

Politechnika Łódzka
Instytut Systemów Inżynierii Elektrycznej

Instrukcja do ćwiczenia

Badanie tranzystorów i układów tranzystorowych.

Cel ćwiczenia.

Poznanie budowy i zasady działania tranzystorów bipolarnych i unipolarnych oraz układów elektronicznych wykorzystujących te elementy.

1. Podstawy teoretyczne.

1.1. Wstęp.

Wynalezienie w 1947 roku tranzystora ostrzowego dało podstawy do szybkiego rozwoju elektroniki. Tranzystory stały się podstawowymi elementami układów elektronicznych. Dążenie do zmniejszania wymiarów urządzeń zaowocowało powstaniem układów scalonych zawierających setki, tysiące a nawet miliony tranzystorów. Elementy takie są obecnie stosowane nie tylko w urządzeniach, które z nimi bezpośrednio kojarzymy np. komputery, sprzęt audiowizualny ale także w wielu innych, jak samochody, sprzęt gospodarstwa domowego itp. Dzięki mikroelektronice znacznie wzrosła funkcjonalność używanych przez nas urządzeń, pojawiło się także wiele nowych ułatwiających nam życie. Można więc śmiało powiedzieć, że wynalezienie tranzystora było jednym z najważniejszych wynalazków XX wieku.

1.2. Tranzystory - zasada działania, rodzaje, budowa.

Z punktu widzenia sposobu działania, tranzystory można podzielić na:

- tranzystory bipolarne;
- tranzystory unipolarne (polowe);
- tranzystory specjalne (np. jednozłączowe).

Oprócz tego najważniejszego sposobu klasyfikacji istnieje wiele innych np. ze względu na parametry (i wynikające stąd zastosowania):

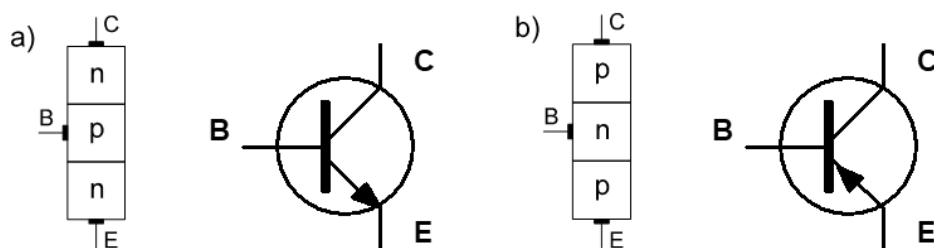
- tranzystory małej mocy;
- tranzystory dużej mocy;
- tranzystory małej częstotliwości;
- tranzystory dużej częstotliwości;
- tranzystory impulsowe.

Nazwa tranzystor pochodzi z języka angielskiego (transistor) i oznacza TRANSfer re-sISTOR czyli element transformujący rezystancję. Należy jednak podkreślić, że cecha zawarta w nazwie dotyczy tylko tranzystorów bipolarnych, pracujących w określonych stanach. Podstawowym zadaniem wszystkich tranzystorów jest przetwarzanie sygnałów elektrycznych, a przede wszystkim ich wzmacnianie.

1.2.1. Tranzystory bipolarne.

Nazwa tranzystor bipolarny obejmuje tranzystory, w których w przewodzeniu prądu biorą udział oba rodzaje nośników - elektrony i dziury, a sterowanie realizowane jest za pomocą prądu bazy. Wyróżniamy dwa rodzaje tranzystorów bipolarnych:

- tranzystory n-p-n;
- tranzystory p-n-p.

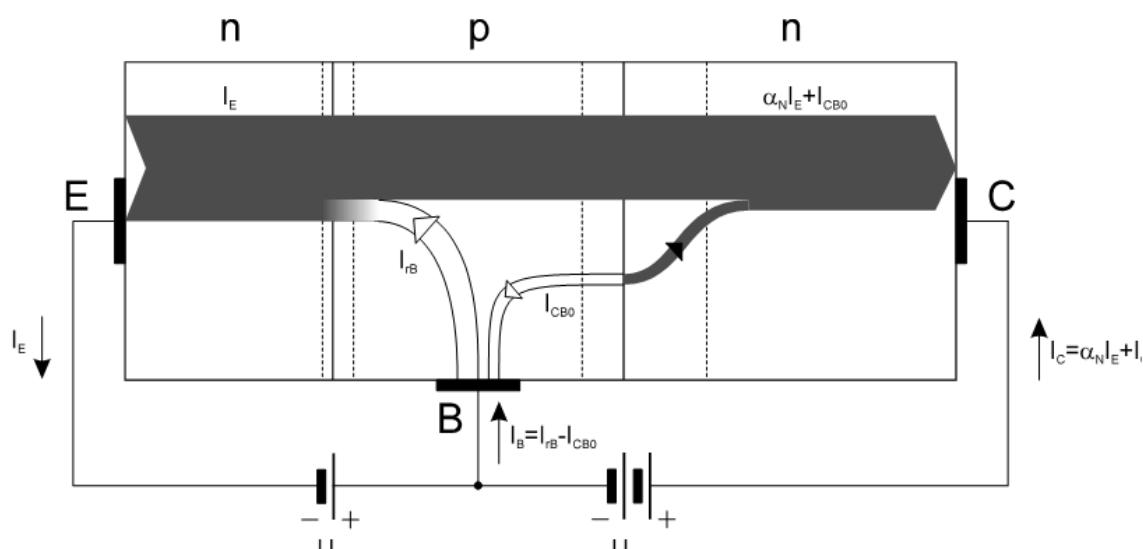


Rys. 1.1. Struktura i symbole tranzystorów bipolarnych: a) npn; b) pnp.

Struktura tranzystora bipolarnego składa się z trzech, różnie domieszkowanych warstw półprzewodnika. Kolejne obszary półprzewodnika nazywane są: E - emiter, B - baza, C - kolektor. Do warstw tych dołączone są metaliczne wyprowadzenia zwane elektrodami tranzystora. Na styku obszarów istnieją typowe złącza p-n (złącze emiter - baza oraz złącze kolektor - baza).

1.2.1.1. Działanie tranzystora bipolarnego.

Rozpatrzmy układ jak na rys. 1.2 z tranzystorem n-p-n.



Rys. 1.2. Zjawiska zachodzące w tranzystorze bipolarnym.

Złącze emiter - baza (EB) spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia. Przez złącze płynie więc prąd nośników większościowych (elektrony z emitera są wstrzykiwane do bazy). Część elektronów rekombinuje w bazie z dziurami. Ubytek dziur, w tym obszarze, jest rekompensowany strumieniem nośników z zewnętrznego obwodu bazy (prąd bazy). Szerokość obszaru bazy jest niewielka w porównaniu z szerokością pozostałych obszarów tranzystora. Przeważająca część elektronów z emitera (ponad 90%) nie zdoła ulec rekombinacji z dziurami i przedostaje się w strefę działania silnego pola elektrycznego, istniejącego w złączu kolektor - baza (CB), spolaryzowanym w kierunku zaporowym. Pole to „wciąga” elektrony w głąb obwodu kolektora. Widać stąd, że prąd kolektora jest mniejszy od prądu emitera o wartość równą prądowi bazy, wynikającą z rekombinacji nośników w obszarze bazy.

$$I_C = I_E - I_B$$

O tym, jaką część prądu emitera stanowi prąd kolektora mówi nam tzw. współczynnik wzmocnienia prądu stałego w układzie OB (wspólnej bazy) - α_N .

$$\alpha_N I_E = I_C$$

Tranzystor jest tym lepszy im większe jest jego wzmocnienie. Aby zwiększyć α_N należy zmniejszyć liczbę rekombinujących w bazie nośników. Obecnie wytwarzane tranzystory są to tzw. tranzystory epiplanarne posiadające dodatkowo wbudowane pole elektryczne w bazie. Realizuje się to poprzez nierównomierne domieszkowanie obszaru bazy. W rozpatrywanym przypadku (tranzystor n-p-n) koncentracja domieszek akceptorowych (dziury) maleje w kierunku od emitera do kolektora wywołując pole, które unosi (przyspiesza) elektrony w stronę kolektora, a zatem zmniejsza liczbę rekombinujących w bazie nośników (zmniejsza się prąd bazy). Wartość współczynnika wzmocnienia α_N wzrasta.

