

# Реализация измерения S-параметров в применении к транзисторам и транзисторным усилителям мощности СВЧ диапазона

А.А. Терентьев<sup>1,2</sup>, А.И. Торгованов<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Микроволновые измерения»

<sup>2</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

<sup>3</sup>АО «НПП «Салют»

**Аннотация:** В настоящей статье осуждается метод измерения большесигнальных S-параметров транзисторов и транзисторных усилителей мощности в СВЧ диапазоне. Предлагаемое в статье решение предусматривает восстановление полной матрицы S-параметров на основе результатов измерений, проведённых в условиях частичного согласования измеряемого объекта.

**Ключевые слова:** S-параметры, согласующие цепи, мощные СВЧ транзисторы.

## 1. Введение

Каждый из измеряемых S-параметров транзистора или транзисторного усилителя мощности является нелинейной функцией, зависящей от следующих условий: выбора рабочей точки по постоянному току, входной мощности, температуры. Для данного метода, как и для других измерительных решений в режиме большого сигнала, встаёт вопрос линеаризации измеряемой функции в рабочей точке. В предлагаемом методе линеаризация осуществляется за счет фиксации мощности и формы сигнала на входе измеряемого транзистора, при этом осуществляется перестройка импедансов, создаваемых на входе и выходе измеряемого объекта. Получаемые в таком случае большесигнальные S-параметры являются действующими значениями комплексных коэффициентов передачи и отражения, зависящих от формы сигнала.

## 2. Метод измерения

Классический способ измерения S-параметров предполагает поочерёдное возбуждение исследуемого объекта с входа (измеряются  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ , в то время как выходной порт находится в режиме согласования) и выхода (измеряются  $S_{22}$ ,  $S_{12}$ , в то время как входной порт находится в режиме согласования). Этот подход работает для линейных устройств, параметры которых не зависят от мощности входного сигнала.

Параметры мощных транзисторов и усилителей мощности, работающих в нелинейном режиме, зависят от следующих параметров: положение рабочей точки по постоянному току, входного и выходной импедансы  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$ , мощность и форма СВЧ сигнала на входе транзистора. Таким образом, не представляется возможным корректно измерить  $S_{22}$  исследуемого транзистора, так как в момент измерения отсутствует возбуждающий сигнал на входе и, как следствие, прибор находится не в рабочем режиме. Одним из известных методов решения данной задачи является использование метода «горячего»  $S_{22}$ , заключающегося в измерении выходного коэффициента отражения при малой отстройке по частоте от сигнала, возбуждающего транзистор с входа. При этом предполагается, что погрешностью, вызванной разностью частот возбуждения с входа и выхода измеряемого устройства, можно пренебречь. Недостаток такого подхода заключается в том, что погрешность, вызванная отстройкой, не подда-

ётся оценке, и кроме того, для проведения такого измерения требуется анализатор цепей с двумя источниками сигнала, что увеличивает стоимость измерительной установки.

Для решения задачи измерения параметров транзисторов и транзисторных усилителей мощности в СВЧ диапазоне авторами предлагается использовать метод пространственно удалённой переменной нагрузки [1]. В таком случае, для проведения измерения достаточно использования анализатора цепей с одним источником, и все измерения проводятся в заданном диапазоне частот без использования отстроек.

Математическая модель измерения реализуется в заданном частотном диапазоне и основывается на восстановлении параметров измеряемых устройств в частотном диапазоне. При этом за счёт фиксации мощности и формы сигнала осуществляется задание режима возбуждения измеряемого объекта, а путём задания различных  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$  осуществляется задание режима работы измеряемого нелинейного объекта, свойства которого, как известно, в общем случае зависят от окружающих его импедансов. Таким образом, предлагаемая математическая модель подразумевает, что измеряемый объект находится в некотором рабочем режиме (диапазоне рабочих режимов, если учитывать вариативность  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$ ), что означает, что исследуемый объект не отражает всю мощность от входа, а по крайней мере частично передаёт её на свой выход.

Требования к переменным  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$  при этом таковы, что исследуемый объект должен не только обеспечивать передачу мощности от источника к нагрузке, но и не переходить к режиму автогенерации, для чего диапазон изменений  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$  должен соответствовать области устойчивости исследуемого устройства.

Восстановление значений S-параметров проводится на основе результатов измерения коэффициентов отражения и передачи исследуемого объекта, нагруженного на одну из двух заданных известных нагрузок. При этом за счёт реализации внешних цепей формирования и коммутации сигналов в измерительной установке [2] удаётся использовать векторный анализатор цепей (ВАЦ) только в режиме измерения  $S_{21}$ , что обеспечивает возможность использования даже самых простых двухпортовых ВАЦ. По результатам калибровки и измерений формируется система из четырёх уравнений для поиска четырёх неизвестных. Восстановленные таким образом S-параметры из-за влияния подключаемых нагрузок на результат измерения являются квазипериодическими функциями частоты. Это влияние устраняется за счёт подключения нагрузок через электрически длинную линию, и перехода от измерения на точках к свипированию частоты с цифровой фильтрацией квазипериодических функций частоты. Следует особо отметить, что обратный коэффициент передачи и коэффициент отражения от выхода исследуемого объекта восстанавливаются математически, что не требует непосредственного возбуждения испытательным сигналом выходного порта исследуемого объекта. Данный аспект крайне важен для активных устройств (транзисторов, усилителей), поскольку, как было отмечено выше, режим работы исследуемых устройств задаётся в предлагаемой математической модели путём задания соответствующих  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$ , а использование на выходе устройства встречно включенного генератора непременно приведёт к изменению режима работы исследуемого объекта.

