

Пилипенко Александр Михайлович, Портных Дмитрий Александрович
**ПРИНЦИПЫ ШАБЛОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ
РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ**

В работе представлены принципы создания точных моделей элементов радиотехнических цепей на основе известных физических моделей (шаблонов). Целью работы является повышение точности моделирования элементов радиотехнических цепей при сохранении физических параметров моделей. Решены задачи идентификации параметров и оценки точности известной и шаблонной моделей р-п-перехода. Доказана эффективность применения шаблонного моделирования для аппроксимации вольт-амперной характеристики р-п-перехода.

Моделирование, шаблон, точность, физические параметры, элементы радиотехнических цепей.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich, Portnykh Dmitry Aleksandrovich
**PRINCIPLES OF TEMPLATE MODELING OF RADIO CIRCUITS
ELEMENTS**

The paper presents the principles of creating accurate models of radio circuits elements on the base of known physical models (templates). The goal of the work is to increase the accuracy of modeling radio circuit elements when the physical parameters of the models are retained. The problems of parametric identification and accuracy assessment of known and template models of p-n junctions have been solved. The effectiveness of using template modeling to approximate the current-voltage characteristics of a p-n junction has been proved.

Modeling, template, accuracy, physical parameters, radio circuits elements.

Введение

Проектирование радиотехнических устройств обязательно включает в себя этап схмотехнического моделирования – компьютерного моделирования радиотехнической цепи, описывающей проектируемое устройство. В настоящее время пакеты схмотехнического моделирования являются неотъемлемой частью большинства систем автоматизированного проектирования (САПР) радиотехнических устройств. Среди пакетов схмотехнического моделирования можно выделить следующие программы, которые

достаточно популярны России: Multisim, Pspice, LTspice, TINA-TI и Micro-Cap. Все пакеты схемотехнического моделирования базируются на программе с открытым исходным кодом SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis) и поэтому также называются SPICE-симуляторами [1].

Система моделирования фактически заменяет физический эксперимент имитационным экспериментом, который выполняется на компьютере, при этом вместо реальных компонентов используются их программные модели [2]. Таким образом, при решении задач проектирования радиотехнических устройств практически невозможно обойтись без математических моделей их элементов.

1. Постановка задачи

В настоящее время отсутствуют универсальные модели элементов радиотехнических цепей, обеспечивающие приемлемую точность моделирования для различных температур и технологий производства.

Целью данной работы является обоснование принципов шаблонного моделирования, позволяющих обеспечить повышение точности моделей элементов радиотехнических цепей при сохранении их физических параметров.

В соответствии с поставленной целью в работе решаются следующие задачи:

- описание принципов создания моделей элементов радиотехнических цепей с помощью физических шаблонов;
- идентификация параметров известной и шаблонной моделей р-п-перехода;
- доказательство эффективности применения шаблонного моделирования для аппроксимации вольт-амперной характеристики (ВАХ) р-п-перехода.

2. Синтез шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей

Основные принципы создания шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей заключаются в следующем:

- шаблонная модель создается на основе известной физической модели элемента;
- один или несколько параметров исходной физической модели заменяются функциями управляющего напряжения или тока;

- для замены параметров физической модели применяется аппроксимация Паде (отношение степенных рядов):

$$P(x) = P_0 \frac{1 + b_1 x + b_2 x^2 + \dots + b_n x^n}{1 + a_1 x + a_2 x^2 + \dots + a_m x^m}, \quad (1)$$

где P_0 – измеренный параметр физической модели; x – управляющее напряжение или ток; a_1, a_2, \dots, a_m и b_1, b_2, \dots, b_n – эмпирические коэффициенты; m и n – целые числа.

Применение отношения степенных рядов для моделирования позволяет обеспечить монотонность ВАХ в отличие от разложения в степенной ряд, при использовании которого возможно нарушение монотонности [3].

3. Разработка шаблонной модели p - n -перехода

SPICE-модель, описывающая ВАХ p - n -перехода с учетом его последовательного сопротивления, имеет следующий вид [4]:

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{V - IR_S}{N\phi_T}\right) - 1 \right], \quad (2)$$

где I и V – ток и напряжение p - n -перехода соответственно; R_S – последовательное сопротивление; I_S – ток насыщения; N – коэффициент эмиссии; $\phi_T = kT/q$ – термический потенциал; $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; $q \approx 1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл – заряд электрона; T – абсолютная температура.

Параметры модели (2) N , I_S и R_S являются физическими параметрами p - n -перехода, поэтому данную модель можно использовать в качестве исходной физической модели (шаблона) для разработки более точных шаблонных моделей p - n -перехода.

Как известно, сопротивление R_S в общем случае нелинейно зависит от тока p - n -перехода [5], поэтому для создания шаблонной модели данный параметр предлагается заменить функцией Паде, которая в простейшем случае имеет следующий вид [6]:

$$R_S(I) = \frac{R_{S0}}{1 + a_1 I}. \quad (3)$$

Важным этапом моделирования элементов радиотехнических цепей является параметрическая идентификация модели – определение параметров модели, обеспечивающих наилучшее совпадение экспериментальной характеристики элемента с моделью. В основе математического аппарата параметрической идентификации моделей лежат методы одномерной и многомерной оптимизации.

