

Применение шаблонной модели для аппроксимации дифференциальных характеристик комплементарных полевых транзисторов с управляющим р-n-переходом

А.М. Пилипенко¹, Н.Н. Прокопенко², П.С. Будяков³

¹Институт радиотехнических систем и управления Южного федерального университета, г. Таганрог, ampilipenko@sfnedu.ru

²Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону

³АО «НПП «Пульсар», г. Москва

Аннотация — Рассмотрена возможность применения шаблонной модели для аппроксимации дифференциальных характеристик комплементарных полевых транзисторов с управляющим р-n-переходом (ПТУП), входящих в состав современных радиационно-стойких интегральных схем (ИС) операционных усилителей с особо малым уровнем собственных шумов. Создание шаблонной модели осуществляется путем замены параметров исходной физической модели дробно-рациональными функциями, которые позволяют обеспечить монотонность вольт-амперных характеристик полученной модели. Число дополнительных параметров шаблонной модели невелико, что позволяет использовать для параметрической идентификации стандартные алгоритмы оптимизации. В данной работе показано, что применение шаблонной модели с дополнительными комплектами параметров, полученными для каждой дифференциальной характеристики отдельно, позволяет повысить точность аппроксимации выходной проводимости ПТУП – в 6 – 8 раз, а крутизны – в 1.5 раза по сравнению с результатами, полученными для SPICE-модели. Достигнутое повышение точности аппроксимации дифференциальных характеристик позволяет обеспечить уменьшение погрешностей моделирования аналоговых ИС, содержащих данные ПТУП, как минимум в 6 раз по сравнению со стандартной методикой.

Ключевые слова — полевой транзистор с управляющим р-n-переходом, шаблонная модель, идентификация параметров, метод наименьших квадратов, крутизна характеристики, выходная проводимость.

I. ВВЕДЕНИЕ

Полевые транзисторы с управляющим р-n-переходом (ПТУП) являются классическими электронными устройствами, имеющими достаточно простую структуру и принципы управления [1]. ПТУП обладают минимальным уровнем собственных шумов по сравнению с другими типами транзисторов, поэтому они продолжают широко использоваться для решения различных задач космического приборостроения, робототехники и радиотехники. В частности, ПТУП применяются в радиационно-стойких интегральных схемах (ИС) для обработки сигналов датчиков различных физических величин, во входных устройствах малошумящих измерительных систем, усилителях биосигналов, микрофонах и детекторах элементарных частиц [2]. Следует

отметить, что на одном полупроводниковом кристалле современных радиационно-стойких ИС могут быть реализованы комплементарные ПТУП, которые, как правило, изготавливают совместно с биполярными транзисторами и применяют для создания операционных усилителей, имеющих особо малый уровень собственных шумов [3].

В качестве стандартной модели ПТУП в SPICE-симуляторах в настоящее время продолжает использоваться известная модель Шичмена-Ходжеса (далее – SPICE-модель), точность которой оказывается достаточно низкой, особенно при моделировании упомянутых выше ИС в условиях криогенных температур [4]. Следует отметить, что для анализа частотных характеристик усилительных устройств в SPICE-симуляторах рассчитываются не только вольт-амперные характеристики (ВАХ) транзисторов, но и их дифференциальные параметры – крутизна и выходная проводимость, причем погрешности моделирования дифференциальных параметров, как правило, оказываются значительно выше погрешности моделирования ВАХ [5].

Как известно, разработка точных физических моделей новых полупроводниковых компонентов – это весьма трудоемкая задача [6]. В данной работе рассматривается возможность применения для аппроксимации дифференциальных характеристик ПТУП так называемой шаблонной модели, которая позволяет повысить точность моделирования ВАХ ПТУП в 2 – 3 раза по сравнению с известной SPICE-моделью без существенного усложнения последней [7]. Создание шаблонной модели осуществляется с помощью замены одного или нескольких параметров исходной компактной модели функциями управляющих напряжений [8].

