

ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫЕ ИСКАЖЕНИЯ В КЛЮЧЕВЫХ ГЕНЕРАТОРАХ КЛАССА D С РЕЗИСТИВНОЙ НАГРУЗКОЙ В РЕЖИМЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ

DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-10-4-11

Manuscript received 12 August 2022;
Accepted 16 September 2022

Варламов Олег Витальевич,
Московский технический университет связи и
информатики, Москва, Россия,
vov@mtuci.ru

Ключевые слова: интермодуляционные
искажения, ключевой усилитель мощности,
класс D, интернет вещей, 5G

Развитие технологий 5G и интернета вещей приводит к смене традиционной парадигмы частотно-территориального планирования. Действительно, кроме уменьшения расстояния между базовыми станциями сотовой связи, возникает проблема приближения к ним радиосредств подвижных устройств, также как и проблема неконтролируемого сближения произвольного количества радиосредств на подвижных устройствах. Во всех случаях между близко расположенными одновременно работающими передатчиками возникают интермодуляционные искажения. Попадая в полосу приема, они нарушают нормальное функционирование радиооборудования. Поэтому требования к характеристикам электромагнитной совместимости передатчиков непрерывно ужесточаются. Усилители мощности класса D, помимо более высокого КПД и лучшим качественным показателям, потенциально могут иметь более низкий уровень интермодуляционных искажений. В статье рассматриваются интермодуляционные искажения в ранее неисследованных двухтактных ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения. На основе разработанного теоретического подхода проведен анализ зависимости уровней интермодуляционных искажений от разброса параметров электронных компонентов и режима работы схемы. Показано, что для достижения желаемых уровней интермодуляционных искажений, не превышающих -70 дБ, необходимо обеспечить разность сопротивлений насыщения активных элементов не более 20% и отклонение времени насыщения от меандра не более 2 градусов.

Информация об авторе:

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, г. Москва, Россия

Для цитирования:

Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Том 16. №10. С. 4-11.

For citation:

Varlamov O.V. (2022) Intermodulation distortion in voltage mode class d switching amplifiers with resistive load. T-Comm, vol. 16, no.10, pp. 4-11. (in Russian)

Введение

При работе двух или более радиопередатчиков, расположенных в непосредственной близости друг к другу, сигнал одного передатчика наводится в антенне другого. В результате, вследствие нелинейности выходной цепи усилителя мощности, образуются дополнительные спектральные составляющие, излучаемые передатчиком и ухудшающие условия электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств. Эти составляющие принято называть интермодуляционными искажениями (в англоязычной научнотехнической литературе: reverse intermodulation distortions - RIMD) [1-3].

Развитие технологий 5G и интернета вещей (IoT, Internet of Things) [4-9] приводит к смене традиционной парадигмы частотно-территориального планирования [4]. Действительно, кроме уменьшения расстояния между базовыми станциями сотовой связи, возникает проблема приближения к ним радиосредств подвижных устройств, в частности, БПЛА. В "умном доме" робот-пылесос может приблизиться к "умной розетке". Беспилотные автомобили также могут находиться на малой дистанции.

Во всех этих случаях между близко расположенными одновременно работающими передатчиками возникают интермодуляционные искажения. Если они попадают в полосу приема, они нарушают нормальное функционирование радиооборудования и встроенных приемников GPS [5-7, 10]. Кроме того, в системах с несколькими входами и несколькими выходами (Multiple-Input Multiple-Output, MIMO) также предъявляются специфические требования к фильтрам, полностью исключающие возможность использования объемной фильтрации. Это приводит к еще более высоким требованиям к характеристикам усилителей мощности (УМ).

Стандарт ETSI EN 300086 [11] определяет понятие интермодуляционного затухания, как способности усилителя сопротивляться генерации компонентов RIMD при наличии мешающего сигнала на его выходе. В этом стандарте также представлена схема измерительной установки и даны примеры допустимых величин RIMD для некоторых случаев.

В частности:

- в целом коэффициент интермодуляционного затухания должен быть не менее 40,0 дБ для любой интермодуляционной составляющей;
- для оборудования базовой станции, предназначенного для использования в особых условиях эксплуатации (например, в местах, где будет работать более одного передатчика), коэффициент интермодуляционного затухания должен составлять не менее 70,0 дБ для любой интермодуляционной составляющей.

Отмечено [11], что требуемые характеристики могут быть обеспечены дополнительными внутренними или внешними изолирующими устройствами (например, циркуляторами), которые уменьшают используемую полосу частот и увеличивают стоимость и габариты устройства.

Некоторые производители полупроводниковых компонентов, в частности RFMD, указывают значение Reverse Intermodulation Product для своих микросхем (например, в спецификации RF3267, 3V W-CDMA linear PA module).

Наибольший КПД ВЧ усилителя мощности может быть достигнут при работе его активных элементов в ключевых

режимах, а именно в классах D, E, F [12-13]. Для работы с современными сигналами связи и вещания [14-18] следует использовать ключевые усилители мощности в составе устройств, реализующих синтетические методы усиления [19-26].

