

Katedra Automatyki i Biomechaniki P.Ł.
LABORATORIUM PODSTAW AUTOMATYKI
Ćwiczenie D: *Badanie wzmacniaczy tranzystorowych*

Ć w i c z e n i e II.6

BADANIE ELEKTRONICZNYCH WZMACNIACZY TRANZYSTOROWYCH

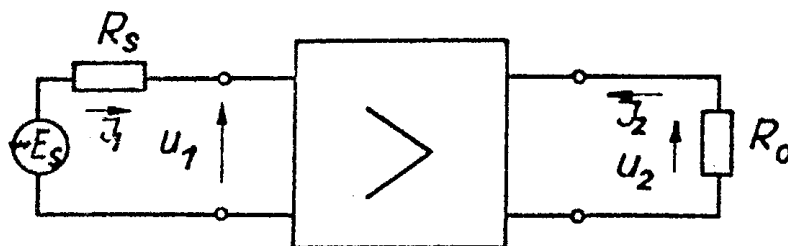
Cel ćwiczenia: zapoznanie się z budową, działaniem i zastosowaniem jedno- i wielostopniowych wzmacniaczy tranzystorowych zbudowanych z elementów dyskretnych oraz wykonanych techniką układów scalonych.

II.6.1. Opis urządzenia pomiarowego

Do urządzenia pomiarowego wchodzi sześć typów wzmacniaczy posiadających wspólny zasilacz sieciowy, generator funkcji standardowych, woltomierz i oscyloskop.

II.6.2. Wprowadzenie teoretyczne

1. Wiadomości ogólne. Głównym zadaniem wzmacniaczy elektronicznych jest wzmacnianie sygnałów elektrycznych. Dodatkowa energia niezbędna do pracy wzmacniacza jest pobierana z oddzielnego źródła energii. Ogólnie wzmacniacz możemy przedstawić jako czwórnik (rys. II.6.1), gdzie R_s - oporność źródła sterującego, R_o - oporność obciążenia.



Rys. II.6.1

Dla układu przedstawionego na rysunku II.6.1 można napisać, że - współczynnik wzmocnienia napięciowego

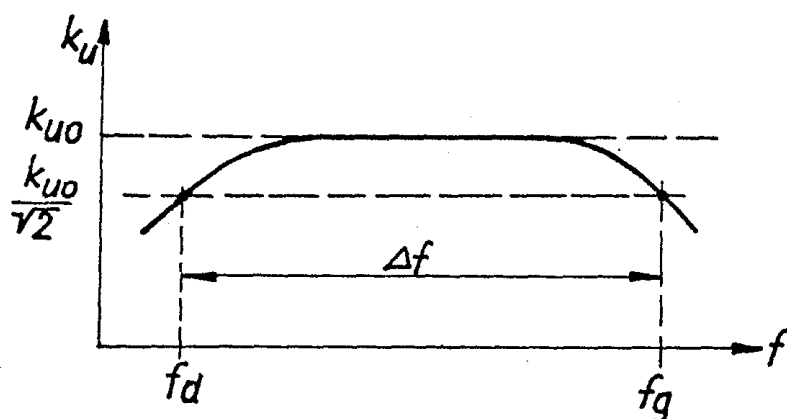
$$k_u = \frac{U_2}{U_1}$$

- współczynnik wzmocnienia prądowego

$$k_i = \frac{I_2}{I_1}$$

Właściwości wzmacniacza określają jego charakterystyki częstotściowe:

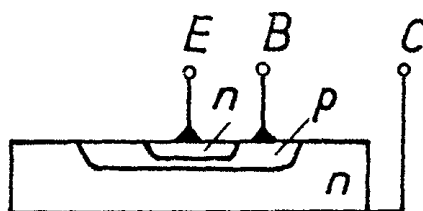
- amplitudowa - dla modułu współczynnika wzmocnienia $k_u = \psi_1(f)$,
- fazowa - dla kąta przesunięcia fazowego $\varphi_u = \psi_2(f)$.



