

# Load-pull измерения на базе векторного анализатора цепей

Стив ДУДКЕВИЧ (Steve DUDKIEWICZ)  
sdudkiewicz@maurymw.com

## Введение

Автоматическая система load-pull на основе автоматизированного slide-screw тюнера была впервые представлена компанией Maury Microwave Corp. в 1987 году. По меньшей мере за 20 лет до этого для настройки импеданса транзисторов при определении характеристик и проектировании усилителей использовались ручные механические тюнеры различного вида. Сегодня необходимость правильного согласования транзисторных модулей в процессе проектирования усилителей общеизвестна; при этом важно, чтобы цепи на входе и выходе транзистора были согласованы по импедансу для обеспечения максимальной передачи мощности, достижения максимально возможных значений выходной мощности, коэффициента усиления и КПД. Методика, используемая для определения идеально согласующихся импедансов цепи, носит название load-pull. Автор отмечает ряд недостатков существующих традиционных методов и повышение точности, которое дают методы, основанные на нелинейных векторных анализаторах нового класса.

Цель метода load-pull состоит в обеспечении тестируемого устройства набором контролируемых импедансов источника и нагрузки при измерении множества параметров в каждой точке. Путем изменения импеданса можно определять характери-

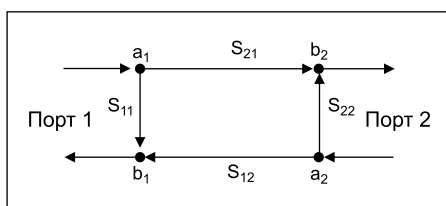


Рис. 1. Модель параметра рассеяния с двумя портами

В статье рассматриваются улучшения при определении характеристик приборов с большим уровнем сигнала, полученные с помощью нового класса систем vector receiver load pull, по сравнению с традиционными скалярными методами, основанными на использовании калиброванных автоматизированных load-pull тюнеров. Последние новшества в области систем измерения нелинейных устройств значительно усовершенствовали load-pull характеризацию, благодаря чему появилась возможность упростить разработку СВЧ-схем, а особенно модулей усилителей мощности на дискретных транзисторах.

ки функционирования устройства и проектировать идеально согласующиеся цепи для оптимальных практических режимов с большими сигналами.

Импедансы, подаваемые на тестируемое устройство, могут быть установлены в различных форматах: импеданс  $Z_{load}$  (состоящий из  $R \pm jX$ ), коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) (как комплексное число по величине и фазе) и коэффициент отражения  $\Gamma_L$  (как комплексное число по величине и фазе).

Поскольку тестируемое устройство рассматривается как устройство с двумя портами (рис. 1), величина отражения ( $\Gamma_L$ ), передаваемого ему, представляет собой не что иное, как  $a_2/b_2$  или соотношение между отраженными и падающими волнами. Обобщенную формулу можно записать как:

$$\Gamma_{x,n}(f_n) = \frac{a_{x,n}(f_n)}{b_{x,n}(f_n)}. \quad (1)$$

По отношению к системе существует четыре импеданса, которые влияют на наши измерения load-pull (рис. 2):

- $Z_{source}$  — импеданс, направленный от входа тестируемого устройства в тюнер источника и далее;

- $Z_{in}$  — входной импеданс тестируемого устройства с большим сигналом;
- $Z_{out}$  — выходной импеданс тестируемого устройства с большим сигналом;
- $Z_{load}$  — импеданс, направленный от выхода тестируемого устройства в тюнер нагрузки и далее.

Именно значения этих импедансов определяют количество мощности, подаваемой на устройство и выделяемой им. Поскольку  $Z_{in}$  и  $Z_{out}$  являются характеристиками самого устройства и их невозможно контролировать напрямую, система load-pull используется для изменения  $Z_{source}$  и  $Z_{load}$ .

