

# Технологии автоматизированного проектирования усилителей мощности передающих устройств в инструментальной среде AWR MICROWAVE OFFICE

Карякин В.Л., Карякин В.В., ПГУТИ, г. Самара

## 1. Введение

В последнее время разработаны и продолжают совершенствоваться информационные технологии автоматизированного проектирования радиопередающих устройств.

Актуальность исследования определяется, прежде всего, возможностями информационных технологий в повышении качества и надежности разрабатываемых устройств, сокращении сроков проектирования.

В разрабатываемых усилителях мощности повышение качества и сокращение сроков проектирования достигается благодаря применению более совершенных компьютерных моделей на высоких и сверхвысоких рабочих частотах, внедрению новых информационных технологий анализа и оптимизации, автоматизации процесса проектирования и использованию зарубежной элементной базы.

Методики проектирования радиопередатчиков на отечественной элементной базе наиболее полно изложены в книгах под ред. Г.М. Уткина, В.Н. Кулешова и М.В. Благовещенского; В.В. Шахгильдяна; О.А. Челнокова, а также М.А. Сиверса, Г.А. Зейтленка, Ю.Б. Несвижского и др. авторов. Однако данные методики не позволяют в полной мере реализовать возможности зарубежной элементной базы, а также не ориентированы на компьютерное моделирование и автоматизацию проектирования.

## 2. Технологии автоматизированного проектирования

Эффективным способом решения задач автоматизации проектирования передатчиков является использование инструментальной среды AWR Microwave Office (AWR MWO) [1-5].

Используемые до настоящего времени системы проектирования СВЧ-оборудования компаний Hewlett-Packard, Ansoft, Eagleware, были разработаны в 70-80-х гг. прошлого века и предназначались для работы в ОС UNIX, лишь затем адаптированы для Windows. Как следствие, известные пакеты программ HP Advanced Design System, Momentum, Maxwell EM, HFSS, Microwave Explorer, Serenade, GENESYS, IE3D уступают по производительности в работе с Windows пакету AWR MWO.

Первую версию системы проектирования СВЧ устройств AWR MWO компания Applied Wave Research (AWR) представила в 1998 г.

AWR изначально ориентировалась на ОС Windows, использовала объектно-ориентированное программирование, что позволило создать программный продукт оптимальный во многих отношениях: высокопроизводительный, доступный в использовании, с высокой степенью интеграции.

Инструментальная система AWR MWO написана на объектно-ориентированном языке C++ и может легко адаптироваться для ре-

шения новых прикладных задач, в частности, для автоматизации проектирования усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств.

Одной из задач работы, проводимой в рамках "Лаборатории автоматизированного проектирования инфокоммуникационных систем и устройств" [6] Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ), являлась автоматизация проектирования усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств на биполярных транзисторах с использованием инструментальной среды AWR Microwave Office.

## 3. Результаты исследований

При решении данной задачи получены следующие результаты [7] исследований:

1. Проведен анализ нелинейных моделей биполярных плоскостных транзисторов и гетеротранзисторов, которые в настоящее время широко применяются при разработке телекоммуникационных устройств.

2. Разработаны информационные технологии анализа и оптимизации усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств на биполярных транзисторах.

3. Разработаны рекомендации по созданию системы автоматизированного проектирования усилителей мощности на основе использования инструментальной среды AWR MWO.

В работе использованы компьютерные методы инструментальной среды AWR MWO, в которой для решения схемотехнических задач содержится два модуля для моделирования линейных и нелинейных схем — Voltaire LS и Voltaire XL. В основе пакета нелинейного анализа Voltaire XL лежит модифицированный метод гармонического баланса для использования в современных программах высокочастотных и сверхвысокочастотных приложений.

