

Ćwiczenie 22a

TRANZYSTORY

1. Cel ćwiczenia

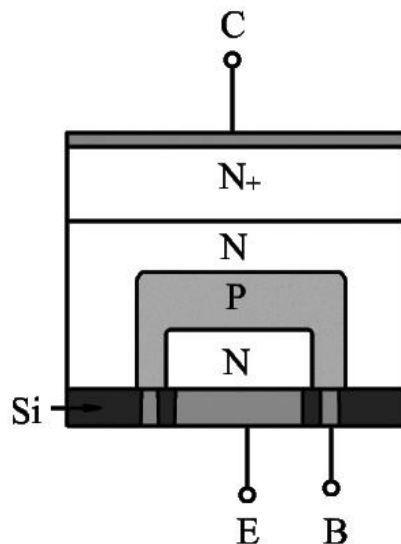
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z właściwościami i zasadą działania oraz zastosowaniem tranzystorów bipolarnego i polowego.

2. Podstawy teoretyczne

Tranzystor jest to trójelektrodowy (lub czteroelektrodowy) element półprzewodnikowy pełniący podstawową rolę w elektronicznych układach analogowych i cyfrowych, jako wzmacniacz, przełącznik itp. Tranzystor może być elementem indywidualnym (dyskretnym) lub częścią monolitycznego układu scalonego. Tranzystory dzieli się ogólnie na: bipolarne i unipolarne (polowe). Dalszego, bardziej szczegółowego, podziału dokonuje się zwykle ze względu na: rodzaj półprzewodnika (tranzystory krzemowe, germanowe), właściwości i zastosowania (tranzystory małej i dużej mocy, małej i wielkiej częstotliwości, impulsowe, wysokonapięciowe), cechy konstrukcyjno-technologiczne itp.

2.1. Tranzystor bipolarny. Budowa, zasada działania.

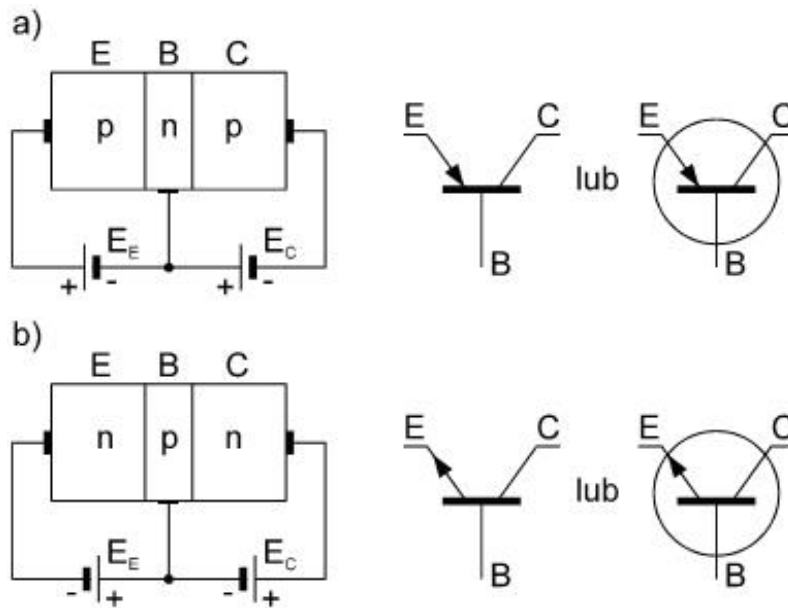
Tranzystor bipolarny jest przyrządem półprzewodnikowym o dwóch złączach p-n zbudowanym z trzech warstw półprzewodników domieszkowanych wykazujących kolejno przewodnictwa typu p-n-p lub n-p-n. Są one uzyskane w monokryształe półprzewodnika, najczęściej krzemu (Si). Przykładową budowę tranzystora bipolarnego o strukturze epitaksjalno-planarnej przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Budowa tranzystora bipolarnego o strukturze epitaksjalno-planarnej

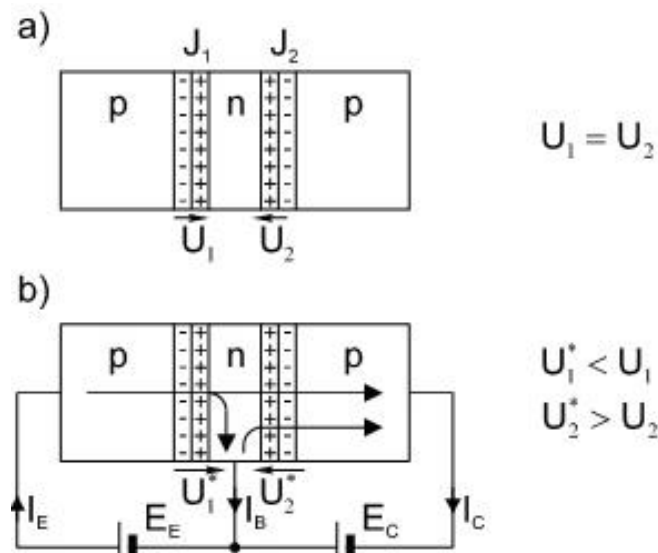
Warstwa wewnętrzna nazywa się bazą (B) a warstwy zewnętrzne emiterem (E) i kolektorem (C) (rys. 2). Emiter baza i kolektor mają doprowadzenia metaliczne zwane elektrodami tranzystora. Tranzystor bipolarny może pracować w trzech układach pracy: o wspólnej bazie (OB), o wspólnym emiterze (OE) oraz o wspólnym kolektorze (OC).

Strukturę, symbole graficzne tranzystora bipolarnego (NPN i PNP) i polaryzację elektrod w układzie OB przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Struktura, polaryzacja elektrod (układ OB) i symbole graficzne tranzystora:
 a) typu p-n-p
 b) typu n-p-n

Stan tranzystora zapewniający uzyskanie przez niego właściwości wzmacniających uzyskuje się przez odpowiednią polaryzację elektrod (rys. 2). Złącze emiterowe (emiter-baza) spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia, zaś kolektorowe (kolektor-baza) w kierunku zaporowym. Zachodzące w tranzystorze zjawiska fizyczne wyjaśniono na przykładzie tranzystora p-n-p. (rys. 3).



Rys. 3. Zasada działania tranzystora:
 a) tranzystor niespolaryzowany,
 b) tranzystor spolaryzowany w kierunku przewodzenia.

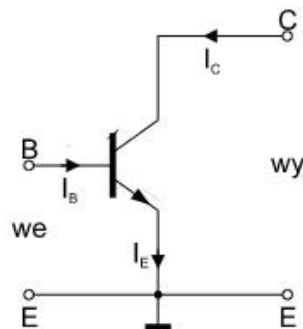
W stanie równowagi, bez polaryzacji zewnętrznej na obu złączach tranzystora występują bariery potencjału (U_1 i U_2 na *rys.3a*) spowodowane rekombinacją dziur z obszarów emitera i kolektora z elektronami obszaru bazy. Zaznaczone na *rys. 3a* ładunki „+” i „-” oznaczają odpowiednio ładunki nieruchomych jonów donorowych i akceptorowych. Jeżeli złącze kolektorowe (J_2) zostanie spolaryzowane w kierunku zaporowym przez włączenie źródła E_C , zwiększy się bariera potencjału U_2 między kolektorem a bazą (*rys.3b*). Jeżeli połączymy źródło E_E , polaryzujące złącze emiterowe w kierunku przewodzenia (*rys. 3b*) to obniży się bariera potencjału U_1 między emiterem a bazą. Dziury z obszaru emitera przepływają drogą dyfuzji do obszaru bazy, gdzie częściowo rekombinują. Ponieważ szerokość bazy jest niewielka i np. w tranzystorach małej mocy zawiera się w granicach (0,3-1) μm , liczba rekombinujących dziur w bazie stanowi (1-5)% dyfundujących z emitera dziur. Większość dziur osiąga więc złącze kolektorowe i jest unoszona do obszaru kolektora. Miarą „ubytku” dyfundujących nośników większościowych emitera (prądu emitera) jest tzw. współczynnik wzmocnienia prądowego α wyznaczany w układzie OB, przy czym

$$\alpha = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} \quad (1)$$

gdzie: ΔI_C , ΔI_E - przyrosty prądu: kolektora i emitera.

