

УДК 621.375

УСИЛИТЕЛИ С БОЛЬШИМ ПИК ФАКТОРОМ: ТЕНДЕНЦИИ И НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ

И. А. ЧЕПИКОВ, Н. А. ТИТОВИЧ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: dlaw99@mail.ru, nikolai.titovich@gmail.com

Аннотация. В данной статье рассматриваются усилители с большим пик фактором, их важность в современных радиочастотных и звуковых приложениях, а также современные тенденции и технологии, способствующие их развитию. Анализируются существующие решения и их ограничения, предложены новые подходы к проектированию, позволяющие улучшить характеристики усилителей и повысить их эффективность.

Abstract. This article examines high peak factor amplifiers, their importance in modern RF and audio applications, and the current trends and technologies driving their development. Existing solutions and their limitations are analyzed, new design approaches are proposed to improve the characteristics of amplifiers and increase their efficiency.

Введение

Усилители играют ключевую роль в современных системах передачи и обработки сигналов, обеспечивая необходимый уровень мощности для различных приложений, от радиосвязи до аудиотехники и медицинского оборудования. Одним из критически важных параметров, определяющих эффективность работы усилителей, является пик фактор, который отражает соотношение между максимальным значением сигнала и его среднеквадратичным значением. Высокий пик фактор может значительно усложнять работу усилителей, приводя к искажению сигналов, перегреву и другим нежелательным эффектам. В последние годы наблюдается рост интереса к усилителям с большим пик фактором, особенно в контексте развития технологий беспроводной связи и обработки сигналов. Поскольку коэффициент полезного действия (КПД) линейных усилителей мощности радиосигналов с высоким пик-фактором крайне низкий, это создает определенные сложности в проектировании радиопередатчиков и возникает потребность применения специальных методов и схем построения радиопередатчиков с высокой линейностью радиотракта [1].

Цель данной статьи — рассмотреть основные аспекты проектирования и применения усилителей с большим пик фактором, а также проанализировать современные подходы к их оптимизации на примере из одной наиболее популярной схемы усилителя У.Догерти.

Основная часть

Привлекательность решения У.Догерти обусловлена эффективностью управления входными сигналами с высоким отношением пиковой к средней мощности, которое характерно для современных систем связи [2]. Усилитель, построенный по схеме У.Догерти, имеет более высокий коэффициент полезного действия по сравнению с аналогами за счет более рационального использования транзисторов по току. Схема данного метода приведена на рисунке 1.

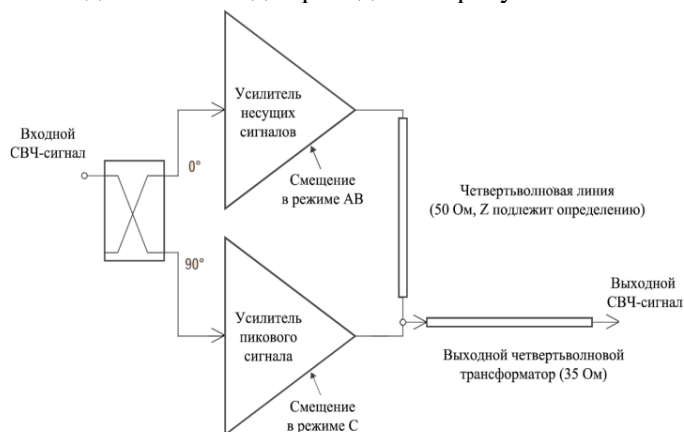


Рис. 1. Структурная схема усилителя У.Догерти.

Суть данного метода заключается в использовании двух различных типов усилителей для достижения оптимального усиления аудиосигнала с высоким пик-фактором. Основной усилитель, работающий в классе АВ, обеспечивает качественное усиление большей части сигнала, обеспечивая хорошую линейность и низкие искажения. Однако одного основного усилителя недостаточно для полноценного усиления всего динамического диапазона.

Для решения данной проблемы используется пиковый усилитель, работающий в классе С. Этот тип усилителя, как правило, имеет высокий коэффициент полезного действия, что позволяет ему эффективно обрабатывать кратковременные пики сигнала, хотя и с некоторыми искажениями. Работая в тандеме, основной и пиковый усилители могут обрабатывать сигнал во всем диапазоне амплитудно-частотной характеристики. Таким образом, работая в паре два усилителя могут обеспечить усиления сигнала во всем диапазоне амплитудно-частотной характеристики. На рисунке 2 приведен график зависимости мощностей основного и пикового УМ и выходного сложеного сигнала.

