

11.4.4 Tranzystory

Tranzystory są elementami aktywnymi. Mogą wzmacniać napięcia, prądy i moce.

Tranzystory wytwarza się na bazie germanu albo krzemu. Można je podzielić na bipolarne i unipolarne. W elektrotechnice najczęściej stosuje się tranzystory bipolarne (**rys. a**). Stosuje się je m.in. jako elektroniczne łączniki lub w technice pomiarowej i regulacji jako wzmacniacze.

Oznaczenia i charakterystyki tranzystorów bipolarnych. Wśród tranzystorów bipolarnych rozróżnia się typ NPN i PNP. W zależności od typu tranzystora występują trzy różne obszary domieszkowania. Każdy obszar ma własne wyprowadzenie (**rys. b**): B – baza, E – emiter, C – kolektor. Te trzy obszary (warstwy) półprzewodnika można przedstawić w schemacie zastępczym jako dwie diody połączone szeregowo (**rys. c**).

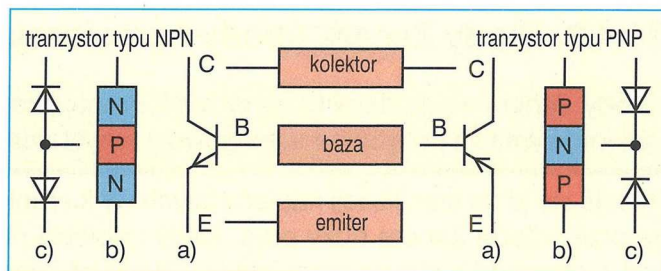
Oznaczenia typu tranzystora. Składają się z dwóch albo trzech dużych liter i liczby (**Tabela 1**). Niektórzy producenci wprowadzają oznaczenie 2N... (zgodnie z normą amerykańską JEDEC). W tym wypadku materiał półprzewodnika i zastosowanie podane są w katalogu producenta.

Obudowy tranzystorów. Rodzaje, wymiary i oznaczenia obudów tranzystorów podają normy (**Tabela 2**). Obudowa może być plastikowa lub metalowa. Tranzystory w obudowie plastikowej, np. TO-92, to tranzystory małosygnałowe. Tranzystory takie stosowane są w zakresie prądów rzędu mA. Tranzystory mocy przystosowane są do prądów przewodzenia o wartości rzędu amperów i mają często metalowe obudowy, które lepiej odprowadzają ciepło wydzielające się w strukturze krystalicznej półprzewodnika.

Istotne parametry charakterystyczne i graniczne tranzystorów. Parametry charakterystyczne określają właściwości tranzystora. Najważniejszymi parametrami charakterystycznym i granicznymi są:

- Statyczny współczynnik wzmocnienia prądu B .
- Napięcie baza – emiter U_{BE}
- Prąd kolektora I_C
- Prąd bazy I_B
- Moc strat P_{tot}

Najistotniejszym parametrem jest statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego B . Jest to stosunek prądu kolektora I_C do prądu bazy I_B ($B = I_C : I_B$). Mała wartość prądu bazy, np. w tranzystorze NPN, może być wzmacniana, np. 80 razy.



Rys. Tranzystory bipolarne a) symbole, b) przekrój struktury, c) diodowy schemat zastępczy

Tabela 1: Oznaczenia tranzystorów

1. litera: materiał półprzewodnika
2. litera: funkcja
3. litera: zastosowanie przemysłowe

Przykład: **BCY 58**

1. litera: materiał półprzewodnika

A: German, **B:** krzem,
C: materiały III-V wartościowe, np. arsenek galu,
R: materiały polikrystaliczne, np. do produkcji magnetorezystorów

2. litera: funkcja, rodzaj elementu

C: tranzystor m.cz., **D:** tranzystor mocy, m.cz.,
F: tranzystor w.cz., **S:** tranzystor impulsowy
U: tranzystor mocy, impulsowy

3. litera, np. X, Y lub Z, oznaczenie zastosowania przemysłowego (profesjonalne)

Przykład:

BC 107: tranzystor krzemowy m.cz.

