

Виртуальный измерительный комплекс для исследования малосигнальных усилителей сверхвысоких частот с автоматизированным вводом исходных данных

И. С. Пастушенко, А. Д. Тупицын
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)

Аннотация. Приёмопередатчики (трансиверы) диапазона сверхвысоких частот (СВЧ) широко используются в современном мире, начиная с промышленного и заканчивая различными бытовыми применениями. Это требует использования целого набора методов и средств моделирования, разработки и исследования таких устройств – от различных программ моделирования и до методов физического исследования реальных объектов. Существует также отдельная группа методов и средств моделирования – имитационное моделирование. В качестве объекта исследования в статье рассматривается усилитель малого сигнала диапазона СВЧ – важная часть приёмопередатчика. Для его исследования методами имитационного моделирования используется виртуальный измерительный комплекс, реализованный в среде LabView. Автоматизированный программный модуль ввода S-параметров позволяет изменять режимы усилителя по постоянному току (рабочую точку) непосредственно в процессе исследования. Для данного типа транзистора рабочая точка определяется набором S-параметров, выбранным в соответствии с установленными напряжением и током питания усилителя.

Ключевые слова: имитационное моделирование; виртуальный измерительный комплекс; рабочая точка; малосигнальный усилитель СВЧ

I. ВВЕДЕНИЕ

В современном мире чрезвычайно широко применяются различные каналы связи. Передаваемая с их помощью информация чрезвычайно разнообразна и используется для различных целей – для управления производственными процессами, на транспорте и в медицине, в различных видах связи, в том числе в мобильной телефонии, в компьютерных сетях и даже в быту. Общим для большинства таких каналов связи является использование сверхвысокочастотных диапазонов и обеспечиваемая благодаря их использованию мобильность в самом широком смысле этого слова. Чрезвычайно важным звеном каждого такого канала связи являются приёмопередатчики, которые, в зависимости от назначения канала связи, должны соответствовать различным и весьма жёстким требованиям. Это в свою очередь предъявляет жёсткие требования к разработке подобных устройств. При этом используются различные методы и

средства моделирования и проектирования, включая средства, так называемого, имитационного моделирования.

В качестве объектов разработки и исследования в данной статье рассматриваются малосигнальные транзисторные усилители СВЧ, представляющие собой важную часть любого приёмопередатчика, для исследования которых применяется виртуальный измерительный комплекс, реализованный в программной среде LabView. В противоположность физическим установкам он обладает несравнимо меньшей стоимостью и определёнными достоинствами при использовании. Например, гарантирует от выхода из строя объекта исследования, не требует высокой квалификации пользователя и позволяет гибко изменять условия проведения исследования. В сравнении со специализированными программами, интерфейс которых ориентирован, прежде всего, на решение задач синтеза, программы имитационного моделирования могут иметь интерфейсы, имитирующие работу с реальными измерительными приборами – иметь в этом смысле более «дружественный» интерфейс. Это позволяет использовать подобные виртуальные измерительные комплексы также в образовательном процессе, при повышении квалификации специалистов, в том числе – в дистанционном режиме обучения.

II. МЕТОДЫ

В [1] описан виртуальный измерительный комплекс, реализованный в среде LabView, позволяющий производить исследования транзисторных усилителей сверхвысоких частот на основе микрополосковых линий в режиме малого сигнала методами имитационного моделирования. На экране компьютера визуализируются измерительные приборы и объект исследования.

Для виртуализации исследуемого усилителя используется метод декомпозиции [2], с помощью которого принципиальная схема усилителя разбивается на цепь последовательно включенных четырёхполюсников, описываемых соответствующими матрицами, приводимыми к одному виду с последующим перемножением и преобразованием для получения матрицы рассеяния S всего усилителя. На лицевой панели векторного анализатора микроволновых цепей виртуального измерительного комплекса располагаются органы управления, управляющие режимами рабо-

ты, и экран для индикации полученных результатов в виде частотных зависимостей S -параметров. Также имеются элементы для ввода параметров каждой из микроволновых линий, образующих усилитель, и для ссылки на файл S -параметров активного элемента усилителя – транзистора. Данные параметры описывают транзистор для фиксированных значений токов и напряжений питания и могут не соответствовать интересующим значениям. Для проведения исследований в таких ситуациях можно использовать механизмы интерполяции массивов S -параметров.

