

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА ИНТЕРМОДУЛЯЦИОННЫХ ИСКАЖЕНИЙ В КЛЮЧЕВЫХ ВЧ УСИЛИТЕЛЯХ МОЩНОСТИ С РАЗДЕЛЬНЫМ УСИЛЕНИЕМ СОСТАВЛЯЮЩИХ

DOI: 10.36724/2072-8735-2024-18-10-4-11

Manuscript received 10 September 2024;

Accepted 15 October 2024

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

Ключевые слова: высокоэффективный ВЧ усилитель
мощности, имитационная модель, интермодуляционные
искажения, класс D, ключевой усилитель, усилитель
мощности с раздельным усилением составляющих

Ключевые высокочастотные (ВЧ) усилители мощности с раздельным усилением составляющих (КУМРС) является перспективным направлением развития для различного оборудования средств радиосвязи и телерадиовещания среди ряда "синтетических" методов усиления и их комбинаций. Кроме высокого среднего КПД при усилении современных телекоммуникационных сигналов с амплитудно-фазовой модуляцией, обладающих большим значением пик-фактора, КУМРС потенциально может обладать большей устойчивостью к обратным интермодуляционным искажениям (ОИМИ), вызванными наведенными на антенну радиоэлектронного средства (РЭС) сигналами других РЭС, располагающихся в непосредственной близости. В статье описана разработанная имитационная модель для анализа ОИМИ в ВЧ КУМРС. Обосновано применение транзитного метода анализа и среды моделирования Micro-Cap 12. Предварительные расчеты подтвердили достаточную точность разработанной имитационной модели в рассматриваемом динамическом диапазоне полезных и мешающих сигналов. Показана возможность использования разработанной имитационной модели для анализа ОИМИ в ВЧ КУМРС при различных частотных расстройках мешающих сигналов. Разработанная модель будет использоваться для детального исследования ОИМИ в КУМРС различных конфигураций (с ФНЧ с резким и плавным переходом, односторонне и двухсторонне нагруженными), а также при рассмотрении влияния на уровень ОИМИ дополнительных цепей (демпфирующей цепи и ФВЧ-диплексера), подключаемых на выход ФНЧ модуляционного тракта.

Информация об авторе:

Варламов Олег Витальевич, д.т.н., доцент, профессор кафедры "Радиооборудование и схемотехника", Московский технический университет связи и информатики, Москва, Россия. <https://orcid.org/0000-0002-3996-9156>. Scopus Author ID: 6602830358

Для цитирования:

Варламов О.В. Имитационная модель для анализа интермодуляционных искажений в ключевых ВЧ усилителях мощности с раздельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2024. Том 18. №10. С. 4-11.

For citation:

Varlamov O.V. (2024) Simulation model for the analysis of intermodulation distortion in class D switching RF power amplifiers with separate amplification. T-Comm, vol. 18, no.10, pp. 4-11. (in Russian)

1 Введение

Применение высокочастотных (ВЧ) усилителей мощности, использующих ключевые режимы работы (КРР) активных элементов, в том числе с отдельным усилением составляющих (КУМРС) [1-5], помимо широко обсуждаемого и достигаемого эффекта в виде повышения КПД радиопередатчиков различного назначения имеет массу иных технологических и качественных преимуществ. В ключевом режиме изменение температуры окружающей среды (в том числе от саморазогрева при работе), существенно влияющей на положение рабочей точки в режимах А, АВ и В, не является сильно критичным. Уровень нелинейных искажений всех видов (гармонических, комбинационных, обратных интермодуляционных, обусловленных "эффектом памяти" и т.д.) в ключевом режиме определяется не током покоя, в большой степени зависящем от температуры при постоянном напряжении смещения, а, в основном, стабильностью длительности этапа насыщения. При организации возбуждения прямоугольными импульсами с фронтами достаточной крутизны и амплитудой существенно больше порога открывания активного элемента, влиянием изменения напряжения отсечки от изменения температуры на длительность этапа насыщения можно пренебречь.

Изменение сопротивления насыщения активного прибора при изменении температуры, при выборе его на два порядка меньше сопротивления нагрузки (для обеспечения высокого КПД), также оказывает малое влияние на нелинейные характеристики каскада, работающего в ключевом режиме. Все это позволяет отказаться от температурной стабилизации режима работы ключевых каскадов и заведомо избежать потенциальной неустойчивости петли термостабилизации.

Обеспечение электромагнитной совместимости различных радиоэлектронных средств является одной из наиболее актуальных проблем в технике радиосвязи. Эта проблема становится наиболее острой в радиокомплексах, где необходимо обеспечить нормальную работу радиоприемника в присутствии близко расположенного работающего радиопередатчика, например, в подвижных службах радиосвязи. В этом случае передатчик должен иметь уровень нежелательных излучений на частотах приема ниже, чем уровень принимаемого полезного сигнала.

