

Ćwiczenie 2

Pomiary parametrów tranzystorów bipolarnych

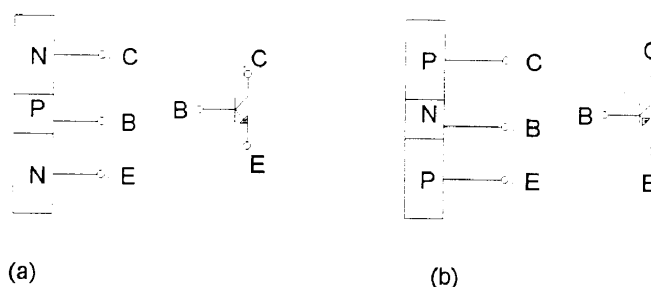
Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie statycznych charakterystyk tranzystorów bipolarnych oraz metod identyfikacji parametrów odpowiadających im modeli małosygnałowych, poznanie metod pomiaru parametrów małosygnałowych tranzystorów i poznanie ich właściwości dynamicznych podczas przełączania.

Wiadomości podstawowe

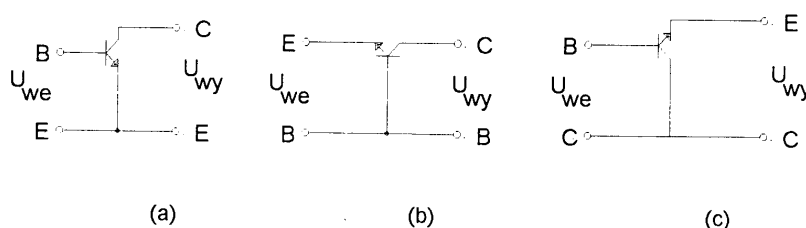
Budowa tranzystora bipolarnego

Tranzystor jest strukturą trzywarstwową o trzech elektrodach zewnętrznych, emiterze (E), bazie (B) i kolektorze (C). Jak pokazano na rys.2.1, może to być struktura typu p-n-p lub n-p-n, przy czym zawsze obszar emitera jest w niej domieszkowany silniej niż baza, a obszar kolektora słabiej. Ta asymetria wynika z przeznaczenia każdej z tych warstw i powoduje, że mimo iż emiter i kolektor są tego samego typu sposób włączenia tranzystora w obwód elektryczny nie jest obojętny. W normalnych warunkach pracy złącze baza-emiter jest polaryzowane w kierunku przewodzenia, złącze baza-kolektor jest polaryzowane wstecznie, a sterowanie pracą tranzystora odbywa się przez odpowiednie zmiany prądu baza-emiter.



Rys.2.1 Rozkład domieszek oraz symbol tranzystora bipolarnego (a) typu n-p-n i (b) typu p-n-p

Tranzystor, jako element trzykońcówkowy, może być włączony w układ elektryczny na trzy sposoby nazywane układami pracy. Układy te nazywane, odpowiednio, układem wspólnego emitera (OE), układem wspólnej bazy (OB) i układem wspólnego kolektora (OC) są schematycznie przedstawione na rys.2.2.

