

Моделирование биполярного транзистора 2Т937 на основе экспериментальных статических и частотных характеристик

А. Л. ХВАЛИН

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н. Г. Чернышевского, Саратов, Россия,
e-mail: Khvalin63@mail.ru

Представлена методика моделирования биполярного транзистора 2Т937. Приведены результаты расчётов статических и частотных характеристик и оценка погрешности моделирования биполярного транзистора 2Т937. Решены задачи оптимизации параметров модели Гуммеля–Пуна, взятой за основу при моделировании транзистора. Показано, что созданную модель можно использовать в системах автоматизированного проектирования в качестве элементной базы при разработке транзисторных устройств.

Ключевые слова: статические входные и выходные характеристики, частотные характеристики, S-параметры, модель Гуммеля–Пуна, САПР, биполярный транзистор.

The technique of modeling of the bipolar transistor 2Т937 is presented. Results of calculations of static and frequency characteristics and assessment of an error of modeling of the bipolar transistor 2Т937 are given. Problems of optimization of parameters of the model of Hummel-Poon taken as a basis when modeling the transistor are solved. It is shown that the created model can be used in computer-aided engineering systems as element base when developing transistor devices.

Key words: static input and output characteristics, frequency characteristics, S-parameters, Gummel-Poon model, computer-aided design system, bipolar transistor.

В настоящее время при проектировании сверхвысоко-частотных (СВЧ) устройств широко применяются системы автоматизированного проектирования (САПР) [1–3]. Известные САПР имеют встроенные библиотеки используемых в устройствах активных и пассивных СВЧ-компонентов, что значительно облегчает процесс проектирования [3–5]. Однако многие зарубежные, а также производимые российской электронной промышленностью транзисторы, не имеют компьютерных моделей, совместимых со средствами САПР. Это обстоятельство существенно ограничивает возможность применения существующей элементной базы при проектировании конкретных устройств в САПР.

В данной статье автор рассматривает вопросы создания компьютерной модели транзистора 2Т937, серийно выпускаемого АО «ГЗ «Пульсар» (Россия). Кремниевый транзистор 2Т937 относится к высокочастотным эпитаксиально-планарным биполярным транзисторам средней мощности [6, 7]. Транзистор может использоваться в усилительных и генераторных схемах и имеет эксплуатационные характеристики, не уступающие зарубежным аналогам. В настоящее время некоторые ведущие зарубежные фирмы выпускают транзисторы с характеристиками, приближающимися к характеристикам биполярного транзистора 2Т937, но не достигающими их. К таким транзисторам относятся: 2L08 (Acrian Inc., США), MA 42181-510 (M/A Comm. Semi, США), LUE 20095 и LEE 1010T (Philips Elec., США) [6].

Биполярный транзистор, как радиотехнический элемент, представляет собой полупроводниковый кристалл, смонтированный в корпусе. Кристалл подключается к выводам транзистора разварочными проволоками, но может иметь и цепи согласования. Дополнительные элементы (разварочные проволоки, корпус, выводы транзистора и цепи согласования)

вносят существенные искажения в работу полупроводникового кристалла и должны включаться в эквивалентную схему транзистора.

При моделировании биполярного транзистора применяется электрическая модель Гуммеля–Пуна [2, 3, 8, 9]. Зарядовая модель Гуммеля–Пуна биполярного транзистора является продолжением передаточной модели Эберса–Молла, в которую введён дополнительный заряд в области базы транзистора, позволяющий использовать её в режимах малого и большого входных сигналов. Базовая модель Гуммеля–Пуна содержит 60 параметров, имеющих физический смысл межэлектродных ёмкостей, индуктивностей, токов, напряжений и пр. Параметры данной модели могут определяться теоретически по известным математическим соотношениям на основе известных конструктивных, технологических и электрофизических параметров полупроводникового кристалла транзистора [10], однако возможные особенности включения полупроводникового кристалла транзистора в электрическую схему при этом не учитываются. Следовательно, для создания оптимизированной модели, наиболее приближенной к реальным условиям, необходимо, чтобы расчётные характеристики транзистора максимально точно воспроизводили его экспериментально измеренные характеристики.

