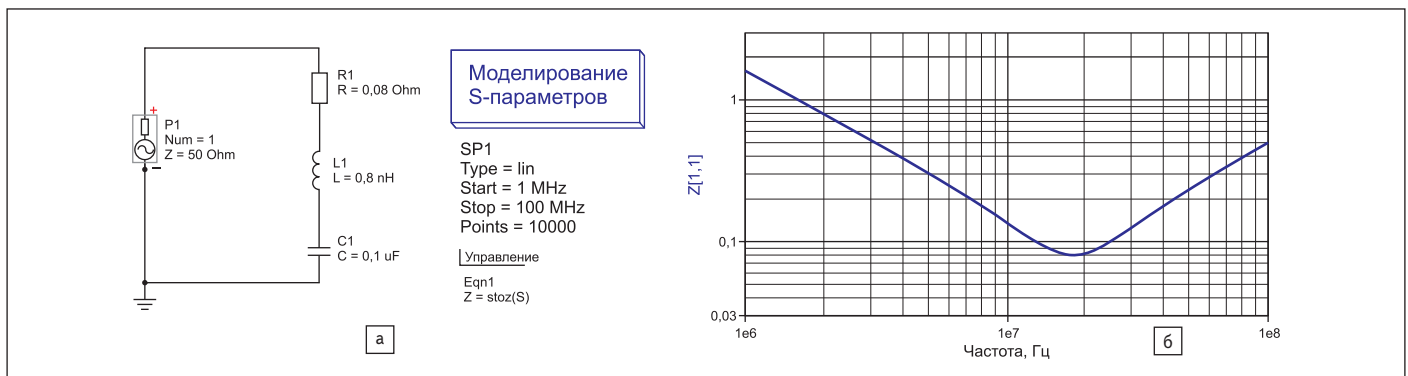


Рис. 12. а) Эквивалентная схема керамического конденсатора с потерями; б) зависимость эквивалентного сопротивления керамического конденсатора от частоты

Применение моделирования S-параметров для анализа эквивалентных сопротивлений

Qucs позволяет использовать моделирование S-параметров для анализа эквивалентных комплексных сопротивлений в частотной области.

В качестве примера рассмотрим эквивалентную схему керамического конденсатора с потерями [7]. Зависимость полного сопротивления конденсатора от частот конденсатора с диэлектриком X7S емкостью 0,1 мкФ, приведенная в документации на конденсатор, показана на рис. 11.

Конденсатор с потерями можно представить в виде последовательного колебательного контура. Проанализируем эту цепь в Qucs. Схема модели конденсатора и результаты моделирования показаны на рис. 12. Конденсатор является двухполюсником (однопортовая схема). При помощи функции `stoz()` производится пересчет матрицы S-параметров в матрицу Z-параметров. Матрица Z-параметров двухполюсника имеет один элемент Z_{11} , который соответствует эквивалентному сопротивлению конденсатора.

На рис. 12 видно, что смоделированная частотная зависимость полного сопротивления конденсатора от частоты идентична при-

веденной в документации на конденсатор. Таким образом, Qucs позволяет моделировать зависимости комплексных сопротивлений многополюсников от частоты.

Синтез схем СВЧ-устройств при помощи Qucs

В версии Qucs 0.0.19 существенной переработке подверглась встроенная утилита для синтеза пассивных фильтров [8], которая позволяет синтезировать схемы ФНЧ, ФВЧ, полосовых фильтров по заданным параметрам АЧХ. В нее были добавлены следующие топологии звеньев фильтров, особенно важные для СВЧ-устройств:

1. Фильтр на МПЛ с торцевой связью.
2. Фильтр на связанных МПЛ.
3. Фильтр на МПЛ с переменным волновым сопротивлением.

В качестве примера синтезируем полосовой фильтр на связанных МПЛ. Параметры фильтра: фильтр Чебышева 3-го порядка с неравномерностью АЧХ в полосе пропускания 2 дБ, полоса частот от 1 до 1,2 ГГц, характеристическое сопротивление — 50 Ом.

Запускаем средство для синтеза пассивных фильтров («Инструменты->Синтез фильтров»). Открывается главное окно утилиты (рис. 13). Выбираем тип фильтра **Coupled Microstrip** (Фильтр на связанных МПЛ), вводим параметры фильтра и нажимаем кнопку **Calculate**. В окне утилиты отображается надпись **Successful**, извещающая о том, что фильтр синтезирован успешно. Теперь системный буфер обмена содержит схему фильтра. Ее можно вставить в Qucs при помощи команды «Правка->Вставить» (Ctrl+V). Вставим схему в Qucs и проведем моделирование фильтра. Схема фильтра в Qucs показана на рис. 14, а АЧХ синтезированного фильтра — на рис. 15, коэффициенты S_{21} и S_{11} выражены в децибелах.

