

Komputerowe modelowanie elementów elektronicznych

- Układy rzeczywiste
 - elementy biernie – proste (z wyjątkiem magnetycznych)
 - pojedyncze (dyskretne) przyrządy półprzewodnikowe
 - układy scalone – znaczny stopień skomplikowania, z reguły stosuje się wiele uproszczeń
- Spotyka się wszystkie 3 podejścia
 - podstawowe, mikroskopowe równania fizyki – w pełni fizyczne (przyczynowe), zwykle 2 i 3-wymiarowe
 - makroskopowe równania opisujące wielkości elektryczne – mogą być fizyczne, ale z reguły są mieszane, gdyż zawierają zależności i parametry wyznaczone empirycznie (również empiryczne parametry do fizycznych równań)
 - równania i parametry bez związku z zasadą działania, oparte tylko na obserwacjach zewnętrznych



Komputerowe modelowanie elementów elektronicznych

- Dwie postaci modelu
 - model wbudowany
 - równania lub obwód zastępczy zdefiniowane wewnątrz symulatora
 - instrukcja MODEL pozwala wprowadzić wartości parametrów inne niż domyślne
 - konkretny element wstawia się do obwodu przez dopisanie elementu o nazwie rozpoczynającej się od odpowiedniej litery (R, C, L, D, Q, J, M; w niektórych SPICE'ach również inne)
 - podobwód
 - dopóki się nie zdefiniuje, symulator go nie rozpozna
 - instrukcja SUBCKT ... ENDS pozwala wprowadzić opis podobwodu złożonego z dowolnych elementów
 - konkretny element wstawia się do obwodu przez dopisanie elementu o nazwie rozpoczynającej się od litery X



Komputerowe modelowanie elementów elektronicznych

- Modele wbudowane a podobwody w praktyce
 - modele wbudowane mogą być różne w różnych implementacjach SPICE'a
 - obie postaci spotyka się w bibliotekach dostarczanych przez producentów elementów
 - pojedyncze elementy – z reguły modele wbudowane
 - ale niektóre zjawiska nie są tam uwzględnione, wówczas stosuje się podobwody (np. w elementach większej mocy)
 - układy scalone – podobwody, ale wcale nie muszą być to modele strukturalne (przyczynowe)



Modele wbudowane przyrządów półprzewodnikowych

- Rodzaje elementów
 - dioda – D / D
 - tranzystor bipolarny (BJT) – Q / NPN, PNP, LPNP
 - tranzystor polowy złączowy (JFET) – J / NJF, PJF
 - tranzystor polowy z izolowaną bramką (MOSFET) – M / NMOS, PMOS
- Tylko w PSPICE'ie (wersja MicroSim)
 - tranzystor GaAsFET – B / GASFET
 - tranzystor bipolarny z izolowaną bramką (IGBT) – Z / NIGBT
- Modele posiadają także elementy: S, W, T (linia transmisyjna)
- Mogą posiadać modele (ale nie muszą):
 - rezystor – R / RES
 - kondensator – C / CAP
 - cewka – L / IND
 - sprzężenie cewek (transformator, rdzeń) – K / CORE



Modele wbudowane przyrządów półprzewodnikowych

- Deklaracja nazwy modelu i parametrów
 - **.MODEL nazwa_modelu**
+ **[AKO: model_bazowy]**
+ **typ_modelu_wbudowanego**
+ **[parametr1=wartość1 parametr2=wartość2 ...]**
...
 - **oznaczenie_elementu końcówki nazwa_modelu**
 - nazwa_modelu – dowolna zaczynająca się literą
 - model_bazowy – nazwa modelu, z którego mają być pobrane wartości domyślne
 - typ_modelu_wbudowanego – określa typ przyrządu (D, NPN, PNP, ... jak na poprzednim slajdzie)
 - parametrom nie określonym zostaną przypisane wartości domyślne lub z modelu_bazowego (o ile został podany)
 - oznaczenie_elementu musi się rozpoczynać od odpowiedniej litery biorąc pod uwagę typ_modelu_wbudowanego (patrz poprzedni slajd)



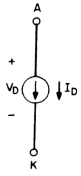
Modele wbudowane przyrządów półprzewodnikowych

