

СОВРЕМЕННАЯ СИСТЕМА LOAD PULL РОССИЙСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Для эффективной разработки радиотехнических устройств, начиная от моделирования дискретных компонентов и заканчивая проектированием на системном уровне, требуется априорная информация о поведении параметров усилителей мощности СВЧ.

Такую информацию можно получить, благодаря применению специализированных измерительных систем с переменным импедансом. В статье представлена измерительная система российского производства, основой которой являются автоматизированные тюнеры от компании Maury Microwave.

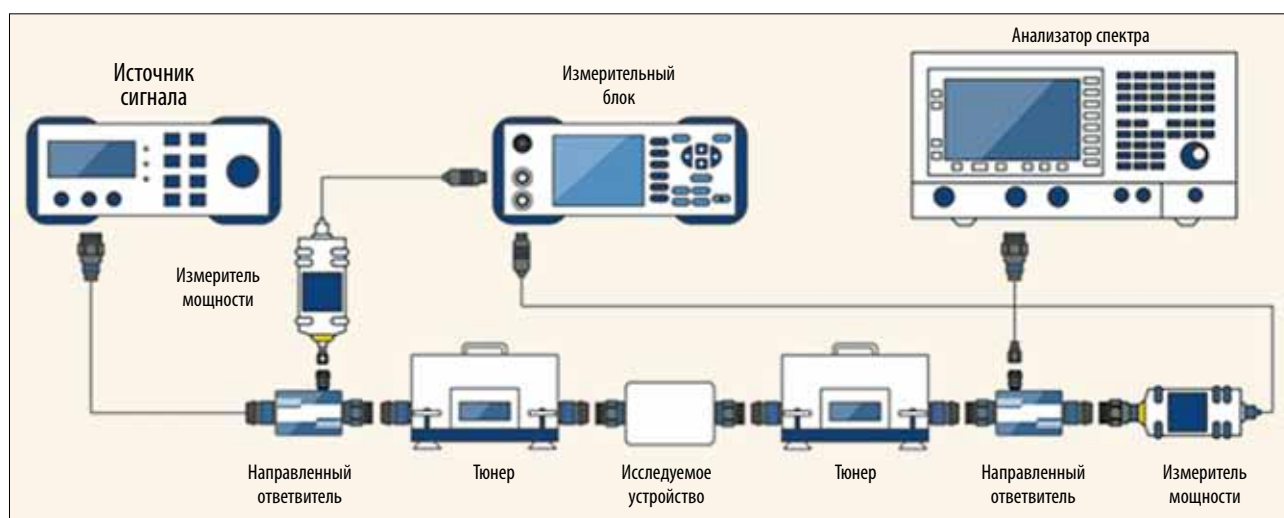
Для разработки и производства усилителей мощности СВЧ, включая отдельные транзисторы, широко применяются системы с переменным импедансом, так называемые Load Pull Measurement Systems (LPMS). Эти системы ориентированы на измерение входной и выходной мощности, коэффициентов передачи и эффективности при исследовании устройств, когда сопротивление источника сигнала и нагрузки отличаются от характеристического импеданса линии передачи. Особенно это становится актуальным с увеличением мощности СВЧ. Системы находят применение не только в целях подтверждения работоспособности используемых компонентов в заданных условиях, но и для определения и построения поведенческих моделей на группы устройств и, соответственно, валидации таких моделей.

Основой LPMS российского производства являются автоматизированные тюнеры от компании Maury Microwave, известные как трансформаторы согласующие или трансформаторы полного сопротивления, и отечественный прецизионный векторный анализатор цепей с возможностью прямого доступа к приемникам. Анализатор цепей в составе системы позволяет

