

А.С. Сальников, В.А. Боев  
(г. Томск, Томский государственный университет систем управления  
и радиоэлектроники)

## **РАЗРАБОТКА ПОВЕДЕНЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ТРАНЗИСТОРА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ И ЕЕ РЕАЛИЗАЦИЯ В QUCS**

### **DC BEHAVIORAL MODELING OF TRANSISTOR AND MODEL IMPLEMENTATION IN QUCS**

*Рассмотрен полный цикл разработки новой поведенческой модели, заканчивая реализацией модели в программе моделирования Qucs на языке Verilog-A. В задаче введены упрощения, что позволяет использовать результаты в учебном процессе.*

*The thesis is dedicated to full design flow of transistor behavioral model including Verilog-A implementation in Qucs. The task is simplified so it can be used for educational purpose.*

*Ключевые слова: поведенческая модель транзистора, Qucs, Verilog-A.*

*Keywords: transistor behavioral model, Qucs, Verilog-A.*

**Введение.** При обучении дисциплинам, связанным с электроникой, большое значение имеют инструменты моделирования электрических схем. Практика, однако, такова, что предпочтение приходится отдавать открыто распространяемым программам. Программа моделирования Qucs [1] с открытым исходным кодом позволяет моделировать цифровые, аналоговые и СВЧ-цепи, имеет необходимые модули отображения результатов расчета и может считаться хорошей альтернативой коммерческим САПР в учебном процессе.

Важной темой в полупроводниковой электронике являются модели транзисторов. Для глубокого понимания темы студент должен изучить теорию существующих моделей и экстракции ее параметров, а также на практике реализовать модель в специализированной программе и подобрать ее параметры для описания результатов измерения транзистора. Одной из целей данной работы являлось освоение этой процедуры на примере Qucs.

Современные модели транзисторов, применяемые для моделирования электрических цепей можно разделить на компактные эмпирические, компактные физические и поведенческие. В данной работе сосредоточимся только на поведенческих моделях, которые представляют собой аппроксимацию результатов измерений без глубокого изучения физики работы прибора. Таким модели являются универсальными, относительно простыми в построении и использовании, поэтому подходят под цели работы. Чаще всего для построения поведенческих моделей используют методы машинного обучения, например, искусственные нейронные сети [2], метод

опорных векторов [3] или байесовский вывод [4]. Особенно сложных в изучении нелинейных и электротермических эффектов в мощных транзисторах [5,6].

В данной работе исследуется весь цикл разработки модели, но с учетом применения в учебном процессе каждый этап цикла упрощается. Таким образом, целью представляемой научной работы является разработка простой поведенческой модели, описывающей ВАХ транзистора, и ее реализация в программе Qucs. В данной работе рассматриваются транзисторы на основе КМОП технологии.

**Поведенческая модель.** Есть большое разнообразие поведенческих моделей. С математической точки зрения, построение поведенческой модели — это аппроксимация измеренных параметров устройства. На сегодняшний день широкое распространение в качестве инструмента аппроксимации получили искусственные нейронные сети (ИНС). Однако в ходе исследований на простейших нейронных сетях не удалось получить удовлетворительных результатов, поэтому в дальнейших исследованиях данный подход будет исследоваться более подробно.

В данной работе для описания ВАХ была использована функция специального вида. Функция получена упрощением функции для описания тока, применяемой в модели Angelov, которая используется в том числе и для моделирования КМОП-транзисторов [7]. Используемая в работе функция имеет вид:

$$I_{СИ}(V_{СИ}, V_{ЗИ}) = w_0 [1 + \tanh(w_1(V_{ЗИ} - w_2))] \tanh(w_3 V_{СИ})$$

где  $w_i$  – коэффициенты аппроксимации.

Представленная формула представляет собой поведенческую модель ВАХ транзистора. Для использования модели необходимо подобрать коэффициенты аппроксимации под измерения конкретного транзистора.

**Интеграция модели в Qucs.** Чтобы использовать разработанную модель необходимо реализовать ее в программе Qucs. Для этого можно использовать несколько подходов, в данной работе был выбран файл на языке Verilog-A, поскольку он более функционален и широко используется в практике для разных САПР.

Для начала разработанная модель должна быть записана на языке описание электрических схем Verilog-A. Загрузка файла в программу Qucs выполняется следующим образом: 1) файл добавляется в текущий проект; 2) для файла готовится файл условного обозначения; 3) модель компилируется средствами Qucs; 4) скомпилированный файл загружается в Qucs через меню. Для корректной работы требуется полная установка компилятора, программ Qucs и ADMS в соответствии с инструкциями указанных программ.

**Эксперимент по построению модели.** Для получения исходных данных были смоделированы ВАХ 0,8 мкм КМОП-транзистора с общей шириной затвора 10 мкм на основе данных из [8].