Rys. II.6.2

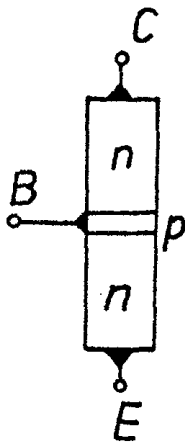
Typową charakterystykę częstotściową (amplitudową) wzmacniacza przedstawiono na rysunku II.6.2. Zakres częstości przenoszonych przez wzmacniacz określony szerokością pasma $\Delta f = f_g - f_d$, gdzie f_g i f_d są górną i dolną częstością graniczną wzmacniacza. Częstości f_g i f_d określają częstości, dla których wzmocnienie wzmacniacza maleje o 3 dB (tj. $\sim 30\%$ wartości k_{u0}).

2. Tranzystor jako element wzmacniający. Tranzystor ze względu na właściwości wzmacniające jest zaliczany do najważniejszych elementów elektronicznych. Wykorzystuje się w nim zjawiska zachodzące na styku dwóch obszarów półprzewodnika o odmiennym stanie przewodzenia (n- typu elektronowego i p - typu dziurowego). Te odmienne warstwy przewodnictwa uzyskuje się przez odpowiednie domieszkowanie germanu lub krzemu.

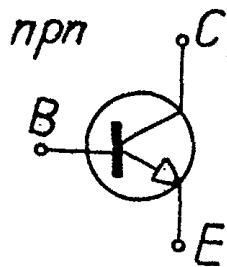
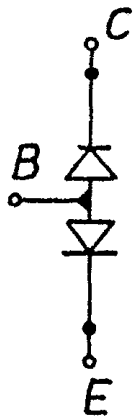


Rys. II.6.3

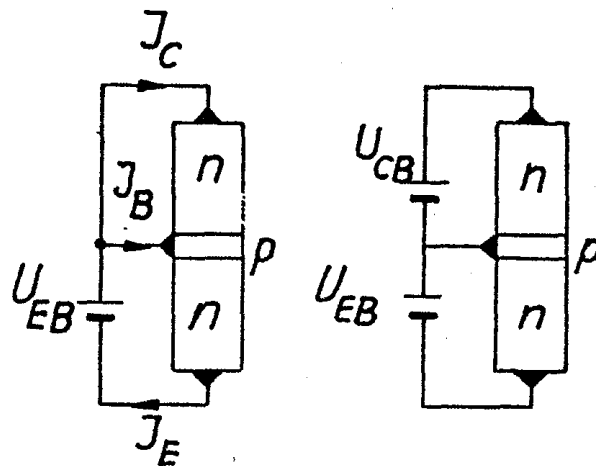
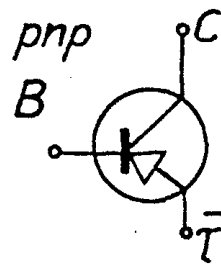
Tranzystor składa się z trzech warstw (obszarów) o typie przewodnictwa pnp lub npn wykonanych specjalną technologią (rys. II.6.3). Nosią one nazwy: emiter - E, baza - B i kolektor - C. Schematycznie tranzystor npn można przedstawić jako przeciwne połączenie dwóch diod (rys. II.6.4). Diody te wykonuje się techniką dyfuzji w kryształach typu n z bardzo cienką wspólną bazą. Na rysunku II.6.5 przedstawiono symbol graficzny tranzystora typu npn i pnp. Działanie tranzystora polega na tym, że jedno złącze jest spolaryzowane w kierunku przewodnym, a drugie zaporowym (rys. II.6.6).



Rys. II.6.4



Rys. II.6.5



Rys. II.6.6

Na rysunku II.6.7 przedstawiono rozptył prądów w tranzystorze typu npn. Nośniki wprowadzone przez spolaryzowane w kierunku przewodzenia złącze emiter-baza na skutek bardzo cienkiej bazy dyfundują w ogrom-

nej większości do obszaru kolektora, obniżając barierę potencjału na złączu spolaryzowanym zaporowo. Powoduje to zmianę prądu płynącego przez to złącze.