## Системы load-pull: традиционная и с векторным анализатором

Традиционная система load-pull (рис. 3) состоит из цепи входного сигнала (включает в себя источник сигнала и усилитель), тюнеров импеданса источника и нагрузки, а также скалярных измерительных приборов, таких как обязательные измерители мощности и дополнительный анализатор спектра. В системах такого типа значения входной и выходной мощности вычисляются на основе установленной на скалярном измерителе мощности путем деэмбеддинга

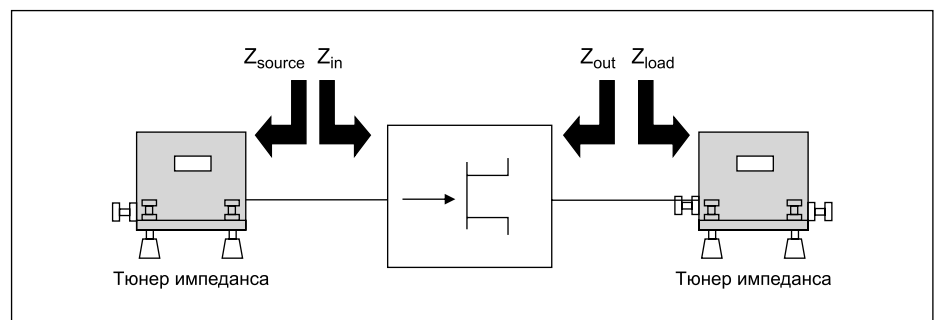


Рис. 2. Импедансы, подаваемые на тестируемое устройство

(de-embedding), то есть исключения влияния на конечный сигнал других устройств в цепи, а также тюнеров.

Измерители мощности широкополосного типа способны измерять весь сигнал, излучаемый транзистором, включая мощность основной частоты и гармоник. Устройство с сильной нелинейностью может выдавать значительные величины мощности второй и третьей гармоники, однако при этом невозможно определить процент мощности, выделяемый по каждой частоте. Поэтому значение, полученное от измерителя мощности, относится исключительно к основной частоте и искусственно повышает мощность, предположительно поступающую от тестируемого устройства. Единственное решение состоит в том, чтобы добавить анализатор спектра, что увеличивает стоимость и сложность системы. Но система все еще будет зависеть от точности деэмбединга устройств в цепи от тестируемого устройства к прибору. Кроме того, такие измерители требуют значительного времени стабилизации для получения точного значения мощности.

Система load-pull с векторным анализатором (рис. 4) состоит из цепи входного сигнала (включает в себя источник сигнала и усилитель), тюнеров импеданса источника и нагрузки, а также векторного анализатора цепей. Для определения параметров измеренной векторный анализатор цепей использует только *a*- и *b*-волны, калиброванные на контрольной плоскости тестируемого устройства. В данном случае *a*- и *b*-волны анализируются на разных частотах, при этом каждая частотная составляющая четко отделена и используется для вычисления мощностей основной частоты и побочных гармоник независимо друг от друга. Анализатор цепей является, по сути, более точным прибором измерения мощности, чем измеритель мощности или анализатор спектра. Путем определения  $a_1, b_1, a_2, b_2$  и мгновенных значений  $Z_{source}, Z_{in}, Z_{out}$  и  $Z_{load}$  измеренных при большом уровне сигнала, мы можем точнее вычислять подводимую мощность, усиление и эффективность.

Выходная мощность, передаваемая устройством, представляется как

$$P_{out} = \frac{(|b_2|^2 - |a_2|^2)}{2} = \frac{|b_2|^2}{2} \times (1 - |\Gamma_{load}|^2). \quad (2)$$

Входная мощность, подводимая на тестируемое устройство при настроенном импедансе источника, составляет:

$$P_{in, del} = \frac{(|a_1|^2 - |b_1|^2)}{2} = \frac{|a_1|^2}{2} \times (1 - |\Gamma_{in}|^2). \quad (3)$$

В традиционной системе load-pull входной импеданс тестируемого устройства не известен, а тюнер источника используется для того, чтобы лучше согласовать вход устройства для максимального увеличения пере-

