

Туральчук П.А.¹, Кириллов В.В.¹, Вендик О.Г.¹, Парнес М.Д.²

¹Санкт-Петербургский государственный электротехнический

университет «ЛЭТИ»

² ООО «Резонанс»

СВЧ усилители мощности с высоким КПД на основе технологии AlGaIn/GaN

В работе обсуждаются вопросы проектирования усилителей мощности на транзисторах с гетеропереходом AlGaIn/GaN. Обсуждаются основы проектирования усилителей мощностей с учетом гармонических составляющих в нагрузке усилителя с целью достижения высокого коэффициента полезного действия.

Ключевые слова: транзистор на нитриде галлия, СВЧ усилитель мощности, согласующая цепь

С момента появления первых работ по разработке транзисторов на нитриде галлия GaN [1], возможности приборов СВЧ диапазона были существенно расширены благодаря уникальным свойствам гетероперехода AlGaIn/GaN. Высокая подвижность и концентрация носителей заряда в канале AlGaIn/GaN наряду с широкой запрещенной зоной определяют частотные и мощностные свойства гетеропереходных полевых транзисторов с каналом, обладающим высокой подвижностью носителей заряда (HEMT) [2]. Применение GaN транзисторов существенно улучшает параметры СВЧ усилителей мощности (УМ). УМ на HEMT GaN транзисторах используются в выходных каналах фазированных антенных решеток (ФАР), заменяя при этом гораздо более громоздкие и менее эффективные усилители мощности на клистродах или лампах бегущей волны [3]. ФАР – это наиболее масштабные и дорогостоящие устройства современных радиоэлектронных систем. Отказ от вакуумных активных элементов в составе ФАР сильно упрощает конструкцию современных радиолокационных систем. В настоящее время успешно выпускаются СВЧ УМ на основе HEMT GaN транзисторов, выходная мощность которых достигает 1000 Вт [4].

Решающим фактором в развитии СВЧ УМ являются повышение коэффициента полезного действия (КПД усилителя определяется отношением мощности на выходе усилителя к подводимой мощности постоянного тока) при сохранении линейности и расширении полосы частот устройства [5]. Интерес к разработке УМ с высоким КПД проявляется уже давно в рамках рассмотрения классических усилители классов АВ, В и С [6]. В отличие от классических классов, основанных на выборе угла отсечки с помощью смещения, ключевой режим работы УМ является наиболее эффективным способом достижения высокого КПД. Эта технология успешно применяется в широтно-импульсной модуляции (ШИМ) в ВЧ-диапазоне. В этой роли импульсный модулятор в цепи усилителя обеспечивает КПД в пределах 80% – 90%. Однако, простое частотное масштабирование не представляется возможным для использования этого режима в диапазоне СВЧ.

В последнее время научные исследования сосредоточены на ключевых режимах работы СВЧ УМ, таких как классы Е и F [7, 8]. Основным физическим принципом увеличения КПД при работе усилителя в режимеключа заключается в том, что в транзисторе, который переключается между состояниями открыт/закрыт, в каждый момент

времени существует либо ноль напряжения, либо ноль тока. Поскольку перекрытие между напряжением и током в этом случае минимизировано, то и рассеиваемая мощность минимальна, что позволяет теоретически получить 100% КПД. В действительности, с ростом частоты транзистор перестает быть идеальным ключом, что приводит к перекрытию напряжения и тока и снижению КПД УМ в пределах 70-80%.

