

**Евсеев В.И., Лупанова Е.А, Куликов А.Б.,
Никулин С.М., Петров В.В.**

ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Измерительные усилители и техника определения большесигнальных S-параметров СВЧ транзисторов

Обсуждаются принципы построения измерительных усилителей и техника измерения S-параметров СВЧ транзисторов в режиме большого сигнала методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Волновые параметры рассеяния транзистора в полосковой линии низкого волнового сопротивления определяют с помощью полосковой калибровочной меры короткого замыкания и низкоомной нагрузки. Функцию меры холостого хода выполняют открытые концы 50-омных полосковых линий измерительного усилителя.

Ключевые слова: S-параметры, трансформаторы сопротивлений, полосковая линия, волновое сопротивление, короткое замыкание, низкоомная нагрузка.

В практике разработки выходных каскадов передающих модулей радиолокационных систем и систем связи широко используется метод переменной нагрузки с использованием трансформаторов сопротивлений [1,2]. Зарубежные компании «Маури» (США) и «Фокус» (Канада) предлагают для этих целей коаксиальные тюнеры сопротивлений с электронной перестройкой параметров и контактные устройства для подключения транзисторов в стандартный коаксиальный канал. Стоимость такого оборудования сопоставима со стоимостью векторных анализаторов цепей.

В докладе предлагается альтернативное решение поставленной задачи, ориентированное на измерение S-параметров в коаксиальном канале в режиме большого сигнала и определение параметров СВЧ транзисторов в полосковых линиях передачи в диапазоне частот и мощностей, требующее существенно меньших материальных затрат. Суть предлагаемого решения состоит в оригинальной технике измерения большесигнальных S-параметров измерительных усилителей с изменяемой конфигурацией, которые совмещают в себе функции тюнеров импеданса, контактных устройств и адаптеров питания по постоянному току.

Известно, что входной и выходной импедансы СВЧ транзисторов находятся на периферии диаграммы полных сопротивлений и проводимостей. По этой причине для получения эффекта усиления транзисторы окружают электрическими цепями, трансформирующими импедансы источника входного сигнала и нагрузки, близких или равных 50 Ом, к весьма низким импедансам транзистора, имеющих величины порядка единиц Ом. С этой целью обычно используют отрезки полосковых линий низкого волнового сопротивления и/или их каскадные соединения определенной длины, обеспечивающие приемлемое согласование в ограниченной полосе частот. Однако такое решение [3] не позволяет проводить измерения S-параметров транзисторов в различных диапазонах частот входного сигнала.

Эффект трансформации сопротивления, широко и давно известный в коаксиальном канале, существенно проще получить в экранированной 50-омной полосковой линии передачи с помощью четвертьволнового трансформатора в виде металлической пластины с пленкой диэлектрика, изолирующей ее от полосковых проводников. Фрагмент конструкции усилителя с установленным трансформатором приведен на рисунке 1. В качестве диэлектрика применена пленка из фторопласта 4, толщиной 20 мкм. Малая толщина пленки позволяет получать волновое сопротивление трансформатора не более 10 Ом, что обеспечивает трансформацию сопротивлений источника сигнала и нагрузки до величин порядка единиц Ом.

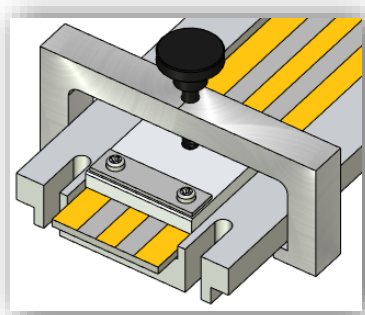


Рис. 1. Экранированная полосковая линия с четвертьволновым трансформатором

Устанавливая трансформатор на небольшом расстоянии от транзистора, удается скомпенсировать его емкостной импеданс индуктивной составляющей трансформирующей цепи. Для проведения измерений в новом частотном окне достаточно лишь установить другую пластину трансформатора и подобрать его положение по отношению к транзистору.

Питание транзистора по постоянному току в широком диапазоне частот осуществляется через катушки индуктивности, установленные в полосковые линии измерительного усилителя в области контакта с измеряемым прибором, где импеданс усилителя имеет весьма низкие, порядка единиц Ом, сопротивления.

Внешний вид измерительного усилителя показан на рисунке 2.

