

УДК 621.375.026

ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ МОЩНОСТИ СИГНАЛА С БОЛЬШИМ ПИК-ФАКТОРОМ

Чепиков И.А., магистрант гр.345241

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

Титович Н.А. – к.т.н., доцент, доцент кафедры ИРТ

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.

Ключевые слова: усилитель мощности, сигнал с большим пик-фактором, усилитель по схеме У. Догерти.

Введение

Усилители являются неотъемлемой частью современных систем передачи и обработки сигналов, обеспечивая необходимую мощность для широкого спектра приложений, включая радиосвязь, аудиотехнику и медицинское оборудование. Одним из ключевых параметров, определяющих производительность усилителей, является пик-фактор, который характеризует соотношение между максимальным значением сигнала и его среднеквадратичным значением. Высокий пик-фактор может создавать значительные трудности в работе усилителей, приводя к искажениям сигналов, перегреву и другим нежелательным эффектам. В последние годы наблюдается возрастание интереса к усилителям с высоким пик-фактором, особенно в свете развития технологий беспроводной связи и обработки сигналов. Поскольку коэффициент полезного действия (КПД) линейных усилителей мощности радиосигналов с большим пик-фактором зачастую остается низким, это создает определенные вызовы при проектировании радиопередатчиков и подчеркивает необходимость применения специализированных методов и схем для достижения высокой линейности радиотракта [1].

Цель данной статьи — изучить основные аспекты проектирования и применения усилителей с высоким пик-фактором, а также проанализировать современные подходы к их оптимизации на примере одной из наиболее известных схем усилителей, разработанной 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.

Суть данного метода заключается в использовании двух различных типов усилителей для достижения оптимального усиления аудиосигнала с высоким пик-фактором. Основным 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 [2]. 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 1. 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 сложение усиленных сигналов в выходной ИДЛ.

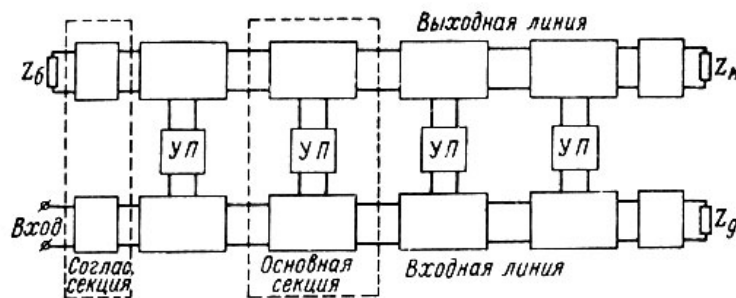


Рисунок 1 – Структурная схема усилителя с распределенным усилением

С появлением мощных металл оксидных полупроводниковых (МДП) 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 находит применение в приемных модулях фазированных антенных решеток. Однако реализация таких усилителей сопряжена с рядом трудностей. Резкие зависимости входных и выходных емкостей транзисторов 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 коэффициента полезного действия (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.

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 коэффициента полезного действия усилителя мощности в широкой полосе частот на высоком уровне мощности при сохранении линейности усилительного тракта, позволяет техническое решение, описанное в [4], представленное на рисунке 2.

Широкополосный усилитель мощности, построенный по схеме Догерти, содержащий основной усилитель (1), пиковый усилитель (2), а также согласующие цепи основного (4) и пикового (5) усилителей и симметрирующий трансформатор (6), выход которого соединен с нагрузкой. В схему 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.

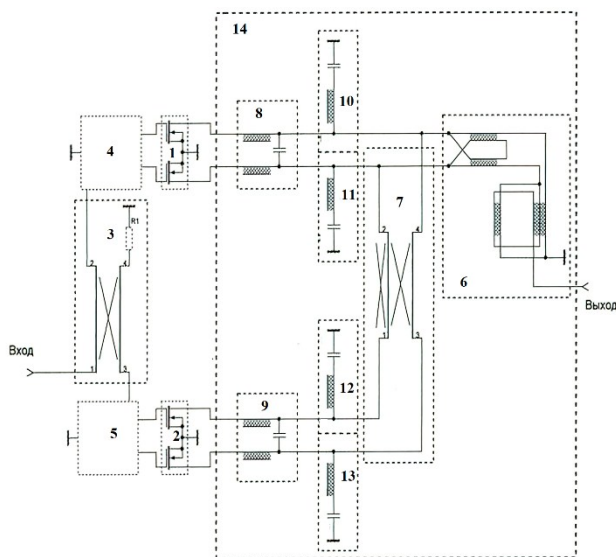


Рисунок 2 – Широкополосный усилитель мощности по схеме Догерти

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 1 и пиковым 2 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, 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

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. Шахгильдян В. В., Иванюшкин Р. Ю. Методы повышения энергетической эффективности линейных усилителей мощности. // Т-Сотт – 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.

UDC 621.375.026

BROADBAND ENERGY EFFICIENT SIGNAL POWER AMPLIFIER WITH HIGH CREST FACTOR

Tchepikov I.A

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus)

Titovich N.A. – Ph.D., Associate Professor, Department of IRT BSUIR

Annotation. This article discusses high-peak-factor amplifiers, their importance in modern RF and audio applications, and current trends and technologies that drive their development. Existing solutions and their limitations are analyzed, and new design approaches are proposed to improve amplifier performance and efficiency.

Keywords. Key words: power amplifier, high peak factor signal, amplifier based on W. Doherty's scheme.