



Uniwersytet  
Wrocławski

**Wydział Fizyki  
i Astronomii**  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9  
50-204 Wrocław  
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65  
fax +48 71 328 73 65  
e-mail: [sekr@ifd.uni.wroc.pl](mailto:sekr@ifd.uni.wroc.pl)  
[www.ifd.uni.wroc.pl](http://www.ifd.uni.wroc.pl)

# **Elektronika (konspekt)**

Franciszek Gołek ([golek@ifd.uni.wroc.pl](mailto:golek@ifd.uni.wroc.pl))

[www.pe.ifd.uni.wroc.pl](http://www.pe.ifd.uni.wroc.pl)

## **Wykład 07**

**Elementy aktywne, lampy elektronowe i tranzystory.**

# Lampy próżniowe i tranzystory

Tranzystor jest elementem, który zmieniając swoją oporność może wzmacniać sygnały elektryczne w sprzęcie audio albo jako tzw. 0-1 przełącznik realizować funkcje logiczne w obwodach cyfrowych.

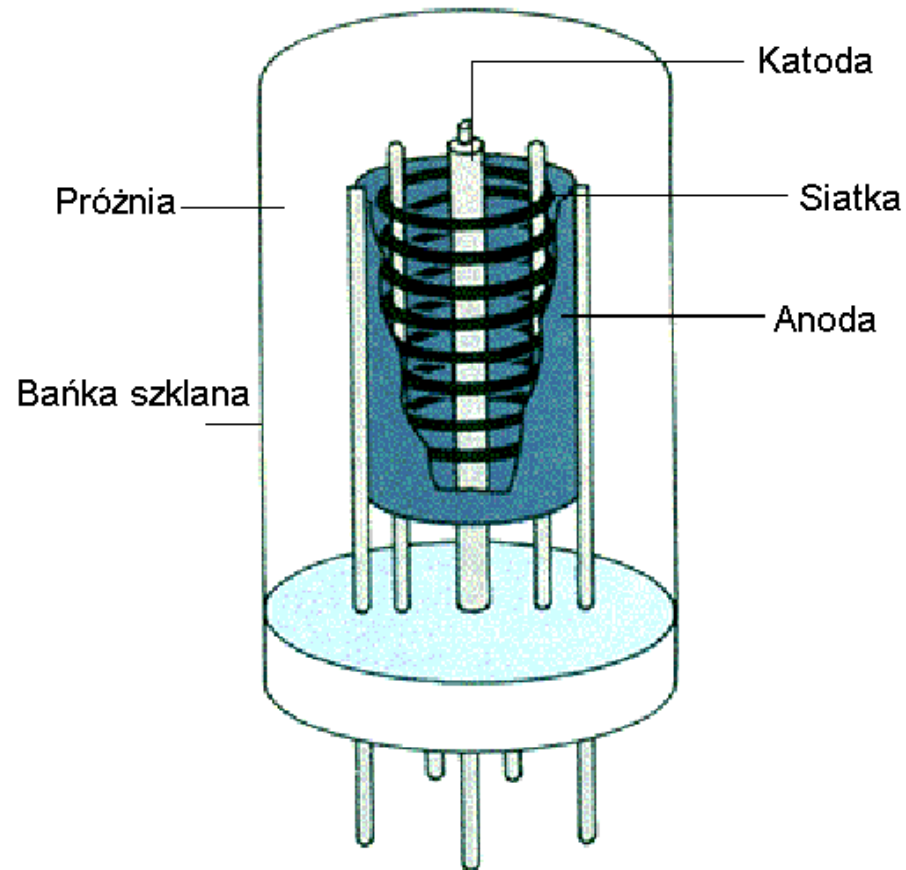
Znacznie wcześniej przed powstaniem tranzystora wynaleziono Lampę (J.A. Fleming 1904 – dioda próżniowa, Lee De Forest 1906 – trioda próżniowa, I. Langmiur 1912 - wysoko-próżniowe lampy radiowe). Poczynając od lampy triody, złożonej z katody, anody oraz umieszczonej między nimi siatki, stało się możliwe sterowanie

prądem anoda-katoda przy pomocy pola elektrycznego siatki i małego prądu siatka-katoda. Ten swoisty „zawór” (w którym potencjał siatki przemyka prąd anodowy) zapewnił efekt wzmacniania sygnałów elektrycznych. Dla wielu badaczy efekt wzmocnienia sygnału sterującego triodą był inspiracją w pracach nad otrzymaniem tranzystora.

[www.angelfire.com/planet/funwithtransistors/Book CHAP-4A.html](http://www.angelfire.com/planet/funwithtransistors/Book_CHAP-4A.html)

[www.daheiser.info/VTT/TEXT/vacuum%20tube%20characteristic%20equations.pdf](http://www.daheiser.info/VTT/TEXT/vacuum%20tube%20characteristic%20equations.pdf)

# Lampa trioda



# Wzmacnianie sygnałów elektrycznych na zasadzie dzielnika napięcia zawierającego jeden sterowalny, zmienny rezystor.

Rozważmy układ szeregowo połączonych: sterowanego rezystora zmiennego  $R_z$  i rezystora stałego – odbiornika  $R_o$  połączonych zasilaczem tak jak dzielnik napięcia. Mamy tu

$$U_{R_o} = R_o \times U / (R_o + R_z) \quad \text{– napięcie na } R_o$$

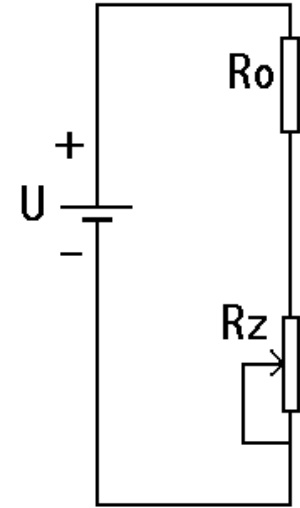
$$U_{R_z} = R_z \times U / (R_o + R_z) \quad \text{– napięcie na } R_z.$$

Przy zmianie  $R_z$  od wartości  $R_z \gg R_o$  do  $R_z \ll R_o$  moc wydzielana w  $R_o$  zmieni się w przybliżeniu

od  $P_{\min} = 0$  do  $P_{\max} = U^2 / R_o$ . Zatem impuls mocy wyjściowej wydzielanej w odbiorniku osiągnie wartość

$P_{\text{wy}} \approx P_{\max} = U^2 / R_o$ . Jeżeli moc sygnału sterującego  $P_s$ , który „pokręcił” rezystorem  $R_z$  była mniejsza od  $P_{\max}$  to otrzymaliśmy wzmacnienie sygnału  $K_p = P_{\text{wy}} / P_s$ . Taki trick można wykonać zarówno przy pomocy lampy jak i tranzystora.

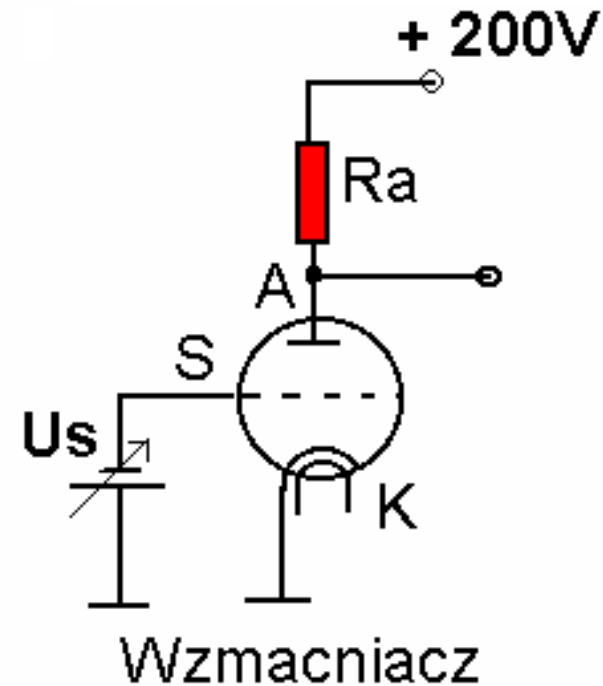
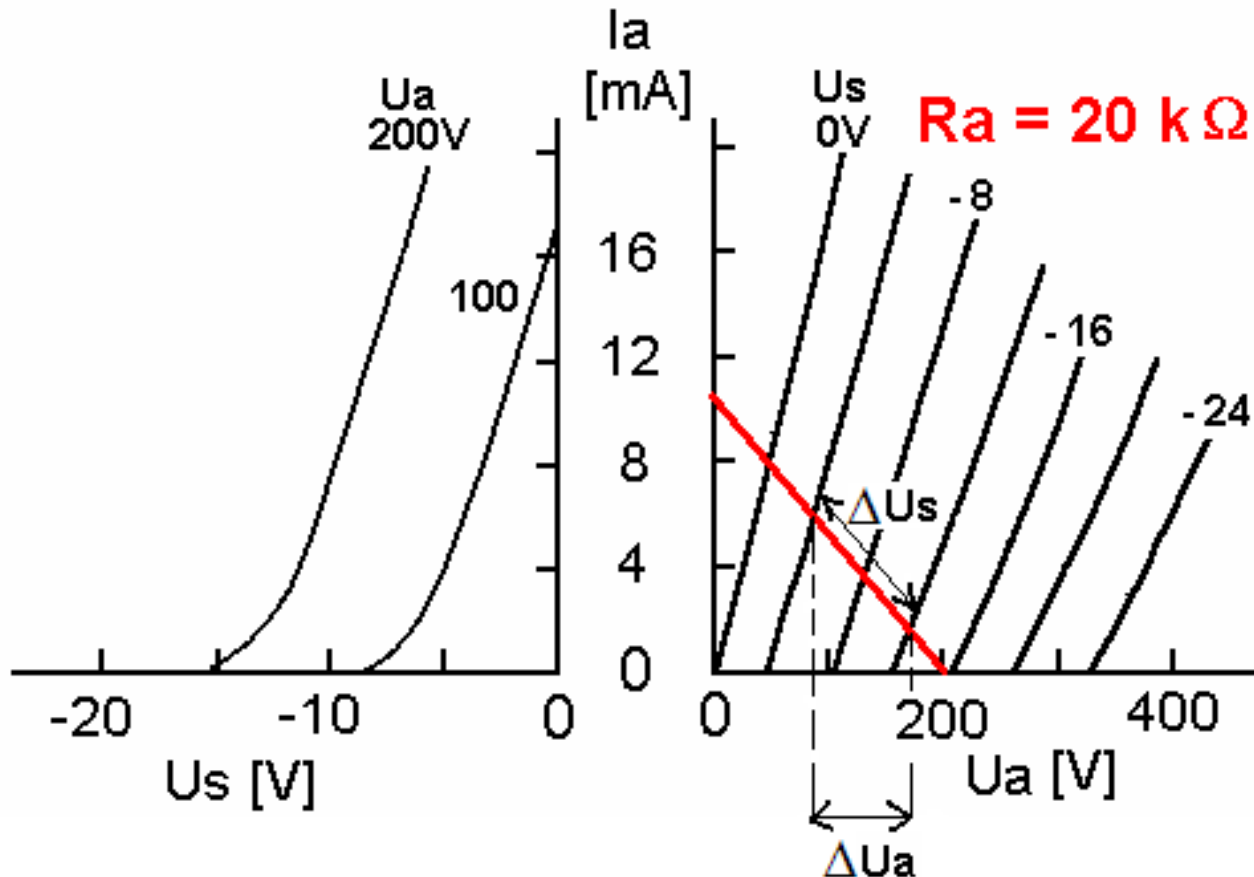
Zdolność wpływania sygnału elektrycznego na inny sygnał elektryczny to podstawowa cecha tzw. elementów aktywnych. Obecnie w układach elektronicznych elementy aktywne w postaci tranzystorów występują wyjątkowo obficie.



**Trioda jako element dzielnika napięcia dającego wzmacnienie sygnału elektrycznego.** Dzięki dużej przezroczystości siatki S wielokrotnie mniej elektronów trafia w siatkę niż zostaje przez nią przepuszczonych do anody co już powodując wzmacnienie prądowe. Z rodziny charakterystyk statycznych na poniższym rysunku widać, że  $\Delta U_s < \Delta U_a$  ( $8V < 90V$ ) co daje wzmacnienia napięciowe. Dodatkowo mamy:  $I_a > I_s$  oraz  $\Delta I_a > \Delta I_s$  co w rezultacie daje znaczne wzmacnienie mocy.

$$\Delta U_a \times \Delta I_a \gg \Delta U_s \times \Delta I_s \quad \Delta P_{Ra} \gg \Delta P_{Sterujące} \quad \text{http://ecclab.com/start.php3?ID=6.}$$

Przykładowa rodzina charakterystyk statycznych triody



# Parametry lampy.

Oznaczenia:  $U_a$  - Napięcie anodowe (względem katody).  $I_a$  - Prąd anodowy  $U_s$  - Napięcie siatka – katoda,  $\Delta$  – symbol małej zmiany (przyrostu),  $R_a$  - rezystor anodowy (obciążenie).

