

УДК 621.315.671.5

Поиск начального приближения для задачи экстракции параметров модели мемристора с помощью методов машинного обучения

© 2021 г. Е. С. Шамин^{1,2,✉}, Д. А. Жевненко^{1,2}, Ф. П. Мещанинов^{1,2},
В. С. Кожевников^{1,2}, Е. С. Горнев^{1,2}

¹ *Московский физико–технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия*

² *АО «НИИ молекулярной электроники»,
ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия*

✉ Автор для переписки: eshamin@niime.ru

Аннотация. В работе рассмотрено решение задачи экстракции параметров модели мемристора из экспериментально полученных вольт–амперных характеристик. Ставится проблема поиска начального приближения для данной задачи на основе анализа внешнего вида вольт–амперных характеристик средствами машинного обучения.

Ключевые слова: модель мемристора, вольтамперная характеристика, машинное обучение

Для цитирования: Шамин Е.С., Жевненко Д.А., Мещанинов Ф.П., Кожевников В.С., Горнев Е.С. Поиск начального приближения для задачи экстракции параметров модели мемристора с помощью методов машинного обучения. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(2): 97—101. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-97-101>

Determination of the initial guess for the problem of memristor model parameters extraction using machine learning algorithms

E. S. Shamin^{1,2,✉}, D. A. Zhevnenko^{1,2}, F. P. Meshchaninov^{1,2},
V. S. Kozhevnikov^{1,2}, E. S. Gornev^{1,2}

¹ *Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University),
9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia*

² *Molecular Electronics Research Institute, JSC,
6–1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia*

✉ Corresponding author: eshamin@niime.ru

Abstract. The focus of this work is on the algorithm of extraction of parameters of the memristor model from the experimentally obtained current–voltage characteristics. The problem of finding the initial guess for this algorithm based on current–voltage characteristic features is stated and solved by means of machine learning algorithms.

Keywords: memristor model, current–voltage characteristic, machine learning

For citation: Shamin E.S., Zhevnenko D.A., Meshchaninov F.P., Kozhevnikov V.S., Gornev E.S. Determination of the initial guess for the problem of memristor model parameters extraction using machine learning algorithms. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoi tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(2): 97–101. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-2-97-101>

Введение

Мемристор — микроэлектронное устройство, в основе работы которого лежит обратимое изменение своего сопротивления в зависимости от протекшего через него заряда и сохранение этого сопротивления после отключения питания. Первый образец мемристора был получен в 2008 г. [1], однако задача построения его точной физической модели все еще не решена [2]. Основное распространение получили компактные модели [3], которые применяются для множества прикладных задач, включая построение схемотехнических моделей на основе мемристоров. Использование компактных моделей для анализа реальных устройств предваряется экстракцией их ключевых параметров из эксперимента. Для экстракции применяются различные методы [4–6], самым распространенным из которых является аппроксимация вольт–амперной характеристики (ВАХ) мемристора при помощи различных методов оптимизации.

Количество итераций, необходимых для аппроксимации даже одной ВАХ может исчисляться десятками тысяч. Это может занимать значительное время, ведь для каждого определения целевой

функции необходимо полностью пересчитывать модельную ВАХ. В случае, когда необходимо определить параметры модели для десятков тысяч ВАХ (например, для анализа серии переключений), это не является приемлемым. На данный момент разработка методов быстрой оптимизации серии переключений является открытой задачей.

Описание подхода к решению проблемы

В данной работе предлагается решение, представляющее собой комбинацию различных методов. В основе этих методов лежит применение машинного обучения, а именно алгоритмов случайного леса (*Random Forest*), для определения начального приближения аппроксимации по признакам обрабатываемых ВАХ.

