

# Лабораторная работа №12 по курсу «Радиотехнические устройства и системы» Компактные модели

Кузнецов В.В., доцент кафедры ЭИУ1-КФ

28 марта 2015 г.

## 1 Цель работы

Цель данного руководства — рассмотрение использования компактных моделей (заданные уравнением устройства) в 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 Туннельный диод

Компактные модели представляют токи  $I_1, \dots, I_N$ , протекающие через каждую ветвь многополюсника и заряды  $Q_1, \dots, Q_N$  накопленные каждой ветвью многополюсника (всего  $N$  ветвей) как функциональную зависимость от напряжений  $V_1, \dots, V_N$  подаваемых, на зажимы многополюсника.

Уравнения тока:

$$I_1 = f_1(V_1, \dots, V_N) \quad (1)$$

...

$$I_N = f_N(V_1, \dots, V_N) \quad (2)$$

Уравнения заряда:

$$Q_1 = g_1(V_1, \dots, V_N) \quad (3)$$

...

$$Q_N = g_N(V_1, \dots, V_N) \quad (4)$$

Таким образом можно представить ВАХ и ВФХ электронного компонента. Например ВАХ туннельного диода описывается следующим уравнением:

$$I = I_s \left( e^{\frac{V}{\varphi_T}} - 1 \right) + I_v e^{k(V-V_v)} + I_p \cdot \frac{V}{V_p} e^{\frac{V_p-V}{V_p}} \quad (5)$$

Где  $\varphi_T$  — тепловой потенциал, определяемый абсолютной температурой  $T$ , постоянной Больцмана  $k_B = 1.38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К и зарядом электрона  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  Кл

$$\varphi_T = \frac{k_B T}{e} \quad (6)$$

Туннельный диод также имеет ёмкость  $C$  p-n перехода, которую можно представить с помощью зарядового уравнения:

$$Q = CV \quad (7)$$

Теперь промоделируем ВАХ туннельного диода при помощи компонента «Заданное уравнением устройство» (рис.1). Данный компонент по умолчанию имеет одну секцию. Каждое слагаемое уравнения ВАХ туннельного диода (5) представляется отдельной секцией компонента. Эти секции нужно добавить вручную.

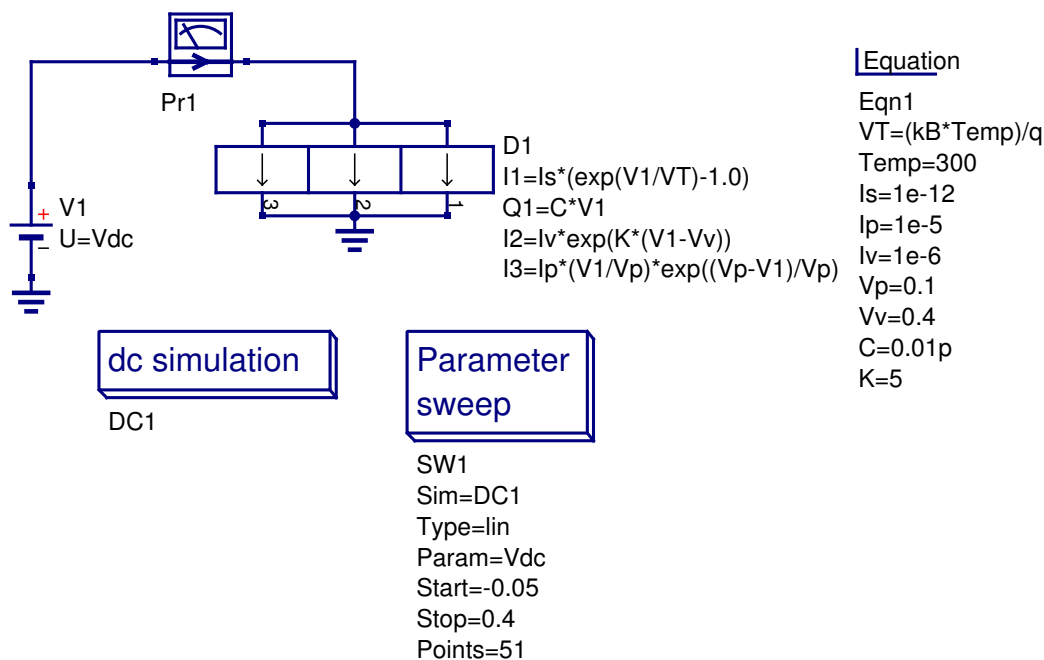


Рис. 1. Модель туннельного диода

Запустив моделирование получим N-образную ВАХ туннельного диода. На ВАХ туннельного диода имеется участок с отрицательным сопротивлением.

