

Сравнение методик согласования импедансов при проектировании усилителей

Стив Дудкевич, Марк Шульц Тенберг,
Джампьеро Эспозито, Maury Microwave Corp.
и Трэвис Барбьери, Freescale Semiconductor

Перевод: Елена Кириленко

В статье рассматриваются различные типы усилителей, что необходимо для определения того, в каких случаях стоит реализовывать согласование на гармониках, а в каких – нет. Также в статье приводятся различные методологии гармонических измерений harmonic Load-Pull, используемых при проектировании усилителей.

Современные телекоммуникационные системы, как коммерческие, так и военные, требуют постоянного улучшения показателей выходной мощности, КПД, линейности и рабочего диапазона частот. Для этого в процессе проектирования внутренних компонентов систем необходимо уделять дополнительное внимание малошумящим усилителям и усилителям мощности.

С целью достижения высоких значений КПД были проведены серьёзные исследования в области согласования импедансов нагрузки на одной или нескольких гармониках. Равнозначные усилия были затрачены на разработку коммерческой измерительной системы, получившей название harmonic Load-Pull (далее Load-Pull), которая сможет помочь в определении идеальных согласующих импедансов на основной частоте и на гармониках для улучшения выходных характеристик.

Перед началом процесса проектирования необходимо выяснить, требуется ли системе усилитель с согласованием на гармонических частотах? Если да, то какой тип был бы предпочтительнее?

СОГЛАСОВАНИЕ ИМПЕДАНСА НА ГАРМОНИКАХ И ЕГО РОЛЬ В ПРОЕКТИРОВАНИИ УСИЛИТЕЛЕЙ

Усилители мощности (УМ) проектируются для широкого спектра задач, поэтому разработчикам приходится иметь дело как с линейными усилителями класса «А», так и с нелинейными. Таким образом, некоторые УМ проектируются на несогласованных транзисторах, другие на полностью согласованных компонентах. А необходимость согласования на гармониках определя-

ется целями проектирования и типом используемого транзистора.

Усилители, работающие в линейном режиме, не генерируют сигналы на гармонических частотах, и, соответственно, мощность на выходе таких устройств прямо пропорциональна мощности на входе. Поскольку мощности на гармонических частотах нет, то и согласование на них не будет влиять на характеристики всего устройства. Существует множество математических методов, использующих S-параметры для определения оптимального импеданса на входе и выходе транзистора [1, 2]. Для нахождения идеального согласующего импеданса для заданной добротности в качестве альтернативы можно использовать измерительную систему Load-Pull на основной частоте.

Современные коммерческие и военные радиотехнические системы порой должны функционировать в диапазоне нескольких октав или в декаде для того, чтобы удовлетворить требованиям по ширине спектра. Таким образом, широкополосные усилители являются критическим элементом радиотехнических и радиолокационных систем, которые зачастую определяют выходную мощность и стабильность коэффициента усиления во всём рабочем диапазоне частот. При проектировании УМ согласование на основной частоте определяет выходную мощность и коэффициент усиления. В случае проектирования широкополосного УМ идеальный согласующий импеданс должен быть вычислен для множества поддиапазонов всей рабочей полосы частот, а синтезированная согласующая цепь должна обеспечивать требуемый широкополосный отклик. При

таком согласовании высока вероятность того, что гармонические составляющие нижних частот рабочего диапазона совпадут с его средними или высокими частотами. Когда происходит такое совпадение, возможности независимого согласования гармонических импедансов для каждой несущей частоты практически нет [3, 4].

Рассмотрим в качестве примера проектирование широкополосного УМ, работающего в диапазоне частот от 3,1 до 10,6 ГГц. Теоретически для основной частоты 3,1 ГГц усилитель класса F требует нагрузки КЗ (короткое замыкание) на второй гармонике 6,2 ГГц и ХХ (холостой ход) на третьей гармонике 9,3 ГГц. Однако частоты 6,2 ГГц и 9,3 ГГц являются также и основными частотами для рабочего диапазона данного УМ и нагрузки КЗ и ХХ могут значительно ухудшить характеристики усилителя.

