



## PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

# Ćwiczenie B2

## Łączenie kluczy półprzewodnikowych

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Łukasz Starzak, Adam Olszewski, Jerzy Powierza

Łódź 2012



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia .....</b>	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
<b>C Doświadczenie .....</b>	<b>7</b>
2. Pomiary .....	7
2.1. Tranzystory IGBT w połączeniu równoległym.....	7
Układ pomiarowy .....	7
Przygotowanie układu .....	8
Pomiar próbny .....	9
Obserwacja stanów dynamicznych .....	9
Zakończenie.....	10
2.2. Tyrystory SCR w połączeniu szeregowym .....	11
Układ pomiarowy .....	11
Przygotowanie układu .....	12
Pomiar próbny .....	12
Obserwacja stanów dynamicznych .....	13
Zakończenie.....	13
<b>D Wyniki .....</b>	<b>15</b>
3. Opracowanie i analiza wyników .....	15
3.1. Współpraca równoległa .....	15
3.2. Współpraca szeregową .....	16
<b>E Informacje .....</b>	<b>17</b>
4. Literatura .....	17



# B

## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

Celem ćwiczenia jest doświadczalne zbadanie problemów, jakie wiążą się z równoległym i szeregowym łączeniem kluczy półprzewodnikowych. Zostały one opisane w literaturze [1, 2, 5]. Należy zwrócić uwagę na mniej korzystne właściwości tranzystora IGBT pod względem łączenia równoległego. Z tego powodu został on wybrany jako obiekt badań doświadczalnych. Możliwości łączenia równoległego różnych przyrządów półprzewodnikowych mocy są zbliżone. Z tego powodu obiektem badań będą tyrystory. Wybór ten pozwoli zaobserwować różnicę między przeciążeniami doświadczanymi przez przyrządy sterowalne oraz półsterowalne.

Rozważane zagadnienia w odniesieniu do stanów statycznych (blokowania w przypadku połączenia szeregowego, przewodzenia w przypadku połączenia równoległego) są łatwo zrozumiałe. Dlatego w niniejszym ćwiczeniu analizie zostaną poddane wyłącznie stany dynamiczne (przełączanie).

Minimalizacja negatywnych zjawisk dynamicznych wymaga zazwyczaj precyzyjnych działań w obwodach sterowania. Doświadczalne badanie skuteczności takich działań jest niemożliwe w układzie laboratoryjnym, który w celu umożliwienia prowadzenia bezpiecznych pomiarów musi posiadać nieoptymalną konstrukcję. W związku z tym w niniejszym ćwiczeniu ograniczymy się jedynie do obserwacji występujących problemów oraz zbadamy tylko jeden, mało wymagający (pod względem precyzji) sposób ich minimalizacji. Pełny opis środków zaradczych wraz ze wskazówkami praktycznymi można znaleźć w literaturze [1, 2, 5].



## 2. Pomiary

---

### 2.1. Tranzystory IGBT w połączeniu równoległym

#### Układ pomiarowy

Układ laboratoryjny, którego schemat przedstawia rys. 1, zawiera dwa tranzystory IGBT IRG4BC20U połączone równolegle. Wewnątrz układu znajduje się opornik obciążający  $R_L = 10 \Omega$ . W szereg z kolektorem każdego tranzystora włączony jest już opornik  $0,47 \Omega$ , dzięki czemu uzyskana zostaje symetria rozplywu prądów w stanie ustalonym przewodzenia. Różnice obserwowane w układzie wynikać więc będą wyłącznie z procesów przejściowych zachodzących podczas przełączania.

Oba tranzystory są sterowane z jednego sterownika bramki za pośrednictwem oporników  $R_{G1}$  i  $R_{G2}$ . W celu uniknięcia przegrzania tranzystora, jest on sterowany pojedynczymi impulsami przełączającymi, załączającymi i po krótkiej chwili wyłączającymi tranzystor. Czas trwania impulsów wynosi kilkadziesiąt mikrosekund, zaś ich amplituda jest w przybliżeniu równa napięciu zasilania obwodu sterowania  $U_{GG}$ .