## 4. Новизна и практическая ценность исследований

Новизна полученных результатов исследований усилителей мощности с использованием компьютерных методов инструментальной среды AWR MWO заключается в следующем:

- обоснована методика построения статических характеристик транзисторов, динамических характеристик усилителей мощности в диапазонах высоких и сверхвысоких частот, благодаря анализу нелинейных моделей биполярных плоскостных транзисторов и гетеротранзисторов;

- предложена методика проектирования оптимальных нелинейных усилителей мощности на биполярных транзисторах, представляющая собой совокупность разработанных методик исследования влияния параметров схемы усилителя на режимы его работы, оценки оптимального сопротивления нагрузки и сопротивления источника возбуждения, оптимизации цепей согласования и оценки их энергетических характеристик;

- предложена методика анализа и оптимизации широкополосного усилителя мощности на биполярном транзисторе в линейном режиме малого сигнала.

Достоверность результатов, полученных в инструментальной среде AWR Microwave Office, подтверждается результатами экспериментов, проводимых в "Лаборатории автоматизированного проектирования инфокоммуникационных систем и устройств" ПГУТИ на макетах усилителей мощности, выполненных с использованием современных технологий изготовления топологии печатных плат, монтажа элементов и высокоточного измерительного СВЧ оборудования (генераторы стандартных сигналов, измерители комплексных сопротивлений, измерители амплитудно-частотных характеристик, анализаторы спектра).

Адекватность использованных компьютерных моделей транзисторов реальным, подтверждается также результатами экспериментов, проводимых компанией AWR совместно с компаниями разработчиками активных элементов, а также результатами тестирования пакета программ AWR Microwave Office зарубежными компаниями разработчиками телекоммуникационных систем и устройств.

Результаты работы имеют существенное значение для отрасли телекоммуникаций, заключающееся в повышении качества и надежности разрабатываемых устройств, сокращении сроков проектирования.

Предложенные методики проектирования оптимальных нелинейных усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств, методика анализа и оптимизации широкополосного усилителя мощности в линейном режиме малого сигнала с использованием инструментальной среды AWR Microwave Office представлены в виде алгоритмов и программ, зарегистрированных в Отраслевом фонде алгоритмов и программ Федерального агентства по образованию.

## 5. Этапы исследований

5.1. На первом этапе исследований приводится анализ моделей биполярных плоскостных транзисторов ВJT и гетеротранзисторов НВТ (рис.1), которые в настоящее время широко применяются при разработке телекоммуникационных устройств.

В частности, рассматриваются нелинейные модели биполярных транзисторов, адекватно описывающие их динамику в диапазонах высоких и сверхвысоких рабочих частот. Отмечается, что выбор транзистора в базе данных инструментальной среды AWR MWO, исходя из технических характеристик, автоматически определяет вид модели, которая наиболее адекватно описывает процессы, происходящие в нем.

Каждая из анализируемых моделей позволяет достаточно точно

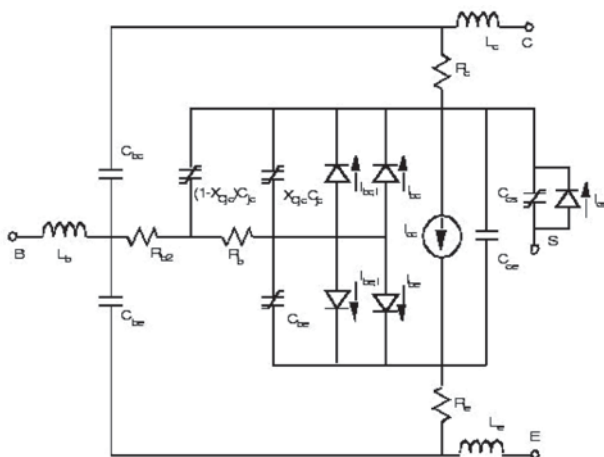


Рис. 1. Модель транзистора технологии НВТ в инструментальной среде AWR MWO

провести исследование динамических свойств биполярного транзистора на рабочих частотах, учитывая при этом специфику его статических характеристик.

Приводится классификация SPICE-параметров, являющихся составной частью математической модели транзистора в AWR MWO. Если параметры выбранного транзистора отсутствуют в библиотеке AWR MWO, то численные значения SPICE-параметров можно ввести, воспользовавшись информацией производителей радиоэлектронных компонентов (NEC, Philips, Motorola) имеющейся на сайтах в сети Internet.

