

УДК 621.382.323

Применение нейронных сетей при построении нелинейных моделей полевых транзисторов

Богданов С. А.

*АО «Научно-производственное предприятие “Исток” имени А. И. Шокина»
ул. Вокзальная, 2А, г. Фрязино, Московская обл., 141190, Российская Федерация
bogdanov_sa@mail.ru*

Получено: 19 мая 2022 г.

Отрецензировано: 5 июня 2022 г.

Принято к публикации: 5 июня 2022 г.

Аннотация: На основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей разработана нелинейная модель полевого транзистора, особенностью которой является возможность обучения нейронных сетей, используемых для аппроксимации вольтамперной характеристики и емкостей затвор-сток и затвор-исток нелинейной модели транзистора встроенными в популярные СВЧ САПР алгоритмами оптимизации. Это позволяет использовать известные преимущества нейронных сетей в задачах аппроксимации функций для повышения достоверности результатов нелинейного моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов.

Ключевые слова: нелинейная модель полевого транзистора, искусственные нейронные сети, радиальная базисная сеть, функция активации, «SoftPlus».

Для цитирования (ГОСТ 7.0.5—2008): Богданов С. А. Применение нейронных сетей при построении нелинейных моделей полевых транзисторов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. 2022. Т. 5, № 1. С. 45—53.

Для цитирования (ГОСТ 7.0.100—2018): Богданов, С. А. Применение нейронных сетей при построении нелинейных моделей полевых транзисторов / С. А. Богданов // *Инфокоммуникационные и радиоэлектронные технологии*. — 2022. — Т. 5, № 1. — С. 45—53.

1. Введение

В настоящее время предъявляются повышенные требования к спектральной эффективности, электромагнитной совместимости, динамическому диапазону и линейности передаточных характеристик разрабатываемых монолитных интегральных схем и СВЧ-устройств. При этом особое

внимание уделяют достоверности нелинейных моделей активных элементов в широком диапазоне рабочих частот, температур и питающих напряжений, поскольку результаты моделирования указанных характеристик проектируемых устройств во многом определяются адекватностью применяемых моделей.

В популярных САПР СВЧ-устройств широко распространены модели полевых транзисторов, реализованные в виде эквивалентных схем, в которых зависимости параметров нелинейных элементов от температуры и питающих напряжений аппроксимируются аналитическими функциями [1].

За рубежом активно разрабатываются нелинейные модели транзисторов на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей (ИНС) [2—6]. Такие модели представляют собой одну или совокупность из нескольких математических моделей ИНС, моделирующих поведение транзистора. Количество нейронов в рассматриваемых моделях транзисторов на основе ИНС варьируется от десятков до сотен. Выбор архитектуры и процесс обучения ИНС требует применения специализированного программного обеспечения с высокопроизводительными алгоритмами, что существенно усложняет разработку модели транзистора. Кроме того, нетривиально решение задачи экспорта таких моделей в популярные САПР СВЧ-устройств. Разработанные модели транзисторов с использованием математического аппарата теории ИНС демонстрируют высокую точность прогнозирования характеристик транзистора, которая в ряде случаев достигает единиц процентов [4]. К достоинствам таких моделей также относят универсальность, независимость методики получения модели от типа транзистора, высокое быстродействие и оперативность разработки [1].

В настоящей работе предпринята попытка объединить преимущества эмпирических нелинейных моделей полевых транзисторов, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Целью работы является разработка нелинейной модели полевого транзистора с использованием математического аппарата теории искусственных нейронных сетей для улучшения достоверности моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов.

2. Модель полевого транзистора

Одной из универсальных эмпирических моделей полевых транзисторов является модель Ангелова [7], в которой предложены следующие функциональные зависимости для аппроксимации емкостей затвор — ис-

ток C_{gs} , затвор — сток C_{gd} , а также тока стока I_d от напряжений затвор-исток V_{gs} и сток-исток V_{ds} :

$$C_{gs}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gs0}(1 + \tanh(\psi_1(V_{gs}))) (1 + \tanh(\psi_2(V_{ds}))), \quad (1)$$

$$C_{gd}(V_{gs}, V_{ds}) = C_{gd0}(1 + \tanh(\psi_3(V_{gs}))) (1 - \tanh(\psi_4(V_{ds}, V_{gs}))), \quad (2)$$

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))) \right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}), \quad (3)$$

где $\psi_1(V_{gs})$, $\psi_2(V_{ds})$, $\psi_3(V_{gs})$, $\psi_4(V_{ds}, V_{gs})$, $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ — полиномиальные функции, а C_{gs0} , C_{gd0} , I_{pk} , λ , α — параметры модели [7].

