

Wydział Mechaniczno-Energetyczny

Laboratorium Elektroniki

Ćwiczenie nr 4

Energoelektronika – układy prądu zmiennego

1. Wstęp

Energoelektronika to dział elektroniki, zajmująca się projektowaniem i stosowaniem układów elektronicznych dużej mocy. Głównym zadaniem energoelektroniki jest regulowanie i przetwarzanie energii elektrycznej przy użyciu elementów półprzewodnikowych mocy. Energoelektronika obejmuje swoim zakresem elementy i urządzenia półprzewodnikowe, dla których zakres energii zawiera się w przedziale od kilku watów do kilku megawatów.

2. Ogólna charakterystyka struktur czterowarstwowych

Tyrystor to element półprzewodnikowy, w którym występują dwa stany (przewodzenia i nieprzewodzenia) uwarunkowane wewnętrznym sprzężeniem zwrotnym w wielowarstwowej strukturze półprzewodnikowej $p-n-p-n$. Tyrystory mogą być dwu-, trzy- i czteroelektrodowe, mogą przewodzić prąd w jednym kierunku (jednokierunkowe) lub w obu kierunkach (dwukierunkowe).

3. Typy tyrystorów

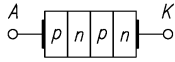
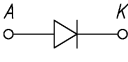
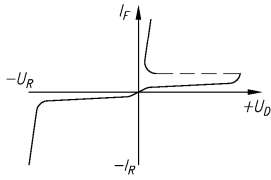
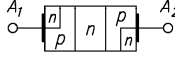
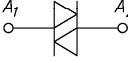
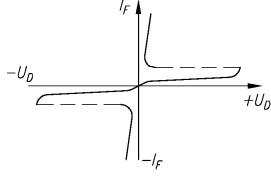
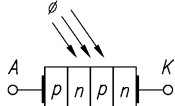
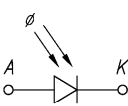
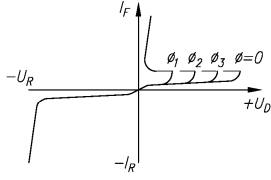
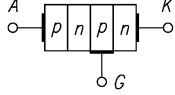
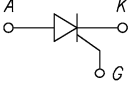
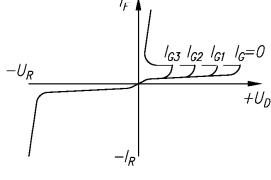
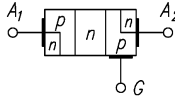
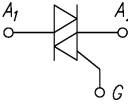
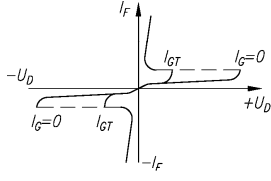
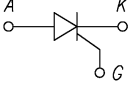
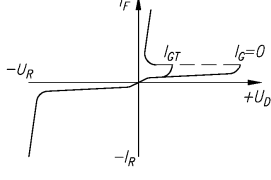
Najczęściej spotykane są tyrystory jednokierunkowe zwane tyrystorami triodowymi (SCR), są to elementy trójelektrodowe z wyprowadzoną anodą A, katodą K i bramką G (elektroda sterująca), przewodzące tylko w jednym kierunku, od anody do katody.

Tyrystory triodowe przewodzące w jednym kierunku stanowią grupę, do której zaliczyć można: tyrystor włączany i wyłączany bramką, tyrystor sterowany światłem (fototyrystor) oraz tyrystor wykonany metodą planarną z jednostronnym rozłożeniem warstw $p-n-p-n$ (SUS). Tyrystory triodowe przewodzące w obu kierunkach posiadają strukturę pięciowarstwową, są to simistory, wyzwalane impulsami bramkowymi o polaryzacji dodatniej bądź triaki, wyzwalane na przemian impulsami o polaryzacji dodatniej i ujemnej.

Tyrystory diodowe jednokierunkowe lub dwukierunkowe, które przechodzą w stan przewodzenia na skutek przekroczenia napięcia progowego to m. in. dioda Shockleya (dynistor) – przewodząca w jednym kierunku i diak – przewodzący w obu kierunkach.

Tabela 2.1 przedstawia elementy półprzewodnikowe przełączające o strukturze cztero- i pięciowarstwowej. Zostały w niej umieszczone informacje dotyczące struktury oraz wyprowadzeń, charakterystyki prądowo-napięciowe i oznaczenia graficzne dla lepszego ich poznania.

Tabela 2.1. Elementy półprzewodnikowe przełączające o strukturze cztero- i pięciowarstwowej

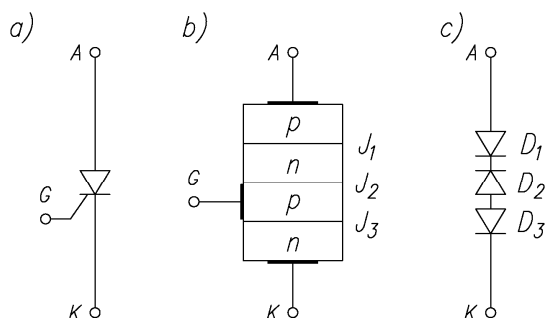
| Nazwa elementu | Struktura | Oznaczenie graficzne | Charakterystyka |
|---|---|--|---|
| <p>Tyrystor diodowy jednokierunkowy, dynistor</p> <p>Unidirectional diode thyristor, Shockley diode</p> |  |  |  |
| <p>Tyrystor diodowy dwukierunkowy, diak</p> <p>Bidirectional diode thyristor, Diac</p> |  |  |  |
| <p>Fototyrystor diodowy blokujący wstecznie</p> <p>Light activated switch (LAS)</p> |  |  |  |
| <p>Tyrystor triodowy jednokierunkowy</p> <p>Semiconductor controlled rectifier (SCR)</p> |  |  |  |
| <p>Tyrystor triodowy dwukierunkowy, triak</p> <p>Bidirectional triode thyristor, Triac</p> |  |  |  |
| <p>Tyrystor triodowy wyłączany bramką, trigistor</p> <p>Gate controlled switch (GCS)</p> | |  |  |

Niezawodna praca tyrystora oraz jego parametry elektryczne zależą od konstrukcji i technologii produkcji. Tyrystor powinien charakteryzować się:

- małymi stratami mocy przy maksymalnej gęstości prądu,
- dużym napięciem zaporowym i małym prądem upływu,
- dużą odpornością na wibracje i wstrząsy,
- małym czasem przełączania,
- szerokim zakresem temperatury pracy.

