

# Усилители мощности по схеме Догерти

## Часть 1

В. Кочемасов, к. т. н.<sup>1</sup>, Т. Косичкина, к. т. н.<sup>2</sup>

УДК 621.375 | ВАК 05.27.01

Усилители мощности по схеме Догерти появились давно – еще в 30-х годах 20-го века. С тех пор они успешно использовались в различных приложениях. Сегодня интерес к этим устройствам возрастает. О современных усилителях Догерти – их архитектуре, технологиях изготовления, преимуществах и др. рассказывается в данной статье.

Современные системы связи обычно используют сложные технологии, такие как мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов (OFDM) и множественный доступ с кодовым разделением каналов (CDMA). Один из главных недостатков таких систем – высокий пик-фактор передаваемых сигналов. Пик-фактор (PAR – Peak to Average Ratio) – это отношение пикового значения сигнала к его среднеквадратичному значению. Высокое значение пик-фактора OFDM-сигналов обусловлено тем, что на периоде символа происходит одновременное когерентное сложение модулированных сигналов поднесущих (рис. 1), количество которых может составлять до нескольких тысяч. Если на всех поднесущих передаются одинаковые биты (например «1»), пиковый уровень суммарного сигнала станет в несколько раз больше значения амплитуды одной поднесущей, и при большом числе поднесущих частот величина пик-фактора может достигать значения порядка 10 дБ.

Данный эффект, если с ним не бороться, требует увеличения динамического диапазона выходного усилителя мощности. Таким образом, разработчикам радиопередающих устройств приходится справляться с еще более строгими требованиями к пропускной способности, линейности, универсальности и эффективности системы.

Усилитель мощности (УМ) – ключевой элемент передатчика, поскольку он сильно влияет как на энергетическую эффективность (КПД), так и на линейность.

Одним из наиболее простых типов выходного усилителя мощности является усилитель класса АВ. Такой усилитель относительно прост для разработки и производства и может легко обеспечить КПД около 65% при работе в диапазоне частот до 2 ГГц. Проблема,

связанная с этим классом, состоит в том что, когда уровень входного радиочастотного сигнала снижается, размах выходного напряжения также снижается и КПД падает пропорционально квадратному корню из выходной мощности. Именно поэтому современные разработчики электронной связной аппаратуры, в частности базовых станций WCDMA и LTE, а также радиовещательных передатчиков цифровых стандартов (DVB-T, DVB-T2), обратили внимание на усилители мощности Догерти (УМД), к которым в настоящее время наблюдается повышенный интерес.

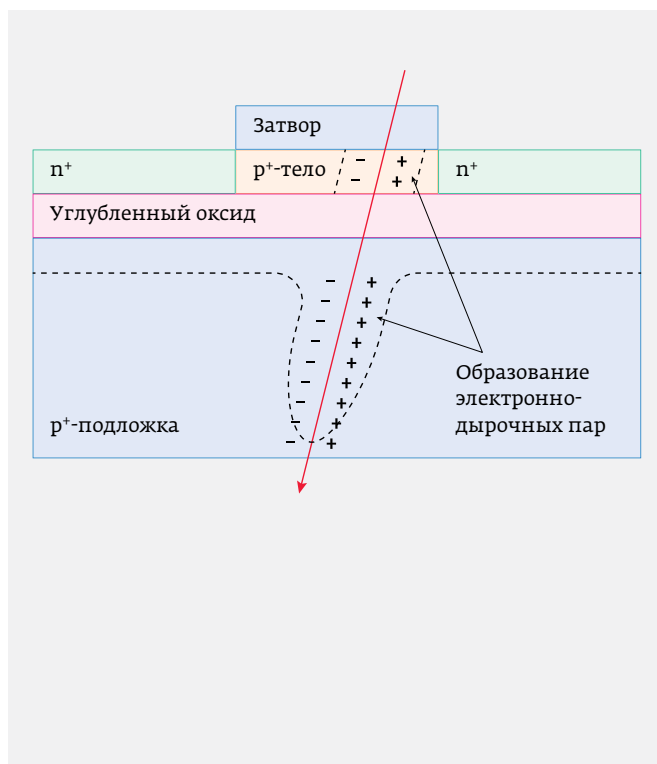


Рис. 1. Сложение поднесущих, приводящее к увеличению пик-фактора OFDM-сигналов: а – сигналы отдельных поднесущих; б – суммарный сигнал

<sup>1</sup> ООО «Радиокомп», генеральный директор, vkochemasov@radiocomp.ru.

<sup>2</sup> Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ), доцент, tkosichkina@yandex.ru.

