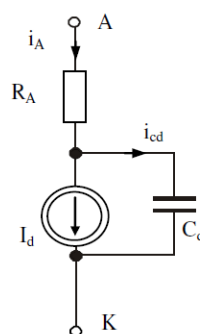


# Modelowanie diod półprzewodnikowych

Programie PSPICE wbudowane są modele wielu elementów półprzewodnikowych takich jak diody, tranzystory bipolarne, tranzystory dipolowe złączone, tranzystory MOSFET, tranzystory IGBT. Wszystkie te elementy opisane są modelami nieliniowymi wielkosygnalowymi, których postać jest bardzo złożona.

Na tych zajęciach przedstawiony zostanie opis najprostszego z rozważanych modeli – model diody oraz sposób wyznaczania wybranych charakterystyk tego elementu.

Dioda opisana jest w programie PSPICE za pomocą modelu, którego reprezentację obwodową pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Reprezentacja obwodowa modelu diody w programie PSPICE.

W modelu tym, źródło prądowe  $I_d$  modeluje charakterystyki statyczne rozważanego elementu,  $R_A$  – jego rezystancję szeregową, zaś  $C_d$  – pojemność złącza. Prąd źródła  $I_d$  stanowi sumę składowej dyfuzyjnej i generacyjno-rekombinacyjnej oraz prądu przebicia złącza, zgodnie ze wzorem:

$$I_d = I_{nrm} \cdot K_{inj} + I_{rec} \cdot K_{gen} - I_{revh} - I_{revl} \quad (1)$$

gdzie  $I_{nrm}$  oznacza składową dyfuzyjną daną wzorem (2),  $K_{inj}$  – współczynnik wstrzykiwania dany wzorem (3),  $I_{rec}$  – składową rekombinacyjną daną wzorem (4),  $K_{gen}$  – współczynnik generacji opisany wzorem (5), zaś  $I_{revh}$  oraz  $I_{revl}$  oznaczają wysokoprądową i niskoprądową składową prądu przebicia wyrażonych wzorami (6) i (7).

$$I_{nrm} = IS \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{N \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (2)$$

$$K_{inj} = \sqrt{\frac{IKF}{IKF + I_{nrm}}} \quad (3)$$

$$I_{rec} = ISR \cdot \left[ \exp\left(\frac{V}{NR \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

$$K_{gen} = \left[ \left(1 - \frac{V}{V_J}\right)^2 + 0,005 \right]^{M/2} \quad (5)$$

$$I_{revh} = IBV \cdot \left[ \exp \left( \frac{-BV-V}{NBV \cdot V_t} \right) \right] \quad (6)$$

$$I_{revl} = IBVL \cdot \left[ \exp \left( \frac{-BV-V}{NBVL \cdot V_t} \right) \right] \quad (7)$$

W prezentowanych wzorach  $V$  oznacza napięcie na źródle prądowym  $I_d$ ,  $V_t$  – potencjał termiczny, a pozostałe symbole oznaczają parametry modelu diody, których sens wyjaśniono w tabeli 1.

Inercja elektryczna diody jest modelowana za pomocą kondensatora  $C_d$ , którego pojemność dana wzorem

$$C_d = TT \cdot \frac{dI}{dV} + C_j \quad (8)$$

stanowi sumę składowej dyfuzyjnej i składowej złączowej  $C_j$  wyrażonej wzorem

$$C_j = \begin{cases} C_{J0} \cdot \left(1 - \frac{V}{V_J}\right)^{-M} & \text{dla } V \leq FC \cdot V_J \\ C_{J0} \cdot (1 - FC)^{-(M+1)} \left(1 - FC \cdot (1 + M) + M \cdot \frac{V}{V_J}\right) & \text{dla } V > FC \cdot V_J \end{cases} \quad (9)$$

