

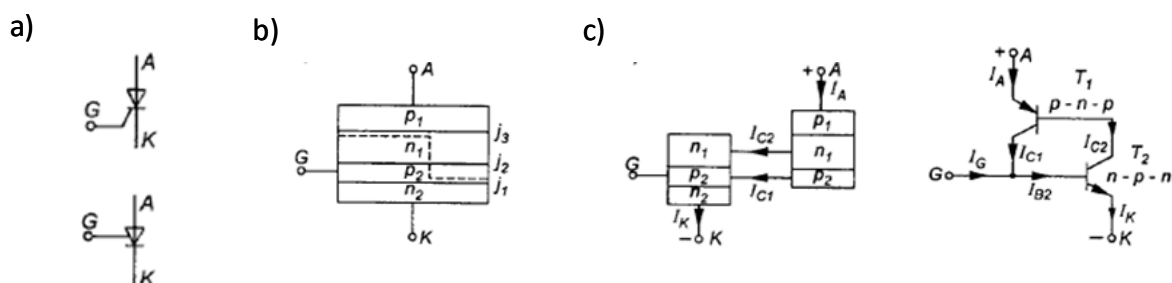
7. TYRYSTORY

7.1. WSTĘP

Tyristory są półprzewodnikowymi przyrządami mocy pracującymi jako łączniki dwustanowe, tj. mające stan włączenia (charakteryzujący się małą rezystancją) i stan wyłączenia (o dużej rezystancji).

7.2. TYRYSTOR SCR

Tyristor, oznaczany symbolem SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), jest przyrządem półprzewodnikowym o strukturze czterowarstwowej. Ma on trzy wyprowadzenia: anodę (A), katodę (K) i bramkę (G). Bramka jest elektrodą sterującą (rys.7.1).

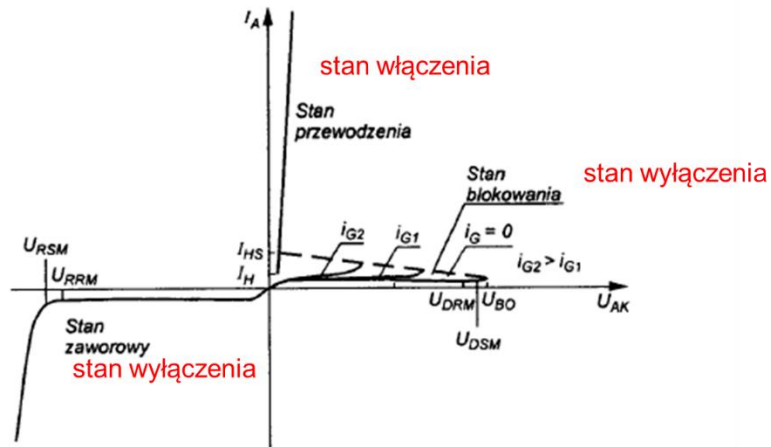


Rys. 7.1. Tyristor: a) symbole graficzne, b) struktura, c) model dwutranzystorowy

Charakterystyka prądowo-napięciowa tyristora jest przedstawiona na rys.7.2. Wyróżnić w niej można zakresy dodatniej polaryzacji anody względem katody (pierwsza ćwiartka układu współrzędnych) i polaryzacji ujemnej (ćwiartka trzecia). W zakresie dodatniej polaryzacji anody tyristor może znajdować się w dwóch stanach stabilnych, tj. stanie blokowania i stanie przewodzenia. W zakresie ujemnej polaryzacji anody tyristor jest w stanie zaworowym. Stan zaworowy i blokowania są stanami wyłączenia tyristora. Stan przewodzenia jest stanem włączenia tyristora.

W stanie zaworowym, przy ujemnym napięciu anoda-katoda, właściwości tyristora są podobne do właściwości diody. Dopóki napięcie nie przekroczy pewnej granicznej dopuszczalnej wartości, dopóty przez tyristor płynie niewielki prąd, którego wartość zależy od temperatury złącza. Zdolność zaworowa tyristora jest ograniczona powtarzalnym szczytowym napięciem wstecznym U_{RRM} i niepowtarzalnym szczytowym napięciem wstecznym U_{RSM} .