**Задание:** Собрать схему 1 и провести моделирование ВАХ туннельного диода. В отчёте привести график ВАХ.

### 3 Нелинейная ёмкость

Линейная ёмкость  $C$ , не зависящая от напряжения, описывается уравнением заряда. Уравнение содержит только слагаемые линейно зависящие от напряжения.

$$Q = CV \quad (8)$$

Для нелинейной ёмкости уравнение заряда будет содержать слагаемые, содержащие степенные множители напряжения. Это математической модели нелинейного конденсатора при помощи разложения в степенной ряд Тэйлора:

$$Q = C_1V + \frac{C_2V^2}{2} + \frac{C_3V^3}{3} + \dots + \frac{C_NV^N}{N} \quad (9)$$

Постоянный ток через линейную и нелинейную ёмкость равен нулю  $I = 0$ .

Имея в распоряжении данную математическую модель, можно промоделировать в Qucs нелинейную ёмкость, используя заданное уравнением устройство и зарядовые уравнения (рис.2)

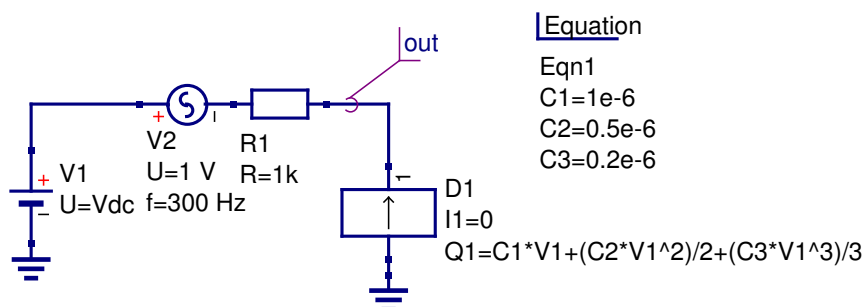


Рис. 2. Модель нелинейного конденсатора

**Задание:** Смоделировать АЧХ в диапазоне 1 Гц — 1 кГц тестовой схемы с нелинейным конденсатором (рис.2) при напряжении источника постоянного напряжения (источник напряжения смещения) 1 В. Затем провести параметрический анализ и получить семейство АЧХ при напряжении смещения от 1 до 10 В с шагом 1 В. В отчёте привести обе АЧХ.

## 4 Нелинейная индуктивность

Нелинейная индуктивность может быть промоделирована при помощи преобразования нелинейной ёмкости в индуктивность при помощи *гириатора*. Гиратор — это четырёхполюсник, преобразующий ёмкость в индуктивность. Подобная схема показана на рис.3. Компонент X1 — это гиратор.

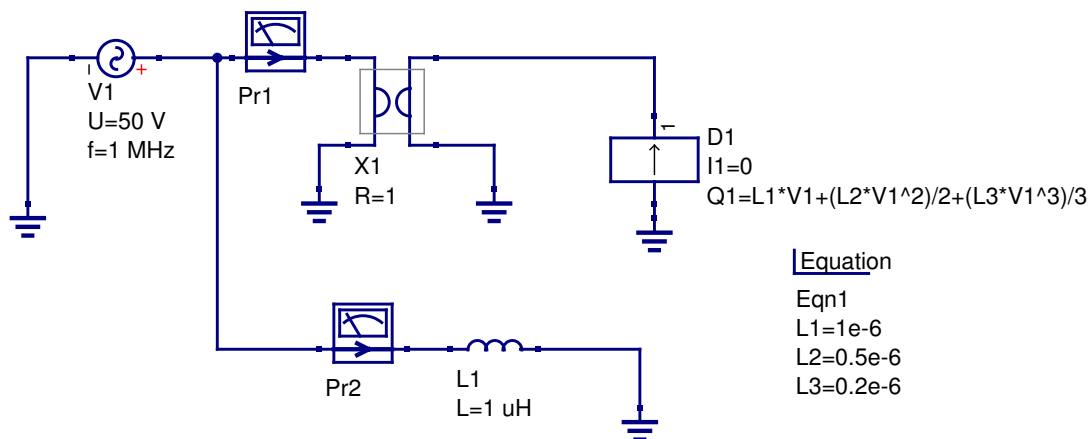


Рис. 3. Модель нелинейной индуктивности

**Задание:** Смоделировать тестовую схему рис.3. Провести моделирование переходного процесса на отрезке  $0 - 4$  мкс. Получить осциллограммы тока через линейную и нелинейную индуктивность. Сравнить форму тока. Объяснить чем вызваны данные различия. В отчёт включить обе осциллограммы.

## 5 Заключение

В ходе данной лабораторной работы студенты ознакомились с принципами моделирования полупроводниковых приборов, нелинейных конденсаторов и индуктивностей при помощи компактных моделей.