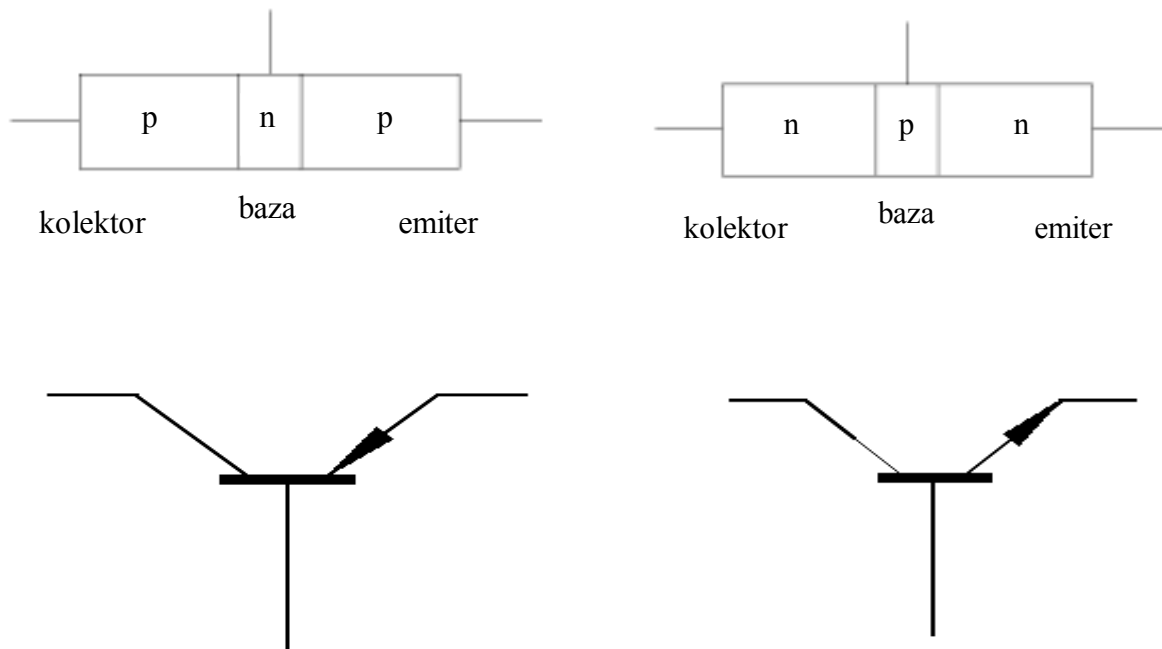


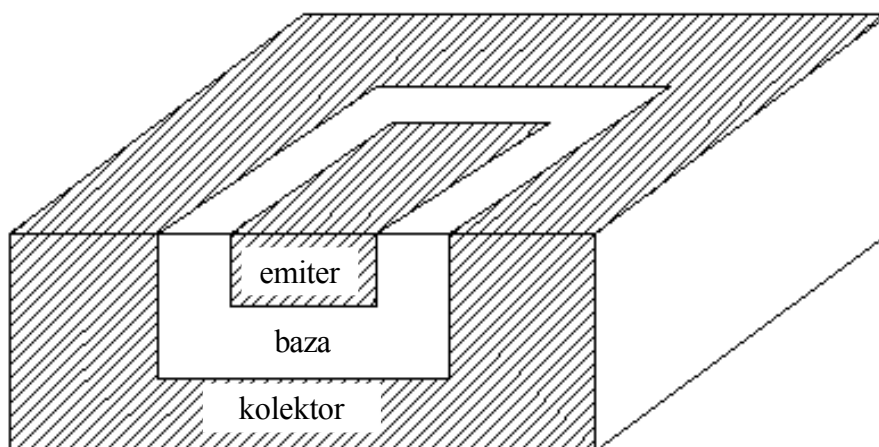
## WYKŁAD 5

# TRANZYSTORY BIPOLARNE

Tranzystor bipolarny to **odpowiednie** połączenie dwu złącz pn :



W rzeczywistości budowa tranzystora znacznie różni się od schematu pokazanego powyżej :

