

УДК 621.3.049.771.12

Анализ и сравнение различных подходов к экстракции параметров модели мемристора

© 2021 г. Е. С. Шамин^{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 проведен анализ различных подходов к задаче экстракции параметров эмпирической модели мемристора. Приводится описание особенностей процесса экстракции для модели модификации подвижности мемристора, а также предлагается оригинальный вариант алгоритма экстракции, основанный на оптимизационном алгоритме Нелдера—Мида с целевой функцией, основанной на расчете признаков исследуемой вольтамперной характеристики. Проводится сравнение предложенного алгоритма с двумя другими — с целевой функцией, основанной на симметрической разности площадей модельной и экспериментально полученной вольтамперных характеристик и с целевой функцией, основанной на MSE между точками рассматриваемых вольтамперных характеристик. Сравнение проводится по критерию фиксированного бюджета с помощью специализированного программного средства. Предложенный алгоритм экстракции не уступает двум другим в точности, при этом предлагая возможность тонкой настройки.

Ключевые слова: мемристор, экстракция, оптимизация, модель мемристора

Благодарности: Авторы работы благодарят Д.А. Жевненко, Ф.П. Мещанинова и В.С. Кожевникова за неоценимый вклад в подготовке статьи.

Для цитирования: Шамин Е.С., Горнев Е.С. Анализ и сравнение различных подходов к экстракции параметров модели мемристора. *Известия вузов. Материалы электрон. техники.* 2021; 24(4): 248—254. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-248-254>

Краткое сообщение подготовлено по материалам доклада, представленного на III-й международной конференции «Математическое моделирование в материаловедении электронных компонентов», Москва, 25–27 октября 2021 г.

© 2021 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Analysis and comparison of different approaches to the extraction of parameters of the memristor model

E. S. Shamin^{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 Academician Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia*

✉ Corresponding author: eshamin@niime.ru

Abstract. The paper analyzes various approaches to the problem of extracting the parameters of an empirical memristor model. A description of the features of the extraction process for the memristor mobility modification model is given, and an original version of the extraction algorithm is proposed, based on the Nelder–Mead optimization algorithm with an objective function based on the calculation of features of the studied current–voltage characteristic. The proposed algorithm is compared with two others — with an objective function based on the symmetric difference between the areas of the model and experimentally obtained current–voltage characteristics and with an objective function based on the MSE between the points of the considered current–voltage characteristics. The comparison is carried out according to the criterion of a fixed budget using a specialized software tool. The proposed extraction algorithm is not inferior to the other two in accuracy, while offering the possibility of fine tuning.

Keywords: memristor, extraction, optimization, memristor model

Acknowledgments: The authors are grateful to D.A. Zhevnenko, F.P. Meshchaninov and V.S. Kozhevnikov for his invaluable contribution to the preparation of the article.

For citation: Shamin E.S., Gornev E.S. Analysis and comparison of different approaches to the extraction of parameters of the memristor model. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki = Materials of Electronics Engineering*. 2021; 24(4): 248–254. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2021-4-248-254>

Введение

Мемристор — сравнительно новое микроэлектронное устройство. Первая успешная реализация мемристора датируется 2008–м годом [1] и задача построения его полной физически обоснованной модели до сих пор не решена [2]. В связи с этим большинство существующих на данный момент моделей мемристоров являются эмпирическими. Один из основных вопросов, возникающих при работе с эмпирическими моделями мемристора является вопрос экстракции модельных параметров из эксперимента. Для экстракции применяются различные методы описанные в работах [3, 4], однако чаще всего эта операция проводится посредством применения алгоритмов оптимизации, или, иначе, с помощью аппроксимации экспериментального контура моделью. Такая операция в зависимости от сложности выбранного алгоритма, целевой функции, модели мемристора и экспериментальных дан-

ных (например, даже в рамках одного устройства может присутствовать значительный разброс значений напряжения переключения в разных рабочих циклах [5]) может занимать значительное время.

