



Elektronika przyrządów półprzewodnikowych

Laboratorium nr 7

Parametry i zastosowania tyrystorów

Zagadnienia obowiązujące na kartkówce

- Klasyfikacja tyrystorów.
- Symbole i charakterystyki I-U: dynistora, tyrystora triodowego, diaka i triaka.
- Budowa wewnętrzna: dynistora, tyrystora triodowego, diaka i triaka.
- Polaryzacja i stany pracy: dynistora, tyrystora triodowego, diaka i triaka.
- Parametry tyrystorów – definicje.
- Działanie tyrystora triodowego (wyjaśnienie metod załączania).
- Układy sterowania mocą na bazie tyrystorów (schemat, przebiegi czasowe, zasada działania)
- Kąt fazowy zapłon/palenia – definicje.
- Zastosowania tyrystorów.
- Zadania obliczeniowe związane z programem ćwiczenia.

Literatura

- T. Ohly, Z. Radzimski, *Elementy elektroniczne cz. I*, Wydawnictwo PWr, Wrocław 1980, rozdział 5. Tyrystory i triaki,
- W. Marciniak, *Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone*, WNT, Warszawa 1987, podrozdział 11.2. Tyrystory
- B. Wilamowski, *Mikroelektronika: Specjalne przyrządy półprzewodnikowe*, podrozdział 5.2.1. Tyrystor.

4. Wiadomości wstępne.

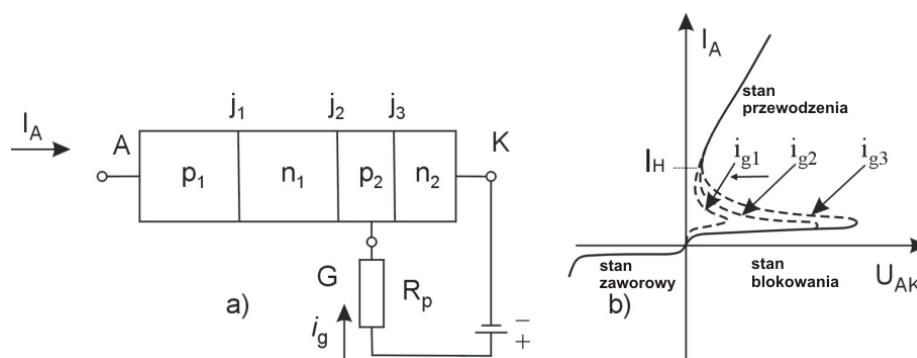
Jednym z najważniejszych przyrządów półprzewodnikowych w dziedzinie elementów przełączających średnich i dużych mocy jest tyrystor. W literaturze nosi on także nazwę prostownika sterowanego (SCR - Silicon Controlled Rectifier). W literaturze polskiej najczęściej operuje się nazwą tyrystor. Nazwa ta utrwaliła się jako oznaczenie elementu przełączającego o trzech zaciskach, o działaniu jednokierunkowym (prostującym prąd zmienny). Jest to także określenie całej rodziny przyrządów półprzewodnikowych, załączanych w sposób kontrolowany, pracujących najczęściej z zasilaniem napięciem zmiennym. Z punktu widzenia ilości złącz p-n w pojedynczej strukturze można je klasyfikować jako:

- przyrządy o trzech złączach p-n: tyrystory, trynistory, dynistory,
- przyrządy o czterech złączach p-n: triaki, diaki

Tyrystory, o strukturze czterowarstwowej, są przyrządami o działaniu jednokierunkowym, natomiast triaki, o strukturze pięciowarstwowej, są przyrządami o działaniu dwukierunkowym (symetrycznej charakterystyce prądowo-napięciowej).

Tyrystor

Tyrystorem triodowym nazywamy czterowarstwowy przyrząd półprzewodnikowy p-n-p-n o trzech zaciskach (wyprowadzeniach): anodzie, katodzie i bramce (rys. 1a). Charakterystyka prądowo napięciowa przedstawiona na rys.1b uwidacznia wpływ prądu bramki i_g na zmianę przebiegu zależności $I_A = f(U_{AK})$. W praktyce stosuje się ustaloną wartość prądu bramki. Zakres charakterystyki narysowany linią kreskowaną jest niestabilny i dotyczy szybkiej zmiany stanu tyrystora z blokowania prądu do przewodzenia prądu.



