

УДК 621.375

Ю.С. Ямпольский, канд. техн. наук, проф.,
К.Я. Мамедов, канд. техн. наук, доц.,
С.С. Дрозд, инженер,
Одес. нац. политехн. ун-т

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ДИАПАЗОНА РАДИОЧАСТОТНЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, С.С. Дрозд. **Визначення динамічного діапазону радіочастотних підсилювачів.** Розглянуто взаємозв'язок методів розрахунку динамічного діапазону радіочастотних підсилювачів за інтермодуляційною складовою третього порядку (ІМС₃). Пропонуються співвідношення, які здійснюють взаємний перерахунок різних методів визначення динамічного діапазону за ІМС₃.

Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, С.С. Дрозд. **Определение динамического диапазона радиочастотных усилителей.** Рассмотрена взаимосвязь методов расчета динамического диапазона радиочастотных усилителей по интермодуляционной составляющей третьего порядка (ИМС₃). Предлагаются соотношения, осуществляющие взаимный пересчет различных методов определения динамического диапазона по ИМС₃.

Yu.S. Yampolskiy, K.Ya. Mamedov, S.S. Drozd. **Determining the dynamic range of radio-frequency amplifiers.** The interrelation of the methods of calculating the dynamic range of radiofrequency amplifiers by intermodulation component of the 3rd order (IMC₃) is considered. The ratios which carry out mutual conversion of various methods of determining of the dynamic range by IMC₃ are proposed.

Одной из актуальных проблем современной радиоэлектроники является обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) радиотехнических устройств. Важный показатель ЭМС радиочастотного усилителя (РЧУ) приемопередающей аппаратуры — линейность его передаточной характеристики, которую обычно оценивают величиной динамического диапазона (ДД₃) по интермодуляционной составляющей третьего порядка (ИМС₃) [1]. Иногда величина ДД₃ искусственно завышена, например, в рекламных проспектах, что затрудняет его объективную оценку.

Представляет интерес разработка единого подхода к определению ДД₃ РЧУ приемопередающей аппаратуры (далее РЧУ), работающей в сложной электромагнитной обстановке (ЭМО).

Очевидно, что должна существовать однозначная связь между методикой оценки ДД₃ по рекомендациям МККР [2] и часто применяемыми методами измерения ДД₃ [3, 4]. В соответствии с этим представляется возможным взаимный пересчет между перечисленными методами определения ДД₃ РЧУ.

Измерение ДД₃ по выходу РЧУ основывается на определении значения амплитуды интермодуляционной составляющей на выходе РЧУ $U_{к3 \text{ вых}}$ при фиксированном значении двух равных выходных уровней интермодулирующих сигналов $U_{с3 \text{ вых}}$ с частотами f_1 и f_2 , находящимися в полосе пропускания контуров РЧУ. При этом существуют несколько критериев оценки ДД₃ РЧУ.

Например, в методе [3] на выходе РЧУ фиксируется уровень $U_{с3 \text{ вых}}$, при котором величина амплитуды $U_{к3 \text{ вых}}$ равна некоторому стандартному значению [1]. Обычно таким стандартным уровнем интермодуляционной составляющей выбирают $U_{к3 \text{ вых}} = 1 \text{ мкВ} = 0 \text{ дБмкВ}$ или $U_{к3 \text{ вых}} = 0,1 \text{ мкВ} = -20 \text{ дБмкВ}$. В этом случае ДД₃ (далее d_3) отсчитывается от уровня $U_{к3 \text{ вых}}$, т.е. $d_3 = U_{с3 \text{ вых}} - U_{к3 \text{ вых}}$, (рис. 1, а). Однако этот метод определения ДД дает существенные численные различия d_3 одного и того же РЧУ при различных значениях $U_{к3 \text{ вых}}$.