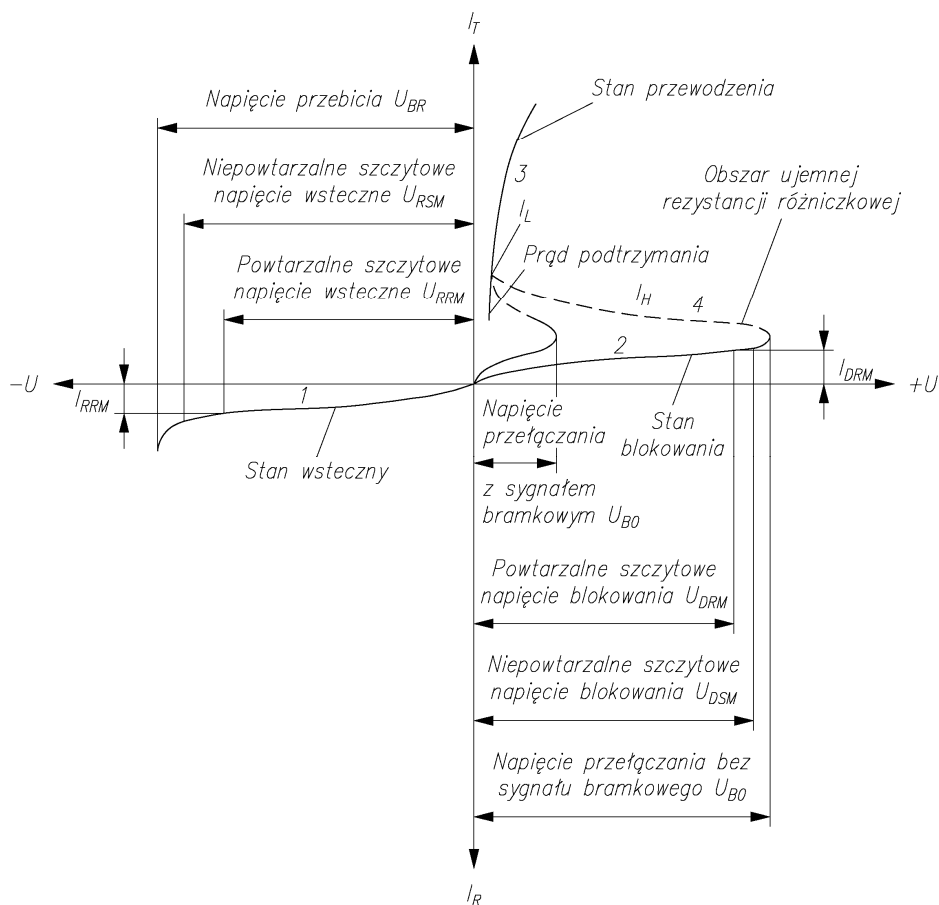
4. Działanie tyrystora i jego właściwości

Tyrystor jest nazywany prostownikiem sterowanym, ze względu na podobieństwa do diody. Jest to element czterowarstwowy o strukturze $p-n-p-n$ posiadający trzy elektrody: anodę, katodę i bramkę. Rysunek 4.1 przedstawia graficzny symbol tyrystora, jego strukturę czterowarstwową oraz zastępczy układ diodowy.



Rys. 4.1. Tyrystor triodowy jednokierunkowy
a – symbol graficzny,
b – struktura czterowarstwowa,
c – diodowy układ zastępczy

Tyrystor podczas pracy może znajdować się w trzech możliwych stanach: stan blokowania, stan przewodzenia oraz stan zaporowy. Wymienione stany pracy można przedstawić w postaci charakterystyki napięciowo-prądowej.



Rys. 4.2. Charakterystyka napięciowo-prądowa tyrystora

Stan blokowania występuje, w momencie nieprzewodzenia tyrystora, gdy potencjał katody jest niższy od potencjału anody tego elementu, bez polaryzacji bramki. Wówczas złącza J_1 i J_3 są spolaryzowane w kierunku przewodzenia a złącze J_2 jest w stanie zaporowym, przez tyrystor płynie niewielki prąd upływu. Przebieg napięcia i prądu blokowania obrazuje część charakterystyki oznaczona numerem 2.

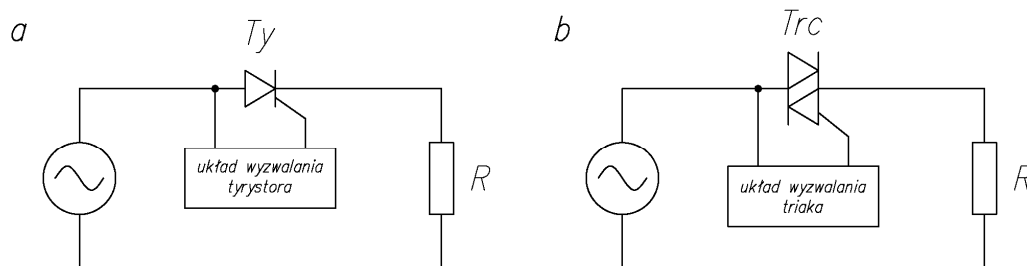
Jeśli w stanie blokowania napięcie między anoda a katodą przekroczy pewna wartość graniczną (napięcie przełączania bez sygnału bramkowego U_{B0}) wtedy tyrystor przejdzie do stanu przewodzenia. Przepływ prądu sterującego przez bramkę spowoduje, że tyrystor przejdzie w stan przewodzenia przy napięciu anoda-katoda (napięcie przełączania z sygnałem bramkowym U_{B0}) niższym od napięcia przełączania bez sygnału bramkowego U_{B0} . Przy wystarczająco dużym prądzie bramki tyrystor zachowa się jak dioda prostownicza. Po załączeniu tyrystora napięcie anoda-katoda spada do bardzo niskiego poziomu około 1V. W stanie przewodzenia prąd płynący przez tyrystor jest ograniczony tylko przez zewnętrzną impedancję obwodu w którym jest pracuje. Stan przewodzenia na charakterystyce napięciowo-prądowej jest oznaczony numerem 3. Przejście w stan przewodzenia ze stanu blokowania przedstawia odcinek charakterystyki oznaczony numerem 4, przy czym dla krzywej o numerze 2 przejście zachodzi bez udziału prądu bramki.

W stanie zaporowym potencjał katody jest wyższy od potencjału anody tyrystora. Złącza J_1 i J_3 są wówczas spolaryzowane zaporowo i przez tyrystor płynie jedynie niewielki prąd wsteczny.

Tyrystor może się znajdować w jednym z dwóch stabilnych i odwracalnych stanów pracy. Zmiana ze stanu blokowania do stanu przewodzenia jest nazwana załączeniem tyrystora, może być osiągnięta przez zwiększenia napięcia U_{B0} . Jednak bardziej praktyczną metodą jest załączanie tyrystora za pomocą prądu bramkowego. Jeśli napięcie anoda-katoda jest mniejsze od wartości U_{B0} , wówczas tyrystor może być załączony poprzez podanie dodatniego napięcia między bramkę a katodę. Taka metoda nosi nazwę sterowania bramkowego. Należy pamiętać, że po załączeniu tyrystora, sterowanie bramką nie wpływa na jego działanie. Metodą wyłączenia tyrystora jest zmniejszenie prądu anoda-katoda poniżej wartości prądu podtrzymania bądź podanie ujemnego napięcia na anodę tyrystora (stan zaporowy). Uwaga: klasyczny tyrystor nie może zostać wyłączony za pomocą sterowania bramkowego. Wyjątek stanowi tyrystor wyłączany bramką GCS.

5. Sposoby wyzwalania i sterowania tyrystorów

Rysunek 5.1 przedstawia układy sterowania prądu przemiennego z użyciem tyrystora i triaka, które pełnią funkcję elementów regulujących w sposób ciągły energię elektryczną do odbiornika. Regulacja mocy odbywa się na zmianie wartości skutecznej napięcia i prądu przy stałej wartości skutecznej napięcia zasilania.



