

ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАДИОПЕРЕДАЮЩЕЙ АППАРАТУРЫ

DOI: 10.36724/2072-8735-2023-17-5-25-31

Manuscript received 14 April 2023;
Accepted 07 May 2023

Грычкин Сергей Евгеньевич,
Московский технический университет связи
и информатики, Москва, Россия,
sg@radiotest-mtuci.ru

Ключевые слова: энергетическая
эффективность, радиоэлектронная аппаратура,
КПД, усилитель мощности, цифровое
радиовещание

В настоящее время повышение энергетической эффективности радиоэлектронной аппаратуры является одной из важнейших задач при разработке и модернизации аппаратуры всех радиослужб, причем в некоторых сферах применения радиоэлектронной аппаратуры энергетическая эффективность критически важна. Портативные абонентские устройства связи в настоящее время получили огромное развитие. Такие устройства используются как в качестве устройств абонентской связи при развитии сетей связи общего пользования и предприятий, так и в качестве портативных индивидуальных устройств, выполняющих различные другие функции, такие как запись и воспроизведение мультимедиа, платежные функции и другие функции. Мобильные абонентские портативные устройства, такие как смартфоны, планшеты, портативные ноутбуки и устройства для чтения электронных книг, оснащаются сенсорными экранами и гибкими экранами, а их функциональные возможности расширяются за счет добавления новых функций, таких как считывание штрих-кодов, RFID и считывание смарт-карт. Все это требует большего потребления энергии. Требование к обеспечению энергоэффективности портативных абонентских устройств связи выступает вместе с требованием минимизации массо-габаритных показателей таких устройств. Рассматриваются основные проблемы, которые имеют место при разработке и эксплуатации радиопередающей аппаратуры, и перечислены решения, которые позволяют повысить КПД передатчиков. Поскольку повышение энергетической эффективности особенно важно для усилителей мощности (УМ) оконечных каскадов передатчиков, проведен анализ ключевых режимов работы УМ, пригодных для построения модулируемых оконечных каскадов радиопередатчиков систем цифрового радиовещания, и их сравнение. Обсуждаются режимы работы ключевых усилителей мощности и методы достижения высокой энергетической эффективности усилителей мощности, показаны их достоинства и недостатки.

Для цитирования:

Грычкин С.Е. Повышение энергетической эффективности радиопередающей аппаратуры // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2023. Том 17. №5. С. 25-31.

For citation:

Grychkin S.E. (2023) Energy efficiency increasing of radio transmitters. T-Comm, vol. 17, no.5, pp. 25-31. (in Russian)

Введение

В настоящее время к радиоэлектронной аппаратуре предъявляются высокие требования по энергоэффективности при разработке и модернизации аппаратуры всех радиослужб и диапазонов частот [1]. К радиопередатчику как наиболее энергоемкой части радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) предъявляются требования повышения энергетической эффективности (КПД) при сохранении функциональных показателей, а также переходу к улучшению таких показателей радиопередатчиков [2].

Наибольшая потребность в разработке высокоэффективных передатчиков РЭА имеется для мощных радиопередатчиков [3], а также передатчиков портативной абонентской РЭА и необслуживаемых передатчиков передачи данных, в том числе для РЭА Интернета Вещей (IoT) [4,5]. Именно для таких передатчиков необходимо, в первую очередь повышать энергетическую эффективность.

Мощные радиопередатчики широко применяются в цифровом радиовещании [6,7] и цифровом телевидении [8]. Потребление мощности в таких передатчиках велико, так что в целях уменьшения потерь требуется применение методов повышения КПД.

Портативные абонентские устройства связи в настоящее время получили огромное развитие. Такие устройства используются как в качестве устройств абонентской связи при развитии сетей связи общего пользования и предприятий, так и в качестве портативных индивидуальных устройств, выполняющих различные другие функции, такие как запись и воспроизведение мультимедиа, платежные функции и другие функции [9]. Мобильные абонентские портативные устройства, такие как смартфоны, планшеты, портативные ноутбуки и устройства для чтения электронных книг, оснащаются сенсорными экранами и гибкими экранами, а их функциональные возможности расширяются за счет добавления новых функций, таких как считывание штрих-кодов, RFID и считывание смарт-карт. Все это требует большего потребления энергии. Требование к обеспечению энергоэффективности портативных абонентских устройств связи выступает вместе с требованием минимизации массо-габаритных показателей таких устройств.

Необслуживаемые радиопередатчики и радиопередатчики для IoT функционируют долгое время без подзарядки. Такие передатчики должны иметь малые потери энергии, то есть высокий КПД. Для этого нужно минимизировать расход энергии в режиме ожидания, применять такие режимы работы активных элементов, которые обеспечивают высокий КПД [4].