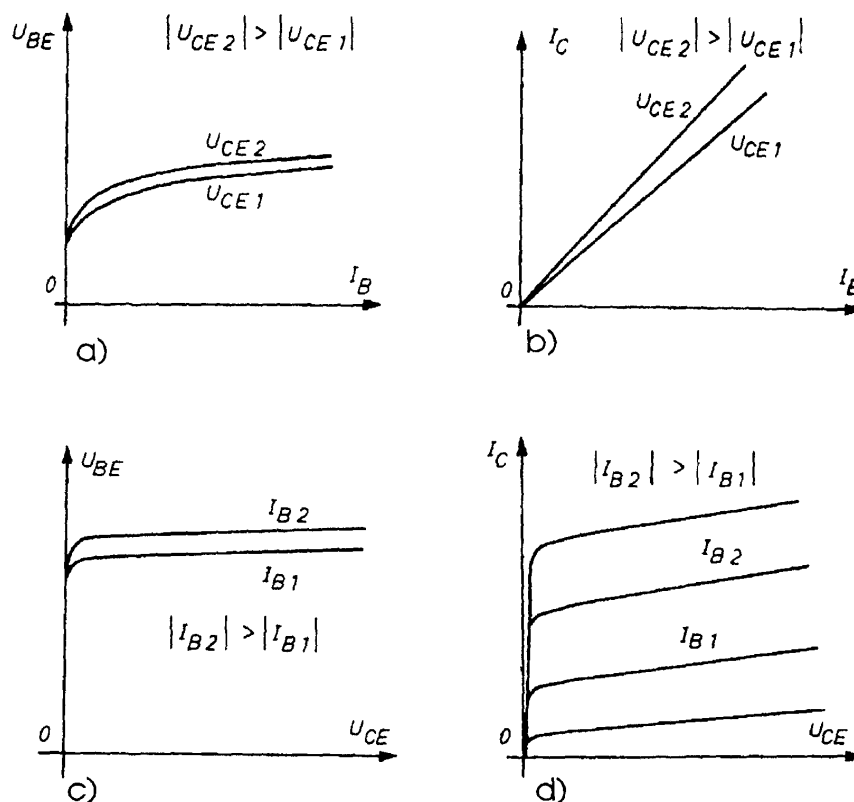


Rys.2.2. Tranzystor n-p-n w konfiguracjach: (a) wspólnego emitera, (b) wspólnej bazy i (c) wspólnego kolektora

Charakterystyki statyczne tranzystora

W każdym układzie pracy tranzystora, OE, OB i OC, można wyznaczyć dla niego cztery rodziny charakterystyk statycznych, określające zależności pomiędzy wartościami ustalonymi prądów i napięć występujących na wejściu i wyjściu odpowiedniego czwórnika. Są to:

- charakterystyki wejściowe $U_{BE}(I_{BE})$ dla $U_{CE} = \text{const.}$
- charakterystyki przejściowe $I_{CE}(I_{BE})$ dla $U_{CE} = \text{const.}$
- charakterystyki oddziaływania wstecznego $U_{BE}(U_{CE})$ dla $I_{BE} = \text{const.}$
- charakterystyki wyjściowe $I_{CE}(U_{CE})$ dla $I_{BE} = \text{const.}$

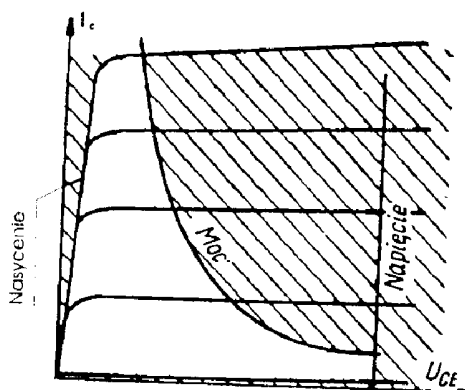


Rys.2.3 Przykładowe charakterystyki statyczne tranzystora bipolarnego w układzie wspólnego emitera: (a) charakterystyka wejściowa, (b) charakterystyka przejściowa, (c) charakterystyka oddziaływania wstecznego, (d) charakterystyka wyjściowa

Typowe charakterystyki tranzystora bipolarnego pracującego w układzie wspólnego emitera (OE) są zestawione na rys.2.3. Spośród tych charakterystyk największe znaczenie praktyczne ma charakterystyka wyjściowa. Jest ona wykorzystywana do definiowania obszarów pracy tranzystora jak to pokazano na rys.2.4. Są to:

- **obszar odcięcia** znajdujący się poniżej krzywej dla $I_B=0$, w którym oba złącza tranzystora są spolaryzowane w kierunku wstecznym,
- **obszar nasycenia** odpowiadający narastającej części charakterystyk, w którym oba złącza tranzystora są spolaryzowane w kierunku przewodzenia,
- **obszar aktywny** znajdujący się pomiędzy obszarem odcięcia i nasycenia, obejmujący płaskie części charakterystyk, w którym złącze emiter-baza jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze kolektor-baza w kierunku wstecznym
- **obszar bezpiecznej pracy (SOA) obejmujący** fragmenty ww. obszarów ograniczone z góry hiperbolą mocy admysyjnej P_{max} i prostą odpowiadającą napięciu przebicia U_b ,

w których przyrząd może pracować bez ryzyka przebicia lub uszkodzenia w wyniku efektu samonagrzewania.