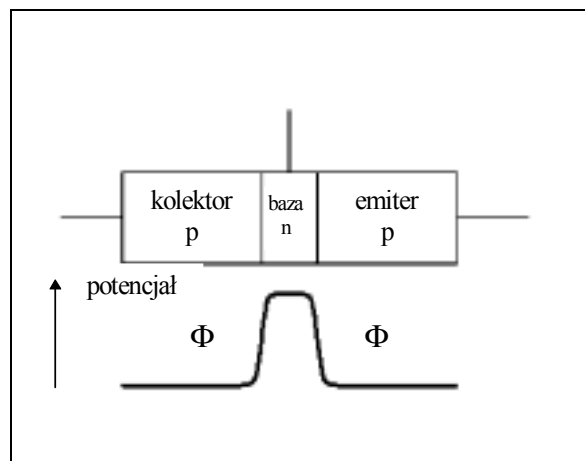


(PRZYKŁAD TRANZYSTORA PLANARNEGO)

Działanie tranzystora (na przykładzie tranzystora pnp):

W stanie bez polaryzacji zewnętrznej dziury z emitera nie przenikają do kolektora, gdyż są blokowane przez barierę potencjału emiter-baza. Podobna bariera potencjału istnieje na złączu baza-kolektor.

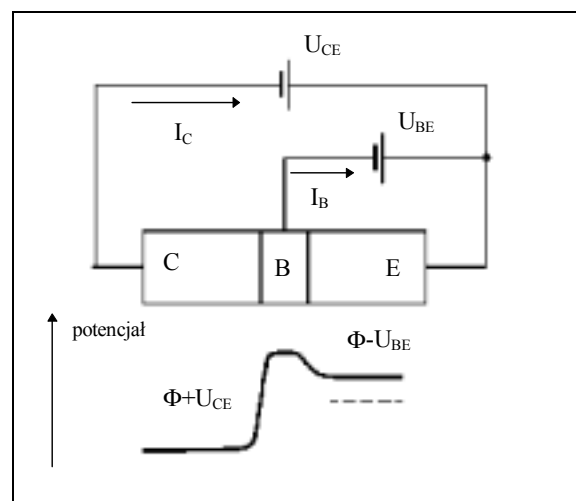
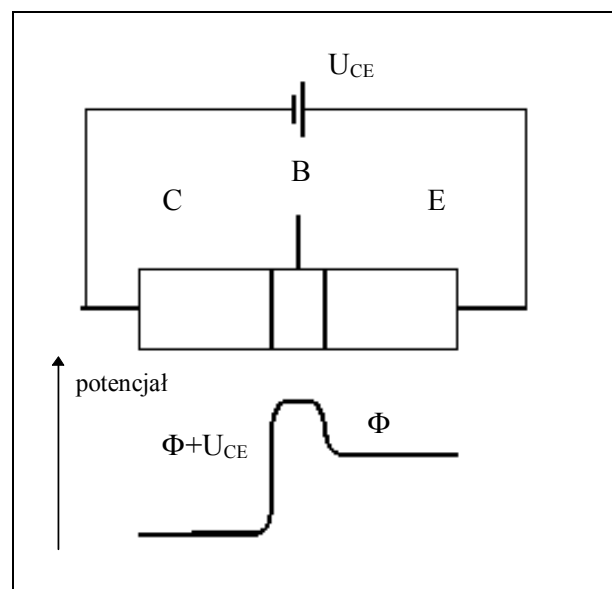
Po przyłożeniu zewnętrznej różnicy potencjałów między kolektor i emiter (baza pozostaje z niczym niepołączona) również nie obserwuje się przepływu prądu. Napięcie  $U_{CE}$  odkłada się na zaporowo spolaryzowanym złączu baza-kolektor.