В настоящей работе рассматриваются способы повышения энергоэффективности выходных каскадов радиопередатчиков. Подробно обсуждаются высокоэффективные ключевые режимы работы оконечных каскадов усилителей мощности и синтетические методы линейного усиления в ключевых усилителях мощности.

Способы повышения энергоэффективности радиопередатчиков

Рассмотрим пример структурной схемы радиопередатчика (рис. 1). Поскольку в радиопередатчике максимальное

потребление энергии происходит в оконечных каскадах усилителя мощности, то именно в этих блоках и должен обеспечиваться максимальный КПД, так как он определяет КПД всего передатчика. Следует подчеркнуть, что устройства электропитания, интегрированные или поставляемые в комплекте с радиопередатчиком, также должны обладать высоким КПД.

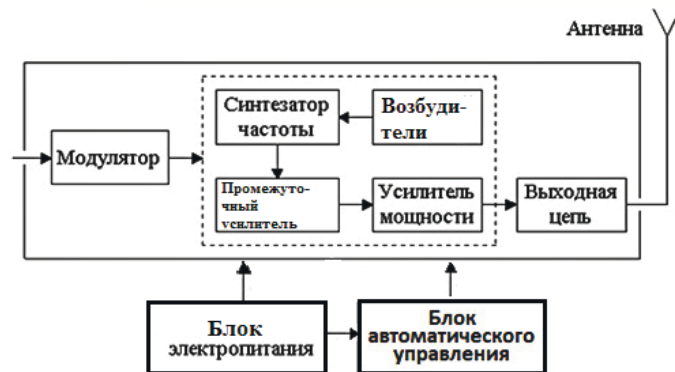


Рис. 1. Структурная схема радиопередатчика

Источниками потерь в схеме передатчика являются потери на тепловое излучение, паразитное радиоизлучение, потери за счет рассогласований на стыках в выходной цепи (сумматорах и выходных фильтрах) при прохождении мощного радиосигнала в антенну.

Особенностью современных передатчиков является применение модуляции радиосигналов (например, OFDM и др.) с пик-фактором, достигающим 12-15 дБ. Для достижения большей энергетической эффективности переходят к применению ключевых режимов работы УМ в модуляторах оконечных каскадов передатчиков. В [10,11] рассмотрены возможности повышения КПД при использовании ключевых режимов усилителей (режимы D и DE), схемы Кана [12], схемы Догерти [13]. В [14-16] рассмотрены синтетические методы усиления, в том числе с применением автоматической подстройки электропитания, и показано, что такие комбинированные синтетические методы могут применяться для обеспечения минимизации потерь в усилителе.

Тепловой режим любого передатчика чрезвычайно важен для получения высокого КПД. Это связано как с режимами работы активных элементов, которые не могут быть оптимальными при высоких температурах, так и уходом настроек в схеме передатчика, оптимизированного при проектировании.

Отношение рассеиваемой мощности P_d к полезной мощности P_u растет с уменьшением КПД η согласно соотношению:

$$P_d/P_u = (1 - \eta)/\eta. \quad (1)$$

При построении передатчика требуется отвод тепла с применением радиаторов. Расчет требуемого радиатора для обеспечения температурного режима активного элемента (АЭ) $t_{AЭ}$ при температуре передатчика $t_{tr\max}$ оценивается по формуле [17]:

$$R_{rad} \leq (t_{dAЭ} - t_{tr\max})/P_d. \quad (2)$$

Минимальная площадь поверхности радиатора S_{rad} , требуемая для отведения тепла транзистора, зависит от КПД согласно формуле:

$$S_{rad} = P_u k (1 - \eta) / \eta, \quad (3)$$

где для пластинчатого радиатора и естественного воздушного охлаждения коэффициент $k = (0,1 \dots 0,25) / \Delta t$ при $\Delta t = t_{d\Delta t} - t_{trmax}$ [17].

Результат расчета нормированной площади радиатора S_{rad} / P_u от η приведен на рисунке 2.

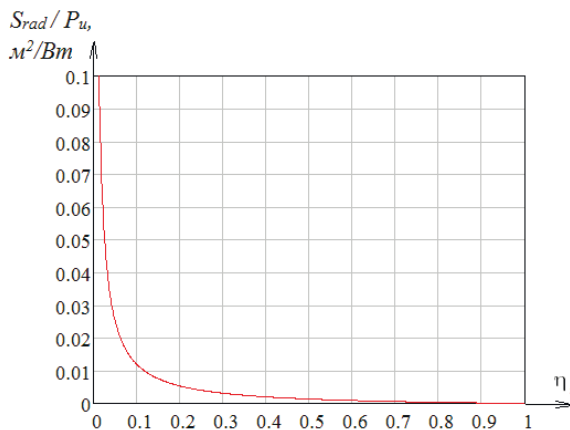


Рис. 2. Зависимость нормированной площади радиатора от КПД (для $\Delta t = 75^\circ\text{C}$)

Кроме того, недостаточный отвод тепла может повлиять на надежность радиопередатчика. На рисунке 3 приведен график зависимости срока службы мощного высокочастотного LDMOS транзистора от температуры перехода, рассчитанный на калькуляторе [18].