W stanie blokowania, przy dodatnim napięciu anoda-katoda, gdy prąd bramki nie płynie ($I_G=0$), przebieg charakterystyki jest podobny jak w stanie zaworowym. Przekroczenie napięcia U_{BO} powoduje przełączenie tyristora w stan przewodzenia. Przełączenie tyristora w stan przewodzenia przy napięciu mniejszym niż U_{BO} wymaga przepływu prądu bramki o wartości tym większej, im mniejsze jest napięcie pomiędzy anodą a katodą tyristora.

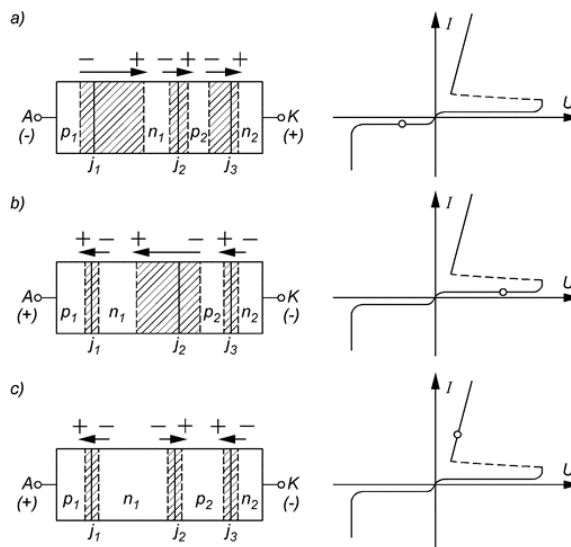


Rys. 7.2. Charakterystyka prądowo napięciowa tyrystora

Stan blokowania tyrystora charakteryzowany jest takimi parametrami, jak: powtarzalnym szczytowym napięciem blokowania U_{DRM} i niepowtarzalnym szczytowym napięciem blokowania U_{DSM} . Wartości te nie powinny być przekraczane w warunkach normalnej eksploatacji.

W stanie przewodzenia minimalna wartość prądu, jaki musi popłynąć tuż po przełączeniu ze stanu blokowania jest określona przez prąd załączenia I_{HS} . Natomiast wartość graniczna prądu przy przejściu ze stanu przewodzenia do stanu blokowania nosi miano prądu podtrzymania I_H . Gdy prąd anodowy tyrystora zmniejszy się poniżej tej wartości tyrystor przechodzi ze stanu przewodzenia w stan blokowania, zatem jest wyłączany.

Maksymalna obciążalność prądowa tyrystora jest ograniczona prądem granicznym I_{TAVM} (nie jest zaznaczony na charakterystyce). Jest to największa średnia wartość prądu tyrystora w kształcie półfali sinusoidy o częstotliwości 50 Hz w określonych warunkach chłodzenia.



Rys.7.3. Rozkłady napięć na złączach tyrystora w stanie: a) zaporowym, b) blokowania, c) przewodzenia

W stanie zaporowym (rys.7.3a) złącza j_1 i j_3 są spolaryzowane w kierunku zaporowym, a złącze j_2 w kierunku przewodzenia. W miarę zwiększania napięcia przy pewnej jego wartości następuje przebicie złącza, przy czym w pierwszej kolejności przebija się złącze j_1 , a następnie

złącze j_3 . Dzieje się tak z uwagi na niesymetryczne właściwości złączy wynikające z technologii produkcji. Charakterystyka tyrystora w zakresie przebicia jest podobna do charakterystyki diody.

W stanie blokowania (rys.7.3b) złącza j_1 i j_3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze j_2 w kierunku zaporowym.

W stanie przewodzenia (rys.7.3c) wszystkie złącza są spolaryzowane w kierunku przewodzenia. Napięcie na złączu j_2 ma przeciwną biegunowość i odejmuje się od spadków napięć na złączach pozostałych.