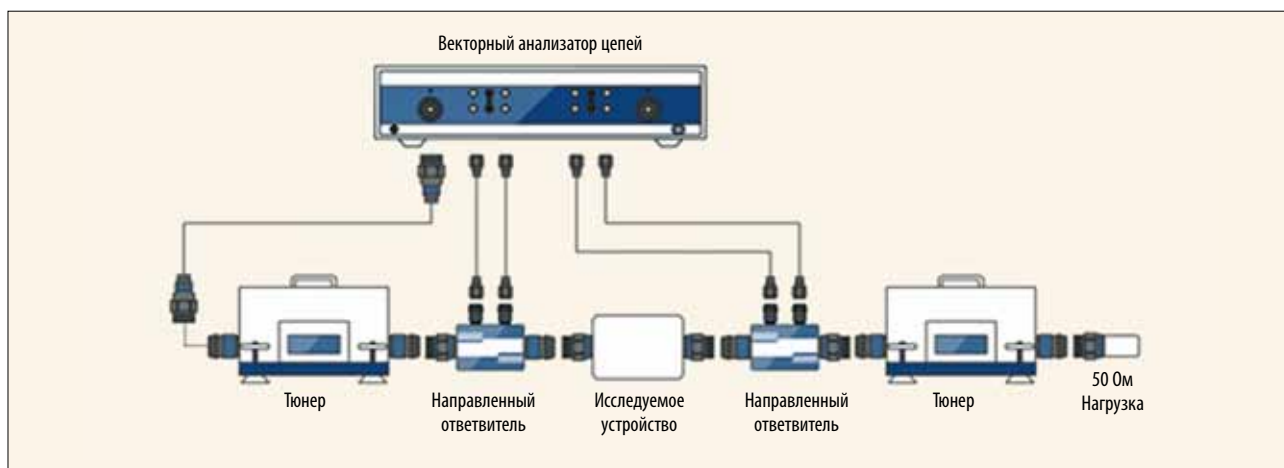
определять S-параметры устройства в плоскости его подключения. Эти данные способствуют более точному определению коэффициента усиления, линейности амплитудной характеристики, точки компрессии и эффективности применения исследуемого усилителя. Учет S-параметров устраняет эффект несогласования в тракте, который только увеличивается с ростом частоты зондирующего сигнала и может значительно исказить результаты. Измеренные параметры рассеяния также применяются для оценки устойчивости усилителя в целях исключения его самовозбуждения.

Для корректной работы системы требуется предварительная калибровка тюнеров. В ходе калибровки определяются параметры в зависимости от частоты и положения внутреннего зонда, обеспечивающего изменение коэффициента отражения. Калибровка выполняется с помощью анализатора цепей из состава системы в автоматическом режиме, без применения дополнительных средств измерений.

Ранее в подобных системах для определения мощности в контрольных точках измерительного тракта применялись ваттметры СВЧ совместно с анализаторами спектра (рис. 1),



▲ Рис. 1. Конфигурация системы на базе измерителей мощности (ваттметров) и анализатора спектра



▲ Рис. 2. Пример конфигурации системы с применением векторного анализатора цепей

которые обеспечивали анализ отдельных гармонических составляющих. В качестве источника выступал вспомогательный генератор или синтезатор частот.

Основные недостатки этой системы связаны со скоростью измерений мощности с помощью широкополосных ваттметров, принципом их работы (только скалярные измерения), и необходимостью использования дополнительного анализатора спектра. К недостаткам можно отнести и неисключенный эффект рассогласования, который стал наиболее критичным при тестировании усилителей в нелинейном режиме. Для понимания этого эффекта рассмотрим один из примеров. Система последовательно изменяет импеданс источника и нагрузки, пока в тракте не установится режим передачи максимальной мощности. После этого осуществляется плавная перестройка уровня входного сигнала для определения амплитудной характеристики устройства. В нелинейном режиме коэффициент отражения усилителя зависит не только от частоты, но и от уровня входной мощности. В этих условиях величина рассогласования, связанная с отклонением импеданса устройства от настроенного состояния тюнера источника, будет постоянно меняться и влиять на измеренный коэффициент усиления или другой параметр непредсказуемым образом.

С развитием и доступностью на рынке векторных анализаторов цепей, систему модернизировали и перестроили. Теперь все основные функции, связанные с генерацией и обработкой сигнала, уже в векторной форме переложили на анализатор (рис. 2). Калибровка системы стала более гибкой и распространилась на анализатор совместно с тюнерами.

Кратко рассмотрим особенности основных частей системы — тюнера импеданса и векторного анализатора цепей.

Наиболее распространенный тип современного тюнера импеданса — автоматизированный микрометрический (рис. 3). Он состоит из прецизионной полосковой линии с малыми потерями и номинальным значением волнового сопротивления 50 Ом. Линия представляет собой две параллельные пластины с центральным проводником между ними и металлическим зондом. Когда зонд извлечен из полосковой линии, сигнал проходит через тюнер практически без искажений. Коэффициент отражения тюнера близок к нулю в линейном масштабе. По мере углубления зонда внутрь полосковой линии изменяется волновое сопротивление из-за изменения напряженности электрического поля, и часть сигнала отражается в сторону исследуемого устройства. В этом случае амплитуда отраженного сигнала растет, т. е. возрастает коэффициент отражения (возвратные потери или коэффициент стоящей волны по напряжению) тюнера. При изменении горизонтального положения зонда регулируется фаза коэффициента отражения. Перемещая зонд, можно установить практически любое комплексное значение коэффициента отражения (или импеданса) в пределах диаграммы Вольперта-Смита.