Rozpatrując działanie rzeczywistego tranzystora należy uwzględnić istnienie tzw. prądu wstecznego złącza CB - I_{CB0} . Prąd wsteczny jest strumieniem nośników generowanych termicznie w warstwie zaporowej złącza CB, spolaryzowanego w kierunku zaporowym. Prąd ten sumuje się z prądem kolektora, stąd całkowity prąd w obwodzie kolektora wynosi:

$$I_C = \alpha_N I_E + I_{CB0}$$

zaś prąd w obwodzie bazy:

$$I_B = I_{rB} = I_{CB0}$$

gdzie I_{rB} - prąd rekombinacji nośników w bazie.

W nowoczesnych tranzystorach wartość współczynnika α_N zawiera się w granicach od 0,9 do 0,999.

Wiedząc, że rezystancja złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia jest bardzo mała (w naszym przypadku złącze EB) oraz, że rezystancja złącza spolaryzowanego w kierunku zaporowym jest bardzo duża (tutaj złącze CB) widzimy, że nawet przy braku wzmocnienia prądowego ($\alpha_N < 1$) można uzyskać duże wzmocnienie mocy, ponieważ prąd z obwodu o małej rezystancji (I_E) jest przeniesiony prawie całkowicie do obwodu o bardzo dużej rezystancji (I_C) $I_E \approx I_C$ (stąd transformacja rezystancji).

$$P_{WE} = I_E^2 R_{WE} \quad P_{WY} = I_C^2 R_{WY}$$

gdzie: P_{WE} - moc dostarczana, P_{WY} - moc odbierana z tranzystora.

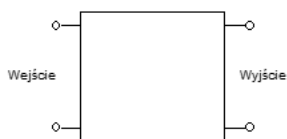
Aby otrzymać maksymalne wzmocnienie należy zapewnić: $R_{EB} \approx R_{WE}$; $R_{CB} \approx R_{WY}$ (warunek dopasowania), stąd:

$$R_{EB} \ll R_{CB} \rightarrow R_{WE} \ll R_{WY} \rightarrow P_{WE} \ll P_{WY}$$

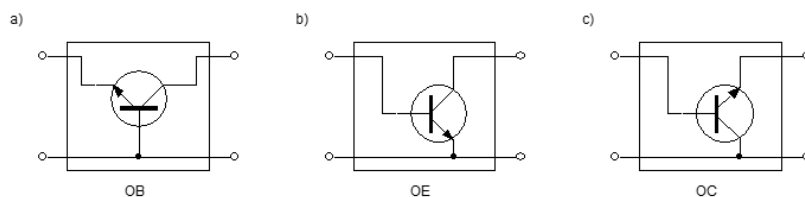
Powyższe rozważania dotyczyły tranzystorów n-p-n, ale można je rozszerzyć na tranzystory p-n-p, zmianie ulegną wtedy biegunowości napięć zasilających i rodzaje nośników prądu.

1.2.1.2 Układy pracy tranzystora bipolarnego.

Najłatwiej jest rozpatrywać pracę tranzystora traktując go jako czwórnik liniowy czyli element posiadający dwa zaciski wejściowe i dwa wyjściowe.



Rys. 1.3. Symbol czwórnikowy.



Rys. 1.4. Układy pracy tranzystora bipolarnego: a) układ ze wspólną bazą; b) układ ze wspólnym emiterem; c) układ ze wspólnym kolektorem.

W związku z tym, że tranzystor ma trzy zaciski, jedna z jego rzeczywistych elektrod musi być wspólna dla obwodu wejściowego i wyjściowego czwornika. Istnieją trzy sposoby włączenia tranzystora do układu, tzw. **układy pracy**:

- ze wspólną bazą OB,
- ze wspólnym emiterem OE,
- ze wspólnym kolektorem OC.

Każdy z tych układów różni się parametrami, tym niemniej zjawiska zachodzące w tranzystorze są zawsze takie same. Praca układu ze wspólną bazą OB została omówiona w punkcie 1.2.1.1 podczas wyjaśniania zasady działania tranzystora. Wzmocnienie prądowe w tym układzie (OB) wynosi:

$$k_i = \frac{\Delta I_{wy}}{\Delta I_{we}} = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_E} = \alpha \approx \alpha_N \quad (0,9 \dots 0,999);$$

gdyż prądem wyjściowym jest tutaj prąd kolektora, zaś wejściowym prąd emitera. Analogicznie wzmocnienie prądowe w układzie OE:

$$k_i = \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \frac{\alpha}{1-\alpha} = \beta \approx \beta_N \quad (10 \dots 1000).$$

Wzmocnienie prądowe w układzie OC:

$$k_i = \frac{\Delta I_E}{\Delta I_B} = \frac{\Delta I_C + \Delta I_B}{\Delta I_B} = \beta + 1 \approx \beta_N + 1$$

Gdzie:

α_N i β_N odpowiednio współczynniki wzmocnienia prądu stałego w układzie OB i OE,

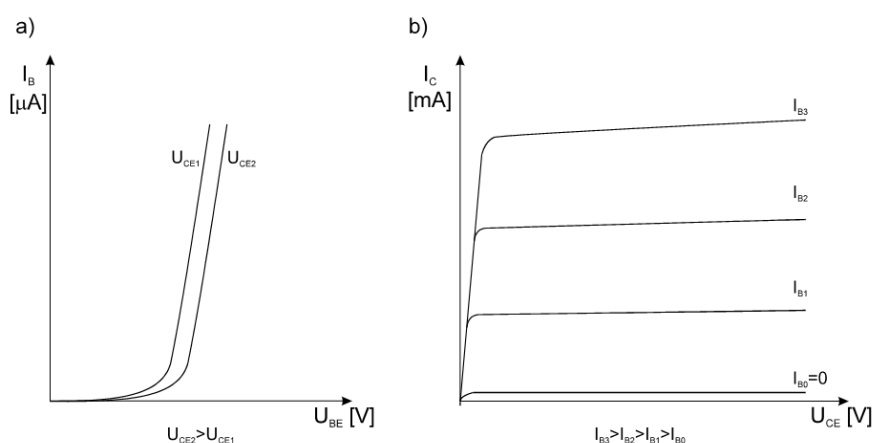
α i β odpowiednio współczynniki wzmocnienia sygnałów zmiennych w układzie OB i OE.

Podstawowe parametry układów OB, OE, OC podane są w tabeli 1.1.

Tabela 1.1.

układ \ parametr	OB	OE	OC
k_i wzmocnienie prądowe	małe $\sim \alpha < 1$	duże $\sim \beta$	największe $\sim \beta + 1$
k_u wzmocnienie napięciowe	największe	duże	małe
$k_p = k_u k_i$ wzmocnienie mocy	duże	największe	małe
R_{we} rezystancja wejściowa	najmniejsza	mała	największa
R_{wy} rezystancja wyjściowa	największa	duża	najmniejsza

1.2.1.3 Charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego.



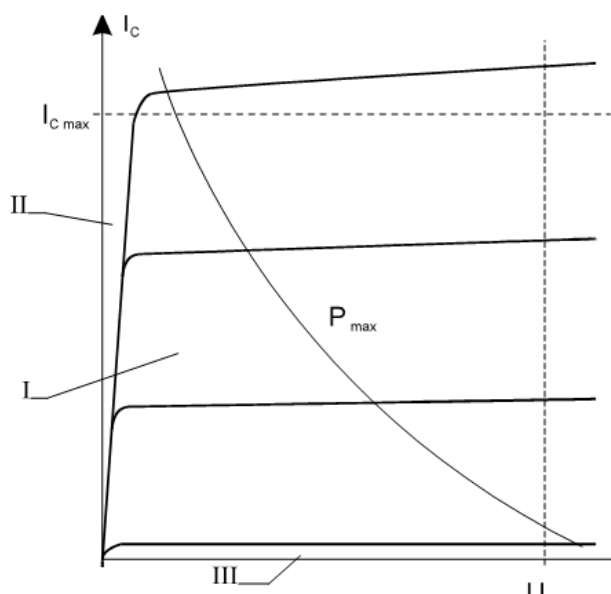
Rys. 1.5. Charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego pracującego w układzie OE:
a) charakterystyki wejściowe; b) charakterystyki wyjściowe.