Синтез СВЧ усилителей в классах режимов E и F с целью достижения максимально высокого КПД основан на анализе форм выходного тока и напряжения [9]. Так в режиме класса E нагрузка транзистора рассчитывается из условия, при котором форма тока и форма напряжения никогда не бывают максимальными одновременно. В классе F волна напряжения включает одну или несколько нечетных гармоник, приближаясь к квадратной форме, в то время как ток включает в себя четные гармоники, приближаясь по форме к половине синусоиды. Особый интерес представляет анализ усилителя в частотной области, предложенный в работе [10], он может быть применен к классам в режиме E, F и C. Предложенный метод позволяет описать работу УМ с учетом конечного числа гармоник, их импедансов, а также сделать оценку характеристик УМ, нагруженного на соответствующий импеданс. Количество гармонических составляющих, учитываемых в спектрах одного сигнала, определяет максимально достижимый КПД. Нагрузка на частоте соответствующей гармоники определяет выходную мощность усилителя. Таким образом, для обеспечения заданного режима работы УМ с высоким КПД требуется расчет параметров выходной нагрузки транзистора с учетом гармонических составляющих. Обобщенная схема УМ, представленная транзистором и выходной согласующей цепью, представлена на рисунке 1.

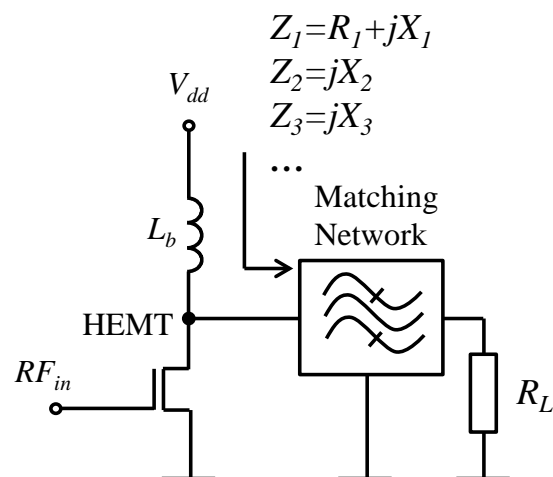


Рис. 1. Обобщенная схема УМ.

Стоит упомянуть другой тип УМ с высоким КПД – класс J, впервые предложенный в работе [11], он отличается линейностью работы и расширенным диапазоном частот. В режиме класса J вторая гармоника используется в сочетании с импедансом фундаментальной частоты так, чтобы сформировать так называемый эффект "уплощения" протекающего тока.

С использованием современных методов проектирования (AWR Design Environment, Keysight ADS, и т.п.) расчет СВЧ УМ основан на использовании графо-аналитического метода, заключающегося в построении контуров выходных нелинейных характеристик УМ (выходной мощности или КПД) [12]. Результаты расчета, полученные с помощью оптимизационных процедур, приводятся на круговой диаграмме Смита в зависимости от импеданса нагрузки, как входной, так и выходной (в англ. лит. load-pull technique). Анализ параметров СВЧ транзистора с помощью данной методики позволяет определить оптимальную нагрузку транзистора для получения максимальной выходной мощности,

максимального коэффициента усиления или максимального коэффициента полезного действия. В случае работы транзистора в коммутационном режиме или с использованием набора высших гармоник (классы E, F, J), класс работы определяется параметрами согласующих цепей на частотах используемых гармоник. Это означает, что может быть найдено условие согласования импеданса на основной частоте и нагрузки соответствующих гармоник в виде короткого замыкания или холостого хода. Использование данной методики дает возможность определить оптимальную нагрузку усилителя, соответствующую максимумам КПД, выходной мощности или коэффициента усиления, как на частоте основной гармоники, так и при использовании набора высших гармоник [11]. Результаты расчёта импеданса на основной частоте 4 ГГц и реактивных нагрузок на частотах гармоник для транзистора GaN со структурой десятипальцевого затвора шириной 125 мкм, разработанного в ООО «Резонанс», представлены на рисунке 2.