W związku z powyższym po każdej zmianie nastaw konieczne jest wygenerowanie impulsu przełączającego. Dotyczy to również sytuacji, gdy nastawy zostały zmienione tylko na urządzeniach pomiarowych (oscylskopie, sondzie prądowej). Dopiero po wygenerowaniu nowego impulsu oscylskop zarejestruje przebiegi przy nowych ustawieniach i zmiana ustawień odniesie jakikolwiek skutek. Do tego czasu, nawet jeżeli wydaje się, że przebiegi zostały np. powiększone w poziomie (zmiana podstawy czasu na mniejszą), nie jest to prawdą. W pamięci oscylskopu nadal będą znajdować się dane zarejestrowane przy poprzednich nastawach; jedynie punkty zostaną rzadziej rozłożone na ekranie.

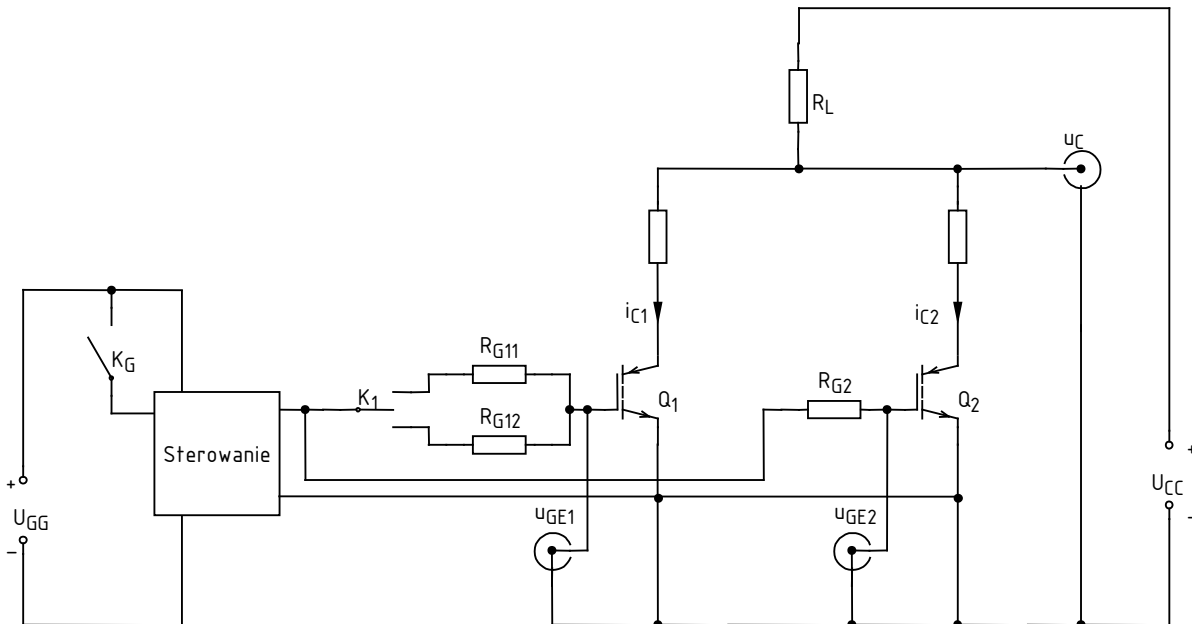
Opornik  $R_{G1}$  posiada wartość zmienną, wybieraną przełącznikiem na panelu, przy czym:

- $R_{G2} = R_{G11}$ ,
- $R_{G2} > R_{G12}$ .

W ten sposób możliwe jest uzyskanie zbliżonych lub znacząco różnych obwodów sterowania obu tranzystorów. W związku z występującą różnicą napięć bramka-źródło, w gnieździe BNC  $V_{trig}$  dostępny jest sygnał bezpośrednio z wyjścia generatora impulsów. Pozwala on uzyskać wyzwalenie

oscylskopu zawsze w tym samym momencie (względem sygnału sterującego bramkami) – co jest w niniejszym ćwiczeniu niezwykle istotne.

Pomiaru napięć bramka-źródło  $u_{GE1}$  i napięcia kolektor-emiter  $u_{CE}$  dokonuje się przez przyłączenie sondy napięciowej do wyprowadzeń z gniazd BNC opisanych na panelu jako  $V_{G1}$ ,  $V_{G2}$  i  $V_C$ , gdzie przewód niebieski lub ekran to wspólny potencjał emiterów. Pomiaru prądów kolektorów dokonuje się poprzez zapięcie sondy prądowej na jednym z dwóch przewodów wyprowadzonych nad panel, opisanych jako  $i_{C1}$  i  $i_{C2}$ .