Имея непрерывный и слабо зависящий от расстройки спектр, шумовое излучение может поражать значительные участки рабочего диапазона частот. Так, известен пример из анализа радиопомех в воздушной подвижной службе. Из общего числа зарегистрированных 436 случаев нарушений радиосвязи из-за помех 31,2% составили помехи, обусловленные шумовыми излучениями передатчиков. Для исключения шумовых помех присвоение рабочих частот станциям подвижных служб производится с большим разносом частот каналов приема и передачи, вследствие чего значительная часть каналов связи не используется. По этой причине не представляется возможным использовать значительную часть рабочих частот несколькими радиостанциями, размещенными в одном подвижном объекте. Все это заставляет искать пути снижения шумовых излучений передатчика, которые заключаются как в выборе режима работы активных приборов его усилителя мощности, так и в поиске новых схемных решений всего передатчика в целом.

Проблема шумовых излучений весьма серьезно стоит и в ключевых усилителях мощности передатчиков, построенных по методу отдельного усиления составляющих. Дополнительным преимуществом ключевых режимов работы является меньший уровень тепловых шумов. Данный параметр также важен, как и рассматриваемые в статье обратные интермодуляционные искажения (reverse intermodulation distortions – RIMD, ОИМИ), при близком расположении большого количества приемопередающих устройств [6-8].

Действительно, попадание шумовых излучений передатчика в полосу пропускания расположенного в непосредственной близости приемника другого радиосредства, эквивалентно фактическому ухудшению его чувствительности. На уровень шумовых излучений передатчиков в разных странах и разными фирмами-производителями накладываются различные ограничения, зависящие от назначения радиосредства. Типичными значениями относительного уровня шума в полосе 1 Гц можно считать от минус 125 дБ/Гц до минус 150 дБ/Гц при отстройке на $\pm 3\%$. При этом обеспечение низкого уровня шумовых излучений начинается с малошумящего генератора, управляемого напряжением (ГУНа) в синтезаторе частот (СЧ), соответствующего выбора структуры и параметров СЧ, и сквозного проектирования линейного усилительного тракта с учетом шумовых характеристик, поскольку в многокаскадных линейных усилителях шумовые колебания первых каскадов последовательно усиливаются.

Мощный оконечный каскад в классе А или АВ может вносить существенный вклад в формирование результирующего уровня шума на выходе передатчика в целом. При таких режимах работы токи, протекающие через транзистор, меняются в широких пределах. Шум на выходе каскада будет зависеть от состояния транзистора как вследствие прямой зависимости уровня шума от величины тока, протекающего через транзистор (например, дробовой шум), так и вследствие изменения малосигнальных параметров транзистора (это влияет на передачу шумов из входной цепи).

Для ответственных применений, требующих малого уровня шумовых излучений передатчиков, в ряде случаев на выходе устройства используют дополнительные перестраиваемые (или переключаемые) полосовые фильтры, ослабляющие шумы вне полосы пропускания на 20 дБ. Иногда их подключают два последовательно. Очевидно, что при потерях в каждом из фильтров 10-20% мощности, КПД линейного усилителя еще больше уменьшается. Активные элементы усилителя мощности, использующего ключевые режимы работы, при нахождении в режиме отсечки закрыты и не генерируют шумовых колебаний.

В режиме насыщения сопротивление активного прибора, выбираемое обычно на два порядка меньше сопротивления нагрузки, генерирует меньше шумов, чем в согласованном линейном режиме работы. Сопоставимые с линейным режимом уровни шумов присутствуют только на этапах переключения из отсечки в насыщение и обратно, длительность которых по определению существенно меньше периода колебаний. В результате средняя мощность генерируемых шумовых излучений оказывается существенно меньше, и может достигать минус 170 дБ/Гц при отстройке на $\pm 3\%$ [9].

Как показали проведенные в [9] измерения, общий уровень шумов на выходе ключевого усилителя может быть

даже меньше, чем на его входе – за счет того, что ключевой усилитель подавляет случайные (шумовые) флуктуации амплитуды входного сигнала. При этом фазовая компонента увеличивается незначительно. Это обстоятельство позволяет надеяться, что многокаскадные усилители мощности в ключевом режиме будут иметь еще большее преимущество по шумовым колебаниям по сравнению с усилителями, работающими в недонапряженном линейном режиме.

Очевидным недостатком ключевых режимов работы активных элементов является необходимость применения элементной базы, способной работать на частотах как минимум на порядок больше верхней частоты усиливаемого сигнала и соответствующего монтажа (как правило, с использованием полосковых линий с низким характеристическим сопротивлением) для пропускания 7-9 гармоник несущей частоты.

Для работы в КВ диапазоне необходимо использовать более дорогие СВЧ транзисторы. Тем не менее, преимущества ключевых режимов работы, особенно сильно проявляющиеся при непрерывном совершенствовании элементной базы и расширении диапазона ее рабочих частот, позволяют рассматривать возможность их практического применения во все большем числе приложений [10-17].

Обсуждаемая в настоящей статье устойчивость к обратным интермодуляционным искажениям актуальна при близком расположении большого количества приемопередающих устройств. Также она актуальна (как вторичный эффект) при воздействии средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ), поскольку снижает уровень дополнительных спектральных составляющих, которые могут попасть в полосу приема иных РЭС, находящихся в непосредственной близости.

