

УДК 621.396.6

Ю.С. Ямпольский, канд. техн. наук, проф.,
К.Я. Мамедов, канд. техн. наук, доц.,
В.В. Корна, магистр,
Одес. нац. политехн. ун-т

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ В ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВАХ

Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, В.В. Корна. Дослідження інтермодуляційних спотворень в телекомунікаційних пристроях. Розроблено алгоритм розрахунку динамічного діапазону радіочастотних підсилювачів по інтермодуляційній складовій 3-го порядку. Запропонований метод дозволяє проводити попередню оцінку потенційно можливого динамічного діапазону по інтермодуляції 3-го порядку радіочастотного підсилювача, виконаного на тому чи іншому польовому транзисторі.

Ключові слова: інтермодуляція, динамічний діапазон, радіочастотний підсилювач, електромагнітна сумісність, інтермодуляційна складова, параметр нелінійності.

Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, В.В. Корна. Исследование интермодуляционных искажений в телекоммуникационных устройствах. Разработан алгоритм расчета динамического диапазона радиочастотных усилителей по интермодуляционной составляющей 3-го порядка. Предложенный метод позволяет проводить предварительную оценку потенциально достижимого динамического диапазона по интермодуляции 3-го порядка радиочастотного усилителя, выполненного на том или ином полевым транзисторе.

Ключевые слова: интермодуляция, динамический диапазон, радиочастотный усилитель, электромагнитная совместимость, интермодуляционная составляющая, параметр нелинейности

Yu.S. Yampolsky, K.Ya. Mamedov, W.W. Korna. Study of intermodulation distortion in telecommunication devices. A algorithm for calculating the dynamic range by intermodulation component of the 3rd order of RF amplifiers. The proposed method allows you to conduct a preliminary assessment of the potential dynamic range by intermodulation component of the 3rd order of a RF amplifier performed upon a particular field-effect transistor.

Keywords: intermodulation, dynamic range, the RF amplifier, electromagnetic compatibility, intermodulation products, the nonlinearity parameter.

Практически во всех современных телекоммуникационных устройствах широко используются полевые транзисторы (ПТ), например, в усилительно-преобразовательных трактах цифровых радиоприемников и радиопередатчиков.

Поскольку эти радиотехнические устройства (РТУ) функционируют в условиях сложной помеховой обстановки, то возникает проблема обеспечения их электромагнитной совместимости (ЭМС).

Важный показатель ЭМС РТУ — линейность его проходной характеристики, которую обычно оценивают величиной динамического диапазона d_3 по интермодуляционным составляющим третьего порядка (ИМСЗ) [1, 2]. Известны наиболее важные методики определения d_3 радиочастотных усилителей (РЧУ) [3, 4]. Они основаны на экспериментальных измерениях.

Предлагается метод теоретического расчета d_3 РЧУ на ПТ по его паспортным данным. Это позволит оценить потенциальные возможности РЧУ, выполненного на заданном типе транзистора. Кроме того, даст возможность определить оптимальную область значений напряжений смещения и возбуждения, при которых реализуется максимальное значение d_3 .

Динамический диапазон d_3 непосредственно связан с параметром нелинейности ПТ следующим соотношением [1]

$$H_{03} = \frac{1}{d_3} \frac{4}{U_{c3}^2}, \quad (1)$$

где H_{03} — параметр нелинейности третьего порядка;
 U_{c3} — амплитуда интермодулирующего сигнала.

Параметр нелинейности H_{03} определяется на основе анализа проходной вольт-амперной характеристики (ВАХ) ПТ РЧУ в соответствии с выражением [2]

$$H_{03} = \frac{1}{2} \frac{S''}{S}, \quad (2)$$

где S — крутизна проходной ВАХ исследуемого ПТ в рабочей точке;
 S'' — вторая производная крутизны S .

Заменив амплитудное значение U_{c3} на действующее и приравняв выражения (1) и (2), получим

$$H_3 = \frac{S''}{S} = \frac{1}{d_3} \frac{8}{(U_{c3 \text{ дейст.}})^2}, \quad (3)$$

связывающее динамический диапазон d_3 и $\frac{S''}{S}$.

