

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA NR.2

Badanie właściwości impulsowych tranzystora.

Charakterystyki wyjściowe (kolektorowe) tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera mogą być podzielone na trzy zakresy:

1. Obszar zatkania
2. Obszar przewodzenia aktywnego (wzmocnienie)
3. Obszar nasycenia

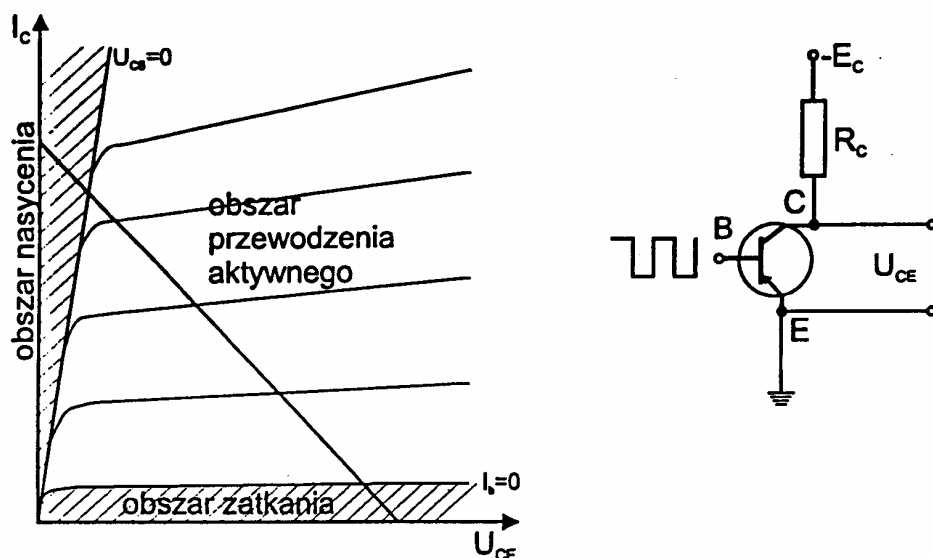
Tranzystor w stanie zatkania posiada złącze baza-kolektor i złącze baza-emiter spolaryzowane zaporowo. Wtedy prąd kolektora jest praktycznie równy prądowi wstecznemu zaporowo spolaryzowanego złącza baza-kolektor $I_C = I_{C0}$, zaś napięcie kolektor - emiter U_{CE} jest praktycznie równe napięciu baterii kolektorowej E_C (w układzie jak na rys. 1). Oporność od strony wejścia i wyjścia tranzystora jest rzędu megaomów. Granicę obszaru zatkania stanowi charakterystyka wyjściowa dla prądu bazy $I_B = 0$.

Przy polaryzacji złącza baza-emiter w kierunku przewodzenia i złącza baza-kolektor w kierunku zaporowym tranzystor znajduje się w obszarze przewodzenia aktywnego, w którym występuje wzmocnienie sygnału sterującego tranzystorem $I_C = \beta I_B$.

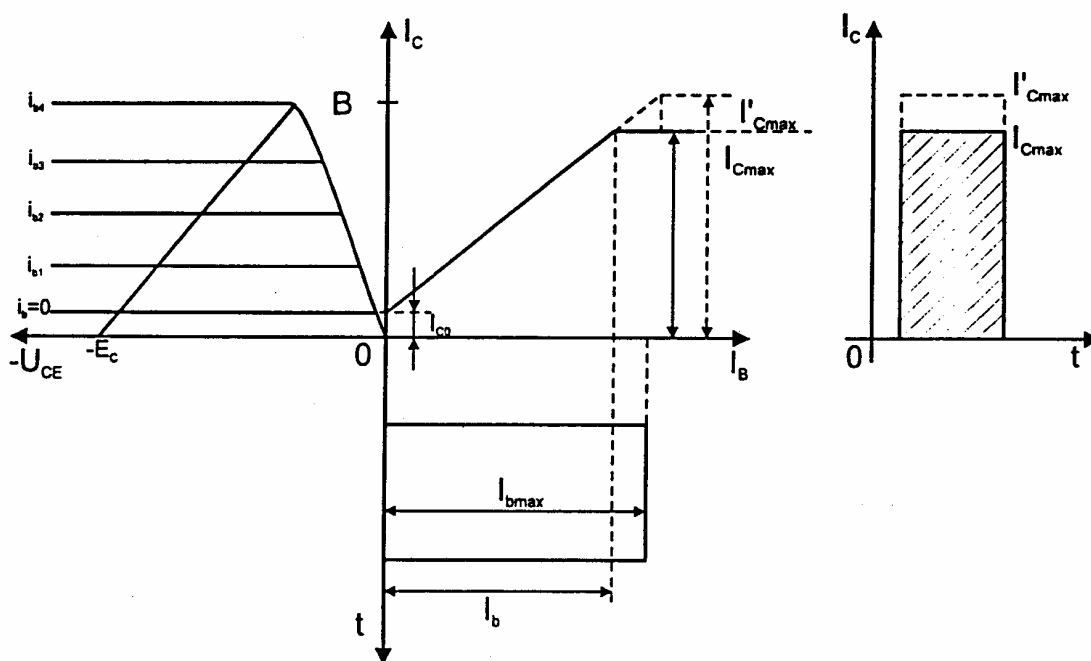
Jeżeli oba złącza zostaną spolaryzowane w kierunku przewodzenia tranzystor przechodzi w stan nasycenia. W tym stanie napięcie między kolektorem a emiterem U_{CE} jest bardzo niewielkie (ułamek wolta). Zatem prąd kolektora praktycznie jest wyznaczony przez rezystancję kolektorową R_C oraz napięcie baterii kolektorowej E_C zgodnie ze wzorem:

$$I_C = \frac{E_C}{R_C} \quad (1)$$

Oporność tranzystora w stanie nasycenia jest mała (kilka omów).



Rysunek 1. Podział obszaru charakterystyk wyjściowych tranzystora (WE).



Rysunek 2. Analiza pracy tranzystora w obszarze nasycenia.

Specyfikę pracy tranzystora w czasie wchodzenia w stan nasycenia wyjaśnia rysunek 2. Zakładamy, że prąd bazy zmienia się od zera do wartości $I_{B \max}$, przy której tranzystor zostaje głęboko nasycony.

W trakcie narastania prądu bazy (złocze impulsu, patrz rys. 2) punkt pracy tranzystora przemieszcza się „w górę” prostej pracy. Prąd kolektora wzrasta, a wskutek narastającej wartości spadku napięcia na R_C maleje napięcie kolektor-emiter $U_{CE} = E_C - I_C R_C$. Tranzystor wchodzi w zakres nasycenia, gdy napięcie na złączu baza-kolektor przyjmuje wartość równą zero. Na rys. 2 odpowiada to usytuowaniu punktu pracy tranzystora w punkcie B. Oznaczmy prąd bazy płynący w tych warunkach przez bazę jako I_B . Dalszy wzrost wartości prądu bazy ponad wartość równą I_B powoduje spolaryzowanie złącza baza-kolektor w kierunku przewodzenia. W

tych warunkach związek pomiędzy prądem kolektora a prądem bazy jest inny niż w zakresie aktywnym. Dalszy przyrost prądu kolektora oraz obniżanie się napięcia kolektor-emiter są nieproporcjonalnie mniejsze w stosunku do wywołujących je przyrostów prądu bazy. Nawet przy prądzie bazy $I_{B\max}$ o wartości wielokrotnie przekraczającej wartość I_B punkt pracy tranzystora nieznacznie odsuwa się od punktu B „w górę” prostej pracy. W wyniku efektu nasycenia wartość prądu kolektora nie może osiągnąć wartości:

$$I_{C\max} = \beta_N I_{B\max} \quad (2)$$

i praktycznie dana jest równaniem (1). Napięcie kolektor-emiter U_{CE} przyjmuje wartości mniejsze od wartości napięcia na złączu baza-emiter U_{BE} .