Jak wiadomo, właściwości elementów półprzewodnikowych silnie zależą od temperatury. Modele tych elementów wbudowane w programie PSPICE uwzględniają tę zależność poprzez uzależnienie takich parametrów modelu jak prąd nasycenia  $I_S$ , prąd nasycenia składowej rekombinacyjnej  $I_{SR}$ , prąd kolana  $I_{KF}$ , napięcie przebicia  $BV$ , rezystancja szeregową  $R_S$ , potencjał złączowy  $V_J$ , pojemność złączowa przy zerowej polaryzacji  $C_{J0}$  oraz szerokość przerwy energetycznej  $E_g$  od temperatury. Zależności te dane są wzorami

$$I_S(T) = I_S \cdot \exp \left[ \left( \frac{E_g}{N \cdot V_t} \right) \cdot \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right] \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{XTI/N} \quad (10)$$

$$I_{SR}(T) = I_{SR} \cdot \exp \left[ \left( \frac{E_g}{NR \cdot V_t} \right) \cdot \left( \frac{T}{T_0} - 1 \right) \right] \cdot \left( \frac{T}{T_0} \right)^{XTI/NR} \quad (11)$$

$$I_{KF}(T) = I_{KF} \cdot [1 + TIKF \cdot (T - T_0)] \quad (12)$$

$$BV(T) = BV \cdot [1 + TBV1 \cdot (T - T_0) + TBV2 \cdot (T - T_0)^2] \quad (13)$$

$$R_S(T) = R_S \cdot [1 + TRS1 \cdot (T - T_0) + TRS2 \cdot (T - T_0)^2] \quad (14)$$

$$VJ(T) = VJ \cdot \left(\frac{T}{T_0}\right) - 3 \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - E_g(T_0) \cdot \frac{T}{T_0} + E_g(T) \quad (15)$$

$$CJO(T) = CJO \cdot \left(1 + M \cdot \left(0,0004 \cdot (T - T_0) + 1 - \frac{VJ(T)}{VJ}\right)\right) \quad (16)$$

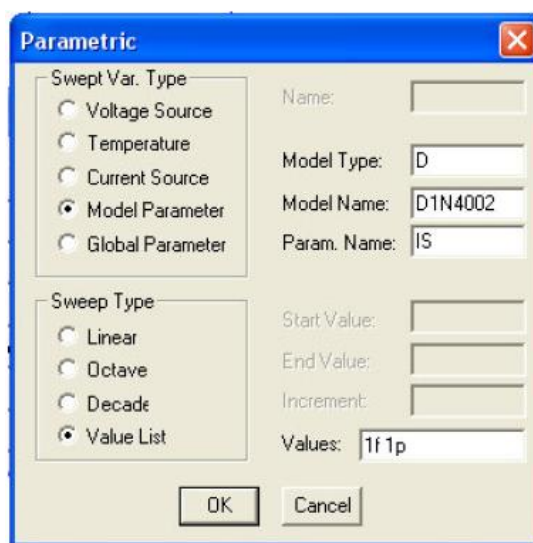
$$E_g = 1,16 - \frac{0,000702 \cdot T^2}{T+1108} \quad (17)$$

Symbol	Nazwa parametru	Jednostka	Wartość domyślna
AF	wykładnik szumów migotania		0
BV	napięcie przebicia	V	$\infty$
CJO	pojemność złączowa przy zerowej polaryzacji	F	0
EG	Szerokość przerwy energetycznej	eV	1.11
FC	Współczynnik w linearyzowanej zależności $C_j(V)$		0.5
IBVL	Prąd kolana składowej niskoprądowej prądu przebicia	A	0
IBV	prąd przebicia przy $V = - BV$	A	0,1 n
IKF	Prąd kolana	A	$\infty$
IS	prąd nasycenia	A	10 f
ISR	Prąd nasycenia składowej rekombinacyjnej	A	0
M	wykładnik opisujący profil domieszkowania złącza		0.5
N	współczynnik emisji		1
NBV	Współczynnik nieidealności prądu przebicia		1
NBVL	Współczynnik nieidealności składowej niskoprądowej prądu przebicia		1
NR	Współczynnik emisji dla składowej rekombinacyjnej		2
RS	Rezystancja szeregową	$\Omega$	0
TBV1	Liniowy współczynnik temperaturowych zmian napięcia przebicia	$^{\circ}C^{-1}$	0
TBV2	Kwadratowy współczynnik temperaturowych zmian napięcia przebicia	$^{\circ}C^{-2}$	0
TRS1	Liniowy współczynnik temperaturowych zmian rezystancji szeregową	$^{\circ}C^{-1}$	0
TRS2	Kwadratowy współczynnik temperaturowych zmian rezystancji szeregową	$^{\circ}C^{-2}$	0
TT	czas przelotu	s	0
T_ABS	Temperatura elementu w czasie analizy	$^{\circ}C$	27
VJ	potencjał złączowy	V	1
XTI	wykładnik w potęgowej zależności prądu nasycenia od temperatury		3