Представляет интерес получить аналитические соотношения, позволяющие вычислять параметр $\frac{S''}{S}$.

Основная трудность заключается в нахождении аналитического выражения проходной ВАХ различных типов ПТ и определении крутизны S , а также ее производных. Для упрощения задачи принято, что работа исследуемого ПТ осуществляется на частотах намного ниже его граничной частоты f_T . Это позволит пренебречь влиянием инерционных явлений на его характеристики.

Аппроксимация проходной ВАХ ПТ означает подмену реальной зависимости тока стока от напряжения на его затворе $I_C(U_{зи})$ на некоторую достаточно простую математическую зависимость $I_C(U_{зи})$.

При анализе нелинейных РЧУ наиболее часто используются методы аппроксимации проходных ВАХ экспоненциальными, тригонометрическими или степенными полиномами, сплайн-функциями, функциями специального вида, функциональными рядами и др.

Выбирая тот или иной метод аппроксимации, необходимо учитывать следующие требования: точность расчетов $\leq 10\%$, возможность определения аналитического выражения для крутизны S и ее первых двух производных, которые не должны иметь точек разрыва.

Проанализировав существующие методы аппроксимации, пришли к выводу о целесообразности применения логарифмически-экспоненциальной аппроксимации [5], которую удобно представить в обобщенном виде

$$y(x) = a \ln \{1 + \exp[b(x - x_0)]\}, \quad (4)$$

где x_0 — абсцисса точки пересечения двух прямых;

a и b — коэффициенты, позволяющие задавать резкость перехода от одной прямой к другой.

Данная аппроксимация обладает интересным свойством. Она описывает две прямые на плоскости, плавно переходящие друг в друга. Используя несколько членов уравнения (4), можно описывать функции, представляемые несколькими отрезками прямых. Так, используя два члена, можно описать проходную ВАХ ПТ (рис. 1)

$$I_c(U_{зи}) = k_1 \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{S_1(U_{зи} - U_1)}{k_1} \right] \right\} + k_2 \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{(S_2 - S_1)(U_{зи} - U_2)}{k_2} \right] \right\}, \quad (5)$$

где $k_1 = \frac{\Delta I_1}{\ln 2}$;

$$k_2 = \frac{-\Delta I_2}{\ln 2};$$

$$S_1 = \frac{(I_2 - I_1)}{(U_2 - U_1)};$$

$$S_2 = \frac{(I_3 - I_2)}{(U_3 - U_2)}.$$

1, 2, 3 — индексы, соответствующие номерам точек на рисунке.

Как известно, крутизну $S = \frac{dI_c}{dU_{зи}}$ определяют с помощью проходной ВАХ $I_c(U_{зи})$.

Аналитическое выражение крутизны проходной ВАХ ПТ определяется дифференцированием уравнения (5) и введением обозначений $\gamma = \exp \left[\frac{S_1(U_{зи} - U_1)}{k_1} \right]$ и $\eta = \exp \left[\frac{(S_2 - S_1)(U_{зи} - U_2)}{k_2} \right]$.

Тогда

$$S(U_{зи}) = S_1 \frac{\gamma}{1 + \gamma} + (S_2 - S_1) \frac{\eta}{1 + \eta}. \quad (6)$$

Соотношение (6) позволяет найти первую и вторую производные для крутизны S проходной ВАХ ПТ. Для упрощения процесса дифференцирования выполнена замена $\frac{\gamma}{1 + \gamma} = \gamma_1$ и

$\frac{\eta}{1 + \eta} = \eta_1$. Уравнение (6) принимает вид

$$S(U_{зи}) = S_1 \gamma_1 + (S_2 - S_1) \eta_1. \quad (7)$$

Тогда выражения для первой (8) и второй (9) производных крутизны

$$S'(U_{зи}) = \frac{S_1^2 \gamma_1^2}{k_1 \gamma} + \frac{(S_2 - S_1)^2 \eta_1^2}{k_2 \eta}, \quad (8)$$

$$S''(U_{зи}) = \frac{S_1^3}{k_1^2} (\gamma_1 - 3\gamma_1^2 + 2\gamma_1^3) + \frac{(S_2 - S_1)^3}{k_2^2} (\eta_1 - 3\eta_1^2 + 2\eta_1^3). \quad (9)$$