Коммерческие транзисторы доступны на рынке от множества производителей, с разным уровнем согласования. Несогласованные транзисторы могут быть настроены на получение максимальных характеристик на заданной частоте, уровне мощности и смещении. Достигается это путём определения оптимальных нагрузочных условий на основной частоте и, в случае необходимости, на гармониках. Для предсогласованных и полностью согласованных компонентов возможность существенно изменить импеданс, представленный уже корпусированному устройству с уже имеющейся согласующей цепью, значительно снижается. Предсогласованные и согласованные транзисторы в основном предлагаются с уже встроенным согласованием на гармонических частотах, предусмотренным для определённых применений. Например, для проектирования базовых станций. Таким образом, преимущества представления дополнительного согласования на гармониках вне корпуса устройства в данном случае исключаются.

На рисунке 1 показаны результаты гармонических измерений Load-Pull для транзистора Freescale LDMOS, с интегрированным согласованием на гармониках, работающего в классе F на частоте 960 МГц с напряжением смещения $V_{dd} = 28$ В, $I_{dq} = 300$ мА и выходной мощностью 35 Вт при 1 дБ компрессии коэффициента усиления. Видно, что изменение импеданса на гармониках по всей диаграмме Смита не влечёт за собой увеличения или каких-либо тенденций к улучшению КПД.

Согласование импеданса на гармониках становится критичным при проектировании высокоэффективных УМ, функционирующих в условиях компрессии или насыщения. В таких условиях транзистор будет работать в глубоко нелинейном режиме, а значит будет генерировать мощность на одной или нескольких гармонических частотах. Для подобных режимов достижимо функционирование транзисторов в современных классах работы (E, F, G, J и их инверсных режимах) путём идеального согласования на гармониках.

В основном, когда вследствие компрессии присутствует мощность на гар-

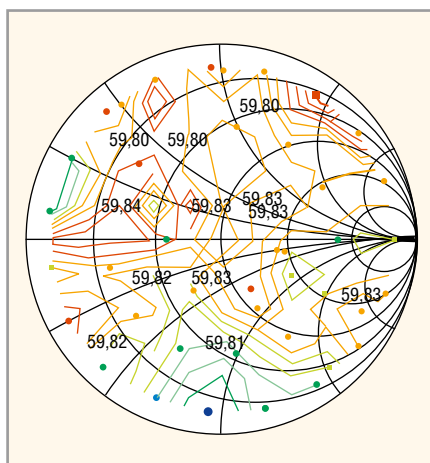


Рис. 1. Load-Pull контуры КПД на f_0 для нагруженного транзистора

монических частотах, улучшить показатели КПД возможно через отражение энергии обратно в направлении к транзистору, что имеет место при амплитуде отражения $|\Gamma_r|$, близкой к единице с соответствующим значением фазы (зависящим от плоскости сечения, в которой проводились измерения) [5–8].

На рисунке 2 показано изменение КПД GaN-транзистора на частоте

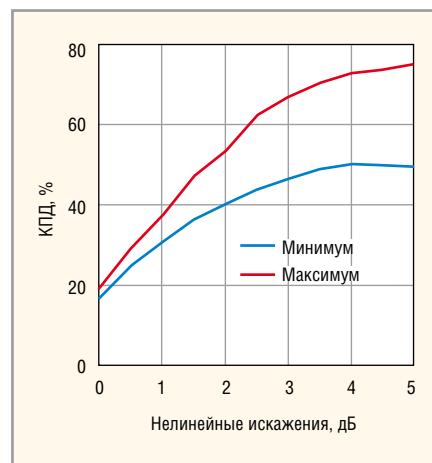


Рис. 2. КПД как функция компрессии усиления с согласованием на гармониках

2,5 ГГц в зависимости от уровня компрессии: от 0 дБ (малосигнальный, практически линейный режим работы) до 5 дБ (глубокая компрессия, близкая к насыщению). На рисунке 2 представлены два случая согласования на гармонических частотах – минимальное и максимальное. Влияние согласования на гармониках, а именно на значение КПД, возрастает вместе с ростом выходной мощности на этих частотах.




