

УДК 621.372.061

ПРИМЕНЕНИЕ МОДИФИЦИРОВАННОЙ ФУНКЦИИ ГИПЕРБОЛИЧЕСКОГО ТАНГЕНСА ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ВОЛЬТАМПЕРНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

В.И. Туев, М.В. Южанин

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

E-mail: mxm@ms.tusur.ru

Предложено единое аналитическое выражение, позволяющее аппроксимировать вольтамперные характеристики полевых транзисторов во всей области допустимых напряжений при прямом и инверсном включении. Погрешность аппроксимации не превышает 20 % в области рабочих напряжений на затворе при положительных и отрицательных напряжениях на стоке.

Ключевые слова:

Нелинейные искажения, радиосигналы, вольтамперные характеристики, полевые транзисторы, аппроксимация.

Для расчета нелинейных искажений в устройствах усиления, регулирования амплитуды, синхронного детектирования радиосигналов на полевых транзисторах (ПТ) необходимо иметь математическую функцию, описывающую вольтамперные характеристики (ВАХ) во всей области допустимых напряжений при прямом и инверсном (противоположная полярность напряжения на стоке) включении транзисторов.

Широко используемые для аппроксимации передаточных ВАХ ПТ степенные функции [1–4], обладая погрешностью аппроксимации до 10 % в рабочей области для малосигнальных режимов работы ПТ, имеют количественное и качественное (рис. 1, а) расхождение экспериментальных и расчетных данных при значениях напряжений на затворе U_3 меньших напряжения отсечки U_0 и больших нуля, что ограничивает возможности их использования при моделировании транзисторов в системах автоматизированного проектирования.

В работах [5–8] для аппроксимации ВАХ ПТ применена функция гиперболического тангенса, позволяющая сохранять характер зависимости расчетных характеристик транзисторов в указанных областях. Вместе с тем, для описания выходных ВАХ ПТ в прямом и инверсном режимах работы используется два различных выражения, обозначенных в подписи к рис. 1, б, как F_1 и F_2 соответственно [5].

В месте сопряжения этих функций в точке с нулевым стоковым потенциалом результирующая функция и ее производные имеют разрыв, что затрудняет использование такой аппроксимации для расчета нелинейных искажений, в частности, пассивных аттенюаторов, в которых ПТ функционируют при нулевом стоковом напряжении.

В настоящей работе предложено единое аналитическое выражение, позволяющее аппроксимировать вольтамперные характеристики одно- и двухзатворных полевых транзисторов во всех обла-

