

PODSTAWY ELEKTRONIKI

Katedra Robotyki i Mechatroniki

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

***Akademia Górniczo-Hutnicza
im. Stanisława Staszica w Krakowie***



Wzmacniacz OE

***LAB 9
LAB 10***

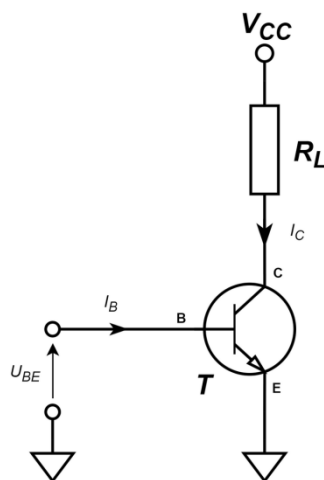
SPIS TREŚCI

1.	TRANZYSTOR BIPOLARNY	2
2.	WZMACNIACZ OE	4
2.1	Informacje ogólne.....	4
2.2	Zasada działania wzmacniacza tranzystorowego	4
2.3	Budowa wzmacniacza w konfiguracji OE.....	6
2.4	Wyznaczanie optymalnego punktu pracy	8
2.5	Inne sposoby polaryzacji punktu pracy tranzystora	11
3.	LITERATURA	12

PODSTAWY ELEKTRONIKI

1. TRANZYSTOR BIPOLARNY

Na rys. 1 widać typowy obwód w którym do sterowania wykorzystano tranzystor bipolarny. Obciążenie zamodelowane jako R_L wpięte jest między napięcie zasilania (np. $12V_{DC}$) oraz kolektor tranzystora.



Rys. 1: Typowy obwód sterowania przy pomocy tranzystora bipolarnego

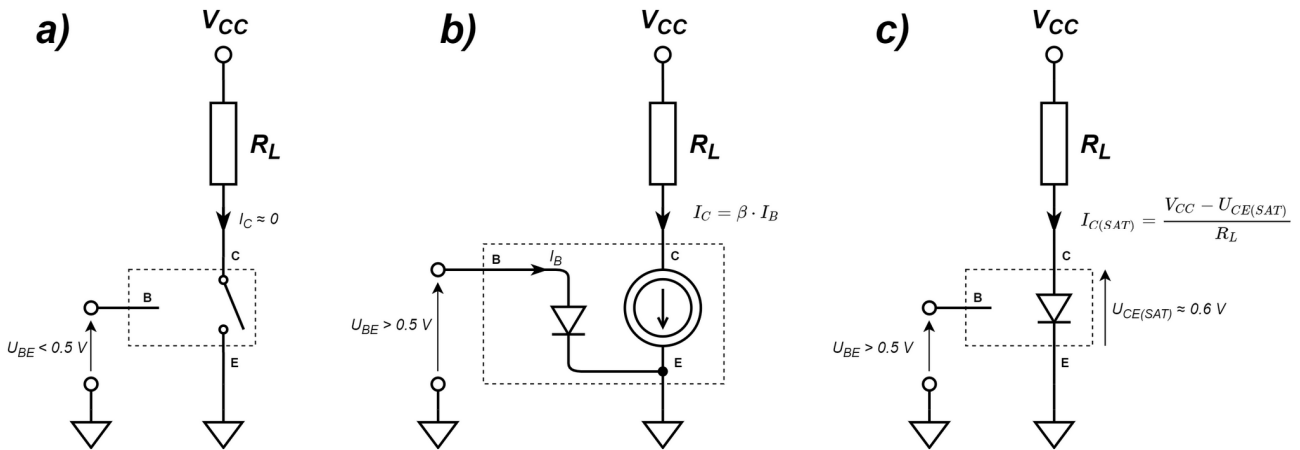
Zakładając obwód jak na rys. 1, tranzystor bipolarny może pracować w trzech zakresach w zależności od wartości napięcia U_{BE} oraz impedancji obciążenia (zakładamy, że napięcie V_{CC} jest dodatnie i dużo większe od 0.7 V):

zakres zatkania/odcięcia ($U_{BE} < 0.5 \text{ V}$) – rezystancja zastępcza kanału jest bardzo duża, tranzystor praktycznie nie przewodzi prądu pomiędzy kolektorem a emiterem; schemat zastępczy takiej sytuacji widoczny jest na rys. 2a;