В [3] описан вариант виртуального источника питания – интерполятор файлов S -параметров. По задаваемому пользователем пути он обращается к папкам, содержащим файлы S -параметров активного элемента усилителя, считывает и интерполирует их, создавая новый файл для заданного тока и напряжения питания. Данный источник не интегрирован в состав виртуального измерительного комплекса и используется как отдельная программа для генерации файлов S -параметров путём интерполяции для требуемых токов питания. Он требует ручного выбора исходных файлов для нужного напряжения питания. Передача данных для работы измерительного комплекса, полученных в результате интерполяции файлов, осуществляется путём записи S -параметров в файл с последующим считыванием его при работе виртуального измерительного комплекса. Это существенно замедляет работу и в ряде случаев приводит к ошибкам в работе программ, особенно при переносе с одного компьютера на другой.

Кроме того, источник, описанный в [3] не позволяет полностью «задать» режим работы исследуемого усилителя. Для этого требуется использование двух программно связанных источников, позволяющих «зафиксировать» ток коллектора (стока) активного элемента усилителя при произвольном напряжении его коллекторного (стокового) питания.

В данной статье описан виртуальный измерительный комплекс для исследования малосигнальных усилителей сверхвысоких частот с автоматизированным вводом исходных данных, содержащий векторный анализатор микроволновых цепей с подключённым объектом исследования, а также два источника питания с органами управления выходными напряжениями и токами и устройствами их индикации. Источники питания, в отличие от описанных в [3], позволяют эмулировать работу измерительного комплекса в реальном времени, автоматизированно выбирая файлы S -параметров для любых устанавливаемых органами управления источников токов и напряжений питания, в том числе для тех, для которых отсутствуют файлы S -параметров. При этом параметры усилителя задаются физическими размерами линий передачи, на основе которых он создан и параметрами печатной платы (подложки), такими, как толщина, диэлектрическая проницаемость, потери.

Упрощённая схема исследуемого усилителя приведена на рис. 1. Она содержит источник сигнала с внутренним сопротивлением Z_{SOURCE} , нагрузку с сопротивлением Z_{LOAD} , линии передачи $L0 – L9$, разделительные конденсаторы $C1 – C4$, транзистор VT , а также источники тока и

напряжения, питающие усилитель. Линии передачи $L0 – L9$ – подводящие и имеют волновые сопротивления, равные волновым сопротивлениям источника и нагрузки, равное 50 Ом. Конденсаторы $C1 – C4$ имеют емкости, не оказывающие влияния на частотные зависимости параметров усилителя в диапазоне сверхвысоких частот. Линии передачи $L7, L9$ являются элементами, отображающими идеальные фильтры питания, и не оказывают влияния на параметры усилителя.

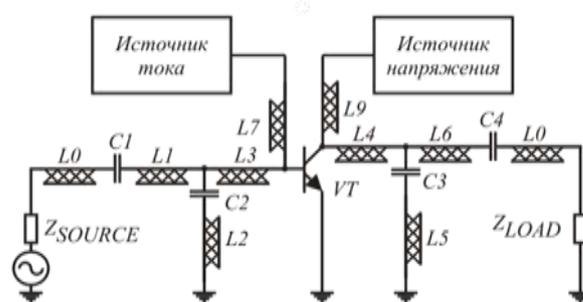


Рис. 1. Упрощённая принципиальная схема исследуемого усилителя

Лицевая панель виртуального измерительного комплекса, отображаемая на экране компьютера, изображена на рис. 2. В левой части расположены одинаковые источники питания 1 и 15, работающие в разных режимах и обеспечивающие требуемый режим работы объекта исследования виртуального измерительного комплекса. Источник 1 работает в режиме стабилизации напряжения питания активного элемента (коллекторного для биполярного транзистора, стокового для полевого). При этом переключатель-индикатор 3 С. V. (Constant Voltage – постоянное напряжение) меняет цвет отображения на красный.

