

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ СТРУКТУРНЫХ МОДЕЛЕЙ ТРАНЗИСТОРА ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ

А. М. Бобрешов, Л. И. Аверина, Г. К. Усков, И. С. Коровченко

Воронежский государственный университет

Предложена методика определения параметров моделей твердотельных устройств по экспериментальным данным, в качестве которых могут выступать различные характеристики, например вольтамперные, передаточные характеристики, линейные параметры, снятые для различных режимов работы, характеристики блокирования, интермодуляции и др. Достоинством представленной методики является: универсальность по отношению к эквивалентной схеме модели; возможность использовать различные экспериментальные данные для определения параметров; простота реализации методики в системах схемотехнического проектирования.

ВВЕДЕНИЕ

Современное программное обеспечение, предназначенное для синтеза и анализа электронных схем, позволяет с высокой точностью проектировать СВЧ устройства, в том числе и усилители на полевых транзисторах. В таких системах автоматизированного проектирования в большинстве случаев уже встроены различные методы анализа, присутствуют модели применимые к различным типам транзисторов.

В настоящее время для синтеза и анализа электронных схем в СВЧ диапазоне применяются несколько программ: Ansoft Designer; Microwave Office, Ansoft Serenade, Orcad и т.д. Основные различия между ними — интерфейс пользователя и методы расчета. Так в программе Orcad используется нелинейный метод анализа во временной области, в Microwave Office — методы гармонического баланса и рядов Вольтерры, в Ansoft Designer — методы гармонического баланса и метод анализа во временной области. Несмотря на многие различия, для описания транзисторов применяются практически идентичные модели [1].

При всех достоинствах таких систем есть и недостатки, связанные с тем, что производители СВЧ приборов чаще всего в качестве их описания дают экспериментально снятые те или иные параметры, а не параметры модели. Таким образом, необходима универсальная методика формирования и определения параметров модели, встроеной в программный продукт, по экспериментальным данным. Общеизвестно,

что в паспортных данных отечественной и зарубежной продукции приводятся различные данные. Поэтому возникает понятная заинтересованность в универсальном подходе, особенно, когда наряду с импортной элементной базой, применяется отечественная

Необходимость формирования и определения параметров модели является самостоятельной задачей.

МЕТОДИКА

Надо отметить, что задачи по определению параметров моделей рассматривались в работах [2—6]. К основным недостаткам существующих методик можно отнести то, что они либо жестко привязаны к топологии модели, либо параметры находятся для определенного условия (режим работы транзистора, уровень входного сигнала, и т.д.) с использованием вычислений или программ, не входящих в пакет схемотехнического проектирования. Это существенно ограничивает границу применимости методов.

В настоящей работе предложена универсальная по отношению к эквивалентной схеме (ЭС) методика, позволяющая определять параметры структурных моделей твердотельных приборов, как около конкретной рабочей точки транзистора, так и для требуемого диапазона. Методика может быть легко реализована в пакетах схемотехнического проектирования. В качестве экспериментальных данных, по которым определяются параметры модели, могут выступать различные характеристики, например вольтамперные, передаточные характеристики, линейные параметры, снятые для различных режимов работы, характеристики блокирования, интермодуляции и т.д.

Алгоритм методики представлен на рис. 1. Предположим, что для определения параметров модели транзистора имеется N экспериментальных характеристик. Тогда, моделируются N схем, которые воспроизводят схемы получения этих экспериментальных данных (блоки реализации компьютерного эксперимента на рис. 1). Параметры модели выносятся в отдельный блок хранения параметров и перед расчетом характеристик подставляются в ЭС каждой из N схем. Следует отметить, что методы анализа, применяемые для их расчета, могут различаться в зависимости от характера рассчитываемой характеристики и требуемой точности.