$r_a$  (lub  $\rho_a$ ) - dynamiczna rezystancja anodowa:

$$r_a = \Delta U_a / \Delta I_a \text{ przy stałym napięciu siatki } U_s$$

$g_m$  - transkonduktancja (lub  $S_a$  - nachylenie charakterystyki):

$$g_m = \Delta I_a / \Delta U_s \text{ przy stałym napięciu anody } U_a.$$

$\mu$  (lub  $k_a$ ) - współczynnik amplifikacji:

$$\mu = |\Delta U_a / \Delta U_s| \text{ przy stałym prądzie anodowym } I_a.$$

Występuje związek między współczynnikiem amplifikacji  $\mu$ , rezystancją dynamiczną anodową  $r_a$  i transkonduktancją  $g_m$  (nachyleniem charakterystyki  $S_a$ ):

$$\mu = r_a \times g_m \quad (\text{lub } k_a = \rho_a \times S_a)$$

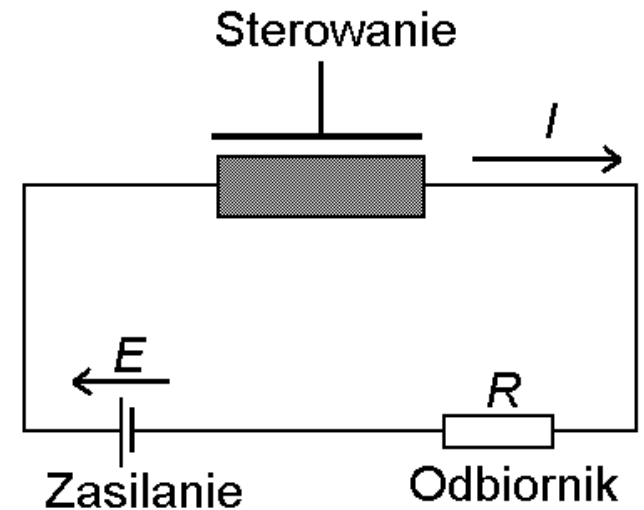
$$\text{Wzmocnienie napięciowe } k_U = \mu \times R_a / (r_a + R_a)$$

$$k_U = k_a \times R_a / (\rho_a + R_a)$$

Zanim przejdziemy do omawiania tranzystora warto wspomnieć oprócz triody, o takich lampach jak tetroda czy pentoda. Trioda jest lampą trójelektrodową i najprostszą zapewniającą efekt wzmocnienia. Poprawiając charakterystyki wzmacniacza w lampie dodano drugą siatkę (o stałym potencjale dodatnim) aby zmniejszyć pojemność pasożytniczą między anodą a siatką pierwszą „sterującą” – tak powstała tetroda. Tetroda miała jednak poważną wadę polegającą na tym, że część elektronów wtórnych, wybijanych z anody była przechwytywana przez dodaną siatkę drugą. Taki efekt, zwany dynatronowym, powodował wklęsnięcia na charakterystykach anodowych lampy ( $I_a = I_a(U_a)$ ) a przez to poważne zniekształcenia wzmacnianego sygnału. Aby tego uniknąć dodano jeszcze jedną, trzecią siatkę – tak powstała pentoda. Siatka trzecia w pentodzie zwykle ma potencjał zerowy (czyli jest zwarta z katodą) i dzięki temu stanowi barierę dla elektronów wtórnych z anody. Elektrony wtórne są zawracane do anody i efekt dynatronowy tu nie występuje. Oprócz pentod z siatką zerową (antydynatronową) stosowane były również pentody z podwójnym sterowaniem, tzw. pentody mieszające. W takich pentodach siatka trzecia była drugą siatką sterującą. Takie pentody można było stosować w układach koincydencyjnych i antykoincydencyjnych jak również do przemiany częstotliwości (czy modulacji sygnałów w.cz.). Ich wadą znowu była duża pojemność między anodą a siatką trzecią (S3) ograniczając od góry częstotliwość sygnałów doprowadzanych do siatki S3. W heptodzie mamy dwie dodatkowe siatki ekranujące (S1 i S3 sterujące a S2 i S4 ekranujące albo S1 i S4 sterujące a S3 i S5 ekranujące z S2 jako specjalnej siatki-anody dla heterodyny – lokalnego generatora).

# TRANZYSTORY

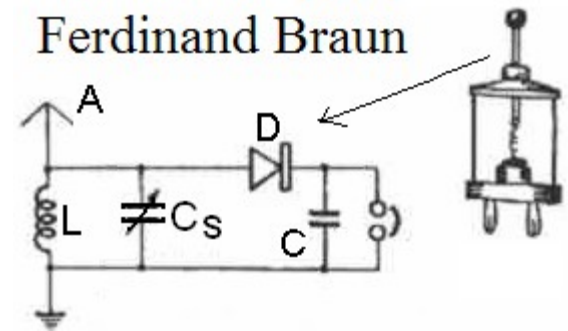
W 1926r. Julius Lilienfeld (autor wielu patentów) opatentował ideę, że słabo przewodzący materiał umieszczony w polu elektrycznym będzie zmieniał swoje przewodnictwo pozwalając na uzyskanie efektu wzmocnienia (i może też efektu przełączenia). Poszukiwania realizacji tej idei trwały wiele lat. Przemysł telekomunikacyjny stosował w tym czasie niedogodne lampy próżniowe i przełączniki. Po wojnie w roku 1946 Mervin Kelly dyrektor laboratoriów Bell'a powołał grupę badawczą dla opracowania stałociałowych substytutów lamp i przełączników. Członkowie tej grupy w 1947 roku, wynaleźli tranzystor ostrzowy a po kilku miesiącach tranzystor złączowy. Tranzystory polowe, realizujące ideę Lilienfelda, pojawiają się od 1953 roku – jako tranzystory typu JFET, i po 1960 roku – jako tranzystory MOSFET. Już w 1954 roku sprzedano 100 000 tranzystorowych radioodbiorników a laboratoria Bell'a wykonały komputer z 700 tranzystorami dla sił powietrznych USA.



**Tranzystor** – to wynalazek, który wywarł i nadal wywiera wielki wpływ na człowieka i jego otoczenie. Wynalezienie tranzystora było jednym z wielu pożytecznych wyników szerokiego programu badawczego poświęconego półprzewodnikom, w którym brali udział fizycy, chemicy, metalurdzy i elektronicy. Wiele lat przed wynalezieniem tranzystora wiadomo było, że przewodność półprzewodnika zmienia się pod wpływem temperatury oraz pod wpływem oświetlenia (przewodność rośnie z temperaturą – odwrotnie niż w metalach, przewodność rośnie też przy oświetlaniu). Oczywistym jest, że przewodność zależy od ilości nośników ładunku w jednostce objętości oraz od ruchliwości tych nośników. Ruchliwość to stosunek prędkości dryfu nośników ładunku  $v_d$  w polu elektrycznym  $E$  do natężenia tego pola. Ruchliwość nośników ładunku decyduje o szybkości działania i przełączania tranzystorów. Wzrost temperatury obniża ruchliwość w metalach i półprzewodnikach ale gwałtownie zwiększa ilości nośników ładunku i przewodność tylko w półprzewodnikach. Efekty te wyjaśnia pasmowa teoria ciał stałych zapoczątkowana przez A.H. Wilsona w 1931r. Już na początku XX wieku jako odbiorczy układ radiowy wykorzystywano, nie rozumiejąc jego działania, detektor kryształowy (inaczej dioda ostrzowa) w postaci złącza bardzo cienkiego drutu stalowego z kryształkiem **galeny (PbS)**. Układy z detektorem kryształowym były stopniowo wypierane przez układy lampowe, a te już w drugiej połowie XX wieku przez układy tranzystorowe. Oczywiście to fizycy wynaleźli tranzystor i fizycy znajdują kolejne jego udoskonalenia.

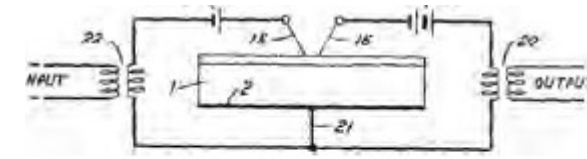
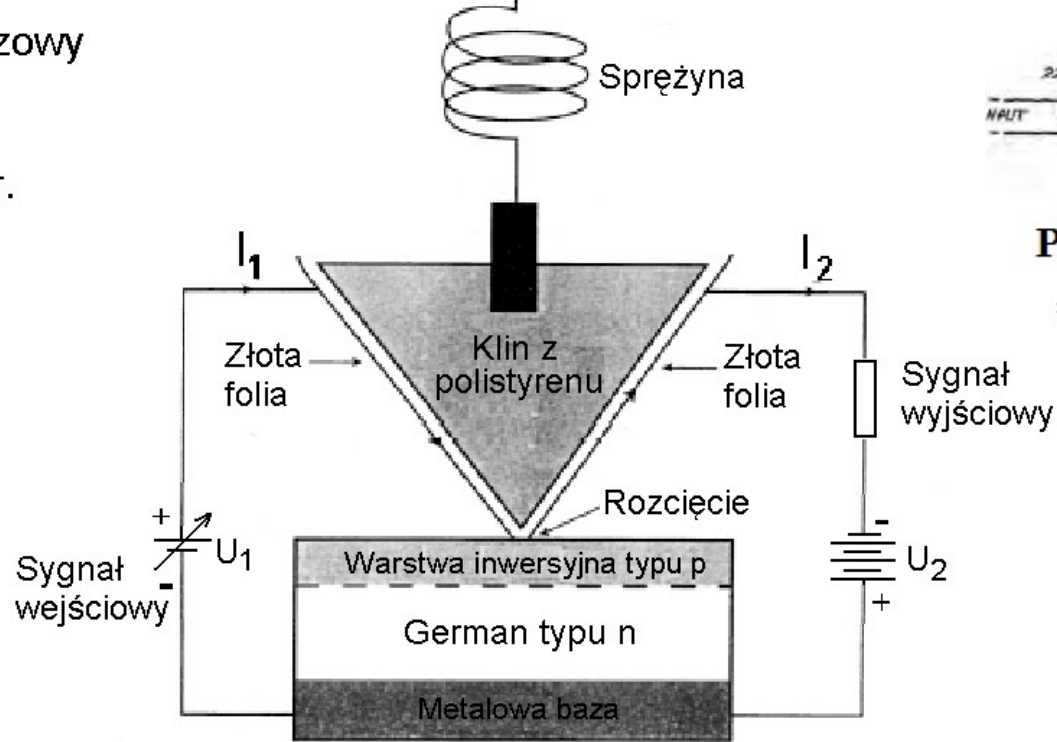
William Bradford Shockley w roku 1938 rozpoczął poszukiwanie sposobu zmiany detektora krystalicznego na wzmacniacz sygnału elektrycznego. Poszukiwania te przerwane przez wojnę kontynuował od roku 1945 kierując grupą, w której byli między innymi Brattain i Bardin (wynalazcy tranzystora ostrzowego).

Prostownik 1874  
Ferdinand Braun

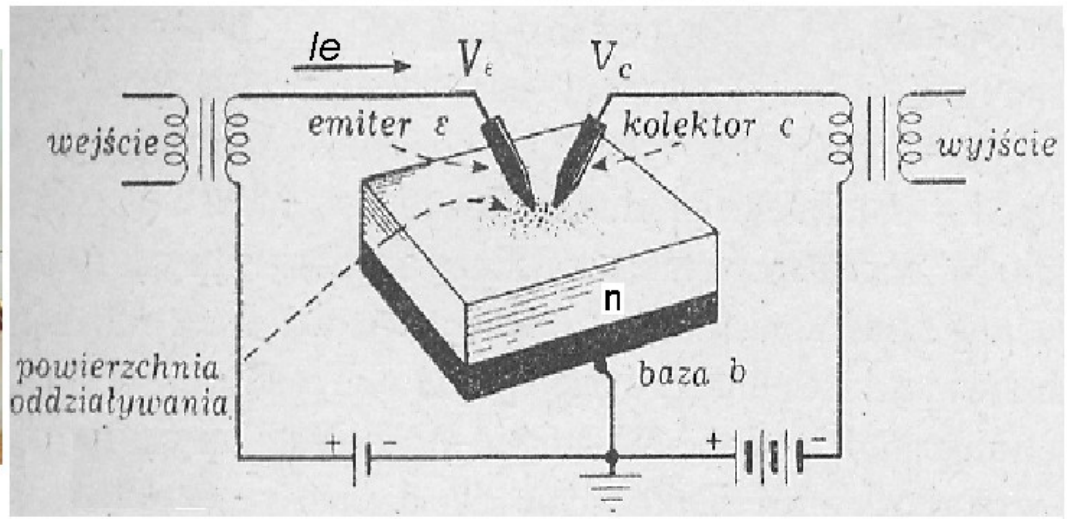
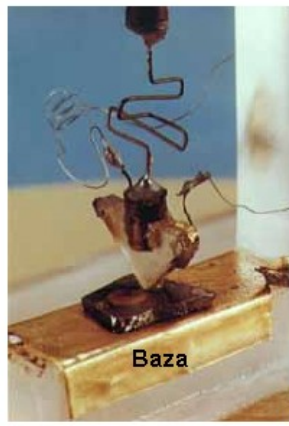




Tranzystor ostrzowy  
 J. Bardeen i  
 W.H. Brattain  
 Bell Lab. 1947 r.