Rys.5.1. Metoda sterowania prądu przemiennego z użyciem tyrystora i triaka

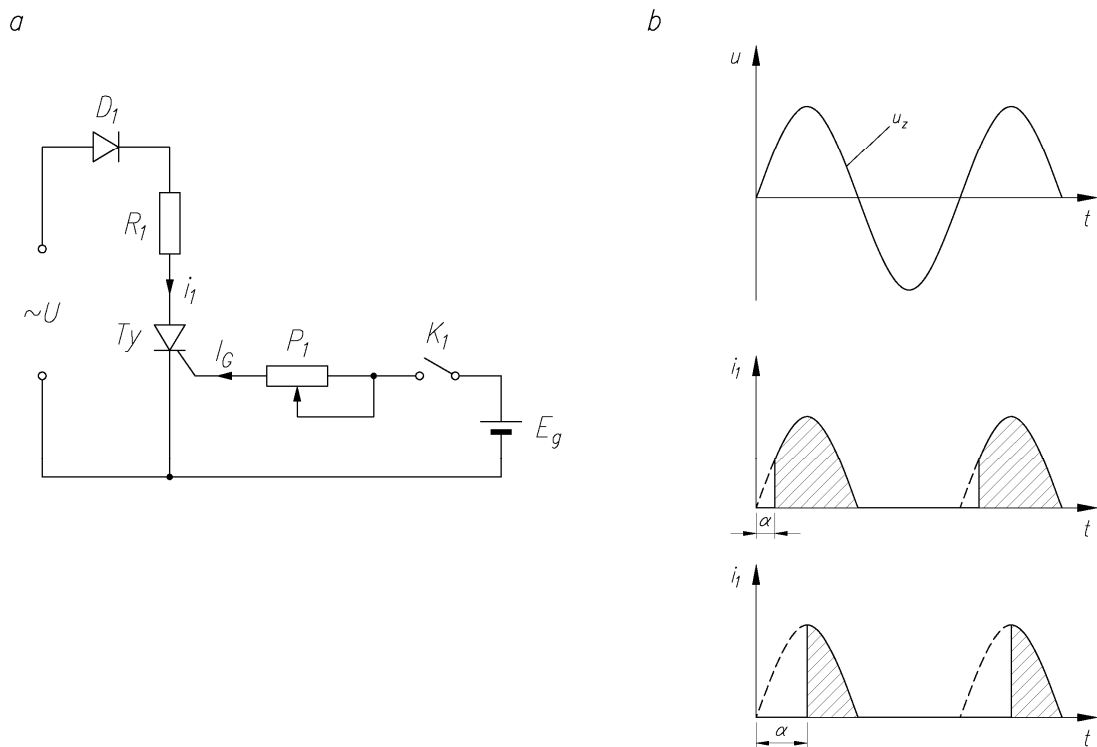
Praca tyrystora bądź triaka charakteryzuje się dwoma stanami – przewodzenia i zaporowym, które mogą być wyzwalane impulsami bramkowymi synchronizowanymi z napięciem zasilającym. Wówczas układ wykorzystuje regulację fazową (regulowane opóźnienie załączenia elementu półprzewodnikowego względem momentu przejścia przez zero napięcia zasilania) lub regulację grupową (rozłączenie w momencie przejścia przez zero napięcia zasilania lecz z opóźnianiem okresów). Dodatkowo istnieje możliwość załączania wymienionych elementów półprzewodnikowych wartością prądu bramki. Sterowanie fazowe umożliwia regulację wartości skutecznej prądu i napięcia na odbiorniku w każdym okresie napięcia zasilania, natomiast sterowanie grupowe w wybranym interwale czasu.

W praktyce występują trzy najczęściej stosowane metody wyzwalania tyrystora:

- napięciem stałym,
- napięciem przemiennym,
- za pomocą impulsu.

Wyzwalanie napięciem stałym

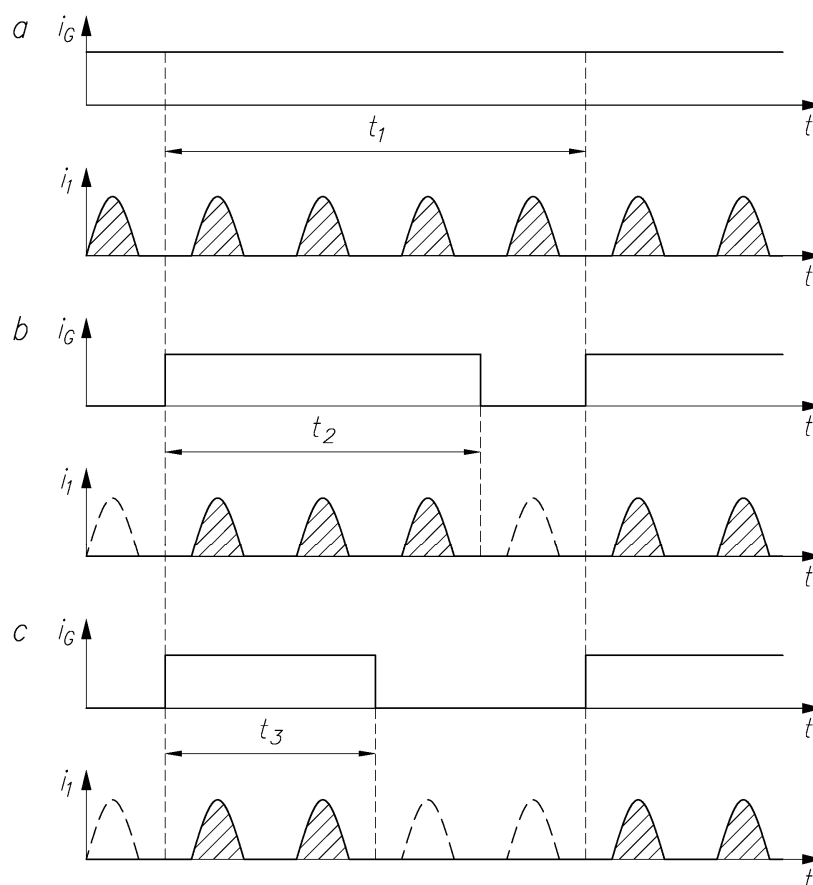
Wyzwalanie napięciem stałym jest często stosowane w obwodach zabezpieczenia, układach automatyki przekaźnikowej i sygnalizacji. Polega ono na stopniowym zwiększaniu napięcia i prądu sterowania aż do osiągnięcia wartości prądu przełączającego bramki I_{GT} i napięcia przełączającego bramki U_{GT} , które zmieniają się wraz ze zmianą napięcia anodowego. Powyższe zjawisko można wykorzystać do budowy układu umożliwiającego regulację mocy obciążenia w zakresie 50%÷100% przy prostowaniu jednopółkowym. Wartość 100% mocy obciążenia jest rozumiana jako wartość mocy odbiornika przy bezpośrednim jego podłączeniu do źródła zasilania.