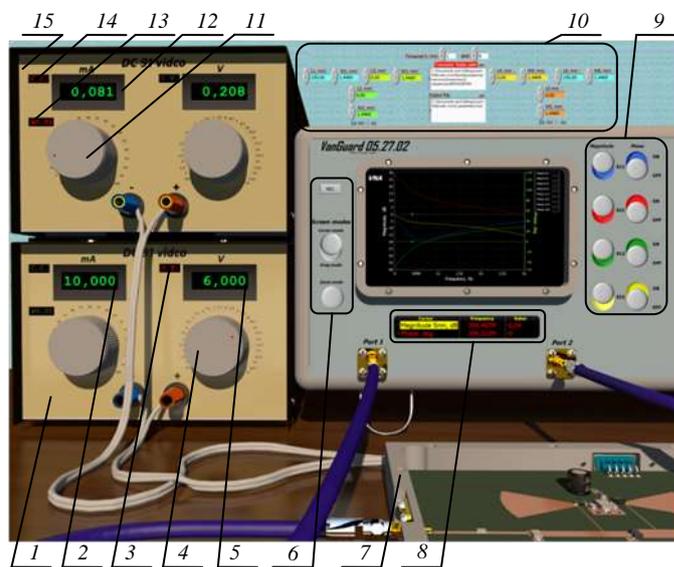


Рис. 2. Внешний вид виртуального измерительного комплекса

Источник 15 работает в режиме стабилизации тока базы, определяя рабочую точку усилителя, о чём свидетельствует красный переключатель-индикатор С. С. (Constant Current; в данном случае – неизменный ток) 14. Источники

имеют одинаковые регуляторы выходных токов – 11 для верхнего и аналогичный для нижнего, а также регулятор напряжения 4 для нижнего источника и аналогичный для верхнего. Выходные ток и напряжение нижнего источника – ток и напряжение питания коллекторной цепи транзистора VT – отображаются индикаторами 2 и 5 соответственно. Индикатор тока 12 отображает значение тока базы транзистора, а переключатель 13 $\times 0,01$ свидетельствует от режиме «точной» регулировки тока (от 0 до 1 мА).

Элементы управления 6 векторного анализатора микроволновых цепей VNA (Vector Network Analyzer) определяют режим работы его экрана – управление курсорами для считывания данных с полученных зависимостей, масштабирование изображения. Индикаторная панель 8 отображает положения курсоров по горизонтали и вертикали в единицах измерения кривых на экране. Курсоры перемещаются по экрану манипулятором «мышь».

С помощью коаксиальных кабелей, подключённых к Порту 1 и Порту 2 на лицевой панели векторного анализатора, последний соединён с исследуемым усилителем 7.

Группа переключателей 9 управляет отображаемыми на экране кривыми. В зависимости от положений переключателей могут отображаться частотные зависимости $|S_{11}|$, $|S_{21}|$, $|S_{12}|$, $|S_{22}|$, а также зависимости фаз данных S -параметров в произвольных сочетаниях.

Органы управления 10 используются для конфигурирования параметров исследуемого усилителя и электрических режимов его работы путём выбора соответствующих наборов файлов S -параметров для выбранного транзистора. Здесь расположены приборы ввода данных LabView для определения длин L и ширин W линий передачи L1 – L6. Они расположены в виде T-образных цепей на входе и выходе транзистора, аналогичных тому, как это изображено на рис. 1 для групп линий передачи L1, L2, L3 и L4, L5, L6. Исключение любой линии из схемы усилителя осуществляется путём задания нулевой длины для данной линии. На рис. 1 линии L2 и L5 нагружены на короткое замыкание. Режим нагрузки можно изменить с помощью расположенных рядом с соответствующими приборами ввода переключателями K3 – XX (короткое замыкание – холостой ход). К органам управления 10 также относятся приборы ввода-вывода LabView для формирования путей к используемым файлам S -параметров и к файлам, в которые записываются результаты измерений. В этой группе органов управления имеются также приборы ввода параметров диэлектрической подложки (печатной платы).