При всех известных достоинствах модели Ангелова [7] к одному из ее недостатков относят низкую достоверность при моделировании нелинейных искажений, обусловленную недостаточной хорошей аппроксимацией крутизны транзистора при описании ВАХ с помощью (3) [8—10]. Несмотря на потенциальную возможность повышения точности моделирования ВАХ (3) путем использования в $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ полиномов более высокого порядка, на практике это не всегда удается реализовать.

В то же время математический аппарат теории ИНС находит широкое применение для решения прикладных задач оптимизации, прогнозирования, управления, классификации, а также аппроксимации функций многих переменных с очень большой точностью [11, 12]. Таким образом, имеется возможность повысить достоверность моделирования ВАХ и крутизны транзистора путем замены в (3) полиномиальной функции $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ на функцию $R(V_{gs}, V_{ds})$, синтезируемую с помощью математической модели ИНС.

Анализ характеристик функций активации нейронов и различных архитектур ИНС позволяет предложить для синтеза функции $R(V_{gs}, V_{ds})$ радиальную базисную сеть (РБС). Разложение по радиальным базисным функциям может быть реализовано на двухслойной нейронной сети, первый слой которой состоит из радиальных базисных нейронов, а второй — из единственного нейрона с линейной характеристикой, на котором реализуется суммирование выходов нейронов первого слоя.

Вход функции активации РБС определяется как модуль разности вектора весов \mathbf{w} и вектора входа \mathbf{p} , умноженный на смещение \mathbf{b} . Функция активации РБС имеет вид:

$$f(n) = e^{-n^2},$$

где $n = \|x - w\| \cdot b$, где x — вектор входных переменных, w — вектор-строка весов, b — вектор-столбец смещений, а результатом операции $\|x - w\|$ является вектор из элементов $S_i = |x_i - w_i|$, которые определяются расстояниями между i -м вектором входа x и i -й вектор-строкой весов.

В случае двух входных переменных V_{gs} и V_{ds} ($i = 2$) выход отдельного j -го нейрона первого слоя имеет вид:

$$F_j(V_{gs}, V_{ds}) = \exp\left(-b_{i-1,j}^2 (V_{gs} - w_{i-1,j})^2 - b_{i,j}^2 (V_{ds} - w_{i,j})^2\right),$$

а на выходе РБС из m нейронов в скрытом слое имеем

$$R(V_{gs}, V_{ds}) = c + \sum_{j=1}^m a_j F_j(V_{gs}, V_{ds}).$$

Таким образом ВАХ нелинейной модели полевого транзистора с применением математического аппарата теории ИНС может быть представлена в виде:

$$I_d(V_{gs}, V_{ds}) = I_{pk} \left[1 + \tanh(R(V_{gs}, V_{ds})) \right] (1 + \lambda \cdot V_{ds}) \tanh(\alpha \cdot V_{ds}). \quad (4)$$

Выражения (1) и (2) с точностью 5—10 % [7] описывают нелинейные зависимости емкостей затвор — исток C_{gs} и затвор — сток C_{gd} от приложенных напряжений даже при использовании линейных зависимостей в функциях ψ_1, ψ_2, ψ_3 и ψ_4 . Во многих случаях этого достаточно.

Для аппроксимации нелинейных зависимостей зарядов Q_{gs} и Q_{gd} в качестве альтернативы (1) и (2) может быть предложена архитектура двухслойной ИНС [12], с линейной функцией активации в выходном слое и с так называемой «SoftPlus» [13] функцией активации нейронов в скрытом слое:

$$f_1(a_m) = \ln(1 + e^{a_m}). \quad (5)$$

Функция активации «SoftPlus» (5) имеет следующие особенности: она монотонная, а ее производная представляет собой сигмоидальную функцию:

$$\frac{\partial f(a_m)}{\partial a_m} = \frac{1}{1 + e^{-a_m}}. \quad (6)$$

Таким образом, выражения для зарядов Q_{gd} и Q_{gs} как результат аппроксимации двухслойной нейронной сетью на основе функции «SoftPlus» будут иметь вид:

$$Q(V_{gs}, V_{ds}) = \sum_{j=1}^m a_j \ln \left[1 + \exp(w_{i-1,j} V_{gs} + w_{i,j} V_{ds} + b_j) \right]. \quad (7)$$

В отличие от известных выражений для зарядов Q_{gs} и Q_{gd} , полученных из физических соображений в [14] для барьерной емкости контакта Шоттки в случае однородно легированного полупроводника, функция (7) не имеет разрывов.