Целью данной работы является повышение точности моделирования дифференциальных характеристик комплементарных ПТУП с помощью шаблонной модели. Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- идентификация параметров SPICE-модели и шаблонной модели для комплементарной пары тестовых ПТУП;

- оценка погрешностей аппроксимации статических и дифференциальных характеристик комплементарных ПТУП с помощью SPICE-модели и шаблонной модели при использовании различных критериев минимизации погрешностей;

- анализ точности моделирования собственных коэффициентов усиления комплементарных ПТУП.

II. ОПИСАНИЕ МОДЕЛЕЙ ПТУП

SPICE-модель ПТУП, описывающая его ВАХ, имеет следующий вид [9]

$$I(V_{DS}, V_{GS}) = \begin{cases} 0, & \text{при } V_G \leq 0; \\ \beta(2V_G - V_{DS})V_{DS}(1 + \lambda V_{DS}), & \text{при } V_{DS} \leq V_G; \\ \beta V_G^2(1 + \lambda V_{DS}), & \text{при } V_{DS} > V_G, \end{cases} \quad (1)$$

где I – ток стока; V_{DS} – напряжение сток-исток; V_{GS} – напряжение затвор-исток; $V_G = V_{GS} - V_{TH}$ – эффективное напряжение затвора; V_{TH} – пороговое напряжение; β – удельная крутизна; λ – коэффициент модуляции длины канала.

Модель (1) далее используется в качестве исходной физической модели для создания шаблонной модели ПТУП, поскольку ее параметры β , V_{TH} , λ можно определить по результатам прямых измерений [8]. Шаблонные модели и методы их синтеза для различных полупроводниковых компонентов представлены в работах [7], [8], [10], [11].

Из работ [10], [11] следует, что для создания шаблонной модели необходимо заменить параметры исходной модели β и λ дробно-рациональными функциями (отношениями степенных рядов), которые в простейшем случае описываются следующими выражениями:

$$\beta = \beta_0 \frac{\beta_1 V_G}{\beta_1 V_G + \beta_2 V_G^2}; \quad (2)$$

$$\lambda = \lambda_0 \frac{\lambda_1 V_{DS}}{\lambda_1 V_{DS} + \lambda_2 V_{DS}^2}, \quad (3)$$

где β_0 и λ_0 – физические параметры шаблонной модели; β_1 , β_2 и λ_1 , λ_2 – дополнительные эмпирические коэффициенты.

Применение дробно-рациональных функций (2) и (3) обеспечивает монотонность ВАХ полученной шаблонной модели (1), (2), (3) [11]. Число дополнительных эмпирических коэффициентов в шаблонной модели равно четырем, что позволяет использовать для параметрической идентификации стандартные алгоритмы поиска минимума.

Дифференциальные характеристики транзистора – крутизна S и выходная проводимость G – определяются на основе его ВАХ с помощью следующих выражений [5]:

$$S = \frac{\partial I}{\partial V_{GS}}; \quad G = \frac{\partial I}{\partial V_{DS}}.$$

III. МЕТОДИКА ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Стандартный способ определения параметров моделей транзисторов сводится к минимизации целевой функции, которая имеет вид суммы квадратов относительных погрешностей аппроксимации ВАХ:

$$F_I = \sum_{k=1}^N \left[\frac{I(V_{DSk}, V_{GSk}) - I_k}{I_k} \right]^2, \quad (4)$$

где N – число экспериментальных точек; V_{DSk} и V_{GSk} – экспериментальные значения напряжений сток-исток и затвор-исток, соответственно; I_k – экспериментальные значения тока стока; $I(V_{DSk}, V_{GSk})$ – значения тока стока, полученные в результате моделирования.

