

УДК 621.375.026

## ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЕЙ СИГНАЛОВ С БОЛЬШИМ ЗНАЧЕНИЕМ ПИК-ФАКТОРА ДЛЯ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫХ ПЕРЕДАТЧИКОВ

ТИТОВИЧ Н. А., ИЛЬИНСКИЙ Е. С., БОБРОВНИЧАЯ Т. А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Филиал УО БГУИР «Минский радиотехнический колледж»  
(г. Минск, Республика Беларусь)

E-mail: nikolai.titovich@gmail.com, bearmoodskiy@gmail.com, tanyatanya1719@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрены методы повышения энергоэффективности усилителей мощности (УМ) радиосигналов с большим пик-фактором. Описаны достоинства и недостатки схемы УМ по схеме У. Догерти. Для повышения широкополосности УМ предложено использовать схему усилителя с распределенным усилением (УРУ) на полевых транзисторах. Обсуждаются пути повышения линейности и энергоэффективности УРУ.

**Abstract.** Methods for increasing the energy efficiency of power amplifiers (PA) of radio signals with a large peak-factor are considered. The advantages and disadvantages of the PA Dougherty scheme are described. To increase the bandwidth of the PA, it is proposed to use a distributed gain amplifier (DGA) circuit based on field-effect transistors. Ways of increasing the linearity and energy efficiency of the DGA are discussed.

В настоящее время в связи с интенсивным развитием систем и средств цифровой радиосвязи, а также цифрового телерадиовещания все более актуальной становится задача построения высокоэффективных линейных усилителей мощности сигналов, используемых при цифровых способах передачи, относящихся к сигналам с переменной огибающей. К сигналам с переменной огибающей относятся не только сигналы с амплитудной модуляцией и однополосной модуляцией, но и большинство сигналов, используемых в цифровых методах передачи: QAM – информация заложена в амплитуде сигнала; OFDM – изменение огибающей связано с биениями поднесущих; PSK – переменная огибающая связана с цифровой фильтрацией, производимой при формировании сигнала. В связи с высокой энергетической эффективностью таких сигналов, появляется проблема усиления таких радиосигналов, известная как большое значение пик-фактора. Пик-фактор – это максимальное отклонение значения сигнала от его среднего значения. Поскольку коэффициент полезного действия линейных усилителей мощности (УМ) радиосигналов с высоким пик-фактором крайне низок, возникает потребность применения специальных методов и схем построения радиопередатчиков с высокой линейностью радиотракта [1].

Существует много схем построения УМ передатчиков с переменной огибающей. Одним из наиболее популярных является схема усилителя У. Догерти. Привлекательность решения У. Догерти обусловлена эффективностью управления входными сигналами с высоким отношением пиковой к средней мощности, которое характерно для современных систем связи. 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 рис. 1.

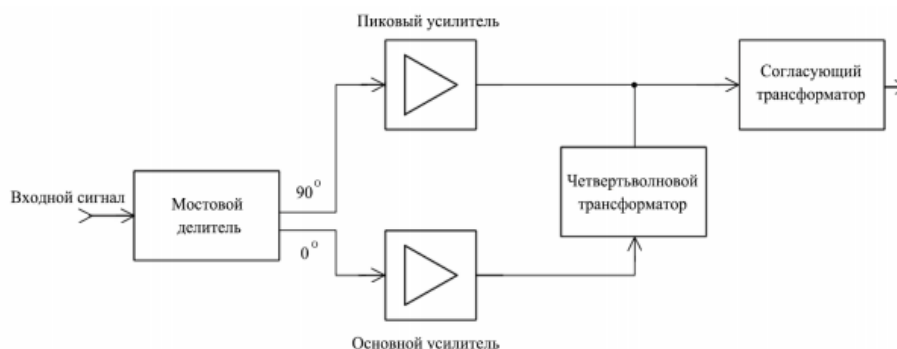


Рис.1. Структурная схема усилителя У. Догерти

Суть метода заключается в том, что имеется два усилителя: пиковый и основной, которые работают в разных режимах. Так, основной усилитель, как понятно из названия, производит усиление большей части сигнала и работает в режиме АВ. Но поскольку речь идет о сигналах с большим пик-фактором, полностью усилить за счет одного основного усилителя нет возможности, и поэтому необходим пиковый усилитель. Данный усилитель работает в режиме С. Этот режим характеризуется гораздо более высокими значениями коэффициента полезного действия и уровнем искажений. Таким образом, работая в паре, два усилителя могут обеспечить усиления сигнала во всем диапазоне амплитудно-частотной характеристики. На рис. 2. приведен график зависимости мощностей основного и пикового УМ и выходного сложеного сигнала.