Например, если РЧУ имеет уровень интермодулирующих сигналов $U_{с3 \text{ вых}} = 80$ дБмкВ, то при стандартном уровне $U_{к3 \text{ вых}} = 0$ дБмкВ $d_3 = 80$ дБ, что характерно для РЧУ среднего качества. Если же принять $U_{к3 \text{ вых}} = 0,1$ мкВ = -20 дБмкВ, то расчетное численное значение d_3 возрастает до 100 дБ, создавая видимость улучшения ДД₃, хотя режим работы усилителя и сам усилитель остались теми же.

Таким образом, этот метод определения d_3 не позволяет оценить потенциальные возможности РЧУ, который должен работать в сложной помеховой обстановке.

Для объективной оценки ДД РЧУ, способного работать в условиях больших электромагнитных помех и наводок, при измерении ДД максимальный уровень интермодулирующего сигнала на выходе РЧУ $U_{с3 \text{ вых макс}}$ в дБмкВ устанавливается на 20 дБ выше уровня интермодуляционной составляющей $U_{к3 \text{ вых макс}}$ [2], т.е. условный верхний фиксированный динамический диапазон $D_{ф3} = U_{с3 \text{ вых макс}} - U_{к3 \text{ вых макс}} = 20$ дБ. Далее для определения ДД $U_{с3 \text{ вых макс}}$ относят к принятому стандартному значению $U_{к3 \text{ вых}} = 0$ дБмкВ, а ДД определяют как $D_3 = U_{с3 \text{ вых макс}} - 0$ дБмкВ, (см. рисунок 1, б).

Для оценки ДД₃ РЧУ используют также параметр “точка пересечения” (intercept point — IP_3), отражающий теоретическое значение d_3 , при котором уровень интермодулирующего сигнала равен амплитуде интермодуляционной составляющей, т.е. $U_{с3 \text{ вых}} = U_{к3 \text{ вых}}$, [1] (рис. 1, в). Очевидно, что этот параметр также дает достаточно объективную оценку ДД РЧУ, работающего в неблагоприятной ЭМО, или при переходе в режим “большого” сигнала.