На сегодняшний день вопрос выбора оптимального алгоритма оптимизации — задача в общем смысле не решенная [6]. Все существующие наработки по этой тематике несут исключительно рекомендационный характер. Более того, как указано в работе [7], эффективность алгоритмов и их параметров неразрывно связана с задачей, для которой они применяются. Таким образом, исследования, направленные на улучшение качества аппроксимации в каждом конкретном случае имеют важное прикладное значение. Иначе говоря, решение вопроса сравнения качества работы различных алгоритмов экстракции параметров эмпирических моделей мемристора из экспериментальных данных является крайне актуальным и полагается главной целью данной работы.

Обзор простейших алгоритмов экстракции и особенностей их применения

Первое, о чем стоит задуматься — это инструментарий для анализа работы рассматриваемой модели мемристора и, в частности, алгоритмов экстракции ее параметров. К рассмотрению предлагается оригинальное программное средство под названием Visualizer, интерфейс которого представлен на рис. 1. Данный инструмент удобен для сравнения различных алгоритмов решения задачи экстракции между собой. Также его можно использовать для исследования взаимосвязей между параметрами рассматриваемой модели мемристора и особенностями соответствующих им вольтамперных характеристик.

С помощью функционала, предоставляемого Visualizer, можно получить следующие данные:

- отклик вида ВАХ рассматриваемой модели мемристора на изменение ее параметров;
- динамическая визуализация изменения ВАХ прямо в процессе оптимизации;
- оптимальные параметры модели для импортируемого экспериментального контура;
- сводная таблица результатов оптимизации расписанная по итерационно;
- значения стандартных и импортируемых целевых функций;
- время, затраченное на оптимизацию.

Проанализируем работу двух наиболее очевидных алгоритмов экстракции параметров модели мемристора на примере модели модификации подвижности [8], основанной на модели Yakorcic S. et al. [9]. Важно отметить, что в рамках данной работы будут рассматриваться только алгоритмы поиска локальных минимумов ввиду того, что не всегда корректно проводить сравнение алгоритмов поиска глобальных минимумов, а

алгоритмы поиска локальных минимумов всегда можно глобализовать. Для простоты сравнения оба рассматриваемых алгоритма будут на основе Нелдера—Мида [10], но с разными целевыми функциями (рис. 2):

1. Целевая функция на основе симметрической разности площадей (нормированный на площадь, заметаемую экспериментальным контуром, результат операции XOR между площадями, заметаемыми экспериментальным и модельным контуром);

2. Целевая функция на основе MSE между 200 точками обрабатываемых контуров.

При запуске оптимизаций становится более ясна специфика задачи — алгоритм экстракции в работе с рассматриваемой системой дифференциальных уравнений (моделью мемристора) сталкивается с множеством практически равнозначных локальных минимумов, причем это не зависит от выбора целевой функции. Дополнительно не редка ситуация, когда алгоритм сходится в нежелательный минимум — модельная ВАХ, или один из ее лепестков, схлопывается в прямую. Это так же обусловлено особенностями исследуемой модели.

Отдельной сложностью является слабая чувствительность ВАХ к изменению параметров модели при некоторых их значениях. Ввиду этих проблем не редкими являются резкие изменения целевых функций, что обуславливает выбор алгоритма Нелдера—Мида в качестве основного для рассмотрения.

Последняя рассматриваемая особенность задачи, связана уже с исследуемыми алгоритмами и относится к невозможности адресовать конкретные особенности обрабатываемых экспериментальных контуров — если, например, алгоритм оптимизации схлопнул левую ветку ВАХ,