Rys. 1. Schemat układu klucza dolnego z równoległym połączeniem tranzystorów IGBT

### Przygotowanie układu

1. Zasilanie obwodu mocy  $U_{CC}$  doprowadzić z jednej sekcji regulowanej wyłączonego zasilacza o minimum 2 sekcjach regulowanych. Zasilanie obwodu sterowania  $U_{GG}$  doprowadzić z osobnego zasilacza. Wszystkie pokręta zasilaczy skrócić do zera. Ustawić zasilacze w tryb niezależnej pracy sekcji (*independent*).
2. Włączyć komputer. Po zakończeniu logowania włączyć oscylskop i skonfigurować połączenie z komputerem zgodnie z instrukcją dostępną na stanowisku.
3. Do kanałów 1 i 2 oscylskopu przyłączyć sondy napięciowe o tłumieniu 10:1. Sondę z kanału 1 przyłączyć do wyprowadzeń z gniazda  $V_{G1}$ , zaś sondę z kanału 2 –  $V_C$ . Zwrócić uwagę na przyłączenie mas obu sond do tego samego potencjału (nie znaczy to, że do tego samego wyprowadzenia); w przeciwnym razie nastąpi zwarcie układu przez oscylskop, co może doprowadzić do uszkodzenia jego obwodów wejściowych. Do kanału 3 oscylskopu doprowadzić bezpośrednio napięcie z gniazda  $V_{trig}$ .

Zgłosić układ prowadzącemu do sprawdzenia. W tym czasie należy wykonać dalsze punkty do 5 włącznie.

4. Skonfigurować oscylskop:
  - CH1 Menu, Coupling: DC, Probe: 10X, Invert: Off;
  - CH2 Menu – jak wyżej;
  - CH3 Menu – jak wyżej, oprócz Probe: 1X;
  - CH4 Menu – jak wyżej, oprócz Probe: 1X;
  - wzmocnienie kanałów 1 i 3 (pokręta Volts/Div) dostosowane do obserwacji przebiegów o amplitudzie 15 V, zaś kanału 2 – 60 V;



- Trigger Menu, Edge, Slope: Rising, Source: CH3, Mode: Normal, Coupling: DC;
- poziom wyzwalania (pokrętło Trigger Level) na około połowę napięcia  $U_{GG} = 15 \text{ V}$ ;
- podstawa czasu (pokrętło Sec/Div) dostosowania do obserwacji przebiegu przełączania tranzystora o czasie trwania podanym wyżej.

Wyświetlić przebieg z kanału 3, ukryć pozostałe (wciskanie przycisku Menu powoduje naprzemienne wyświetlanie i ukrywanie przebiegu z danego kanału).

5. Wybrać rezystancję bramkową  $R_{G11}$ .

**Przed wykonaniem kolejnych punktów poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący.**

6. Włączyć zasilacz obwodu sterowania. Nieco zwiększyć próg ograniczenia prądowego, co powinno spowodować zgaśnięcie czerwonej kontrolki. Ustawić napięcie  $U_{GG} = 15 \text{ V}$  obserwując wskazanie amperomierza – jeżeli przekracza ono  $100 \text{ mA}$ , należy sprowadzić napięcie do zera i ponownie sprawdzić układ; nie należy zwiększać ograniczenia prądowego przy niezerowym napięciu.

