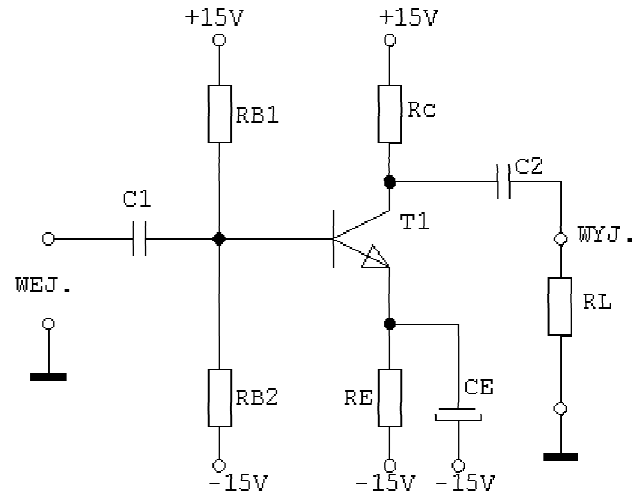


EASY - MATERIAŁY POMOCNICZE

SKĄD SIĘ BIERZE POTRZEBA STOSOWANIA MODELI MAŁOSYGNAŁOWYCH
I CO TO W OGÓLE SĄ MODELE MAŁOSYGNAŁOWE?

(pomocne do projektu z ELKA2; do obiegu wewnętrznego)

Wyobraźmy sobie układ wzmacniacza z tranzystorem bipolarnym (rys. 1) spolaryzowanym w właściwy sposób (czyli z ustalonym p. pracy). Możemy powiedzieć o tym układzie, że prąd kolektora jest taki-a-taki, napięcia na elektrodach takie-i-takie itp. Ale przecież na tej podstawie nie można stwierdzić, jak będzie się zachowywał ten układ, kiedy doprowadzimy do niego sygnał. Jakie będzie np. wzmocnienie? Widać, że sama znajomość p. pracy nie pozwala odpowiedzieć na to pytanie. Dlatego właśnie jest potrzebny opis małosygnałowy, a więc taki, który dotyczy wyłącznie tych właściwości układu, które są ważne dla sygnału: wzmocnienie, rezystancja wejściowa i wyjściowa itp.

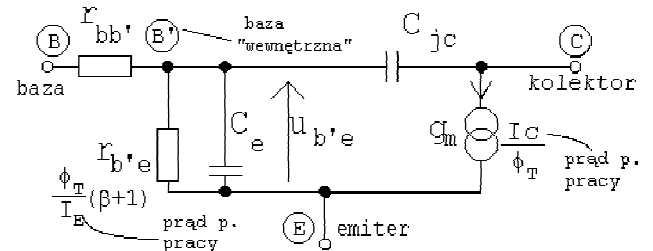


Rys. 1 Wzmacniacz w konfiguracji WE; ustalony p. pracy

Model hybrid π (rys. 2) jest chyba najpopularniejszym małosygnałowym modelem tr-ra. Słowo **model** oznacza, że jest to przedstawienie tr-ra jako określonego układu elementów "teorioobwodowych". Trzeba przy tym rozumieć, że przede wszystkim tr-r po musi być prawidłowo spolaryzowany w stanie aktywnym, żeby w ogóle był sens stosowania modelu małosygnałowego.

"Mały sygnał" to taki, który nie wywołuje dużych zniekształceń i nie zmienia punktu pracy tr-ra. Przykładowo - jeśli obwód polaryzacji z rys. 1 ustala prąd kolektora na 5mA, to sygnał może ten prąd zmienić jedynie w taki sposób, że prąd kolektora **będzie oscylował wokół wartości średniej 5 mA**. Ale **WARTOŚĆ ŚREDNIA** pozostanie 5 mA. Natomiast jeśli wartość średnia zmienia się, albo np. prąd spada do zera i przez jakiś czas utrzymuje się wartość zero, to nie można mówić o małym sygnale.