В качестве экспериментальных характеристик в данной работе автор рассматривает три статические характеристики транзистора и восемь частотных характеристик. Таким образом, алгоритмически задача оптимизации параметров модели Гуммеля–Пуна состоит в определении численных значений 60 параметров модели биполярного транзистора 2Т937, максимально точно воспроизводящих 11 его основных экспериментальных характеристик. Отметим, что разброс параметров

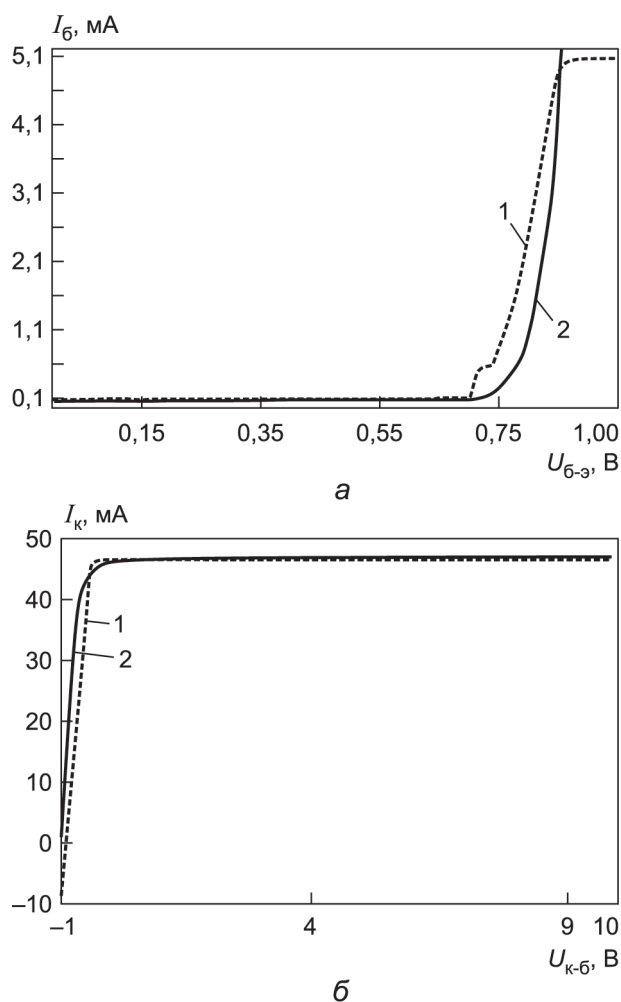


Рис. 1. Зависимости силы тока базы от напряжения база–эмиттер (входная характеристика) (а) и силы тока коллектора от напряжения коллектор–база (выходная характеристика) (б): 1 – экспериментальная характеристика; 2 – расчётная характеристика

для транзисторов одной серии составляет 30 %, поэтому на практике точность определения параметров модели порядка 50 % считается удовлетворительной [2, 8, 9]. Для определения параметров указанного транзистора необходимо сформулировать и решить задачу параметрического синтеза [2].

Для автоматизации параметрического синтеза необходимы следующие составляющие;

математическая (компьютерная) модель Гуммеля–Пуна. В качестве расчётной модели для САПР Microwave Office автор настоящей статьи выбрал базовую компьютерную модель по Гуммелю–Пуна биполярного транзистора BJT3;

модули оптимизации, полученные с помощью градиентного и симплексного методов, а также на базе метода случайного поиска;

целевые функции, т. е. формализованное задание на синтез.

Оптимизация параметров модели Гуммеля–Пуна – это многокритериальная и многопараметрическая задача. В отличие от задач, имеющих единственную цель оптимизации (критерий) и, следовательно, только одну целевую функ-

цию, решение многокритериальной многопараметрической задачи существенно осложняется при оценке оптимальности выбранного решения [11, 12]. Если критериев много, то они, как правило, являются «конфликтующими», т. е. при улучшении одной характеристики другие характеристики неизбежно ухудшаются. Таким образом, многокритериальная многопараметрическая оптимизация сводится к нахождению компромиссного решения, которое позволяет достичь «равноудалённости» расчётных характеристик от характеристик, полученных экспериментальным путём при некоторой усреднённой погрешности моделирования.