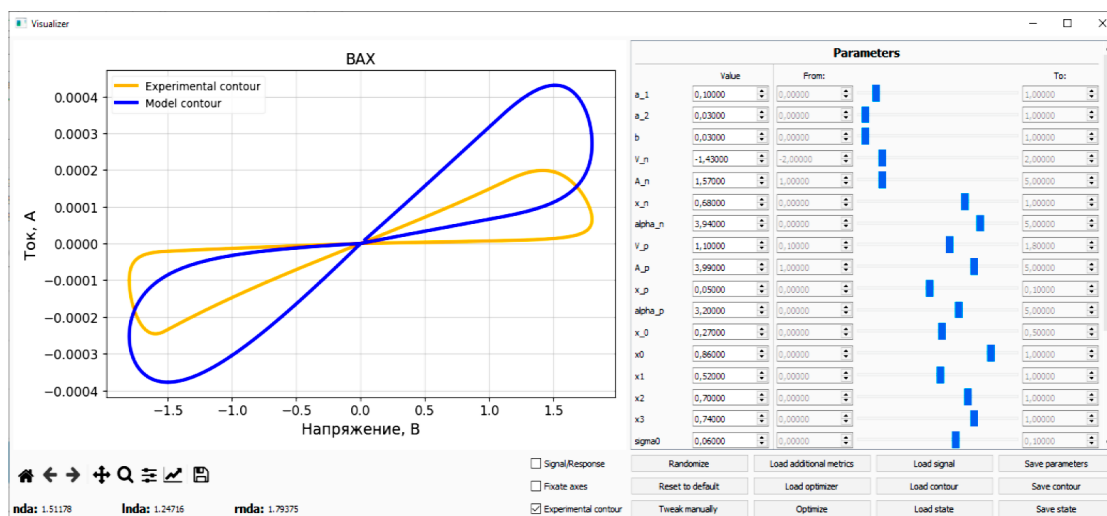


Рис. 1. Интерфейс программного средства Visualizer

Fig. 1. Visualizer interface

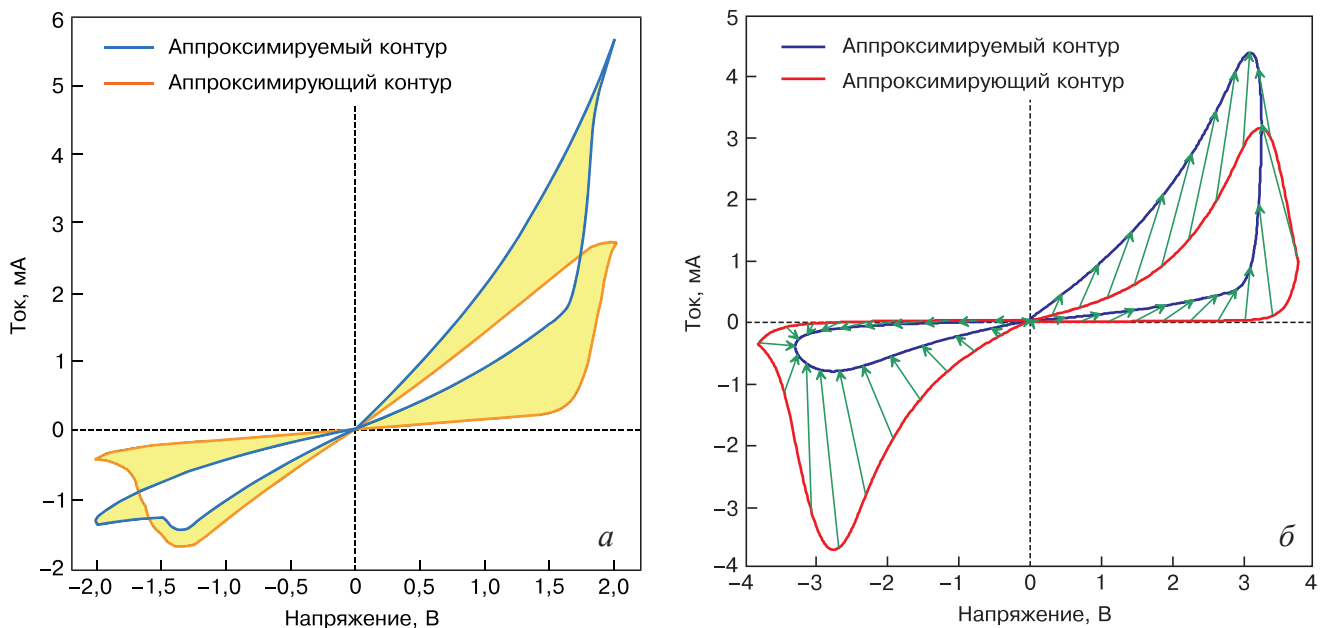


Рис. 2. Визуализация целевой функции на основе симметрической разности площадей (а) и на основе MSE между точками рассматриваемых контуров (б)