Уровень допустимых ОИМИ в передатчиках нормируется различными стандартами. В качестве примера далее рассмотрим стандарт ETSI EN 300086 (рис. 1) Допустимые значения ОИМИ составляют от не менее 40 дБ и ужесточаются до более 70 дБ для базовых станций сотовых сетей подвижной связи.

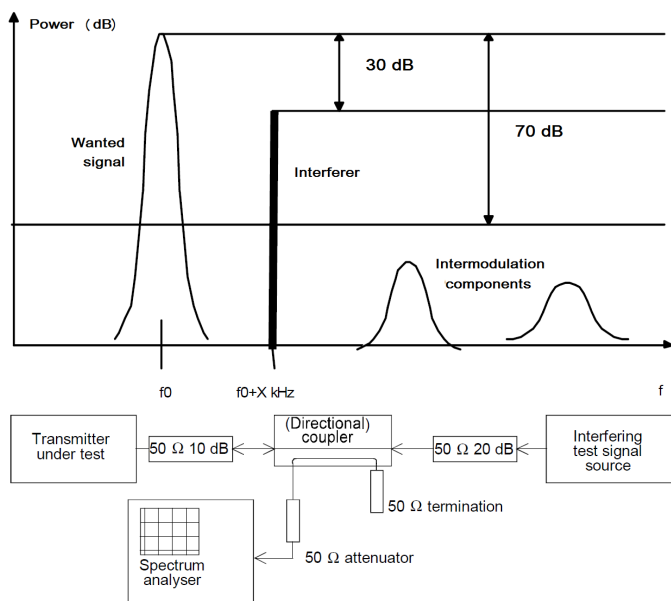


Рис. 1. Схема проведения измерений для определения величины ОИМИ по стандарту ETSI EN 300086

В диапазонах частот выше 100 МГц такие параметры обеспечиваются внешними узлами – фильтрами или циркуляторами. В диапазоне ВЧ такие возможности по конструктивным причинам отсутствуют и выполнение требований на величину интермодуляционных искажений возможно только с помощью выбора соответствующих режимов работы активных элементов.

Предположение о потенциально большей устойчивости КУМРС к обратным интермодуляционным искажениям, вызванным излучением других РЭС, базируется на большей устойчивости входящих в их высокочастотный тракт ключевых генераторов, теоретически обоснованной в работах [18-21] и экспериментально продемонстрированной при сравнении линейного усилителя, работающего в классе А, и ключевого усилителя работающего в классе D [22]. КУМРС является комплексной структурой, содержащей, кроме ключевых генераторов, набор активных и пассивных узлов [23-32], взаимодействие которых определяет параметры передатчика.

Анализ ОИМИ в КУМРС до настоящего времени не производился, что обуславливает актуальность описываемого в данной статье исследования.

В [18-21] были приведены результаты анализа обратных интермодуляционных искажений в ключевых двухтактных усилителях в предположении резистивности цепей связи усилителя с нагрузкой. Был выявлен механизм возникновения обратных интермодуляционных искажений, определены причины, вызывающие искажения и оценена степень их влияния на уровни интермодуляционных составляющих.

По причине сложности структуры и появляющихся продуктов обратных интермодуляционных искажений на новых частотах, проведение аналитического анализа всего КУМРС, аналогичного выполненному в [18-21] для собственно ключевых генераторов, представляется малоперспективным. Более реально проведение анализа обратных интермодуляционных искажений в КУМРС с помощью имитационной модели, аналогично тому, как это было сделано для анализа работы КУМРС на узкополосную антенну [33, 35].

2 Выбор метода анализа и среды моделирования

Помимо собственно ключевых генераторов, ОИМИ которых теоретически был рассмотрен в [18-21], в КУМРС на ОИМИ потенциально может влиять ШИМ модулятор, питающий оконечный ключевой каскад и ФНЧ, устраняющий тактовые частоты ШИМ-преобразования, и обладающий существенной неравномерностью амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) и группового времени запаздывания (ГВЗ) в полосе нахождения продуктов ОИМИ. При использовании различных способов построения модуляционного тракта [22-29] реакция на интерферирующие сигналы также может быть различной.

Поскольку моделирование необходимо проводить одновременно на частотах огибающей и на рабочих частотах диапазона ВЧ с использованием ключевого режима (не менее 10 гармоник рабочей частоты), применение быстрого метода гармонического баланса [35] не представляется возможным. Метод совместной симуляции радиочастотного тракта и огибающей также не может быть использован, поскольку усилитель сигнала огибающей в большинстве случаев выполнен с ШИМ преобразованием.

Поэтому для решения поставленной задачи выбран метод транзисторного анализа. Моделирование будет выполняться на уровне структурных узлов, поэтому проприетарные модели активных приборов не требуются. Данное обстоятельство дает возможность применения свободно распространяемой программы схемотехнического моделирования Micro-Cup 12.