3. Оценка достоверности модели

Для апробации разработанной модели было проведено экспериментальное исследование ВАХ и S-параметров GaAs НЕМТ транзистора производства АО «НПП “Исток” им. Шокина» в диапазоне частот 0,5—18 ГГц для следующих значений величин питающих напряжений и их приращений: $-2,5 \text{ В} \leq V_{gs} \leq 0,5 \text{ В}$, $\Delta V_{gs} = 0,1 \text{ В}$ и $0 \text{ В} \leq V_{ds} \leq 5 \text{ В}$, $\Delta V_{ds} = 0,2 \text{ В}$. Используя известные методики экстракции параметров паразитных элементов эквивалентной схемы транзистора [15], а также с помощью оптимизации по Y- и Z-параметрам при всех значениях питающих напряжений в указанном диапазоне частот строились две нелинейные модели: модель Ангелова [7] с C_{gs} , C_{gd} и I_d , определяемыми выражениями (1—3) соответственно, и нелинейная модель, разработанная на основе математического аппарата теории искусственных нейронных сетей, где зависимости Q_{gd} , Q_{gs} и I_d заданы выражениями (7) и (4). Количество нейронов скрытого слоя в РБС для описания ВАХ и в скрытом слое нейронной сети для описания зарядовой модели — пять. В модели Ангелова при описании ВАХ (3) функция $\psi(V_{gs}, V_{pk}(V_{ds}))$ была представлена полиномом 5-го порядка.

Для оценки достоверности моделирования S-параметров транзистора в зависимости от частоты и напряжения затвор — исток в области насыщения для моделей Ангелова и модели на основе математического аппарата теории ИНС (модель на основе ИНС) определялись величины максимального отклонения результатов моделирования и эксперимента по каждому из S-параметров $\max \Delta S = \max(|S_{\text{мод}} - S_{\text{эксн}}|)$, среднее арифметическое отклонение $\sum \Delta S / N$, а также среднее арифметическое величины относительного отклонения теоретической и экспериментальной поверхностей S-параметров $\sum \delta S / N = \frac{100\%}{N} \sum \left| \frac{S_{\text{мод}} - S_{\text{эксн}}}{S_{\text{эксн}}} \right|$, где N — количество анализируемых точек. Результаты сведены в таблицу 1.

Таблица 1. Оценка достоверности моделей.

Table 1. Estimation of model reliability

S-параметр	Критерии оценки достоверности	Модель Ангелова	Модель на основе ИНС
S11	$\max \Delta S_{11}$	0,3773	0,1075
	$\sum \Delta S_{11}/N$	0,1028	0,0226
	$\sum \delta S_{11}/N, \%$	11,6	2,6
S12	$\max \Delta S_{12}$	0,04898	0,022
	$\sum \Delta S_{12}/N$	0,0176	0,0071
	$\sum \delta S_{12}/N, \%$	31,6	11,6
S21	$\max \Delta S_{21}$	1,712	1,608
	$\sum \Delta S_{21}/N$	0,1623	0,078
	$\sum \delta S_{21}/N, \%$	21,0	10,1
S22	$\max \Delta S_{22}$	0,539	0,129
	$\sum \Delta S_{22}/N$	0,217	0,0483
	$\sum \delta S_{22}/N, \%$	28,4	6,5

Как видно из таблицы 1, модель полевого транзистора, разработанная на основе математического аппарата теории ИНС по рассматриваемым критериям, превосходит по достоверности моделирования S-параметров классическую модель Ангелова [7], что позволяет надеяться на ее потенциально более высокую точность и при моделировании нелинейных искажений.

4. Заключение

Анализ результатов моделирования позволяет предположить, что разработанная нелинейная модель полевого транзистора на основе математического аппарата теории ИНС позволит повысить достоверность моделирования СВЧ-устройств на основе полевых транзисторов. В разработанной модели удалось объединить рассмотренные преимущества эмпирических нелинейных моделей полевых транзисторов, реализуемых в популярных САПР СВЧ-устройств в виде эквивалентных схем, и нелинейных моделей транзисторов на основе ИНС.