ASY 27: tranzystor germanowy impulsowy do zastosowań przemysłowych (profesjonalnych)

Tabela 2: Obudowy tranzystorów. Znormalizowane oznaczenia i opis wyprowadzeń

Obudowa z opisem wyprowadzeń	Znormalizowane oznaczenie Przykład	Obudowa z opisem wyprowadzeń	Znormalizowane oznaczenie Przykład
	TO-3 2N3055 AD 130		TO-18 BC 107 BC 237
	TO-39 BC 141 BC 345		TO-66 AD 164 BD 215
	TOP-66 BD 695 BD 696		TO-92 BC 250 BC 546 BC 237
	TO-126 BD 233 BD 226		TO-220 BD 643 BD 644

W kolektorze C tranzystora płynie prąd I_C wzmacniony, ze współczynnikiem B (rys. 1a). Współczynnik B jest podawany przez producenta tranzystorów. Można go także wyznaczyć na podstawie charakterystyk tranzystora (rys. 2).

Przykład:

Tranzystor ma statyczny współczynnik wzmacnienia prądowego równy $B = 80$. Prąd bazy $I_B = 1 \text{ mA}$. Obliczyć prąd kolektora I_C .

Rozwiązanie:

$$B = I_C : I_B \Rightarrow I_C = B \cdot I_B = 80 \cdot 1 \text{ mA} = 80 \text{ mA}$$

Suma prądów I_B i I_C w tranzystorze jest równa prądowi emitera I_E ($I_E = I_B + I_C$; rys.1b)

Następną wielkością charakterystyczną dla tranzystorów bipolarnych jest **napięcie baza – emiter** U_{BE} (rys.1a). Często mówi się, że jest to napięcie sterujące. Napięcie U_{BE} musi być większe od odpowiedniego dla danego materiału półprzewodnika napięcia progowego, np. dla krzemu około 0,6 V. Przez zmianę napięcia U_{BE} steruje się tranzystorem.

Wartości graniczne tranzystora nie mogą być przekraczane (Tabela). W wypadku przekroczenia **mocy strat** tranzystor ulegnie uszkodzeniu. Maksymalną moc strat określa się dla tranzystorów małosygnałowych przy danej temperaturze otoczenia, a dla tranzystorów mocy przy danej temperaturze obudowy. Taki parametr jest konieczny dla tranzystorów mocy przy projektowaniu radiatorów. Moc strat tranzystora P_{tot} obniża się wraz ze wzrostem temperatury otoczenia.



Radiatory do elementów półprzewodnikowych: str. 219

Charakterystyki tranzystorów. Informują o parametrach tranzystora w trakcie jego eksploatacji (rys. 2).

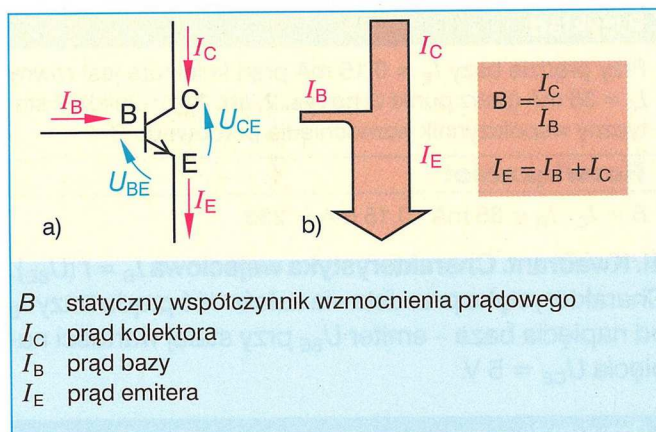
I. Kwadrant. Rodzina charakterystyk wyjściowych $I_C = f(U_{CE})$. Przedstawia zależność prądu kolektora I_C od napięcia kolektor – emiter U_{CE} przy różnych wartościach prądu bazy.

Przykład:

Przy $U_{CE} = 8 \text{ V}$ i $I_B = 150 \mu\text{A}$ (patrz ① na rys. 2) prąd kolektora tranzystora $I_C = 35 \text{ mA}$.

Dodatkowo w polu charakterystyk wyjściowych umieszczono hiperbolę mocy strat dla $P_{\text{tot}} = 0,3 \text{ W}$. Aby nie przekroczyć dopuszczalnej wartości mocy strat P_{tot} , nie należy umieszczać punktu pracy tranzystora powyżej hiperboli mocy strat (rys. 2).