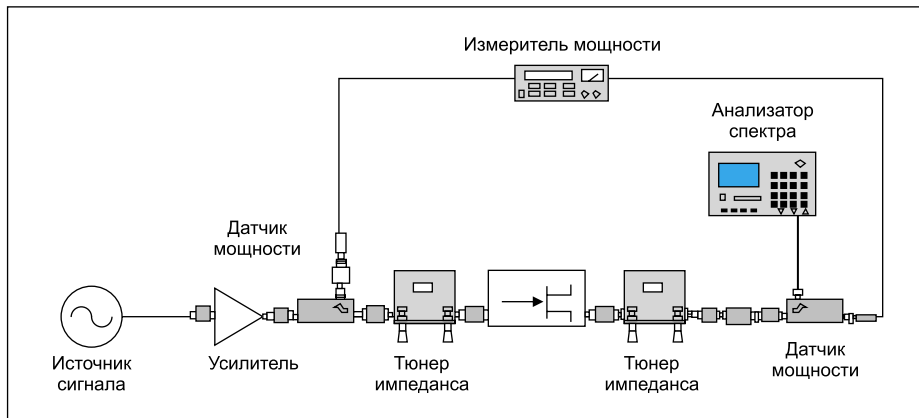


Рис. 3. Блок-схема традиционной системы load-pull

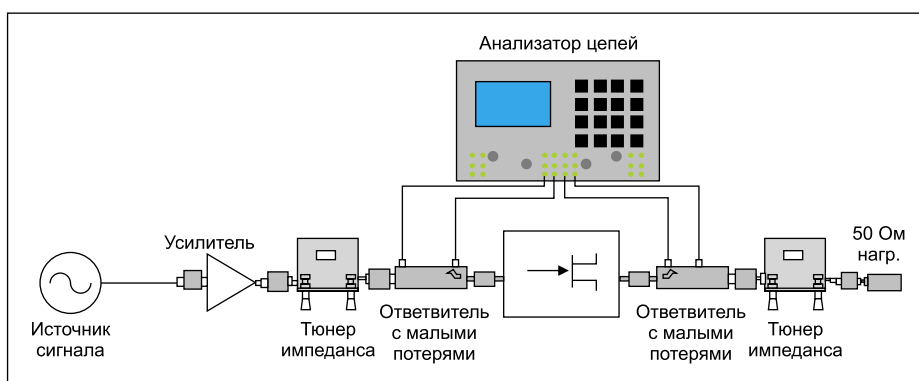


Рис. 4. Блок-схема системы load-pull с векторным анализатором

дачи мощности. Тем не менее, если тюнер источника не будет точно согласовываться с комплексно сопряженной величиной  $S_{11}$ , которая меняется в зависимости от входной мощности, полная передача мощности не получится. Следовательно, подводимая к устройству мощность не будет известна, а доступная мощность будет использоваться для определения таких параметров, как усиление преобразователя и компрессия. Смещение по входной мощности, усилению и эффективности происходит в результате несоответствия между тюнером источника и входным импедансом устройства.

Доступная входная мощность, используемая традиционной системой, представляется как:

$$P_{in, avail} = \frac{P_{in, del}}{1 - \left| \frac{Z_{in} - Z_{source}^*}{Z_{in} + Z_{source}^*} \right|^2}. \quad (4)$$

Здесь хорошо видно, что доступная и подводимая входная мощность источника равны при  $Z_{in} = Z_p$  источника. Аналогичным образом усиление по мощности, измеренное в системе с векторным анализатором, можно определить по формуле:

$$G_p = \frac{P_{out}}{P_{in, del}} = \frac{|b_2|^2 \times (1 - |\Gamma_{load}|^2)}{|a_1|^2 \times (1 - |\Gamma_{in}|^2)}. \quad (5)$$

Однако в традиционной системе усиление преобразователя представляется как:

$$G_t = \frac{P_{out}}{P_{in, avail}} = \frac{|b_2|^2 \times (1 - |\Gamma_{load}|^2)}{|a_1|^2 \times (1 - |\Gamma_{in}|^2)} \times 1 - \left| \frac{Z_{in} - Z_{source}^*}{Z_{in} + Z_{source}^*} \right|^2 \quad (6)$$

КПД суммирования мощности, измеренный в системе с векторным анализатором, можно определить по формуле:

$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in, del}}{P_{DC}}. \quad (7)$$