Из приведенного примера видно, что встроенная система синтеза фильтров позволяет синтезировать пассивные фильтры, в том числе для использования в составе СВЧ-устройств. Утилита синтеза пассивных фильтров разрешает использовать различные топологии звеньев.

Также в Qucs встроена утилита для расчета параметров МПЛ и коаксиальных линий по известным геометрическим размерам линии. Она вызывается через меню «Инструменты->Расчет линии» и предназначена для расчета следующих видов СВЧ-линий:

1. Отрезки МПЛ и связанные МПЛ.
2. Коаксиальная линия.
3. Прямоугольный волновод.
4. Копланарный волновод.

Главное окно данной утилиты показано на рис. 16. В главном окне отображается схематический чертеж рассчитываемой линии и поля ввода для параметров линии.

Утилита позволяет как рассчитать геометрические размеры линии по заданным

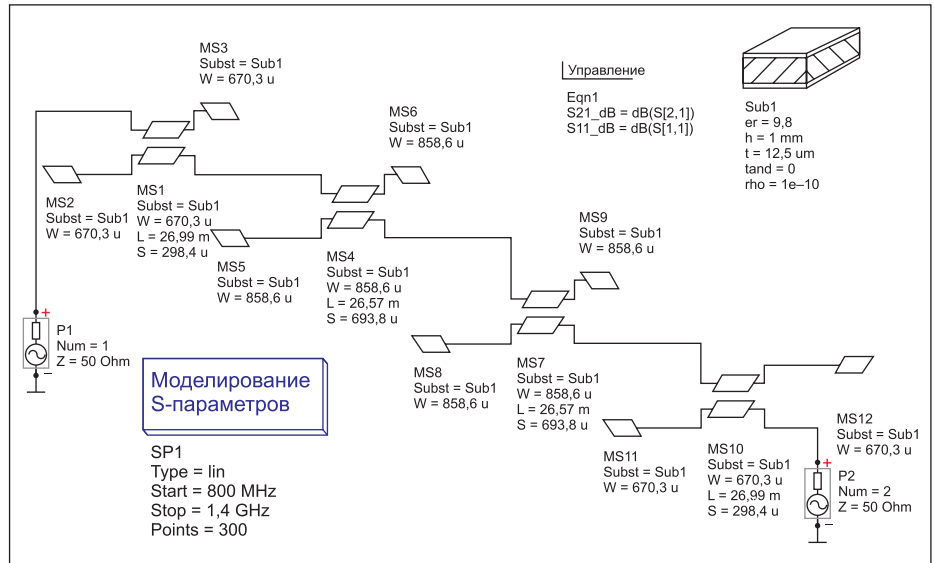


Рис. 14. Синтезированная схема фильтра на связанных МПЛ

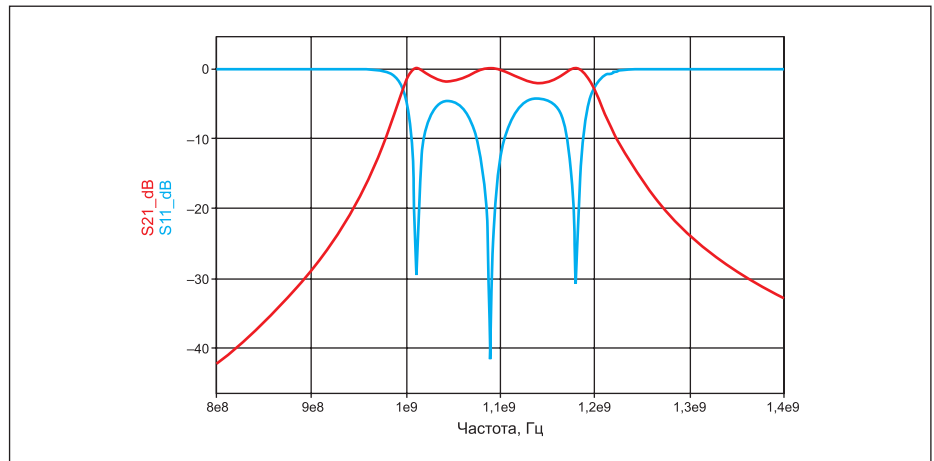


Рис. 15. АЧХ фильтра на МПЛ

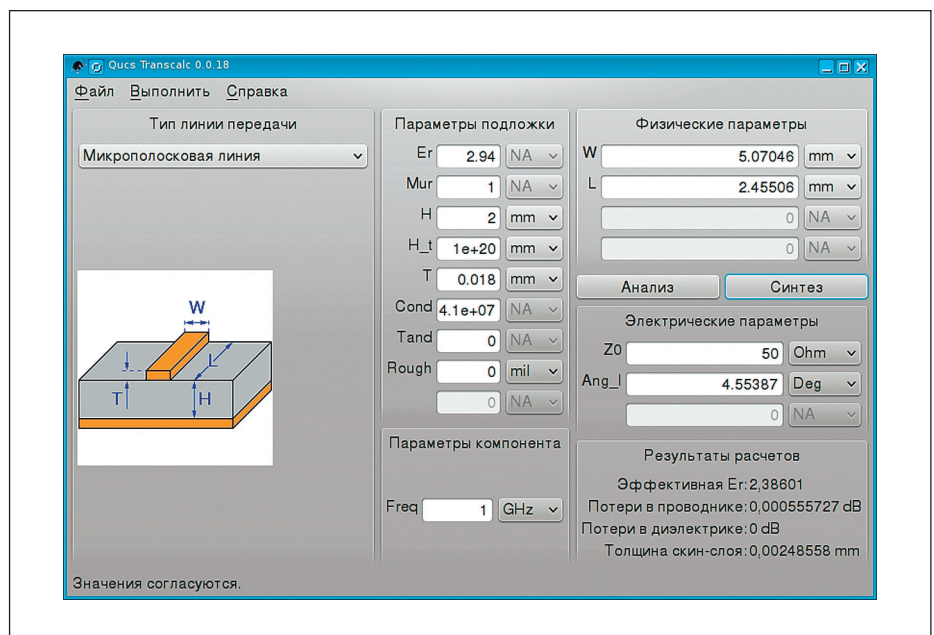


Рис. 16. Главное окно утилиты для расчета длинных линий

параметрам (волновому сопротивлению Z_0 , Ом, и электрической длине Ang_I в градусах), так и решать обратную задачу: рассчитать волновое сопротивление и электрическую длину по заданным геометрическим размерам.

Заключение

В статье были рассмотрены элементная база для моделирования высокочастотных устройств, имеющаяся в Qucs, и основные принципы анализа и синтеза высокочастотных схем. Несмотря на то, что Qucs относится к классу ПО с открытым исходным кодом, данный симулятор позволяет получать результаты, сравнимые с проприетарным ПО, подобным пакету AWR MicrowaveOffice.

