

# Создание библиотеки s2p-моделей мощных СВЧ транзисторов средствами автоматизированного проектирования или натурального эксперимента

В.И. Евсеев<sup>1</sup>, А.А. Крылов<sup>2</sup>, Е.А. Лупанова<sup>3</sup>, С.Л. Моругин<sup>3</sup>, С.М.Никулин<sup>1,3</sup>, В.В.Петров<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ООО «Арзамасское приборостроительное конструкторское бюро»

<sup>2</sup>Компания «Кейсайт Технолоджиз» г. Нижний Новгород

<sup>3</sup>Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

**Аннотация:** в данной работе обсуждаются два способа создания библиотеки s2p-моделей мощных СВЧ транзисторов в пространстве различных режимов питания по постоянному току, частоты и мощности входного сигнала. Модели получают в режиме согласования транзистора с источником входного сигнала и максимального значения мощности в стандартной 50-омной нагрузке либо методом гармонического баланса на основе выбранной схемной нелинейной модели транзистора, либо натурным экспериментом по результатам измерений S-параметров в режиме большого сигнала. В обоих случаях s2p-модели получают методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Библиотека позволяет проектировать конструкции выходных каскадов транзисторных усилителей средствами линейного анализа и оптимизации электрических цепей.

**Ключевые слова:** Мощные СВЧ транзисторы, s2p-модели, настраиваемые полосковые согласующие цепи, метод пространственно удаленной переменной нагрузки, метод гармонического баланса.

## 1. Введение

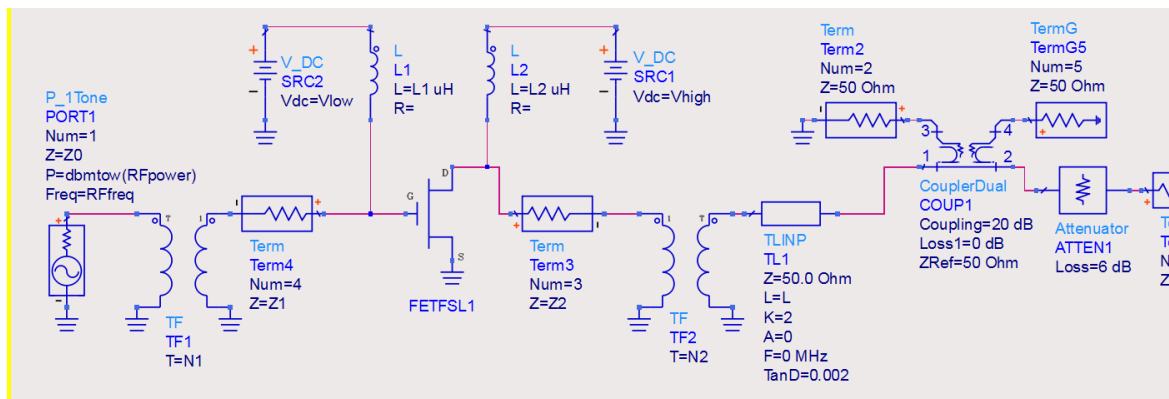
В практике разработки выходных каскадов транзисторных усилителей СВЧ мощности используют трудоемкую и дорогую процедуру создания нелинейных моделей транзисторов на основе измерений вольт-амперных и вольт-фарадных характеристик, а также линейных S-параметров при различных значениях питающих напряжений. Причем измерения S-параметров в режиме согласования транзистора с источником сигнала и нагрузкой выполняют с помощью коаксиальных тюнеров импеданса и контактных устройств для монтажа прибора в полосковую линию низкого волнового сопротивления [1,2]. Такой подход к моделированию малоэффективен, а в случае, когда транзистор усиливает импульсные сигналы или работает в сильно нелинейном режиме, как, например, в парафазном каскаде усиления, почти бесполезен.

В докладе предлагается альтернативное решение, адаптированное к работе транзистора в реальных условиях и позволяющее проектировать выходные каскады усилителей СВЧ мощности средствами анализа и оптимизации линейных электрических цепей. Суть предлагаемого решения состоит в создании библиотеки s2p-моделей мощных СВЧ транзисторов в пространстве различных режимов питания по постоянному току, частоты и мощности входного сигнала. Как и в известной концепции X-параметров [3], библиотека строится либо с помощью схемной нелинейной модели транзистора средствами автоматизированного проектирования, либо средствами СВЧ измерений с реальным прибором. Причем в случае натурального эксперимента модели можно строить в пространстве импульсных входных сигналов разной длительности и скважности. Отличие от X-параметров состоит в том, что s2p-модели описывают поведение транзистора в диапазоне частот в пространстве амплитуд непрерывного или импульсного входного сигнала и питающих напряжений только по основному тону. Зависимость S-параметров от импеданса нагрузки не

выявляется и не требуется, поскольку модель получают при условии согласования входной и выходной цепи транзистора на соответствующей частоте.