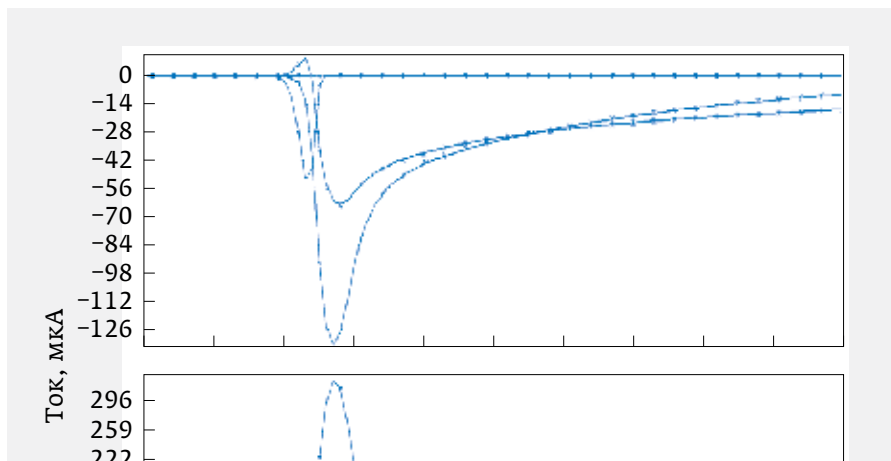


Рис. 2. Схема Догерти

Усилитель Догерти – это схема в виде двух параллельно подключенных к общей нагрузке усилителей мощности с фазосдвигающими цепочками, обеспечивающая подведение мощности от второго усилителя к нагрузке при переходе первого усилителя в режим насыщения.

Запатентованная в 1936 году Уильямом Догерти (William H. Doherty) схема долгое время использовалась в мощном АМ-радиовещании. Однако сегодня усилители Догерти переживают второе рождение. Попробуем разобраться почему.

### ПРИНЦИП РАБОТЫ СХЕМЫ ДОГЕРТИ

В схеме Догерти используются два разных усилителя мощности – первый из них функционирует как линейный усилитель класса АВ, а второй работает как

усилитель класса С (в нелинейном режиме) и своим выходным сигналом преобразует импеданс, на который нагружен первый УМ через инвертирующую импеданс четвертьволновую линию (рис. 2).

Рабочая точка усилителя класса АВ расположена ближе к зоне отсечки (рис. 3). Угол отсечки в этом режиме более 90°, но менее 180°. Линейность усилителя мощности класса АВ ближе к классу А, его КПД ближе к классу В. Это дает возможность выбора рабочей точки усилителя класса АВ исходя из того, каким является основное требование к работе усилителя – линейность

или высокий КПД. При низких уровнях входных напряжений уровень выходного сигнала усилителя пропорционален уровню входного и форма входного напряжения хорошо воспроизводится на выходе. По мере увеличения уровня входного сигнала усилитель переходит в режим насыщения и уровень выходного сигнала больше не пропорционален входному, форма сигнала немного искажается.

Таким образом, при работе в линейном режиме, то есть с сигналами низкого уровня, усилитель класса АВ ведет себя как источник тока.

При работе усилителя класса С (см. рис. 3) выходной ток протекает менее одного полупериода входного сигнала. В усилителях этого класса при подаче на вход сигнала с низким уровнем выходной ток очень мал, но он сильно возрастает при увеличении уровня входного

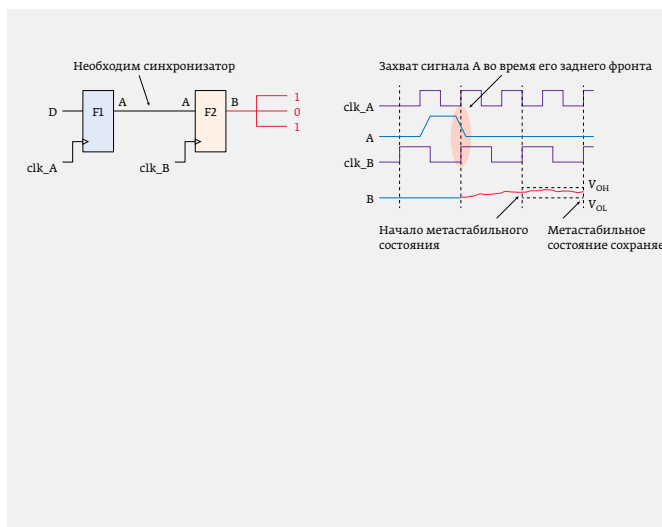


Рис. 3. Области расположения рабочих точек, соответствующие усилителям различных классов