Векторные анализаторы цепей C2209 и C2220 серии КОБАЛЬТ совместного производства компаний «ПЛАНАР» (г. Челябинск) и НПК ТАИР (г. Томск) предназначены для измерений параметров электрических цепей с высокой точностью (рис. 4).



▲ Рис. 3. Автоматизированные тюнеры импеданса компании Maury Microwave



▲ **Рис. 4.** Векторные анализаторы цепей C2209 и C2220 серии КОБАЛЫТ

Приборы содержат в своем составе генераторы испытательного и гетеродинного сигналов, аттенюаторы регулировки выходной мощности, коммутаторы (переключатели направления распространения испытательного сигнала), измерительные секции на базе резистивных мостов и (или) направленные ответвители, многоканальный векторный приемник и блок управления с сигнальным процессором.

Преимуществом анализаторов является возможность удаленного управления при помощи стороннего программного обеспечения, адаптированного под конкретные приложения. Используя возможности программирования, можно самостоятельно решить, как применять встроенный источник сигнала и прецизионный многоканальный приемник.

Указанные модели имеют переключки на передней панели, обеспечивающие доступ к основным блокам. Это является необходимым условием для их включения в рассматриваемую систему. Подобная модификация анализаторов позволяет проводить специальные измерения. Во-первых, в тракт могут быть введены цепи, одновременно обеспечивающие требуемый режим работы исследуемого устройства и приемника, а во-вторых, приемник может синхронно обрабатывать сигналы, непосредственно поданные на его входы. Стоит отметить, что по своим характеристикам приведенные отечественные приборы не уступают аналогам от известных зарубежных производителей и, в некоторых случаях, даже превосходят их. С учетом предоставляемых возможностей по анализу цепей, эти приборы являются лучшими претендентами на включение в измерительную установку.

Продолжим обсуждение системы с переменным импедансом в целом (рис. 5). Тюнеры и векторный анализатор цепей являются ее ключевыми элементами. Тюнеры используются для регулировки сопротивления источника сигнала и (или) нагрузки, а векторный приемник, входящий в состав анализатора цепей, фиксирует напряжения на входе и выходе исследуемого устройства в комплексной форме. Векторный приемник имеет четыре независимых канала. Для выделения измерительных высокочастотных сигналов применяются внешние направленные ответвители, расположенные в непосредственной близости к устройству. Такое расположение позволяет максимально компенсировать влияние дополнительных устройств и кабелей в тракте на результат измерений.



▲ **Рис. 5.** Измерительная система с переменным импедансом

Одновременный анализ и обработка напряжений на выходе приемника позволяют определять электрические параметры устройства в зависимости от частоты, входной мощности и при изменении импедансов источника сигнала и нагрузки. При соблюдении правильной техники калибровки системы, опорные плоскости отчета всех интересующих параметров будут привязаны к соединительным контактам самого устройства. При этом компенсируется влияние всех подводящих линий измерительного тракта, вплоть до плоскости подключения.

Все процессы, связанные с перемещением зондов тюнеров, синхронными измерениями напряжений с помощью многоканального приемника, векторной калибровкой системы и финальным расчетом характеристик, выполняются под управлением штатного программного обеспечения, разработанного специалистами Maury Microwave. Эта программа имеет простой пользовательский интерфейс и для получения точных и достоверных результатов измерений реализует математический аппарат, проверенный годами международной практики.

Представленная в настоящей статье измерительная система с переменным импедансом является незаменимой при исследовании и подтверждении параметров усилителей мощности СВЧ или отдельных транзисторов в условиях, близких к реальному применению, или в специальных режимах. Анализ, проводимый на базе данной системы, позволит проектировать устройства с учетом априорной информации о чувствительности компонентов к изменению условий эксплуатации. Для решения индивидуальных задач разработчик может самостоятельно определить, какой тип системы полезен ему в первую очередь. Системы бывают пассивные, активные или работающие с учетом нескольких гармоник зондирующего сигнала. Описание таких систем общедоступно и должным образом отражено в публикациях. Основная информация представлена на сайте Maury Microwave — родоначальника и одного из лидирующих производителей LPMS. Подробное описание функциональных возможностей векторных анализаторов цепей, как отдельных приборов, представлено на сайтах «ПЛАНАР» и НПК ТАИР.