Однако в традиционной системе КПД представляется как:

$$Eff = \frac{P_{out} - P_{in, avail}}{P_{DC}}. \quad (8)$$

Как и в случае с входной мощностью, усиление по мощности и усиление преобразователя одинаковы, а КПД суммирования мощности и стандартный КПД равны при  $Z_{in} = Z_{source}$

### Входной импеданс и усиление в режиме большого сигнала

Как правило, традиционная система load-pull предусматривает использование ис-

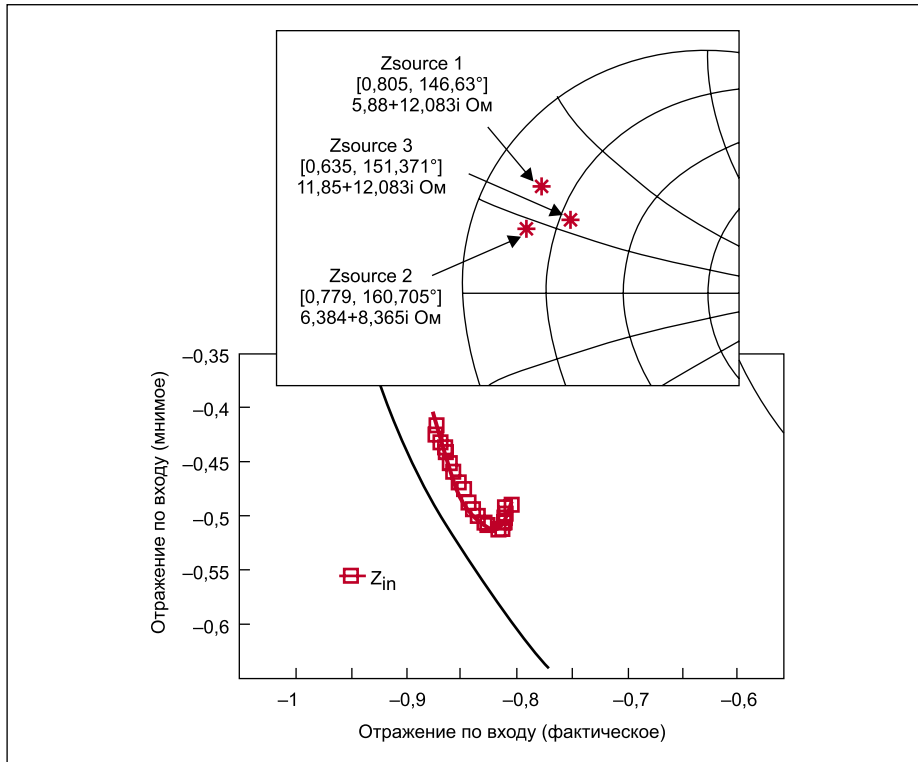


Рис. 5. Входной импеданс тестируемого устройства с большим сигналом и три настроенные величины импеданса источника

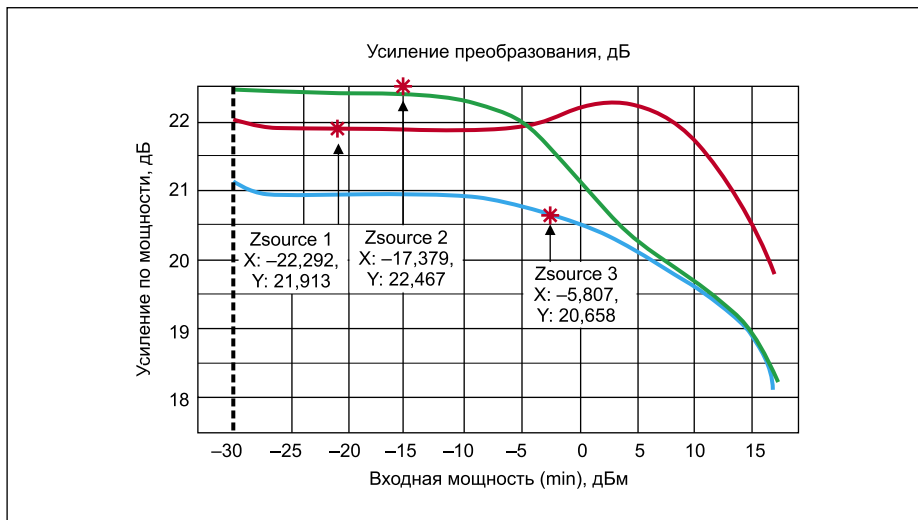


Рис. 6. Развертки мощности при каждом из трех настроенных импедансов (три отдельные развертки  $G_p$ )

импеданса источника настраиваются поочередно, а развертка мощности выполняется для каждой из них (рис. 6).

