



Politechnika Wroclawska

Wydział Elektroniki Mikrosystemów i Fotoniki

hw

LABORATORIUM
ELEMENTÓW i UKŁADÓW
ELEKTRONICZNYCH

Opracował zespół: Marek Panek, Waldemar Oleszkiewicz, Ryszard Korbutowicz, Iwona Zborowska-Lindert, Bogdan Paszkiewicz, Małgorzata Kramkowska, Zdzisław Synowiec, Beata Ściana, Irena Zubel, Tomasz Ohly, Bogusław Boratyński

Ćwiczenie nr 5 Tranzystor bipolarny

I. Zagadnienia do samodzielnego przygotowania:

- Złącze p-n,
- Budowa tranzystora bipolarnego i zjawiska fizyczne w nim występujące związane z transportem nośników prądu,
- Polaryzacja złącz w tranzystorze dla różnych rodzajów pracy,
- Układy pracy tranzystora: WB, WE, WC; wzmacnienie prądowe,
- Małosygnalowe parametry czwórnikowe typu [h].

II. Program zajęć

- Pomiar charakterystyki wyjściowej i wejściowej tranzystora w układzie WE.
- Wykreślenie charakterystyki przejściowej tranzystora w układzie WE.
- Obliczenie parametrów h_{ij} badanego tranzystora w wybranym punkcie pracy i opracowanie małosygnalowego schematu zastępczego.

III. Literatura

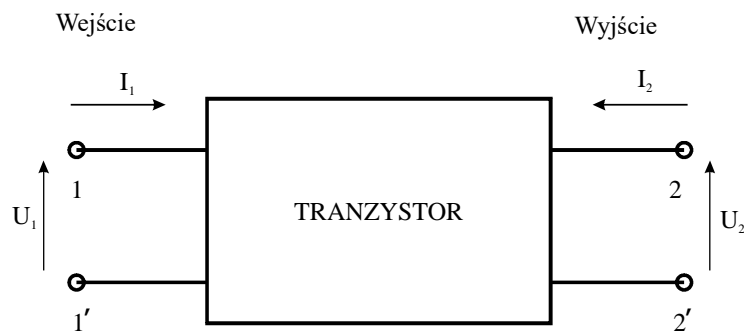
1. Notatki z WYKŁADU
2. W. Marciniak - Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone
3. A. Świt, J. Pułtorak - Przyrządy półprzewodnikowe

Wykonując pomiary **PRZESTRZEGAJ** przepisów BHP związanych z obsługą urządzeń elektrycznych.

1. Wiadomości wstępne

1.1 Tranzystor jako czwórnik

Działanie tranzystora w układzie elektronicznym najlepiej opisać przyjmując, że pracuje on w układzie czwórnika (rys. 1.), w którym zdefiniowano wejście i wyjście. Tranzystor jest trójelektrodowym elementem elektronicznym, istnieje więc więcej niż jeden sposób podłączenia tranzystora, czyli zdefiniowania jego wejścia i wyjścia. Opisane to jest w p. 1.2.



Rys. 1. Tranzystor w układzie czwórnika

Dla tranzystora traktowanego jako czwórnik można wykreślić charakterystyki stałoprądowe (statyczne) I-U podając zależności pomiędzy napięciami i prądami na wejściu i wyjściu, a tym samym wyznaczyć cztery rodziny charakterystyk prądowo-napięciowych tranzystora:

- | | | | |
|----------------|------|-------------------------|--|
| $U_1 = f(I_1)$ | przy | $U_2 = \text{parametr}$ | – charakterystyka wejściowa |
| $I_2 = f(U_2)$ | przy | $I_1 = \text{parametr}$ | – charakterystyka wyjściowa |
| $I_2 = f(I_1)$ | przy | $U_2 = \text{parametr}$ | – charakterystyka przejściowa |
| $U_1 = f(U_2)$ | przy | $I_1 = \text{parametr}$ | – charakterystyka oddziaływania wstecznego |

Zależności I-U między wyjściem a wejściem mają charakter nieliniowy. Dla analizy przenoszenia sygnałów zmiennych można zależności prądowo-napięciowe można opisać równaniami liniowymi jeśli założymy, że analizujemy małe amplitudy tych sygnałów, tzn. jesteśmy w określonym punkcie (punkcie pracy) charakterystyki stałoprądowej. Najczęściej używany opis tranzystora pracującego w zakresie małych częstotliwości wykorzystuje parametry mieszane (hybrydowe) czwórnika typu $[h]$ modelu tranzystora. Wówczas układ równań dla sygnałów zmiennych, opisujących zależności wej. - wyj. wygląda następująco:

$$\begin{aligned} u_1 &= h_{11} i_1 + h_{12} u_2 \\ i_2 &= h_{21} i_1 + h_{22} u_2 \end{aligned} \quad (1)$$

gdzie: i_1, i_2, u_1, u_2 są amplitudami małych sygnałów zmiennych i są równoważne niewielkim przyrostom prądów i napięć stałych, czyli: $\Delta I_1, \Delta I_2, \Delta U_1, \Delta U_2$

Na podstawie tych zależności możliwa jest analiza przenoszenia sygnałów zmiennych i wyznaczenie wzmocnienia tranzystora.