Wartość współczynnika α jest nieco mniejsza od jedności i zawiera się w granicach (0,95-0,99).

Działanie tranzystora n-p-n jest analogiczne do działania tranzystora p-n-p z tą różnicą, że napięcia polaryzujące mają przeciwne znaki, zaś prąd emitera składa się głównie z elektronów, a nie dziur. Najczęściej stosowanym układem pracy tranzystora bipolarnego jest układ o wspólnym emiterze (OE) przedstawiony na rysunku 4.



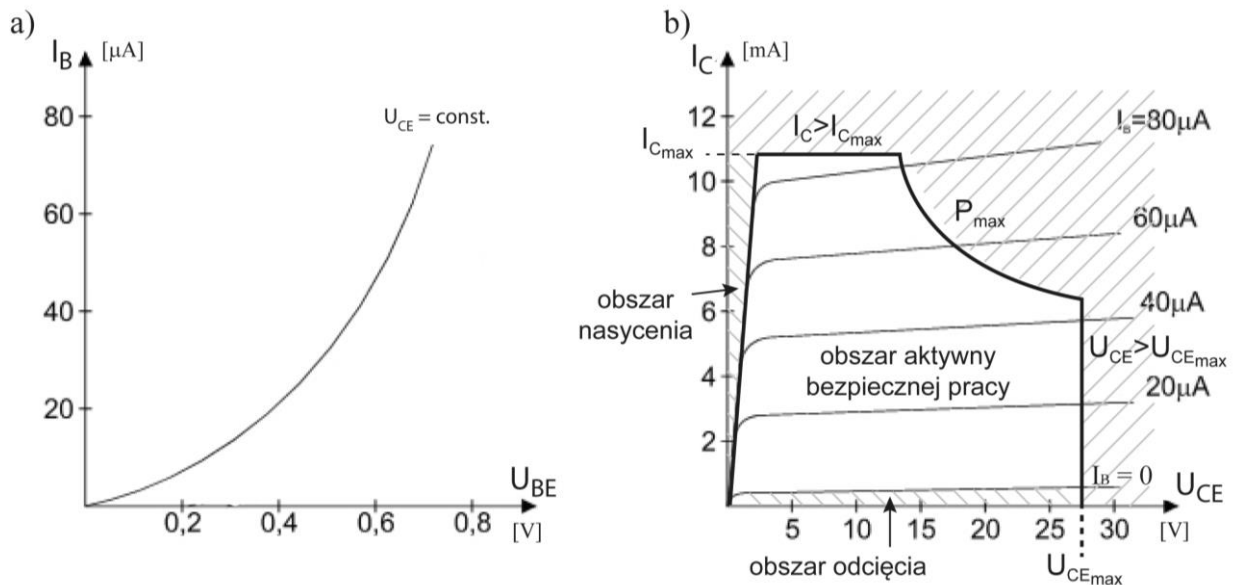
Rys. 4. Układ pracy tranzystora o wspólnym emiterze (OE)

W układzie o wspólnym emiterze (*rys. 4*) prądem wejściowym (sterującym) jest prąd bazy a wyjściowym prąd kolektora. Elektroda wspólna jest przyłączona do masy. Wzmocnienie prądowe β oznaczane w katalogach układów elektronicznych jako h_{21E} określa zależność:

$$\beta = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} \quad (2)$$

gdzie: ΔI_B - przyrost prądu bazy.

Na *rys. 5* podano typowy przebieg charakterystyk statycznych tranzystora n-p-n w układzie (OE).



Rys. 5 Statyczne charakterystyki tranzystora w układzie OE.
a) wejściowa; b) wyjściowa

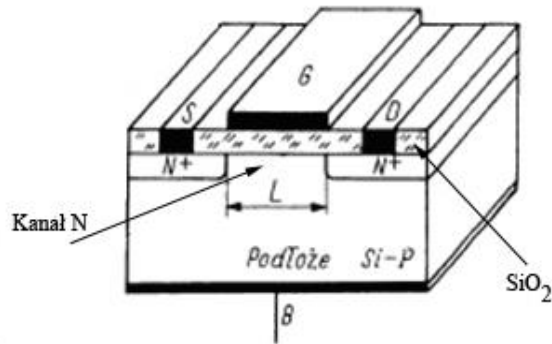
Obszar aktywny bezpiecznej pracy tranzystora jest ograniczony krzywą maksymalnych strat mocy P_{max} której hiperboliczny przebieg wynika z maksymalnej wartości iloczynu napięcia między kolektorem a emiterem przy jednoczesnej wartości prądów kolektora, dla których nie jest przekroczona maksymalna temperatura złącza tranzystora powodująca jego uszkodzenie. Charakterystyka dla prądu $I_B = 0$ ogranicza obszar odcięcia (zatkania) tranzystora, w którym obydwie złącza tzn. baza - emiter i kolektor - baza spolaryzowane są w kierunku zaporowym. W stanie nasycenia złącza baza - emiter i kolektor - baza, spolaryzowane są w kierunku przewodzenia.

2.2. Tranzystor polowy z izolowaną bramką. Budowa, zasada działania.

Tranzystor polowy z izolowaną bramką, w którym rolę izolatora pełni tlenek krzemu SiO_2 (ang. oxide) nazywany jest MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor) lub w skrócie MOS. Jest on zazwyczaj elementem trójkońcówkowym. Może być czterokońcówkowym jeżeli uwzględnimy wykorzystywane do polaryzacji tranzystora wyprowadzenie podłoża B (nazywany wówczas tranzystorem dwubramkowym), które z reguły jest jednak zwarte z wyprowadzeniem źródła S. Poszczególne końcówki tranzystora polowego są oznaczane inaczej niż w przypadku tranzystora bipolarnego: S- źródło (source), G- bramka (gate), D - dren (drain).