Вывод и обоснование математической модели и расчётных формул приведён, например, в работах [3, 4].

### 3. Согласование измеряемого объекта

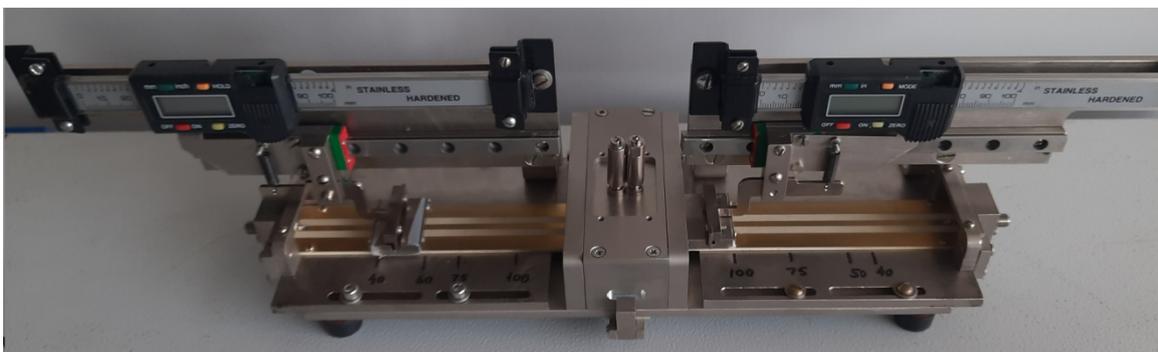
Важным для анализа СВЧ транзисторов продолжением развития метода переменной пространственно удалённой нагрузки является поиск оптимальных способов подстройки импедансов  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$ , создаваемых на входе и выходе исследуемого объекта. Так, ранее были опробованы и опубликованы результаты изменений с использованием трансформаторов импедансов [5], однако такой подход

не является в полной мере оптимальным: автоматические трансформаторы импедансов крайне дороги и на настоящий момент в России вообще недоступны, а механические трансформаторы более трудоёмки в использовании и всё равно недёшевы (на настоящий момент авторам неизвестны актуальные серийно производимые в России модели трансформаторов импедансов).

Авторами исследуется подход, основанный на предварительном согласовании исследуемого объекта с использованием отрезка электрически длинной низкоомной микрополосковой линии и тонкой подстройке с использованием переменной ёмкости, подведённой к низкоомной микрополосковой линии.

Предварительное согласование основано на измерении объекта (транзистора) в контактном устройстве, выполненном в микрополосковом исполнении с низким (порядка 10 Ом) волновым сопротивлением. Включение такой низкоомной микрополосковой линии встык с 50-Омным коаксиальным трактом измерительной установки приведёт к тому, что КСВ, создаваемый на входе контактного устройства, будет представлять собой квазипериодическую функцию в частотной области, причём чем длиннее отрезок низкоомной микрополосковой линии, тем больше максимумов и минимумов будет наблюдаться в фиксированном частотном диапазоне. При выборе номинала волнового сопротивления низкоомной микрополосковой линии, равного 10 Ом, согласование в точках минимумов КСВ в частотной области (без учёта потерь) будет аналогично степени согласования транзистора с 2-Омной линией. Учитывая, что входные и выходные импедансы несогласованных транзисторов составляют порядка единиц Ом, такое предварительное согласование вполне достаточно для того, чтобы измеряемый транзистор вошёл в режим усиления для обеспечения измерения его параметров и дальнейшей тонкой подстройки.

Тонкая подстройка  $Z_{вх}$  и  $Z_{вых}$ , создаваемых на входе и выходе исследуемого объекта, может быть реализована ёмкостью, механически перемещаемой вдоль линии. Вариант реализации контактного устройства с такой ёмкостью представлен на рисунке 1.



**Рисунок 1.** Контактное устройство с ёмкостью, подводимой к линиям.

Как видно, ёмкости реализованы в виде конденсатора, одна обкладка которого реализована самой линией, вторая – перемещаемой металлической пластиной, а зазор и заполнение обеспечены плёнкой нормируемой толщины. Перемещение пластины вдоль линии происходит механически и может быть обеспечено цифровым измерением положения пластины и цифровым интерфейсом для передачи результата измерения. Изменение величины ёмкости может быть реализовано комплектованием контактного устройства несколькими парами пластин различного размера.