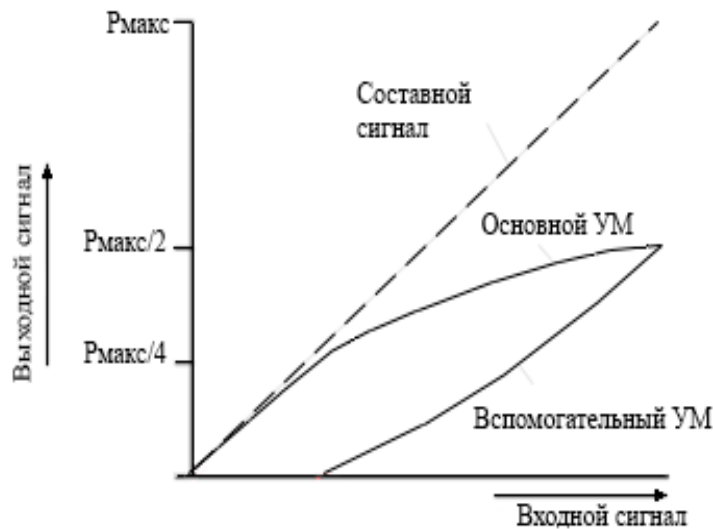


Рис. 2. Характеристика зависимости мощности УМ У. Догерты от уровня входного сигнала

Однако данный метод не лишен недостатков. Основным недостатком 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 усилителя мощности по схеме 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 рис.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.

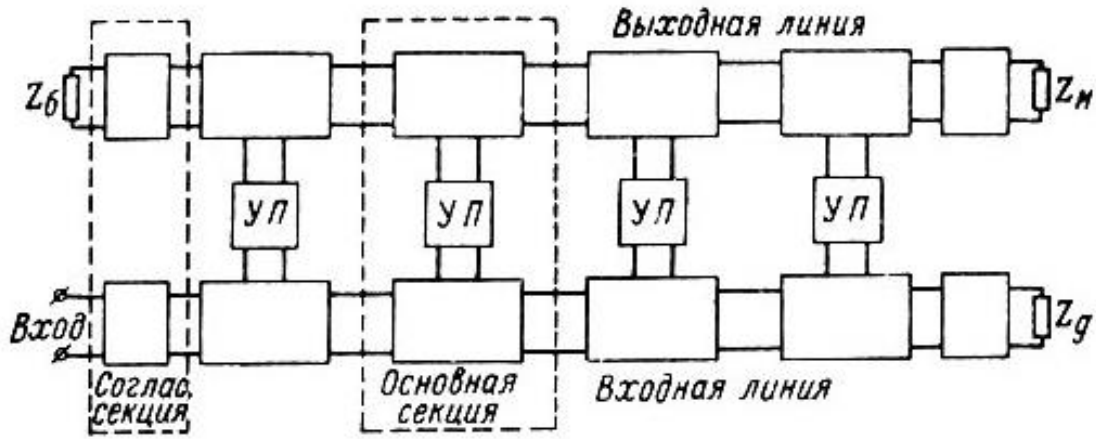


Рис. 3. Структурная схема усилителя с распределенным усилением

С появлением мощных МДП транзисторов, обладающих высоким входным и выходным сопротивлением, тема построения мощных широкополосных УРУ снова стала актуальной. Она не только более широкополосная, но и более надежна в сравнении с мостовыми схемами сложения мощностей. Выход из строя одного из транзисторов в УМ, содержащем несколько мостов сложения, приводит к нарушению в работе всех мостов и к полной его неработоспособности. При параллельной схеме сложения мощностей аналогичный отказ не приводит к прекращению УМ в целом. УРУ на ПТ используют также в приемных модулях фазированных антенных решеток.