Параметры моделей p - n перехода определяются методом наименьших квадратов из условия минимума целевой функции в качестве которой, как правило, используется сумма квадратов относительных погрешностей аппроксимации экспериментальной ВАХ. Для решения задачи поиска минимума целевой функции рекомендуется использовать алгоритм Левенберга-Марквардта с контролем точности при изменении начальных условий [6]. Точность моделирования оценивается с помощью среднеквадратической и максимальной относительных погрешностей аппроксимации ВАХ σ и δ_{\max} .

На рис. 1 показаны измеренная ВАХ диода FR102, представленная в работе [7], и результаты аппроксимации данной ВАХ с помощью физической SPICE-модели (2) и шаблонной модели (2)&(3), полученной из модели (2) путем замены параметра R_S выражением (3). Результаты параметрической идентификации и погрешности моделей представлены ниже.

SPICE-модель:

$$N=1,528; I_S=19,35 \text{ пА}; R_S=120,5 \text{ Ом}; \sigma=20,6 \%; \delta_{\max}=40,2 \%$$

Шаблонная модель:

$$N=1,279; I_S=2,485 \text{ пА}; R_S=578,5 \text{ Ом}; a_1=2,89 \text{ мА}^{-1}; \sigma=6,2 \%; \delta_{\max}=9,7 \%$$

Как показывают полученные выше результаты, применение шаблонной модели позволяет обеспечить уменьшение максимальной и среднеквадратической погрешностей моделирования p - n -перехода примерно в 3 – 4 раза по сравнению с исходной физической моделью, при этом число параметров исходной модели равно трем, а шаблонной модели – четырем.

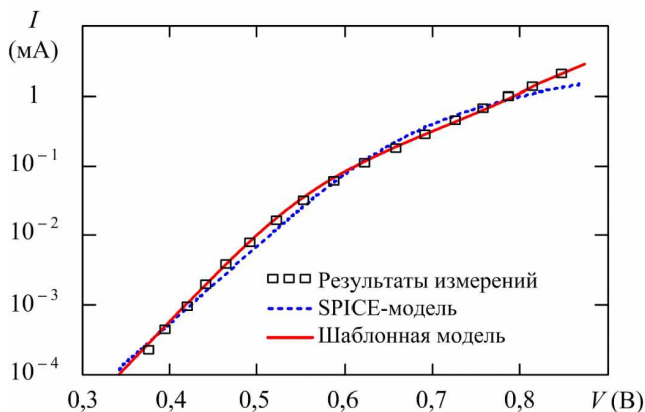


Рис. 1. Измеренная ВАХ диода FR102 и результаты моделирования

Выводы

В данной работе представлены основные принципы создания шаблонных моделей элементов радиотехнических цепей. Данные принципы планируется использовать для разработки точных моделей различных видов диодов и транзисторов, включая перспективные элементы, созданные по новым технологиям.

Следует отметить, что дополнительное повышение точности шаблонной модели можно обеспечить с помощью повышения порядка полиномов числителя и знаменателя функции (3), а также путем замены всех параметров исходной физической модели выражениями вида (1), однако, при этом число параметров шаблонной модели существенно увеличится и возрастет сложность их параметрической идентификации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Низиненко А. М.* Методы математического и компьютерного моделирования элементов и устройств инфокоммуникационных систем : учебное пособие : Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону : Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2023. – 138 с.
2. *Щебет В. В.* Алгоритмы идентификации параметров моделей двухполюсных элементов радиотехнических цепей: диссертация ... кандидата технических наук : 05.12.04. – Таганрог, 2003. – 200 с.
3. *McAndrew C. C.* Practical modeling for circuit simulation // IEEE Journal of Solid-State Circuits, vol. 33, no. 3, pp. 439–448, 1998, doi: 10.1109/4.661209.

4. *Khalis M., Masrouf R., Mir Y., Zazoui M.* Two methods for extracting the parameters of a nonideal diode // *International Journal of Physical Sciences*, vol. 10(8), pp. 270-275, 2015, doi: 10.5897/IJPS2015.4260.
5. *Li S. S.* *Semiconductor Physical Electronics*, 2nd ed. – Springer, 2006.
6. *Pilipenko A. M., Biryukov V. N., Serebryakov A. I.* A Technique for Semiconductor Devices Modeling Using Physical Templates // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2019, pp. 1-4, doi: 10.1109/EWDTS.2019.8884443.
7. *Biryukov V. N., Pilipenko A.M.* Diagnostics of the Nonlinear Static Models of a Diode // *Journal of Communications Technology and Electronics*, vol. 54, no. 5, pp. 577–582, 2009, doi: 10.1134/S1064226909050118.

Пилипенко Александр Михайлович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfcdu.ru.

Портных Дмитрий Александрович, аспирант кафедры теоретических основ радиотехники, Южный федеральный университет, Россия, г. Таганрог, пер. Некрасовский 44, 347922, телефон: +7(8634)37-16-32, e-mail: portnyh@sfcdu.ru.

Pilipenko Alexandr Mikhaylovich, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Head of the department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: ampilipenko@sfcdu.ru.

Portnykh Dmitry Aleksandrovich, student gr. RTm01-21, Department of Fundamentals of Radio Engineering, Southern Federal University, Russia, Taganrog, 44 Nekrasovskiy lane, 347922, phone: +7(8634)37-16-32, e-mail: portnyh@sfcdu.ru.