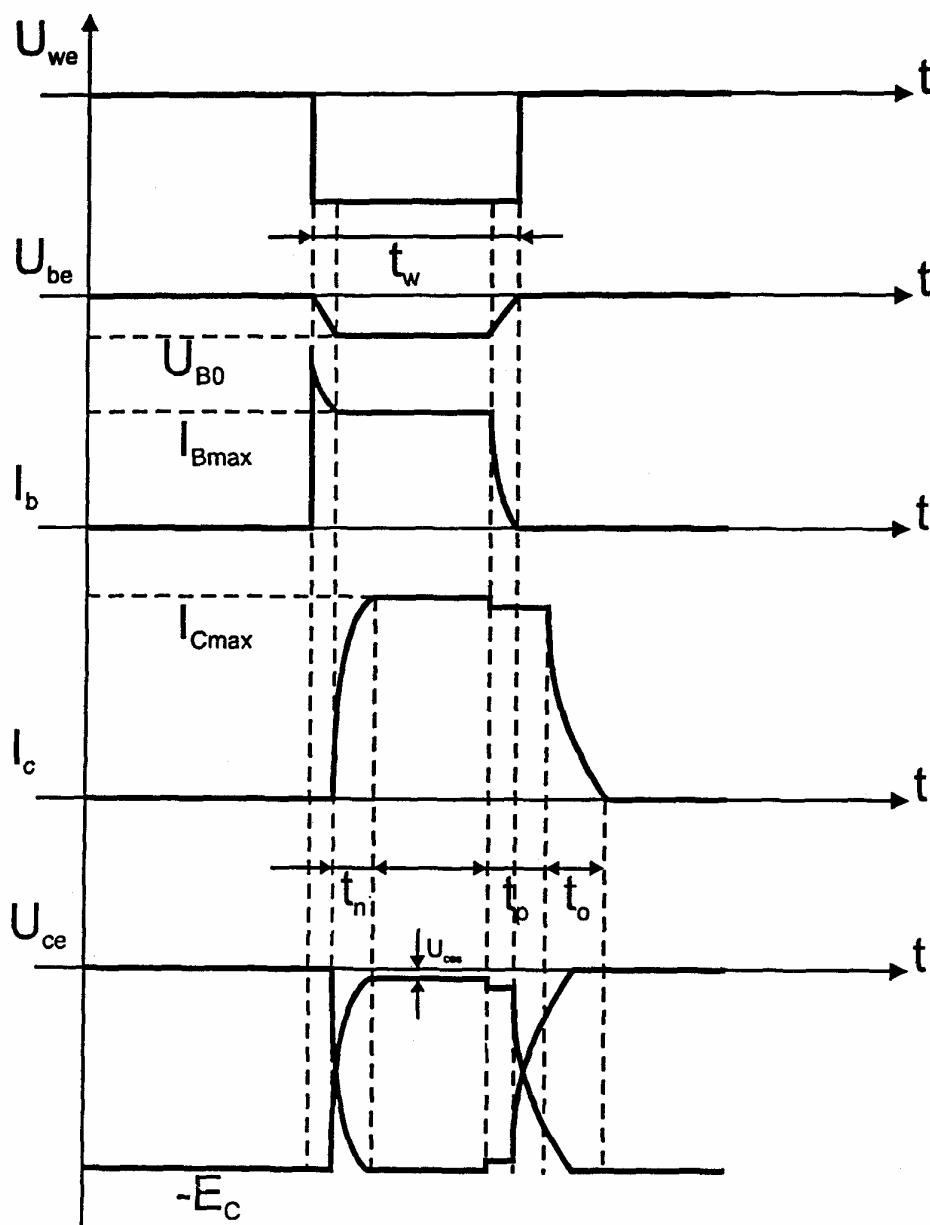
Im większa jest wartość prądu bazy tym większa jest głębokość nasycenia tranzystora. Głębokość nasycenia charakteryzuje się przy pomocy współczynnika przesterowania K_F . Współczynnik K_F , przy danej wartości prądu kolektora I_C w stanie nasycenia tranzystora, wskazuje ile razy wartość prądu bazy jest większa od wynikającej z zależności:

$$I_{B\max} = \frac{I_C}{\beta} \quad (3)$$

Współczynnik przesterowania K_F przy danej wartości prądu kolektora I_C zdefiniowany jest wzorem:

$$K_F(I_C) = \beta \frac{I_B}{I_C} \quad (4)$$

Przełączenie tranzystora polega na przejściu chwilowego punktu pracy tranzystora ze stanu zatkania do stanu nasycenia, lub w kierunku odwrotnym wzdłuż linii prostej pracy tranzystora. Przełączenie tranzystora można uzyskać pod wpływem skokowej zmiany sygnału sterującego. Zależnie od kierunku zmian punktu pracy rozróżnia się proces włączania czyli przejścia od stanu zatkania do stanu nasycenia, i proces wyłączania czyli przejścia od stanu nasycenia do stanu zablokowania. Procesy włączania i wyłączania, czyli praca w układzie kluczującym dla tranzystora pracującego w połączeniu z rys. 1. Charakteryzują się przebiegami prądów i napięć podanymi na rysunku 3.

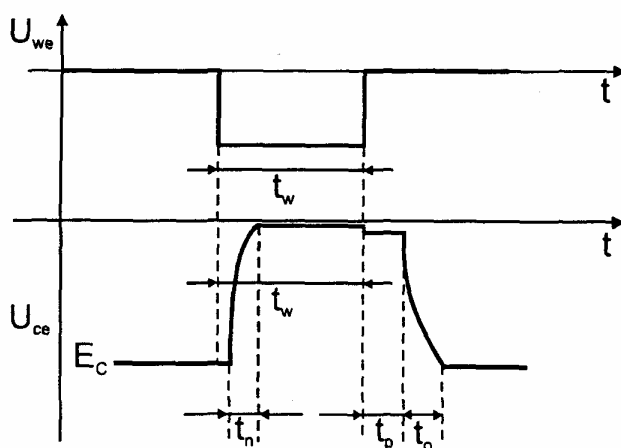


Rysunek 3. Przebiegi napięć i prądów tranzystora przy jego przełączaniu.