Рассмотрены перспективы развития технологии производства биполярных транзисторов. Из анализа развития технологии производства биполярных транзисторов следует, что в ближайшем будущем в мощных высокочастотных усилителях найдут широкое применение сравнительно дорогие биполярные гетеротранзисторы НВТ на основе GaAs-технологии, а в высокочастотных усилителях малой и средней мощности при высоких требованиях к собственным шумам — более дешевые гетеротранзисторы НВТ на основе SiGe-технологии. Кремневые биполярные плоскостные транзисторы ВJT уступают по частотным свойствам НВТ транзисторам, но благодаря низкой стоимости находят широкое применение при разработке телекоммуникационных устройств.

5.2. Второй этап посвящен рассмотрению методики исследования влияния параметров схемы усилителя мощности (УМ) на режимы его работы, временные и энергетические характеристики.

Дана методика построения статических характеристик биполярных транзисторов в инструментальной среде MWO. Отмечается, что для построения статических характеристик необходимо вначале выбрать нелинейный усилительный элемент из базы данных MWO с учетом требований технического задания по параметрам и области применения усилителя мощности. Следующим этапом является подготовка программы к проведению исследований УМ в инструментальной среде MWO. Алгоритм подготовки MWO к проведению исследований содержит информацию о последовательности открытия нового проекта в среде MWO, методике составления компьютерной модели выбранного транзистора из библиотеки MWO или библиотек производителей радиоэлектронных компонентов.

На основании компьютерной модели выбранного транзистора разработан алгоритм программы MWO построения статических характеристик усилителей мощности. Анализ характеристик позволяет судить о работоспособности модели транзистора по постоянному току, характере нелинейности, диапазоне значений входного напряжения, при котором удовлетворяются требования по максимально допустимому выходному току.

Для наиболее полного исследования работы УМ с выбранным транзистором на рабочих частотах разработана программа построения динамических характеристик, т.е. зависимостей выходного тока от выходного напряжения с учетом сопротивления нагрузки транзистора и его инерционных свойств на рабочих частотах.

Построение динамической характеристики осуществляется в плоскости построений семейства статических характеристик. Это обеспечивает наглядность полученных результатов исследования УМ. В частности, в совокупности с временными зависимостями выходного тока можно судить о режиме работы УМ, инерционности транзистора, контролировать влияние блокировочных элементов цепей питания и смещения на работу УМ.

С целью выбора ограничений на параметры усилителя мощности при его оптимизации разработана совокупность методик с использованием динамических характеристик (рис.2), позволяющих исследовать влияние сопротивления нагрузки, питающих напряжений, мощности возбуждения, напряжения смещения, цепей питания на режимы работы, временные и энергетические характеристики.

5.3. На третьем этапе дана методика оценки оптимального сопротивления нагрузки и сопротивления источника возбуждения УМ.

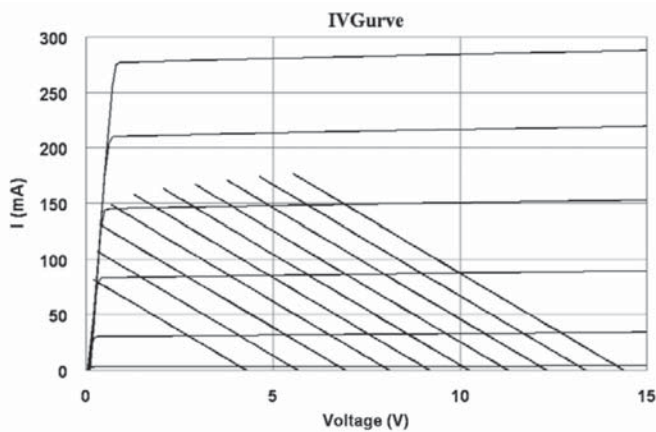


Рис. 2. Динамические характеристики УМ при изменяющемся напряжении коллекторного питания

Схема усилителя мощности передающих устройств, в общем случае содержит активный элемент (АЭ), входную и выходную цепи согласования, а также цепи питания и смещения. Входная цепь согласования трансформирует входное сопротивление АЭ в оптимальное сопротивление нагрузки для источника возбуждения, а выходная цепь трансформирует сопротивление нагрузки в требуемое для данного транзистора сопротивление с целью обеспечения оптимального режима работы.