Далее формируется целевая функция как квадрат разности значений рассчитываемых и экспериментальных характеристик и проводится процедура многопараметрической оптимизации, которая сводится к сравнению расчетных характеристик с соответствующими им экспериментальными по выбранному критерию ошибки и ее последовательному уменьшению (блок формирования параметров отдельной итерации). Заметим, что выбранный вид целевой функции приводит к минимизации ошибок измерения экспериментальных данных методом наименьших квадратов.

Таким образом, в процессе каждой итерации оптимизации происходит варьирование пара-

метров модели, их подстановка в ЭС компьютерного эксперимента и приближение расчетных характеристик каждой из схем к экспериментальным одновременно [7—9]. В качестве метода оптимизации сначала использовался метод нахождения глобального минимума целевой функции — метод Монте-Карло, а затем локального. Здесь, как наиболее эффективный при большом количестве параметров использовался симплексный метод многопараметрической оптимизации [10,11]. После того как разница между рассчитываемыми и экспериментальными характеристиками станет меньше заданной погрешности оптимизации окончательные значения параметров модели принимаются равными параметрам последней итерации.

ПРИМЕР ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ

Рассмотрим процедуру идентификации параметров на примере модели *Materka*. Для этого используем экспериментальные данные, в качестве которых будут выступать S -параметры и вольтамперные характеристики, измеренные при различных режимах работы транзистора. Как уже было сказано выше, S -параметры применяются для описания линейных многополюсников в СВЧ диапазоне. Параметры, рассеянные в нелинейном режиме, измеряются с боль-

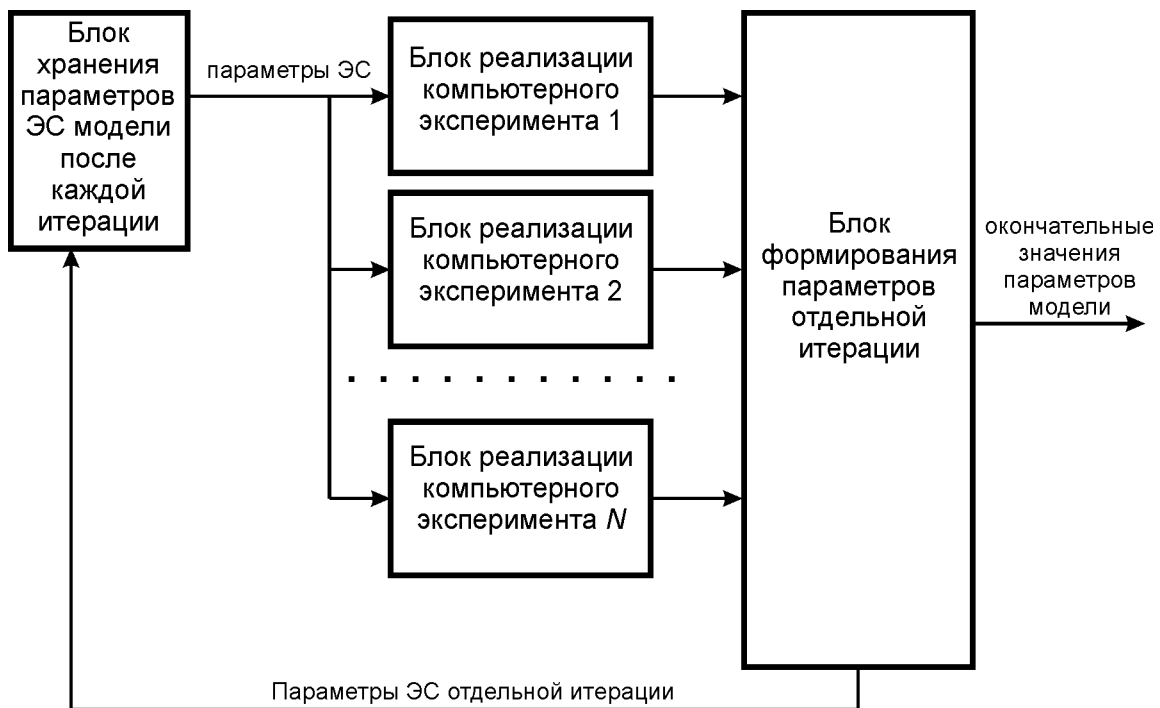


Рис. 1. Алгоритм определения параметров модели

шой погрешностью и в справочниках не приводятся. Но для каждого режима по постоянному току схема замещения нелинейного прибора может быть линеаризована. Так, например, нелинейная емкость может быть заменена линейной емкостью, имеющей такое же значение, что и нелинейная при заданном напряжении смещения. В таком случае, можно использовать S-параметры, измеренные в линейном режиме [12, 13].