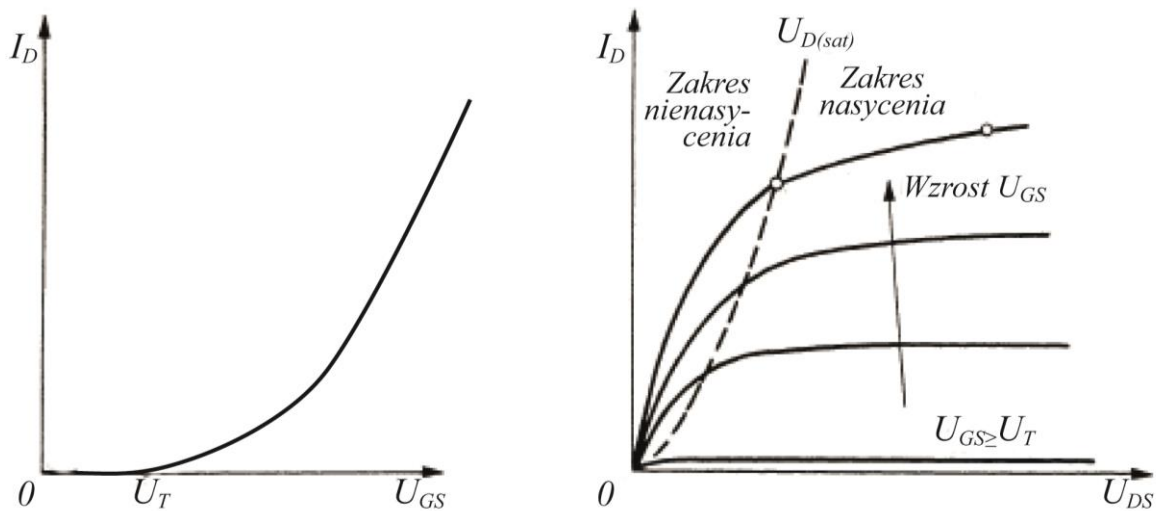
Najczęściej stosowaną konfiguracją włączenia tranzystora polowego jest układ ze wspólnym źródłem (odwracający fazę), ze względu na bardzo dużą rezystancję wejściową, duże wzmocnienie napięciowe oraz mały poziom szumów.

W tranzystorze polowym z izolowaną bramką płytka monokrystaliczna słabo domieszkowanego krzemu typu P jest zaopatrzona w kontakt omowy z elektrodą podłoża B, natomiast dwa silnie domieszkowane obszary N^+ stanowią elektrody źródła S i drenu D. Powierzchnia półprzewodnika między źródłem a drenem jest pokryta cienką ($15 \div 100$) nm warstwą dielektryczną (SiO_2). Na powierzchni tej warstwy jest osadzona elektroda metalowa bramki G (rys. 6). W rozpatrywanym przypadku podłoże B jest zwarte ze źródłem S, które stanowi punkt odniesienia dla potencjałów bramki i drenu.



Rys. 6 Uproszczony przekrój struktury tranzystora polowego z izolowaną bramką (MOSFET)

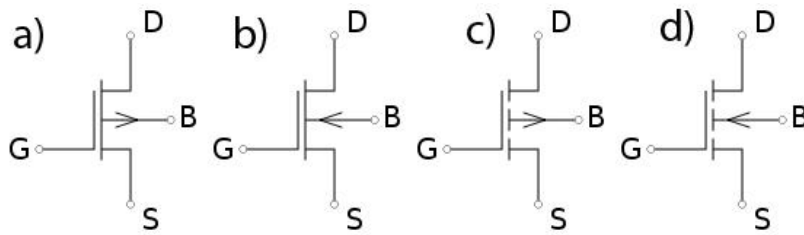
Najważniejsze dla opisu działania tranzystora MOS są charakterystyki prądowo-napięciowe: przejściowa, tj. $I_D = f(U_{GS})$ przy $U_{DS} = \text{const}$, oraz wyjściowa, tj. $I_D = f(U_{DS})$ przy $U_{GS} = \text{const}$ (rys. 7).



Rys. 7 Charakterystyki przejściowa (a) i wyjściowe (b) tranzystora MOS

Gdy napięcie bramki osiąga wartość progową U_T w obszarze przypowierzchniowym półprzewodnika pojawia się warstwa inwersyjna. Ponieważ ma ona ten sam typ przewodnictwa co obszary N^+ źródła i drenu, tworzy kanał umożliwiający przepływ prądu I_D między tymi obszarami. Dopóki napięcie U_{DS} jest małe w porównaniu z napięciem bramki U_{GS} dopóty kanał spełnia funkcję rezystora liniowego o rezystancji regulowanej napięciem bramki. W tym zakresie napięć zmiany prądu I_D w funkcji napięcia U_{DS} są prawie liniowe dla obu kierunków polaryzacji drenu.

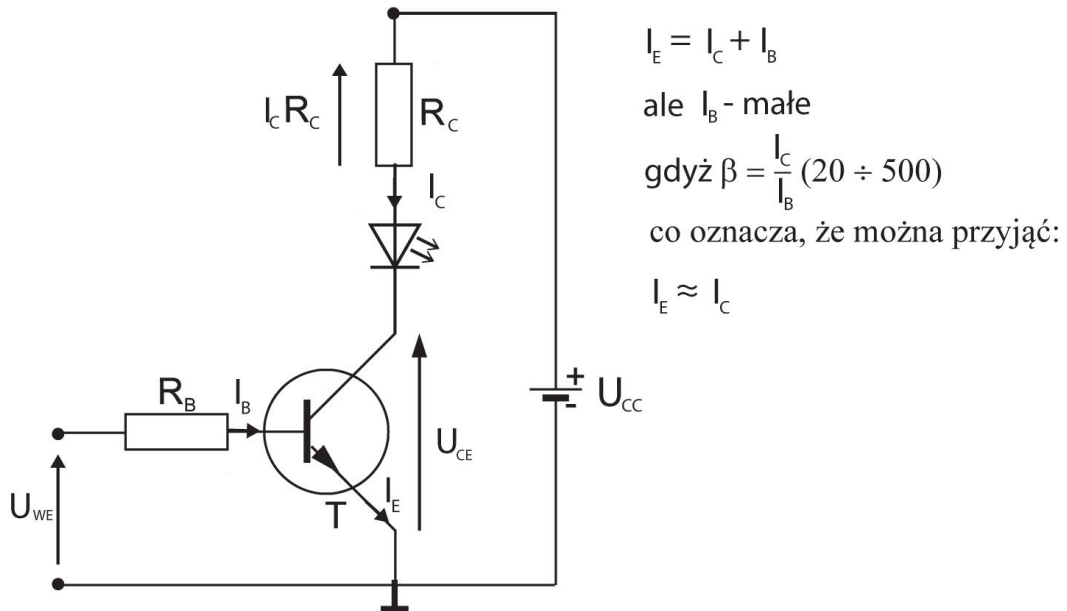
W opisany sposób działa tranzystor MOS z kanałem indukowanym (nie wykonanym technologicznie) nazywany też normalnie wyłączonym. W takim tranzystorze warstwa inwersyjna, stanowiąca kanał łączący źródło z drenem, powstaje wskutek skupienia przy powierzchni dużej liczby nośników mniejszościowych przyływających z podłoża B (typu P). Tranzystor MOS, w którym kanał jest wykonany technologicznie (bez polaryzacji bramki), nazywa się normalnie włączonym (gdyż przy $U_{GS} = 0$ może płynąć duży prąd drenu). Symbole graficzne tranzystorów MOS z kanałem zubożonym (normalnie włączony - typu P i typu N) oraz wzbogacanym (normalnie wyłączony - typu P i typu N) przedstawia rysunek 8.



Rys. 8 Symbole graficzne tranzystorów MOS
 a) z kanałem zubożanym typu P; b) z kanałem zubożanym typu N
 c) z kanałem wzbogacanym typu P; d) z kanałem wzbogacanym typu N

2.3. Praca tranzystora jako klucza sterowanego

Zarówno tranzystory bipolarne jak i polowe są wykorzystywane w układach przełączających jako klucze sterowane. Pracę takiego układu opisano na przykładzie tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera, który przechodzi od stanu blokowania do stanu przewodzenia zgodnie ze zmianami sygnału sterującego. Schemat układu przedstawiono na rysunku 9.