Parametry małosygnałowe czwórnika, czyli elementy modelu zastępczego tranzystora dla m.cz., mogą być wyznaczone z nachylenia charakterystyk stałoprądowych (statycznych).

I tak:

$$\begin{aligned} h_{11} &= \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1} & U_2 &= const. & h_{12} &= \frac{\Delta U_1}{\Delta U_2} & I_1 &= const. \\ h_{21} &= \frac{\Delta I_2}{\Delta I_1} & U_2 &= const. & h_{22} &= \frac{\Delta I_2}{\Delta U_2} & I_1 &= const. \end{aligned} \quad (2)$$

przy czym:

h_{11} – to rezystancja wejściowa [Ω]

h_{12} – współczynnik napięciowego oddziaływania wstecznego [V/V]

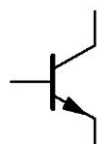
h_{21} – **zwarciovy współczynnik wzmocnienia prądowego** [A/A]

h_{22} – konduktancja wyjściowa [S]

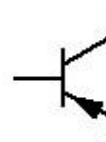
Ze względu na nieliniowość charakterystyk statycznych, wartości powyższych parametrów nie są stałe i zależą od układu pracy oraz od punktu pracy, czyli polaryzacji stałoprądowej tranzystora.

1.2 Układy pracy tranzystora

Tranzystor bipolarny jest półprzewodnikowym elementem elektronicznym, który wymaga rozróżnienia symbolu w schematach układów elektronicznych w zależności od konstrukcji. Oznaczenie symboliczne typu tranzystora przedstawia Rys.2.



n-p-n



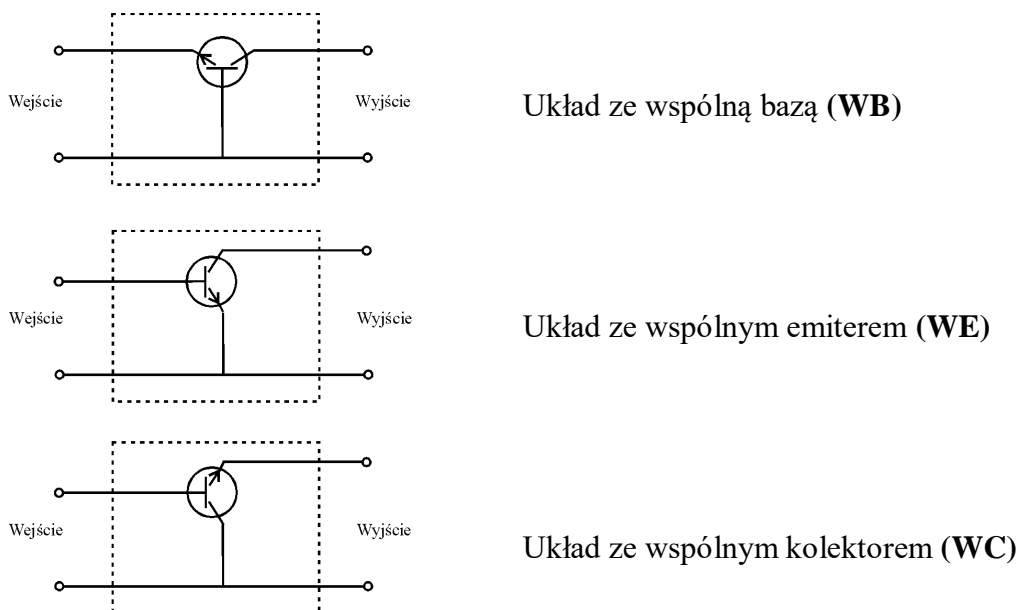
pnp

Rys. 2. Symbole graficzne tranzystorów bipolarnych

Ponieważ tranzystor bipolarny ma trzy wyprowadzenia (końcówki, elektrody), dlatego w układzie czwórnika jedna elektroda musi być wspólna dla obwodu wejściowego i obwodu wyjściowego. W związku z tym można stworzyć **trzy podstawowe układy pracy tranzystora**:

- układ ze wspólną bazą, WB (OB) – wspólną elektrodą jest baza, wejściem E-B, wyjściem C-B,
- układ ze wspólnym emiterym, WE (OE) – wspólną elektrodą jest emiter, wejściem B-E, wyjściem C-E,
- układ ze wspólnym kolektorem, WC (OC) – wspólną elektrodą jest kolektor, wejściem B-C, wyjściem E-C.

