

# **ĆWICZENIE 23**

## **BADANIE I ZASTOSOWANIE UKŁADÓW Z TYRYSTORAMI I TRIAKAMI**

### **Cel ćwiczenia**

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z budową i własnościami tyrystora, triaka, pracą tyrystorowych prostowników sterowanych w układzie mostka typu 2T-2D oraz pracą układów z triakami sterowanymi fazowo i grupowo.

### **Program ćwiczenia**

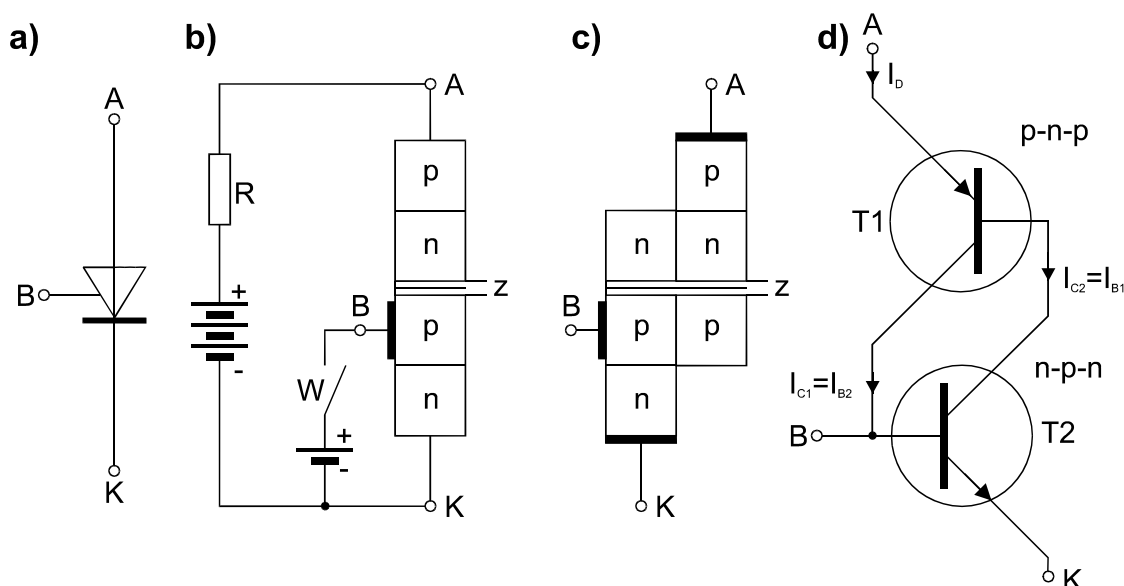
1. Wiadomości wstępne
  - 1.1. Budowa tyrystora
  - 1.2. Charakterystyki i parametry tyrystora
  - 1.3. Zdejmowanie charakterystyk w układzie charakterografu
  - 1.4. Prostowniki sterowane
  - 1.5. Tyrystor dwukierunkowy (TRIAK)
  - 1.6. Sterowanie fazowe i grupowe w układach z triakiem
2. Wykonanie pomiarów
  - 2.1. Badanie tyrystora w układzie charakterografu
  - 2.2. Badanie triaka
  - 2.3. Badanie tyrystorowego prostownika sterowanego
  - 2.4. Wyznaczanie wartości średniej napięcia w prostowniku sterowanym
  - 2.5. Badanie tyrystorowego układu napędowego
  - 2.6. Badanie układu z triakiem sterowanym fazowo
  - 2.7. Badanie układu z triakiem sterowanym grupowo
3. Uwagi i wnioski

# 1. Wiadomości wstępne

## 1.1. Budowa tyrystora.

Tyrystor, nazywany także diodą sterowaną, jest krzemowym elementem półprzewodnikowym o strukturze czterowarstwowej  $p-n-p-n$  (rys. 1). Elektrody wyprowadzone od skrajnych warstw tworzą odpowiednio anodę ( $A$ ) i katodę ( $K$ ). Elektroda wyprowadzona ze środkowego obszaru typu  $p$  nazywa się bramką ( $B$ ). Przy odłączonej bramce (otwarty łącznik  $W$  na rys. 1b) tyrystor nie przewodzi prądu nawet przy dodatniej polaryzacji anody względem katody (tzn. do anody przyłączony jest dodatni biegun źródła napięcia, a do katody ujemny). Nieprzewodzenie tyrystora związane jest z zaporowym działaniem bariery potencjału, która znajduje się między obszarami  $n$  i  $p$ . Obszary  $n$  i  $p$  tworzą zwykłą diodę półprzewodnikową. Dioda ta spolaryzowana jest zaporowo tzn. do obszaru  $n$  przyłożony jest biegun "+", zaś do obszaru  $p$  biegun "-". Wytwarza się więc bariera potencjału, która zobrazowana jest na rys. 1b jako  $z$ . Bariera ta nie dopuszcza do przepływu nośników między anodą i katodą tyrystora, w obwodzie zewnętrznym nie ma przepływu prądu. Wystarczy jednak wywołać krótki impuls prądu w obwodzie bramki, zamykając na chwilę łącznik  $W$ , aby wprowadzić tyrystor w stan przewodzenia. Po wejściu tyrystora w stan przewodzenia bramka traci własności sterownicze, a zatem otwarcie łącznika w obwodzie bramki nie przerywa prądu anodowego.

Wyłączenie tyrystora można spowodować wyłączeniem napięcia anodowego, zmianą jego polaryzacji lub zmniejszeniem prądu anodowego poniżej pewnej wartości krytycznej, zwanej prądem podtrzymania. Wprowadzenie tyrystora w stan przewodzenia impulsem prądu bramki nazywa się wyzwaniem bramkowym.



Rys. 1. Tyrystor: a) symbol graficzny, b) struktura czterowarstwowa, c-d) schemat zastępczy jako analogia dwutranzystorowa.

Zasadę działania tyrystora można wyjaśnić zastępując strukturę czterowarstwową  $p-n-p-n$  zestawieniem dwóch tranzystorów: tranzystora  $p-n-p$  ( $T_1$ ) oraz tranzystora  $n-p-n$  ( $T_2$ ) - rys. 1c,d. Jeżeli do bazy tranzystora  $T_2$  (elektroda ta jest jednocześnie bramką tyrystora) doprowadzimy dodatni impuls prądowy to tranzystor ten zacznie przewodzić. Dzięki wzmacniającemu działaniu tranzystora w jego kolektorze popłynie prąd  $I_{C2}$ . Prąd ten jest jednocześnie prądem bazy tranzystora  $T_1$ . Tranzystor  $T_1$  zacznie przewodzić. Następuje więc likwidacja zaporowego działania bariery potencjału. W układzie zastępczym istnieje dodatnie sprzężenie zwrotne. Polega to na tym, że prąd kolektora  $I_{C1}$  tranzystora  $T_1$  jest jednocześnie prądem bazy  $I_{B2}$  tranzystora  $T_2$ . Wzrastający prąd  $I_{C1}$  powoduje więc wzrost prądu  $I_{B2}$ . Tranzystor  $T_2$  zostaje głębiej wprowadzony w stan przewodzenia. Wzrasta więc prąd  $I_{C2}=I_{B1}$ . Powoduje to, że i tranzystor  $T_1$  zostaje głębiej wprowadzony w stan przewodzenia. Efektem tego jest gwałtowny wzrost prądu przepływającego przez całą strukturę. Tyrystor zaczął więc przewodzić. Na podstawie analizy matematycznej schematu zastępczego tyrystora można wyprowadzić zależność na prąd przewodzenia tyrystora  $I_D$ :

$$I_D = \frac{I_{C_0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)} \quad (1)$$

gdzie:

- $I_D$  - prąd przewodzenia
- $I_{C_0}$  - prąd generowany cieplnie w warstwie  $n$
- $\alpha_1, \alpha_2$  - współczynniki wzmocnienia prądowego tranzystorów używanych w schemacie zastępczym (rys. 1d).

W zależności od wartości sumy ( $\alpha_1, \alpha_2$ ) rozróżniamy następujące stany pracy tyrystora przy polaryzacji przepustowej ( anoda +, katoda -).

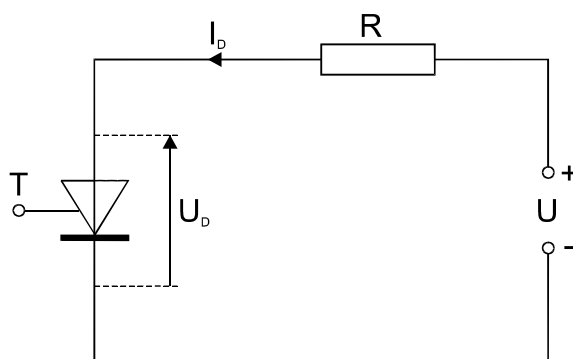
1<sup>0</sup> ( $\alpha_1 + \alpha_2$ )  $\ll 1$  - **blokowanie** (stan nieprzewodzenia)

W tym przypadku jak wynika z zależności (1) prąd tyrystora osiąga niewielkie wartości:  $I_D \cong I_{C_0}$ .

2<sup>0</sup> ( $\alpha_1 + \alpha_2$ ) dąży do 1 - **przełączenie** (załączenie)

3<sup>0</sup> ( $\alpha_1 + \alpha_2$ ) bliskie 1 - **przewodzenie**

Przy tym warunku prąd struktury silnie wzrasta do wartości ustalonej, ograniczonej rezystancją obwodu zewnętrznego tyrystora i przyłożonym do obwodu napięciem (rys. 2). Spadek napięcia na przewodzącym tyrystorze  $U_D$  jest rzędu kilku woltów. Stanowi to więc nikły procent przyłożonego napięcia zewnętrznego.



