



УДК 621.375.4

О. А. Адоньев, Д. В. Котов, А. В. Плутешко, А. А. Блинников  
АО "Всероссийский НИИ радиотехники" (Москва)  
А. В. Зайцев, П. В. Маслов  
АО "Акметрон" (Москва)

## 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.*

### Мощный СВЧ-усилитель, X-параметры, поведенческая модель усилителя мощности, ADS, PNA-X

При разработке СВЧ-усилителей мощности необходимо учитывать режимы работы транзисторов, в которых предсказать поведение усилителя на основании аналитических моделей затруднительно. 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 этого актуальна задача создания методики их измерений.

X-параметры описывают поведение устройства, возбуждаемого гармоническим сигналом [1]. При измерении X-параметров в режиме большого сигнала помимо откликов падающей и отраженной волн на частоте возбуждения используются отклики на гармониках сигнала. Для описания поведения устройства при различных импедансах входной и выходной цепей в состав X-параметров включаются коэффициенты передачи малых сигналов на основной частоте и на ее гармониках. Эти сигналы называются тонами экстракции (ТЭ), они действуют на входе и выходе устройства одновременно с большим сигналом и

имеют уровень  $-30 \dots -20$  дБ относительно уровня этого сигнала [3].

Поведенческая модель состоит из массива данных, получаемых при исследовании усилителя. Для каждого устройства анализируются диапазон частот, входная мощность, входные и выходные импедансы. Набор значений указанных параметров определяет собой множество точек при проведении измерений. Для определения поведения устройства в промежуточных точках используется интерполяция.

В рамках описываемой работы проведены 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 со скважностью 5. Для проведения измерений использован 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 осуществлялось для семи частот от 2.65 до 2.95 ГГц с шагом 50 МГц. Точки 2.65 и 2.95 ГГц необходимы для расширения исследуемого частотного диапазона усилителя. В измерениях применялась процедура систематического перебора импеданса нагрузки (load-pull) [6], предусматривающая перебор значений импе-

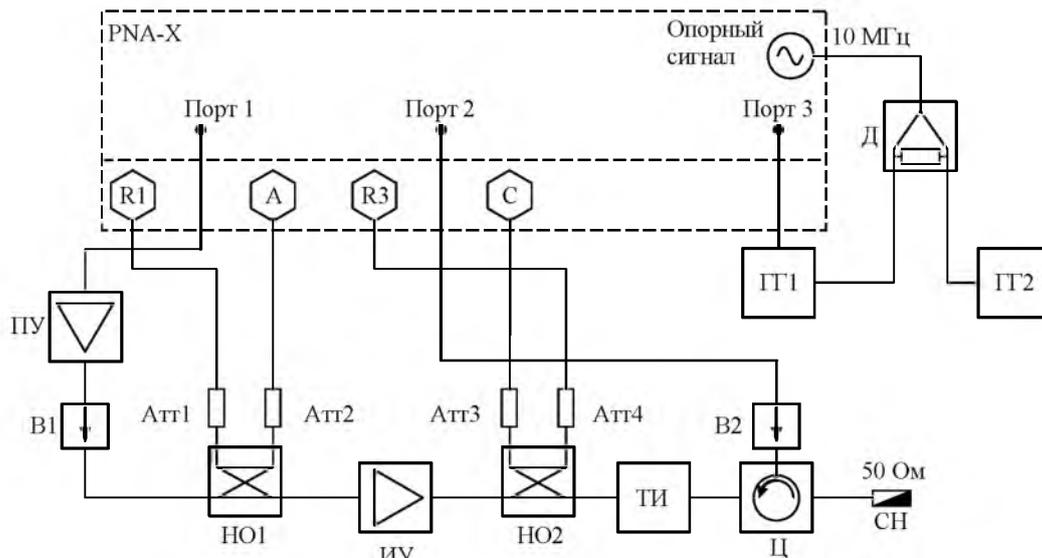


Рис. 1

данса нагрузки в диапазоне, заданном на диаграмме Вольперта–Смита. Систематический перебор импеданса нагрузки позволяет находить оптимальные значения нагрузки для получения требуемых характеристик усилителя мощности (выходная мощность, КПД и др). В рассмотренных измерениях для каждой из частот выбирались 25 значений импеданса нагрузки, расположенных в окрестности единичного значения на диаграмме Вольперта–Смита. Измерения выполнялись на трех гармониках несущей частоты сигнала. Диапазон входной мощности варьировался от 20 до 33 дБм с шагом 1 дБ.

