

X-ПАРАМЕТРЫ – ЭФФЕКТИВНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Е. Николаев

Инженеры, занимающиеся разработкой активных компонентов (усилителей, удвоителей частоты и др.) электрических цепей, сегодня все чаще сталкиваются с необходимостью моделировать их поведение при больших мощностях СВЧ-сигналов. В этом случае активные компоненты работают, как правило, в нелинейных режимах, и традиционные методы их описания, основанные на линейных моделях, оказываются непригодными [1]. Компания Agilent Technologies создала эффективный инструмент для разработки и анализа нелинейных цепей – X-параметры.

Уже в течение многих лет для анализа поведения активных компонентов электрических цепей при прохождении СВЧ-сигналов используются так называемые S-параметры. Они описывают компоненты в приближении "черного ящика", когда задаются взаимосвязи между падающими и отраженными сигналами, но не детализируется внутренняя структура компонента. Например, для четырехполюсника (рис.1) связи между сигналами определяются выражениями:

$$b_1 = S_{11} \cdot a_1 + S_{12} \cdot a_2,$$

$$b_2 = S_{21} \cdot a_1 + S_{22} \cdot a_2,$$

где a_1, a_2 – комплексные амплитуды волн, входящих в четырехполюсник (падающие волны); b_1, b_2 – комплексные амплитуды волн, выходящих из четырехполюсника (отраженные волны); $S_{i,j}$ – S-параметры. Параметры S_{11} и S_{22} – это коэффициенты отражения по соответствующим входам при подключении согласованных нагрузок (отраженный сигнал отсутствует) ко всем остальным входам; S_{12} и S_{21} – коэффициенты передачи с второго входа на первый и наоборот, соответственно, при подключении согласованных нагрузок к остальным входам.

S-параметры компонентов можно измерять с помощью специального оборудования (например, векторных анализаторов цепей) и потом использовать в САПР для определения различных характеристик этих компонентов. Но проблема в том, что модели, основанные на S-параметрах, дают хорошие результаты только в линейном приближении, которое реализуется в основном при малых уровнях сигналов.

Для корректного описания компонентов электрических цепей в нелинейном случае, соответствующем высоким уровням передаваемых сигналов, компания Agilent разработала технологию, основанную на новом наборе характеристик цепей, получивших название X-параметров [1, 2]. По сути, технология X-параметров – это расширение модели S-параметров на нелинейную область.

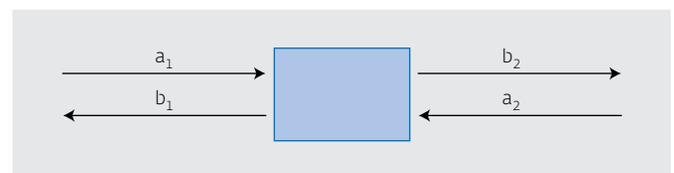


Рис.1. Схема модели S-параметров

Поведение компонентов при прохождении через них сигналов большой амплитуды описывается нелинейными уравнениями, связывающими комплексные параметры падающих (A) и отраженных (B) волн. Например, для двухпортового усилителя (рис.2) уравнения будут иметь вид [2]:

$$B_{ef} = F_{ef}(DC, A_{11}, A_{12}, \dots, A_{21}, A_{22}, \dots),$$

где индекс e соответствует номеру порта; индекс f – номеру гармоники; DC – смещение постоянной составляющей сигнала.

Для практического использования зависимости B(A) ее необходимо тем или иным образом упростить. Наиболее радикальное упрощение приводит к модели S-параметров. В этом случае каждая B-волна представляется как линейная комбинация падающих A-волн. В другом предельном случае (без упрощений) каждая B-волна связана нелинейно зависимостью с каждой гармоникой всех падающих волн.

