

**Евсеев В.И., Лупанова Е.А, Малышев И.Н.,
Никулин С.М., Петров В.В.**

ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

ОАО «НПО «ЭРКОН»

Измерение параметров мощных СВЧ резисторов и оконечных нагрузок

Обсуждаются методы и техника контроля параметров мощных СВЧ резисторов и оконечных нагрузок в полосковых линиях передачи. Конструкция контактного устройства построена по модульному принципу, позволяющему сконструировать ее под заданный тип резистора. Для определения КСВН нагрузок и S-параметров резисторов относительно их физических границ предложено использовать OSM-калибровку с двумя физически реализованными калибровочными полосковыми мерами волнового сопротивления в режиме короткого замыкания и с согласованной нагрузкой.

Ключевые слова: СВЧ резистор, оконечная нагрузка, коаксиально-полосковый переход, КСВН, S-параметры, короткозамкнутая нагрузка, согласованная нагрузка.

Мощные СВЧ резисторы предназначены для монтажа пайкой в полосковые линии передачи и применяются для работы с теплоотводом в широкополосных узлах высокочастотной аппаратуры в цепях деления и суммирования мощности, а также в качестве оконечных нагрузок [1]. Частотные параметры таких электронных компонентов: коэффициент стоячей волны напряжения - КСВН, волновые параметры рассеяния - S-параметры следует определять непосредственно на их физических границах или на некотором расстоянии от них в полосковых линиях передачи. Существенно, что частотные параметры, измеренные и определенные в какой-либо полосковой линии передачи, не могут быть абсолютно воспроизведены в другой линии с иными размерами поперечного сечения и иным материалом изоляционной подложки. Причем, поскольку мощные СВЧ резисторы устанавливаются на металлическом фланце для отвода избыточного тепла, существенное влияние на частотные параметры оказывает не только контакт с полосковым проводником, но и контакт по металлизированному основанию с полосковой линией передачи.

Частотные параметры резисторов измеряют в коаксиальном канале с помощью анализаторов цепей. Для подключения мощных СВЧ резисторов, установленных в полосковые линии передачи, в коаксиальный канал используют специальную оснастку с коаксиально-полосковыми переходами. Коаксиально-полосковые переходы искажают получаемую измерительную информацию о параметрах резисторов на их физических границах. Это объясняется неоднородностью электромагнитного поля, возникающей в области контакта коаксиальной и полосковой линий передачи.

В настоящей работе обсуждается конструкция универсальной оснастки, методы и программные средства, позволяющие определять параметры мощных СВЧ резисторов в различных диапазонах частот, с различными полосковыми линиями передачи.

Для определения параметров мощных СВЧ резисторов разработана оригинальная конструкция универсального контактного устройства, позволяющая контролировать параметры, как оконечных нагрузок, так и проходных резисторов всех выпускаемых типоразмеров.

Разработанная оснастка построена по модульному принципу, позволяющему скомпоновать ее под заданный тип резистора.

Внешний вид универсальной оснастки, скомпонованной для измерения параметров оконечных нагрузок, рассчитанных на диапазон частот до 18 ГГц, приведен на рисунке 1. Контактное устройство для измерения оконечных нагрузок и проходных резисторов с максимальной мощностью до 1000 Вт в диапазоне частот до 8 ГГц показано на рисунке 2.

