

Tyrystor jako element prostowników sterowanych

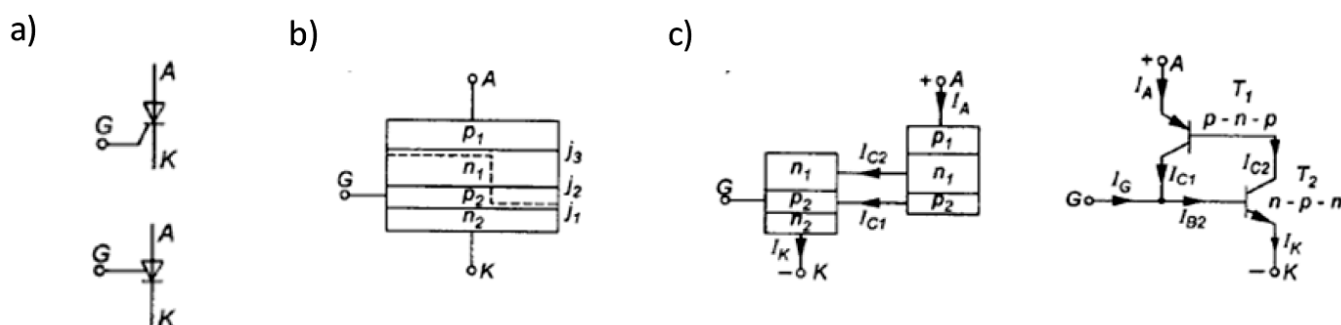
Wiadomości ogólne

Tyrystor oznaczany symbolem SCR (*Silicon Controlled Rectifier*), jest przyrządem półprzewodnikowym znajdującym szerokie zastosowanie w przekształtnikach o sterowaniu fazowym, takich jak sterowniki napięcia przemiennego, prostowniki sterowane bądź falowniki o komutacji napięciem odbiornika. Mimo utraty swojego znaczenia na rzecz układów o sterowaniu przez modulację szerokości impulsów, z uwagi na małe osiągnięte częstotliwości przełączeń (praktycznie do 1 kHz), tyrystory wciąż są niezastąpione w układach wielkiej mocy. Cechuje je wytrzymałość napięciowa do 10kV, a jednocześnie mogą przewodzić prąd o wartości średniej sięgającej kilku kiloamperów. Są nadal stosowane w sterowanych prostownikach do napędów przekształtnikowych wielkiej mocy, w sprzęgach i liniach przesyłowych sieci elektroenergetycznych z obwodami prądu stałego, a także w falownikach rezonansowych wielkiej mocy do grzania indukcyjnego.

Budowa i podstawowe właściwości struktury złączowej tyrystora.

Tyrystor, jest przyrządem półprzewodnikowym o strukturze czterowarstwowej ($p-n-p-n$). Ma on trzy wyprowadzenia: anodę (A), katodę (K) i bramkę (G). Bramka jest elektrodą sterującą

Na Rys. 1 poglądowo przedstawiono przekrój poprzeczny struktury tyrystora.



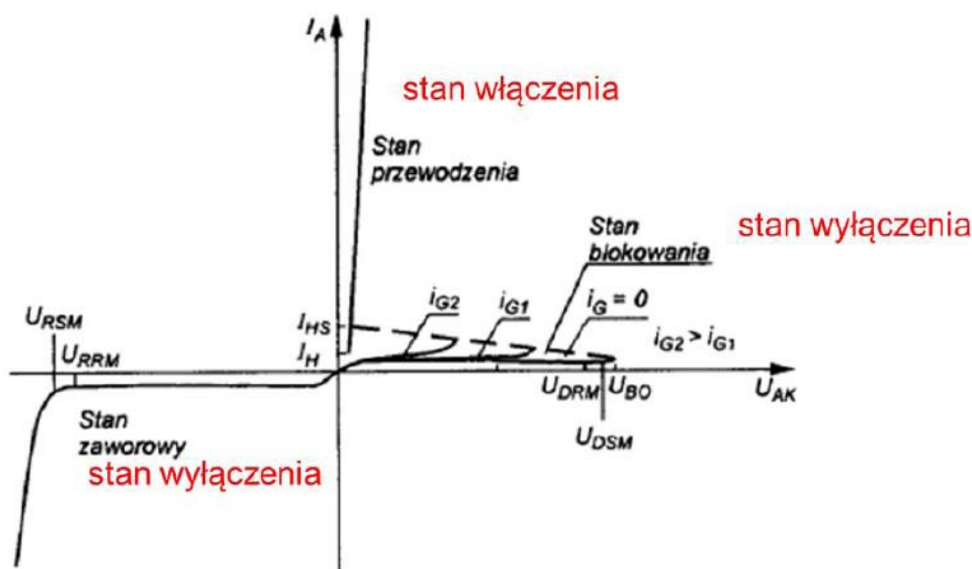
Rys. 1. Tyrystor: a) symbole graficzne, b) struktura, c) model dwutranzystorowy.