Для наглядности удобно рассмотреть нелинейную модель, наиболее близкую к модели S-параметров. В ней заложена нелинейная зависимость всех B-волн только от одной (основной) гармоники входящего сигнала на порте 1 – A₁₁. В этом случае выражения для гармоник отраженных волн будут выглядеть так:

$$B_{ef} = X_{ef}^{(f)}(DC, |A_{11}|)P^f + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(S)}(DC, |A_{11}|)P^{f-h} \cdot A_{gh} + \sum_{g,h} X_{ef,gh}^{(T)}(DC, |A_{11}|)P^{f+h} \cdot A_{gh}^*$$

Здесь A_{gh} – комплексная амплитуда (индекс g соответствует номеру порта, индекс h – номеру гармоники); P = e^{iPhase(A₁₁)} – фаза сигнала A₁₁;

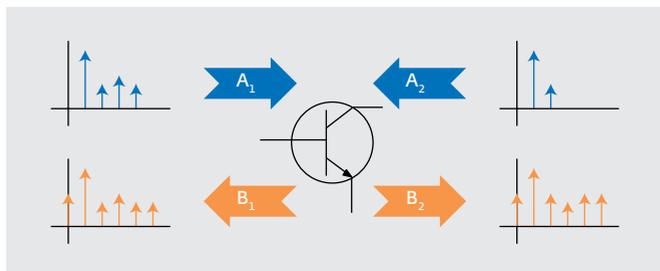


Рис.2. Структура сигналов в модели X-параметров: A₁ – падающая волна в основном порте (1), B₁ – волна, отраженная от порта 1, B₂ – прошедшая волна, A₂ – отраженная волна от следующего модуля каскада. Каждый сигнал содержит несколько гармоник, которые учитываются в модели X-параметров

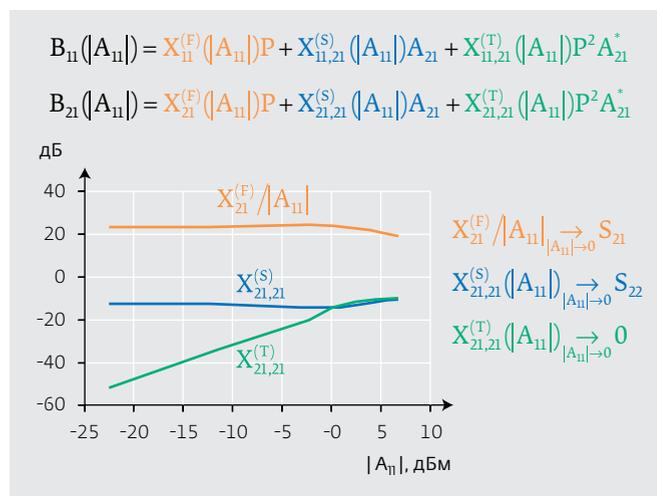


Рис.3. Переход X-параметров в S-параметры

A* – величина, комплексно сопряженная A[†]. Суммирование выполняется по всем портам и гармоникам, кроме пары (1,1).

Первое слагаемое в этом уравнении описывает отклик идеально согласованной (на всех гармониках) нелинейной системы со смещением постоянной составляющей (DC-bias) при подаче на порт 1 синусоидального сигнала. Второе и третье слагаемые описывают вклад в каждую гармонику в порте e от всех гармоник, присутствующих в каждом другом порте. В этом отличие от модели S-параметров, где учитывается только общий сигнал (без разделения на гармоники) от каждого порта.

В предельном случае малых сигналов X-параметры автоматически переходят в S-параметры (рис.3).

Как можно работать с X-параметрами? Есть несколько вариантов. Во-первых, X-параметры можно измерять с помощью оборудования компании Agilent. Сегодня это векторные анализаторы цепей серии PNA-X (рис.4) [3]. Измеренные X-параметры можно непосредственно экспортировать в САПР Advanced Design System (ADS) компании Agilent и там на их основе определять характеристики модулей, для которых измерены параметры.

Еще одно важное применение X-параметров – описание с их помощью проектируемых устройств. В САПР ADS встроено специальное запатентованное решение – автоматический генератор X-параметров [3]. Он позволяет сгенерировать

† Если комплексное число z=x+iy, то комплексно сопряженным ему называется число z* = x-iy.