В данной работе предлагается повысить точность моделирования дифференциальных характеристик транзисторов с помощью применения шаблонной модели, а также за счет присвоения каждой модели одного и того же элемента нескольких комплектов параметров. Основной комплект параметров можно получить из условия минимума целевой функции F_I , а дополнительные комплекты параметров – из условия минимума целевых функций:

$$F_S = \sum_{k=1}^N \left[\frac{S(V_{GSk}, V_{DSk}) - S_k}{S_k} \right]^2; \quad (5)$$

$$F_G = \sum_{k=1}^N \left[\frac{G(V_{GSk}, V_{DSk}) - G_k}{G_k} \right]^2, \quad (6)$$

где S_k и G_k – значения крутизны и выходной проводимости, полученные по результатам эксперимента; $S(V_{GSk}, V_{DSk})$ и $G(V_{GSk}, V_{DSk})$ – значения крутизны и выходной проводимости транзистора, полученные в результате моделирования.

Для решения задачи поиска минимума целевой функции использовался алгоритм Левенберга-Марквардта с дополнительным контролем погрешности результатов моделирования с помощью последовательного уточнения вектора начальных значений определяемых параметров.

Для повышения скорости поиска минимума целевой функции (4) параметры SPICE-модели (1) использовались в качестве начальных приближений для идентификации параметров шаблонной модели β_0 , V_{TH} , λ_0 . Начальные значения эмпирических коэффициентов β_1 и λ_1 принимались равными единице, а β_2 и λ_2 – равными нулю. Для повышения скорости поиска минимума целевых функций (5) и (6) в качестве начальных условий использовался основной комплект параметров, полученный из условия минимума целевой функции (4).

Оценка точности моделей проводилась для каждого набора параметров на основе вычислений

относительных среднеквадратических погрешностей моделирования ВАХ, крутизны и выходной проводимости, которые имеют следующий вид:

$$\sigma_I = \sqrt{\frac{F_{I \min}}{N}}; \sigma_S = \sqrt{\frac{F_{S \min}}{N}}; \sigma_G = \sqrt{\frac{F_{G \min}}{N}},$$

где $F_{I \min}$, $F_{S \min}$ и $F_{G \min}$ – минимальные значения целевых функций F_I , F_S и F_G , соответственно.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для оценки эффективности применения шаблонной модели и дополнительных комплектов параметров при аппроксимации дифференциальных характеристик ПТУП была проведена идентификация параметров и рассчитаны погрешности моделирования комплементарной пары тестовых ПТУП (p -канального и n -канального ПТУП), экспериментальные ВАХ которых приведены в работе [11], а технология изготовления описана в работе [12]. Рассматриваемые транзисторы предназначены для применения в составе ИС операционных усилителей, которые могут функционировать при одновременном воздействии радиации и предельно низких температур вплоть до -197°C [3].

Размеры исследуемых ПТУП: p -канальный ПТУП – ширина канала $W = 50$ мкм, длина канала $L = 6$ мкм; n -канальный ПТУП – ширина канала $W = 260$ мкм, длина канала $L = 8$ мкм. Для идентификации параметров и расчета погрешностей моделей использовались ВАХ тестовых ПТУП, измеренные при комнатной температуре, а также экспериментальные дифференциальные характеристики, полученные с помощью численного дифференцирования измеренных ВАХ.

В табл. 1 и 2 приведены результаты параметрической идентификации ПТУП, полученные для SPICE-модели и шаблонной модели при использовании различных критериев минимизации погрешностей (различных целевых функций F_I , F_S и F_G). Курсивом показаны погрешности моделирования ПТУП, полученные с помощью известной методики параметрической идентификации (применение SPICE-модели и основного комплекта параметров). Погрешности моделирования ПТУП, полученные с помощью предлагаемой методики параметрической идентификации (применение шаблонной модели и дополнительных комплектов параметров), выделены жирным шрифтом.