Fig. 2. Visualization of the objective function based on the symmetric area difference (a) and based on the MSE between the points of the considered contours (б)

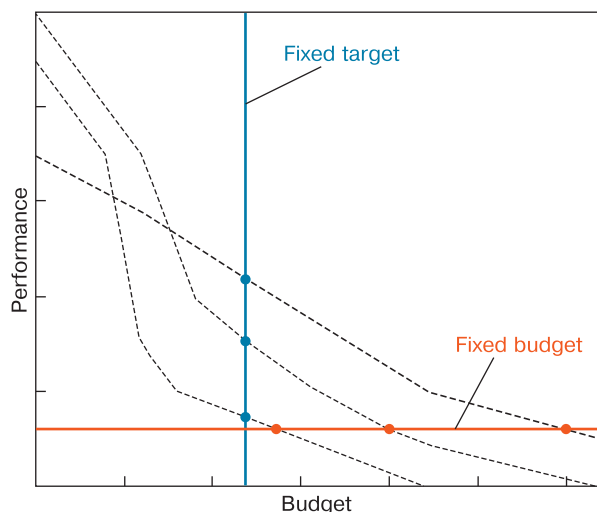


Рис. 3. Визуализация критерия фиксированной цели (значения целевой функции) и фиксированного бюджета (затраченного времени) [6]

Fig. 3. Visualization of the criterion of a fixed target (objective function value) and a fixed budget (time spent) [6]

или плохо обработал область переключения — это никак не исправит подстройкой алгоритма.

Сравнение алгоритмов будем проводить по критерию фиксированного бюджета, описанному в [6] (рис. 3). Под бюджетом в данном случае подразумевается затраченное на оптимизацию время. Этот критерий выгодно использовать ввиду того, что в рамках конкретной задачи нас больше интересует не точность аппроксимации, а ее скорость. Для получения показательных результатов будем сравнивать алгоритмы для частного случая ВАХ, отображенных на рис. 1. Сравнение будем проводить по значениям функции сим-

метрической разности площадей, как наиболее показательной.

Как видно из рис. 4, алгоритм с целевой функцией на основе симметрической разности площадей намного быстрее решает задачу экстракции. Это является очень важным, если его применение подразумевает обработку десятков тысяч экспериментально полученных переключений.

Оригинальный алгоритм экстракции и анализ его работы

Как уже было упомянуто, применение обоих вышеописанных алгоритмов не дает возможности адресовать конкретные особенности обрабатываемых экспериментальных контуров, что является крайне важным для некоторых задач.

Решение этой проблемы легло в основу разработки оригинального алгоритма экстракции параметров модели мемристора. Новый алгоритм должен был обрабатывать аналогично или не на много хуже аналога с целевой функцией на основе симметрической разности площадей, при этом предоставляя широкий функционал по модификации.

Очевидной идеей была реализация алгоритма на основе признаков ВАХ. С помощью программного средства Visualizer было проведено выделение признаков ВАХ, наиболее подверженных изменениям при варьировании параметров рассматриваемой модели. Каждому признаку был приписан вес, после чего была составлена целевая функция для задачи экстракции, в основе которой лежит суммирование отношений