Ввиду того, что, обычно, экстракция параметров мемристора подразумевает достаточно хорошее совпадение модельных и эмпирических ВАХ — составление обучающей выборки, в рамках данного решения, завязано на рандомизации параметров модели мемристора, используемой далее для задачи экстракции параметров. В случае данной работы в качестве модели мемристора использовалась модифицированная версия модели Yаkopcic, имеющая

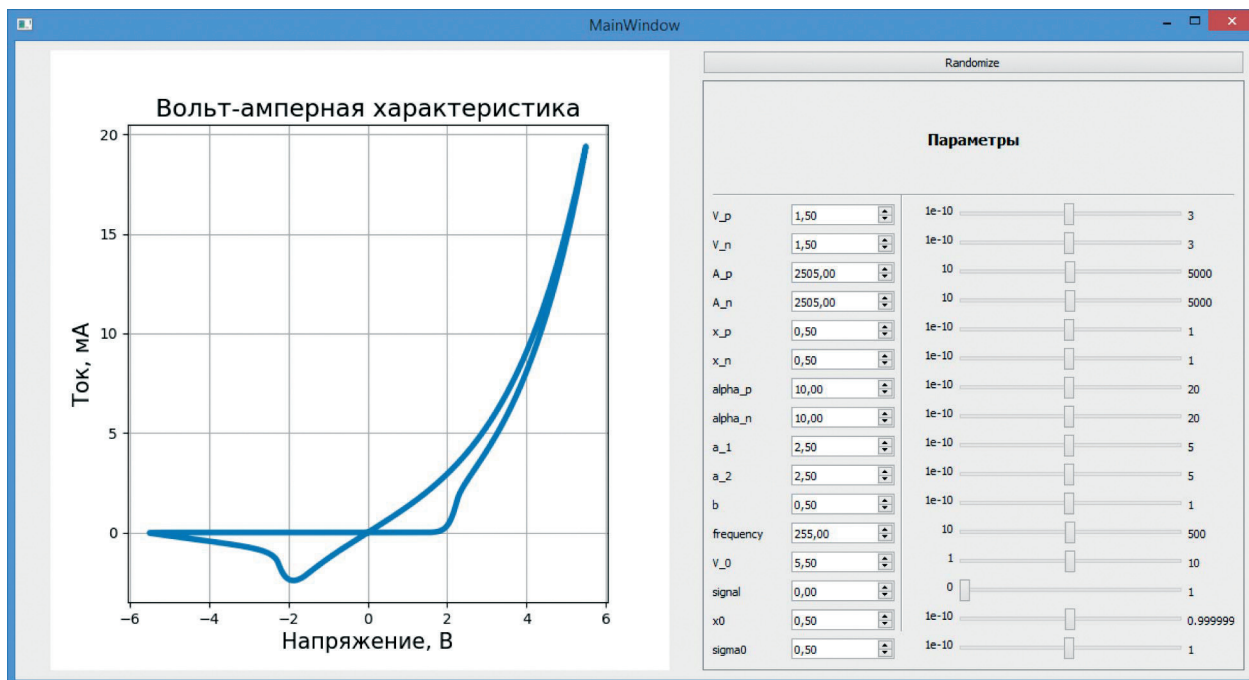


Рис. 1. Утилита, позволяющая в реальном времени варьировать параметры модели мемристора и следить за изменениями вида ВАХ

Fig. 1. Utility that allows you to vary the parameters of the memristor model in real time and monitor changes in the I–V curves

