

**Адоньев О.А.¹, Котов Д.В.¹, Плутешко А.В.¹,
Блинников А.А.¹, Зайцев А. В.², Маслов П. В.²**

¹АО «Всероссийский НИИ радиотехники»

²АО «Акметрон»

Методика измерений X-параметров мощного СВЧ усилителя S-диапазона

Выполнена серия измерений X-параметров мощного СВЧ усилителя S-диапазона. В результате работы составлена методика проведения подобных измерений, являющихся основой для создания поведенческой модели усилителя, поддерживаемой САПР Keysight ADS. В методике описаны все этапы подготовки рабочего стенда, процесс настройки оборудования, а также описана возможность применения X-параметров.

Ключевые слова: мощный СВЧ усилитель, X-параметры, поведенческая модель усилителя мощности, ADS, PNA-X.

При разработке СВЧ усилителей мощности необходимо учитывать такие режимы работы транзисторов, в которых, предсказать поведение усилителя на основании аналитических моделей, порой, невозможно. Компания Keysight Technologies, совместно с компанией Maury Microwave предложили решение данной проблемы в виде X-параметров, описывающих нелинейные свойства активных устройств. Измеренные X-параметры импортируются в САПР Keysight Advanced Design System (ADS) для дальнейшего моделирования.

На данный момент, существующие источники информации [1,2] не дают целостного представления о проведении измерений X-параметров. Вследствие чего, возникает задача создания методики их измерений.

X-параметры описывают поведение устройства, возбуждаемого гармоническим сигналом [1]. В режиме большого сигнала, помимо откликов падающей и отражённой волн на частоте возбуждения, используются отклики на гармониках сигнала. Для описания поведения устройства при различных импедансах входной и выходной цепи, в состав X-параметров включаются коэффициенты передачи малых сигналов на основной частоте и её гармониках. Эти сигналы называются тонами экстракции (ТЭ), они действуют на входе и выходе устройства одновременно с большим сигналом и имеют уровень -30... -20 дБ относительно уровня этого сигнала [3].

Поведенческая модель состоит из массива данных, получаемых при исследовании усилителя. Для каждого устройства выбираются следующие параметры: диапазон частот, входная мощность, входные и выходные импедансы. Данная область параметров определяет собой множество точек при проведении измерений. Для моделирования поведения устройства в промежуточных точках, используется интерполяция.

В рамках данной работы проводятся измерения X-параметров мощного СВЧ усилителя S-диапазона на LDMOS-транзисторе NXP-BLS6G2735LS-30, с выходной мощностью 40 Вт, в полосе рабочих частот 2.7-2.9 ГГц. Режим работы транзистора импульсный (скважность 5). Для проведения данных измерений используется векторный

анализатор цепей PNA-X, с программным обеспечением (ПО) NVNA [4] компании Keysight Technologies и тюнер импеданса компании Maury Microwave с ПО IVCAD [5].

Измерение X-параметров осуществляется для 7 частотных точек (от 2.65 ГГц до 2.95 ГГц с шагом 50 МГц). Точки 2.65 ГГц и 2.95 ГГц необходимы для расширения исследуемого частотного диапазона усилителя. В измерениях применяется процедура систематического перебора импеданса нагрузки (load-pull) [6], представляющая из себя перебор значений импеданса нагрузки в диапазоне, заданном на диаграмме Вольперта-Смитта. Систематический перебор импеданса нагрузки позволяет находить оптимальные значения нагрузки, для получения требуемых характеристик усилителя мощности (выходная мощность, КПД и др). В данном случае, для каждой из частот выбираются 25 значений импеданса нагрузки, расположенных в окрестности точки 1 на диаграмме Вольперта-Смитта. Измерения выполняются до 3 гармоники несущего сигнала. Диапазон входной мощности варьируется от 20 дБм до 33 дБм с шагом 1 дБ.

На рис.1 представлена схема измерений X-параметров.