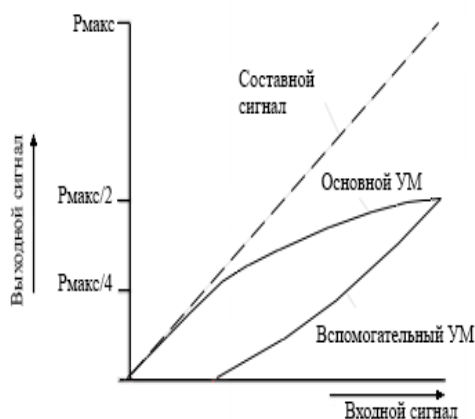


Рис. 2. Характеристика зависимости мощности усилителя мощности У.Догерти от уровня входного сигнала.

Чтобы не перегружать систему, для пикового усилителя, вносится фазовый сдвиг сигнала в 90 градусов. При сложении усиленных сигналов в выходной цепи основного усилителя для обеспечения баланса фаз включена четвертьволновая линия, а для согласования усилителя с нагрузкой — четвертьволновой согласующий трансформатор. Для достижения еще большей энергоэффективности разработчики пытаются добавить не один пиковый усилитель, а два и три. Но данные схемы кроме небольшого преимущества обладают очень большим недостатком: сложностью согласования выходных сопротивлений всех усилителей. Поэтому классическая схема с одним пиковым усилителем является наиболее практичной в использовании.

Основной недостаток данного метода, как и всех мостовых схем сложения мощностей, заключается в ограничении полосы усиливаемого сигнала в 6 МГц. Связанно это ограничение с тем, что схемы мостового делителя и мостового сложения мощностей выполняются на отрезках длинных линий, длина которых составляет четверть длины волны усиливаемого сигнала. При переходе на частоту другого телевизионного канала приходится изменять конструкцию всех мостовых схем.

Одним из методов решения данной проблемы является построение по схеме усилителей мощности с распределенным усилением (УРУ), где для повышения мощности используется параллельное включение нескольких активных элементов. Схема с УРУ широко использовалась в мощных ламповых усилителях в 50-60-е годы прошлого столетия [3]. Однако с развитием мощных усилителей мощности на биполярных транзисторах (БТ), имеющих низкое входное и выходное сопротивление, эта схема не получила дальнейшего развития, так как параллельное соединение нескольких БТ приводит к резкому снижению входного и выходного сопротивления УМ в целом, в результате чего возникают трудности в построении схем согласования. В связи с этим схемы с УРУ были вытеснены мостовыми схемами сложения мощностей. При сложении мощностей с помощью квадратурных мостов, применяемых при построении телевизионных передатчиков, для повышения мощности приходится использовать от трех до семи мостов сложения.

В схеме УРУ реализуется сложение коэффициентов усиления отдельных усилительных приборов, так что принципиально при любой полосе частот можно получить коэффициент усиления больше единицы, даже если коэффициент усиления отдельного усилительного прибора меньше единицы. Это свойство усилителя определило его широкое применение в тех случаях, когда полоса усиливаемых частот составляет несколько сотен МГц [3].

Структурная схема УРУ приведена на рисунке 3. Она состоит из нескольких параллельно включенных усилительных приборов (УП), входной и выходной искусственных длинных линий (ИДЛ), элементов согласования с нагрузкой и питания. В соответствии с особенностью работы ИДЛ параллельно соединенные усилители возбуждаются с некоторой задержкой. Аналогично происходит и сложение усиленных сигналов в выходной ИДЛ.