Bardzo ważnym parametrem jakościowym tranzystora jest współczynnik wzmocnienia prądowego. Można go określić jako stosunek liczby nośników wpływających do strefy kolektora do liczby nośników wstrzykniętych przez złącze emiter-baza w układzie wspólnej bazy

$$\alpha_0 = \frac{I_C - I_{CBO}}{I_E}, \quad (\text{II.6.1})$$

gdzie I_{CBO} - prąd nośników mniejszościowych złącza baza-kolektor.

Dla układu z rysunku II.6.7 wynika zależność

$$I_E = I_C + I_B. \quad (\text{II.6.2})$$

Wykorzystując zależności (II.6.1) i (II.6.2) możemy napisać, że

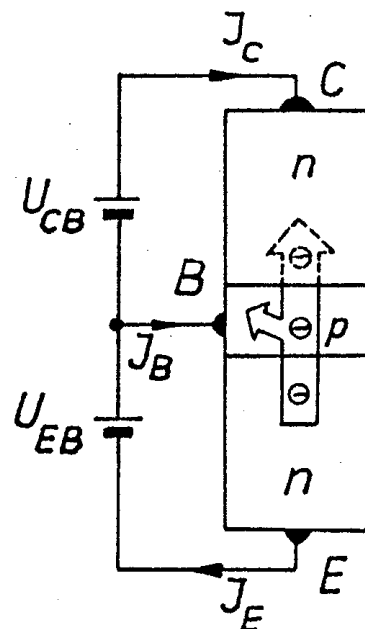
$$I_C = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0} I_B + \frac{1}{1 - \alpha_0} I_{CBO}. \quad (\text{II.6.3})$$

Dla normalnych warunków pracy tranzystora można przyjąć, że $I_{CBO} \approx 0$; wtedy stosunek prądu kolektora do prądu bazy

$$\beta_0 = \frac{\alpha_0}{1 - \alpha_0}, \quad (\text{II.6.4})$$

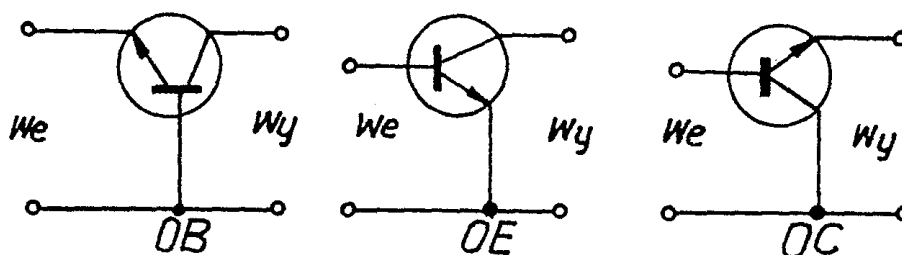
nazywamy współczynnikiem wzmocnienia prądowego w układzie wspólnego emitera. Wartość tego współczynnika może się zawierać w granicach 10-1000. Tranzystor będący elementem posiadającym trzy elektrody może być połączony w układzie wyłącznie w ten sposób, że jedna elektroda jest wspólna w układzie czwórnik. Otrzymujemy w ten sposób trzy układy pracy tranzystora; wspólna baza - OB; wspólny emiter - OE i wspólny kolektor - OC (rys. II.6.8).

W celu zapewnienia prawidłowych warunków pracy wzmacniacza tranzystorowego (lampowego) należy zachować możliwie stałe wielkości na-



Rys. II.6.7

pięć i prądów określających punkty pracy tranzystora. Położenie ich, ustalone wartościami prądu kolektora I_C i napięcia kolektor-emiter U_{CE} ulega zmianie na skutek rozrzutu parametrów poszczególnych egzemplarzy tranzystora oraz zmian temperatury złącza półprzewodnikowego.