Rys.2.4 Charakterystyki wyjściowe z zaznaczonym obszarem bezpiecznej pracy

Parametry małosygnałowe dla macierzy h

W zakresie małych częstotliwości i małych amplitud sygnału wejściowego tranzystor może być potraktowany jako czwórnik liniowy opisany układem równań:

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

gdzie indeksy 1 i 2 reprezentują, odpowiednio, stosowane wcześniej indeksy "we" i "wy". Ponieważ równanie to można zapisać w formie macierzowej parametry tego równania noszą nazwę parametrów macierzowych typu h. Parametry te są liczbami rzeczywistymi i reprezentują nachylenie stycznych do odpowiednich charakterystyk statycznych w wybranym punkcie pracy, czyli w punkcie odpowiadającym składowej stałej sygnału wejściowego. W sposób formalny są one określone przez odpowiednie pochodne tych charakterystyk, i tak:

$$h_{11} = \left. \frac{dU_1}{dI_1} \right|_{U_2 = const}$$

określa nachylenie charakterystyki wejściowej

$$h_{12} = \left. \frac{dU_1}{dU_2} \right|_{I_1 = const}$$

określa nachylenie charakterystyki oddziaływania wstecznego

$$h_{21} = \left. \frac{dI_2}{dI_1} \right|_{U_2 = const}$$

określa nachylenie charakterystyki przejściowej a

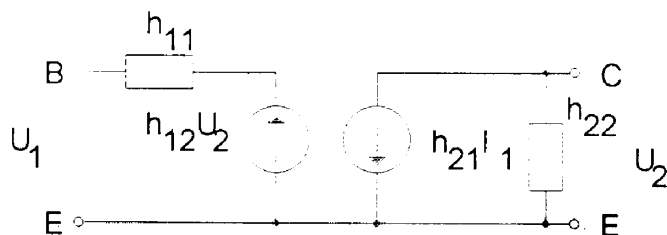
$$h_{22} = \left. \frac{dI_2}{dU_2} \right|_{I_1 = const}$$

określa nachylenie charakterystyki wyjściowej.

W praktyce wielkości te nie wyznacza się poprzez liczenie pochodnych, ale stosuje się metodę przybliżoną polegającą na zastąpieniu pochodnych ilorazami małych przyrostów odpowiednich napięć i prądów.

Z równania macierzowego typu h można w sposób formalny utworzyć schemat zastępczy tranzystora, który będzie jego modelem małosygnalowym. Schemat ten jest przedstawiony na rys.2.5. Pozwala on na podanie sensu fizycznego poszczególnych parametrów h . Parametry te w danym układzie pracy tranzystora mają następującą interpretację:

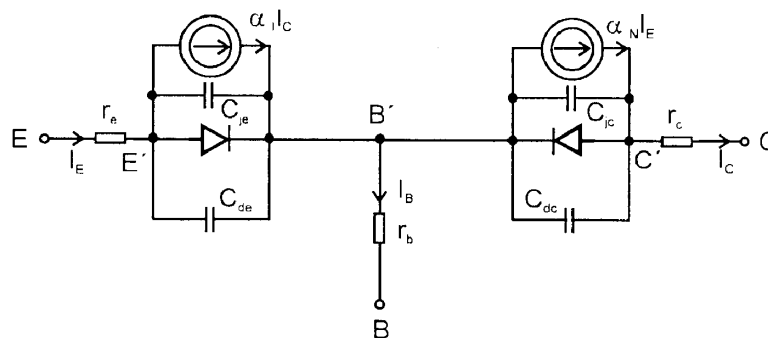
- h_{11} - impedancja tranzystora przy zwartym obwodzie wyjściowym,
- h_{12} - współczynnik sprzężenia zwrotnego przy rozwartym obwodzie wejściowym,
- h_{21} - zwarciovowy współczynnik wzmocnienia prądowego,
- h_{22} - konduktancja wyjściowa przy rozwartym obwodzie wejściowym,