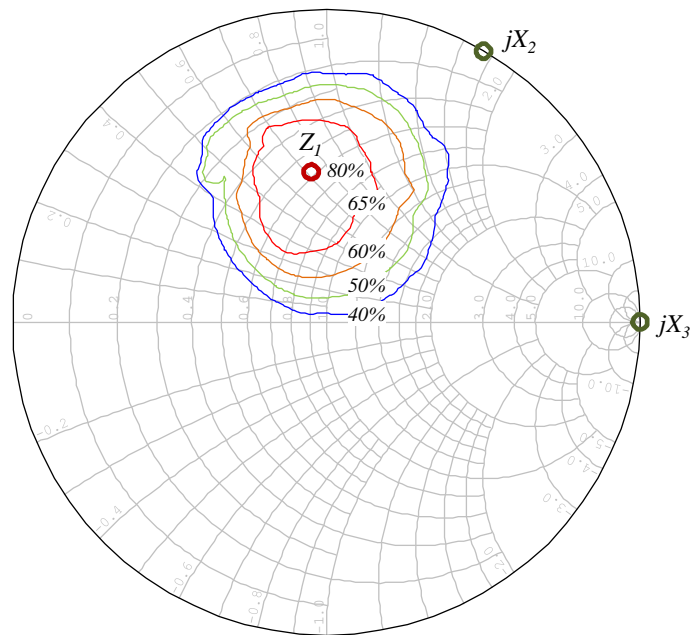


Рис. 2. Результаты анализа импеданса нагрузки УМ на основной частоте и частотах гармоник, обеспечивающей максимальный КПД.

Принцип построения СЦ, обеспечивающей нагрузку транзистора, как на частоте основной гармоники, так и с использованием набора высших гармоник изображен рисунке 3. Ключевой особенностью подхода, принятого в данной работе, является разделение согласующих цепей на основной частоте (плоскость B) и цепей, обеспечивающих нагрузку на частотах гармоник (плоскость C) для уменьшения сложности процедуры проектирования СЦ. Учитывая высокий импеданс гармоник в плоскости C , согласование на частотах гармоник полностью определяются транзистором и согласующей цепью на частотах этих гармоник. Данная методика независимого согласования на частотах гармоник и на фундаментальной частоте позволяет управлять значением достижимого КПД в широкой полосе частот, наряду с полным подавлением гармоник за пределами рабочей полосы [12]. Выбор параметров согласующей цепи на фундаментальной частоте ведется с учетом компромисса между сохранением высокого значения КПД, максимальным подавлением гармоник в цепях нагрузки и поддержанием заданной выходной мощности.

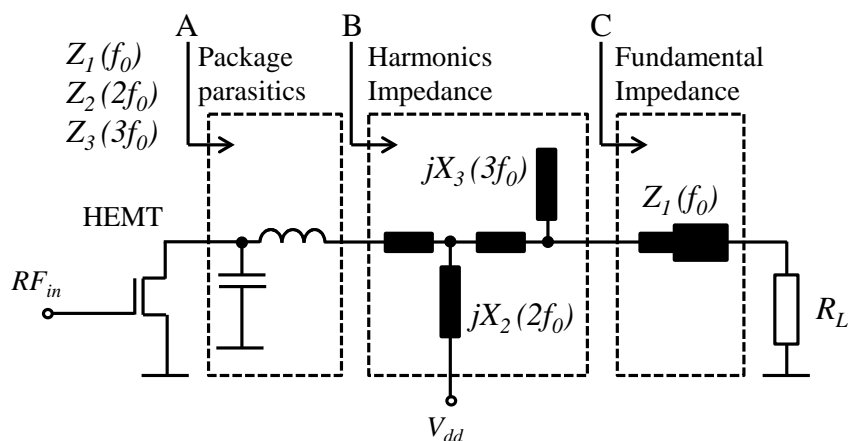


Рис. 3. Принцип построения СЦ, обеспечивающей нагрузку транзистора, как на частоте основной гармоники, так и с использованием набора высших гармоник.

Синтез входной и выходной согласующих цепей, которые трансформируют выбранные импедансы к 50 Ом входа и выхода УМ на заданных частотах осуществляется линейными методами теории цепей. При этом вход УМ нагружен на импеданс, комплексно-сопряженный с входным импедансом транзистора.