Schematy poszczególnych układów z zastosowaniem tranzystora *npn* przedstawiono na rys. 3.



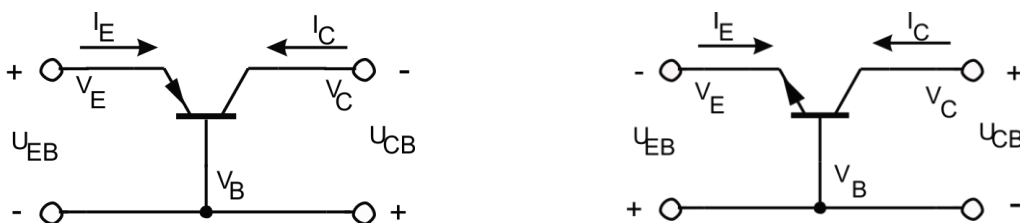
Rys. 3. Schematy podstawowych układów pracy tranzystora *npn*

Jednocześnie, ze względu na to, że w tranzystorze są dwa złącza p-n: E-B i B-C, a każde z tych złączy może być spolaryzowane w kierunku przewodzenia lub zaporowym, można wyróżnić **cztery stany polaryzacji tranzystora**. I tak:

- *stan aktywny*: złącze emiter-baza spolaryzowane jest w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza w kierunku zaporowym;
- *stan nasycenia*: oba złącza spolaryzowane są w kierunku przewodzenia;
- *stan odcięcia*: oba złącza spolaryzowane są w kierunku zaporowym
- *stan inwersji*: złącze E-B spolaryzowane w kierunku zaporowym, a złącze C-B w kierunku przewodzenia (odwrotnie do stanu aktywnego)

W dalszej części przedstawione zostaną warunki, jakie należy spełnić, aby tranzystor pracował w zakresie stanu aktywnego w układzie ze wspólną bazą i wspólnym emiterem.

POLARYZACJA W UKŁADZIE ZE WSPÓLNĄ BAZĄ -WB (OB)



Rys.4 Układ WB a) tranzystor *pnp*

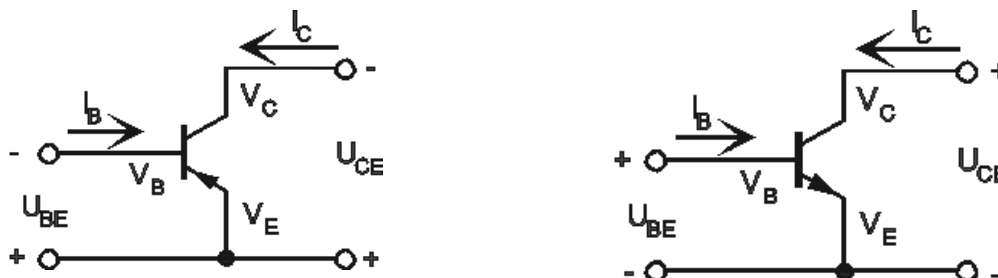
b) tranzystor *npn*

W układzie tym zwarciovyy współczynnik wzmacnienia prądowego dla prądu stałego zdefiniowany jest jako:

$$a_o = -\frac{I_C - I_{CO}}{I_E} \Big|_{U_{CB=const}} \approx -\frac{I_C}{I_E} \Big|_{U_{CB=const}} \quad \text{zwykle } I_{CO} \ll I_C \quad (3)$$

gdzie I_{CO} – prąd zerowy kolektora (dla $I_E=0$), czyli prąd nasycenia i generacji złącza C-B.

POLARYZACJA W UKŁADZIE ZE WSPÓLNYM EMITEREM WE (OE)



Rys.5 Układ WE: a) tranzystor **pnp**

b) tranzystor **nnp**

Zwarciovyy współczynnik wzmacnienia prądowego dla prądu stałego:

$$\beta_o = \frac{I_C - I_{CO}}{I_B + I_{CO}} \Big|_{U_{CE=const}} \approx \frac{I_C}{I_B} \Big|_{U_{CE=const}} \quad (4)$$

W tranzystorze, elemencie 3-zaciskowym, obowiązuje zawsze zasada:

$$I_E + I_B + I_C = 0 \quad \text{stąd} \quad \beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \quad (5)$$

oraz

$$U_{CE} = U_{CB} + U_{BE}$$

gdzie

$$U_{CE} = V_C - V_E - \text{to różnica potencjałów na zaciskach kolektora i emitera itp.}$$