Charakterystyka prądowo-napięciowa tyrystora jest przedstawiona na rys. 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 tyrystor może znajdować się w dwóch stanach stabilnych, tj. stanie blokowania i stanie przewodzenia. W zakresie ujemnej polaryzacji anody tyrystor jest w stanie zaworowym. Stan zaworowy i blokowania są stanami wyłączenia tyrystora. Stan przewodzenia jest stanem włączenia tyrystora.

W stanie zaworowym, przy ujemnym napięciu anoda-katoda, właściwości tyrystora są podobne do właściwości diody. Dopóki napięcie nie przekroczy pewnej granicznej dopuszczalnej wartości, dopóty przez tyrystor płynie niewielki prąd, którego wartość zależy od temperatury złącza. Zdolność zaworowa tyrystora 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 tyrystora w stan przewodzenia. Przełączenie tyrystora 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 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.2. Charakterystyka prądowo napięciowa tyrystora.

Sterowanie prądem bramki jest podstawowym sposobem włączenia tyrystora, tj. spowodowania, że przechodzi on ze stanu blokowania do stanu przewodzenia. Z przebiegu charakterystyki (rys.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 (napięcie U_{BO} , rys. 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 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,

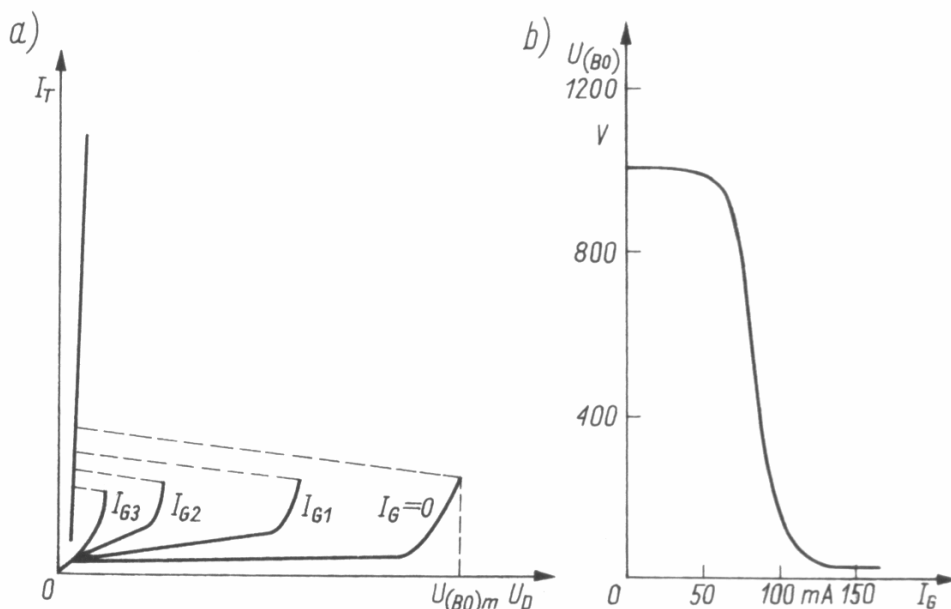
3) przekroczenia dopuszczalnej temperatury złącza; przy wysokiej temperaturze prąd generacji cieplnej obu tranzystorów wzrasta do wartości powodującej przełączenie tyrystora,

4) promieniowania świetlnego. Bezpośrednie naświetlenie struktury złącza 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.

Wyłączanie 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.

Na rys.3. pokazano główną charakterystykę tyrystora – $I_T = f(U_D)$ oraz zależność napięcia przełączenia od wartości prądu bramki.