Rys.1 Tyrystor: a) struktura i układ polaryzacji obwodu bramka-katoda, b) charakterystyka prądowo-napięciowa (wartości parametru: $i_{g1} > i_{g2} > i_{g3}$).

Jeżeli potencjał anody jest niższy od potencjału katody to mówimy wtedy o polaryzacji zaporowej (zaporowej). W takim stanie pracy złącza j₁ i j₃ spolaryzowane są zaporowo, natomiast złącze j₂ w kierunku przewodzenia. Ilość elektronów i dziur, przy polaryzacji zaporowej, do-

chodząca do złącza j_2 jest ograniczona przez polaryzację zaporową złącz j_1 i j_3 , stąd prąd płynący przez przyrząd jest prądem wstecznym tych złącz: jest to więc prąd o niewielkim natężeniu.

Jeżeli z kolei potencjał anody przewyższa potencjał katody to mówimy wtedy o polaryzacji w kierunku przewodzenia. Można tutaj rozróżnić dwa stany pracy:

- stan blokowania oraz - stan przewodzenia.

Stan blokowania

W stanie blokowania złącza j_1 i j_3 spolaryzowane są w kierunku przewodzenia, natomiast złącze j_2 zaporowo. Impedancja tyrystora jest w tym przypadku duża, prąd płynący przez niego jest więc bardzo mały.

Stan przewodzenia

Stan przewodzenia charakteryzuje się tym, że wszystkie złącza są spolaryzowane w kierunku przewodzenia, impedancja tyrystora jest więc mała, a prąd anodowy tyrystora ograniczony jest w zasadzie tylko wartością obciążenia umieszczonego w obwodzie (podobnie jak w układzie prostownika z diodą).

Następujące zjawiska mogą spowodować przełączenie tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia, czyli gwałtowny wzrost prądu anodowego:

- zwiększenie gęstości nośników w warstwie zubożonej złącza j_2 (obszar p_2) na skutek przepływu prądu bramki w złączu j_3 (bramka – katoda)
- powielanie lawinowe nośników prądu w warstwie zaporowej złącza j_2 ,
- wzrost prądu generacji I_g złącza j_2 pod wpływem temperatury lub oświetlenia
- przepływ prądu pojemnościowego, przy nagłej zmianie wartości napięcia zasilającego.

W efekcie powoduje to przepolaryzowanie złącza j_2 w kierunku przewodzenia. Stan ten utrzymuje się mimo ustania czynnika wymuszającego przełączenie.

W praktyce, sposoby załączania tyrystora sprowadzają się do:

- **podania impulsu prądu bramki w stanie blokowania tyrystora,**
- **podania impulsu światła w stanie blokowania – dotyczy to fototyrystorów**

Spadek napięcia na tyrystorze załączonym jest sumą spadków napięć na poszczególnych złączach (złącze j_2 ma znak polaryzacji odwrotny do pozostałych) i z reguły nie przekracza 2V (dla małych wartości prądu anodowego ok. 1V). Wyłączenie tyrystora jest możliwe tylko przy obniżeniu wartości prądu anodowego poniżej prądu podtrzymania I_H lub zmniejszeniu napięcia anodowego praktycznie do zera.

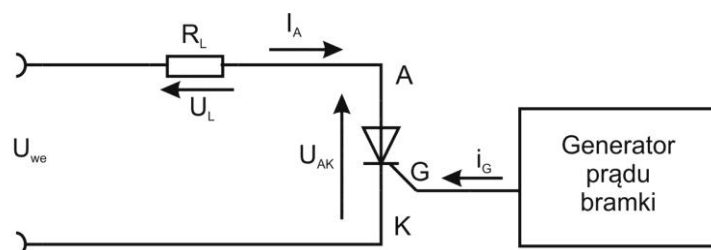
Parametry tyrystorów

Parametry tyrystorów związane są z szerokim zakresem wykorzystania tych przyrządów. Z tego względu liczba spotkanych w literaturze parametrów jest bardzo duża. Do tych najważniejszych należą:

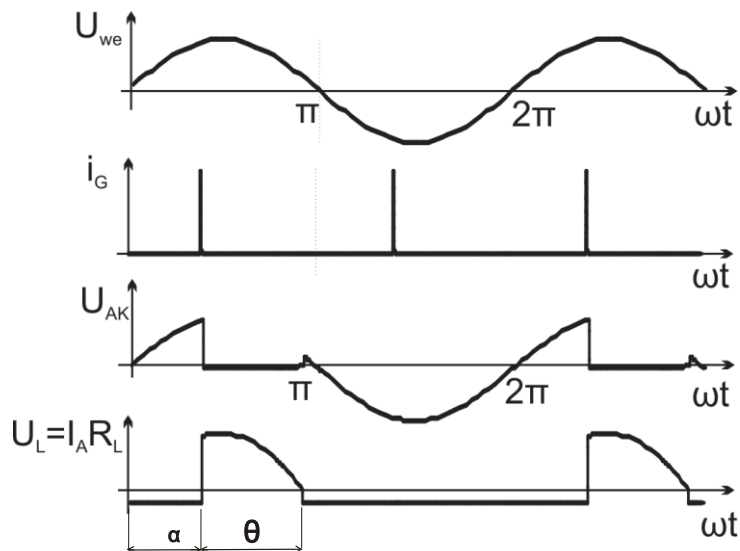
- graniczne napięcie przełączania V_p
napięcie doprowadzone między anodę a katodę (polaryzacja w kierunku przewodzenia), przy którym w warunkach gdy $I_G = 0$, nastąpi przełączenie ze stanu blokowania w stan przewodzenia
- **dopuszczalne napięcie anodowe V_{Ad} w stanie blokowania** (polaryzacja w kierunku przewodzenia); zwykle przyjmuje się $V_{Ad} = 0,8 V_p$
napięcie to zdefiniować można jako napięcie mniejsze od napięcia V_p o tyle, aby tyrystor nie mógł samoczynnie ulec przełączaniu w stan przewodzenia;
- **dopuszczalny prąd anodowy I_{Ad} w stanie przewodzenia**
maksymalny prąd jaki może płynąć przez tyrystor w kierunku przewodzenia
- **prąd podtrzymania I_H**
minimalny prąd anodowy tyrystora w stanie przewodzenia bez prądu bramki, $I_G = 0$
- **graniczne napięcie anodowe w kierunku wstecznym V_R**
napięcie, przy którym następuje zjawisko przebicia lawinowego złąc spolaryzowanych w kierunku zaporowym (dotyczy to złącza j_1 i j_3).
- **dopuszczalne napięcie anodowe w kierunku zaporowym V_{Rd}** .
zwykle definiuje się ten parametr jako równy $0,8 V_R$.
- **prąd przełączający bramki I_{GF}**
prąd bramki, przy którym spolaryzowany w kierunku przewodzenia tyrystor ($V_A = 6 V$) ulega przełączeniu ze stanu blokowania w stan przewodzenia.
- **maksymalna moc admisyjna P_{adm}** .
maksymalna moc jaka może wydzielić się w tyrystorze

Układ pracy tyrystora

Typowy układ pracy tyrystora zasilany napięciem przemiennym (zmiennym okresowo) przedstawiono na rys.2. Obciążenie w obwodzie reprezentuje rezystor R_L . Generator prądu bramki dostarcza impulsy prądu z możliwą regulacją kąta fazowego (kąta zapłonu) w zakresie $0^\circ < \alpha < 180^\circ$ ($0 < \alpha < \pi$). Odpowiednie przebiegi napięciowe i prądowe w obwodzie podano na rys.3.



Rys.2 Układ pracy tyrystora z obciążeniem R_L

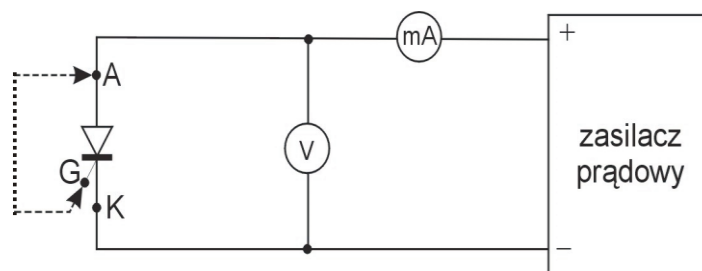


Rys.3. Przebiegi napięć i prądów w obwodzie tyrystora [α – kąt fazowy zapłonu, θ – kąt fazowy otwarcia tyrystora].