В дополнение к более высокому КПД и лучшим качественным показателям [28 - 30] ключевые усилители мощности потенциально могут иметь большее интермодуляционное затухание по сравнению с линейными, работающими в классах A, AB или B. Экспериментальное исследование обратных интермодуляционных искажений в линейном усилителе класса A и в ключевом усилителе мощности класса D с переключением тока (Current Mode Class D - CMCD) описано в [27].

Обратные интермодуляционные искажения в ключевом усилителе мощности класса D с переключением напряжения (Voltage Mode Class D - VMCD) еще не исследовались. В частности, не определены зависимости уровней интермодуляционных искажений от неидеальностей параметров элементов и режимов работы.

В данной статье рассматривается теоретический подход к расчету обратных интермодуляционных искажений в ключевом усилителе мощности класса D с переключением напряжения. В разделе II на основе рассмотрения схем замещения для различных этапов работы записаны выражения для выходного спектра. В разделе III рассмотрены зависимости RIMD от неидеальностей параметров элементов и режимов работы. В разделе IV приводятся выводы по работе.

Вывод выражений для анализа

В литературе отсутствуют работы, посвященные теоретическому анализу интермодуляционных искажений в ключевых генераторах с учетом неидеальности параметров элементов и режимов работы.

Сложившийся метод построения широкодиапазонных транзисторных радиопередатчиков определяет их структуру. Так мощности нескольких усилительных ячеек (обычно это двухтактные схемы) складываются с помощью трансформаторной системы сложения. Полученная мощность через фильтр гармоник и согласующее устройство подается в антенну [22].

В общем случае анализ интермодуляционных искажений в такой системе весьма сложен, однако представляется достаточным провести исследование для одной двухтактной схемы. Дело в том, что фильтрующая система и система сложения мощности определенным образом трансформируют для двухтактной схемы как входное сопротивление антенны, так и уровень наведенной на антенну ЭДС. В результате для каждой двухтактной схемы имеется определенное сопротивление нагрузки R_L и определенная амплитуда наведенной ЭДС с ее внутренним сопротивлением Z_i .

На рисунке 1 приведена упрощенная схема выходной цепи ключевого генератора, отражающая проникновение внешней ЭДС в коллекторную цепь. Здесь ключевой генератор (КГ) имеет нагрузку R_L , куда от внешнего источника подается сигнал через некоторое сопротивление Z_i .

Для облегчения анализа искажений в схеме Рис. 1 введем следующие допущения:

1. Модель транзистора представляется идеальным ключом SW с сопротивлением $r_{on} = r_{sat}$ (см. рис. 2).

2. Уровень наведенной ЭДС считаем настолько малым, что транзисторы остаются работать в ключевом режиме, причем степень насыщения, а также длительность этапа насыщения не меняются за период сигнала помехи.

3. Источник наведенных колебаний представляет собой моногармоническую ЭДС с резистивным внутренним сопротивлением R_i . (полагаем, что исследуемые сигналы находятся в полосе пропускания фильтрующих цепей радиопередатчика).

4. Добротность цепей, определяющих R_i , настолько мала, что переходными процессами при переключении ключей можно пренебречь.

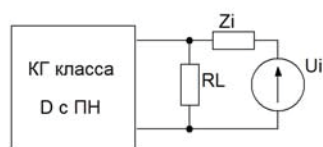


Рис. 1. Упрощенная схема выходной цепи КГ с наведенной внешней ЭДС



Рис. 2. Модель транзистора

Значение R_i , включающее в себя сопротивление системы сложения, фильтра гармоник, согласующего устройства, антенны и тракта распространения может быть легко определено в каждом конкретном случае экспериментально, либо расчетным путем методами теории линейных электрических цепей. Для конкретного определения уровней интермодуляционных искажений рассмотрим различные схемы ключевых генераторов и разные режимы их работы.

Эквивалентная схема ключевого генератора с переключением напряжения (ПН) может быть представлена в виде, показанном на рисунке 3а. Здесь же приведена цепь подачи внешней ЭДС к нагрузке. В таком каскаде рекомендуется поддерживать длительность этапа насыщения каждого ключа $\tau_{sat} \leq \pi$ [9, 12], поэтому на рисунке 3 б-г приведены эквивалентные схемы для всех возможных сочетаний положения ключей SW1 и SW2.

Как нетрудно видеть, сопротивление нагрузки для генератора внешней ЭДС является нелинейным, что неизбежно вызывает появление дополнительных спектральных составляющих в токе нагрузки. Выражение, описывающее ток в нагрузке, вызванный наведенной ЭДС, в общем случае можно представить в виде:

$$I(t) = I_m(t) \cos \omega t, \quad (1)$$

где ωt – частота наведенной ЭДС, $I_m(t)$ – амплитуда тока в нагрузке, зависящая от положения ключей SW1 и SW2.