Przy projektowaniu układów tranzystorowych bardzo przydatna jest znajomość prądowo-napięciowych charakterystyk statycznych (charakterystyk wyznaczonych przy powolnych zmianach napięcia i prądu). Przykładowe charakterystyki dla układu ze wspólnym emiterem OE znajdują się na rys. 1.5.

1.2.1.4. Obszary pracy tranzystora bipolarnego.

Ze względu na istnienie dwóch złączy p-n, z których każde można spolaryzować na dwa sposoby istnieją cztery zakresy pracy tranzystora bipolarnego:

- **Obszar aktywny normalny** (obszar I na rys. 1.6);
 - ♦ złącze EB spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
 - ♦ złącze CB spolaryzowane w kierunku zaporowym.
- **Obszar nasycenia** (obszar II);
 - ♦ złącze EB spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
 - ♦ złącze CB spolaryzowane w kierunku przewodzenia.
- **Obszar zatkania** (obszar III);
 - ♦ złącze EB spolaryzowane w kierunku zaporowym,
 - ♦ złącze CB spolaryzowane w kierunku zaporowym.
- **Obszar aktywny inwersyjny**;
 - ♦ złącze EB spolaryzowane w kierunku zaporowym,
 - ♦ złącze CB spolaryzowane w kierunku przewodzenia.



Rys.1.6. Obszary pracy tranzystora bipolarnego na charakterystyce wyjściowej.

Najczęściej wykorzystywanym obszarem pracy jest zakres aktywny normalny. Tranzystor ma wtedy własności wzmacniające. Pracę w zakresach nasycenia i zatkania wykorzystuje się w układach cyfrowych, przełączających. Tranzystor pracuje wtedy dwustanowo (jako tzw. klucz), wchodząc na zmianę w stan nasycenia bądź w stan zatkania.

1.2.2. Tranzystory unipolarne (polowe).

Nazwa tranzystor unipolarny obejmuje wszystkie tranzystory, w których przepływ prądu jest wywołany przez transport nośników jednego rodzaju (stąd nazwa tranzystor unipolarny). W przeciwieństwie do tranzystorów bipolarnych, które są sterowane prądem (prądem bazy), w tranzystorach unipolarnych prąd wyjściowy jest sterowany polem elektrycznym, zależnym od napięcia (stąd nazwa tranzystor polowy - ang. FET - Field-Effect Transistor). Mamy więc tu do czynienia ze sterowaniem napięciowym.

Tranzystory polowe dzielimy na dwie grupy:

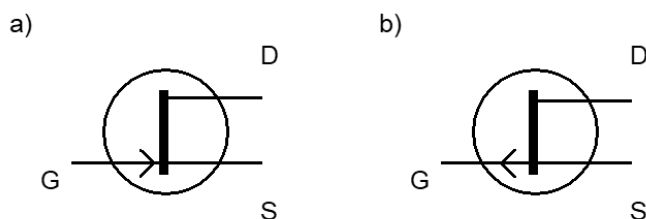
- złączone - JFET (ang. Junction FET):
 - ♦ tranzystory polowe ze złączem p-n PNFET;
 - ♦ tranzystory polowe ze złączem metal-półprzewodnik MESFET (ang. Metal-Semiconductor FET);
- z izolowaną bramką:
 - ♦ tranzystory polowe z bramką izolowaną tlenkiem krzemu MOSFET (ang. Metal-Oxide Semiconductor FET).

Charakterystyczne dla wszystkich tranzystorów polowych jest posiadanie tzw. **kanalu**, którego szerokość jest regulowana polem elektrycznym.

1.2.2.1. Tranzystory unipolarne ze złączem p-n PNFET.

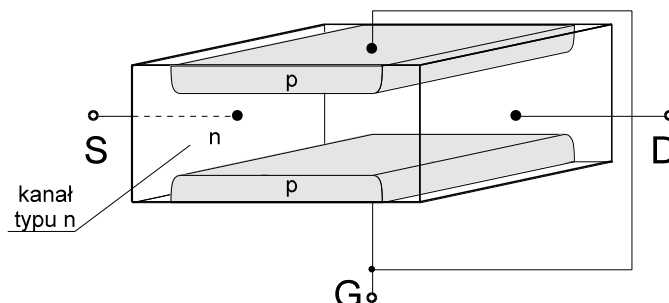
Istnieją dwa rodzaje tranzystorów PNFET:

- tranzystory z kanałem typu n,
- tranzystory z kanałem typu p.



Rys. 1.7. Symbole tranzystora unipolarnego PNFET:
a) z kanałem typu n; b) z kanałem typu p

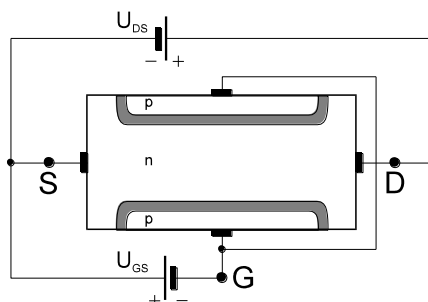
Na rys. 1.7 jest przedstawiono uproszczoną strukturę tranzystora PNFET z kanałem typu n.



Rys. 1.8. Struktura tranzystora PNFET.

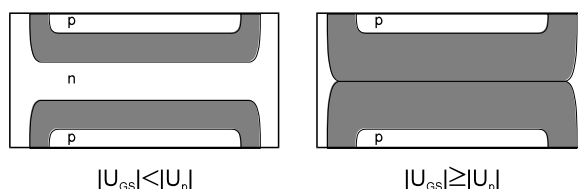
Elektrody S i D nazywane odpowiednio źródło (ang. Source) i dren (ang. Drain), są dołączone do kanału wykonanego z półprzewodnika typu n. Elektroda sterująca - bramka G (ang. Gate) jest połączona z obszarem typu p. Prąd w kanale (prąd wyjściowy) jest tworzony przez strumień tylko

nośników większościowych (w tym przypadku elektronów). Podczas normalnej pracy, elektrody tranzystora PNFET są spolaryzowane w sposób widoczny na rys. 1.9.



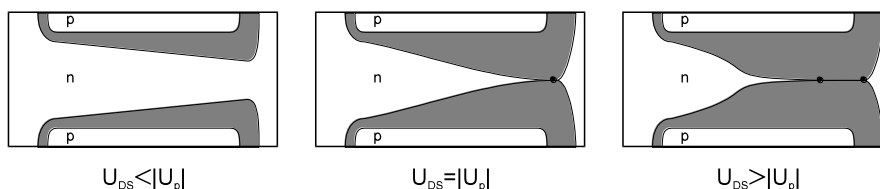
Rys. 1.9. Podstawowy układ pracy tranzystora PNFET z kanałem typu n.

Do elektrody G (połączonej z warstwami typu p) jest przyłożony ujemny biegun źródła napięcia U_{GS} , zaś do elektrody S dodatni (warstwa n). Są to złącza p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym. Na styku obszarów (bramka i kanał) pojawia się obszar ładunku przestrzennego, którego szerokość zależy od wartości napięcia U_{GS} . Jeżeli napięcie to osiągnie wartość równą U_p (tzw. napięcie progowe) przekrój kanału maleje do zera.