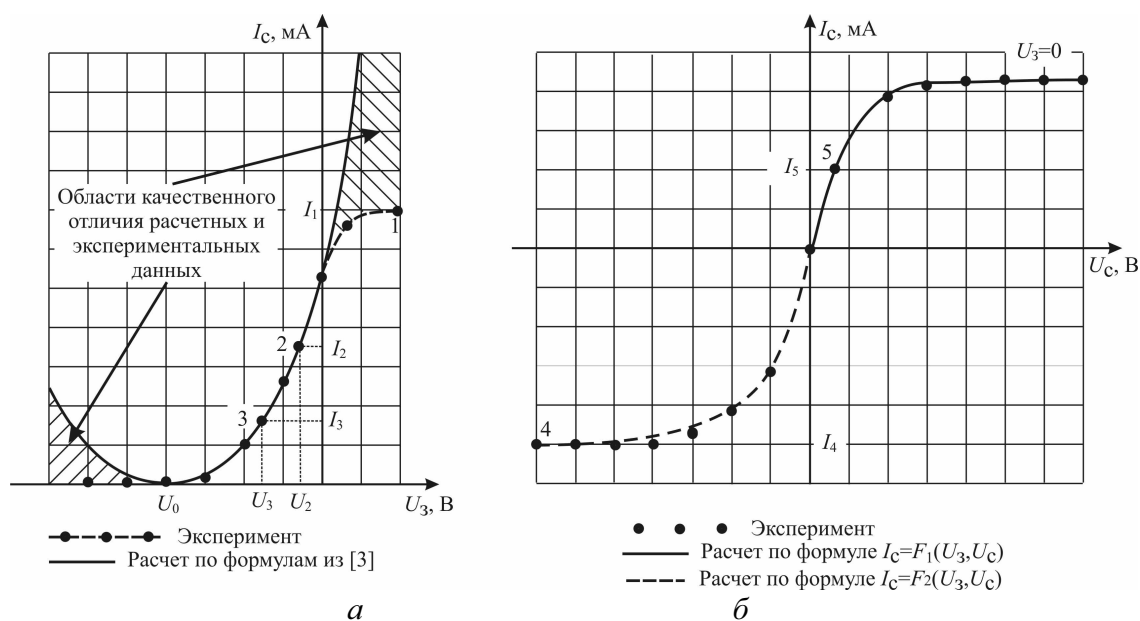


Рис. 1. Вольтамперные характеристики полевых транзисторов

стях допустимых напряжений на электродах при прямом и инверсном включении.

В основу предложенного выражения положено известное разложение функции гиперболического тангенса в виде отношения суммы и разности экспонент [9]. Модификация исходного выражения состоит в добавлении функционально зависимого коэффициента при первом слагаемом и, в общем случае не единичного по значению, коэффициента при втором слагаемом в числителе. Полученный при этом функционал, пригодный для описания зависимости тока стока I_c от напряжений на стоке U_c , первом затворе U_{31} полевых триодов и втором затворе U_{32} полевых тетродов относительно истока имеет вид:

$$I_c(U_c, U_{31}, U_{32}) = \frac{A_1(U_{31}, U_{32}) \cdot e^{B \cdot U'_c(U_{31}, U_{32})} + A_2 \cdot e^{-B \cdot U'_c(U_{31}, U_{32})}}{e^{B \cdot U'_c(U_{31}, U_{32})} - e^{-B \cdot U'_c(U_{31}, U_{32})}} \times (U_{32} - D \cdot U_{02}), \quad (1)$$

где

$$A_1(U_{31}, U_{32}) = \frac{A_3 \cdot e^{E \cdot U_{31}}}{e^{E \cdot U_{31}} - e^{-E \cdot U_{31}}} \cdot (U_{32} - G \cdot U_{02}); \quad (2)$$

$$U'_{31} = U_{31} - F \cdot U_{01}; \quad (3)$$

$$U'_c(U_{31}, U_{32}) = U_c - \frac{\ln(A_1(U_{31}, U_{32})) - \ln(A_2)}{2 \cdot B \cdot U_{31}} \cdot U_{01}; \quad (4)$$

A_2, A_3, B, D, E, F, G – числовые коэффициенты; U_{01}, U_{02} – напряжения отсечки соответственно по первому и второму затворам.

Функция $A_1(U_{31}, U_{32})$ в (1) описывает зависимость тока стока от напряжения на затворе (U_{31}) полевых триодов. Совместно с сомножителями ($U_{32} - D \cdot U_{02}$) и ($U_{32} - G \cdot U_{02}$) выражение (2) описывает зависимость тока стока от напряжений на первом (U_{31}) и втором (U_{32}) затворах полевых тетродов относительно истока. При аппроксимации ВАХ полевых триодов эти сомножители исключаются.

Экспоненциальные составляющие $e^{\pm B \cdot U'_c(U_{31}, U_{32})}$ и $e^{\pm E \cdot U_{31}}$ в (1) и (2) соответственно характеризуют выходные ВАХ как при прямом, так и при инверсном включении транзистора. Коэффициенты B и E определяют угол наклона выходных и передаточной ВАХ соответственно.

Коэффициент F в (3) определяет точку пересечения передаточной ВАХ с горизонтальной осью.

Численные значения коэффициентов A_2, A_3, B, D, E, F, G вычисляются по экспериментально измеренным характеристикам. Например, для полевых триодов коэффициенты A_3, E и F определяются по трем характерным точкам на передаточной вольтамперной характеристике (рис. 1, а): максимальный ток стока I_1 (точка 1), точка 2 с половинным значением максимального тока $I_2 = 0,5 I_1$, соответствующая напряжению на затворе U_2 , и точка 3 (I_3, U_3), ограничивающая снизу наиболее линейную

часть передаточной ВАХ. Численные значения коэффициентов A_3 и F рассчитываются по формулам

$$A_3 = I_1; \quad F = \frac{U_2}{U_{01}}.$$

Значение коэффициента E выбирается в интервале 0,75...1,5 по критерию минимума среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных данных в точках 2 и 3.