Основываясь на эквивалентных схемах (рис. 3 б-г), можно составить выражения, описывающие амплитуду тока мешающего сигнала в нагрузке для всех трех рабочих этапов схемы.

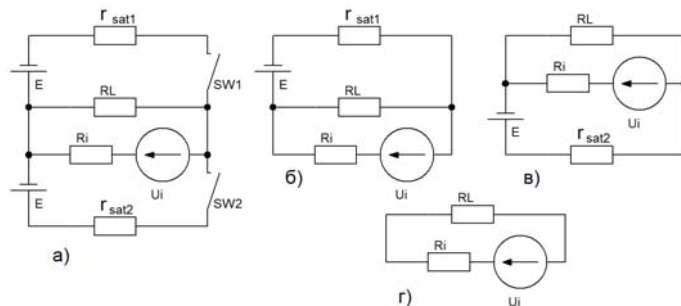


Рис. 3. Эквивалентные схемы КГ с ПН: а – общая; б), в) и г) – для всех возможных комбинаций положений ключей SW1 и SW2

$$I_{m1} = \frac{U_i}{R_L} \left(\frac{1}{1 + R_i \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_{on1}} \right)} \right), \quad (2)$$

$$I_{m2} = \frac{U_i}{R_L} \left(\frac{1}{1 + R_i \left(\frac{1}{R_L} + \frac{1}{r_{on2}} \right)} \right), \quad (3)$$

$$I_{m3} = \frac{U_i}{R_L + R_i}. \quad (4)$$

Для реальных условий эксплуатации при наличии разброса параметров транзисторов времена нахождения каждого транзистора в насыщении не одинаковы, т.е. $\tau_{sat1} \neq \tau_{sat2}$, а также $r_{on1} \neq r_{on2}$.

Принимая это во внимание, можно построить эпюры амплитуд тока помехи в нагрузке (см. Рис. 4). Для Рис. 4 введем следующие обозначения:

$$t_0 = 0; t_1 = \tau_{sat1}; t_2 = T/2; t_3 = \tau_{sat2} + T/2; t_4 = T,$$

где T – период рабочей частоты генератора, t_{sat1} и t_{sat2} – длительность замкнутого состояния ключей SW1 и SW2 соответственно.

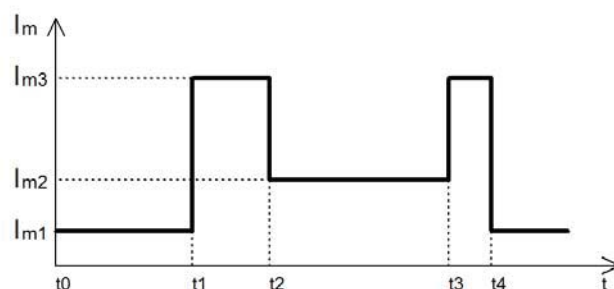


Рис. 4. Диаграмма амплитуд тока помехи в нагрузке

Для упрощения последующих выкладок положим $U_i = 1$.

Проведя преобразование Фурье над сигналом, изображенным на рисунке 4, получим

$$I_{m(t)} = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + A_{2n} \sin n\omega t), \quad (5)$$

где ω – рабочая частота ключевого генератора,

$$A_0 = \frac{I_{m1}\tau_{sat1}}{T} + \frac{I_{m2}\tau_{sat2}}{T} + I_{m3} \left(1 - \frac{\tau_{sat1}}{T} - \frac{\tau_{sat2}}{T}\right), \quad (6)$$

$$A_n = \frac{I_{m1}}{n\pi} \sin \frac{2n\pi\tau_{sat1}}{T} + \frac{(-1)^n I_{m2}}{n\pi} \sin \frac{2n\pi\tau_{sat2}}{T} - \frac{I_{m3}}{n\pi} \sin \frac{2n\pi\tau_{sat1}}{T} - \frac{(-1)^n I_{m3}}{n\pi} \sin \frac{2n\pi\tau_{sat2}}{T}, \quad (7)$$

$$A_{2n} = \frac{I_{m1}}{n\pi} \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau_{sat1}}{T}\right) - \frac{(-1)^n I_{m3}}{n\pi} + \frac{I_{m3}}{n\pi} \cos \frac{2n\pi\tau_{sat1}}{T} + \frac{(-1)^n I_{m2}}{n\pi} \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau_{sat2}}{T}\right) + \frac{I_{m3}}{n\pi} \left((-1)^n \cos \frac{2n\pi\tau_{sat2}}{T} - 1\right), \quad (8)$$

Подставляя (5) в (1), после несложных преобразований получаем:

$$I_{(t)} = A_0 \cos \omega t + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{A_n}{2} \cos(n\omega \pm \omega_i)t + \frac{A_{2n}}{2} \sin(n\omega \pm \omega_i)t \right]. \quad (9)$$

Анализируя выражения (6) – (9), можно отметить, что в нагрузке усилителя при воздействии сторонней ЭДС кроме составляющей с частотой помехи ω_i возникает ряд спектральных составляющих с частотами $n\omega \pm \omega_i$. Эти составляющие и являются интермодуляционными искажениями, которые могут излучаться передатчиком. Уровень этих искажений зависит как от параметров элементов ключевого генератора $r_{on1}, r_{on2}, R_L, R_i$, так и от режима работы τ_{sat1}, τ_{sat2} .