С использованием соотношений (7) и (9) получено аналитическое выражение для функции параметра нелинейности ПТ $H_3(U_{зи})$

$$H_3(U_{зи}) = \frac{\frac{S_1^3}{k_1^2} (\gamma_1 - 3\gamma_1^2 + 2\gamma_1^3) + \frac{(S_2 - S_1)^3}{k_2^2} (\eta_1 - 3\eta_1^2 + 2\eta_1^3)}{S_1 \gamma_1 + (S_2 - S_1) \eta_1}. \quad (10)$$

Таким образом, полученные соотношения (8)...(10) позволяют аналитически определять значения параметров S , S'' и H_3 , используя известную проходную ВАХ данного ПТ. Кроме этого, для РЧУ и преобразователей частоты особую важность представляет собой отношение $\frac{S'}{S}$ — параметр нелинейности второго порядка [2], характеризующий уровень интермодуляционных составляющих второго порядка (ИМС2),

$$H_2 = \frac{1}{4} \frac{S'}{S} = \frac{1}{4} \frac{k_1 \gamma + \frac{S_1^2 \gamma_1^2 + (S_2 - S_1)^2 \eta_1^2}{S_1 \gamma_1 + (S_2 - S_1) \eta_1}}{S_1 \gamma_1 + (S_2 - S_1) \eta_1}. \quad (11)$$

Возможности практического применения предложенной методики показаны на примере ПТ типа КП901А [6], значения проходной ВАХ при $U_{си} = 15\text{ В}$ приведены в таблице

Значения проходной ВАХ ПТ КП901 при $U_{си} = 15\text{ В}$

$U_{зи}, \text{В}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_C, \text{мА}$	0	48.5	146.5	270	410	550	685	820	950	1050	1100

На основе (5) получено выражение для аппроксимации проходной ВАХ транзистора КП901А

$$I_C(U_{зи}) = 0,07 \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{0,136(U_{зи} - 1)}{0,07} \right] \right\} + (-0,058) \ln \left\{ 1 + \exp \left[\frac{(0 - 0,136)(U_{зи} - 9,1)}{(-0,058)} \right] \right\}. \quad (12)$$

Приведены рассчитанная с помощью уравнения (12) и справочная проходная ВАХ ПТ КП901А (рис. 2).

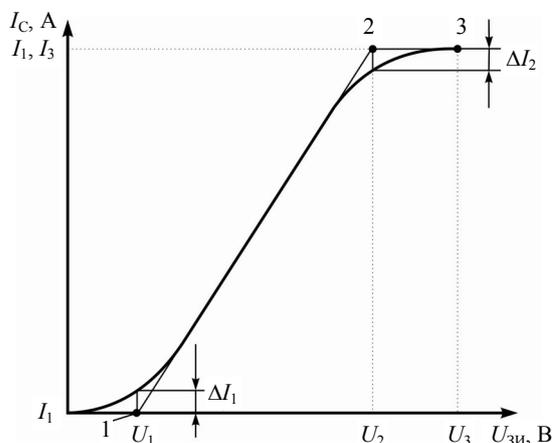


Рис. 1. Графическое определение коэффициентов аппроксимации

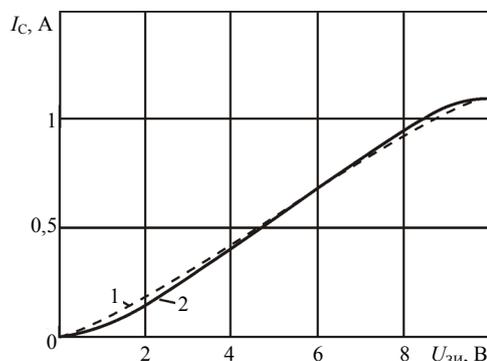


Рис. 2. График проходной ВАХ ПТ КП901: справочной (1) и рассчитанной по уравнению (12) (2)

Их сравнение указывает на достаточно высокую точность аппроксимации проходной ВАХ по уравнению (12).