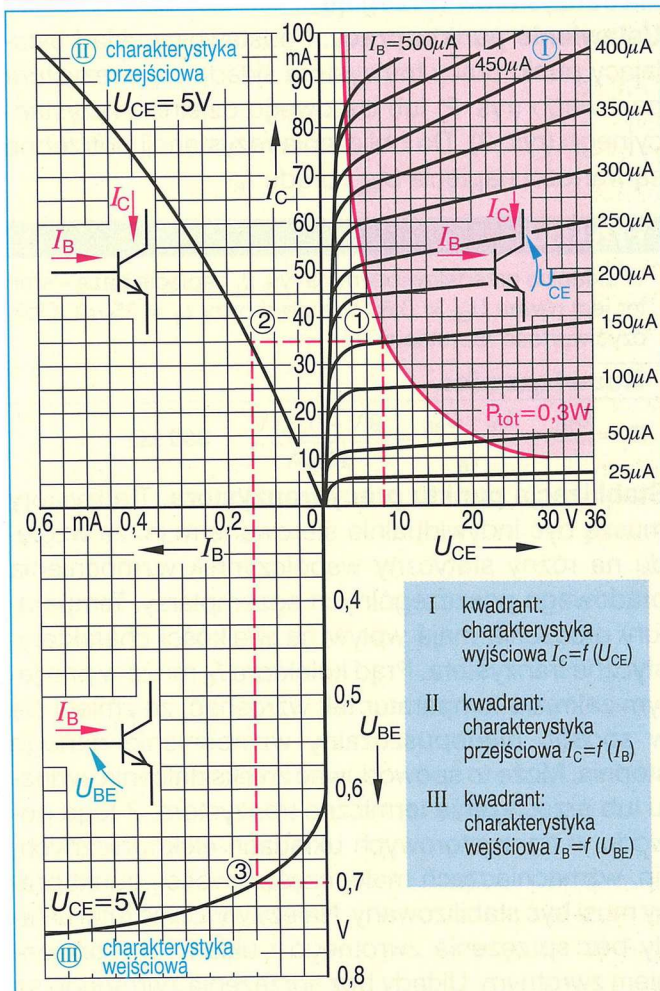
II. Kwadrant. Charakterystyka przejściowa, prądowa $I_C = f(I_B)$. Jest to zależność prądu kolektora I_C od prądu bazy I_B przy stałym napięciu kolektor – emiter $U_{CE} = 5 \text{ V}$. Na podstawie charakterystyki można wyznaczyć statyczny współczynnik wzmacnienia prądowego B .



Rys. 1. Prądy, napięcia i wzmacnienie prądowe w tranzystorze typu NPN

Tabela: Graniczne parametry tranzystorów

Parametr	Znaczenie	BC107	2N3055
P_{tot}	Moc strat $P_v \approx U_{CE} \cdot I_C < P_{\text{tot}}$ zależy od temperatury: przy temperaturze otoczenia 25°C Przy temperaturze obudowy 25°C	300 mW	115 W
I_C	Maksymalny prąd kolektora	100 mA	15 A
I_B	Maksymalny prąd bazy	50 mA	7 A
U_{CE0}	Maksymalne napięcie przebicia złącza kolektor-emiter	45 V	60 V



Rys. 2. Pole charakterystyk Tranzystora BC 107

Przykład:

Przy prądzie bazy $I_B = 0,15 \text{ mA}$ prąd kolektora jest równy $I_C = 35 \text{ mA}$ (patrz punkt 2 na rys. 2, str. 211). Obliczyć statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego B .

Rozwiązanie:

$$B = I_C : I_B = 35 \text{ mA} : 0,15 \text{ mA} = 233$$

III. Kwadrant. Charakterystyka wejściowa $I_B = f(U_{BE})$. Charakterystyka przedstawia zależność prądu bazy I_B od napięcia baza – emiter U_{BE} przy stałej wartości napięcia $U_{CE} = 5 \text{ V}$.

Przykład:

Jaką wartość ma prąd bazy przy napięciu $U_{BE} = 0,7 \text{ V}$?

Rozwiązanie:

$$I_B = 0,15 \text{ mA} \text{ (patrz 3 na rys. 2, str. 211).}$$

Ponieważ prąd kolektora I_C , przy danym prądzie bazy, praktycznie nie zależy od napięcia kolektor – emiter U_{CE} , w kwadrancie II i III przedstawiono tylko jedną charakterystykę.

Układy pracy tranzystora. Tranzystor może pracować w trzech różnych topologiach, w układach: **wspólnej bazy, wspólnego emitera i wspólnego kolektora**. Najczęściej stosowany jest układ wspólnego emitera.