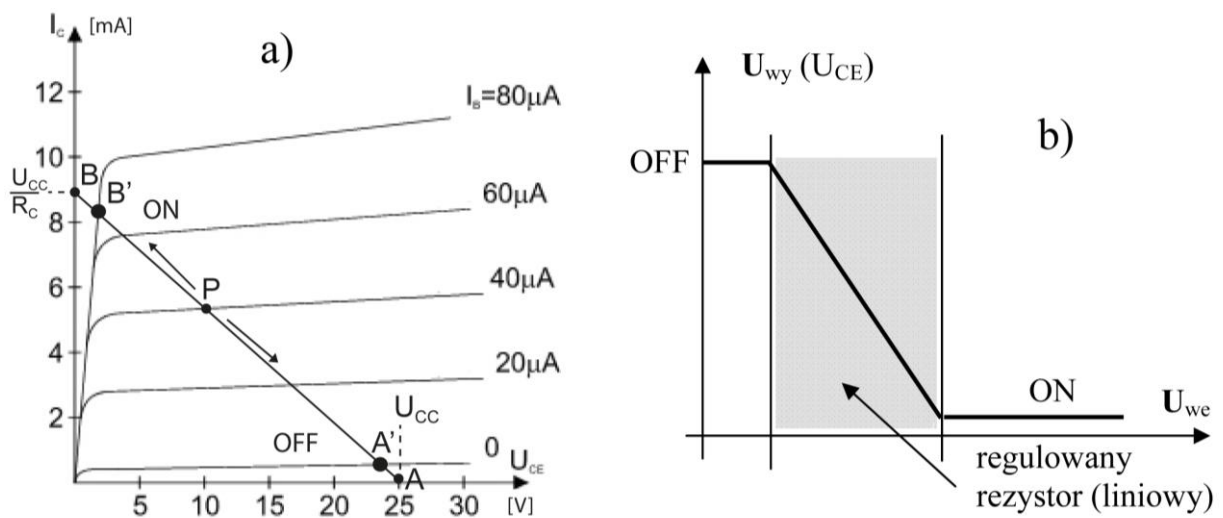
Rys. 9 Schemat układu pomiarowego z kluczem tranzystorowym

Przebieg procesu załączania jak i wyłączania tranzystora zależy zarówno od właściwości samego tranzystora jak i obwodu, w którym jest on przełączany. W przypadku, gdy złącze baza - emiter nie jest wystawione w kierunku przewodzenia przez wejściowe napięcie sterujące U_{WE} , nie płynie prąd bazy i tranzystor pozostaje w stanie odcięcia. Złącze kolektorowe w rozpatrywanym przypadku jest na stałe spolaryzowane w kierunku zaporowym przez napięcie U_{CC} . Sytuacja ta odpowiada w praktyce przerwie w obwodzie między kolektorem a emiterym, czyli tranzystor nie przewodzi prądu, co oznacza, że klucz tranzystorowy jest wyłączony (dioda LED nie świeci się). Po spolaryzowaniu przez prąd bazy złącza baza - emiter w kierunku przewodzenia tranzystor załącza się i prąd między kolektorem a emiterym zaczyna płynąć. Jego wartość zgodnie z charakterystyką wyjściową tranzystora zależy od prądu bazy (rys. 5b). Tranzystor może pracować jako regulowany rezystor sterowany prądem bazy, który reguluje prąd między kolektorem a emiterym

i w konsekwencji dioda LED świeci jaśniej w zależności od wartości przepływającego przez nią prądu I_C . W przypadku pełnej polaryzacji złącza baza - emiter tranzystora bipolarnego (największej wartości prądu bazy I_B) następuje pełne jego załączenie - kolektor i emiter są praktycznie zwarte - klucz tranzystorowy jest załączony. Rezystor R_C ogranicza prąd płynący między końcówką kolektorową a końcówką emiterową, tak aby zapobiegać spaleni się diody LED oraz tranzystora przez przepływ praktycznie zwarciovego prądu.

Uwaga: W przypadku tranzystora bipolarnego, jeśli sterujemy napięciem (a nie źródłem prądu), konieczne należy ograniczyć prąd bazy rezystorem R_B . Należy zwrócić także uwagę, że napięcie U_{BE} podczas zmian prądów bazy odpowiadających zmianom napięcia U_{WE} jest praktycznie stałe i dla tranzystorów krzemowych wynosi około 0,7 V.

Podczas pracy tranzystora jako przełącznika punkt pracy przechodzi po prostej pracy (rys. 10a) pomiędzy obszarami zatkania i nasycenia, tzn. od punktu A' do punktu B' i odwrotnie.



Rys. 10 Charakterystyki wyjściowe tranzystora bipolarnego z prostą pracy (a) oraz stany pracy klucza tranzystorowego (b)

Korzystając z II-go prawa Kirchhoffa dla układu z rysunku 9 (przy założeniu zerowej rezystancji w kierunku przewodzenia diody LED oraz że $I_E = I_C$) można zapisać:

$$U_{CC} = R_C I_C + U_{CE} \quad (3)$$

Równanie (3) przedstawia tzw. **prostą pracy** i określa liniową zależność między prądem kolektora I_C , a napięciem kolektor-emiter U_{CE} . Zmianę położenia prostej pracy można dokonać przez zmianę napięcia U_{CC} lub rezystora R_C .

Tak wyznaczoną **prostą pracy** zwaną też prostą obciążenia (obciążeniem dla źródła napięcia U_{CC} rys. 9 jest rezystor R_C , tranzystor oraz dioda elektroluminescencyjna) można wrysować w charakterystyki wyjściowe tranzystora, co jest przedstawione na rysunku 10a. Aby taką prostą narysować wystarczy równanie tej prostej rozwiązać dla dwóch granicznych warunków, a więc dla $I_C = 0$ i $U_{CE} = 0$. Otrzymujemy wówczas odpowiednio $U_{CE} = U_{CC}$ oraz

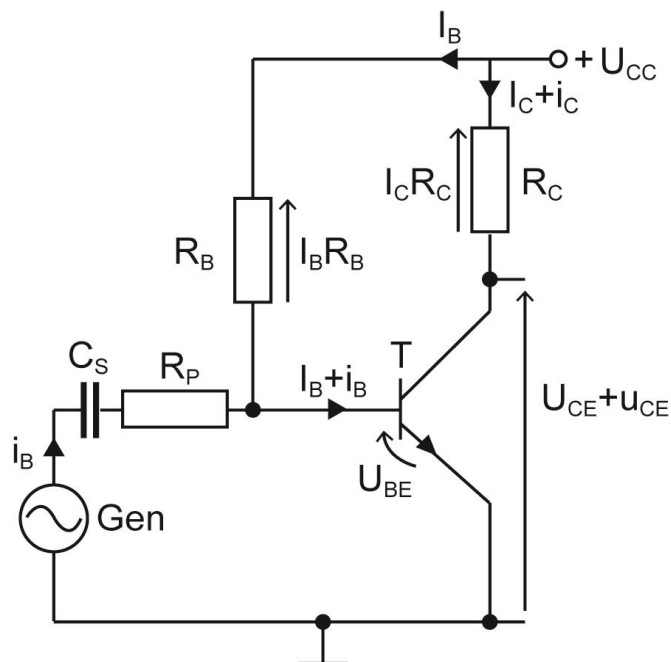
$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C} \quad (\text{punkty A i B na rys. 10a}).$$

Jeżeli punkt pracy tranzystora położony jest w punkcie B' klucz tranzystorowy jest załączony (ON) - dioda LED świeci najjaśniej. Jeżeli punkt pracy znajduje się w punkcie A' klucz tranzystorowy jest wyłączony (OFF) - dioda LED nie świeci. Regulując położenie punktu pracy P między punktami A' i B' za pomocą napięcia wejściowego U_{WE} regulujemy wartość napięcia wyjściowego U_{WY} (U_{CE} - rys. 10b) i rezystancję R_{CE} tranzystora. Zmienia się wówczas wartość prądu I_C przepływającego przez gałąź z kluczem tranzystorowym oraz umieszczoną w niej diodę LED, co powoduje zmiany jasności jej świecenia.