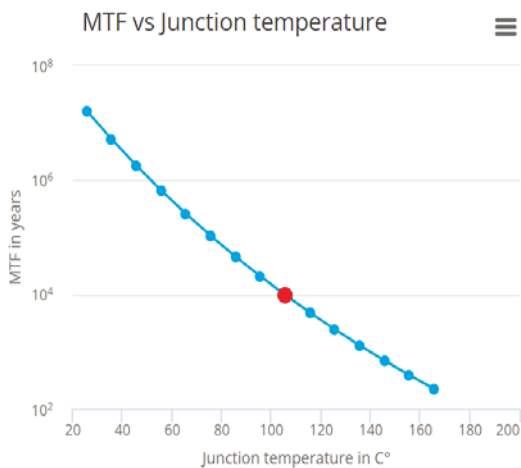


Рис. 3. Расчетная зависимость срока службы (в годах) LDMOS транзистора от температуры перехода ($^\circ\text{C}$) (расчетный пример для транзистора BLF188XR при рабочей температуре 105°C)

Достижение высокой энергоэффективности радиопередатчиков должно происходить при одновременном обеспечении всех требуемых показателей качества выходного сигнала. Обеспечение линейности усилителей мощности является важным требованием для удовлетворения таких требований.

Обеспечение параметров выходного сигнала достигается при работе усилителя в соответствующих режимах, а также применением дополнительных схемных решений (например, предкоррекции и др.), минимизирующих нелинейные искажения. Для устранения возможных помех передатчикам в соседних каналах предъявляются требования к уровню внеполосных излучений (обеспечение маски спектра), что может потребовать наличия дополнительных фильтров в схеме передатчика [19-24]. Требования по уровням побочных излучений в широком диапазоне частот определяются нормативными документами и направлены на обеспечение электромагнитной совместимости.

Приведем основные способы, применяемые для построения передатчиков для применений, в которых высокая энергетическая эффективность является важнейшим показателем:

- увеличение электронного КПД УМ путем применения таких методов как переход к эффективным ключевым режимам, в том числе с применением синтетических и комбинированных методов;
- использование высокоэффективных вторичных источников электропитания;
- использование управляемых источников вторичного питания в усилителях, позволяющих регулировать напряжение питания в зависимости от огибающей сигнала с достаточно высокой скоростью;
- снижение рассогласований и потерь в выходных пассивных устройствах;
- недопустимость перегрева, поддержание номинальной температуры работы передатчика;
- использование способов снижения пик-фактора сигнала.

Сравнительный анализ высокоэффективных режимов работы и методов построения ключевых усилителей мощности

Для построения усилителей мощности для передатчиков, работающих со сложными сигналами с высоким пик-фактором, требуется высокая линейность УМ. Однако высокая линейность УМ обычно достигается за счет низкого КПД, который резко падает при высоком пик-факторе из-за разности напряжений между напряжением питания и усиливаемым сигналом. Для достижения большей энергетической эффективности переходят к применению ключевых режимов работы УМ в оконечных каскадах передатчиков. Энергетическая эффективность ключевых усилителей мощности (КУМ) является результатом использования АЭ – биполярного или MOSFET (МОП) транзисторов в качестве ключевого элемента.

Рассмотрим построение КУМ на биполярных или MOSFET (МОП) транзисторах. В ключевом режиме АЭ работает только в режимах открытого и закрытого ключа - соответственно, отсечки и насыщения.

Ключевые УМ класса D являются в настоящее время основным перспективным видом усилителей для применения в цифровых радиопередатчиках диапазона ОВЧ. УМ класса D называют импульсные УМ с выходным фильтром, настроенным на основную частоту, в которых мощность постоянного тока преобразуется в мощность в нагрузке на основной частоте, без потерь мощности на гармониках.

КПД УМ может быть максимальным, если АЭ работает как переключатель. Когда АЭ (например, транзистор) включен, напряжение почти равно нулю, и через АЭ протекает большой ток, то есть в течение этой части периода транзистор действует как низкоомный (замкнутый ключ). Когда транзистор выключен, то ток равен нулю, а на АЭ присутствует высокое напряжение, то есть в течение оставшейся части периода АЭ действует как открытый ключ.