Zasada pracy czterowarstwowej struktury tyrystora może być wyjaśniona na podstawie modelu zastępczego złożonego z dwóch tranzystorów $p_1-n_1-p_2$ i $n_1-p_2-n_2$ (rys.7.1c), otrzymanego przez myślowe rozsuniecie struktury przeciętej wzdłuż linii przerywanej jak na rys.7.1b. Przy dodatniej polaryzacji anody tyrystora w stanie blokowania, jak wcześniej wspomniano, złącza j_1 i j_3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze j_2 w kierunku zaporowym. Można uznać, że złącza: pierwsze (p_1-n_1) i trzecie (p_2-n_2) pełnią funkcje złączy emiterowych obu tranzystorów, a złącze drugie (n_1-p_2) jest wspólnym złączem kolektorowym.

Analizując schemat zastępczy z uwzględnieniem pracy tranzystorów, można napisać układ równań:

$$I_{C1} = \alpha_1 I_{E1} + I_{CB01} \quad (7.1)$$

$$I_{C2} = \alpha_2 I_{E2} + I_{CB02} \quad (7.2)$$

gdzie: α_1 i α_2 - współczynniki wzmocnienia prądowego dla tranzystorów w konfiguracji WB, I_{CB01} i I_{CB02} - prądy nasycenia złączy kolektorowych.

Suma prądów kolektorów musi być równa prądowi anodowemu tyrystora, a zatem:

$$I_{C1} + I_{C2} = I_A \quad (7.3)$$

Można zauważyć, że:

$$I_{E1} = I_A \quad (7.4)$$

$$I_{E2} = I_K = I_A + I_G \quad (7.5)$$

Wprowadzając oznaczenia:

$$I_{C0} = I_{CB01} + I_{CB02} \quad (7.6)$$

Otrzymujemy:

$$I_A = \frac{I_{C0} + \alpha_2 I_G}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (7.7)$$

Przy małych wartościach prądu emitera tranzystora krzemowego współczynnik wzmocnienia α jest bardzo mały. Szybko natomiast wzrasta przy wzroście prądu.

W warunkach blokowania, gdy nie jest dostarczany prąd bramki ($I_G=0$) suma $\alpha_1+\alpha_2$ jest bardzo mała i prąd między anodą i katodą tyrystora równy jest prądowi nasycenia tranzystorów T_1 i T_2 . Oddziaływanie zewnętrzne poprzez dostarczanie prądu bramki I_G , będącego składową prądu bazy tranzystora T_2 , powoduje wzrost prądu emitera, a to z kolei wzrost wartości współczynników wzmocnienia.

Jeśli suma wartości współczynników wzmocnienia $\alpha_1+\alpha_2$ jest bliska jedności, to jak wynika ze wzoru (7.7), prąd anodowy wzrasta teoretycznie do nieskończoności, tzn. tyrystor przechodzi do stanu przewodzenia i jego prąd jest ograniczony wyłącznie przez parametry obwodu zewnętrznego. **Sterowanie prądem bramki jest podstawowym sposobem włączenia tyrystora**, tj. spowodowania, że przechodzi on ze stanu blokowania do stanu przewodzenia. Z przebiegu charakterystyki (rys.7.2) wynika, że w zależności od wartości

prądu bramki włączenie tyrystora może mieć miejsce przy różnych wartościach napięcia anoda-katoda. Im większa jest wartość prądu bramki, tym mniejsze jest napięcie anoda-katoda, przy którym następuje włączenie tyrystora.

Włączenie tyrystora może nastąpić nie tylko na skutek sterowania prądem bramki, lecz także w wyniku:

1) wzrostu napięcia anodowego w stanie blokowania tyrystora do wartości, przy której zostanie zapoczątkowany proces przebiecia lawinowego w zaporowo spolaryzowanym złączu j_2 (napięcie U_{B0} , rys.7.2), powoduje to wzrost prądu i przełączenie tyrystora do stanu przewodzenia,

2) skokowych zmian napięcia anodowego o dużej stromości narastania zboczy du_A/dt ; zaporowo spolaryzowane złącze j_2 w stanie blokowania tyrystora ma określoną pojemność i przy odpowiednio dużej wartości du_A/dt składowa zmienna przepływa przez tę pojemność powodując chwilowy wzrost prądu i w konsekwencji włączenie tyrystora,

3) przekroczenia dopuszczalnej temperatury złączy; przy wysokiej temperaturze prąd generacji cieplnej obu tranzystorów wzrasta do wartości powodującej przełączenie tyrystora,

4) promieniowania świetlnego. Bezpośrednie naświetlenie struktury złącza j_2 powoduje generację par elektron-dziura, przez co wzrasta prąd powodując włączenie tyrystora. Wykorzystywane jest to z reguły w fototyrystorach, gdzie funkcję sterującą bramki przejmuje strumień świetlny padający przez okno w obudowie tyrystora. Wykorzystanie fototyrystorów zapewnia dobrą izolację elektryczną obwodu sterującego od obwodu silnopiętowego anoda - katoda tyrystora.