Parametry tranzystorów bardzo silnie zależą od wybranego punktu pracy. Punkt pracy musi być bezpieczny dla danego elementu tzn. wartości mocy, prądów i napięć nie mogą przekroczyć wartości granicznych (obszar aktywny bezpiecznej pracy - rys. 5b). Położenie punktu pracy powinno być na tyle stabilne, aby przy zmianach warunków zewnętrznych (np. temperatury) zapewnić funkcjonowanie układu zgodne z wymaganiami. Aby punkt pracy analizowanego tranzystora o charakterystyce wyjściowej z rysunku 10a znajdował się w punkcie P należy w obwodzie bazy wytworzyć takie napięcie U_{BE} (rys. 5a), aby prąd bazy miał wartość $40 \mu A$.

2.4 Analiza pracy jednostopniowego wzmacniacza tranzystorowego prądu zmiennego w układzie OE.

Rozpatrzmy przedstawiony na rys. 11 prosty układ wzmacniacza małej częstotliwości z tranzystorem bipolarnym pracującym w konfiguracji OE. Przy braku zmiennego sygnału wejściowego ($u_1=0$) wzmacniacz znajduje się w tzw. stanie spoczynkowym i płyną wówczas prądy spoczynkowe I_B , I_C , I_E .



Rys. 11 Wzmacniacz tranzystorowy w układzie OE.

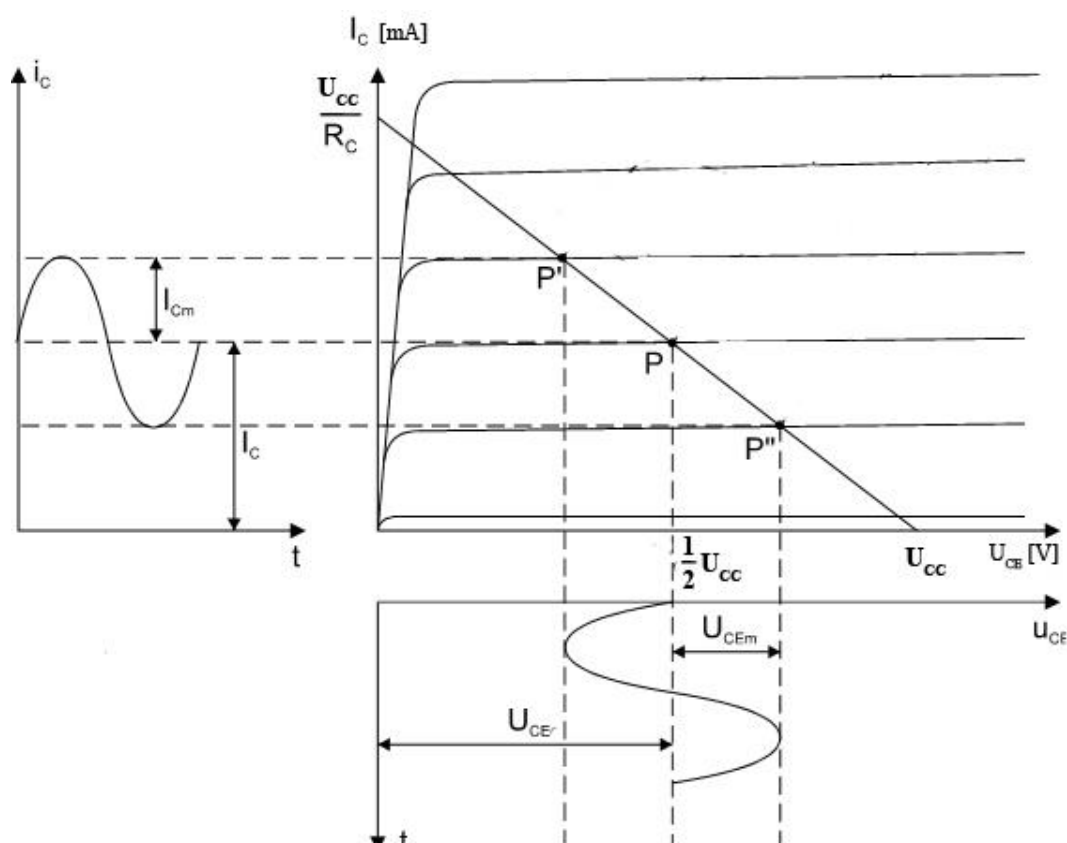
Na podstawie II prawa Kirchhoffa spoczynkowe prądy bazy oraz kolektora określone są zależnościami:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_P} \quad (4)$$

$$I_C = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{R_C} \quad (5)$$

Wzmocnienie stałoprądowe układu może zostać obliczone na podstawie zależności (2), (4) i (5).

Wartość prądu I_B regulowana przez rezystor R_B ustala położenie spoczynkowego punktu pracy w punkcie P rys. 12.



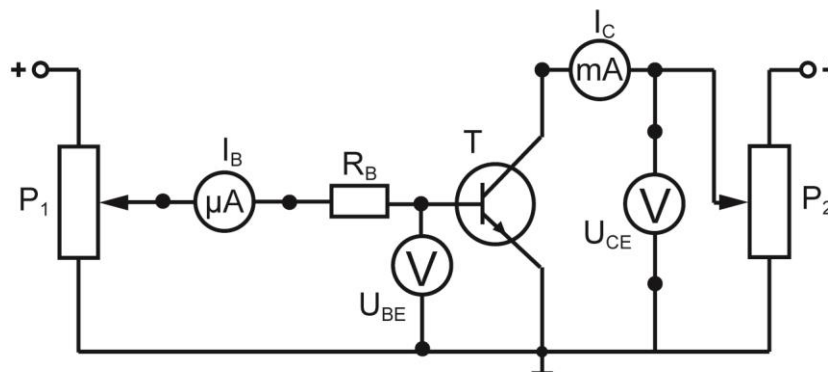
Rys. 12 Analiza graficzna wzmacniacza w układzie OE z rys. 11

Składowa zmienna prądu bazy i_B (rys. 11) z generatora (sygnał wzmacniany) steruje składową zmienną prądu kolektora i_C (sygnał wyjściowy) i ustala aktualne położenie chwilowego punktu pracy względem spoczynkowego punktu pracy P. Zbyt wysoka amplituda prądu i_B powoduje wejście tranzystora w stan nasycenia (dla dodatniej połówki sinusoidy prądu wzmacnianego) lub w stan odcięcia (dla ujemnej połówki sinusoidy prądu wzmacnianego), co prowadzi do odkształcenia sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego (spłaszczenie części szczytowej). Mówimy wtedy o tzw. „przesterowania” wzmacniacza. Zauważmy, że spoczynkowy punkt pracy wzmacniacza znajduje się po środku prostej pracy między obszarami odcięcia i nasycenia. Maksymalna wartość amplitudy prądu bazy i_B powinna być tak dobrana, aby chwilowy punkt pracy tranzystora przemieszczał się po prostej pracy nie wykraczając poza założone punkty pracy P' i P'' (**praca liniowa tranzystora**).