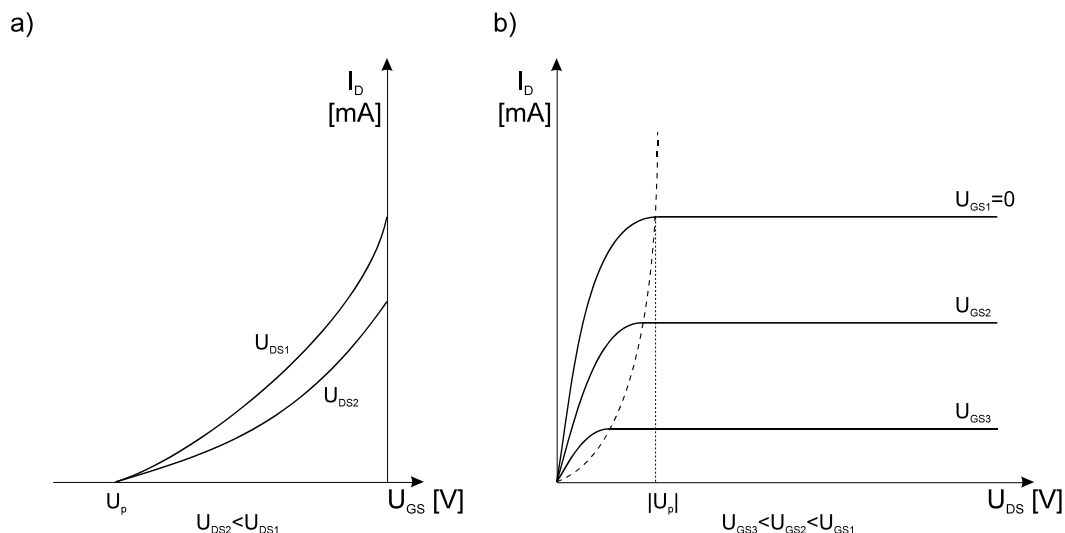
Rys. 1.10. Zmiana szerokości kanału przy napięciu $U_{DS}=0$.

Kształt obszaru ładunku przestrzennego zależy również od napięcia U_{DS} . Wzrost tego napięcia powoduje zmiany pokazane na rys. 1.11. Zmiana szerokości kanału powoduje zmianę jego rezystancji, tym samym ulega zmianie prąd kanałowy I_D wymuszony przez źródło napięcia U_{DS} .



Rys. 1.11. Zmiana szerokości kanału przy $U_{DS}>0$.

Dla napięcia $U_{DS} = U_p - U_{GS}$ kanał się zamyka, ale dzięki istnieniu pola elektrycznego od napięcia U_p nośniki mogą w dalszym ciągu przemieszczać się od źródła do drenu. Dalszy wzrost U_{DS} zwiększa obszar strefy zaporowej. Mimo to prąd pozostaje stały, ponieważ zwiększa się natężenie pola elektrycznego pochodzącego od napięcia U_{DS} . Nośniki są tutaj wciągane do obszaru warstwy zaporowej tak samo jak nośniki wciągane z bazy do kolektora w tranzystorze bipolarnym. Opisane zjawiska wyjaśniają charakterystyki statyczne tranzystora unipolarnego ze złączem p-n.



Rys. 1.12. Charakterystyki statyczne tranzystora unipolarnego PNFET:
a) charakterystyki przejściowe; b) charakterystyki wyjściowe.

Prąd drenu jest sterowany polem elektrycznym zależnym od napięcia bramki U_{GS} . Dzięki odpowiedniej polaryzacji (na wejściu złącze p-n spolaryzowane w kierunku zaporowym) tranzystory polowe PNFET osiągają bardzo duże wartości rezystancji wejściowych: $10^6 \div 10^8 \Omega$. Jeszcze większe wartości rezystancji wejściowych ($10^{12} \div 10^{14} \Omega$) osiągane są w tranzystorach MOSFET. Ich bramka jest izolowana od kanału warstwą izolatora - tlenku krzemu stąd nazwa tranzystory z izolowaną bramką.

1.3. Zastosowania tranzystorów.

1.3.1. Wzmacniacze.

Wzmacniacz jest przyrządem służącym do sterowania większej mocy mocą mniejszą. Wzmacniacz elektryczny zamienia sygnał wejściowy (napięcie, prąd) o mocy p_1 na sygnał wyjściowy o mocy p_2 , przy czym $p_2 \gg p_1$. Z punktu widzenia charakteru wzmacnianego sygnału wzmacniacze można podzielić na:

- napięciowe;
- prądowe;
- mocy;

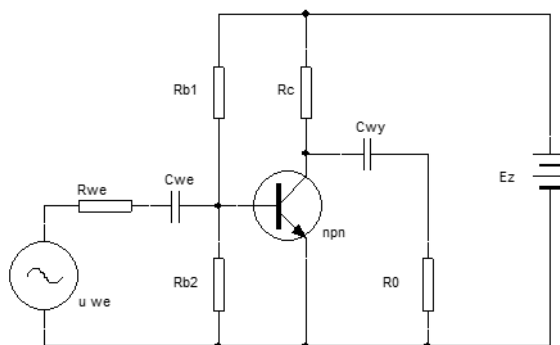
oraz

- prądu stałego;
- prądu zmiennego.

Dobrym przykładem wzmacniacza elektrycznego jest wzmacniacz mikrofonowy przetwarzający bardzo słaby sygnał (o niewielkiej mocy) pochodzący z cewki mikrofonu na silny sygnał (o dużej mocy) doprowadzony do głośnika. Inny przykład to wzmacniacz antenowy stosowany wtedy gdy odbiornik telewizyjny jest zbyt oddalony od nadajnika. Należy zauważyć, że np. transformator nie jest wzmacniaczem, pomimo posiadania możliwości zwiększania napięcia lub prądu, ponieważ moce: dostarczona do transformatora i odbierana są sobie w przybliżeniu równe.

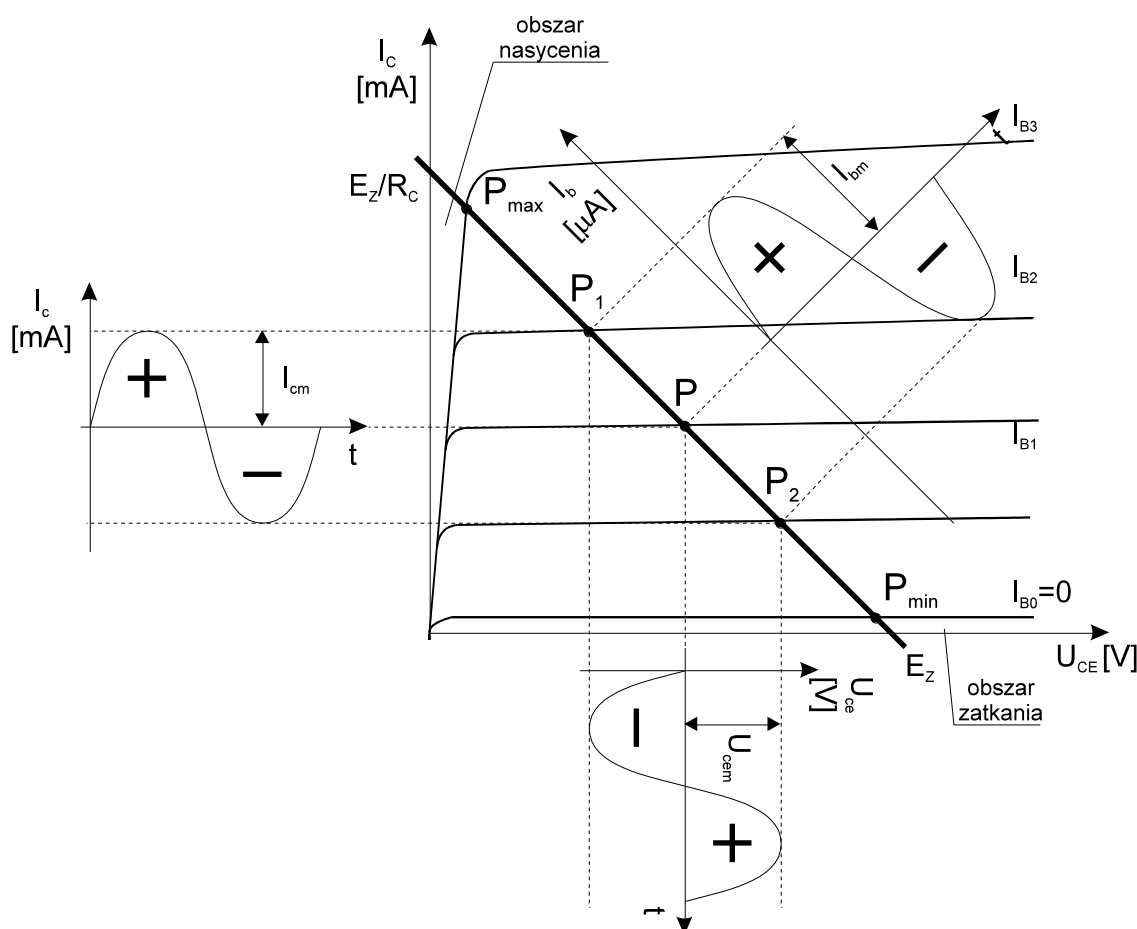
1.3.1.1. Wzmacniacz tranzystorowy.