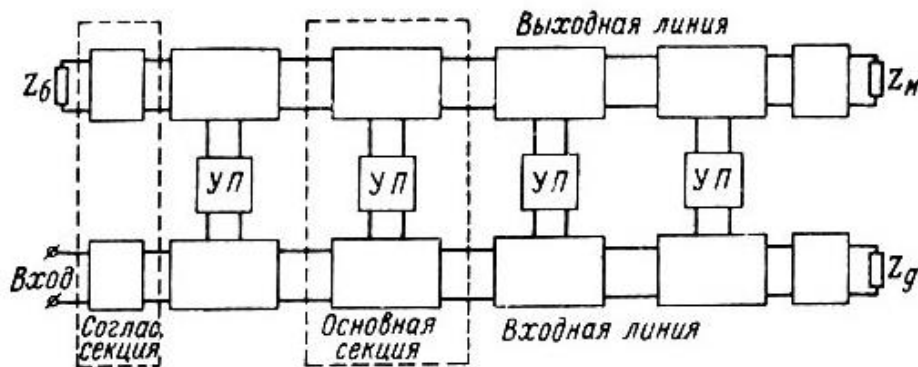


Рис. 3. Структурная схема усилителя с распределенным усилением.

С появлением мощных металл-оксидных полупроводниковых (МОП) транзисторов, обладающих высоким входным и выходным сопротивлением, тема создания мощных УРУ вновь приобрела актуальность. Эти усилители не только обеспечивают широкополосное усиление, но и демонстрируют повышенную надежность по сравнению с мостовыми схемами, которые часто используются для сложения мощности. В мостовых схемах выход из строя одного из транзисторов может привести к полной неработоспособности всей системы, так как это нарушает работу всех мостов. В отличие от этого, при параллельной схеме сложения мощности отказ одного транзистора не останавливает работу всего усилителя.

УРУ на основе полевых транзисторов также находят применение в приемных модулях фазированных антенных решеток. Однако реализация мощных усилителей сопряжена с рядом трудностей. Резкие зависимости входных и выходных емкостей транзисторов от приложенных напряжений могут приводить к дополнительным нелинейным искажениям в усилительном тракте, что требует внедрения методов линеаризации для улучшения качества усиления мощности. Кроме того, при работе с сигналами, имеющими высокий пик-фактор, возникает необходимость повышения КПД усилителя.

Метод усиления, предложенный У.Догерти, не может быть непосредственно применен в схемах УРУ, так как он также требует использования мостовых схем деления и сложения мощности. В этой ситуации более перспективным решением представляется применение метода автоматической регулировки режима работы (АРР) УРУ. Этот метод использует синхронное изменение напряжения питания усилителя в соответствии с изменениями огибающей входного сигнала, что позволяет повысить энергоэффективность работы усилителя по аналогии с методом У.Догерти [1].

Однако стоит отметить, что применение АРР может вводить дополнительные нелинейные искажения, поскольку в тракте управления напряжением питания могут возникать задержки по отношению к амплитуде усиливаемого сигнала. Тем не менее, исследование УРУ с использованием АРР остается актуальным благодаря достижениям в области цифровой предкоррекции, что позволяет достигать необходимой линейности усилительного тракта. В этом контексте компьютерное моделирование проектируемой схемы становится важным инструментом, позволяющим оценить ее характеристики и оптимизировать параметры. Расчет и сравнительный анализ энергетической эффективности УМ с линейной и нелинейной АРР позволяет значительно снизить затраты на этапе макетирования.

Достичь желаемого результата - повышения КПД УМ в широкой полосе частот на высоком уровне мощности при сохранении линейности усилительного тракта, позволяет техническое решение, описанное в [4], представленное на рисунке 4.

Широкополосный усилитель мощности построен по схеме Догерти, содержит основной усилитель 1, пиковый усилитель 2, согласующие цепи основного 4 и пикового 5 усилителей и симметрирующий трансформатор 6, выход которого соединен с нагрузкой. В схему также введены направленный ответвитель 7 и реактивные цепи по числу входов ответвителя (10,11,12,13). Направленный ответвитель выполнен в виде гибкой полосковой линии с сильной электромагнитной связью и неравными длинами проводников в области электромагнитной связи. Короткий проводник имеет электромагнитную связь между входами ответвителя по внешней стороне проводника, а длинный проводник не имеет упомянутой связи. Кроме того, каждая реактивная цепь состоит из последовательного соединения микрополосковой линии и конденсатора. Усилители выполнены двухтактными, их выходы соединены с одноименными входами согласующих цепей, которые выполнены симметричными и на средней частоте рабочего диапазона обеспечивают фазовый сдвиг 90° . Выходы согласующей цепи основного усилителя непосредственно подключены ко входам направленного ответвителя и симметрирующего трансформатора, выходы пикового усилителя через другую согласующую цепь подключены к противоположным входам направленного ответвителя. Между одноименными входами направленного ответвителя и корпусом включены реактивные цепи.