zakres aktywny ($U_{BE} > 0.5 \text{ V}$, $I_C = \beta \cdot I_B$) – niewielki zakres, w którym prąd wejściowy bazy jest w przybliżeniu proporcjonalnie liniowy z prądem kolektora; tranzystor tak „steruje swoją rezystancją” aby utrzymać proporcjonalny prąd pomiędzy prądem bazy a kolektora; schemat zastępczy takiej sytuacji widoczny jest na rys. 2b; współczynnikiem wzmocnienia prądowego jest parametr oznaczany jako:

$$\beta = \frac{I_C}{I_B}$$

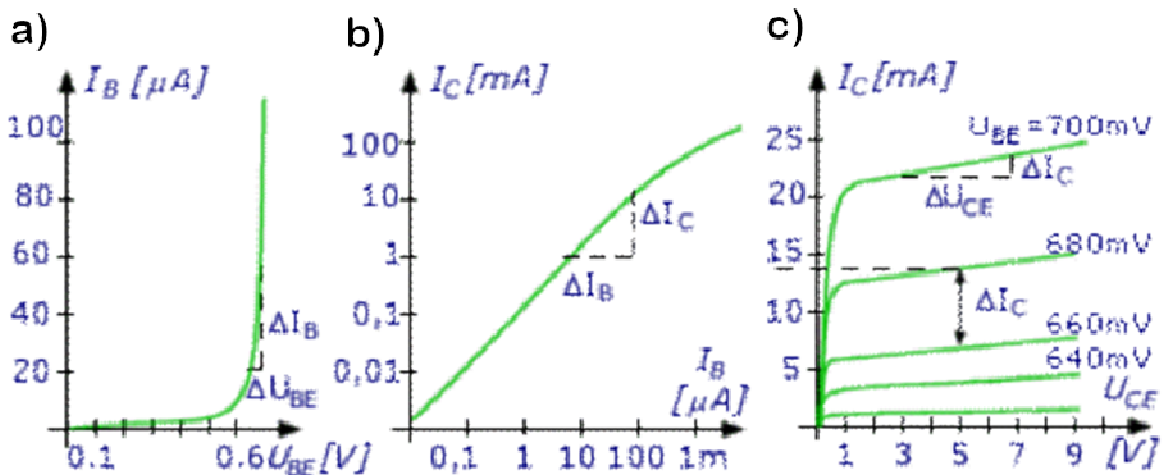
zakres nasycenia ($U_{BE} > 0.5 \text{ V}$; $I_{C(SAT)} < \beta \cdot I_B$) – prąd kolektora jest maksymalny i wynika tylko z obciążenia zewnętrznego (rezystancja zastępcza kanału jest bardzo mała); tranzystor nie jest w stanie zmniejszyć swojej rezystancji kanału aby popłynął prąd proporcjonalny do prądu bazy; pojawia się jedynie niewielki spadek napięcia na tranzystorze (napięcie U_{CE}), które wynosi ok. 0.6 V (czyli tyle ile na diodzie w stanie przewodzenia); schemat zastępczy takiej sytuacji widoczny jest na rys. 2c.



Rys. 2: Schemat zastępczy tranzystora pracującego w zakresie:
a) zatkania/odcięcia; b) aktywnym; c) nasycenia

W związku z tym tranzystor jest wykorzystywany w dwóch trybach prac:

- jako włącznik („przełącznik”) – wtedy pracuje w trybach zatkania i nasycenia – pozwala wtedy na włączenie i wyłączenie np. diody, żarówki, silnika;
- jako wzmacniacz – wtedy pracuje w liniowym zakresie pracy i jest w stanie wzmacniać sygnał wejściowy (napięciowo lub/i prądowo);

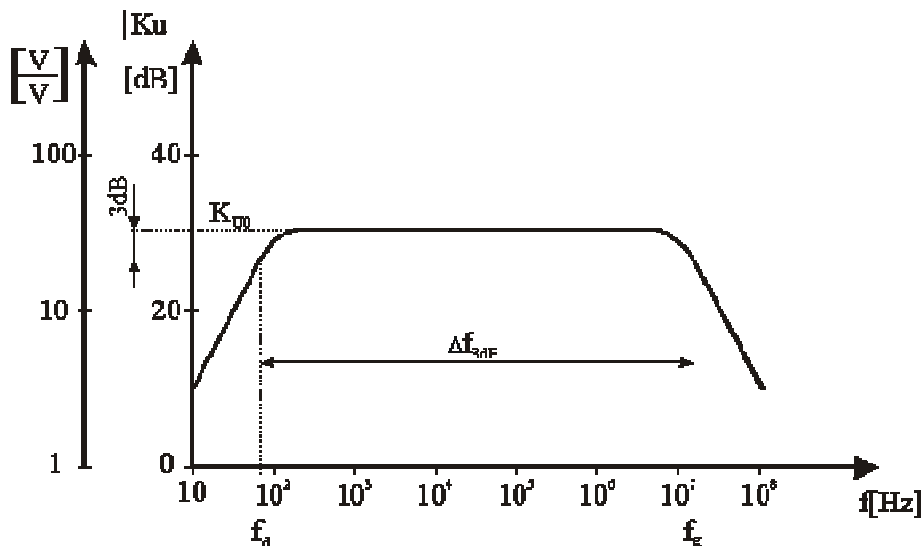


Rys. 3: Charakterystyki tranzystora bipolarnego NPN:
a) wejściowa; b) przejściowa; c) wyjściowa.