Таблица 1

Результаты моделирования p -канального ПТУП ($pJFET$)

Модель	SPICE-модель			Шаблонная модель		
	F_I	F_S	F_G	F_I	F_S	F_G
Целевая функция						
β_0 , мкА/В ²	41.86	43.25	21.68	44.95	44.63	25.23
V_{TH} , В	1.794	1.810	2.128	1.729	1.758	1.912
λ_0 , В ⁻¹	0.0302	0.0241	0.0223	0.1267	0.0558	0.1611
β_1 , В ⁻¹	–	–	–	0.0966	0.0482	–0.0624
β_2 , В ⁻²	–	–	–	0.0059	0.0011	0.0022
λ_1 , В ⁻¹	–	–	–	0.0561	0.0629	0.0298
λ_2 , В ⁻²	–	–	–	0.0120	0.0058	0.0071
σ_I , %	2.4	5.4	25	1.2	2.0	14
σ_S , %	3.5	2.8	39	3.1	2.5	20
σ_G , %	70	53	36	17	24	12

Таблица 2

Результаты моделирования n -канального ПТУП ($nJFET$)

Модель	SPICE-модель			Шаблонная модель		
	F_I	F_S	F_G	F_I	F_S	F_G
Целевая функция						
β_0 , мкА/В ²	233.7	248.1	92.54	312.9	351.9	265.6
V_{TH} , В	–1.293	–1.363	–1.622	–1.177	–1.170	–1.241
λ_0 , В ⁻¹	0.1215	0.0759	0.0862	0.6870	0.3863	0.8924
β_1 , В ⁻¹	–	–	–	0.1781	0.1977	0.1091
β_2 , В ⁻²	–	–	–	0.1010	0.0809	0.1411
λ_1 , В ⁻¹	–	–	–	0.3521	0.3802	0.3561
λ_2 , В ⁻²	–	–	–	0.0895	0.0799	0.0809
σ_I , %	9.0	15	35	5.5	9.0	19
σ_S , %	12	9.5	50	10	8.0	31
σ_G , %	87	57	40	17	25	10

Из табл. 1 и 2 следует, что применение шаблонной модели позволяет повысить как точность аппроксимации ВАХ, так и точность аппроксимации дифференциальных характеристик для обоих типов тестовых ПТУП. Использование дополнительных комплектов параметров, полученных с помощью критериев (5) и (6), обеспечивает дополнительное повышение точности моделирования дифференциальных характеристик ПТУП.

Сравнительный анализ погрешностей, приведенных в табл. 1 и 2, показывает, что предлагаемая методика параметрической идентификации позволяет повысить точность моделирования выходной проводимости по сравнению с точностью, полученной для SPICE-модели, примерно в 6 раз для p -канального ПТУП и в 8 раз для n -канального ПТУП. Точность моделирования дифференциальной крутизны при использовании предлагаемой методики возрастает приблизительно в 1.5 раза по сравнению с точностью, полученной для SPICE-модели, как для p -канального, так и для n -канального ПТУП.

Для качественного подтверждения высокой точности предлагаемой методики параметрической идентификации ПТУП на рис. 1 представлены

экспериментальные дифференциальные характеристики и расчетные дифференциальные характеристики, полученные для SPICE-модели с основным комплектом параметров и для шаблонной модели с дополнительными комплектами параметров.

V. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Практическое применение рассматриваемых ПТУП лежит в области разработки ИС малошумящих операционных усилителей, поэтому для доказательства эффективности предлагаемой методики параметрической идентификации особый интерес представляет исследование точности моделирования собственных коэффициентов усиления по напряжению K_V тестовых ПТУП с помощью известной и предлагаемой методики.

Экспериментальные значения собственных коэффициентов усиления по напряжению определялись по экспериментальным значениям крутизны и выходной проводимости:

$$K_{V,k} = \frac{S_k}{G_k}$$

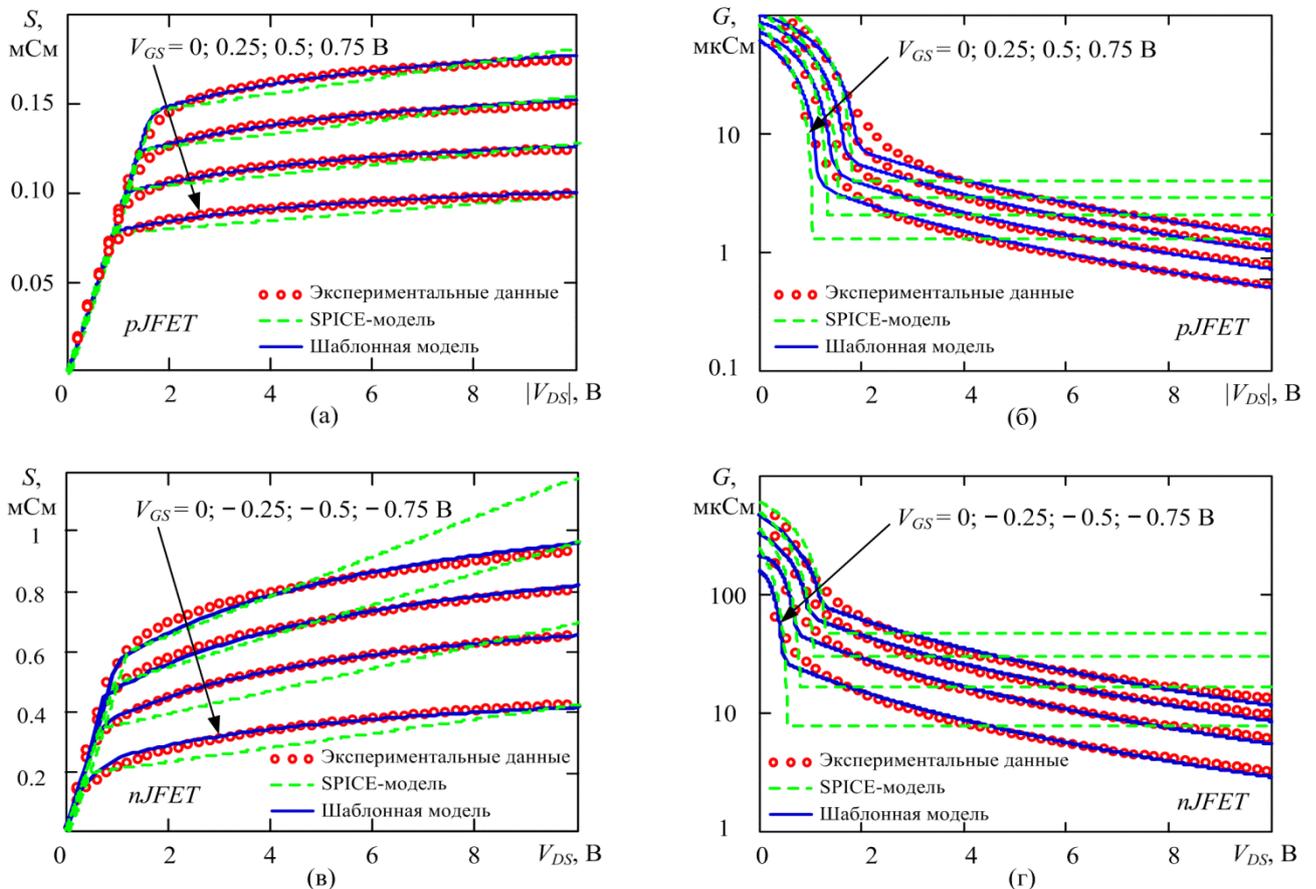


Рис. 1. Дифференциальные характеристики p -канального ПТУП (а, б) и n -канального ПТУП (в, г)

Расчетные значения собственных коэффициентов усиления вычислялись на основе результатов моделирования крутизны и выходной проводимости:

$$K_V(V_{GS,k}, V_{DS,k}) = \frac{S(V_{GS,k}, V_{DS,k})}{G(V_{GS,k}, V_{DS,k})}$$

На рис. 2 представлены экспериментальные и расчетные зависимости собственных коэффициентов усиления тестовых ПТУП от напряжения сток-исток при различных значениях напряжения затвор-исток.