Запишем выражение для тока интермодуляционных искажений в нагрузке в следующем виде.

$$I_{i(t)} = \frac{1}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{A_{1n}^2 + A_{2n}^2} \cos(n\omega \pm \omega_i)t. \quad (10)$$

Поскольку уровни интермодуляционных искажений оцениваются относительно сигнала помехи, проникающего в нагрузку, определим эти искажения следующим образом:

$$K_{in} = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{A_{1n}}{I_{m3}}\right)^2 + \left(\frac{A_{2n}}{I_{m3}}\right)^2}. \quad (11)$$

Здесь в качестве нормирующего множителя используется амплитуда сигнала помехи на нагрузке при снятом напряжении возбуждения ключевого генератора (ключи SW1 и SW2 разомкнуты).

Преобразование формулы (11) с использованием (2) – (4) и (6) – (8) позволяет получить окончательное выражение, описывающее уровни интермодуляционных искажений в ключевом генераторе с ПН в зависимости от параметров $r_{on1}, r_{on2}, \tau_{sat1}, \tau_{sat2}, R_L, R_i$:

$$K_{in} = \frac{1}{2n\pi} \sqrt{\left[\left[(C_1 - 1) \sin 2n\pi\tau_{sat1}'' + (-1)^n (C_2 - 1) \sin 2n\pi\tau_{sat2}'' \right]^2 + \left[(C_1 - 1) + (-1)^n (C_2 - 1) + (1 - C_1) \cos 2n\pi\tau_{sat1}'' + (-1)^n (1 - C_2) \cos 2n\pi\tau_{sat2}'' \right]^2 \right]^{1/2}} \quad (12)$$

Здесь

$$C_1 = \frac{r_{on1}'' + r_{on1}'' R_i''}{r_{on1}'' + r_{on1}'' R_i'' + R_i''}, C_2 = \frac{r_{on2}'' + r_{on2}'' R_i''}{r_{on2}'' + r_{on2}'' R_i'' + R_i''},$$

$$\tau_{sat1}'' = \frac{\tau_{sat1}}{T}, \tau_{sat2}'' = \frac{\tau_{sat2}}{T} - \text{нормированное время насыщения}$$

ключей SW1, SW2;

$$r_{on1}'' = \frac{r_{on1}}{R_L}, r_{on2}'' = \frac{r_{on2}}{R_L} - \text{нормированное сопротивление}$$

насыщения ключей SW1, SW2;

$$R_i'' = \frac{R_i}{R_L} - \text{нормированное внутренне сопротивление ис-}$$

точника наведенной ЭДС.

Результаты расчетов

Для оценки допустимых величин разброса параметров и режимов работы ключевых генераторов с точки зрения обеспечения требуемого уровня интермодуляционных искажений, проведем расчеты зависимости уровня K_{in} в различных условиях.

Вначале рассмотрим идеальный случай работы схемы с ПН, а именно: $r_{on1}'' = r_{on2}'' = r_{on}''$; $\tau_{sat1}'' = \tau_{sat2}'' = 0.5$. Подставляя эти переменные в выражение (12), нетрудно убедиться, что $K_{in} = 0$ для всех n .

Такой результат имеет простое физическое толкование: в этом случае для генератора помехи U_i сопротивление нагрузки не изменяется. Значительно более интересным представляется анализ реальных условий работы ключевого генератора.

Прежде всего следуют отметить, что при всех реально возможных сочетаниях параметров, как показывают расчеты, уровни интермодуляционных искажений мало зависят от величины R_i при $R_i \geq R_L$, что практически всегда имеет место.

Рассмотрим случай работы подобранных по параметрам (согласованных пар) транзисторов, т.е. $r_{on1}'' = r_{on2}'' = r_{on}''$, $\tau_{sat1}'' = \tau_{sat2}'' \neq 0.5$. Подставляя эти параметры в (12), получаем:

$$K_{in} = \frac{[1 + (-1)^n](1 - C_1)}{2n\pi} (2 - 2 \cos 2n\pi\tau_{sat}'')^{1/2}. \quad (13)$$

Нетрудно видеть, что в этом случае $K_{in} = 0$ всегда при $n = 2k + 1$, где $k = 0; \pm 1; \pm 2; \dots$.

В дальнейшем будем называть эти составляющие искажениями по нечетным n . Другие составляющие будем называть искажениями по четным n , которые здесь также будут отсутствовать при $\tau_{sat}'' = k/n$. Максимальное значение K_{in} будет при $\tau_{sat}'' = (2k + 1)/2n$.