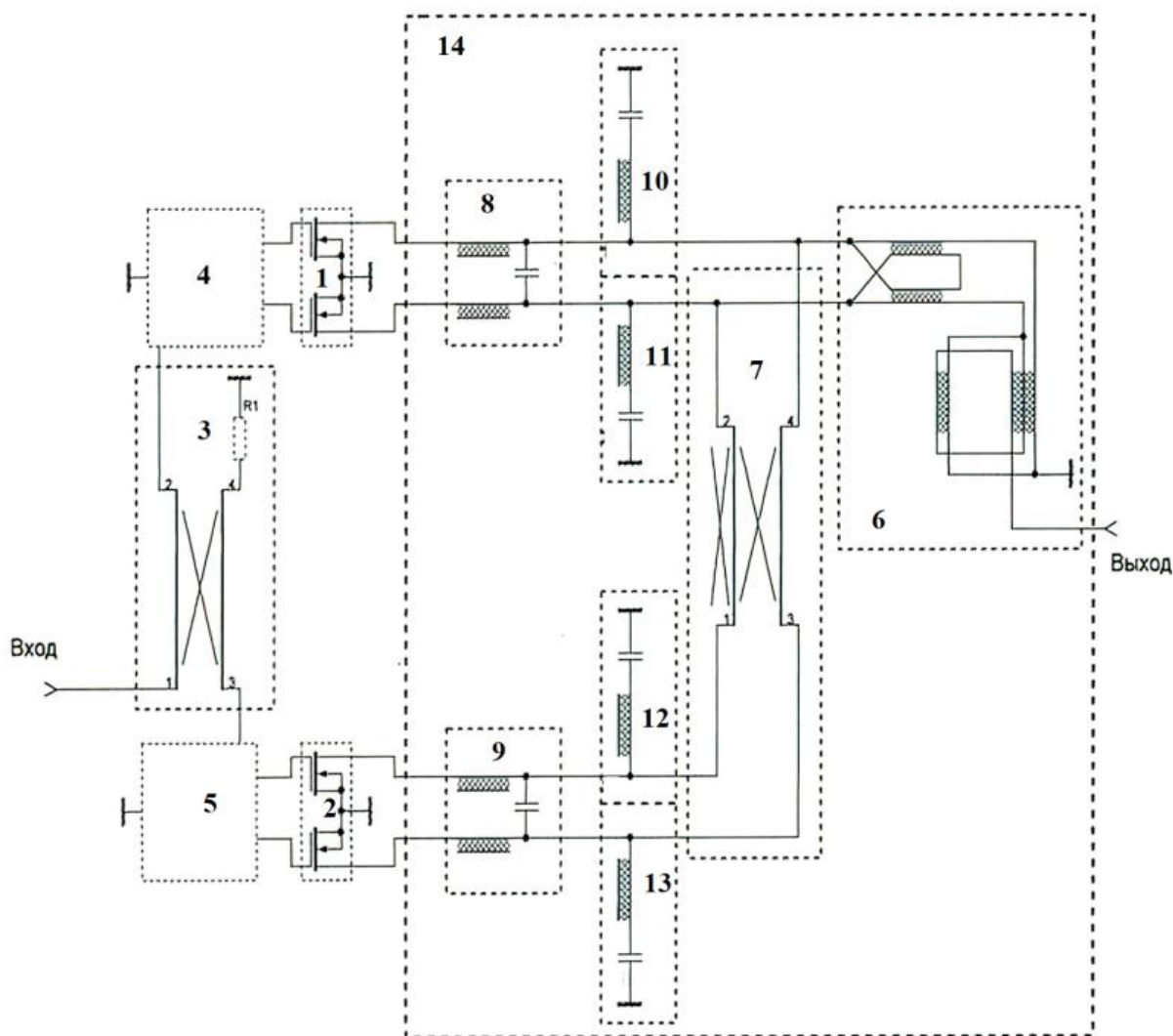


Рис. 4. Широкополосный усилитель мощности по схеме Догерти

Усилитель работает следующим образом. На общий вход усилителя подается высокочастотный сигнал с динамично изменяющейся амплитудой, характеризующийся высоким отношением пиковой мощности к среднему значению. Входной сигнал в усилителе делится между основным и пиковым усилителями неравнозначно с фазовым сдвигом, обеспечивающим его квадратурность. На низких и средних уровнях мощности основной усилитель работает как линейный усилитель класса «В». В рабочем диапазоне частот, за счет соответствующей реализации суммирующей цепи, он работает на активную нагрузку и имеет хорошую развязку с пиковым усилителем. Практически вся мощность основного усилителя поступает в нагрузку. С ростом уровня входного сигнала основной усилитель входит в насыщение, а пиковый выходит в активный режим. Как и в классической схеме усилителя Догерти, этот переход установлен на уровне мощности 6 дБ, что соответствует половине пикового входного напряжения. В зависимости от структуры усиливаемого сигнала диапазон может быть выбран другим. Для сигнала DVB T-2 наиболее оптимальным, с точки зрения реализации энергетических характеристик и линейности усилителя, является уровень (7-8) дБ.

Исследования характеристик данного широкополосного усилителя мощности, описанные в [4], показывают, что при усилении сигнала с пик-фактором сигнала 10-12 дБ в полосе частот дециметрового диапазона обеспечивается уровень средней эффективной мощности 170 Вт с КПД по стоковой цепи в 40-52% и линейностью MER>35,5 дБ. Аналогичный усилитель, выполненный по типовой двухтактной схеме, позволяет получить КПД только 20-25%. Таким техническим решением невозможно создать оптимальные импедансы для первой, второй и третьей гармоник одновременно. Следовательно, из-за влияния гармоник между основным и пиковым усилителями, максимальная мощность, эффективность и приемлемая линейность в этой структуре не достигались. Аналогично и в усилителе-прототипе потенциально достижимый КПД падает с ростом пик-фактора усиливаемого сигнала. В заявляемом усилителе синтез широкополосного сумматора Догерти (14) осуществлен с учетом оптимального согласования нагрузки, как