Patent Roberta Gibney'a  
 # 2,560,792

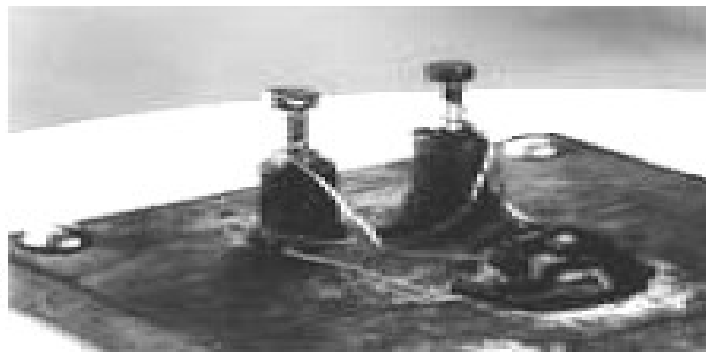


W budowie tego pierwszego tranzystora trudnym było umieścić dwa ostrza (emiter i kolektor) w odległości około 0,1 mm od siebie na czystej powierzchni kryształu Ge.

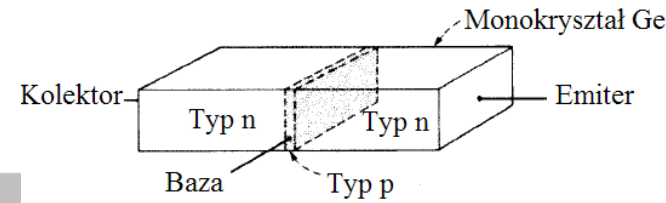
Nezwykłe ważnymi dla wynalezienia tranzystora były:

- 1) W 1936 r. Mervin Kelly organizuje grupę badawczą dla rozwoju urządzeń elektronicznych na bazie ciał stałych (jak diody krystaliczne zamiast lamp próżniowych).
- 2) Inna grupa powołana w 1946 r. przez M. Kelly'ego, której kierownikiem został Bill Shockley decyduje aby zająć się najprostszymi półprzewodnikami: germanem i krzemem.
- 3) Bardeen i Brattain, na podstawie prac z Purdue University szybko orientują się, że głównym problemem uzyskania efektu polowego (zmiany oporności wymuszane zewnętrznym polem elektrycznym) są stany powierzchniowe.

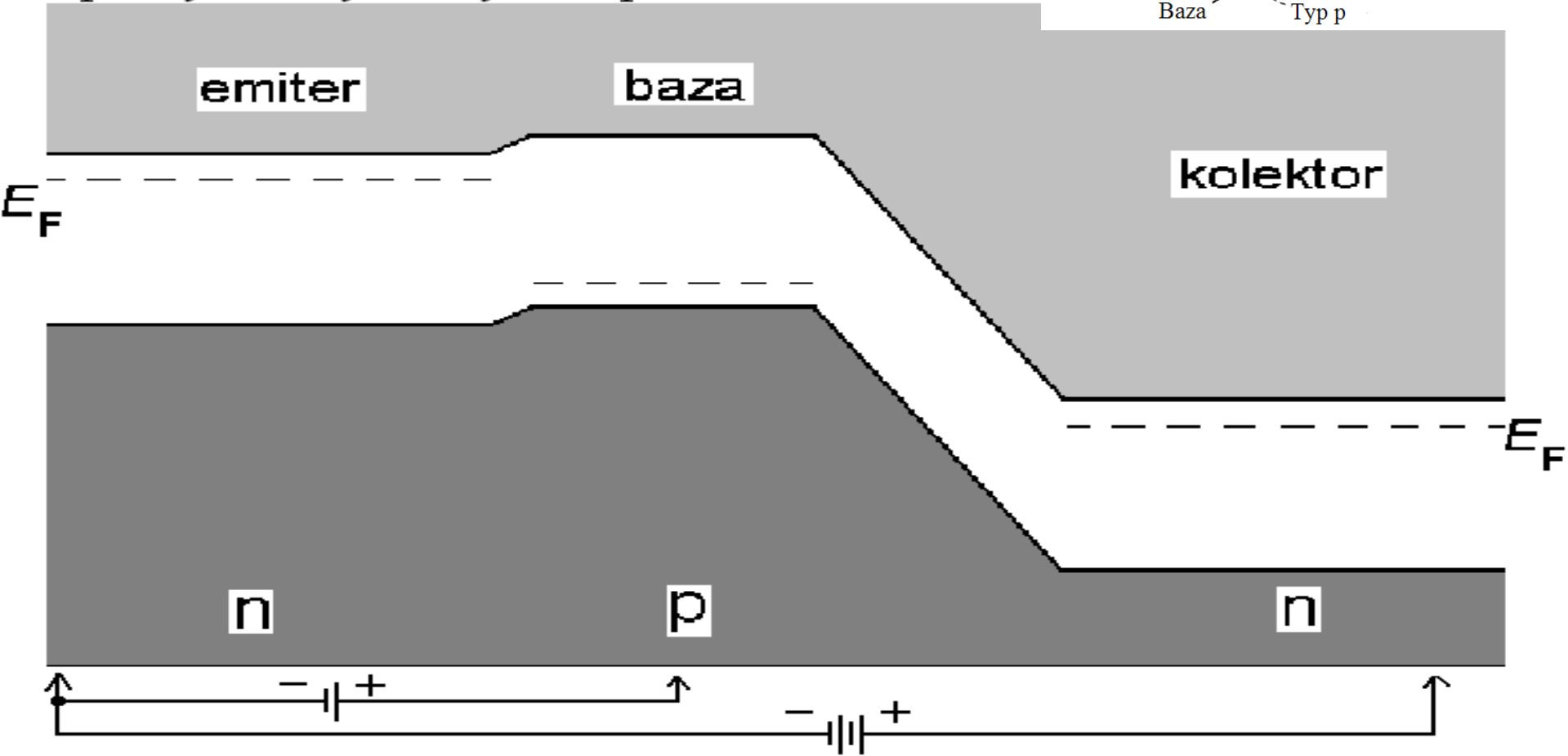
Pierwszy tranzystor  
złączowy (kanapka  
germanowa)  
William B. Shockley  
w Bell Labs, rok 1948.



Pierwszy tranzystor  
krzemowy  
Gordon Teal  
w Texas Instruments,  
rok 1954.



Spolaryzowany tranzystor npn  $V_e < V_b < V_c$



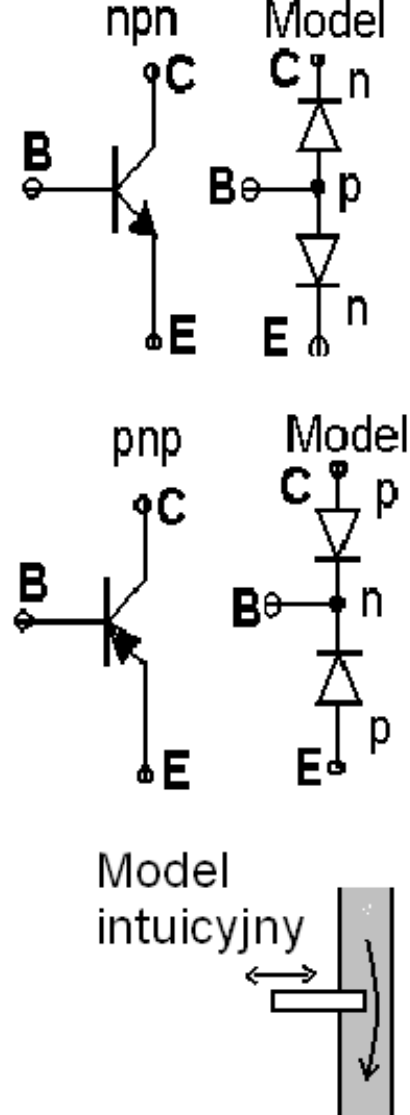
Dzięki tranzystorom możemy: 1) budować układy wzmacniające iloczyn napięcia i prądu czyli moc sygnału elektrycznego, 2) budować przełączniki i układy zerojedynkowe. Podobne możliwości stwarzały lampy ale przy większych kosztach i stratach energii na grzanie katod. Ponadto dzięki tranzystorom dokonuje się rewolucja, w której dotychczasowy nośnik informacji - papier zastępowany jest nośnikami elektronicznymi i powstaje „inteligencja” z elektronicznymi mózгами i sensorami daleko bardziej sprawnymi od naszych biologicznych.

## Tranzystory złączowe bipolarne

W nazwie słowo „bipolarne” bierze się z tego, że w mechanizmie działania takich tranzystorów istotną rolę odgrywają nośniki ładunku obu znaków.

Tranzystory te składają się z dwóch złączy pn, które razem stanowią układ typu npn albo pnp. Takie układy nazywamy odpowiednio tranzystorami typu npn lub pnp. W obu przypadkach środkowa warstwa półprzewodnika, zwana bazą B, jest bardzo cienka. Jej grubość jest porównywalna ze średnią drogą swobodną nośników ładunku wstrzykiwanych do niej z emitera, tak aby zapewnić sam efekt tranzystorowy polegający na przechwytywaniu tychże nośników przez kolektor. Prąd kolektora jest niemal równy prądowi emitera. Tylko drobna część nośników (około 1%), które ulegną rekombinacji w cienkiej bazie stanowią prąd bazy. Brzegowe warstwy tranzystora mają nazwy odpowiednio: emiter E i Kolektor C. Nazwa „tranzystor” pochodzi od angielskiego opisu efektu: TRANSferable reSISTOR, w którym rezystancja między kolektorem a emiterym może być zmieniana przez sygnał podany między bazę a emiter.

Modele diodowe ułatwiają sprawdzenie i rozpoznanie tranzystora przy pomocy multimetru. Multimetry zwykle dysponują funkcją dioda, która daje stały prąd od zacisku czerwonego do tzw. wspólnego. Sprawdzając tą funkcją złącza BE i BC, stwierdzimy, że  $U_{CB} < U_{BE}$  co jest zgodne z faktem silniejszego domieszkowania emitera niż kolektora. Tranzystor połączony szeregowo swoimi zaciskami emitera i kolektora z opornikiem i włączony do zasilania napięciem  $U_{CC}$  stanowi swoisty dzielnik napięcia! Złącze BE jest polaryzowane sygnałem sterującym. Otwierając złącze BE powodujemy, że z emitera wprowadzane są mobilne nośniki ładunku w obszar cienkiej bazy a tym samym w pobliże złącza BC. Około 99% tych nośników jest porywane przez kolektor (rys. na następnym slajdzie). Tylko około 1% nośników trafia w obszarze bazy na nośniki przeciwnego znaku i rekombinuje z nimi. W tranzystorze npn elektrony wstrzyknięte z emitera do bazy rekombinują z dziurami – nośnikami większościowymi w bazie. Na miejsce każdej znikającej dziury, w procesie rekombinacji, z zacisku bazy wchodzi następna dziura stanowiąc część prądu bazy.