Rys. 2. Tyrystor z obwodem zewnętrznym w stanie przewodzenia

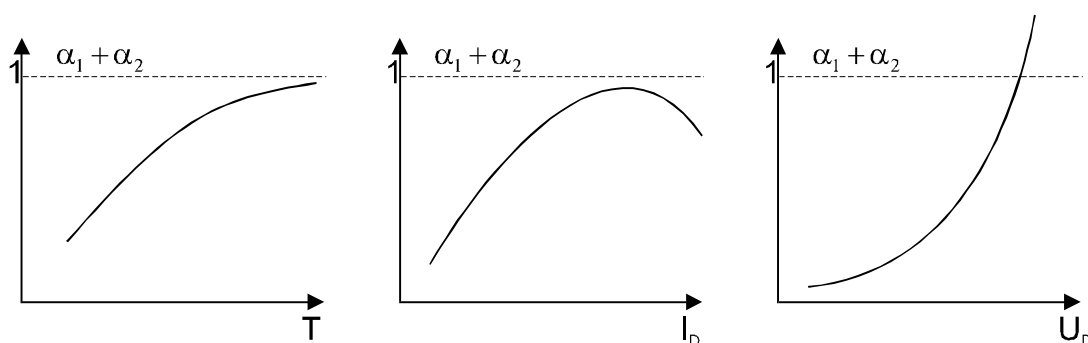
Jeżeli nastąpiło już wejście tyrystora w stan przewodzenia, to stan ten jest samoczynnie podtrzymywany, gdyż dzięki przepływowi dużego prądu  $I_D$  suma współczynników  $\alpha_1 + \alpha_2$  jest stale bliska jedności. Tyrystor pracuje wówczas jak zwykła dioda.

Najistotniejszą cechą odróżniającą tyrystor od diody półprzewodnikowej jest możliwość nieprzewodzenia mimo polaryzacji przepustowej. Właściwość tę uzyskuje się dzięki zaporowemu działaniu bariery potencjału (rys. 1) - pozostałe złącza spolaryzowane są przepustowo. Stąd też wywodzi się nazwa - dioda sterowana.

Oprócz opisanego wyzwalania bramkowego, przejście tyrystora ze stanu blokowania do stanu przewodzenia może nastąpić wskutek następujących czynników:

- przy przekroczeniu pewnej granicznej wartości napięcia  $U_D$  między anodą i katodą tyrystora (wyzwalanie napięciowe),
- przy przekroczeniu granicznej temperatury złącza (przełączanie temperaturowe),
- pod wpływem energii świetlnej doprowadzonej do złącza (wyzwalanie świetlne),
- przy przekroczeniu pewnej maksymalnej szybkości narastania napięcia na tyrystorze  $du/dt$  (prąd pojemnościowy płynący przez złącze może wywołać taki sam efekt jak prąd bramki).

Wyżej wymienione możliwości załączania tyrystora wynikają z wpływu na  $\alpha_1$  i  $\alpha_2$  określonych parametrów (np.  $T$ ,  $I_D$ ,  $U_D$ ), co przedstawiono na rys.3.



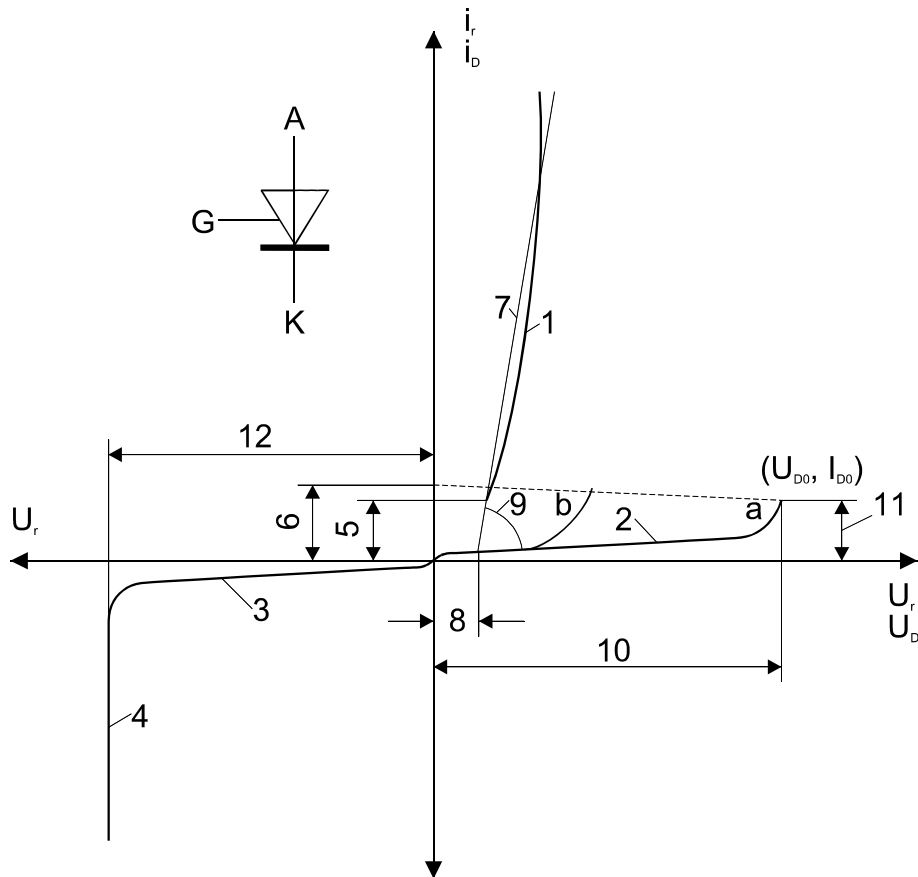
Rys. 3. Wpływ różnych wielkości na współczynniki wzmocnienia prądowego tranzystorów zastępczych

W przypadku niewłaściwej konstrukcji lub eksploatacji urządzeń tyrystorowych wymienione czynniki mogą powodować niezmierzone wyzwalenie tyrystorów. Niektóre z nich wykorzystuje się celowo w elementach stanowiących odmiany tyrystorów. Na zasadzie wyzwiania napięciowego pracują diody czterowarstwowe zwane dynistorami, a wyzwianie świetlne wykorzystywane jest w fototyrystorach.

## 1.2. Charakterystyka i parametry tyrystora.

Charakterystyki statyczne i parametry obwodu głównego.

Obwodem głównym tyrystora nazywamy obwód prądowy, w którym są włączone główne elektrody tyrystora: anoda i katoda. W obwodzie tym płynie prąd. Charakterystyka napięciowo-prądowa (główna) tyrystora (rys. 4) ilustruje trzy omówione stany pracy przy polaryzacji przepustowej: stabilny stan blokowania, niestabilny stan przełączania, stabilny stan przewodzenia oraz stan zaporowy przy polaryzacji wstecznej. Jak widać tyrystor jest elementem nieliniowym o rezystancji dodatniej w stanach blokowania i przewodzenia oraz ujemnej w stanie przełączania.



Rys. 4. Charakterystyka napięciowo-prądowa obwodu głównego tyrystora:

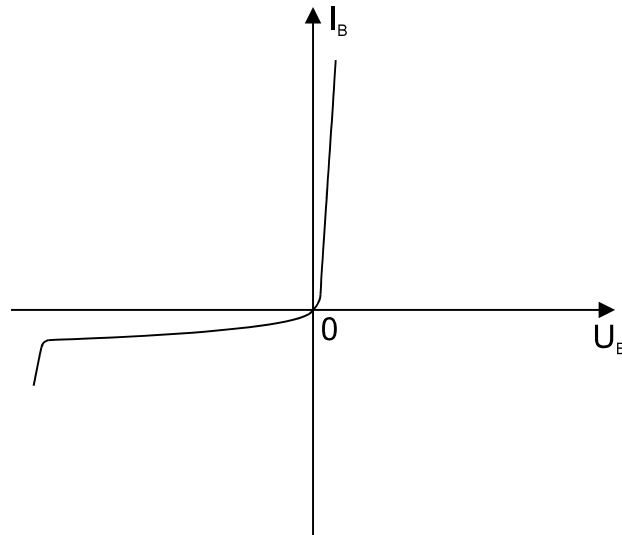
*a*-bez prądu bramki, *b*-z prądem bramki, 1-charakterystyka w stanie przewodzenia, 2-charakterystyka w stanie blokowania, 3-charakterystyka w stanie zaporowym, 4-obszar przebicia, 5-prąd podtrzymania, 6-prąd włączania, 7-aproksymacja prostoliniowa w stanie przewodzenia, 8-napięcie progowe, 9-rezystancja dynamiczna w stanie przewodzenia, 10-napięcie przełączania, 11-prąd przełączania, 12-napięcie przebicia

**Stan blokowania** - charakteryzują współrzędne  $U_D, I_D$  punktu szczytowego ( $U_{D_0}, I_{D_0}$  - bez prądu bramki) odpowiadającego przełączaniu, tj. **napięcie przełączania** i **prąd przełączania**. Prąd przełączania odpowiadający przejściu ze stanu blokowania do stanu przewodzenia nosi nazwę **prądu włączenia**  $I_L$ . Natomiast prąd przełączania odpowiadający przejściu ze stanu przewodzenia do stanu blokowania nosi nazwę **prądu podtrzymania**  $I_H$ .

Podstawowym parametrem charakteryzującym **stan przewodzenia** jest **największy prąd przewodzenia**. Stan polaryzacji wstecznej tyrystora nazywa się **stanem zaporowym** (stan zaporowy przy polaryzacji wstecznej). W stanie tym płynie przez tyrystor niewielki prąd wsteczny pod warunkiem nieprzekroczenia **największego szczytowego napięcia wstecznego**  $U_{R_{max}}$ .