3. Wykonanie pomiarów.

3.1. Wyznaczanie charakterystyk wejściowej i wyjściowej oraz wzmacnienia prądowego i napięciowego tranzystora bipolarnego.

Układ połączeń przedstawiono na rys. 1:



Rys. 1. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk wejściowej i wyjściowej oraz wzmacnienia prądowego i napięciowego tranzystora bipolarnego

Wykaz oznaczeń: P₁, P₂ - potencjometry, V - woltomierz cyfrowy, μA (zakres 2 mA), mA - mikro i miliamperomierz cyfrowy, T - tranzystor badany

a) Wyznaczanie charakterystyki wejściowej

Dla zadanych wartości napięcia kolektor-emiter U_{CE} zmieniając prąd bazy I_B pomierzyć napięcie baza-emiter U_{BE} . Wyniki pomiarów zestawień w tabelicy 3.1:

Tablica 3.1

Lp.	I_B	$U_{BE} (U_{CE} = 0)$	$U_{BE} (U_{CE} = 1)$	$U_{BE} (U_{CE} = 10)$
	μA	V (V)	V (V)	V (V)
1	0			
2	100			
3	200			
4	300			
5	500			
6	700			
7	1000			

Na podstawie uzyskanych wyników określić typ tranzystora bipolarnego oraz wykreślić charakterystyki $U_{BE} = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const}$. We wnioskach porównać przebieg wyznaczonych charakterystyk z przedstawionymi w części teoretycznej. Opisać w jaki sposób zmiana napięcia kolektor-emiter U_{CE} wpływa na przebieg wyznaczonych charakterystyk.

b) Wyznaczanie charakterystyki wyjściowej

Dla zadanych, ustalonych prądów bazy I_B , pomierzyć prąd kolektora zmieniając napięcie kolektor-emiter U_{CE} od 0 do 15 V. Wyniki pomiarów zestawić w tablicy 3.2:

Tablica 3.2

Lp.	U_{CE}	$I_C (I_B = 0)$	$I_C (I_B = 300)$	$I_C (I_B = 500)$	$I_C (I_B = 1000)$
	V	mA (μ A)	mA (μ A)	mA (μ A)	mA (μ A)
1	0				
2	0,1				
3	0,2				
4	0,5				
5	1,0				
6	5,0				
7	7,5				
8	10,0				
9	15,0				

Na podstawie uzyskanych wyników wykreślić charakterystyki $I_C=f(U_{CE})$ przy $I_B=const$. Porównać przebieg wyznaczonych charakterystyk z przedstawionymi w części teoretycznej. Opisać w jaki sposób zmiana prądu bazy I_B wpływa na przebieg wyznaczonych charakterystyk.

c) Wyznaczanie stałoprądowego wzmocnienia prądowego

Na podstawie pomiarów z podpunktu 3.1.b (Tablica 3.2) obliczyć wzmocnienie prądowe badanego tranzystora bipolarnego na podstawie zależności:

$$k_i = \frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{I_C}{I_B} \quad (6)$$

Wyniki zanotować w tablicy 3.3.

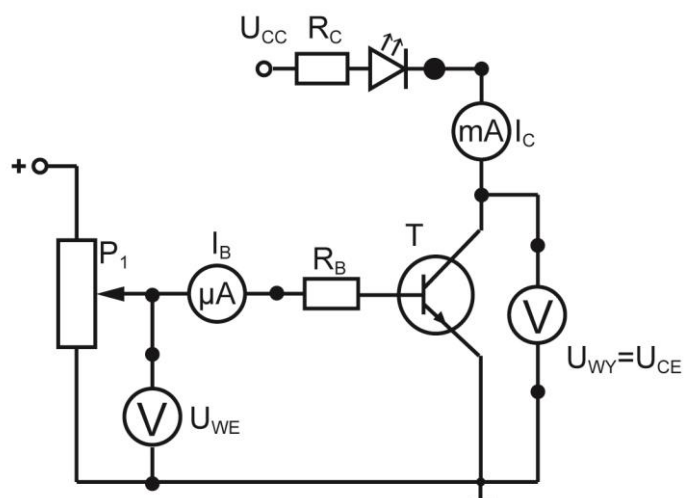
Tablica 3.3

Lp.	I_B	$I_C (U_{CE} = 0)$	k_i	$I_C (U_{CE} = 1)$	k_i	$I_C (U_{CE} = 10)$	k_i
	μ A	mA (V)	-	mA (V)	-	mA (V)	-
1	0						
2	300						
3	500						
4	1000						

We wnioskach wyjaśnić jak zmienia się wartość wzmocnienia prądowego badanego tranzystora bipolarnego wraz ze wzrostem prądu bazy I_B oraz napięcia U_{CE}

3.2 Praca tranzystora bipolarnego jako klucza sterowanego

Układ połączeń przedstawiono na rys. 2:



Rys. 2. Tranzystor bipolarny jako klucz sterowany

Dla zadanych wartości napięcia wejściowego U_{WE} pomierzyć prąd bazy I_B , prąd kolektora I_C oraz napięcie kolektor-emiter U_{CE} . Wyniki pomiarów zestawzić w tabelicy 3.4.

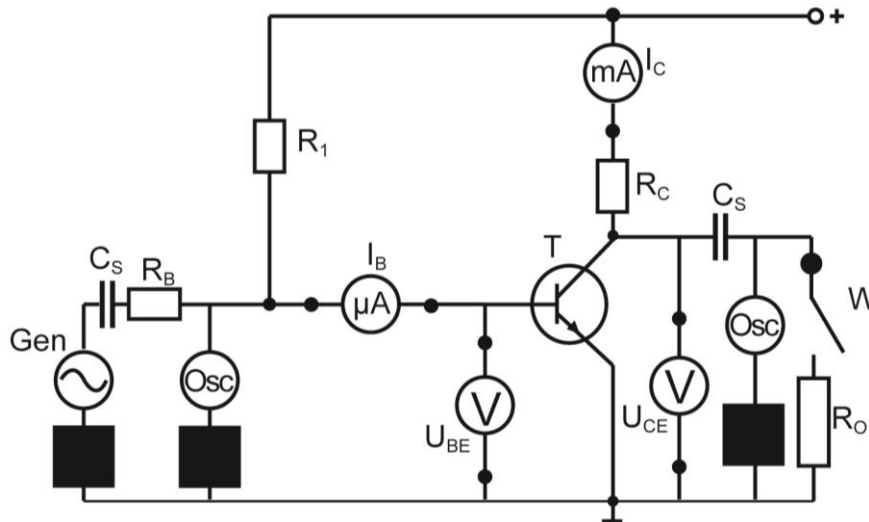
Tablica 3.4

Lp.	U_{WE}	I_B	I_C	$U_{WY} = U_{CE}$	R_{CE}
	V	μA	mA	V	Ω
1	0				
2	1				
3	2				
4	3				
5	4				
6	5				
7	6				
8	7				
9	8				
10	9				

Na wyznaczoną w podpunkcie 3.1.b charakterystykę wyjściową (narysowaną powtórnie) nanieść wyznaczone punkty pracy dla zadanych napięć wejściowych i wykreślić prostą pracy. Na tej podstawie wyznaczyć wartość napięcia zasilającego U_{CC} oraz obliczyć rezystancję w obwodzie kolektora. We wnioskach opisać w jaki sposób na położenie punktu pracy tranzystora wpływa napięcie wejściowe U_{WE} oraz jak dla danego punktu pracy zachowuje się dioda LED. Wykreślić charakterystyki $R_{CE} = f(U_{WE})$ oraz $U_{WY} = f(U_{WE})$ i skomentować ich przebiegi.