Rys. II.6.8

Zmiany temperatury mają bardzo duży wpływ na takie parametry tranzystora jak:

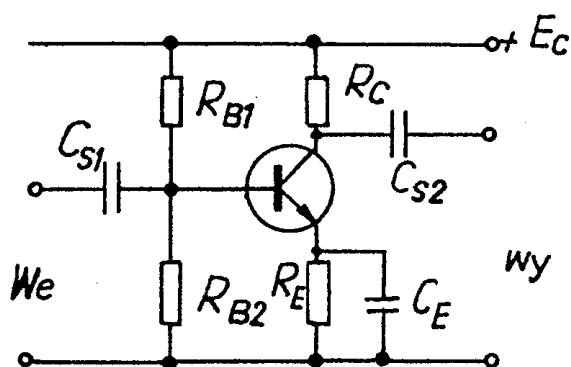
- zmiana prądu baza-kolektor I_{CB0} , który rośnie wykładniczo ze wzrostem temperatury,
- zmiany spadku napięcia baza-emiter U_{BE} o 2-3 mV przy zmianie temperatury o 1°C ,
- zmiany współczynników wzmocnienia.

Wielkości tych zmian wynikają ze zjawisk fizycznych zachodzących w tranzystorze i nie mamy na nie żadnego wpływu. Można jednak przez przyłączenie odpowiednich obwodów zewnętrznych zmniejszyć znacznie wpływ temperatury na zmianę punktu pracy tranzystora. Można to zrealizować przez wprowadzenie ujemnego sprzężenia zwrotnego dla prądu stałego lub przez włączenie do obwodów zasilających elementów o ujemnym temperaturowym współczynniku oporności (termistor, żarówka). Zmiana oporności tego elementu powoduje zmianę prądu bazy i dzięki temu zostają częściowo skompensowane zmiany temperaturowe prądu zerowego I_{CB0} i napięcia U_{BE} . Często stosuje się jednocześnie oba sposoby kompensacji wpływu temperatury na pracę wzmacniacza.

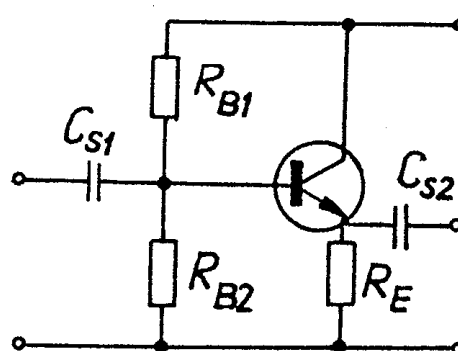
3. Wzmacniacz oporowy ze sprzężeniem pojemnościowym. Jest to najprostszy typ wzmacniacza. Zwykle obciążeniem jego jest obwód wejściowy następnego stopnia. Sprzężenie obu stopni jest zrealizowane za pomocą kondensatora. Dzięki temu jest tylko przenoszona składowa zmierzona wzmacnianego sygnału. Dla składowej stałej połączenie takie przedstawia nieskończenie dużą oporność.

Na rysunku II.6.9 przedstawiono schemat stopnia wzmacniającego w układzie OE, zapewniającym największe wzmocnienie mocy. Oporniki

R_{B1} i R_{B2} (rys. II.6.9) tworzą dzielnik potencjometryczny napięcia polaryzującego bazę. Wraz z opornikiem R_C ustalają punkt pracy tranzystora na rodzinie charakterystyk. Włączenie w obwód emitera opornika R_E spowoduje powstanie ujemnego sprzężenia zwrotnego dla prądu stałego, co znacznie zmniejszy wpływ temperatury na zmianę punktu pracy tranzystora. Zablokowanie opornika R_E kondensatorem C_E eliminuje ujemne sprzężenie dla sygnałów prądu zmiennego. Kondensatory C_{S1} i C_{S2} są kondensatorami sorzégającymi kolejne stopnie wzmacniacza.