Należy przestrzegać podstawowych zasad użytkowania tranzystorów (**Przegląd**).

Ustawienie punktu pracy. Podstawowy układ ustalający punkt pracy tranzystora składa się z rezystora bazowego (rys. 2) lub bazowego dzielnika rezystancyjnego (rys. 3). Do obliczenia rezystancji potrzebne są wartości napięcia U_{BE} i prądu I_B .

Przykład:

W układzie przedstawionym na rys. 2, napięcie baza – emiter jest równe $U_{BE} = 0,63 \text{ V}$, a prąd bazy $I_B = 25 \mu\text{A}$. Obliczyć wartość rezystancji R_1 .

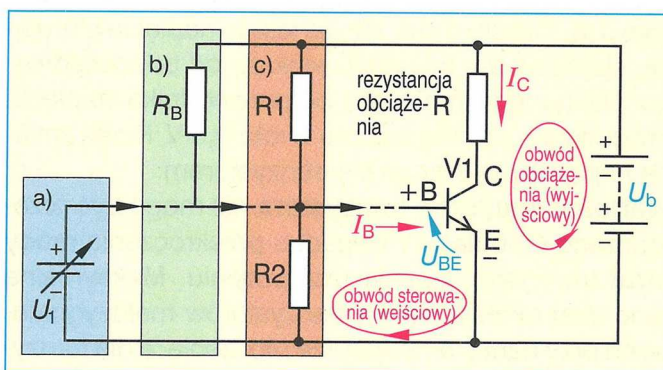
Rozwiązanie:

$$R_1 = \frac{U_{R1}}{I_B} = \frac{U_b - U_{BE}}{I_B} = \frac{9 \text{ V} - 0,63 \text{ V}}{25 \mu\text{A}} = 330 \text{ k}\Omega$$

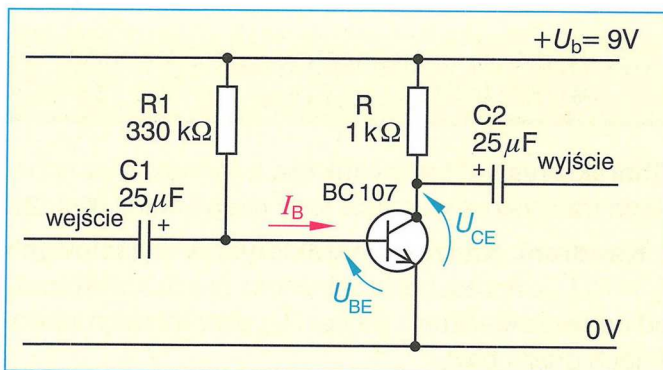
Stabilizacja punktu pracy tranzystora. Tranzystory muszą być indywidualnie sterowane m.in. ze względu na różny statyczny współczynnik wzmocnienia prądowego poszczególnych egzemplarzy. Temperatury otoczenia mają wpływ na wielkości charakterystyczne tranzystora. Prąd kolektora I_C może w przyjętym zakresie temperatur tak wzrosnąć, że zmieni się w sposób niedopuszczalny wzmocnienie danego stopnia. Może to spowodować zniekształcenia sygnału lub przeciążenie termiczne tranzystora. Z tego powodu w tranzystorowych układach elektronicznych, np. wzmacniaczach małej częstotliwości, punkt pracy musi być stabilizowany. Należy wyróżnić tutaj układy bez sprzężenia zwrotnego i układy ze sprzężeniem zwrotnym. Układy bez sprzężenia zwrotnego są proste w budowie, ale niestabilne.

Przegląd:**Zasady łączenia tranzystorów**

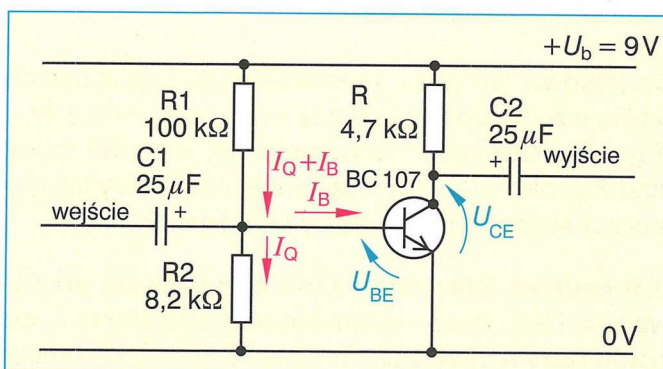
- Tranzystory są zazwyczaj zasilane napięciem stałym.
- W układzie wspólnego emitera rezystancja obciążenia, np. żarówka, rezystor, jest włączona pomiędzy kolektor tranzystora i źródło zasilania U_b (rys. 1).
- Złącze baza – emiter jest spolaryzowane w kierunku przewodzenia, a złącze baza – kolektor w kierunku zaporowym.
- Prądy I_B i I_C muszą mieć ograniczone wartości.
- Punkt pracy tranzystora (ustalony przez I_B i U_{BE}) można ustalić za pomocą różnych układów zasilania (rys. 1.).