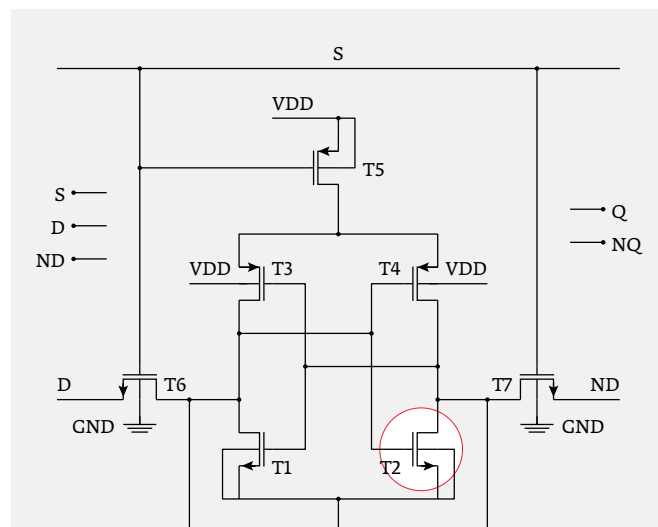


Рис. 4. Зависимость КПД от выходной мощности для усилителей разных классов

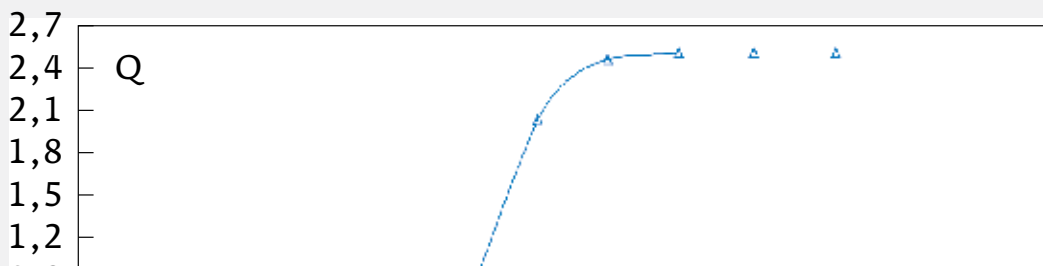


Рис. 5. Пояснение к принципу работы усилителя Догерти

сигнала. Несмотря на ухудшение линейности, КПД усилителя класса С является самым высоким из четырех классов усилителей мощности – А, В, АВ и С (рис. 4).

Идея Догерти заключалась в том, чтобы при переходе усилителя класса АВ в режим насыщения использовать усилитель класса С. Таким образом, при сложении двух сигналов, искаженных нелинейными режимами, можно получить сигнал, точно воспроизводящий переданный (рис. 5). Усилитель класса АВ получил название усилитель несущей частоты, или основной усилитель (main), а усилитель класса С – пиковый или вспомогательный (auxiliary) усилитель.

Дальнейшее развитие идеи состояло в методах, используемых для разделения входного сигнала, а также в способах сложения выходных сигналов от двух усилителей таким образом, чтобы они работали без нежелательной перегрузки. Кроме того, в классических схемах усилителя Догерти после усилителей содержатся полосовые фильтры, позволяющие уменьшить нежелательное воздействие гармоник. Эти полосовые фильтры обычно выполняются на LC-контурах.

Для разделения входного сигнала на два канала, как правило, используется квадратурный преобразователь, поскольку выдаваемые им сигналы сдвинуты на  $90^\circ$  относительно друг друга. Этот сдвиг необходим для того, чтобы при сложении сигналов они находились в одной фазе, поскольку сигнал с выхода усилителя несущей подвергается задержке на  $90^\circ$  в четвертьволновом

преобразователе [1]. Конструктивно делитель мощности, как правило, выполняется на дискретных компонентах, хотя в последние годы некоторые компании, такие как NXP [2] и Peregrine Semiconductor [3], стали выпускать интегрированные модули для усилителей Догерти.

Для объединения выходов усилителей используется инвертор полного сопротивления (импеданса), который связывает выход пикового усилителя с выходом усилителя несущей частоты (см. рис. 2). Функцию такого инвертора, как правило, выполняет четвертьволновая линия передачи. Она не осуществляет никакого преобразования, если полное выходное сопротивление усилителя равно характеристическому сопротивлению линии передачи. В противном случае четвертьволновая линия преобразует низкий импеданс на одном конце в высокий импеданс на другом.

Преобразователь выходного импеданса преобразует выходное сопротивление усилителя несущей частоты, превращая этот усилитель из источника тока в источник напряжения в соответствии с уровнем входного напряжения по следующему принципу.

При низких уровнях входного напряжения основной усилитель, подключенный к нагрузке через четвертьволновую линию передачи, работает так же, как обычный усилитель мощности. Поскольку вспомогательный усилитель в этом случае выключен (рис. 6а), высокий выходной импеданс ( $Z_0$  на рис. 2) позволяет основному усилителю перейти в режим насыщения при значении



Рис. 6. Работа усилителя Догерти при низком (а) и высоком (б) уровнях входного сигнала.  $R_n$  – сопротивление нагрузки

тока, равном половине максимального значения, в то время как напряжение имеет максимальное значение. В этом случае, поскольку напряжение достигло своего максимального значения, усилитель работает с максимальным КПД, хотя и не выдает максимальной мощности (его мощность на 6 дБ ниже максимальной).

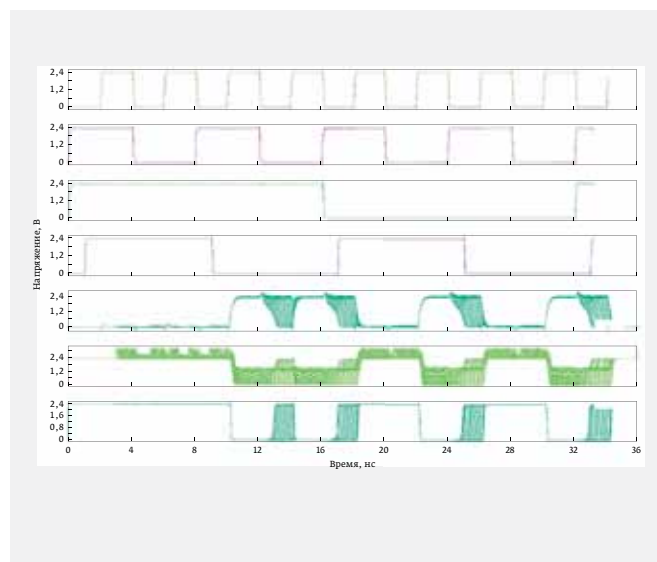
При среднем уровне входного напряжения (когда основной усилитель приближается к режиму насыщения) наличие достаточного смещения позволяет подключиться вспомогательному усилителю (рис. 6б). В этот момент вспомогательный усилитель действует как источник тока, а основной усилитель – как источник напряжения. Как только вспомогательный усилитель подключается, его ток будет увеличивать импеданс  $Z_1$  (см. рис. 2). Однако увеличение импеданса  $Z_1$  приводит к уменьшению импеданса  $Z_0$ , который является импедансом, «видимым» основным усилителем. Это приводит к тому, что выходное напряжение основного усилителя остается постоянным, и он не переходит в режим насыщения, а его выходной ток начинает расти.