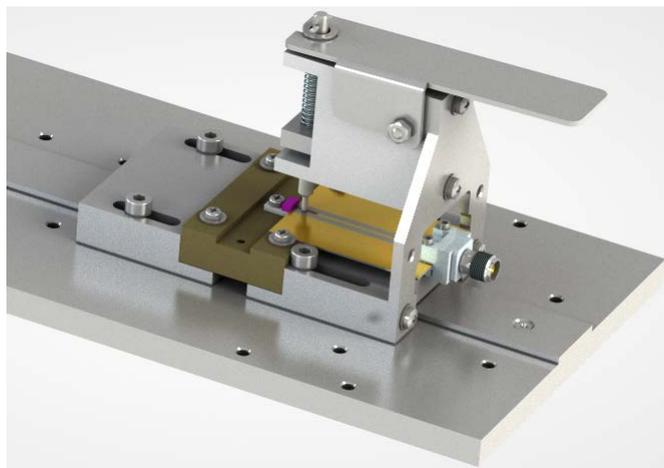


Рис. 1. Контактное устройство для измерений в полосе частот до 18 ГГц

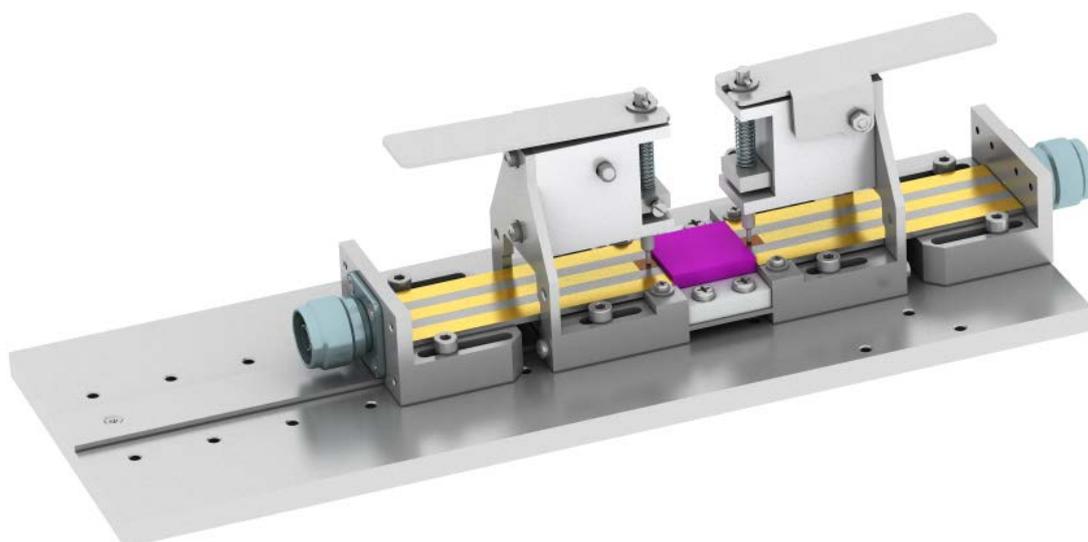


Рис. 2. Контактное устройство для измерений в полосе частот до 8 ГГц

При измерении параметров оконечных резисторов используется один переход, а в случае проходных – два. Сам измеряемый объект крепится винтами к специальному носителю, также устанавливаемому на основание. Под каждую группу изделий, имеющих одинаковые размеры, спроектировано отдельное основание, обеспечивающее требуемое расположение изделия относительно полосковой линии. Примеры носителей приведены на рисунке 3.

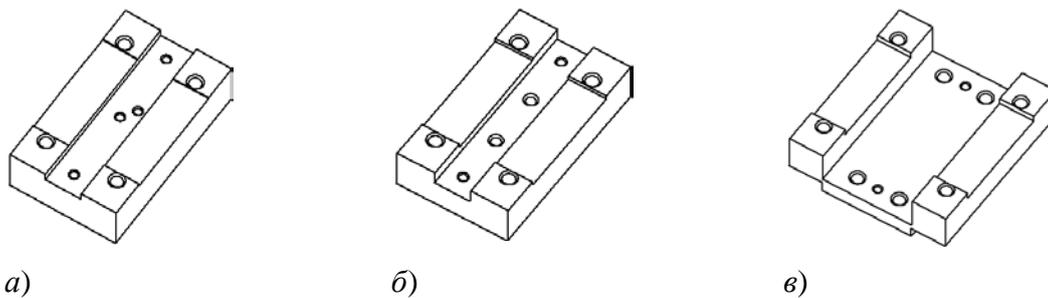


Рис. 3. Примеры конструкций носителей резисторов различной мощности: а – 10 и 20 Вт; б – 100 Вт; в – 800 и 100 Вт;

Подключение изделий к ленточным проводникам полосковых линий осуществляется с помощью прижимного устройства с диэлектрическим прижимным элементом.

Измерение параметров резисторов и окончных нагрузок в универсальной оснастке выполняют с помощью векторных анализаторов цепей. Электрическая схема подключения изделий в оснастку показана на рисунке 4.