В результате применения данной методики был разработан однокаскадный усилитель мощности СВЧ в виде интегральной схемы, обеспечивающий выходную мощность 5 Вт на частоте 4 ГГц. Топология УМ, выполненная на органической подложке Arlon AD1000, представлена на рисунке 4. Транзистор HEMT представлен нелинейной моделью, содержащей информацию о динамических характеристиках и волновых параметрах транзистора в рабочем диапазоне частот.

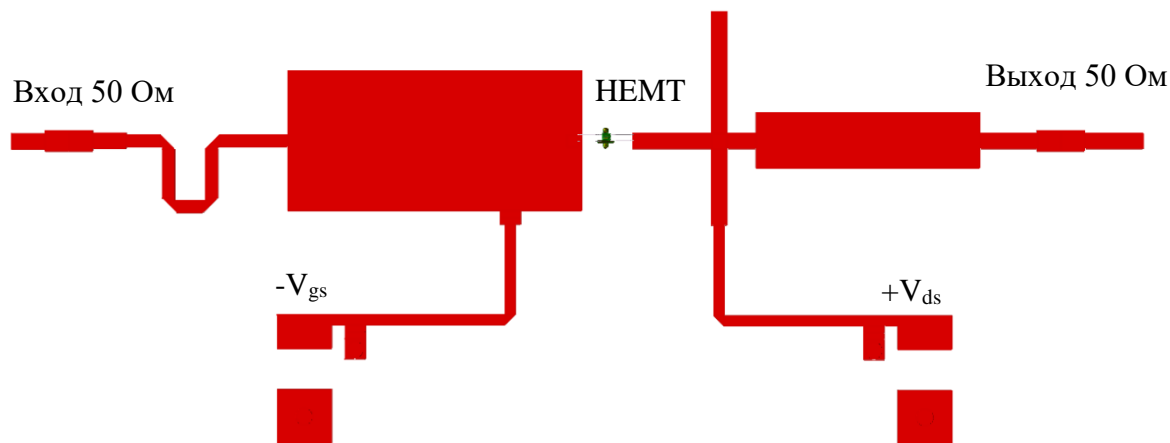


Рис.4 Общая топология СВЧ УМ 5 Вт

Динамические характеристики УМ, полученные в результате моделирования, представлены на рисунке 5. УМ характеризуется следующими максимально достижимыми параметрами: коэффициент усиления 15 дБ, КПД по добавленной мощности 78% , выходная мощность 5 Вт.

Таким образом, для достижения высокого КПД в УМ требуется расчет параметров выходной нагрузки транзистора с учетом гармонических составляющих. Подход синтеза СЦ, рассматривающий раздельное согласование на частотах гармоник и основной частоте, позволяет существенно упростить процедуру проектирования. В результате была предложена структура УМ на 5 Вт, характеризующегося КПД по добавленной мощности 78%.