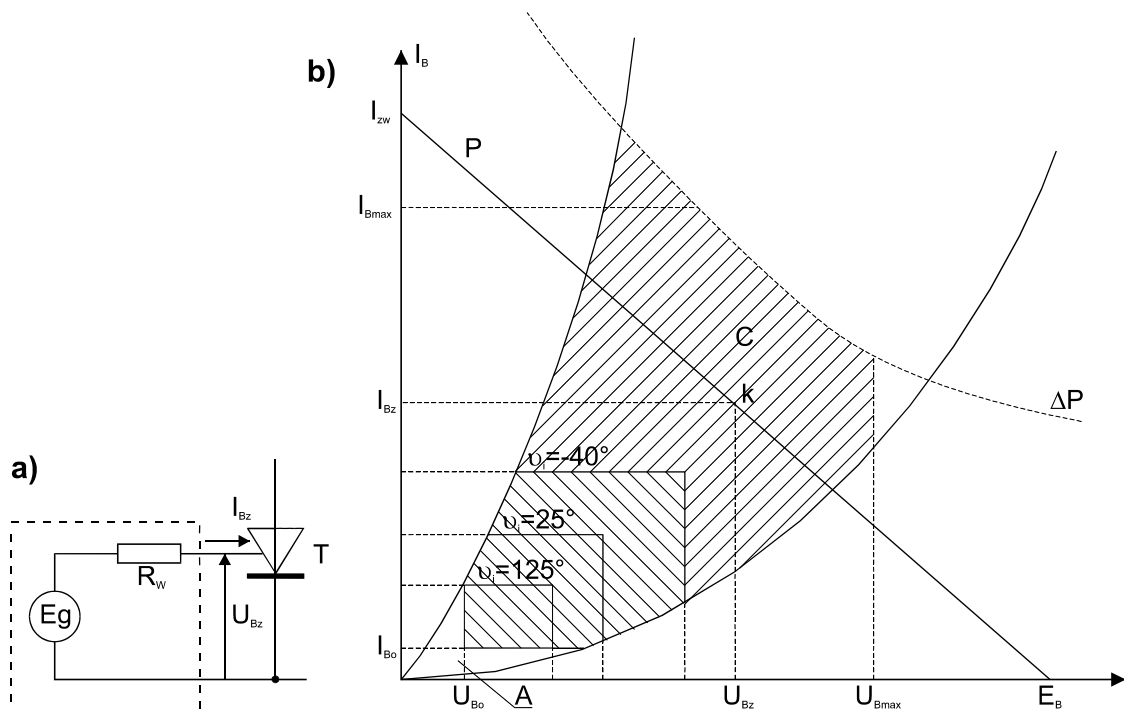
Parametry i charakterystyki obwodu bramki.

Złącze bramka - katoda ma na ogół słabe właściwości prostujące (rys. 5). Charakteryzuje się ono również stosunkowo małym napięciem przebicia lawinowego przy polaryzacji wstecznej.



*Rys. 5. Charakterystyka napięciowo-prądowa obwodu bramki*

Ponieważ charakterystyki bramkowe wskazują stosunkowo duży rozrzut technologiczny, katalogowe charakterystyki napięciowo-prądowe bramki tyrystora przedstawione są zawsze w postaci dwóch krzywych granicznych (rys.6), między którymi powinna leżeć charakterystyka dowolnie wybranego egzemplarza tyrystora danego typu.



Rys. 6. Układ zastępczy źródła sygnałów sterujących (a), sposób wyznaczania prostej obciążenia oraz obszary pracy obwodu bramki (b)

Oznaczenia:

$U_{B_{max}}$  ☞ największe szczytowe napięcie przewodzenia bramki

$I_{B_{max}}$  ☞ największy szczytowy prąd przewodzenia bramki

$U_{B_z}$  ☞ napięcia przełączające (wyzwalające) bramki

$I_{B_z}$  ☞ prąd przełączający (wyzwalający) bramki

$\Delta P$  ☞ hiperbola dopuszczalnej straty mocy w bramce

$P$  ☞ prosta obciążenia obwodu bramkowego

$\vartheta_j$  ☞ temperatury złącza bramka-katoda

$A$  ☞ obszar niemożliwych przełączeń tyrystora. Na rys. 6b podana jest również największa wartość napięcia i prądu bramki  $U_{B_0}$ ,  $I_{B_0}$ , która nie spowoduje włączenia ani jednego tyrystora danego typu.

$B$  ☞ obszar możliwych przełączeń tyrystora lub tzw. obszar niepewnego wyzwalania. Proste pionowe i poziome, które przecinają ten obszar, wyznaczają minimalną wartość prądu i napięcia bramki niezbędną do wyzwolenia tyrystora przy określonej temperaturze struktury. Im niższa jest temperatura struktury  $p-n-p-n$ , tym wyższa jest wartość wyzwalającego prądu i napięcia bramki.

$C$  ☞ obszar pewnych przełączeń (pewnego wyzwalania).

Prosta obciążenia źródła sygnału sterującego powinna przecinać napięciowo-prądową charakterystykę bramkową danego tyrystora w obszarze pewnych przełączeń. Punkt wyzwalania powinien znajdować się dostatecznie blisko krzywej dopuszczalnej straty mocy w bramce.

Na rysunku 6a przedstawiono układ zastępczy źródła sygnałów sterujących składający się z SEM  $E_B$  i rezystancji wewnętrznej  $R_w$ . Prosta obciążenia  $p$  tego źródła poprowadzona jest w ten sposób, że punkt pracy  $k$ , tj. punkt przecięcia tej prostej z charakterystyką bramkową, znajduje się w obszarze pewnych przełączeń, w pobliżu krzywej dopuszczalnych strat mocy.

Prosta obciążenia wyznacza na osiach współrzędnych napięcie źródła bramkowego  $E_B$  i prąd zwarcia  $I_{zw} = E_B / R_w$ .

Jeśli SEM źródła sygnałów sterujących jest funkcją czasu  $e_B(t)$ , co ma miejsce w sterowaniu impulsowym, to prosta obciążenia (rys. 6b) w czasie narastania sygnału przemieszcza się równolegle od punktu zero osi współrzędnych do położenia maksymalnego, które osiąga przy amplitudzie napięcia sterującego.

### 1.3. Zdejmowanie charakterystyk w układzie charakterografu.

Pomiaru charakterystyk napięciowo-prądowych tyrystora w stanie zaporowym oraz w stanie blokowania można dokonać w układzie charakterografu (rys.17). Przez stan zaporowy rozumie się polaryzację wsteczną złącza anoda-katoda, a przez stan blokowania nieprzewodzenie podczas polaryzacji złącza anoda-katoda tyrystora w kierunku przewodzenia. Układ charakterografu umożliwia zasilanie złącza anoda-katoda dodatnimi bądź ujemnymi półfalami sinusoidy uzyskanymi w wyniku jednopółokowego prostowania napięcia zasilającego za pomocą diody. Oddzielna część układu umożliwia zasilanie obwodu bramki tyrystora napięciem regulowanym przez dzielnik złożony z potencjometru oraz rezystora. W trakcie pomiaru charakterystyk w kierunku zaporowym zasilanie obwodu bramki jest odłączane za pomocą wyłącznika. Napięcia sterujące do oscyloskopu są pobierane z elektrod tyrystora ( $U_{AB}$ ) oraz z szeregowego opornika przez który płynie prąd tyrystora ( $U_{BC}$ ). Za pomocą układu można dokonać pomiaru powtarzalnego szczytowego napięcia wstecznego w stanie zaporowym oraz powtarzalnego szczytowego napięcia blokowania w stanie blokowania i charakterystyki prądu anodowego w funkcji napięcia anoda-katoda w stanie przewodzenia.

### 1.4. Prostowniki sterowane.

Jak wynika z rozważań w p. 1.2 wyzwalenie wymaga doprowadzenia do bramki sygnału wyzwalającego w postaci prądu bramki i napięcia bramki o odpowiednich wartościach. Najczęściej stosowanym w prostownikach sterowanych sposobem wyzwiania jest wyzwianie bramkowe impulsowe. Podanie dodatniego impulsu prądowego o odpowiednich parametrach na bramkę tyrystora spolaryzowanego dodatnio powoduje przejście tyrystora ze stanu blokowania w stan przewodzenia.

Istotną cechą układów wyzwiania bramkowego tyrystora w prostowniku sterowanym jest możliwość zmiany kąta pojawiania się impulsu wyzwalającego, czyli tzw. **kąta załączania** (wyzwalania)  $\Theta_z$ . Zmiana kąta załączania powoduje natomiast zmianę wartości średniej prądu, napięcia i mocy odbiornika.

Podstawowe schematy prostowników sterowanych

a) układ jednofazowy półokresowy

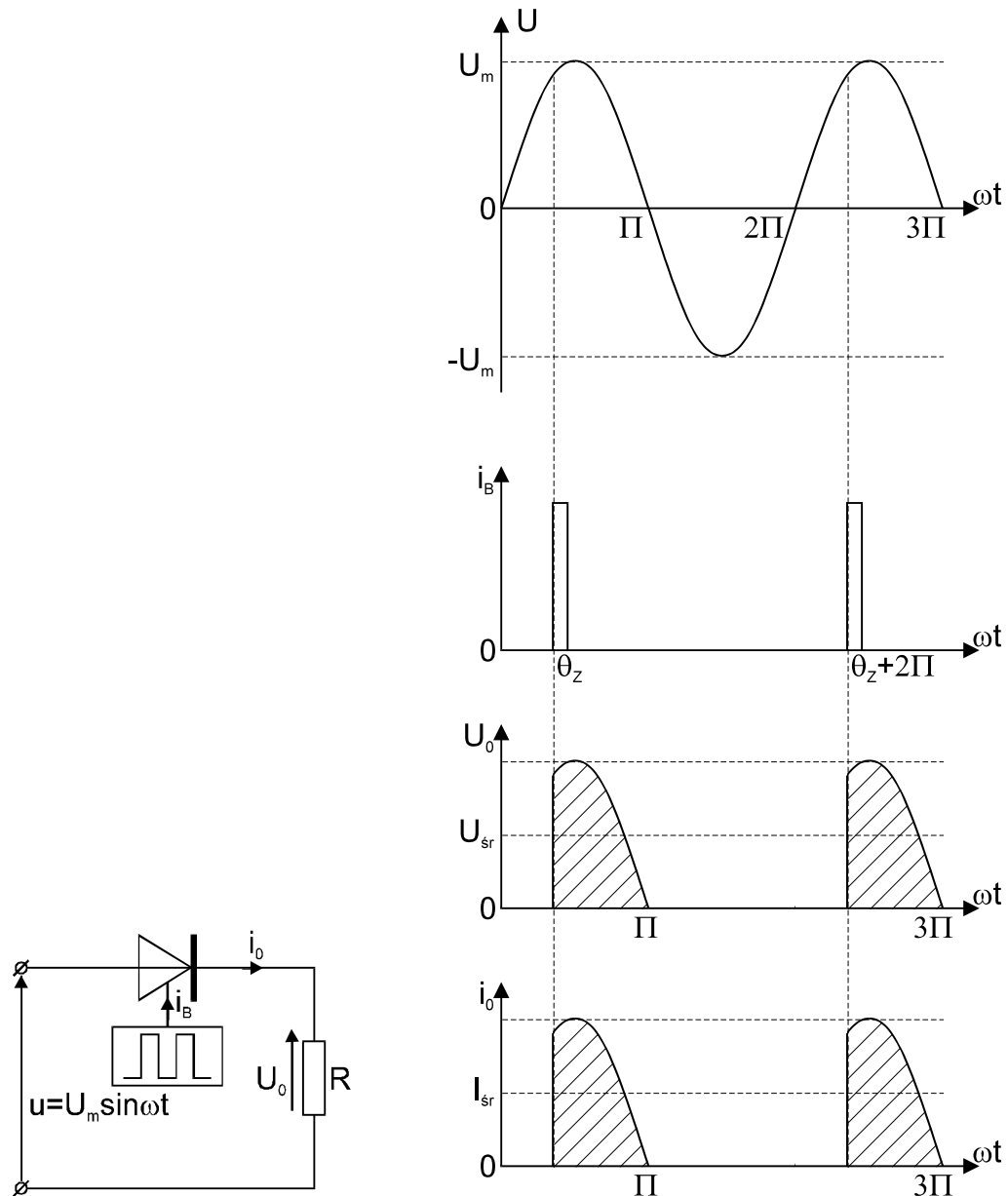
$$U_{sr} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \Theta_z) \quad (2)$$