Так как традиционная система способна только измерять доступную входную мощность, уровень несоответствия между фактическим входным импедансом устройства и настроенным импедансом источника будет влиять на общее усиление преобразователя устройства и отличаться на каждом уровне мощности. Поскольку система с векторным анализатором измеряет  $a$ - и  $b$ -волны в режиме реального времени на контрольной плоскости тестируемого устройства, подводимая входная мощность всегда известна, даже если физически невозможно согласовать импедансы настроенного источника и тестируемого устройства. Развертка усиления по мощности  $G_p$  показывает существенное улучшение по сравнению с разверткой усиления преобразователя  $G_i$  и дает более реалистичное понимание возможностей тестируемого устройства (рис. 7). Усиление преобразователя можно, тем не менее, использовать для проверки функционирования устройства при определенных импедансах источника.

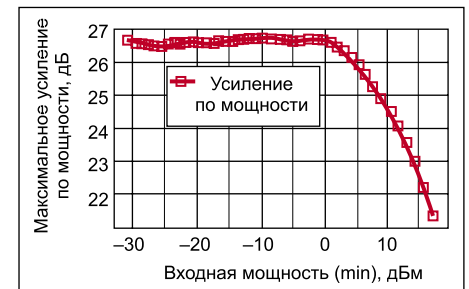


Рис. 7. Развертка мощности при согласовании входного импеданса тестируемого устройства с большим сигналом и импеданса источника (одна развертка  $G_p$ )

### Согласование импедансов источника

В то время как для традиционной системы необходима фактическая подстройка входного импеданса (source-pull), чтобы наглядно представить графики зависимости мощности и усиления при различных импедансах источника, система load-pull с векторным анализатором позволяет вычислить эту зависимость математически. Зная входной импеданс устройства с большим сигналом, можно вычислить зависимость мощности и усиления при различных импедансах источника путем сравнения несоответствия между предполагаемым импедансом источника и входным импедансом устройства с большим сигналом в реальном времени. Это несоответствие изменяется как функция мощности и настроенного импеданса нагрузки, а также фактической входной мощности (рис. 8). Сравнив измеренные и математически вычисленные графики зависимости мощности и усиления при различных им-

точника сигнала с постоянной мощностью на выходе и настройку импеданса источника на максимальное усиление. Импеданс нагрузки, таким образом, настраивается на какой-либо максимальный параметр, например выходную мощность или КПД. Итерация настройки источника и нагрузки продолжается до тех пор, пока не будет определена оптимальная величина импеданса, после чего часто выполняется развертка мощности для измерения нелинейных искажений устройства. Входной импеданс тестируемого устройства с большим сигналом меняется в зависимости от мощности источника; следовательно,

импеданс источника, выбранный в процессе выполнения подстройки входного импеданса (source-pull), был оптимален только при одной удельной мощности, а не по всему диапазону развертки, что говорит о недостаточности оптимальных результатов согласования в большинстве режимов.