Rys. 1. Ustawianie punktu pracy tranzystora typu NPN przez:
a) regulowane źródło napięcia, b) rezystor bazowy,
c) dzielnik napięciowy



Rys. 2. Ustawianie punktu pracy tranzystora przez rezystor bazowy R_1



Rys. 3. Ustawianie punktu pracy tranzystora przez rezystor dzielnik napięcia R_1, R_2

Zastosowania tranzystorów

Tranzystory i układy tranzystorowe znalazły szerokie zastosowanie. Przykładem mogą być:

- Tranzystory jako łączniki elektroniczne,
- Wzmacniacze małej częstotliwości,
- Stabilizatory napięcia.

Tranzystor jako łącznik elektroniczny

W tranzystorach pracujących jako łączniki występują dwa stabilne stany pracy: stan przewodzenia i stan odcięcia prądowego (nieprzewodzenia). Jeżeli tranzystor jest w stanie przewodzenia, obwód kolektor – emiter ma małą rezystancję. Kiedy tranzystor jest wyłączany w obwód kolektor–emiter, ma dużą rezystancję. Zatem tranzystor w stanie przewodzenia można traktować jak styk zamknięty, a w stanie nieprzewodzenia jak styk otwarty łącznika. Sterując odpowiednio tranzystor (**rys. 1**) można włączyć lub wyłączyć napięcie zasilające żarówkę (rezystor obciążenia). W praktyce często musi być określona wartości rezystancji R_v ograniczająca prąd bazy.

Przykład:

Tranzystor BC107 pracuje w układzie łącznika elektronicznego. Współczynnik przesterowania $k = 3$, napięcie $U_{BEsat} = 0,77 \text{ V}$. Wyznaczyć na podstawie rys. 1 i 2 wartość rezystancji rezystora bazowego R_v .

Rozwiązanie:

Z rys. 2: $B_{min} = I_C : I_{Bmin} = 50 \text{ mA} : 250 \mu\text{A} = 200$

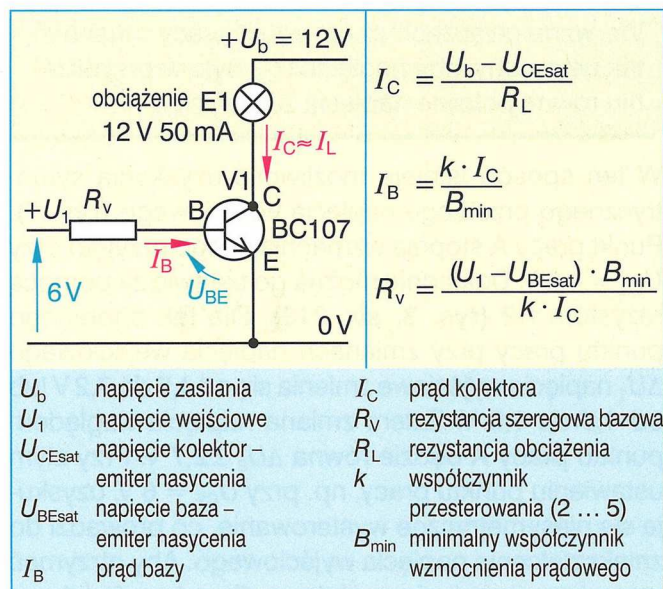
$$R_v = \frac{(U_1 - U_{BEsat}) \cdot B_{min}}{k \cdot I_C} = \frac{(6 \text{ V} - 0,77 \text{ V}) \cdot 200}{3 \cdot 50 \text{ mA}} = 7 \text{ k}\Omega$$