### Pomiar próbny

7. Wygenerować impuls przełączający wciskając przycisk na panelu układu. Na oscyloskopie powinien pojawić się komunikat „Trig'd” nad podziałką oraz powinien pojawić się aktualny obraz przebiegu prostokątnego napięcia sterującego. Jeżeli komunikat nie pojawia się, sprawdzić ustawienia wyzwalania (Trigger Menu, Trigger Level).
8. Jeżeli prostokątny impuls nie jest dobrze widoczny, dostosować podstawę czasu, położenie chwili wyzwalania (Horizontal Position – strzałka nad podziałką – nie powinna nigdy znajdować się na samym brzegu podziałki) wzmocnienie, położenie poziomego zera (Vertical Position – strzałka na lewo od podziałki – nie powinna nigdy znajdować się na samym brzegu podziałki).
9. Włączyć zasilacz obwodu mocy. Nieco zwiększyć próg ograniczenia prądowego, co powinno spowodować zgaśnięcie czerwonej kontrolki. Ustawić napięcie  $U_{CC} = 60 \text{ V}$  obserwując wskazanie amperomierza – jeżeli przekracza ono  $50 \text{ mA}$ , należy sprowadzić napięcie do zera i ponownie sprawdzić układ; nie należy zwiększać ograniczenia prądowego przy niezerowym napięciu. W przypadku poprawnej pracy układu, zwiększyć próg ograniczenia prądowego do maksimum.
10. Ukryć przebieg z kanału 3, wyświetlić z kanału 1 i 2. W razie potrzeby dostosować nastawy dla tych kanałów. Szpilki na przebiegu  $u_{CE}$  nie są istotne w niniejszym ćwiczeniu.
11. Włączyć i skonfigurować wzmacniacz sondy prądowej zgodnie z instrukcją dostępną na stanowisku. W odpowiednim momencie wyjście wzmacniacza przyłączyć do kanału 4 oscyloskopu; zwrócić uwagę na uwagi dotyczące współpracy z oscyloskopem podane w instrukcji do sondy. Przed rozmagnesowaniem sondy ustawić wzmocnienie  $1 \text{ A/dz}$ . Sondę zapiąć na przewodzie  $i_{C1}$  zgodnie ze strzałkami na panelu i na korpusie sondy.
12. Wyświetlić przebieg z kanału 4. Nie zmieniać ustawionego wcześniej wzmocnienia w torze pomiaru prądu, nawet jeżeli przebieg nie wypełnia maksymalnie ekranu; w razie wątpliwości skonsultować nastawy z prowadzącym.

### Obserwacja stanów dynamicznych

13. Zarejestrować przebiegi podczas załączania tranzystorów:
  - a) Zmienić podstawę czasu i położenie chwili wyzwalania tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg załączania tranzystorów (nie jakiegokolwiek innego stanu pracy) na odcinku od początku impulsu sterującego do ustalenia się przebiegów w obwodzie głównym. Nie zmieniać jednak wzmocnienia w torze pomiaru prądu. Upewnić się, że wyzwalanie następuje stabilnie zawsze w tym samym momencie – przebiegi nie przesuwają się w poziomie po kolejnym wciśnięciu przycisku na panelu. W przeciwnym razie zmienić poziom wyzwalania.

- b) Przełożyć sondę napięciową (wystarczy końcówka gorąca) tak, aby mierzyć przebieg  $u_{GE2}$ . Upewnić się, że nastawiona podstawa czasu i położenie chwili wyzwalania pozwalają zaobserwować również ten przebieg na odpowiednim odcinku; w przeciwnym razie odpowiednio zmienić te nastawy.
  - c) Przełożyć sondę napięciową z powrotem tak, aby mierzyć przebieg  $u_{GE1}$ .
  - d) W programie WaveStar for Oscilloscopes utworzyć nowy arkusz typu YT Sheet i przeciągnąć do niego przebiegi  $u_{CE}$ ,  $u_{GE1}$ ,  $i_{C1}$  (odpowiednie kanały z panelu bocznego). Nie zapisywać arkusza i nie zmieniać żadnych ustawień oscyloskopu.
  - e) Przełożyć sondę napięciową (łącznie z masą) i prądową tak, aby mierzyć przebiegi  $u_{GE2}$  i  $i_{C2}$ . Nie odświeżając arkusza YT Sheet, przeciągnąć ponownie odpowiednie kanały z panelu bocznego w celu dodania przebiegów  $u_{GE2}$  i  $i_{C2}$ , ewentualnie zmieniając kolory dla łatwiejszej identyfikacji.
  - f) Zapisać arkusz. Zanotować, które numery przebiegów dotyczą tranzystora  $Q_1$ , a które –  $Q_2$ .
14. Zarejestrować przebiegi podczas wyłączania tranzystorów:
- a) Zbocze wyzwalające zmienić na opadające (Trigger Menu, Slope). W razie potrzeby dostosować podstawę czasu, położenie chwili wyzwalania i poziom wyzwalania tak, aby z maksymalną dokładnością (w poziomie i pionie) obserwować wyłączanie tranzystorów na odcinku od początku impulsu sterującego do ustalenia się przebiegów w obwodzie głównym.
  - b) Przełożyć sondę napięciową (wystarczy końcówka gorąca) tak, aby mierzyć przebieg  $u_{GE1}$ . Upewnić się, że nastawiona podstawa czasu i położenie chwili wyzwalania pozwalają zaobserwować również ten przebieg na odpowiednim odcinku; w przeciwnym razie odpowiednio zmienić te nastawy.
  - c) Przełożyć sondę napięciową z powrotem tak, aby mierzyć przebieg  $u_{GE2}$ .
  - d) W programie WaveStar for Oscilloscopes utworzyć nowy arkusz typu YT Sheet i przeciągnąć do niego przebiegi  $u_{CE}$ ,  $u_{GE2}$ ,  $i_{C2}$  (odpowiednie kanały z panelu bocznego). Nie zapisywać arkusza i nie zmieniać żadnych ustawień oscyloskopu.
  - e) Przełożyć sondę napięciową (łącznie z masą) i prądową tak, aby mierzyć przebiegi  $u_{GE1}$  i  $i_{C1}$ . Nie odświeżając arkusza YT Sheet, przeciągnąć ponownie odpowiednie kanały z panelu bocznego w celu dodania przebiegów  $u_{GE1}$  i  $i_{C1}$ , ewentualnie zmieniając kolory dla łatwiejszej identyfikacji (najlepiej przypisując kolory identycznie, jak w pkt. 13).
  - f) Zapisać arkusz. Zanotować, które numery przebiegów dotyczą tranzystora  $Q_1$ , a które –  $Q_2$ .
15. Zarejestrować przebiegi przy asymetrii w obwodzie bramki:
- a) Zmienić rezystancję bramkową na  $R_{G12}$ .
  - b) Zbocze wyzwalające zmienić na narastające (Trigger Menu, Slope).
  - c) Powtórzyć pkt. 13–14, zwracając uwagę na pkt. 13.b) i 14.b).