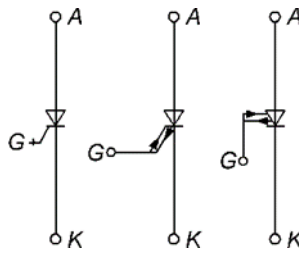
Wyłączenie tyrystora SCR, tj. przejście ze stanu przewodzenia do stanu blokowania możliwe jest tylko w jeden sposób. Następuje to po zmniejszeniu jego prądu anodowego poniżej wartości prądu podtrzymania I_H . Zwykle wyłączenie tyrystora następuje wskutek zmiany polaryzacji napięcia przemiennego zasilającego obwód anoda-katoda tyrystora lub w wyniku przejmowania prądu tyrystora przez inny obwód równoległy znajdujący się w jego układzie pracy.

7.3. TYRYSTOR GTO

Tyrystor GTO (*Gate Turn-Off*) może być zarówno włączany, jak i wyłączany prądem bramki. Dodatni prąd bramki włącza go, a wyłącza prąd bramki o kierunku przeciwnym. Symbole graficzne tyrystora GTO podano na rys.7.4.

Podobnie jak wcześniej omówiony tyrystor konwencjonalny SCR, tyrystor GTO ma strukturę czterowarstwową, ale różnice konstrukcyjne są bardzo duże. Polegają one m.in. na podziale katody na wiele segmentów otoczonych metalizowanym obszarem bramki, złożonej konstrukcji anody itd.

Sposób działania tyrystora GTO jest w zasadzie podobny do tyrystora SCR i może być zilustrowany takim samym dwutranzystorowym modelem zastępczym (rys.7.1c). Praca przyrządu w stanie blokowania, proces przełączania w stan przewodzenia i charakterystyki są takie same, jak w przypadku tyrystora SCR (rys. 7.2).



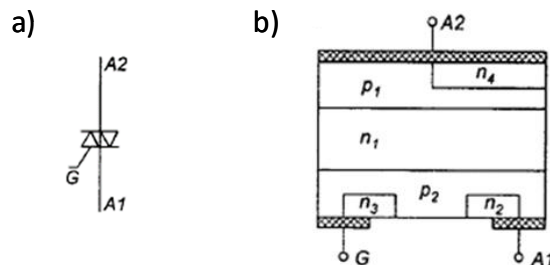
Rys. 7.4. Symbole graficzne tyrystora wyłączanego prądem bramki GTO

Warunki wyłączania tyrystora przy wykorzystaniu bramki można przedstawić na podstawie zastępczego schematu dwutranzystorowego (rys.7.1c). Gdy tyrystor znajduje się w stanie przewodzenia, wówczas oba tranzystory składowe są w stanie nasycenia. Spełnione są wtedy warunki: dla tranzystora T_1 warunek nasycenia $I_{B1} > (I_{C1}/\beta_{01})$ i dla tranzystora T_2 warunek nasycenia $I_{B2} > (I_{C2}/\beta_{02})$. Jeżeli prąd bazy tranzystora T_2 będzie krótkotrwale mniejszy od ww. wartości podtrzymującej nasycenie, to istnieją warunki, aby tranzystor T_2 przeszedł w aktywny zakres pracy i w efekcie spowodował przełączenie tyrystora w stan blokowania. Niemniej, aby spowodować przełączenie tyrystora prądem bramki, to do tej elektrody musi być doprowadzone ujemne napięcie, celem odprowadzenia nadmiarowego ładunku zgromadzonego w jego obszarach.