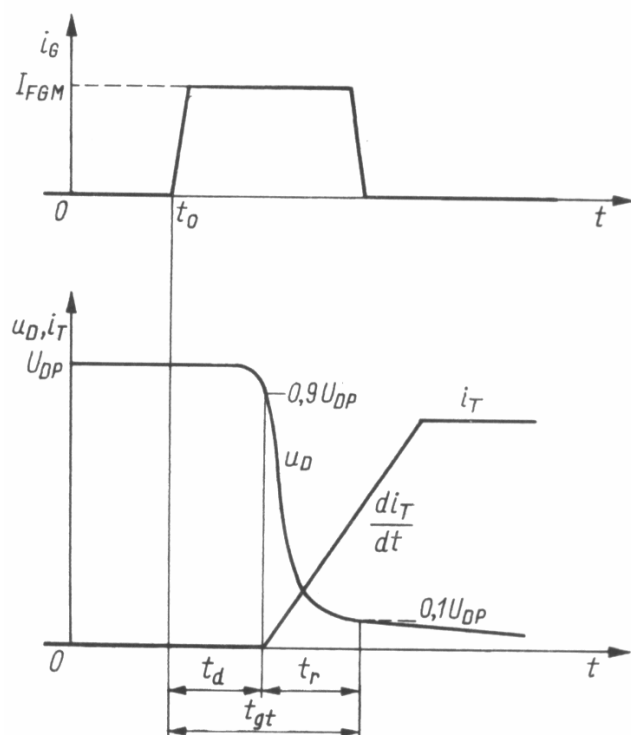


Rys. 3. Charakterystyki tyrystora w stanie blokowania a) napięciowo-prądowa główna; b) zależność napięcia przełączania $U_{(BO)}$ od prądu bramki I_G .

Wartość prądu bramki dobiera się tak, aby załączenie tyrystora następowało nawet przy małej wartości napięcia anoda-katoda, gdyż tylko wtedy można uzyskać sterowanie niezależne od wartości tego napięcia, co jest warunkiem poprawnej, powtarzalnej pracy łącznika tyrystorowego. Tyrystor po załączeniu krótkotrwałym impulsem prądu bramki pozostaje w stanie przewodzenia, o ile przepływający przez niego prąd anodowy nie zmaleje poniżej pewnej wartości zwanej *prądem podtrzymania* lub *prądem wyłączania*. Do wyłączenia tyrystora, z czym wiąże się odzyskanie zdolności blokowania dodatniego napięcia anodowego, konieczne jest przerwanie przepływu prądu na krótki okres czasu. Zwykle proces ten jest związany z polaryzacją wsteczną tyrystora.

Dynamiczne właściwości tyrystora

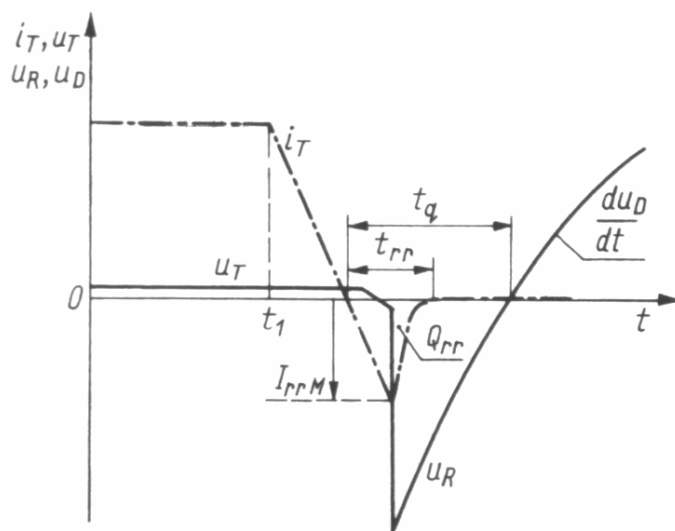
Na rys.4 został przedstawiony proces załączania tyrystora.



Rys. 4. Przebiegi napięć i prądów przy załączaniu tyrystora.

Po pojawieniu się czoła impulsu prądu bramki (chwila t_0 na rys.4.) napięcie na tyrystorze zaczyna się obniżać, ale z pewnym opóźnieniem t_d . Faza, w której napięcie na tyrystorze obniża się do wartości odpowiadającej $0,1 U_{DP}$ (U_{DP} - wartość napięcia blokowania przed rozpoczęciem załączania), wiąże się z procesem narastania prądu i trwa przez czas t_r (czas narastania). Suma czasów t_d i t_r stanowi czas załączania t_{gt} .