Po włączeniu skokowego napięcia na wejście, następuje ładowanie pojemności złączowych C_{jc} i C_{je} tak, że napięcie na bazie tranzystora przechodzi przez poziom progowy U_{B0} z pewnym opóźnieniem. Po osiągnięciu tego napięcia, zaczyna narastać prąd kolektora. Proces tego narastania zaczyna się więc z pewnym opóźnieniem w stosunku do momentu skoku napięcia sterującego. To opóźnienie scharakteryzowane jest przez podanie czasu t_o . Narastanie prądu kolektora ma charakter wykładniczy, ze stałą czasową określoną przez czas życia nośników a także stałą czasową $R_c C_{jc}$. W momencie gdy napięcie na złączu baza-kolektor przyjmie wartość zero (spadek napięcia $I_c R_c$ na rezystorze kolektorowym prawie zrówna się z napięciem baterii kolektorowej E_c), tranzystor wejdzie w stan nasycenia, a prąd kolektora osiągnie wartość bliską E_c / R_c . W praktyce, czas narastania t_n określa się jako odcinek czasu, w którym sygnał wyjściowy zmieni się od 0,1 do 0,9 wartości sygnału w stanie ustalonym.

Po ustaleniu się prądu kolektora, jeżeli prąd bazy jest większy, niż wynikałoby to z równania (3), w bazie gromadzą się ładunki w związku z przesterowaniem tranzystora (nadmiar prądu bazy wobec wartości prądu niezbędnej do wstępnego nasycenia tranzystora).

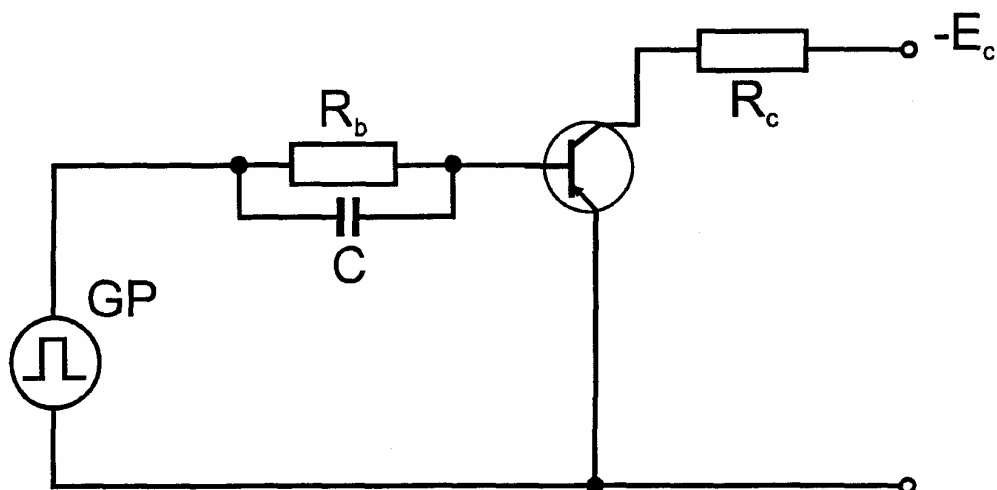
W procesie wyłączania tranzystora można wyodrębnić dwie fazy. W fazie pierwszej trwa usuwanie z bazy zgromadzonego nadmiaru ładunków. W tym czasie prąd kolektora nie zmienia się. Faza ta trwa przez czas t_p , zwany czasem przeciągania. Po usunięciu nadmiarowych ładunków z bazy rozpoczyna się druga faza, w której zaczyna opadać prąd kolektora. Przebieg opadania prądu kolektora jest odcinkiem krzywej wykładniczej o takiej samej stałej czasowej jak dla krzywej narastania. Czas potrzebny do zaniku prądu t_o nazywa się czasem opadania. W praktyce, czas opadania t_o określa się jako odcinek czasu, w którym sygnał wyjściowy zmieni się od 0,1 do 0,9 wartości sygnału w stanie ustalonym.



Rysunek 4. Definicja czasów trwania poszczególnych faz przełączania tranzystora

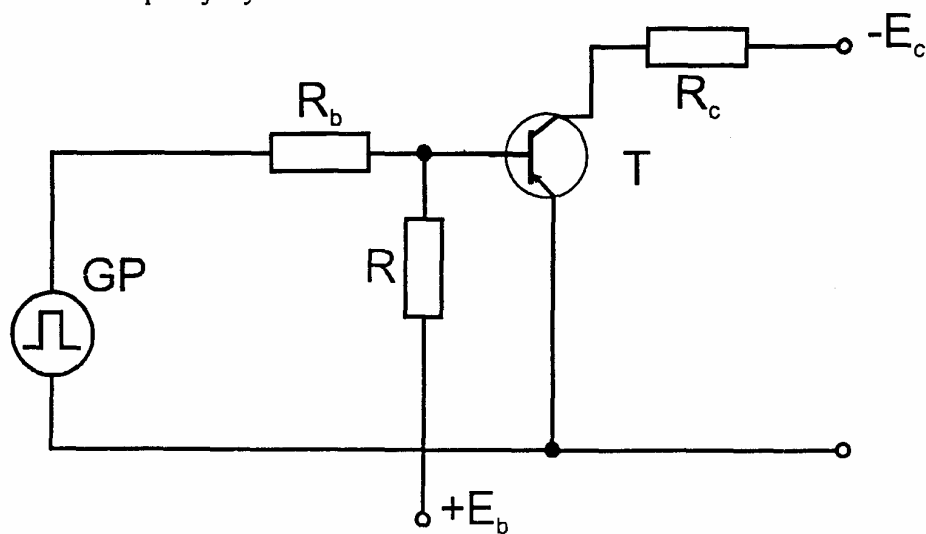
Wartości czasów trwania poszczególnych faz stanów przejściowych (rys. 4) w procesie włączania i wyłączania są zależne zarówno od właściwości dynamicznych samego tranzystora jak też od sposobu jego sterowania. Stosując więc pewne modyfikacje układów można uzyskiwać skracanie poszczególnych czasów, a więc polepszenie przebiegów wyjściowych (kształt).

