

# КАЛИБРОВКА ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ В КОМПАНИИ ROHDE & SCHWARZ

## RF POWER CALIBRATION AT ROHDE & SCHWARZ

Герхард Россель (Gerhard Rosel)

При разработке собственного контрольно-измерительного оборудования радиочастотного диапазона компания Rohde & Schwarz уделяет большое внимание тому, чтобы обеспечивалась полная прослеживаемость результатов измерения к национальными эталонами единиц величин. В этой статье обсуждается калибровка средств измерения мощности СВЧ. Поскольку временные затраты являются одной из определяющих характеристик эффективности производства, компания Rohde & Schwarz разработала новую схему калибровки, позволяющую калибровать рабочие эталоны мощности на производстве значительно быстрее чем раньше, при этом, даже с более высокой точностью.

### МОЩНОСТЬ РАДИОЧАСТОТНОГО СИГНАЛА — ВАЖНАЯ ФИЗИЧЕСКАЯ ВЕЛИЧИНА, ИЗМЕРЯЕМАЯ ОБОРУДОВАНИЕМ КОМПАНИИ ROHDE & SCHWARZ

Анализаторы спектра, генераторы сигналов, тестеры радиосвязи, а также анализаторы цепей — все эти приборы имеют одно общее свойство: их можно использовать для измерения абсолютного уровня мощности радиочастотных сигналов или для генерации сигналов с точно заданным уровнем мощности. Поскольку высокая точность установки уровня мощности — подобно высокой точности установки частоты — является определяющей характеристикой для многих радиоизмерительных приборов, калибровка по мощности играет важную роль. При этом процедура калибровки должна удовлетворять трем условиям:

1. Должна обеспечиваться полная прослеживаемость результатов калибровки по мощности (аналогично калиб-



Рис. 1. Схема передачи размера единицы мощности для преобразователей мощности серии R&S@NRV. Микрокалориметр и вторичный эталон образуют первичный национальный эталон



ровке по другим физическим величинам) к эталонам Национального метрологического института.

2. При передаче размера единицы мощности погрешности передачи должны быть сведены к минимуму на всех этапах.

3. Калибровка по мощности должна выполняться быстро, но с требуемой точностью, поскольку именно обеспечение точности является основной целью проведения калибровочных работ.

Все эти условия могут быть выполнены с использованием ваттметров, и именно по этой причине эти приборы предусмотрены для использования во

многих точках производственного процесса. Калибровка по мощности радиоизмерительных приборов почти всегда представляет собой простое сравнение показаний мощности ваттметра и калибруемого прибора. В случае с источниками сигналов преобразователь мощности подключается непосредственно к выходу прибора. Для калибровки приемников, используется делитель мощности либо измерения проводятся с использованием

проходного преобразователя мощности серии R&S@NRP-Z28/-Z98. Это все оборудование, фактически используемое при калибровке по мощности радиочастотной аппаратуры. Однако калибровка самих преобразователей мощности, как правило, требует гораздо больших усилий.

### ТРАДИЦИОННЫЙ ПОДХОД: КЛАССИЧЕСКАЯ СХЕМА ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ В КОМПАНИИ ROHDE & SCHWARZ

Классическая схема калибровки термических преобразователей мощности серии R&S@NRV содержит две ступени (рис. 1): в зависимости от диапазона частот, преобразователь калибруется с использованием одного или более рабочих эталонов — калибратора мощности. К рабочим эталонам размер единицы мощности передается непосредственно от первичных эталонов, например, эталонов Немецкого национального мет-

рологического института (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, PTB) или Американского института стандартов и технологий (NIST). Для обеспечения прослеживаемости результатов измерения, эти рабочие эталоны регулярно контролируются по более точным вторичным эталонам — ваттметрам поглощаемой мощности, которые в свою очередь ежегодно или раз в два года направляются в один из национальных институтов, где они калибруются с особой тщательностью. В сущности, эта процедура все еще функционирует и сегодня. Хотя этот принцип может звучать привлекательно из-за короткой цепи в схеме передачи, в настоящее время он перестал быть актуальным — в основном из-за вторичных эталонов, которые при этом используются.