В работе часть параметров модели определено из экспериментально снятых S-параметров, а оставшиеся из вольтамперных характеристик транзистора. Для этого все параметры модели были введены, как оптимизируемые глобальные переменные среды. Было создано шесть схем: три — для расчета S-параметров транзистора (рис. 2.) с напряжениями питания и смещения, равными тем, при которых проводились измерения и три — для расчета вольтамперных характеристик (рис. 3.) в различных режимах работы по напряжению затвор-исток.

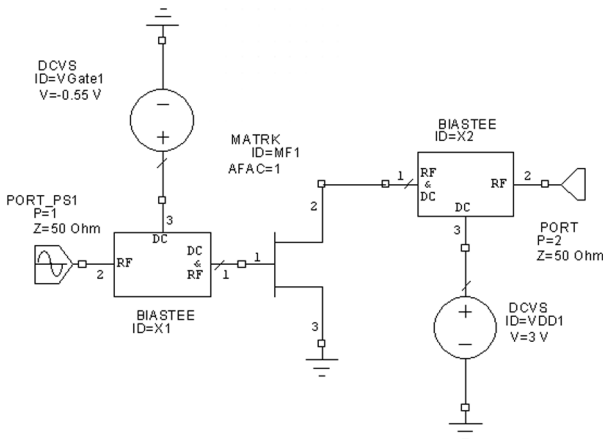


Рис. 2. Схема расчета S-параметров в режиме $V_{gs} = -0.55$ В

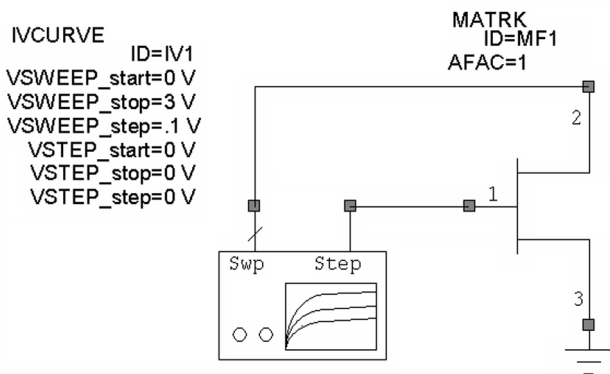


Рис. 3. Схема расчета вольтамперной характеристики в режиме $V_{gs} = 0$ В

При этом в качестве параметров модели выступали глобальные переменные.

Для каждой из схем были введены справочные данные, по которым была произведена оптимизация глобальных переменных. Таким образом, в качестве целевой функции для первых трех схем выступал квадрат разности справочных и рассчитываемых по модели значений S-параметров, а для остальных — значений тока стока [8, 9].

В результате оптимизации были получены параметры модели полевого транзистора с затвором Шоттки АП362 (таблица 1), описывающие нелинейные и паразитные элементы его эквивалентной схемы.

Таблица 1

Полученные параметры модели *Materka* полевого транзистора с затвором Шоттки АП362

IDSS	241.3	R10	2.935
VP	-1.682	KR	0.1909
GAM	0	C10	34.68
E	1.523	K1	29.6
KE	0.4837	C1S	2.278
SL	0.19	CF0	4.377
KG	1.312	KF	39
SS	0.00276	RS	0.887
IG0	0.8202	RG	7.714
AFAG	0.9	RD	4.269
IB0	0.2957	AFAB	0.775

На основе полученных параметров в среде Microwave Office было рассчитано семейство вольтамперных характеристик транзистора и его S-параметры. При сопоставлении полученных результатов и экспериментальных данных было получено их хорошее соответствие.

