POLSKA AKADEMIA NAUK
KOMITET ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI
MINISTERSTWO NAUKI I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO
MINISTERSTWO ŁĄCZNOŚCI

B

KRAJOWE SYMPOZJUM TELEKOMUNIKACJI '87

REFERATY SESJI

PROBLEMY PRODUKCJI I EKSPLOATACJI
UKŁADY PODSTAWOWE I PROCESORY

9—11 września 1987
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy

dr inż. Dariusz Lewandowski
dr inż. Janusz Tomczak
doc. dr hab. inż. Bogdan Wilamowski
Instytut Technologii Elektronicznej
Politechniki Gdańskiej

METODY IDENTYFIKACJI PARAMETRÓW MODELI TRANZYSTORÓW BIPOLARNYCH

Przedstawiono metody identyfikacji stałoprądowych parametrów modeli tranzystorów bipolarnych dla potrzeb komputerowej symulacji układów elektronicznych. Opisano praktyczne metody pomiaru. Przedyskutowano różnice w modelach tranzystorów bipolarnych w ogólnie dostępnych programach komputerowej analizy układów takich jak NAP-2, SPICE-2, µCAP-1 i µCAP-2.

Proces technologiczny wytwarzania układów scalonych jest na tyle skomplikowany i drogi, że wprowadzając do produkcji układ scalony jego konstrukcja musi być wszechstronnie zweryfikowaną. Tradycyjne metody wytwarzania układów próbnych z elementów indywidualnych są w tym przypadku zupełnie nieprzydatne. Nawet gdyby wykorzystać "scalone" struktury elementów, to zarówno efekty termiczne jak i efekty pasożytnicze spowodują znacznie odmienne funkcjonowanie układu. Dlatego jedyną możliwością sprawdzenia poprawności układu jest jego komputerowa symulacja. W tym celu jednak trzeba zastosować należyte modele elementów składowych układu.

Bardzo bogata literatura fachowa dotycząca modelowania właściwości stałoprądowych tranzystorów bipolarnych stwarza możliwość łatwego wyboru odpowiedniego opisu charakterystyk elektrycznych tranzystora. Jednak używanie gotowych programów analizy układów elektronicznych zmusza do stosowania modeli

/Temat realizowany w ramach CPBP 02.16

wbudowanych w te programy. Pozostaje wówczas jedynie określenie metod identyfikacji parametrów modeli tranzystorów.

W programie SPICE [1] stosowana jest uproszczona wersja modelu Gummela-Poona [2]. Natomiast w programie NAP2 [3] wykorzystana jest zmodyfikowana wersja modelu Ebersa-Molla [4]. Oba modele są szczegółowo opisane m.in. w książce Marciniaka [5]. W przeciwieństwie do programu SPICE, NAP2 nie uwzględnia w sposób bezpośredni zjawisk specyficznych dla małego i dużego poziomu wstrzykiwania . Umżloiwia jednak uwzględnienie ich poprzez podanie zależności - współczynników wzmocnienia prądowego α_F, α_R oraz nachylenia charakterystyk $\log I_C(V_{BE})$, $\log I_C(V_{BC})$ od napięć polaryzujących złącza. W programie NAP2 istnieje ponadto możliwość dołączenia modelu transportowego [6] zbliżonego .do propozycji Gummela-Poona. W programach µCAP1 i µCAP2 wbudowane są uproszczone modele Ebersa-Molla.

Do opisu tranzystorów bipolarnych najbardziej odpowiednim jest model Gummela-Poona w wersji stosowanej w programie SPICE. Równania tego modelu mają postać:

$$I_{CC}=(I_S/q_G)\cdot[\exp(V_{BE}/n_F V_T)-\exp(V_{CB}/n_R V_T)] \quad (1)$$

gdzie

$$q_G=q_1/2+[(q_1/2)^2+q^2]^{1/2} \quad (2)$$

$$q_1=1+V_E/V_A+V_{BC}/V_B \quad (3)$$

$$q_2=I_S/I_{kF}[\exp(V_{BE}/n_F V_T)-1]+I_S/I_{KR}[\exp(V_{BC}/n_R V_T)-1] \quad (4)$$