Rys. 5.2. Układ wyzwalania napięciem stałym, a – schemat układu, b – przebiegi napięcia sieci i prądu obciążenia przy zmianie kąta włączania α

Rysunek 5.2 przedstawia uproszczony układ wyzwalania napięciem stałym. Obwód anodowy jest zasilany napięciem zmiennym, co umożliwia włączanie i wyłączenie oraz regulację prądu obciążenia prądem bramki. Włączenie do obwodu obciążenia diody D_1 ogranicza prąd wsteczny tyrystora. Za regulację prądu bramki odpowiada potencjometr P_1 , zmniejszanie jego oporności powoduje wzrost prądu sterowania i przy wartości $I_G < I_{GT}$ następuje włączenie tyrystora w momencie, gdy napięcie sieci osiągnie swoją szczytową dodatnią wartość (kąt włączania $\alpha=90^\circ$ patrz rysunek 5.2). Dalsze zmniejszanie oporności potencjometru P_1 zwiększa prąd sterowania, co objawia się włączeniem tyrystora przy coraz mniejszych wartościach napięcia anodowego i mniejszych kątach włączania α . W przypadku, gdy prąd bramki osiągnie wartość I_{GT} , wówczas tyrystor włączy się przy napięciu anodowym nie przekraczającym 2,5V, dla którego kąt włączania α jest praktycznie równy zero. W tym stanie na obciążeniu wydzielą się maksymalna moc, która odpowiada w 100% wartości mocy przy prostowaniu jednopółkowym.

Jeśli wyłącznik K_1 będzie zamykać i rozwierać obwód bramki dla warunku $I_G=I_{GT}$, spowoduje to włączanie i wyłączenie prądu obciążenia prądem bramki. Przepływ prądu obciążenia bądź jego zanik może odbywać się z opóźnieniem równym połowie okresu napięcia zmiennego od chwili zamknięcia lub rozwarcia K_1 . Interpretacja graficzna powyższego sposobu została pokazana na rysunku 5.3 i określona jest mianem sterowania grupowego. Polega ona tym, że w wybranym powtarzalnym interwale czasu tyrystor przewodzi określoną liczbę półoków prądu okresu napięcia zasilającego z sieci. Wyzwalanie tyrystora odbywa się zawsze w zerze napięcia sieciowego, układ taki wymaga detekcji zmiany kierunku napięcia.



Rys. 5.3. Przebiegi czasowe prądu bramki i prądu przepływającego przez tyrystor przy regulacji grupowej

W przypadku sterowania grupowego, wartość mocy dostarczanej do odbiornika jest łatwa do określenia, ponieważ jest proporcjonalna do czasu trwania przewodzenia lub liczby przewodzonych okresów.

$$P = P_{zn} \cdot \frac{t_2}{t_1} = P_{zn} \cdot \frac{n}{N} \quad (5.1)$$

gdzie:

P_{zn} – moc znamionowa odbiornika,

t_1 – czas powtarzalny,

t_2 – czas przewodzenia okresów,

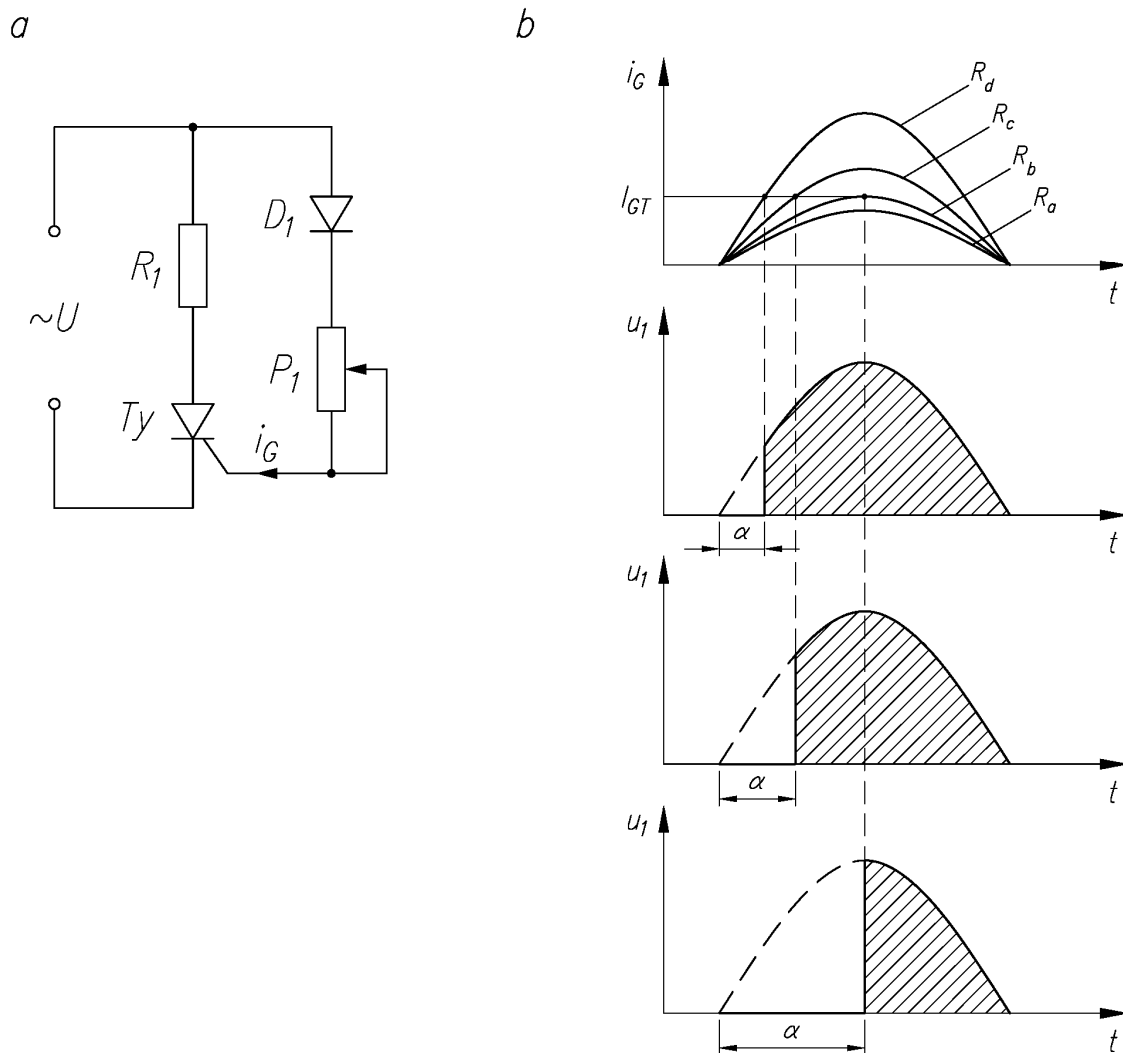
N – ustalona liczba okresów,

n – liczba przewodzonych okresów.

Metoda wyzwalania napięciem stałym ma zastosowanie w układach małej mocy, w urządzeniach, dla których czas włączania nie odgrywa większej roli. Zaletą jej jest prostota układu, natomiast wadami są duża moc źródła sterowania, galwaniczne połączenie obwodu sterowania z obwodem mocy, wymagana znajomość parametrów obwodu bramki każdego użytego tyrystora oraz znaczny wzrost mocy strat w strukturze $p-n-p-n$ tyrystora przy napięciu wstecznym i dodatnim wysterowaniu bramki.