Ручные цифровые осциллографы U1610A и U1620A

- Первые в мире ручные цифровые осциллографы с тремя режимами визуализации: в помещениях, вне помещений и в ночное время
- Цветной жидкокристаллический VGA TFT дисплей высокого разрешения с диагональю 5,7 дюймов (14,5 см) с широкими углами обзора
- Безупречная целостность сигнала благодаря высокой частоте дискретизации и большой глубине памяти
- Время автономной работы до 3 часов
- Полнофункциональный цифровой мультиметр с разрешением 10000 отсчетов и возможностью измерений емкости и частоты
- Изолированные каналы для поиска неисправностей в сигналах высокого напряжения

	U1610A	U1620A
Полоса пропускания	100 МГц	200 МГц
Частота дискретизации (real time)	1 Гвыб/с (500 Мвыб/с на канал)	2 Гвыб/с (1 Гвыб/с на канал)
Кол-во каналов	2	2
Длина записи данных в памяти	120 Квыб / канал (60 Квыб / канал при работе 2-х каналов)	2 Мвыб / канал (1 Мвыб / канал при работе 2-х каналов)
Время нарастания	3,5 нс	1,75 нс
Развертка времени	5 нс...50 с/дел.	2 нс...50 с/дел.
Интерфейсы	USB	USB
Вес	2,5 кг	2,5 кг

Утвержденные типы средств измерений.

«ЭрисКом» - официальный дистрибьютор Keysight Technologies в России.

Тел./Факс: +7 (499) 218-2353
www.eriscom.ru / info@eriscom.ru

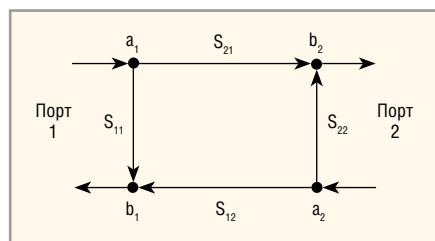


Рис. 3. Двухполюсник, определённый S-параметрами и волнами a и b

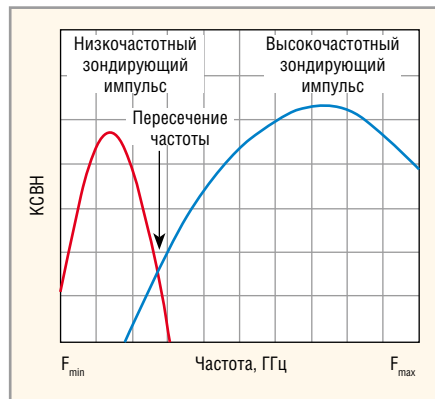


Рис. 4. Типовой широкополосный отклик зондов пассивного импедансного тюнера

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНИКИ ГАРМОНИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ Load-Pull

Гармонические измерения Load-Pull существуют уже десятилетия, с момента изобретения техник активного Load-Pull с закрытым и открытым контурами согласования в 1979–1990 гг. [9, 10]. В то время данным системам были присущи проблемы устойчивости и обработки данных, что ограничивало их коммерческое применение. В 1990-е гг. для гармонических измерений Load-Pull использовались пассивные механические тюнеры. Осуществлялись такие измерения путём параллельного включения тюнеров с использованием мультиплексов, или же каскадированием тюнеров и применением продвинутого математического аппарата [12]. Как и в случаях всех пассивных систем, амплитуда потенциально возможного коэффициента отражения в сечении тестируемого устройства была ограничена диапазоном согласования тюнера и потерями в СВЧ-тракте.

В 2000–2010 гг. стали появляться современные измерительные системы активного Load-Pull с открытым контуром согласования. Таким образом удалось усовершенствовать более ранние системы активного Load-Pull и преодолеть ограничения пассивных систем [13]. Любая измерительная система, будь то пассивная гармо-

ническая, активная гармоническая или гибридно-активная, имеет свои преимущества и недостатки. Основными моментами, которые различают между собой техники реализации измерений Load-Pull, являются: метод измерения, максимально возможный коэффициент отражения в сечении тестируемого устройства, методология управления импедансом на гармониках, точность и скорость согласования и, конечно же, стоимость всей системы.