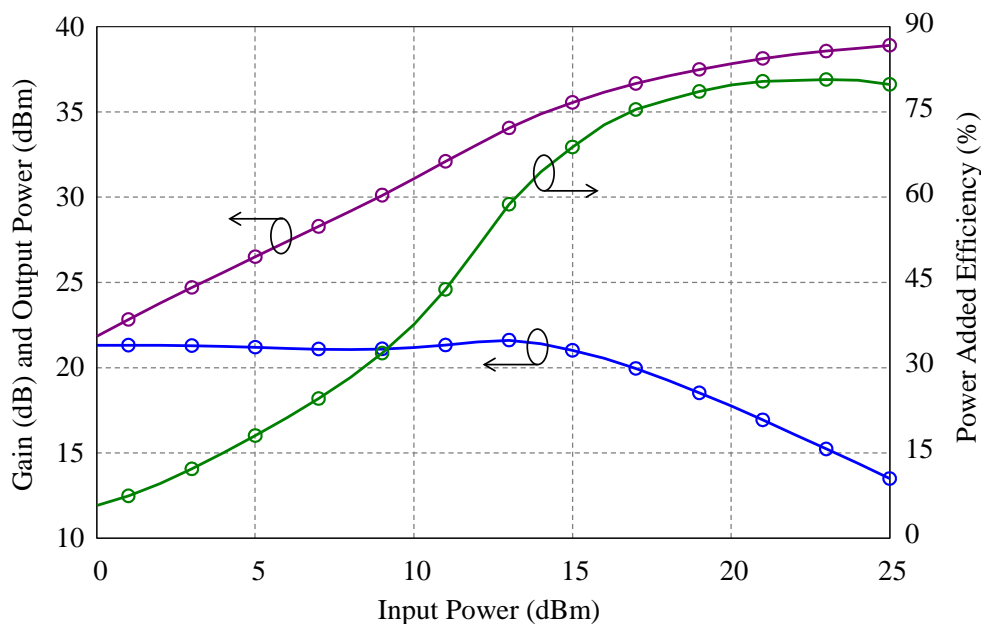


Рис. 5. Зависимости выходной мощности, коэффициента усиления и КПД УМ от мощности входного сигнала

Работа выполнена в рамках государственной работы «Проведение научно-исследовательских работ (фундаментальных научных исследований, прикладных научных исследований и экспериментальных разработок)» проектной части государственного задания Минобрнауки России (задание № 8.2579.2014/К).

Библиографический список

1. Khan M.A., Kuznia J.N., Bhattaral A.R., Olsen D.T. Metal semiconductor field effect transistor based on single crystal GaN. –Appl.Phys.Lett., 1993, v.62 (15), p.1786–1787.
2. Данилин В.Н., Жукова Т.А., Кузнецов Ю. и др. Транзисторы на GaN пока самый «крепкий орешек.ж. «Электроника», No 4, 2005
3. Борисов Л., Щелкунов Г. // Электроника: наука, технология, бизнес. 2012. N.4. С. 102-10.
4. Formicone G., Boueri F., Battaglia B. // IEEE International Conference on Microwaves, Communications, Antennas and Electronic Systems (COMCAS 2013). Israel. 2013. P.4.
5. Bo Berglund, Jan Johansson and Thomas Lejon “High efficiency power amplifiers”, Ericsson Review No. 3, 2006
6. Frederick H. Raab, Peter Asbeck, Steve Cripps, Peter B. Kenington, Zoya B. Popovich, Nick Pothecary, John F. Sevic and Nathan O. Sokal, “RF and Microwave Power Amplifier and Transmitter Technologies — Part 2”, 2003 *High Frequency Electronics*, pp. 22-36
7. Colantonio P., Giannini F., Limiti E., High efficiency RF and microwave solid state power amplifier. A John Wiley and Sons, Ltd., Publication. 2009. 495 p.
8. Grebennicov A., Switchmode RF and Microwave Power Amplifier. Academic Press. 2012. 345 p.
9. N. O. Sokal, “Class-E switching-mode high-efficiency tuned RF/microwavepower amplifier: Improved design equations,” in IEEE MTT-SInt. Microwave Symp. Dig., vol. 2, Boston, MA, June 13–15, 2000, pp.779–782.
10. F. H. Raab, “Class-E, Class-C, and Class-F Power Amplifiers Based Upon a Finite Number of Harmonics”, MTT, 2001
11. S. C. Cripps, “RF Power Amplifiers for Wireless Communications,” 2nd Edition, Artech House, Norwood, Mass, 2006
12. Tuffy, Neal, Anding Zhu, and Thomas J. Brazil. "Class-J RF power amplifier with wideband harmonic suppression." *Microwave Symposium Digest (MTT), 2011 IEEE MTT-S International*. IEEE, 2011.