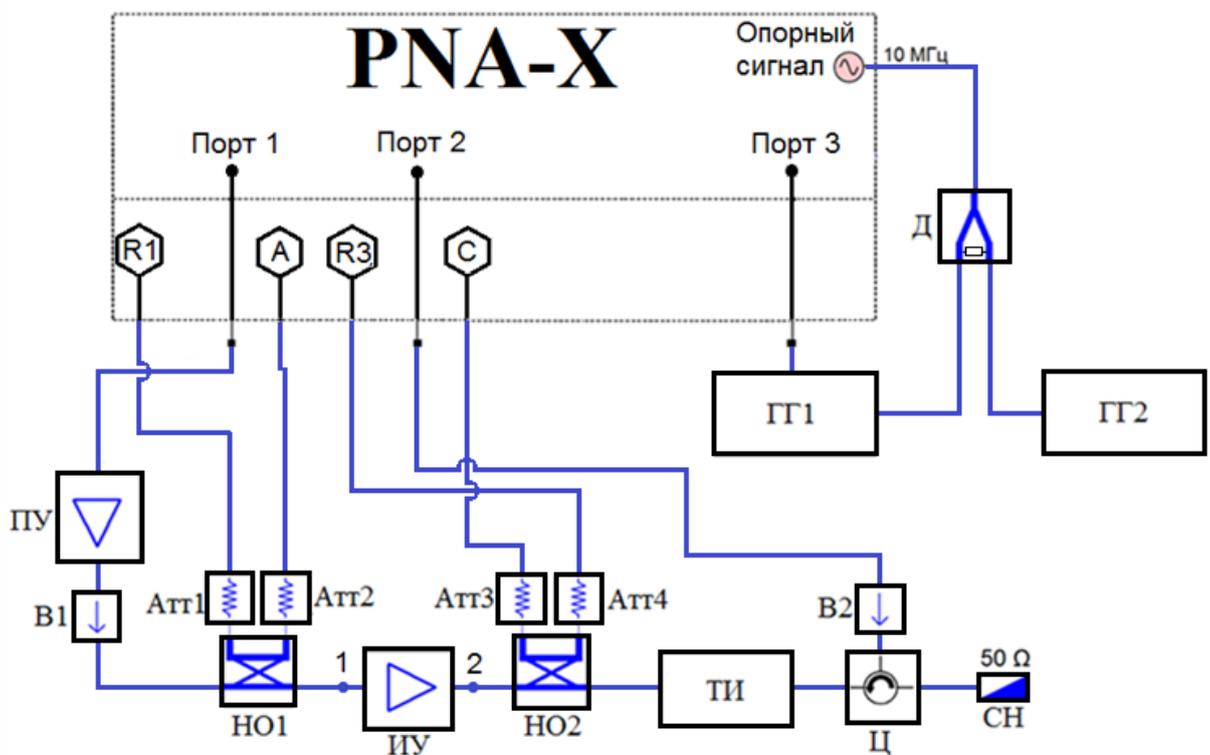


Рис. 1. Схема измерений X-параметров усилителя мощности (load-pull).

На данном рисунке изображены порты и приёмники векторного анализатора цепей PNA-X [7], а также внешнее подключение оборудования, необходимого для измерений:

А, С - приёмники отраженных волн.

R1, R3 - приёмники падающих волн.

ПУ – предварительный усилитель с коэффициентом усиления 30 dB

B1, B2 – вентили

НО1, НО2 – направленные ответвители с коэффициентом ответвления 35 dB,

ИУ – измеряемое устройство,

ТИ – тюнер импеданса Maury Microwave,

Ц – циркулятор,

СН – согласованная нагрузка 50 Ом,

Атт1, Атт2, Атт3, Атт4 - аттенюаторы 20 dB,
ГГ1, ГГ2 – генераторы гармоник,
Д – делитель.

На рис.2 изображена блок-схема методики, описывающая этапы проведения измерений X-параметров.

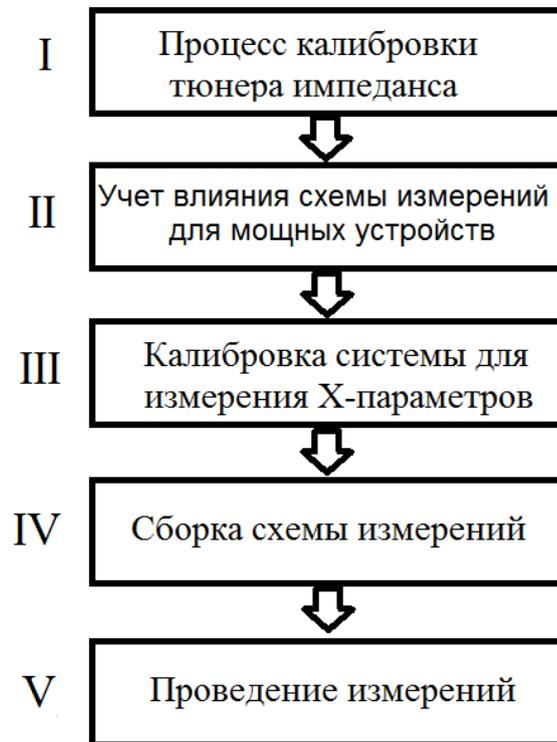


Рис. 2. Этапы методики измерения X-параметров (может во второй пункт добавить слово элементов? Получится «Учет влияния элементов схемы... А в третьем, вместо ...системы... применить «стенда» «Система» не подходит.)