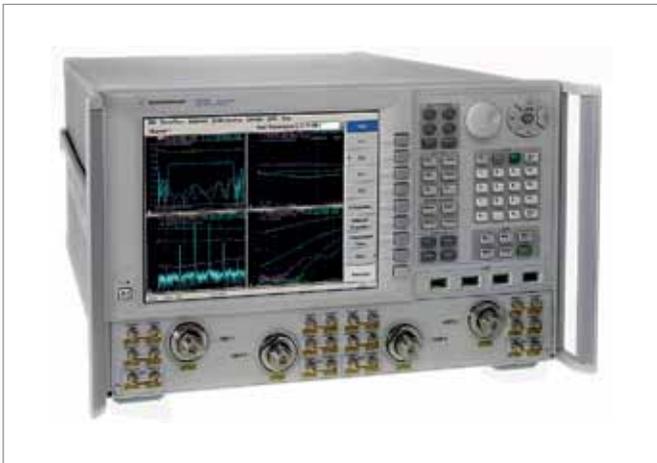


Рис.4. Векторный анализатор СВЧ-цепей серии PNA-X

файл X-параметров любой схемы и топологии. Этот файл полностью описывает поведение проектируемого устройства. Помимо удобства работы, такой подход обеспечивает защиту интеллектуальной собственности: сгенерировав файл с X-параметрами радиоэлектронного блока, можно передать его разработчикам конечной системы. При этом не нужно передавать схему самого устройства для моделирования, так как X-параметры дают его описание, достаточное для использования в САПР ADS.

Можно также объединять несколько модулей, для которых измерены X-параметры, в каскады и рассчитывать X-параметры объединенной системы. Эксперименты показывают, что при этом получаются весьма точные результаты. В качестве примера можно привести исследование каскада двух нелинейных усилителей [4]. Сначала с помощью анализатора PNA-X были измерены

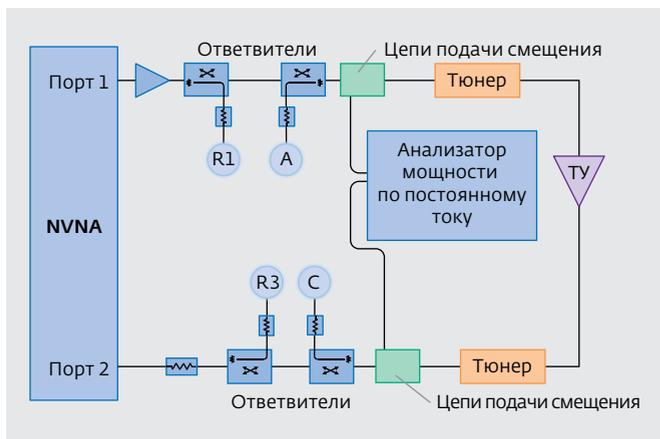


Рис.6. Блок-схема эксперимента для измерения X-параметров УМ. ТУ – тестируемое устройство

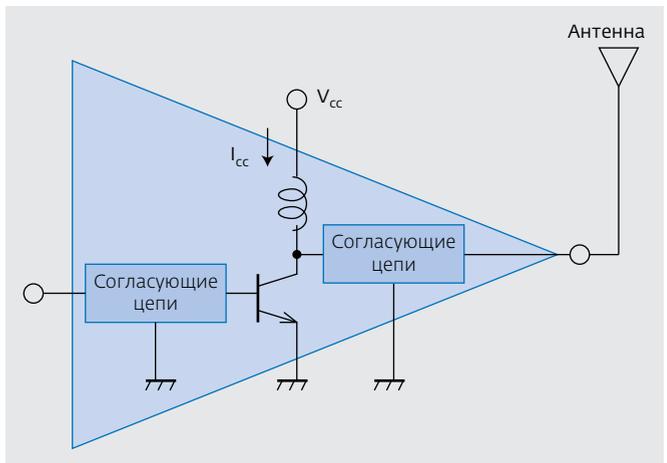


Рис.5. Блок-схема усилителя мощности на основе GaN-транзистора

X-параметры каждого из усилителей и экспортированы в САПР ADS. Там на основе этих данных были рассчитаны X-параметры каскада усилителей. Затем X-параметры каскада были определены экспериментально. Последующие расчеты характеристик каскада усилителей (амплитуд и фаз гармоник) на основе X-параметров, полученных обоими способами, показали хорошее соответствие результатов.