На рисунке 5 приведены уровни K_{in} при $n = 2$ в зависимости от τ_{sat}'' при различных r_{on}'' и $R_i'' = 1$. Здесь же приведена кривая K_{in} при $n = 4$, $r_{on}'' = 0.32$.

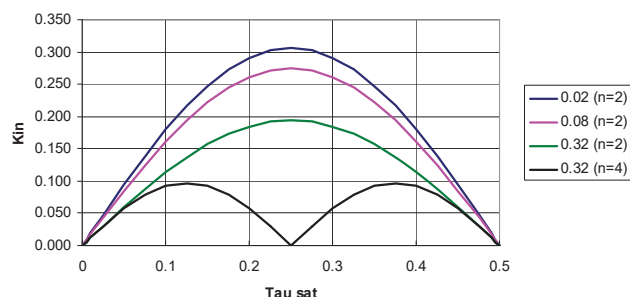


Рис. 5. Уровни K_{in} при $n = 2$ в зависимости от τ_{sat}'' для различных r_{on}'' при $R_i = 1$. Также приведена зависимость при $n = 4$, для $r_{on}'' = 0.32$

Из этих графиков видно, что $K_{in} \rightarrow 0$ при $\tau_{sat}'' \rightarrow 0$ и $\tau_{sat}'' \rightarrow 0.5$. С ростом r_{on}'' искажения уменьшаются. Уровень искажений высших порядков (n велико) значительно меньше, чем низших порядков (n мало). Отсюда следует вывод, что с точки зрения обеспечения малого уровня RIMD необходимо обеспечить работу ключей с $\tau_{sat}'' \approx 0.5$, либо $\tau_{sat}'' \approx 0$, а интересоваться нужно искажениями низших порядков.

В дальнейшем целесообразно рассматривать область изменения τ_{sat}'' вблизи точки $\tau_{sat}'' = 0.5$, поскольку здесь обеспечиваются оптимальные энергетические показатели генератора [9, 12] и минимальные уровни K_{in} .

Для определения уровней RIMD как интермодуляционного затухания, в соответствии с требованиям стандарта ETSI EN 300086 [11] необходимо к полученному результату прибавить значение -30 дБ согласно методике измерения (рис. 6).

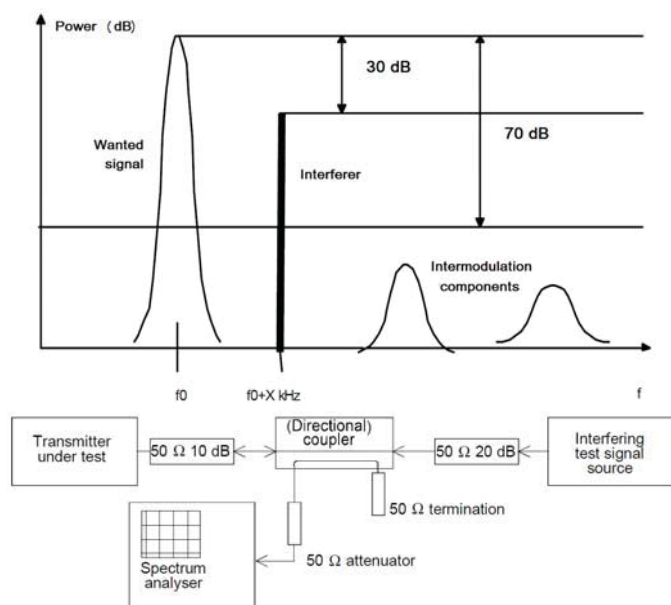


Рис. 6. Схема измерения интермодуляционного затухания в соответствии со стандартом ETSI EN 300086 [11]

Рассмотрим другой случай. Предположим, что параметры работы схемы подобраны так, что $\tau_{sat1}'' = \tau_{sat2}'' = 0.5$, а $r_{on1}'' \neq r_{on2}''$. Результаты расчетов для этого случая показывают полное отсутствие искажений по четным n . Искажения по

нечетным n не зависят от абсолютных значений r_{on}'' , а определяются величиной $\Delta r_{on}'' = (r_{on1}'' - r_{on2}'') / r_{on1}''$.

Графическое представление результатов расчетов показано на рисунке 7, откуда следует, что для получения низкого уровня интермодуляционных искажений необходимо выполнение достаточно жестких требований. Чтобы обеспечить уровень искажений, не превышающий минус 70 дБ, требуется обеспечить разброс в значениях r_{on}'' не более 20%. Впрочем, это значение является вполне типичным для согласованных пар транзисторов.