Procesu wyłączania tyrystora jest pokazany na Rys.5. Jeżeli prąd główny tyrystora i_T zmniejszy się do zera a następnie zmieni kierunek i zacznie się zwiększać to zmagazynuje się ładunek nadmiarowy Q_{rr} złącza anodowego, który następnie zostanie odprowadzony. Wówczas następuje szybkie zmniejszanie prądu wstecznego od wartości maksymalnej I_{rrM} do niewielkiej wartości ustalonej w stanie zaworowym. Czas t_{rr} jest nazywany *czasem odzyskiwania zdolności zaworowej*. Całkowity czas, jaki musi upłynąć od momentu przejścia prądu i_T przez zero do pojawienia się dodatniego napięcia blokowania, nosi nazwę *czasu wyłączania* t_q i stanowi podstawowy parametr charakteryzujący właściwości dynamiczne tyrystora.



Rys. 5. Przebiegi napięć i prądów przy wyłączaniu tyrystora.

Jeżeli napięcie na tyrystorze - który odzyskał zdolność blokowania - narasta zbyt szybko, to na skutek występowania prądu związanego z ładowaniem pojemności złącza środkowego może wystąpić zjawisko niekontrolowanego załączenia. Ponieważ jest to niedopuszczalne, stromość narastania napięcia blokowania musi być ograniczona do wartości stanowiącej jeden z istotnych parametrów dynamicznych.

Podstawowe parametry tyrystorów

Do głównych parametrów tyrystora możemy zaliczyć:

$I_{T(AV)m}$ – maksymalny średni prąd przewodzenia (prąd graniczny): jest znamionową wartością średnią prądu, który może przepływać w sposób ciągły przez tyrystor przy zapewnieniu odpowiedniego chłodzenia, przy którym temperatura struktury złączonej T_{jm} nie przekroczy maksymalnej wartości dopuszczalnej. Producenci podają - jako warunek - maksymalną wartość temperatury T_c , która może przy prądzie granicznym wystąpić na podstawie obudowy. Prąd graniczny - jako oznaczenie klasy prądowej - jest często umieszczany na obudowie tyrystora. Rzeczywistą wartość dopuszczalną prądu można wyznaczyć na podstawie obliczeń cieplnych, przy czym w zastosowaniu do podstawowych układów prostowników tyrystorowych podaje się nomogramy ułatwiające obliczenia na podstawie typu przekształtnika i kąta przewodzenia.

$I_{T(RMS)}$ – **maksymalny dopuszczalny prąd skuteczny**; jest pomocniczym parametrem określającym dopuszczalne obciążenie prądowe tyrystora.

I_{TSM} – **niepowtarzalny szczytowy prąd przewodzenia**; jest wartością maksymalną pojedynczego impulsu prądu o określonym czasie trwania (zwykle 10 ms), jaki może przepłynąć przez tyrystor przy maksymalnej dopuszczalnej temperaturze struktury złączonej nie powodując trwałego uszkodzenia. Wielkość ta ma znaczenie przy określeniu przeciążalności tyrystora w stanach awaryjnego zwarcia.

I_H – **prąd podtrzymania (prąd wyłączania)**; jest wartością minimalną prądu, przy której tyrystor pozostaje w stanie przewodzenia.

I_L – *minimalny prąd załączania*: jest minimalną wartością niezbędną przy załączaniu w celu uzyskania stabilnego stanu przewodzenia.

U_{RRM} – **powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne**; jest wielkością określającą klasę napięciową tyrystora. Podawane w setkach woltów stanowi podstawowe oznaczenie, zwykle umieszczane na obudowie. Wartość U_{RRM} wynika z podstawowej

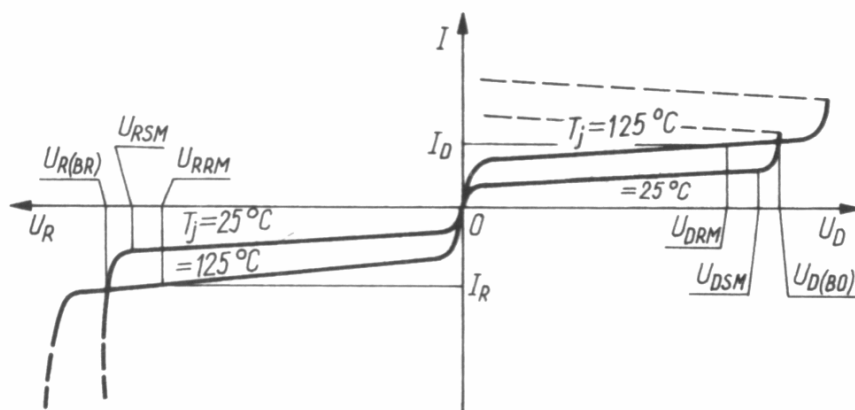
Sterowanie tyrystorowe silników komutatorowych prądu stałego(DC) – Tyrystory - Właściwości
 charakterystyki napięciowo-prądowej tyrystora dla kierunku zaporowego. Na Rys. 6
 pokazano przykładowo zależność między wartością U_{RRM} a wartością napięcia
 przebicia struktury złączonej $U_{R(BR)}$.