Таким образом, пиковый усилитель своим выходным сигналом преобразует (как говорят, модулирует) импеданс  $Z_0$ , на который нагружен первый усилитель мощности. Другими словами, импеданс усилителя несущей частоты динамически изменяется в зависимости от уровня входного сигнала. Это ключевой момент в обеспечении высокого КПД усилителя Догерти, поскольку увеличение выходного тока основного усилителя вызывает увеличение результирующей выходной мощности.

Наконец, при высоком уровне входного напряжения основной и вспомогательный усилители вносят одинаковый вклад в мощность, передаваемую в нагрузку, так как токи, протекающие в них, становятся одинаковыми.

## ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ СХЕМЫ ДОГЕРТИ

Сравнение характеристик усилителей, как правило, проводится с помощью зависимостей КПД и выходной



**Рис. 7.** Зависимости КПД от уровня выходной мощности для усилителей по стандартной схеме и по схеме Догерти

мощности от входной мощности. Кроме того, в случае применения современных методов модуляции, например QAM, принято оценивать фазовые искажения, которые возникают из-за так называемой амплитудно-фазовой конверсии (AM-PM) и снижают пропускную способность систем связи. На рис. 7 показано теоретическое значение КПД для стандартной схемы двух усилителей класса В, объединенных, например, при помощи квадратурных разветвителей [4].

Здесь видно, что КПД достигает максимума (78%) при максимальном уровне выходной мощности. При использовании схемы Догерти высокий КПД достигается уже при уровнях выходной мощности, на 6 дБ ниже максимальной. В пределах от –6 до 0 дБ КПД сначала немного падает из-за включения вспомогательного усилителя, а затем снова начинает расти. Таким образом, получаем большой КПД усилителя при хорошей линейности.

Кроме этого, к достоинствам схемы следует отнести:

- меньшее количество побочных спектральных составляющих в сигналах с высоким пик-фактором, по сравнению с усилителями класса АВ, работающими вблизи точки насыщения;
- возможность использования как в маломощных усилителях для портативных устройств, так и в усилителях большой мощности (например, в базовых станциях сотовых сетей связи);
- множество способов оптимизации работы (смещение, фазировка) для различных приложений.

Разумеется, усилители по схеме Догерти имеют не только достоинства, но и недостатки [1]:

- повышенная сложность схемы по сравнению с классическими усилителями класса АВ;
- сложная настройка всех параметров для нахождения наилучшей рабочей точки;
- характеристики усилителя зависят от уровня входного сигнала (также как и для некоторых других типов усилителей, например, класса А);
- коэффициент усиления усилителя Догерти ниже, чем у аналогичных усилителей мощности класса АВ (примерно на 3 дБ) из-за разделения сигнала на входе.

К проблеме повышения КПД можно подходить с помощью других решений, таких как дефазирование, модуляция смещением, метод Кана и др. С этой точки зрения усилители мощности по схеме Догерти более предпочтительны, поскольку их можно рассматривать как замену усилителям класса АВ. Фактически это означает, что другие описанные методы должны приводить к изменению всего передатчика, они требуют глубокой перестройки всей архитектуры системы, что сильно влияет на совместимость и стоимость устройства в целом.

## ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ ДОГЕРТИ

В системах радиосвязи при передаче «вниз» и «вверх» задействованы различные частоты, в настоящее время не превышающие 6 ГГц. При этом беспроводные системы, такие как Wi-Fi, имеют ограничение на излучаемую мощность примерно в несколько ватт. Для мобильных базовых станций характерны уровни мощности до сотен ватт, в то время как мощность пользовательских терминалов ниже одного ватта.

Тенденция развития систем связи, особенно оборудования типа «точка-точка», состоит в освоении новых частотных диапазонов. Осваиваются полосы частот от нескольких гигагерц до десятков гигагерц. Использование таких частот ограничено рядом факторов, препятствующих мобильности пользователей, а также приводящих к увеличению стоимости высокочастотной

электроники. Тем не менее для небольших зон покрытия, например, внутри здания, уже разрабатываются беспроводные локальные сети 60-ГГц диапазона.