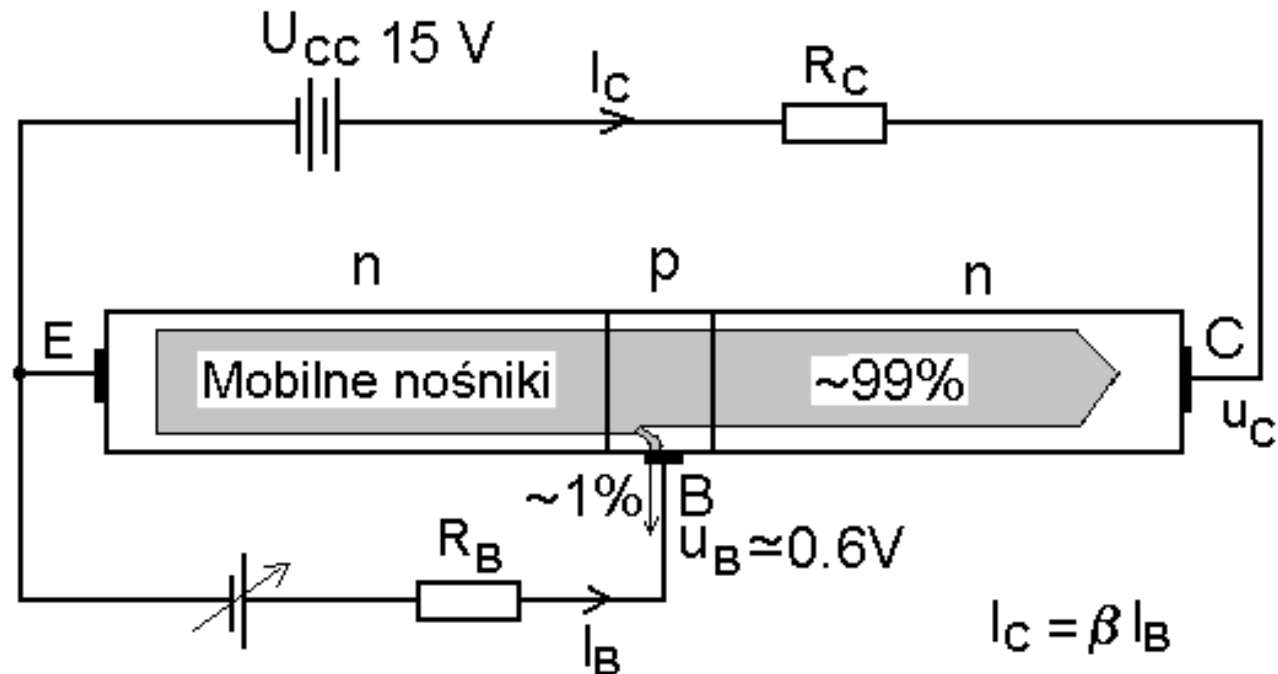


Najprostszy model intuicyjny mówi, że sygnałem o małej amplitudzie mocy, za pomocą bazy (zaworu), dokonuje się zamykanie i otwieranie przepływu dużego ładunku (o dużej amplitudzie mocy) między kolektorem i emiterem. Czasem tranzystor nazywany jest triodą półprzewodnikową.

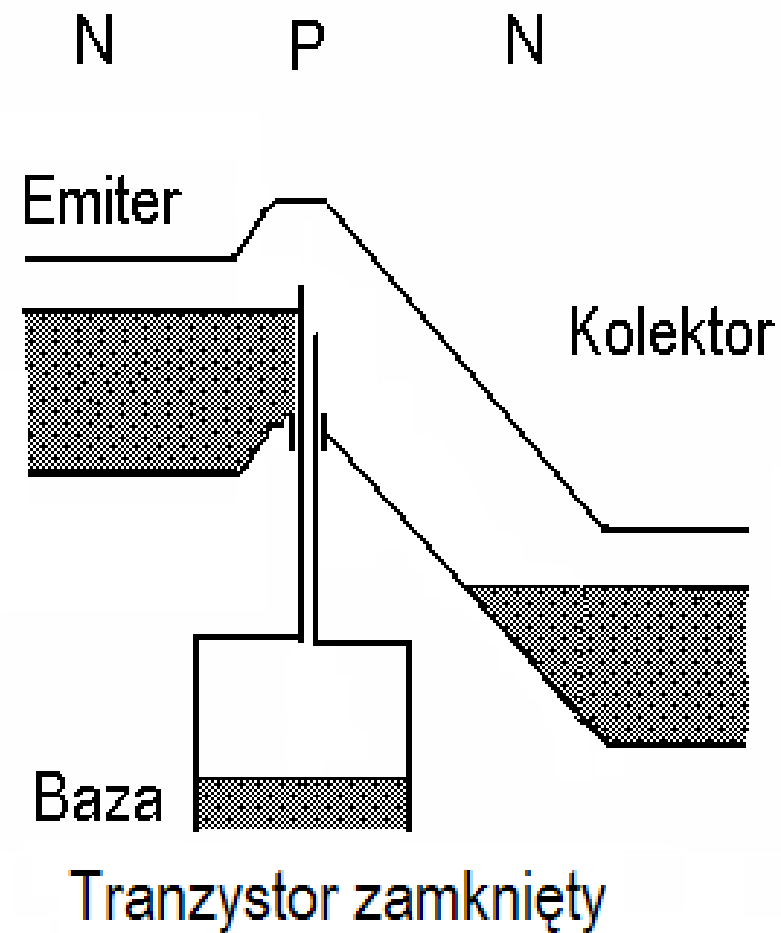
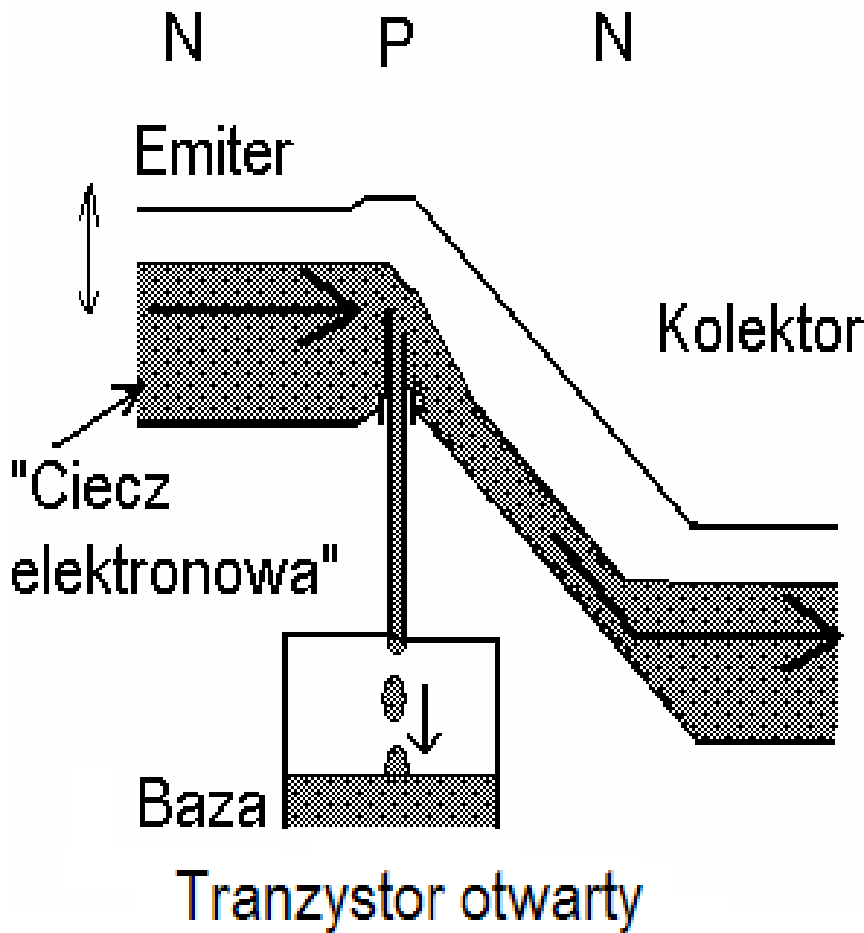
Źródło sterujące złączem BE pracuje z małym prądem ale decyduje o prądzie o natężeniu o dwa rzędy wielkości większym w obwodzie emiter-kolektor-opornik-zasilacz dużej mocy. Cechą charakterystyczną tranzystora jest to, że prąd kolektora  $I_C$  jest proporcjonalny do prądu bazy  $I_B$ . Stosunek  $\beta_{st} = I_C/I_B$  nazywa się statycznym (stałoprądowym) współczynnikiem wzmocnienia prądowego (inne oznaczenie:  $h_{21E} = I_C/I_B$ ). Prąd emitera rozgałęzia się na prąd bazy i prąd kolektora:  $I_E = I_C + I_B$ .

Zatem  $I_E$  jest  $h_{21E} + 1$  raz większy od  $I_B$ .

Tranzystor jest "zaworem", który pozwala na kontrolowany przepływ prądu. Nie jest "pompą", która tłoczy prąd. Rolę pompy pełni zasilacz lub bateria  $U_{CC}$ . Małe zmiany  $U_B$  (0.1V) powodują duże zmiany impedancji E-C i przez to duże zmiany  $u_C$ .



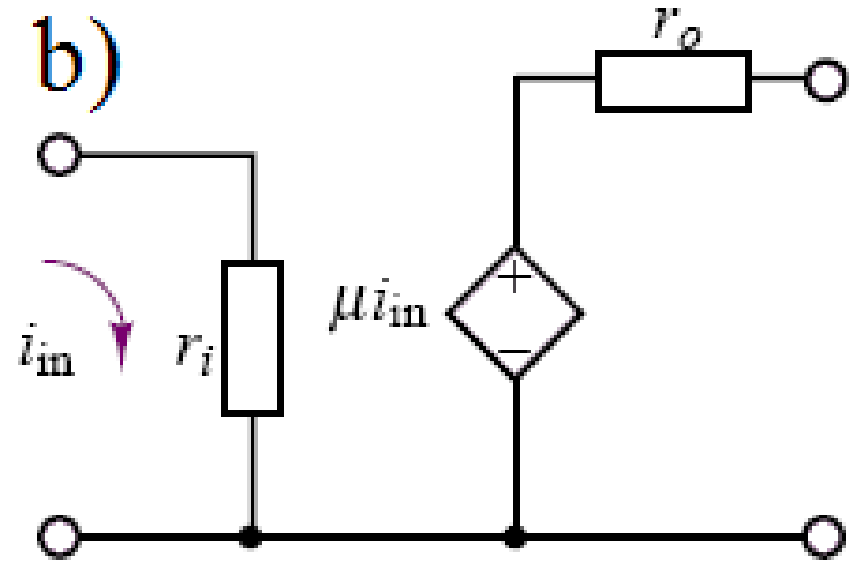
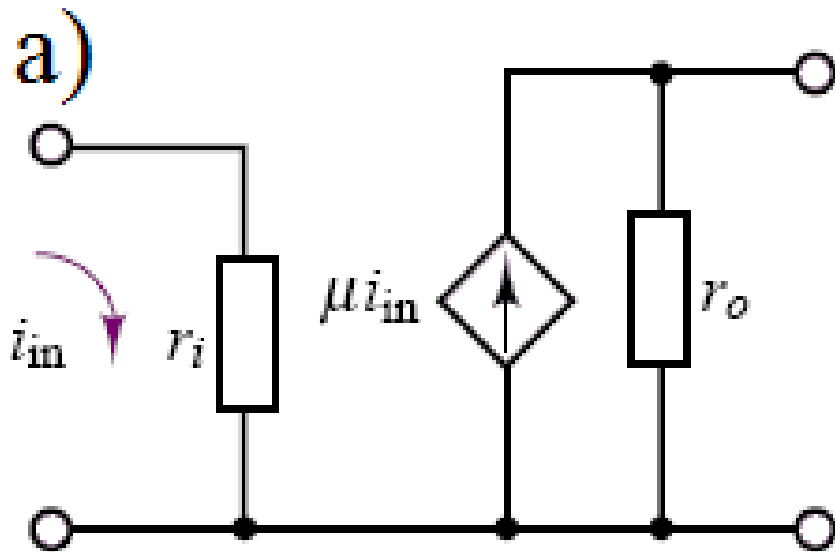
# Cieczowy model spolaryzowanego otwartego i zamkniętego tranzystora npn



# Modele tranzystora bipolarnego

Tranzystory bipolarne pracujące jako wzmacniacze traktuje się zwykle jako elementy sterowane prądowo (sterowane prądem bazy). Zatem modelem tranzystora bipolarnego, zależnie od układu w którym funkcjonuje, może być źródło prądowe sterowane prądem (rys. a) albo źródło napięciowe sterowane prądem (rys. b).

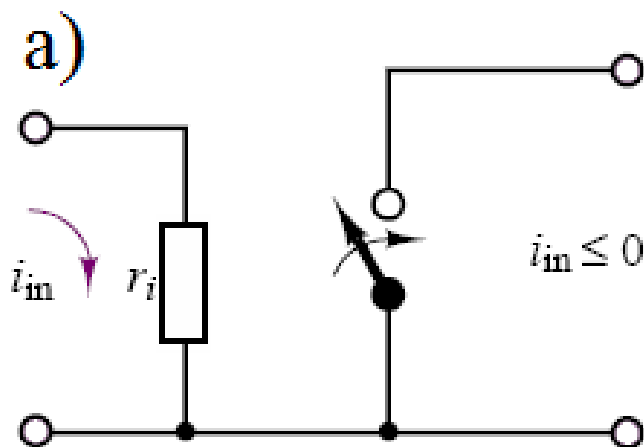
$\mu$  - jest współczynnikiem proporcjonalności.