Czas narastania można znacznie zmniejszyć, stosując tak zwaną pojemność przyspieszającą. Pojemność włączona równolegle do oporności w obwodzie bazy jest przyczyną przesterowania tranzystora w stanach przejściowych. Ta metoda jest słuszna, gdy oporność wewnętrzna generatora sygnałów kluczujących jest niewielka w porównaniu z opornością R_B , ograniczającą prąd bazy tranzystora. Schemat tego sterowania podaje rysunek 5.



Rysunek 5. Układ z pojemnością przyspieszającą.

Zmniejszenie, czasów przeciągania t_p i opadania t_o można uzyskać przełączając tranzystor dwukierunkowymi zmianami napięcia generatora sterującego. W tym wypadku przy wyłączającym skoku napięcia generatora, powstaje silne przesterowanie tranzystora, przyspieszające proces usuwania nadmiaru ładunków z bazy i tym samym skracające czas opadania prądu kolektora. Ten sam efekt można uzyskać przy sterowaniu tranzystora impulsami jednokierunkowymi po zastosowaniu dodatkowej stałej polaryzacji bazy, w wyniku której w czasie gdy napięcie generatora wynosi zero polaryzacja złącza baza-emiter jest zaporowa. Odpowiedni schemat podaje rysunek 6.



Rysunek 6. Przełączanie tranzystora dwukierunkowymi zmianami napięcia sterującego.

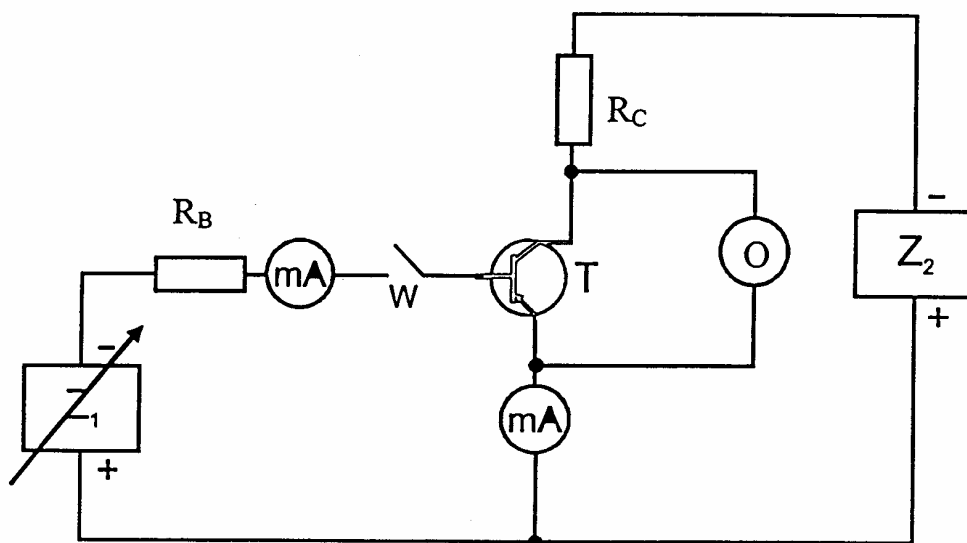
Przebieg ćwiczenia

W ćwiczeniu należy zapoznać się z charakterem pracy tranzystora zastosowanego jako przełącznik. Należy określić punkty pracy tranzystora, odpowiadające granicy stanu zatkania i granicy stanu nasycenia. Badana jest praca tranzystora w układzie przełączającym, oraz wpływ stosowanych w praktyce układów w celu korekcji przebiegu wyjściowego.

Użyte przyrządy:

1. Zasilacz regulowany w zakresie 0...-10V, np. ZS-100,
2. Oscyloskop dwukanałowy, np. DT-516A,
3. Generator impulsowy PGP-5A.

1. Wyznaczenie wartości prądu bazy na granicy nasycenia.



Rysunek 7. Układ pomiarowy do wyznaczenia prądu bazy w funkcji współczynnika przesterowania.