Критерием оптимизации, как правило, является максимальная выходная мощность при достаточно высоком значении КПД.

Результаты исследований УМ с использованием ранее рассмотренных методик позволяет сформулировать ограничения на параметры УМ, т.е. задать напряжение питания, смещения, мощность возбуждения, схему цепей питания, возможные пределы изменения варьируемых параметров для выбранного транзистора.

Выбранные критерии оптимизации и ограничения на параметры схемы УМ дают возможность сформулировать целевую функцию, т.е. максимально формализовать решение задачи оптимизации.

Настоящий этап работы посвящен рассмотрению методики оценки оптимального сопротивления нагрузки и сопротивления источника возбуждения по заданным критериям качества при ограничениях на параметры УМ, сформулированных на основании использования ранее рассмотренных методик.

Приведенные методики оценки оптимального сопротивления нагрузки (рис. 3) и сопротивления источника возбуждения по заданным критериям качества позволили перейти к рассмотрению алгоритмов и программ проектирования цепей согласования УМ в среде MWO.

Приводятся результаты анализа и оптимизации входных и выходных цепей согласования УМ. При проектировании цепей согласования УМ на первое место выступает требование к трансформации нагрузочных сопротивлений в диапазоне рабочих частот.

Однако для обеспечения высоких энергетических характеристик УМ к цепям согласования предъявляются также требования минимизации потерь мощности в диапазоне рабочих частот. В этой связи представляет интерес оценка энергетических характеристик цепей согласования, схемы которых получены в результате оптимизации, исходя из критериев наилучшего согласования с источником возбужде-

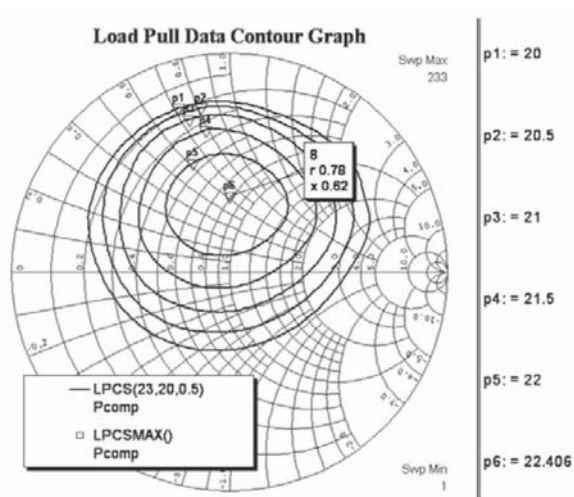


Рис. 3. Результаты оценки оптимального сопротивления нагрузки и максимальной выходной мощности УМ

ния и нагрузкой.

Дана методика оценки затухания оптимальных цепей согласования УМ по мощности в диапазоне рабочих частот.

Результатом проведенных на предыдущих этапах примеров анализа и оптимизации усилителей мощности является принципиальная схема, представленная на рис. 4.

5.4. На четвертом этапе проводится анализ и оптимизация широкополосного линейного усилителя мощности.

В некоторых случаях к усилителю мощности предъявляются высокие требования по широкополосности и линейности его характеристик, в частности, при усилении многоканального сигнала с изменяющейся амплитудой.

Одним из путей расширения диапазона рабочих частот усилителя мощности является исключение из схемы входных и выходных цепей согласования. Требуемое входное и выходное сопротивления усилителя можно обеспечить благодаря наличию в его схеме цепи отрицательной обратной связи по напряжению и по току. Линейность характеристик УМ достигается выбором режима, при котором работа транзистора осуществляется в активной области статических характеристик. В этом режиме в связи с высокими требованиями по линейности усилителя мощности транзистор не должен находиться в состояниях отсечки и насыщения.