Rys.2.5 Schemat zastępczy odpowiadający macierzy h_{ij}

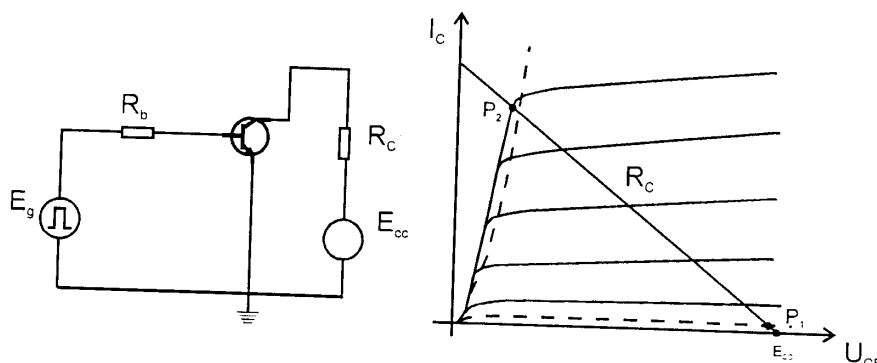
Proces przełączania tranzystora bipolarnego

Tranzystor bipolarny jest przyrządem zawierającym w sobie dwa złącza p-n. Każde z nich posiada swoją pojemność złączową i dyfuzyjną, jak to ilustruje rys.2.6. Przejście każdego złącza ze stanu przewodzenia do stanu polaryzacji zaporowej wymaga przeładowania związanych z nim pojemności, jak to miało miejsce w przypadku procesów przełączania diody.



Rys.2.6 Schemat zastępczy tranzystora dla stanów dynamicznych

Tranzystory są stosowane w układach przełączających jako klucze sterowane, które przechodzą od stanu blokowania do stanu przewodzenia zgodnie ze zmianami sygnału sterującego. Taki podstawowy układ klucza tranzystorowego pracującego w układzie wspólnego emitera jest pokazany na rys.2.7a. W układzie tym, wraz ze zmianami prądu bazy, punkt pracy tranzystora przemieszcza się na po prostej obciążenia naniesionej na charakterystyki wyjściowe (rys.2.7b), przechodząc poprzez obszar aktywny od obszaru odcięcia do obszaru nasycenia i odwrotnie. W punkcie P_1 tranzystor znajduje się w obszarze odcięcia i oba złącza są spolaryzowane w kierunku wstecznym. Pomiędzy punktami P_1 i P_2 tranzystor jest w obszarze aktywnym i złącze baza-emiter jest w stanie przewodzenia a złącze baza-kolektor w stanie polaryzacji wstecznej, natomiast w punkcie P_2 tranzystor jest w obszarze nasycenia i oba złącza są w stanie przewodzenia.



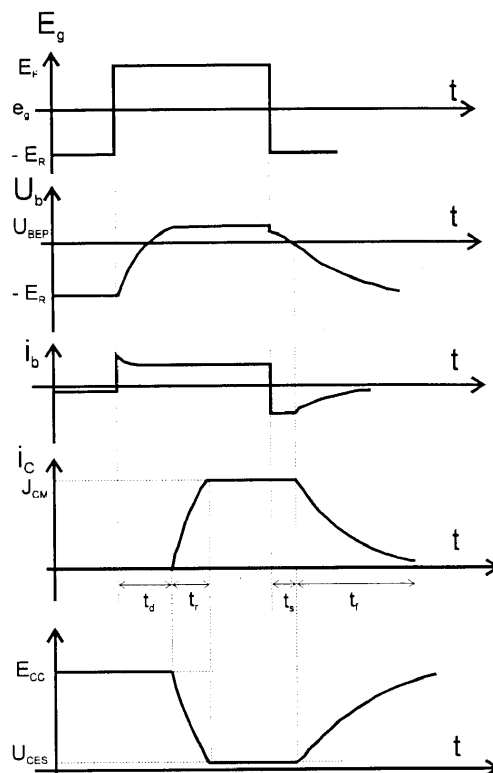
Rys.2.7 Schemat układu przełączania z tranzystorem jako kluczem w układzie OE (a) oraz rodzina charakterystyk wyjściowych z prostą obciążenia dla tego układu (b)