2. WZMACNIACZ OE

2.1 Informacje ogólne

Wzmacniacz w konfiguracji wspólnego emitera OE pozwala na wzmacnianie napięciowe (amplituda napięcia wyjściowego jest większa od amplitudy napięcia wejściowego o współczynnik wzmocnienia k). Wzmacniacz OE posiada dolną i górną częstotliwość graniczną, tzn. nie wzmacnia sygnału poniżej dolnej częstotliwości granicznej oraz powyżej górnej częstotliwości granicznej. Pomiedzy dolną i górną częstotliwością wzmocnienie jest w przybliżeniu stałe. Wzmacniacz w konfiguracji OE najczęściej wykorzystywany jest jako jeden ze stopni we wzmacniaczach akustycznych oraz radiokomunikacji. Wzmacniacz OE nie wzmacnia napięcia stałego dlatego też nie można go użyć np. do wzmocnienia sygnału z przetwornika ADC.

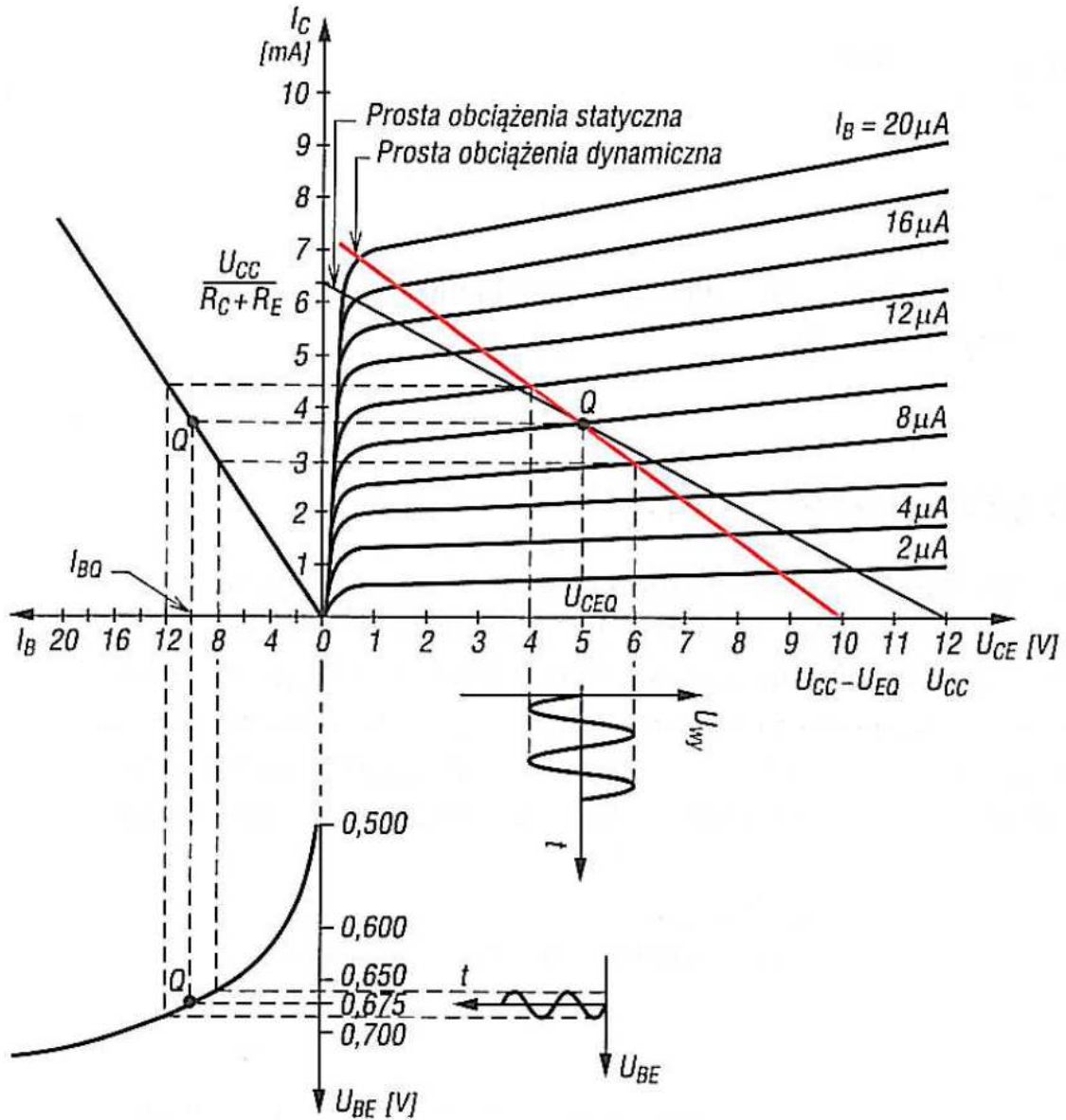


Rys. 4: Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wzmacniacza klasy A w konfiguracji OE

2.2 Zasada działania wzmacniacza tranzystorowego