3.3 Wyznaczanie współczynnika wzmocnienia wzmacniacza w układzie OE.

Układ połączeń przedstawiono na rys. 3:



Rys. 3. Wzmacniacz OE z tranzystorem bipolarnym

Wykaz oznaczeń: G - generator, OSC - oscyloskop, R_0 - rezystancja obciążenia.

Uwaga: Do obserwacji napięcia U_{BE} oscyloskop należy podłączyć przez sondę napięciową. W celu ustawienia zadanej wartości napięcia wejściowego podłączyć wyjście generatora bezpośrednio do oscyloskopu przez trójnik.

Korzystając ze wskazań podłączonych do badanego układu multimetrów wyznaczyć stałoprądowy punkt pracy wzmacniacza.

Dla zadanych, międzyszczytowych wartości ΔU_{WE} sinusoidalnego napięcia wejściowego $f=1$ kHz pomierzyć za pomocą oscyloskopu odpowiadające im międzyszczytowe wartości sygnału wyjściowego ΔU_{WY} . Pomiarów dokonać przy otwartym i zamkniętym wyłączniku w.

Współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza obliczyć wg wzoru: $k_u = \frac{\Delta U_{WY}}{\Delta U_{WE}}$

Tablica 3.5

Lp.	ΔU_{WE} mV	w - otwarty		w - zamknięty	
		ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV
1	60				
2	120				
3	180				
4	240				
5	300				
6					
7					

Na podstawie pomiarów i obserwacji przebiegów na ekranie oscyloskopu zwiększając amplitudę sygnału wejściowego badanego wzmacniacza wyznaczyć ΔU_{WE}^* , począwszy, od

którego wzmacniacz wprowadza zniekształcenia sygnału. Z badać, czy charakter zniekształceń sygnału zmienia się wraz ze wzrostem amplitudy sygnału wejściowego. Przerysować przykładowe (co najmniej dwa) wykresy odkształconych napięć wyjściowych.

Ustawić $\Delta U_{WE} = 300 \text{ mV}$ zmieniając częstotliwość napięcia wejściowego od 1 kHz do 500 kHz, zgodnie z tabelą 3.6, wyznaczyć charakterystykę $k_u = F(f)$

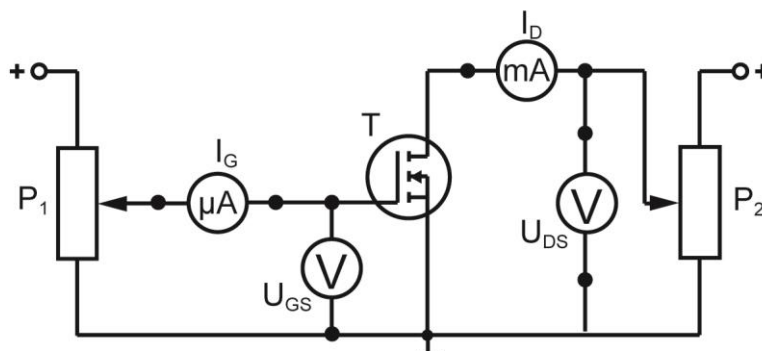
Tablica 3.6

Lp.	f kHz	w - otwarty		w - zamknięty	
		ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV
1	1				
2	10				
3	50				
4	80				
5	100				
6	200				
7	500				

Wykreślić charakterystyki $k_u = f(\Delta U_{WE})$ oraz $k_u = F(f)$ dla wyników pomiarowych wyznaczonych przy otwartym i zamkniętym wyłączniku w oraz skomentować ich przebieg (dlaczego i w jaki sposób rezystancja obciążenia R_o wpływa na k_u). Na wyznaczonej w podpunkcie 3.1.b charakterystykę wyjściową (narysowaną powtórnie) nanieść wyznaczony stałoprądowy punkt pracy wzmacniacza i dla napięcia zasilającego $U_{CC} = 9 \text{ V}$ wykreślić prostą pracy. Dla zmierzonych wartości napięcia ΔU_{WY} (tab. 3.5) zaznaczyć w jakim zakresie będzie zmieniać się położenie zmiennoprądowego punktu pracy wzmacniacza. Wyjaśnić dlaczego począwszy od pewnych wartości ΔU_{WE} dochodzi do odkształcenia sygnału wyjściowego.

3.4 Wyznaczanie charakterystyk przejściowej i wyjściowej oraz wzmocnienia prądowego i napięciowego tranzystora polowego.

Układ połączeń przedstawiono na rys. 4:



Rys. 4. Układ pomiarowy do wyznaczania charakterystyk przejściowej i wyjściowej oraz wzmocnienia prądowego i napięciowego tranzystora polowego

Wykaz oznaczeń: P_1 , P_2 - potencjometry, V - woltomierz cyfrowy, μA , mA - mikro i miliamperomierz cyfrowy, T - tranzystor badany

a) Wyznaczanie charakterystyki przejściowej

Dla zadanych wartości napięcia dren-źródło U_{DS} zmieniając napięcie bramka-źródło U_{GS} pomierzyć prąd drenu I_D . Wyniki pomiarów zestawić w tablicy 3.7:

Tablica 3.7

Lp.	U_{GS}	$I_D (U_{DS} = 1)$	$I_D (U_{DS} = 3)$	$I_D (U_{DS} = 5)$
	V	mA (V)	mA (V)	mA (V)
1	2,0			
2	2,2			
3	2,4			
4	2,6			
5	2,8			
6	3,0			

Na podstawie uzyskanych wyników określić typ tranzystora polowego oraz wykreślić charakterystyki $I_D = f(U_{GS})$ przy $U_{DS} = \text{const.}$ We wnioskach porównać przebieg wyznaczonych charakterystyk z przedstawionymi w części teoretycznej. Opisać w jaki sposób napięcie dren-źródło U_{DS} wpływa na przebieg wyznaczonych charakterystyk.

b) Wyznaczanie charakterystyki wyjściowej

Dla zadanych, ustalonych napięć bramka-źródło U_{GS} , pomierzyć prąd drenu I_D zmieniając napięcie dren-źródło U_{DS} . Wyniki pomiarów zestawić w tablicy 3.8.