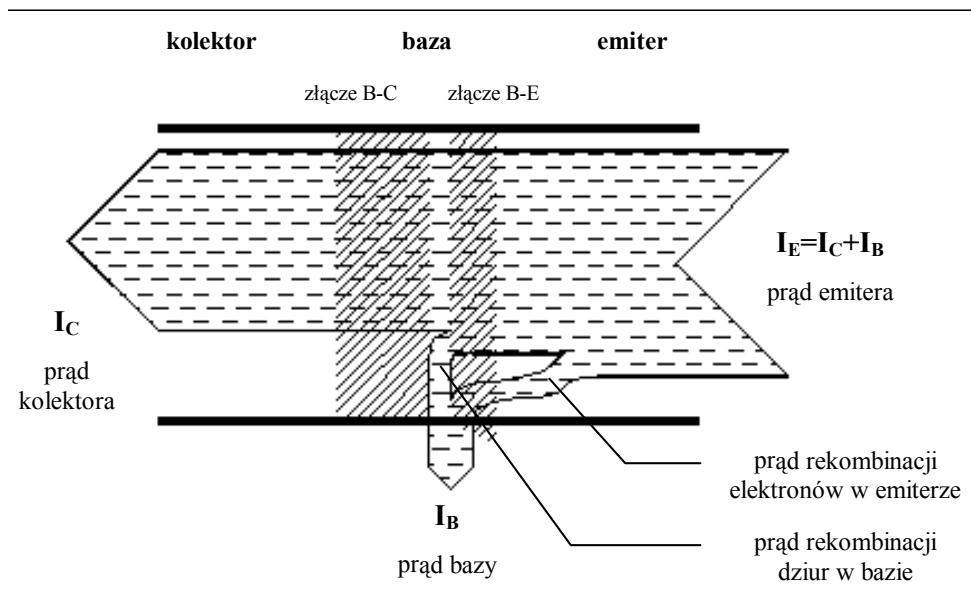
Jeżeli między bazę i emiter zostanie przyłożone napięcie  $U_{BE}$  zmniejszające tę barierę potencjału, dziury z emitera dostana się do bazy, a następnie, **o ile nie zrekombinują w niej**, przedyfundują do kolektora, tworząc prąd  $I_C$ . Regulując napięcie  $U_{BE}$  regulujemy wysokość bariery potencjału za tym złączu, kontrolując jednocześnie ilość dziur dostających się do bazy. Dzięki temu za pomocą sygnału elektrycznego dostarczanego do bazy kontrolujemy oporność między emiterem i kolektorem. Tak działa

## TRANSfereable rezISTOR.

**Aby wystąpił efekt tranzystorowy (by dziury nie zrekombinowały w bazie), baza musi być odpowiednio cienka. Czas rekombinacji dziur w bazie musi być znacznie dłuższy niż czas ich dyfuzji przez bazę !!!**



Działanie tranzystora npn jest analogiczne, jednak kierunki napięć i prądów są odwrotne niż w przypadku pnp, a nośnikami prądu kolektora są elektrony



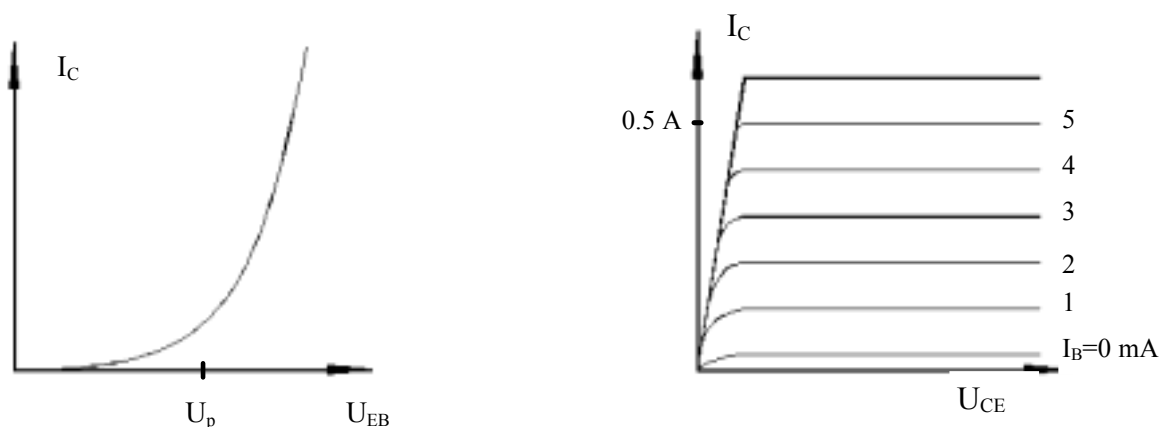
### Rozkład prądów w tranzystorze bipolarnym

Obniżenie bariery potencjału na złączu baza-emiter umożliwia dyfuzję dziur do bazy. W ten sposób powstaje prąd emitera  $I_E$ . Niewielka część dziur rekombinuje w bazie. Przez obniżoną barierę potencjału z bazy do emitera dostają się elektrony, gdzie także rekombinują. Dlatego, by utrzymać barierę potencjału baza - emiter na odpowiednim poziomie, z bazy do zewnętrznego źródła musi wypływać prąd  $I_B$ , równoważący powyższe procesy rekombinacyjne. Jednak większość dziur, zanim zdąży zrekombinować w bazie, dociera do złącza baza-kolektor. **Bariera potencjału na tym złączu nie stanowi dla dziur przeszkody**, dzięki czemu dziury dostają się do kolektora, tworząc prąd  $I_C$ .

Zachodzi relacja :  $I_E = I_C + I_B$ .

