МЕТОДЫ И СРЕДСТВА КОНТРОЛЯ МОЩНЫХ СВЧ ТРАКТОВ

В.М. Волков, О.Б.Зайченко

Харьковский национальный университет радиоэлектроники

There are considered a methods and gauge for powerful VHF transmission line checking, basing on a Hall effect, a ferromagnetic resonance phenomenon, an absorbing wall, a directional coupler, a multiprobe.

СВЧ тракт традиционно принято характеризовать комплексным коэффициентом отражения нагрузки, мощностью передаваемых по нему сигналов и частотой этих сигналов. Эти параметры необходимо измерять и контролировать при производстве и выведении на заданный уровень мощных генераторных приборов, при измерении их КПД, при эксплуатации радиолокационных, радиотелевизионных и связных станций в широком диапазоне частот, а в устройствах СВЧ нагрева и сушки и ускорителях заряженных частиц на фиксированных частотах. Сегодняшнее состояние средств измерений (СИ) для контроля мощных СВЧ трактов в радиоэлектронных системах, отличающихся универсальностью функциональных возможностей, то есть одновременно измеряющих комплексный коэффициент отражения, падающую, отраженную и проходящую мощность, имеющих необходимую точность, быстродействие, тепловую, механическую, радиационную прочность, помехоустойчивость, взаимозаменяемость, массогабаритные и экономические характеристики и др. нельзя считать удовлетворительным. Требует совершенствования и система метрологического обеспечения. Актуальность проблемы особенно обострилась в последние годы в связи с необходимостью более точного контроля энергоносителей, повышением цен на них, а также необходимостью более жесткого контроля режима работы и обеспечения безаварийной работы радиоэлектронных систем и автоматизации защиты генератора и нагрузки.

Необходимым условием создания СИ, обладающего перечисленными свойствами является обоснованный выбор метода измерения для последующей его реализации в приборе. Измерение проходящей мощности основан на отборе незначительной части мощности из основного тракта, позволяющей оценить мощность в основном тракте. Сравнительный анализ известных и находящихся в стадии разработки методов измерения проходящей мощности и комплексного коэффициента отражения (ККО) показал, что только часть методов приемлема для измерения мощности большого уровня при сильно рассогласованных трактах.

В докладе рассмотрены методы основанные на методе направленного ответвления части мощности из основного тракта во вторичный, на нормальном и аномальном эффекте Холла, явлении ферромагнитного резонанса, многозондовом методе, на эффекте поглощающей стенки с точки зрения перспективности их использования для создания серийноспособных встроенных средств измерения и контроля, относящихся к классу СИ общего применения.

Для встроенного контроля проходящей мощности СВЧ в сильно рассогласованных трактах малых и средних уровней сигнала наиболее привлекательным является эффект Холла, заключающийся в возникновении в магнитном поле поперечной разности потенциалов во всякой проводящей пластине, по которой в продольном направлении протекает ток. Разность потенциалов пропорциональна вектору Пойнтинга, чем объясняется нечувствительность метода к фазе ККО. Следовательно, для измерения проходящей мощности достаточно одного датчика, который можно размещать вдоль тракта произвольно. Материалом для

датчика на эффекте Холла служит полупроводник, в котором, наблюдается ряд сопутствующих эффектов, среди которых больше всего проявляется термоЭДС и детекторный эффект. В работах Самарского политехнического университета (В.В. Пахомов) получены обнадеживающие результаты по улучшению чистоты эффекта, однако в последние годы работы, по-видимому, прекращены. В связи с нагревом полупровдника в сильном поле и снижением электрической прочности сверхмощного тракта перспективы в будущем у него малы.

Подобных недостатков практически лишены датчики на аномальном эффекте Холла в ферритовых пленках и металлах. Как известно постоянная Холла обратно пропорциональна значению концентрации и подвижности носителей заряда. В нормальных условиях концентрация свободных носителей в металлах выше, чем в полупроводниках. Из этого следует, что эффект Холла в металлах практически ничтожен, а при резонансе можно повысить чувствительность датчика. Резонанс наблюдается при совпадении собственной частоты системы и частоты внешнего источника сигнала. Оптимальным материалом для возбуждения резонанса являются ферромагнитные пленки. Достоинством датчика является отсутствие в нем детекторного эффекта, однако необходимая для создания условий возникновения эффекта Холла резонансная система создает громоздкость. К недостаткам датчиков на ферритовых пленках относится и то, что они искажают одиночные импульсы и непригоды для их измерения. В лаборатории КПИ (В.С. Вунтесмери, К.Н.Гура) создан ряд экспериментальных образцов датчиков импульсной мощности на аномальном эффекте Холла, которые прошли испытания на больших и сверхбольших уровнях проходящей мощности, однако из-за сложности их технологии производства говорить о серийноспособности пока рано [1].

