

Измерение КСВН генераторов сигналов

А. Пивак, к. т. н.¹, А. Репин, к. т. н.²

УДК 621.317 | ВАК 05.11.08

При распространении радиочастотных сигналов в волноведущих трактах возникают хорошо известные эффекты переотражений или рассогласований, величина которых зависит от степени отличия сопротивлений распределенных и сосредоточенных элементов в тракте от теоретического волнового сопротивления используемой линии передачи. Например, для большинства стандартизованных коаксиальных трактов волновое сопротивление составляет 50 Ом, а отличие от него принято выражать в производных единицах – коэффициенте отражения или коэффициенте стоячей волны по напряжению (КСВН). Однако, если измерение КСВН пассивных или приемных устройств не вызывает сложностей и осуществляется стандартными приборами типа векторного анализатора цепей (ВАЦ), то измерение КСВН активных передающих устройств является более сложной задачей (хотя их влияние на переотражения в тракте точно такое же, как и для других устройств). О ряде подходов к решению данной задачи рассказывается в статье.

Сложность измерения КСВН активных передающих устройств на частоте их работы связана с тем, что стандартный ВАЦ не может провести корректные измерения коэффициента отражения выхода такого устройства в активном режиме из-за неспособности разделить его выходной сигнал и свой собственный тестовый сигнал на той же частоте.

Для некоторых применений, таких как метрологическое обеспечение измерений мощности СВЧ [1] или создание согласующих цепей для мощных СВЧ-транзисторов в нелинейном режиме [2], задача измерений КСВН выхода решена. Однако она требует специальных подходов, которые могут быть экономически и технически нецелесообразны для более простых задач.

В статье рассматриваются различные методы измерения КСВН генераторов сигналов и дается их оценка на предмет применимости при поверке таких приборов. Такая постановка задачи определяет некоторые граничные условия, в рамках которых будет проводиться рассмотрение:

- требуется определение только модуля коэффициента отражения;
- выходной усилитель генератора работает в линейном режиме;

- метод должен учитывать возможные эффекты от системы автоматической регулировки усиления (АРУ) генератора.

Для удобства проведения экспериментов в качестве генератора сигналов используется один из портов ВАЦ без ограничения общности изложения. Все эксперименты проводились на частоте 1 ГГц и выходной мощности –10 дБм (0,1 мВт).

ИЗМЕРЕНИЕ КСВН ГЕНЕРАТОРА В ВЫКЛЮЧЕННОМ СОСТОЯНИИ

Измерение КСВН генератора в выключенном состоянии проводится классическим методом с помощью одного из измерительных портов ВАЦ. Для этого предварительно выполняется однопортовая калибровка систематической погрешности измерительного порта ВАЦ в опорной плоскости кабеля, подключаемого к выходу генератора, после чего производится измерение КСВН. При этом выключение мощности генератора реализуется с помощью встроенного диодного регулятора, а не с помощью встроенных аттенуаторов. Если согласующие цепи активного элемента выходного каскада генератора выполнены для линейных режимов работы, то значение КСВН генератора, измеренное таким образом, может совпадать с КСВН во включенном состоянии. Однако такое предположение содержит допущения, которые на практике могут не выполняться, особенно учитывая схему АРУ.

С помощью данного метода были проведены измерения КСВН порта ВАЦ. Для измерений применялся

¹ ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», руководитель группы технической поддержки, Alexey.Pivak@rohde-schwarz.com.

² ООО «РОДЕ и ШВАРЦ РУС», инженер технической поддержки, Alexander.Repin@rohde-schwarz.com.



Рис. 1. Функциональная схема измерения КСВН генератора методом скалярного пассивного load-pull (а) и load-pull контуры на диаграмме Смита (б)

анализатор цепей R&S®ZNA26 с калибровочным набором R&S®ZN-Z235.

МЕТОД «ГОРЯЧИХ S-ПАРАМЕТРОВ»

С помощью данного метода можно произвести измерение КСВН генератора в активном режиме. Метод «горячих S-параметров» описан в [3].