Jak wynika z powyższej zależności wartość napięcia  $U_d$  zmienia się od  $\frac{U_m}{\pi}$  do zera przy zmianie  $\Theta_z$  od zera do  $\pi$ .

W przypadku obciążenia typu  $R$  wartość średnia prądu wyraża się wzorem:

$$I_{\text{sr}} = \frac{U_{\text{sr}}}{R} = \frac{U_m}{2\pi R} (1 + \cos\Theta_z) \quad (3)$$



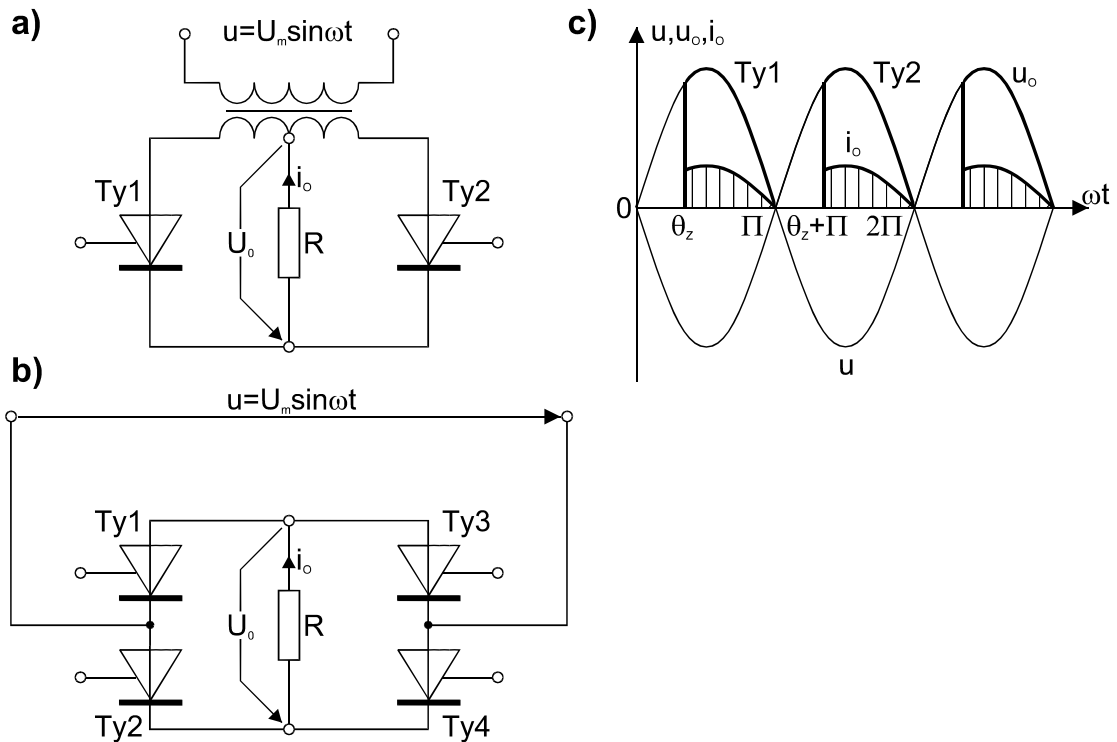
Rys. 7. Prostownik jednofazowy półokresowy: a) układ, b) przebiegi czasowe przy obciążeniu  $R$

b) układ jednofazowy pełnookresowy

Wartość średnią napięcia określa zależność:

$$U_{\omega} = \frac{1}{\pi} \int_{\Theta_z}^{\pi} U_m \sin \omega t d(\omega t) = \frac{U_m}{\pi} (1 + \cos \Theta_z) \quad (4)$$

W przypadku układu z rys. 8a tyrystor  $Ty1$  wyzwalany jest w chwilach odpowiadających kątowi  $(\Theta_z + 2k\pi)$ , natomiast tyrystor  $Ty2$  w chwilach odpowiadających kątowi  $(\Theta_z + \pi + 2k\pi)$ , gdzie  $k \in (0; 1; 2; 3K)$ .

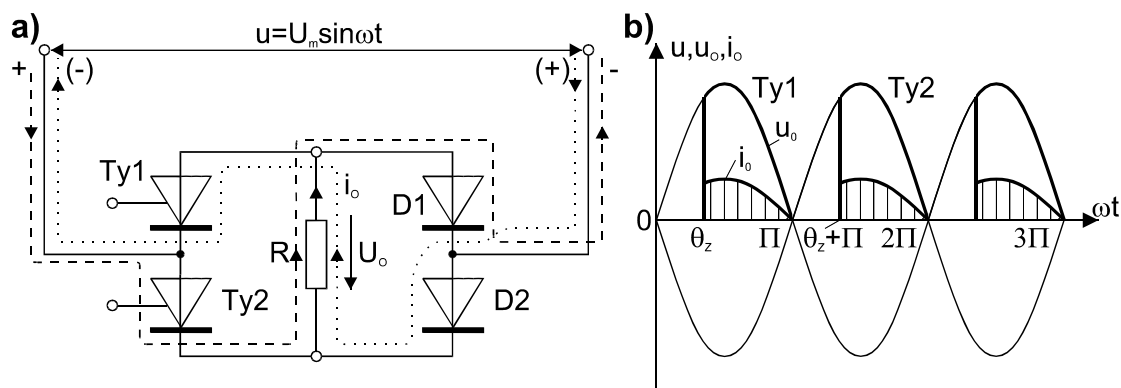


Rys. 8. Jednofazowe, pełnookresowe układy prostowania: a) schemat układu typu 2T z wyprowadzonym środkiem uzwojenia wtórnego transformatora; b) schemat układu mostkowego typu 4T; c) przebiegi czasowe napięcia i prądu obciążenia przy obciążeniu R

Układ mostka jednofazowego (rys. 8b) posiada identyczne przebiegi czasowe  $i_o, u_o$  jak układ 2T. Może on pracować bez transformatora, ale wymaga podwójnej liczby tyrystorów.

Tyrystory przeciwległych gałęzi, np.  $Ty1$  i  $Ty4$  muszą być wyzwalane jednocześnie.

Celem zaoszczędzenia dwóch tyrystorów, zastępuje się je diodami niesterowanymi i otrzymuje się układ mostkowy typu 2T-2D, pokazany na rys. 9.



Rys. 9. Jednofazowy układ mostkowy typu 2T-2D: a) schemat układu, b) przebiegi czasowe napięcia i prądu obciążenia

Częściej występującym w praktyce typem obciążenia prostowników sterowanych jest obciążenie typu rezystancyjno-indukcyjnego (np. w układzie zasilania twornika lub uzwojenia wzbudzenia silnika prądu stałego). Analiza zjawisk i przebiegów w takich obwodach jest bardziej skomplikowana ze względu na zjawiska towarzyszące przepływowi prądu zmiennego w cewce indukcyjnej.

Oprócz wyżej omówionych układów prostowniczych tyrystorowych jednofazowych istnieją układy trójfazowe.

Prostowniki sterowane są bardzo rozpowszechnione jako źródła napięcia stałego regulowanego w szerokich granicach. Najlichniesza grupa zastosowań jest związana z układami napędowymi prądu stałego. Liczną grupę stanowią również zasilacze stabilizowane prądu stałego.

Tyrystory znalazły także zastosowanie w układach zasilania silników asynchronicznych. Pełnią one rolę tzw. przemienników częstotliwości, tzn. zamieniają jedną częstotliwość prądu na drugą. Daje to możliwość bezstratnej regulacji obrotów silników asynchronicznych.

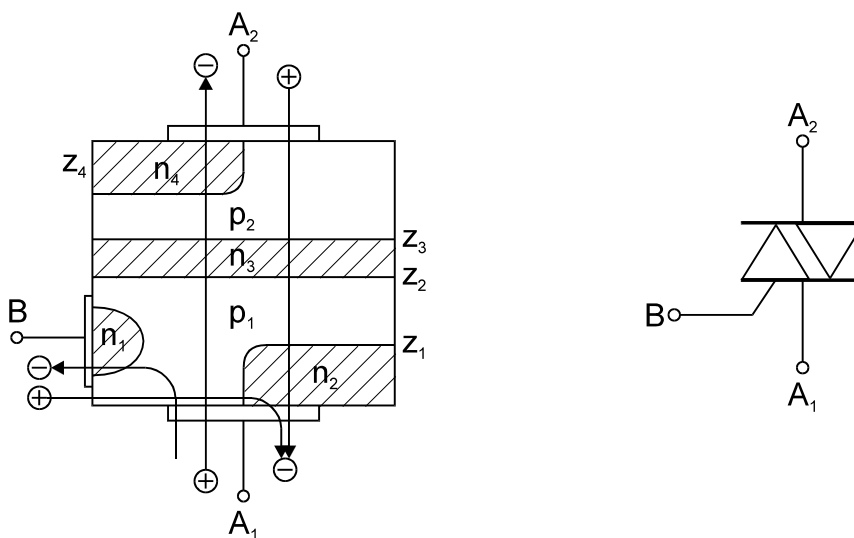
Przykładowo zostaną podane wartości niektórych parametrów dwóch różnych tyrystorów produkcji krajowej.