В КУМ АЭ действуют как двухполюсный переключатель, который определяет либо прямоугольную форму сигнала напряжения, либо прямоугольного тока коллектора (или стока). Выходная цепь настроена на частоту коммутации и, в идеальном случае, удаляет все гармонические составляющие, в результате чего в нагрузку подается чисто синусоидальный сигнал. Рассмотрим основные принципиальные схемы и формы сигналов, соответствующие различным типам УМ класса D с выходным фильтром [10-11].

На рисунке 4а) представлена схема транзисторного УМ класса D с переключением напряжения, состоящего из одностипных АЭ (транзисторов), работающих в ключевом режиме.

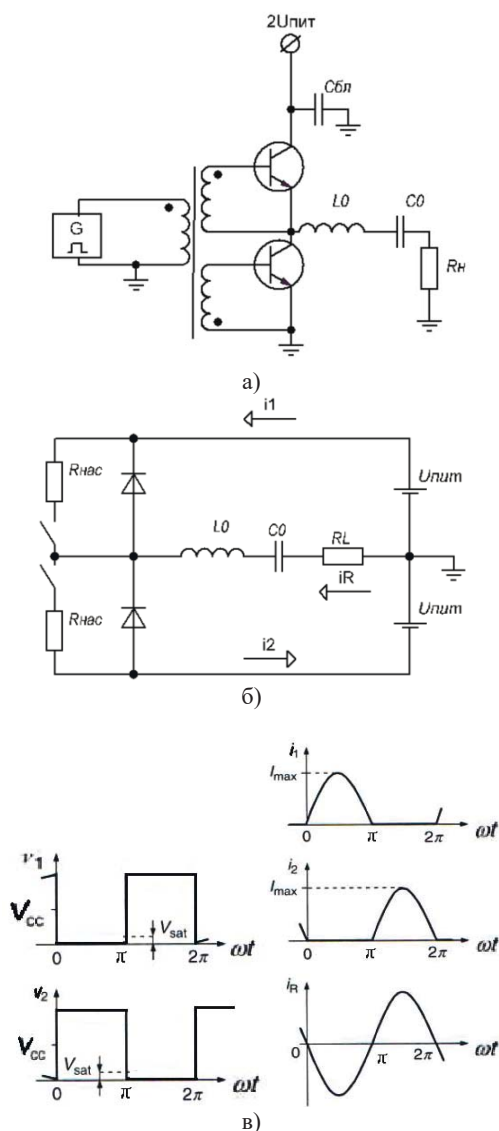


Рис. 4. Схема двухтактного КУМ (а), упрощенная схема КУМ класса D с переключением напряжения (б) и временные диаграммы токов и напряжений для времени насыщения 180° (в)

На рисунке 4б) приведена упрощенная схема этого УМ, в которой АЭ представлены как переключатели с сопротивлением насыщения r_{sat} , в которую входят настроенный на центральную частоту фильтр L_0C_0 и резистивная нагрузка с сопротивлением R_L . В этой схеме транзистор, представленный переключателем, приводится в действие таким образом, чтобы обеспечить попеременное переключение между включенным и выключенным состояниями работы транзистора в пределах рабочего цикла. Чередующееся полупериодное переключение двух АЭ между их режимом отсечки и режимом насыщения по напряжению приводит к прямоугольным импульсам напряжения на стоке (коллекторе) с максимальной амплитудой $2V_{CC}$, как показано на рисунке 4в).

В двухтактном УМ с переключением напряжения и последовательным фильтром эффективность коллекторной цепи равна 100 % для идеализированного случая АЭ без потерь с нулевым сопротивлением насыщения.

Однако на практике КУМ класса D можно использовать на достаточно низких частотах из-за гораздо более высоких потерь, возникающих вследствие следующих факторов:

- неидеальность настроек схемы усилителя;
- переключения транзисторов с отличным от нуля током (коммутативные потери);
- невозможность обеспечения исключительно резистивную нагрузку на высоких частотах.

Коммутативные потери в КУМ класса D обусловлены нарастанием и спадом тока АЭ при скачке напряжения (рис.5в), и рассчитываются на основании соотношений для нарастания напряжения (4) и спада напряжения (5):

$$u'(t) = 1 - \exp(-t/\tau_1), \quad (4)$$

$$u''(t) = \exp(-t/\tau_2), \quad (5)$$

где τ_1 и τ_2 – постоянные времени фронта и спада.

УМ класса D реализуется в относительно простых схемах, имеет хорошие диапазонные свойства, высокие коэффициенты использования АЭ по мощности. Но КУМ класса D при этом имеет недостатки: применение только на низких частотах, относительно невысокий КПД по первой гармонике, рост коммутационных потерь из-за влияния выходной емкости с ростом частоты, режим требует исключительно резистивной нагрузки, а при построении КУМ по мостовой схеме также добавляются потери мощности на балластном сопротивлении.

