

*Адоньев О.А., Котов Д.В., Блинников А.А.,  
Ижуткин В.С.  
АО «Всероссийский НИИ радиотехники»*

## **Компьютерное моделирование мощного СВЧ усилителя S-диапазона с использованием компактной модели и поведенческой модели на основе X-параметров**

*Проведена серия измерений X-параметров мощного СВЧ усилителя S-диапазона. Приведены результаты сравнения компьютерного моделирования СВЧ усилителя на основе компактной модели и измеренных X-параметров. Выполнено исследование готового усилителя на устойчивость.*

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

X-параметры предназначены для описания поведения нелинейного устройства, которое не может быть описано с использованием линейных измерений S-параметров, и являются расширением S-параметров на область работы нелинейных устройств. Описание поведения устройства с точки зрения нелинейных преобразований спектра частот и гармоник сигналов, позволяет устранить ограничения, которые присутствуют при измерениях S-параметров. Также, X-параметры позволяют выполнять измерения при условии каскадирования нелинейных элементов, без использования методов аппроксимации. На рис.1 наглядно представлен каскад из двух усилителей и отражены спектральные составляющие падающих и отраженных волн:

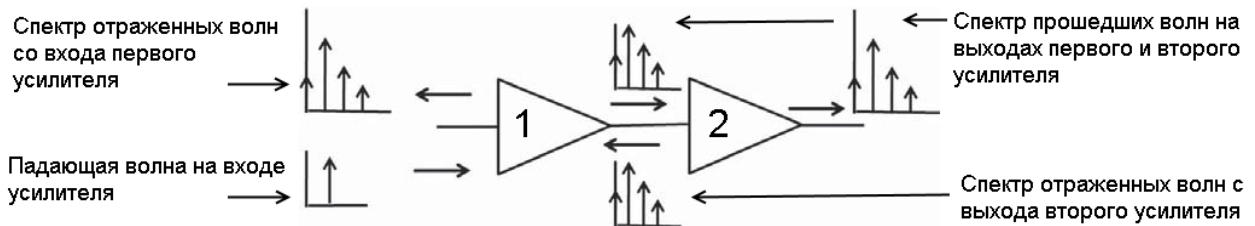


Рис.1. Спектральные составляющие падающих и отраженных волн в каскадах усилителей

На практике, описание поведения нелинейного устройства с помощью X-параметров, даёт полное представление о гармонических и спектральных составляющих, возникающих при его работе. Также осуществляется описание поведения устройства в установившемся состоянии при различных уровнях напряжения питания.

Основная формула X-параметров [1], используемая для описания поведения нелинейного устройства:

$$B_{ef} = X_{ef}^F(|A_{11}|)P^f + \sum_{g,h \neq 1,1} X_{ef,gh}^S(|A_{11}|)P^{f-h}A_{gh} + \sum_{g,h \neq 1,1} X_{ef,gh}^T(|A_{11}|)P^{f+h}A_{gh}^*$$

Данная формула описывает зависимость комплексной амплитуды гармоники ( $B_{ef}$ ) с номером  $f$  на выходном порту  $e$  от значений комплексных амплитуд  $A_{11}$ ,  $A_{gh}$  и  $A_{gh}^*$ , где:

$A_{11}$  – основной сигнал высокого уровня, подаваемый на порт 1  
 $A_{gh}$  – синфазный тон экстракции подаваемый на порт  $g$  вблизи гармоники  $h$  основного сигнала высокого уровня  
 $A_{gh}^*$  – квадратурный тон экстракции подаваемый на порт  $g$  вблизи гармоники  $h$  основного сигнала высокого уровня  
 $P^f, P^{f-h}, P^{f+h}$  – опорные значения фаз  
 $X_{ef}^{(F)}$  – матрица комплексных коэффициентов, описывающая значение гармоники  $f$  на выходном порту  $e$ , при подаче на порт 1 сигнала  $A_{11}$   
 $X_{ef,gh}^{(S)}, X_{ef,gh}^{(T)}$  – матрицы комплексных коэффициентов, описывающие значения спектральных составляющих, вызванных интермодуляционными искажениями, в окрестности гармоники  $f$  на порту  $e$ , при подаче тонов экстракции  $A_{gh}$  и  $A_{gh}^*$  на порт  $g$  вблизи гармоники  $h$  основного сигнала.

Согласно методике измерений X-параметров [2], выполнена серия измерений X-параметров СВЧ-усилителя S-диапазона разработанного на основе LDMOS транзистора BLS9G2735LS-50 компании Ampleon. Ниже приведено сравнение амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) усилителя: на основе математической модели X-параметров, на основе компактной модели транзистора и АЧХ, снятой с тестируемого усилителя обычным способом.