Статические и частотные характеристики транзистора 2Т937 измеряли на базе ЗАО «НПП «Алмаз». Были определены две статические входные характеристики (ток базы и ток эмиттера) и выходная характеристика (ток коллектора). Первую входную характеристику, т. е. зависимость тока базы от напряжения база–эмиттер снимали при отсутствии резистора в эмиттерной цепи. Силу тока базы $I_6=5$ мА задавали в измерителе полупроводниковых приборов (ИППП). Коллектор при этом находился в режиме холостого хода. Вторую входную характеристику, а именно зависимость тока эмиттера от напряжения база–эмиттер, получили для напряжения коллектор–база 5 В. При измерениях в ИППП применяли режим ограничения тока эмиттера, когда $I_9=200$ мА. В этом случае для задания тока базы в эмиттерной цепи был установлен резистор. В ИППП ограничение тока коллектора составляло 50 мА. Ток коллектора $I_к=50$ мА достигался при напряжении источника питания $U_{3-6}=-2,79$ В. Поскольку ток базы I_6 не превышал 1 мА, то ток коллектора $I_к$ был примерно равен току эмиттера I_9 .

Результаты измерения и моделирования статических характеристик биполярного транзистора 2Т937 приведены на рис. 1, а, б. Характеристики, полученные экспериментальным путём, показаны пунктирными линиями, а рассчитанные по модели Гуммеля–Пуна – сплошными линиями. Результаты моделирования статических характеристик с использованием тока базы показали удовлетворительное совпадение с экспериментальными данными.

Заметим, что сформулированную выше многокритериальную многопараметрическую задачу оптимизации ввиду её значительной вычислительной сложности нельзя решить, используя сразу все 60 варьируемых параметров и 11 критериев оптимальности. Для снижения вычислительных затрат сначала определяют некий набор параметров модели Гуммеля–Пуна, особенно влияющих на статические характеристики. Затем в качестве варьируемых применяют только отобранные ранее параметры. В результате получают решения, удовлетворяющие критериям оптимальности, которым отвечают статические характеристики.

В проведённых исследованиях численные значения отобранных ранее параметров модели Гуммеля–Пуна (модули и фазы S-параметров) применяли в качестве первого приближения для последующей оптимизации частотных характеристик транзистора [2, 5]. Затем моделировали частотные характеристики транзистора. При этом набор определённых ранее параметров с зафиксированными значениями из оптимизации исключали. Далее задачу решали с использованием

оставшихся параметров модели Гуммеля–Пуна транзистора 2Т937. Таким образом, были удовлетворены все 11 критериев оптимальности и получены приемлемые статистические и частотные характеристики транзистора.

Результаты определения частотных характеристик данного транзистора показаны на рис. 2, а, б, где представлены зависимости амплитуды и фазы коэффициента передачи S_{21} от частоты. Характеристики, вычисленные по модели Гуммеля–Пуна, изображены сплошными линиями, а измеренные на ИППП экспериментальные характеристики – пунктирными. Оптимальные численные значения параметров модели Гуммеля–Пуна и результаты расчёта всех S -параметров в настоящей статье не приведены, ввиду большого объёма информации.

Для количественной оценки результатов, полученных при решении задачи моделирования статических и частотных характеристик транзистора, использовали так называемый коэффициент вариации, который в теории множеств определяется как отношение среднего квадратического отклонения (СКО) (квадратный корень из дисперсии) к математическому ожиданию соответствующей величины [2]. При этом разброс значений оптимального решения измеряется не в абсолютных единицах, что имеет место для СКО, а в относительных. В рассматриваемом случае понятие коэффициента вариации несколько упрощается, так как для каждой исходной экспериментальной характеристики имеется только одна оптимальная характеристика. Таким образом, для оценки результата оптимизации в относительных единицах для каждой характеристики необходимо вычислить величину, имеющую смысл усреднённой относительной погрешности:

$$\delta_{\text{Mag}} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\text{Mag}[S_{jk}(f_i)]_{\text{т}} - \text{Mag}[S_{jk}(f_i)]_{\text{э}}|}{\text{Mag}[S_{jk}(f_i)]_{\text{э}}},$$

$$\delta_{\text{Ang}} = \frac{100}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|\text{Ang}[S_{jk}(f_i)]_{\text{т}} - \text{Ang}[S_{jk}(f_i)]_{\text{э}}|}{\text{Ang}[S_{jk}(f_i)]_{\text{э}}},$$

где δ_{Mag} , δ_{Ang} – относительные погрешности моделирования (коэффициенты вариации) амплитудных и фазовых характеристик, соответственно; $\text{Mag}[S_{jk}(f_i)]$, $\text{Ang}[S_{jk}(f_i)]$ – соответственно амплитуда и фаза S -параметров с индексами jk в частотной точке f_i , $i=1, N$, $j=1, 4$, $k=1, 4$; N – количество расчётных точек в рабочем диапазоне частот; индексы «т», «э» – теоретические и экспериментальные характеристики, соответственно.