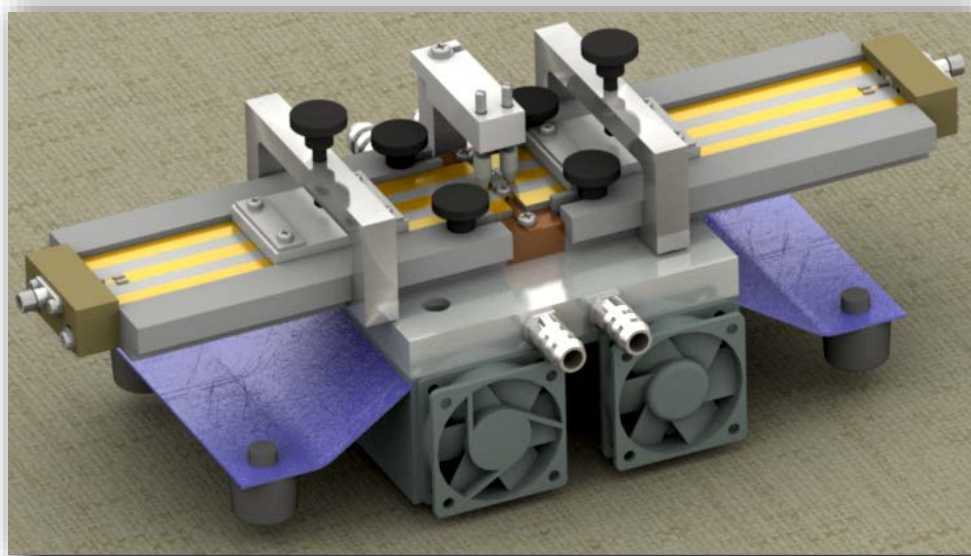


Рис. 2. Внешний вид измерительного усилителя

Параметры рассеяния измерительных усилителей в режиме большого сигнала предлагается определять методом пространственно удаленной переменной нагрузки [4-6]. Структурная схема, поясняющая принцип измерения большесигнальных S-параметров с помощью анализатора цепей с доступом к измерительным приемникам, показана на рисунке 3.

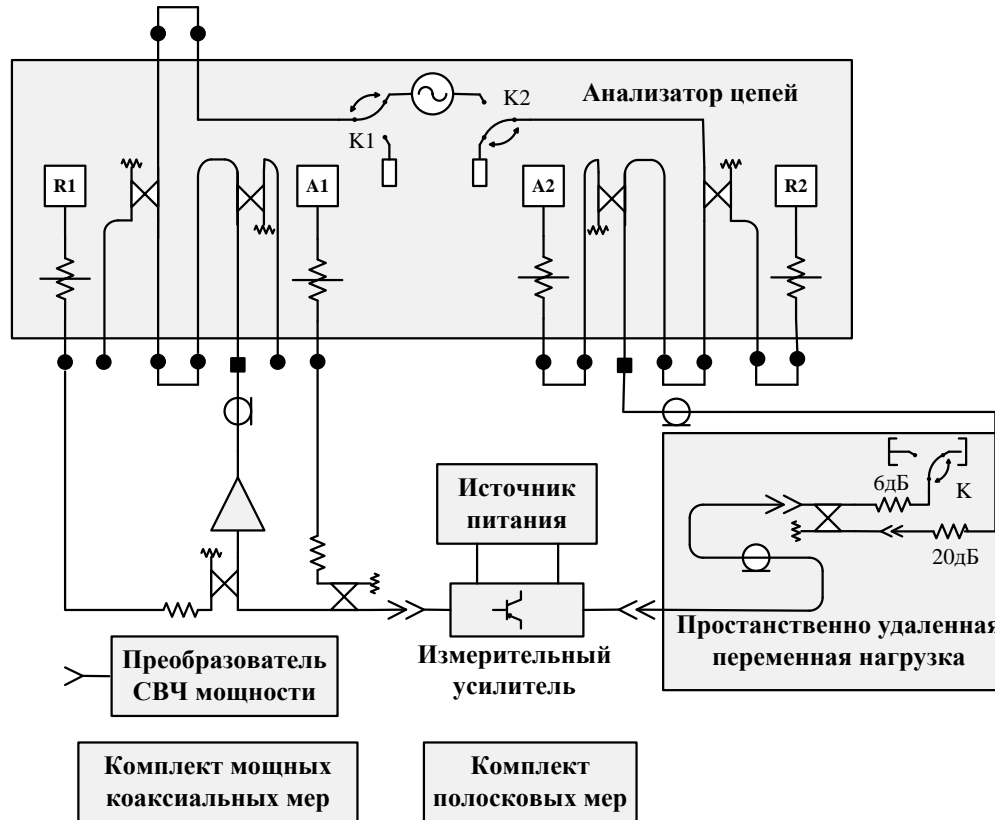


Рис. 3. Система определения S-параметров измерительного усилителя методом пространственно удаленной переменной нагрузки