Для оценки применимости модели по отношению к характеристикам электромагнитной совместимости (ЭМС) на ее основе была рассчитана нелинейная передаточная характеристика усилителя (рис. 4) методами гармонического баланса и методом рядов Вольтерры.

Видно, что метод рядов Вольтерры рассчитывает характеристики только для слабо нелинейного режима. Это связано с тем, что в данном программном продукте при вычислениях используются ядра Вольтерры не выше 3-го порядка [14—18]. Метод гармонического баланса описывает работу транзистора при любых режимах и рассчитывает, не только характеристики для слабо нелинейных, но и для сильно нелинейных режимов, но с меньшей точностью [19—21].

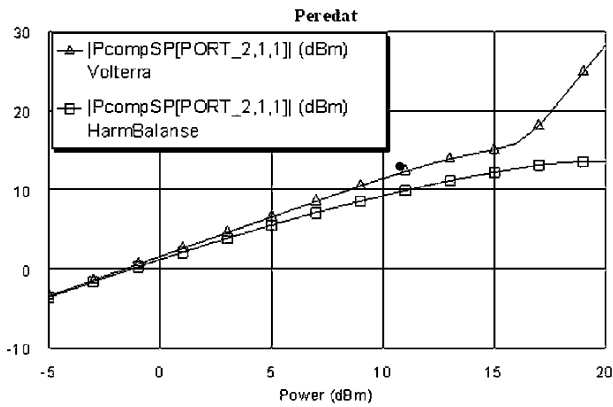


Рис. 4. Нелинейные передаточные характеристики (треугольниками отмечены точки нелинейной передаточной характеристики, рассчитанной методом рядов Вольтерры, квадратами отмечены точки нелинейной передаточной характеристики, рассчитанной методом гармонического баланса, точкой — коэффициент компрессии)

При сравнении экспериментально полученного коэффициента компрессии по уровню -1 дБ с теоретически рассчитанными (методами гармонического баланса и методом рядов Вольтерры), было получено их точное соответствие для метода рядов Вольтерры и отклонение в 1 дБ для метода гармонического баланса (рис. 4).

Следует отметить, что этот параметр однозначно не следует из серии вольтамперных характеристик и S-параметров, что говорит о правильности методики определения модели транзистора.

Аналогичным образом были получены параметры модели MOSN1_4 полевого транзистора средней мощности Semelab D2081UK. При этом параметры модели были определены по экспериментально снятым S-параметрам для напряжения затвора равного 4,4 В, напряжения стока 12 В, и из вольтамперных характеристик прибора. Было создано четыре схемы: одна — для определения S-параметров и три — для определения вольтамперных характеристик. Так же как и в предыдущем случае, оптимизация глобальных переменных, выступающих в качестве параметров модели, проводилась методом Монте-Карло и симплексным методом по экспериментальным данным, введенным для каждой из схем [22].

В результате были получены параметры нелинейной модели, которые приведены в таблице 2. Рассчитанные по модели вольтамперные характеристики и S-параметры хорошо сходятся с экспериментальными. Коэффициент компрессии по уровню -1 дБ, приведенный в

паспортных данных транзистора, расходитя с расчетным на 1 дБ (рис. 5).