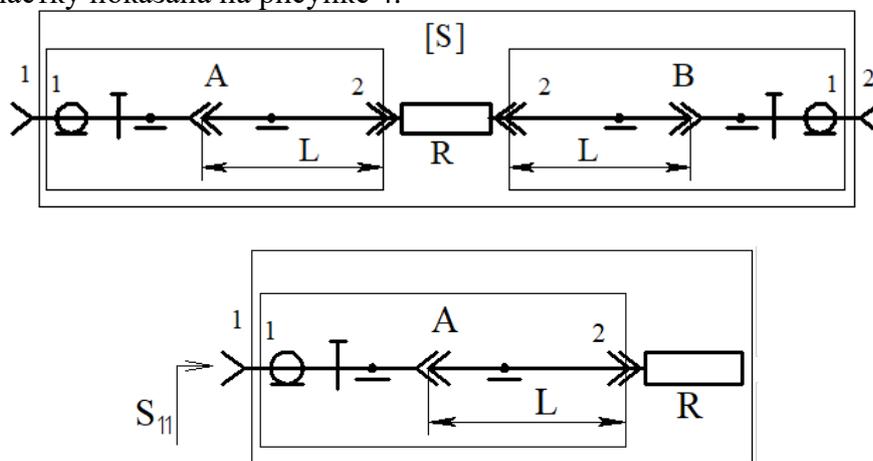


Рис. 4. Схема электрическая для измерения параметров резистора, установленного в разрыве и на конце полосковой линии передачи

Для исключения влияния на результаты измерений цепей А и В, состоящих из коаксиально-полосковых переходов и отрезков полосковых линий длиной L , на конце или между которыми устанавливают испытуемые изделия, предлагается использовать известный OSM-метод определения параметров контактного устройства, адаптированный к специфике решаемой задачи. Метод не имеет жесткого ограничения, как по нижней, так и по верхней границе частотного диапазона и основан на минимальном широкополосном комплекте физических калибровочных мер: - короткого замыкания «S-short» и согласованной нагрузки «M-match» Функцию меры холостого хода «O-open» выполняют краевые емкости полосковых линий контактного устройства. В качестве согласованной нагрузки используется оконечная нагрузка 50 Ом с известным коэффициентом отражения.

Мера короткого замыкания представляет собой металлический параллелепипед с отверстием (или отверстиями) для крепления. Контакт с ленточным проводником коаксиально-полоскового перехода обеспечивается за счет упругого металлического лепестка, припаянного к мере. Для каждого из типоразмеров резисторов предусмотрена отдельная конструкция короткозамкнутой меры, ориентированная на высоту резистора и способ его крепления.



Рис. 5. Конструкция короткозамкнутой нагрузки для: *a* - нагрузок мощностью 10 и 20 Вт; *б* - проходных резисторов

Параметры полосковых калибровочных мер волнового сопротивления выполняется с помощью векторного анализатора цепей N5222A и универсального контактного устройства [2]. Внешний вид универсального контактного устройства приведен на рисунке 6.

