



## PRZEKSZTAŁTNIKI ELEKTRONICZNE

# Ćwiczenie B1k

## Sterowanie tranzystorów polowych – konstrukcja

Opracowanie ćwiczenia i instrukcji:  
Łukasz Starzak

Łódź 2012



## Spis treści

<b>B Wprowadzenie do ćwiczenia .....</b>	<b>5</b>
1. Cel i przebieg ćwiczenia.....	5
2. Praktyczne układy sterowania .....	7
2.1. Analogowy obwód kondycjonujący przycisku.....	7
2.2. Niesymetryczne sterowanie bramki .....	8
<b>C Doświadczenie .....</b>	<b>9</b>
3. Konstrukcja układu.....	9
3.1. Zestaw konstrukcyjny.....	9
Płytką montażową.....	9
Elementy zamontowane na stałe.....	10
3.2. Montaż .....	13
3.3. Uruchomienie i testowanie .....	14
Konfiguracja układu pomiarowego .....	14
Sprawdzenie ogólnej poprawności działania.....	14
Działanie zaprojektowanego układu sterowania .....	15
Niesymetryczne sterowanie bramki.....	15
Obwód kondycjonujący przycisku .....	15
Zakończenie.....	16
<b>D Wyniki .....</b>	<b>17</b>
4. Opracowanie i analiza wyników .....	17
Odczyt wyników liczbowych.....	17
Weryfikacja wyników i założeń projektu.....	17
Niesymetryczne sterowanie bramki.....	18
Analogowy obwód kondycjonujący przycisku .....	18
<b>E Informacje .....</b>	<b>19</b>
5. Literatura .....	19



# B

## Wprowadzenie do ćwiczenia

---

### 1. Cel i przebieg ćwiczenia

---

Celem niniejszej części ćwiczenia jest konstrukcja układu sterowania dla tranzystora MOSFET mocy oraz doświadczalna weryfikacja założeń i wyników projektu. Przy okazji możliwe będzie zapoznanie się z praktycznym obwodem eliminującym negatywny wpływ drgań styków przycisku na działanie sterowanego układu.



## 2. Praktyczne układy sterowania

---

### 2.1. Analogowy obwód kondycjonujący przycisku

W układach sterowania zazwyczaj występuje interfejs użytkownika, w którym zadania są definiowane i zmieniane najczęściej za pomocą przycisków. W momentach wciskania i zwalniania przycisku występują drgania jego styków powodujące, że klucz kilkakrotnie zamyka się i otwiera zanim znajdzie się w pozycji ustalonej.

W konstruowanym w niniejszym ćwiczeniu układzie przycisk (klucz  $K_1$  na rys. 3) zostanie wykorzystany do realizacji funkcji załączania i wyłączania generatora, dzięki czemu nie chłodzony tranzystor nie przegrzeje się. Z powodów podanych wyżej, przycisk ten wymaga obwodu kondycjonującego. Sprawia on, że wciśnięcie i zwolnienie przycisku spowoduje wygenerowanie czystego przebiegu prostokątnego, bez drgań na początku i końcu, który w pewny sposób uaktywni, a następnie wyłączy generator sterujący bramką tranzystora.

Jednym z typowych rozwiązań analogowych tego problemu jest obwód oparty na układzie scalonym 4093, przedstawiony na rys. 3. Składają się nań następujące elementy.

- Obwód RC (opornik  $R_2$  i kondensator  $C_4$ ) – spowoduje opadanie potencjału na wejściu H układu  $U_1$  w chwili, gdy klucz  $K_1$  zostanie zamknięty (wciśnięcie przycisku), oraz jego narastanie, gdy klucz zostanie otwarty. W ten sposób krótkotrwałe przełączenia między potencjałem masy a potencjałem zasilania, wynikające z drgań styków, zostają wygładzone.
- Dodatkowo opornik  $R_2$  ogranicza prąd pobierany z zasilania w czasie, gdy klucz  $K_1$  jest zamknięty.
- Opornik  $R_1$  tworzy z kolei połączenie wejścia H układu  $U_1$  z potencjałem zasilania (logiczną jedynką) w czasie, gdy klucz  $K_1$  jest zamknięty. Jest to konieczne, bowiem kondensator w stanie ustalonym stanowi rozwarciwie, a więc wejście H byłoby do niczego nie podłączone. Wystąpiłby więc na nim nieznan stan logiczny, co spowodowałoby nieprzewidywalne działanie układu.
- Bramka NAND z przerzutnikiem Schmitta na wejściu (układ scalony  $U_1$  zawiera 4 takie bramki) realizująca funkcję  $M = \sim(G \cdot H)$ . Ponieważ na wejście G jest stale podawana wartość logiczna 1, więc *de facto* układ pełni rolę inwertera,  $M = \sim H$ . Istotna jest tu obecność przerzutnika Schmitta, w którym próg detekcji logicznej jedynki jest wyższy niż próg detekcji logicznego zera. Dzięki temu nawet gdyby w wyniku drgań styków przebieg na wejściu H (wygładzony już przez obwód RC) wykazywał wahania, nie będzie to powodować przełączania bramki. Bowiem po wykryciu wartości 1 potencjał wejścia H musiałby spaść naprawdę znacząco, by bramka potraktowała to jako zmianę stanu na logiczne zero.
- Kondensator  $C_3$  pełni rolę odprzęgającego, tj. chroniącego układ scalony przed oddziaływaniem szybkozmiennych zaburzeń, które mogą rozchodzić się w