Суть метода заключается в измерении КСВН генератора на частоте, отличной от рабочей частоты генератора, но близкой к ней. Частота отстройки выбирается больше полосы пропускания фильтра промежуточной частоты (ПЧ) измерительного приемника ВАЦ. Таким образом, благодаря избирательной способности фильтра ПЧ, обеспечивается возможность разделить выходной сигнал генератора и тестовый сигнал ВАЦ. Точность метода измерения при этом зависит от избирательной способности фильтра ПЧ измерительного приемника ВАЦ, что не накладывает существенных ограничений при цифровой реализации высокоселективных фильтров ПЧ.

Обычно генераторы оснащены встроенной системой АРУ с полосой работы от 1 кГц и более, а ВАЦ имеют фильтры ПЧ от 1 Гц. Поэтому оптимальными являются измерения на отстройке 100 Гц.

Поскольку измерения производятся на частоте, отличной от рабочей частоты генератора, метод не позволяет корректно измерить фазу коэффициента отражения

генератора в активном режиме. Кроме этого, метод «горячих S-параметров» применим только для линейных режимов работы усилителей [4]. Но данные ограничения соответствуют условиям задачи.

Для измерений применялась аппаратура, аналогичная описанной в предыдущем разделе.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО И ПАССИВНОГО LOAD-PULL

Метод load-pull широко используется для тестирования активных устройств в нелинейных режимах в целях поиска их оптимальных режимов работы [2]. Принцип метода заключается в синтезировании различных нагрузок на выходе измеряемого устройства. При этом для пассивного варианта метода синтезирование производится с помощью механических трансформаторов сопротивления (тюнеров импеданса) (рис. 1а), а для активного – с помощью дополнительного сигнала, формируемого вспомогательным генератором, подаваемого на выход измеряемого устройства и когерентного с его выходным сигналом, что позволяет имитировать отражение от нагрузки (рис. 2).

Для определения КСВН генератора по данному методу используются свойства активных элементов передавать максимальную мощность в комплексно сопряженную нагрузку. Таким образом, определение значения импеданса такой нагрузки позволяет вычислить выходной КСВН.

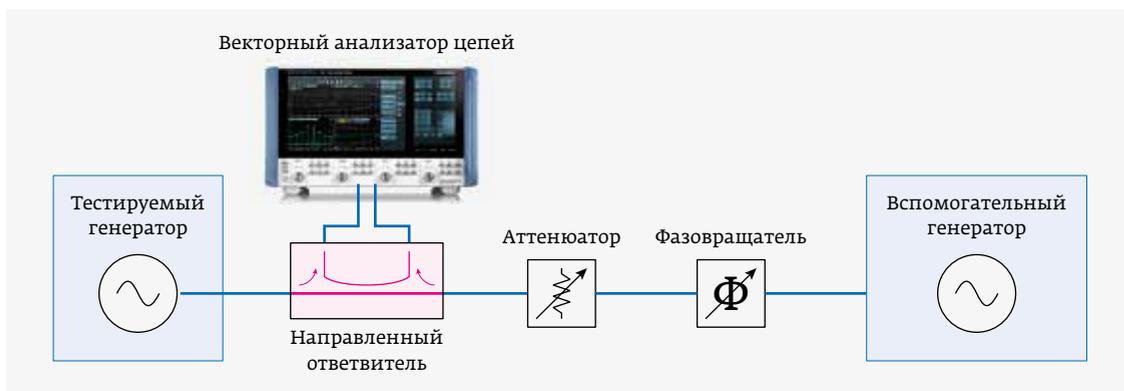


Рис. 2. Функциональная схема измерения КСВН генератора методом активного load-pull

Метод является универсальным, но избыточным для задачи поверки генераторов, так как требует дорогостоящего вспомогательного оборудования в виде тюнеров импеданса для пассивного варианта или когерентных сигналов, что в общем случае для генераторов не обеспечивается. Также метод требует использования специализированного программного обеспечения (ПО) для учета влияния всех элементов схемы измерения.

Результаты измерений методом пассивного load-pull представлены на рис. 1б. Для измерений использовались тюнер Focus Microwave CCMT-1808-TC с ПО FDCS для пассивного load-pull, анализатор цепей R&S®ZNA26 с калибровочным набором R&S®ZN-Z235 для калибровки тюнера и ваттметр R&S®NRP40T для измерения мощности.