Przebieg procesu załączania i wyłączenia tranzystora zależy zarówno od własności samego tranzystora jak i obwodu, w którym jest on przełączany. Zmiany napięć i prądów w tranzystorze, odpowiadające procesowi jego przełączania w obwodzie z rys.2.7 są zestawione na rys.2.8. Proces ten zaczyna się w momencie kiedy napięcie źródła sterującego E_g zmienia się z wartości $-E_R$ na wartość E_F , co inicjuje proces przeładowania pojemności złączowej złącza emiter-baza. Proces ten trwa przez czas t_d nazywany czasem opóźnienia, który obejmuje nie tylko czas niezbędny na przeładowanie tej pojemności, ale również tak zwany czas przelotu, potrzebny na przejście przez obszar bazy i dotarcie do złącza kolektorowego nośników wstrzykniętych przez złącze emiterowe. W momencie dotarcia tych nośników do złącza kolektorowego rozpoczyna się proces przeładowania pojemności złączowej tego złącza, któremu odpowiada czas t_r , nazywany czasem narastania. Proces załączania kończy się w momencie ustalenia się napięcia na tranzystorze, a odpowiadający mu czas załączania t_{ON} jest sumą czasu opóźnienia i czasu narastania:

$$t_{ON} = t_d + t_r$$

Proces wyłączenia tranzystora rozpoczyna się w momencie zmiany napięcia źródła sterującego E_g z wartości E_F na wartość $-E_R$ i podobnie jak proces załączania składa się z dwóch etapów. W pierwszym etapie, któremu odpowiada czas magazynowania t_s , mamy do czynienia z rozładowywaniem pojemności dyfuzyjnych obu złącz. Towarzyszy temu zmiana napięcia na spolaryzowanym w kierunku przewodzenia złączu baza-emiter oraz utrzymywanie się na praktycznie niezmiennym poziomie prądu płynącego pomiędzy kolektorem a emiterem. W drugim etapie, któremu odpowiada czas opadania t_f , mamy do czynienia z przeładowaniem pojemności złączowej złącza baza-kolektor, w wyniku czego złącze to jest w stanie przejąć na siebie całe napięcie przyłożone pomiędzy elektrody kolektora i emitera a tranzystor wchodzi w stan blokowania. Proces wyłączenia kończy się w momencie ustalenia się napięcia na tranzystorze, a odpowiadający mu czas wyłączenia t_{OFF} jest sumą czasu magazynowania i czasu opadania:

$$t_{OFF} = t_s + t_f$$



Rys.2.8 Przebiegi prądów i napięć tranzystora podczas przełączania

Zakres pomiaru

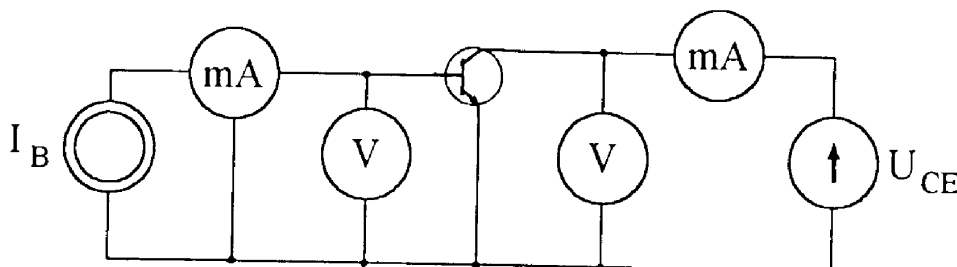
W ćwiczeniu badany jest tranzystor krzemowy n-p-n małej mocy BC107.

- pomierzyć charakterystyki statyczne tranzystora w układzie OE.
- pomierzyć charakterystyki małosygnałowe tranzystora w układzie OE.
- zbadać odpowiedź impulsową tranzystora.