ścieżkach zasilania. Ze względu na wysoką częstotliwość, dla zaburzeń takich kondensator (o typowej wartości 100 nF) stanowi mniejszą impedancję niż wejście układu scalonego, więc cała ich energia jest absorbowana przez tenże kondensator, nie zakłócając pracy chronionego układu.

## 2.2. Niesymetryczne sterowanie bramki

Niekiedy optymalna szybkość załączania i optymalna szybkość wyłączenia nie mogą być uzyskane jednocześnie przy tej samej rezystancji bramkowej. W takiej sytuacji można skonstruować układ sterowania niesymetrycznie, tzn. w taki sposób, aby rezystancja bramkowa dla załączania była inna niż dla wyłączenia. Przykład takiego układu przedstawia rys. 1 (uwzględniono na nim pojemności wewnętrzne tranzystora T związane z bramką). Idea jego działania jest następująca.

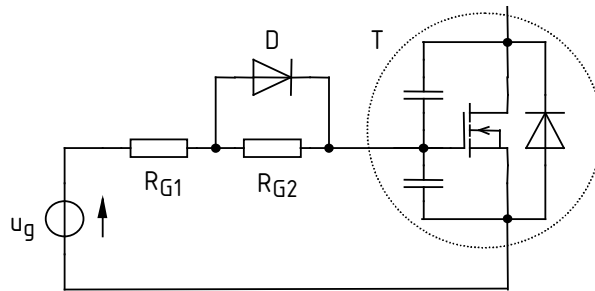
W czasie załączania dioda D przewodzi, zwierając rezystancję  $R_{G2}$ . Przepływ ładunku do bramki opisuje równanie

$$i_G = \frac{dq_G}{dt} = \frac{U_{GG(on)} - U_F - u_{GS}}{R_{G1}}, \quad (1)$$

gdzie  $U_F$  jest spadkiem napięcia na przewodzącej diodzie. Natomiast przy wyłączeniu tranzystora dioda jest spolaryzowana wstecznie, dzięki czemu wsteczny prąd bramki płynie przez obie rezystancje  $R_{G1}$  i  $R_{G2}$ , stąd

$$i_G = \frac{dq_G}{dt} = \frac{U_{GG(off)} - u_{GS}}{R_{G1} + R_{G2}}, \quad (2)$$

Założmy, że początkowo w układzie (symetrycznym) znajdował się tylko opornik  $R_{G1}$ . W takim razie dodanie opornika  $R_{G2}$  i diody spowoduje spowolnienie wyłączenia przy niezmienionej (prawie) szybkości załączania. Oporniki  $R_{G1}$  i  $R_{G2}$  mogą również wynikać z podziału pierwotnego opornika (w układzie symetrycznym)  $R_G$ . Wówczas osiągnęlibyśmy przyspieszenie załączania przy niezmienionej szybkości wyłączenia.



Rys. 1. Przykład obwodu niesymetrycznego sterowania bramki

Aby układ niesymetryczny działał poprawnie, potencjalny spadek napięcia na oporniku  $R_{G2}$  (gdyby w układzie nie było diody) musi być – przy występującym w układzie natężeniu prądu  $i_G$  – większy od napięcia progowego diody  $U_{F(TO)}$ :

$$i_G R_{G2} > U_{F(TO)}, \quad (3)$$

w przeciwnym razie dioda nie załączy się. Oznacza to, że dodatkowa rezystancja  $R_{G2}$  musi mieć odpowiednio dużą wartość. Jest też oczywiste, że dioda musi posiadać czasy załączania i wyłączenia krótsze niż sterowany tranzystor.