#### **4. Аппаратное обеспечение измерения**

В современных условиях тотального ограничения доступа в России к передовым

зарубежным аппаратным решениям для измерения «горячих» S-параметров, X-параметров, предлагаемый авторами метод выгодно отличается простотой своей реализации, опробованной ранее многократно на измерительной технике российского производства [6]. На текущий момент даже простейшие (по современным меркам) двухпортовые векторные анализаторы цепей серии «Обзор» (ООО «Планар»), не говоря уже о более серьёзных измерителях производства ООО «Планар» и АО «Микран», обеспечивают необходимые функциональные и метрологические характеристики для проведения заявляемых измерений. Дополнительные цепи для реализации метода переменной пространственно удалённой нагрузки могут также быть реализованы на полностью российской элементной базе в широком диапазоне частот.

## 5. Калибровка и метрологическое обеспечение

Предлагаемый метод измерения предполагает два уровня калибровки: калибровка в коаксиальном тракте на границах контактного устройства и калибровка в микрополосковой линии контактного устройства непосредственно на границах измеряемого транзистора. Калибровка в коаксиальном тракте состоит из однопортовой векторной калибровки анализатора цепей и калибровки по мощности источника и опорного приёмника 1-го порта, а также измерительного приёмника 2-го порта.

Векторная калибровка анализатора цепей производится общеизвестным методом *OSM* или *SOL*, заключающегося в измерении трёх эталонов волнового сопротивления *XX* (холостого хода, англ. *open*), *KЗ* (короткого замыкания, англ. *short*), *СН* (согласованная нагрузка, англ. *match/load*), параметры которых прослеживаются к государственному эталону волнового сопротивления. Калибровка мощности источника и приёмников анализатора цепей проводится с помощью датчика мощности, точность измерения, которого прослеживается к государственным эталонам мощности и волнового сопротивления.

После проведения калибровки в коаксиальном тракте, по результату калибровки в микрополосковой линии контактного устройства широкополосным LR-методом определяются S-параметры цепей, окружающих измеряемый транзистор. Затем виртуальным исключением окружающих цепей из параметров контактного устройства, смещают опорную плоскость измерений к физическим границам транзистора и получают его собственные S-параметры. Измерение мощности на границах транзистора также производится с помощью виртуального исключения цепей, так как нет физической возможности использовать датчик мощности в полосковой линии передачи. Несмотря на то, что авторам известны ведущиеся в данный момент работы по созданию эталона волнового сопротивления в полосковой линии передачи, например, ОКР «Пластина», данные работы ещё далеки от завершения, поэтому на данный момент невозможно провести оценку погрешностей измерения в контактном устройстве.

## 6. Перспективы

Измерение параметров транзисторов и транзисторным усилителей мощности в настоящий момент является крайне актуальной темой. Оно является необходимым для обеспечения разработки и производства новой элементной базы в целях импортозамещения элементной базы и освоения производства новых перспективных образцов СВЧ техники. Являясь достаточно простым с аппаратной точки зрения, готовым к реализации на полностью отечественной элементной базе, предлагаемое решение даже с учётом некоторых остающихся пока нерешёнными метрологических вопросов может стать крайне востребованным в отрасли и побудить научное сообщество к дальнейшему развитию данного решения в направлении новых видов измерения, к примеру, с использованием зондовых станций.

### Список литературы

1. Никулин С.М., Торгованов А.И. Проектирование усилителей СВЧ-мощности. Эффективность метода удалённой переменной нагрузки // Датчики и системы.- 2015.- №3, с. 148-153.
2. Никулин С.М., Терентьев А.А. Об измерении S-параметров СВЧ транзисторов методом переменной пространственно удалённой нагрузки // Перспективные технологии в средствах передачи информации: Материалы 12-ой международной научно-технической конференции / Владим. гос. университет, в 2-х томах. - Владимир: ВлГУ. - 2017, том II. - 236 с. - ISBN 978-5-905527-16-6, с. 126-129.
3. Терентьев А.А. Методы экспериментального анализа нелинейных СВЧ цепей векторным анализатором цепей и средствами селективной мультипортовой рефлектометрии.- Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Нижегородский гос. техн. ун-т, Нижний Новгород, 2017.
4. Торгованов А.И. Методы и техника оценки параметров мощных СВЧ-транзисторов в полосковых линиях передачи.- Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, Нижегородский гос. техн. ун-т, Нижний Новгород, 2018.
5. Никулин С.М. Торгованов А.И. Измерение S-параметров СВЧ транзистора при высоких уровнях мощности методом пространственно удалённой переменной нагрузки // Сборник трудов V Всероссийской научно-технической конференции "Электроника и микроэлектроника СВЧ", г. С.-Петербург, 30 мая - 2 июня 2015, с. 309-316.
6. Никулин С.М., Терентьев А.А. Новый подход к измерению S-параметров методом переменной пространственно удалённой нагрузки // Датчики и системы, 2016, № 11, с. 3-7.