Измерительные системы Load-Pull могут базироваться на скалярных или векторных измерениях СВЧ-волн. Скалярные системы используют ваттметр или анализатор спектра для измерения скалярных значений сигнала, которые затем пересчитываются в сечение тестируемого компонента (процедура де-эмбединга). Векторные системы базируются на векторном анализаторе цепей, калибруемым в сечении тестируемого компонента для того, чтобы затем напрямую измерять векторы падающей и отражённой волн (a и b соответственно), что даёт более точные результаты и не требует де-эмбединга. Затем из полученных значений рассчитываются качественные характеристики. Двухполюсник, определяемый S-параметрами и волнами a и b, показан на рисунке 3. Пассивный Load-Pull может быть реализован как в виде скалярной системы (измерения с помощью ваттметра), так и в виде векторной системы (измерения векторными приёмниками анализатора цепей), в то время как активный Load-Pull требует обязательного наличия векторных приёмников для измерений волн a и b и определения импеданса, представленного тестируемому компоненту.

Пассивные импедансные тюнеры по своей природе являются широкополосными устройствами. Это означает, что согласующий элемент (зонд) внутри тюнера создаёт широкополосную серию отражённых волн, которая, вероятно, затрагивает несколько гармонических частот, как показано на рисунке 4. С одним согласующим элементом возможно контролировать импеданс на одной частоте, в то время как тюнер будет представлять широкополосный ряд импедансов на более высоких частотах, включающих гармоники. При каскадировании согласующих элементов внутри одного тюнера или при каскадировании нескольких тюнеров с одним зондом возможно

управлять импедансом на энном количестве частот (где n – количество зондов). То есть тюнер с двумя зондами может управлять импедансами на двух частотах, и так далее [12].

В традиционной скалярной гармонической системе Load-Pull, подразумевающей каскадирование импедансных тюнеров, максимально достижимая амплитуда на любой частоте есть сумма отражений каждого элемента минус потери в СВЧ-тракте между тюнерами и тестируемым устройством, таким образом $R_L(TU) = R_L(\text{тюнер}) + R_L(\text{соединения})$. В типичной установке с 50-омной оснасткой на частоте 2,5 ГГц реально достижимым значением коэффициента отражения на основной частоте будет $|\Gamma_j| = 0,93$, на второй гармонике отражение будет равно $|\Gamma_j| = 0,9$.

В современных векторных пассивных измерительных системах Load-Pull между импедансным тюнером и тестируемым устройством (тестируемым транзистором, ТУ) добавлены двунаправленные ответители, которые увеличивают потери в СВЧ-тракте (R_L) и, следовательно, снижают максимально возможное отражение до 0,91 на основной частоте и до 0,85 на второй гармонике. Измерительные системы активного Load-Pull с открытым контуром согласования могут заменить пассивные импедансные тюнеры на цепь активного согласования, состоящую из источника СВЧ-сигнала с контролируемой амплитудой и фазой. Вместо использования пассивного тюнера для отражения сигнала ТУ, СВЧ-генератор создаёт новый сигнал, который подаётся на выход ТУ, формируя требуемое отражение $\Gamma_L = a_2 / b_2$.

В гибридно-активной системе Load-Pull, использующей пассивный тюнер для управления импедансом на основной частоте и активные цепи для согласования на гармониках, реальным достижимым значением коэффициента отражения на основной частоте будет $|\Gamma_j| = 0,86 / 0,91$, в то время как на второй гармонике возможно представить отражения $|\Gamma_j| > 1$ (ограниченные лишь подаваемой на выход ТУ мощностью).

Полностью активная измерительная система Load-Pull не имеет ограничений по амплитуде коэффициента отражения на любой частоте, на которой цепь активного согласования может представить достаточную мощность для удовлетворения условия $\Gamma_L = a_2 / b_2$.

Важно помнить, что с ростом частоты собственные потери в СВЧ-тракте растут и, следовательно, диапазон согласования пассивной системы уменьшается. На рисунке 5 сравниваются амплитуды максимального коэффициента отражения для различных методик гармонического Load-Pull при $f_0 = 2,5$ ГГц.

Системы активного Load-Pull используют как векторные приёмники, так и встроенные источники СВЧ-сигнала в анализаторах цепей для формирования активной цепи согласования. Векторный анализатор цепи (ВАЦ) измеряет волны a и b , программное обеспечение рассчитывает результирующий сигнал, требуемый для обеспечения отражения $\Gamma_1 = a_2 / b_2$ в сечении, и затем отправляет команду источнику для подачи данного сигнала, потом ВАЦ, для точности, снова измеряет получившиеся волны в сечении. Итеративный алгоритм ПО регулирует амплитуду и фазу подаваемого сигнала до тех пор, пока не будет достигнут желаемый уровень отражения в установленных пределах сходимости. Процесс повторяется для каждой точки импеданса и каждого уровня мощности.