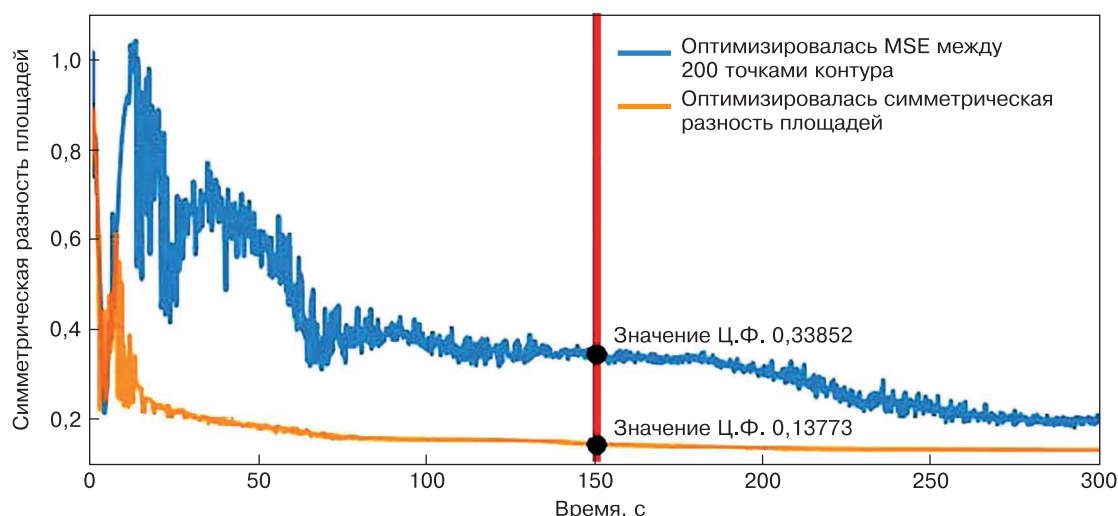


Рис. 4. Сравнение работы алгоритмов экстракции с целевой функцией на основе симметрической разности площадей и MSE между 200 точками рассматриваемых контуров

Fig. 4. Comparison of the operation of extraction algorithms with an objective function based on the symmetric area difference and MSE between 200 points of the considered contours

признаков экспериментальной и модельной ВАХ в степени приписанных каждому признаку весов. Полный список выделенных признаков и приписанных им весов представлен в табл. 1. Номера точек, фигурирующие в табл. 1 соответствуют особым точкам на рис. 5.

Было проведено аналогичное сравнение разработанного алгоритма с двумя рассмотренным

ранее. Результаты этого сравнения можно видеть на рис. 6. Для большей наглядности работа каждого алгоритма отображена на отдельном графике.

Заключение

Как видно из рис. 6, наилучшим вариантом (в рассматриваемом частном случае), как и раньше является алгоритм на основе симметрической разности площадей. Тем не менее алгоритм на основе признаков ВАХ не слишком уступает ему в точности, при этом предлагая широкий функционал по тонкой настройке.

Таблица 1

Список выделенных признаков ВАХ и приписанных им весов

The list of selected I-V characteristics features and the weight assigned to them in the comparison of parameters

Название признака ВАХ	Приписанный вес
Дифференциальная проводимость на ветви 4—7 (R_{on})	3
Ток в точках 4, 7	7
Напряжение в точках 4, 7, 2, 9	1,5
Ток в точках 2, 9	4
Расстояние от точки 2 до ветви 0—4	3
Расстояние от точки 9 до ветви 0—7	3
Площадь правого и левого лепестка ВАХ	7
Разница между площадями правого и левого лепестка ВАХ	1,5
Длина ветви 2—4, 7—9	4
Длина ветви 0—2, 4—0, 0—7, 0—9	1,5
Производная в серединах ветвей 2—3, 3—4, 8—9, 7—8	1,5
Кривизна в точках 1, 3, 5, 6, 8, 10	2

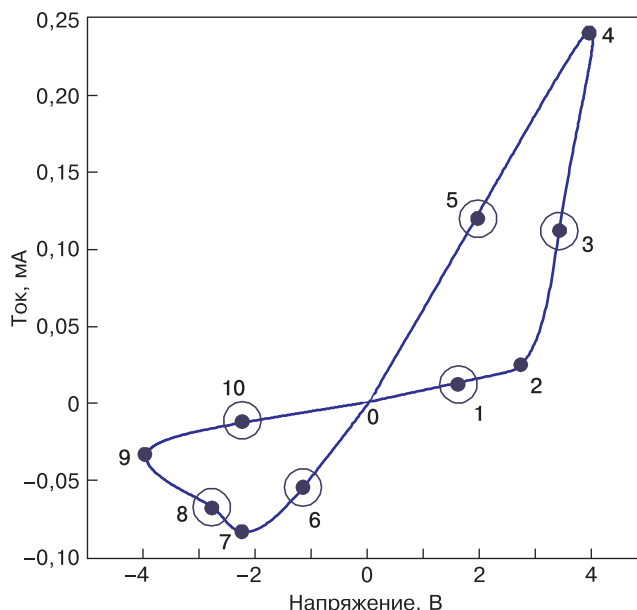


Рис. 5. Особые точки ВАХ (пояснение к табл. 1)

