

МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ МНОГОЗОНДОВЫХ МИКРОВОЛНОВЫХ МУЛЬТИМЕТРОВ

Многозондовый микроволновый мультиметр (МММ) – многофункциональный прибор диапазона СВЧ, выполняющий как функции ваттметра (измерение падающей, отраженной, проходящей в нагрузку мощности), так и способный одновременно измерять модуль и фазу комплексного коэффициента отражения как автоматический анализатор цепей (ААЦ). Одной из целей авторов статьи является разработка метрологического обеспечения многозондового микроволнового мультиметра. Хотя методики поверки автономных приборов для измерения мощности и комплексного коэффициента отражения известны, метрологическое обеспечение МММ рассмотрено лишь в одной статье [1], а современной нормативной документации не существует, как и серийных приборов. Существующие многозондовые микроволновые мультиметры, имеющие единое функциональное назначение, во многом отличны друг от друга: датчиками, алгоритмами обработки их сигналов, структурными схемами реализации алгоритмов, а кроме того, измеряемыми уровнями сигналов и степенью рассогласования передающего тракта. Поэтому возникают проблемы с единым метрологическим обеспечением этого многообразия приборов. Характеристиками, общими для мультиметров и ваттметров, являются: пределы допускаемой основной погрешности ваттметров проходящей мощности, диапазон измерений мощности и максимально допустимое значение импульсной мощности, время установления показаний и время сохранения калибровки, нестабильность показаний, а характеристиками, общими с ААЦ, являются диапазон частот измерения комплексного коэффициента отражения, разрешающая способность по комплексному коэффициенту отражения [1].

В работах ВНИИФТРИ (Россия) предложены и исследованы микроволновые мультиметры в качестве многофункциональных мер нескольких физических величин для радиоизмерений на СВЧ. При этом погрешность измерения КСВН составляет 0,8...2% в волноводах и 1...2,5% в коаксиальных трактах. Погрешность измерения фазы 0,5...1,5, погрешность измерения мощности составляет несколько процентов. Известно, что ААЦ, применяемые в Национальном бюро стандартов (США), обеспечивают на 3 ГГц систематическую погрешность по модулю коэффициента отражения $4 \cdot 10^{-4}$, случайную погрешность $1,5 \cdot 10^{-4}$, при измерении фазового угла соответственно 0,02(1+Г) /Г и 0,06 Г. Приборы с такими характеристиками сами могут являться эталонами. Одно измерение подобными приборами с учетом необходимых калибровок может занимать несколько часов, а результаты калибровок хранятся недолго, что делает ААЦ не пригодным для измерений в реальном масштабе времени и при больших уровнях мощности. Точность в ААЦ кроме прецизионной калибровки обеспечивается частотонезависимым первичным преобразователем и алгоритмами обработки сигналов.

Сравнение многозондового метода и приборов на его основе с ААЦ на двенадцатиполоснике указывает на многие общие черты, например, количество плеч с первичными преобразователями в двенадцатиполоснике – четыре, отсюда четыре уравнения сигналов, обрабатывая которые и получают искомые величины модуля и фазы коэффициента отражения. Четыре уравнения дает также многозондовая система с четырьмя зондами. Следовательно, потенциально достижимая многозондовыми мультиметрами точность высока. Преимущество МММ перед ААЦ состоит в способности точно определять проходящую, падающую и отраженную мощность в “горячем” режиме в широком диапазоне частот, в отличие от ААЦ, ориентированных только на измерение модуля и фазы коэффициента отражения. Это обеспечивает микроволновому мультиметру широкий спектр практических приложений.

Целью данной статьи является анализ состояния и перспектив развития метрологического обеспечения МММ большого уровня мощности при сильном рассогласовании передающего тракта. Основными направлениями исследований, проводимых авторами, является разработка методики поверки по комплексному коэффициенту отражения и повышение точности измерения мощности многозондовым микроволновым мультиметром.