## 2. Создание моделей средствами автоматизированного проектирования

Упрощенная схема, с помощью которой получают  $s_2p$ -модели транзистора в САПР Advanced Design System методом гармонического баланса в режиме пространственно удаленной переменной нагрузки, показана на рисунке 1.

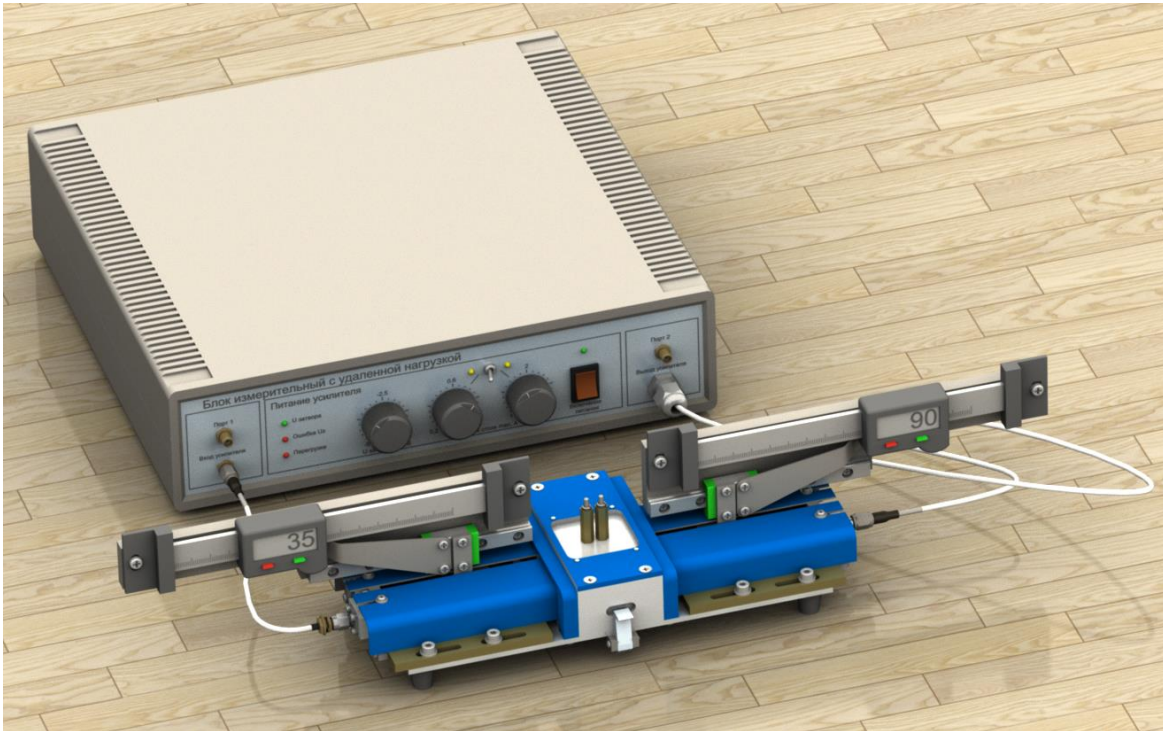


**Рисунок 1.** Упрощенная схема для получения  $s_2p$ -модели транзистора в САПР Advanced Design System

К затвору и стоку транзистора подключены две согласующие цепи, каждая из которых состоит из идеального трансформатора TF и реактивного импеданса Term. К выходной согласующей цепи подключена удаленная переменная нагрузка, состоящая из длинной линии TLINP, направленного ответвителя Coupler Dual со вторым портом Term2, 6дБ аттенюатора Attenuator и оконечной нагрузки Term5, принимающей значение  $Z=Z_3=50$  Ом и  $Z=0$  (режим короткого замыкания) или  $\gg 50$  Ом (режим холостого хода). На транзистор подают напряжения питания по постоянному току  $V_{low}$  и  $V_{high}$ . В первом порту устанавливают заданную величину мощности входного сигнала. Анализ выполняют методом гармонического баланса по основному тону. С помощью двух переменных: - коэффициента трансформации  $N_1$  и реактивного импеданса  $Z_1$  в режиме с согласованной удаленной нагрузкой  $Z_3=50$  Ом получают минимальное значение коэффициента отражения  $S_{11}$  от первого порта на заданной частоте входного сигнала. Затем, варьируя коэффициент трансформации  $N_2$  и реактивный импеданс  $Z_2$  выходной согласующей цепи, получают максимальное значение коэффициента передачи  $S_{21}$ . Параметры рассеяния транзистора с согласующими цепями получают в частотном окне в окрестности заданной частоты методом пространственно удаленной переменной нагрузки [4,5]. Обратный коэффициент передачи  $S_{12}$  и