Ze względu na swoje właściwości wzmacniające tranzystory są bardzo często stosowane w układach wzmacniaczy elektronicznych. Schemat najprostszego wzmacniacza jest przedstawiony na rys. 1.13.



Rys. 1.13. Schemat wzmacniacza tranzystorowego.

Tranzystor bipolarny pracuje tutaj w układzie wspólnego emitera OE. Takie rozwiązanie daje największe z możliwych wzmocnienie mocy. Zasadniczym zadaniem rozpatrywanego układu jest wzmocnienie sygnałów zmiennych w czasie. Do prawidłowej pracy tranzystora niezbędna jest odpowiednia polaryzacja jego elektrod (równoważna z przepływem odpowiednich prądów stałych). Do tego celu służą rezystory R_{B1} , R_{B2} oraz R_C . Ich wartości dobiera się tak, aby tranzystor pracował w stanie aktywnym normalnym. Elementy U_{we} i R_{we} to odpowiednio: źródło sygnałów zmiennych i jego rezystancja wewnętrzna. Kondensatory nie przewodzą prądu stałego. Tym samym kondensator C_{we} przepuszcza do bazy tylko sygnały zmiennie i tylko one będą wzmacniane. Dzięki istnieniu kondensatora C_{wy} , na obciążeniu R_o będzie występował wzmocniony sygnał zmienny, nie będzie zaś składowej stałej. Proces wzmocnienia sygnału najłatwiej można objaśnić korzystając z charakterystyk statycznych tranzystora (rys. 1.14).



Rys. 1.14. Analiza graficzna wzmacniacza z tranzystorem pracującym w układzie OE.

Przy braku sygnału z generatora przez bazę płynie stały prąd I_B , który wywołuje przepływ stałego prądu kolektora I_C . Tranzystor znajduje się w stanie określonym przez tzw. **punkt pracy** P leżący na przecięciu prostej obciążenia i odpowiedniej dla płynącego prądu $I_B(P)$ gałęzi charakterystyki wyjściowej. Prosta obciążenia przechodzi przez punkty: E_Z na osi U_{CE} i E_Z/R_C na osi I_C . Jej nachylenie zależy więc od wartości rezystancji w obwodzie kolektora R_C . Punkt pracy P można zmieniać zwiększając bądź zmniejszając spoczynkowy, stały prąd bazy, który zależy od wartości rezystancji R_{B1} i R_{B2} (punkt P przesuwa się wtedy po prostej obciążenia). Pojawienie się sygnału wejściowego (napięcie sinusoidalnie zmienne z generatora) wywołuje przepływ dodatkowej składowej zmiennej prądu w obwodzie bazy, która spowoduje przesuwanie się punktu pracy, cyklicznie: od punktu P poprzez P_1 , P , P_2 i z powrotem do P . W efekcie pojawia się składowa zmienna prądu kolektora o wartości maksymalnej I_{Cm} większej β razy od wartości maksymalnej składowej zmiennej prądu bazy I_{Bm} . Dodatkowo połowce prądu wejściowego odpowiada ujemna połówka napięcia wyjściowego, więc wzmacniacz z tranzystorem w układzie OE odwraca fazę wzmacnianego sygnału. Jeżeli punkt pracy przesunie się do punktu P_{max} , tranzystor wejdzie w stan nasycenia, natomiast jeżeli punkt pracy przejdzie do punktu P_{min} , tranzystor wejdzie w stan zatkania. Przebiegi wyjściowe stają się wtedy zniekształcone (obcinane są dodatnie lub ujemne połówki sygnału wyjściowego).

1.3.1.2. Generatory.

Generator drgań elektrycznych jest to urządzenie wytwarzające przebiegi elektryczne o stałej amplitudzie (niegasnące), najczęściej zmieniające się w sposób okresowy. Pod względem energetycznym generator przetwarza energię pochodzącą ze źródła zasilania (energia prądu stałego) na energię prądu zmiennego. Generator wytwarza przebiegi bez zewnętrznego sygnału pobudzającego, stąd parametry drgań zależą tylko od budowy i właściwości układu.

Ze względu na rodzaj generowanych przebiegów generatory dzielimy na:

- generatory przebiegów sinusoidalnych,
- generatory przebiegów niesinusoidalnych (np. prostokątnych, trójkątnych).

W zależności od charakteru obwodu decydującego o częstotliwości wytwarzanego sygnału rozróżnia się:

- generatory LC - z obwodem rezonansowym LC (drgania o wielkiej częstotliwości),
- generatory RC - z filtrem RC (drgania o niskiej częstotliwości),
- generatory elektromechaniczne - z drgającymi elementami mechanicznymi (np. oscylator kwarcowy).

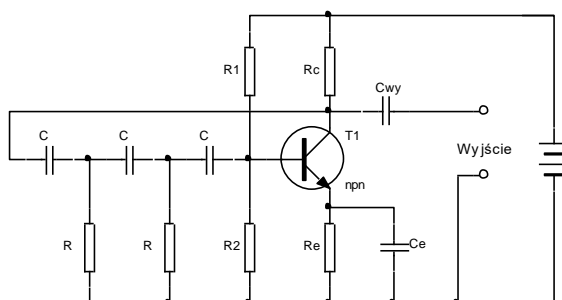
Przykładem zastosowań generatorów może być np. generator fali nośnej nadajnika telewizyjnego o częstotliwości drgań rzędu setek MHz, a także generator częstotliwości wzorcowej w zegarku elektronicznym o częstotliwości rzędu dziesiątek kHz.

Każdy generator składa się z układu wzmacniającego i układu dodatniego sprzężenia zwrotnego. Sprzężenie zwrotne polega na doprowadzeniu części sygnału wyjściowego na wejście wzmacniacza. W zależności od tego czy sygnał wyjściowy dodaje się do sygnału wejściowego czy odejmuje mamy sprzężenie dodatnie lub ujemne. Sprzężenie dodatnie sprzyja generacji drgań. Własności jakie muszą spełniać: wzmocnienie wzmacniacza bez sprzężenia K_u i współczynnik sprzężenia zwrotnego K_s , określający jaka część sygnału wyjściowego jest przenoszona na wejście stanowią tzw. **warunki generacji**:

- warunek amplitudy $|K_u K_s| \geq 1$
- warunek fazy $\varphi + \psi = 2\pi n$,

gdzie: φ i ψ odpowiednio przesunięcie fazowe toru wzmacniacza i układu sprzężenia zwrotnego.