- a) do wejścia układu dołączyć zasilacz regulowany Z_1 , napięcie ujemne na zacisku obwodu bazy,
- b) w obwód bazy włączyć miliamperomierz,
- c) do wyjścia układu dołączyć oscyloskop O , kanał A bez odcięcia składowej stałej.
- d) ustawić w zasilaczu napięcie 0V, odczytać z oscyloskopu napięcie odcięcia kolektor-emiter U_{CEodc} ,
- e) zmieniać wartość napięcia zasilacza tak, aby wartość napięcia U_{CE} osiągnęła 0.5V,
- f) odczytać wartość prądu bazy I_{Bmin} .

2. Wyznaczenie wartości napięć sterujących przy których współczynnik przesterowania osiąga założone wartości.

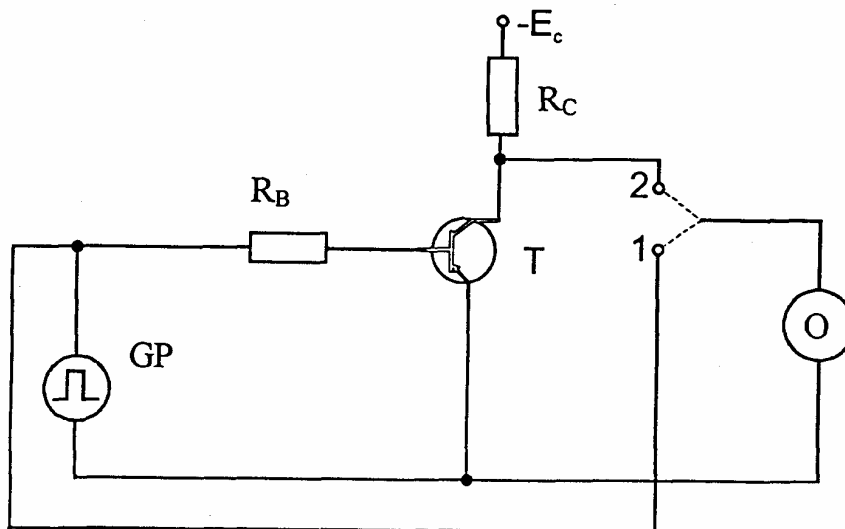
Układ pomiarowy jak w punkcie 1. Regulując napięcie zasilacza ustawić takie wartości napięć przy których prąd bazy osiąga podaną w poniższej tabeli wielokrotność I_{Bmin} . Otrzymane wartości prądów i napięć wpisać do tabeli. Dla wartości współczynnika przesterowania $K_F=1$ wpisać wartość prądu bazy równą I_{Bmin} , wyznaczoną w poprzednim punkcie.

Tabela 1.

K_F	I_B	U_Z
-	mA	V
1		
2		
4		
8		
16		

3. Praca tranzystora w układzie przełącznika.

3.1. Praca przy sterowaniu napięciem jednobiegunowym.



Rysunek 8. Układ pomiarowy do wyznaczenia czasów charakteryzujących pracę dynamiczną tranzystora.

- Do wejścia układu dołączyć generator impulsowy GP, wyłączyć składową stałą (offset off), wyjście impulsu ujemnego, wypełnienie impulsu $1/2$ ($T/2$), okres 2,5 ms,
- do wejścia układu dołączyć kanał B oscyloskopu O, synchronizacja od kanału B, w oscyloskopie włączyć przycisk "CHOPP", oraz rozciągnąć podstawę czasu wciskając przycisk "x5", wyzwalać od zbocza opadającego (przycisk "-"),
- posługując się danymi z Tabeli 1 regulować amplitudę napięcia z generatora impulsowego (odczyt amplitudy z oscyloskopu, kanał B) tak, aby uzyskiwać kolejno wartości współczynni-

ka przesterowania podane w Tabeli 1. Dla każdej wartości współczynnika przesterowania odczytać

- czas opóźnienia t_d ,
- czas narastania t_n ,
- czas przeciągania t_p ,
- czas opadania t_o ,

wyniki wpisać do Tabeli 2.

Tabela 2.

K_F	U_Z	t_d	t_n	t_p	t_o
-	V	ns	ns	ns	ns
1					
2					
4					
8					
16					

d) Na podstawie Tabeli 2, na wspólnym wykresie podać zależności:

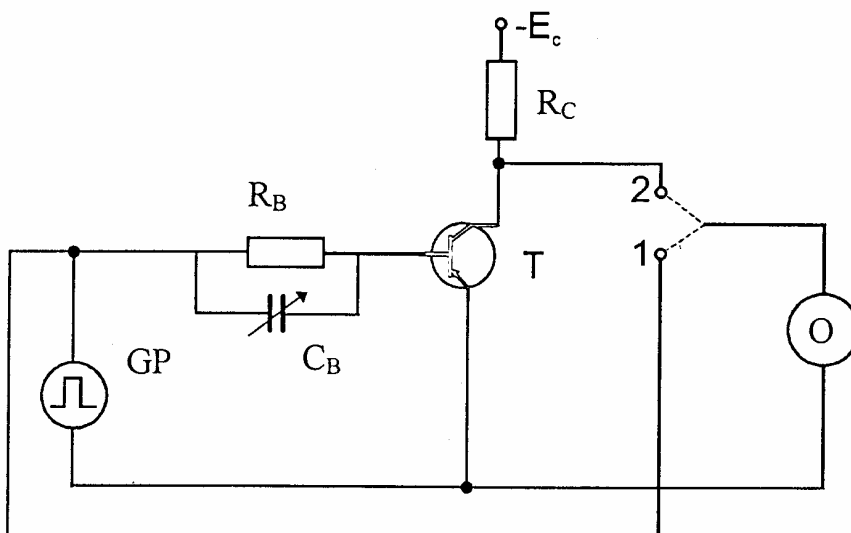
$$t_d = f(k)$$

$$t_n = f(k)$$

$$t_p = f(k)$$

$$t_o = f(k)$$

3.2. Praca przy sterowaniu napięciem jednobiegunowym. Badanie wpływu pojemności przyspieszającej na czasy przełączania tranzystora.



Rysunek 9. Układ pomiarowy do określenia wpływu pojemności przyspieszającej na czasy przełączania tranzystora.

- a) do rezystora szeregowego w obwodzie bazy R_B dołączyć równolegle kondensator C_B o pojemności **100pF**,
 b) zachowując warunki jak w punkcie 3.1., dla wartości współczynnika przesterowania $K_F=1$, $K_F=2$, $K_F=4$, $K_F=8$, $K_F=16$ zmierzyć:
 - czas opóźnienia t_d ,
 - czas narastania t_n ,
 - czas przeciągania t_p ,
 - czas opadania t_o ,
 c) do rezystora szeregowego w obwodzie bazy R_B dołączyć równolegle kondensator C_B o pojemności **500pF**,
 d) wykonać pomiary jak w punkcie "b)",
 e) wyniki pomiarów umieścić w Tabeli 3.

Tabela 3.

C_B	K_F	t_d	t_n	t_p	t_o
pF	-	ns	ns	ns	ns
	1				
	2				
	4				
	8				
	16				
	1				
	2				
	4				
	8				
	16				

- e) Na podstawie Tabeli 2 i Tabeli 3, na wspólnym wykresie podać zależności:

$C_B=0$

$C_B=100\text{pF}$

$C_B=500\text{pF}$

$t_d=f(k)$

$t_d=f(k)$

$t_d=f(k)$

$t_n=f(k)$

$t_n=f(k)$

$t_n=f(k)$

$t_p=f(k)$

$t_p=f(k)$

$t_p=f(k)$

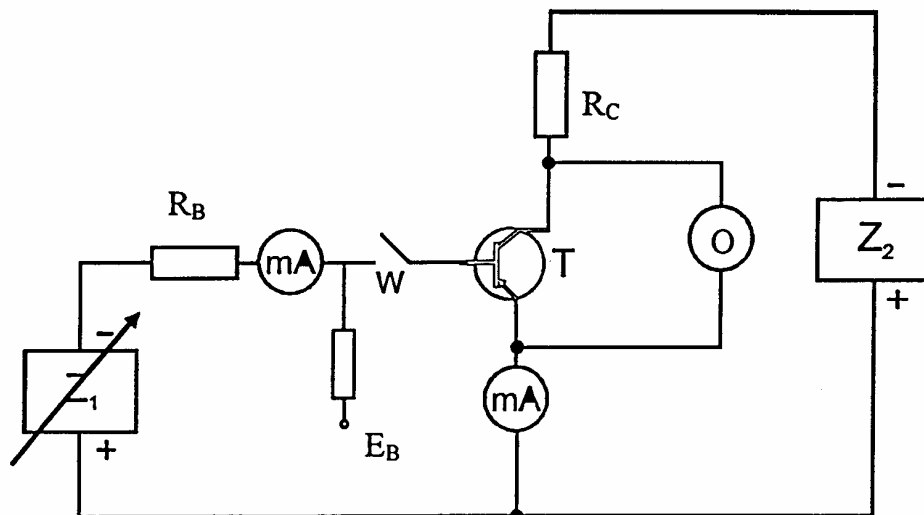
$t_o=f(k)$

$t_o=f(k)$

$t_o=f(k)$

3.3. Praca przy sterowaniu napięciem jednobiegunowym. Badanie wpływu polaryzacji zaporowej bazy.

3.3.1. Wyznaczenie wartości prądu wejściowego obwodu sterującego na granicy nasycenia tranzystora.



Rysunek 10. Układ pomiarowy do wyznaczenia prądu wejściowego w funkcji współczynnika przesterowania.