Rys. II.6.9



Rys. II.6.10

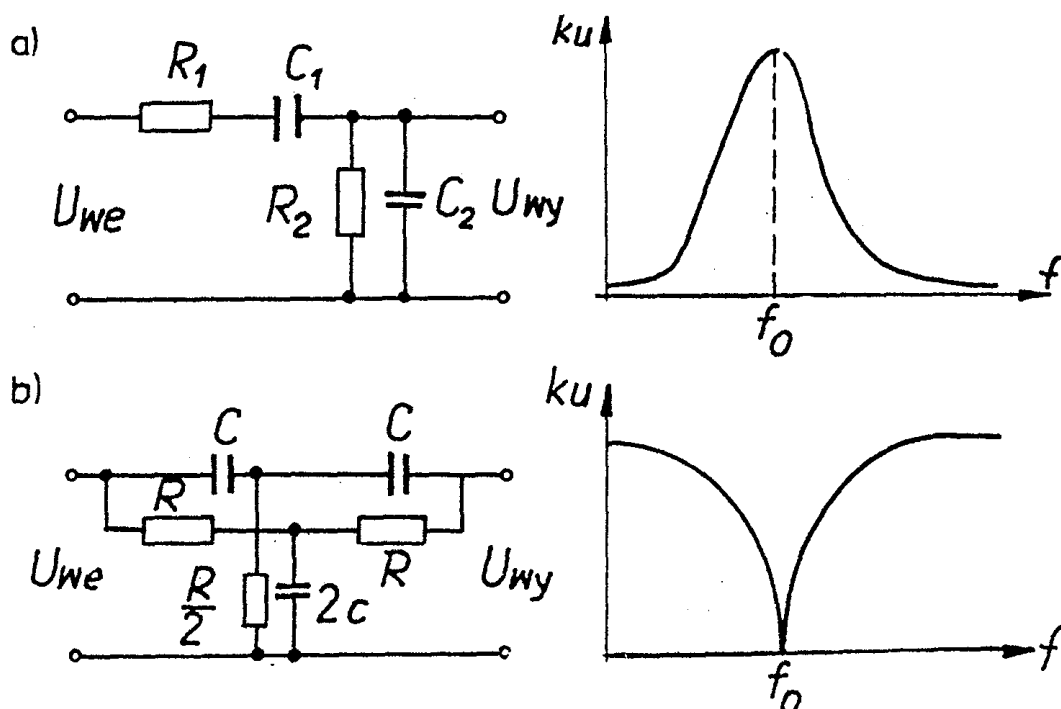
4. Wtórnik emiterowy. Wtórnik emiterowy jest wzmacniaczem o wzmacnieniu napięciowym mniejszym od jedności i dużym wzmacnieniu prądowym. Podstawowy układ wtórnika w układzie DC pokazano na rysunku II.6.10. Układ wtórnika cechuje duża oporność wejściowa i mała wyjściowa. Z tego względu wtórnik można traktować jako transformator impedancji.

5. Wzmacniacz selektywny. Wzmacniacz selektywny charakteryzuje się dużym wzmacnieniem w określonym pasmie częstości i znacznie mniejszym wzmacnieniem poza tym pasmem. W zależności od rodzaju częstościowej charakterystyki amplitudowej rozróżniamy następujące typy wzmacniaczy selektywnych:

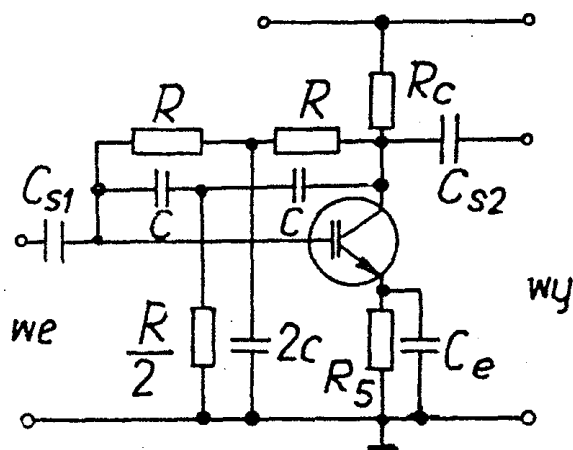
- wzmacniacz selektywnie uwydatniający; posiada on duże wzmacnienie tylko w wąskim pasmie częstości,
- wzmacniacz selektywnie tłumiący; charakteryzuje się dużym wzmacnieniem w szerokim pasmie z wyjątkiem wąskiego pasma, dla którego wzmacnienie jest bardzo małe,
- wzmacniacz dolnoprzepustowy; posiada duże wzmacnienie dla małych częstości i malejące znaczenie dla dużych częstości,
- wzmacniacz górnoprzepustowy; jego wzmacnienie dla małych częstości jest bardzo małe; natomiast rośnie dla dużych częstości.

