

Пассивные элементы виртуального измерительного комплекса для исследования малосигнальных усилителей сверхвысоких частот

И. С. Пастушенко, А. Д. Тупицын

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

Аннотация. В современных системах и сетях передачи данных различного назначения широко используются приёмопередатчики (трансиверы) диапазона сверхвысоких частот (СВЧ). Они содержат различные устройства – усилители, преобразователи частоты – разработка которых требует не только компьютерного моделирования, но и экспериментальной проверки и настройки. Для этого используются различные измерительные приборы и методы. Например, имитационное моделирование. Для этого разрабатываются программные средства, такие, как виртуальный измерительный комплекс для исследования малосигнальных усилителей СВЧ на основе LabView. Для него в статье описан программный модуль моделирующий ёмкостные элементы схем усилителей. Представлены результаты проверки работоспособности виртуального измерительного комплекса и нового программного модуля, а также сравнения его работы с Microwave Office.

Ключевые слова: имитационное моделирование, виртуальный измерительный комплекс, малосигнальный усилитель СВЧ

I. ВВЕДЕНИЕ

Для создания различных современных сетей передачи данных широко используются различные каналы связи радиочастотного диапазона. Прежде всего – диапазона сверхвысоких частот, благодаря его большой информационной ёмкости. Кроме того, радиоканал как таковой обеспечивает высокую мобильность систем связи. Но чем выше рабочие частоты диапазона, в котором осуществляется обмен информацией, тем сложнее становится процесс разработки и доводки элементов таких каналов связи. Прежде всего – приёмопередатчиков, включая их активные и пассивные элементы. К ним относятся сверхвысокочастотные диоды, биполярные и полевые транзисторы, сосредоточенные элементы, такие, как резисторы, конденсаторы и катушки индуктивности. А также линии передачи с различными свойствами. В малосигнальных усилителях и преобразователях частоты это чаще всего отрезки микрополосковых линий. Сегодня чрезвычайно широко распространены интегральные усилители, содержащие различное число усилительных каскадов и элементов, обеспечивающих режимы их работы. То же относится к преобразователям частоты. Существуют также однокристальные передатчики, приёмники и приёмопередатчики. Но вне зависимости от того, на каких компонентах – дискретных или интегральных – реализовано устройство, в процессе его разработки необходимо проведение макетирования и уточнения его основных параметров. Это связано как с неточностями изготовления элементов, так и с технологическим

разбросом параметров активных и пассивных компонентов. Кроме того, следует учитывать, что с ростом рабочей частоты устройств возрастают паразитные проводимости (ёмкостные) компонентов, что в значительной мере влияет на амплитудно- и фазо-частотные характеристики устройств. Для уточнения параметров используются векторные анализаторы микроволновых цепей, анализаторы спектра и т. п. При этом могут также использоваться различные методы и средства моделирования и проектирования, включая средства имитационного моделирования.

В данной статье рассматривается введение пассивных элементов в схемы исследуемых с помощью виртуального измерительного комплекса [1] для исследования малосигнальных транзисторных усилителей сверхвысоких частот (СВЧ), позволяющего производить исследования усилителей методами имитационного моделирования в широком диапазоне частот и электрических режимов по постоянному току. Измерительный комплекс реализованный в программной среде LabView, обладает значительно меньшей стоимостью, чем соответствующие измерительные приборы, гарантирует от выхода из строя объекта исследования и позволяет изменять условия проведения исследования в широких пределах. Интерфейс виртуального измерительного комплекса позволяет использовать его в образовательном процессе, включая дистанционный режим, так как он имитирует процесс измерения на экране компьютера.

II. МЕТОДЫ

Описанный в [1] виртуальный измерительный комплекс, реализован в среде LabView и позволяет 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.

Внешний вид виртуального измерительного комплекса представлен на рис. 1 и состоит из источников питания 1, объекта исследования 2 и векторного анализатора микроволновых цепей 3.

Выбор типа исследуемого транзистора и его режима по постоянному току осуществляется путём ссылки на файлы S-параметров транзистора с последующей автоматической интерполяцией массивов, режим которой задаётся положениями регуляторов напряжения и тока питания источников питания.



Рис. 1. Внешний вид виртуального измерительного комплекса

Векторный анализатор виртуального измерительного комплекса позволяет производить одновременное измерение четырёх S -параметров отображая их в произвольных сочетаниях на своём экране в формате Re-Im. Также существует возможность экспорта файлов результатов измерений и экспорта топологических параметров цепи.