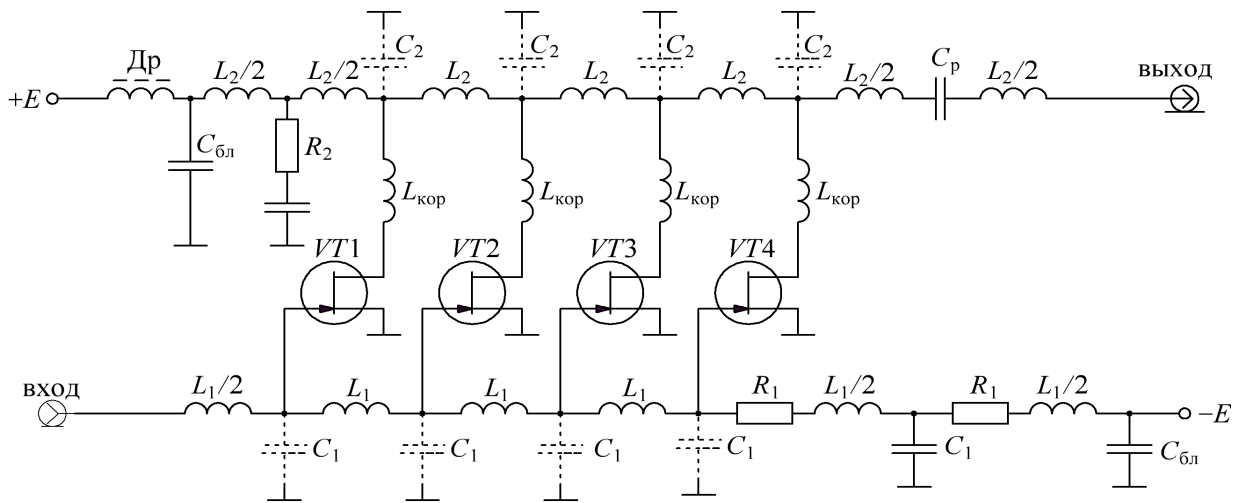


Рис. 4. Схема широкополосного УРУ на полевых транзисторах

Принципиальная схема, использующая параллельное включение четырех ПТ, изображена на рис.4. Входная искусственная длинная линия (ИДЛ) образована четырьмя индуктивностями  $L_1$  с выводом средней точки и входными емкостями ПТ  $C_1$ . Кроме входного сигнала от ИДЛ, на затвор каждого транзистора подается отрицательное напряжение смещения  $E$ , источник которого заблокирован по высокой частоте конденсатором  $C_{бл}$ . Цепочка  $R_1, C_1, L_1/2$  – согласующая. Выходная ИДЛ также образована индуктивностями  $L_2$  с выводом средней точки и выходными емкостями ПТ  $C_2$ . Дроссель  $Dr$  и  $C_{бл}$  образуют фильтр источника питания цепей стока транзисторов. Цепочка  $R_2, C_{бл}, L_2/2$  – согласующая,  $R_2$  выполняет одновременно роль балластного сопротивления,  $C_p$  на выходе линии – разделительная емкость.

Для производителей телевизионных передатчиков отмеченные преимущества УРУ весьма важны. Сегодня передатчик состоит из универсального возбудителя, а также частотно зависимых предварительного и оконечного усилителя, построенных с применением мостовых схем. При переходе

на УМ с УРУ изделие становится намного практичнее, так как широкополосный усилитель значительно проще в настройке на частоту канала, и не требует изменения конструкции мостовых схем.

Однако построение УРУ на ПТ сопряжено с рядом трудностей. Резкие зависимости входных и выходных емкостей транзисторов приводят к дополнительным нелинейным искажениям в тракте, что приводит к потребности усовершенствования линеаризации тракта усиления мощности [4]. Также при усилении сигнала с большим пик-фактором стоит проблема повышения КПД УРУ. Применить метод усиления У. Догерти в схеме УРУ не представляется возможным, так как в этом случае также необходимо использовать мостовые схемы деления и сложения мощности. Более перспективным, на наш взгляд, в данной ситуации является применение метода автоматической регулировки режима работы (АРР) УРУ, использующего синхронное с изменением огибающей входного сигнала изменение напряжения питания УМ. В [4] АРР используется для повышения энергоэффективности УМ по схеме У. Догерти. Следует учесть, что метод АРР может вносить дополнительные нелинейные искажения, так как в тракте управления напряжением питания возникают задержки по отношению к амплитуде усиливаемого сигнала. Тем не менее тема применения УРУ с АРР является актуальной для дальнейших исследований также и благодаря достижениям в области современной цифровой предкоррекции, с помощью которой возможно достичь требуемой линейности усилительного тракта. В этом случае важную роль играет компьютерное моделирование проектируемой схемы. Расчет и сравнительный анализ энергетической эффективности УМ с линейной и нелинейной АРР позволяет значительно снизить затраты на этапе макетирования.

#### **Список использованных источников**

1. Шахгильдян В. В., Иванюшкин Р. Ю. Методы повышения энергетической эффективности линейных усилителей мощности // Т-Сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2011. Т.5. №9. С.143-145.
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. Новосибирск, 2013, с. 15-61.
3. Алексеев О. В. Усилители мощности с распределенным усилением — Ленинград: Издательство «Энергия». Ленинградское отделение, 1968.
4. Перспективные пути построения тракта усиления мощности передатчиков эфирного цифрового телевизионного вещания// Системы синхронизации, формирования и обработки сигналов / Иванюшкин Р. Ю., Разин К. О., Шамаков Н. Д. 2018. Т. 9. № 3. С. 96-103.