Таблица 2

Параметры модели MOSN1_4 полевого транзистора с Semelab D2081UK

GAMMA	72.1	PB	37.26
LAMBDA	2.078	KP	0.15
IS	2.029	W	0.634
PHI	97.36	L	0.949
LD	0.0199	CGS0	0.74
RD	18.547	CGD0	0.379
RS	0.9064	CGB0	0.78
RG	0.2387	U0	601
TOX	0.000178	RDS	10^6
EOX	3.78	N	1
NI	$1.45 \cdot 10^{10}$	ER	11.7
RSH	0.001	VT0	3.866

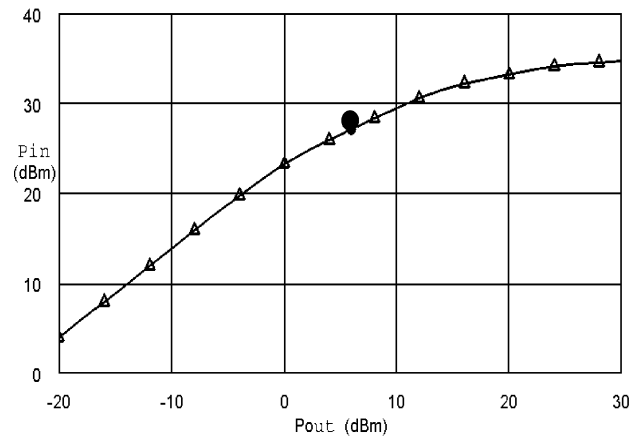


Рис. 5. Нелинейная передаточная характеристика (точкой отмечен — экспериментальный коэффициент компрессии)

Общеизвестно, что по коэффициенту компрессии может быть найден такой параметр, как intercept point (IP). По определению IP находится как точка пересечения двух прямых, одна из которых соответствует линейному режиму усилителя, вторая — нелинейному режиму, при котором возникает интермодуляция [23, 24]. IP однозначно связан с абсолютной величиной мощности интермодуляционного сигнала, которая характеризует эффект интермодуляции в маломощных усилителях (МШУ) [25].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, вышеописанная методика позволяет находить параметры структурных моделей полевых транзисторов, на основе которых можно производить учет нелинейных эффектов, в том числе блокирования и интермодуляционных искажений. Структурные модели, полученные на основе разработанной методики опреде-

ления параметров, позволяют включать в процесс моделирования транзисторы и другие твердотельные приборы, параметры моделей которых не известны исследователю. В первую очередь это касается отечественной элементной базы.