- W jednym pliku może być wiele modeli tego samego przyrządu (np. wiele modeli tranzystora BJT NPN)
- Z jednego modelu może korzystać wiele elementów w obwodzie (np. mogą być 4 diody MUR830 o różnych nazwach elementów, ale o tej samej nazwie modelu)
- Deklaracja nazwy modelu i parametrów
 - dioda D67, której model DIODA ma wszystkie parametry domyślne
.MODEL DIODA D
D67 1 5 DIODA
 - diody D68 i D69 opisane modelem MUR130 o zdefiniowanych parametrach CJ i TT
D68 7 11 MUR130
D69 12 19 MUR 130
.MODEL MUR130 CJ=30e-9 TT=6e-6

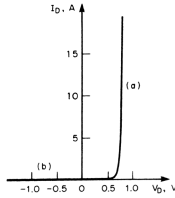


Modele diody

■ DC najprostszy



$$I_D = I_S (e^{qV_D/kT} - 1) + V_D \text{ GMIN}$$

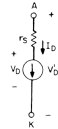
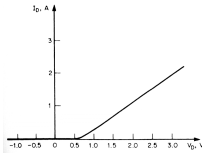


Modele diody

■ DC – uwzględnia: generację-rekombinację, rezystancję szeregową bazy, wysoki poziom wstrzykiwania

$$I_D = f(V_D) = \begin{cases} I_S (e^{qV_D/nkT} - 1) + V_D \text{ GMIN} & \text{for } V_D \geq -5 \frac{nkT}{q} \\ -I_S + V_D \text{ GMIN} & \text{for } V_D < -5 \frac{nkT}{q} \end{cases}$$

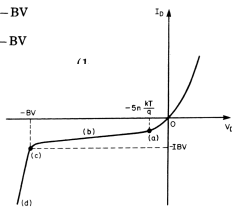
$$V_D = r_S I_D + V_D$$



Modele diody

■ DC dla polaryzacji wstecznej

$$I_D = f(V_D) = \begin{cases} I_S (e^{qV_D/nkT} - 1) + V_D \text{ GMIN} & \text{for } -5 \frac{nkT}{q} \leq V_D \leq 0 \\ -I_S + V_D \text{ GMIN} & \text{for } -BV < V_D < -5 \frac{nkT}{q} \\ -IBV & \text{for } V_D = -BV \\ -I_S \left(e^{-q(BV + V_D)/nkT} - 1 + \frac{qBV}{kT} \right) & \text{for } V_D < -BV \end{cases}$$



Modele diody w wersji PSpice

■ PSpice

- Model wielkosygnałowy
 - przejęty całkowicie z wersji SPICE2
- Model małosygnałowy
 - przejęty całkowicie z wersji SPICE2
- Zależności temperaturowe (przykładowe)

- przejęte z modyfikacjami

- prąd nasycenia

$$I_S(T_2) = I_S(T_1) \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{XTU/n} \exp\left[-\frac{qE_g(300)}{nkT_2} \left(1 - \frac{T_2}{T_1}\right)\right]$$

- rezystancja szeregową

$$r_s(T_2) = r_s(T_1) [1 + TRS1(T_2 - T_1) + TRS2(T_2 - T_1)^2]$$

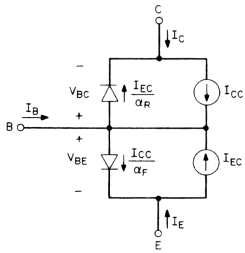
- pojemność złączowa

$$C_j(T_2) = C_j(T_1) \left\{ 1 + m \left[400 \times 10^{-6} (T_2 - T_1) - \frac{\phi_0(T_2) - \phi_0(T_1)}{\phi_0(T_1)} \right] \right\}$$



Tranzystor bipolarny złączowy

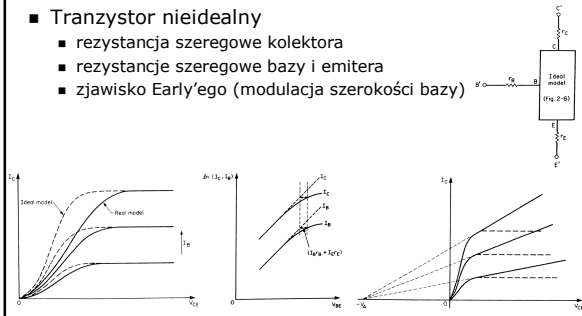
■ Oryginalny model stałoprądowy Ebersa-Molla