- do wejścia układu dołączyć zasilacz regulowany, napięcie ujemne na zacisku obwodu bazy,
- w obwód bazy włączyć miliamperomierz,
- do rezystora służącego do dodatkowej polaryzacji bazy dołączyć z zasilacza zewnętrznego (np. ZS-100) napięcie dodatnie $E_B=5V$,
- do wyjścia układu dołączyć oscyloskop, kanał A bez odcięcia składowej stałej.
- ustawić w zasilaczu napięcie $0V$, odczytać z oscyloskopu napięcie U_{CE0dc} ,
- zmieniać wartość napięcia zasilacza tak, aby wartość napięcia U_{CE} osiągnęła $0.5V$,
- odczytać wartość prądu wejściowego obwodu sterującego I_{WEmin} .

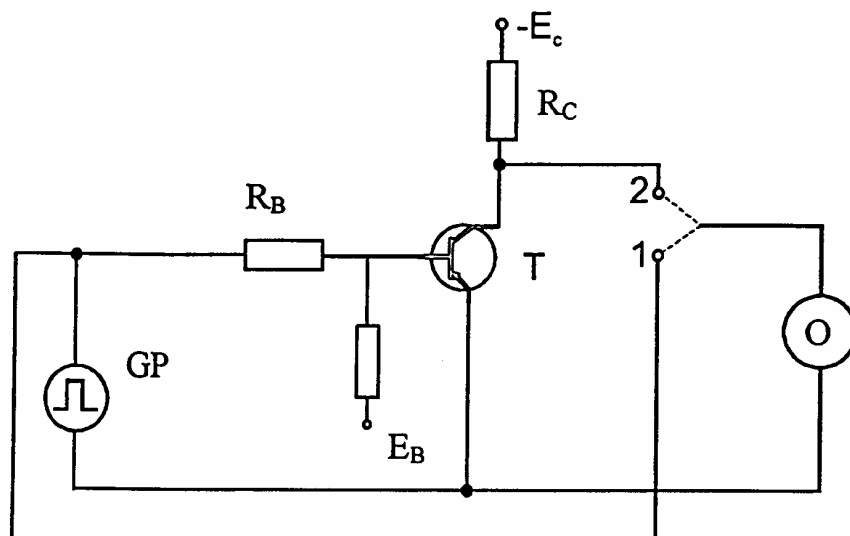
3.3.2. Wyznaczenie wartości napięć sterujących przy których współczynnik przesterowania osiąga założone wartości.

Układ jak w punkcie 3.3.2. Regulując napięcie zasilacza ustawić takie wartości napięć przy których prąd wejściowy obwodu sterującego osiąga podaną w poniższej tabeli wielokrotność I_{WEmin} . Otrzymane wartości prądów i napięć wpisać do tabeli. Dla wartości współczynnika przesterowania $K_F=1$ wpisać wartość prądu bazy równą I_{WEmin} , wyznaczoną w poprzednim punkcie.

Tabela 4.

K_F	I_{WE}	U_Z
-	mA	V
1		
2		
4		
8		
16		

3.3.3. Wyznaczenie wartości czasów przełączania.



Rysunek 11. Układ pomiarowy do określenia wpływu dodatkowej polaryzacji na czasy przełączania tranzystora.

- Do wejścia układu dołączyć generator impulsowy, wyłączyć składową stałą (offset off), wyjście impulsu ujemnego, wypełnienie impulsu $1/2$ ($T/2$), okres $2,5$ ms,
- do wejścia układu dołączyć kanał B oscyloskopu, synchronizacja od kanału B, w oscyloskopie włączyć przycisk "CHOPP", oraz rozciągnąć podstawę czasu wciskając przycisk "x5", wyzwalanie od zbocza opadającego (przycisk "-"),
- posługując się danymi z Tabeli 4 regulować amplitudę napięcia z generatora impulsowego (odczyt amplitudy z oscyloskopu, kanał B) tak, aby uzyskiwać kolejno wartości współczynnika przesterowania podane w Tabeli 4. Dla każdej wartości współczynnika przesterowania odczytać

- czas opóźnienia t_d ,
- czas narastania t_n ,
- czas przeciągania t_p ,
- czas opadania t_o ,

wyniki wpisać do Tabeli 5.

Tabela 5.

k	U_z	t_d	t_n	t_p	t_o
-	V	ns	ns	ns	ns
1					
2					
4					
8					
16					

d) Na podstawie Tabeli 2 i Tabeli 5, na wspólnym wykresie podać zależności:

bez polaryzacji zaporowej

z polaryzacją zaporową

$$t_d=f(k)$$

$$t_n=f(k)$$

$$t_p=f(k)$$

$$t_o=f(k)$$

$$t_d=f(k)$$

$$t_n=f(k)$$

$$t_p=f(k)$$

$$t_o=f(k)$$

Tematy do opracowania.

1. Scharakteryzować obszary pracy tranzystora.
2. Omówić proces przełączania tranzystora.
3. Narysować przebiegi napięć i prądów tranzystora przy przełączaniu.
4. Omówić wpływ pojemności przyspieszającej na parametry przebiegów wyjściowych.
5. Omówić wpływ dodatkowej zaporowej polaryzacji emitera na kształt przebiegów wyjściowych przy pracy przełączającej.