коэффициент отражения  $S_{22}$  имеют вид квазигармонических комплексных функций частоты. Искомые значения этих параметров восстанавливают с помощью минимаксного сглаживающего алгоритма фильтрации данных. Затем выполняют процедуру экстракции согласующих цепей. Полученные S-параметры транзистора на центральной частоте частотного окна записывают в строку  $s_2p$ -модели, после чего описанную процедуру определения S-параметров транзистора выполняют в новом частотном окне. После завершения формирования  $s_2p$ -модели при заданных питающих напряжениях и заданной мощности входного сигнала, получают другую  $s_2p$ -модель транзистора при измененной мощности входного сигнала или новых значениях питающих напряжений.

### 3. Создание моделей средствами натурального эксперимента

Формирование библиотеки  $s_{2p}$ -моделей транзистора средствами натурального эксперимента выполняют с помощью автоматизированной установки, состоящей из векторного анализатора цепей с доступом к измерительным приемникам, измерительного блока с удаленной нагрузкой, измерительного усилителя с настраиваемыми полосковыми согласующими цепями, источника питания и измерителя СВЧ мощности с аттенуатором. Фрагмент измерительной системы показан на рисунке 2.



**Рисунок 2.** Фрагмент измерительной системы для определения  $s_{2p}$ -моделей СВЧ транзистора методом пространственно удаленной переменной нагрузки

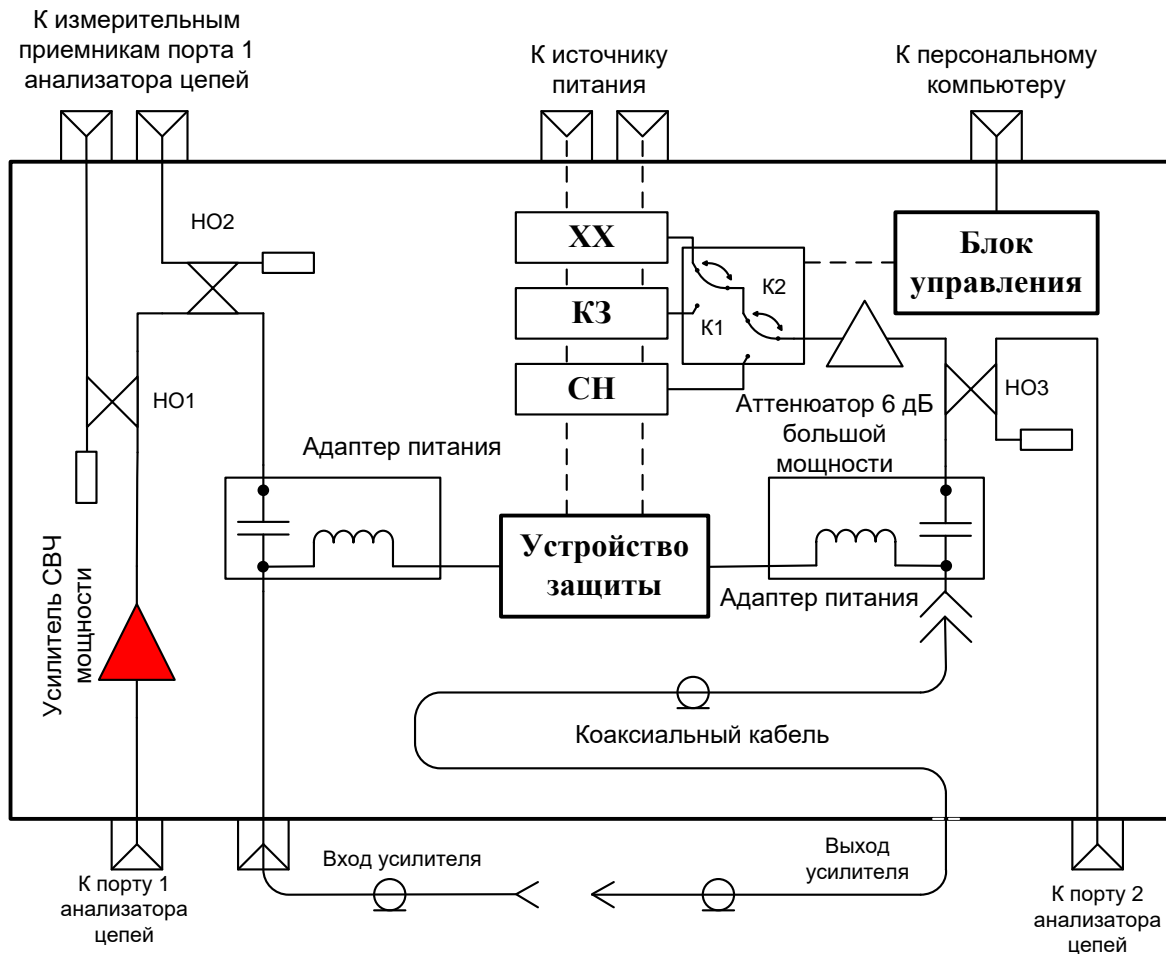
Электрическая схема измерительного блока с пространственно удаленной переменной нагрузкой приведена на рисунке 3. Блок содержит усилитель СВЧ мощности, направленные ответвители, адаптеры питания, электрически длинный коаксиальный кабель, бДБ мощный аттенуатор, коммутатор, нагрузку короткого замыкания, холостого хода, согласованную нагрузку, блок управления и устройства защиты.