Generator RC z przesuwnikiem fazy (generator drgań sinusoidalnych).



Rys. 1.15. Schemat generatora RC z przesuwnikiem fazy.

Układ składa się ze wzmacniacza tranzystorowego pracującego w układzie wspólnego emitera oraz przesuwnika fazy włączonego między wyjście a wejście wzmacniacza. Tranzystor w układzie OE wprowadza przesunięcie fazowe π (odwraca fazę). Aby spełniony był warunek fazy, człon sprzężenia (tutaj przesuwnik fazy złożony z trzech członów RC połączonych szeregowo) powinien przesuwać fazę o kolejne π , co da w efekcie żądane przesunięcie 2π . Z analizy matematycznej takiego układu RC wynika, że kąt π uzyskuje się dla częstotliwości drgań f_r

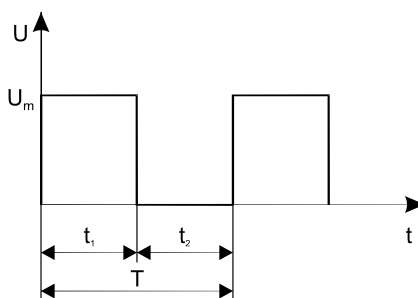
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{6}RC}$$

gdzie: R i C są wartościami elementów pojedynczego członu.

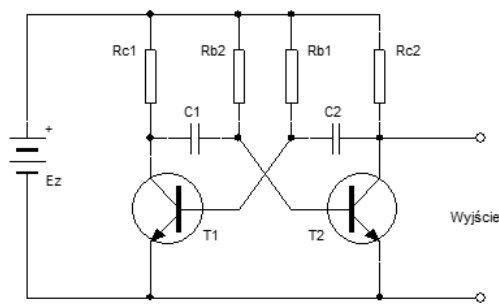
Układ przesuwnika wprowadza znaczne tłumienie sygnału, stąd wzmacniacz musi posiadać duże wzmocnienie napięciowe aby spełniony był warunek amplitudy.

Multiwibrator astabilny (generator drgań prostokątnych).

Idealny przebieg prostokątny pokazano na rys. 1.16. Charakteryzuje się on amplitudą U_m , okresem T , i współczynnikiem wypełnienia $\gamma = t_1/T$. Schemat multiwibratora astabilnego jest pokazany na rys. 1.17.

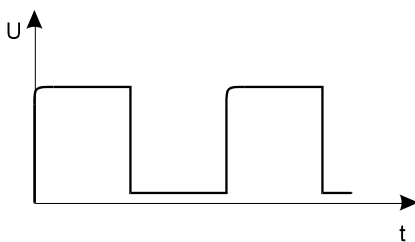


Rys. 1.16. Idealny przebieg prostokątny.



Rys. 1.17. Schemat multiwibratora astabilnego.

Układ powyższy stanowi właściwie dwustopniowy wzmacniacz tranzystorowy z wyjściem bezpośrednio dołączonym do wejścia. Warunek fazy jest tu spełniony automatycznie bowiem każdy ze stopni wzmacniacza (układ WE) przesuwa fazę o π co daje w sumie 2π . Współczynnik układu sprzężenia zwrotnego K_s wynosi 1, ponieważ jest to bezpośrednie połączenie wejścia z wyjściem. Warunek amplitudy jest też spełniony - $K_u K_s \gg 1$, ponieważ wzmocnienie napięciowe szeregowego połączenia dwóch wzmacniaczy (tranzystorów) $K_u \gg 1$. Tranzystory pracują tu przemiennie, w stanach zatkania i nasycenia. Jeżeli tranzystor T_1 jest w stanie nasycenia, to T_2 jest w stanie zatkania. W tej sytuacji mamy do czynienia z ładowaniem kondensatora C_1 przez opornik R_{B2} . Gdy napięcie na bazie T_2 osiągnie wartość potrzebną do pokonania bariery potencjału złącza p-n (dla Si 0,7V), tranzystor T_2 wchodzi w stan nasycenia powodując zatkanie tranzystora T_1 . Proces ten przebiega cyklicznie, czego efektem jest przebieg wyjściowy obserwowany na kolektorze dowolnego z tranzystorów.



Rys. 1.17. Przebiegi wyjściowe w multiwibratorze astabilnym.

Otrzymany przebieg nie jest idealnie prostokątny. Wynika to z istnienia skończonych stałych czasowych ładowania kondensatorów $R_{B1}C_2$ i $R_{B2}C_1$.

Można wykazać, że okres drgań wynosi tutaj:

$$T = 0,69(R_{B1}C_2 + R_{B2}C_1),$$

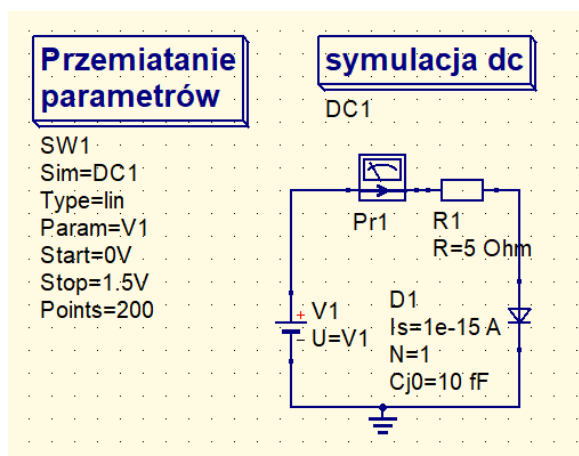
stąd częstotliwość drgań:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{0,69(R_{B1}C_2 + R_{B2}C_1)}.$$

2 Część wykonawcza

2.1 Charakterystyka statyczna diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia

Charakterystyka statyczna diody wyznaczona będzie w układzie z rysunku 2.1.



Rys. 2.1 Układ do wyznaczenia charakterystyki statycznej diody prostowniczej spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

W układzie wykorzystano następujące elementy:

V1 – źródło napięcia dc


D – diodę prostowniczą 1N4002 (D1N4002)

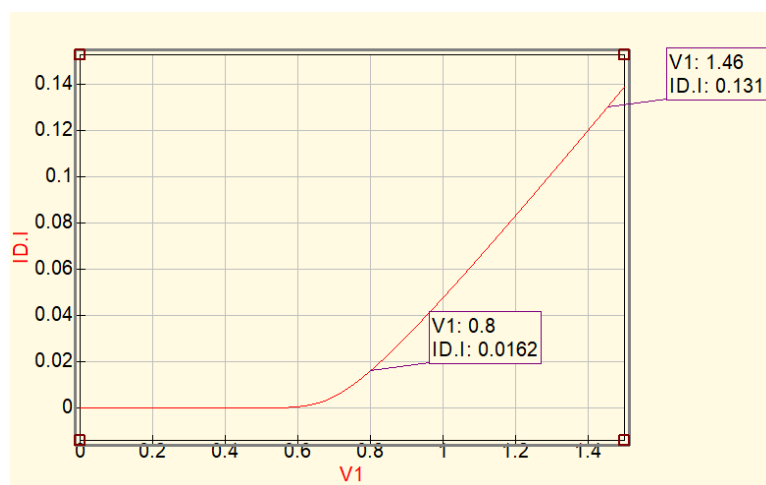
I – miernik prądu

R1 - rezystor

Podłączenie źródła napięcia tak jak na rysunku 2 polaryzuje diodę w kierunku przewodzenia. Na schemacie umieścić symulację dc, przemiatanie parametrów oraz zdefiniować zakres zmiany napięcia V1 od 0 do 1,5V z krokiem 5mV.