Typ tyrystora	BTP 2	T20-1000
Parametr		
Największy prąd przewodzenia	2 A	1000 A
Powtarzalne napięcie blokowania	25-800 V	100-1200 V
Powtarzalne napięcie wsteczne	25-800 V	100-1200 V
Spadek napięcia na tyrystorze	2 V	1,05-1,35 V
Prąd podtrzymania	7-10 mA	200 mA

## 1.5. Tyrystor dwukierunkowy (TRIAK).

Na bazie klasycznej czterowarstwowej struktury  $p-n-p-n$  powstają nowe przyrządy półprzewodnikowe o specjalnych właściwościach narzuconych z reguły przez potrzeby układowe bądź przez praktykę eksploatacyjną. Tyrystor dwukierunkowy jest przyrządem trójelektrodowym, włączanym sygnałem bramkowym o przemiennej polaryzacji i przewodzącym prąd w obu kierunkach. Nazwa triak jest skrótem oznaczenia: Triode - AC - Switch. Tyrystor ten zastępuje dwa normalne tyrystory połączone w układzie przeciwrównoległym. Początkowo tyrystory dwukierunkowe wykonane były głównie w celu uproszczenia regulacji mocy w układach prądu zmiennego. Obecnie triaki stosuje się szeroko w urządzeniach z regulacją fazy oraz jako tanie bezstykowe łączniki mocy.

W celu wyjaśnienia zasady działania triaka należy zapoznać się ze strukturą wewnętrzną przyrządu, którą przedstawiono na rys. 10.



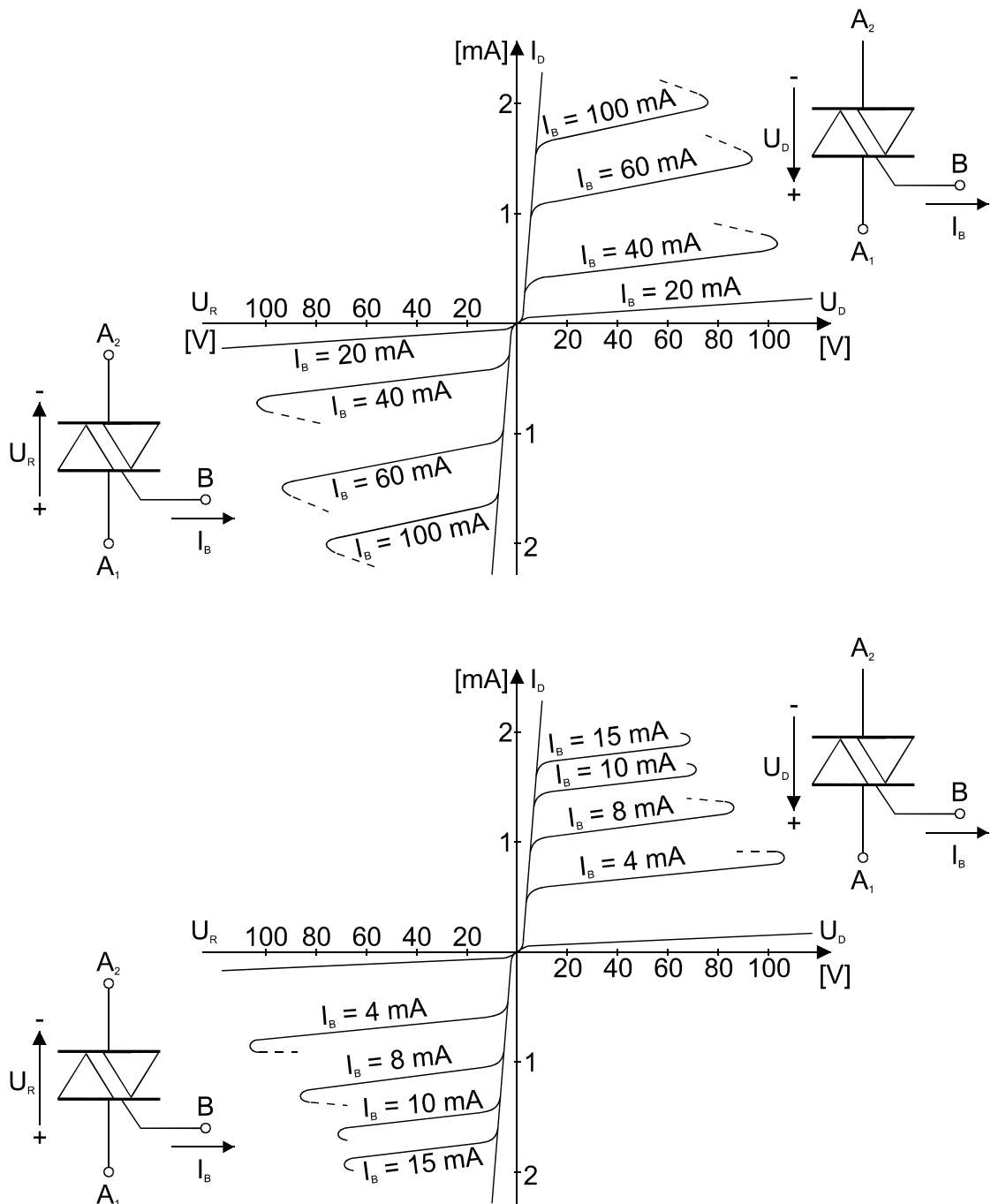
Rys. 10. Budowa i symbol graficzny triaka

Jak przedstawiono na rys. 10 elektrodą sterującą jest obszar typu  $n$ , utworzony w warstwie  $p$ , w procesie technologicznym. Elektroda ta służy do wyzwalania triaka. Jeżeli do elektrody  $A_1$  doprowadzimy ujemny biegun napięcia, a do  $A_2$  dodatni to załączenie triaka nastąpi w taki sposób, jak w konwencjonalnym tyrystorze. Pod wpływem prądu sterującego złącze  $Z_2$  zaczyna przewodzić wyzwalając układ.

Z opisanej zasady działania można wyciągnąć wniosek, że triak blokuje napięcie o dowolnej biegunowości, przewodzi prąd w obu kierunkach oraz, że może być wyzwalany w dowolnym kierunku impulsami sterującymi zarówno dodatnimi jak i ujemnymi. Z tego względu wyróżniamy następujące cztery stany pracy triaka.

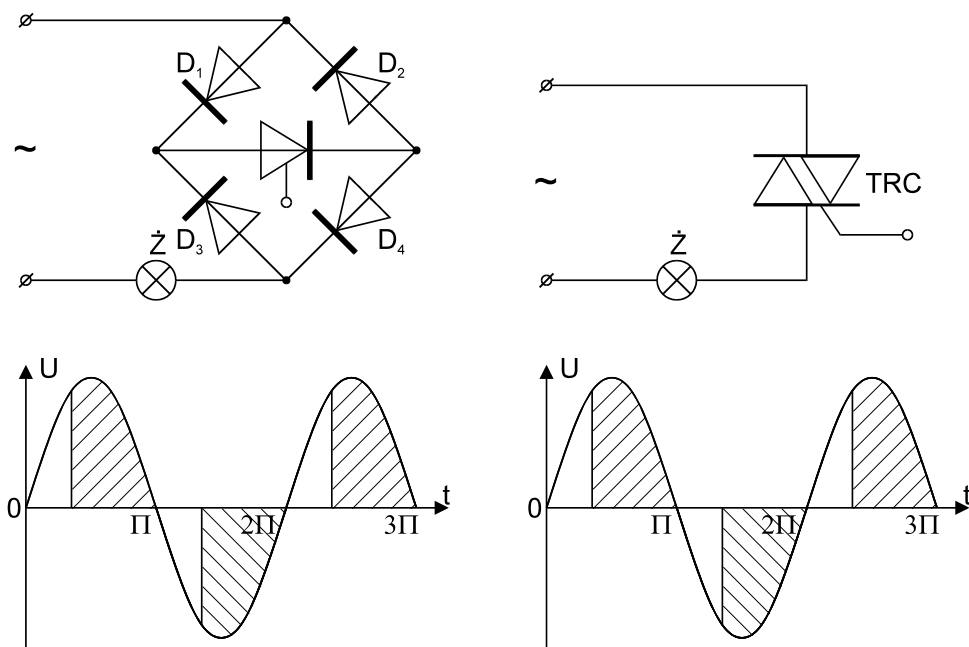
- Stan I + – Elektroda  $A_2$  ma potencjał dodatni względem  $A_1$ , elektroda  $B$  sterowana jest impulsami dodatnimi.
- Stan I – – Elektroda  $A_2$  ma potencjał dodatni względem  $A_1$ , elektroda  $B$  sterowana jest impulsami ujemnymi.
- Stan III + – Elektroda  $A_2$  ma potencjał ujemny względem  $A_1$ , sterowanie impulsami dodatnimi.
- Stan III – – Elektroda  $A_2$  ma potencjał ujemny względem  $A_1$ , sterowanie impulsami ujemnymi.

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe triaka średniej mocy. Cztery wyżej opisane stany pracy triaka odpowiadają pracy przyrządu w I i III ćwiartce na rys. 11a, przy dodatniej biegunowości impulsów prądu sterującego i na rys. 11b - przy ujemnej biegunowości impulsów sterujących. Charakterystyki obwodu głównego w I i III ćwiartce są w przybliżeniu symetryczne, jednak optymalne warunki sterowania uzyskuje się dla stanu I+ i III- tzn. przy sterowaniu impulsami o zmiennej polaryzacji, przy czym dodatni impuls bramkowy pojawia się przy dodatnim napięciu na elektrodzie A2. Przy  $I_B = 0$  triak blokuje napięcie o dowolnej biegunowości, pod warunkiem oczywiście, nie przekroczenia napięcia przełączania.