Po podłączeniu napięcia zasilania wzmacniacza tranzystor zostaje odpowiednio spolaryzowany przyjmując statyczny punkt pracy zaznaczony na rys.5 jako Q. W wyniku podania na wejście wzmacniacza sygnału zmiennego dodaje się ono do statycznego napięcia wyznaczonego wstępną polaryzacją bazy. Napięcie U_{BE} zmienia się więc wokół punktu Q oznaczającego statyczny punkt pracy. Zmiana tego napięcia powoduje zmianę prądu bazy zgodnie z charakterystyką wejściową $I_B = f(U_{BE})$. Sygnał zmienny powinien być na tyle mały, aby można było założyć, iż wzmacniacz pracuje na liniowym odcinku charakterystyki. Prąd bazy zmienia się wokół wartości I_{BQ} . Z kolei zmiany prądu bazy wywołują zmiany prądu kolektora, które są β razy większe niż zmiany prądu bazy (charakterystyka przejściowa tranzystora $I_C = f(I_B)$). Zmiany prądu

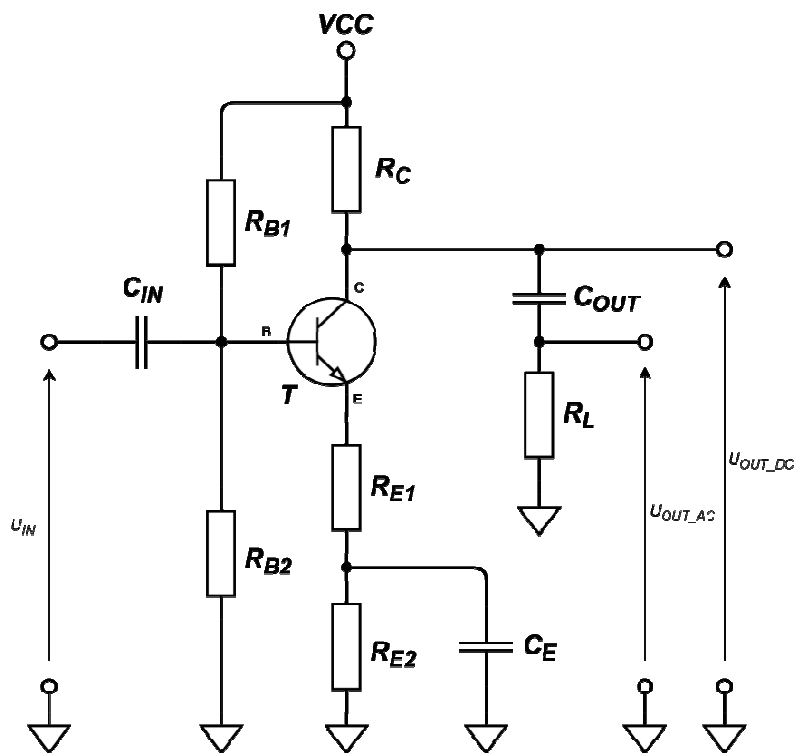
kolektora wywołują na obciążeniu R_C proporcjonalne zmiany napięcia. Zmienia się również U_{CE} wokół wartości U_{CEQ} (charakterystyka $I_C = f(U_{CE})$). Zmiany napięcia U_{CE} są w przeciwfazie do zmian prądu kolektora i mają większą amplitudę (k -krotnie) niż wejściowe napięcie U_{BE} co oznacza, że nastąpiło wzmocnienie napięciowe sygnału ($k_U = U_{wv}/U_{we}$).