5. Pomiary

5.1 Pomiar stałoprądowej charakterystyki prądowo-napięciowej tyrystora w stanie blokowania i w stanie przewodzenia metodą techniczną.

Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia takich parametrów jak: prąd podtrzymania tyrystora, prąd przełączający bramki, prąd anodowy w stanie blokowania, spadek napięcia w stanie przewodzenia przedstawiono na rys.4. Ze względu na efekty cieplne, maksymalny prąd zasilacza DC nie powinien przekraczać 50% wartości dopuszczalnego prądu anodowego badanego tyrystora (odpowiednio nastawiamy ograniczenie prądowe zasilacza, praktycznie nie więcej niż 1,0 A).



Rys.4. Układ do pomiaru charakterystyki prądowo-napięciowej tyrystora w stanie przewodzenia.

Procedura pomiarów:

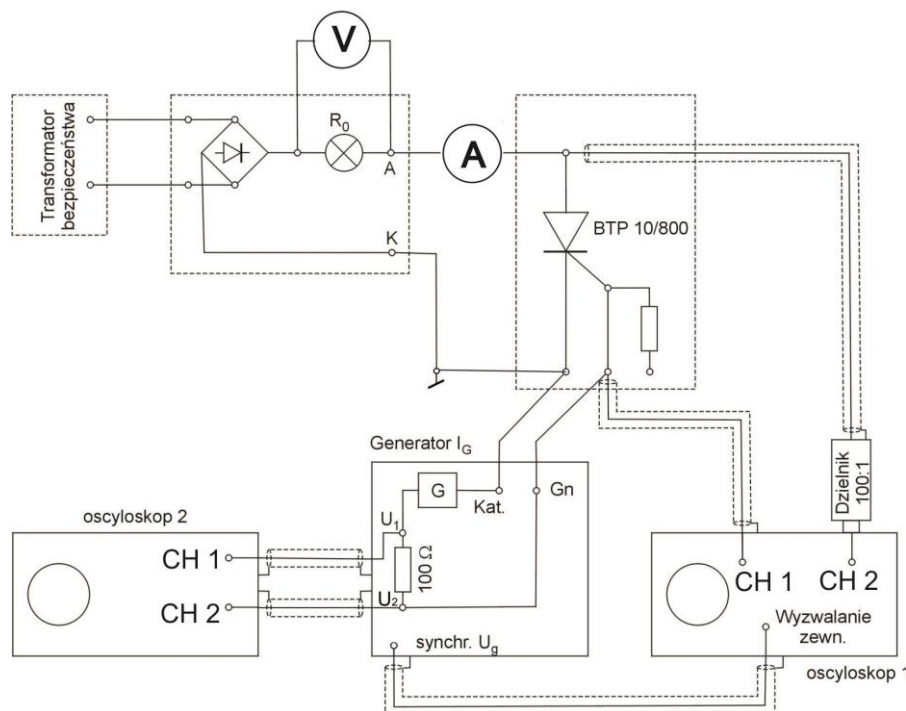
- 1) Nastawiamy napięcie na zasilaczu większe od napięcia tyrystora w stanie przewodzenia (np. 6 V). Bramka jest niepodłączona. Ustawiamy zakres amperomierza *AUTO*. Odczytujemy wartość prądu anodowego w stanie blokowania.
- 2) Załączamy tyrystor podając na bramkę napięcie dodatnie względem katody, zwierając na moment bramkę z anodą dodatkowym przewodem (oznaczony na rysunku linią przerywaną). Odczytujemy wartość napięcia i prądu w tym punkcie pracy tyrystora. Prąd powinien osiągnąć wartość ograniczenia ustawionego na zasilaczu (*dłaczego?*).

