

Анализ компактных моделей БТ и математического обеспечения для экстракции SPICE параметров БТ

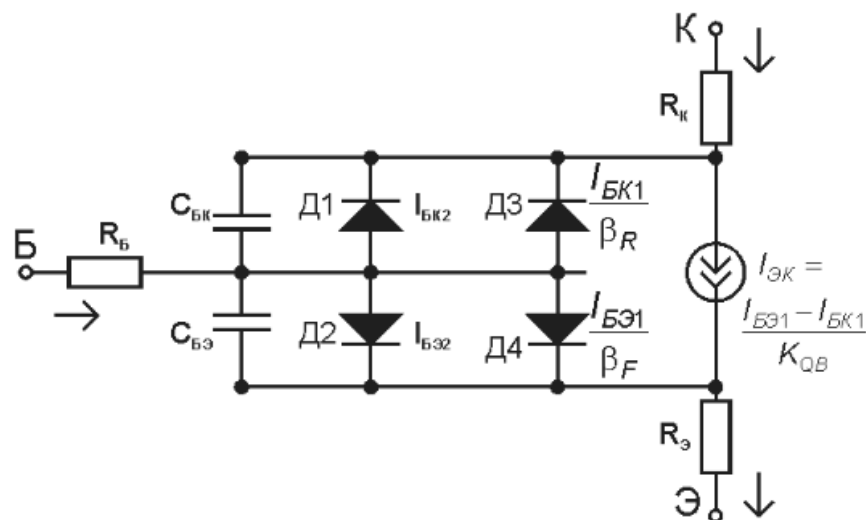
Капустин М.И.¹, Костына К.В.¹, Большечев В.А.², Турин В.О.³

¹ ИПАИТ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орёл

² АО «Протон», г. Орёл

³ ФМФ ОГУ имени И.С. Тургенева, г. Орёл

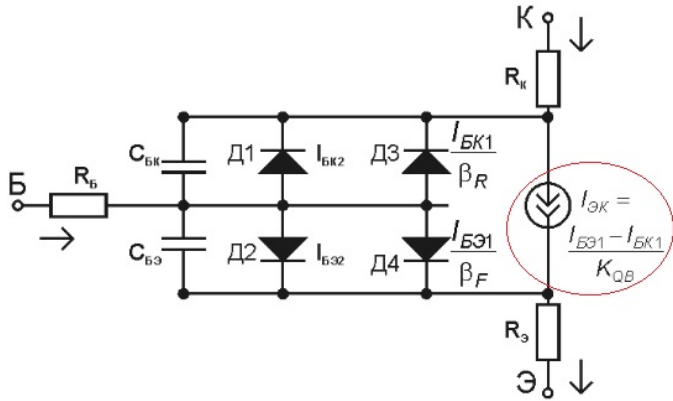
Модель Гуммеля-Пуна



Модель состоит из:

- 1) Три вывода: К (коллектор), Б(база). Э(эмиттер);
- 2) Источник тока $I_{эк}$;
- 3) Два диода Д1 и Д2, моделирующие два р–н перехода: Б–Э и Б–К;
- 4) Два диода Д3 и Д4, моделирующие ток рекомбинации в базе;
- 5) Сопротивления слоёв К, Б, Э: R_k , R_b , $R_э$;
- 6) Ёмкости $C_{бк}$ и $C_{бэ}$ р–н переходов Б–Э и Б–К, это суммы барьерных и диффузионных;

Модель Гуммеля-Пуна, источник тока



Источник тока $I_{ЭК} = \frac{I_{BE1} - I_{BK1}}{K_{QB}}$

где: $I_{BE1} = I_s \left(\exp \left(\frac{U_{BE}}{n_f \phi_T} \right) - 1 \right)$;

$$I_{BK1} = I_s \left(\exp \left(\frac{U_{BK}}{n_r \phi_T} \right) - 1 \right);$$

$$K_{QB} = \frac{K_{q1}}{2} + \sqrt{\left(\frac{K_{q1}}{2} \right)^2 + K_{q1}};$$

тогда: $I_{ЭК} = \frac{I_s}{K_{QB}} \left(\exp \left(\frac{U_{BK}}{n_r \phi_T} \right) - \exp \left(\frac{U_{BE}}{n_f \phi_T} \right) \right)$