Результаты расчётов коэффициентов вариации для оптимальных частотных характеристик приведены в таблице. Количество расчётных точек N в рабочем диапазоне частот принимали равным 100. Диапазон частот составил одну октаву, так как отношение верхней граничной частоты к нижней было равно двум. Несмотря на широкий диа-

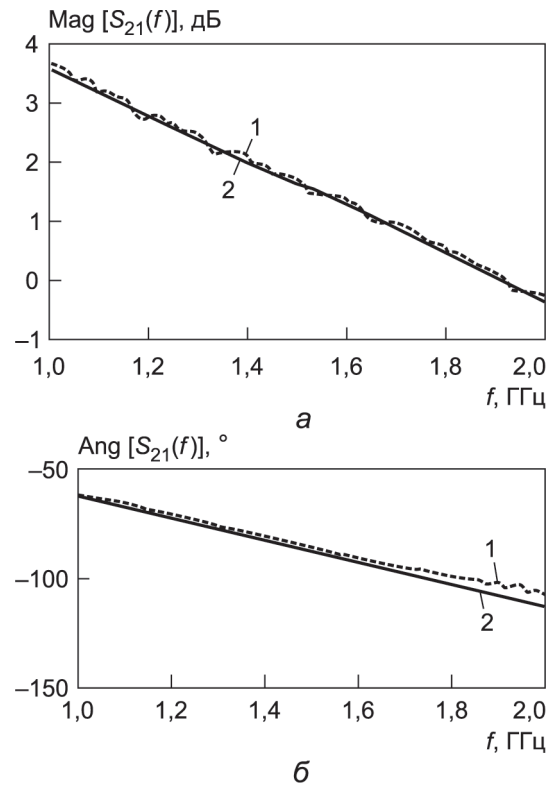


Рис. 2. Частотные характеристики модуля коэффициента передачи (а) и фазы коэффициента передачи (б) биполярного транзистора 2Т937: 1 – экспериментальная характеристика; 2 – расчётная характеристика

пазон частот, максимальный коэффициент вариации для амплитудных и фазовых характеристик не превысил 13 %, что существенно ниже средних допустимых погрешностей для подобных задач [9, 10].

Из таблицы следует, что наибольшие значения коэффициента вариации получены для следующих амплитудных характеристик: обратных потерь $\text{Mag}[S_{11}(f_i)]_{\text{э}}$ и коэффициента

Критерии оптимальности частотных характеристик

Компоненты целевой функции	Вид характеристики в диапазоне частот 1–2 ГГц	Средний коэффициент вариации оптимальных характеристик от экспериментальных, %
$\text{Mag}[S_{11}(f_i)]_{\text{э}}$	Амплитудная для S_{11}	11,43
$\text{Mag}[S_{12}(f_i)]_{\text{э}}$	Амплитудная для S_{12}	2,19
$\text{Mag}[S_{21}(f_i)]_{\text{э}}$	Амплитудная для S_{21}	2,38
$\text{Mag}[S_{22}(f_i)]_{\text{э}}$	Амплитудная для S_{22}	12,10
$\text{Ang}[S_{11}(f_i)]_{\text{э}}$	Фазовая для S_{11}	9,76
$\text{Ang}[S_{12}(f_i)]_{\text{э}}$	Фазовая для S_{12}	7,75
$\text{Ang}[S_{21}(f_i)]_{\text{э}}$	Фазовая для S_{21}	12,81
$\text{Ang}[S_{22}(f_i)]_{\text{э}}$	Фазовая для S_{22}	3,87

отражения по выходу $\text{Mag}[S_{22}(f_i)]_3$. Это объясняется тем, что в результате деления даже небольших абсолютных погрешностей оптимизации на малые абсолютные значения исходных характеристик получается значительная относительная погрешность, т. е. коэффициент вариации. Фазовые характеристики воспроизводятся с той же по порядку погрешностью, что объясняется существенным разбросом значений исходных характеристик в пределах выбранного диапазона. На практике при построении устройств на основе транзисторов часто выбирают узкие диапазоны рабочих частот (менее одной октавы), что позволяет даже в высокочастотной области существенно снизить погрешность моделирования [13–18].