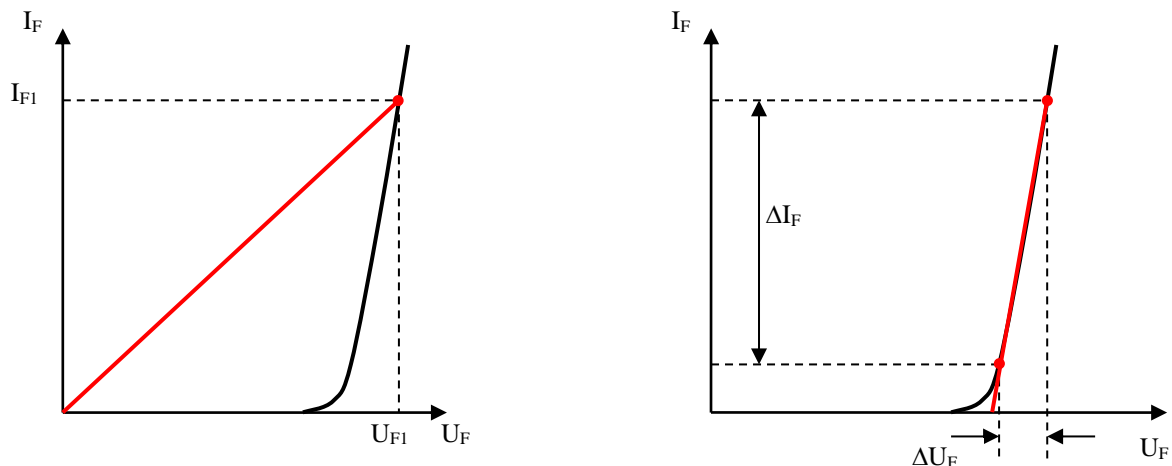
Po wykonaniu symulacji, w nowym oknie, wyświetli charakterystykę zmiany prądu płynącego przez

diodę w funkcji napięcia polaryzującego złącze V1. Ustaw znaczniki na wykresie  zgodnie z rysunkiem 2.2.



Rys. 2.2. Przykładowa charakterystyka diody spolaryzowanej w kierunku przewodzenia.

Dla diody można wyznaczyć dwa rodzaje rezystancji: statyczną oznaczoną dużą literą R oraz dynamiczną oznaczoną małą literą r oraz wartość napięcia progowego. Napięcie progowe $U_{(T0)}$ jest to napięcie poniżej którego prąd płynący przez diodę spolaryzowaną w kierunku przewodzenia jest pomijalnie mały. Interpretacje graficzne rezystancji diody przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 2.3. Rezystancja statyczna diody (a), rezystancja dynamiczna (b).

$$R_F = \frac{U_{F1}}{I_{F1}} \quad (1)$$

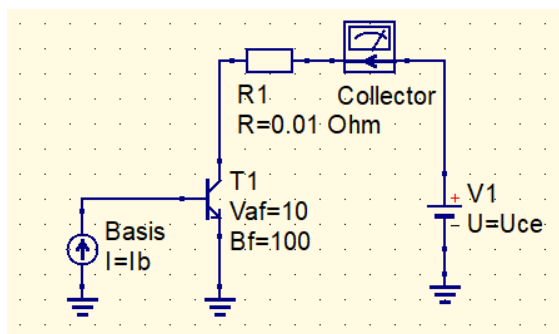
$$r_F = \frac{\Delta U_F}{\Delta I_F} \quad (2)$$

Wyznaczyć rezystancje oraz napięcie progowe dla diod z Tabeli 1.

Dioda	R Ω	r Ω	U _{T0} V
D1N4002			
D1N5402			
D1N5400			

2.2 Charakterystyka statyczna tranzystora bipolarnego

Charakterystyka statyczna tranzystora jest tak naprawdę rodziną charakterystyk. Dla układu wspólnego emitera OE są to zależność prądu wyjściowego (I_C) w funkcji napięcia kolektor-emiter (U_{CE}) dla stałych wartości prądu bazy. Do wyznaczenia charakterystyki statyczne tranzystora należy połączyć układ zgodnie ze schematem (rys 2.4).



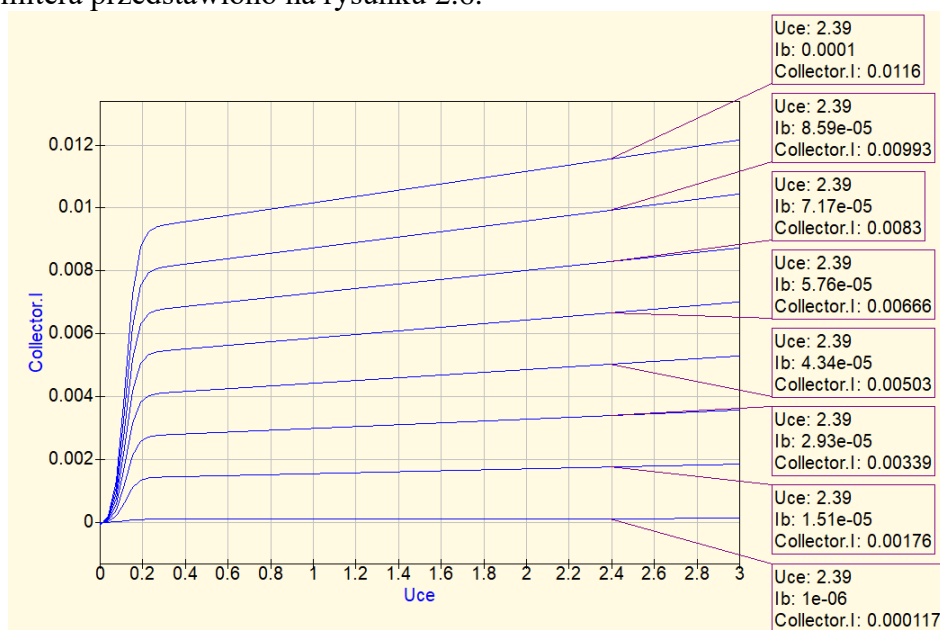
Rys. 2.4. Układ do wyznaczenia charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera.

Zdefiniować parametry symulacji zgodnie z rysunkiem 2.5



Rys. 2.5. Parametry symulacji do wyznaczenia charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera.

Przykładowa rodzina charakterystyk wejściowych tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera przedstawiono na rysunku 2.6.



Rys. 2.6. Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera OE wykonana w programie Qucs.