- 3) Zmniejszając wartość ograniczenia prądowego zasilacza zmniejszamy prąd płynący w obwodzie tyrystora. Dla danej wartości prądu odczytujemy wielkość spadku napięcia na tyrystorze w kilku punktach pomiarowych. Szkicujemy przebieg charakterystyki w stanie przewodzenia.
- 4) Na podstawie pomiarów określamy wielkość prądu podtrzymania I_H (dla pewnej wartości prądu zasilacza tyrystor ulegnie wyłączeniu). Odczytujemy także wartość napięcia na tyrystorze, które powinno osiągnąć wówczas wartość napięcia zasilania (*dla czego?*).

5.2 Pomiar mocy wydzielonej w obciążeniu w zależności od kąta włączenia tyrystora.

Należy zastosować układ pomiarowy przedstawiony na rys.5.

Tyrystor pracuje w układzie pracy zasilanym z transformatora napięciem przemiennym i następnie wyprostowanym jedno- lub dwu-połówkowo za pomocą mostka Graetza. Umieszczenie prostownika w obwodzie powoduje, że obserwowany na oscyloskopie przebieg napięcia U_{AK} jest nieco inny niż ten, przedstawiony na rys.3. (nie zawiera „ujemnych połówek sinusoidy”). Moc elektryczna dostarczana jest, w sposób regulowany za pomocą impulsowego generatora prądu bramki I_G , do obciążenia R_0 (żarówka). Moc tę wyznaczamy z pomiaru prądu w obciążeniu i napięcia na obciążeniu. Kąt włączenia można regulować w szerokich granicach przebiegu i mierzyć przez odczyt jego wartości na osi podstawy czasu oscyloskopu 1.



Rys. 5. Układ pomiarowy tyrystora w obwodzie regulacji mocy w obciążeniu R_0 . Rezystor pomiarowy (100Ω) prądu bramki jest połączony szeregowo z generatorem prądu G we wspólnej obudowie generatora.

Moc w obciążeniu należy obliczać jako iloczyn wartości skutecznych napięcia i prądu zmierzonych miernikami rzeczywistej wartości skutecznej, ang. true RMS) z zachowaniem właściwej procedury zależnej od stosowanych mierników.

Pomiar wartości skutecznej napięcia i prądu multimetrami cyfrowym Agilent/Keysight z oznaczeniem *true rms* lub *truevolt*, np. typu 34401A lub 34461A:

Prawidłowy pomiar wartości skutecznych napięć i prądów przebiegów niesymetrycznych tzn. z występującą składową stałą (taki przebieg ma miejsce w obwodzie przełączanego tyrystora z obciążeniem) polega na pomiarze napięcia i prądu kolejno na zakresie DC i AC oraz zastosowaniu wzorów (1) i (2) w celu wyliczenia rzeczywistej wartości skutecznej (*true rms*).

$$I_{rms} = \sqrt{I_{AC}^2 + I_{DC}^2} \quad (1)$$

$$U_{rms} = \sqrt{U_{AC}^2 + U_{DC}^2} \quad (2)$$

Uwaga: Amperomierz ustawić na zakres 10A (wybrać odpowiednie gniazdo amperomierza 34461A), a woltomierz – 100 V.

Wyniki pomiarów prądów i napięć w funkcji kąta palenia zapisać w tabeli 1, osobno dla prostowania jedno- i dwupołkowego (po 5 punktów pomiarowych).

Tabela 1. Wyniki pomiarów mocy w obciążeniu tyrystora

θ	I_{AC}	I_{DC}	I_{rms}	U_{AC}	U_{DC}	U_{rms}	P
[rad]	[A]	[A]	[A]	[V]	[V]	[V]	[W]
1-poł							
2-poł							

Wyniki pomiarów mocy P w funkcji **kąta otwarcia (palenia) tyrystora dla układu jedno-połkowego i dwupołkowego** (z tabeli 1) zamieścić na wspólnym wykresie.