Таким образом, в настоящей статье решена многокритериальная многопараметрическая задача моделирования в октавном диапазоне частот 1–2 ГГц на примере биполярного транзистора 2Т937. Относительные погрешности моделирования основных характеристик имеют порядок 10–12 %. В связи с малыми абсолютными значениями коэффициентов отражения по входу параметра S_{11} и выходу параметра S_{22} относительный коэффициент вариации составил соответственно 11,43 и 12,10 %. Относительную погрешность моделирования можно существенно снизить в более узких диапазонах рабочих частот. Также погрешности моделирования можно снизить при включении в алгоритм моделирования соответствующих поправок, т. е. разности значений расчётных и экспериментальных характеристик в нескольких расчётных точках.

Относительные погрешности моделирования транзисторов могут иметь значения 20–50 %. Это связано с технологическими разбросами параметров транзисторов, составляющими порядка 30 %, невозможностью учёта целого ряда конструктивных и технологических факторов, а также значительными вычислительными сложностями при решении задач многокритериальной оптимизации.

Предложенную автором модель транзистора 2Т937 можно использовать в современных компьютерных САПР при разработке устройств различного назначения.

Л и т е р а т у р а

1. Хвалин А. Л., Страхова Л. Л., Воробьёв А. В. Оптимизация параметров модели биполярного транзистора по его экспериментальным характеристикам // Радиотехника. 2015. № 7. С. 35–40.
2. Хвалин А. Л. Анализ и синтез интегральных магнитоуправляемых радиотехнических устройств на ферритовых резонаторах: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. Самара, Поволжская государственная академия телекоммуникаций и информатики, 2014.
3. Самолданов В. Н., Игнатъев А. А., Ляшенко А. В., Солопов А. А., Хвалин А. Л., Маринин А. В., Коваленко М. Л. Компьютерное моделирование ферритовых резонаторов во внутренних цепях биполярного транзистора в усилительном режиме работы // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2004. № 1. С. 110–118.

4. Хвалин А. Л. Векторный магнитометр слабых магнитных полей // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 45–48.
5. Хвалин А. Л., Страхова Л. Л. Компьютерное моделирование статических характеристик биполярного транзистора 2Т937 // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2016. № 21. С. 43–50.
6. Петухов В. М. Биполярные транзисторы средней и большой мощности сверхвысокочастотные и их зарубежные аналоги. Т. 4. Справочник. М.: КУБК-а, 1997.
7. Кашкаров А. П. Популярный справочник радиолюбителя. М.: ИП «РадиоСофт», 2008.
8. Бичурин М. И., Букашев Ф. И., Петров В. М. SPICE-модели биполярных транзисторов со статической индукцией // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 3. С. 50–51.
9. Денисенко В. В. Моделирование разброса параметров транзисторов в КМОП СБИС // Компоненты и технологии. 2003. № 8. С. 40–45.
10. Дворников О. В., Шульгевич Ю. Ф. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Ч. 1. Расчёт Spice-параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно технологических и электрофизических параметров // Современная электроника. 2009. № 5. С. 48–53.
11. Соболев И. М. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. М.: Дрофа, 2006.
12. Черных С. В. Многопараметрическая оптимизация многомодальных функций // Вестник Российского государственного университета им. И. Канта. 2010. Вып. 10. С. 94–103.
13. Карякин В. В. Информационные технологии моделирования биполярных транзисторов в САПР «Telecom–MWO» // Инфокоммуникационные технологии. 2008. № 3. Т. 6. С. 86–93.
14. Аронов В. Л., Евстигнеев А. А. Моделирование мощного биполярного транзистора в усилительном режиме с учётом квазинасыщения // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2005. Вып. 1–2. С. 24–33.
15. Зырин С. С. Применение базовой модели биполярного транзистора для расчёта СВЧ-автогенераторов и усилителей // Электронная техника. Сер. 1. Электроника СВЧ. 1989. Вып. 3. С. 33–37.
16. Горбачёв Д. М., Мазеев Е. В., Фурсаев М. А. Решение задач проектирования СВЧ-генератора с внутренней обратной связью на биполярном транзисторе // Радиотехника. 2011. № 1. С. 42–46.
17. Головкин А. А., Пивоваров И. Ю., Кузнецов И. Р. Компьютерное моделирование и проектирование радиоэлектронных средств. Учебник для вузов. Стандарт третьего поколения. СПб.: Питер, 2015.
18. Малахов Р. К., Добычина Е. М. Мощные транзисторы для бортовых радиолокационных систем // Научный Вестник МГТУ гражданской авиации. 2012. № 12 (186). С. 184–190.

Дата принятия: 10.05.2018.