Метрологическое обеспечение по измерению мощности включает следующие нормативные документы: ГОСТ 13605-75 “Ваттметры СВЧ. Технические требования. Методы испытаний”, ГОСТ 13606-68 “Преобразователи приемные (головки) болометрических и термистрных ваттметров. Типы. Основные параметры. Технические требования”, ГОСТ 8.392-80 “Ваттметры СВЧ малой мощности и их первичные измерительные преобразователи диапазона частот 0.03-78.33 ГГц. Методы и средства

поверки", ГОСТ 8.397-80 "Ваттметры волноводные импульсные малой мощности в диапазоне частот 5,64-37,5 ГГц. Методы и средства поверки", МИ 211-80, МИ 212-80 и МИ 80-86, определяющие поверочные схемы, операции, средства поверки только по мощности малого и среднего уровня [2]. Для того, чтобы поверить ваттметр проходящей мощности, в качестве образцового средства может быть использован ваттметр как проходящей, так и поглощаемой мощности. При использовании для поверки образцового ваттметра поглощаемой мощности, его подключают на выходе ваттметра проходящей мощности вместо нагрузки. Значения стандартных частот и их количество (около 70) по ГОСТ 8.392-80 выбраны из условия обеспечения единства измерения мощности на любой частоте. Одно из направлений уменьшения погрешности эталонов – уменьшение количества стандартных частот, возможное благодаря технике широкополосного согласования, и создание приемных преобразователей с малой неэквивалентностью замещения. Система передачи размера единицы мощности регламентируется поверочной схемой, состоящей из эталонов, образцовых средств измерения первого разряда, образцовых средств измерения второго разряда и рабочих средств. Существующие эталоны мощности воспроизводят значения только малых мощностей, в связи, с чем их непосредственное применение на больших уровнях мощности невозможно. Проблема образцовых средств для больших уровней мощности решается следующим образом.

Высокую точность позволяет обеспечить пондеромоторный метод, на базе которого за последние двадцать пять лет в Харьковском университете радиоэлектроники был разработан и создан ряд высокоточных установок для измерения и воспроизведения единицы мощности в волноводном тракте, потому что пондеромоторные ваттметры легко подвергнуть абсолютной калибровке по длине, массе и времени. Проведенные сличения с государственными эталонами показали, что пондеромоторные ваттметры не уступают государственным эталонам по точности и могут применяться в качестве эталонов и образцовых средств. Неустойчивость к вибрациям и узкополосность не позволяют широко использовать эти ваттметры в качестве рабочих средств измерения.

В качестве образцовых ваттметров предлагается применять отобранные дополнительно аттестованные методом косвенных измерений отдельные экземпляры серийно выпускаемых ваттметров поглощаемой мощности МЗ-45, МЗ-46, МЗ-47, МЗ-48. Для повышения точности примененных приборов решаются задачи изучения систематических погрешностей, изучения случайных погрешностей, погрешностей метода аттестации, долговременная стабильность и разработка методик внесения поправок. Причинами возникновения систематической погрешности являются, во-первых, отличие коэффициента эффективности первичного преобразователя от единицы из-за потерь в стенках волновода и неэквивалентность тепловых потерь, во-вторых, неточная настройка источника калиброванного напряжения, в-третьих, погрешность измерения сигнала первичного преобразователя. Для определения поправки вместо высокостабильного источника мощности СВЧ используют источник мощности низкой частоты, имитирующий выделение мощности СВЧ. Мощность НЧ выделяется в поглощающем резисторе коаксиального преобразователя или во вспомогательном нагревателе для волноводного преобразователя. Искомая поправка к показаниям ваттметра вычисляется как разность между показаниями прибора и показаниями образцового прибора НЧ типа Д-5016. Систематическая погрешность прибора определяется не исключенной систематической погрешностью измерения мощности НЧ ваттметром Д-5016. Коррекция этих погрешностей определением значений погрешностей и внесением поправочных коэффициентов с противоположными знаками позволяет уменьшить общую погрешность с 4% до 2,5%, то есть почти в 2 раза [3].