Wzmacniacze selektywne są budowane jako wzmacniacze rezonansowe z wykorzystaniem obwodu rezonansowego LC lub z gałęzią RC (z mostkiem Wienera lub obwodami typu 2T). Przy budowie wzmacniaczy selektywnych pracujących przy małych częstotliwościach bardziej korzystne jest stosowanie obwodów z elementami RC.

Na rysunku II.6.11 przedstawiono selektywne człony i ich charakterystyki częstotściowe: a) dla mostka Wienera, b) dla układu z 2T.



Rys. II.6.11



Rys. II.6.12

Dostrojenie wzmacniacza do żądanej częstotliwości można uzyskać przez zmianę wartości elementów RC. Częstota rezonansowa f_0 jest równa

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (\text{II.6.5})$$

Na rysunku II.6.12 przedstawiono wzmacniacz selektywnie uwydatniający, w którym zastosowano układ 2T.

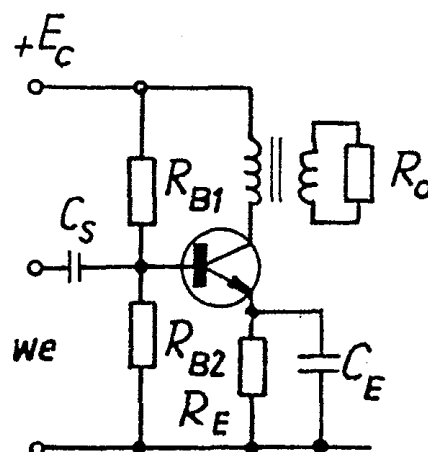
6. Wzmacniacz mocy. Zadaniem wzmacniacza mocy jest dostarczenie wymaganej mocy wyjściowej do obciążenia. Wzmacniacze mocy z reguły pracują z dużym sygnałem wejściowym i wyjściowym. Przy pracy z dużymi sygnałami należy się liczyć z występowaniem zniekształceń sygnału wyjściowego z powodu nieliniowych charakterystyk tranzystora. Moc wyjściowa wzmacniacza jest ograniczona przede wszystkim maksymalną mocą strat kolektora $P_{C \max}$, która zależy od temperatury złącza $T_{j \max}$ i temperatury otoczenia T_a

$$P_{C \max} = \frac{T_{j \max} - T_a}{R_t}, \quad (\text{II.6.6})$$

gdzie R_t - oporność termiczna [$^{\circ}\text{C}/\text{W}$].

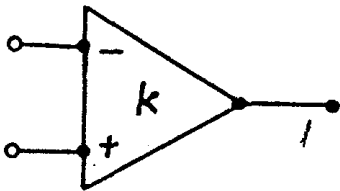
Na rysunku II.6.13 przedstawiono przykład wzmacniacza mocy. Układ powyższy cechuje stosunkowo mała sprawność i moc wyjściowa. Znacznie lepsze parametry uzyskują wzmacniacze przeciwobne zbudowane z elementów dyskretnych lub techniką scaloną.