Poszczególne elementy schematu zastępczego z rys. 2 dają się odtworzyć wprost z budowy i właściwości tr-ra bipolarnego.



Rys. 2 Małosygnałowy model tr-ra bipolarnego "hybrid π "

Rezystancja $r_{bb'}$ to najmniej oczywisty z elementów modelu hybrid π . Jest to po prostu rezystancja doprowadzenia bazy (dokładniej obszaru półprzewodnika między kontaktem bazy a strefą "aktywną" bazy). Chociaż wartość tej rezystancji nie jest duża (typowo kilkanaście - kilkadziesiąt Ω), to $r_{bb'}$ jest z pewnych powodów niepomijalna (w kwestiach dotyczących szybkości tr-ra). Dlatego też zwykle umieszcza się $r_{bb'}$ na schemacie zastępczym, chociaż na poziomie "szkolnym" **w zasadzie przyjmuje się najczęściej $r_{bb'}$ jako równe zero**. Wartość $r_{bb'}$ jest parametrem technologicznym. Nie wynika niestety z np. ustalonego p. pracy, po prostu trzeba znać ten parametr dla danego typu tr-ra. **UWAGA**. Do odtworzenia wartości $r_{bb'}$, jeśli jest

to koniecznie potrzebne, wykorzystuje się np. fakt, że $r_{bb'} + r_{b'e} = h_{11e}$ (a h_{11e} to dająca się zmierzyć rezystancja wejściowa tr-ra w układzie WE). Jednak w znacznej większości rozważań szkolnych przyjmuje się po prostu $r_{bb'} = 0$.

Rezystancja $r_{b'e}$ to zwyczajnie rezystancja dynamiczna (czyli przyrostowa, różniczkowa) złącza B-E. Ale uwaga! Rezystancję złącza B-E można "widzieć" albo od strony emitera, albo od strony bazy. Interpretację graficzną rezystancji dynamicznych dla obu tych przypadków przedstawia rys. 3. Schemat z rys. 2 akurat przedstawia model zastępczy dla konfiguracji wspólny emiter (WE) (podobnym modelem można również opisać układ WB), a w konfiguracji WE "widzi się" złącze B-E od strony zacisku wejściowego, tj. bazy. Jaka jest różnica między tymi "punktami widzenia"? Ano taka, że prąd bazy jest, jak wiadomo, $(\beta+1)$ -krotnie mniejszy, niż prąd emitera. A jeśli prąd przy danym napięciu (dane jest napięcie na złączu dla p. pracy) jest mniejszy, to znaczy, że rezystancja dynamiczna jest WIĘKSZA. Dokładnie $(\beta+1)$ razy większa. Natomiast rezystancja dynamiczna złącza "widziana" od strony emitera (oznacza się ją jako $r_{eb'}$) jest po prostu taka sama, jak rezystancja zwykłego złącza PN. Wartości tych rezystancji są opisane dość prostymi wzorami:

$$r_{eb'} = \phi_T / I_E \text{ (rezystancja dynamiczna B-E od strony emitera)}$$

gdzie:

ϕ_T - tzw. potencjał termiczny (typowo zakłada się $\phi_T = 26\text{mV}$),

I_E - stały prąd emitera (prąd p. pracy).

Natomiast od strony bazy mamy $r_{b'e}$:

$$r_{b'e} = (\beta+1) \cdot r_{eb'}$$

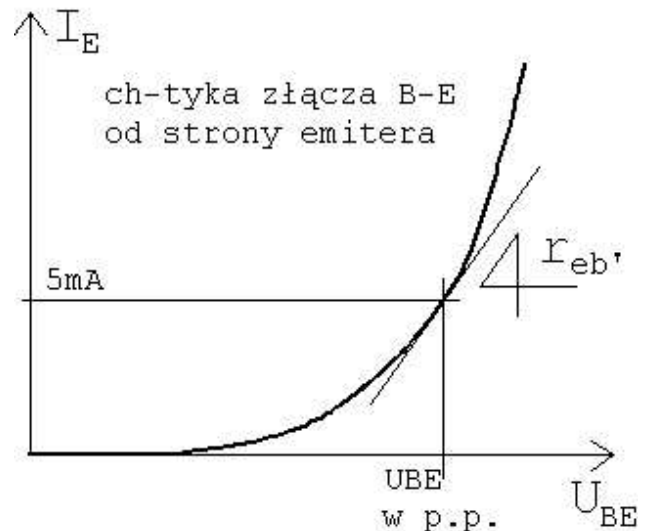
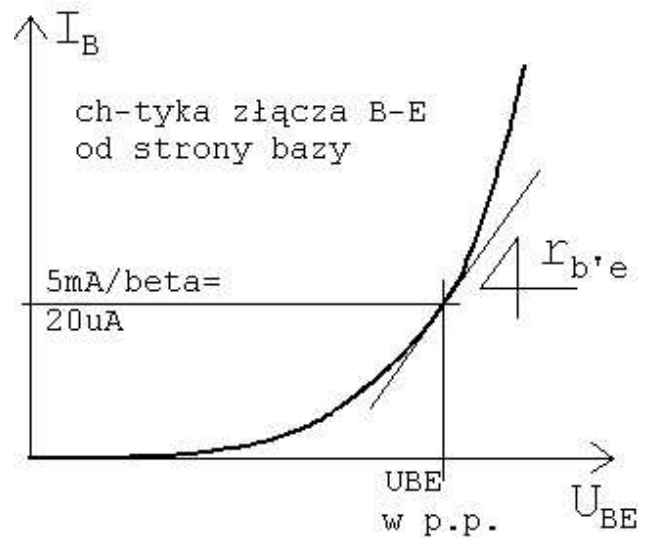
lub $r_{b'e} = (\beta+1) \cdot \phi_T / I_E$ (rezyst. dynamiczna złącza B-E od strony bazy)

UWAGA: przy liczeniu powyższych wzorów najczęściej wykorzystuje się fakt, że $I_E \approx I_C$, a $\beta+1 \approx \beta$.

Wzór na $r_{eb'}$ wywodzi się wprost ze wzoru Shockley'a na charakterystykę złącza PN: $I_F = I_{SS} \cdot \exp(U_F / \phi_T - 1)$ - trzeba tylko odpowiednio zróżniczkować.

Transkonduktancja g_m

Kolektor tr-ra bipolarnego w stanie aktywnym zachowuje się jak źródło prądowe. Z samej zasady działania tr-ra wynika, że prąd kolektora jest sterowany (czy też, można powiedzieć, ustalany) przez napięcie na złączu B-E. Czym większe napięcie U_{BE} , tym większy prąd I_C . Dotyczy to zarówno prądu stałego (p. pracy), jak i sygnału



Rys. 3 Rezystancje dynamiczne $r_{b'e}$ i $r_{eb'}$.