Высокая точность модели X-параметров позволяет эффективно использовать их для разработки различных электронных устройств. Рассмотрим, как применялись X-параметры при разработке усилителя мощности (УМ) на основе 45-Вт GaN-транзистора [5]. Общее проектирование УМ было выполнено в САПР ADS. Эта система использовалась для моделирования импедансов

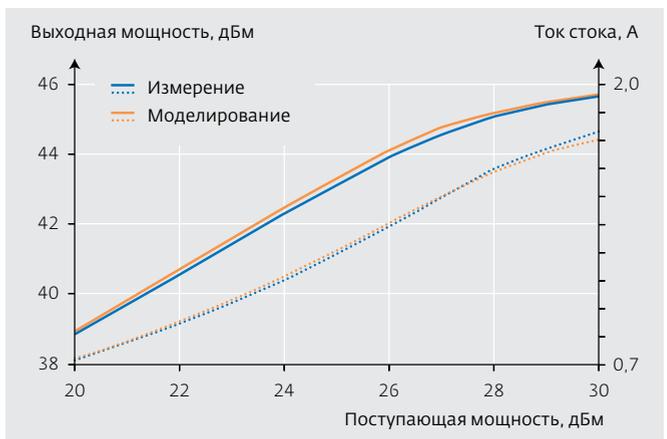


Рис.7. Выходная мощность (сплошная линия) и ток стока (пунктир), полученные на основе измерения X-параметров и моделирования

Сравнение результатов моделирования и измерения для усилителя мощности

Показатель качества	Результат моделирования	Результат измерений
Входная мощность, дБм	30	30
Эффективность стока, %	64,1	64,6
РАЕ, %	62,3	62,6
Выходная мощность, дБм	45,3	44,93

согласующих цепей на основной частоте и частотах гармоник на входном (затвор) и выходном (сток) портах транзистора (рис.5). Моделирование позволило подобрать импедансы, обеспечивающие максимальные значения выходной мощности и КПД добавленной мощности (РАЕ) усилителя.

Затем на основе этих данных был собран УМ, и его рабочие характеристики были измерены с помощью нелинейного векторного анализатора цепей (NVNA), главным элементом которого является PNA-X [6]. В эксперименте использовалась система, содержащая анализатор NVNA и ряд дополнительных элементов (рис.6) [5]. Светло-синими кружками на рис.6 обозначены входные порты анализатора цепей. Все элементы темно-синего цвета обозначают внешние компоненты, используемые для защиты этих портов: усилители, ответвители, аттенюаторы и цепи подачи смещения. Тюнеры (обозначены оранжевым цветом) обеспечивают согласование импедансов на входе и выходе тестируемого устройства. Измерения проводились при различной мощности сигналов.

Сравнение характеристик усилителя, полученных на основе измеренных X-параметров, с результатами моделирования, показало их очень хорошее совпадение (рис.7, см. таблицу). Это подтверждает точность моделирования активных компонентов и эффективность X-параметров как инструмента для их описания.

Таким образом, X-параметры можно использовать при разработке УМ и других активных компонентов. Их применение позволяет существенно сократить время разработки и выхода конечных изделий на рынок, а также защитить интеллектуальную собственность поставщиков компонентов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Characterizing and Designing Linear/Nonlinear Active Devices. – cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-3897EN.pdf
2. **Root D.E., Horn J., Betts L.** et al. X-параметры: новый принцип измерений, моделирования и разработки нелинейных ВЧ- и СВЧ-компонентов (X-Parameters: The new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components). – Контрольно-измерительные приборы и системы, 2009, №2, с.20.
3. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог. – Agilent Technologies, 2011.
4. Agilent NVNA and X-Parameter Simulation in ADS. – www.home.agilent.com/upload/cmc_upload/All/1_NVNA_and_X-parameters_in_ADS.pdf?&cc=RU&lc=rus
5. Evaluating and Optimizing High-power Amplifier Designs with X-Parameter Techniques. Application Note. – cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5990-7528EN.pdf
6. Agilent Nonlinear Vector Network Analyzer (NVNA). – cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5989-8575EN.pdf