Уникальной модификацией активного Load-Pull является применение методики измерения с использованием смешанного сигнала (Mixed-Signal Active Load-Pull, MSALP), где возможна генерация произвольных форм СВЧ-сигнала и широкополосный анализ данных вместо классических измерений. В связи со своей широкополосной природой MSALP использует принцип дробления во времени для практически одновременного представления множества импедансов TU , что позволяет реализовать гораздо более быстрые согласования и измерения [13].

Несмотря на используемый метод измерения, одни и те же импедансы, представленные на одинаковых частотах, должны давать одинаковые результаты. На рисунке 6 показано сравнение измеренных данных для скалярного пассивного, векторного, гибридно-активного Load-Pull и MSALP для одних и тех же импедансов на f_0 , $2f_0$ и $3f_0$.

Исследование уровня КПД показывает, что максимальный КПД достигается в случае максимального отражения на гармонических частотах. То есть для достижения максимально возможного КПД нужно обеспечить коэффициент отражения по выходу $|\Gamma| = 1$ на всех гармонических частотах.

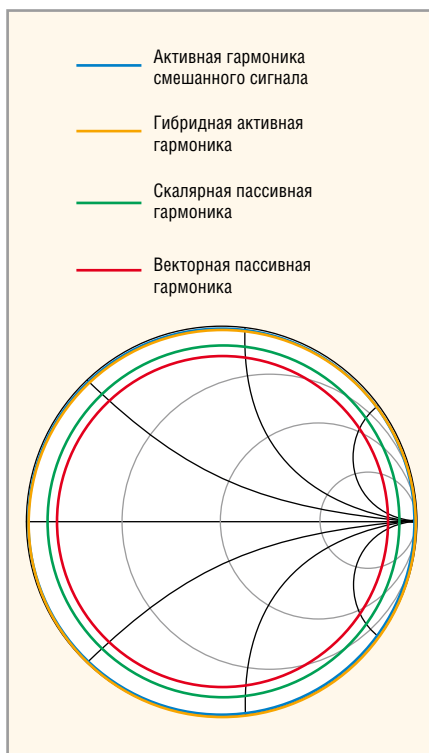


Рис. 5. Максимально достижимое отражение на второй гармонике при различных методиках Load-Pull

На рисунке 7 показано изменение КПД в зависимости от амплитуды отражения при фиксированной фазе на второй гармонике для транзистора с выходной мощностью 10 Вт и рабочей частотой 2,5 ГГц. Влияние гармонического согласования увеличивается с ростом амплитуды. В случае коэффициента отражения $|\Gamma_1| = 0,85$ (типичное значение для векторного пассивного Load-Pull) КПД приблизительно равен 75%, в то время как $|\Gamma_1| = 0,99$ (возможно, в активном Load-Pull) даёт КПД ~80%.

Кроме того, каждая измерительная техника имеет свои ограничения по коэффициенту отражения и предполагает свой процесс калибровки. Как правило, пассивные механические тюнеры имеют свою процедуру установки параметров, при которой S-параметры элемента согласования приводятся в соответствие с позициями мотора. Увеличение количества элементов согласования увеличивает время процедуры. Современные импедансные тюнеры с интерфейсом LXI™, используемые вместе с анализаторами цепей, устанавливаются в течение примерно 11 минут каждый по 700–1000 точкам импеданса. Таким образом, для калибровки двух согласующих элементов потребуется около 22 минут.