Proces wyłączania prądem bramki rozpoczyna się od doprowadzenia do bramki krótkotrwałego impulsu o wartości ujemnej. Amplituda tego impulsu prądowego musi być bardzo duża (ok. 20-30% wartości prądu anodowego), ale czas jego trwania może być niewielki (kilka do kilkunastu mikrosekund). Układ sterujący pracą tyrystora od strony bramki musi być dostosowany do przepływu dużych wartości prądu przy wyłączaniu tyrystora GTO, co wpływa znacząco na złożoność jego budowy.

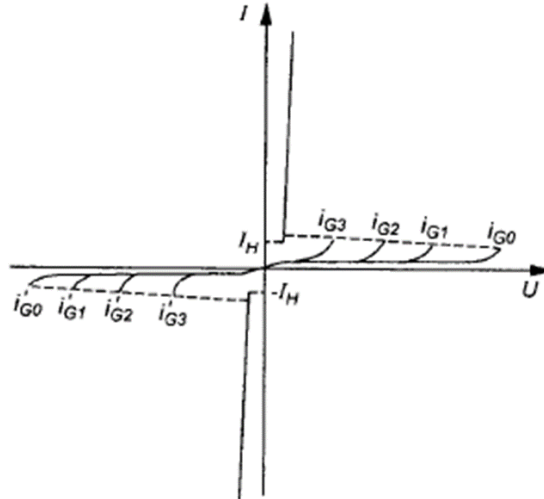
7.4. TRIAK

Triak jest tyrystorem dwukierunkowym. W jego strukturze można wyróżnić dwa tyrystory SCR połączone odwrotnie równolegle, przy czym mają one tylko jedną bramkę sterującą. Struktury te to: $p_1-n_1-p_2-n_2$ i $p_2-n_1-p_1-n_4$ (rys.7.5b). Triak ma trzy wyprowadzenia: anodę pierwszą A_1 , anodę drugą A_2 i bramkę G (rys.7.5).



Rys. 7.5. Triak: a) symbol graficzny, b) struktura przyrządu

Charakterystyka prądowo-napięciowa triaka jest symetryczna względem punktu początku układu współrzędnych, zatem zarówno przy polaryzacji $U_{A2} > U_{A1}$ jak i $U_{A2} < U_{A1}$ triak może być w stanach blokowania i przewodzenia (rys.7.6).



Rys. 7.6. Charakterystyka prądowo napięciowa triaka

Istnieją następujące metody włączania triaka:

1. Gdy $U_{A2} > U_{A1}$ wówczas struktura $p_1-n_1-p_2-n_2$ pracuje jak klasyczny tyrystor. Dodatni prądowy impuls bramkowy $I_G > 0$ powoduje wzrost współczynników wzmocnienia do wartości bliskiej jedności, co przełącza triak ze stanu blokowania w stan przewodzenia.

2. Gdy $U_{A2} > U_{A1}$ i prąd bramkowy jest ujemny $I_G < 0$ wówczas prąd bazy tranzystora $n_1-p_2-n_3$ (rys.7.5d) wprowadza triak w stan przewodzenia.

3. Gdy $U_{A2} < U_{A1}$ wówczas struktura $p_2-n_1-p_1-n_4$ pracuje jako klasyczny tyrystor a bramką jest złącze n_3-p_2 . Doprowadzenie impulsu ujemnego bramki $I_G < 0$ przełącza triak ze stanu blokowania do stanu przewodzenia.

4. Gdy $U_{A2} < U_{A1}$ i impuls bramkowy jest $I_G > 0$, wówczas bramką jest złącze p_2-n_2 i wzrost prądu bramki włącza triak.

Najlepsze właściwości wykazuje triak włączany pierwszą metodą, a najgorsze włączany metodą czwartą. Ze względu na połączenie odwrotne równoległe dwóch tyrystorów w strukturze triaka, jest on bardziej wrażliwy na zmiany stromości napięcia anodowego du_A/dt co ogranicza jego zastosowania. Pracuje on zwykle z obciążeniami rezystancyjnymi i w ograniczonym zakresie w układach zawierających indukcyjności.

Wyłączenie triaka następuje, gdy wartość prądu anodowego zmniejszy się poniżej wartości prądu podtrzymania $|I_H|$.