

**Терентьев А.А., Никулин С.М., Долинин В.Я.,
Куликов Д.С.**

ООО «Научно-исследовательский институт векторных измерений»

Нижегородский государственный технический университет

им. Р.Е. Алексеева

Техника измерения S-параметров нелинейных СВЧ цепей в режиме большого сигнала

В статье представлены идея и конструкция оригинального автоматизированного измерительного комплекса, предназначенного для измерения S-параметров в режиме большого сигнала, базирующегося на методе переменной пространственно удалённой нагрузки. Автоматизированный измерительный комплекс включает 2-портовый векторного анализатора цепей "Обзор-804/1" без прямого доступа к приёмникам и оригинальную приставку к нему.

Ключевые слова: измерение S-параметров, метод переменной пространственно удалённой нагрузки, параметры рассеяния, режим большого сигнала.

Задача измерения параметров радиотехнических устройств в режиме большого сигнала, в частности, измерения полной матрицы S-параметров в рабочем режиме, до сих пор остаётся сложной и нетривиальной задачей. При этом на практике отмечаются не только аппаратная и методологическая сложность таких измерений, но и значительная стоимость таких измерений, подчас ставящая под сомнение целесообразность приобретения узконаправленных измерительных комплексов. В статье предложен вариант аппаратно простого, достаточно точного и недорогого автоматизированного измерительного комплекса (АИК) для измерения S-параметров, который может быть использован при проведении анализа усилителей мощности и СВЧ транзисторов в режиме большого сигнала. Основой предлагаемого АИК является простой распространённый векторный анализатор цепей без прямого доступа к приёмникам.

Метод переменной пространственно удалённой расширяет функциональные свойства векторных анализаторов цепей. В отличие от других известных решений, этот метод предполагает использование только одного генератора, с помощью которого обеспечивают возбуждение исследуемого объекта и только с его входа. Это является наиболее оптимальным решением, как с точки зрения поведения исследуемого объекта, который в этом случае находится в своём нормальном рабочем режиме, так и с точки зрения аппаратных затрат. Кроме того, при анализе с использованием одного генератора исключаются такие недостатки других известных решений, как рассогласование фаз двух генераторов, невозможность полной калибровки векторного анализатора цепей из-за одновременного измерения на нескольких частотах, а также невозможность калибровки в условиях возникновения сигналов на комбинационных частотах.

В развитие метода переменной пространственно удалённой нагрузки ранее были проведены теоретические и практические исследования, направленные на ещё большее упрощение реализации данного метода при сохранении всех его основных достоинств [1,

2]. В предложенном способе векторный анализатор цепей используется только в режиме измерения коэффициента прямой передачи S_{21} , а восстановление всех параметров возможно за счёт оригинального способа коммутации измеряемых сигналов на второй порт векторного анализатора цепей. За счёт данного подхода в качестве измерительного оборудования могут быть использованы даже самые доступные линейки векторных анализаторов цепей, а точность метода одновременно с этим увеличивается за счёт отсутствия прямых измерений коэффициентов отражения, которые, как известно, восстанавливаются векторными анализаторами цепей с меньшей точностью, чем коэффициенты передачи.

Калибровка метода переменной пространственно удалённой нагрузки возможна как с использованием стандартного набора калибровочных мер (согласованная и короткозамыкающая нагрузка, а также нагрузка холостого хода), так и с использованием согласованной и частично отражающих мер (к примеру, с импедансами 25 и 100 Ом в 50-Омном тракте). Последнее особенно важно в задачах анализа СВЧ цепей в режиме большого сигнала, поскольку, таким образом, предотвращается возможность выгорания раскачивающего усилителя мощности в тракте формирования сигнала, необходимого для задания рабочего режима исследуемого объекта.

В качестве основы измерительного стенда, показанного на рисунке 1 выбран векторный анализатор цепей «Обзор-804/1» производства ООО «ПЛАНАР» (г. Челябинск, Россия) [3].