Коэффициенты A_2 и B определяются по двум точкам на выходной вольтамперной характеристике (рис. 1, б): максимальный ток стока в инверсном включении I_4 (точка 4) и точка 5 с половинным значением максимального тока при прямом включении $I_5 = 0,5 I_4$. Значение коэффициента A_2 определяется по формуле

$$A_2 = |I_4|.$$

Значение коэффициента B выбирается в интервале 0,6...0,95 по критерию минимума среднеквадратичного отклонения расчетных и экспериментальных данных в точке 5 и в начале координат.

Численные значения коэффициентов аппроксимации, найденные по этой методике, и напряжений отсечки для некоторых типов ПТ приведены в таблице.

Таблица. Численные значения коэффициентов и напряжений отсечки для аппроксимации ВАХ некоторых типов полевых транзисторов

Тип ПТ	A_2	A_3	B	D	E	F	G	Напряжение отсечки, В
АПЗ26А	10^{-3}	0,103	0,8	–	0,75	0,25	–	$U_{01} = -4$
АП604	0,2	0,13	0,9	–	1	0,5	–	$U_{01} = -4$
АПЗ28	1	$11 \cdot 10^{-3}$	0,7	0,476	1,2	0,55	1	$U_{01} = -2,5$ $U_{02} = -2,1$

На рис. 2–4 приведены экспериментальные и рассчитанные в соответствии с (1)–(4) и данными таблицы характеристики СВЧ полевых триодов и тетрода с затворами Шоттки. Экспериментальные данные взяты из [5, 6] и [4] соответственно.

Погрешность аппроксимации не превышает 20 % во всем диапазоне рабочих напряжений на электродах при прямом и инверсном включении транзисторов. Также достигнуто качественное совпадение экспериментальных и расчетных данных при напряжениях на затворе в пределах допустимых значений.

Заключение

Предложено единое аналитическое выражение с использованием модифицированной функции гиперболического тангенса, позволяющее аппроксимировать вольтамперные характеристики полевых триодов (тетродов) во всей области допустимых напряжений на затворе (затворах) и стоке при прямом и инверсном включении. Погрешность аппроксимации не превышает 20 %.