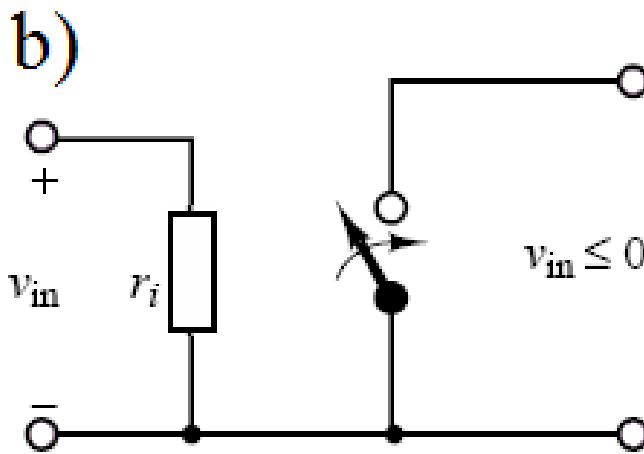


# Modele tranzystora bipolarnego

Tranzystory bipolarne mogą też pracować jako elementy przełączające (nieliniowe, on/off). Wtedy można je traktować jako przełączniki sterowane prądem (rys. a) albo przełączniki sterowane napięciem (rys. b).



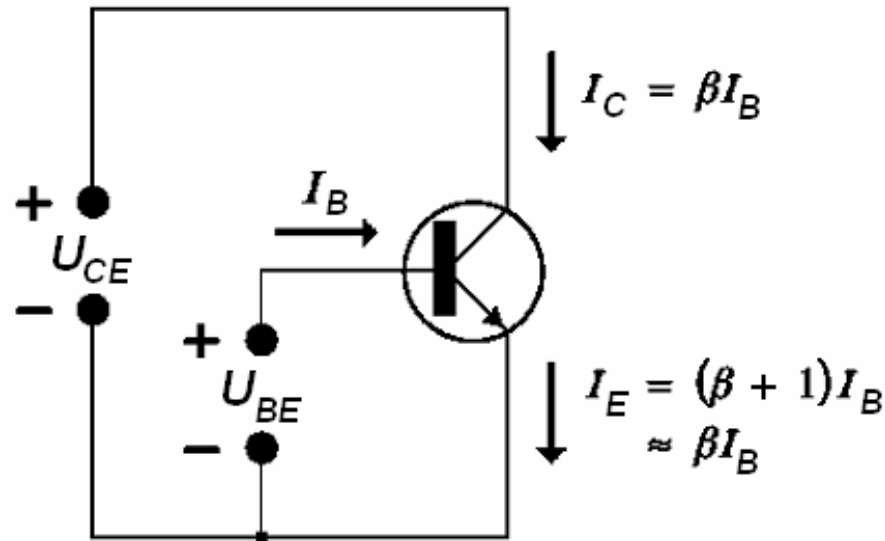
Przełącznik kontrolowany prądem



Przełącznik kontrolowany napięciem

# Prosty model tranzystora

mówi, że:  $I_C = \beta I_B$ , gdzie  $10 < \beta < 1000$ .



Każdy tranzystor charakteryzuje się maksymalnymi (dopuszczalnymi) wartościami  $I_C$ ,  $I_B$  i  $U_{CE}$ . Ważną wielkością charakteryzującą tranzystor jest częstotliwość graniczna  $f_T$  określana jako ta, przy której współczynnik wzmocnienia prądowego maleje do jedności

Tzw. **prosty model tranzystora** jako wzmacniacza prądowego mówi, że z dobrym przybliżeniem prąd kolektora jest proporcjonalny do prądu bazy:  $I_C = \beta_{st} I_B$  (w rzeczywistości  $\beta$  zależy od: natężenia prądu kolektora, napięcia kolektor-emiter, temperatury, a nawet od egzemplarza tego samego typu tranzystora). Ponadto w modelu prostym przyjmujemy, że  $U_{BE} = \text{const.} = 0.6V$ , tranzystor sterowany jest prądowo,  $I_E = I_C + I_B = I_B(1 + \beta)$ . Gdy tranzystor pracuje jako wzmacniacz, złącze baza-emiter jest polaryzowane w kierunku przewodzenia. Bariera potencjału na tym złączu jest zredukowana. W efekcie mamy znaczny prąd w elementach: emiter - bardzo cienka baza (rzędu  $\mu m$ ) - kolektor. W obwodzie bazy płynie znikomy prąd gdyż prawie wszystkie nośniki ładunku wstrzykiwane z emitera do bazy szybko znajdują się w obszarze złącza baza-kolektor i tu są przyspieszane do kolektora. Dzięki temu, że w cienkiej bazie prawdopodobieństwo rekombinacji i rozproszenia nośników jest małe, około 99% prądu emitera przechwytuje kolektor. Pozostałe około 1% prądu emitera stanowi prąd w obwodzie bazy. O wzmacnieniu decyduje fakt, że małe amplitudy  $U_B$  i  $I_B$  powodują duże amplitudy  $U_C$  i  $I_C$  (bo  $I_C = \beta_{st} I_B$  a  $U_C = R_C I_C$ ). Czyli mała amplituda mocy w obwodzie bazy wywołuje dużą (wzmocnioną) amplitudę mocy w obwodzie kolektora!

## Przykład.

Wyznaczyć (podać wyrażenie na) wzmacnienie napięciowe

$$k_U = U_o/U_s.$$

Najpierw wyznaczmy napięcie wejściowe  $U_{in}$

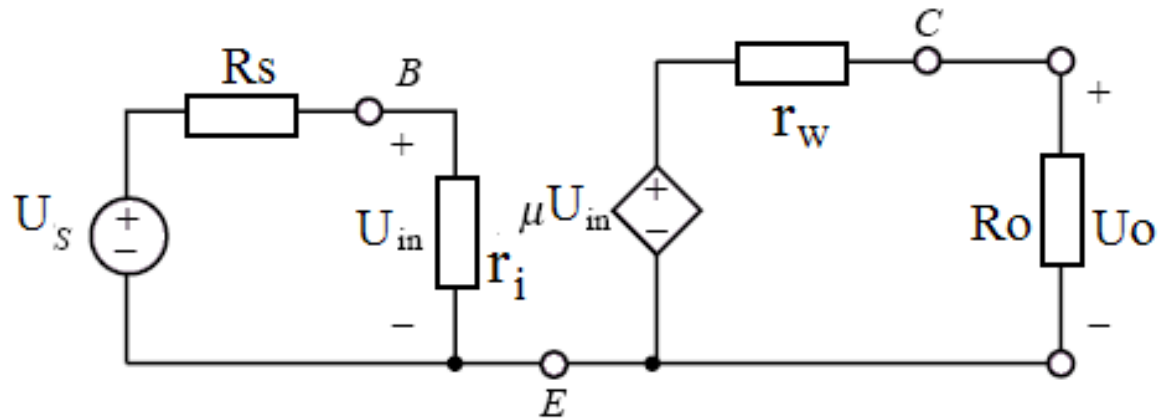
z wiedzy o dzielniku napięcia mamy:  $U_{in} = U_s r_i / (r_i + R_s) \rightarrow$

$\mu U_{in} = \mu U_s r_i / (r_i + R_s)$  i to napięcie też ulega podziałowi:

$$U_o = \mu U_s r_i / (r_i + R_s) \times R_o / (r_w + R_o),$$

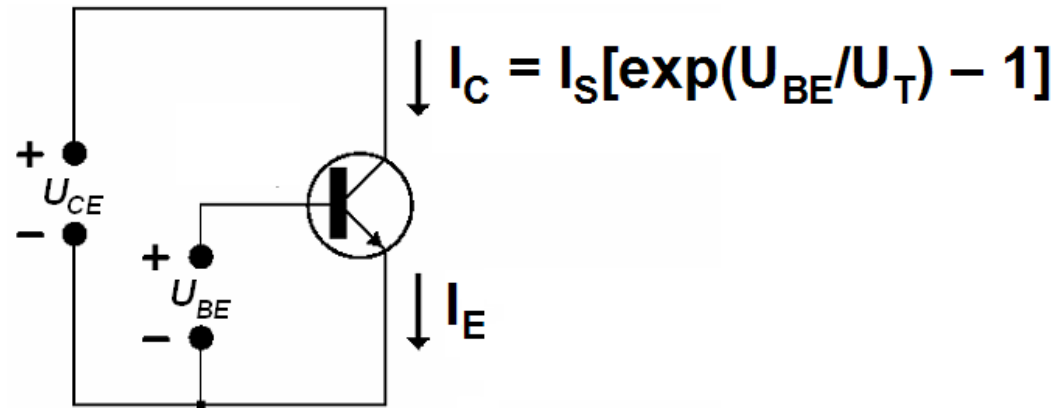
W końcu;  $k_U = U_o/U_s = \mu r_i / (r_i + R_s) \times R_o / (r_w + R_o),$

Komentarz: z wyrażenia na  $k_U$  widać, że wzmacnienie układu jest mniejsze od  $\mu$  (wzmocnienia samego tranzystora) i zależy od względnej wartości rezystancji wejściowej  $r_i$  i rezystancji źródła  $R_s$  oraz rezystancji obciążenia i rezystancji wyjściowej. Wzmocnienie staje się bliskie wartości  $\mu$  gdy  $r_i \gg R_s$  i  $R_o \gg r_w$ .



# Uproszczony model Ebersa-Molla mówi, że:

$$I_C = I_S [\exp(U_{BE}/U_T) - 1]$$



Poprawniejszym modelem tranzystora bipolarnego jako elementu transkonduktancyjnego jest **model Ebersa-Molla**. W tym modelu wykorzystujemy zależność prądu kolektora od napięcia między bazą a emiterem  $U_{BE}$ :  $I_C = I_S [\exp(U_{BE}/U_T) - 1]$  (jest to uproszczone równanie Ebersa-Molla, w dalszym uproszczeniu składnik  $-1$  jest pomijany gdy  $I_C \gg I_S$ ).

gdzie:  $U_T = kT/q$  ( $= 25.3\text{mV}$  w temperaturze pokojowej),  $I_S$  prąd wsteczny nasycenia zależny od danego egzemplarza tranzystora i jego temperatury. Ta zależność jest tak silna, że  $I_C$  rośnie o 9% przy wzroście temperatury o  $1^\circ\text{C}$  i niezmiennym napięciu  $U_{BE}$  (pomimo tego, że  $U_T = kT/q$ ).

Model Ebersa-Molla jest bardziej przydatny do opisu dynamiki przełączania tranzystora w elektronice cyfrowej (dwustanowej). Przy pomocy modelu E-M można oszacować niektóre parametry tranzystora niezależne od typu.