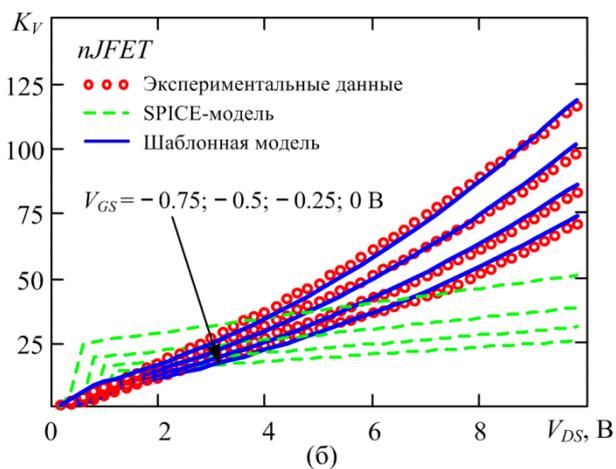
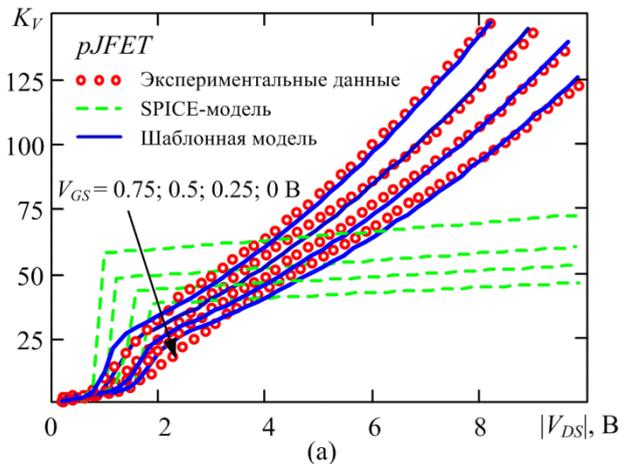


Рис. 2. Собственные усиления *p*-канального ПТУП (а) и *n*-канального ПТУП (б)

Из рис. 2 видно, что значения собственных коэффициентов усиления, полученные на основе шаблонной модели с дополнительными комплектами параметров, значительно лучше соответствуют экспериментальным данным, чем значения, вычисленные с помощью SPICE-модели и основного комплекта параметров. Относительные среднеквадратические погрешности моделирования собственных коэффициентов усиления тестовых ПТУП с помощью предлагаемой методики не превышают 10 % независимо от типа канала, в то время как аналогичные погрешности, полученные при использовании SPICE-модели, могут достигать 100 % и более.

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе показано, что применение шаблонной модели позволяет обеспечить повышение точности аппроксимации дифференциальных характеристик комплементарных ПТУП (выходной проводимости – в 6 – 8 раз, крутизны – в 1.5 раза) по сравнению с результатами, полученными для SPICE-модели. Достигнутое повышение точности аппроксимации дифференциальных характеристик обеспечивает уменьшение погрешностей моделирования собственных коэффициентов усиления комплементарных ПТУП и, соответственно, погрешностей моделирования аналоговых ИС, содержащих данные ПТУП как минимум в 6 раз по сравнению со стандартной методикой.

Шаблонная модель включает в себя параметры исходной SPICE-модели и не более четырех эмпирических параметров. Поскольку параметры SPICE-модели (1) можно использовать в качестве начальных приближений при идентификации физических параметров шаблонной модели, а число эмпирических параметров шаблонной модели невелико для ее параметрической идентификации, можно использовать стандартные алгоритмы оптимизации, например, алгоритм Левенберга-Марквардта.