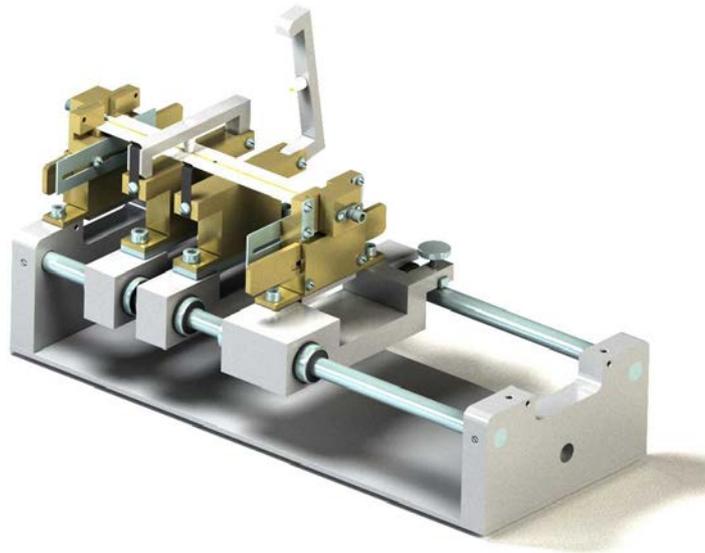


Рис. 6. Внешний вид универсального контактного устройства

Принципиальное отличие данного контактного устройства от оснастки, разработанной в настоящем проекте, состоит в том, что область разъемного контакта реализована между коаксиальным разъемом и подключаемыми полосковыми линиями передачи разных поперечных размеров и разных материалов подложки. Это позволяет использовать оригинальный LRT-метод [3] измерений S-параметров электронных компонентов в полосковых линиях передачи с использованием минимального комплекта калибровочных мер, не требующих предварительного определения их электрических параметров

Мощные СВЧ резисторы и оконечные нагрузки характеризуют полным импедансом $Z(f) = R(f) + iX(f)$. Действительная $R(f)$ и мнимая $X(f)$ части полного импеданса являются медленными функциями частоты f электромагнитного поля и их следует представлять аналитическими функциями вида:

$$R(f) = \sum_{n=0}^N r_n f^n, X(f) = \sum_{n=0}^N x_n f^n \quad (1)$$

Численные значения коэффициентов r_n и x_n находят методом наименьших квадратов. Импеданс оконечной нагрузки $Z_n(f)$ получают по результатам измерения ее коэффициента отражения, а импеданс резистора $Z_R(f)$ – по результатам измерения S-параметров в полосковой линии передачи [7]:

$$Z_H(f) = Z_B(f) \frac{1 + \Gamma_H(f)}{1 - \Gamma_H(f)}, \quad Z_R(f) = Z_B(f) \frac{2S_{11}(f)}{S_{21}(f)} \quad (2)$$

Здесь $Z_B(f)$ - волновое сопротивление полосковой линии контактного устройства. Существенно, что вычисление $Z_R(f)$ по формуле (2) автоматически исключает отрезки полосковых линий по обе стороны от контролируемого изделия.

При построении аналитических моделей конечных нагрузок и СВЧ резисторов, пригодных для использования в системах автоматизированного проектирования, необходимо знать волновое сопротивление полосковой линии, в которой определены параметры изделий. Волновое сопротивление полосковой линии $Z_B(f)$ как медленной функции частоты электромагнитных колебания определяется с помощью специальной процедуры, основанной на методе стандарта Битти [4], по результатам измерения S-параметров универсального контактного устройства с полосковой линией передачи, имеющей участок в виде симметричной полосковой линии передачи малого волнового сопротивления, как показано на рисунке 7.

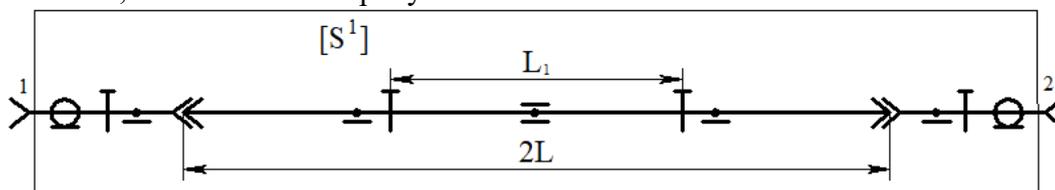


Рис. 7. Схема электрическая соединения переходов отрезком полосковой линии длиной L

Библиографический список

1. Мощные СВЧ – резисторы P1-17. [Электронный ресурс]. – Режим доступа http://www.mniirip.ru/sites/default/files/products_descr/r1, свободный.
2. Евсеев В.И., Лебедева Е.А., Никулин С.М., Петров В.В., Шипунов А.С. Технические средства для измерений параметров полосковых СВЧ устройств. Датчики и системы, №6, 2016, с. 22-27.
3. Лавричев О.В., Никулин С.М. LRT-метод определения параметров объектов в нестандартных направляющих системах // Журнал Датчики и системы. – М.: Изд-во Сенсидат-Плюс, 2017, №8-9 с. 39-44.
4. Михаэль Хибель. Основы векторного анализа цепей. Москва, Издательский дом МЭИ, 2009, - 500 с: ил.