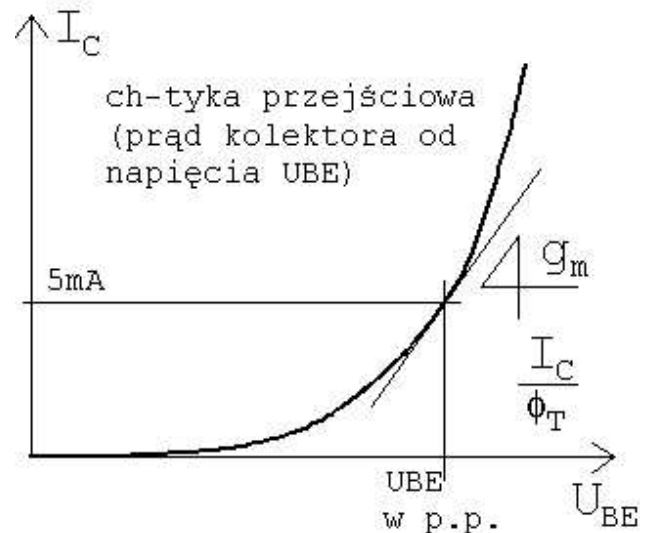
(z tym, że ogólna zależność dla prądu stałego jest nieliniowa - wykładnicza, a dla sygnału - zgodnie z założeniem małosygnalowej pracy - zależność jest liniowa). A więc na schemacie zastępczym musi pojawić się prądowe źródło sterowane napięciem występującym bezpośrednio na złączu B-E, (czyli $U_{b'e}$ - z pominięciem $r_{bb'}$ - a nie U_{be}). Źródło prądowe sterowane napięciem to tzw. transkonduktancja, stąd przyjęty sposób opisu tego źródła: $I_c = g_m \cdot U_{b'e}$ (I_c w tym miejscu to sygnał, nie mylić z prądem stałym p. pracy!). Wartość g_m wynika, podobnie jak wartości $r_{b'e}$ i $r_{eb'}$, ze sposobu działania tr-ra. Czym większe napięcie B-E tym większy prąd kolektora i tym większe nachylenie charakterystyki (rys. 4). Jak widać nachylenie jest tu praktycznie takie samo, jak $r_{eb'}$, tylko że g_m jest akurat odwrotnością oporności, a prąd stały ustalający ten parametr to I_C , a nie I_E :

$$g_m = I_C / \phi_T$$

Oczywiście, przyjmując zrozumiałe już przybliżenie $I_C \approx I_E$, stwierdzamy, że $g_m \approx 1/r_{eb'}$.

Pojemność C_{jc} to zwyczajnie pojemność złącza B-C. Oczywiście model hybrid π ma sens jedynie dla stanu aktywnego tr-ra, więc jest to pojemność zatkanego złącza B-C. Wartość C_{jc} jest daną katalogową.

Pojemność C_{DE} to trochę inna pojemność niż C_{jc} . Złącze B-E jest bowiem przewodzące, więc tym razem nie jest to pojemność zaporowa złącza PN. C_{DE} to tzw. pojemność dyfuzyjna. Po prostu w bazie w danej chwili jest ileś tam elektronów. Wprawdzie te elektrony przelatują przez bazę dość szybko, ale na miejsce tych, które przeleciały do kolektora - pojawiają się nowe. Oczywiście jest to ładunek dynamiczny, a pojemność C_{DE} jest miarą tego ładunku. W dodatku ładunek ten wyraźnie zależy od prądu emitera (czy też kolektora, jak kto woli). Czym większy prąd, tym większy ładunek w bazie. Gdybyśmy chcieli zmierzyć pojemność C_{DE} , napotkalibyśmy poważną trudność, bo pojemność ta jest z bocznikowaną opornością $r_{b'e}$ o niezbyt przecież dużej wartości, więc dla typowego miernika pojemności pomiar jest niemożliwy. Można jednak dokonać pomiaru pośredniego - albo badając zachowanie obwodu wejściowego tr-ra, albo badając odpowiedź prądu kolektora. Obecność C_{DE} musi bowiem powodować tłumienie większych częstotliwości. Najbardziej charakterystycznym pomiarem, w którym uzyskuje się informację o C_{DE} jest pomiar f_β i f_T . Pomiary f_β i f_T wymagają jednak osobnego omówienia.



Rys. 4 Charakterystyka przejściowa i definicja transkonduktancji g_m

Powracając do $r_{bb'}$, $r_{b'e}$ i g_m :

te trzy (a przeważnie tylko dwa - bez $r_{bb'}$) parametry stanowią cały model hybrid π dla średnich częstotliwości - tj. takich, przy których pojemności sprzężeń układu (C_1 , C_E i C_2 z rys. 1) są już zwarciami, a pojemności własne tr-ra (C_{jc} i C_{DE}) jeszcze są rozwarciami (tzn. nie umieszczają się w ogóle na schemacie dla średnich częstotliwości). Opanowanie tych dwóch parametrów $r_{b'e}$ i g_m pozwala wyliczać podstawowe właściwości wzm-cza na tr-rze BJT.