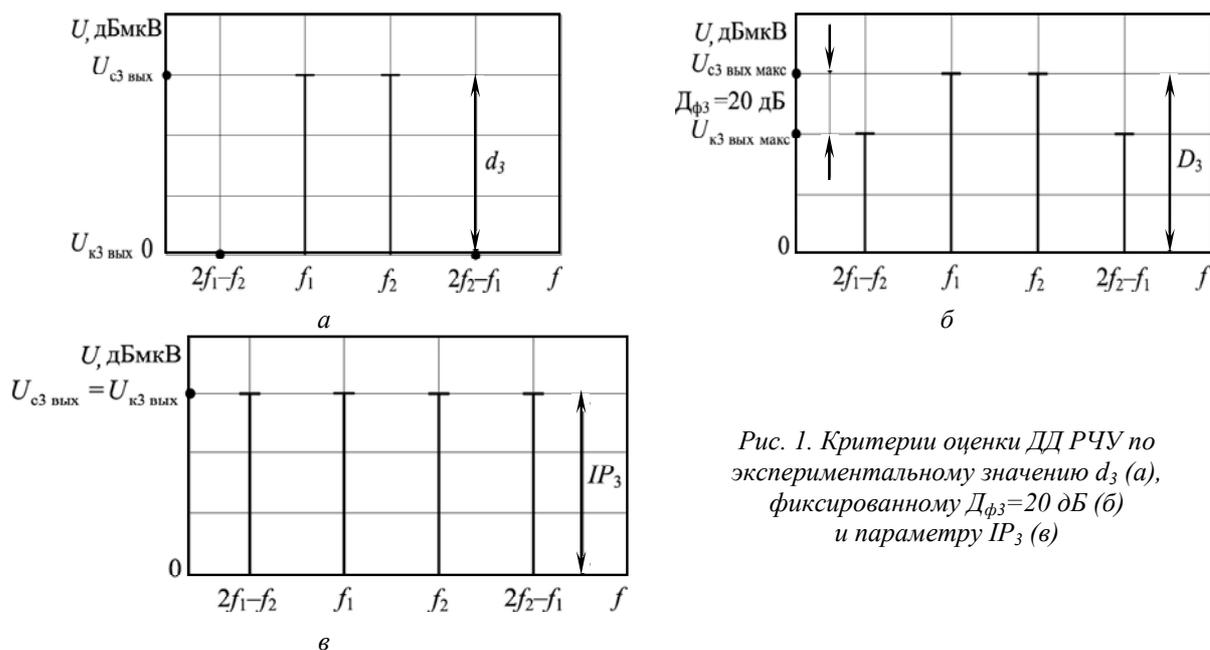


Рис. 1. Критерии оценки ДД РЧУ по экспериментальному значению d_3 (а), фиксированному $D_{ф3} = 20$ дБ (б) и параметру IP_3 (в)

Установим связь между названными методами расчета ДД. Для этого представим параметры ДД по перечисленным критериям в графических координатах (рис. 2).

Для удобства пользования графиком по оси ординат откладываем выходной уровень $U_{с3 \text{ вых}}$ без коэффициента усиления K , приведенный ко входному $U_{с3 \text{ вх}}$. При этом принимается $K=1$, т.е. 0 дБ.

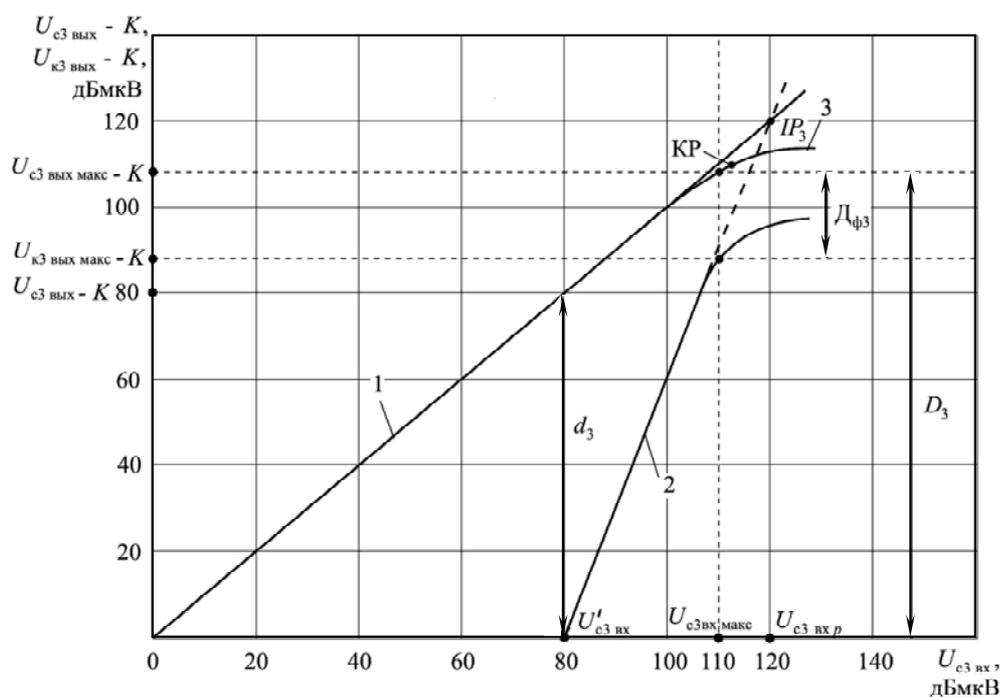


Рис. 2. Графическая интерпретация параметров ДД РЧУ: 1 — нормированная прямая усиления идеального усилителя; 2 — характеристика уровня интермодуляционной составляющей $U_{к3 вых} - K$ на выходе РЧУ; 3 — амплитудная характеристика реального усилителя с точкой компрессии КР

По первому методу [3] исходная величина экспериментального значения d_3 определяется относительно уровня сигнала $U_{с3 вых} - K$ и амплитуды интермодуляционной составляющей $U_{к3 вых}$. В частном случае $d_3 = 80$ дБ для уровня $U_{к3 вых} - K = 0$ дБмкВ при амплитуде входного сигнала $U'_{с3 вх} = 80$ дБмкВ, для которой $U_{с3 вых} - K = 80$ дБмкВ.