oraz

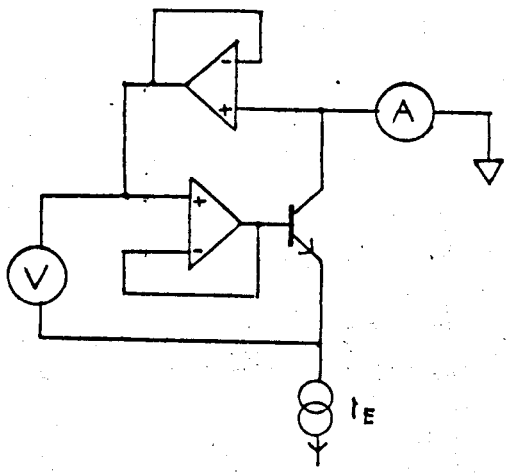
$$I_{BE}=I_S/\beta_F[\exp(V_{BE}/n_F V_T)-1]+I_{SE}[\exp(V_{BE}/n_E V_T)-1] \quad (5)$$

$$I_{BC}=I_S/\beta_R[\exp(V_{BE}/n_R V_T)-1]+I_{SC}[\exp(V_{BE}/n_C V_T)-1] \quad (6)$$

Powyższy model należy uzupełnić o rezystancje rozproszone bazy, emitera i kolektora, które można uzależnić od prądu I_C. Jedyna różnica między równaniami (1)-(6) a modelami z programu

SPICE (opisanym m.in. przez Marciniaka [5]) to wprowadzenie współczynników n_F i n_R w równaniu na prąd I_{CC}. Najważniejszym uproszczeniem modelu jest pominięcie wpływu efektu Kirka, wywołującego nieco szybsze zmniejszanie się współczynnika wzmocnienia prądowego β w stosunku do opisu równań (1)-(6). Właściwa identyfikacja parametrów modeli możliwa jest po starannym wykonaniu pomiarów.

Rys.1 przedstawia układ dla pomiaru charakterystyki $i_C(u_{BE})/u_{CB}=0$. Zerowa wartość napięcia u_{CB} wymuszona została przez układ wtórnika ze wzmacniaczami operacyjnymi. Zapewnia on obciążenie kolektora niewielkim prądem ok. 50 pA oraz separację woltomierza od bazy. Wartość napięcia u_{BE} ustalona jest przez regulowane źródło prądowe w obwodzie emitera.

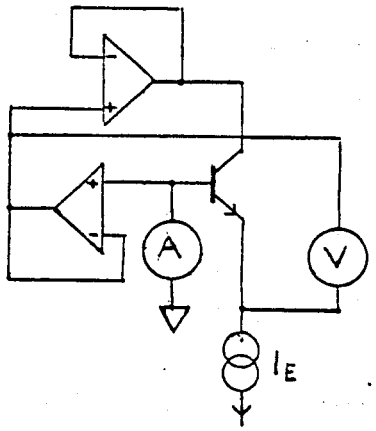


Rys.1 Układ pomiarowy prądu kolektora.

Rys.2 przedstawia układ dla charakterystyki $i_B(u_{BE})/u_{CB}=0$. Zastosowanie wtórnika o małym wejściowym prądzie polaryzacji umożliwia pomiar przy zerowym napięciu u_{CB} niezależnie od spadku napięcia na amperomierzu w zakresie prądu bazy i_B od 10 nA.

Pomiar rezystancji emitera r_E przeprowadzono metodą Kulke-Millera [7], natomiast pomiar rezystancji kolektora r_C dla obszaru nasycenia przeprowadzono metodą opisaną w [8], [9]. Rezystancję r_C dla obszaru aktywnego określono metodą opisaną w [9]. Obydwie metody bazują na charakterystykach wyjściowych na granicy obszarów nasycenia i aktywnego.

Rezystancję rozproszoną bazy wyznaczono jako rezystancję emitera podłożowego tranzystora pnp.