на основной частоте, так и на второй и третьей гармониках. Создан нулевой импеданс для второй гармоники (двухтактное включение транзисторов в усилителях), и высокий для третьей (включение реактивных цепей 10, 11, 12, 13). За счет поворота фазы третьей гармоники пикового усилителя и широкополосной трансформации нагрузки трансформатором 6 в усилителе основного канала произведено уплощение косинусоидального импульса тока транзисторов.

Заключение

В ходе исследования темы усилителей с большим пик-фактором были выявлены ключевые тенденции и направления их дальнейшего развития. Они находят применение в различных областях — от музыкальной индустрии до кино и телевидения, а также в автомобильной акустике, что открывает новые возможности для их разработки и использования. Развитие новых технологий, таких как цифровая обработка сигналов, способствовало созданию более эффективных и компактных усилителей, что в свою очередь увеличило их пик-фактор.

Анализ известных решений повышения энергетических характеристик таких усилителей показал, что наиболее эффективной является схема УМ, предложенная в свое время У.Догерти. Однако она находится в противоречии с требованиями обеспечения широкополосности усилительного тракта. Набирающая в последнее время популярность схема широкополосного УРУ на полевых транзисторах требует введения в схему элементов предкоррекции, компенсирующих отрицательное влияние входных и выходных емкостей транзистора. Весьма перспективной представляется схема широкополосного УМ по схеме Догерти с широкополосным согласующим трансформатором на выходе.

Список использованных источников

1. Шахильдян В. В., Иванюшкин Р. Ю. Методы повышения энергетической эффективности линейных усилителей мощности. // Т-Сотм – Телекоммуникации и транспорт, 2011, №9.
2. Анализ режимов функционирования усилителя мощности по схеме Догерти в цифровых телевизионных передатчиках //технические науки - электротехника, радиотехника, телекоммуникации и электроника/ Савенков Г.Г., Морозов Ю.В., Цыкунов А.В. – 2013
3. Алексеев О.В. Усилители мощности с распределенным усилением - Ленинград: Энергия, 1968.
4. Широкополосный усилитель мощности по схеме Догерти / И.О. Киселёв [и др.] патент RU 2727146, 2020 – 21 с.