Fig. 5. Singular points of the I-V characteristics (explanation to Table 1)

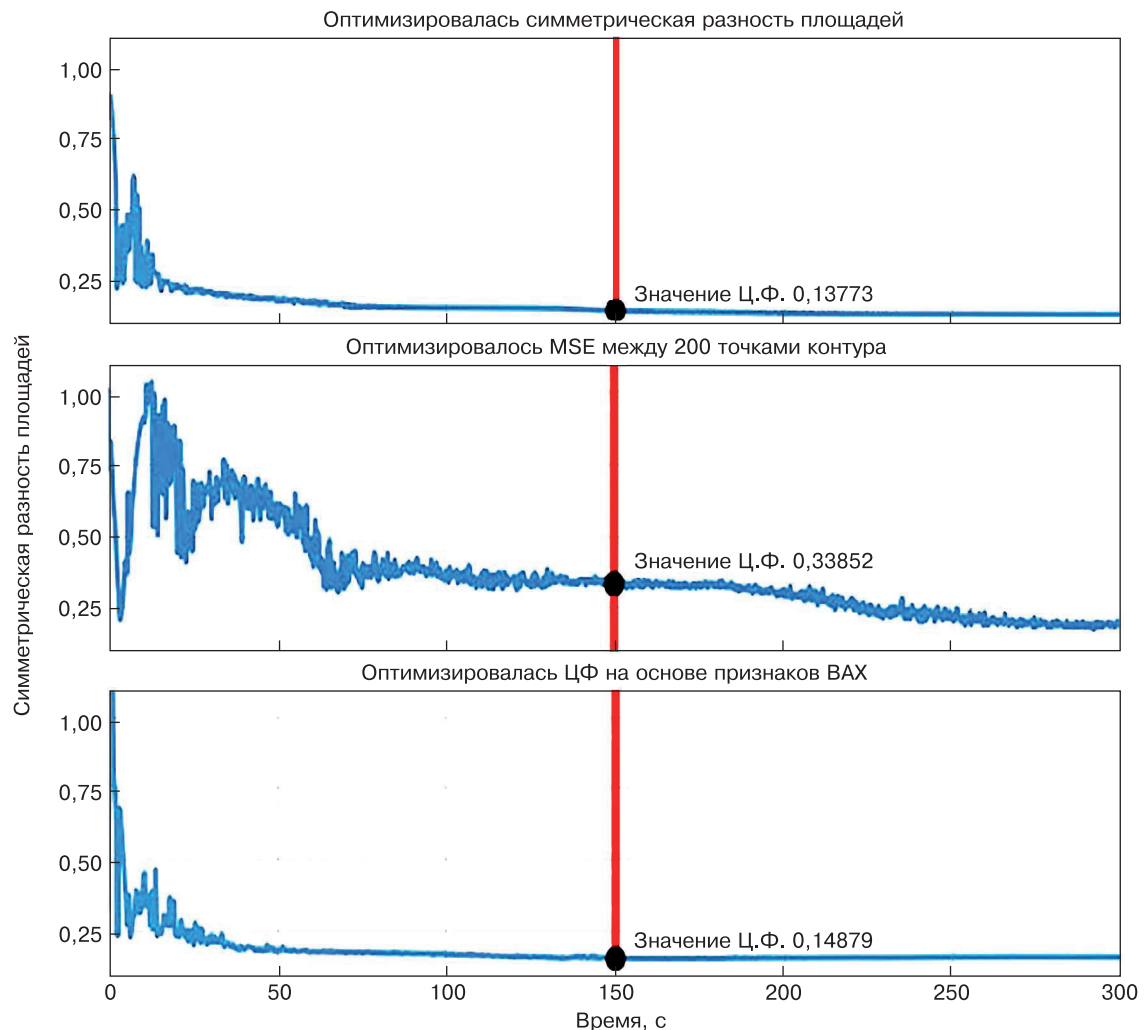


Рис. 6. Сравнение алгоритма на основе признаков ВАХ с алгоритмами на основе симметрической разности площадей и MSE между 200 точками обрабатываемых ВАХ