Rys. 11. Przykładowe charakterystyki prądowo-napięciowe triaka w pierwszej i trzeciej ćwiartce, przy różnych wartościach prądu bramki

Częstym przypadkiem zastosowania triaka jest układ regulacji natężenia oświetlenia. Układ z triakiem jest układem bardziej ekonomicznym, gdyż zawiera mniejszą liczbę elementów niż układ z konwencjonalnym tyrystorem. Obrazuje to rys. 12.

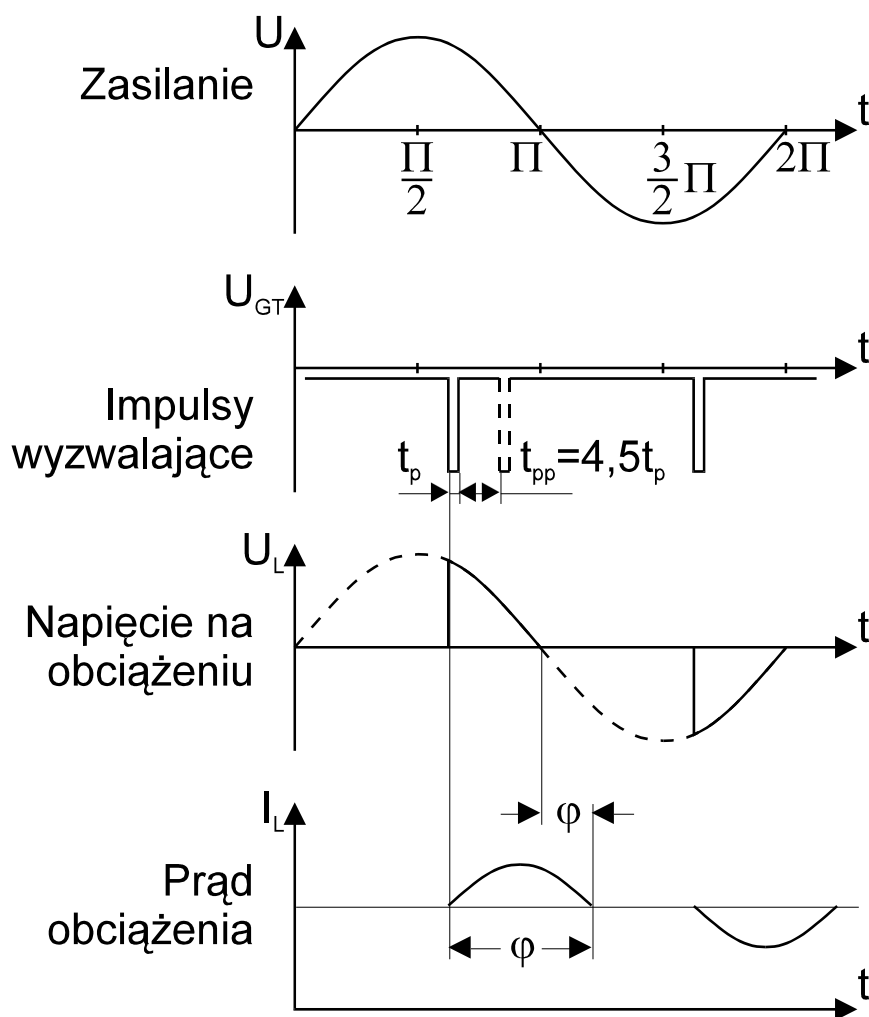


Rys. 12. Przykład zastosowania triaka i tyrystora do regulacji natężenia oświetlenia.  
Przebiegi czasowe napięcia w układzie

### 1.6. Sterowanie fazowe i grupowe w układach z triakiem.

Sterowanie fazowe polega na włączeniu tyrystora bądź triaka impulsem synchronicznym w stosunku do napięcia zasilającego w ściśle określonej, regulowanej, części każdego okresu. Znane od dawna układy sterowania wykonane z elementów dyskretnych są aktualnie zastępowane układami scalonymi. Jednym z przykładów układu sterującego może być układ U208B firmy Telefunken (rys.13).

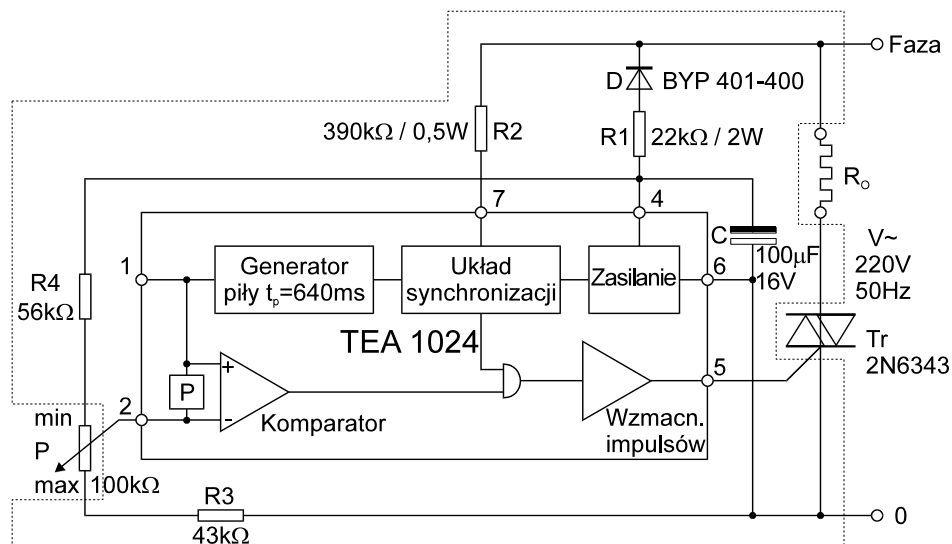




Rys.14. Przebiegi w układzie regulacji fazowej

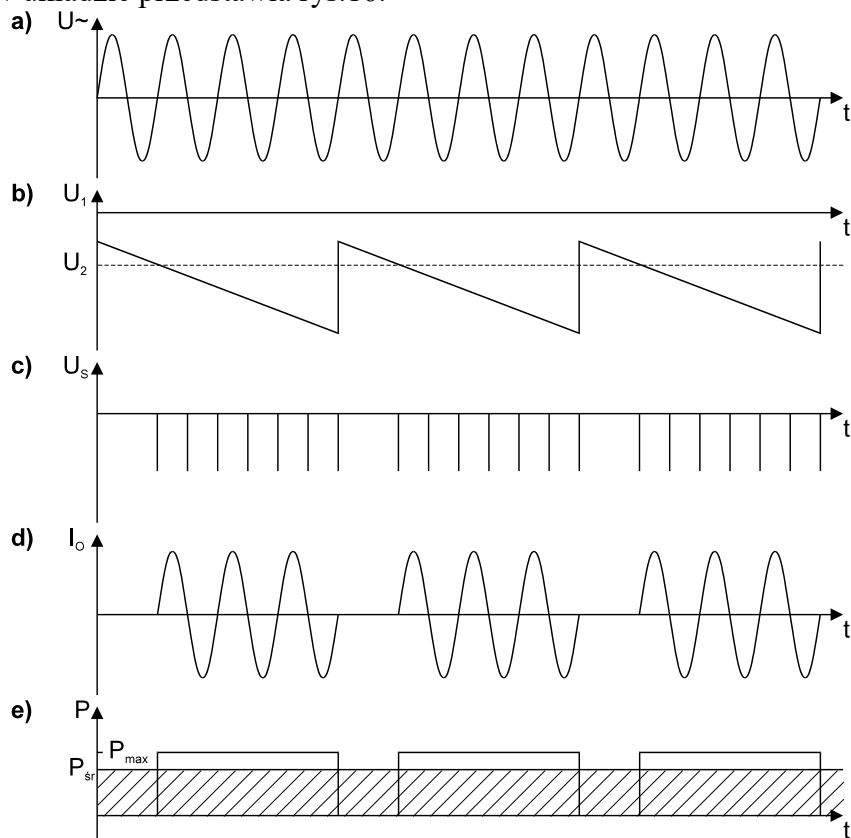
Układy regulacji grupowej zostały wprowadzone do użytku z uwagi na fakt, że układy regulacji fazowej są źródłem zakłóceń radioelektrycznych powstających w chwili przełączania triaka. Metoda grupowej regulacji mocy nie powoduje zakłóceń a więc nie wymaga stosowania skomplikowanych i kosztownych filtrów przeciwzakłóceńowych. Triak jest wyzwalany w momencie przejścia przez zero napięcia zasilającego, przewodzi do końca półokresu i jest wyzwalany ponownie. Regulacji mocy dokonuje się włączając triak przez pewną określoną liczbę połówek okresu sieci, a następnie wyłączając go na określony czas. Sterowanie grupowe ma zastosowanie do urządzeń cieplnych o dużej bezwładności, w których temperatura nie zmienia się skokowo, lecz przyjmuje pewną ustaloną wartość średnią. Może być także stosowane do sterowania silników o dużej masie wirnika. Sterowanie grupowe nie nadaje się do regulacji mocy w oświetleniu ze względu na widoczne migotanie światła. Przykładem układu do sterowania grupowego jest układ scalony TEA1024 firmy AEG. Schemat układu przedstawia rysunek 15.





Rys.15. Układ scalony do sterowania grupowego tyrystorów

Zasadniczą częścią układu scalonego jest układ synchronizacji, który wytwarza impulsy sterujące triakiem. Impulsy sterujące są zsynchronizowane z napięciem sieci tak, że impuls wyzwalający rozpoczyna się tuż przed a kończy tuż po przejściu napięcia zasilającego przez zero. Impulsy wyzwalające są podawane na bramkę triaka przez bramkę AND i wzmacniacz impulsów. Bramka AND jest sterowana za pomocą komparatora. Komparator dokonuje porównania napięcia piłokształtnego z ustawionym przez użytkownika napięciem odniesienia. W momencie zrównania napięć komparator odblokowuje bramkę AND i impuls wyzwalający dochodzi do bramki triaka. Układ oznaczony literą P zabezpiecza wejście komparatora przed impulsami zakłócającymi. Przebiegi w układzie przedstawia rys.16.