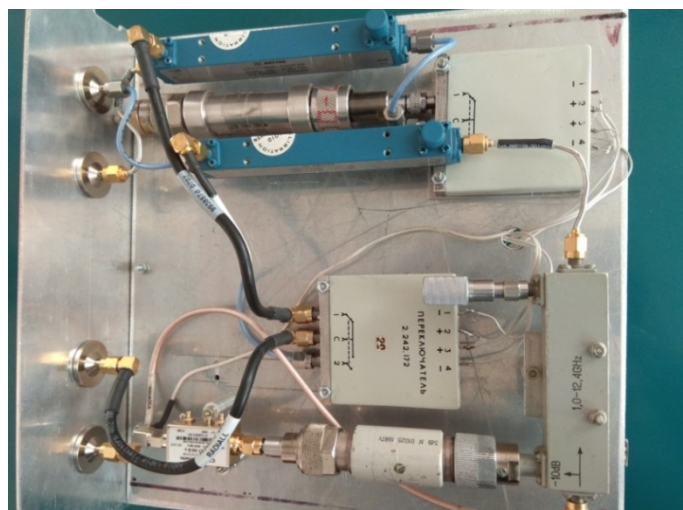
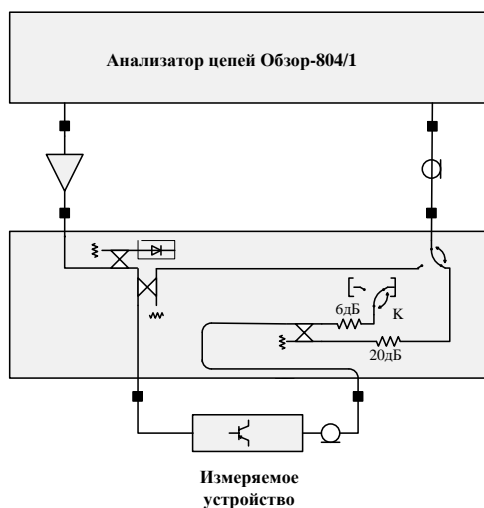


Рис. 1. Разработанный и изготовленный экспериментальный стенд.

Данный прибор относится к младшей линейке производителя и не обладает прямым доступом к измерительным приёмникам, но при этом его высокие метрологические характеристики позволяют использовать его как при разработке и проектировании радиоэлектронных средств, так и для производственного контроля параметров СВЧ цепей.

АИК выполнен в диапазоне частот от 0.5 до 8 ГГц и в диапазоне мощностей до 10 Вт. Таким образом, изготовленный измеритель покрывает большинство задач, возникающих при создании систем беспроводной связи в наиболее распространенных диапазонах частот.

В качестве аппаратной основы измерителя использованы СВЧ узлы в коаксиальном тракте с разъёмами типа SMA. Направленные ответвители - Krytar 1850 (для использования в измерительных трактах) и Narda 4202B-10 (для контроля подводимой мощности). СВЧ-переключатели - 2.242.172 производства АО «ФНПЦ «НИИПИ «Кварц». Датчик мощности - Mini-circuits ZX47-40-S+. Внешние разъёмы измерителя для подключения измеряемых устройств - типа N.

На рисунке 1 представлен внешний вид измерителя S-параметров и его внутренняя структура с соединительными кабелями.

Векторный анализатор цепей используется, как отмечено ранее, только в режиме измерения прямого коэффициента передачи S_{21} , измерение коэффициентов отражения реализовано путём поочерёдной коммутации измеряемых сигналов на второй порт векторного анализатора цепей. Управление переключения каналов измерения и коммутацией нагрузок реализовано в автоматизированном режиме с использованием платы управления типа Arduino Uno. Вид графического пользовательского интерфейса, разработанного ПО представлен на рисунке 2.

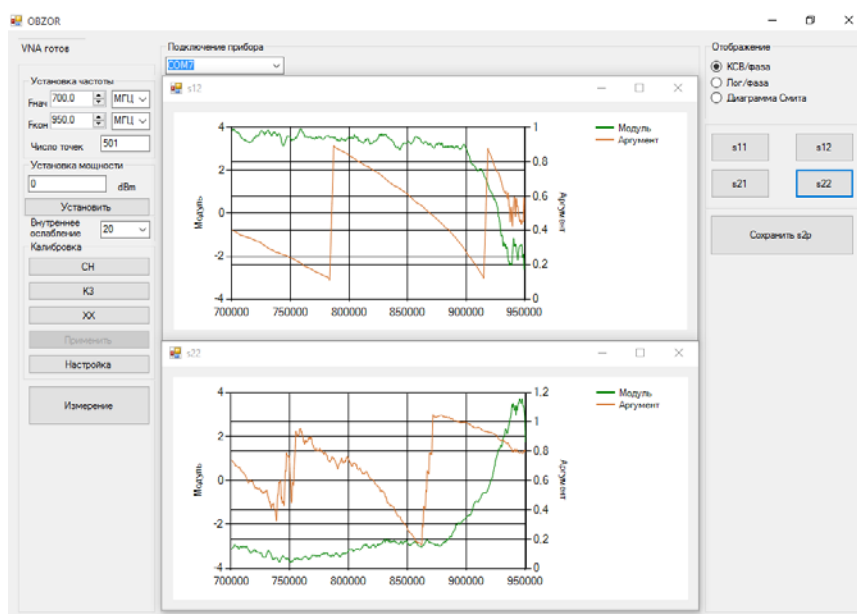


Рис. 2. Программный графический интерфейс пользователя измерительного стенда.