Вопросы метрологического обеспечения по комплексному коэффициенту отражения существенно отличаются от калибровки ААЦ на двенадцатиполосниках. В двенадцатиполосных ААЦ калибровка выполняется путем измерения известных параметров стандартных нагрузок. При калибровке по известному модулю и фазе коэффициента отражения стандартной нагрузки определяют собственные параметры двенадцатиполосника. В процессе измерений после проведенной калибровки собственные параметры двенадцатиполосника известны и появляется возможность определить параметры неизвестной нагрузки. Простейший вариант калибровки предусматривал использование трех мер с известными коэффициентами отражения: короткого замыкания, холостого хода и согласованной нагрузки. Позднее количество калибровочных элементов и процедур уменьшилось. С целью повышения точности предлагается от использования образцовых нагрузок коэффициента отражения, аттестуемых по волновому сопротивлению, перейти к калибровке непосредственно по волновому сопротивлению. Минимально необходимый набор для калибровки ААЦ представляет собой короткозамыкатель и меру волнового сопротивления в виде отрезка линии передачи, аттестованную по геометрическим размерам [4].

При больших уровнях сигналов и сильно рассогласованных трактах использование стандартных нагрузок с известными параметрами недопустимо. Поэтому предлагается методика калибровки по модулю и фазе коэффициента отражения, заключающаяся в имитации сигналов датчиков, рассчитанных заранее для возможных случаев изменения частоты, модуля и фазы коэффициента отражения. Эти пять сигналов, которые хранятся в специальной таблице, сравнивают с реальными сигналами в тракте. Возможны два случая: в первом случае датчик в поверке не участвует, и результат получается более точный, во втором случае датчик учитывают, благодаря чему достигается более достоверный результат. В качестве датчика используются частотонезависимые волноводные и коаксиальные датчики на основе поглощающей стенки. Такие датчики обладают надежностью и долговременной стабильностью характеристик. Калибровочные коэффициенты рассчитываются для идеального случая. Характеристики реального датчика существенно отличаются от идеального за счет нелинейности их характеристик, неточности и зависимости коэффициента преобразования от частоты, являясь основным источником погрешности, поэтому применение в составе мультиметра средств вычислительной техники позволяет вносить коррекцию в показания прибора [5-8]. Когда в поверке участвует датчик, реализуется метод замещения СВЧ мощности мощностью внешнего источника. Нагрев происходит непосредственно через конденсатор или косвенно, когда конструкцию датчика дополняют подогревателем, который, нагреваясь сам, греет термопару. В перспективе калибровку планируется автоматизировать. Предложенный метод калибровки мультиметра по заранее рассчитанным таблицам позволяет калибровать мультиметр при больших уровнях сигналов и сильно рассогласованных трактах. Необходимо его дальнейшее развитие.

Список литературы: 1. Чуйко В.Г. Нормирование характеристик, методы испытаний и поверки микроволновых мультиметров СВЧ. // Измерительная техника. 1995. №6. С.44-46. 2. Чуйко В.Г. Стандартизация ваттметров СВЧ и методов их поверки. // Измерительная техника. 1980. №2. С.63-66. 3. Колегов В.Г., Олешко В.Г., Чуйко В.Г. Образцовые ваттметры СВЧ большого уровня мощности. // Исследования в области радиотехнических измерений/ Сб. Науч. Тр. ВНИИФТРИ. М.: 1980. С.4-9. 4. Каменецкий М.И., Кондаков Ю.В. Особенности метрологического обеспечения автоматических анализаторов цепей. // Исследования в области радиотехнических измерений/ Сб. Науч. Тр. ВНИИМ, Л.: 1986. С.3-16. 5. Многозондовый микроволновый мультиметр. Волков В.М., Индина О.Б. и др. Патент Украины № 24427А. 6. Волков В.М., Зайченко О.Б. Синтез преобразователя для микроволнового мультиметра. // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. Харьков. 2000. Вып. 113 С.94-100. 7. Универсальный волноводный датчик проходящей мощности СВЧ. Волков В.М. Патент Украины № 29881А. 8. Волков В.М. Температурное поле квазиточечного датчика проходящей мощности СВЧ. // Радиотехника. 2000. Вып.115. С.84-89.

Харьковский государственный технический университет радиотехники

Поступила в редколлегию 27.02.2001