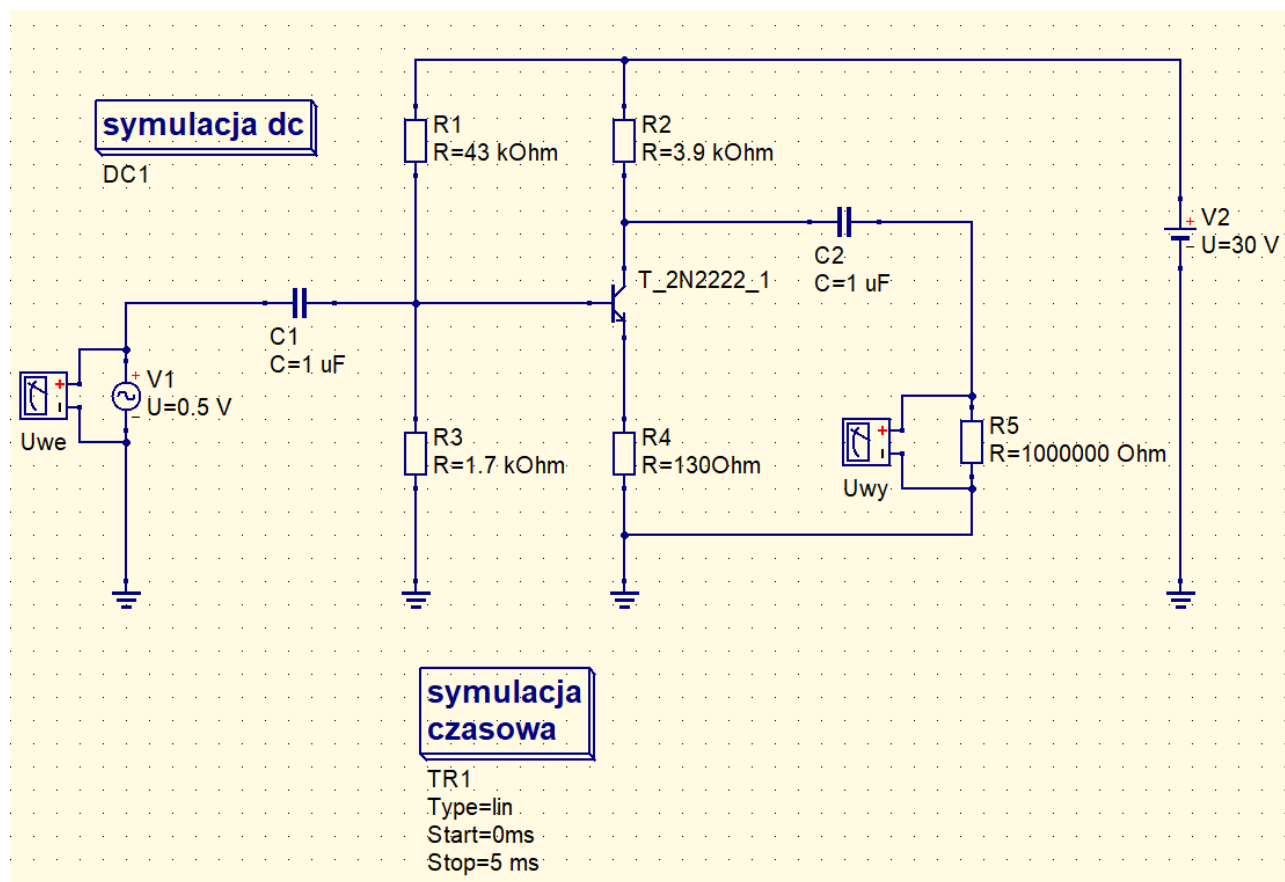
Współczynnik wzmacnienia prądowego tranzystora bipolarnego pracującego u układzie wspólnego emitera definiujemy jako stosunek prądu kolektora do prądu bazy przy stałym napięciu coelektro-emiter.

$$h_{21E} = \beta = \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE} = const} \quad (3)$$

Dla charakterystyki wyjściowej tranzystora bipolarnego wyznaczonej w punkcie wcześniejszym obliczyć współczynnik wzmacnienia prądowego dla wszystkich prądów bazy oraz napięcia $U_{CE}=2V$.

2.3 Analiza czasowa wzmacniacza mocy klasy A w układzie OE

Schemat wzmacniacza mocy klasy A pracującego w układzie OE z wykorzystaniem tranzystora bipolarnego Q2N2222 przedstawiono na rysunku 2.7.

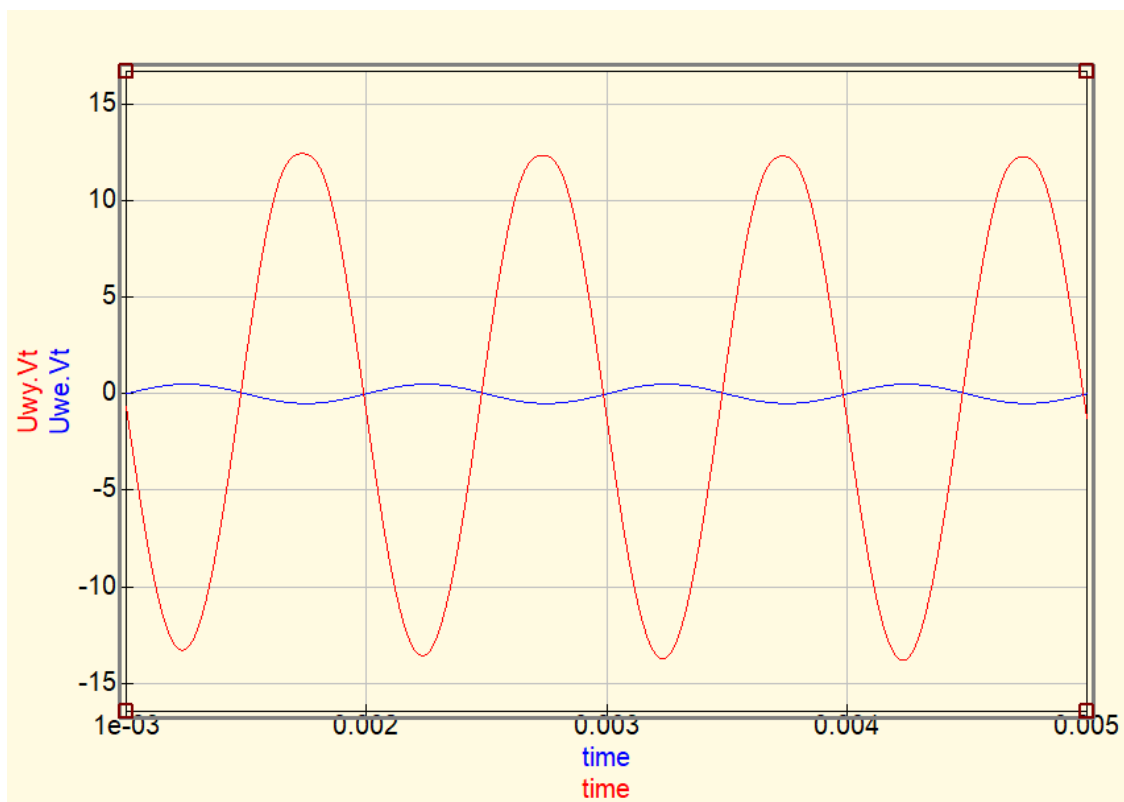


Rys. 2.7. Wzmacniacz mocy klasy A pracujący w układzie OE

Do prawidłowego ustalenia punktu pracy tranzystora należy ustawić następujące wartości:

R1	43 kΩ
R2	1,7 kΩ
R3	3,9 kΩ
R4	130 Ω
R5	1 MΩ
C1	1 μF
C2	1μF
V1	U=0,5V; f=1kHz
V2	U=30V

W celu wykonania obliczeń ustaw parametry symulacji czasowej: Start:0ms; Stop:0.5ms; Krok:10us. Wykonaj symulację. W wynikach symulacji umieść wykres kartezjański a w nim napięcie wejściowe Uwe.Vt oraz napięcie wyjściowe Uwy.Vt. W razie konieczności dostosuj skalę na osiach wykresu. Wyniki symulacji przedstawiono na rysunku 2.8.



Rys.8. Przebieg czasowy napięcia wejściowego (niebieski) oraz wyjściowego (czerwony) wzmacniacza mocy OE

Otrzymaną charakterystykę umieścić w sprawozdaniu. Co jest cechą badanych wzmacniaczy. Korzystając ze znaczników na wykresie obliczyć współczynnik wzmocnienia napięciowego:

$$k_U = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \quad (3)$$

Przeprowadzić analizę wpływu rezystancji R4 na charakterystykę czasową. Dla kolejnych symulacji przyjąć wartości R4: 110Ω; 310Ω; 510Ω; 710Ω; 910Ω; 1100Ω.

Przeprowadzić analizę wpływu rezystancji R1 (ustalającej punkt pracy tranzystora) na charakterystykę czasową. Dla kolejnych symulacji przyjąć wartości R1: 30 kΩ; 35 kΩ; 40 kΩ; 45 kΩ; 50 kΩ.

W obu przypadkach wyznaczyć wartość współczynnika wzmocnienia napięciowego.