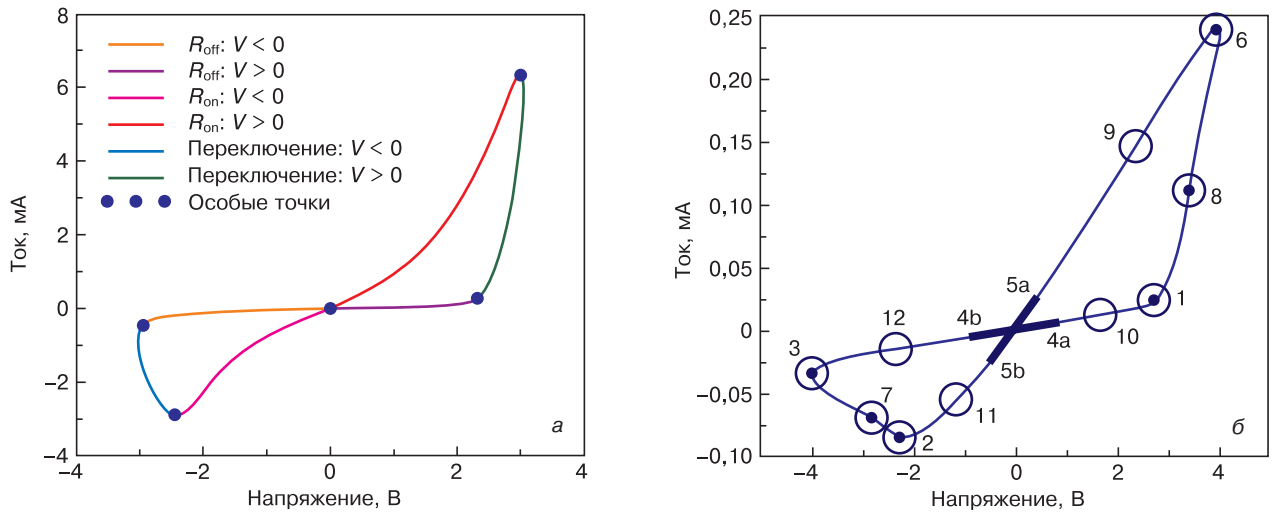


Рис. 2. Особые точки модельной ВАХ (а) и схематическое изображение рассчитываемых признаков ВАХ (б). Жирные точки — координаты, жирные линии — первые производные, круги — вторые производные

Fig. 2. Singular points of the model I–V curve (a) and a schematic representation of the calculated features of the I–V curve (б). Bold dots are coordinates, thick lines are first derivatives, circles are second derivatives

13 настраиваемых параметров (не включая параметры управляющего сигнала).

Для анализа зависимостей между признаками ВАХ и параметрами модели было реализовано программное средство, позволяющее в реальном времени варьировать параметры модели мемристора и следить за изменениями вида ВАХ (рис. 1). С помощью него было определено более 40 признаков ВАХ, среди которых координаты различных точек, расстояния, первые и вторые производные, а также площади.

Определение численных значений признаков ВАХ начинается с выделения особых точек (рис. 2) по следующему алгоритму:

- выделение крайних точек по току (самой верхней и самой нижней) в предположении, что переключение состояния мемристора заканчивается именно в них;
- разбиение ВАХ на 4 ветви — R_{off} + переключение и R_{on} для положительных и отрицательных напряжений;
- нахождение точек переключения на ветвях R_{off} + переключение — выделение точки с максимальным расстоянием на ветви R_{off} + переключение от ветви R_{on} ;
- разбиение ВАХ на 6 ветвей (R_{on} , R_{off} и переключение).

Далее для каждой из ветвей проводится расчет числовых признаков ВАХ. На рис. 2, а показан результат работы алгоритма по выделению особых точек на примере модельной ВАХ мемристора. Также на рис. 2, б можно видеть схематичное изображение рассчитываемых признаков ВАХ.

Для получения начального приближения для каждого параметра модели мемристора проводился регрессионный анализ, по вычисленным признакам ВАХ с помощью алгоритмов случайного леса.

График точности случайного леса для параметра b используемой модели мемристора можно видеть на рис. 3.

Для каждой построенной модели проводился выбор глубины деревьев леса, а также их количества на сетке с помощью кросс-валидации. По графикам, представленным для модели для параметра b можно видеть, что после определенной глубины деревьев и их количества точность алгоритма перестает принципиально увеличиваться. Алгоритм с параметрами в соответствующей точке будет оптимальным в смысле вычислительной сложности и точности (рис. 4).

Обученные модели случайного леса использовались для анализа серии переключений мемристора, состоящей из 300 контуров. На рис. 5 можно видеть