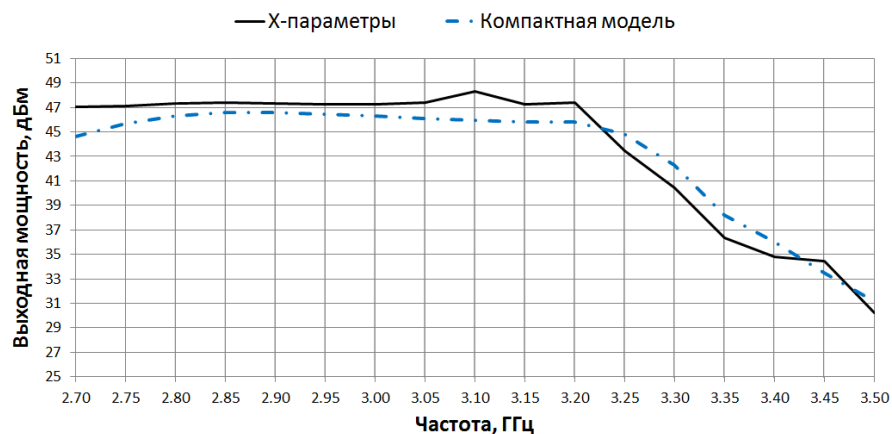


Рис. 2. Сравнение АЧХ полученной из X-параметров и АЧХ компьютерной модели усилителя на основе компактной модели

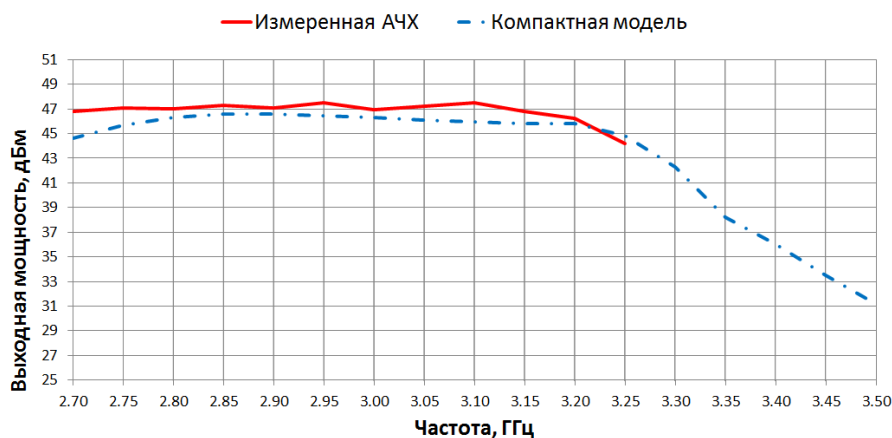


Рис. 3. Сравнение АЧХ измеренного усилителя и АЧХ компьютерной модели усилителя на основе компактной модели

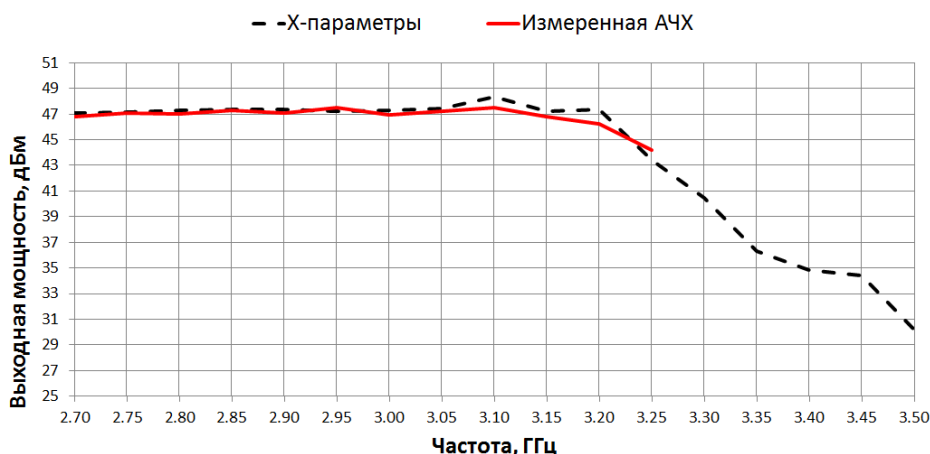


Рис. 4. Сравнение АЧХ полученной из X-параметров и АЧХ измеренного усилителя

Как видно из рис. 2, 3, 4, в рабочем диапазоне частот 2,7-3,2 ГГц измеренная АЧХ и АЧХ полученная из X-параметров совпадают с точностью до 0,5 дБ. Моделирование на основе компактной модели имеет существенное расхождение с результатами измерений. Это может быть обусловлено неполнотой данных в предоставленной компактной модели.

Устройство, исследуемое с помощью X-параметров, так же, как и в случае с S-параметрами, представляет собой «черный ящик», в котором связь между входными и выходными данными формируется с помощью математических функций, систем дифференциальных уравнений и специфических преобразований независимо от внутренней структуры исследуемого нелинейного устройства [3], в данном случае – усилителя. Вследствие чего целесообразно использовать поведенческие модели на основе X-параметров для анализа характеристик разрабатываемых устройств.