Для наглядности на рис. 5 показано графическое представление входного импеданса с GaAs FET большим сигналом как функция мощности на диаграмме Вольперта-Смита. В данном случае входной импеданс значительно изменяется в зависимости от мощности. В том же самом примере три величины

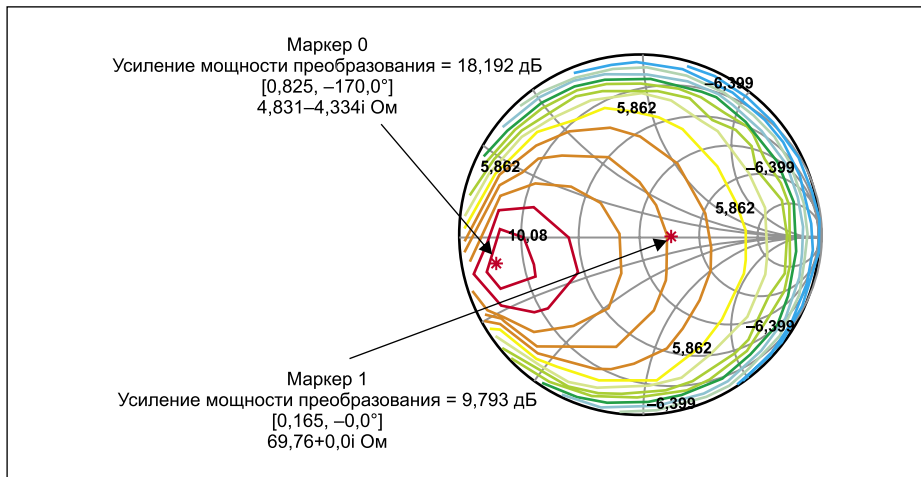


Рис. 8. Математически вычисленные графики зависимости усиления от импеданса

жений предусматривает настройку тюнеров источника и нагрузки по позициям, которые обеспечивают сопряженное согласование на тестируемом устройстве, а также измерение усиления на THRU. Теоретически усиление тоже должно быть равно нулю ( $G_t = 0$ ), так как THRU является пассивным компонентом без потерь, а входные и выходные импедансы, подключенные к тестируемому устройству, сопряженно согласовываются для устранения потерь несоответствия. Тем не менее на диаграмме Вольперта-Смита отражается усиление до  $\pm 0,4$  дБ.

В системе с векторным анализатором можно выполнить комплексно-сопряженную проверку, но это не имеет особого смысла, так как импедансы, подаваемые на тестируемое устройство, и величины мощности, измеренные на нем, вычисляются по  $a$ - и  $b$ -волнам, калиброванным на контрольной плоскости тестируемого устройства. Соответственно, деэмбеддинг тюнеров не требуется. Проверка осуществляется путем настройки тюнера нагрузки на какой-либо импеданс  $Z_{load}$  и сравнения его с измеренным значением  $Z_{in}$  на THRU. Так как цепь THRU не вносит потерь,  $Z_{in}$  THRU должен равняться  $Z_{load}$ . Проверка также осуществляется путем измерения фактического усиления по мощности в любой комбинации импедансов источника и нагрузки на THRU при ожидаемом усилении по мощности  $G_p = 0$ . Усиление до  $\pm 0,2$  дБ возможно при самых высоких значениях отражения тюнера, его можно снизить путем увеличения коэффициента ответвления направленного ответвителя с малыми потерями, расположенного между тюнерами и тестируемым устройством.

**Заключение**

Традиционная автоматическая система load-pull используется на протяжении более 20 лет и все еще является широко распространенным методом характеристики устройств при проектировании усилителей; однако она обладает недостатками и не способна точно измерять устройства с большим сигналом. Без такой характеристики устройства невозможно точно измерить подводи-

педансах источника, получим их полное соответствие друг другу. Возможность виртуально изменять импеданс источника и вычислять зависимость мощности и усиления от импеданса избавляет от необходимости многократных итераций source-pull — load-pull, что значительно сокращает время измерения.

**Характеризация и деэмбеддинг тюнера**

В традиционной системе load-pull наиболее важным фактором точности является характеристика каждого тюнера на каждой задействованной частоте. Характеризация предполагает перемещение внутреннего РЧ-зонда тюнера в множество горизонтальных и вертикальных положений с записью соответствующих  $S$ -параметров. Эти  $S$ -параметры затем используются при вычислении потерь в тюнере для деэмбеддинга мощности и определения импеданса, подключенного к тестируемому устройству. Чтобы улучшить точность настройки, выполняется характеристика сотен или тысяч отдельных состояний тюнера. Сократить количество характеризованных состояний можно с помощью интерполяции, однако некоторые специалисты все же настаивают на продолжительных процедурах.