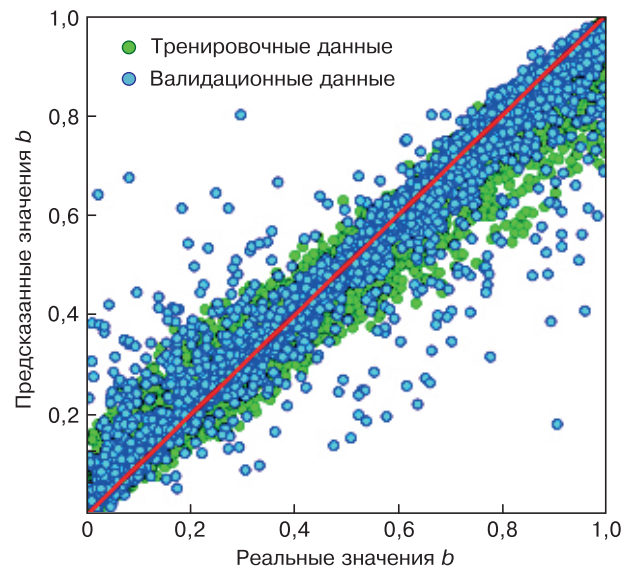


Рис. 3. График точности предсказания параметра b модели Yakopcic

Fig. 3. Prediction accuracy plot of parameter b of the Yakopcic model

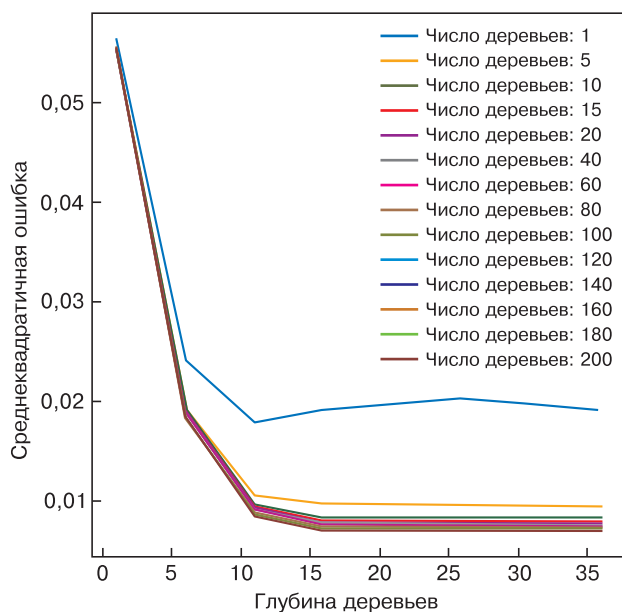


Рис. 4. Графики подбора параметров случайного леса для модели предсказания параметра b модели Yakopcic

Fig. 4. Random forest parameter fitting plots for the parameter b prediction model of the Yakopcic model

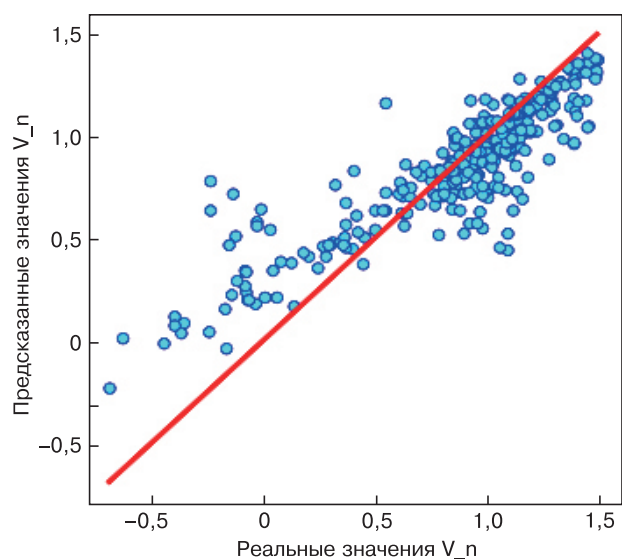


Рис. 5. Графики точности определения параметра V_n с помощью построенных алгоритмов предсказания

Fig. 5. Graphs of the accuracy of determining the parameter V_n using the constructed prediction algorithms

точность определения параметра V_n с помощью использования построенных моделей, относительно определения параметра V_n с помощью средств

аппроксимации. Полученные результаты подходят на роль начального приближения для задачи аппроксимации.