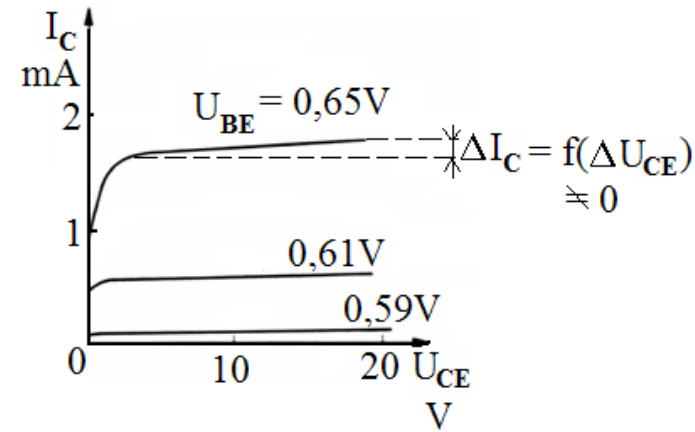
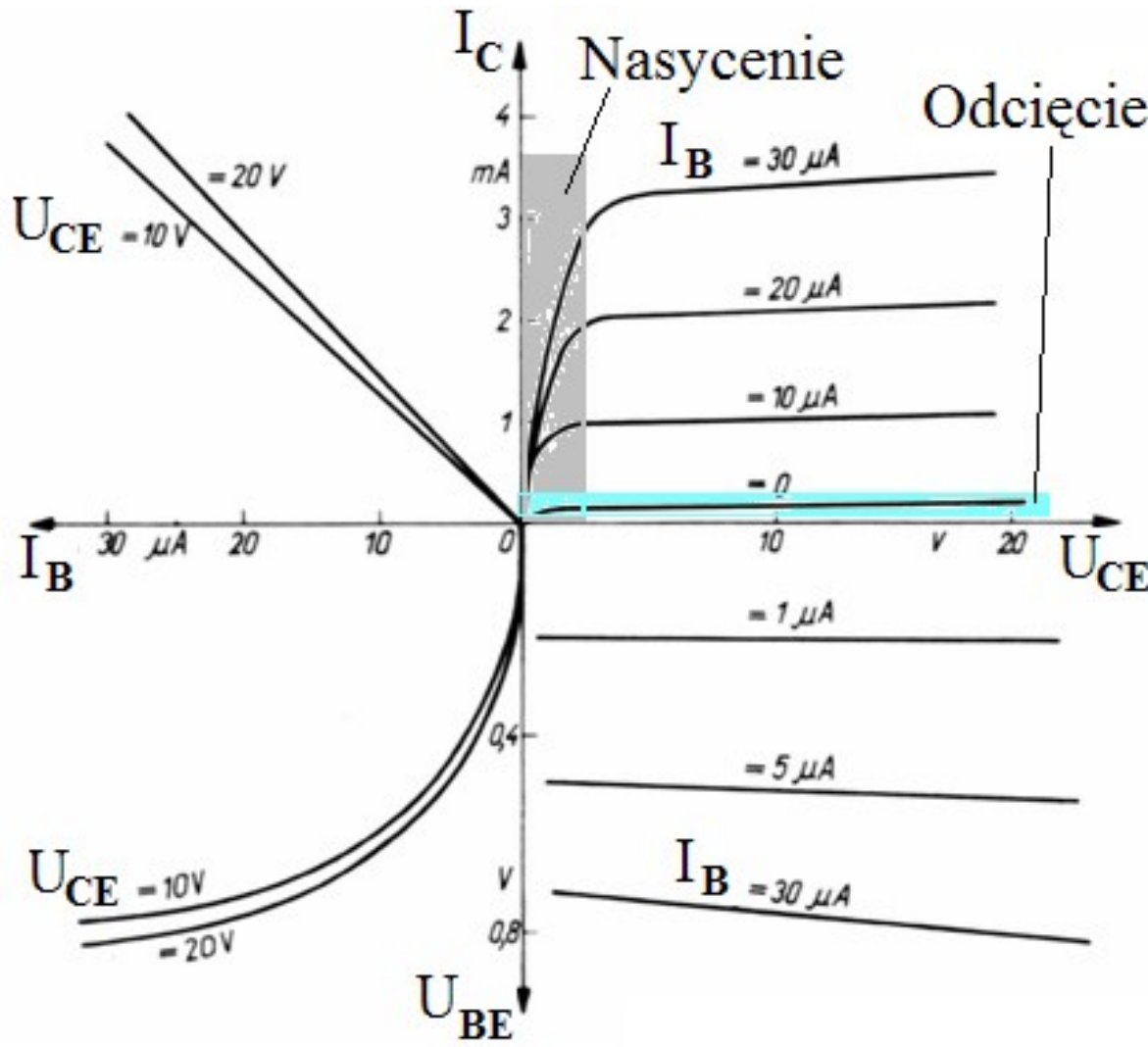
# Przykładowa rodzina charakterystyk tranzystora bipolarnego

## Efekt Early'ego:

niezerowy wpływ napięcia  $U_{CE}$  na prąd kolektora przy stałym napięciu  $U_{BE}$ .

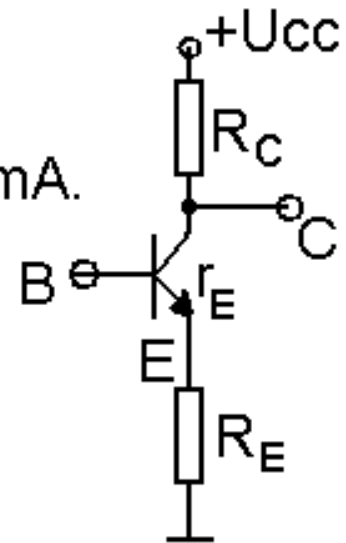
Powoduje to odchylenia od idealnego źródła prądowego. ( $U_{BE}$  też zależy od  $U_{CE}$  przy stałym  $I_C$ ).

$$\Delta U_{BE} \cong 0.0001 \Delta U_{CE}$$



Przykład. Oszacować wielkość rezystancji dynamicznej  $r_E$  występującej szeregowo z  $R_E$  przy podziale amplitudy napięcia, generowanej sygnałem wejściowym  $U_B$ , gdy  $I_C = 1\text{mA}$ .  
 Rozwiązanie:  $I_E \approx I_C$ ,  $I_C = I_0 \exp(U_{BE}/U_T) \leftarrow$  z równania E-B.

$$r = \frac{dU_E}{dI_E} = \frac{1}{\frac{dI_E}{dU_E}} \approx \frac{1}{\frac{dI_C}{dU_{BE}}} = \frac{U_T}{I_C} = \frac{0,025\text{V}}{1\text{mA}} = \frac{0,025\text{V}}{1\text{mA}} = 25\Omega$$



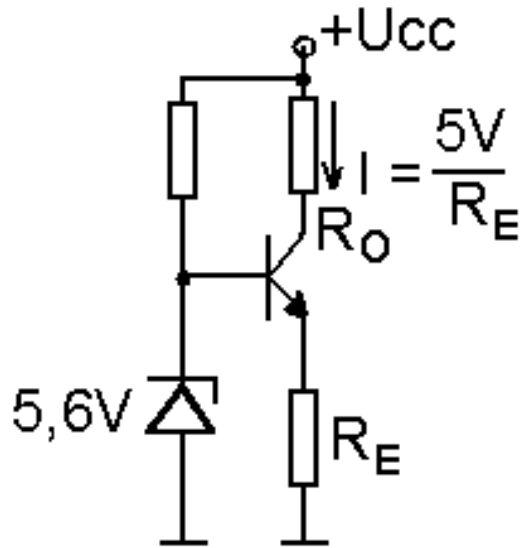
Widać, że opór dynamiczny  $r_E$  ma małą wartość i głównie zależy od natężenia prądu  $I_C$ . Zależność  $r_E$  od temperatury ukryta jest w wartości  $U_T$ .

**Uwaga.** W odróżnieniu od oporników czy kondensatorów zwanych **dwójnikami**, tranzystory podobnie jak wiele układów (np. filtry) zaliczamy do **czwórników**. Dla czwórników wyróżniamy dwie wielkości wejściowe **U1** i **I1** oraz dwie wyjściowe: **U2** i **I2**. Zauważmy, że przyłożenie napięcia do jakiegoś układu wymaga dwóch zacisków. Podobnie jest z odebraniem np. wzmacnionego napięcia. Fakt ten w naturalny sposób przyczynia się do stosowania teorii czwórników w elektronice a w szczególności do opisu wzmacniaczy. Symbol:  $h_{21E}$  to właśnie element tzw. macierzy  $H_e$ .

$$\begin{pmatrix} dU_{BE} \\ dI_C \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11e} & h_{12e} \\ h_{21e} & h_{22e} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} dI_B \\ dU_{CE} \end{pmatrix} = H_e \begin{pmatrix} dI_B \\ dU_{CE} \end{pmatrix}$$

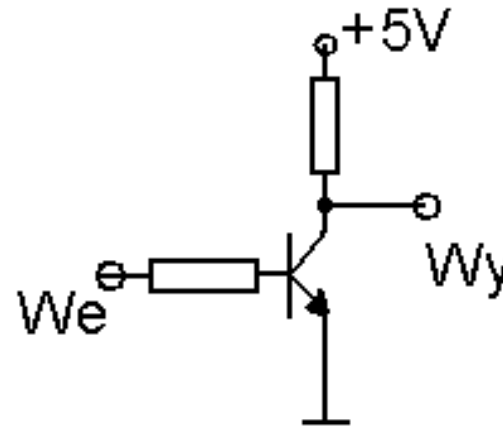
# Proste układy tranzystorowe

## Źródło prądowe



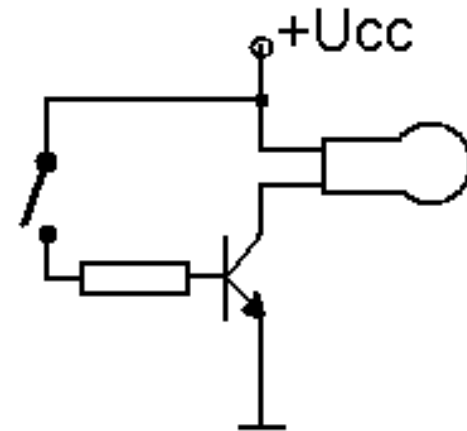
Suma napięć: stałego 5.6 V i spadku napięcia na  $R_E$  polaryzują złącze BE. Zatem  $R_E$  realizuje tzw. ujemne sprzężenie zwrotne stabilizujące prąd obciążenia.

## Negator



5V na we. daje 0.3 V na wy. Zaś poniżej 0.6V na we. daje 5V na wy.

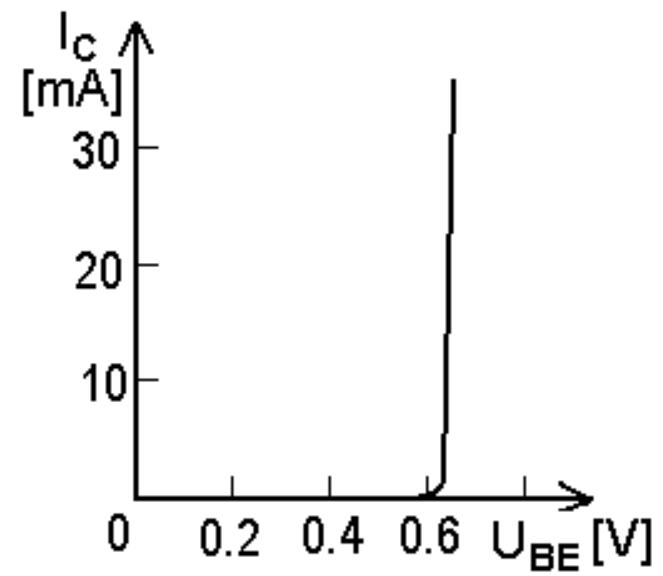
## Wyłącznik żarówki



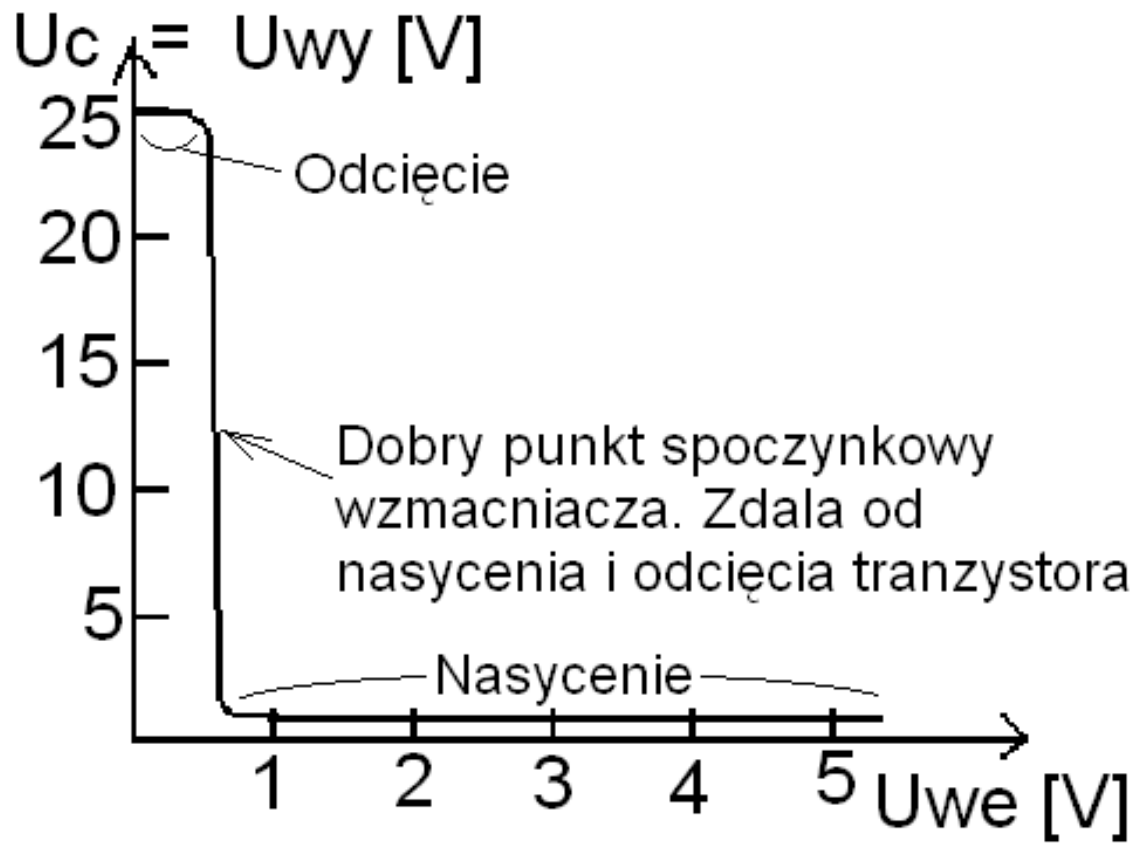
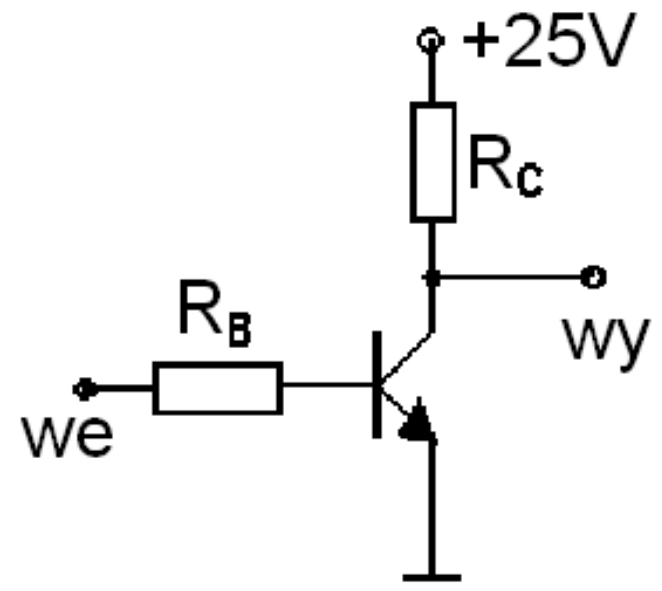
W przełączniku mamy prąd o dwa rzędy wielkości mniejszy od prądu żarówki. Oszczędzamy przełącznik.