Затем были изучено влияние разных коэффициентов аппроксимации на форму ВАХ. Показано преимущественное влияние  $w_0$  — на максимальной

значение тока,  $w_1$  и  $w_2$  — на крутизну (прирост тока между двумя ветвями для разных  $V_{зи}$ ),  $w_3$  — на наклон линейного участка. Таким образом, методика построения модели проводилась следующим образом: 1) действительные результаты и результаты построения модели нормировались; 2) подбором  $w_3$  достигался требуемый наклон ВАХ; 3) подбором  $w_1$  и  $w_2$  достигался требуемый вид ВАХ; 4) убиралась нормировка и подбирался параметр  $w_0$ . Далее применялись методы оптимизации для достижения большей точности. Для оценки точности модели использовалась формула:

$$E_I = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^N (I_{СИ(k)}^D - I_{СИ(k)}^M)^2}{\sum_{k=1}^N (I_{СИ(k)}^D)^2}} \quad (1)$$

где  $I_{СИ}^D$  - действительное значение тока,  $I_{СИ}^M$  - значение тока, рассчитанное по модели в каждой точке ВАХ, в  $N$  - число точек на ВАХ.

Целью оптимизации была минимизация выражения (1). Найденные значения были подставлены в код модели и интегрированы в Qucs. Сравнение исходных данных и построенной модели представлено на рис. 1. Ошибка моделирования, рассчитанная по (1) составила 0.0817.

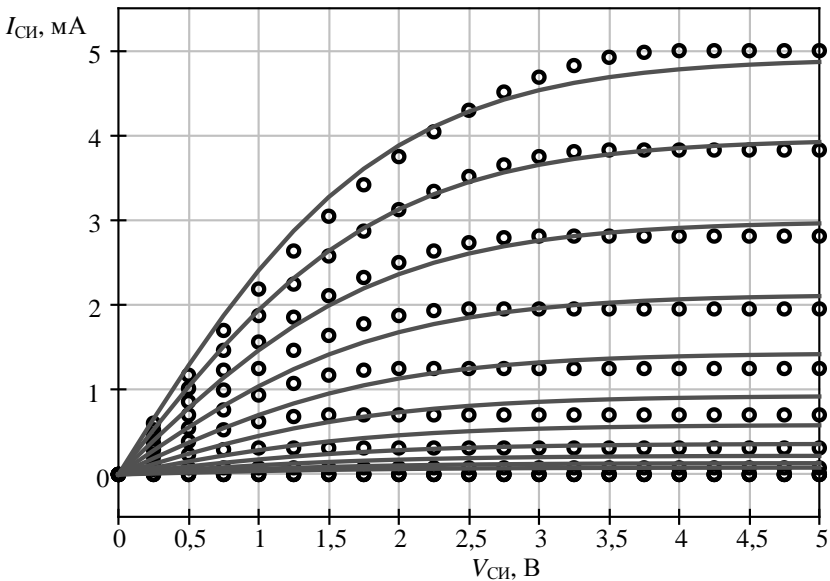


Рис. 1. ВАХ транзистора и построенной модели

Полученные данные показывают недостаточную точность построенной модели. Для повышения точности необходимо усложнять модель.

**Заключение.** В представленной работе пройден полный цикл разработки новой поведенческой модели транзистора от получения исходных данных до внедрения модели в программу моделирования Qucs. Данный цикл отличает простотой и может быть использован в учебном процессе для обучения навыку моделированию электронных устройств в современных САПР, поскольку общие принципы этой деятельности в Qucs совпадают с тем, как это реализовано в коммерческих САПР. В то же время модель показала недостаточную точность. В ходе дальнейших исследований будет проведено усложнение и уточнение поведенческой модели, в том числе с применением ИНС. Для реализации подобных моделей также потребует автоматизация подготовка исходного кода на языке Verilog-A.

### Список литературы

1. Официальный сайт проекта Qucs [Электронный ресурс] – URL: <http://qucs.sourceforge.net/> (дата обращения 09.10.2020).
2. An artificial neural network based nonlinear behavioral model for RF power transistors / J. Cai [et al.] // 2017 Asia Pacific Microwave Conference (APMC). – IEEE, 2017. – С. 600-603.
3. Support vector regression-based behavioral modeling technique for RF power transistors / J. Cai [et al.] // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. – 2018. – Т. 28. – №. 5. – С. 428-430.
4. Cai J. A new nonlinear behavioral modeling technique for RF power transistors based on Bayesian inference / J. Cai, J. King, J. C. Pedro // 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). – IEEE, 2017. – С. 624-626.
5. A new design flow based on behavioral modeling applied to wideband and highly efficient power amplifiers with GaN packaged transistors / W. Dementroux [et al.] // 41st European Microwave Conference. – IEEE, 2011. – С. 147-150.
6. Lakrim A. The DC behavioural electrothermal model of silicon carbide power MOSFETs under SPICE / A. Lakrim, D. Tahri // 2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2015. – С. 2818-2823.
7. 4-terminal Angelov model for SOI CMOS MESFETs / S. J. Wilk [et al.] // 2015 IEEE Radio Frequency Integrated Circuits Symposium (RFIC). – IEEE, 2015. – С. 359-362.
8. Allen P. E. CMOS Analog Circuit Design / P. E. Allen, D. R. Holberg. – Oxford University Press, 2012. – 783 с.

*Материал поступил в редколлегию 12.10.20.*