Схема измерений X-параметров измеряемого устройства ИУ представлена на рис. 1, где изображены порты и приемники векторного анализатора цепей PNA-X [7], а также внешнее оборудование, необходимое для измерений: А, С – приемники отраженных волн; R1, R3 – приемники падающих волн; ПУ – предварительный усилитель с коэффициентом усиления 30 дБ; В1, В2 – вентили; НО1, НО2 – направленные ответвители с коэффициентом ответвления 35 дБ; ТИ – тюнер импеданса "Maury Microwave"; Ц – циркулятор; СН – согласованная нагрузка 50 Ом; Атт1–Атт4 – аттенуаторы 20 дБ; ГГ1, ГГ2 – генераторы гармоник; Д – делитель.

На рис. 2 изображена блок-схема методики, описывающая этапы проведения измерений X-параметров. 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 значений импедансов на диаграмме Воль-

перта–Смита для каждой рассматриваемой частотной точки.

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

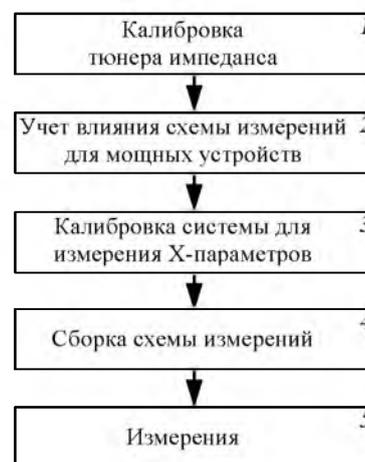


Рис. 2

На третьем этапе система калибруется для измерений X-параметров усилителя мощности в импульсном режиме. Собирается схема (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 калибровки. При этом необходимо задать частотный диапазон измерений, уровень мощности при калибровке, положение переключателей внутри PNA-X, количество измеряемых гармоник и значения уровней каждого ТЭ, исходящего из портов 1 и 3.

Калибровка системы в ПО NVNA состоит из трех процедур: векторной калибровки, фазовой калибровки с ГГ2 и мощностной калибровки. Векторная калибровка выполняется при подключении ЭКМ к разъемам 1 и 2. Фазовая калибровка осуществляется при помощи ГГ2, подключаемого к разъему 1, при этом ГГ1 остается подключен к порту 2 и определяет опорную фазу сигнала. Калибровка уровня мощности проводится с использованием измерителя мощности, подключаемого к разъему 1. Результаты калибровок автоматически импортируются в ПО IVCAD.

На четвертом этапе следует подключить ИУ к разъемам 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. Для полу-

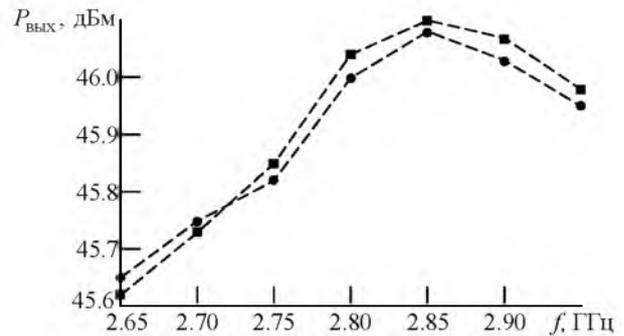


Рис. 3

чения полной модели все файлы объединяются в один. Полученный файл используется для моделирования в САПР "Keysight" ADS.

Для проверки полученных результатов они записываются в файл формата "\*.mdf". В файле содержатся результаты измерений, не преобразованные в X-параметры: выходная мощность усилителя для каждой из исследуемых частот и для каждого импеданса.

По результатам измерений построена амплитудно-частотная характеристика для  $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{вых}} = 50 \text{ Ом}$  (рис. 3, точки измерения указаны круглыми маркерами). Для сравнения на этом же рисунке приведены X-параметры, используемые в САПР "Keysight" ADS при моделировании поведения усилителя (квадратные маркеры).