Также из-за необходимости широкой полосы пропускания и отсутствия частотного ресурса рассматривается использование миллиметрового диапазона для мобильных сетей 5-го поколения. Кроме того, высокочастотные радиолинии широко применяются для реализации мобильной инфраструктуры, когда устройства фиксированы в пространстве, например для подключения базовых станций к сети. В этом случае может использоваться антенна с высоким коэффициентом усиления. Считается, что реализация подключения типа «точка-точка» через радиорелейные линии связи, работающие на частотах от нескольких гигагерц до десятков гигагерц, будет охватывать большую долю рынка микроволновых электронных устройств. Уровни мощности в этом случае будут находиться в диапазоне от нескольких ватт до нескольких десятков ватт.

Характеристики, такие как КПД и спектральная чистота, систем, работающих в данном частотном диапазоне, в основном определяются радиочастотным оборудованием. В частности, одним из наиболее важных компонентов является усилитель мощности. Основные факторы, влияющие на выбор полупроводниковой технологии для проектирования усилителей, – рабочая частота и уровень мощности. Если доступно несколько технологий, то решающими факторами становятся стоимость, мощность, КПД и линейность.

В рамках этих аспектов важно определить зависимость характеристик усилителей мощности от технологии их изготовления. Кроме того, существует два варианта выполнения усилителей – монолитные интегральные схемы и гибридные интегральные микросхемы. Монолитные интегральные схемы СВЧ-диапазона имеют высокую надежность и воспроизводимость, а также низкую стоимость при массовом производстве.

До недавнего времени основной технологией для изготовления СВЧ-компонентов являлась технология КМОП. Традиционная реализация усилителей Догерти гигагерцового диапазона состоит из громоздких конструкций делителей мощности и сложных цепей питания, что считается нецелесообразным для разработки усилителя, полностью интегрированного в кристалл. В основном, согласующие цепи и симметрирующий четвертьволновый трансформатор (балун) располагают вне интегральных микросхем [5].

При создании усилителей мощности для портативных устройств были предложены различные способы миниатюризации, в том числе архитектуры,

позволяющие устранить громоздкие делители мощности и изготовить полностью интегрированные микросхемы усилителей Догерти для 2,4-ГГц диапазона на основе 0,18-мкм КМОП-технологии, например, каскадно-каскадные схемы [6].

Существуют также реализации усилителей Догерти на основе технологии КМОП 0,13 мкм [7]. Для компактной реализации схемы все соответствующие цепи, включая четвертьволновой согласующий трансформатор и входные линии компенсации фазы, реализуются как цепи с сосредоточенными параметрами. Для максимизации КПД в точке 1-дБ компрессии входная мощность усилителя класса С регулируется путем оптимизации смещения затвора пикового усилителя. При этом уменьшение коэффициента усиления основного усилителя компенсируется увеличением коэффициента усиления пикового усилителя.

Как показано на рис. 8, линии передачи и смещения могут быть реализованы с помощью фильтров нижних и верхних частот, состоящих из дискретных компонентов.

Биполярные транзисторы с гетеропереходом (HBT), основанные на технологии КМОП, имеют преимущества для применения в мобильных терминалах мощностью до 1 Вт благодаря надежному и недорогому технологическому процессу, гибкости и возможности совместной интеграции с низкочастотными (baseband) устройствами. Однако, что касается применения HBT для усилителей Догерти, они демонстрируют низкую эффективность из-за таких недостатков технологии КМОП, как низкие напряжение пробоя и плотность мощности.

В настоящее время для базовых станций широко используются устройства LDMOS (Laterally Diffused Metal Oxide Semiconductors) и HEMT (High electron mobility transistor – транзисторы с высокой подвижностью электронов, ТВПЭ) благодаря лучшим характеристикам по напряжению пробоя и плотности мощности.

В технологии LDMOS на основе кремния получают недорогие устройства, которые имеют высокие надежность и линейность. Более высокий КПД обеспечивают устройства HEMT на основе нитрида галлия (GaN). Напряжение питания в этих двух технологиях одинаково (варианты напряжений 28, 40, 50 В являются коммерчески доступными), поэтому они обеспечивают сопоставимую оптимальную реальную нагрузку. Однако внутренние свойства устройств GaN, благодаря уменьшенным емкостным эффектам, позволяют использовать более высокую частоту и большую полосу пропускания [8].

В настоящее время наиболее часто GaN-технология реализуется на подложке из карбида кремния (SiC), так как SiC обеспечивает хорошее согласование с кристаллом GaN и высокую теплопроводность, необходимую

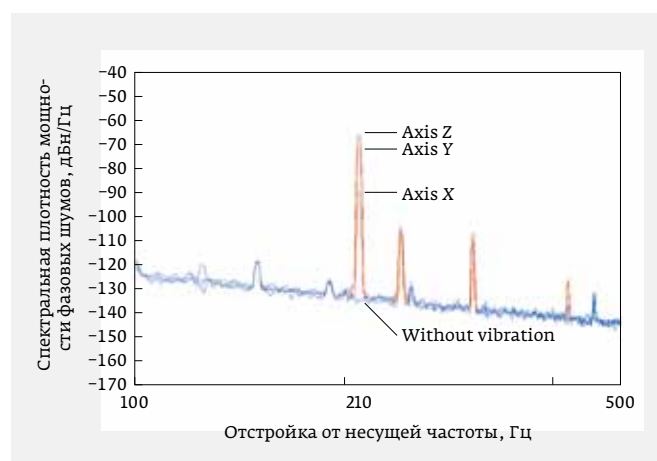


Рис. 8. Согласующие цепи усилителей Догерти

для отвода тепла от активных областей транзистора. Технология нитрида галлия на подложке из карбида кремния уже доступна для изготовления полупроводниковых устройств, но реализация монолитных микросхем по-прежнему ограничивается несколькими примерами. На основе технологии GaN уже получены выдающиеся с точки зрения выходной мощности и КПД результаты [9–12], и следует отметить, что почти все широкополосные прототипы усилителей Догерти основаны на GaN-транзисторах.