### 3. Konstrukcja układu

---

#### 3.1. Zestaw konstrukcyjny

##### Płytki montażowa

Do konstrukcji układu przeznaczona jest uniwersalna płytka montażowa, której wygląd ogólny przedstawia rys. 2a. Płyta zawiera 840 otworów połączonych w następujący sposób (patrz rysunek):

- pola numerowane tworzą pionowe ścieżki, po dwie w każdej kolumnie – jedna ścieżka A–E, druga ścieżka F–J;
- pola oznaczone kolorem czerwonym i niebieskim (przeznaczone domyślnie do prowadzenia zasilania) tworzą po 4 ścieżki u góry i u dołu płyty – osobne czerwona i niebieska w lewej połowie oraz osobne czerwona i niebieska w prawej połowie płyty.

Mocowanie elementów na płytce odbywa się na zasadzie wtykania, zaś połączenia między ścieżkami należy wykonywać za pomocą dostępnych na stanowisku drucików łączeniowych w izolacji.

Oprócz płytki montażowej, w zestawie do realizacji ćwiczenia znajdują się torebki zawierające:

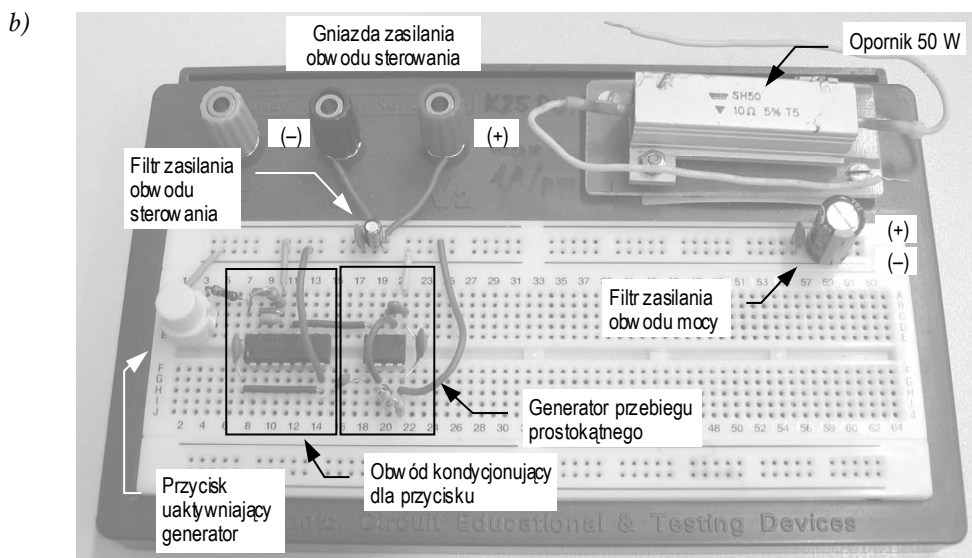
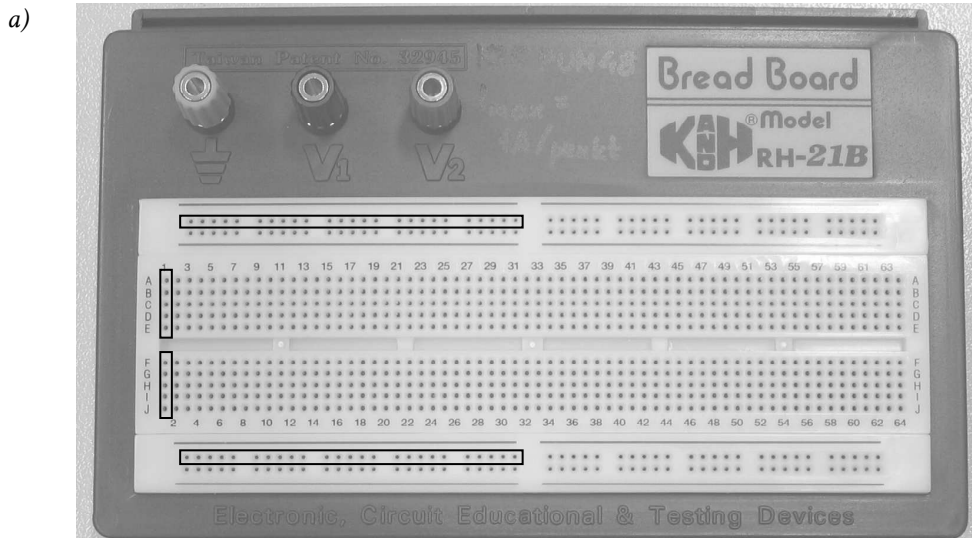
- 1) tranzystory (element T na rys. 3);