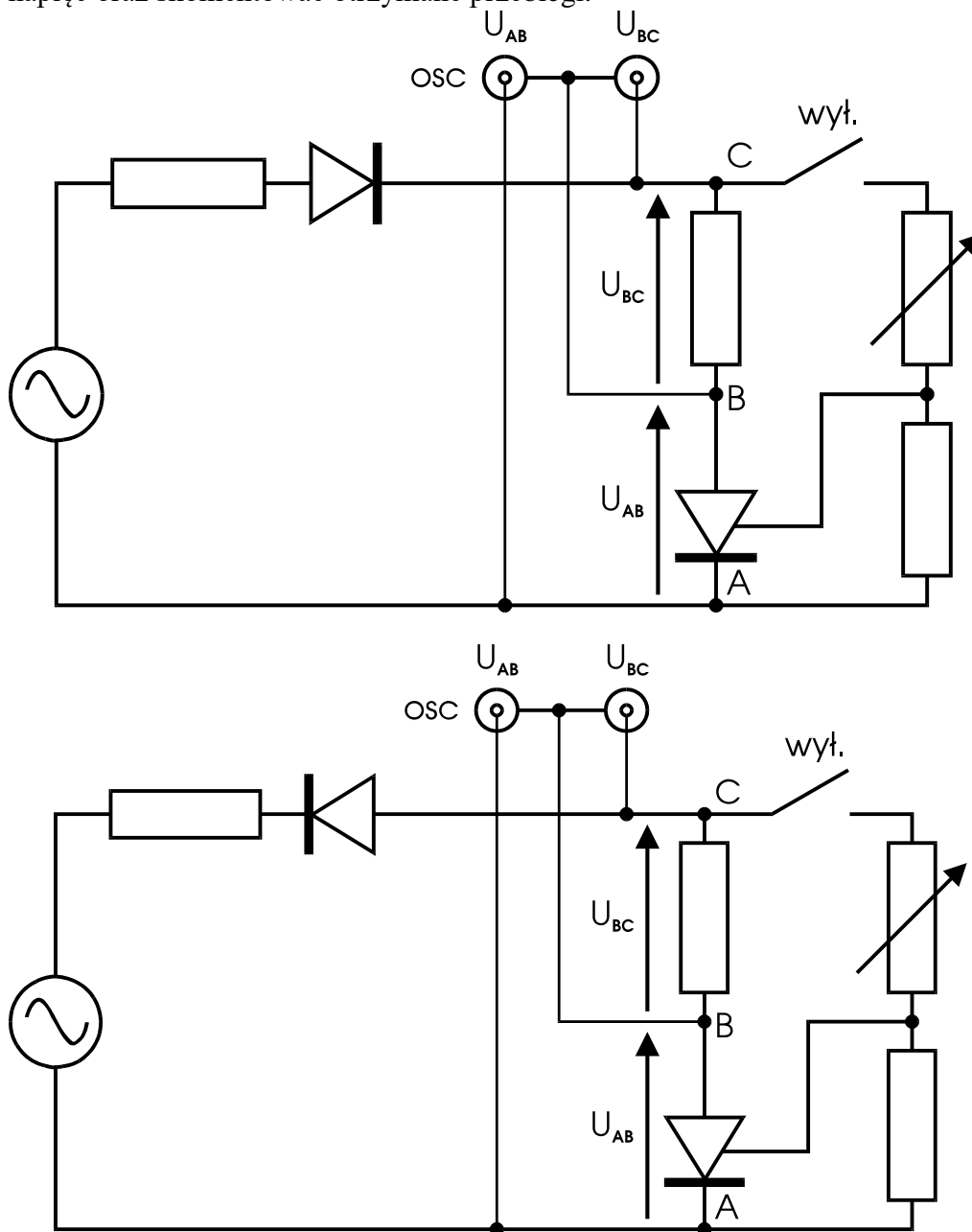


Rys.16. Przebiegi w układzie regulacji grupowej

## 2. Wykonanie pomiarów

### 2.1. Badanie tyrystora w układzie charakterografu.

W układzie charakterografu przedstawionym na rys.17 należy dokonać następujących pomiarów. Dla kierunku przewodzenia pomierzyć za pomocą oscyloskopu powtarzalne szczytowe napięcie blokowania  $U_{DRM}$  przy otwartym wyłączniku wył. (wejście X oscyloskopu ustawić na DC). Przy zamkniętym wyłączniku wył. zaobserwować na ekranie rodzinę charakterystyk  $I_{AK}=f(U_{AK})$  dla różnych pozycji potencjometru do regulacji prądu bramki. Dla kierunku zaporowego zmierzyć powtarzalne szczytowe napięcie wsteczne  $U_{RRM}$  (przy otwartym wyłączniku wył.). Wszystkie zmierzone wartości napięć zamieścić w sprawozdaniu. Narysować zaobserwowane na ekranie oscyloskopu przebiegi, pokazać na nich zmierzone wartości napięć oraz skomentować otrzymane przebiegi.



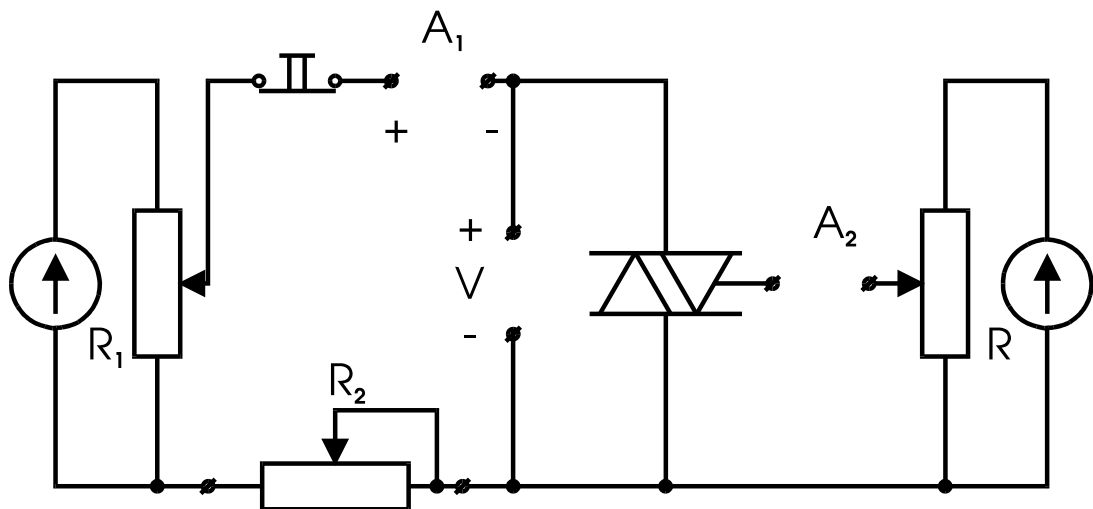
Rys.17. Charakterograf do badania charakterystyk tyrystorów

### 2.2. Badanie triaka.

Układ do badania triaka przedstawiono na rys.18. Dla kilku wartości napięcia anodowego zadanych rezystorem  $R_1$  zwiększać prąd bramki rezystorem  $R$  aż do wywołania załączenia triaka. Rezystor  $R_2$  powinien być ustawiony na maksymalną wartość rezystancji. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

Tabela 1.

L.p	$U_A$	$I_B$
	V	mA
1		
2		
3		
4		
5		
6		



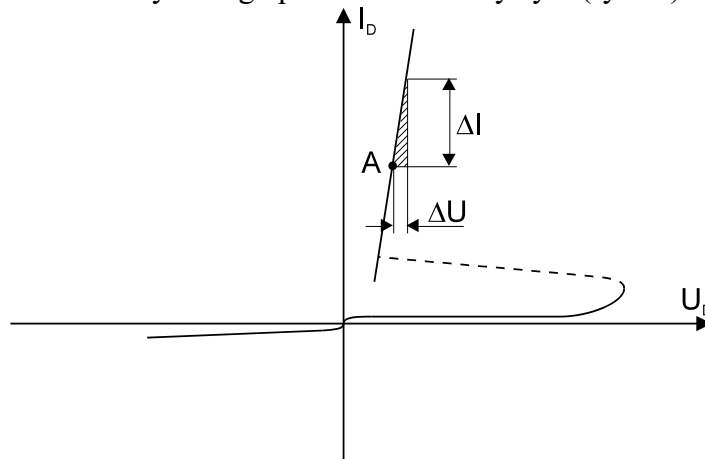
Rys.18. Schemat układu do badania triaka

Za pomocą rezystora  $R_1$  ustawić maksymalną wartość napięcia anodowego. Rezystorem  $R$  zwiększać prąd bramki od zera aż do wartości, przy której triak zacznie przewodzić. Zapamiętać wartość tego prądu. Sprowadzić triak do stanu blokowania przez zmniejszenie wartości napięcia anodowego do zera. Ustawić zapamiętaną wartość prądu bramki. Zwiększać napięcie na triaku odczytując prąd obwodu głównego na amperomierzu  $A_1$ . Po wyzwoleniu triaka zmierzyć spadek napięcia na przewodzącym triaku dla minimalnej i maksymalnej wartości rezystancji  $R_2$ . Wyniki pomiarów zanotować w tabeli 2.

Tabela 2.

L.p	$U_A$	$I_A$
	V	A
1		
2		
3		
4		
5		
6		

Czynności powtórzyć dla trzeciej ćwiartki charakterystyki napięciowo-prądowej, a wyniki zanotować w tabeli identycznej jak tabela 2. Na podstawie wyników pomiarów należy narysować charakterystyki:  $U_A=f(I_B)$  oraz  $I_A=f(U_A)$  oraz określić rezystancję przewodzącego triaka dla wybranego punktu charakterystyki (rys.19).