Тем не менее технология GaN на SiC весьма дорогая из-за высокой стоимости и ограниченного размера (до 75 мм) компонентов карбида кремния, поэтому она предназначена в основном для высокопроизводительных приложений. На приложения с более низкой стоимостью ориентированы другие решения, в частности, основанные на кремниевых или сапфировых подложках. Примеры реализации усилителей мощности на основе GaN на кремниевых подложках можно найти в [13] и [14]. Отметим, что надежность технологии GaN значительно улучшилась за последние несколько лет.



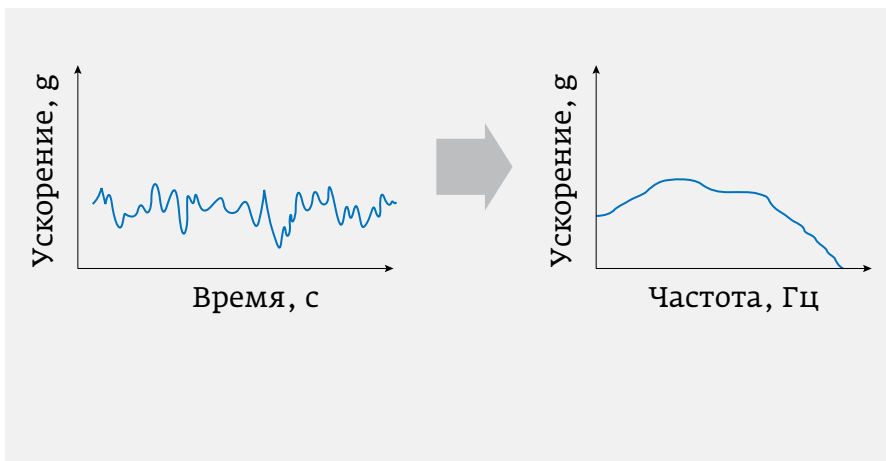


Рис. 9. Многоступенчатая архитектура усилителя мощности по схеме Догерти

Наконец, технологии рНЕМТ (псевдоморфные ТВПЭ) на арсениде галлия (GaAs) перспективны для разработки усилителей миллиметрового диапазона (частоты выше 20 ГГц) средних и больших мощностей. Исследуется также применение GaN-транзисторов на этих частотах. С точки зрения усилителей Догерти, предпочтение здесь отдается технологии GaN (относительно GaAs), что связано с уровнями импеданса, позволяющими обеспечить широкополосное согласование и уменьшить потери. Более того, благодаря более высокой плотности мощности потребность в сложных схемах сложения снижается, что позволяет реализовать передовые топологии, представленные в научных разработках.

### АРХИТЕКТУРЫ УСИЛИТЕЛЕЙ ДОГЕРТИ

Для традиционной архитектуры Догерти характерно значительное снижение КПД в области между точками пиковых значений (см. рис. 7), особенно для больших отношений мощности основного и вспомогательного усилителей. В последние годы были разработаны новые архитектуры усилителей Догерти, которые предлагают больший КПД.

**ЗАО "Руднев-Шляев"**

Разработка и производство:

- платы сбора данных
- измерительные приборы
- виброакустические системы
- инструментальные решения задач заказчика

Москва (495) 787-63-67  
(495) 787-63-68

www.rudshel.ru  
adc@rudshel.ru

Один из методов повышения КПД усилителей Догерти – увеличение числа каналов. Внутреннее ограничение стандартного двухканального усилителя Догерти определяется тем, что первый пик КПД достигается при уровне относительного снижения выходной мощности, равном 6 дБ. Однако в большинстве современных систем связи пик-фактор превышает это значение, поэтому требуется расширение диапазона высокого КПД.

Идея состоит в использовании более двух усилителей мощности, чтобы предотвратить значительное ухудшение КПД при определенных

уровнях выходной мощности. Это может быть обеспечено так называемыми многоканальными (N-way) усилителями Догерти, работа которых аналогична работе обычного двухканального усилителя Догерти. Базовая многоканальная архитектура усилителя мощности Догерти, показанная на рис. 9, использует более одного пикового усилителя с четвертьволновыми линиями передачи для суммирования их выходных мощностей. Характеристические импедансы каждой выходной четвертьволновой линии передачи зависят от числа каналов и могут быть рассчитаны по соответствующим формулам [11].