Преимуществами Qucs является кросс-платформенность и нетребовательность к ресурсам ПК, что позволяет ему работать в том числе и на отечественных сборках ОС Linux. Преимуществом является и развитая система постобработки результатов, оптимизированная для анализа высокочастотных схем. К недостаткам системы следует отнести малое количество библиотечных компонентов.

Таким образом, можно рекомендовать Qucs для моделирования высокочастотных электронных схем в академических целях, на малых предприятиях и индивидуальным разработчикам электроники, а в некоторых случаях Qucs можно использовать и на крупных предприятиях для замены проприетарного ПО, закупаемого за рубежом.

Данное направление особенно актуально в связи с политикой санкций и финансовым кризисом. ■

Литература

1. Сайт проекта Qucs: Quite Universal Circuit Simulator. www.qucs.sourceforge.net
2. Репозиторий исходных кодов проекта Qucs. www.github.com/Qucs/qucs
3. Кузнецов В. В. Методические указания к лабораторным работам по курсу «Радиотехнические устройства и системы». www.github.com/ra3xdh/RTUiS-labs
4. Кечиев Л. Н., Крючков Н. М., Кузнецов В. В. Использование свободного ПО Qucs в целях моделирования для оценки факторов ЭМС РЭА // Технологии ЭМС. 2015. № 1.
5. Кузнецов В. В. Симулятор электронных схем с открытым исходным кодом Qucs: основные возможности и основы моделирования // Компоненты и технологии. 2015. № 3.
6. Драч В. Е., Чухраев И. В., Яшин А. А. Моделирование усилителя мощности диапазона СВЧ // Радиопромышленность. 2011. № 1.
7. X7S Dielectric AVX. www.avx.com/docs/catalogs/cx7s.pdf
8. Brinson M., Crozier R., Kuznetsov V., Novak C., Roucaries B., Schreuder F., Torri G. B. Qucs: improvements and new directions in the GPL compact device modelling and circuit simulation tool. MOS-AK Workshop, Grenoble, March, 2015. www.mos-ak.org/grenoble_2015/presentations/T4_Brinson_MOS-AK_Grenoble_2015.pdf