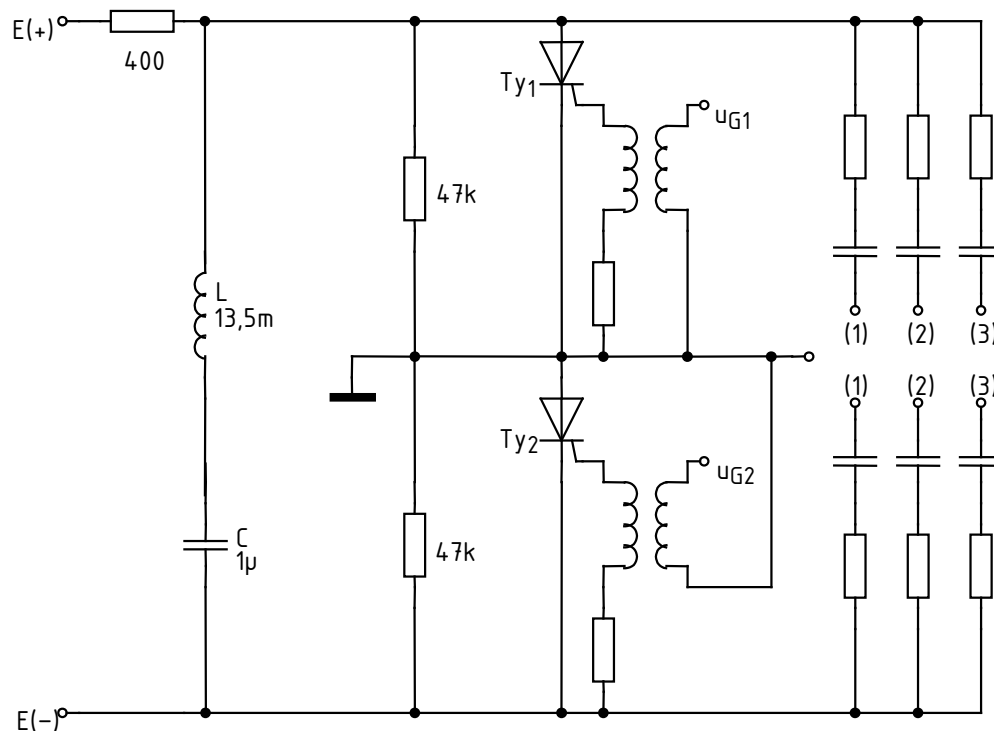
## Zakończenie

16. Skręcić do zera napięcie zasilania obwodu mocy. Poczekać na zgaśnięcie czerwonej kontrolki na panelu układu. Skręcić do zera napięcie zasilania obwodu sterowania. Rozłączyć układ, ale nie odłączać sond od oscyloskopu.

