

СТАТИСТИЧЕСКИ МОДЕЛ НА ПОЛЕВИ ТРАНЗИСТОР В ИССИ

ст.ас. ктн ГАЛЯ ИЛИЕВА МАРИНОВА –
Технически Университет, София

Моделирането на полеви транзистори е разгледано подробно в [1,3,4,5,6]. В [1,7] е направен анализ на разсейването на характеристиките на полеви транзистори в рамките на една производствена серия и са направени изводи за значението на технологичните отклонения.

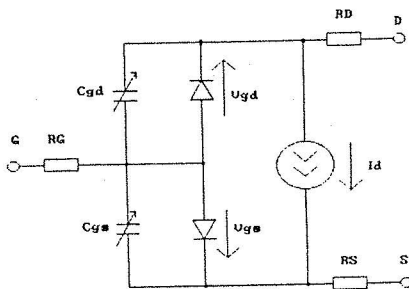
Настоящият доклад представя нов статистически модел на полеви транзистор, който е построен с цел да се разширят възможностите за анализ на статистическия симулатор за електрониката – ИССИ. Статистическият модел на полеви транзистор е построен на основата на номиналния модел в PSpice [4,5]. Разработена е методика за определяне на параметрите му от измерени данни според изискванията и формата на ИССИ описани в [2]. Новият статистически модел на полеви транзистор е вграден в ИССИ. Представени са примери за статистическо моделиране на дискретни и интегрални схеми с полеви транзистори, като е приложен новият модел.

1. Методика за определяне на параметрите на статистически модел на полеви транзистор

Еквивалентната схема на модела на полеви транзистор в PSpice е представена на фиг.1.

Методиката за определяне на параметрите на статистическия модел на полеви транзистор е разработена на основата на унифицираната методология за статистическо моделиране в ИССИ.

Отделните етапи на методиката са представени подробно в следващото изложение.



Фиг.1. Модел на полеви транзистор в PSpice

1.1. Организация и измерване на необходимите за статистическо моделиране характеристики и параметри на полевия транзистор

Моделът на полеви транзистор в PSpice се характеризира със следната система от параметри:

V_{to} – прагово напрежение;	Δ – модулация на широчината на канала;
β – коефициент на транспроводимост;	PB – p-n потенциал на гейта;
R_D – дрейново омично съпротивление;	FC – коефициент на намаляване на капацитета при право включване;
R_S – сорсово омично съпротивление;	V_{tots} – температурен коефициент на V_{to} ;
I_g – p-n ток на насиване на гейта;	β_{tsv} – температурен коефициент на β ;
C_{gd} – капацитет гейт-дрейн, при 0V;	KF – коефициент на Фликер шум;
C_{gs} – капацитет гейт-сорс, при 0V;	AF – експоненциален множител на Фликер шум;

За интегрален полевия транзистор се включват допълнително:
 $R_D/area$ – серийно на дрейна;

$R_s/area$ - серийно на сорса;

R_g - серийно на гейта.

Според методиката за извличане на параметрите на модела на полеви транзистор в PSpice, описана в [5] следва да се измери следната система от характеристики:

Измерена характеристика	Снети параметри
$U_G(I_D), I_D=0$	V_{TO}
$I_D(U_G), U_G=0$	I_S, β
$C_{GD}(V_{GDR}), V_{GDR}=0$	C_{GD}
$C_{GS}(V_{GSR}), V_{GSR}=0$	C_{GS}

като V_{GDR} и V_{GSR} са обратните напрежения между гейта и дрейна и между гейта и сорса респективно.

Методиката за определяне на параметрите на статистическо модел на полеви транзистор не включва работа с модула за извличане на параметри на номинални модели PARTS на PSpice и всички необходими данни се получават директно от измервания. Методиката за полеви транзистори е по-елементарна от тази за биполарни транзистори и диоди и улеснява потребителите на ИССИ.