Przyjmuje się wartość typową $R_v = 6,8 \text{ k}\Omega$

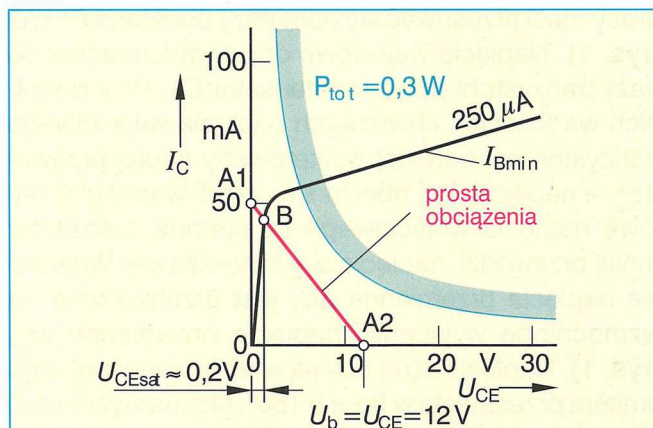
Do włączenia tranzystora potrzebny jest minimalny prąd bazy I_{Bmin} , który można wyznaczyć rysując na charakterystyce wyjściowej (**rys. 2, str. 211**) tranzystora prostą obciążenia. Na tej prostej zaznaczono punkt pracy A1 (tranzystor przewodzi) i A2 (tranzystor nie przewodzi). Punkt pracy A1 wyznacza prąd I_C równy prądowi obciążenia 50 mA i napięcie $U_{CE} = 0$. Punkt pracy A2 wyznacza prąd $I_C = 0$ i napięcie $U_{CE} = U_b = 12 \text{ V}$. Linia łącząca punkty A1 i A2 nazywa się **prostą obciążenia**. Punkt przecięcia B tej prostej z wybraną charakterystyką tranzystora określa minimalny prąd bazy $I_{Bmin} = 250 \mu\text{A}$, potrzebny do wprowadzenia tranzystora w stan przewodzenia. Aby tranzystor dobrze przewodził przyjmuje się współczynnik przesterowania, np. $k = 3$. Prąd bazy zwiększa się trzykrotnie. W ten sposób będzie zagwarantowane, że w trakcie sterowania każdy tranzystor tego typu będzie się bezpiecznie i szybko przełączał. Ponieważ tranzystor nie jest idealnym łącznikiem w stanie załączenia pomiędzy kolektorem i emiterem występuje małe napięcie U_{CEsat} o wartości ok. 0,2 V (**rys. 2**). Straty mocy występujące w tranzystorze w stanie przewodzenia oblicza się w sposób następujący: $P_v = U_{CEsat} \cdot I_C = 0,2 \text{ V} \cdot 50 \text{ mA} = 10 \text{ mW}$. Tranzystor nie jest w tym przypadku przeciążony.

Tranzystor jako wzmacniacz małych częstotliwości

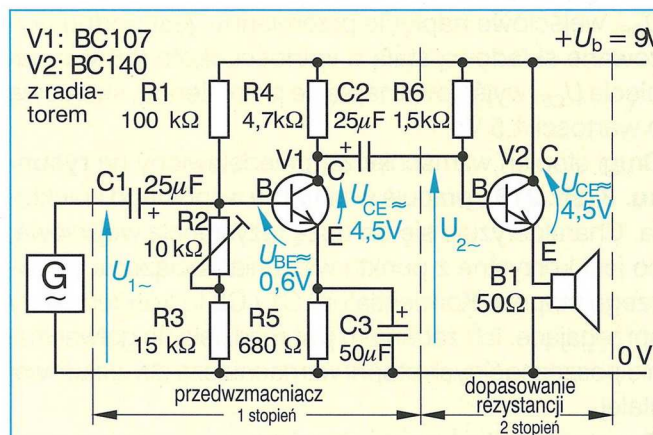
Wzmacniacze małych częstotliwości (m.cz.) mają za zadanie wzmacniać małe napięcia przemienne. Wzmacniacze te stosuje się np. w domofonach, radioodbiornikach i odbiornikach telewizyjnych. Proste wzmacniacze m.cz. zawierają przedwzmacniacz napięciowy i stopień końcowy (wzmacniacz mocy), dopasowujący rezystancję wyjściową wzmacniacza do rezystancji odbiornika (**rys. 3**).



Rys. 1. Tranzystor jako łącznik



Rys. 2. Charakterystyka wyjściowa i prosta obciążenia



Rys. 3. Prosty tranzystorowy wzmacniacz m.cz.