Суть метода состоит в измерении в частотном окне входного коэффициента отражения $\Gamma_{1,2}$ и прямого коэффициента передачи $K_{1,2}$ измерительного усилителя с пространственно удаленной переменной нагрузкой:

$$\Gamma_{1,2}(f_n) = S_{11}(f_n) + \frac{S_{21}(f_n)S_{12}(f_n)G_{1,2}(f_n)}{1 - S_{22}(f_n)G_{1,2}(f_n)}, \quad (1)$$

$$K_{1,2}(f_n) = \frac{S_{21}(f_n)k_{1,2}(f_n)}{1 - S_{22}(f_n)G_{1,2}(f_n)}.$$

Здесь $G_{1,2}$ - комплексный коэффициент отражения, а $k_{1,2}$ - комплексный коэффициент передачи переменной удаленной нагрузки.

В режиме большого сигнала, когда начинают проявляться нелинейные свойства транзистора, S-параметры измерительного усилителя становятся функциями амплитуды входного сигнала и комплексного коэффициента отражения пространственно удаленной нагрузки, являющейся квазипериодической функцией частоты $G_{1,2} \approx g_{1,2} \exp(-i4\pi fl/v)$.

Здесь l – длина коаксиальной линии, v – фазовая скорость распространяющейся в линии электромагнитной волны $g_{1,2}$ – коэффициент отражения от переменной нагрузки. Переменная нагрузка холостого хода и короткого замыкания, подключенная к измерительному усилителю через длинную линию и бдБ аттенуатор, создает эффект частичного противофазного отражения падающей волны, что позволяет вычислить все четыре элемента S-матрицы на каждой частоте из системы уравнений (1). Полученные комплексные величины $S_{ik}(f)$ являются квазипериодическими функциями частоты f , а их средние линии – искомыми большесигнальными S-параметрами измерительного усилителя в стандартном коаксиальном канале.

Порядок работы предлагаемой измерительной системы состоит в выполнении следующих операций [5]:

- ✓ Однопортовая калибровка анализатора цепей с помощью комплекта коаксиальных мер высокого уровня мощности;
- ✓ Калибровка по уровню падающей или поглощенной мощности на входе измерительного усилителя;
- ✓ Настройка усилителя на максимум усиления и приемлемый КСВН;
- ✓ Измерение коэффициента отражения $G_{1,2}$ и коэффициента передачи $k_{1,2}$ пространственно удаленной переменной нагрузки;
- ✓ Измерение коэффициента отражения $\Gamma_{1,2}$ и коэффициента передачи с измерительным усилителем в режиме пространственно $K_{1,2}$ удаленной переменной нагрузки при заданных уровнях падающей или поглощенной мощности;
- ✓ Определение массива большесигнальных S-параметров измерительного усилителя в диапазоне частот и мощностей по результатам измерений из системы уравнений (1) в сочетании с процедурой сглаживания квазипериодических функций частоты;
- ✓ Определение S-параметров согласующих цепей, по результатам измерений усилителя с полосковыми мерами заданного волнового сопротивления;
- ✓ Определение массива большесигнальных S-параметров транзистора относительно его физических границ.

Все перечисленные операции выполняются в частотном окне, в пределах которого усилитель имеет приемлемые коэффициенты отражения и передачи.

Завершающим этапом определения S-параметров транзистора в полосковой линии с низким волновым сопротивлением является процедура исключения входной и выходной цепей измерительного усилителя из полученных результатов. С этой целью выполняют двух-портовую калибровку анализатора цепей с помощью стандартного набора коаксиальных мер волнового сопротивления или электронного калибратора. Затем подключают к анализатору измерительный усилитель и измеряют его коэффициенты отражения на входе и выходе без транзистора – режим «open», с полосковым короткозамыкателем – режим «short» и с оконечной нагрузкой малого (много меньше 50 Ом) сопротивления – режим «match». Параметры калибровочных мер определяют с помощью специальной оснастки LRT-методом [7,8].