Fig. 6. Comparison of the algorithm based on the I–V characteristics with algorithms based on the symmetric area difference and MSE between 200 points of the processed I–V characteristics

Библиографический список

1. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D., Williams S. The missing memristor found. *Nature*. 2008; 453(7191): 80—83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
2. Pershin Y.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. Al Chawa M.M., Picos R. A simple quasi-static compact model of bipolar ReRAM memristive devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2019; 67(2): 390—394. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2915825>
4. 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>
5. Красников Г.Я., Горнев Е.С., Матюшкин И.В. Общая теория технологии и микроэлектроника. *Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника*. В 3 ч. Ч. 1. Уровни описания технологии. 2017; 1(165): 51—69. Ч. 2. Вопросы метода и классификации. 2017; 4(168): 16—41. Ч. 3. Уровень технологической операции. 2018; 3(171): 63—93.
6. Bartz-Beielstein T., Doerr C., Bossek J., Chandrasekaran S., Eftimov T., Fischbach A., Kerschke P., López-Ibáñez M., Malan K., Moore J.H., Naujoks B., Orzechowski P., Volz V., Wagner M., Weise T. Benchmarking in optimization: Best practice and open issues. NY, USA: Cornell University; 2020. 50 p. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2007.03488>
7. Brownlee J. A note on research methodology and benchmarking optimization algorithms. Technical Report. Melbourne, Australia: Swinburne University of Technology; Victoria, Australia, 2007. 6 p.
8. Zhevnenko D., Meshchaninov F., Kozhevnikov V., Shamin E., Gornev E., Belov A., Gerasimova S., Guseinov D., Mikhaylov A. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021; 142: 110382. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110382>
9. 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>
10. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. 1965; 7(4): 308—313. <https://doi.org/10.1093/COMJNL/7.4.308>

References

1. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D., Williams S. The missing memristor found. *Nature*. 2008; 453(7191): 80—83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
2. Pershin Y.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. Al Chawa M.M., Picos R. A simple quasi-static compact model of bipolar ReRAM memristive devices. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2019; 67(2): 390—394. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2915825>
4. 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>
5. Krasnikov G.Y., Gornev E.S., Matushkin I.V. General theory of technology and microelectronics. *Electronic Engineering. Series 3. Microelectronics*. In 3 p. Part 1. Levels of technology. 2017; 1(165): 51—59. Part 2. Issues of methodology and classification. 2017; 4(168): 16—41. Part 3. Technological operation level. 2018; 3(171): 63—93. (In Russ.)
6. Bartz-Beielstein T., Doerr C., Bossek J., Chandrasekaran S., Eftimov T., Fischbach A., Kerschke P., López-Ibáñez M., Malan K., Moore J.H., Naujoks B., Orzechowski P., Volz V., Wagner M., Weise T. Benchmarking in optimization: Best practice and open issues. NY, USA: Cornell University; 2020. 50 p. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110382>
7. Brownlee J. A note on research methodology and benchmarking optimization algorithms. Technical Report. Melbourne, Australia: Swinburne University of Technology; 2007. 6 p.
8. Zhevnenko D., Meshchaninov F., Kozhevnikov V., Shamin E., Gornev E., Belov A., Gerasimova S., Guseinov D., Mikhaylov A. Simulation of memristor switching time series in response to spike-like signal. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2021; 142: 110382. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2020.110382>
9. 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>
10. Nelder J.A., Mead R. A simplex method for function minimization. *The Computer Journal*. 1965; 7(4): 308—313. <https://doi.org/10.1093/COMJNL/7.4.308>

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

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

Evgeniy S. Gornev — Corresponding Member of RAS, 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 Technological Direction – Head of PTD Department, Molecular Electronics Research Institute, JSC, 6–1 Academician Valieva Str., Moscow, Zelenograd 124460, Russia; <https://orcid.org/0000-0003-1706-4142>; e-mail: egornev@niime.ru

Поступила в редакцию 24.12.2021; поступила после доработки 30.12.2021; принята к публикации 15.01.2022
Received 24 December 2021; Revised 30 December 2021; Accepted 15 January 2022