Недостатки УМ класса D с коммутацией напряжения преодолеваются в УМ класса DE (рис. 5), в которой заряд и разряд шунтирующей емкости в коммутационном узле может быть выполнен без участия транзисторов в этих действиях и без рассеивания мощности транзисторами. Однако частотные ограничения УМ класса D связаны с паразитными коллекторными шунтирующими емкостями, что приводит к увеличению времени переключения из-за заряда и разряда конденсатора, а также тот факт, что транзисторные ключи заряжают и разряжают шунтирующую емкость, рассеивая мощность.

Рассматриваемые выше потери мощности УМ класса D можно уменьшить, например, при введении времени задержки в период, когда один АЭ уже выключен, а другой еще не включен. Такой способ может увеличить диапазон частот, в котором применяется УМ. Этого можно добиться, введя условия переключения УМ класса E, когда коммутационные потери при переходе от выключения к включению сводятся к

нулю за счет нулевого напряжения при нулевой производной напряжения. Поскольку шунтирующий конденсатор должен быть разряжен именно в это время, в цепь нагрузки следует включить дополнительный последовательный дроссель L , как показано на рисунке 5б. В результате получается, что формы коммутируемого тока и напряжения имеют характеристики как класса D, так и класса E. Фильтр L_0C_0 служит для подавления гармонических составляющих.

Такой УМ класса DE [14] может применяться благодаря высокой эффективности работы на более высоких рабочих частотах. Оптимальные параметры УМ класса DE могут быть определены на основе его анализа форм напряжения коллектора и тока. На рисунке 5а показана упрощенная схема КУМ класса DE, при этом АЭ заменены ключами. Во время цикла переключения эти ключи последовательно занимают следующие положения: ключи поочередно замкнуты либо оба разомкнуты. Подробный теоретический анализ УМ класса DE дан в [14]. При использовании КУМ режима класса DE рабочий диапазон частот с КПД около 90 % может быть более чем в два раза выше по сравнению с КУМ класса D.

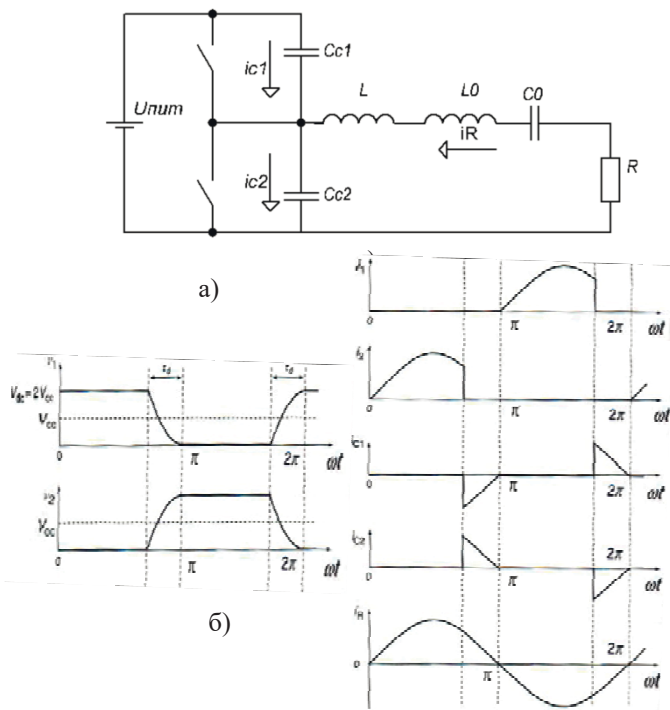


Рис. 5. Упрощенная схема УМ класса DE с переключением напряжения (а) и временные диаграммы токов и напряжений (б)

Вариантом "синтетического" построения высокоэффективного усилителя является КУМ по схеме Кана. В такой схеме происходит разделение входного сигнала передатчика на амплитудную и фазовую составляющие, а выходной сигнал синтезируется по огибающей и фазомодулированному заполнению [12].

Таким образом, усилению подвергается сигнал с постоянной огибающей и фазоманипулированным заполнением. Восстановление амплитудной модуляции происходит в оконечном каскаде передатчика. Благодаря синтезированию усиленного сигнала в оконечном каскаде, энергоэффективность рассматриваемого КУМ достаточно велика.

Однако в усилителе по схеме Кана за счет инерционности фильтра НЧ в оконечном каскаде может иметь место отсутствие синхронизма, то есть момент прихода фазомодулированного заполнения и момент прихода огибающей не совпадают. Требования к допустимой рассинхронизации каналов весьма жесткие и сильно зависят от полосы канала: чем шире полоса частот, занимаемая сигналом, тем жестче требования к максимально допустимой задержке.