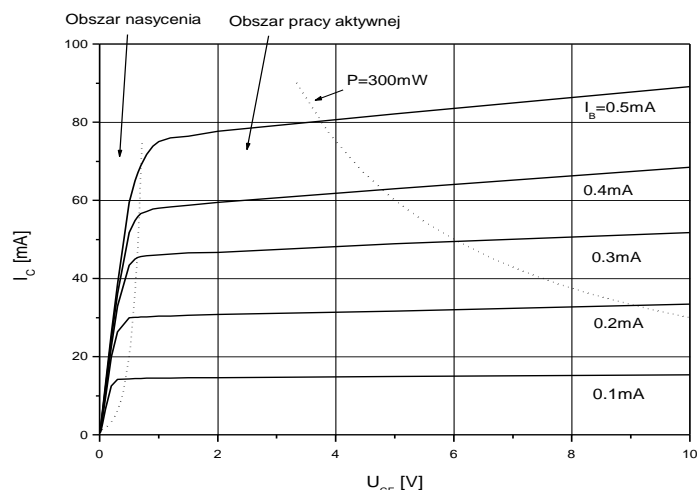
Można łatwo wykazać (patrz Wykład), że niezależnie od układu, dla pracy aktywnej obowiązuje warunek: $V_C > V_B > V_E$ dla tranzystora **nnp** oraz $V_E > V_B > V_C$ dla **pnp**.

1.3 Charakterystyki statyczne tranzystorów

Charakterystyki prądowo-napięciowe tranzystora opisują jego zachowanie dla prądów stałych oraz umożliwiają analizę przenoszenia sygnałów zmiennych. Dla tranzystora traktowanego jako czwórnik można wykreślić charakterystyki I-U podając zależności pomiędzy napięciami i prądami na wejściu i wyjściu, przy czym sposób znakowania napięć i prądów (kierunki strzałek), stosowany tutaj (w punkcie IV.1 jak i IV.2) jest typowy dla czwornikowego opisu tranzystora.

Na rys. 6a,b,c przedstawiono rodziny charakterystyk stałoprądowych tranzystora bipolarnego npn dla układu OE:

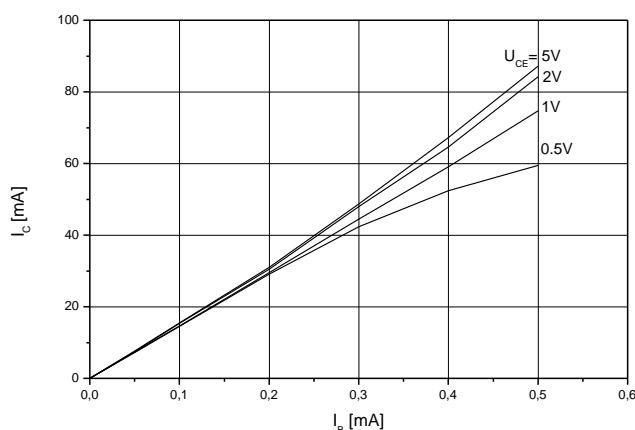
- charakterystyki wyjściowe (Rys.6a) $I_C = f(U_{CE})$ przy $I_B = \text{const.}$
- charakterystyki przejściowe (Rys.6b) $I_C = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const.}$
- charakterystyki wejściowe (Rys.6c) $U_{BE} = f(I_B)$ przy $U_{CE} = \text{const.}$



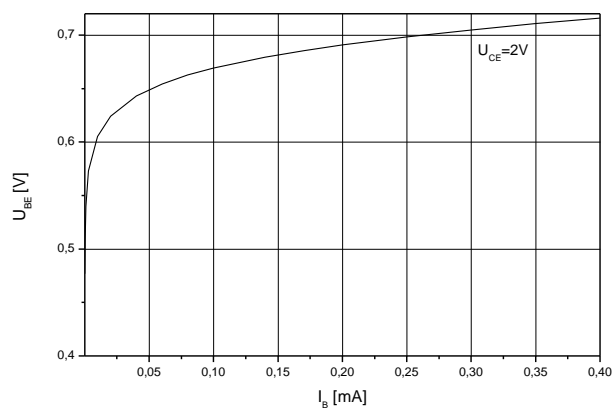
Rys. 6a. Charakterystyka wyjściowa tranzystora bipolarnego npn (BD145) w układzie WE

Na charakterystyce wyjściowej naniesiono dodatkowe linie:

- rozdzielającą obszar pracy aktywnej (złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku zaporowym) i obszar nasycenia (złącze baza-kolektor spolaryzowane w kierunku przewodzenia),
- stałej mocy strat w kolektorze (hiperbola $I_C = P/U_{CE}$, $P = 300\text{mW}$).



