**УДК 621.3:004.032.26**

**ДВУХЭТАПНЫЙ МЕТОД ПОСТРОЕНИЯ КОМПАКТНЫХ МОДЕЛЕЙ ЭЛЕМЕНТОВ RERAM**

*Морозов Александр Юрьевич, д.ф.-м.н., научный сотрудник1,*

[*morozov@infway.ru*](mailto:morozov@infway.ru)

*Абгарян Каринэ Карленовна, д.ф.-м.н., главный научный сотрудник, руководитель отдела1,* [*kristal83@mail.ru*](mailto:kristal83@mail.ru)

*Ревизников Дмитрий Леонидович, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник1,* [*reviznikov@mai.ru*](mailto:reviznikov@mai.ru)

*1ФИЦ ИУ РАН, г.Москва*

Аннотация. Математические модели мемристоров, как правило, задаются в виде динамических систем относительно параметра состояния элемента, характеризующего проводимость. При этом зависимость тока (или сопротивления) от параметра состояния и приложенного к элементу напряжения может быть довольно сложной. Существующие модели зачастую не в полной мере воспроизводят экспериментальные данные. В связи с этим в работе предлагается двухэтапный метод, заключающийся в использовании классических моделей на первом этапе и нейронных сетей для аппроксимации зависимости тока от параметра состояния и напряжения на втором этапе.

Ключевые слова: компактная модель, RERAM, мемристор, аппроксимация, ВАХ, оксид гафния, HfO2.

**Введение**

Большинство известных компактных моделей элементов RERAM сформулированы в виде динамической системы относительно параметра состояния мемристора . Параметр состояния мемристора — это величина, которая соответствует положению границы, разделяющей области с низкой и высокой концентрацией вакансий кислорода, толщине проводящего слоя, или толщине непроводящего барьера, в котором возникает туннельный ток электронов. В самом простом и наиболее распространенном варианте сопротивление мемристора задается в виде выпуклой линейной комбинации двух крайних его значений (высокоомного —  и низкоомного — ) с весовыми коэффициентами, определяемыми параметром состояния , а ток — через закон Ома: .

Зачастую существующие модели не в полной мере воспроизводят экспериментальные данные. Ранее авторами работы было предложено использовать интервальный аппарат для улучшения данной ситуации [1-2]. В настоящей работе предлагается подход, заключающийся в использовании нейронных сетей для аппроксимации зависимости тока  от параметра состояния  и напряжения  [3]. В результате получается компактная модель, в которой параметр состояния определяется с помощью динамической системы, учитывающей основные физические особенности элементов, а уже тонкая подстройка модели под экспериментальные данные осуществляется на уровне нейронной сети.

**Построение компактных моделей мемристоров**

Построение компактной модели осуществляется в два этапа. Пусть экспериментальные данные представлены в виде таблицы , , где  — количество экспериментальных точек. На первом этапе выполняется моделирование динамической системы по , и определяются . Отметим, что динамическая система может зависеть от ряда параметров, значения которых задаются в соответствии с доступной информацией относительно экспериментального образца. Важной особенностью представленного подхода является то, что динамическая система может быть любой. На втором этапе с экспериментальными данными сопоставляется :  и решается задача построения функции  аппроксимирующей . Любую непрерывную функцию действительных переменных можно аппроксимировать с любой точностью искусственной нейронной сетью прямого распространения с одним скрытым слоем и непрерывными сигмоидными функциями активации. Поэтому вид  выбирается следующим:

 (1)

где , , , , ,  — весовые коэффициенты.

**Результаты**

Выполняется построение нейросетевой модели мемристора, на основе оксида гафния. На рис. 1а показана зависимость напряжения от времени, а на рис. 1б — серым цветом экспериментальная вольтамперная характеристика (ВАХ) в соответствии с работой [4]. В качестве основной модели использовалась модель, предложенная в [4]:

 (2)

где  В — пороговое значение напряжения активации;  — константа;  — нечетное целое число;  — функция получения целочисленного результата; ,  — подгоночные коэффициенты, .

По (2) был получен набор значений  и далее выполнено обучение нейронной сети (1) с помощью библиотеки TensorFlow до достижения сетью определенной точности аппроксимации. В скрытом слое нейронной сети находится порядка сотни нейронов ( в (1)). На рис. 1б — черным цветом показана модельная ВАХ. Небольшое несоответствие наблюдается только в левом «хвосте».

|  |  |
| --- | --- |
| C:\Users\sasha\Desktop\Алгоритм\Алгоритм\PSS 2022\01 - копия.png  (а) | hfo2_mod  (б) |
| Рис 1. Сравнение модельной ВАХ с экспериментальной ВАХ (б) при определенной форме входного напряжения (а). | |

**Заключение**

Представлен метод построения компактных моделей элементов RERAM, согласно которому параметр состояния определяется с помощью динамической системы, учитывающей основные физические особенности элементов, а тонкая подстройка модели под экспериментальные данные осуществляется на уровне нейронной сети. Предложенный подход применен к мемристору на основе оксида гафния (HfO2). Расчетная ВАХ соответствует экспериментальной, что демонстрирует универсальность и эффективность предложенного подхода.

*Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 23-91-01012)*

**Список использованных источников**

1. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Interval Model of a Memristor Crossbar Network // Physica status solidi (b), 2022, Vol. 269, No. 11, 2200150. DOI: 10.1002/pssb.202200150
2. Morozov A. Yu., Abgaryan K. K., Reviznikov D. L. Simulation Modeling of an Analog Impulse Neural Network Based on a Memristor Crossbar Using Parallel Computing Technologies // Russian Microelectronics, 2023, Vol. 52, No. 8, pp. 1–7. DOI:10.1134/S1063739723080024
3. Abgaryan K. K., Morozov A. Yu., Reviznikov D. L. Hybrid Approach for Modeling Memristive Elements // Physica status solidi (b). 2024. DOI: 10.1002/pssb.202400058.
4. Mladenov V. Analysis of Memory Matrices with HfO2 Memristors in a PSpice Environment // Electronics, 8(4), 383, March 2019, p. 16. DOI: 10.3390/electronics8040383.

**TWO-STEP METHOD FOR CONSTRUCTING COMPACT MODELS OF RERAM ELEMENTS**

A.Yu. Morozov, K.K. Abgaryan, D.L. Reviznikov

[*morozov@infway.ru*](mailto:morozov@infway.ru)

Federal Research Centre "Computer Science and Control"(FRCCSC), of the Russian Academy of Sciences, (FRC CSC RAS). Vavilov st. 44, 119333 Moscow, Russia

**Annotation.** Mathematical models of memristors are usually specified as dynamic systems relative to the state parameter of the element characterizing conductivity. In this case, the dependence of the current (or resistance) on the state parameter and the voltage applied to the element can be quite complex. Existing models often do not fully reproduce experimental data. In this regard, the paper proposes a two-stage method consisting of using classical models at the first stage and neural networks to approximate the dependence of the current on the state parameter and voltage at the second stage.

**Keywords:** compact model, RERAM, memristor, approximation, I-V characteristics, hafnium oxide, HfO2.