**Ze względu na ryzyko przebicia bramki w wyniku wyładowania elektrostatycznego, tranzystory należy przechowywać w torebce antystatycznej. Przed uchwyceniem elementu należy uziemić się np. przez dotknięcie bolca przewodu ochronnego w listwie zasilającej. Tranzystory należy przenosić trzymając je za metalowy radiator wbudowany, połączony elektrycznie z drenem, zaś unikać chwytania za nóżki, szczególnie nóżkę bramki. Podobne środki bezpieczeństwa należy zachować przy manipulacji układami scalonymi.**

- 2) sterowniki bramki ( $U_3$ );
- 3) oporniki o znormalizowanych wartościach znamionowych z przedziału  $10\ \Omega$  –  $1\ k\Omega$ , tolerancji 5% i mocy znamionowej  $0,25\ W$  lub  $0,6\ W$ , z przeznaczeniem na opornik bramkowy ( $R_G$ );

## 4) inne elementy:

- szybką diodę gaszącą z serii MUR ( $D_0$ ) do obwodu mocy,
- kondensatory ( $C_3, C_4, C_8, C_9$ ),
- oporniki do realizacji obwodu kondycjonującego przycisku ( $R_1, R_2$ ),
- szybką diodę małej mocy 1N4148 do realizacji niesymetrycznego obwodu sterowania.



Rys. 2. Płyta montażowa wykorzystywana w ćwiczeniu: a) przebieg ścieżek łączących otwory (zaznaczono po jednej w każdej grupie otworów); b) widok ze zmontowanym generatorem przebiegu prostokątnego i przykładowo częściowo zmontowanym obwodem kondycjonującym przycisku

### Elementy zamontowane na stałe

Dla usprawnienia wykonywania ćwiczenia, elementy standardowe lub badane w innych ćwiczeniach są zamontowane na płytce na stałe i nie należy ich wymontowywać po wykonaniu ćwiczenia. Dotyczy to również połączeń wykonanych wokół tych elementów, np. układu  $U_2$ . Płytkę z wmontowanymi elementami przedstawia rys. 2b.

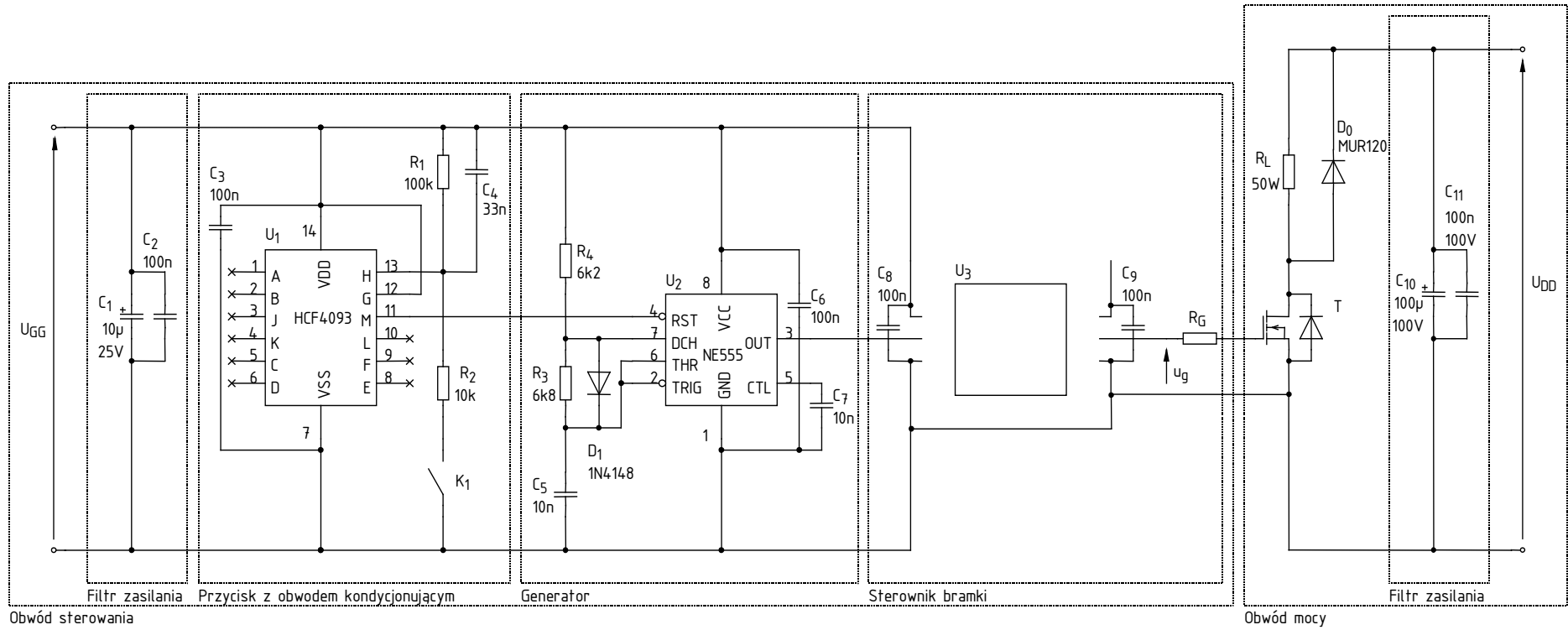
Generator przebiegu prostokątnego oparty jest o układ scalony 555 ( $U_2$  na rys. 3). Aktywowany jest on poziomem wysokim (1) na wejściu RST, zaś generowany przebieg prostokątny dostępny jest na wyjściu OUT. Częstotliwość i współczynnik wypełnienia przebiegu wynikają z wartości  $R_3, R_4$  i  $C_5$ , a także (co niekorzystne) z napięcia progowego diody  $D_1$ . Wynikowy przebieg ma parametry