Rys.2 Układ do pomiaru pradu bazy

Identyfikację parametrów modeli tranzystora można przeprowadzić na dwa sposoby. Pierwszy polega na zastosowaniu estymacji nieliniowej, tzn. na minimalizacji funkcji celu określonej np. jako suma kwadratów odchyleń wyników pomiarowych od opisywanych przez model. Do minimalizacji funkcji celu można zastosować gotowe programy profesjonalne. Umożliwiają one m.in. nakładanie ograniczeń na ekstremalne wartości parametrów co pozornie umożliwia przyjmowanie przez nie wartości niefizycznych (np. ujemnych). Metodologia ta jest w pewnej mierze niebezpieczna. Problem wynika stąd, że każdy model jest

w pewnych zakresach bliższy a w pewnych dalszy od rzeczywistej sytuacji. Stosując optymalizację nieliniową uśrednia się parametry modelu gubiąc ich sens fizyczny. Może to doprowadzić do znacznych błędów w przypadku rozszerzenia zakresu stosowania modelu. Dlatego też znacznie lepszą jest metoda podana przez Getreu [9], która polega na identyfikacji parametrów w niewielkich grupach lub pojedynczo.

Dla niskiego poziomu wstrzykiwania, gdy $q_G=q_1$, przy $V_{BC}=0$ równanie (1) upraszcza się do postaci:

$$I_{cc}=\frac{I_s}{1+V_{BE}/V_A}\cdot\exp\left(V_{BE}/n_F V_T\right) \qquad (7)$$

Znając wartość V_A łatwo jest wyznaczyć I_s oraz n_F. Napięcie Early'ego V_A można określić na podstawie pomiarów przewodności wyjściowej tranzystora pracującego w zakresie inwersyjnym aktywnym dla $V_{BE}=0$. Podobnie można wyznaczyć V_B oraz n_R dla I_{cc} przy $V_{BE}=0$.

Parametry opisujące nieidealne składowe prądu bazy łatwo obliczyć na podstawie zależności (5) i (6) po określeniu parametrów β_F i β_R (maksymalne wzmocnienia prądowe). Wymaga to jednak starannych pomiarów przy małych gęstościach prądu bazy.

Nieco bardziej kłopotliwe jest wyznaczenie parametrów I_{KF} i I_{KR} opisujących działanie tranzystora dla dużych gęstości prądu. Spowodowane jest to trudnym do określenia wpływem polaryzacji na rezystancję rozproszoną bazy, pominięciem w modelu efektu Kirka oraz zjawiskiem samonagrzewania tranzystora. Z drugiej jednak strony w typowych sytuacjach nie projektuje się układów z tranzystorami pracującymi w zakresie bardzo dużych gęstości prądów, w związku z czym błędy modelowania mają drugoplanowe znaczenie.

Podsumowanie

Staranne pomiary chrakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora bipolarnego umożliwiają prostą identyfikację parametrów modelu zbliżonego do propozycji Gummela-Poona. Ponieważ model Ebersa-Molla jest równoważny modelowi Gummela-Poona przy pominięciu dużego i małego poziomu wstrzykiwania, podobnie można wyznaczyć parametry modelu wersji podstawowej programu NAP2. Wybór modelu jest w istocie rozstrzygnięciem sprzeczności między szybkością obliczeń a ich dokładnością.

Literatura

1. Nagel L.W.: SPICE2 A computer program to simulate semiconductor circuits.ElectronicsResearch Laboratory Report N.ERL-MS20 Univ.of California,Berkeley, 1975.

2. Gummel H.K., Poon H.C.: An integral charge control model of bipolar transistors. Bell Syst.Techn.,1970, No 5-6,s.827-852.

3. Rubner-Petersen T.: A nonlinear analysis program for electronic circuit, User Mannal 16/5, 1973

4. Ebers J.J.,Moll J.L.: Large signal behaviour of junction transistors., Proc. IRE,vol 42, s.1761-17772, 1964.

5. Marciniak W.: Modele elementów półprzewodnikowych, WNT Warszawa 1985.

6. Lewandowski D.: Transportowy model tranzystora bipolarnego dla programu analizy układów NAP2. Zgłoszone na X Kon. TUiOE.

7. Kulke B.,Miller S.B.:Accurate measurements of emitter and collector series resistances in transistors. Proc.IRE.(Lett), vol.45, s 90, 1957.

8. Pietrenko W.,Wilamowski B.: Pomiar rezystancji rozproszonej kolektora tranzystora bipolarnego. Rozprawy Elektroniczne, s.803-812, 1976.

9. Getreu I.F.: Modeling the bipolar transistor, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam 1978.