U_{RSM} – **niewpowtarzalne szczytowe napięcie wsteczne**; jest to wartość, która może pojawiać się
 na złączu w znacznych odstępach czasu (np. kilku minut) pod postacią pojedynczego
 przepięcia. Wartość powtarzalną napięcia oznacza się dla maksymalnej dopuszczalnej
 temperatury struktury.

U_{DRM} – **powtarzalne szczytowe napięcie blokowania**; analogicznie jak U_{RRM} .

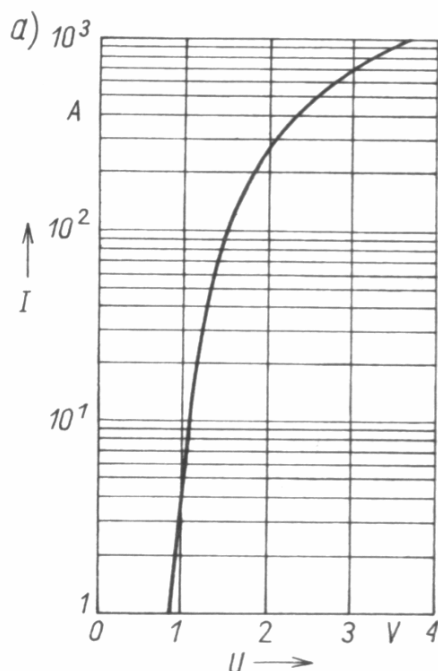
U_{DSM} – **niewpowtarzalne szczytowe napięcie blokowania**; analogicznie jak U_{RSM} .

Odpowiednio do tych parametrów napięciowych podawana jest wartość prądów: **wstecznego**
 I_R i **blokowania** I_D . Sposób określenia wielkości związanych z charakterystykami dla stanu
 zaworowego i blokowania pokazano na rysunku poniżej.



Rys. 6. Charakterystyk napięciowo-prądowe tyrystora w stanie blokowania i zaworowym

Uzupełnieniem danych katalogowych dotyczących charakterystyk i parametrów
 statycznych obwodu głównego tyrystora jest charakterystyka przewodzenia przedstawiająca
 zależność napięcia przewodzenia U_T od prądu przewodzenia I_T – pokazana poniżej.



Rys. 7. Charakterystyka tyrystora w stanie przewodzenia $I_T = f(U_T)$

Pewna grupa parametrów typowa dla tyrystora dotyczy obwodu bramki. Jako podstawowe wielkości należy wymienić:

I_{GT} – minimalna wartość prądu bramki (**prąd bramki przełączający**);

U_{GT} – minimalna wartość napięcia bramki (**napięcie bramki przełączające**), przy których zapewnione jest załączenie każdego egzemplarza tyrystora danego typu.

Właściwości dynamiczne tyrystora, zgodnie z przedstawionym opisem i ilustrującymi go przebiegami napięć i prądów przy załączaniu i wyłączaniu (Rys. 5), są w katalogach określone przez zbiór następujących parametrów:

t_{gt} – **czas załączania**; będący sumą czasu opóźnienia t_d i czasu opadania napięcia t_r .

Określony jako przedział czasu między chwilą, gdy prąd bramki osiągnie 0,1 wartości szczytowej, a momentem, gdy napięcie na tyrystorze obniży się do wartości **0,1 U_{DP}** (wartość napięcia blokowania przed załączaniem);

t_q - **czas wyłączenia** – określony jako minimalny niezbędny przedział czasu między przejściem prądu anodowego przez zero a ponownym pojawieniem się dodatniego napięcia anodowego, po upływie którego tyrystor nie załączy się samoczynnie ponownie;

Wszystkie wielkości, które są definiowane jako graniczne lub znamionowe parametry tyrystora, wyznaczone w ściśle określonych warunkach, są zależne od temperatury struktury złączowej T_j . W przypadku tyrystora maksymalna dopuszczalna temperatura jest zdecydowanie niższa niż w przypadku innych przyrządów półprzewodnikowych i wynosi 125°C.