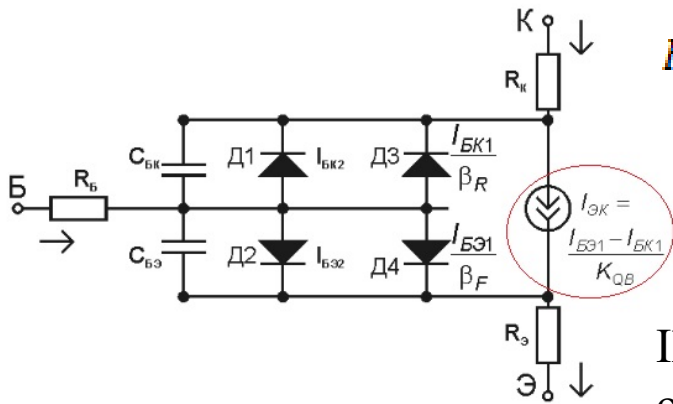
I_s - Обратный ток насыщения;

K_{qB} - коэффициент, учитывающий заряд базы;

n_f и n_r – коэффициенты неидеальности в прямом и инверсном режиме.

$$\phi_T = \frac{kT}{q} = 0,026 \text{ - тепловой потенциал при } t=27^\circ \text{ C}$$

Модель Гуммеля-Пуна, источник тока



$$K_{q1} = 1 + \frac{U_{бэ}}{V_{ar}} + \frac{U_{бк}}{V_{af}} - \text{тепловой потенциал при } t=27^\circ \text{ C};$$

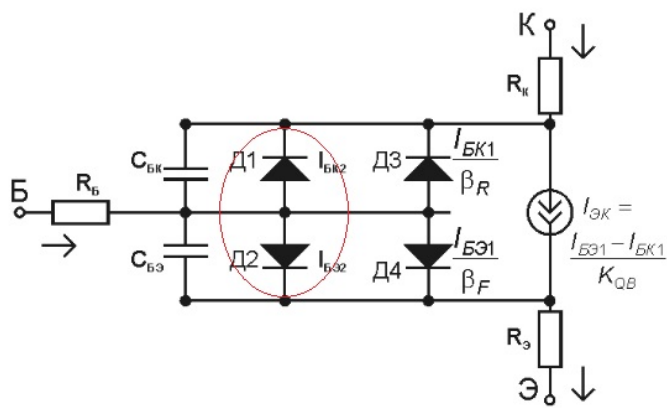
$$K_{q2} = \frac{I_{бэ1}}{I_{kf}} + \frac{I_{бк1}}{I_{kr}} - \text{учитывает эффект высокого уровня инжекции};$$

I_{kr} и I_{kf} – точки на графике зависимости β (I_k), определяющие спад β ;

I_{kr} – определяет границу области высокого уровня инжекции;

V_{af} и V_{ar} – напряжение Эрли в прямом и инверсном режиме.

Модель Гуммеля-Пуна, диоды Д1 и Д2



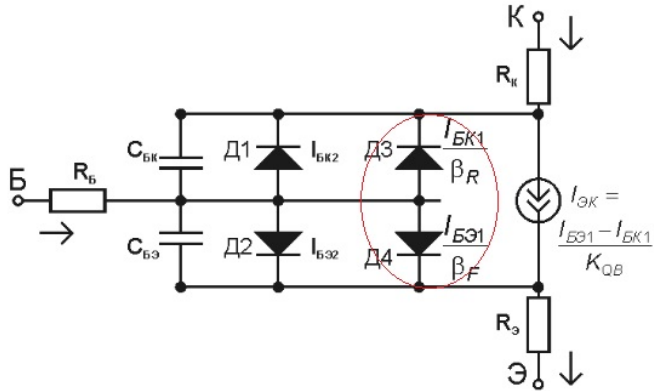
Два диода Д1 и Д2, моделирующие два р-п перехода: Б-Э и Б-К (от двух диодов транзистор отличается тем, что средняя часть, база тонкая и переходы взаимодействуют через неё); токи этих диодов:

$$\frac{I_{бэ1}}{\beta_F} \quad \frac{I_{бк1}}{\beta_R} \quad - \text{ токи инжекции}$$