## 2.2. Tyrystory SCR w połączeniu szeregowym

### Układ pomiarowy

Układ laboratoryjny, którego schemat przedstawia rys. 2, zawiera dwa tyrystory SCR połączone szeregowo. Pracują one w układzie przerywacza z równoległą gałęzią rezonansową, którego zasada działania nie jest w niniejszym ćwiczeniu istotna; została ona szczegółowo opisana w [2]. Wewnątrz układu znajduje się gałąź LC, która wprowadza do obwodu oscylacyjny charakter przebiegów. Po załączeniu tyrystorów prąd w układzie ma charakter sinusoidalny. Dzięki temu prąd po pewnym czasie spada do zera i – zgodnie z zasadą działania tyrystorów – następuje ich wyłączenie. Przypomnijmy bowiem, że wyłączenie przyrządu półsterowalnego, jakim jest tyrystor SCR, nie jest możliwe poprzez oddziaływanie od strony elektrody sterującej (bramki).



Rys. 2. Schemat układu laboratoryjnego z szeregowym połączeniem tyrystorów SCR

Równoległe do obwodu anoda-katoda każdego tyrystora włączony jest już opornik o wartości 47 kΩ, dzięki czemu uzyskana zostaje symetria rozkładu napięć w stanie ustalonym blokowania. Różnice obserwowane w układzie wynikać więc będą wyłącznie z procesów przejściowych zachodzących podczas przełączania.

Oba tyrystory są sterowane z jednego sterownika cyfrowego w postaci odpowiednio zaprogramowanego mikrokontrolera. Impulsy sterujące są dostarczane do bramek za pośrednictwem transformatorów, jako że katody tyrystorów znajdują się na różnych potencjałach. Częstotliwość powtarzania impulsów załączających tyrystory wynosi 400 Hz.

Sterownik może generować impulsy sterujące w tym samym momencie dla obu tyrystorów (co uzyskuje się po wciśnięciu przycisku Reset na panelu układu) bądź w różnych momentach. Przesunięcie między impulsami można zwiększyć lub zmniejszyć z krokiem 1 μs za pomocą przycisków +1 i -1. Oprócz tego, tyrystory zostały dobrane tak, aby posiadały znacząco różne parametry własne, między innymi czas załączania oraz ładunek usuwany przy wyłączaniu. W wyniku tego nawet przy zsynchronizowanych impulsach bramkowych obserwowana może być pewna asymetria w przełączaniu. W związku z występującą asymetrią, w gnieździe BNC *Syncho* dostępny jest sygnał synchronizujący, pojawiający się zawsze w tym samym momencie (względem jednego z sygnałów sterujących bramkami).

Pomiaru napięć na tyrystorach dokonuje się przez przyłączenie sond napięciowych do wyprowadzeń z gniazd bananowych, przy czym masy sond muszą być przyłączone do punktu oznaczonego symbolem masy. Pomiaru prądu anody dokonuje się poprzez zapięcie sondy prądowej na jednym z dwóch przewodów wyprowadzonych z lewej strony obudowy.

Dla poprawy warunków pracy tyrystorów w stanach dynamicznych możliwe jest włączenie w obwód, równoległe do tyrystorów, tłumików RC. Dokonuje się tego poprzez zwarcie odpowiedniego gniazda (1, 2, 3) z gniazdem masy za pomocą krótkiego przewodu. Parametry tłumików podano w tab. 1