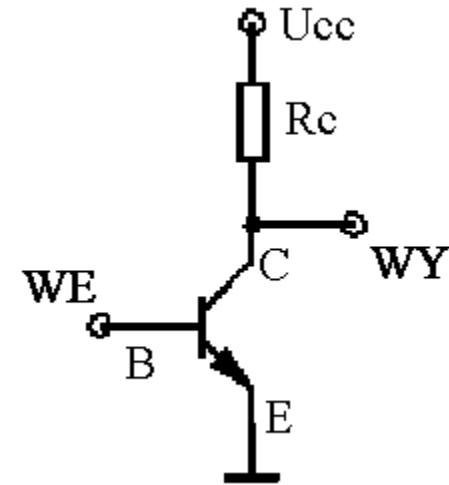
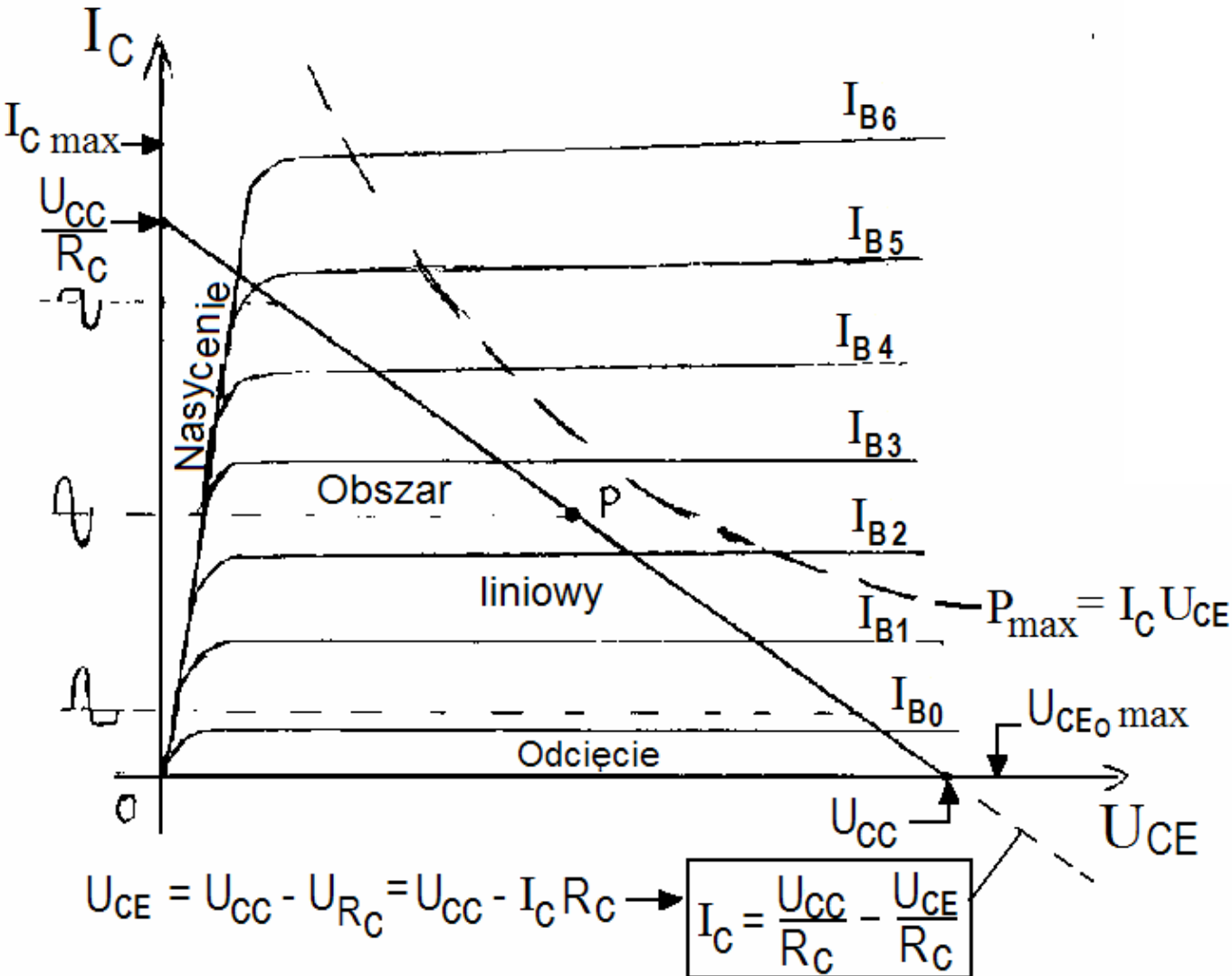
Charakterystyka przejściowa  
tranzystora  $I_C = I_C(U_{BE}) \rightarrow$



Charakterystyka przejściowa  
układu  $U_{wy} = U_{wy}(U_{we})$ .



Rodzina charakterystyk wyjściowych tranzystora bipolarnego npn i ograniczenie wyboru obciążenia  $R_C$ . Prosta obciążenia  $I_C = (U_{CC} - U_{CE})/R_C$  powinna leżeć poniżej hiperboli  $P_{max} = I_C \cdot U_{CE}$ . Linia odcięcia – oba złącza nie przewodzą. Linia nasycenia – gwałtowny spadek wsp.  $\beta$  i utrata liniowości przy minimalnym napięciu  $U_{CE}$ .



## Parametry i charakterystyki tranzystorów bipolarnych

Od współczynnika  $\beta_{st}$  należy odróżniać współczynnik małosygnałowy  $\beta$ .

$\beta = \partial I_C / \partial I_B$  przy  $U_{CE} = \text{const.}$  natomiast  $\beta_{st} = I_C / I_B$

Gdy tranzystor pracuje z małymi sygnałami, np. w układzie wzmacniacza liniowego wówczas charakterystyki w otoczeniu punktu pracy mogą być zastąpione stycznymi, zwanymi parametrami małosygnałowymi lub różniczkowymi. Oto kilka przykładów:

1. Transkonduktancja:

$$g_m = \partial I_C / \partial U_{BE}.$$

(w przybliżeniu  $g_m = I_C / U_T = I_C / 25\text{mV}$ , dla  $I_C = 2,5\text{mA}$   $g_m \cong 0,1\text{S}$ ).

2. Różniczkowa (dynamiczna) rezystancja wyjściowa:

$$r_{CE} = \partial U_{CE} / \partial I_C \quad \text{przy } U_{BE} = \text{const.}$$

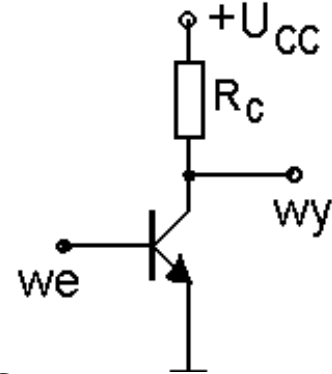
3. Różniczkowa (dynamiczna) rezystancja wejściowa:

$$r_{BE} = \partial U_{BE} / \partial I_B \quad \text{przy } U_{CE} = \text{const.}$$

# Wzmacniacze

Wzmacniacze są urządzeniami, w których energia ze źródeł zasilania (zasilaczy) jest zamieniana na energię sygnału wyjściowego przy pomocy sygnału sterującego. Zwykle do wejścia wzmacniacza podawana jest suma składowej stałej i składowej zmiennej:  $u(t) = U_0 + U_{ZMIENNE}$ ,  $i(t) = I_0 + I_{ZMIENNE}$ . Składowa zmienna jako sygnał wzmacniany zwykle jest znacznie mniejsza od składowej stałej. Składowa stała pełni tylko rolę pomocniczą wyznaczając punkt pracy wzmacniacza tranzystorowego. Wyróżniamy trzy typy wzmacniaczy: WE, WB WK.

Wzmacniacz o wspólnym emiterze (WE) jest dzielnikiem napięcia utworzonym przez impedancję obciążenia i sterowaną (a zatem zmieniającą się) impedancję tranzystora między kolektorem a emiterem. Wyrażenie : wspólny emiter oznacza, że emiter jest wspólną dla wejścia i dla wyjścia (uziemioną) elektrodą tranzystora.

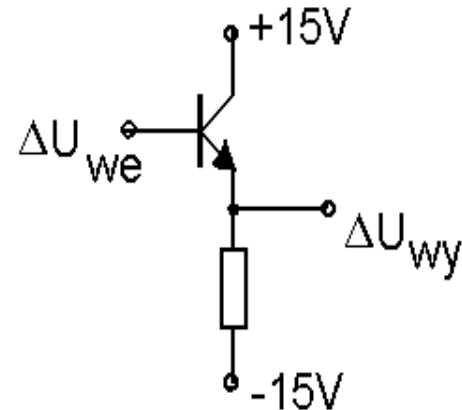


Sygnałem wyjściowym (wzmocnionym) jest napięcie i prąd kolektora. Zmienna składowa napięcia kolektora (określanego względem zerowego potencjału masy i uziemionego emitera) ma fazę przeciwną (tj. odwróconą o  $180^\circ$ ) do fazy sygnału sterującego - wejściowego. Wzrostowi potencjału na bazie (dodatnia amplituda składowej zmiennej sygnału sterującego  $u_{BE}$ ) odpowiada zmniejszenie impedancji tranzystora i napięcia na kolektorze  $u_{CE}$ . Wzmocnienie prądowe wynosi  $h_{21E} = \beta$ . Przy znacznym wzmocnieniu napięciowym (zależnym od obciążenia) wzmocnienie mocy jest rzędu  $\beta^2$ .