По второму методу значение D_3 по рекомендациям МККР [2] находится при обеспечении разности $U_{с3 вых макс} - U_{к3 вых макс}$ по оси $U_{с3 вых} - K$ в 20 дБ. В рассматриваемом примере это соответствует амплитуде входного сигнала $U_{с3 вх макс} = 110$ дБмкВ и условному фиксированному уровню $D_{ф3} = 20$ дБ. Тогда параметр D_3 , отсчитываемый от уровня $U_{к3 вых} - K = 0$ дБмкВ, будет равен 110 дБ.

Определение величины IP_3 по третьему методу [4] очевидно (см. рисунок 2).

Амплитуда сигнала на входе РЧУ однозначно связана с параметром его нелинейности следующим соотношением [1]

$$U_{с3 вх} = \frac{2}{\sqrt{H_{03} D_{ф3}}}, \quad (1)$$

где $H_{03} = \frac{1}{2} \frac{K''}{K}$ — обобщенный параметр нелинейности третьего порядка;

K'' — вторая производная от K по напряжению смещения на управляющем электроде РЧУ, A/V^3 .

Для установления связи между параметрами IP_3 и $U_{с3 вх макс}$ найдем выражение для амплитуды входного сигнала $U_{с3 вх р}$ в точке IP_3 , для чего примем в (1) величину

$$D_{ф3} = \frac{U_{с3 вых}}{U_{к3 вых}} = 1. \text{ Тогда } U_{с3 вх р} = \frac{2}{\sqrt{H_{03}}}.$$

Если принять $D_{\text{фз}} = \frac{U_{\text{сз вых}}}{U_{\text{кз вых}}} = 10$, то $U_{\text{сз вх макс}} = \frac{2}{\sqrt{10H_{03}}}$.

Таким образом, отношение $\frac{U_{\text{сз вх п}}}{U_{\text{сз вх макс}}}$ устанавливает связь между параметрами IP_3 и $U_{\text{сз вх макс}}$ и может быть представлено в виде

$$U_{\text{сз вх п}} = U_{\text{сз вх макс}} \sqrt{10}. \quad (2)$$

После логарифмирования получаем $20 \log(U_{\text{сз вх п}}) = 20 \log(U_{\text{сз вх макс}}) + 10$, что эквивалентно

$$IP_3 = (U_{\text{сз вх макс}} + 10), \text{ дБмкВ}. \quad (3)$$

Связь между IP_3 и d_3 (см. рисунок 2) определяется выражением

$$IP_3 = \frac{d_3}{2} + U'_{\text{сз вх}}, \quad (4)$$

где $U'_{\text{сз вх}}$ — амплитуда интермодулирующего сигнала на входе РЧУ, при которой $U_{\text{кз вых}} - K = 0$ дБмкВ.

После подстановки (3) в (4) для идеального РЧУ получена связь между параметрами d_3 и $U_{\text{сз вх макс}}$

$$U_{\text{сз вх макс}} = \frac{1}{2}d_3 - 10 + U'_{\text{сз вх}}. \quad (5)$$

Однако в реальных РЧУ при сравнительно больших амплитудах $U_{\text{сз вх}}$ наблюдается компрессия выходного сигнала (см. рисунок 2, кривая 3). В этом случае реальный ДД РЧУ относительно нижнего фиксированного уровня интермодуляционной составляющей 0 дБмкВ определяется как

$$D_3 = U_{\text{сз вх макс}} + K' - 0 \text{ дБмкВ, дБ}, \quad (6)$$

где K' — коэффициент усиления РЧУ при амплитуде $U_{\text{сз вх макс}}$.