zgodne z podanymi w projektowej części ćwiczenia, tj. częstotliwość  $f = 100$  kHz i współczynnik wypełnienia  $D = 0,2$ . Taki współczynnik wypełnienia pozwala na znaczące zmniejszenie prądu skutecznego w stosunku do jego amplitudy. Dzięki temu nie ulegnie przegrzaniu tranzystor, jak również nie zostaną uszkodzone ścieżki płytki posiadające dość niską obciążalność 1 A. Kondensator  $C_6$  pełni rolę analogiczną do  $C_3$  opisanego w par. 2.1, zaś kondensator  $C_7$  pełni analogiczną rolę w stosunku do napięcia odniesienia wytwarzanego wewnątrz układu  $U_2$ .

Na płycie umieszczony jest również przycisk  $K_1$ , którego nie należy przemieszczać ze względu na dużą średnicę nóżek powodującą stopniowe niszczenie otworów montażowych. W lewej części płytki umieszczony jest również układ scalony  $U_1$ .

Na wejściu zasilania obwodu sterowania znajduje się filtr pojemnościowy, którego zadaniem jest zapobieganie wahaniom napięcia zasilającego  $U_{GG}$  (realizowane przez kondensator elektrolityczny  $C_1$ ) oraz tłumienie szybkodziennych zaburzeń będących skutkiem przełączania tranzystora  $T_1$  i wyjść układów scalonych (kondensator ceramiczny  $C_2$ ). Tę samą rolę w obwodzie mocy (napięcie zasilające  $U_{DD}$ ) pełnią kondensatory  $C_{10}$  i  $C_{11}$ . Kondensatory  $C_1$  i  $C_2$  połączone są z gniazdami bananowymi  $V_1$  i  $V_2$ , których należy użyć do przyłączenia zasilania  $U_{GG}$ . Natomiast do przyłączenia zasilania  $U_{DD}$  służą przewody z wtykami bananowymi z jednej strony i wtykami do otworów płytki z drugiej.

W górnej części płyty zamontowane są oporniki mocy o wartości  $10 \Omega$  (dolny) oraz  $10 \Omega$  lub  $4,7 \Omega$  (górny). Należy je wykorzystać jako odbiornik  $R_L$  w sposób pozwalający uzyskać zadany prąd przewodzenia przy danym napięciu zasilania.



Rys. 3. Układ klucza dolnego z praktycznym obwodem sterowania

### 3.2. Montaż

Na płytce należy zmontować układ zgodnie ze schematem z rys. 3, wybierając odpowiednio:

- 1) tranzystor T – zadany w założeniach projektu,
- 2) sterownik  $U_3$  – zadany w założeniach projektu,
- 3) opornik bramkowy  $R_G$  – zgodnie z wynikami projektu.

Sprawdzić, czy moc dopuszczalna opornika  $R_G$  (patrz par. 3.1) jest odpowiednia w stosunku do mocy strat obliczonej w toku projektowania. Zanotować rezystancję  $R_G$  użytego ostatecznie opornika.