Выполнить требования на синхронизацию каналов можно при использовании в модуляционном тракте многофазной ШИМ. Такое решение существенно ослабляет требования к ФНЧ модулятора, снижая его инерционности. Однако для эффективного использования многофазной ШИМ необходимо обеспечить достаточно точную фазировку между каналами.

Относительное фазовое несоответствие $\Delta\varphi$ для ШИМ модулятора с n каналами, где n – четное, можно определить по формуле [19]:

$$\Delta\varphi = \left\{ n^{2z} \frac{1 - J_0(2\pi)}{1 - J_0(2n\pi)} \left[1 + \left(\sum_{i=1}^{n/2} \sin\left(\frac{2\pi}{n}(i-1)\right) \right)^2 \right] \right\}^{-1/2}, \quad (6)$$

в которой J_0 – функция Бесселя нулевого порядка, z – порядок ФНЧ в схеме усилителя.

В КУМ по схеме Кана в оконечных каскадах передатчика за счет изменения паразитных емкостей АЭ и под действием прикладываемого напряжения к АЭ возникает с амплитудно-фазовая конверсия. Таким образом, перечисленные выше два недостатка в таком усилителе приводят к нелинейным искажениям сигнала, что требует применения специальных мер по линейризации передатчика. Еще один недостаток связан с необходимостью пропускать всю полосу огибающей через высокоэффективный канал управления напряжением питания тех каскадов усиления, в которых осуществляется амплитудная модуляция, причем чем шире полоса канала огибающей, тем выше требуется тактовая частота импульсного устройства регулировки напряжения питания.

Как показал проведенный анализ литературы [25], для случая экстремально широких полос модулирующих частот, соответствующих широкополосным 5G приложениям, возможно применение в качестве модуляционного устройства линейного усилителя с квантованием входного сигнала [26]. Однако, применение данного решения приводит к снижению результирующего КПД.

В схеме КУМ с дефазированием формирователь канальных сигналов формирует из введенного амплитудно-модулированного сигнала два синусоидальных сигнала с постоянной огибающей и с разницей фаз φ , пропорциональной арккосинусу амплитуды огибающей

$$\varphi = 2 \arccos(U_{in}), \quad (7)$$

где $U_{in} = U/U_{max}$ – нормированное входное напряжение огибающей к максимальной амплитуде выходного напряжения при пиковом напряжении огибающей U_{max} .

Эти два сигнала затем усиливаются нелинейными УМ и суммируются для получения выходного амплитудно-модулированного сигнала. Пиковая выходная мощность получается при синфазном сложении по фазе токов от УМ с равными амплитудами аналогично двухтактному УМ.

КУМ по схеме с дефазированием имеет, в свою очередь, ряд недостатков: сложность схемы канальных формирователей и чувствительность усилителей к широкому диапазону импедансов нагрузки. С возрастанием частоты увеличивается чувствительность к фазовым ошибкам, вызванным разницей электрических длин двух каналов УМ. Все это увеличивает сложность практической реализации КУМ.

Заключение

В настоящей работе проведен анализ требований по энергоэффективности при разработке и модернизации РЭА. Приведены сферы применения РЭА, в которых энергетическая эффективность является решающим показателем.

Перечислены основные источники потерь в радиопередатчике. Показано, что ключевые режимы работы в выходных каскадах передатчиков, в том числе с применением комбинированных и синтетических методов в усилителях мощности, являются необходимыми для достижения высокого КПД.

Приведены основные способы, применяемые для построения энергоэффективных передатчиков при условии сохранения высоких требований к качеству выходного сигнала.

Как показал проведенный в настоящей работе сравнительный анализ схем УМ различных типов для оконечных каскадов передатчиков, каждая из схем и классов КУМ имеет ряд недостатков, которые не позволяют выбрать универсальный оптимальный вариант такого усилителя, так что применение конкретных УМ зависит от совокупности требуемых характеристик передатчика. Другой путь – использование синтетических и комбинированных методов построения высокоэффективных УМ для увеличения результирующего КПД оконечных каскадов передатчиков.