### Определение уровня мощности генератора



Рис. 2. Определение уровня мощности генератора R&S@SMF100A с помощью преобразователя мощности R&S@NRP-Z55 в качестве эталона. Максимальная погрешность измерения из-за рассогласования составляет 0,18 дБ на 18 ГГц (без гамма-коррекции)

Вторичные эталоны должны отвечать высоким требованиям. Во первых, они должны обеспечивать воспроизводимость и стабильность на протяжении длительного периода времени, а также совместимость с первичными эталонами национальных институтов. Во-вторых, они должны обеспечивать выполнение калибровки собственных рабочих эталонов компании быстро и, что самое важное, без большой потери по точности. Достаточно трудно выполнить оба требования в одно и то же время по двум причинам: совместимость с калибровочным оборудованием, используемым национальными институтами, означает, что в качестве вторичных эталонов могут быть использованы только определенные преобразователи мощности, а именно преобразователи мощности на основе термисторов, которые уже многие годы не используются в

промышленных испытаниях. Калибровка же рабочих эталонов также требует большого числа измерений, необходимых для обеспечения достоверности результатов и охвата широкого диапазона частот. Однако медленные датчики мощности на основе термисторов требуют большого объема времени для достижения этих целей. Другая проблема состоит в том, что из-за привязки к вторичным эталонам, каждый из существующих рабочих эталонов для калибровки преобразователей мощности

ключом к решению этой проблемы является коррекция погрешностей измерений, вызванных рассогласованием. Эти погрешности могут быть рассчитаны с большой точностью, если известны комплексные коэффициенты отражения преобразователя мощности и рабочих эталонов. Затем, эти данные только должны быть учтены при обработке результатов измерений. Эта методика известна как гамма-коррекция — от прописной греческой буквы гамма ( $\Gamma$ ), которая обычно используется при обозначении комплексного коэффициента отражения. Эта методика дает возможность быстро проводить калибровку по мощности при исключительно низких потерях по точности.

создания обычно намного больше погрешности преобразователя, приведенной в его технической документации. С помощью гамма-коррекции этот источник погрешностей практически полностью исключается, и общая погрешность измерения, в результате, будет примерно равна погрешности измерения преобразователя мощности.

Возникает очевидный вопрос: Почему гамма-коррекция не использовалась раньше при калибровке по мощности? Причина в том, что не сама коррекция, а скорее определение комплексного коэффициента отражения источника сигнала вызвало определенные проблемы. Эти измерения предъявляют определенные требования к источнику, и они также должны быть выполнены с большой точностью, поскольку в противном случае будет иметь место противоположный эффект. Компания Rohde & Schwarz занималась решением этой проблемы с помощью привлечения своих новаторских разработок. И теперь преобразователи мощности серии R&S@NRP могут быть откалиброваны с большой точностью и с высокой скоростью с помощью полностью перепроектированных рабочих эталонов для калибровки преобразователей мощности.

## Погрешность измерений с/без гамма-коррекции

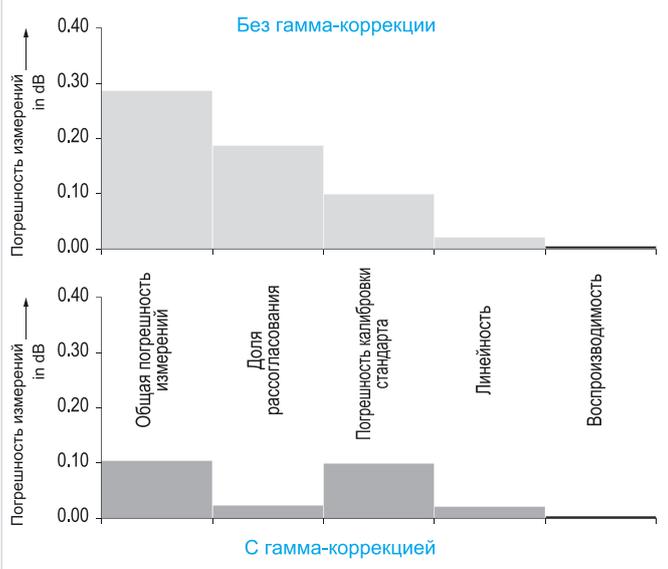


Рис. 3. Погрешность измерений с использованием и без использования гамма-коррекции для примера на рис. 2 (уровень калибровки -10 дБм)

работает также только в диапазоне частот вторичного эталона. Например, для калибровки преобразователя мощности R&S@NRV-Z55 до 40 ГГц он должен подключаться к трем различным рабочим эталонам.

С точки зрения точности, результат также не идеален. Поскольку преобразователи мощности на основе термисторов довольно плохо согласованы по своей природе, то при калибровке рабочих эталонов появляются относительно большие погрешности, вызванные рассогласованием преобразователей. Это означает, что даже сразу после калибровки эти установки существенно менее точны, чем используемые для их калибровки вторичные эталоны.

### БЫСТРЕЕ И ТОЧНЕЕ С ГАММА-КОРРЕКЦИЕЙ

В производстве, однако, и время калибровки, и достижимая точность являются критичными. Для уменьшения потерь точности и времени калибровки единственным решением, таким образом, является применение для передачи размера единицы мощности к рабочим эталонам современных преобразователей мощности вместо классических вторичных эталонов. Однако это фактически удлинит схему передачи размера единицы мощности — что является явным парадоксом.