Измерительная система работает в четырех режимах: 1 – измерение коэффициентов отражения от пространственно удаленной переменной нагрузки; 2 – калибровка по коэффициенту отражения и коэффициенту передачи; 3 – калибровка по мощности входного сигнала; 4 – измерение  $S$ -параметров измерительного усилителя.

В первом режиме первый порт анализатора цепей подключают к удаленной нагрузке («выход усилителя») и измеряют коэффициенты отражения в заданном диапазоне частот с заданным шагом в режиме короткого замыкания, холостого хода и согласования.

Во втором режиме первый и второй порты анализатора цепей подключают соответственно к первому и второму порту измерительного блока, соединяют напрямую соединительные кабели измерительного блока и в автоматическом режиме выполняют калибровку.

В третьем режиме разъединяют кабели и подключают к кабелю «вход усилителя» измеритель мощности с аттенуатором.



**Рисунок 3.** Схема электрическая блока измерительного с пространственно удаленной переменной нагрузкой

В четвертом режиме между соединительными кабелями устанавливают измерительный усилитель с анализируемым транзистором. Библиотеку s2p-моделей мощных СВЧ транзисторов в пространстве различных режимов питания по постоянному току, частоты и мощности входного сигнала формируют по результатам измерения S-параметров методом удаленной переменной нагрузки [4,5] в заданных частотных окнах в режиме минимального значения коэффициента отражения S11 и максимального коэффициента передачи на центральных частотах каждого окна.