МЕТОД СКАЛЯРНОЙ ИЛИ ВЕКТОРНОЙ ИНЖЕКЦИИ ТЕСТОВОГО СИГНАЛА ЧЕРЕЗ НАПРАВЛЕННЫЙ ОТВЕТВИТЕЛЬ

Данный метод заключается в подаче вспомогательного сигнала на выход генератора и измерении отраженного сигнала с помощью направленного ответвителя. В скалярном варианте по принципу действия он не отличается от метода «горячих S-параметров», однако может быть выполнен без использования ВАЦ, а только с помощью амплитудных измерителей, например анализатора спектра. При использовании сдвига частот основного и вспомогательного сигналов на 100 Гц на выходе направленного ответвителя во временной области будет наблюдаться сигнал биений, пропорциональный комбинациям основного и отраженного вспомогательного сигналов для различных фазовых соотношений между ними. При настройке амплитуды вспомогательного сигнала, равной амплитуде основного сигнала, биения будут представлять собой стоячую волну, из которой КСВН генератора рассчитывается по определению.

В векторном варианте по технической реализации метод похож на активный load-pull, но используется не критерий максимальной выходной мощности, а косвенное измерение отраженного сигнала. Для инъекции применяется дополнительный сигнал, когерентный основному. Фазовый сдвиг между сигналами настраивается таким образом, чтобы обеспечить сложение падающей и отраженной волн в фазе, выделение суммарного сигнала направленным ответвителем и вычисление из него амплитуды отраженной волны в условиях равенства мощностей основного и дополнительного сигналов с дальнейшим расчетом КСВН.

Точность измерения данным методом в скалярном режиме ограничивается конечной направленностью ответвителя. В векторном режиме ограничения аналогичны активному load-pull. Также к недостаткам метода можно отнести тот факт, что при измерениях генератор работает

на эквивалентную нагрузку с коэффициентом отражения Γ (условие равенства мощностей основного и вспомогательного сигналов), что отличается от типовых применений генераторов в согласованных трактах.

Для измерений использовался R&S®ZNA26 с опцией фазовой когерентности [5], учет конечной направленности ответвителя не производился, но оценивался как погрешность измерения.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАССОГЛАСОВАННЫХ ВАТТМЕТРОВ

Метод применяется для измерения эффективного коэффициента отражения калибраторов мощности проходящего типа [1], а также для контроля стабильности этого коэффициента [6]. Однако требует для работы набора воздушных линий или только контролирует изменение коэффициента отражения во времени. Поэтому для определения КСВН генераторов предлагается использовать модификацию метода, основанную на наблюдении биений из-за переотражений в частотной области (рис. 3) и оценке КСВН генератора по размаху этих биений с учетом известного коэффициента отражения рассогласованного ваттметра, аналогично методу ripple test для проверки ВАЦ [7].

Метод требует, чтобы генератор имел перестройку частоты с достаточно малым шагом, и позволяет оценить КСВН его выхода только в определенном диапазоне частот, что соответствует условиям поставленной задачи.

Для измерений применялся ваттметр R&S®NRP40T и рассогласованный элемент типа T-Checker R&S®ZV-Z435.

* * *

Результаты измерений, проведенных с помощью описанных методов, представлены в табл. 1. Из анализа табл. 1 следует, что все методы показывают сходимость результатов с учетом погрешностей, присущих каждому из них. Однако с точки зрения корректности и простоты

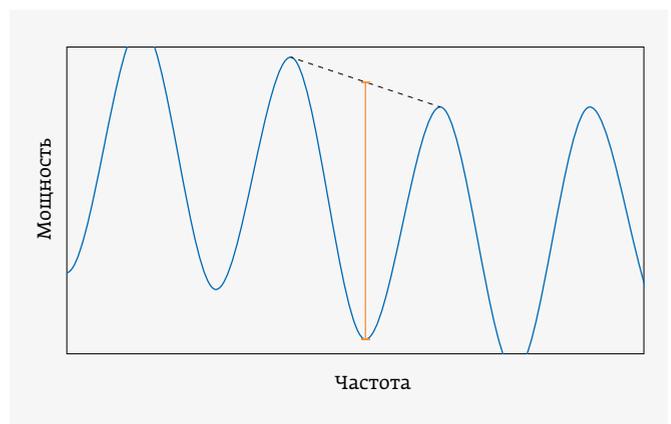


Рис. 3. Биения в частотной области

Таблица 1. Значения КСВН и коэффициента отражения генератора тестового порта ВАЦ R&S®ZNA26