Усилитель, состоящий из  $N$  каналов, реализуется путем параллельного включения  $N-1$  пиковых усилителей. Увеличивая  $N$ , правильно оптимизируя разделение мощности и подбирая соответствующее смещение

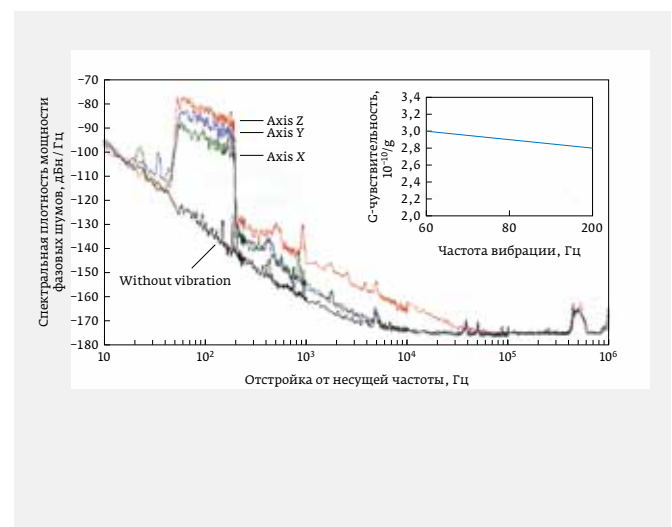


Рис. 10. Зависимость КПД N-канальных усилителей по схеме Догерти от выходной мощности

для пиковых усилителей, первый пик КПД можно получить при уровне относительного снижения выходной мощности более 6 дБ.

На рис. 10 показаны кривые КПД для усилителя Догерти с числом каналов до четырех. Видно, что 4-канальный усилитель оптимизирован для достижения максимума КПД при уровне относительного снижения выходной мощности 12 дБ. При этом КПД значительно падает в области 6–12 дБ. N-канальный усилитель мощности может решить эту проблему: входящие в его состав N–1 вспомогательных усилителей включаются при разных уровнях мощности, совпадающих с пиками КПД. Снижение КПД между пиками при этом значительно ослабляется.

С другой стороны, основной усилитель может работать в режиме насыщения, что требует надлежащего выбора размера устройства и специальных дизайнерских решений. Предлагаются специальные методы сложения выходной мощности основного и вспомогательных усилителей. В некоторых разработках применяется метод адаптации смещения, улучшающий линейность.

Для расширения области высокого КПД используются не только многоканальные, но и многоступенчатые усилители Догерти. Как было упомянуто выше, полностью интегрированные микросхемы усилителей Догерти на базе КМОП-технологии позволяют изготовить каскодно-каскадные схемы (рис. 11). Идея каскодно-каскадной архитектуры состоит в следующем [6]: каскодный усилитель, состоящий из усилителей CS<sub>1</sub> (с общим истоком) и CG (с общим затвором), работает в качестве основного усилителя Догерти. Каскадный усилитель, состоящий из усилителей CS<sub>1</sub> и CS<sub>2</sub> (с общим истоком) работает в качестве вспомогательного усилителя Догерти. Цепь согласования перед усилителем CS<sub>2</sub> обеспечивает фазовый сдвиг на 90° и высокий импеданс по отношению к CS<sub>1</sub>. Из-за высокого импеданса большая часть мощности, подаваемой на CS<sub>1</sub>, будет закачиваться в усилитель CG. Усилитель CS<sub>2</sub>, смещенный в класс С, будет работать так же, как классический вспомогательный усилитель в схеме Догерти. Так как линии передачи, работающие на частоте 2,4 ГГц, при реализации на чипе довольно длинные, они заменяются схемами с сосредоточенными параметрами.

## МЕТОДЫ УЛУЧШЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК УСИЛИТЕЛЕЙ ДОГЕРТИ

Стандартные реализации усилителей Догерти имеют ограничения на линейность и достижимый средний КПД, которые обусловлены внутренней структурой этого вида усилителей и другими проблемами, связанными с неидеальностью устройства. Для соответствия спецификациям линейности системы связи практически

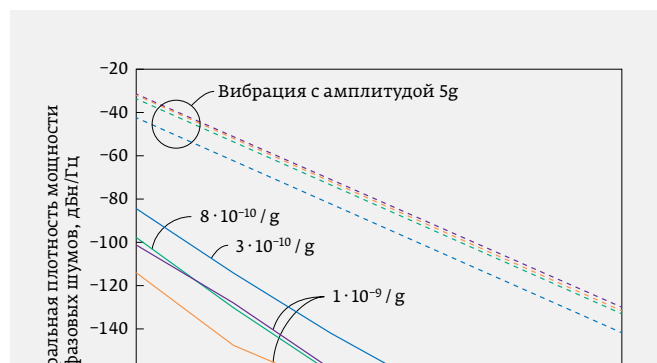


Рис. 11. Структурная схема каскодно-каскадного усилителя

всегда используются методы цифровой коррекции (предыскажения). В настоящее время предметом научных исследований в этой области являются уменьшение сложности предыскажений и повышение общей производительности системы, а также методы уменьшения амплитудных и фазовых искажений и эффектов памяти [12].

Кроме того, очевидно, что с учетом важности снижения энергопотребления часто предметом исследований становятся вопросы повышения КПД. Важно отметить, что во всех предлагаемых методах вопросы повышения КПД или линейности никогда не рассматриваются независимо. Фактически, каждый подход, который позволяет повысить КПД, обычно подразумевает дополнительную сложную и очень точную конструкцию для разделения входных сигналов, выбор режима работы пикового усилителя и фазовую синхронизацию между всеми каналами усилителя таким образом, чтобы избавиться от нелинейных эффектов, например насыщения. Для адаптивной настройки этих параметров часто используется цифровая обработка сигналов.