O ile zewnętrzne źródła zezwalają, prąd  $I_C$  jest proporcjonalny do prądu  $I_B$ .

Współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora :  $\beta = h_{21E} = \frac{I_C}{I_B}$  ma wartość od kilku do kilkuset (zwykle  $\beta \approx 100$ ).

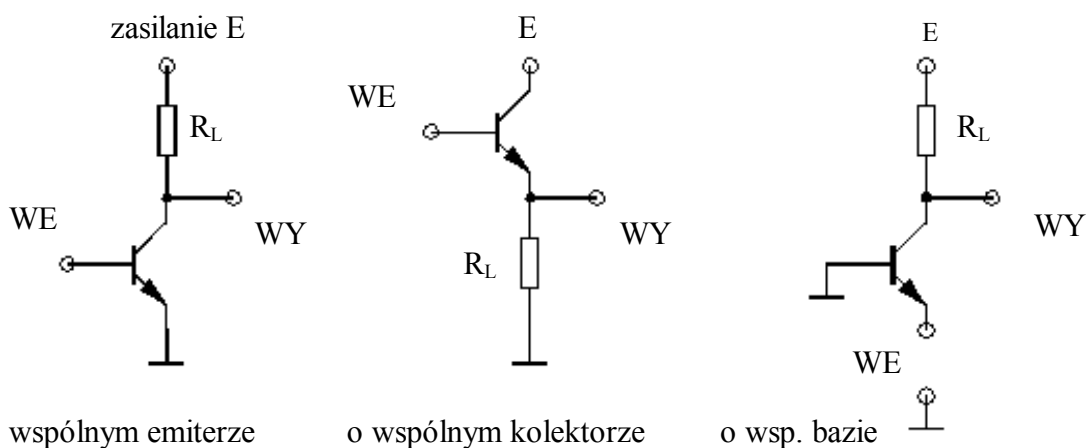
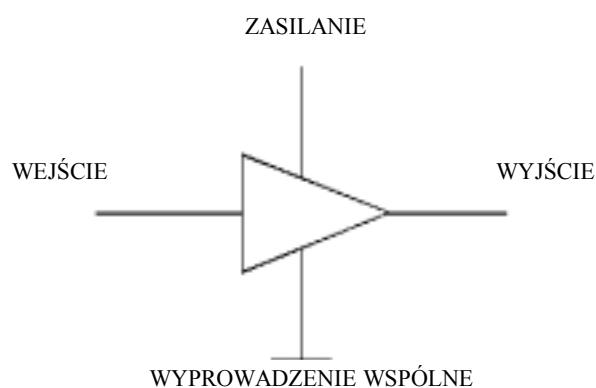


Prąd kolektora  $I_C$  narasta wraz z napięciem baza-emiter  $\beta$ -razy szybciej niż prąd tego złącza  $I_B$ . Prąd kolektora zależy od prądu bazy, lecz słabo zależy od napięcia kolektor-emiter ( $U_{CE}$ ). **Należy pamiętać, że wprowadzenie prądu do bazy (a tym samym wywołanie przepływu prądu kolektora) jest możliwe, gdy napięcie  $U_{BE}$  przekroczy napięcie przewodzenia złącza danego typu (0.65 V dla krzemu, 0.35 V dla germanu)**

## WZMACNIACZE TRANZYSTOROWE

Wzmacniacz jest to układ, w którym energia z zasilacza jest zamieniana na energię sygnału wyjściowego. Sygnał wyjściowy jest funkcją sygnału wejściowego.

Wzmacniacz tranzystorowy jest specjalnym, sterowanym dzielnikiem napięcia zasilającego. Jednym z rezystorów w tym dzielniku jest tranzystor. Dla tranzystora bipolarnego mamy trzy podstawowe układy wzmacniające :



Założymy, że napięcie wejściowe wzmacniacza składa się z podkładu stałego  $U_{WE0}$  i składowej zmiennej amplitudzie  $U_{WE}$  :  $u_{WE}(t) = U_{WE} \cos(\omega t) + U_{WE0}$ , przy czym podkład stały pełni tylko rolę pomocniczą, natomiast sygnałem użytecznym jest składowa zmienna. Podobną postać ma napięcie wyjściowe. Zakładamy tę samą postać również dla prądów wejściowych i wyjściowych. Wszystkie parametry wzmacniacza określamy tylko dla składowej zmiennej. Z zasady działania dzielnika napięcia wynikają następujące własności powyższych wzmacniaczy :