Для реализации имитационного моделирования объекта применяется метод декомпозиции [2], с помощью которого принципиальная схема усилителя разбивается на цепь последовательно включенных четырёхполюсников, описываемых соответствующими матрицами, приводимыми к одному виду с последующим преобразованием и преобразованием для получения полной матрицы рассеяния S всего усилителя. В данной версии виртуального комплекса моделируемая топология усилителя включала транзистор и расположенные на его входе и выходе Т-образные цепи, состоящие из отрезков микроволновых линий передачи с регулируемыми свойствами. Шлейфы Т-образных цепей могли быть нагружены как на короткое замыкание, так и на холостой ход.

В данной статье в качестве примера рассматривается возможность введения в описанные цепи последовательно включенных конденсаторов – по одному в каждую Т-образную цепь. Конденсаторы при этом оказывают влияние на основные характеристики усилителей (в [1] конденсаторы в схемах также имелись, но предполагалось, что их ёмкости таковы, что они не влияют на параметры усилителя). Усилитель при этом представляется последовательностью четырёхполюсников, приведённой на рис. 2, и состоит из линии передачи $L1$, конденсатора $C1$, тройника $T1$ со шлейфом $L2$, линии $L3$, подключённой к базе (эмиттеру) биполярного транзистора или к затвору (истoku) полевого. Выходная цепь, аналогичная по структуре и состоит из линии $L4$ тройника $T2$ со шлейфом $L5$ линии $L6$. Вход и выход усилителя нагружены согласованными нагрузками сопротивлением 50 Ом.

Чтобы ввести частотно-зависимые ёмкостные сопротивления в схему, представленную на рис. 2, используется подход, описанный в различных литературных источниках, например в [3], когда последовательный конденсатор в эквивалентной двухпроводной линии заменяется его полным сопротивлением Z , включённым между линиями с

волновыми сопротивлениями Z_{v1} и Z_{v2} . Тогда для конденсатора, как четырёхполюсника, можно записать выражения для элементов его матрицы рассеяния: $S11=(Z'+R-1)/\Delta$, $S22=(Z'-R+1)/\Delta$, $S12= S21=2R^{1/2}/\Delta$. Здесь $\Delta= Z'+R+1$, $R=Z_{v2}/Z_{v1}$ и $Z'=Z/ Z_{v1}$.



Рис. 2. Упрощённая структура исследуемого усилителя

Подстановка в указанные формулы выражений для полных сопротивлений конденсаторов позволяет получить следующие промежуточные соотношения для S -параметров конденсатора, как четырёхполюсника:

$$S11 = (-j \frac{1}{2\pi f C} + Z2 - Z1) / (-j \frac{1}{2\pi f C} + Z2 + Z1);$$

$$S22 = (-j \frac{1}{2\pi f C} - Z2 + Z1) / (-j \frac{1}{2\pi f C} + Z2 + Z1);$$

$$S12 = S21 = \frac{2\sqrt{\frac{Z2}{Z1}}}{\frac{1}{Z1} \left(j \frac{-1}{2\pi f C} + Z2 + Z1 \right)}.$$

Полученные выражения для S -параметров позволяют сформировать матрицу рассеяния S . Соотношения для S -параметров содержат комплексные величины и должны быть преобразованы в формат Re-Im, так как используемые версии LabView не позволяют работать с комплексными числами непосредственно и предполагают отдельную обработку действительных и мнимых составляющих. Кроме того, для «вставки» конденсаторов, как четырёхполюсников в цепочки вычислений [1], необходимо преобразовать полученные матрицы рассеяния S в матрицы передачи T . Эти преобразования не приводятся в данной статье ввиду своей громоздкости.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Для отладки и проверки достоверности работы виртуального измерительного комплекса был проведен ряд имитационных моделирований малосигнальных усилителей с различной топологией на основе сверхвысокочастотных транзисторов.

На рис. 3 представлены результаты исследования однотранзисторного усилителя на биполярном транзисторе BFR90 при напряжении питания 6 В и токе питания 10 мА для частотного диапазона 1,2...1,4 ГГц в виде изображений частотных зависимостей S -параметров на экране анализатора микроволновых цепей виртуального измерительного комплекса. В этом случае конденсаторы $C1$ и $C2$ замкнуты накоротко, что достигается заданием их ёмкостей равными 100000 пФ. На рис. 4 представлен тот же усилитель при $C1$ и $C2$ равных 3 пФ.