Применимость данной методики может быть расширена на структурные эквивалентные схемы других твердотельных приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Разевиг В.Д., Потапов Ю.В., Кукушкин А.А.* Проектирование СВЧ-устройств с помощью Microwave Office. Под ред. В. Д. Разевига. — М.: СОЛОН-Пресс, 2003. — 496 с.
2. *Алгазинов Э.К., Бобрешов А.М., Иркутский О.А.* Определение параметров моделей на примере полевого транзистора // Изв. Вузов. Электроника. — 1999. — № 6. — С. 35—40.
3. *Кищинский А.А., Надеждин Б.Б., Свистов Е.А.* Комплекс программных средств для быстрого получения нелинейных моделей ПТШ на основе результатов измерений S-параметров и импульсных вольт-амперных характеристик // Материалы 8-й Международной Крымской конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии”, 1998, С. 362—365.
4. *Кищинский А.А., Надеждин Б.Б., Свистов Е.А., Шульга Н.В.* Метод автоматизированного определения параметров линейной модели СВЧ полевого транзистора // Материалы 10 Международной Крымской конференции “СВЧ техника и телекоммуникационные технологии” 2000, С. 56—58.
5. *Хребтов И.В.* Моделирование характеристик ЭМС МШУ на субмикронных НЕМТ транзисторах / И. В. Хребтов, А. М. Бобрешов // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. — 2004. — Т. 7. — № 4. — С. 103—109.
6. *Алгазинов Э.К., Аверина Л.И., Бобрешов А.М., Дыбой А.В.* Автоматизированная система определения параметров нелинейной модели полевого СВЧ транзистора для анализа и синтеза усилителей на его основе // Сб. трудов симпозиума по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии-Санкт-Петербург. — 1997. — Ч. 2. — С. 194—197.
7. *Аверина Л.И.* Нелинейное моделирование полевого транзистора в системе схемотехнического СВЧ проектирования Ansoft Serenade 8.0 / Л. И. Аверина, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация, связь: VIII междунар. науч.-техн. конф., 2002 г. — Б.м. — 2002. — Т. 3. — С. 2162—2167.
8. *Аверина Л.И.* Определение параметров нелинейных моделей полевого транзистора в системе схемотехнического СВЧ проектирования Microwave Office / Л. И. Аверина, Г. К. Усков // Радиолокация, навигация и связь: IX междунар. науч.-техн. конф., 22—24 апр. 2003 г. — Б.м. — 2003. — Т. 1. — С. 457—465.
9. *Бобрешов А.М.* Нелинейное моделирование усилителей на полевых транзисторах в СВЧ диапазоне / А. М. Бобрешов, Л. И. Аверина, Г. Кусков, М. А. Корольков // Радиолокация, навигация, связь: X междунар. науч.-техн. конф., 13—15 апр. 2004 г. — Б.м. — 2004. — Т. 1. — С. 449—455.
10. *Реклейтис Р., Рейвиндран А., Рэгсдел К.* Оптимизация в технике. — М.: Мир, 1986. — 280 с.
11. *Грунта К., Гардж Р., Чаджа Р.* Машинное проектирование СВЧ устройств: Пер. с англ. — М.: Радио и связь, 1987. — 532 с.
12. *Шварц Н.З.* Линейные транзисторные усилители СВЧ. — М.: Сов.радио, 1980. — 368 с.
13. *Шварц Н.З.* Усилители СВЧ на полевых транзисторах. — М.: Радио и связь, 1987. — 200 с.
14. *Maas S.* Nonlinear Microwave Circuits, IEEE Press, New York, 1996.
15. *Busgang J.J., Ehrman L., Graham J.W.* Analysis of Nonlinear Systems with Multiple Inputs, Proc. IEEE, vol. 62, P. 1088, 1974.
16. *Weiner D.D., Spina J.F.* Sinusoidal Analysis and Modeling of Weakly Nonlinear Circuits, Van Nostrand, New York, 1980.
17. *Schetzen M.* The Volterra & Wiener Theories of Nonlinear Systems, John Wiley & Sons, New York, 1980.
18. *Maas S., Neilson D.* Modeling MESFETs for Intermodulation Analysis of Mixers and Amplifiers. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, P. 1291-4, 1990.
19. *Rizzoli V.* State-of-the-Art Harmonic-Balance Simulation of Forced Nonlinear Microwave Circuits by the Piecewise Technique / V. Rizzoli [e.a.] // IEEE Trans. Microwave Theory Tech. January 1992. 1992, Vol. 40, № 1. — P. 12—28.
20. *Rizzoli V., Matri F., Sgallari F., Spaletta G.* Harmonic-Balance Simulation of Strongly Nonlinear Very Large-Size Microwave Circuits by Inexact Newton Methods, IEEE MTT-S, P. 1357—1360, 1996.
21. *Materka A., Kacprzak T.* Computer calculation of large-signal GaAs FET amplifier characteristics // IEEE Trans. Microwave Theory and Techn. 1985. № 2, P. 129—135.
22. Моделирование выходных усилительных каскадов на полевых транзисторах средней мощности в СВЧ диапазоне с учетом ЭМС / А. М. Бобрешов [и др.] // 6-й Международный симпозиум по электромагнитной совместимости и электромагнитной экологии: материалы симп., 21—24 июня 2005 г. — СПб., 2005. — С. 200—203.
23. *Малевиц И.Ю.* Оценка интермодуляционных параметров высоколинейных приемно-усилительных трактов // Радиотехника. 1995. № 6. С. 19—21.
24. *Шарапов Ю.И.* Преобразование частоты $F_{\text{мч}} = F_r - F_c$ при $F_r > F_c$ и постоянной частоте гетеродина без заданных комбинационных составляющих // Радиотехника. 1997. № 12. С. 79—83.
25. *Князев А.Д.* Элементы теории и практики обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронных средств / А. Д. Князев. — М.: Радио и связь, 1984. — 336 с.