Для подтверждения стабильности работы усилителя в требуемом диапазоне частот произведены измерения «горячих» S-параметров. Коэффициент устойчивости вычислялся по формуле [4]:

$$k = \frac{1 - |\hat{S}_{11}|^2 - |\hat{S}_{22}|^2 + |\hat{S}_{11}\hat{S}_{22} - \hat{S}_{12}\hat{S}_{21}|^2}{2|\hat{S}_{12}\hat{S}_{21}|}$$

На рис.5, 6 представлены результаты измерений коэффициента устойчивости:

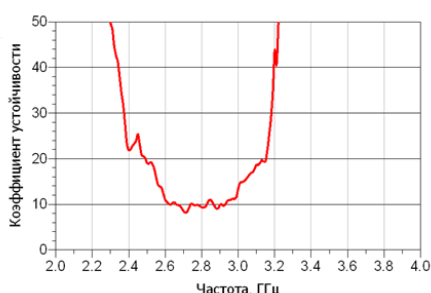


Рис. 5. Коэффициент устойчивости при отсутствии большого сигнала на входе усилителя

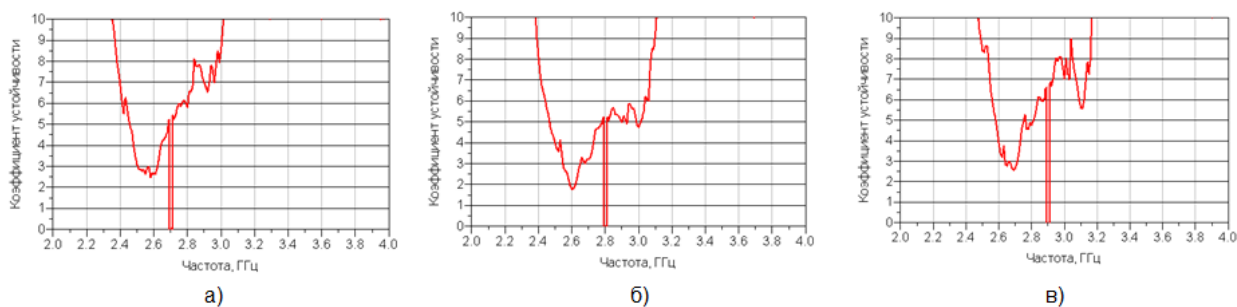


Рис.6. Коэффициент устойчивости при входной мощности большого сигнала 34 дБм:  
а) на частоте 2,7 ГГц, б) на частоте 2,8, ГГц в) на частоте 2,9 ГГц.

Как видно из рис. 5, 6, исследуемый усилитель мощности показывает устойчивое поведение в рабочем диапазоне частот и за его пределами. Зоны неустойчивости на частотах 2,7 ГГц, 2,8 ГГц, 2,9 ГГц и небольшой диапазон частот вокруг них, обусловлены методом измерения и связаны с избирательностью приемников, которые анализируют не только малый сигнал на этих частотах, но и сумму малого и большого сигнала, что приводит к некорректности расчетов коэффициента устойчивости в этих точках. Соответственно, результаты, полученные в этих точках, не говорят о неустойчивой работе усилителя.

В данной работе приведено сравнение АЧХ усилителя: полученных на основе математической модели X-параметров, на основе компактной модели транзистора и АЧХ, снятой с исследуемого усилителя обычным способом. По результатам сравнения установлено, что поведенческая модель усилителя мощности на основе X-параметров достаточно точно совпадает с результатами реальных измерений АЧХ усилителя мощности. Согласно полученным результатам можно заключить, что целесообразно использовать X-параметры в процессе разработки СВЧ усилителей мощности. Приведены результаты исследования усилителя на устойчивость с использованием метода «горячих» S-параметров.

#### Библиографический список

1. Root D.E., Horn J., Betts L., Gillease 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. О.А. Адоньев, Д.В. Котов, А.В. Плутешко, А.А. Блинников, А.В. Зайцев, П.В. Маслов, Методика измерений X-параметров мощного СВЧ-усилителя S-диапазона, Известия высших учебных заведений России «Радиоэлектроника», 2016, с. 69-71
3. А.А. Коколов, Ф.И. Шеерман, Л.И. Бабак, Обзор математических моделей СВЧ полевых транзисторов с высокой подвижностью электронов, Доклады ТУСУРа, №2, 2010, с. 118-123
4. Jan Verspecht, Denis Barataud, Jean-Pierre Teyssier and Jean-Michel Nébus, Hot S-Parameter Techniques:  $6 = 4 + 2$ , Conference Record of the 66th ARFTG Conference Washington, 2005.