Przebieg ćwiczenia

- Pomiar charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego.

Pomierzyć charakterystyki statyczne tranzystora BC107 w układzie OE : wyjściową $I_C = f(U_{CE})$ przy $I_B = 10, 20, 30, 40, 50$ i $60 \mu A$, wejściową $I_B = f(U_{BE})$ przy $U_{CE} = 2$ i $10 V$, przejściową $I_C = f(I_B)$ przy $U_{CE} = 2$ i $10 V$, zwrotną $U_{BE} = f(U_{CE})$ przy $I_a = 10$ i $60 \mu A$.
 Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys.2.9.

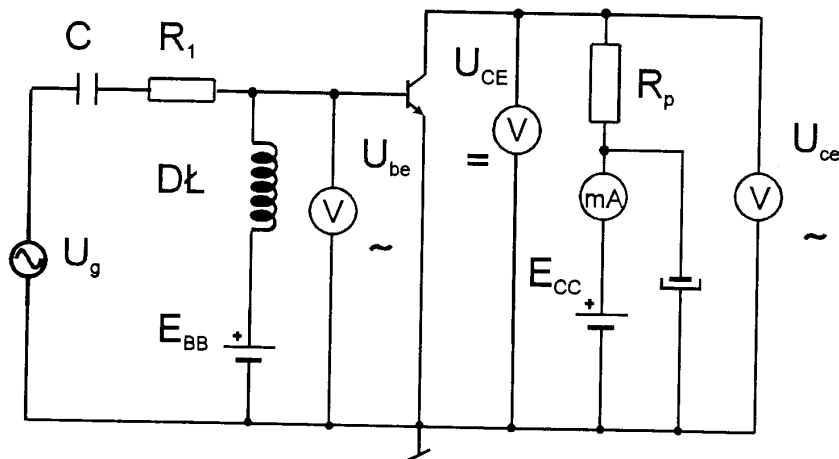


Rys.2.9. Schemat układu pomiarowego do wyznaczania charakterystyk statycznych tranzystora bipolarnego w układzie OE

Katedra Przyrządów Półprzewodnikowych i Optoelektronicznych
 Laboratorium Przyrządów Półprzewodnikowych

- Pomiar charakterystyk małosygnalowych tranzystora.

Pomierzyć w układzie OE charakterystyki parametrów $h_{11e} = f(I_c)$ i $h_{21e} = f(I_c)$ w zakresie prądu kolektora od 0 do 50 mA przy $U_{CE} = 2V$. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys.2.10.

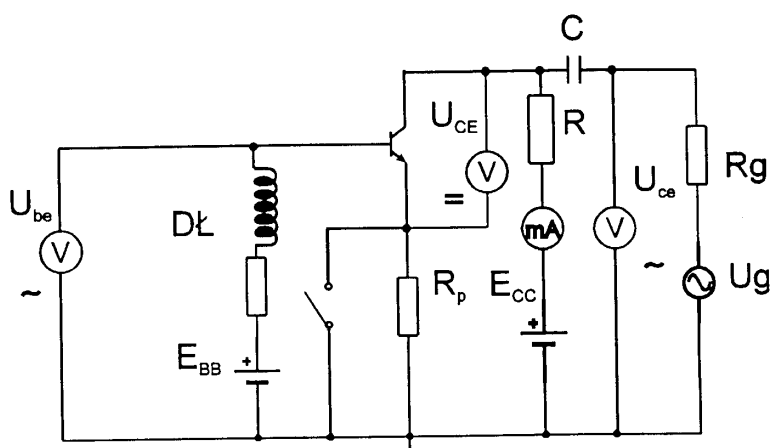


Rys.2.10 Schemat układu do pomiaru parametrów h_{11e} i h_{21e} .

Wartości tych parametrów oblicza się ze wzorów:

$$h_{11e} = R_1 \frac{U_{BE}}{U_g} \quad h_{21e} = \frac{R_1 U_{CE}}{R_p U_g}$$

Pomierzyć w układzie OE charakterystyki parametrów $h_{12e} = f(I_c)$ i $h_{22e} = f(I_c)$ w zakresie prądu kolektora od 0 do 50 mA przy $U_{CE} = 2V$. Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys.2.11. Rezystor pomiarowy R_p w obwodzie emitera służy do pomiaru prądu zmiennego przy pomiarze parametru h_{22e} . Podczas pomiaru parametru h_{12e} rezystor należy zewrzeć do masy.