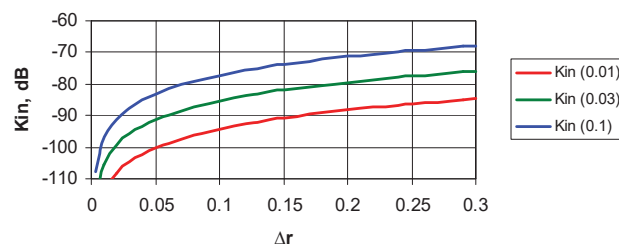


Рис. 6. Зависимость RIMD от разности сопротивлений насыщения транзисторов $\Delta r_{on}'' = (r_{on1}'' - r_{on2}'') / r_{on1}''$ для различных r_{on1}''

Результаты расчета работы КГ с ПН при $\tau_{sat}'' = \tau_{sat1}'' = \tau_{sat2}'' \neq 0.5$, $r_{on1}'' \neq r_{on2}''$, представлены на рисунке 8. Исходя из этого графика, следует, что, например, для получения уровня RIMD не более -70 дБ необходимо обеспечить длительность времени насыщения > 0.495 , т. е. отклонение τ_{sat}'' от меандра не должно превышать 2%.

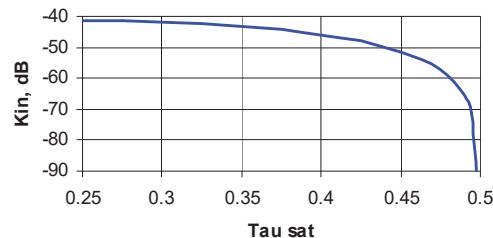


Рис. 7. Зависимость RIMD от времени насыщения ключей $\tau_{sat}'' = \tau_{sat1}'' = \tau_{sat2}'' \neq 0.5$

Заключение

Разработан теоретический подход к расчету интермодуляционных искажений (RIMD) в ключевых усилителях мощности класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения.

Проведенный анализ показал, что для достижения желаемых уровней интермодуляционных искажений, не превышающих -70 дБ, необходимо обеспечить разность сопротивлений насыщения активных элементов не более 20% и отклонение времени насыщения от меандра не более 2 градусов.

Литература

1. Katz A., McGee D., Brinton C., Qiu J. Sensitivity and mitigation of Reverse IMD in power amplifiers // 2011 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications, 2011, pp. 53-56, doi: 10.1109/PAWR.2011.5725374.
2. Sinkevich E., Mordachev V. Investigation of the transmitter susceptibility to reverse intermodulation by the use of double-frequency

diagrams // 2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), 2015, pp. 1159-1164, doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256333.

3. Atanasov A. N., Oude Alink M. S., van Vliet F. E. Reverse Intermodulation in Multi-Tone Array Transmitters // 2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/BCICTS48439.2020.9392972.

4. Dymkova S.S. Breakthrough 5G data call using dynamic spectrum sharing to accelerate nationwide 5G deployments // Synchroinfo Journal, vol. 5, no. 6, pp. 17-21, 2019.

5. Dymkova S. Applicability of 5G subscriber equipment and global navigation satellite systems // Synchroinfo Journal, vol. 7, no. 5, pp. 36-48, 2021. DOI: 10.36724/2664-066X-2021-7-5-36-48.

6. Dymkova S. S., Dymkov A. D. Multifactorial methodology of cycling routes time calculation based on 3D maps // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1-8, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416046.

7. Dymkova S. S., Dymkov A. D. Experimental Studies of GNSS Errors in Rough and Wooded Mountainous Terrain // 2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619169.

8. Varlamov O.V. Industrial digitalization is driving demand for private mobile networks // Synchroinfo Journal, vol. 5, no. 6, pp. 13-16, 2019.

9. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path // 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651.

10. Khadonova S. V., Ufimtsev A. V., Dymkova S. S. Digital Smart Airport" System Based on Innovative Navigation and Information Technologies // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261529.

11. ETSI EN 300 086 V2.1.2 "Land Mobile Service; Radio equipment with an internal or external RF connector intended primarily for analogue speech; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU," European Telecommunications Standards Institute, Aug. 2016.

12. Varlamov O. V., Gromorushkin V. N. Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions // 2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131508.

13. Afanasyev P., Grebennikov A., Farrell R., Dooley J. Analysis and Design of Outphasing Transmitter Using Class-E Power Amplifiers With Shunt Capacitances and Shunt Filters // IEEE Access, vol. 8, pp. 208879-208891, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038584.

14. Varlamov O. V. Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-8. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456925

15. Varlamov O. V. Experimental Study of a Synchronous DVB-T2 Network in the Yaroslavl Region. Problems with Some Manufacturers' Receivers // 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261562.

16. Dolgopyatova A. V., Varlamov O. V. Analysis of Long-Range VHF Radio Waves Propagation to Specify Protection Ratios Between Coexisting DRM+, RAVIS and IBOC Systems // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488392.

17. Varlamov O. V., Bychkova A. A. Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2021, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488396.

18. Варламов О.В., Варламов В.О. Распределение максимальных уровней атмосферных радишумов в диапазонах низких частот и средних частот по территории земли // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2017. Т. 9. № 5. С. 42-51. EDN: ZWLTYYD

19. Varlamov O. V., Chugunov I. V. Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation // 2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Kazan, 2017, pp. 1-3. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2017.7997508

20. Bolotov A. O., Kholuykov R. G., Varlamov O. V. EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation // 2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Minsk, 2018, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456955

21. Gromorushkin V. N., Varlamov O. V., Dolgopyatova A. V., Voronkov A. A. Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna // 2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia, 2019, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706736

22. Varlamov O. V. Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions // 2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Svetlogorsk, Russia, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166046.