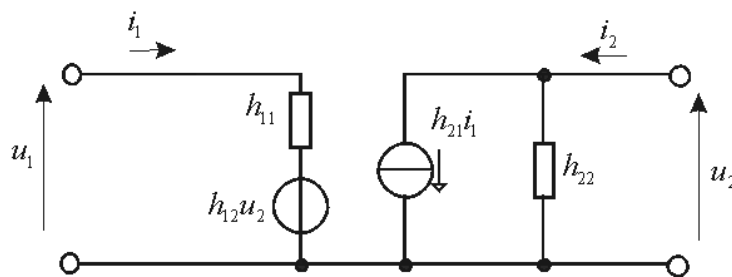
Rys. 6b. Charakterystyka przejściowa tranzystora bipolarnego npn (BD145) w układzie WE



Rys. 6c. Charakterystyka wejściowa tranzystora bipolarnego npn (BD145) w układzie WE, jej przebieg praktycznie nie zależy od parametru U_{CE}

1.4 Parametry małosygnalowe tranzystora bipolarnego

Jak widać wszystkie charakterystyki tranzystora bipolarnego są nieliniowe. Niezależnie od nieliniowości charakterystyki, jeżeli uwzględnimy odpowiednio krótki jej odcinek, możemy go zawsze przybliżyć linią prostą. Parametry macierzy [h] tranzystora są właśnie współczynnikami kierunkowymi prostych aproksymujących charakterystyki tranzystora w określonym punkcie (nazywanym punktem pracy). Parametry te opisują właściwości tranzystora np. wzmocnienie tylko w pobliżu tego punktu, Dlatego mogą być wykorzystane do obliczenia parametrów wzmacniacza małych sygnałów (amplituda sygnału zmiennego $U_m < 26\text{mV}$) w określonym punkcie pracy. Cztery parametry typu h_{ij} zdefiniowane wzorami (2) opisują w pełni właściwości tranzystora dla małych sygnałów i dla małych częstotliwości oraz przyjmują wartości rzeczywiste (dla wielkich częstotliwości będą to liczby zespolone). W zależności od układu pracy posługujemy się parametrami h_{ije} dla tranzystora pracującego w układzie WE, a h_{ijb} pracującym w układzie WB. Korzystając z parametrów małosygnalowych h_{ij} schemat zastępczy tranzystora można przedstawić tak, jak pokazano na rys.7.



Rys 7. Małosygnalowy schemat zastępczy tranzystora bipolarnego - czwórnik typu [h].

Metodyka wyznaczania parametrów h_{ije} z charakterystyk statycznych (dla układu wspólnego emitera):

1. Wybieramy punkt pracy (U_{CE}^* , I_C^*) na charakterystyce wyjściowej tranzystora w zakresie średnich wartości napięć i prądów. Następnie zaznaczamy na charakterystyce przejściowej punkt (I_B^* , I_C^*) i na charakterystyce wejściowej punkt (I_B^* , U_{BE}^*).
2. Na poszczególnych charakterystykach wybieramy punkty w pobliżu punktu pracy i liczymy przyrosty odpowiednich prądów i napięć. Jeżeli punkty będą leżały zbyt blisko siebie to przyrosty wartości prądów lub napięć mogą być obliczone niedokładnie, z drugiej strony punkty muszą leżeć dostatecznie blisko tak aby odcinek charakterystyki leżący między nimi można było aproksymować linią prostą.
3. Obliczamy parametry h_{ije} tranzystora w wybranym punkcie pracy:

$$h_{11e} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_B} \quad \text{przy } U_{CE} = \text{const.}$$

$$h_{21e} = \frac{dI_C}{dI_B} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta I_B} = \quad \text{przy } U_{CE} = \text{const.}, \quad [h_{21e} = \beta]$$

$$h_{22e} = \frac{dI_C}{dU_{CE}} \approx \frac{\Delta I_C}{\Delta U_{CE}} \quad \text{przy } I_B = \text{const}$$

Analizując kształt charakterystyk stałoprądowych można zastanowić się, w jaki sposób wartość parametrów $[h_{ij}]$ zależy od punktu pracy.