Другой важный предмет исследований в литературе — правильное включение вспомогательной цепи (цепи пикового усилителя). Например, в гибридных решениях



широко применяется асимметричное разделение входных сигналов, которое хорошо зарекомендовало себя в коммерческих продуктах. Этот метод позволяет построить усилитель Догерти на базе двух идентичных усилителей мощности с использованием набора транзисторов и соответствующих конструкций линий смещения, инвертора импеданса и разделителя входов.

Большое внимание в работах уделяется разработке, модификации и оптимизации выходного сумматора двухканальных усилителей Догерти. Например, стандартный импеданс усилителя Догерти заменяется на сопряженную линию, нагруженную конденсатором. Иногда для коррекции текущего дисбаланса между основной и вспомогательной ветвями добавляется цепь согласования выходных сигналов (инвертор импеданса и общее согласование на 50 Ом).

Существуют факторы, ограничивающие полосу пропускания УМД. Дополнительная сложность увеличения широкополосности УМД связана с необходимостью правильной модуляции нагрузки (преобразования импеданса), которая требует разных импедансов при разных уровнях мощности. В частности, типичными ограничивающими факторами могут быть инвертор импеданса, цепи смещения и фазовая синхронизация в выходном общем узле. Инвертор импеданса обычно реализуется с помощью четвертьволновой линии передачи, которая по своей сути является узкополосной. Некоторые разработки представляют собой новые реализации инвертора импеданса, способного расширить полосу пропускания. Решение, применяемое для цепей смещения, заключается в том, чтобы встроить линию смещения в цепь согласования выхода. Оптимальная модуляция нагрузки в большом диапазоне частот, достижимая при хорошей фазовой синхронизации между основной и вспомогательной цепью, может быть получена путем разработки новой архитектуры УМД, например, так называемой цифровой архитектуры, в которой сигнал между основной и вспомогательной ветвями разделяется на низких (baseband) частотах.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Slade B.** The Basics of the Doherty Amplifier. – <http://orbanmicrowave.com/the-basics-of-power-amplifiers-part-3/>
2. <https://www.nxp.com/products>
3. <https://www.psemi.com/products>
4. **Сечи Ф., Буджатти М.** Мощные твердотельные СВЧ-усилители. – М.: ТЕХНОСФЕРА. 2015. 416 с.
5. **Chen Y.-J. E., Liu C.-Y., Luo T.-N., and Heo D.** A high-efficient CMOS RF power amplifier with automatic adaptive bias control // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. V. 16. № 11. PP. 615–617.
6. **Yang L.-Y., Chen H.-S., Chen Y.-J. E.** A 2.4 GHz Fully Integrated Cascode-Cascade CMOS Doherty Power Amplifier // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2008. V. 18. № 3. PP. 197–199.
7. **Kang J., Yu D., Min K., and Kim B.** A Ultra-High PAE Doherty Amplifier Based on 0.13- $\mu\text{m}$  CMOS Process // IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2006. V. 16. № 9. PP. 505–507.
8. **Pengelly R.S., Wood S.M., Milligan J.W., Sheppard S.T., and Pribble W.L.** A review of GaN on SiC high electron-mobility power transistors and MMICs // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012. V. 60. № 6. PP. 1764–1783.
9. **Deguchi H., Ui N., Ebihara K., Inoue K., Yoshimura N., and Takahashi H.** A 33W GaN HEMT Doherty amplifier with 55% drain efficiency for 2.6 GHz base stations // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. Jun. 2009. PP. 1273–1276.
10. **Kim I., Moon J., Jee S., and Kim B.** Optimized Design of a Highly Efficient Three-Stage Doherty PA Using Gate Adaptation // IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2010. V. 58. № 10. PP. 2562–2574.
11. **Grebennikov A.** A high-efficiency 100-W four-stage Doherty GaN HEMT power amplifier module for WCDMA systems // IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Jun. 2011. PP. 1–10.
12. **Camarchia V., Moreno Rubio J., Pirola M., Quaglia R., Colantonio P., Giannini F., Giofre R., Piazzon L., Emanuelsson T., and Wegeland T.** High-Efficiency 7 GHz Doherty GaN MMIC Power Amplifiers for Microwave Backhaul Radio Links // IEEE Trans. Electron Devices. 2013. V. 60. № 10. PP. 3592–3595.
13. **Moreno J., Fang J., Quaglia R., Camarchia V., Pirola M., Ghione G.** Development of single-stage and Doherty GaN-based hybrid RF power amplifiers for quasi-constant envelope and high PAPR wireless standards // Microwave and Optical Technology Letters. 2012. V. 54. PP. 206–210.
14. **Yoshida S., Tanomura M., Murase Y., Yamanoguchi K., Ota K., Matsunaga K., Shimawaki H.** A 76 GHz GaN-on-silicon power amplifier for automotive radar systems // 2009 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, Boston, MA, USA, 7–12 June 2009. PP. 665–668.