$$\beta_F = \frac{I_K}{I_б} \quad \beta_R = \frac{I_э}{I_б}$$

- коэффициенты усиления тока в прямом и инверсном включении

Модель Гуммеля-Пуна, диоды Д3 и Д4



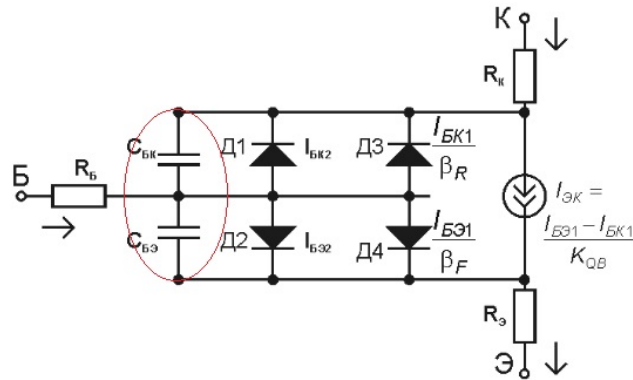
Два диода Д3 и Д4, моделирующие ток рекомбинации в базе: $I_{бэ2}$ и $I_{бк2}$

$$I_{бэ2} = I_{se} \left(\exp \left(\frac{U_{бэ}}{n_e \phi_T} \right) - 1 \right)$$

$$I_{бк2} = I_{sc} \left(\exp \left(\frac{U_{бк}}{n_s \phi_T} \right) - 1 \right)$$

n_e и n_s – коэффициенты неидеальности при малом уровне инжекции в прямом и инверсном включении

Модель Гуммеля-Пуна, ёмкости



Ёмкости p-n переходов Б-Э и Б-К, это суммы барьерных и диффузионных ёмкостей:

$$C_{i, \text{диф}} = \frac{T_i I_i}{m_i \phi_T}$$

$$C_{i, \text{бар}} = \frac{C_{i, \text{бар}0}}{\left(1 - \frac{U_i}{\phi_i}\right)^\theta}$$

Здесь: i – эмиттер или коллектор соответственно.

C_{je} , C_{jc} – (junction) ёмкости переходов Б-Э и Б-К при нулевом напряжении на переходе (смещении).

Модель Гуммеля-Пуна, доп. параметры

$V_{je}, V_{jc} = 0.7$ – (junction) контактная разность потенциалов переходов Б-Э и Б-К.

$M_{je}, M_{jc} = 0.3 \dots 0.5$ – (junction) коэффициенты учитывающие плавность эмиттерного и коллекторного перехода

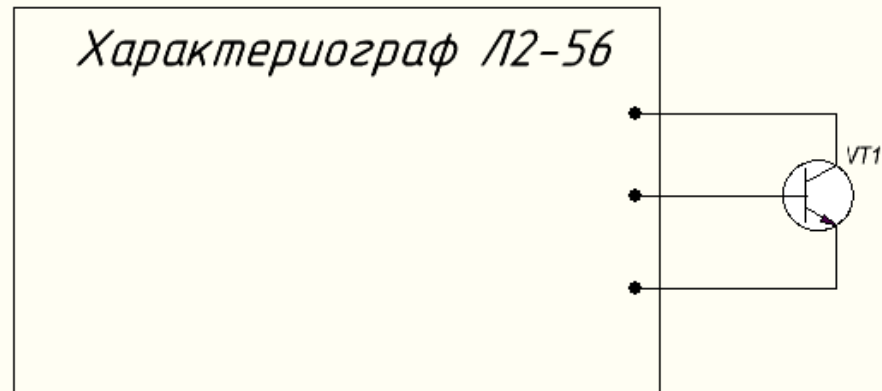
$T_f = \frac{1}{2\pi f_t}$ - время пролёта носителей через базу, где f_t – граничная частота

Параметры с индексом F относятся к прямому включению транзистора, когда переход Б-Э прямосмещён, переход Б-К обратносмещён; параметры с индексом R относятся к обратному включению транзистора, когда переход Б-Э обратносмещён, переход Б-К прямосмещён.