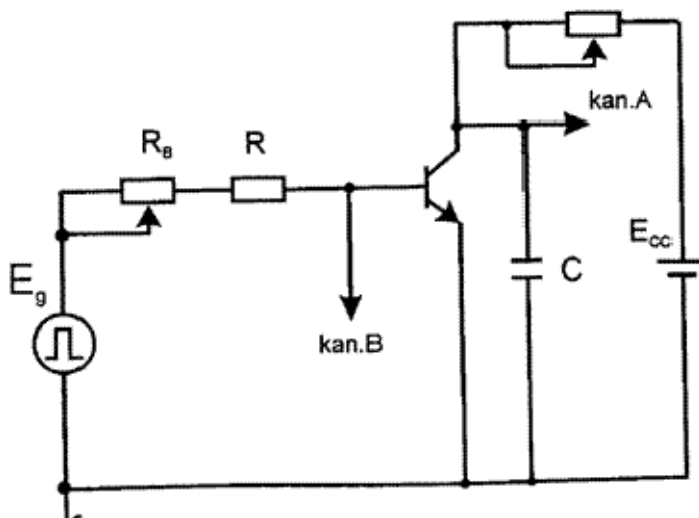
Rys.2.11. Schemat układu do pomiaru parametrów h_{12e} i h_{22e} .

Pomiary parametrów tranzystorów bipolarnych

Wartości tych elementów oblicza się ze wzorów:

$$h_{12e} = \frac{U_{BE}}{U_{CE}} \quad h_{22e} = \frac{1}{R_p} \frac{U_g}{U_{CE} - U_g}$$

- Badanie własności dynamicznych tranzystora bipolarnego.
- Układ pomiarowy przedstawiony jest na rys.2.12. Pomierzyć czas załączania i czas wyłączenia tranzystora w zależności od:
- rezystancji R_C przy ustalonej amplitudzie impulsu z generatora i ustalonym napięciu E_{CC} ,
 - rezystancji R_b przy ustalonej amplitudzie impulsu z generatora i ustalonym napięciu E_{CC} ,
 - pojemności C przy ustalonej rezystancji R_C , przy ustalonej amplitudzie impulsu z generatora i ustalonym napięciu E_{CC} .



Rys.2.12 Schemat układu do badania właściwości impulsowych tranzystorów bipolarnych.

Opracowanie wyników

- Charakterystyki statyczne – wykreślić rodziny charakterystyk statycznych badanego tranzystora bipolarnego (wszystkie charakterystyki jednego tranzystora na wspólnym wykresie).
- Charakterystyki małosygnałowe – wykreślić wszystkie pomierzone charakterystyki parametrów h badanego tranzystora.
- Właściwości impulsowe.
 - narysować oscylogramy napięć i prądów przy przełączaniu tranzystora,
 - wykreślić zależności pomierzonych czasów t_d , t_r , t_s i t_f od parametrów obwodu.

Wymagania

- znajomość procesów fizycznych zachodzących w tranzystorze bipolarnym,
- małosygnałowy schemat zastępczy tranzystora bipolarnego,
- interpretacja parametrów modelu,
- praca tranzystora jako elementu przełączającego,
- interpretacja czasów t_d , t_r , t_s i t_f występujących przy przełączaniu tranzystora,
- omówić przebiegi napięć i prądów występujących przy przełączaniu tranzystora.

Literatura

- [1] Z.Lisik, Podstawy fizyki półprzewodników, skrypt PŁ, 1994
- [2] J.Baranowski, Półprzewodnikowe układy impulsowe i cyfrowe, WNT 1976
- [3] J.Jaczeński. Podstawy elektroniki i energoelektroniki, Warszawa 1981
- [4] A.Świt, J. Pułtorak, Przyrządy półprzewodnikowe. WNT, Warszawa 1979