Wartość parametru h_{11e} można obliczyć także analitycznie. (Materiał uzupełniający)

Dynamiczna rezystancja złącza p-n emiter-baza, w którym prądem płynącym przez złącze (jak w diodzie) jest prąd emitera I_E , opisuje wzór:

$$r_d = r_e = \frac{dU_{BE}}{dI_E} \quad (6)$$

Ponieważ dla prądów stałych

$$I_E = (h_{21E} + 1) \cdot I_B \quad (7)$$

więc analogicznie dla prądów zmiennych

$$dI_E = (h_{21e} + 1) \cdot dI_B \quad (8)$$

czyli:

$$r_e = \frac{dU_{BE}}{dI_B (h_{21e} + 1)} \quad (9)$$

Przekształcając powyższe równanie wyznacza się h_{11e} :

$$h_{11e} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} = r_e (h_{21e} + 1) \quad (10)$$

Korzystając z zależności na dynamiczną rezystancję złącza p-n spolaryzowanego w kierunku przewodzenia

$$r_d = \frac{kT}{q} \frac{1}{n I} \quad \text{otrzymujemy} \quad r_e = \frac{kT}{q} \frac{1}{n I_E} \quad (11)$$

oraz przy założeniu, że $h_{21e} \gg 1$, oraz $n = 1$ (w temperaturze pokojowej $\frac{kT}{q} = 26\text{mV}$)

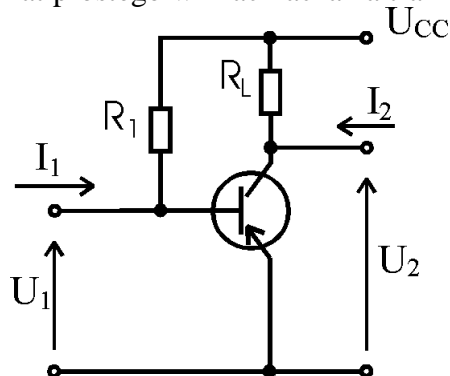
to związek pomiędzy parametrami h_{11e} i h_{21e} wyznaczanymi w ćwiczeniu powinien być następujący

$$h_{11e} = \frac{h_{21e} \cdot 26\text{mV}}{I_E} \quad (12)$$

1.5 Właściwości wzmacniające tranzystora bipolarnego. (Materiał uzupełniający)

Ten punkt będzie pomocny także w Ćw. 6

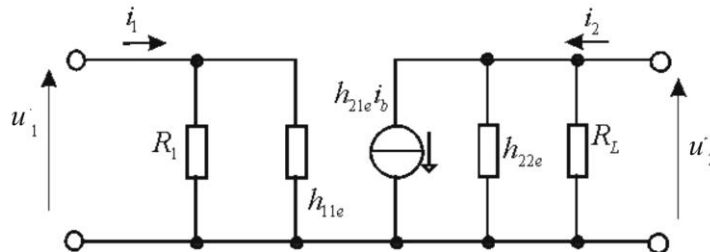
Na rys.8 przedstawiono schemat prostego wzmacniacza na tranzystorze bipolarnym.



Rys.8. Schemat prostego wzmacniacza w układzie WE (tranzystor pnp).

Dla małych sygnałów układ wzmacniacza przedstawiony na rys.8 można zamienić schematem zastępczym przedstawionym na rys.9 wg zasady:

- zasilacz, jako źródło napięciowe o zerowej rezystancji wewnętrznej, stanowi zwarcie do masy dla sygnałów zmiennych, stąd rezystory R_1 , R_L na wejściu i wyjściu dołączone do masy
 - tranzystor jest zastąpiony jest małosygnałowym schematem zastępczym (rys. 7) gdzie, dla uproszczenia, w analizowanym modelu tranzystora pominięto wpływ parametru h_{12} , który zazwyczaj ma bardzo małą wartość.



Rys. 9. Małosygnałowy schemat zastępczy wzmacniacza tranzystorowego.

Dla takiego układu można obliczyć wzmocnienie prądowe, wzmocnienie napięciowe i wzmocnienie mocy.

W przedstawianych poniżej zależnościach założono $R_L \ll 1/h_{22}$ oraz $R_1 \gg h_{11}$. Pozwala to na pominięcie konduktancji wyjściowej tranzystora i rezystora polaryzującego bazę R_1 .

a) Wzmocnienie prądowe k_i :