Układ wyzwalania napięciem zmiennym

Układ przedstawiony na rysunku 5.4 przedstawia najprostszy sposób wyzwalania napięciem zmiennym z możliwością regulacji kąta włączania od 0° do 90° , co odpowiada zmianie mocy w zakresie $100\% \div 50\%$ wartości maksymalnej przy prostowaniu jednopółkwowym. Kąt przewodzenia tyrystora jest rozumiany jako kąt fazowy pomiędzy momentem zapłonu a wyłączeniem tyrystora, jest to różnica wartości kąta odpowiadającego pełnemu półkresowi (180°) i kąta zapłonu.



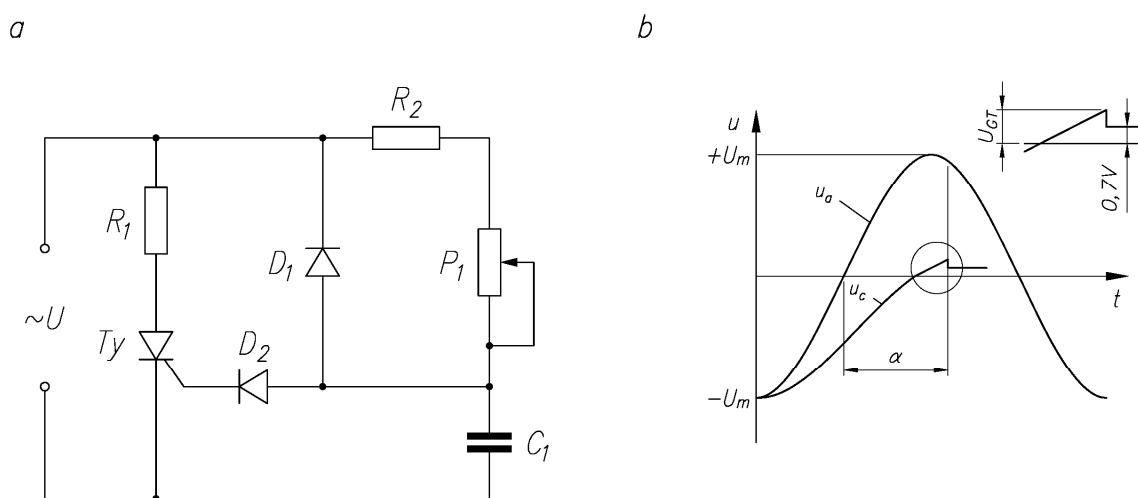
Rys. 5.4. Układ wyzwalania napięciem zmiennym, a – schemat układu, b – przebiegi ilustrujące działanie wymienionego układu wyzwalania

Działanie układu jest następujące: prąd bramki i_G jest pobierany od napięcia zasilającego $\sim U$. Potencjometr P_1 służy do ustalania wartości tego prądu. Dioda D_1 włączona w szereg z potencjometrem P_1 zapobiega pojawieniu się napięcia wstecznego między katodą a bramką tyrystora w okresie ujemnego napięcia sieci. Przy oporności potencjometru równej R_a prąd bramki nie osiąga jeszcze poziomu I_{GT} , nie jest więc w stanie wyzwolić tyrystora. Zmniejszając oporność potencjometru P_1 do wartości R_b , prąd bramki osiąga wartość I_{GT} przy amplitudzie napięcia zasilającego ($\alpha=90^\circ$) powodując włączenie tyrystora. Regulując oporność potencjometru P_1 w zakresie od R_b do R_d można zmieniać kąt włączania α w zakresie od kilkunastu stopni do 90° . Tego typu układ teoretycznie daje możliwość

wyzwalania w zakresie $0 \div 90^\circ$ i jest stosowany do statycznego przełączania. Możliwości regulacji fazy nie wykorzystuje się ze względu na dużą zależność temperaturową, ograniczony zakres regulacji oraz konieczność doboru oporności potencjometru do każdego egzemplarza tyrystora.

Układ wyzwalania napięciem zmiennym z zastosowaniem elementów RC

Zastosowanie prostego obwodu RC i dwóch diod w obwodzie wyzwalania jak ma schemat na rysunku 1.3 umożliwi uzyskanie opóźnienia kąta włączania α w pełnym zakresie $0 \div 180^\circ$. Zasada regulacji polega na opóźnieniu przepływu prądu bramkowego $0 \div 180^\circ$ w stosunku do zera przebiegu dodatniego napięcia anodowego. Opóźnienie realizuje się przez zmianę stałej czasowej obwodu RC.



Rys. 5.5. Układ wyzwalania napięciem zmiennym z zastosowaniem elementów RC, a – schemat układu, b – przebiegi czasowe napięcia na zaciskach anoda-katoda tyrystora i na kondensatorze C_1

Działanie układu ilustrują przebiegi przedstawione na rysunku 5.5b. Kondensator C_1 jest ładowany okresowo przez diodę D_1 do wartości ujemnej amplitudy napięcia U_m , następnie rozładowywany przez potencjometr P_1 do wartości $+U_{GT}$. Zmieniając wartość potencjometru P_1 można uzyskać różne czasy rozładowania pojemności C_1 , czyli różne kąta włączania α . Ponieważ obwód sterowania jest zasilany z sieci przez rezystor R_2 , to pojemność kondensatora powinna być dobrana tak, aby jej prąd rozładowania był większy od prądu sterowania I_{GT} przy największym kącie włączania α_0 . Wartość elementów RC można wyznaczyć z zależności:

$$U_C = U_{GT} + \Delta U_{D2} \quad (5.2)$$

$$R = \frac{\sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \alpha_2 - (U_{GT} + \Delta U_{D2})}{I_{GT}} \quad (5.3)$$

$$C = \frac{0,65}{f \cdot R} \quad (5.4)$$

gdzie:

U_{D2} – spadek napięcia na diodzie D_2 ,

α_2 – największa wartość kąta włączania.

Dioda D_2 zabezpiecza złącze bramka-katoda tyrystora przed przebicciem w okresie ujemnego napięcia sieci. W trakcie trwania tego okresu pełne napięcie wsteczne zostaje odłożone na wspomnianej diodzie. Zaletą rozpatrywanego układu jest prostota rozwiązania przy szerokim zakresie regulacji kąta włączania α . Wadą jest konieczność ponownego doboru elementów RC przy zmianie tyrystora oraz mniejsza, ale ciągle jeszcze znaczna, zależność temperaturowa.