Метод измерений	КСВН	Коэффициент отражения Г	Погрешность измерения ΔГ
Измерение КСВН генератора в выключенном состоянии	1,15	0,068	0,007
Метод «горячих S-параметров»	1,14	0,065	0,008
Метод load-pull	1,16	0,075	0,015
Метод инъекции тестового сигнала через направленный ответвитель	1,16	0,075	0,03
Метод рассогласованного ваттметра	1,13	0,06	0,015

использования оптимальными для определения КСВН генераторов при их поверке являются методы «горячих S-параметров» и рассогласованного ваттметра. При этом метод рассогласованного ваттметра может использоваться и для выходных трактов генераторов, работающих в нелинейном режиме, а стоимость ваттметра на порядок меньше, чем ВАЦ.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Torok A., Janik D., Peinelt W., Stumpe D., Stumper U.** Efficient broadband method for equivalent source reflection coefficient measurements // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. V. 50. No. 2. PP. 361–363.
2. **Vye D.** Fundamentally Changing Nonlinear Microwave Design // Microwave Journal, March 2010. PP. 24–36.
3. **Хибель М.** Основы векторного анализа цепей / Пер. с англ. С. М. Смольского под ред. Д. М. Сазонова и У. Филипп; 2-е изд., испр. и доп. М.: Издательский дом МЭИ. 2018. С. 379–381.
4. **Dunsmore J.** Handbook of microwave component measurements with advanced VNA techniques / John Wiley & Sons, Ltd, United Kingdom, 2012. P. 408.
5. **Пивак А., Репин А.** Использование техники фазовых компенсаций для изменения формы и спектра сигналов // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 8. С. 94–96.
6. Калибраторы мощности СВЧ NRPC67. Методика поверки. NRPC67 МП. р. п. Менделеево: ФГУП «ВНИИФТРИ», 2019.
7. Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analysers // EURAMET Calibration Guide. No. 12. Version 3.0. Germany. March 2018.

КНИГИ ИЗДАТЕЛЬСТВА «ТЕХНОСФЕРА»



Цена 1600 руб.

НАСТОЛЬНАЯ КНИГА ИНЖЕНЕРА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДОВЫХ МЕТОДИК ВЕКТОРНОГО АНАЛИЗА ЦЕПЕЙ

Дансмор Джоэль П.

Издание осуществлено при поддержке компании Keysight Technologies

Пер. с англ. и науч. ред. Е. Ю. Харитонова, Е. В. Андропова, А. С. Бондаренко

В книге рассмотрен широкий круг измерительных задач в СВЧ-диапазоне. В центре внимания – измерения активных и пассивных устройств с использованием новейших методик векторного анализа цепей, методики их калибровки, подходы к анализу полученных результатов. Приведены практические примеры измерений параметров таких устройств, как кабели и соединители, линии передачи, фильтры, направленные ответвители и др.

Автор книги – инженер-разработчик с 30-летним стажем – работал над широчайшим кругом измерительных задач в СВЧ-диапазоне: от компонентов сотового телефона до спутниковых мультиплексоров.

Книга станет прекрасным практическим руководством для инженеров-метрологов и разработчиков ВЧ / СВЧ-устройств, занимающихся моделированием и тестированием как отдельных узлов радиоэлектронной аппаратуры, так и законченных изделий, к примеру систем спутниковой связи, радиолокации и радионавигации. Крайне полезной данная книга будет и в процессе обучения студентов радиотехнических специальностей.

М.: ТЕХНОСФЕРА,
2019. – 736 с.,
ISBN 978-5-94836-505-3

КАК ЗАКАЗАТЬ НАШИ КНИГИ?

✉ 125319, Москва, а/я 91; ☎ +7 495 234-0110; 📠 +7 495 956-3346; knigi@technosphera.ru, sales@technosphera.ru