Выразительный пример применения гамма-коррекции приведен на рис. 2 и 3. Если выходная мощность традиционного радиочастотного или микроволнового генератора измеряется с помощью преобразователя мощности, то выходные рассогласования обеих приборов будут, как правило, оказывать наибольшее влияние на суммарную погрешность, т. к. погрешность рассогла-

### ПОДРОБНОСТИ НОВОЙ МЕТОДИКИ: СХЕМА ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ МОЩНОСТИ ДЛЯ ДАТЧИКОВ МОЩНОСТИ СЕРИИ R&S@NRP

Благодаря существенной коррекции влияния, оказываемого рассогласованием, стало возможным ввести две до-

### Схема передачи размера единицы мощности для преобразователей мощности R&S@NRP

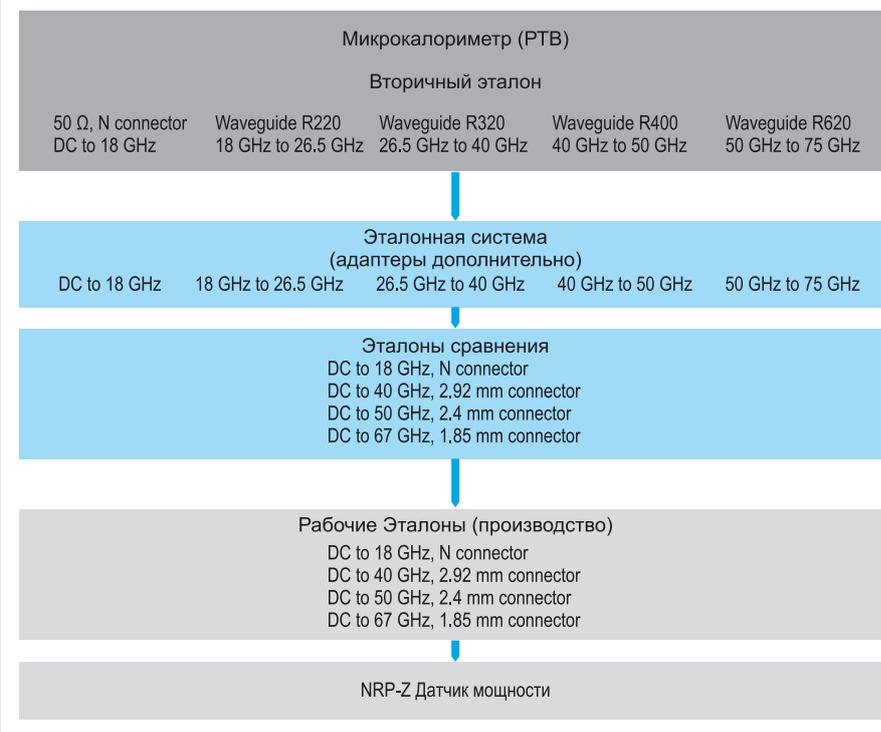


Рис. 4. Схема передачи размера единицы мощности для преобразователей мощности серии R&S@NRP. Этапы передачи, являющиеся новыми по сравнению с классическим подходом, показаны на синем фоне

полнительные ступени в схему передачи размера единицы мощности без сопутствующего увеличения погрешности калибровки преобразователей мощности (рис. 4). Рабочие эталоны на производстве больше не калибруются с применением старых, затратных по времени методов, включающих вторичные эталоны, со связанной с их использованием потерей по точности. Вместо этого используются внутренние эталоны сравнения компании, которые основаны на современных преобразователях мощности. Поскольку современные рабочие эталоны также спроектированы так, чтобы обеспечивать калибровку заданных типов преобразователей мощности во всем их диапазоне частот в одном типе СВЧ тракта, очевидной является возможность также проводить калибровку самого рабочего эталона без дополнительных переподключений. В случае установки до 40 ГГц, например, преимущество состоит в том, что вместо трех вторичных эталонов в диапазонах частот от 10 МГц до 18 ГГц, от 18 ГГц до 26,5 ГГц, и от 26,5 ГГц до 40 ГГц необходимо подключать только один эталон сравнения на весь диапазон частот.

Для проведения калибровки прецизионных эталонов сравнения разработана специально спроектированная эталонная установка, основанная на термических преобразователях мощности серии R&S@NRP. Эта эталонная установка используется лабораторией 16101 Немецкой службы калибровки (DKD) в компании Rohde & Schwarz. Эталонная установка содержит специально сконфигурированные под каждый эталон сравнения калибраторы проходящей мощности. Они представляют собой источники, которые могут быть откалиброваны и обладают аналогичными с эталонами сравнения диапазонами частот и выходными разъемами. Для частот свыше 18 ГГц должны использоваться волноводы. В настоящее время установка содержит пять калибраторов мощности, охватывающих диапазон частот от 100 кГц до 75 ГГц. Погрешности измерений калибраторов мощности лишь не намного выше, чем у вторичных эталонов, поскольку в процессе калибровки используется гамма-коррекция и набор вторичных эталонов с тем же типом СВЧ разъема. Это увеличивает надежность процесса и уменьшает эффекты влияния стохастических процессов.