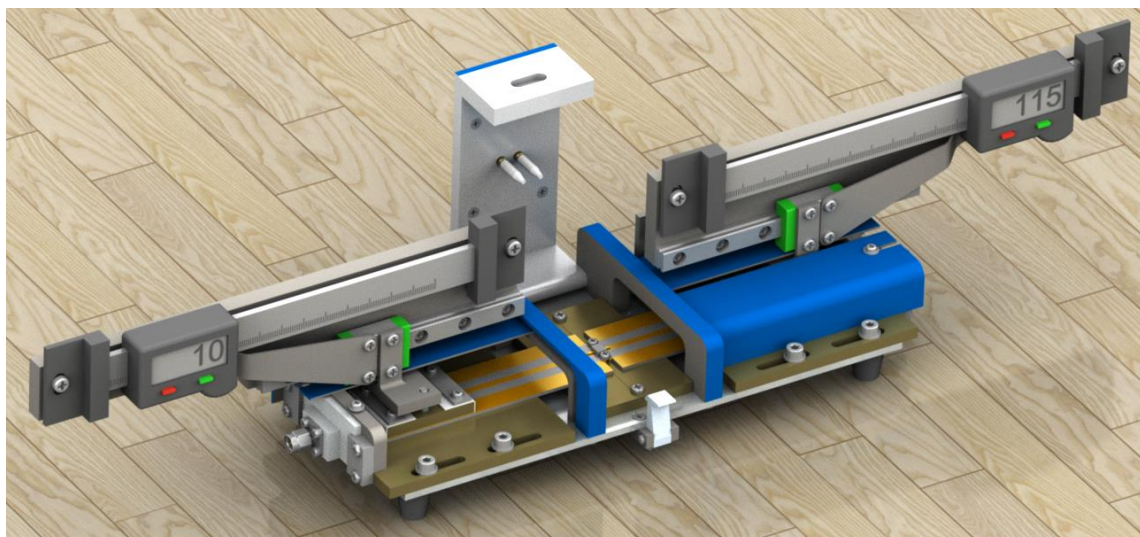
В цепи питания усилителя применена схема защиты, которая обеспечивает снятие напряжения со стока измеряемого транзистора в случаях:

- превышения допустимого тока стока;
- пропадания или снижения отрицательного напряжения на затворе;
- остановки вентиляторов системы охлаждения.

Время срабатывания защиты по току и напряжению затвора порядка 10 мкс. Значение допустимого тока стока может быть установлено в пределах от 300 мА до 3А, а порог срабатывания защиты по напряжению на затворе – от минус 6 до минус 2 В.

Идея построения измерительного усилителя с настраиваемыми согласующими цепями обсуждалась в работе [6]. Принципиальное отличие предлагаемой конструкции усилителя, показанной на рисунке 4, состоит в ее универсальности и

возможности определения S-параметров транзистора относительно его физических границ в процессе измерений с автоматической регистрацией положения согласующих устройств с известными параметрами в полосковых линиях. Конструкция адаптирована к различным типоразмерам корпусов транзисторов за счет замены деталей, обеспечивающих контакт их ленточных проводников с полосковой линией.



**Рисунок 4.** Внешний вид измерительного усилителя с настраиваемыми согласующими цепями

#### 4. Заключение

**Создание** библиотеки s2p-моделей мощных СВЧ транзисторов в пространстве различных режимов питания по постоянному току, частоты, формы и мощности входного сигнала позволит существенно упростить и удешевить аппаратные средства автоматизированного проектирования мощных каскадов транзисторных усилителей. Существенно, что решение задачи натурным экспериментом открывает уникальные возможности построения моделей транзисторов в режиме усиления импульсных сигналов, а также транзисторных пар в парафазном режиме работы.

#### Список литературы

1. Understanding the Relevance of Harmonic Impedance Matching in Amplifier Design. // Steve Dudkiewicz, Marc Schulze Tenberge and Giampiero Esposito, Maury Microwave Corp., Ontario, Calif.; Travis Barbieri, Freescale Semiconductor, Phoenix, Ariz.- April 14, 2015.
2. Takayama, Y. A new load-pull characterization method for microwave power transistors. // In 1976 IEEE-MTT-S International Microwave Symposium. Cherry Hill (NJ, USA), 1976, p. 218 – 220.
3. Vye D. X-Parameters, S-Functions, Polyharmonic Distortion Models, Waveform Engineering, Hot S-22, NonLin-S, Active Harmonic Load Pull, NVNA, OpenWave Forum. Nonlinear Device Characterization // Microwave Journal, March 2009. pp. 24 - 36.
4. Никулин С.М., Торгованов А.И. Измерение S-параметров нелинейных СВЧ цепей методом пространственно удаленной переменной нагрузки. Датчики и системы, №11, 2014, с. 27-33.
5. Никулин С.М., Торгованов А.И. Проектирование усилителей СВЧ мощности. Эффективность метода удаленной переменной нагрузки. // Электроника. Наука, технология, бизнес, №3, 2015, с. 60-65.
6. Евсеев В.И., Лупанова Е.А, Куликов А.Б., Никулин С.М., Петров В.В. Измерительные усилители и техника определения большесигнальных S-параметров СВЧ транзисторов. // Электроника и микроэлектроника СВЧ. Санкт-Петербургский электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), том 1, 2018, с. 282 -286.