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \quad \text{czyli} \quad k_i = h_{21e} \quad (13)$$

b) Wzmocnienie napięciowe k_u

$$k_u = \frac{U_2}{U_1} \quad (14)$$

Jeżeli na wejście układu przyłożymy napięcie U_1 , to w obwodzie tym popłynie prąd I_1 ,

którego wartość określi zależność
$$I_1 = \frac{U_1}{h_{11e}} \quad (15)$$

Prąd źródła prądowego $I_1 \cdot h_{21}$ przepływając przez R_L wytwarza spadek napięcia U_2 równy:

$$U_2 = -h_{21e} I_b R_L$$

Podstawiając (15) i (14) do (13) i przekształcając otrzymane równanie, wyznaczamy wzmocnienie napięciowe:

$$k_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} R_L \quad (16)$$

c) Wzmocnienie mocy k_p

Wzmocnienie mocy jest stosunek mocy wydzielonej w obciążeniu, P_2 do mocy doprowadzonej do wejścia układu, P_1 , czyli

$$k_p = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U_2 I_2}{U_1 I_1} = k_i k_u \quad (17)$$

Podstawiając zależności (13) i (16) do (17) uzyskujemy:

$$k_p = \frac{(h_{21e})^2}{h_{11e}} R_L \quad (18)$$

2. Przebieg ćwiczenia.

W ramach ćwiczenia należy wyznaczyć prądowo-napięciowe charakterystyki wyjściowe, wejściowe i przejściowe tranzystora w układzie WE.

Przed przystąpieniem do pomiarów należy:

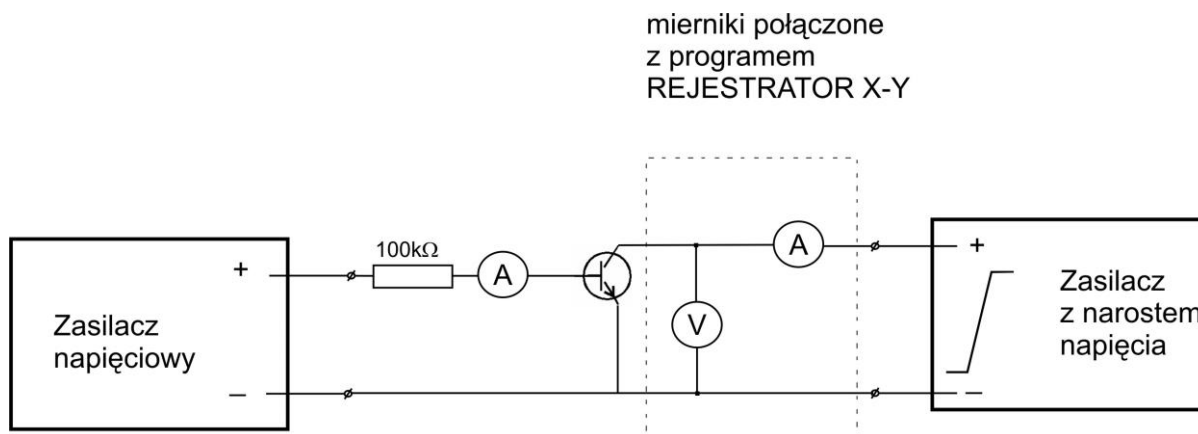
1. Zidentyfikować za pomocą katalogu typ tranzystora (*nnp* czy *pnnp*), rozmieszczenie wyprowadzeń (elektrod) oraz jego parametry dopuszczalne,
2. Określić, jaki zakres prądów i napięć można stosować podczas pomiarów, aby nie przekroczyć mocy admysyjnej $P_{c\max}$ i zapisać to w sprawozdaniu,
3. Ustalić biegunowość zasilania na Wej. i Wyj. układu, wymaganą dla tranzystora *pnnp* lub *nnp* w odpowiednim układzie pracy.

Pomiary charakterystyk prądowo-napięciowych można wykonać przy pomocy programu komputerowego „Rejestrator XY” lub metodą tzw. „techniczną” czyli odczytu danych z mierników punkt po punkcie. O sposobie wykonywania pomiarów decyduje prowadzący.

Obsługa programu „Rejestrator” opisana jest w instrukcji do ćw.1.

2.1. Charakterystyki wyjściowe: $I_C=f(U_{CE})$ przy ustalonej wartości I_B .

Pomiar charakterystyk **wyjściowych** tranzystora *nnp* w układzie WE wykonujemy w układzie, którego schemat przedstawia Rys.10. Jako zasilacz wejściowy zastosować zasilacz podwójny Agilent E3649A lub E3631A, a do pomiarów odpowiednich prądów i napięć zastosować mierniki HP34401A. Mierniki mierzące prąd ustawić w trybie pomiaru prądu **AUTO**.