Библиографический список

1. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found. *Nature*. 2008; 453(7191): 80—83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
2. Pershin Yu.V., Di Ventra M. On the validity of memristor modeling in the neural network literature. *Neural Networks*. 2020; 121: 52—56. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.08.026>
3. Кожевников В.С., Горнев Е.С., Мещанинов Ф.П., Жевненко Д.А. Анализ методов математического моделирования мемристоров. *Международный форум «Микроэлектроника–2019». 5-я Международная научная конференция «Электронная компонентная база и микроэлектронные модули»: Сб. тезисов*. Алушта, 30 сентября — 5 октябрь 2019 года. М.: Техносфера; 2019. С. 556—568. <https://elibrary.ru/pnbmnh>
4. Chawa A.M.M., Picos P. A simple quasi-static compact model of bipolar ReRAM memristive devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2020; 67(2): 390—394. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2915825>
5. Garcia A.A., Reyes L.O. Analysis and parameter extraction of memristive structures based on Strukov's non-linear model. *Journal of Semiconductors*. 2018; 39(12): 124009. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/12/124009>
6. Yakopcic C., Taha T., Subramanyam G., Pino R., Rogers S. A memristor device model. *IEEE Electron Device Letters*. 2011; 32(10): 1436—1438. <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2163292>

References

1. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found. *Nature*. 2008; 453(7191): 80—83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
2. Pershin Yu.V., Di Ventra M. On the validity of memristor modeling in the neural network literature. *Neural Networks*. 2020; 121: 52—56. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2019.08.026>
3. Kozhevnikov V.S., Gornev E.S., Meshchaninov F.P., Zhevnenko D.A. Analysis of methods of mathematical modeling of memristors. *International forum "Microelectronics-2019". 5th International Scientific Conference "Electronic Component Base and Microelectronic Modules": Collection of abstracts*. Alushta, September 30 — October 5, 2019. Moscow: Technosfera; 2019. P. 556—568. (In Russ.). <https://elibrary.ru/pnbmnh>
4. Chawa A.M.M., Picos P. A simple quasi-static compact model of bipolar ReRAM memristive devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2020; 67(2): 390—394. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2915825>
5. Garcia A.A., Reyes L.O. Analysis and parameter extraction of memristive structures based on Strukov's non-linear model. *Journal of Semiconductors*. 2018; 39(12): 124009. <https://doi.org/10.1088/1674-4926/39/12/124009>
6. Yakopcic C., Taha T., Subramanyam G., Pino R., Rogers S. A memristor device model. *IEEE Electron Device Letters*. 2011; 32(10): 1436—1438. <https://doi.org/10.1109/LED.2011.2163292>

Информация об авторах / Information about the authors

Шамин Евгений Сергеевич — научный сотрудник, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; аспирант, АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0470-350X>; e-mail: eshamin@niime.ru

Evgeniy S. Shamin — Researcher, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Postgraduate Student, Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6-1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0470-350X>; e-mail: eshamin@niime.ru

Жевненко Дмитрий Алексеевич — Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; e-mail: DmitryZhev@yandex.ru

Мещанинов Федор Павлович — Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; e-mail: fmeshaninov@yandex.ru

Кожевников Владислав Сергеевич — Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; e-mail: vladislavkozhevnikov@gmail.com

Горнев Евгений Сергеевич — чл.-корр. РАН, доктор техн. наук, профессор, Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), Институтский пер., д. 9, Долгопрудный, Московская обл., 141707, Россия; зам. руководителя приоритетного технологического направления — начальник управления РПТН, АО «НИИ молекулярной электроники», ул. Акад. Валиева, д. 6, стр. 1, Москва, Зеленоград, 124460, Россия; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1706-4142>; e-mail: egornev@niime.ru

Dmitriy A. Zhevnenko — Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6-1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; e-mail: DmitryZhev@yandex.ru

Fedor P. Meshchaninov — Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6-1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; e-mail: fmeshaninov@yandex.ru

Vladislav S. Kozhevnikov — Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6-1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; e-mail: vladislavkozhevnikov@gmail.com

Evgeniy S. Gornev — Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Moscow Institute of Physics and Technology (National Research University), 9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, Moscow Region, 141701, Russia; Deputy Head of Priority Technology Direction — Head of Department, Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6-1 Acad. Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1706-4142>; e-mail: egornev@niime.ru

Статья подготовлена по материалам доклада, представленного на II-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 19–21 октября 2020 г.