3 Разработка имитационной модели для анализа ОИМИ

Разработанная модель структурно состоит из четырех узлов – КУМРС, источника полезного сигнала, измерительной цепи в соответствии с рисунком 1, и источников интерферирующих сигналов. Структурная схема разработанной модели приведена на рисунке 2.

Модели блоков КУМРС и источника сигнала аналогичны модели, разработанной автором в [33, 34]. Блок измерительной цепи содержит необходимые аттенюаторы и сумматоры, представленные П-образными цепями. Блок источников интерферирующих сигналов содержит синусоидальный источник и источник OFDM сигнала с полосой частот 10 кГц с задаваемой частотой несущего колебания.

4 Тестовые расчеты уровней интермодуляционных искажений

Для проверки модели для анализа ОИМИ в КУМРС был проведен ряд тестовых расчетов.

1. Расчеты ОИМИ в собственно ключевых генераторах (КГ) при усилении немодулированной несущей.

В этой ситуации модуляционный тракт усиливает постоянную составляющую и теоретически характеристики его ФНЧ не влияют на уровень интермодуляционных искажений. Для обеспечения корректности получаемых результатов, отстройка мешающих сигналов не должна превышать полосу пропускания ФНЧ.

Собственно ключевой генератор, показанный в модели на рисунке 2, является генератором с переключением напряжения. Его можно заменить на КГ с переключением тока или на генератор с мостовой коллекторной цепью добавлением в цепь питания каскада дросселя или дросселя с

разделительным конденсатором и балластным резистором, соответственно (рис. 3).

По умолчанию в модели используется режим работы высокочастотного каскада со временем насыщения, равном 180° градусов (π – работа с меандрами). Такой режим работы является допустимым для всех трех рассматриваемых видов ключевых генераторов. При желании исследовать режимы работы с "недокрытием" (время насыщения меньше π) для схем с ПН, или с "перекрытием" (время насыщения больше π) для схем с ПТ, возможно введение дополнительных блоков в цепь возбуждения ключей, соответственно обужающих или расширяющих входные импульсы на заданную величину.

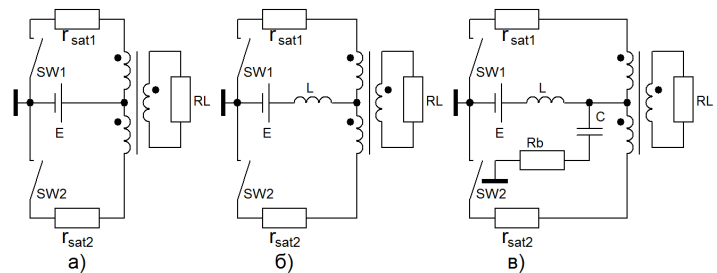


Рис. 3. Схемы генераторов класса D с ПН (а), с ПТ (б) и с мостовой коллекторной цепью (в)

Результаты проведенного имитационного моделирования зависимостей уровней ОИМИ для схемы КГ с ПН с достаточной точностью совпали с теоретическими [18, 19, 36, 37].

2. Рассмотрение возможности расчета уровней ОИМИ на OFDM сигнале для полной структуры КУМРС. Полоса антенной цепи была принята много больше расстроек полезного и мешающего сигналов по частоте, что устраняло влияние антенной цепи на уровни обратных интермодуляционных искажений.

Проведенное исследование зависимости уровней обратных интермодуляционных искажений от уровня мешающего сигнала показало, что они линейно зависят от уровня мешающего сигнала. Этот результат следует считать ожидаемым и подтверждающим работоспособность модели в пределах требуемого динамического диапазона.