Tabela 1. Lista parametrów modelu diody wraz z ich wartościami domyślnymi.

W celu wyznaczenia charakterystyki statycznej diody trzeba narysować schemat układu, stanowiący równoległe połączenie badanej diody oraz niezależnego źródła napięciowego lub prądowego i przeprowadzić analizę DC Sweep względem wydajności tego źródła w zadanym zakresie zmian napięcia lub prądu.

W celu oceny wpływu wybranego parametru na charakterystyki statyczne diody należy wybrać w Setupie 2 analizy: DC Sweep oraz Parametric. W oknie dialogowym DC Sweep należy ustawić analizę względem wydajności źródła zasilającego w wybranym zakresie jego zmian. Z kolei, w oknie dialogowym analizy parametrycznej (Parametric) należy wybrać w charakterze rodzaju zmiennej przemiatanej Model Parametr, jako Model Type należy wybrać D (co oznacza diodę), jako Model Name – nazwę analizowanej diody, np. D1N4002, jako Param. Name – nazwę badanego parametru, np. IS, jako Sweep Type – Value List oraz wpisać listę wartości wybranego parametru modelu, dla których mają być przeprowadzone analizy. Przykładowy wygląd wypełnionego okna dialogowego Parametric pokazano na rys. 2. Okno to odpowiada analizie wpływu parametru IS na charakterystyki diody D1N4002, a obliczenia są wykonywane przy wartościach rozważanego parametru równych 1 pA oraz 1 fA.



Rys. 2. Okno dialogowe analizy parametrycznej.

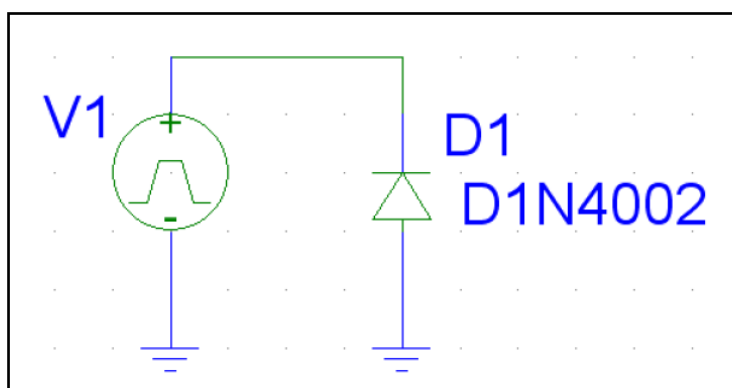
W celu wyznaczenia zależności pojemności złączonej diody od napięcia na jej zaciskach można wykorzystać układ przedstawiony na rys. 3. Układ ten składa się z badanej diody oraz źródła napięciowego generującego przebieg trapezoidalny. W parametrach źródła napięciowego przyjmuje się zerową wartość poziomu niskiego V1, a wartość poziomu wysokiego V2 równa jest wartości napięcia wstecznego na diodzie, dla której ma być wyznaczona zależność  $C_j(V)$ . należy przyjąć zerową wartość czasu opóźnienia TD, a czas narastania impulsu TR powinien wynosić około 1 ms. Dla rozważanego układu należy przeprowadzić analizę stanów przejściowych przyjmując wartość Final Time równą wartości czasu TR. Wówczas, w całym

rozważanym zakresie analizy, napięcie wsteczne na diodzie jest liniowo narastającą funkcją czasu.