Представленная 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.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. X-Parameters: The new Paradigm for Measurement, Modeling, and Design of Nonlinear RF and Microwave Components / D. E. Root, J. Horn, L. Betts, C. Gillease, J. Verspecht // Microwave Engineering Europe. 2008. P. 16–21.
2. Device Modeling with NVNAs and X-parameters / D. E. Root, J. Xu, J. Horn, M. Iwamoto, G. Simpson // IEEE MTT-S INMMiC Conf., Gotenborg, Sweden, 26–27 Apr. 2010. Piscataway: IEEE, 2010. P. 12–15.
3. X-Parameter\* Measurements. URL: [http://na.support.keysight.com/pna/nvna/NVNAWebHelp/XParameter\\_Measurements.htm](http://na.support.keysight.com/pna/nvna/NVNAWebHelp/XParameter_Measurements.htm) (дата обращения 25.02.16)
4. Nonlinear Vector Network Analyzer. URL: <http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5989-8575RURU.pdf> (дата обращения 18.02.16).
5. IVCAD Advanced Measurement and Modeling Software. URL: [https://www.maurymw.com/MW\\_RF/IVCAD\\_Advanced\\_Measurement\\_Modeling\\_Software.php](https://www.maurymw.com/MW_RF/IVCAD_Advanced_Measurement_Modeling_Software.php) (дата обращения 28.10.16).
6. IVCAD NVNA and X-parameters – Load Pull. URL: [https://maury.zendesk.com/hc/en-us/article\\_attachments/202784476/IVCAD\\_MT930C\\_GS\\_NVNA\\_Load\\_Pull.pdf](https://maury.zendesk.com/hc/en-us/article_attachments/202784476/IVCAD_MT930C_GS_NVNA_Load_Pull.pdf) (дата обращения 28.10.16).
7. Modeling a UMS GaN Transistor (CHZ015A) with a B1505, a PNA-X and ICCAP. URL: [http://www.keysight.com/upload/cmc\\_upload/All/gan\\_transistor.pdf](http://www.keysight.com/upload/cmc_upload/All/gan_transistor.pdf) (дата обращения 28.10.2016).

O. A. Adonev, D. V. Kotov, A. V. Pluteshko, A. A. Blinnikov  
JSC "All-Russian Research Institute of Radio Engineering" (Moscow)  
A. V. Zaycev, P. V. Maslov  
JSC "Akmetron" (Moscow)

### Technique of the X-Parameters Measurements of S-Band Power Amplifier

*Performed a series of the X-parameters measurements of high-power S-band power amplifier. This method is the foundation to provide similar measurements and as result to obtain the behavioral model of power amplifier to further simulations in ADS. This method describes all the calibration and measurement steps to obtain X-parameters.*

RF Power Amplifier; X-Parameters; Behavioral Model of RF Power Amplifier; ADS; PNA-X

Статья поступила в редакцию 16 июля 2016 г.



Санкт-Петербургский  
государственный  
электротехнический университет  
«ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

14-я МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ  
«ТЕЛЕВИДЕНИЕ:  
ПЕРЕДАЧА И ОБРАБОТКА  
ИЗОБРАЖЕНИЙ»

Конференция состоится 27, 28 июня 2017 г. в Санкт-Петербургском государственном электротехническом университете "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина).

На конференции будут рассмотрены вопросы:

- цифровой обработки и компрессии видеоданных;
- разработки методов и устройств формирования видеосигнала;
- создания прикладных телевизионных систем.

Тезисы доклада и заявка на участие в конференции предоставляются в электронном виде не позднее 15 мая 2017 г.

Сборник конференции включен в систему Российского индекса научного цитирования (РИНЦ).

Сайт конференции: [www.tv-conference.ru](http://www.tv-conference.ru)

E-mail: [tvconference@gmail.com](mailto:tvconference@gmail.com)

Телефон оргкомитета:

8 (812) 346-47-84

Контактные лица:

Манцетов Андрей Александрович

+7 (911) 244-66-64

Баранов Павел Сергеевич

+7 (921) 368-77-19

Мотыко Александр Александрович

+7 (905) 228-90-82