В результате OSM калибровки определяют нестандартные S-параметры входной и выходной согласующей цепи измерительного усилителя с 50-омной линией передачи со стороны коаксиальных разъемов и низкоомной виртуальной полосковой линией со стороны контакта с измеряемым транзистором. Существенно, что волновые сопротивления входной и выходной виртуальных низкоомных полосковых линий передачи, между которыми «установлен» тестируемый транзистор, могут быть как равными, так и различными.

Полосковая мера короткого замыкания представляет собой металлический параллелепипед с отверстием (или отверстиями) для крепления. Контакт с ленточными проводниками полосковых линий входной и выходной согласующей цепи усилителя обеспечивается за счет упругих металлических лепестков, припаянных к мере. Конструкция короткозамкнутой нагрузки показана на рисунке 4, а. Для каждого из типоразмеров транзистора предусмотрена отдельная конструкция короткозамкнутой меры, ориентированная на высоту транзистора и способ его крепления.

В качестве оконечной нагрузки малого сопротивления можно применить серийные СВЧ резисторы типа P1-17 (рисунок 4, б) или специально разработанную конструкцию на чип резисторах (рисунок 4, в). В последнем случае удастся реализовать больший диапазон значений сопротивления.

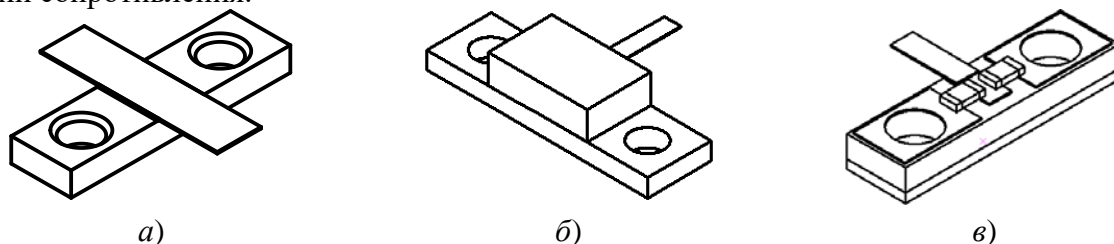


Рис. 4. Конструкция короткозамкнутой нагрузки (а) и оконечных нагрузок малого сопротивления (б, в)

В цепи питания усилителя применена схема защиты, которая обеспечивает снятие напряжения со стока измеряемого транзистора в случаях:

- превышения допустимого тока стока;
- пропадание или снижения отрицательного напряжения на затворе;
- остановки вентиляторов системы охлаждения.

Время срабатывания защиты по току и напряжению затвора порядка 10 мкс. Значение допустимого тока стока может быть установлено в пределах от 300 мА до 3А, а порог срабатывания защиты по напряжению на затворе – от минус 6 до минус 2 В.

Библиографический список

1. Understanding the Relevance of Harmonic Impedance Matching in Amplifier Design. // Steve Dudkiewicz, Marc Schulze Tenberge and Giampiero Esposito, Maury Microwave Corp., Ontario, Calif.; Travis Barbieri, Freescale Semiconductor, Phoenix, Ariz.- April 14, 2015.
2. Takayama, Y. A new load-pull characterization method for microwave power transistors. // In 1976 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium. Cherry Hill (NJ, USA), 1976, p. 218 – 220.
3. Евсеев В.И., Никулин С.М., Петров В.В., Торгованов А.И., Шипунов А.С. Измерительные усилители для определения параметров СВЧ транзисторов и транзисторных пар в диапазоне частот и мощностей. // Материалы XIX координационного научно-технического семинара по технике СВЧ, Нижний Новгород, 2017, с. 155 – 157.
4. Никулин С.М., Торгованов А.И. Измерение S-параметров нелинейных СВЧ цепей методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Датчики и системы, №11, 2014, с. 27-33.
5. Никулин С.М., Торгованов А.И. Проектирование усилителей СВЧ мощности. Эффективность метода удаленной переменной нагрузки. // Электроника. Наука, технология, бизнес, №3, 2015, с. 60-65.
6. Никулин С.М., Терентьев А.А. Новый подход к измерению S-параметров методом переменной пространственно удаленной нагрузки. Датчики и системы, №11, 2016, с. 3-7.
7. 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.
8. 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.