Tranzystor bipolarny złączowy

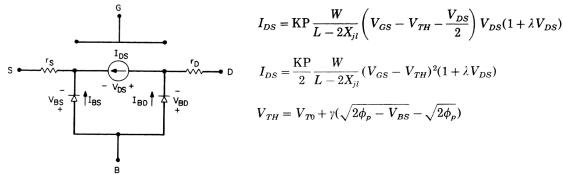
■ Tranzystor nieidealny

- rezystancja szeregowo kolektora
- rezystancje szeregowo bazy i emitera
- zjawisko Early'ego (modulacja szerokości bazy)



Modele tranzystora polowego MOSFET

- Ciągły rozwój ze względu na mikroelektronikę
 - mniejsze wymiary, napięcia, większe częstotliwości
 - istotne stają się zjawiska, które dawniej można było zaniedbać
- Pierwszy stworzony model – tzw. LEVEL1 (Shichmana-Hodgesa)



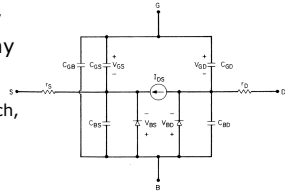
$$I_{DS} = KP \frac{W}{L - 2X_H} \left(V_{GS} - V_{TH} - \frac{V_{DS}}{2} \right) V_{DS} (1 + \lambda V_{DS})$$

$$I_{DS} = \frac{KP}{2} \frac{W}{L - 2X_H} (V_{GS} - V_{TH})^2 (1 + \lambda V_{DS})$$

$$V_{TH} = V_{T0} + \gamma (\sqrt{2\phi_p - V_{BS}} - \sqrt{2\phi_p})$$

Modele tranzystora polowego MOSFET

- LEVEL1 wielosygnałowy
- LEVEL2 – tzw. analityczny
 - oparty na bardziej skomplikowanych rozważaniach teoretycznych, fizyczne równania i parametry
 - problemy ze zbieżnością, obciążenie CPU



$$L' = L_{eff}(1 - \lambda V_{DS})$$



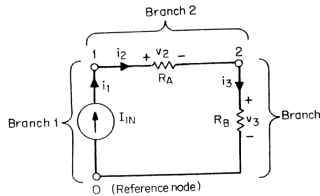
$$L_{eff} - L' = X_D \sqrt{\left(\frac{X_D v_{max}}{2f_0} \right)^2 + V_{DS} - V_{Dsat}} - \frac{X_D^2 v_{max}}{2f_0}$$

Modele tranzystora polowego MOSFET

- Powstawały kolejne modele...
 - LEVEL3 (półempiryczny model tranzystora z krótkim kanałem) – równania na powrót uproszczono, wprowadzono równania i parametry empiryczne
 - najchętniej stosowany (do 1 μm)
 - wielosygnałowy – identyczna topologia, inne wzory
 - BSIM1 (berkeleyowski model tranzystora z krótkim kanałem) – równania skomplikowano, do wyznaczenia parametrów opracowano specjalny program
 - BSIM3v3 (1995) – technologie submikronowe
 - powszechnie używany przez producentów i użytkowników
 - BSIM4 (2000) – L < 100 nm
 - ponad 300 parametrów

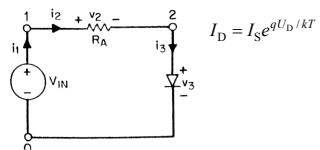
Algorytmy numeryczne

- Zmodyfikowana metoda potencjałów węzłowych
- Układ równań liniowych → metoda eliminacji Gaussa
 - nadaje się tylko do obwodów liniowych, czyli do obwodów elektronicznych się nie nadaje



Algorytmy numeryczne

- Układy z elementami nieliniowymi
 - algorytm Newtona-Raphsona lub Geara



$$I_D = I_S e^{qU_D / kT}$$

$$i_1^{k+1} + \frac{e_2^{k+1} - e_1^{k+1}}{R_A} = 0$$

$$\frac{e_1^{k+1} - e_2^{k+1}}{R_A} - I_S e^{q e_2^{k+1} / kT} - \frac{q(e_2^{k+1} - e_2^k)}{kT} I_S e^{q e_2^k / kT} = 0$$

$$e_1^{k+1} = V_{IN}$$

Algorytmy numeryczne

- Układy z elementami nieliniowymi
 - algorytm Newtona-Raphsona lub Geara