	Wzmacniacz o :	WSPÓLNYM EMITERZE	WSPÓLNYM KOLEKTORZE	WSPÓLNEJ BAZIE
1	Wzmocnienie napięciowe	duże	< 1	duże
2	Wzmocnienie prądowe	duże	duże	< 1
3	Przesunięcie fazowe między sygnałem wejściowym i wyjściowym	180 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>	0 <sup>0</sup>
4	Pasma przenoszenia	małe	średnie	duże

### 1. Wzmacniacz o wspólnym emiterze :

- Prąd wyjściowy (prąd płynący przez rezystor  $R_L$ ) jest prądem kolektora, jest więc duży, bo  $\beta$ -krotnie większy od prądu wejściowego - prądu bazy. Dlatego wzmocnienie prądowe tego układu jest duże.
- Stosując odpowiednio duży rezystor pracy  $R_L$  można uzyskać na nim duży spadek napięcia, a więc i duże wzmocnienie napięciowe.
- Wzmacniacz ten charakteryzuje się więc dużym wzmocnieniem mocy.
- Wzrost napięcia wejściowego powoduje zwiększenie prądu bazy tranzystora, a więc zmniejszenie jego rezystancji między emiterem i kolektorem, czyli (z zasady dzielnika napięcia) spadek napięcia wyjściowego. Analogicznie, przy zmniejszającym się napięciu wejściowym nastąpi wzrost napięcia wyjściowego. Zachodzi więc odwrócenie fazy napięcia wyjściowego względem wejściowego.

### 2. Wzmacniacz o wspólnym kolektorze :

- ma wzmocnienie napięciowe  $U_{WY}/U_{WE} < 1$  bo :  $U_{WE} = U_{BE} + U_{WY}$ . Ponieważ nie ma odwrócenia fazy sygnału uzyskujemy, że wzmocnienie napięciowe :  $\frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{U_{WY}}{U_{WY} + U_{BE}} < 1$ .
- prąd wyjściowy jest prądem emitera, jest więc  $\beta+1$  razy większy od prądu wejściowego - prądu bazy. Wzmocnienie prądowe jest więc duże.

### 3. Wzmacniacz o wspólnej bazie :

- prąd wejściowy jest prądem emitera :  $I_{we} = I_B (\beta + 1)$ , a prąd wyjściowy jest prądem kolektora :

$$I_{WY} = I_B \beta . \text{ Wzmocnienie prądowe : } \frac{I_{WY}}{I_{WE}} = \frac{\beta}{\beta + 1} < 1 .$$

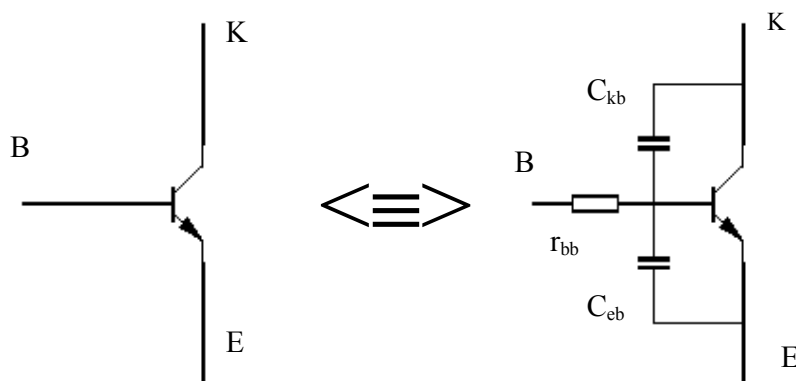
- Mimo to stosując odpowiednio duży rezystor  $R_L$  można uzyskać duże zmiany napięcia na wyjściu i tym samym duże wzmocnienie napięciowe.

## PASMO WZMOCNIENIA.

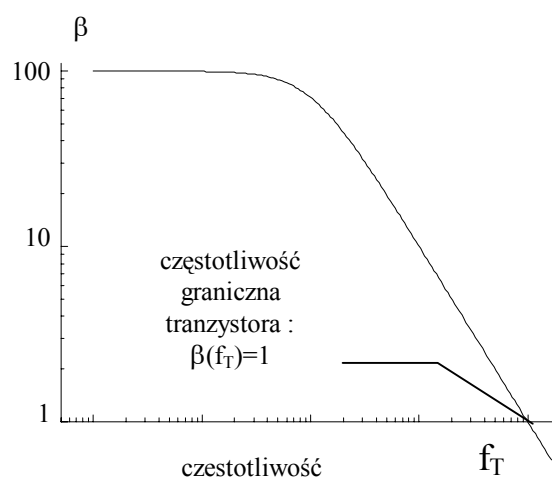
Pasmo wzmocnienia jest określone przez własności tranzystora (jego wielkości pasożytnicze) oraz sposób jego współdziałania z obwodem wzmacniacza.