Литература

1. Грычкин С.Е., Строганова Е.П. Основные требования к энергоэффективности инфокоммуникационного и электрического оборудования // Технологии информационного общества. Сборник трудов XIV Международной отраслевой научно-технической конференции. 2020, с. 29-30.
2. Повышение эффективности мощных радиопередающих устройств / Под ред. А.Д. Артыма. М.: Радио и связь. 1987. 176 с.
3. Варламов О.В., Варламов В.О., Долгопятова А.В. Международная сеть DRM вещания для создания информационного поля в Арктике // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2019. Т. 13. С. 9-16.
4. 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, p. 1-4, 9078651.
5. Дымкова С.С. Облачные IOT платформы и приложения для оптимизационного управления транспортом // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 4. С. 39-50.
6. Варламов О.В. Организация одночастотных сетей цифрового радиовещания стандарта DRM. Особенности и результаты практических испытаний // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2018. Т. 12. № 11. С. 4-20.
7. Варламов О.В., Аби Ассали Бычкова А. Разработка сети синхронного цифрового радиовещания стандарта DRM для Венесуэлы // REDS: Телекоммуникационные устройства и системы. 2020. Т. 10. № 2. С. 23-27.
8. 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 2020 - Proceedings. 2020. С. 9261562.
9. Malkovich O.B., Grychkin S.E., Stroganova E.P. Investigation of Portable Communication Devices with Electrochemical Power Sources Application Features // 2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications, Moscow, Russia. 2022, p. 1-4, 9744368.
10. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions // Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF), Saint-Petersburg, Russia. 2020, p. 1-6, 9131508.
11. Varlamov O.V., Chugunov I.V. Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation // Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO), Kazan. 2017, p. 1-3. 7997508.
12. Kahn L.R. Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration // Proceedings of the IRE. 1952, vol. 40, № 7, p. 803-806.
13. Raab F.H. Efficiency of Doherty RF Power-Amplifier Systems // IEEE Trans. Broadcasting. 1987, vol. BC-33, № 9, p. 77-83.
14. Sheikhi A. Effect of Shunt Capacitances on Performance of Current-Mode Class-DE Power Amplifier at Any Active Time / A. Abdipour, A. Grebennikov, H. Hemesi // IEEE Transactions on Power Electronics. 2018, vol. 33, №. 8, p. 7038-7045.
15. Варламов О.В., Нгуен Д.К., Грычкин С.Е. Комбинирование синтетических методов высокоэффективного высокочастотного усиления // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2021. Т. 15. № 9. С. 11- .
16. 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, Conference Proceedings. 2021. С. 9416126.
17. Корякин-Черняк С.Л., Парчала О.Н., Шустов М.А. Электротехнический справочник. Практическое применение современных технологий. М.: Наука и Техника, 2014, 592 с.
18. <https://www.ampleon.com/support/rf-power-lifetime-calculator.html> (RF Power Lifetime Calculator).
19. Варламов О.В. Подавление побочных продуктов преобразования в модуляторе с многофазной ШИМ при асимметрии каналов // Труды Научно-исследовательского института Радио. 2022, № 2. С. 49-57.
20. 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. С. 9619166.
21. 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 - Conference Proceedings. 2021. С. 9488387.
22. Varlamov O.V. 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.
23. Варламов О.В. Интермодуляционные искажения в ключевых генераторах класса D с резистивной нагрузкой в режиме переключения напряжения // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2022. Т. 16. № 10. С. 4-11.
24. 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.
25. Варламов О.В., Дымкова С.С., Городилина М.В. Авторские профили в наукометрических базах данных. Учебно-методическое пособие. М.: Медиа Паблишер, 2020.
26. 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.

ENERGY EFFICIENCY INCREASING OF RADIO TRANSMITTERS

Sergey E. Grychkin, Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia, sg@radiotest-mtuci.ru

Abstract

At present, increasing the energy efficiency of radio electronic equipment is one of the most important tasks in the development and modernization of equipment for all radio services, and in some areas of application of radio electronic equipment, energy efficiency is critical. The main problems that occur in the development and operation of radio transmitting equipment are considered, and solutions are listed that can increase the efficiency of transmitters. Since the increase in energy efficiency is especially important for high-power power amplifiers of the final stages of transmitters, in this paper we analyze the radio transmitters switching operating modes, suitable for building modulators of the final stages of radio transmitters of digital broadcasting systems. The operating modes of switching power amplifiers and methods for achieving high energy efficiency of power amplifiers are discussed, their advantages and disadvantages are shown. The comparative analysis of circuits and classes of various types switching power amplifiers showed that each of them has a number of disadvantages that do not allow choosing the universal optimal version of such amplifier, so that the use of specific power amplifiers depends of the transmitter required characteristics. Another way is to use synthetic and combined methods for constructing high-performance power amplifiers to increase of the transmitters final stages resulting efficiency.

Keywords: energy efficiency, electronic equipment, efficiency, power amplifier, digital broadcasting.