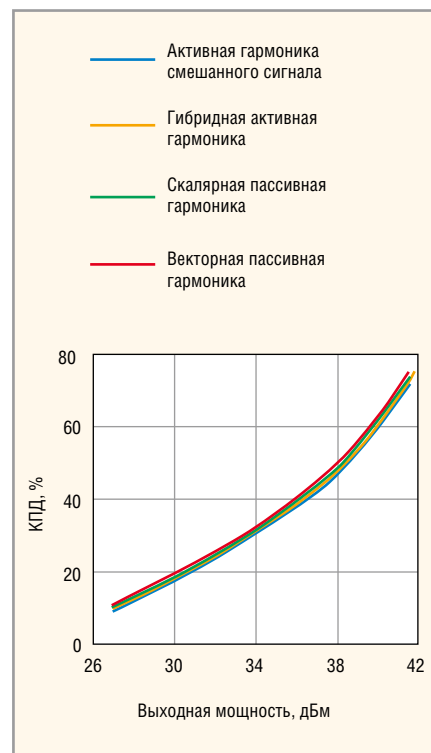


Рис. 6. Зависимость КПД от выходной мощности для различных методологий Load-Pull при идентичных импедансах

Системная калибровка для скалярных и векторных систем также будет различной. Скалярная калибровка подразумевает «калибровку по мощности», при которой мощности в нужных сечениях вычисляются с помощью процедуры де-ембеддинга данных измерителя мощности. Этот процесс занимает несколько минут. В векторных измерениях Load-Pull калибровка системы проходит в два или три этапа и включает в себя двухпортовую векторную калибровку в сечении, а также калибровку по мощности. Опциональной является калибровка для нелинейных измерений NVNA. Оба этапа вместе занимают около 5 минут, нелинейная калибровка – до 7 минут.

Время, затрачиваемое на согласование, неодинаково для пассивной и активной методик. Скалярный пассивный Load-Pull предполагает перестановку нескольких элементов согласования и достаточно низкую усреднённую скорость сбора данных измерений ваттметра. Пассивные векторные измерения, также как и скалярные, предполагают механическое движение согласующих элементов, но непосредственно измерения проходят быстрее, так как вместо ваттметра используются векторные приёмники анализатора цепей. Активный Load-Pull с открытым контуром инъекции может

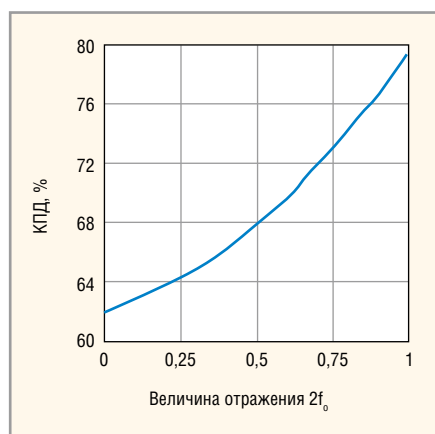


Рис. 7. КПД в зависимости от амплитуды отражения на $2f_0$ при постоянной фазе

быть быстрее или медленнее пассивного тюнера, в зависимости от желаемой точности согласования и результирующего количества итераций, требуемого для сходимости импеданса (измерения с точностью в ~30 дБ будут быстрее, чем измерения с точностью ~50 дБ). Поскольку в методике Load-Pull со смешанным сигналом используется подход «Time-Slotting» с широкополосной генерацией и анализом, то возможно практически одновременно представлять ТУ множество импедансов, что влечёт за собой гораздо более быстрое согласование, а на измерения тратится меньше времени.

В таблице приведено время, соответствующее установке тюнера (в случае его наличия), время калибровки системы, время согласования на основной частоте при фиксированной второй гармонике и время согласования импеданса на второй гармонике. Для этого сравнения были использованы коммерческие измерительные системы Load-Pull от Maury Microwave. В состав систем входили гармонические импедансные тюнеры MT982ML01 LXI™, векторный анализатор цепей Keysight Technologies серии PNA-X N5242A, цепь активного согласования реали-

зовывалась на основе второго источника СВЧ-сигнала PNA-X совместно с внешним усилителем мощности, а для управления измерениями использовался программный пакет измерений и моделирования Maury серии MT930 IVCAD. В свою очередь, измерения Load-Pull со смешанными сигналами реализованы системой Maury Microwave MT2000 [14].