### 1. Pasożytnicze pojemności tranzystora :

Każdy rzeczywisty tranzystor charakteryzuje się różnymi wielkościami pasożytniczymi, z których najważniejsze to: rozproszona rezystancja bazy  $r_{bb}$  oraz pojemności baza-emiter  $C_{be}$  i baza-kolektor  $C_{bk}$



Pasożytnicza pojemność między bazą a emiterem ( $C_{be}$ ) tworzy wraz z rozproszoną rezystancją bazy ( $r_{bb}$ ) filtr dolnoprzepustowy, który przy wysokich częstotliwościach bocznikuje złącze baza-emiter, zmniejszając przepływający prąd sterujący tranzystor. W rezultacie współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora maleje wraz ze wzrostem częstotliwości.



Pasmo wzmocnienia tranzystora jest ograniczone przez jego częstotliwość graniczną  $f_T$ ; powyżej tej częstotliwości współczynnik wzmocnienia prądowego  $\beta$  jest mniejszy od jedności.

### 2. Efekt Millera.

W pewnych układach - np. we wzmacniaczu o wspólnym emiterze - pasmo przenoszenia jest znacznie mniejsze niż  $f_T$  na skutek oddziaływania pasożytniczej pojemności kolektor - baza  $C_{kb}$ , rezystancją źródła sygnału  $R_{WYG}$  i rozproszoną rezystancją bazy  $r_{bb}$ . W układzie tym napięcie wyjściowe - będące napięciem kolektora - ma fazę przeciwną niż napięcie wejściowe, czyli napięcie bazy. Przy wysokich częstotliwościach prąd z kolektora przenika do bazy przez układ

górnoprzepustowy  $C_{bk}(R_{WYG}+r_{bb})$ , osłabiając sygnał sterujący tranzystor. Jest to tzw. **efekt Millera**.

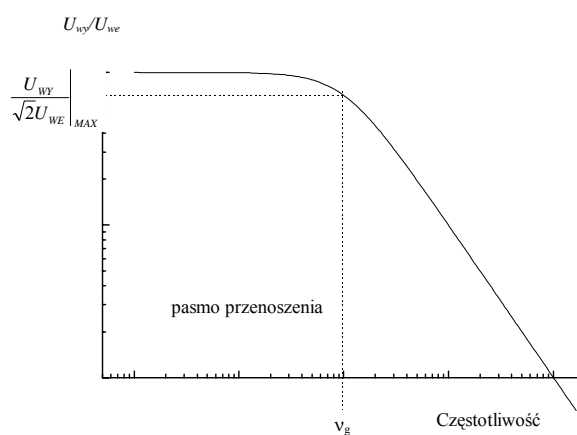
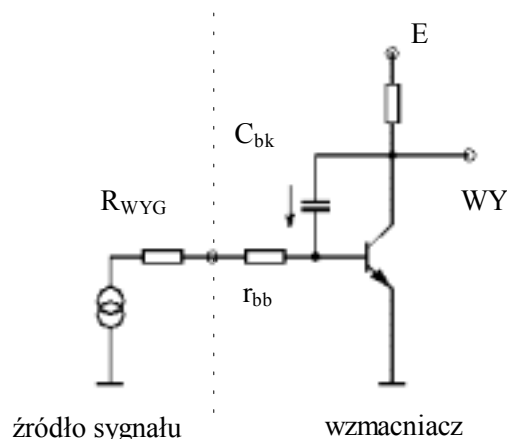
Oddziaływanie sygnału wyjściowego na sygnał wejściowy nazywamy

### sprężeniem zwrotnym

**Pasmo przenoszenia wzmacniacza określa się podobnie jak pasmo przenoszenia filtra : dla częstotliwości granicznych wzmacniacza wzmocnienie jest mniejsze o  $1/\sqrt{2}$  w stosunku do wzmocnienia maksymalnego.**

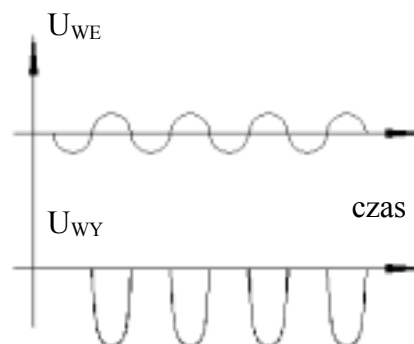
Nie należy mylić częstotliwości granicznej wzmacniacza z częstotliwością graniczną tranzystora.