В зависимости от диапазона частот, собственные эталоны сравнения компании калибруются с использованием одного или более калибраторов мощности. Необходимо использовать коаксиально-волноводные адаптеры разных типов, в зависимости от типа коаксиального разъема, используемого эталонном сравнении. Однако, поскольку влияние адаптеров может быть учтено почти полностью с помощью усвер-



Рис. 5. Часть эталонной установки компании Rohde & Schwarz

шенствованной гамма-коррекции, то и эталоны сравнения также получают исключительно низкую погрешность измерений. В результате передача размера единицы мощности к рабочим эталонам для калибровки преобразователей R&S@NRP оказывается быстрой и широкодиапазонной. Это помогает существенно уменьшить простои в производстве и, кроме того, упрощает повторную калибровку, а за счет исключения потребности в адаптерах улучшает

имеют мало общего с установками, используемыми до настоящего времени во всем мире для точной калибровки по мощности. Используются однопортовые векторные анализаторы цепей, а их выходной уровень устанавливается с помощью встроенных преобразователей мощности (рис. 5 и 6). Соответственно, такие установки позволяют измерять отношение мощностей, а также определять коэффициент отражения подключенного преобразователя мощности и собственный коэффициент отражения выхода установки (оба в комплексных величинах). Это означает, что имеются все данные, необходимые для гамма-коррекции, и тем самым достигается наивысший уровень точности.

Мощность радиочастотного сигнала (измеряемая величина) передается от вторичного эталона к собственному эталону сравнения компании в четыре этапа:

1. Определяются комплексные коэффициенты отражения преобразователей мощности и выхода эталонной установки. Эквивалентный коэффициент отражения выхода установки определяется по методу Юрошка, согласно которому выполняется однопортовая калибровка по калибровочным нагрузкам XX, K3, 50 Ом (OSM) измерительного порта.

2. Калибруется калибратор мощности с помощью набора вторичных эталонов мощности того же типа, а также усредняются калибровочные коэффициенты.

## Эталон мощности для полосы частот волновода

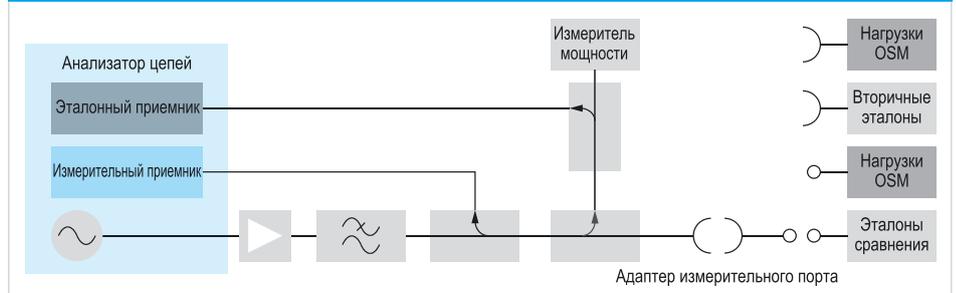


Рис. 6. Блок-схема эталона мощности для волноводной полосы частот

ее надежность. Более того, этот метод оказывается более точным, чем предыдущий подход.

Для подтверждения правильности новой схемы калибровки точность разработанных методов и результатов измерений была проверена и подтверждена независимыми экспертами, которые выполнили сравнительные измерения в рамках процесса аккредитации для Немецкой службы калибровки (DKD).

### КАЛИБРАТОРЫ МОЩНОСТИ — ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ИСТОЧНИКИ СИГНАЛОВ И ОДНОПОРТОВЫЙ ВЕКТОРНЫЙ АНАЛИЗАТОР ЦЕПЕЙ В ОДНОЙ УСТАНОВКЕ

Калибраторы мощности, используемые в настоящее время в лаборатории DKD 16101 компании Rohde & Schwarz,

3. Определяются все четыре S-параметра коаксиально-волноводного адаптера (если он используется при подключении эталона сравнения).

4. Калибруется эталон сравнения. Для охвата всего диапазона частот эталона сравнения, он последовательно подключается к набору калибраторов мощности. ☑

*During development of its RF T&M equipment, Rohde & Schwarz takes great care to ensure that the displayed measurements are perfectly traceable to recognized national standards. This article discusses the calibration of the measurand referred to as RF power.*