Следует отметить, что для реализации потенциальной точности шаблонной модели при аппроксимации дифференциальных характеристик комплементарных ПТУП в данной работе было предложено для одного и того же компонента использовать дополнительные комплекты параметров шаблонной модели, полученные отдельно для крутизны и выходной проводимости. Поскольку различным комплектам параметров соответствуют различные независимые целевые функции, оптимизация которых может выполняться параллельно, длительность параметрической идентификации растет несущественно, также как и общее время моделирования соответствующей интегральной схемы.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-19-00122-П).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Makris N., Bucher M., Jazaeri F., Sallese J. CJM: A Compact Model for Double-Gate Junction FETs // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2019. V. 7. P. 1191–1199.
- [2] Makris N., Chevas L., Bucher M. Compact Modeling of Low Frequency Noise and Thermal Noise in Junction Field Effect Transistors // ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), Cracow, Poland. 2019. P. 198–201.
- [3] Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бугакова А.В., Будяков П.С. Модернизация конструкций биполярных и полевых транзисторов BiJFET технологического процесса для работы в условиях проникающей радиации и низких температур // Радиоэлектронная техника. 2018. № 1(11). С. 27–32.
- [4] Петросянец К.О., Исмаил-заде М.Р., Самбурский Л.М., Харитонов И.А. SPICE-модели полевых транзисторов со структурой MOSFET и JFET для расширенного диапазона температуры до -200°C // Проблемы разработки

- перспективных микро- и нанoeлектронных систем. 2018. Вып. 3. С. 111–117.
- [5] Бирюков В.Н., Пилипенко А.М., Семерник И.В., Шеховцова И.В. Диагностика дифференциальных параметров моделей полевых транзисторов // Радиотехника и электроника. 2015. Т. 60. № 8. С. 865–872.
- [6] Денисенко В.В. Компактные модели МОП-транзисторов для SPICE в микро- и нанoeлектронике. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 408 с.
- [7] Pilipenko A.M., Biryukov V.N., Prokopenko N.N. A Template Model of Junction Field-Effect Transistors for a Wide Temperature Range // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia. 2019. P. 1–4.
- [8] Van den Bosch S., Martens L. Approximation of State Functions in Measurement-Based Transistor Model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. V. 47. № 1. P. 14–17.
- [9] Massobrio G., Antognetti P. Semiconductor Device Modeling with SPICE, 2nd ed. McGraw-Hill, 1993.
- [10] Бирюков В.Н., Пилипенко А.М., Прокопенко Н.Н., Дворников О.В. Шаблонная модель комплементарных полевых транзисторов с управляющим р-п-переходом // Журнал радиоэлектроники. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/5/text.pdf> (дата обращения: 01.04.2020).
- [11] 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), Batumi, Georgia. 2019. P. 1–4.
- [12] Lovshenko I.Y., Khanko V.T., Stempitsky V.R. Radiation influence on electrical characteristics of complementary junction field-effect transistors exploited at low temperatures // Materials Physics & Mechanics. 2018. V. 39. № 1. P. 92–101.

Application of the Template Model for Approximation of Differential Characteristics of Complementary JFETs

A.M. Pilipenko¹, N.N. Prokopenko², P.S. Budyakov³

¹Institute of Radio Engineering Systems and Control of Southern Federal University, Taganrog, ampilipenko@sfnu.ru

²Don State Technical University, Rostov-on-Don

³JSC Scientific and Production Enterprise «Pulsar», Moscow

Abstract — The problems of modeling the complementary junction field-effect transistors (JFETs), which are used for processing the signals from sensors of various physical quantities in radiation-hardened integrated circuits (IC) of operational amplifiers with particularly low level of intrinsic noise, are considered in this paper.

The goal of the work is to increase the accuracy of approximation of the differential characteristics (output conductance and transconductance) of complementary JFETs using the template model. To achieve this aim, the parameters and the errors of approximation of static and differential characteristics of complementary JFETs were estimated using the SPICE-model and the template model by means of various minimization criteria. Besides, an analysis of accuracy of modeling the own gain of complementary JFETs has been carried out.

To create a template model, it is necessary to replace parameters of the initial physical model by the fractionally rational functions of control voltages (relations of power series). This replacement allows ensuring the monotonicity of I-V characteristics of the obtained model. The number of additional empirical parameters in the obtained template model is small (no more than four), which makes it possible to use standard minimum search algorithms for parametric identification, for example, the Levenberg-Marquardt algorithm.