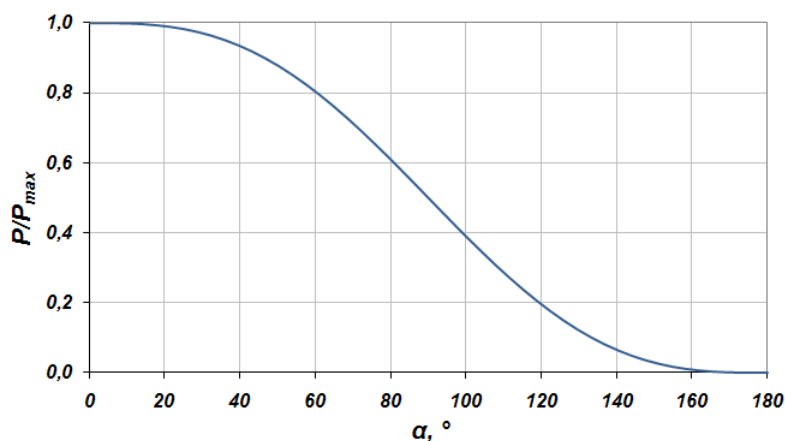
Układy wyzwiania napięciem przemiennym opisane powyżej realizują funkcję sterowania fazowego, które polega na powtarzalnym wprowadzaniu tyrystora w stan przewodzenia w każdej połowie napięcia przebiegu sinusoidalnego.

Ilość energii wydzielanej na odbiorniku R_l zależy od kąta włączania α tyrystora. Dla wyżej wymienionych układów wyzwiania napięciem zmiennym wartość mocy traconej na odbiorniku wynosi:

$$P = \int_{t_1}^{\frac{T}{2}} \frac{1}{T} \cdot \frac{U_m^2 \cdot \sin^2\left(\frac{2 \cdot \pi}{T} \cdot t_1\right)}{R_l} dt \quad (5.5)$$

$$P = \frac{U_m^2}{4 \cdot R_l} - \frac{U_m^2}{2 \cdot R_l \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\pi}{T} \cdot t_1 - 0,25 \cdot \sin\left(\frac{4 \cdot \pi}{T} \cdot t_1\right) \right) \quad (5.6)$$

Możliwości regulacyjne przy sterowaniu fazowym tyrystora ilustruje rysunek 5.6. Najwyższa wrażliwość regulacji występuje w zakresie kątów włączania tyrystora od 40° do 140° . Zmiana powyższego kąta w przedziałach od 0° do 40° i 140° do 180° nie powoduje większych zmian wartości mocy na odbiorniku.



Rys. 5.6. Względna zmiana mocy na odbiorniku od kąta włączania tyrystora

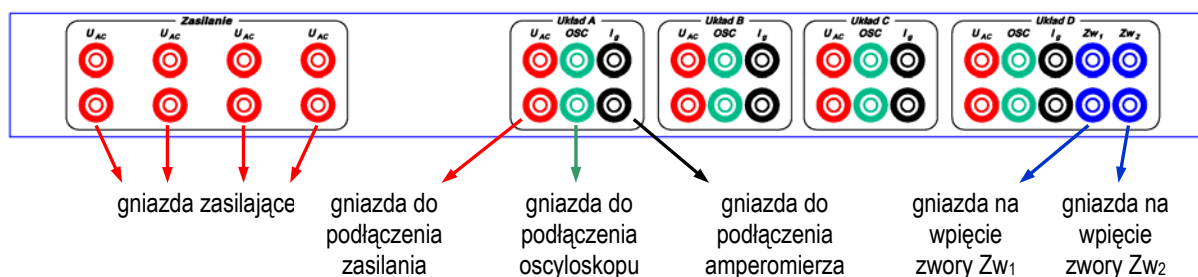
6. Instrukcja do przeprowadzenia ćwiczenia laboratoryjnego

Celem ćwiczenia laboratoryjnego jest zapoznanie się z zasadą działania półprzewodnikowych przyrządów mocy. W skład makiety wchodzi cztery indywidualne układy, które pozwalają na przeanalizowanie różnej konfiguracji pracy tyrystora i triaka. Dodatkowo makieta wyposażona jest w źródło napięcia przemiennego 24 V o mocy 100 VA oraz w sztuczne obciążenie w postaci żarówek 24 V o mocy 3 W.



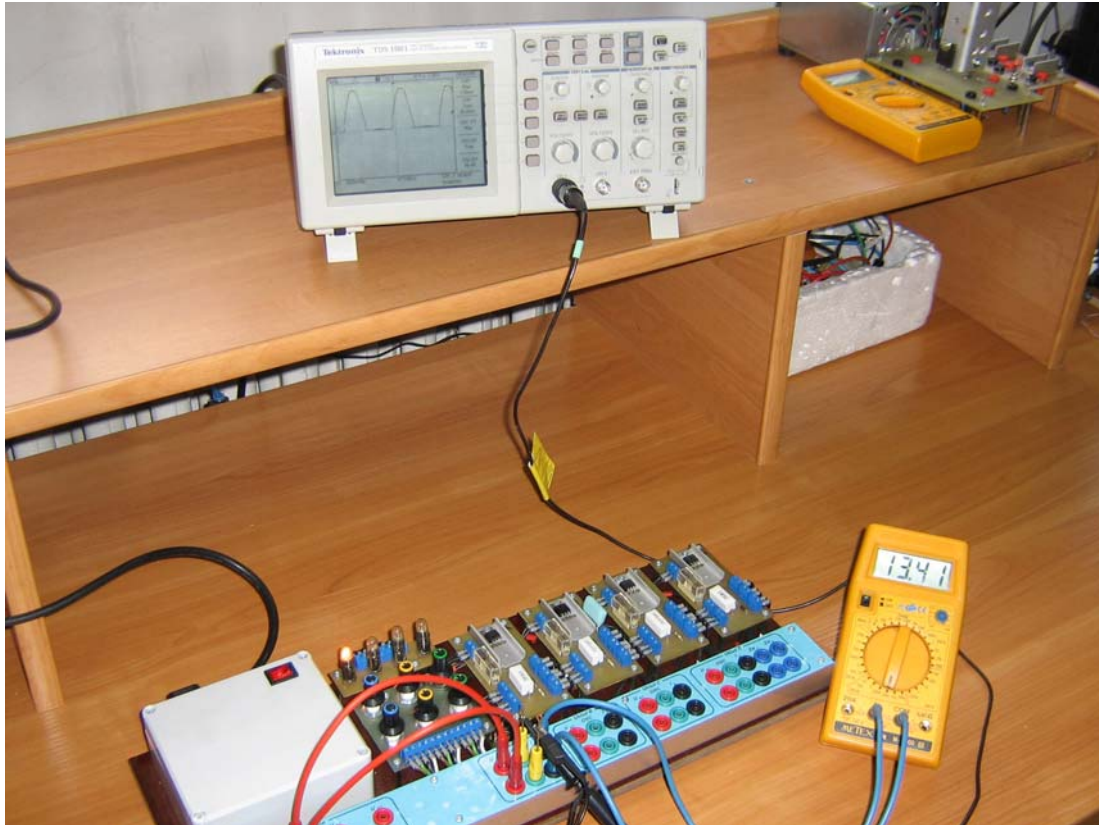
Rys. 6.1. Widok makiety dydaktycznej z tyrystorami i triakami