23. Varlamov O. V., Nguyen D. C., Grychkin S. E. Simultaneous Application of Several Synthetic Methods for High Efficiency Radiofrequency Amplification // 2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416126.

24. Gromorushkin V. N., Varlamov O. V. Experimental Studies of the Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Broadband Unmatched Load // 2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2021, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488387.

25. Varlamov O. V. Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path // 2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.

26. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals. Патент на изобретение US 7724837 B2. Заявка № US20040546012 от 07.01.2004.

27. Kamper M., Ulbricht G., Weigel R., Fischer G. Comparison of class A and class D RF amplifier operation with focus on reverse intermodulation and efficiency performance // 2011 6th European Microwave Integrated Circuit Conference, 2011, pp. 272-275.

28. Варламов О.В. Технология создания сети цифрового радиовещания стандарта DRM для Российской Федерации: дис. ...докт. техн. наук: 05.12.04 / Варламов Олег Витальевич. М., 2017. 350 с.

29. Варламов О.В., Лаврушенко В.Г. Критерии качества передающего устройства для стандарта DRM и измерительное оборудование // Broadcasting. Телевидение и радиовещание. 2004. № 3. С. 44-48. EDN: UJOWNL

Иванюшкин Р.Ю., Варламов О.В., Сягаев А.К. Нелинейные искажения сигнала стандарта DRM в синтетических схемах линейного усиления / В сборнике: Обработка сигналов в системах наземной радиосвязи и оповещения Материалы XV межрегиональной научно-технической конференции. 2007. С. 301-310. EDN: UJOQTV

INTERMODULATION DISTORTION IN VOLTAGE MODE CLASS D SWITCHING AMPLIFIERS WITH RESISTIVE LOAD

Oleg V. Varlamov, Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia, vov@mtuci.ru

Abstract

The development of 5G technologies and the Internet of Things lead to a change in the traditional paradigm of frequency-territorial planning. Indeed, in addition to reducing the distance between base stations of cellular communication, there is a problem of approaching the radio means of mobile devices to them, as well as the problem of uncontrolled convergence of an arbitrary number of radio means on mobile devices. In all cases, intermodulation distortion (name in English technical literature: reverse intermodulation distortion - RIMD) occurs between closely spaced simultaneously operating transmitters. Once in the reception band, they disrupt the normal functioning of radio equipment. Therefore, the requirements for the transmitter's electromagnetic compatibility characteristics are continuously tightened. Class D power amplifiers, in addition to higher efficiency and better quality indicators, may potentially have a lower level of intermodulation distortion. The article deals with intermodulation distortion in previously unexplored class D push-pull voltage switching mode power amplifier with a resistive load. On the developed theoretical approach basis, an analysis was made of the intermodulation distortion levels dependence on the electronic components parameters spread and the circuit operating mode. It is shown that in order to achieve the desired levels of intermodulation distortion, not exceeding -70 dB, it is necessary to ensure the difference in the active elements saturation resistances is not more than 20% and the saturation time deviation from the meander is not more than 2 degrees.

Keywords: reverse intermodulation distortions, voltage mode class D, VMCD, RF Power Amplifier, Internet of Things, 5G.

References

1. A. Katz, D. McGee, C. Brinton and J. Qiu (2011), "Sensitivity and mitigation of Reverse IMD in power amplifiers," *2011 IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications*, pp. 53-56, doi: 10.1109/PAWR.2011.5725374.
2. E. Sinkevich and V. Mordachev (2015), "Investigation of the transmitter susceptibility to reverse intermodulation by the use of double-frequency diagrams," *2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC)*, pp. 1159-1164, doi: 10.1109/ISEMC.2015.7256333.
3. A. N. Atanasov, M. S. Oude Alink and F. E. van Vliet (2020), "Reverse Intermodulation in Multi-Tone Array Transmitters," *2020 IEEE BiCMOS and Compound Semiconductor Integrated Circuits and Technology Symposium (BCICTS)*, pp. 1-4, doi: 10.1109/BCICTS48439.2020.9392972.
4. S.S. Dymkova (2019), "Breakthrough 5G data call using dynamic spectrum sharing to accelerate nationwide 5G deployments," *Synchroinfo Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 17-21.
5. S. Dymkova (2021), "Applicability of 5G subscriber equipment and global navigation satellite systems," *Synchroinfo Journal*, vol. 7, no. 5, pp. 36-48. DOI: 10.36724/2664-066X-2021-7-5-36-48.
6. S. S. Dymkova and A. D. Dymkov (2021), "Multifactorial methodology of cycling routes time calculation based on 3D maps," *2021 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, pp. 1-8, doi: 10.1109/IEEECONF51389.2021.9416046.
7. S. S. Dymkova and A. D. Dymkov (2021), "Experimental Studies of GNSS Errors in Rough and Wooded Mountainous Terrain," *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619169.
8. O. V. Varlamov (2019), "Industrial digitalization is driving demand for private mobile networks," *Synchroinfo Journal*, vol. 5, no. 6, pp. 13-16.
9. O. V. Varlamov and V. N. Gromorushkin (2020), "High Efficiency Power Amplifier for IoT Applications: RF Path," *2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, pp. 1-5, doi: 10.1109/IEEECONF48371.2020.9078651.
10. S. V. Khadonova, A. V. Ufimtsev and S. S. Dymkova (2020), "Digital Smart Airport" System Based on Innovative Navigation and Information Technologies," *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261529.
11. ETSI EN 300 086 V2.1.2 "Land Mobile Service; Radio equipment with an internal or external RF connector intended primarily for analogue speech; Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of the Directive 2014/53/EU," European Telecommunications Standards Institute, Aug. 2016.
12. O. V. Varlamov and V. N. Gromorushkin (2020), "Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions," *2020 Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia, pp. 1-6, doi: 10.1109/WECONF48837.2020.9131508.
13. P. Afanasyev, A. Grebennikov, R. Farrell and J. Dooley (2020), "Analysis and Design of Outphasing Transmitter Using Class-E Power Amplifiers With Shunt Capacitances and Shunt Filters," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 208879-208891, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038584.