Аналогичным образом, использованием коэффициентов аппроксимации из уравнения (12), проведен расчет зависимостей $S(U_{зи})$, $S''(U_{зи})$ и $H_3(U_{зи})$. Результаты расчетов представлены в графическом виде (рис. 3 и 4).

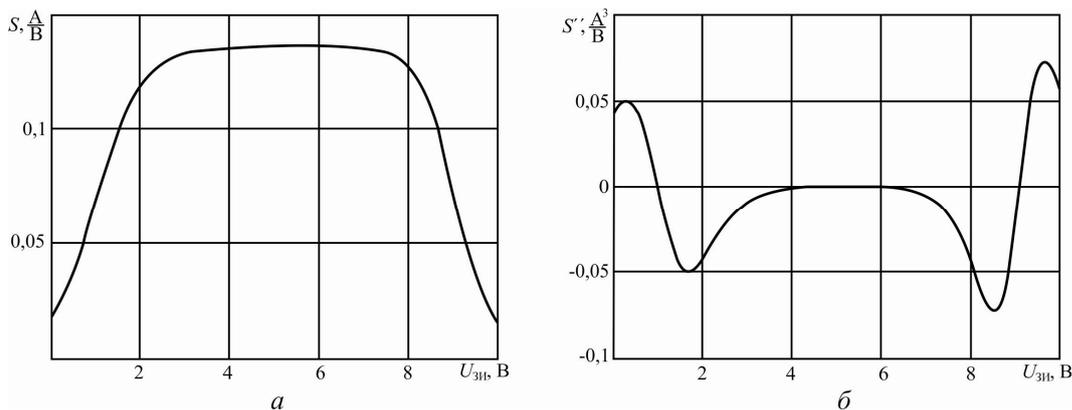


Рис. 3. Графики крутизны $S(U_{зи})$ (а) и второй производной крутизны $S''(U_{зи})$ (б) для транзистора КТ901

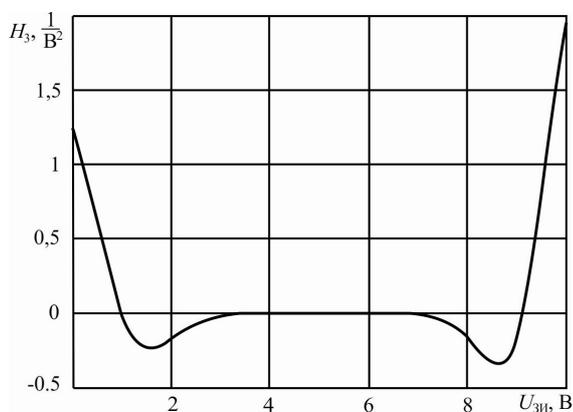


Рис. 4. График параметра нелинейности $H_3(U_{зи})$

Видно, что крутизна S проходной ВАХ ПТ имеет на затворе некоторый диапазон напряжений $U_{зи}$, в котором неизменны S и, соответственно, коэффициент усиления радиочастотного усилителя. Таким образом, существует область оптимальных режимов, в которой обеспечивается линейное усиление сигналов УМ на данном типе ПТ.

На графике (рис. 4) видно существенное уменьшение параметра нелинейности $H_3(U_{зи})$ в диапазоне $U_{зи} = 3...7$ В, что соответствует увеличению ДД по ИМС₃ на этом участке. Так, при амплитуде входных сигналов $U_{с3} = 0,5$ В и напряжении смещения $U_{зи} = 5$ В рассчитанное по формулам (3) и (10) значение d_3 составило – 73 дБ. В крайних точках области линейного усиления при $U_{зи} = 4$ и 6 В значения d_3 составили соответственно –63 и –60 дБ.

Экспериментальное измерение параметра d_3 для конкретного ПТ показало, что при амплитуде входного сигнала $U_{с3} = 0,5$ В и напряжениях смещения на затворе $U_{зи} = 4, 5$ и 6 В соответственно составило: –61, –69 и –62 дБ. Сравнение расчетных и экспериментальных значений указывает на хорошее совпадение теории и эксперимента.