Продемонстрированный в работе подход по применению математического аппарата теории ИНС при разработке нелинейной модели полевого транзистора позволяет производить разработку и использование нелинейных моделей активных элементов СВЧ электроники на основе нейронных

сетей непосредственно в схемотехнических САПР, используя возможности их методов оптимизации. Указанный подход расширяет возможности поиска новых технических решений по улучшению параметров и характеристик радиоэлектронной аппаратуры.

Список литературы

1. Коколов А. А., Шеерман Ф. И., Бабак Л. И. Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов // Доклады ТУСУР. 2010. № 2-1 (22). С. 118—126.
2. Qi-Jun Zhang, Gupta K. C., Devabhaktuni V. K. Artificial neural networks for RF and microwave design — from theory to practice // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2003. Vol. 51, no. 4. P. 1339—1350.
3. Gao J., Zhang L., Xu J., Zhang Q. -J. Nonlinear HEMT Modeling Using Artificial Neural Network Technique. In: IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2005. P. 469—472.
4. Alam M. S., Farooq O., Izharuddin, Armstrong G. Artificial Neural Network Based Modeling of GaAs HBT and Power Amplifier Design for Wireless Communication System. In: 2006 International Conference on Microelectronics. 2006. P. 103—106.
5. Liu W., Na W., Zhu L., Ma J., Zhang, Q. -J. A Wiener-Type Dynamic Neural Network Approach to the Modeling of Nonlinear Microwave Devices // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. Vol. 65, no. 6, P. 2043—2062.
6. Hu W., Luo H., Yan X. Guo Y. -X. An Accurate Neural Network-Based Consistent Gate Charge Model for GaN HEMTs by Refining Intrinsic Capacitances // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2021. Vol. 69, no. 7. P. 3208—3218.
7. Angelov I., Zirath H., Rorsman N. A new empirical nonlinear model for HEMT-devices. In: 1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest. 1992. Vol. 3. P. 1583—1586.
8. Angelov K., Andersson D., Schreurs D. [et al]. In: Large-signal modelling and comparison of AlGaIn/GaN HEMTs and SiC MESFETs. Asia-Pacific Microw. Conf. 2006. P. 279—282.
9. Sayed A., Boeck G. An empirical large signal model for silicon carbide MESFETs. In: Gallium Arsenide and Other Semicond. Appl. Symp. 2005. P. 313—316.
10. Yuk K. S., Branner G. R. An empirical large-Signal model for SiC MESFETs with self-heating thermal model // IEEE Trans. MTT. 2008. Vol. 56, no. 11. P. 2671—2680.
11. Галушкин А. И. Нейронные сети : основы теории. М. : Горячая линия — Телеком, 2012. 496 с.
12. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6. М. : ДИАЛОГ-МИФИ, 2001. 630 с.
13. Baggenstoss P. M. A Neural Network Based on First Principles. In: ICASSP 2020—2020. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), 2020. P. 4002—4006.
14. Statz H., Newman P., Smith I. W., Pucel R. A., Haus H. A. GaAs FET device and circuit simulation in SPICE // IEEE Transactions on Electron Devices. 1987. Vol. 34, no. 2. P. 160—169.
15. Rudolph M., Fager C., Root D. E. Nonlinear transistor model parameter extraction techniques. Cambridge University Press, 2012. 366 p.

Информация об авторе

Богданов Сергей Александрович, кандидат технических наук, начальник сектора АО «НПП «Исток» им. Шокина», г. Фрязино, Российская Федерация.

Application of Neural Networks in the Construction of Nonlinear Models of Field-Effect Transistors

S. A. Bogdanov

*Scientific and production enterprise “Istok” n. a. A. I. Shokin, JSC
Vokzalnaya st., 2A, Fryazino, Moscow region, 141190, Russian Federation
bogdanov_sa@mail.ru*

Received: May 19, 2022

Peer-reviewed: June 5, 2022

Accepted: June 5, 2022

Abstract: *The nonlinear model of a field-effect transistor based on the mathematical apparatus of the theory of artificial neural networks was developed. The main feature of this model is the possibility of training neural networks used to approximate the current-voltage characteristic and the gate-drain and gate-source capacitances of a nonlinear transistor model by using optimization algorithms built into popular microwave CAD systems. This makes it possible to use the well-known advantages of neural networks in the problems of function approximation to increase the reliability of the results of nonlinear modeling of microwave devices based on field-effect transistors.*

Keywords: *nonlinear model of a field-effect transistor; artificial neural networks; radial basic network; activation function; SoftPlus.*

For citation (IEEE): S. A. Bogdanov, “Application of Neural Networks in the Construction of Nonlinear Models of Field-Effect Transistors,” *Infocommunications and Radio Technologies*, vol. 5, no. 1, pp. 45–53, 2022, doi: 10.29039/2587-9936.2022.05.1.03. (In Russ.).