Efekt Millera praktycznie nie występuje w układzie o wspólnym kolektorze, gdyż kolektor tranzystora jest połączony z niskorezystywnym źródłem zasilania, czyli źródłem napięcia stałego. Również w układzie o wspólnej bazie nie ma oddziaływania wyjścia wzmacniacza na wejście przez pojemność  $C_{BC}$ , gdyż napięcie wejściowe wzmacniacza jest napięciem emitera, a baza ma ustalony potencjał.



### WYZNACZANIE PUNKTU PRACY (ustalenie wejściowego prądu składowej stałej).

**Ponieważ tranzystor npn może pracować liniowo tylko wtedy, gdy napięcie  $U_{BE}$  przekroczy napięcie przewodzenia danego typu złącza (0.65 V)**, gdyby na wejście wzmacniacza skierować sygnał sinusoidalny, powstałby na wyjściu wzmocniony sygnał o kształcie podobnym do przebiegu „wyprostowanego jednopółkwo”.



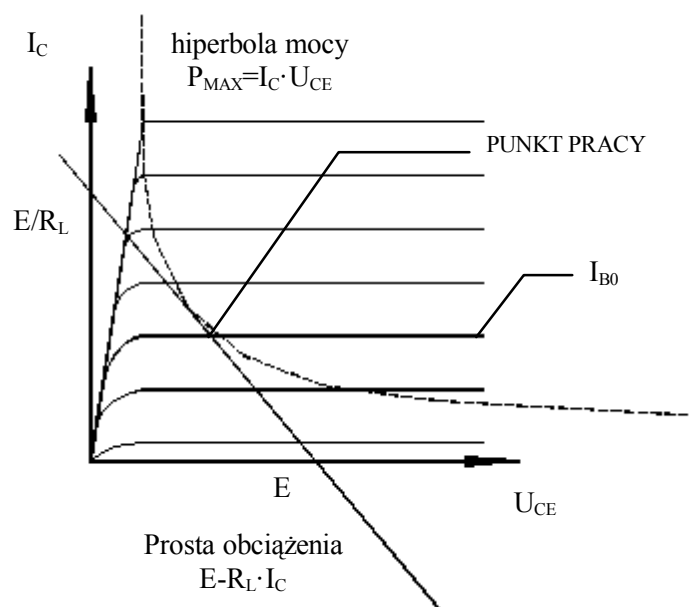
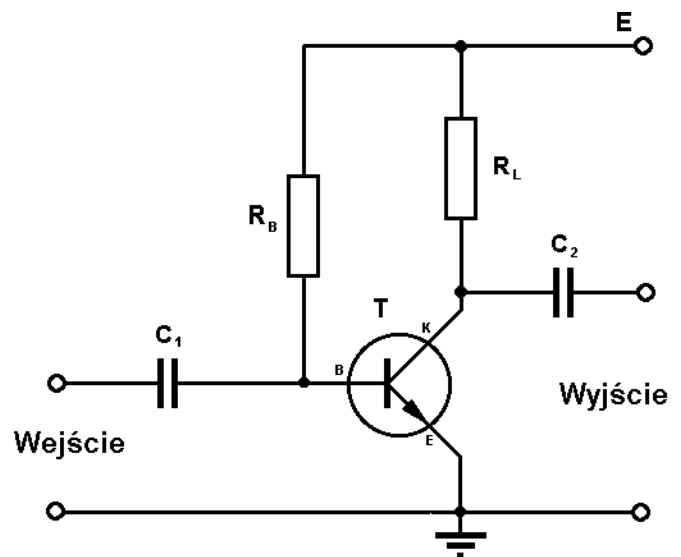
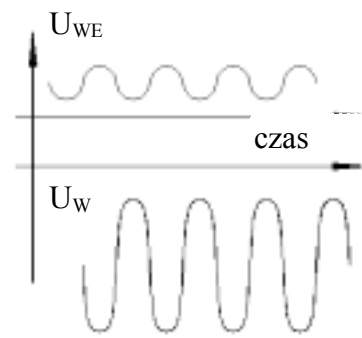
Dlatego, aby otrzymać wzmacnianie pełno okresowe należy do wzmacnianego sygnału zmiennego (zmiennego prądu bazy) dodać podkład stały (stały prąd bazy).