Rys. 5: Zasada działania wzmacniacza tranzystorowego

2.3 Budowa wzmacniacza w konfiguracji OE

Na rys. 6 przedstawiono wzmacniacz w konfiguracji wspólnego emitera w najczęściej spotykanej wersji polaryzacji bazy tranzystora. Ponieważ tranzystor jako wzmacniacz (w zakresie aktywnym) kiedy napięcie U_{BE} wynosi ok. 0.6-0.7 V należy zadbać aby taka wartość składowej stałej napięcia pojawiła się na bazie tranzystora.



Rys. 6: Schemat wzmacniacza w konfiguracji OE

Pojemności sprzęgające C_{IN} , C_{OUT} oraz pojemność blokująca C_E należy dobrać tak, alby dla częstotliwości sygnałów wzmacnianych przez układ ich impedancje są bliskie zeru. Wtedy też dla składowej zmiennej będą stanowiły mały opór (dlatego można je zastąpić zwarcie dla składowej AC sygnału).

Poniżej przedstawiono elementy wzmacniacza oraz opisano ich funkcje.

T - tranzystor bipolarny typu NPN. Jest to element aktywny, którego właściwością jest (prawie) liniowa zależność między prądem kolektora a prądem bazy. Dla niewielkich zmian wartości napięcia u_{BE} wokół ustalonego punktu pracy można przyjąć, że zależność $i_C = f(u_{BE})$ jest liniowa. To przybliżenie jest podstawą zastosowania tranzystora do liniowego wzmacniania sygnałów elektrycznych. Tranzystor pracujący w układzie wzmacniacza liniowego musi mieć właściwie ustalony punkt pracy. Pod pojęciem punktu pracy

tranzystora bipolarnego rozumie się wartości jego prądu bazy i napięcia kolektor-emiter w stanie statycznym (brak sterowania składową zmienną).

R_{B1} , R_{B2} - rezystorowy dzielnik napięcia ustalający potencjał bazy tranzystora T. W przypadku dzielnika przyjmuje się założenie, że wartość prądu płynącego przez rezystory nie obciążonego dzielnika jest znacznie większa od wartości prądu bazy tranzystora T w ustalonym punkcie pracy (minimum 10 razy większa co zapewnia małe obciążenie dzielnika rezystancyjnego). Dodatkowo połączone równolegle rezystory stanowią z kondensatorem C_{IN} filtr górnoprzepustowy sygnału wejściowego $(R_{B1} || R_{B2}) \cdot C_{IN}$.

$R_{E1} + R_{E2}$ - rezystory emiterowe ustalające wartość prądu emitera tranzystora T. Dla założonych wartości: prądu kolektora I_C , potencjału bazy V_B oraz napięcia baza-emiter U_{BE} wartość jego rezystancji wyznacza się ze wzoru:

$$R_E \approx \frac{V_B - U_{BE}}{I_C}.$$

Rezystor ten wprowadza ujemne sprzężenie zwrotne dla prądu stałego. Każda bardzo powolna zmiana potencjału bazy tranzystora T, powoduje prawie taką samą zmianę potencjału jego emitera (gdyż wartość U_{BE} zmienia się niezauważalnie nawet przy dużych zmianach potencjału bazy). Napięcie efektywnie sterujące tranzystorem jest różnicą potencjału bazy i potencjału emitera. Działanie sprzężenia zwrotnego jest w tym przypadku bardzo korzystne, gdyż przyczynia się do zmniejszenia temperaturowej niestabilności punktu pracy tranzystora T.

Dodatkowo rezystor R_{E1} umożliwia regulację poziomu wzmacnienia, poprzez zmianę impedancji emiterowej dla składowej zmiennej sygnału.

C_E - kondensator (na ogół polaryzowany, elektrolityczny o dużej wartości pojemności) „zwierający” składową zmienną prądu emitera. Duża pojemność oznacza niewielką reaktancję, dzięki czemu dla składowej zmiennej sygnał ma niewielki opór.

R_C - rezystor kolektorowy. Wartość jego rezystancji wpływa na wartość napięcia U_{CE} (punkt pracy tranzystora) oraz na wartość wzmacnienia zmiennoprądowego wzmacniacza. Pośrednio, poprzez wartość wzmacnienia napięciowego, wpływa również na wartość górnej częstotliwości granicznej pasma przepustowego wzmacniacza. Należy zwrócić uwagę, że dla ustalonych wartości: prądu kolektora, napięć zasilających i potencjału bazy zwiększanie wartości R_C powoduje zwiększanie wzmacnienia napięciowego oraz zmniejszanie górnej częstotliwości granicznej. Zazwyczaj przyjmuje się, że rezystor kolektorowy powinien być ok. 10 razy większy od rezystora emiterowego.