Выводы и рекомендации

Перед тем как начать сложный и длительный процесс проектирования, необходимо понять и определить цели и ограничения проектирования. В случае усилителей мощности важно определить, что это будет за усилитель, будет ли это слабо-сигнальный линейный усилитель, или узкополосный высокоэффективный усилитель, или же широкополосный усилитель, а также определить, какие транзисторы будут использоваться в его разработке: несогласованные, предсогласованные или полностью согласованные. После определения основных целей проектирования следует понять, будет ли в данном случае полезно согласование на гармонических частотах. Если в процессе проектирования потребуются гармоническое согласование, то следует оценить, какая из методик, представленных в статье, удовлетворит требованиям по амплитуде отражения. В завершение необходимо определить оборудование для осуществления измерений Load-Pull с учётом времени на процесс тестирования и измерений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pozar D.M. Microwave Engineering. Wiley & Sons Inc. New York. 2005.
2. White J.F. High Frequency Techniques: An Introduction to RF and Microwave Engineering. Wiley & Sons Inc. 2004.
3. Colantonio P., Giannini F., Giofre R. and Piazzon L. High-Efficiency Ultra-Wideband

Power Amplifier in GaN technology. Electron Letters. 2008. Vol. 44. N 2. Pp. 130–131.

4. Andersson C.M., Moon J., Fager C., Kim B. and Rorsman N. Decade Bandwidth High Efficiency GaN HEMT Power Amplifier Designed with Resistive Harmonic Loading. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 2012. June.
5. Maier T., Carrubba V., Quay R., Raay F. and Ambacher O. Active Harmonic Source-/Load-Pull Measurements of AlGaN/GaN HEMTs at X-Band Frequencies. 83rd ARFTG Microwave Measurement Conference. 2014. Pp. 1–4.
6. Barbieri T.A., Noori B. Improvements in High Power LDMOS Amplifier Efficiency Realized Through the Application of Mixed-Signal Active Loadpull. 82nd ARFTG Microwave Measurement Conference. 2013.
7. Thirivikraman T. and Hoffman J. Design of an Ultra-High Efficiency GaN High-Power Amplifier for SAR Remote Sensing. IEEE Aerospace Conference. 2013. Pp. 1–6.
8. Moon J., Lee J., Pengelly R., Baker R. and Kim B. Highly Efficient Saturated Power Amplifier. IEEE Microwave Magazine. 2012. February. Vol. 13. N 1. Pp. 125–131.
9. Stancliff B. and Poulin D.P. Harmonic Load-Pull. MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1979. Pp. 185–187.
10. Larose R., Ghannouchi F. and Bosio R. A New Multi-harmonic Load-Pull Method for Nonlinear Device Characterization and Modeling. IEEE International Microwave Symposium. 1990. Pp. 443–446.
11. Maury Microwave. Application Note 5C-053. A Comparison of Harmonic Tuning Methods for Load Pull Systems.
12. Maury Microwave. Application Note 5C-081. Cascading Tuners for High VSWR and Harmonic Load Pull.
13. Squillante M., Marchetti M., Spirito M. and de Vreede, L.C.N. A Mixed-signal Approach for High-Speed Fully Controlled Multidimensional Load-Pull Parameters Sweep. 73rd ARFTG Microwave Measurement Conference. 2009.
14. www.maurymw.com/MW_RF/.

Сравнение времён измерения (минуты, если не указано обратное)

Конфигурация	Калибровка тюнера	Системная калибровка	Шаг 1	Шаг 2	Шаг 3
			f_0 Load-Pull, фиксированная частота $2f_0$ при 50 Ом (35 нагрузок, 16 мощностей)	$2f_0$ Load-Pull, фиксированная частота f_0 при оптимальных параметрах (20 нагрузок, 16 мощностей)	f_0 Load-Pull, фиксированная частота $2f_0$ при оптимальных параметрах (35 нагрузок, 16 мощностей)
Скалярная гармоника (2 настраиваемых элемента)	22	3	11,1	6,4	11,1
Гармоника «вектор-ресивер» (2 настраиваемых элемента)	22	5	5,3	3,1	5,3
Гибридная гармоника (1 настраиваемый элемент)	11	5	4,2	7,3	7,5
Активная, со смешанным сигналом (0 настраиваемых элементов)	Нет тюнера	5	15 секунд	35 секунд	50 секунд

**Лидер в области разработки
и производства высоковольтных
реле и контакторов**



Реклама



Вакуумные реле



Газонаполненные реле



Герконовые реле



Контакторы