Повторяемость параметров тюнера очень важна, так как  $S$ -параметры, связанные с каждым состоянием, повторно не измеряются. В системе load-pull с векторным анализатором измерение импедансов, подаваемых на тестируемое устройство, осуществляется в режиме реального времени. В этом случае не обязательно полностью выполнять предварительную характеристику тюнеров источника и нагрузки, достаточно только маленькой выборки точек, если вообще есть такая необходимость. Аналогичным образом воспроизводимость тюнера не представляет важности для точности системы, поскольку импедансы, подаваемые тюнерами на тести-

руемое устройство, измеряются постоянно. Мощность определится по  $a$ - и  $b$ -волнам, калиброванным на контрольной плоскости тестируемого устройства, что избавляет от необходимости деэмбеддинга тюнера.

**Проверка системы**

В традиционных системах load-pull посткалибровочная системная проверка в форме  $\Delta G_t$  или проверка согласования комплексных сопряжений крайне важны.  $\Delta G_t$  сравнивает теоретическое и измеренное усиление в любом наборе импедансов источника и нагрузки. Для таких измерений в качестве тестируемого устройства применяется «перемычка» (THRU) — идеальное устройство или устройство с потерями, для которого известны  $S$ -параметры. Входные и/или выходные импедансы регулируются, а усиление вычисляется по известным предварительно характеризованным  $S$ -параметрам или определяется измерителем мощности с деэмбеддингом по контрольной плоскости тестируемого устройства.

Теоретически расчетные и измеренные коэффициенты усиления должны совпадать с результатом  $\Delta G_t = 0$ . Однако на диаграмме Вольперта-Смита достаточно часто можно видеть отклонение до  $\pm 0,4$  дБ. Проверка согласования комплексных сопря-

Таблица. Сравнение load-pull методов: традиционного и с векторным анализатором цепей

Параметр измерения	Традиционный метод	Метод с векторным анализатором
Коэффициент отражения на входе ( $Z_{in}$ )	×	✓
Доступная входная мощность ( $P_{in,avail}$ )	✓	✓
Доставленная входная мощность ( $P_{in,del}$ )	×	✓
Выходная мощность ( $P_{out}$ )	✓	✓
Усиление по мощности ( $G_p$ )	×	✓
Усиление преобразователя ( $G_t$ )	✓	✓
КПД суммирования мощности (PAE)	×	✓
КПД (Eff)	✓	✓
Амплитудная модуляция / фазовая модуляция (AM/PM)	×	✓
Калиброванная мощность гармоники	Требуется анализатор спектра	✓
Измерение многочастотного сигнала	Требуется анализатор спектра	✓
Измерение модулированного сигнала	Требуется анализатор спектра	×
Скорость развертки мощности (для 25 уровней мощности)	~20 с	~1 с

мую входную мощность, усиление по мощности и КПД суммирования мощности. Поскольку определение подобных величин производится с помощью измерителей мощности с деэMBEDдингом через тюнеры, требуется чрезвычайно точная характеристика и воспроизводимость тюнера. В заключение, для достижения оптимального согласования цепи, необходимы многократные итерации source-pull — load-pull.

В таблице приводится сравнение возможностей и достижимых результатов при тра-

диционном load-pull методе и load-pull методе на базе векторного анализатора цепей. Система load-pull с векторным анализатором преодолевает недостатки традиционного load-pull метода за счет непосредственного измерения  $a$ - и  $b$ -волн устройства в режиме реального времени, таким образом определяя входной импеданс устройства с большим сигналом при каждом значении входной мощности и позволяя вычислить подводимую входную мощность, усиление по мощности и КПД суммирования мощности. Так

как система калибруется на контрольной плоскости тестируемого устройства, устраняются погрешности, возникающие в результате деэMBEDдинга тюнера, и отпадает необходимость его длительной характеристики. Кроме того, общее время измерения значительно сокращается благодаря возможности системы математически вычислять зависимость усиления от импеданса источника и устранять многократные итерации source-pull — load-pull, которые необходимы для традиционной системы. ■