It is shown in this work, that the use of the template model with additional sets of parameters obtained separately for each differential characteristic allows increasing the accuracy

of the differential characteristics of complementary JFETs approximation (6 – 8 times for output conductance and 1.5 times for transconductance) in comparison with the results obtained for the SPICE-model. The achieved increase of accuracy of the differential characteristics approximation allows reducing the errors of modeling the own gains of the complementary JFETs and also the errors of modeling analog ICs, which include this JFETs, at least 6 times in comparison with the known technique.

Keywords — junction field-effect transistor, template model, parametric identification, method of least squares, transconductance, output conductance

REFERENCES

- [1] Makris N., Bucher M., Jazaeri F., Sallese J. CJM: A Compact Model for Double-Gate Junction FETs // IEEE Journal of the Electron Devices Society. 2019. V. 7. P. 1191–1199.
- [2] Makris N., Chevas L., Bucher M. Compact Modeling of Low Frequency Noise and Thermal Noise in Junction Field Effect Transistors // ESSDERC 2019 – 49th European Solid-State Device Research Conference (ESSDERC), Cracow, Poland. 2019. P. 198–201.
- [3] Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Bugakova A.V., Budyakov P.S. Modernizaciya konstrukcij bipolyarnyh i polevyh tranzistorov BiJFET tekhnologicheskogo processa dlya raboty v usloviyah pronikayushchej radiacii i nizkih temperatur (Modernization of designs of bipolar and field-effect transistors of BiJFET technological process for work in the conditions of the penetrating radiation and low

- temperatures) // Radioelektronnaya tekhnika. 2018. № 1(11). S. 27–32 (in Russian).
- [4] Petrosyants K.O., Ismail-zade M.R., Sambursky L.M., Kharitonov I.A. SPICE-modeli polevykh tranzistorov so strukturoj MOSFET i JFET dlya rasshirenogo diapazona temperatury do -200°C (SPICE-Models of Field-Effect Transistors with MOSFET and JFET Structures in the Temperature Range down to -200°C) // Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem. 2018. Vyp. 3. S. 111–117 (in Russian).
- [5] Biryukov V.N., Pilipenko A.M., Semernik I.V., Shekhovtsova I.V. Diagnostika differentsial'nykh parametrov modelej polevykh tranzistorov (Diagnostics of differential parameters in models of field-effect transistors) // Radiotekhnika i elektronika. 2015. T. 60. № 8. S. 865–872 (in Russian).
- [6] Denisenko V.V. Kompaktnye modeli MOP-tranzistorov dlya SPICE v mikro- i nanoelektronike (Compact models of MOSFETs for SPICE in micro- and nanoelectronics). M.: FIZMATLIT, 2010. 408 s. (In Russian).
- [7] Pilipenko A.M., Biryukov V.N., Prokopenko N.N. A Template Model of Junction Field-Effect Transistors for a Wide Temperature Range // 2019 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Batumi, Georgia. 2019. P. 1–4.
- [8] Van den Bosch S., Martens L. Approximation of State Functions in Measurement-Based Transistor Model // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1999. V. 47. № 1. P. 14–17.
- [9] Massobrio G., Antognetti P. Semiconductor Device Modeling with SPICE, 2nd ed. McGraw-Hill, 1993.
- [10] Biryukov V.N., Pilipenko A.M., Prokopenko N.N., Dvornikov O.V. Shablonnaya model' komplementarnykh polevykh tranzistorov s upravlyayushchim p-n-perekhodom (Template model of complementary field-effect transistors with a control pn junction) // Zhurnal Radioelektroniki. 2019. № 8. Available at: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/5/text.pdf> (access date: 01.04.2020). (In Russian).
- [11] 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), Batumi, Georgia. 2019. P. 1–4.
- [12] Lovshenko I.Y., Khanko V.T., Stempitsky V.R. Radiation influence on electrical characteristics of complementary junction field-effect transistors exploited at low temperatures // Materials Physics & Mechanics. 2018. V. 39. № 1. P. 92–101.