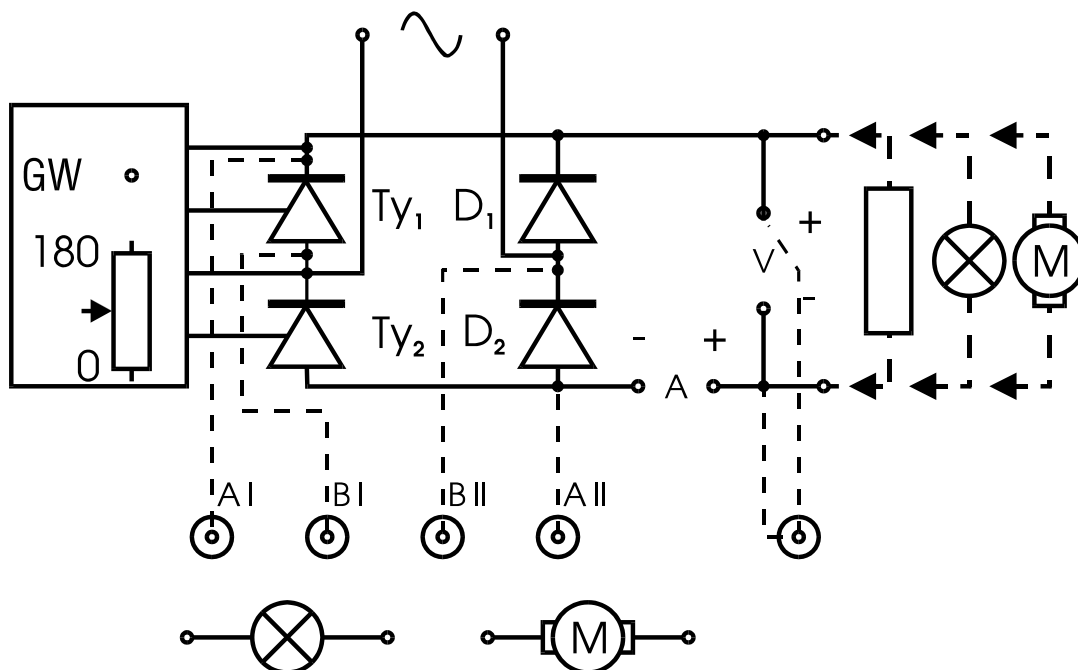


Rys.19. Sposób określenia rezystancji przewodzącego triaka

### 2.3. Badanie tyrystorowego prostownika sterowanego.

Badany prostownik składa się z tyrystorów Ty1 i Ty2 oraz diod D1 i D2. Kąt wyzwalania tyrystorów jest regulowany przez przesuwanie w fazie impulsów wytwarzanych w generatorze impulsów wyzwalających (rys.20).

Po przyłączeniu do zacisków wyjściowych prostownika opornika R dla różnych wartości kąta wyzwalania  $\theta_z$  zaobserwować i narysować przebiegi napięcia na tyrystorze oraz napięcia wyjściowego. Zmieniając wartość oporności opornika zdjąć charakterystykę prostownika  $U_d=f(I_{sr})$  przy kącie wyzwalania  $\theta_z=const.$  i narysować ją w sprawozdaniu. Pomiary przeprowadzić dla dwóch wartości kąta wyzwalania. Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 3.

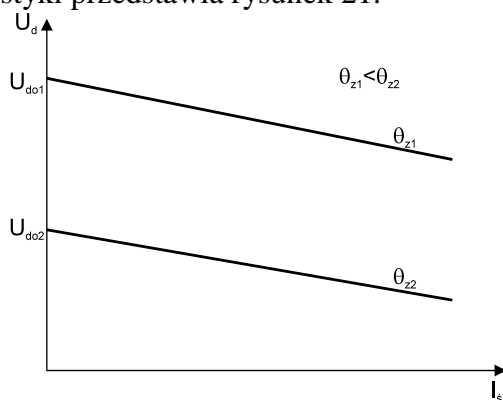


Rys.20. Tyrystorowy prostownik sterowany

Tabela 3.

L.p	$\theta_z$	$U_d$	$I_{sr}$
	°	V	A
1			
2			
3			
4			
5			
6			

Przykładowe charakterystyki przedstawia rysunek 21.



Rys.21. Przykładowe charakterystyki prostownika

W celu obejrzenia przebiegów napięcia na tyrystorze i diodzie współpracujących w mostku w czasie dodatniej półfali napięcia należy dokonać połączenia gniazd oznaczonych AI, BI, BII, AII odpowiednio z gniazdami oscyloskopu WEA STRUMIEŃ I, WEB STRUMIEŃ I, WEB STRUMIEŃ II, WEA STRUMIEŃ II. Oscyloskop pracuje w układzie różnicowym, to znaczy napięcie między anodą i katodą tyrystora uzyskujemy przez odjęcie napięcia A-masa i napięcia K-masa. Dlatego przełączniki rodzaju pracy oscyloskopu dla obu strumieni należy ustawić następująco: A±B wciśnięty; -B wciśnięty; wzmocnienia 10V/cm niekalibrowane. Pokrętłami płynnej regulacji wzmocnienia uzyskać właściwy kształt przebiegów. Zamiast napięć z diody (przewody dołączone do gniazd BII, AII zdjąć) do wejścia A lub B strumienia II można podłączyć napięcie z obciążenia.

#### 2.4. Wyznaczanie wartości średniej napięcia w prostowniku sterowanym.

Schemat połączeń przedstawiony jest na rysunku (rys.20). Za pomocą oscyloskopu zmierzyć wartość maksymalną napięcia na wyjściu prostownika (na odbiorniku). Określić za pomocą oscyloskopu wartość kąta wyzwalania tyrystorów  $\theta_z$ . Woltomierzem zmierzyć napięcie na odbiorniku (wartość średnią). Dla porównania na podstawie wzoru /4/ obliczyć wartość średnią napięcia na odbiorniku. Wyniki zanotować w tabeli 4.

Tabela 4.

L.p	$U_V$	$U_{OBL}$
	V	V

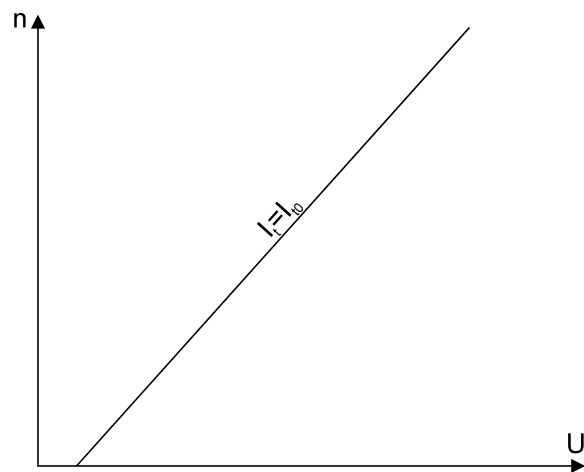
#### 2.5. Badanie tyrystorowego układu napędowego.

Badanie wykonuje się w układzie przedstawionym na rysunku 20. W celu uzyskania wyników należy regulując kąt wyzwalania wyznaczyć zależność prędkości obrotowej silnika od napięcia na tworniku (silnik nieobciążony). Pomiaru prędkości dokonuje się za pomocą stroboskopu. Wyniki pomiaru zapisać w tabeli 5.

Tabela 5.

L.p	$U_t$	n
	V	obr/min
1		
2		
3		
4		

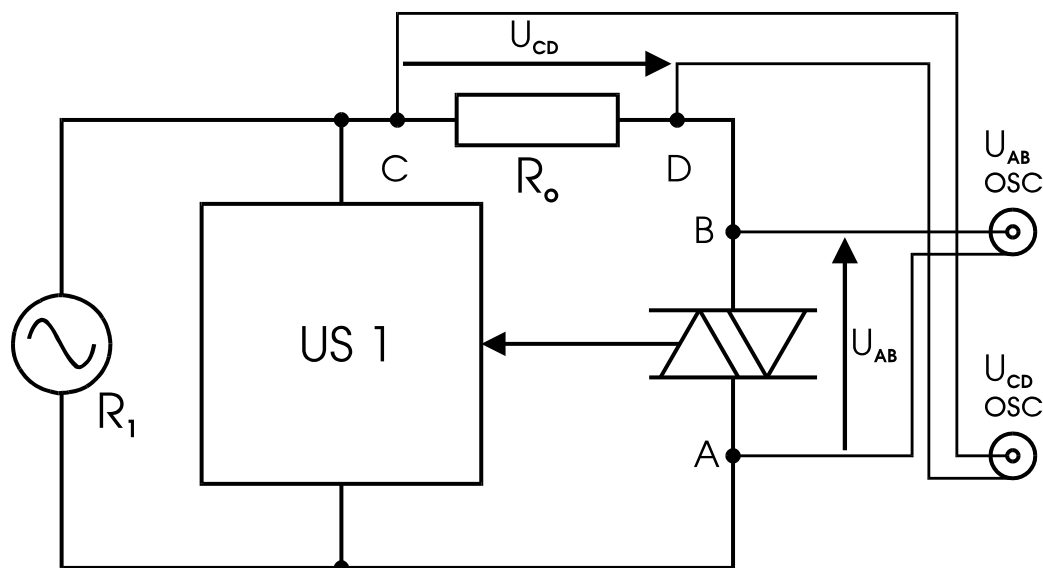
Na podstawie otrzymanych wyników wykreślić zależność  $n=f(U_t)$ . Przykładowy przebieg pokazuje rysunek 22.



Rys.22. Przykładowy przebieg zależności  $n=f(U_t)$

### 2.6. Badanie układu z triakiem sterowanym fazowo.

W układzie z triakiem sterowanym fazowo przedstawionym na rys.23 należy dokonać za pomocą oscyloskopu obserwacji przebiegów napięcia na triaku oraz napięcia na obciążeniu dla różnych kątów wyzwalania triaka. Otrzymane przebiegi należy zamieścić w sprawozdaniu oraz skomentować.



Rys.23. Układ z triakiem sterowanym fazowo

### 2.7. Badanie układu z triakiem sterowanym grupowo.

W układzie z triakiem sterowanym grupowo przedstawionym na rys.24 należy dokonać za pomocą oscyloskopu obserwacji przebiegów napięcia na triaku oraz