1.2. Определяне на параметрите на вектора на статистически значимите параметри на модела на полеви транзистор

Според статистическите изследвания на параметрите на модела на полеви транзистор, векторът на статистически значимите параметри се дефинира за дискретен елемент, като:

$$\vec{a}_{JFET} = (a_1(V_{TO}), a_2(I_S), a_3(\beta), a_4(C_{GS}), a_5(C_{GD}))$$

и за интегрален елемент, като

$$\vec{a}_{JFET} = (a_1(V_{TO}), a_2(I_S), a_3(\beta), a_4(C_{GS}), a_5(C_{GD}), a_6(R_g), a_7(R_D), a_8(R_{G1}))$$

като $a_1(par_1)$ - стойност на параметъра par_1 .

1.3. Снемане на матрицата на стойностите на параметрите на модела на полеви транзистор

От измерените статистически данни за параметрите на модела на полеви транзистор за серия от n елемента се снима матрицата:

$[a]_{n \times 5}$ - за дискретно изпълнение

JFET

или $[a]_{n \times 8}$ - за интегрално изпълнение.

JFET

Матрицата се конструира, като:

$$[a]_{n \times 5} = \begin{bmatrix} a_{11}(V_{TO}) & a_{21}(I_S) & a_{31}(\beta) & a_{41}(C_{GS}) & a_{51}(C_{GD}) \\ a_{12}(V_{TO}) & a_{22}(I_S) & a_{32}(\beta) & a_{42}(C_{GS}) & a_{52}(C_{GD}) \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{1n}(V_{TO}) & a_{2n}(I_S) & a_{3n}(\beta) & a_{4n}(C_{GS}) & a_{5n}(C_{GD}) \end{bmatrix}$$

От статистическите данни в [a] и според дефинициите в [2] JFET

се определят:

- 1) оценката на плътността на разпределение на системата статистически значими параметри - $\hat{f}(\vec{a})$;
- 2) еквивалентната статистическа оценка - $\hat{g}(\vec{a})$ на оценката $\hat{f}(\vec{a})$;
- 3) средните стойности на статистически значимите параметри:

$$\overline{V_{TO}}, \overline{I_S}, \overline{\beta}, \overline{C_{GS}}, \overline{C_{GD}}, (\overline{R_S}, \overline{R_D}, \overline{R_G}).$$

1.4. Построяване на статистическия модел на полеви транзистор

Статистическият модел на полеви транзистор е построен, както следва:

$$SM(JFET) = \left\{ \begin{array}{l} \text{Const} = PB=20 \quad FC=0.5 \quad (R_B=0 \quad R_G=0 \quad R_S=0) \\ \text{Var/Dim} \quad \overline{V_{TO}} \quad \overline{\beta} \quad \overline{I_S} \quad \overline{C_{GD}} \quad \overline{C_{GS}} \quad (\overline{R_D} \quad \overline{R_G} \quad \overline{R_S}) \\ \text{Means} \quad \overline{V_{TO}} \quad \overline{\beta} \quad \overline{I_S} \quad \overline{C_{GD}} \quad \overline{C_{GS}} \quad (\overline{R_D} \quad \overline{R_G} \quad \overline{R_S}) \\ g(\vec{a}) \\ y_1 = (h_1, \vec{a}), \quad l=1.3 \end{array} \right.$$

като системата апроксимации на характеристиките на полевия транзистор се определя от уравненията на модела, както следва:

$$y_1 = (h_1, \vec{a}) = \left\{ \begin{array}{l} I_d = h_1(\vec{a}, V_{gs}, V_{ds}) \left\{ \begin{array}{l} V_{ds} > 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} V_{gs} - V_{TO} < 0 \quad I_d = 0 \\ V_{gs} - V_{TO} > V_{ds} \quad I_d = \beta(1 + \lambda V_{ds}) V_{ds} (2(V_{gs} - V_{TO}) - V_{ds}) \\ 0 \leq V_{gs} - V_{TO} \leq V_{ds} \quad I_d = \beta(1 + \lambda V_{ds}) (V_{gs} - V_{TO}) \end{array} \right. \\ V_{ds} < 0 \quad d \rightarrow s \end{array} \right. \\ \text{Режим на отсечка} \\ \text{Линейен режим} \\ \text{Режим на насищане} \\ C_{GS} = h_2(\vec{a}, V_{gs}) \left\{ \begin{array}{l} V_{gs} \leq FC \cdot PB \quad C_{GS} = \arcsin(C_{GS1} - V_{gs}/PB)^M \\ V_{gs} > FC \cdot PB \quad C_{GS} = \arcsin(C_{GS1} - FC) \cdot (1+M) \cdot (1 - FC(1+M) + M V_{gs}/PB) \end{array} \right. \\ C_{GD} = h_3(\vec{a}, V_{gd}) \left\{ \begin{array}{l} V_{gd} \leq FC \cdot PB \quad C_{GD} = \arcsin(C_{GD1} - V_{gd}/PB)^M \\ V_{gd} > FC \cdot PB \quad C_{GD} = \arcsin(C_{GD1} - FC) \cdot (1+M) \cdot (1 - FC(1+M) + M V_{gd}/PB) \end{array} \right. \end{array} \right.$$

като $M=0.5$. Към модела може да се добавят уравнения за отразяване на топлинните въздействия.

2. Настройване на ИССИ към новия модел

Параметрите на статистическия модел на полеви транзистор се зареждат в Базата данни статистически модели на полупроводникови елементи на ИССИ, а познавателният образ се

заряда в Базата знания, като се предвиждат следните възможности за симулиране:

JFET	[n - канален	[дискретен
		p - канален		интегрален .

Статистическият симулатор ИССИ се настройва, така че от измерени данни за параметрите на номиналния модел на серия дискретни или интегрални полеви транзистори от различни типове да се определят и съхраняват параметрите на статистическите им модели. Така могат да се генерират серии полеви транзистори и да се симулират статистически електронни и интегрални схеми включващи полеви транзистори.

3. Примери

Представени са два примера за статистическо симулиране в ИССИ на електронна и интегрална схема с полеви транзистори, като е използван новия статистически модел.

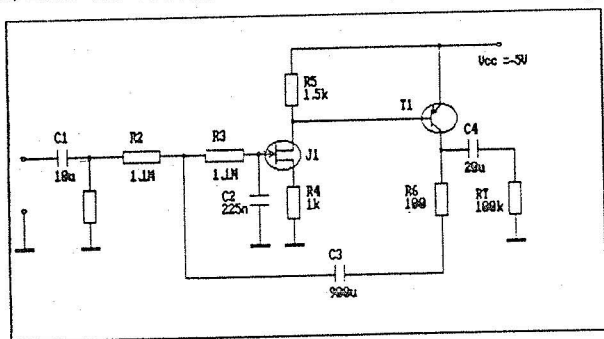
3.1. Двустъпален усилвател с полеви транзистор

Схемата е представена на фиг.2. Изследванията на чувствителността на схемата в честотна област от стойностите на пасивните елементи показва висока стабилност към техните изменения - чувствителността на амплитудо-честотната характеристика, оценена в PSpice е:

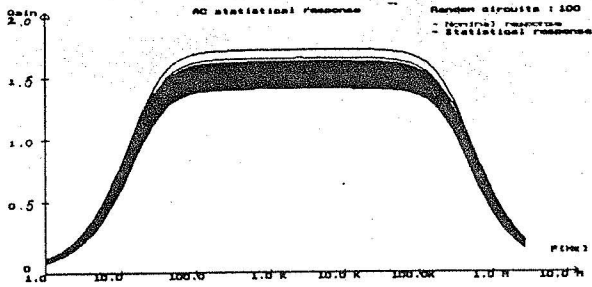
$$\frac{K_U}{S_{R,c}} < 1.$$

Следователно статистическото поведение на схемата се определя изключително от полевия и биполарния транзистори и техният правилен избор е гаранция за запазване на високата стабилност на усилвателя.

На фиг.3. е представен изхода от статистическото симулиране в ИССИ на усилвателя при 10% толеранси на пасивните елементи и с използване на статистическите модели на двата транзистора.