C_{IN} – kondensator ma za zadanie doprowadzić składową zmienną sygnału wejściowego do potencjału bazy tranzystora. Dodatkowo połączone równolegle rezystory ($R_{B1} || R_{B2}$) stanowią z kondensatorem C_{IN} filtr górnoprzepustowy sygnału wejściowego $(R_{B1} || R_{B2}) \cdot C_{IN}$.

C_{OUT} – kondensator ma za zadanie doprowadzić składową zmienną sygnału z wzmacniacza do wyjścia (usunąć składową stałą czyli offset z sygnału wyjściowego).

R_{OUT} – wartość rezystancji obciążenia.

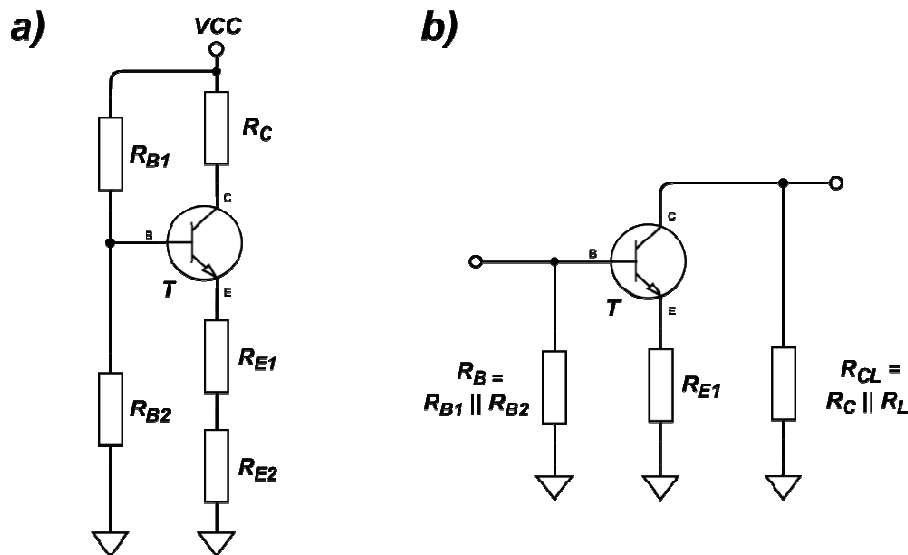
2.4 Wyznaczanie optymalnego punktu pracy

Na rys. 7 przedstawiono schematy stałoprądowy i zmiennoprądowy wzmacniacza OE. Zasady budowania schematu stałoprądowego:

- kondensatory stanowią rozwarcie (impedancja kondensatora dla małych częstotliwości jest bardzo duża);
- cewki stanowią zwarcie (impedancja cewki zmniejsza się dla dużych częstotliwości).

Zasady budowania schematu zmiennoprądowego (obwodu dla składowej zmiennej):

- kondensatory stanowią zwarcie;
- cewki stanowią rozwarcie;
- każdy potencjał stały zastępuje się potencjałem zerowym (masą).



**Rys. 7: Schemat zastępczy:
a) stałoprądowy; b) zmiennoprądowy.**

W układzie występują wartości chwilowe napięć i prądów:

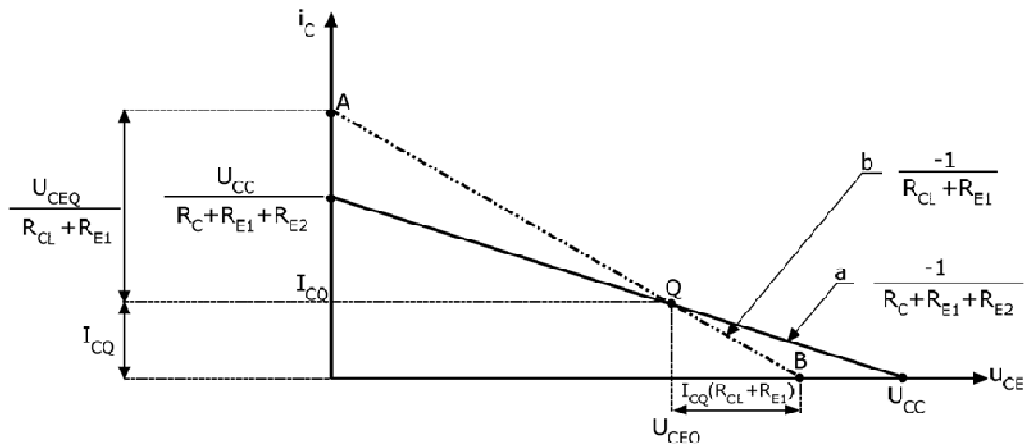
$$i_c = I_{CQ} + i_c,$$

$$u_{CE} = U_{CEQ} + u_{ce}.$$

Są one superpozycją składowych stałych I_{CQ} , U_{CEQ} i składowych zmiennych i_c , u_{ce} . Składowe stałe prądu i napięcia są związane zależnością:

$$V_{CC} = U_{CEQ} + I_{CQ}(R_C + R_{E1} + R_{E2})$$

Jest to równanie statycznej prostej pracy w polu charakterystyk wyjściowych $i_c(u_{CE})$ tranzystora (rys. 8 - a).



Rys. 8: Statyczna (a) i dynamiczna (b) prosta pracy w polu charakterystyk wyjściowych tranzystora.

Punkt pracy Q leży w przecięciu statycznej prostej pracy z charakterystyką wyjściową tranzystora określoną prądem bazy I_{BQ} :

$$V_{CC} \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} = I_{BQ} R_B + U_{BEQ} + I_{BQ} (\beta + 1) (R_{E1} + R_{E2}).$$

Związek pomiędzy składową zmienną prądu kolektora i napięcia kolektor-emiter przedstawia zależność opisującą schemat z rys. 7 b :

$$i_c = - \frac{u_{ce}}{R_{CL} + R_{E1}}.$$

Na podstawie powyższych zależności otrzymujemy:

$$i_c = - \frac{u_{ce}}{R_{CL} + R_{E1}} + I_{CQ} + \frac{U_{CEQ}}{R_{CL} + R_{E1}}.$$

Jest to równanie dynamicznej prostej pracy w polu charakterystyk wyjściowych $i_c(u_{CE})$ tranzystora (rys. 8 - b). Dynamiczna prosta pracy przechodzi przez punkt pracy Q. Chwilowy punkt pracy, który jest wyznaczony chwilowymi wartościami prądu i napięcia porusza się po dynamicznej prostej pracy w takt zmian sygnału wejściowego powodującego zmianę prądu bazy i_b oraz napięcia baza-emiter u_{BE} . Zatem chwilowa wartość prądu kolektora i_c może maksymalnie wzrosnąć do wartości (pomijając dla uproszczenia obszar nasycenia tranzystora):

$$i_{c \max} = i_c(u_{CE} = 0) = I_{CQ} + \frac{U_{CEQ}}{R_{CL} + R_{E1}},$$

oraz osiągnąć wartość minimum:

$$i_{C \min} = 0.$$

Chwilowa wartość potencjału kolektora u_c jest superpozycją składowej stałej (rys. 7a):

$$U_C = U_{CC} - I_{CQ}R_C,$$

i składowej zmiennej (rys. 8b):

$$u_c = -i_c R_{CL},$$

$$u_c = U_C + u_c.$$

Korzystając z powyższych zależności otrzymujemy wartość chwilową potencjału kolektora u_c w funkcji wartości chwilowej prądu kolektora i_c :

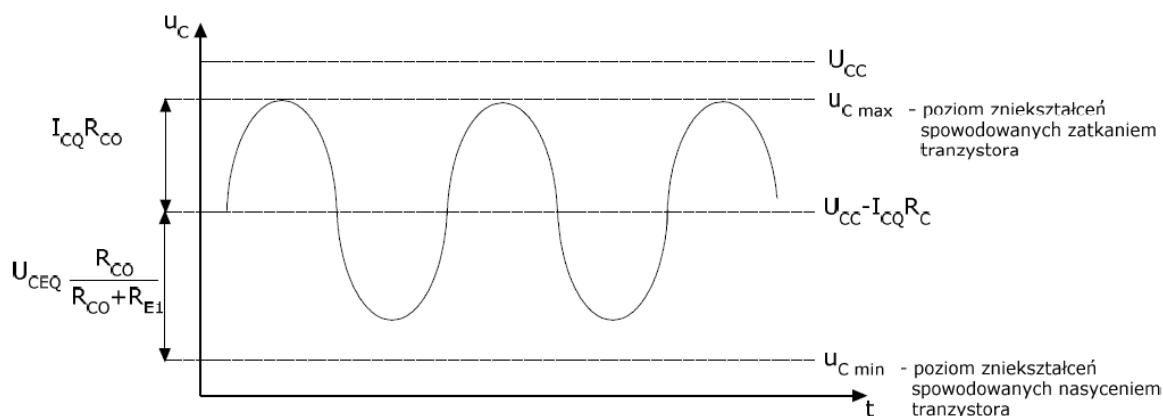
$$u_c(i_c) = V_{CC} - I_{CQ}R_C + I_{CQ}R_{CL} - i_c R_{CL}.$$