Обычно в области точки КР значение K уменьшается от десятых долей дБ до 1...2 дБ при максимальной амплитуде $U_{\text{сз вх макс}}$.

Таким образом, используя полученные соотношения и экспериментальное значение d_3 , можно рассчитать динамический диапазон РЧУ по различным критериям: по параметру IP_3 (4), по рекомендациям МККР с фиксированным значением $D_{\text{фз}}=20$ дБ для идеализированного РЧУ (5), а также определить D_3 реального РЧУ в области точки компрессии КР (6).

Для иллюстрации возможностей применения полученных соотношений и их взаимной связи приведены результаты экспериментальных исследований ДД РЧУ на транзисторах типа КП901Б и КТ907А (см. таблицу).

Эксперимент проводился с помощью измерительной установки [5].

Результаты экспериментальных исследований ДД РЧУ

Тип транзистора	d_3 , дБ	$U'_{\text{сз вх}}$, дБмкВ	$U_{\text{сз вх макс}}$, дБмкВ	IP_3 , дБмкВ
КТ 907А	31	100	106,8	115,5
КП 901Б	31	108	115	123,5

По выражению (5) с использованием данных таблицы рассчитано значение $U_{\text{сз вх макс}}$: — для КТ 907А $U_{\text{сз вх макс}} = 1/2 \cdot 31 - 10 + 100 = 105,5$ дБмкВ, а для КП 901Б $U_{\text{сз вх макс}} = 1/2 \cdot 31 - 10 + 108 = 113,5$ дБмкВ. Незначительное различие теоретического и экспериментального значения $U_{\text{сз вх макс}}$ обусловлено компрессией выходного сигнала $U_{\text{сз вых}}$ и погрешностью измерений.

Таким образом, полученные новые соотношения (3), (5), (6) позволяют осуществлять взаимный пересчет различных способов расчета динамического диапазона маломощных и среднemosных радиочастотных усилителей по ИМС₃.

При работе РЭА в сложной помеховой обстановке для единообразной и объективной оценки динамического диапазона радиочастотных усилителей по ИМС₃ целесообразно проводить расчеты ДД, используя экспериментальное значение d_3 и полученные соотношения.

Литература

1. Систематизация показателей, характеризующих динамический диапазон радиотехнических устройств по интермодуляции / [Н.А. Сартасов, И.М. Симонтов, Г.И. Невмержицкий, А.И. Тихонов] // Техника средств связи. Сер. ТРС. — 1982. — Вып. 10(30). — С. 79 — 81.
2. Рекомендации 332-4. Избирательность радиоприемников. Вопросы 49/1, п. 6.4: Интермодуляция / Междунар. консультатив. комитет по радио // Документы XIV Пленарной Ассамблеи МККР. — М.: Связь, 1981. — Т.1. — С. 64 — 65.
3. RA 6790. MF/HF receiver: Проспект / Racal Communications, Inc. — Brighton, NY, USA, 1979 — 10 p.
4. Михайлов, Б.И. Оценка линейности радиоприемных трактов с помощью параметра IP / Б.И. Михайлов, В.С. Маркин, С.П. Смолин // Техника средств связи. Сер. ТРС. — 1981. — Вып. 10(29). — С. 83 — 85.
5. Ямпольский Ю.С. Измеритель амплитудной нелинейности радиочастотных усилителей / Ю.С. Ямпольский, К.Я. Мамедов, С.В. Шеремет // Тр. Одес. политехн. ун-та. — Одесса, 1999. — Вып. 2(18). — С. 197 — 199.

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

Поступила в редакцию 16 сентября 2008 г.