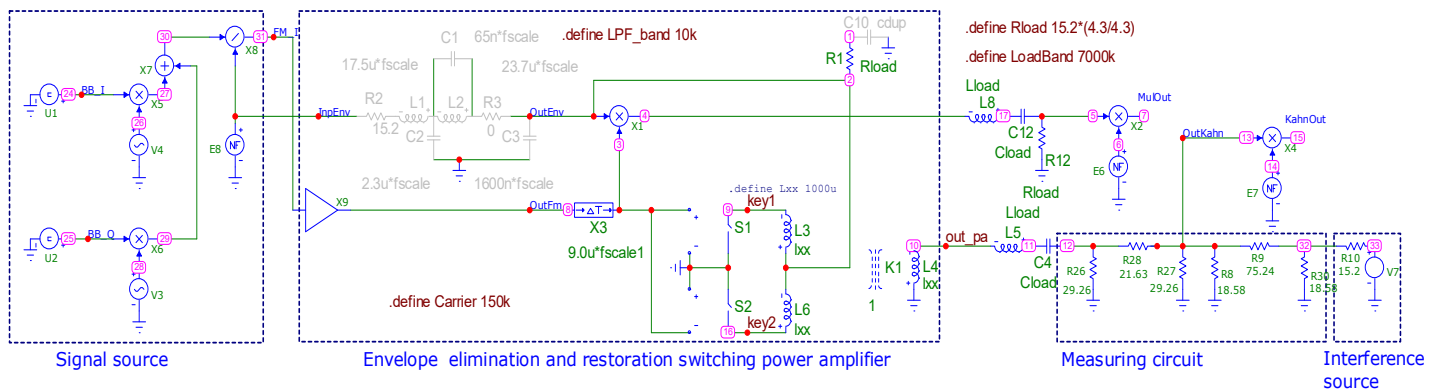


Рис. 2. Структурная схема имитационной модели для анализа ОИМИ в КУМРС

Пример спектра выходного сигнала КУМРС при мешающем сигнале с относительным уровнем минус 30 дБ и отстройкой 50 кГц для различных полос пропускания ФНЧ ШИМ-модулятора показан на рисунке 4. Как видно из рисунка, уровень ОИМИ может достигать требуемого ETSI EN 300086 для тяжелых условий значения минус 70 дБ. Зависимость уровней ОИМИ от частотной расстройки между полезным и мешающим сигналами для КУМРС с двусторонним нагруженным ФНЧ с плавным переходом с различными частотами среза (5, 10 и 15 полос огибающей) представлены на рисунке 5. Как видно из рисунка, затухание ОИМИ увеличивается с увеличением полосы пропускания ФНЧ модуляционного тракта.

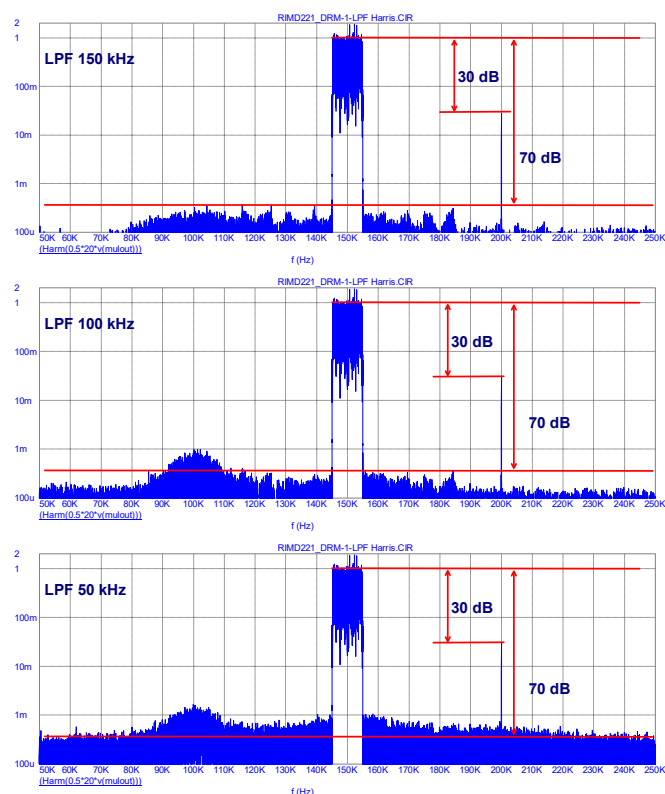


Рис. 4. Пример спектра выходного сигнала КУМРС при воздействии интерферирующего сигнала с частотной расстройкой 50 кГц и относительным уровнем минус 30 дБ для различных полос пропускания ФНЧ ШИМ-модулятора

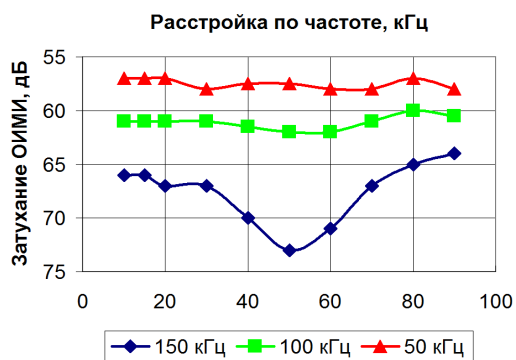


Рис. 5. Зависимость затухания ОИМИ от расстройки частоты между полезным и мешающим сигналами для КУМРС с двусторонним нагруженным ФНЧ с плавным переходом с разными частотами среза (5, 10 и 15 полос огибающей)

Детальное исследование ОИМИ в КУМРС различных конфигураций предполагается провести в дальнейших исследованиях. Также планируется провести поиск схемотехнических решений, позволяющих снизить уровни ОИМИ, аналогично направлениям, рассмотренным в [32].

5 Заключение

Разработана имитационная модель для анализа ОИМИ в КУМРС. Показана адекватность ее работы применительно к отдельно взятому КГ с ПН сравнением с результатами теоретического анализа.

Зависимость уровней ОИМИ от уровня интерферирующего сигнала носит линейный характер, что свидетельствует о достаточном динамическом диапазоне разработанной имитационной модели.

Показана возможность применения разработанной имитационной модели для анализа ОИМИ в КУМРС при различных частотных отстройках интерферирующих сигналов.