В настоящее время наибольшее распространение для целей измерения мощности и модуля ККО получил метод направленного ответвления незначительной части мощности во вторичный тракт. Из наиболее распространенных схем измерения применяются одно- или двунаправленный ответвитель и измерители малых мощностей поглощающего типа. Основными параметрами, характеризующими направленный ответвитель, является рабочий диапазон частот, направленность, переходное ослабление и перепад его в диапазоне частот, степень согласования основного и вторичного трактов, допустимая мощность в основном канале. Основной недостаток метода заключается в чувствительности к внеполосным составляющим сигнала генератора.

Хотя энергия гармоник значительно меньше энергии основного сигнала, их влияние на результат измерений проходящей мощности может быть очень значительным. Эксперимент, проведенный на линейном ускорителе электронов в ХФТИ (В.Б.Муфель) показал наличие большого уровня гармоник, которые не только изменили уровень полезного сигнала во вторичном канале двунаправленного ответвителя, но и привели к резонансным явлениям в нем на частотах гармоник из-за неидеальных нагрузок во всем частотном спектре сигнала. Поэтому необходимо разделять измерительные каналы прямой и обратной волны. Практика показала, что без применения фильтров нижних частот (ФНЧ) приборы просто становились неработоспособными. К тому же «пролезание» гармоник на датчики малого уровня мощности выводят их из строя. А ведь генераторные СВЧ приборы как правило имеют самый высокий уровень внеполосных составляющих. Серийные приборы передовых западных фирм (Bird El. Co., Marconi, Heynen Intern., Rohde&Shwarz и др.) во вторичном канале имеют ФНЧ, что безусловно ухудшает частотные свойства приборов, а также точность. Кроме того переходное ослабление зачастую зависит от частоты, что

особенно ощутимо в коаксиальных трактах. Для снижения частотной зависимости переходного ослабления, прибегают к различным методам выравнивания характеристик, например, к введению компенсирующих неоднородностей, улучшению диапазонных свойств самих элементов связи, введению в первичную или вторичную цепь ответвителя добавочной линии передачи, нагруженной на согласованную нагрузку с обеих сторон, применению отверстий связи, форма которых допускает раздельное изменение переходного ослабления и критической длины волны. Чаще всего широкий частотный диапазон конструктивно перекрывают сменными вставками (головками), число которых бывает больше ста. Скорректированное переходное ослабление под стандартный индикаторный блок дало возможность фирме Rohde&Shwarz такой же диапазон перекрыть всего 4 сменными вставками. При этом требуется тщательнейшие измерение и корректировка переходного ослабления при помощи микропроцессорного устройства. Такие приборы дорогие и труднoремонтируемые.

Дальнейший прогресс в развитии метода НО для больших и сверхбольших уровней проходящей мощности встретит большие экономические и технологические трудности, связанные с совершенствованием НО, необходимостью учета разброса характеристик элементов связи, нагрузок, датчиков и соответственно сложностью организации метрологического обеспечения. В настоящее время в большинстве случаев разработчики систем создают собственные приборы, закрывающие узкие диапазоны частот, уровней измеряемых мощностей и на сегодня как будто решают проблему контроля, и однако этот метод в будущем имеет плохие перспективы.

Для встроенного контроля мощности СВЧ и параметров тракта также применяют многозондовый метод. Его достоинством является способность работать в сильно рассогласованном тракте и слабая чувствительность к внеполосным составляющим сигнала генератора; в отличие от других метод позволяет раздельно измерять в "горячем" режиме падающую, отраженную и проходящую в нагрузку мощность, модуль и фазу коэффициента отражения, длину волны. То есть, одновременно контролировать генератор, нагрузку и еще ее "поведение". По значениям модуля и фазы коэффициента отражения открывается перспектива подсогласования нагрузки.

Многозондовые ваттметры проходящей мощности большого уровня встроенного типа впервые были разработаны в ХНУРЭ в конце шестидесятых годов. Пройдя несколько этапов развития и усовершенствования, они трансформировались в многофункциональные высокоэффективные рабочие приборы (ММИ). Значительный вклад в создание образцовых ММИ внесли российские ученые Механников, Чуйко, Мыльников, Перепелкин и др. При этом был решен ряд сложных задач теоретического и практического характера.