Идентификация параметров

№	Измеряемые параметры	Параметры требуемые Mirco-cap	Получаемые SPICE параметры
1	Входная и выходная характеристики	Vbe Ic	RE, NF, IS
2	Входная и выходная характеристики	Beta Ic	NE, ISE, BF, IKF
3	Выходная характеристика	Vce Ic	RC, BR, NC, ISC, IKR
4	Зависимость Сбк от смещения Убк	Vcb Cob	CJC, MJC, VJC, FC
5	Зависимость Сбэ от смещения Убэ	Veb Cib	CJE, MJE, VJE
6	Зависимость времени рассасывания TS от Ic	Ts Ic	TR
7	Зависимость граничной частоты усиления от Ic	Ft Ic	TF, ITF, XTF, VTF

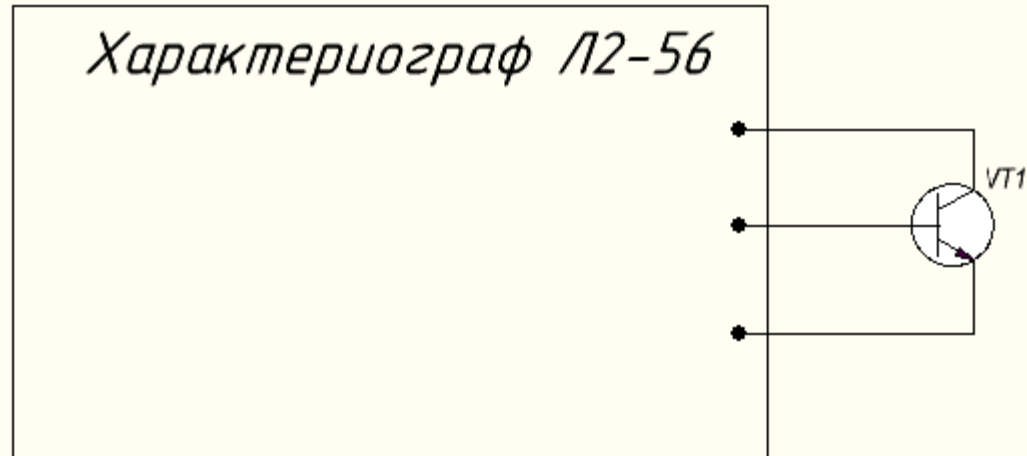
Входная характеристика



Входной характеристикой биполярного транзистора является зависимость напряжения на переходе база-эмиттер от тока базы, при постоянном напряжении перехода коллектор-эмиттер. Снятие входной характеристики производилось при помощи характериографа Л2-56. Изменяя ток базы получаем значения напряжения на переходе база-эмиттер.

Данные получаемые в этом эксперименте используются в опытах №1 и 2

Выходная характеристика



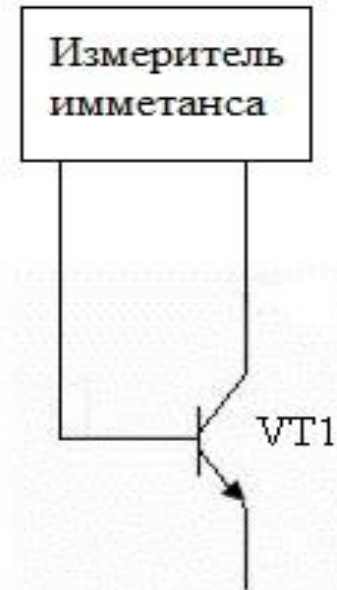
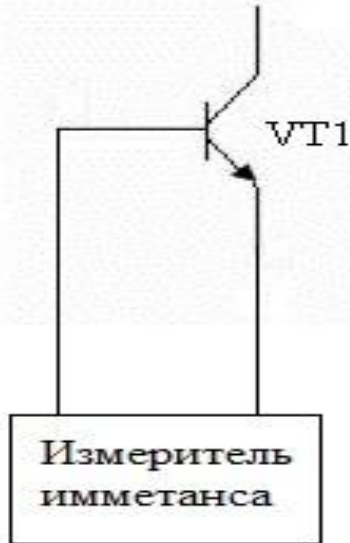
Выходной характеристикой биполярного транзистора является зависимость тока коллектора от напряжения на переходе коллектор-эмиттер при постоянном токе базы. Снятие входной характеристики производилось при помощи характериографа л2-56. Для всех транзисторов ток базы задавался с 10 мкА с тем же шагом.

Данные получаемые в этом эксперименте используются в опытах №1,2 и 3

Измерение ёмкостей

Измерения проводились при помощи измерителя иммитанса МНИПИ Е7-20.