Rys. 3 przedstawia jedynie ogólny zarys połączeń wokół układu scalonego – sterownika bramki. Należy je zrealizować zgodnie z opisem końcówek i schematem typowych połączeń podanymi w karcie katalogowej tego układu. Niektóre sterowniki nie posiadają osobnych końcówek zasilania wyjścia, w związku z czym kondensator  $C_9$  jest zbędny.

Aby kondensatory odprzegające spełniły swoje zadanie, należy je montować jak najbliżej odpowiednich nóżek układów scalonych.

Do wtykania wyprowadzeń w otwory montażowe należy używać dostępnych na stanowisku szczypiec.

### 3.3. Uruchomienie i testowanie

#### Konfiguracja układu pomiarowego

1. Do układu doprowadzić zasilanie  $U_{GG}$  i  $U_{DD}$  z dwóch sekcji regulowanych wyłączonego zasilacza. Wszystkie pokręta zasilacza skrócić do zera. Ustawić zasilacz w tryb niezależnej pracy sekcji (*independent*).

Zgłosić układ prowadzącemu do sprawdzenia. W tym czasie należy wykonać dalsze punkty do 4 włącznie.

2. Włączyć komputer. Po zakończeniu logowania włączyć oscyloskop i skonfigurować połączenie z komputerem zgodnie z instrukcją dostępną na stanowisku.
3. Do obu kanałów oscyloskopu przyłączyć sondy napięciowe o tłumieniu 10:1, które należy wybrać przełącznikiem 1X/10X na korpusie sondy. W ścieżkę masy w bloku sterowania (na płycie) włączyć jeden koniec dodatkowego drucika, a do drugiego przyłączyć masy sond w sposób zapewniający, że nie zostaną one zwarte z innymi punktami podczas pomiarów.
4. Skonfigurować oscyloskop:
  - CH1 Menu, Coupling: DC, Probe: Voltage 10X, Invert: Off;
  - CH2 Menu – jak wyżej;
  - Trig Menu, Type: Edge, Source: CH1, Slope: Rising, Mode: Auto, Coupling: DC;
  - poziom wyzwalań (pokrętko Trigger Level) na około połowę napięcia  $U_{GG}$  ustalonego w toku projektowania;
  - podstawa czasu (pokrętko Sec/Div) dostosowania do obserwacji przebiegu o parametrach podanych w par. 3.1;
  - wzmocnienie kanałów 1 i 2 (pokrętko Volts/Div) dostosowane do obserwacji przebiegów o amplitudzie  $U_{GG}$ .

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

#### Sprawdzenie ogólnej poprawności działania

5. Włączyć zasilacz. Nieco zwiększyć próg ograniczenia prądowego, co powinno spowodować zgaśnięcie czerwonej kontrolki. Ustawić napięcie  $U_{GG}$  ustalone w toku projektowania obserwując wskazanie amperomierza – jeżeli przekracza ono 100 mA, należy sprowadzić napięcie do zera i ponownie sprawdzić układ; nie należy zwiększać ograniczenia prądowego przy niezerowym napięciu.
6. Sondą z kanału 1 zbadać potencjał końcówki RST układu  $U_2$ . Sprawdzić, czy po wciśnięciu przycisku potencjał zmienia się z logicznego 0 na 1. Jeżeli nie, sprawdzić ustawienia oscyloskopu (podstawa czasu, wzmocnienie, poziom wyzwalań) oraz połączenia obwodu kondycjonującego.
7. Sondą z kanału 1 zbadać potencjał końcówki OUT układu  $U_2$ . Sprawdzić, czy po wciśnięciu przycisku pojawia się stabilny przebieg prostokątny o spodziewanych parametrach. Jeżeli nie, sprawdzić ustawienia oscyloskopu (podstawa czasu, wzmocnienie, poziom wyzwalań) oraz połączenia w obwodzie generatora.
8. Sondą z kanału 1 zbadać potencjał na wyjściu sterownika  $U_3$ . Sprawdzić, czy po wciśnięciu przycisku pojawia się stabilny przebieg prostokątny. Jeżeli nie, sprawdzić połączenia. Sprawdzić, czy analogiczny przebieg (spowolniony przez pojemność wejściową tranzystora) pojawia się na nóżce bramki tranzystora. Jeżeli nie, sprawdzić połączenia.
9. Upewnić się, że żadne przewody nie dotykają metalowej obudowy oporników mocy ani metalowego radiatora tranzystora. W przeciwnym razie nastąpi stopienie izolacji w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury.