Литература

1. Kahn L. Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration. // Proc. IRE 1952, 40, 803–806.
2. Filimonov N., Varlamov O., Itkin G. Efficient modulation of RF signals // Патент на изобретение EP 1450479 B1. Заявка № EP20030003830 от 20.02.2003.
3. Filimonov N., Varlamov O. Power amplifier circuit for amplifying RF-signals // Патент на изобретение EP 1229642 B1. Заявка № EP20010102249 от 31.01.2001.
4. Варламов О.В. Радиопередатчики сложных сигналов, построенные по методу раздельного усиления. Основы теории и лабораторный практикум // Учебно-методическое пособие. Москва, 2019.
5. Varlamov O.V. Theoretical Foundations for Teaching the Causes of Non-Linear Distortions in Modern High-Efficiency Transmitters // В сборнике: 2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED), Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-10, doi: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965552.
6. Khadonova S.V., Ufimtsev A.V., Dymkova S.S. "Digital Smart Airport" System Based on Innovative Navigation and Information Technologies," // В сборнике: 2020 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology (EMCTECH), Vienna, Austria, 2020, pp. 1-6, doi: 10.1109/EMCTECH49634.2020.9261529.
7. Чертова О.Г., Чиров Д.С. Построение опорной сети связи на базе малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с отсутствием наземной инфраструктуры // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2019. Т. 11. № 3. С. 60-71.
8. Бакулин М.Г., Крейнделин В.Б. Проблема повышения спектральной эффективности и емкости в перспективных системах связи 6G // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 2. С. 25-31.
9. Варламов О.В., Громорушкин В.Н., Лаврушенко В.Г. Разработка коротковолнового ключевого усилителя мощности с раздельным усилением составляющих однополосного сигнала // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т. 5. № 9. С. 42-44.
10. 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
11. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. Simultaneous application of several synthetic methods for high efficiency radiofrequency amplification // В сборнике: 2021 Systems of Signals

Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Conference Proceedings. 2021. С. 9416126. doi: 10.1109/IEECONF51389.2021.9416126.

12. Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкин С.Е. Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 9. С. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16.

13. 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.

14. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. High efficiency power amplifier for IoT applications: RF path // В сборнике: 2020 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications. 2020. С. 9078651. doi: 10.1109/IEECONF48371.2020.9078651.

15. Дымкова С.С. Облачные IoT платформы и приложения для оптимизационного управления транспортом // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 4. С. 39-50.

16. Chivanov D., Dymkova S. Impact of 5G network performance on users loyalty // Synchroninfo Journal. 2024. Т. 10. № 1. С. 39-52.

17. Pastukh A., Tikhvinskiy V., Dymkova S., Varlamov O. Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems // Technologies, vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110.

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

19. Varlamov O.V. Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers // В сборнике: 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 – Conference Proceedings. 2022.

20. Долгопятова А.В., Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режимах с переключением тока и мостовом // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 3. С. 4-13. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-4-13.

21. Dolgopyatova A.V., Varlamov O.V. Reverse Intermodulation Distortion in Current Mode and Bridge Class D RF Power Amplifiers // В сборнике: 2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEECONF56737.2023.10092117.

22. 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.

23. Varlamov O., Nguyen D.C., Grebennikov A. Broadband and efficient envelope amplifier for envelope elimination and restoration/envelope tracking higher-efficiency power amplifiers // Sensors. 2022. Т. 22. № 23. С. 9173. doi: 10.3390/s22239173.

24. Варламов О.В. Построение мощных широкополосных усилителей постоянного тока модуляционного тракта передатчиков с раздельным усилением составляющих // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 11. С. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14.

25. Varlamov O.V. Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path // В сборнике: 2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021 – Proceedings. 2021. С. 9619166. doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.

26. Грычкин С.Е., Захаров А.М., Варламов О.В. Методика расчета КПД ШИМ модулятора на GAN FET транзисторах // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 9. С. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27.

27. Grychkin S.E., Zakharov A.M., Varlamov O.V. Calculation and Simulation of GaN FET Modulator for Envelope Elimination and Restoration Power Amplifier // 2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Pskov, Russia, 2023, doi: 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178469.

28. Nguyen D.C., Gromorushkin V.N., Varlamov O.V. Theoretical comparison of different envelope elimination and restoration transmitter PWM modulator configurations to expand the possible antenna mismatch // Sensors. 2023. Т. 23. № 23. С. 9466. doi: 10.3390/s23239466.

29. Нгуен Д.К., Варламов О.В. Зависимость уровня искажений выходного сигнала передатчика современных телекоммуникационных сигналов с разделением составляющих от параметров фильтра тракта огибающей // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Т. 17. № 2. С. 12-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-12-26.

30. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V., Dolgopyatova A.V., Voronkov A.A. Operation Problems of the EER Transmitter with Narrowband Antenna // В сборнике: 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

31. Varlamov O.V., Grebennikov A. Experimental Studies of Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Narrow-band Matched Load // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840873.

32. Нгуен Д.К. Методы снижения требований к полосе пропускания антенны для передатчика с разделением составляющих // Радиотехника. 2023. Т. 87. № 9. С. 96-112. DOI: 10.18127/j00338486-202309-09.

33. Нгуен Д.К., Варламов О.В. Имитационная модель для исследования работы ключевых ВЧ-усилителей мощности с раздельным усилением составляющих на узкополосную нагрузку // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2022. Т. 14. № 2. С. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.