5.3 Pomiar czasu włączania tyrystora w funkcji wartości prądu bramki $t_{gt}=f(I_G)$.

Pomiary należy wykonać w układzie przedstawionym na rys.5. dla ustalonego kąta włączenia tyrystora $\alpha = \pi$. Moment włączenia tyrystora obserwujemy na oscyloskopie jako spadek napięcia U_{AK} od wartości maksymalnej U_{AKM} do wartości typowej dla tyrystora w stanie przewodzenia. Przykładowy przebieg napięcia U_{AK} (rys.3) ustawiony do pomiaru czasu włączania przedstawiono na rys.6. Zgodnie z definicją, czas włączania należy zmierzyć jako odstęp czasowy pomiędzy wartością 10% amplitudy impulsu prądowego sterującego tyrystorem (w naszym przypadku napięcia U_{GK}) do osiągnięcia spadku napięcia anodowego U_{AK} równego 10% wartości początkowej amplitudy U_{AKM} w stanie blokowania. Synchronizację wyzwalania podstawy czasu należy ustawić (*Trigger Menu*) na zbocze opadające napięcia anodowego.

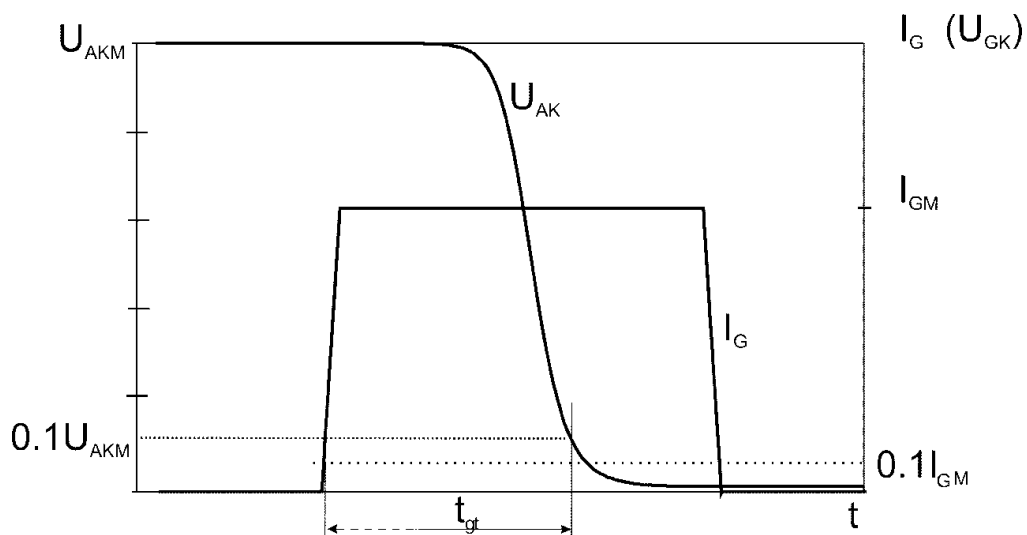
Podstawa czasu oscyloskopu ma być ustawiona na zakres $0,1 \div 0,5 \mu\text{s/dz}$ tak, aby widoczny był stan przejściowy napięcia w czasie.

Wartość prądu bramki należy mierzyć przez pomiar różnicy napięć na rezystorze pomiarowym 100Ω , który jest wmontowany wewnątrz generatora impulsów prądu bramki:

$$I_G = \frac{U_1 - U_2}{100 \Omega}$$

Różnicę napięć odczytywać z oscyloskopu 2 stosując pomiar różnicowy $U_2 - U_1$. Należy zwrócić uwagę, aby przebiegi U_1 , U_2 oraz różnicowy w całości były widoczne na ekranie.

Wykonać pomiary dla pięciu wartości prądu bramki i sporządzić wykres zależności $t_{gt} = f(I_G)$.



Rys. 6. Przebieg napięcia anodowego na tyrystorze oraz prądu bramki w chwili włączania tyrystora.
Uwaga: w tym ćwiczeniu obserwowanym sygnałem sterującym tyrystor jest napięcie U_{GK} .

6. Podsumowanie

- Podać zestawienie zmierzonych parametrów oraz zależności ujęte na wykresach.
- Przykładowe wydruki przebiegów oscyloskopowych dołączyć do sprawozdania.
- Określić maksymalną częstotliwość pracy tyrystora zakładając iż czas włączania t_{gt} nie powinien przekraczać $0,01 T$ (T – okres przebiegu sinusoidalnego wejściowego napięcia pracy).