10. Na zasilaczu ustawić napięcie  $U_{DD}$  w sposób analogiczny jak w pkt. 5. Jeżeli ograniczenie prądowe nie włączyło się, zwiększyć je do maksimum. Obliczyć spodziewany średni prąd pobierany z zasilania  $U_{DD}$  przy podanym w par. 3.1 współczynniku wypełnienia. Wcisnąć na krótko przycisk i stwierdzić, czy wskazanie amperomierza zasilacza zgadza się z przewidywaniami. Jeżeli nie, sprawdzić połączenia obwodu mocy.

### Działanie zaprojektowanego układu sterowania

11. W celu zatrzymania przebiegów na ekranie po zwolnieniu przycisku, przełączyć oscyloskop w tryb normalnego wyzwalań (Trig Menu, Mode: Normal). Wyłączyć zasilacz. Drucik wraz z masami przełożyć do kolumny, w którą włączone jest źródło tranzystora. Na kanale 1 mierzyć napięcie  $u_{GS}$ , na kanale 2 napięcie  $u_g$  (wykorzystać fakt, że te same potencjały występują również na końcówkach sąsiednich elementów, np. oporniku  $R_G$ ). Włączyć zasilacz.
12. Dostosować podstawę czasu, położenie chwili wyzwalań (Horizontal Position, strzałka nad podziałką – nie powinna nigdy znajdować się na samym brzegu podziałki) wzmocnienie, położenie poziomu zera (Vertical Position – strzałka na lewo od podziałki – nie powinna nigdy znajdować się na samym brzegu podziałki) tak, aby obserwować w maksymalnym powiększeniu załączanie tranzystora. Dla ułatwienia późniejszych odczytów poziomy zera powinny znajdować się na pełnej działce lub przynajmniej na drobnej podziałce. Ponieważ natura obu przebiegów pozwala jednoznacznie określić który jest który, mogą być one nałożone na siebie, co zwiększy dokładność odczytów w pionie.
13. Zarejestrować przebiegi dla załączania w formie graficznej (Get Screen).
14. Przenieść drucik masy wraz z masami sond blisko ujemnej końcówki kondensatora  $C_{10}$  (w tę samą linię co ta końcówka). Ponownie zarejestrować przebiegi.
15. Przenieść drucik masy ponownie do kolumny źródła tranzystora. Przełączyć się na wyłączanie przez zmianę zbocza wyzwalań na opadające (Trig Menu, Slope: Falling), dostosować nastawy oscyloskopu i ponownie zarejestrować przebiegi.
16. Wyłączyć zasilacz. Przełożyć sondę z kanału 2 tak, by mierzyć napięcie  $u_{DS}$ . Włączyć zasilacz. Dostosować nastawy oscyloskopu. Zarejestrować przebiegi dla wyłączania i załączania tak, by możliwe było późniejsze odczytanie czasów  $t_f$  i  $t_r$ .

### Niesymetryczne sterowanie bramki

17. Zmodyfikować obwód sterowania tak, by uzyskać niesymetryczne sterowanie bramki (par. 2.2), z niezmiennym czasem opadania  $t_f$ , ale dwukrotnie mniejszym czasem narastania  $t_r$ . Wartości oporników dobrać doświadczalnie. Wszelkich zmian elementów należy dokonywać przy wyłączonym zasilaczu. Zanotować schemat połączeń oporników i diody oraz zanotować uch parametry.

### Obwód kondycjonujący przycisku

18. Drucik wraz z masami przełożyć na powrót do bloku sterowania. Zbadać działanie obwodu kondycjonującego przycisku: zarejestrować napięcie na kluczu  $K_1$  wraz z potencjałem końcówki H układu  $U_1$  oraz potencjał końcówki H wraz z potencjałem końcówki M. Przebiegi powiększyć i przesunąć tak, aby obserwować tylko przedział czasu bezpośrednio po wciśnięciu przycisku; wybrać odpowiednie zbocze wyzwalań (Trig Menu, Slope) oraz poziom wyzwalań (Trigger Level). Przycisk należy wcisnąć wielokrotnie aż do uzyskania możliwie dużych drgań styków i wynikających stąd zaburzeń sygnałów.

**Zakończenie**

19. Skręcić napięcia zasilania  $U_{DD}$  i  $U_{GG}$  (w tej kolejności) do zera. Wyłączyć zasilacz. Odłączyć zasilanie.
20. Wymontować elementy zamontowane własnoręcznie; pozostawić elementy zamontowane na stałe wymienione w par. 3.1.