Первым этапом является калибровка тюнера импеданса Maury Microwave с использованием ПО тюнера IVCAD. Калибровка проводится для каждой из частотных точек. В процессе калибровки тюнер осуществляет перебор множества импедансов на диаграмме Вольперта-Смитта для каждой рассматриваемой частотной точки.

Вторым этапом является калибровка приёмников, с учётом влияния схемы измерений для мощных устройств. Для выполнения данной процедуры используется схема измерений, состоящая из НО1, ТИ и НО2. При этом выход порта 1 подключается к НО1, а выход порта 3 подключается к выходу ТИ. Далее выполняется переход к работе с ПО IVCAD. Первым шагом является подключение к IVCAD тюнера импеданса Maury Microwave, PNA-X, измерителя мощности. Перед калибровкой, внутренний источник PNA-X необходимо установить в непрерывный режим, а также задать требуемый уровень выходной мощности сигнала PNA-X. После выполнения всех вышеперечисленных операций, требуется осуществить автоматический учёт влияния схемы измерений для мощных устройств. Для этого электронный калибровочный модуль (ЭКМ) подключается к разъемам 1 и 2, после чего необходимо запустить в IVCAD процедуру "tuners auto de-embedding".

Третьим этапом проводится калибровка системы, с целью измерений X-параметров усилителя мощности в импульсном режиме. Предварительно собирается схема, показанная на рис.1, за исключением ПУ и В1. Далее, при помощи ПО IVCAD, PNA-X переводится в импульсный режим работы, а также устанавливаются необходимые параметры импульсов.

Затем, ПО IVCAD обращается к ПО NVNA для осуществления калибровки. Здесь необходимо задать частотный диапазон измерений, уровень мощности при калибровке, положение переключателей внутри PNA-X, количество измеряемых гармоник и значения уровней каждого из ТЭ, исходящих из портов 1 и 3. Калибровка системы в ПО NVNA состоит из трех процедур: векторной калибровки, фазовой калибровки с ГГ2 и мощностной калибровки. При векторной калибровке ЭКМ подключается к разъёмам 1 и 2, после чего выполняется калибровка. Фазовая калибровка осуществляется при помощи ГГ2, подключаемого к разъёму 1, при этом ГГ1 остаётся подключён к порту 2 и определяет собой опорную фазу сигнала. Калибровка уровня мощности проводится с использованием измерителя мощности, подключаемого к разъёму 1. Результаты калибровок автоматически импортируются в ПО IVCAD.

На четвертом этапе следует подключить ИУ к разъёмам 1 и 2, а также подключить ПУ, задать количество точек, измеряемых импедансов и диапазон мощности, выходящей из порта 1.

Последний этап заключается в запуске процесса измерений X-параметров ИУ.

Результаты измерений X-параметров автоматически записываются в файл формата «*.xpr». Для каждой из измеренных частотных точек создается отдельный файл X-параметров. Затем, для получения полной модели, следует объединить все файлы в один путем редактирования. Полученный файл используется для моделирования в САПР Keysight ADS.

Представленная в докладе методика включает в себя все этапы измерений, необходимые для получения файла X-параметров. Этот файл может быть использован в САПР Keysight ADS для последующего компьютерного моделирования, позволяя разрабатывать модели активных устройств, с учетом их нелинейных характеристик и с возможностью каскадирования.

Библиографический список

1. Root D.E., Horn J., Betts L., Gillese C., Verspecht J. X-parameters: the new paradigm for measurement, modeling, and design of nonlinear RF and microwave components. Microwave Engineering Europe, 2008. - pp. 16-21.
2. Configuration of PNA-X, NVNA and X-parameters. [Электронный ресурс] URL: https://www.av.it.pt/X-tutorial/0_PNAX_intro.pdf (дата обращения: 25.01.16)
3. High Power Amplifier Measurements Using Agilent's Nonlinear Vector Network Analyzer. [Электронный ресурс] URL: <https://www.av.it.pt/62-PNA-X/X-tutorial.pdf> (дата обращения: 25.02.16)
4. Программное обеспечение NVNA, [Электронный ресурс] URL: <https://www.keysight.com/find/nvna.html> (дата обращения: 18.02.16)
5. Программное обеспечение IVCAD, [Электронный ресурс] URL: https://www.maurymw.com/MW_RF/IVCAD_Advanced_Measurement_Modeling_Software.php (дата обращения: 15.02.16)
6. IVCAD NVNA and X-parameters - Load Pull. [Электронный ресурс] URL: https://maury.zendesk.com/hc/en-us/article_attachments/202784476/IVCAD_MT930C_GS_NVNA_Load_Pull.pdf (дата обращения: 14.01.16)
7. Modeling a UMS GaN transistor (CHZ015A) with a B1505, a PNA-X and ICCAP. [Электронный ресурс] URL: http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/gan_transistor.pdf (дата обращения: 22.01.2016)