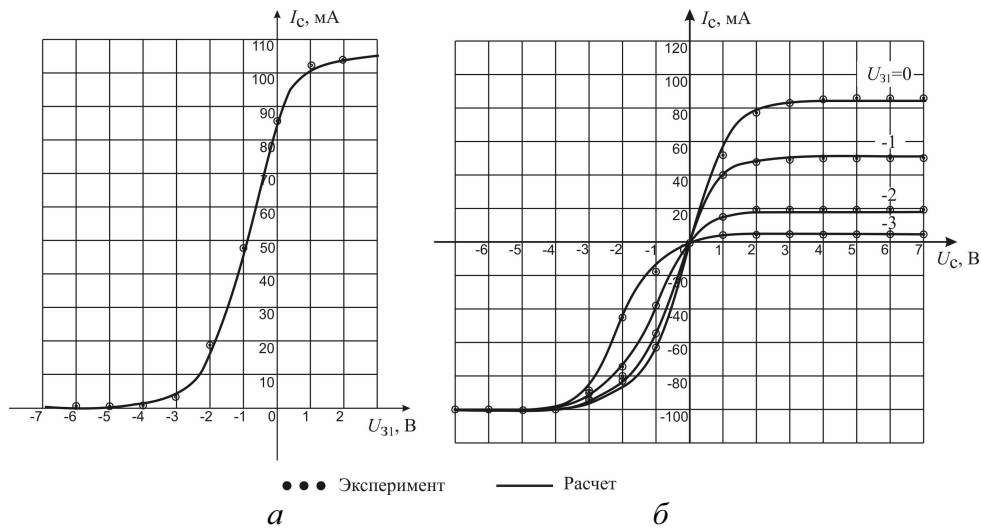


Рис. 2. Передаточная (а) и выходные (б) ВАХ триода 6П326А

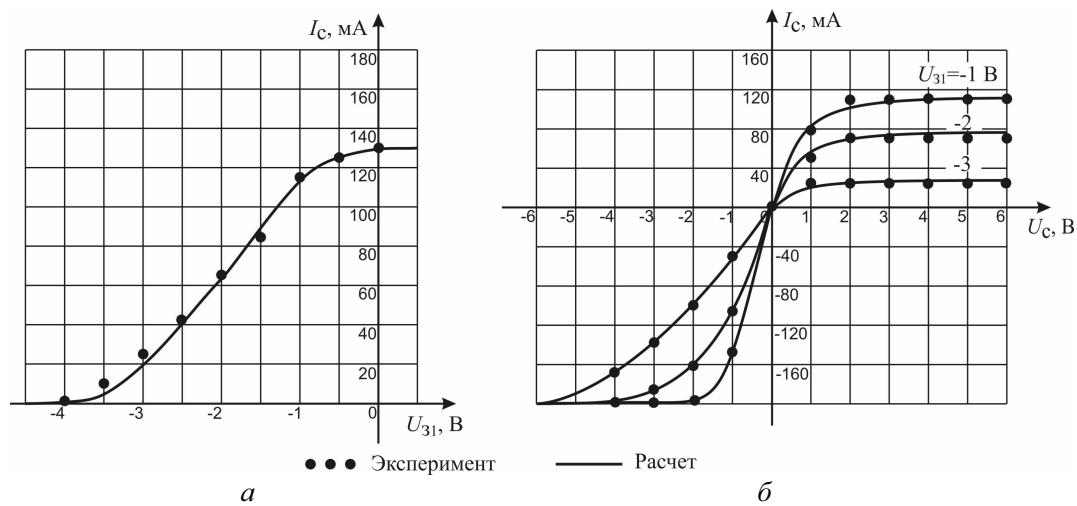


Рис. 3. Передаточная (а) и выходные (б) ВАХ триода 6П604

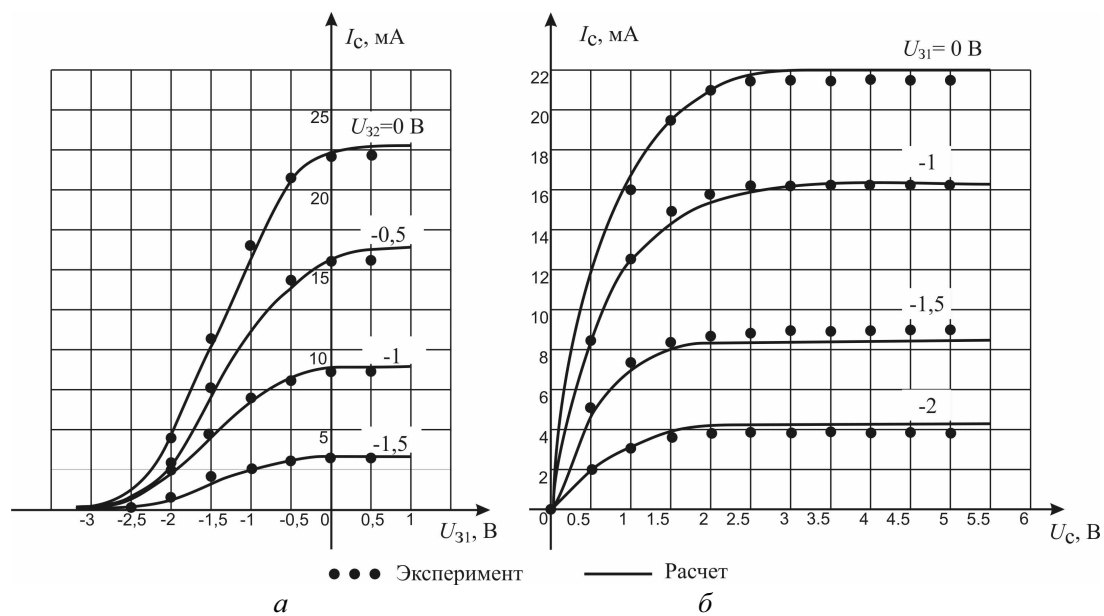


Рис. 4. Передаточные (а) и выходные (б) ВАХ тетрода 6П328А

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туев В.И. Учет насыщения дрейфовой скорости носителей при аппроксимации вольт-амперных характеристик полевых транзисторов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2007. – № 1(15). – С. 51–56.
2. Жаркой А.Г., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик МДП-полевых транзисторов // Известия вузов. Сер. Радиоэлектроника. – 1988. – № 5. – С. 69–70.
3. Жаркой А.Г., Туев В.И. Аппроксимация вольт-амперных характеристик GaAs ПТШ со стабильными областями отрицательного сопротивления // Техника средств связи. Сер. Радиоизмерительная техника. – 1988. – Вып. 8. – С. 36–41.
4. Жаркой А.Г., Пушкарёв В.П., Туев В.И. Аппроксимация и расчет нелинейных токов в полевых тетрадах // Радиотехника. – 1988. – № 4. – С. 10–13.
5. Балдин В.А., Лазунин Ю.А. Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов с затвором Шоттки // Радиотехника. – 1990. – № 8. – С. 23–25.
6. Балыко А.К., Ковтунов Д.А., Тагер А.С. Вольт-амперные характеристики полевых транзисторов при отрицательных напряжениях сток-исток // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. – 1989. – Вып. 5(419). – С. 16–17.
7. Схемотехника устройств на мощных полевых транзисторах: Справочник / В.В. Бачурин, В.Я. Ваксенбург, В.П. Дьяконов. – М.: Радио и связь, 1994. – 280 с.
8. Шустов М.А., Шустов А.М. Аппроксимация семейства ВАХ полевых транзисторов экспоненциально-логарифмическим уравнением // Энергетика: экология, надежность, безопасность: Матер. VIII Всеросс. научно-техн. конф. – 4–6 декабря 2002 года, Томск: ТПУ, 2002. – Т. 1. – С. 31–34.
9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. – М.: Гос. изд-во физ.-мат. лит-ры, 1962. – 609 с.

Поступила 16.01.2009 г.

УДК 621.31

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА КОНТРОЛЯ ЭНЕРГОПРЕОБРАЗУЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА

Ю.М. Казанцев^{2,3}, Ю.А. Кремзуков^{1,2}

¹НИИ автоматики и электромеханики при ТУСУР, г. Томск