14. O. V. Varlamov (2018), "Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, pp. 1-8. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456925
15. O. V. Varlamov (2020), "Experimental Study of a Synchronous DVB-T2 Network in the Yaroslavl Region. Problems with Some Manufacturers' Receivers," *2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH)*, Vienna, Austria, pp. 1-4, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261562.
16. A. V. Dolgopyatova and O. V. Varlamov (2021), "Analysis of Long-Range VHF Radio Waves Propagation to Specify Protection Ratios Between Coexisting DRM+, RAVIS and IBOC Systems," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488392.
17. O. V. Varlamov and A. A. Bychkova (2021), "Basis of Technical Design and Development a Single-Frequency DRM Digital Broadcasting Network for Venezuela," *2021 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO51390.2021.9488396.
18. O. V. Varlamov and V. O. Varlamov (2017), "Distribution of maximum levels of atmospheric radio noise in LF and MF ranges in the territory of the Earth," *H&ES Research*, vol. 9, no. 5, pp. 42-51.
19. O. V. Varlamov and I. V. Chugunov (2017), "Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation," *2017 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Kazan, pp. 1-3. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2017.7997508
20. A. O. Bolotov, R. G. Kholyukov and O. V. Varlamov (2018), "EER power amplifier modulator efficiency improvement using PWM with additional sigma-delta modulation," *2018 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Minsk, pp. 1-4. DOI: 10.1109/SYNCHROINFO.2018.8456955
21. V. N. Gromorushkin, O. V. Varlamov, A. V. Dolgopyatova and A. A. Voronkov (2019), "Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna," *2019 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russia, pp. 1-5. DOI: 10.1109/SOSG.2019.8706736
22. O. V. Varlamov (2020), "Power Capacity of HF Automatic Antenna Tuner Switched by PIN Diodes under Load Mismatch Conditions," *2020 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Svetlogorsk, Russia, pp. 1-5, doi: 10.1109/SYNCHROINFO49631.2020.9166046.

Information about author:

Oleg V. Varlamov, Doctor of Science (technical), professor of the Moscow Technical University of Communications and Informatics, Moscow, Russia

XII Ежегодный Форум "Revenue Assurance & Fraud Management Forum

ТЕЛЕКОМ / БАНКИ / РЕГУЛЯТОРЫ. Влияние санкций"

Открыта регистрация на XII Ежегодный Форум "Revenue Assurance & Fraud Management Forum ТЕЛЕКОМ / БАНКИ / РЕГУЛЯТОРЫ. Влияние санкций", который пройдет 20 октября 2022 года в Москве. Участники могут зарегистрироваться на официальном сайте мероприятия.



В ходе мероприятия будет всесторонне рассмотрена проблематика гарантирования доходов и антифрода, в частности блоки: Главные тренды, санкции, госрегулирование; Роль и технологии, сервисы RA&FM, санкции.

Кроме того, запланирован ряд дискуссий по таким темам как прикладное взаимодействие с государством в условиях санкций, RA&FM - санкции, взаимодействия, перспективы, технологии, сервисы.

Форум объединит топ-руководителей, представителей подразделений, ответственных за направления RA&FM, ИБ, Risk Management. Представители секторов: РЕГУЛЯТОРЫ, ТЕЛЕКОМ, ФИНАНСЫ, ПЛАТЕЖНЫЕ СИСТЕМЫ, МЕДИА/ИНТЕРНЕТ, ТРАНСПОРТ/ЛОГИСТИКА, ЭНЕРГЕТИКА, РОЗНИЦА и др.