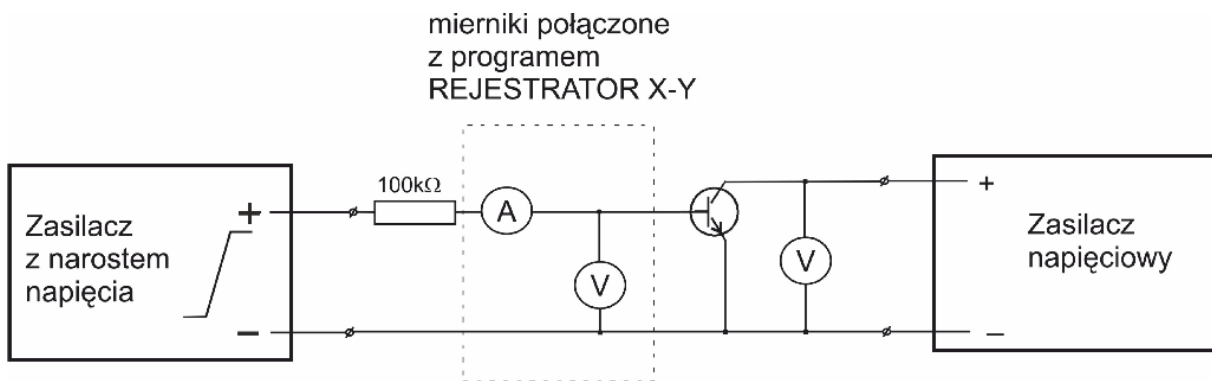


Rys.10. Układ do pomiaru **charakterystyk wyjściowych** w układzie WE dla tranzystora *nnp*

Przed wykonaniem pomiaru w zasilaczu wejściowym ustawić ograniczenie prądowe na poziomie 5mA, a na zasilaczu wyjściowym z narostem napięcia - 30mA. Wykonać serię pomiarów dla co najmniej trzech wartości prądu bazy dla U_{CE} zmieniającym się od zera do 10V. Jeżeli pomiary wykonujemy metodą „techniczną”, to wyniki zapisujemy w tabelce, a na ich podstawie na papierze milimetrowym wykreślamy uzyskane charakterystyki. Jeżeli natomiast pomiary wykonujemy przy pomocy komputera, to odpowiednio (zgodnie z instrukcją obsługi Rejestratora) nazywamy mierniki w obwodzie wyjściowym, a prędkość narostu napięcia w zasilaczu ustawiamy na 30s. Po wykonaniu pomiaru drukujemy uzyskane charakterystyki wyjściowe (wydruk podpisujemy nazwiskami studentów w grupie). Z uzyskanych charakterystyk wyjściowych wyznaczamy parametry małosygnałowe h_{21e} i h_{22e} w punkcie pomiarowym wskazanym przez prowadzącego.

2.2 Charakterystyki wejściowe: $U_{BE}=f(I_B)$ przy ustalonej wartości U_{CE} .

Zmontować układ pomiarowy do pomiaru charakterystyk **wejściowych** tranzystora według schematu pomiarowego z Rys.11. Jako zasilacza w układzie kolektora należy użyć zasilacz podwójny Agilent E3649A lub E3631A, a na wejściu zasilacz z narostem napięcia. Na wejściu zasilania bazy (zasilacz z narostem napięcia) ustawić ograniczenie prądowe 5 mA, a na zasilaniu kolektora 30 mA. Wykonać należy serie pomiarowe dla napięć $U_{CE} = 1V$ i $10V$. Zakres napięcia na zasilaczu z narostem napięcia ustalić tak, aby zakres na osi X prądu bazy, I_B był dwa razy większy niż wartość prądów bazy stosowanych do pomiaru charakterystyk wyjściowych. Uzyskane charakterystyki wejściowe wydrukować i bazując na nich wyznaczyć wartość parametru h_{11e} .



Rys.11. Układ do pomiaru **charakterystyk wejściowych** w układzie WE dla tranzystora npn

2.3 Charakterystyki przejściowe: $I_C=f(I_B)$ przy ustalonej wartości U_{CE}

Na podstawie uzyskanych charakterystyk wyjściowych narysować odręcznie na papierze milimetrowym charakterystykę przejściową badanego tranzystora dla wybranej wartości napięcia U_{CE} (np. $U_{CE} = 2V$).

2.4 Zadanie dodatkowe - obliczanie parametrów wzmacniacza zbudowanego na badanym tranzystorze (wg p. 1.5)

Kolejność postępowania:

- Przyjmij rezystancję obciążenia analizowanego wzmacniacza (np. $R_L=1k\Omega$.)
- Narysuj małosygnalowy schemat zastępczy analizowanego wzmacniacza. Dodatkowo, na charakterystyce wyjściowej narysuj odpowiednią prostą pracy (dla $U_{cc}=10V$).
- Oblicz wzmocnienia: prądowe, napięciowe i mocy wzmacniacza wykonanego na badanym tranzystorze w wybranym punkcie pracy.