²Томский политехнический университет

³Научно-производственный центр «Полюс», г. Томск

E-mail: Kremzukov@niiam.tomsk.ru

Рассмотрена автоматизированная система контроля, предназначенная для автоматизированного функционального контроля, исследований и испытаний систем электропитания космического аппарата. Показано, что использование данной системы позволяет расширить область исследования и настройки системы электропитания, сэкономить рабочее время и повысить надежность космического аппарата.

Ключевые слова:

Автоматизированная система контроля, система электропитания, космический аппарат, имитатор.

Одной из основных систем любого космического аппарата (КА) является система электропитания (СЭП), любые сбои в работе, которой приводят к нарушению других систем, а при ее отказе к завершению срока активного существования [1, 2].

В связи с наметившейся тенденцией увеличения мощности бортового оборудования и срока активного существования КА сформировался системный подход в проектировании СЭП КА. Для повышения надежности работы СЭП КА на орбите на всех этапах исследований, экспериментальных отработок и испытаний используются специализированное оборудование, обладающие высокой скоростью обработки информации, отвечающие современным требованиям по электромагнитной совместимости и соответствующие установленной мощности СЭП КА [2, 3].

В состав СЭП входят три основных элемента [2]:

- первичный источник энергии (солнечная батарея);

- вторичный источник энергии (аккумуляторная батарея);
- комплекс автоматики, стабилизации и защиты.

По мере накопления опыта по исследованию космического пространства стало очевидным, что полная физическая имитация требует слишком больших затрат. К примеру использование солнечной батареи в качестве первичного источника энергии СЭП КА в наземных условиях требует использования специальных стендовых устройств (мощных осветителей, систем термостабилизации и др.) для обеспечения заданных условий освещенности и температуры, что экономически нецелесообразно и технически трудно осуществимо. Поэтому наряду с физическим моделированием стали развиваться другие направления. Например, метод имитационно-физического моделирования, при котором отдельные компоненты системы электропитания заменялись эквивалентном (имитатором). Имитатор