Tab. 1. Parametry tłumików RC

Numer	R [ $\Omega$ ]	C [nF]
1	330	33
2	82	220
3	100	100

### Przygotowanie układu

1. Upewnić się, że wyłącznik na panelu układu znajduje się w pozycji „wyłączony” (O).
2. Zasilacz obwodu mocy ustawić w tryb szeregowy (*series*). Zewrzeć gniazdo „+” sekcji Slave z gniazdem „-” sekcji Master. Doprowadzić zasilanie z wolnych gniazd „-” i „+” do gniazd „120 V” z tyłu obudowy układu laboratoryjnego. Zasilanie z drugiego zasilacza doprowadzić do gniazd „12 V” z tyłu obudowy układu laboratoryjnego.
3. Sondy napięciowe z kanałów 1 i 2 przyłączyć tak, by mierzyć napięcia anoda-katoda na jednym i drugim tyrystorze. Masy obu sond przyłączyć do punktu oznaczonego symbolem masy. W związku z tym, że napięcie dolnego tranzystora mierzone jest odwrotnie, na odpowiednim kanale oscyloskopu włączyć odwracanie przebiegu (Menu, Invert: On). Wzmocnienia obu kanałów 1 i 2 dostosować do obserwacji przebiegów o amplitudzie 120 V.
4. Do kanału 3 oscyloskopu doprowadzić bezpośrednio napięcie z gniazda *Synchro*. Poziom wyzwalania ustawić na ok. -2,5 V.
5. Sondę prądową rozmagnesować. Zapiąć na dowolnym z dwóch wyprowadzonych przewodów.

**Przed wykonaniem kolejnych punktów poprawność połączeń musi sprawdzić prowadzący.**

6. Lekko zwiększyć próg ograniczenia prądowego wszystkich wykorzystanych sekcji zasilaczy. Obserwując, czy amperomierz nie wykazuje stałego poboru prądu, ustawić 12 V na zasilaczu obwodu sterowania oraz 2×60 V na zasilaczu obwodu mocy (pokrętko Voltage sekcji Master – na sekcji Slave identyczne napięcie powinno ustawić się automatycznie). Jeżeli którykolwiek z zasilaczy wykaże pobór stałego prądu lub załączy się ograniczenie prądowe, należy wyłączyć zasilacze i poprosić o pomoc prowadzącego. W przeciwnym razie należy zwiększyć próg ograniczenia prądowego wszystkich wykorzystanych sekcji zasilaczy (w sumie 3 sekcje) do ok. 1/2 zakresu.

### Pomiar próbny

7. Załączyć zasilanie układu przełącznikiem na panelu. Powinna zaświecić się czerwona kontrolka, zaś zasilacze powinny wykazywać pobór prądu rzędu 0,01 A. Na ekranie powinny pojawić się przebiegi napięć i prądu (przynajmniej fragmenty); w przeciwnym razie należy spróbować zmienić poziom wyzwalania i podstawę czasu.
8. Dostosować nastawy oscyloskopu:
  - a) w oparciu o przebieg prądu, dostosować podstawę czasu i położenie chwili wyzwalania tak, by obserwować pełen cykl przełączania tyrystorów (załączanie, przewodzenie i wyłączanie);
  - b) ustawić położenie zera na tym samym poziomie dla obu napięć, ale nie zmieniać wzmocnień ustawionych wcześniej;

- c) w razie potrzeby dostosować wzmacnienie wzmacniacza sondy prądowej i położenie przebiegu w pionie (sonda może błędnie wykazywać zero prądu na innym poziomie niż zero oscyloskopu – nastawy należy dostosować do obserwowanego przebiegu).
9. Zarejestrować przebiegi  $u_{AK1}$ ,  $u_{AK2}$  i  $i_A$  wykorzystując arkusz typu YT Sheet w programie WaveStar.

### Obserwacja stanów dynamicznych

10. Zmienić podstawę czasu i położenie chwili wyzwalania tak, aby z maksymalną dokładnością obserwować przebieg załączania tyrystorów (nie jakiegokolwiek innego stanu pracy; fakt powolnego narastania prądu wynika z charakteru obciążenia LC, a nie z właściwości tyrystorów, nie powinien więc być uwzględniany przy nastawach). Nie zmieniać jednak wzmacnienia na kanałach wykorzystywanych do pomiaru napięć.
11. Odświeżyć zawartość arkusza YT Sheet przyciskiem Refresh Sheet i zapisać plik.
12. Nie zmieniając żadnych ustawień oprócz (w razie konieczności) położenia chwili wyzwalania (Horizontal Position), zarejestrować przebiegi również dla przesunięć impulsów bramkowych: +1, +5 i -5.
13. Zmienić podstawę czasu i położenie chwili wyzwalania tak, aby obserwować przebieg wyłączania tyrystorów (na odcinku od przejścia opadającego prądu przez zero do przejścia narastającego napięcia przez zero). Zarejestrować przebiegi dla zsynchronizowanych impulsów bramkowych (przycisk Reset) oraz pokazujące, czy przebiegi ulegają zmianie po rozsynchronizowaniu wyzwalania tyrystorów.
14. Powrócić do obserwacji załączania. Ustawić gorszy (z punktu widzenia napięciowego obciążenia tyrystora) z przypadków asymetrii impulsów +5, -5. Włączając po kolei pary tłumików RC równolegle do obu tyrystorów (1-masa i masa-1; 2-masa i masa-2 itd.), wybrać tłumik najbardziej skuteczny. Zanotować jego numer i zarejestrować uzyskane przebiegi.