В данном разделе разработан алгоритм программы MWO анализа и оптимизации работы широкополосного усилителя мощности с цепями отрицательной обратной связи. Критерий оптимизации — минимизация отклонения выходной мощности от заданной в диапазоне рабочих частот при стандартных сопротивлениях источника возбуждения и сопротивления нагрузки 50 Ом и заданных ограничениях на величину переменных параметров цепей обратной свя-

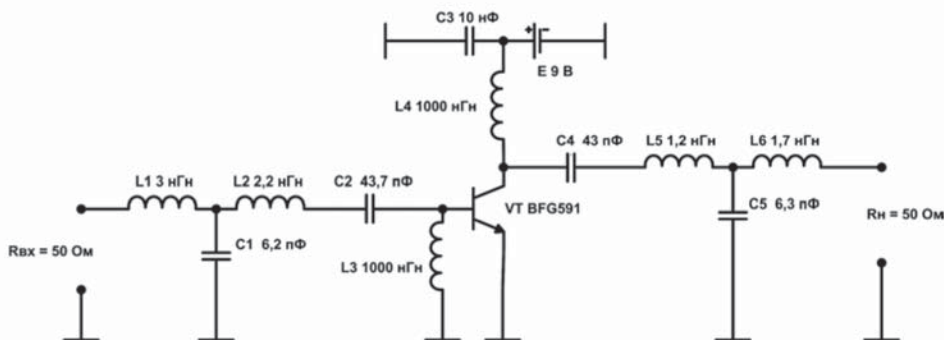


Рис. 4. Схема усилителя мощности, оптимального по критерию максимальной выходной мощности при высоком КПД



зи усилителя мощности.

Результатом оптимизации является принципиальная схема УМ (рис. 5), обеспечивающая требуемый коэффициент усиления по мощности в заданном диапазоне рабочих частот.

5.5. Пятый этап посвящен методике автоматизации проектирования оптимальных усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств на биполярных транзисторах.

Как отмечалось ранее, критерием оптимизации УМ, как правило, является максимальная выходная мощность при достаточно высоком значении КПД.

Результаты исследований с использованием ранее разработанных методик, реализованных в виде алгоритмов и программ, позволили перейти к проектированию оптимальных УМ, содержащих активный элемент, входную и выходную цепи согласования, а также цепи питания и смещения (рис.4).

Алгоритм проектирования следующий.

N1 Ввод исходных данных.

Из базы данных MWO выбирается транзистор, исходя из требований технического задания по мощности, диапазону рабочих частот и области применения.

N2 Составляется компьютерная модель транзистора с помощью программы УМ1.

N3 Строятся статические характеристики транзистора с помощью программы УМ2.

N4 Составляется компьютерная модель схемы УМ и строятся динамические характеристики с помощью программы УМ3.

N5 Выбираются параметры УМ (мощность и сопротивление источника возбуждения, схема цепей питания, напряжение питания, напряжение смещения, сопротивление нагрузки), обеспечивающие требуемые режимы с помощью программ УМ4, УМ5, УМ6, УМ7, УМ8.

N6 Составляется компьютерная модель проектируемого УМ с учетом ограничений на параметры.

N7 Определяется оптимальное сопротивление нагрузки УМ с помощью программы УМ9.

N8 Определяется оптимальное сопротивление источника возбуждения УМ с помощью программы УМ10.

N9 Составляется компьютерная модель выходной цепи согласования и проводится ее анализ с помощью программы УМ11.

N10 Проводится структурно-параметрическая оптимизация выходной цепи согласования с помощью программы УМ12.

N11 Составляется компьютерная модель входной цепи согласования и проводится ее анализ с помощью программы УМ13.

N12 Проводится структурно-параметрическая оптимизация входной цепи согласования с помощью программы УМ14.

N13 Составляется принципиальная схема проектируемого УМ, формулируются требования к конструкции разрабатываемого устройства.

Совокупность методик и программ, приведенных в N5, N6 алгоритма проектирования, обеспечивает формирование ограничений при решении задачи оптимизации УМ.

Методики и программы, рассмотренные в N7, N8 алгоритма проектирования, позволяют провести оптимизацию УМ с заданным критерием качества и ограничениями, сформулированными в N5, N6.

Реализация результатов оптимизации УМ в N5-N8 обеспечивается разработкой оптимальных согласующих цепей со стандартными 50-ти омными сопротивлениями источника возбуждения и нагрузки УМ с помощью программ, рассмотренных в N10-N12, составлением принципиальной схемы проектируемого УМ и формулировкой требований к конструкции разрабатываемого устройства (N13).