Jak wiadomo, podstawowe równanie kondensatora ma postać

$$i_C = C \cdot \frac{du_C}{dt} \quad (18)$$

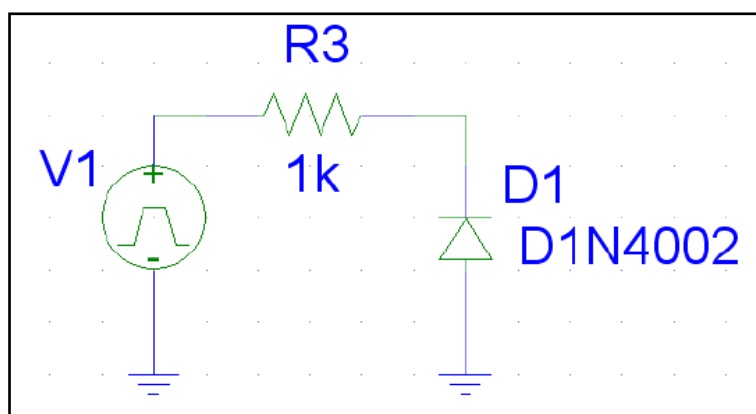
gdzie  $i_C$  oznacza prąd kondensatora  $C$ , zaś  $u_C$  – napięcie na jego zaciskach.



Rys. 3. Schemat układu do wyznaczania charakterystyki  $C_j(V)$  diody.

A zatem po wykonaniu analizy stanów przejściowych należy w programie PROBE wykreślić na osi pionowej wyrażenie o postaci  $\frac{-i(D1) \cdot TR}{V2 - V1}$ , a na osi poziomej wybrać napięcie a diodzie.

Do oceny właściwości impulsowych diody wykorzystuje się układ przełącznika diodowego pokazany na rys. 4.



Rys. 4. Schemat układu przełącznika diodowego.

W układzie tym obok diody i źródła napięciowego znajduje się rezystor. Źródło napięciowe wytwarza przebieg trapezoidalny. Dla poprawnego działania układu niezbędne jest, aby poziomy napięć w generowanym przebiegu miały przeciwne znaki, a moduły ich wartości były

znacznie większe od spadku napięcia na diodzie spolaryzowanej w kierunku przewodzenia. Współczynnik wypełnienia tego sygnału powinien wynosić 0,5, a czas trwania impulsu powinien być około dwukrotnie dłuższy od oczekiwanej wartości czasu odzyskiwania zdolności zaworowej diody. Czas narastania i opadania impulsu powinny być co najmniej stukrotnie krótsze od czasu trwania impulsu. Dla wybranej diody, czasy narastania i opadania powinny wynosić około 20 ns.

### **Zadania do samodzielnego wykonania**

1. Wyznaczyć charakterystyki statyczne diody D1N4002 w zakresie przewodzenia, blokowania i przebicia dla dwóch wartości temperatury, równych odpowiednio 27°C oraz 150°C.
2. Zbadać wpływ następujących parametrów modelu diody: IS, N, ISR, NR, IKF, RS, BV na przebieg jej charakterystyk statycznych.
3. Wyznaczyć charakterystykę  $C_j(u)$  rozważanej diody oraz zbadać wpływ parametrów CJO, M oraz VJ na jej przebieg.
4. Wyznaczyć czasowe przebiegi prądu diody D1N002 w czasie jej przełączania. Na podstawie uzyskanych wyników obliczeń wyznaczyć zależność czasu odzyskiwania zdolności zaworowej  $t_{rr}$  diody od parametru TT. Obliczenia przeprowadzić dla maksymalnej wartości prądu wstecznego  $I_R$  diody w czasie wyłączenia, równego -1 A.