References

1. Grychkin S.E., Stroganova E.P. (2020) Basic requirements for energy efficiency of infocommunication and electrical equipment. *Technologies of the Information Society. Proceedings of the XIV International Industry Scientific and Technical Conference*. P. 29-30.
2. Improving the Efficiency of Powerful Radio Transmitting Devices / Ed. A. D. Artym. M.: Radio and communication. 1987. 176 p.
3. Varlamov O.V., Varlamov V.O., Dolgopyatova A.V. (2019) DRM broadcasting international network to create an information field in the Arctic region. *T-Comm*, vol. 13, no.9. P. 9-16.
4. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. (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. P. 1-4, 9078651.
5. Dymkova S.S. (2020) Cloud IOT platforms and applications for optimizing transport management. *REDS: Telecommunication devices and systems*. Vol. 10. No. 4. P. 39-50.
6. Varlamov O.V. (2018) Organization of single frequency DRM digital radio broadcasting networks. Features and results of practical tests. *T-Comm*. Vol. 12, no.11. P. 4-20.
7. Varlamov O.V., Abi Assali Bychkova A. (2020) Development of DRM synchronous digital broadcasting network for Venezuela. *REDS: Telecommunication devices and systems*. Vol. 10. No. 2. P. 23-27.
8. Varlamov O.V. (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 2020 - Proceedings*. P. 9261562.
9. Malkovich O.B. Grychkin S.E., Stroganova E.P. (2022) Investigation of Portable Communication Devices with Electrochemical Power Sources Application Features. *2022 Systems of Signals Generating and Processing in the Field of on Board Communications*. Moscow. P. 1-4, 9744368.
10. Varlamov O.V., Gromorushkin V.N. (2020) Class D Switching Power Amplifier with a Filter under Load Mismatch Conditions. *Wave Electronics and its Application in Information and Telecommunication Systems (WECONF)*, Saint-Petersburg, Russia. P. 1-6, 9131508.
11. Varlamov O.V. Chugunov I.V. (2017) Modeling of efficiency UHF class-D power amplifier with bandpass sigma-delta modulation. *Systems of Signal Synchronization, Generating and Processing in Telecommunications (SINKHROINFO)*, Kazan. P. 1-3. 7997508.
12. Kahn L.R. (1952) Single-Sideband Transmission by Envelope Elimination and Restoration. *Proceedings of the IRE*. Vol. 40. No. 7. P. 803-806.
13. Raab F.H. (1987) Efficiency of Doherty RF Power-Amplifier Systems. *IEEE Trans. Broadcasting*. Vol. BC-33. No. 9. P. 77-83.
14. Sheikhi A. (2018) Effect of Shunt Capacitances on Performance of Current-Mode Class-DE Power Amplifier at Any Active Time / A. Abdipour, A. Grebennikov, H. Hemesi. *IEEE Transactions on Power Electronics*. Vol. 33. No. 8. P. 7038-7045.
15. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. (2021) Combination of synthetic high-performance RF amplification techniques. *T-Comm*. Vol. 15. No.9. P. 11-16.
16. Varlamov O.V., Nguyen D.C., Grychkin S.E. (2021) 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, Conference Proceedings*. P. 9416126.
17. Koryakin-Chernyak S. L., Partala O. N., Shustov M. A. (2014) Electrotechnical reference book. Practical application of modern technologies. Moscow: Science and Technology, 2014, 592 p.
18. <https://www.ampleon.com/support/rf-power-lifetime-calculator.html> (RF Power Lifetime Calculator).
19. Varlamov O.V. (2022) Suppression of conversion by-products in a multi-phase PWM modulator with channel asymmetry. *Proceedings of the Scientific Research Institute of Radio*. No. 2. P. 49-57.
20. Varlamov O.V. (2021) Multiphase PWM characteristics in the EER transmitter envelope path. *2021 International Conference on Engineering Management of Communication and Technology, EMCTECH 2021 - Proceedings*. P. 9619166.
21. Gromorushkin V.N., Varlamov O.V. (2021) 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 - Conference Proceedings*. P. 9488387.
22. Varlamov O.V. (2022) 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*.
23. Varlamov O.V. (2022) Intermodulation distortion in voltage mode class D switching amplifiers with resistive load. *T-Comm*. Vol. 16. No.10. P. 4-11.
24. Nguyen D.C., Varlamov O.V. (2022) Simulation model for studying the operation of switching mode envelope elimination and restoration RF power amplifiers for a narrow-band load. *H&ES Reserch*. Vol. 14. No 2. P. 10-18. doi: 10.36724/2409-5419-2022-14-2-10-18.
25. Varlamov O. V., Dymkova S. S., Gorodilina M. V. (2020) Author's profiles in scientometric databases, Moscow, 2020.
26. Varlamov O., Nguyen D.C., Grebennikov A. (2022) Broadband and efficient envelope amplifier for envelope elimination and restoration/envelope tracking higher-efficiency power amplifiers. *Sensors*. Vol. 22. No. 23. P. 9173.

Information about author:

Sergey E. Grychkin, Senior Lecturer of Moscow Technical University of Communication and Informatics, Moscow, Russia