Фиг.2. Усилвател с полеви транзистор на входа

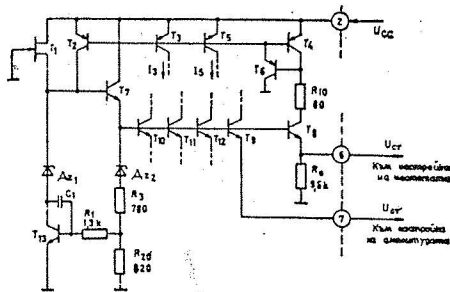


Фиг.3. Статистическо симулиране на АЧХ на усилвателя в ИССИ

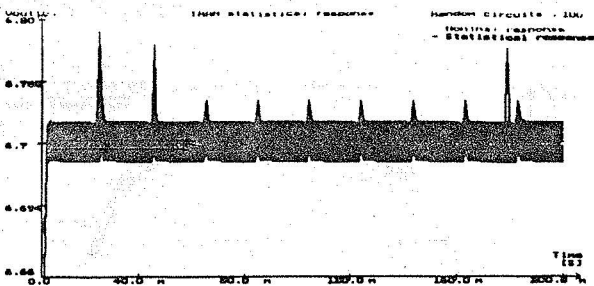
3.2. Стабилизатор на ток и напрежение в интегрална схема

На фиг. 4. е представена схемата на стабилизатор на ток и напрежение в интегралната схема TDA1170. Полевият транзистор T_1 , служи за предотвратяване на евентуалното запусване на транзисторите T_4 и T_5 , като подава ток на транзистора T_7 , който отпуща T_8 . Транзисторите $T_8, 9, 10, 12$ работят като емитерни повторители и осигуряват стабилизирано напрежение в различни точки на ИС TDA1170, а $T_{3,5}$ реализират генератори на ток и осигуряват постоянни стабилизирани токове в схемата.

На фиг. 5. е представен изхода от статистическото симулиране в ИССИ на стабилизираното напрежение, което се подава на функционалните възли в интегралната схема. Използван е статистически модел на интегрален полев транзистор, 10% колебание на захранването, 2% толеранс на пасивните елементи в ИС и статистически модели на интегралните биполярни транзистори.



Фиг.4. Стабилизатор на ток и напрежение в TDA1170



Фиг. 5. Изход от статистическото симулиране в ИССИ на стабилизираното напрежение

Резултатите от статистическото симулиране позволяват да се построи макромодел на стабилизатора и да се оцени влиянието на разсейването на стабилизираното напрежение върху сигналите на интегралната схема.

Заключение

Построяването на статистически модел на полеви транзистор е свързано със задачите за разширение на възможностите на статистическия симулатор ИССИ и за създаването на специализирани методики за определяне на параметрите на статистическите модели на различни типове електронни елементи.

Новият модел дава възможност да се симулират адекватно широк кръг интегрални схеми и устройства, включващи полеви транзистори и да се изпълняват съвременните стандарти за качество на полупроводникови елементи и интегрални схеми [7].

В този аспект предстои да се разработят методики за статистическо моделиране на MOS и CMOS транзисторни елементи и структури.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Козинцева Л. П., "Усилители на полевых транзисторах", "Связь", Москва, 1975г.
2. Маринова Г., "Статистически подход, методи и средства за проектиране в електрониката", Дисертационен труд, Технически университет, София, 1993г.
3. Разевиг В. Д., "Применение программ PCAD и PSpice для схемотехнического моделирования на ПЭВМ". Выпуск 2. "Радио и связь", 1992г.
4. Antognetti P., G. Massobio, "Semiconductor device modeling with Spice", McGraw Hill Inc., New York, 1988
5. PSpice, Users' guide, MicroSim corporation - La Dardine Drive, Laguna Hills, 1989
6. "Transistor circuit design", Texas instruments, McGraw Hill, 1988, Singapore
7. IEC 747-8-3, Part 8, "Field-effect transistor", Section 3: Blank detail specification for case-rated field-effect transistors for switching applications, IEC quality assesment, 1995