Векторный анализатор цепей своими портами подключается к соответствующим портам разработанной приставки. Коммутация исследуемого объекта к портам измерителя по входу осуществляется напрямую, по выходу - через коаксиальный кабель длиной 1-1.5 метра. Раскачивающий усилитель мощности для обеспечения проведения измерений в режиме большого сигнала помещают между выходом первого порта векторного анализатора цепей и соответствующим входом приставки, поэтому вносимые им погрешности исключаются в процессе общей калибровки измерителя.

Одним из существенных ограничений использования 2-портовых векторных анализаторов цепей является отсутствие у них встроенных средств калибровки по мощности. При этом проведение измерений в режиме большого сигнала предполагается обязательную процедуру калибровки по мощности, поскольку измеряемые параметры устройств являются функциями не только частоты, но и уровня, подаваемого на них сигнала.

Калибровка по мощности проводится в два этапа. На первом этапе, до начала измерения, после проведения калибровки измерителя методом трех эталонов в плоскость калибровки подключается внешний датчик мощности (напрямую либо через аттенуатор с известными параметрами), по которому выставляется режим работы векторного анализатора цепей и раскачивающего усилителя мощности. Одновременно с этим, определяется соотношение показаний уровней мощностей на внешнем датчике мощности и на встроенном датчике (находящемся не в плоскости калибровки). На втором этапе, во время проведения измерений, уровень поглощенной мощности контролируется в диапазоне частот только по показаниям встроенного датчика мощности.

Предполагается два основных режима работы, представленного АИК:

1. Измерения в режиме большого сигнала в коаксиальном тракте

Такие измерения проводятся с использованием классического метода калибровки методом трех эталонов. При этом вход исследуемого устройства присоединяется к первому измерительному порту АИК (напрямую либо через адаптер с известными параметрами), а выход вход исследуемого устройства присоединяется к второму измерительному порту АИК через отрезок коаксиального кабеля (кабельную сборку) известной длиной 1-1.5 метра с известными параметрами для реализации метода переменной пространственно-удаленной нагрузки. Типы исследуемых объектов - усилители СВЧ мощности в коаксиальном тракте.

Исследования показали [2], что точность измерения полной матрицы S-параметров с использованием измерителя описанной конструкции является вполне достаточной для инженерной практики, а полученные результаты хорошо согласуются с результатами, полученными другими известными методами.

2. Измерения в режиме большого сигнала в микрополосковом тракте.

Такие измерения являются не менее востребованными на практике, но при этом, в отличие от измерения в коаксиальном тракте, не имеют хоть сколь-нибудь распространенных общепринятых подходов к проведению таких измерений на практике. Объекты таких измерений в режиме большого сигнала - мощные СВЧ транзисторы и другие СВЧ узлы в микрополосковом тракте.

Для реализации измерений в микрополосковом тракте целесообразно использовать специальное контактное устройство (либо измерительный усилитель), обеспечивающее преобразование импедансов из 50 Ом в область низких значений для измерения S-параметров мощных транзисторов, в сочетании с LRT-калибровкой [4], позволяющей обеспечивать измерения в физических границах транзистора.

Библиографический список

1. Новый подход к измерению S-параметров методом переменной пространственно удалённой нагрузки / С. М. Никулин, А.А. Терентьев // Датчики и системы, 2016, № 11, с. 3-7.
2. Измерение S-параметров СВЧ-транзистора в режиме большого сигнала / А.А. Терентьев // Датчики и системы, 2017, № 11, с. 49-53.
3. <http://www.planarchel.ru/Products/Measurement%20instrument/obzor-804>
4. Техника измерения S-параметров СВЧ-транзисторов в полосковых линиях передачи с произвольным волновым сопротивлением / В.И. Евсеев, О.В. Лавричев, С.М. Никулин, В.В. Петров, А.С. Шипунов // Вестник воздушно-космической обороны, 2017, №4, с. 46-50.