34. Nguyen D.C., Varlamov O.V. Simulation Model for Switching Mode Envelope Elimination and Restoration RF Power Amplifiers Research // 2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO), Arkhangelsk, Russia, pp. 1-6. 2022. doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840917.

35. Горгадзе С.Ф., Максимов А.А. Теория гармонического баланса для схемотехнического проектирования // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 11. С. 21-32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32.

36. Varlamov O. Research of influence of drm broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2014. Т. 8. № 2. С. 59-60.

37. Chirov D.S., Lobova E.O. Wideband hf signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approbation // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14. № 4. С. 57-65.

SIMULATION MODEL FOR THE ANALYSIS OF INTERMODULATION DISTORTION IN CLASS D SWITCHING RF POWER AMPLIFIERS WITH SEPARATE AMPLIFICATION

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

Abstract

Switching mode high-frequency (HF) power amplifiers (PA) with envelope elimination and restoration (EER) are a promising direction of development for various equipment of radio communications and television and radio broadcasting among a number of "synthetic" amplification methods and their combinations. In addition to the high average efficiency when amplifying modern telecommunications signals with amplitude-phase modulation, which have a large crest factor, EER PA can potentially have greater resistance to reverse intermodulation distortion (RIMD) caused by signals from other radio-electronic device (RED) located in close proximity at the antenna of the RED. The article describes the developed simulation model for the RIMD analysis in EER PA. The use of the transient analysis method and the Micro-Cap 12 modeling environment is justified. Preliminary calculations confirmed the sufficient accuracy of the developed simulation model in the considered dynamic range of useful and interfering signals. The possibility of using the developed simulation model for the RIMD analysis in EER PA for various frequency detunings of interfering signals is shown. The developed model will be used for a detailed study of the RIMD in EER PA of various configurations (with low-pass filters with a sharp and smooth transition, one-sided and double-sided loaded), as well as when considering the influence on the RIMD level of additional circuits (damping circuit and high-pass filter diplexer) connected to the modulation path low-pass filter output.

Keywords: class D, envelope elimination and restoration, high efficiency RF power amplifier, reverse intermodulation distortions, simulation model.

References

- [1] L. Kahn, "Single-sideband transmission by envelope elimination and restoration," *Proc. IRE*. 1952, 40, pp. 803-806.
- [2] N. Filimonov, O. Varlamov, G. Itkin, "Efficient modulation of RF signals," EP 1450479 B1. 20.02.2003.
- [3] N. Filimonov, O. Varlamov, "Power amplifier circuit for amplifying RF-signals," EP 1229642 B1. 31.01.2001.
- [4] O.V. Varlamov, "Radio transmitters of complex signals built using the split amplification method. Fundamentals of theory and laboratory workshop," Educational and methodological manual. Moscow, 2019.
- [5] O.V. Varlamov, "Theoretical Foundations for Teaching the Causes of Non-Linear Distortions in Modern High-Efficiency Transmitters," *2022 Intelligent Technologies and Electronic Devices in Vehicle and Road Transport Complex (TIRVED)*, Moscow, Russian Federation, 2022, pp. 1-10, doi: 10.1109/TIRVED56496.2022.9965552.
- [6] S.V. Khadonova, A.V. Ufimtsev, S.S. Dymkova, "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.
- [7] O. Varlamov, "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 2, pp. 59-60.
- [8] D.S. Chirov, E.O. Lobo, "Wtendanand HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and aprobaton," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 4, pp. 57-65.
- [9] O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, V.G. Lavrushenkov, "Development of shortwave SSB switching power amplifier with envelope elimination and restoration," *T-Comm*. 2011. Vol. 5. No. 9, pp. 42-44.
- [10] R.Yu. Ivanyushkin, O.V. Varlamov, A.K. Syagaev, "Nonlinear distortions of the DRM standard signal in synthetic linear amplification circuits. In the collection: Signal processing in terrestrial radio communication and warning systems," *Materials of the XV interregional scientific and technical conference*. Nizhny Novgorod, 2007, pp. 301-310.
- [11] O.V. Varlamov, D.C. Nguyen, S.E. Grychkin, "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.
- [12] O.V. Varlamov, D.C. Nguyen, S.E. Grychkin, "Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques," *T-Comm*. 2021. vol. 15, no.9, pp. 11-16. DOI: 10.36724/2072-8735-2021-15-9-11-16.
- [13] O.V. Varlamov, V.G. Lavrushenkov, "The quality criteria for the DRM standard transmitting device and the measuring equipment," *Broadcasting. Television and radio broadcasting*. No. 3, pp. 44-48, 2004.
- [14] O.V. Varlamov, V.N. Gromorushkin, "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.
- [15] S.S. Dymkova, "Cloud iot platforms and applications for optimizing transport management," *REDS: Telecommunication devices and systems*. 2020. Vol. 10. No. 4, pp. 39-50.
- [16] D. Chivanov, S. Dymkova, "Impact of 5G network performance on users loyalty," *Synchroinfo Journal*. 2024. Vol. 10. No. 1. pp. 39-52.
- [17] A. Pastukh, V. Tikhvinskiy, S. Dymkova, O. Varlamov, "Challenges of Using the L-Band and S-Band for Direct-to-Cellular Satellite 5G-6G NTN Systems," *Technologies*, vol. 11, no. 4, p. 110, Aug. 2023, doi: 10.3390/technologies11040110.
- [18] O.V. Varlamov, "Intermodulation distortion in voltage mode class D switching amplifiers with resistive load," *T-Comm*, 2022. Vol. 16, no.10, pp. 4-11.