Na rysunku 6.2 pokazano rozmieszczenie gniazd przyłączeniowych. Zostały one podzielone na sekcje odpowiadające kolejno poszczególnym badanym układom A – D. Każda sekcja zawiera trzy pary gniazd, oznaczone innymi kolorami – gniazda do podłączenia zasilania są czerwone, gniazda do podłączenia oscyloskopu są szmaragdowe, gniazda do podłączenia amperomierza są czarne. Dodatkowo układ D posiada dwie pary gniazd koloru niebieskiego, do których wpina się zworę w zależności od konfiguracji pracy danego układu. Z lewej strony znajdują się gniazda zasilające o napięciu skutecznym równym 24 V, które są koloru czerwonego (cztery pary gniazd). **OSTRZEŻENIE: zabrania się zwierania ze sobą gniazd zasilających z górnego i dolnego rzędu. Niezastosowanie się do powyższego ostrzeżenia grozi uszkodzeniem źródła zasilania oraz poparzeniem osób wykonujących ćwiczenie laboratoryjne.**



Rys.6.2. Opis wyprowadzeń gniazd makiety dydaktycznej

Widok stanowiska laboratoryjnego z makietą laboratoryjną i przyrządami pomiarowymi przedstawiono na rysunku 6.3. W celu dokonania pomiarów pracy wybranych układów niezbędne jest użycie oscyloskopu oraz amperomierza prądu przemiennego. Oscyloskop umożliwi graficzne zobrazowanie zmienności napięcia w czasie na obciążeniu w badanych układach. Użycie amperomierza pozwala na wyznaczenie wartości skutecznej prądu bramki tyrystora bądź triaka w zależności od badanego układu.



Rys. 6.3. Makieta dydaktyczna z podłączonym układem pomiarowym

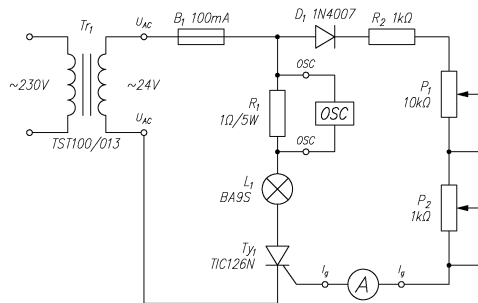
Do regulacji wartości prądu bramki w układach A, B i C służą potencjometry obrotowe, które znajdują się na oddzielnym module obok modułów z badanymi układami. Na rysunku 6.4 pokazano rozmieszczenie potencjometrów regulacyjnych, służących do zgrubnego i dokładnego ustalania prądu bramki w układach badanych A, B i C.



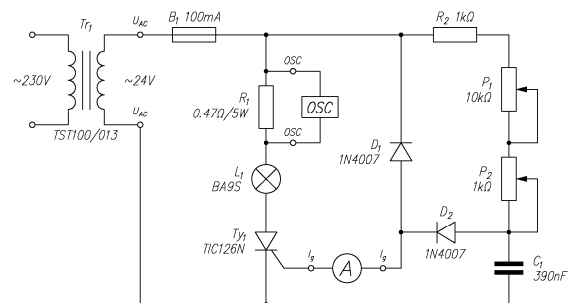
Rys. 6.4. Moduł z potencjometrami do regulacji zgrubnej i dokładnej prądu bramki

Program ćwiczenia laboratoryjnego składa się z przebadania kolejno układów A, B, C i D, znajdujących się na makiecie dydaktycznej. W tym celu należy poprawnie podłączyć oscyloskop i amperomierz w odpowiednio dedykowane gniazda na makiecie. Kolejnym etapem jest ustawienie poprawnych zakresów pomiarowych na przyrządach pomiarowych. Ostatnią czynnością jest podłączenie badanego układu do źródła zasilania. Rysunek 6.5 przedstawia schematy ideowe poszczególnych badanych układów.

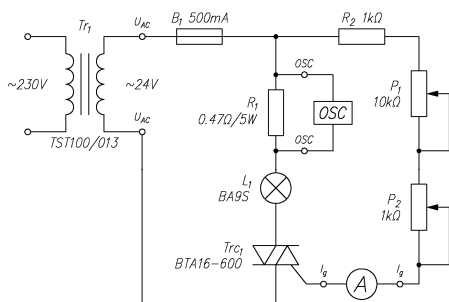
a) układ A



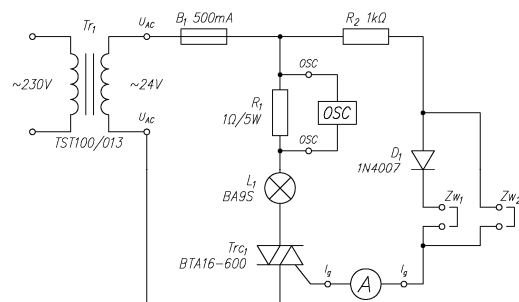
b) układ B



c) układ C



d) układ D

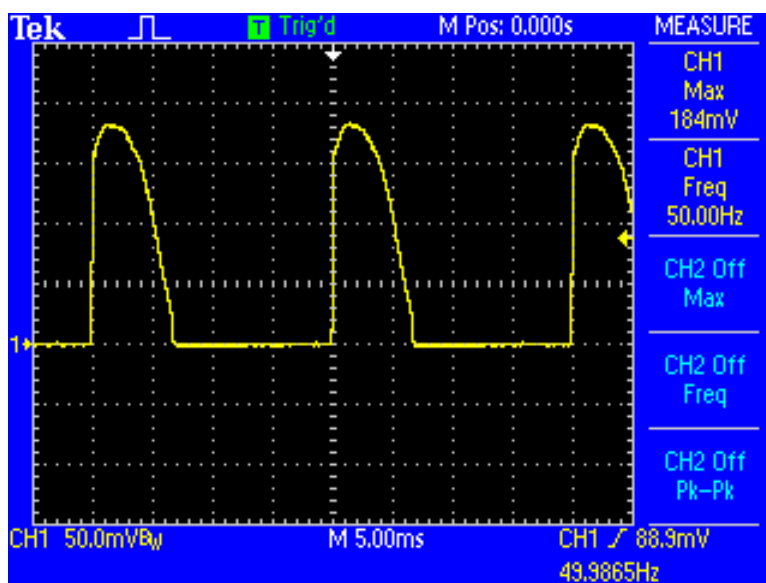


Rys. 6.5. Schematy ideowe badanych układów

W celu wykonania poprawnego pomiaru badanego sygnału napięciowego za pomocą oscyloskopu należy zastosować się do poniższych zaleceń:

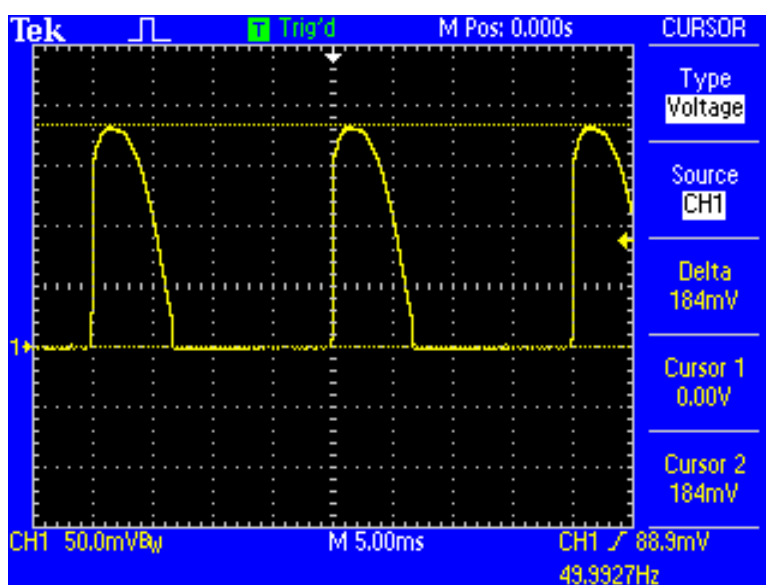
- w pierwszej kolejności powinno się poprawnie podłączyć sondę pomiarową do dedykowanych gniazd na makiecie dydaktycznej i do wybranego kanału oscyloskopu CH 1 – kanał nr 1 bądź CH 2 – kanał nr 2, sprawdzić czy sonda ma włączone tłumienie **10X**, przełącznik na bocznej stronie sondy,
- przycisnąć **CH1 MENU** lub **CH 2 MENU** w zależności od wybranego kanału i ustawić **Probe** na wartość **10X**,
- przycisnąć klawisz **AUTO SET** na przednim panelu oscyloskopu,
- odpowiednio zestroić wyświetlony przebieg na wyświetlaczu LCD oscyloskopu – regulując pokrętkami **VOLTS/DIV** i **SEC/DIV** oraz **POSITION**,
- wybrać klawisz **ACQUIRE**, następnie klawisz odpowiadający funkcji **Average** oraz klawisz poniżej (**Averages**), naciskając go wielokrotnie wybrać wartość **64**,
- klawisz **MEASURE** umożliwia pomiar wybranych pięciu wartości, do modyfikacji tych wartości służą klawisze przy wyświetlaczu LCD,

Obraz ekranu oscyloskopu zawierający przykładowy przebieg czasowy sygnału badanego przedstawiono na rysunku 6.6. Sygnał był mierzony sondą, która była podpięta do kanału oscyloskopu oznaczonego jako CH 1. Z prawej strony ekranu znajdują się mierzone wartości jak wartość maksymalna sygnału i jego częstotliwość.

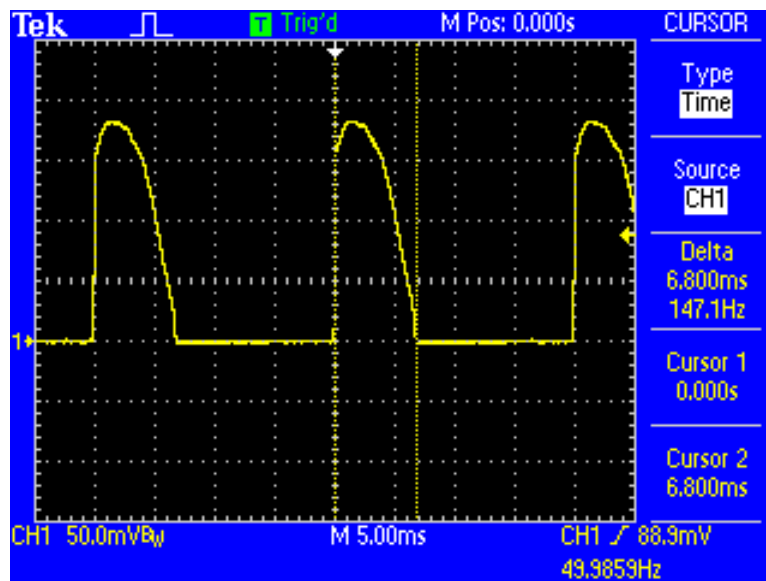


Rys. 6.6. Obraz ekranu oscyloskopu z przykładowym przebiegiem czasowym badanego sygnału

Dokonanie pomiaru wartości napięcia bądź czasu między dwoma dowolnymi punktami badanego sygnału jest możliwe poprzez naciśnięcie klawisza **CURSOR**. Wówczas należy określić czy pomiar ma być dokonany dla czasu **Time** bądź napięcia **Voltage** – służy do tego klawisz przy funkcji **Type**. Dodatkowo trzeba określić dla którego przebiegu ma być dokonany pomiar, czy pochodzącego z kanału CH 1 czy CH 2 – funkcja poniżej **Source**. Przesuwanie znaczników kursorów jest możliwe za pomocą pokręteł **POSITION** z świecąca na zieloną kontrolką **CURSOR 1** oraz **CURSOR 2**.



Rys. 6.7. Pomiar wartości napięcia w wybranych punktach sygnału za pomocą kursorów



Rys. 6.8. Pomiar czasu między wybranymi punktami sygnału za pomocą kursorów

Rysunki 6.7-8 przedstawiają przykładowe obrazy ekranu oscyloskopu z pomiarem wybranych wielkości napięcia i czasu między dwoma punktami badanego sygnału. Odległość między kursorami jest wyświetlana jako wartość parametru **Delta** w prawej części ekranu.

6. Zadania do wykonania

1. Wykonać serię pomiarów prądu bramki, czasu włączania tyrystora lub triaka (czas pomiędzy początkiem półokresu napięcia sieciowego a momentem załączenia tyrystora lub triaka) oraz wartości szczytowej napięcia na rezystorze R_I dla badanych układów A, B i C.
2. Wyznaczyć kąt włączania tyrystora bądź triaka w zależności od badanego układu według poniższego równania:

$$\alpha_1 = \frac{t_1}{T} \cdot 360^\circ \quad (6.1)$$

gdzie:

α_1 – kąt włączania,

t_1 – czas włączania,

T – okres sygnału napięciowego.

4. Obliczyć moc traconą na rezystorze R_I stosując wzór z równania 5.6.
5. Wyznaczyć charakterystyki $P=f(\alpha)$ oraz $P=f(I_g)$ dla układów A, B i C.
6. Dla układu D zaobserwować działanie triaka dla następujących konfiguracji:
 - a. bez założonych zwor Z_{W1} i Z_{W2} ,
 - b. z założoną zworą Z_{W1}
 - c. z założoną zworą Z_{W2} .
8. Skomentować zaobserwowane przebiegi napięć na obciążeniach w wybranych układach oraz wyciągnąć wnioski z uzyskanych wyników.

7. Pytania kontrolne

1. Rodzaje przełączających elementów półprzewodnikowych o strukturze czterowarstwowej oraz ich oznaczenia graficzne.
2. Czym się różni tyrystor od diody?
3. Jaka jest różnica między tyrystorem a triakiem?
4. Co rozumie się pod pojęciem regulacji fazowej i grupowej?
5. Co oznacza kąt włączania i kąt przewodzenia tyrystora?
6. Wymienić stany pracy tyrystora.
7. Czy jest możliwe zbudowanie zamiennika triaka z tyrystorów?
8. Narysować charakterystykę prądowo-napięciową tyrystora.

8. Literatura

- [1] B. Bany, W. Tęсны, "Diody i tyrystory mocy", Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1988
- [2] F. Rajchert, A. Sitnik, J. Stępień, "Tyrystory i ich zastosowania", Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980

Autorzy instrukcji – mgr inż. Maciej Grabowski, dr inż. Artur Jędrusyna