Таким образом, предложенный метод приближенного расчета параметра d_3 позволяет проводить предварительную оценку потенциального ДД по ИМС₃ РЧУ, выполненного на том или ином ПТ. Кроме того, появляется возможность определить область вероятных оптимальных значений напряжения смещения и амплитуды входного сигнала, действующих на затворе ПТ, при которых реализуется максимальный ДД по ИМС₃ РЧУ.

Литература

1. Систематизация показателей, характеризующих динамический диапазон радиотехнических устройств по интермодуляции / [Н.А. Саргасов, И.М. Симонтов, Г.И. Невмержицкий, А.И. Тихонов] // Техника средств связи. Сер. ТРС. — 1982. — Вып. 10(30). — С. 79 — 81.

2. Голубев, В.Н. Оптимизация главного тракта радиоприемного устройства / В.Н. Голубев. — М.: Радио и связь, 1987. — 144 с.
3. Allison, B. Test Procedures Manual / B. Allison, M. Tracy, M. Gruber. — American Radio Relay League. — 2010. — 163 p.
4. Ямпольский, Ю.С. Определение динамического диапазона радиочастотных усилителей / Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, С.С. Дрозд // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 2008. — Вып. 2(30). — С. 185—186.
5. Дьяконов, В.П. Нелинейная аппроксимация передаточных и выходных характеристик мощных МДП-транзисторов / В.П. Дьяконов, В.Ю. Смердов, О.А. Фролков // Полупроводниковая электроника в технике связи / Под. ред. И.Ф. Николаевского. — М.: Связь, 1985. — Вып.25. — С. 163 — 167.
6. Полупроводниковые приборы. Транзисторы средней и большой мощности: Справочник / А.А. Зайцев, А.И. Миркин, В.В. Мокряков. — М.: Радио и связь, 1989. — 640 с.

References

1. Sistematizatsiya pokazateley, kharakteriziruyushchikh dinamicheskiiy diapazon radiotekhnicheskikh ustroystv po intermodulyatsii [Systematization of Indicators Describing the Dynamic Range of Radio Engineering Devices by Intermodulation] / [N.A. Sartasov, I.M. Simontov, G.I. Nevmerzhitskiy, A.I. Tihonov] // Tekhnika sredstv svyazi. Ser. TRS [Communication Facilities]. — 1982. — Issue 10(30). — pp. 79 — 81.
2. Golubev V.N. Optimizatsiya glavnogo trakta radiopriemnogo ustroystva [Optimization of the Main Tract of Radio Receiver] / V.N. Golubev. — Moscow, 1987. — 144 p.
3. Allison B. Test Procedures Manual / B. Allison, M. Tracy, M. Gruber. — American Radio Relay League. — 2010. — 163 p.
4. Yampolskiy Yu.S. Opredelenie dinamicheskogo diapazona radiochastotnykh usiliteley [Determination of the Dynamic Range of RF Amplifiers] / Yu.S. Yampolskiy, K.Ya. Mamedov, S.S. Drozd // Proc. of Odessa Polytech. Univ. — Odessa, 2008. — Issue 2(30). — pp. 185 — 186.
5. D'yakonov V.P. Nelineynaya approksimatsiya peredatochnykh i vykhodnykh kharakteristik moshchnykh MDP-tranzistorov [Non-linear Approximation of the Transfer and Output Characteristics of Power MOS Transistors] / V.P. D'yakonov, V.Yu. Smerdov, O.A. Frolkov // Poluprovodnikovaya elektronika v tekhnike svyazi [Solid-State Electronics in Communications Technology] / Edited by I.F. Nikolaevskiy. — Moscow, 1985. — Issue 25. — pp. 163 — 167.
6. Poluprovodnikovye pribory. Tranzistory sredney i bol'shoy moshchnosti: Spravochnik [Semiconductors. Transistors of Medium and High Power: A Handbook] / A.A. Zaytsev, A.I. Mirkin, V.V. Mokryakov. — Moscow, 1989. — 640 p.

Рецензент д-р техн. наук, проф. Одес. нац. политехн. ун-та Баранов П.Е.

Поступила в редакцию 12 октября 2011 г.