Работа с виртуальным измерительным комплексом осуществляется следующим образом. Прежде всего, с помощью приборов группы 10 ввода-вывода LabView задаётся путь к папке требуемого набора S -параметров, что соответствует выбору типа транзистора. Далее задаются диэлектрическая проницаемость подложки, толщина её материала и потери. Затем формируются топологические элементы усилителя – задаются длины и ширины отрезков линий, из которых состоит усилитель.

После запуска программы, например, в режиме непрерывной работы, с помощью регулятора 4 устанавливается требуемое напряжение питания. Индикатор напряжения 5

при этом будет отображать только значения доступных напряжений питания усилителя, которые и будут «подаваться» на усилитель. Регулятором 11 можно изменять ток базы транзистора и, соответственно, коллектора транзистора VT в режиме реального времени, наблюдая изменения отображаемых на экране зависимостей. При вращении регулятора 11 манипулятором «мышь» наблюдают за значением коллекторного тока с помощью индикатора 2 до достижения требуемого значения.

При выполнении описанных манипуляций программные модули источников питания виртуального измерительного комплекса осуществляют обращение к указанной папке с S -параметрами и анализируют её содержимое, определяя общее количество файлов, напряжения и токи, для которых имеются файлы. Затем, в зависимости от установленного выходного напряжения источника 1, считываются файлы, соответствующие данному напряжению, сортируются и интерполируются по току. После чего из интерполированных массивов осуществляется выборка значений S -параметров, соответствующих установленному с помощью источника 15 току питания усилителя. Производится формирование нового массива S -параметров, который поступает на программные модули векторного анализатора микроволновых цепей, подробно описанные в [1]. После чего цикл повторяется, что создаёт возможность работы в режиме реального времени.

Следует отметить, что в режиме непрерывной работы комплекса можно менять не только токи и напряжения питания, но и топологические размеры усилителя, а также изменять параметры подложки и тип транзистора.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве примера работы виртуального измерительного комплекса приводятся некоторые результаты исследования широкополосного усилителя малого сигнала диапазона 200...900 МГц с применением биполярного транзистора BFR90, обеспечивающего при токе питания 6 мА коэффициент усиления около 10 дБ. На рис. 3 представлен скриншот экрана векторного анализатора виртуального измерительного комплекса, на котором для удобства сопоставления совмещены зависимости $|S_{21}|$ для четырёх значений токов коллектора при напряжении питания 5 В.



Рис. 3. Зависимости S_{21} усилителя от токов коллектора

Здесь 1 – зависимость для тока 10 мА, 2 – зависимость для тока 6 мА, 3 – зависимость для тока 4 мА, 4 – зависимость для тока 2 мА. Кривые 2 и 3 получены с использованием имеющихся массивов S -параметров путём интерполяции. Для интерполяции использовались файлы S -параметров для токов 2, 5, 10, 14 и 20 мА.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный виртуальный измерительный комплекс является логическим развитием виртуальных устройств, описанных в [1] и [3]. Он позволяет производить исследование однотранзисторных малосигнальных усилителей

СВЧ в широком диапазоне токов и напряжений питания и производить оперативные изменения не только числа и параметров ряда пассивных элементов, но и менять активный элемент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Тупицын А.Д. Виртуальный измерительный комплекс для исследования транзисторных усилителей сверхвысокой частоты // Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 6. С. 14–24.
- [2] Никольский В.В., Никольская Т.А. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 304 с.
- [3] <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/papers/240>.