## Wzmacniacz o wspólnym kolektorze (WK).

Układy WK często zwane są wtórnikami emiterowymi. Kolektor jest tu elektrodą wspólna dla składowych zmiennych ponieważ jest zwarty z „ziemią” poprzez dużą pojemność zasilacza (stałość

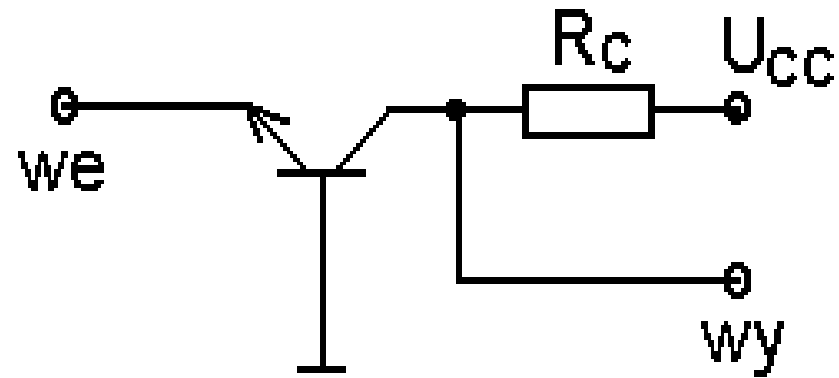
napięcia  $U_{CC}$ ). To znaczy, że na kolektorze jest tylko stały potencjał – brak składowej zmiennej. Obciążenie znajduje się między emiterem a „ziemią” i wraz z tranzystorem stanowi dzielnik napięcia. Istotne jest, że ten układ nie odwraca fazy, powtarza zmiany napięcia wejściowego i powiększa prąd wejściowy  $\beta$ -razy (wzmocnienie mocy też wynosi  $\beta$ ). Brak wzmocnienia napięciowego ( $\Delta U_{wy}/\Delta U_{we}$  jest o „włos” mniejsze od 1 bo  $r_E$  nie jest = 0) wyjaśnia nazwę: wtórnik emiterowy – układ powtarza napięcie zmienne. Potencjał na bazie jest cały czas większy od potencjału na emiterze o około 0.6 V (0.6 do 0.7 V) ponieważ tranzystor jest cały czas otwarty. Zatem potencjał emitera „wędruje” za potencjałem bazy cały czas będąc przesuniętym o 0.6 V - potrzebne do otwarcia złącza BE. Ponieważ  $U_{BE} = U_{we} - U_{Robc}$  mamy do czynienia z ujemnym sprzężeniem zwrotnym redukującym wzmocnienie napięciowe. Bardzo ważnym jest, że  $R_{we} = \beta R_{obc}$ , gdyż prąd wyjściowy jest  $\beta$ -krotnie większy od prądu wejściowego. Dzięki temu układ WK jest swoistym transformatorem impedancji i pozwala na dopasowanie małej impedancji obciążenia do dużej impedancji źródła sygnału sterującego (wzmacnianego prądowo).



$$\Delta U_{wy} = \Delta U_{we}$$
$$\Delta I_{wy} \gg \Delta I_{we}$$

## Wzmacniacz o wspólnej bazie WB.

W tym układzie potencjał bazy jest stały a sygnałem sterującym (wzmacnianym) zmieniany jest potencjał emitera. Układ ten nie zmienia fazy sygnału wzmacnianego przy niskich częstotliwościach. Tj. wyjściowy



sygnał ma fazę zgodną z sygnałem wejściowym. Wzmocnienie prądowe wynosi prawie 1 (jest około 1% mniejsze od 1). Wzmocnienie napięciowe jest duże i zależy od  $R_C$ . Istotną zaletą tego układu jest mała pojemność (pasożytnicza)  $C_{we-wy} = C_{EC}$ , która faworyzuje go przy wzmacnianiu sygnałów o wysokich częstotliwościach. Wadą jest mała rezystancja wejściowa ( $I_E$  jest  $\beta + 1$  razy większy od  $I_B$ ). Układ ten mając dużą impedancję wyjściową może dopasowywać (przeciwnie do układu WK) dużą impedancję obciążenia do małej impedancji źródła.

**Uwaga.** Przy doborze tranzystora katalogowa graniczna częstotliwość tranzystora  $f_t$  powinna być około 100 razy większa niż przewidywana granica pasma przenoszenia wzmacniacza WE. W przypadku wzmacniaczy WK i WB wymagania są znacznie mniejsze i  $f_t$  może być nawet porównywalna z  $f_g$ .

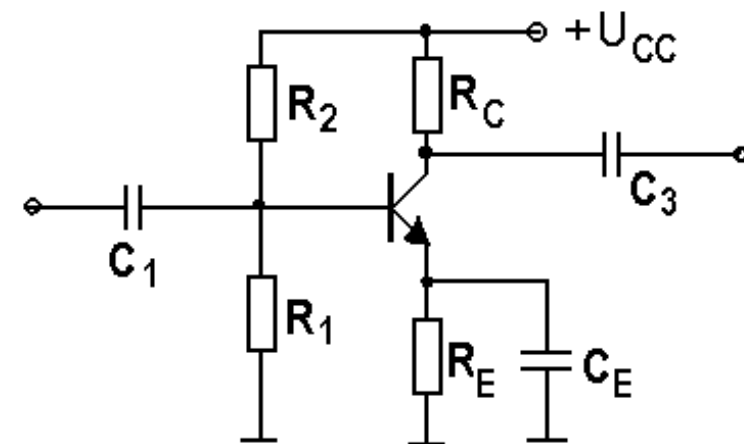
# Wzmacniacz o wspólnym emiterze (WE).

Rezystory  $R_1$  i  $R_2$  stanowią dzielnik napięcia zapewniający spoczynkowy punkt pracy układu (określają potencjał bazy).  $C_1$  i  $C_3$  są pojemnościami sprzęgającymi przekazującymi tylko składową zmienną sygnału pomiędzy kolejnymi stopniami układu.  $C_1$  jest kondensatorem wejściowym a  $C_3$  wyjściowym dla naszego układu.  $R_E$  i  $C_E$  zapewniają silne ujemne sprzężenie zwrotne dla najniższych częstotliwości stabilizując tym sposobem pracę układu.

$R_C$  jest opornikiem kolektora na którym odkłada się zmienny spadek napięcia o amplitudzie wielokrotnie większej (efekt wzmacnienia) od amplitudy sygnału podawanego na bazę. Faza tego sygnału jest przesunięta o  $180^\circ$  (bo wyższy potencjał na bazie wymusza większy prąd kolektora i przez to większy spadek  $U$  na  $R_C$  i niższy potencjał na kolektorze). Przed wykonaniem wzmacniacza należy wybrać tranzystor i poznać jego parametry z odpowiedniego katalogu. Znając parametry dobieramy wartości  $U_{CC}$  i  $I_C$  ( $I_C = I_{\text{spoczynkowe}}$ ).

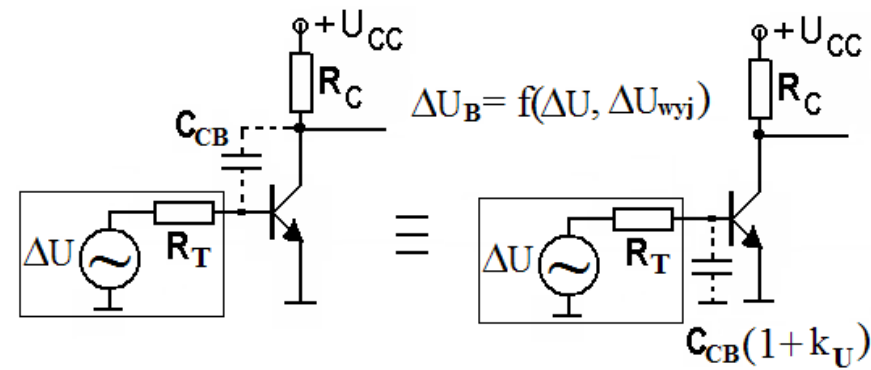
$R_C$  – dobieramy tak aby  $I_C \cdot R_C = U_{CC}/2$ .  $R_E$  dobieram (dla stabilności temperaturowej).  $R_1$  i  $R_2$  dobieramy tak aby:  $U_B = V_E + 0,6V \cong 1,6V$  oraz  $R_T$  (R Thevenina) tego dzielnika nie była większa od  $0,1 \cdot R_{we}$   
tj.  $R_T < 0,1 \cdot \beta \cdot R_E$ . czyli  $R_1 \cong 0,1 \cdot \beta \cdot R_E$ .

O doborze pojemności decyduje pasmo częstotliwości wzmacnianych sygnałów.

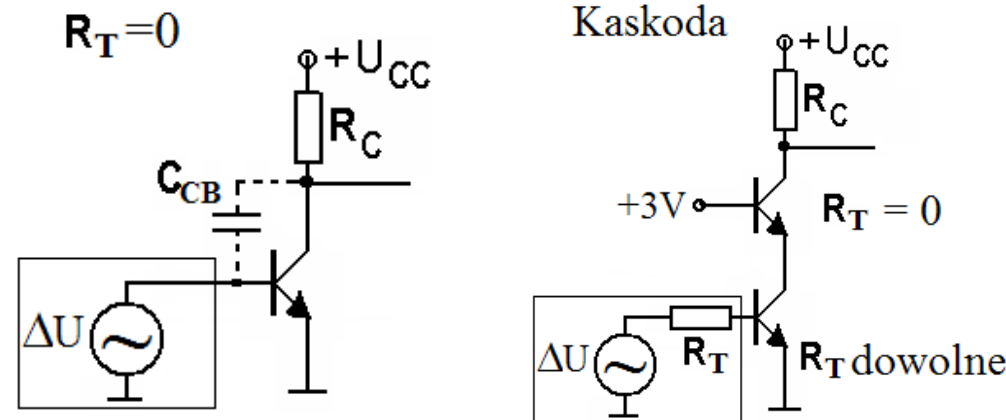


# Efekt Millera

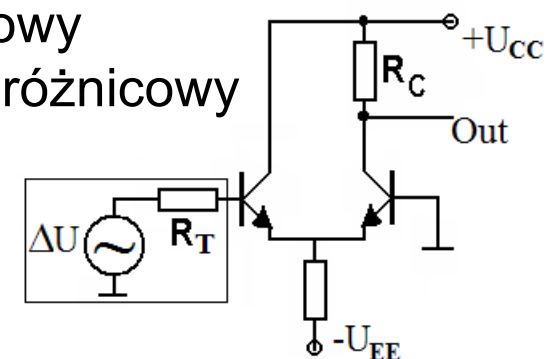
Polega na tym, że pojemność między wejściem a wyjściem dowolnego odwracającego fazę wzmacniacza jest elementem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Takie pojemnościowe ujemne sprzężenie zwrotne osłabia, a dla wyższych częstotliwości nawet eliminuje wzmocnienie. We wzmacniaczu o wspólnym emiterze pojemność  $C_{CB}$  osłabia wzmocnienie w takim stopniu jak pojemność wejściowa o wartości:  $C_{wej.} = C_{CB}(1+k_U)$  (która z opornością wewnętrzną źródła stanowi filtr dolnoprzepustowy).



## Sposoby eliminacji efektu Millera



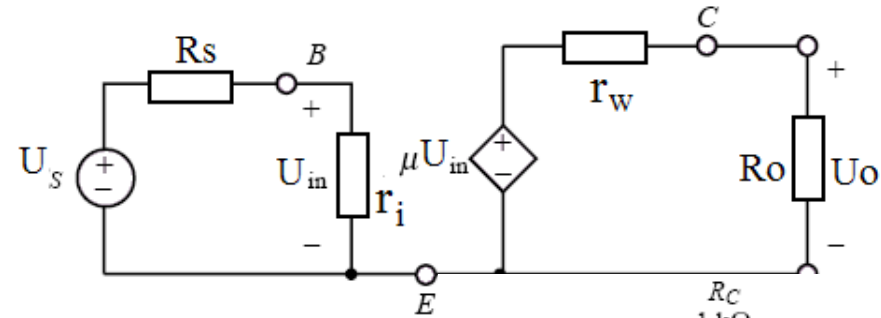
## Jednowejsciowy wzmacniacz różnicowy



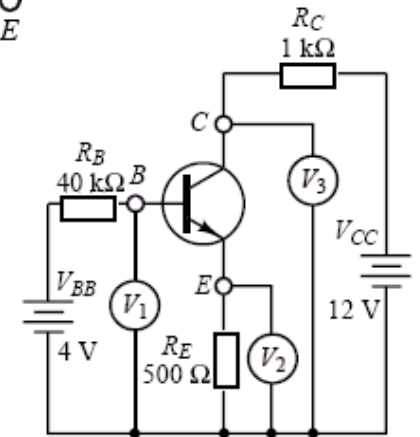


# Elektronika lista zadań 07

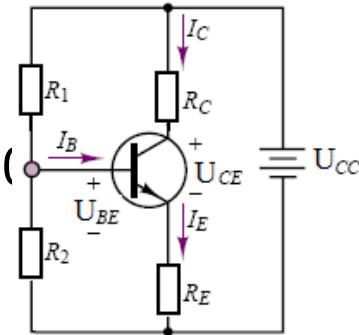
1) Oblicz wzmacnienie napięciowe  $k_U$  układu przedstawionego na rys. wiedząc, że  $R_s = 1 \Omega$ ,  $r_i = 24 \Omega$ ,  $r_w = 100 \Omega$ ,  $R_o = 5 \text{ k}\Omega$  a  $\mu = 250$ .



2. Wiedząc, że woltomierze pokazały napięcia:  $V_1 = 2 \text{ V}$ ,  $V_2 = 1,3 \text{ V}$  i  $V_3 = 8 \text{ V}$ . Oblicz wartość wzmacnienia prądowego  $\beta$ .



3. Oblicz spoczynkowe wartości  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_{CE}$ . Dane:  $\beta = 100$ ,  $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2 = 50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_C = 5 \text{ k}\Omega$ ,  $R_E = 3 \text{ k}\Omega$ ,  $U_{CC} = 15 \text{ V}$ ,  $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$ .



4. Mając dane triody:  $\rho_a = 200 \Omega$ ,  $\mu_a = 100$  oraz wartość  $R_a = 1,8 \text{ k}\Omega$  oblicz wzmacnienie napięciowe układu  $k_U$ :