Układy automatycznego dodawania podkładu stałego nazywają się układami polaryzacji lub układami określającymi punkt pracy tranzystora. Przykład takiego układu podano obok. Prąd polaryzacji jest kierowany do bazy tranzystora za źródła zasilania za pomocą opornika  $R_b$ . Kondensatory  $C_1$  i  $C_2$  służą do odseparowania podkładu stałego od wejścia i wyjścia wzmacniacza (sprzężenie AC).

**Aby znaleźć optymalny punkt pracy tranzystora posługujemy się najczęściej graficzną analizą jego charakterystyk. Postępuje się wówczas według następującego schematu:**

1. Przestrzeń punktów pracy, czyli punktów o współrzędnych ( $U_{CE}$ ,  $I_C$ ), w jakich może znajdować się tranzystor (bez dodatkowych elementów) jest ograniczona przez hiperbolę maksymalnej **dopuszczalnej cieplnej mocy strat tranzystora, określonej w katalogu przez producenta** :  $P_{MAX}=I_C \cdot U_{CE}$ . **Przekroczenie jej grozi spaleniem tranzystora.**

2. Jeżeli tranzystor współpracuje w układzie dzielnika napięcia z rezystorem  $R_L$ , przestrzeń punktów pracy ogranicza się do prostej opisanej równaniem :  $U_{CE}=E-R_L \cdot I_C$  (tzw. **prosta obciążenia**). W praktyce należy tak dobrać napięcie zasilania wzmacniacza  $E$  oraz opór pracy  $R_L$  , by prosta ta była styczna do hiperboli obciążenia (lub przebiegała nieco poniżej).

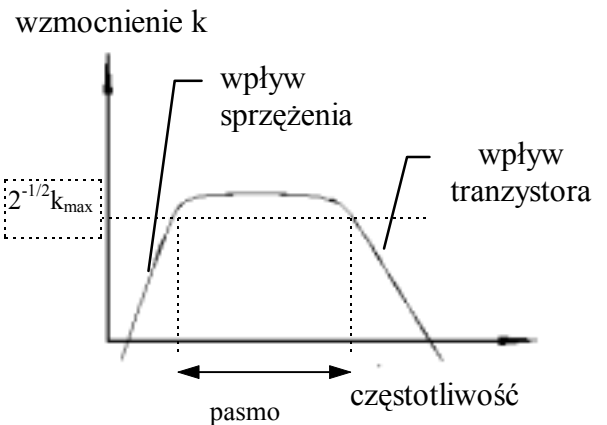




3. Prosta obciążenia przecina oś napięć kolektor-emiter w punkcie E, a oś prądów kolektora w punkcie E/ $R_L$ . **Żaden z tych parametrów nie może przekraczać maksymalnych wielkości tranzystora ( $I_{Cmax}$ ,  $U_{CEmax}$ ) dopuszczonych przez producenta.**

4. Środkowy punkt odcinka prostej obciążenia leżący w powyżej przedstawionej ćwiartce układu współrzędnych odpowiada optymalnemu punktowi pracy wzmacniacza. Z odpowiadającej mu gałęzi charakterystyki tranzystora można odczytać optymalny prąd polaryzacji  $I_{B0}$  (czyli prąd stałego podkładu), jaki należy wprowadzić do bazy. Pozwala to wyznaczyć **wartość opornika  $R_b$  z równania :  $E-0.65V=I_{B0}\cdot R_b$ .**

5. Dobór pojemności sprzęgającej  $C_1$  powinien uwzględniać pasmo przenoszenia wzmacniacza, gdyż  $C_1$  wraz z rezystancją wejściową układu tworzą filtr górno przepustowy. Dla wysokich częstotliwości pasmo przenoszenia wzmacniacza jest ograniczone przez własności tranzystora. Jeżeli



4. budowany jest wzmacniacz o wspólnym emiterze, ze względu na efekt Millera **katalogowa częstotliwość graniczna tranzystora  $f_T$  powinna być przeszło 100 razy większa niż przewidywana górna granica pasma przenoszenia wzmacniacza.**

Znanych jest wiele schematów polaryzacji tranzystorów. Powyżej opisano najprostszy z nich, obok przedstawiono jeden z najczęściej stosowanych

Opisane powyżej wzmacniacze o wspólnej bazie, wspólnym emiterze i wspólnym kolektorze są układami podstawowymi. Inne wyspecjalizowane wzmacniacze (np. wzm. mocy, wzm. rezonansowe, wzm. wielkiej częstotliwości, wzm. różnicowe itd) są ich modyfikacjami , ewentualnie kombinacjami.