Проводилось изменение уровня смещения перехода, в диапазоне от 0 до 6 вольт с шагом в 1 вольт. Так как кристалл транзистора при испытания был разварен в корпусе, вначале то проводились измерения ёмкости колодки, затем арматуры корпуса(выводов),затем проводился замер ёмкости транзистора.

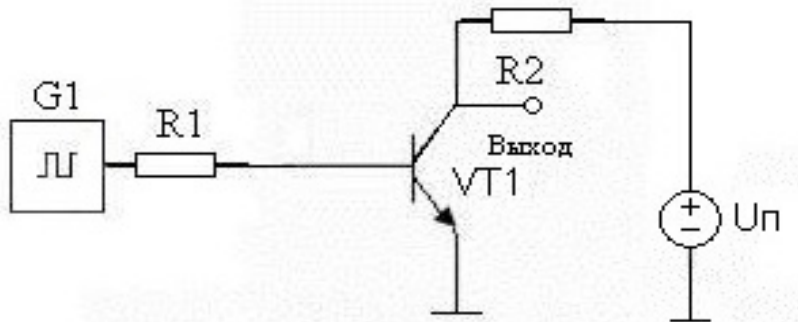


Стр-Ск-Са=Сист

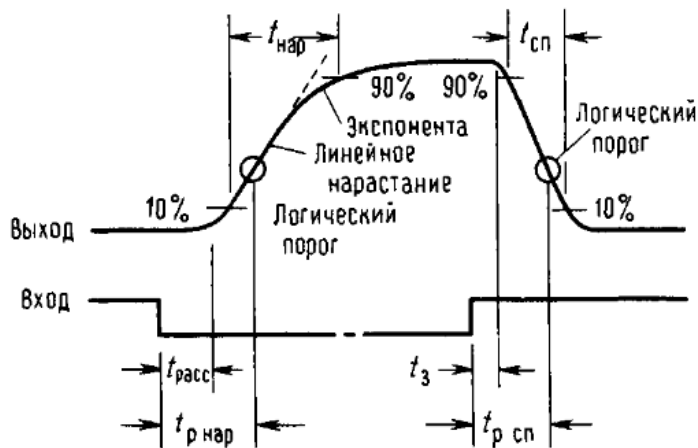
Данные получаемые в этом эксперименте используются в опытах №4 и 5, где они пересчитываются по формулам:

$$C_{ib} = C_{JE} / ((1 + V_{eb} / V_{JE})^{M_{JE}}) \text{ и } C_{ob} = C_{JC} / ((1 + V_{cb} / V_{JC})^{M_{JC}})$$

Зависимость времени рассасывания от тока коллектора



Для данного измерения использовался генератор OWON AG2052F, источник питания Mastech NY3005D-3 и осциллограф SDS8302V OWON. Проводилось изменение тока коллектора при этом изменялось время рассасывания.



Данные получаемые в этом эксперименте используются в опыте № 6

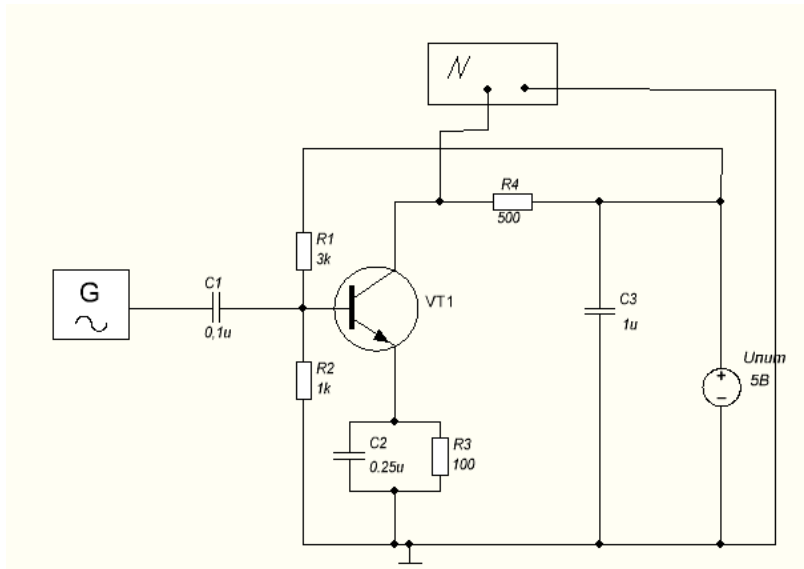
где они пересчитываются по формулам:

$$ar = br / (1.0 + br), af = bf / (1.0 + bf)$$

$$k1 = (1.0 - af * ar) / ar, k2 = (af / ar) * TF$$

$$TS = ((Tr + k2) / k1) * \ln(2.0 / ((Ic / Ib) / bf + 1.0))$$

Зависимость граничной частоты усиления от тока коллектора



Для данного измерения использовался генератор OWON AG2052F, источник питания Mastech NY3005D-3 и осциллограф SDS8302V OWON. Проводилось изменение частоты сигнала подаваемого в базу до тех пор пока модуль коэффициента передачи не становится равным единице.

Данные получаемые в этом эксперименте используются в опыте № 7

где они пересчитываются по формулам:

$$v_{be} = V_T * N * \ln(I_c / I_{SS})$$

$$v_{bc} = v_{be} - V_{ce}$$

$$atf = 1 + XTF * (I_c / (I_c + ITF))^2 * e^{(v_{bc} / (1.44 * V_T))}$$

$$tf = TF * (atf + 2 * (atf - 1) * ITF / (I_c + ITF) + V_T * N * (atf - 1) / (1.44 * V_T))$$

$$fa = (1 - v_{bc} / V_{AF}) * (1 - v_{bc} / V_{AF})$$

$$Ft = 1 / (2 * \pi * (tf / fa + V_T * N * (c_{je} + c_{jc} * (1 + I_c * RC / (V_T * N)))) / I_c)$$

Выводы

Проанализирована компактная модель Гумеля-Пуна для биполярного транзистора и математическое обеспечения для экстракции SPICE параметров БТ. Методика экстракции параметров проводилась на основании анализа предварительных экспериментальных данных, полученных для тестовых БТ на измерительном оборудовании АО «Протон».

Список литературы

1. Advanced Bipolar Transistor Modeling Techniques, HP Application Note 1201-4, Publication #5091-2503EUS, July, 1991.
2. J.J. Ebers and J.L. Moll, Large-Signal Behaviour of Junction Transistors, Proc. IRE, No. 42, 1954.
3. H.K. Gummel and H.C. Poon, An Integral Charge Control Model of Bipolar Transistors, Bell Systems Technical Journal, No. 49, 1970.
4. P. Antognetti, G. Massobrio: Semiconductor Device Modeling with SPICE, McGraw-Hill, 1988, ISBN 0-07-002107-4
5. J.C. Bowers, N. English and H.A. Nienhaus, "Parameter determination techniques for the Gummel-Poon CAD transistor model," 1980 IEEE Power Electronics Specialists Conference, Atlanta, Georgia, USA, 1980, pp. 83-90.
6. Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Расчёт Spice параметров биполярных транзисторов с использованием конструктивно технологических и электрофизических параметров. Современная электроника, № 5, 2009, 48-53.
7. Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Идентификация параметров модели, описывающих вольтамперные характеристики биполярных транзисторов. Современная электроника, № 6, 2009, 52-61.
8. Дворников О., Шульгевич Ю. Методы идентификации параметров моделей интегральных транзисторов. Часть 1. Альтернативные методы идентификации параметров модели биполярных транзисторов. Современная электроника, № 7, 2009, 48-51.
9. Micro-Cap 7.0 Electronic Circuit Analysis Program Reference Manual Copyright 1982-2001 by Spectrum Software 1021 South Wolfe Road Sunnyvale, CA 94086.
10. Motorola Small-Signal Transistors, FETs, and Diodes Device Data. Revision 6. Motorola, Inc. 1997.
11. Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing. William H. Press, Saul A. Teukolsky, William T. Vetterling, Brian P. Flannery, Michael Metcalf. Second Edition. Cambridge University Press. 1992
12. F. Sischka, "Gummel-Poon Bipolar Model: Model Description and Parameter Extraction," Agilent Technologies, Munich, 2001.
13. Петраков О.М. Создание аналоговых PSPICE-моделей радиоэлементов. Москва: Издательское предприятие РадиоСофт, 2004. - Серия «Книжная полка радиолюбителя». Выпуск 8.