Wartość chwilowa potencjału kolektora u_c może osiągnąć wartość maksymalną:

$$u_{C \max} = u_c(i_{C \min}) = V_{CC} - I_{CQ}R_C + I_{CQ}R_{CL},$$

oraz minimalną:

$$u_{C \min} = u_c(i_{C \max}) = V_{CC} - I_{CQ}R_C - U_{CEQ} \frac{R_{CL}}{R_{CL} + R_{E1}}.$$



Zatem punkt pracy jest dobrany optymalnie, gdy:

$$I_{CQ}R_{CL} = U_{CEQ} \frac{R_{CL}}{R_{CL} + R_{E1}},$$

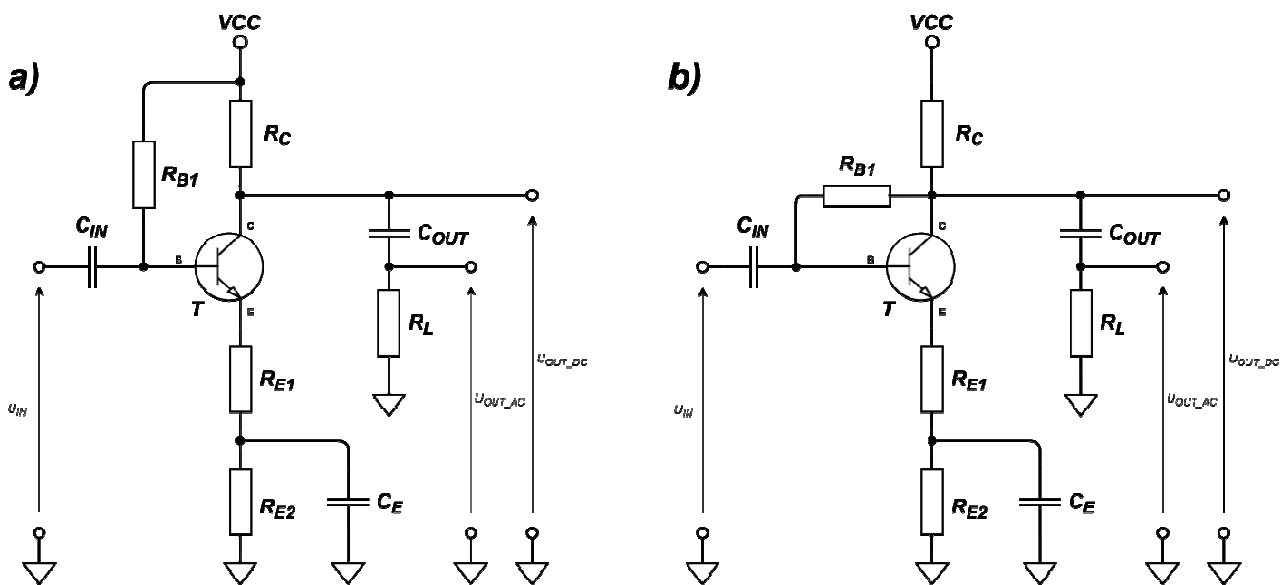
czyli gdy leży on w połowie dynamicznej prostej pracy.

**Dla wzmacniacza najbardziej korzystna będzie sytuacja
gdy punkt pracy Q będzie w połowie prostej.**

2.5 Inne sposoby polaryzacji punktu pracy tranzystora

Na rys. 9 przedstawiono inne sposoby ustalenia punktu pracy tranzystora:

- bezpośrednia polaryzacja bazy - poprzez rezystor o dużej wartości pomiędzy bazą tranzystora a napięciem zasilającym;
- układ polaryzacji ze sprzężeniem zwrotnym w kolektorze – poprzez rezystor wpięty pomiędzy kolektor a bazę tranzystora.



Rys. 9: Inne sposoby polaryzacji bazy tranzystora:
 a) bezpośrednia polaryzacja bazy;
 b) układ polaryzacji ze sprzężeniem zwrotnym w kolektorze

3. LITERATURA

[1] Laboratorium z podstawowych układów elektronicznych KL-210: Rozdział 6 – Wzmacniacze tranzystorowe

[2] <https://home.agh.edu.pl/~maziarz>

[3] http://www.zstio-elektronika.pl/pliki_t_elektronik/TE_Z1-01.pdf

[4] Podstawy elektroniki – część 2; Barbara Pióro, Marek Pióro.

[5] <https://www.electronics-tutorials.ws/>