В рассмотренном алгоритме проектирования введены следующие обозначения.

УМ1 — программа подготовки MWO к проведению исследований; УМ2 — программа построения статических характеристик транзистора; УМ3 — программа построения динамических харак-

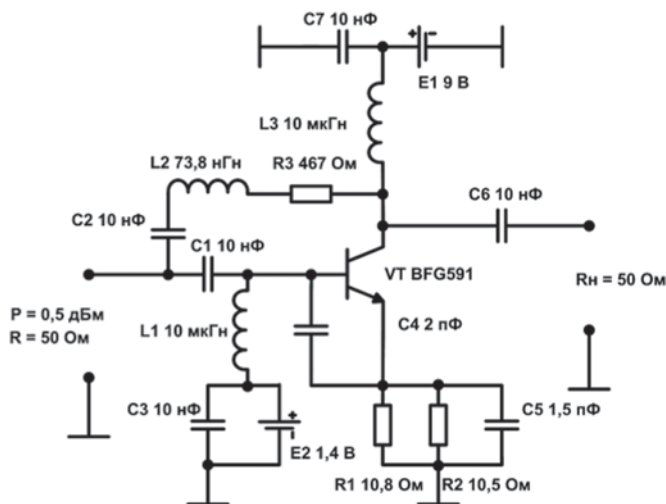


Рис. 5. Оптимальная схема широкополосного усилителя мощности

теристик УМ; УМ4 — программа исследования нагрузочных характеристик УМ; УМ5 — программа исследования влияния питающих напряжений на режимы работы УМ; УМ6 — программа исследования влияния мощности возбуждения на режимы работы УМ; УМ7 — программа исследования напряжения смещения на режимы работы УМ; УМ8 — программа исследования влияния цепей питания УМ на режимы работы; УМ9 — программа оценки оптимального сопротивления нагрузки УМ; УМ10 — программа оценки оптимального сопротивления источника возбуждения УМ; УМ11 — программа анализа работы выходной цепи согласования УМ; УМ12 — программа оптимизации выходной цепи согласования УМ; УМ13 — программа анализа работы входной цепи согласования УМ; УМ14 — программа оптимизации входной цепи согласования УМ.

## 6. Заключение

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по созданию системы автоматизированного проектирования телекоммуникационных передающих устройств "Telecom-MWO" и представлены в виде технического задания с комплексом требований, которые необходимо выполнить для обеспечения эффективной работы пользователей в диалоговом режиме.

## Литература

1. Карякин В.В. Информационные технологии моделирования биполярных транзисторов в САПР "Telecom-MWO" // Информационные технологии. — 2008. — № 3. — Т. 6. — С. 86-93.
2. Карякин В.В. Нелинейные модели биполярных транзисторов в САПР "Telecom-MWO" // Сборник научных трудов "Управление созданием и развитием систем, сетей и устройств телекоммуникаций". — СПб: Изд-во СПбГПУ, 2008. — С. 234-248.
3. Карякин В.В., Карякин Д.В. Информационные технологии проектирования телекоммуникационных устройств // Сборник трудов международной научно-технической конференции "Проблемы техники и технологии телекоммуникаций". — Уфа: Изд-во УГАТУ, 2007. — С. 82-85.
4. Система автоматизированного проектирования телекоммуникационных устройств "Telecom-MWO" с использованием инструментальной среды AVR Microwave Office / Карякин В.В., Карякин Д.В. — М.: Федеральное агентство по образованию. Отраслевой фонд алгоритмов и программ, № г/р 9010, 2007.
5. Карякин В.Л. Устройства генерирования и формирования сигналов в системах подвижной радиосвязи: Учебник для вузов. — М: Радио и связь, 2007. — 433 с.
6. <http://tv.psufi.ru>
7. Отчет о научно-исследовательской работе "Информационные технологии автоматизированного проектирования усилителей мощности телекоммуникационных передающих устройств" / Карякин В.Л., Карякин В.В., Карякин Д.В., Толмачев В.Б. — Самара: ПГУТИ, № г/р 0120.0805277, 2008. — 172 с.