References

- [1] A. A. Kokolov, F. I. Sheerman, L. I. Babak, “Review of mathematical models of microwave field-effect transistors with high electron mobility,” *Doklady TUSUR*, no. 2-1 (22), pp. 118–126, 2010. (In Russ.).
- [2] Qi-Jun Zhang, K. C. Gupta, and V. K. Devabhaktuni, “Artificial neural networks for RF and microwave design – from theory to practice,” *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 51, no. 4, pp. 1339–1350, 2003, doi: 10.1109/TMTT.2003.809179.
- [3] J. Gao, L. Zhang, J. Xu, and Q. -J. Zhang, “Nonlinear HEMT Modeling Using Artificial Neural Network Technique,” in *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, pp. 469–472, 2005, doi: 10.1109/MWSYM.2005.1516631.
- [4] M. S. Alam, O. Farooq, Izharuddin, and G. A. Armstrong, “Artificial Neural Network Based Modeling of GaAs HBT and Power Amplifier Design for Wireless Communication System,” in *2006 International Conference on Microelectronics*, pp. 103–106, 2006, doi: 10.1109/ICM.2006.373277.

- [5] W. Liu, W. Na, L. Zhu, J. Ma, and Q.-J. Zhang, "A Wiener-Type Dynamic Neural Network Approach to the Modeling of Nonlinear Microwave Devices," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 6, pp. 2043–2062, June 2017, doi: 10.1109/TMTT.2017.2657501.
- [6] W. Hu, H. Luo, X. Yan and Y.-X. Guo, "An Accurate Neural Network-Based Consistent Gate Charge Model for GaN HEMTs by Refining Intrinsic Capacitances," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 69, no. 7, pp. 3208–3218, 2021, doi: 10.1109/TMTT.2021.3076064.
- [7] I. Angelov, H. Zirath, and N. Rorsman, "A new empirical nonlinear model for HEMT-devices," in *1992 IEEE MTT-S Microwave Symposium Digest*, vol. 3, pp. 1583–1586, 1992, doi: 10.1109/MWSYM.1992.188320.
- [8] Angelov K., Andersson D., Schreurs D., Xiao N., Rorsman V., Desmaris M., Sudow, and H. Zirath, "Large-signal modelling and comparison of AlGaIn/GaN HEMTs and SiC MESFETs," in *Asia-Pacific Microw. Conf.*, pp. 279–282, 2006, doi: 10.1109/APMC.2006.4429422.
- [9] A. Sayed and G. Boeck, "An empirical large signal model for silicon carbide MESFETs," in *Gallium Arsenide and Other Semicond. Appl. Symp.*, pp. 313–316, 2005.
- [10] K. S. Yuk and G. R. Branner, "An empirical large-Signal model for SiC MESFETs with self-heating thermal model," *IEEE Trans. MTT.*, vol. 56, no. 11, pp. 2671–2680, 2008, doi: 10.1109/TMTT.2008.2005922.
- [11] A. I. Galushkin, *Neural networks: fundamentals of theory*. Moscow: Goryachaya Liniya – Telekom, 2012. (In Russ.).
- [12] V. S. Medvedev, V. G. Potemkin, *Neural networks. MATLAB 6*. Moscow: Dialog – MIFI, 2001. (In Russ.).
- [13] P. M. Baggenstoss, "A Neural Network Based on First Principles," in *ICASSP 2020 – 2020 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, pp. 4002–4006, 2020, doi: 10.1109/ICASSP40776.2020.9054549.
- [14] H. Statz, P. Newman, I. W. Smith, R. A. Pucel, and H. A. Haus, "GaAs FET device and circuit simulation in SPICE," *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 34, no. 2, pp. 160–169, 1987, doi: 10.1109/T-ED.1987.22902.
- [15] Matthias Rudolph, Christian Fager, and David E. Root, *Nonlinear transistor model parameter extraction techniques*, Cambridge University Press, 2012.

Information about the author

Sergey A. Bogdanov, Ph.D. of Engineering Sciences, Head of the sector of JSC RPC "Istok", Fryazino, Russian Federation.