ММИ можно классифицировать по следующим основным признакам: типу применяемых датчиков, способу их размещения вдоль волновода и алгоритмическому и метрологическому обеспечению – на рабочие и образцовые; способу размещения датчиков – на эквидистантные и неэквидитстантные, количеству, способу размещения, типу датчиков и алгоритмов обработки сигналов – на узкополосные и широкополосные; типу и конструкции датчиков – на приборы малого, большого и сверхбольшого уровня проходящей мощности.

В основе работы ММИ лежит принцип восстановления кривой стоячей волны с помощью нескольких, чаще квадратичных по полю или линейных по мощности точечных датчиков, расположенных определенным образом вдоль передающего тракта между генератором и нагрузкой. Чаще всего это эквидистантное расположение, реже неэквидистантное чебышевское. Какое из них применить на практике определяется

целью проектирования ММИ. Последнее размещение датчиков предпочтительно при создании образцовых мультиметров.

Сигнал каждого датчика описывается нелинейным уравнением относительно падающей мощности, модуля и фазы коэффициента отражения нагрузки, фазового расстояния между соседними датчиками. Решение системы уравнений сигналов датчиков позволяет определить искомые значения мощности и комплексного коэффициента отражения.

В настоящее время существует более двух десятков алгоритмов обработки сигналов датчиков многозондовых ваттметров, анализаторов СВЧ цепей и мультиметров, в связи с чем остро стоит задача их классификации и определения оптимального алгоритма по критериям точности и быстродействия. Предлагается классифицировать алгоритмы ММИ на прямые и итерационные, а также на алгоритмы с усреднением и без него, особым критерием классификации являются частотные свойства алгоритма. Для решения нелинейной системы уравнений можно использовать численные методы, в том числе итерационные, основанные на уточнении решения на каждом последующем шаге, либо прибегнуть к линеаризации. Последний подход предпочтительнее как обладающий достаточной точностью и отличающийся простотой реализации. При этом систему нелинейных уравнений надо линеаризовать, ввести промежуточные переменные, а затем строго математически решать с получением аналитических выражений для каждого измеряемого параметра. Частотные свойства мультимтра определяются алгоритмами обработки сигналов датчиков. Одночастотные мультиметры имеют три датчика и простые алгоритмы и схему их реализации. Для перекрытия сорокапроцентной рабочей полосы частот волновода требуется пять датчиков. Полоса частот коаксиального тракта составляет несколько октав, поэтому требуется девять датчиков и соответствующие схемы перекоммутации [2].

Одной из актуальных нерешенных к настоящему времени проблем является разработка метрологического обеспечения ММИ, так как нормативной документации пока не существует, несмотря на целый ряд предлагаемых вариантов. Проблема заключается в неоднородности мультиметров, имеющих общее функциональное назначение, но отличающихся во всем остальном: датчиками, алгоритмами обработки их сигналов, структурными схемами, а также уровнями сигналов, диапазонов рабочих частот и видом линии передачи. Метрологическое обеспечение в настоящее время осуществляется по двум измеряемым параметрам. Для поверки по мощности рекомендуется применять усовершенствованные серийные калориметрические ваттметры оконечного типа. Доработка заключается в детальном изучении и коррекции систематических погрешностей каждого серийного экземпляра. Для поверки по комплексному коэффициенту отражения в связи с невозможностью применения на больших уровнях аттестованных образцовых нагрузок с известными параметрами предлагается имитационный калибратор, моделирующий возможные варианты сочетания фазы, модуля коэффициента отражения в полосе рабочих частот.

Подводя итог, можно сделать вывод, что наиболее перспективным является многозондовый метод.

Список литературы:

1.Волков В.М., Гура К.Н., Кукуш В.Д. Измерение проходящей мощности в рассогласованных трактах.-114 с.- Деп. в ГНТБ Украины 05.03.2001. № 34. – Ук. 2001.
2. Патент № 20427А. Украина МКИ G01R21/04. Микроволновый многозондовый мультиметр/ Волков В.М., Индина О.Б., Евдокимов В.В,, Огуй А.В.(Украина) – Заявл. 09.04.96.- 96041406. - Опубл. 15.07.97. Бюл.№1.-7с.