### Zakończenie

15. Wyłączyć układ przełącznikiem na panelu. Sprowadzić napięcie zasilacza obwodu mocy do zera. Sprowadzić napięcie zasilacza obwodu sterowania do zera. Odłączyć zasilacze od układu. Przetawić zasilacz obwodu mocy w tryb niezależnej pracy sekcji (*independent*). Rozłączyć układ.
16. Na odpowiednim kanale oscyloskopu wyłączyć odwracanie przebiegu (Menu, Invert: Off).



### 3. Opracowanie i analiza wyników

---

#### 3.1. Współpraca równoległa

1. W oparciu o zarejestrowane oscylogramy stwierdzić, czy zastosowane środki wyrównawcze (patrz opis układu w par. 2.1) spełniają swoją rolę.
2. Porównać przebiegi napięcia  $u_{GS}$  obu tranzystorów w przypadku identycznych i różnych rezystancji bramkowych  $R_G$ . Wyjaśnić różnicę w oparciu o znane relacje między rezystancjami bramkowymi (patrz opis układu w par. 2.1) oraz wiedzę o mechanizmie załączania tranzystorów polowych mocy [4].
3. Jaki jest skutek obserwowanej asymetrii w obwodzie sterowania dla prądu kolektora  $i_C$  obu tranzystorów podczas załączania? Który z kluczy zostaje przeciążony: wcześniej czy później przełączany? Na czym polega to przeciążenie i jaką ma wielkość (w procentach wartości prądu w stanie statycznym)? Wyjaśnić obserwacje. Analogiczną analizę przeprowadzić dla stanu wyłączania.

### 3.2. Współpraca szeregową

1. W oparciu o zarejestrowane oscylogramy stwierdzić, czy zastosowane środki wyrównawcze (patrz opis układu w par. 2.2) spełniają swoją rolę.
2. W którym stanie dynamicznym – załączania, wyłączania, czy obu – obserwujemy wpływ desynchronizacji impulsów bramkowych? Wyjaśnić obserwację w oparciu o wiedzę o mechanizmach załączania i wyłączania tyrystora SCR [2, 3].
3. Porównać przebiegi napięcia  $u_{AK}$  obu tyrystorów w przypadku zsynchronizowanych i rozszynchronizowanych impulsów bramkowych. Który z kluczy zostaje przeciążony: wcześniej czy później przełączany? Na czym polega to przeciążenie i jaką ma wielkość (w procentach wartości napięcia w stanie statycznym)? Wyjaśnić obserwacje.
4. Który z tłumików okazał się najbardziej skuteczny? Wyjaśnić ten wynik w oparciu o:
  - założenie, że w uproszczeniu tłumik RC stanowi po prostu obwód spowalniający narastanie napięcia z określoną stałą czasową,
  - wartości elementów podane w tab. 1,
  - analizę zarejestrowanych oscylogramów pod kątem czasu trwania przeciążenia.

Dokładnie rzecz biorąc, działanie tłumików jest bardziej złożone. Zostało ono opisane w literaturze [2] wraz z zagadnieniem doboru wartości elementów.



### 4. Literatura

---

- [1] Napieralski A., Napieralska M.: *Polowe półprzewodnikowe przyrządy dużej mocy*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1995.
- [2] Luciński J.: *Układy tyrystorowe*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1978.
- [3] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 2. Tyrystory*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2009.
- [4] Starzak Ł.: *Laboratorium przyrządów i układów mocy. Ćwiczenie 3<sup>A</sup>. Tranzystor MOSFET*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2009.
- [5] Januszewski S., Świątek H., Zymmer K.: *Półprzewodnikowe przyrządy mocy – właściwości i zastosowania*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 1999.