Tablica 3.8

Lp.	U_{DS}	$I_D (U_{GS} = 2)$	$I_D (U_{GS} = 2,5)$	$I_D (U_{GS} = 3)$
	V	mA (V)	mA (V)	mA (V)
1	0			
2	0,1			
3	0,2			
4	0,4			
5	0,6			
6	1,0			
7	1,5			
8	2,0			
9	2,5			
10	3,0			
11	3,5			
12	4,0			
13	4,5			
14	5,0			

Na podstawie uzyskanych wyników wykreślić charakterystyki $I_D=f(U_{DS})$ przy $U_{GS}=\text{const.}$ We wnioskach porównać przebieg wyznaczonych charakterystyk z przedstawionymi w części

teoretycznej. Opisać w jaki sposób napięcie bramka-źródło U_{GS} wpływa na przebieg wyznaczonych charakterystyk.

c) Wyznaczanie stałoprądowego wzmocnienia napięciowego

Na podstawie pomiarów z podpunktu 3.4.a (Tablica 3.7) obliczyć wzmocnienie napięciowe badanego tranzystora polowego na podstawie zależności:

$$k_u = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{U_{DS}}{U_{GS}} \quad (8)$$

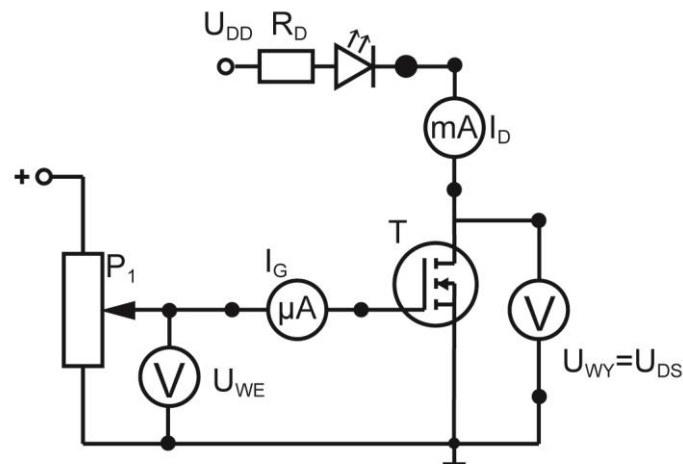
Tablica 3.9

Lp.	U_{GS}	$I_D (U_{DS} = 1)$	k_u	$I_D (U_{DS} = 3)$	k_u	$I_D (U_{DS} = 5)$	k_u
	V	mA (V)	-	mA (V)	-	mA (V)	-
1	2,0						
2	2,2						
3	2,4						
4	2,6						
5	2,8						
6	3,0						

We wnioskach wyjaśnić jak zmienia się wartość wzmocnienia napięciowego badanego tranzystora polowego wraz ze wzrostem napięcia bramki U_{GS} oraz napięcia U_{DS}

3.5 Praca tranzystora polowego jako klucza sterowanego

Układ połączeń przedstawiono na rys. 5:



Rys. 5. Tranzystor polowy jako klucz sterowany

Dla zadanych wartości napięcia wejściowego U_{WE} pomierzyć prąd drenu I_D i napięcie dren-źródło U_{DS} . Wyniki pomiarów zestawzić w tablicy 3.10.

Tablica 3.10

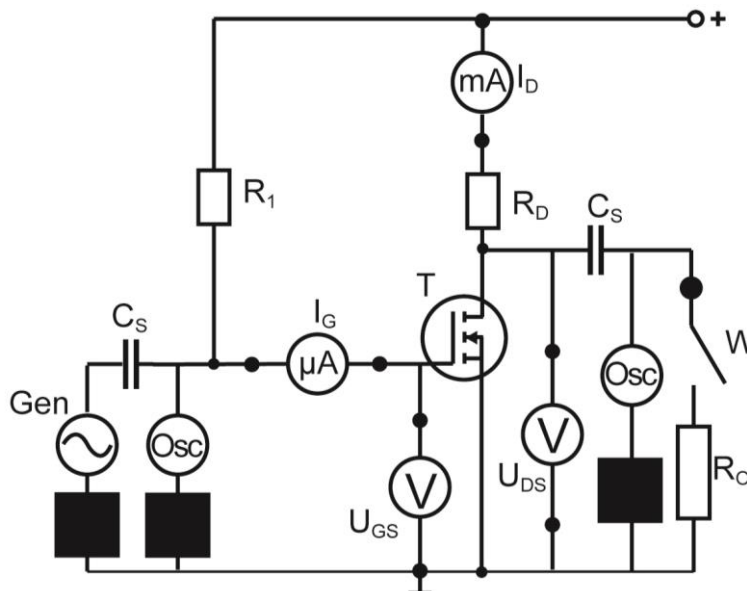
Lp.	U_{WE}	I_D	$U_{WY} = U_{DS}$	R_{DS}
-----	----------	-------	-------------------	----------

	V	A	V	Ω
1	0,5			
2	1,0			
3	1,5			
4	2,0			
5	2,2			
6	2,4			
7	2,6			
8	2,8			
9	3,0			

Na wyznaczoną w podpunkcie 3.4.b charakterystykę wyjściową (narysowaną powtórnie) nanieść wyznaczone punkty pracy dla zadanych napięć wejściowych i wykreślić prostą pracy. Na tej podstawie wyznaczyć wartość napięcia zasilającego U_{DD} oraz obliczyć rezystancję w obwodzie drenu. We wnioskach opisać w jaki sposób na punkt pracy tranzystora wpływa napięcie wejściowe U_{WE} oraz jak dla danego punktu pracy zachowuje się dioda LED. Wykreślić charakterystyki $R_{DS} = f(U_{WE})$ oraz $U_{WY} = f(U_{WE})$ i skomentować ich przebiegi.

3.6 Wyznaczanie współczynnika wzmocnienia wzmacniacza w układzie WS.

Układ połączeń przedstawiono na rys. 6:



Rys. 6. Wzmacniacz WS z tranzystorem polowym

Uwaga: Do obserwacji napięcia U_{GS} oscyloskop należy podłączyć przez sondę napięciową. W celu ustawienia zadanej wartości napięcia wejściowego podłączyć wyjście generatora bezpośrednio do oscyloskopu przez trójnik.

Korzystając ze wskazań podłączonych do badanego układu multimetrów wyznaczyć stałonapięciowy punkt pracy wzmacniacza.

Dla zadanych, międzyszczytowych wartości ΔU_{WE} sinusoidalnego napięcia wejściowego $f=1$ kHz pomierzyć za pomocą oscyloskopu odpowiadające im międzyszczytowe wartości sygnału wyjściowego ΔU_{WY} . Pomiarów dokonać przy otwartym i zamkniętym wyłączniku w.

Tablica 3.11

Lp.	ΔU_{WE}	w - otwarty		w - zamknięty	
	mV	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV
1	100				
2	200				
3	300				
4	400				
5	500				
6	600				
7					
8					

Na podstawie pomiarów i obserwacji przebiegów na ekranie oscyloskopu zwiększając amplitudę sygnału wejściowego badanego wzmacniacza wyznaczyć ΔU_{WE}^* , począwszy, od którego wzmacniacz wprowadza zniekształcenia sygnału. Zbadać, czy charakter zniekształceń sygnału zmienia się wraz ze wzrostem amplitudy sygnału wejściowego. Przerysować przykładowe (co najmniej dwa) wykresy odkształconych napięć wyjściowych.

Ustawić $\Delta U_{WE} = 400$ mV zmieniając częstotliwość napięcia wejściowego od 1 kHz do 500 kHz, zgodnie z tabelą 3.12, wyznaczyć charakterystykę $k_u = F(f)$

Tablica 3.12

Lp.	f	w - otwarty		w - zamknięty	
	kHz	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV	ΔU_{WY} mV	k_u mV/mV
1	1				
2	10				
3	50				
4	80				
5	100				
6	200				
7	500				

Wykonać analogiczne wykresy i analizy jak dla wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym. We wnioskach końcowych porównać oba badane tranzystory. Wskazać główne podobieństwa i różnice, także w zastosowaniu. Określić wady i zalety obu tranzystorów.