**Wymontowując układ scalony należy posłużyć się małym śrubokrętem do jego delikatnego podważenia z obu stron, a dopiero następnie wyjąć go z płytki. W przeciwnym razie może dojść do uszkodzenia wyprowadzeń.**



## 4. Opracowanie i analiza wyników

### Odczyt wyników liczbowych

1. Z oscylogramu przebiegów  $u_{GS}$  i  $u_{DS}$  (pkt 3.3/16), korzystając z podziałki, zgodnie z rysunkiem w [1], odczytać:
  - czas narastania  $t_r$  i czas opadania  $t_f$  (wziąć pod uwagę oba powyższe przebiegi łącznie, uśredniając odczyt),
  - spadek napięcia na tranzystorze w stanie przewodzenia  $U_{DS(on)}$ .
2. Z oscylogramów przebiegów  $u_g$  i  $u_{GS}$  (pkt 3.3/13 i 15), korzystając z podziałki, zgodnie z rysunkami w [1], odczytać:
  - poziom  $U_{GS(plt)}$  płaskiego odcinka napięcia  $u_{GS}$ ,
  - spadek napięcia na wyjściu sterownika w stanie niskim  $\Delta U_{OL}$  – jako poziom napięcia  $u_g$  na odcinku  $t_f$ ;
  - spadek napięcia na wyjściu sterownika w stanie wysokim  $\Delta U_{OH}$  – jako różnicę między napięciem  $u_g$  na odcinku  $t_r$  a napięciem zasilania  $U_{GG}$ , przy czym należy przyjąć, że  $u_g = U_{GG}$  po zakończeniu załączania.
3. Na podstawie wyników z pkt. 2 obliczyć z prawa Ohma, na podstawie znanej rezystancji użytego opornika bramkowego  $R_G$  oraz przyjmując, że napięcia  $u_g$  i  $u_{GS}$  są stałe na odcinkach  $t_r$  i  $t_f$ , obliczyć:
  - prąd bramki  $I_G(t_r)$ ,
  - prąd bramki  $I_G(t_f)$ .

### Weryfikacja wyników i założeń projektu

4. Stwierdzić, w jakim stopniu spełnione zostały założenia projektu:
  - a) prawidłowość załączania i wyłączenia;
  - b) praca z niskim napięciem głównym w stanie przewodzenia;
  - c) szybkość wyłączenia (czas  $t_f$ ).
5. Stwierdzić, w jakim stopniu sprawdziły się prognozy uzyskane w toku projektowania oraz wartości parametrów podane w kartach katalogowych:
  - a) szybkość wyłączenia (czas  $t_f$ );
  - b) natężenie prądu bramki na odcinkach  $t_r$  i  $t_f$ ;
  - c) poziom  $U_{GS(plt)}$ ;
  - d) spadki napięć  $\Delta U_{OH}$  i  $\Delta U_{OL}$ .

6. Które różnice między założeniami a rzeczywistością mogły mieć wpływ na ewentualną inną niż przewidywana szybkość przełączania (czasy  $t_r$  i  $t_f$ )?
7. Porównać oscylogramy – teoretycznie tych samych napięć – z pkt. 3.3/13 i 14; czy linie na schemacie elektrycznym w rzeczywistości stanowią idealne zwarcia (zerowy spadek napięcia)? Czy wobec tego założenie o skupionym (tzn. bez wpływu położenia punktów pomiarowych na płaszczyźnie płytki) charakterze analizowanego obwodu jest uprawnione? Czy miejsce przyłączenia końcówki  $V_S$  sterownika do obwodu mocy ma czy nie ma znaczenia?

### **Niesymetryczne sterowanie bramki**

8. Czy wartości rezystancji, które pozwoliły dwukrotnie skrócić czas narastania, zgadzają się z przewidywaniami teoretycznymi (par. 2.2)? Sprawdzić szacunkowo, czy w układzie spełniony był warunek działania obwodu wynikający z napięcia progowego użytej diody.

### **Analogowy obwód kondycjonujący przycisku**

9. Na podstawie przebiegów zarejestrowanych w pkt. 3.3/18, w oparciu o wiadomości podane w par. 2.1, opisać działanie analogowego obwodu kondycjonującego przycisku; wykazać konieczność jego stosowania w zbadanym układzie.

### 5. Literatura

---

- [1] Starzak Ł.: *Prze kształtniki elektroniczne. Ćwiczenie B1p. Sterowanie tranzystorów polowych – projekt*. Łódź: Politechnika Łódzka, 2012.