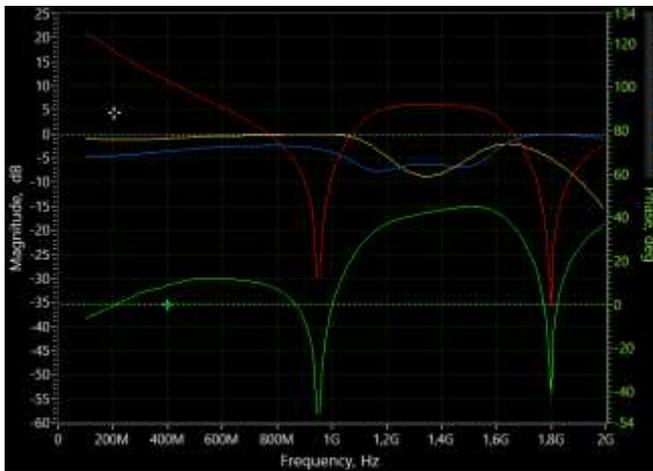


Рис. 3. Зависимости S -параметров усилителя при короткозамкнутых конденсаторах

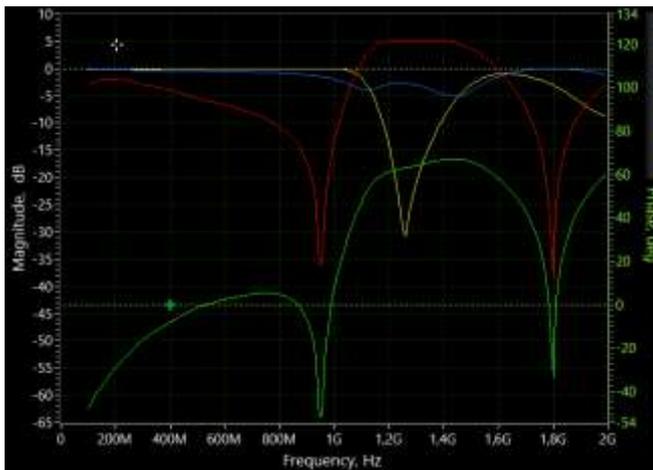


Рис. 4. Зависимости S -параметров усилителя при ёмкостях конденсаторов 3 пФ

На этих рисунках красные кривые представляют зависимости модулей S_{21} усилителей, зелёные – модулей S_{12} , жёлтые – модулей S_{22} , синие – модулей S_{11} .

Структура усилителя соответствует приведённой на рис. 2. Линия L_1 отсутствует, длина L_2 составляет 20,3 мм, ширина 0,56 мм, длина L_3 равна 36 мм, ширина 5,36 мм, длина L_4 равна 10,8 мм, ширина составляет 3,16 мм, длина L_5 равна 37,3 мм, ширина равна 1,36 мм. Линия L_6 отсутствует. Ёмкости конденсаторов C_1 и C_2

составляют 3 пФ. Толщина подложки (платы) равна 1 мм, диэлектрическая проницаемость равна 6.

На рис. 5 приведено сравнение результатов моделирования того же усилителя с использованием виртуального измерительного комплекса и Microwave Office путём сопоставления частотных зависимостей $|S_{21}|$.

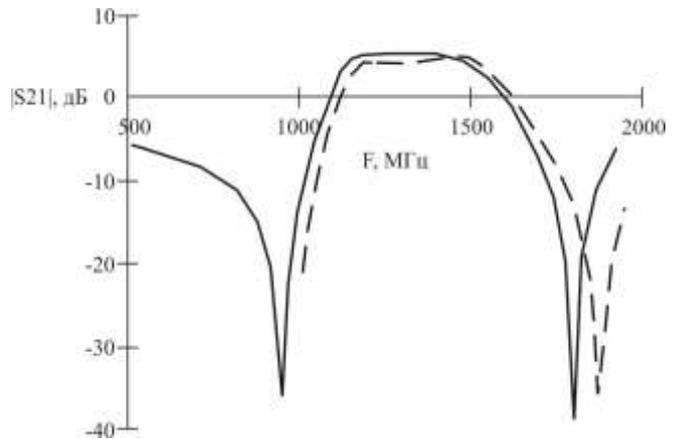


Рис. 5. Сравнение результатов моделирования усилителя с использованием виртуального измерительного комплекса (сплошная кривая) и Microwave Office (пунктирная кривая)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Описанный способ введения сосредоточенных реактивных элементов в состав моделируемых виртуальным измерительным комплексом усилителей позволяет моделировать усилители, содержащие не только ёмкостные, но и индуктивные элементы. Кроме того, имеется возможность введения в схемы резистивных элементов, что позволяет лучше оценивать и эффективно контролировать устойчивость моделируемых усилителей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] <https://conf-ntores.etu.ru/assets/files/2020/cp/papers/240>.
- [2] Никольский В.В., Никольская Т.А. Декомпозиционный подход к задачам электродинамики. М.: Наука, 1983. 304 с.
- [3] Справочник по расчёту и конструированию СВЧ полосковых устройств / С.И. Бахарев, В.И. Вольман, Ю.Н. Либ. и др.; Под ред В.И. Вольмана. М.: Радио и связь, 1982.