- [19] O.V. Varlamov, "Theoretical approach to calculating reverse intermodulation distortion in voltage mode class D RF power amplifiers," *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, SOSG 2022 - Conference Proceedings*, 2022.
- [20] A.V. Dolgopyatova, O.V. Varlamov, "Intermodulation distortion in current mode and bridge class D switching amplifiers with resistive load," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.3, pp. 4-13. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-3-4-13
- [21] A.V. Dolgopyatova, O.V. Varlamov, "Reverse Intermodulation Distortion in Current Mode and Bridge Class D RF Power Amplifiers," *2023 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*, Moscow, Russian Federation, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/IEEECONF56737.2023.10092117.
- [22] M. Kamper, G. Ulbricht, R. Weigel, G. Fischer, "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.
- [23] O. Varlamov, D.C. Nguyen, A. Grebennikov, "Broadband and efficient envelope amplifier for envelope elimination and restoration/envelope tracking higher-efficiency power amplifiers," *Sensors*. 2022. vol. 22. No. 23, pp. 9173. doi: 10.3390/s22239173.
- [24] O.V. Varlamov, "Powerful broadband DC amplifiers for modulation path of transmitters with separate amplification," *T-Comm*, 2022. vol. 16, no.11, pp. 4-14. DOI: 10.36724/2072-8735-2022-16-11-4-14.
- [25] O.V. Varlamov O.V., "Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path," *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021 - Proceedings*. 2021, pp. 9619166. doi: 10.1109/EMCTECH53459.2021.9619166.
- [26] S.E. Grychkin, A.M. Zakharov, O.V. Varlamov, "Method for calculating the efficiency of a PWM modulator based on GaN FET transistors," *T-Comm*, 2023. Vol. 17, no.9, pp. 19-27. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-9-19-27.
- [27] S.E. Grychkin, A.M. Zakharov, O.V. Varlamov, "Calculation and Simulation of GaN FET Modulator for Envelope Elimination and Restoration Power Amplifier," *2023 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Pskov, Russian Federation, 2023, pp. 1-7, doi: 10.1109/SYNCHROINFO57872.2023.10178469.
- [28] D.C. Nguyen, V.N. Gromorushkin, O.V. Varlamov, "Theoretical comparison of different envelope elimination and restoration transmitter PWM modulator configurations to expand the possible antenna mismatch," *Sensors*. 2023. Vol. 23. No. 23, pp. 9466. doi: 10.3390/s23239466.
- [29] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Dependence of modern telecommunication signals transmitter with components separation output signal distortion level on the envelope path filter parameters," *T-Comm*, 2023. vol. 17, no.2, pp. 12-26. DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-2-12-26.
- [30] V.N. Gromorushkin, O.V. Varlamov, A.V. Dolgopyatova, A.A. Voronkov, "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.
- [31] O.V. Varlamov, A. Grebennikov, "Experimental Studies of Envelope Elimination and Restoration HF Power Amplifier Characteristics with Narrow-band Matched Load," *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, 2022, pp. 1-4, doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840873.
- [32] D.C. Nguyen, "Methods of reducing antenna bandwidth requirements for envelope elimination and restoration transmitter," *Radiotekhnika*. 2023. Vol. 87. No. 9, pp. 5-11. DOI: <https://doi.org/10.18127/j00338486-202309-09>.
- [33] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load," *H&ES Reserch*. 2022. Vol. 14. No 2, pp. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.
- [34] D.C. Nguyen, O.V. Varlamov, "Simulation Model for Switching Mode Envelope Elimination and Restoration RF Power Amplifiers Research," *2022 Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SYNCHROINFO)*, Arkhangelsk, Russian Federation, pp. 1-6. 2022. doi: 10.1109/SYNCHROINFO55067.2022.9840917.
- [35] S.F. Gorgadze, A.A. Maximov, "Harmonic balance theory for scheme technical design," *T-Comm*, 2020. Vol. 14, no.11, pp. 21-32. DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-21-32.
- [36] O. Varlamov, "Research of influence of DRM broadcast transmitter nonlinearities onto the output signal parameters," *T-Comm*. 2014. Vol. 8. No. 2, pp. 59-60.
- [37] D.S. Chirov, E.O. Lobova, "Wideband HF signals dispersion distortion compensator based on digital filter banks. Theory and approximation," *T-Comm*. 2020. Vol. 14. No. 4, pp. 57-65.

Information about author:

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