7. Wzmacniacze prądu stałego. Wzmacniacze prądu stałego służą do wzmacniania sygnałów prądu stałego oraz sygnałów wolnozmiennych; dlatego też buduje się je jako wzmacniacze o bezpośrednim sprzężeniu kolejnych stopni (z pominięciem kondensatorów sprzęgających). Bardzo ważnym problemem jest fakt, że każda zmiana prądu lub napięcia spowodowana zmianą punktów pracy tranzystorów w funkcji temperatury, zmianą napięcia zasilania itp., dodaje się do wzmacnionego sygnału użytecznego dając na wyjściu tzw. sygnał fałszywy, nazywany pełzaniem zera. Głównym powodem powyższego zjawiska są zmiany prądu I_{C0} , napięcia U_{BE} oraz współczynnika wzmocnienia prądowego β_0 ; dlatego do budowy wzmacniaczy prądu stałego należy używać elementów bardzo wysokiej jakości oraz stosować specjalne układy kompensacyjne.

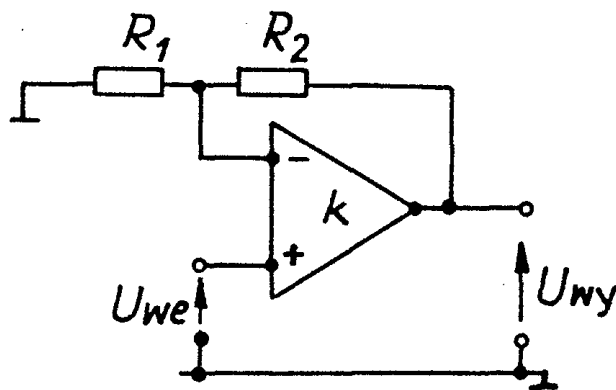


Rys. II.6.13

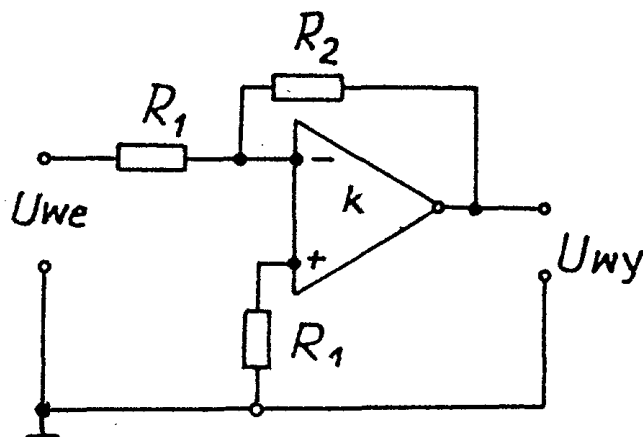
Obecnie wzmacniacze prądu stałego buduje się najczęściej w postaci obwodów scalonych. Przewyższają one w wielu przypadkach swoimi parametrami wzmacniacze budowane w sposób konwencjonalny. Wzmacniacze o sprzężeniu bezpośrednim są często nazywane wzmacniaczami operacyjnymi z uwagi na możliwość stosowania ich w układach do wykonywania operacji matematycznych. Wzmacniacz operacyjny posiadający duże wzmocnienie pracuje przeważnie z dołączonym zewnętrznym układem sprzężenia zwrotnego, który w dużym stopniu decyduje o właściwościach całego układu wzmacniacza. Wzmacniacz operacyjny posiada przeważnie wejście symetryczne (różnicowe). Wejście nieodwracające jest oznaczone znakiem „+”, a odwracające znakiem „-”. Wyjście wzmacniacza jest z reguły niesymetryczne. Podanie sygnału na wejście odwracające spowoduje przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem wejściowym i wyjściowym o 180° . Wzmacniacz operacyjny oznaczamy schematycznie jak trójkąt z oznaczeniem wejść „+” i „-” (rys. II.6.14).



Rys. II.6.14



Rys. II.6.15



Rys. II.6.16

8. Wzmacniacz nieodwracający fazy. W układzie tym napięcie wejściowe jest doprowadzone do zacisku „+” (rys. II.6.15). Napięcie wyjściowe wynosi

$$U_{wy} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{we}. \quad (\text{II.6.7})$$

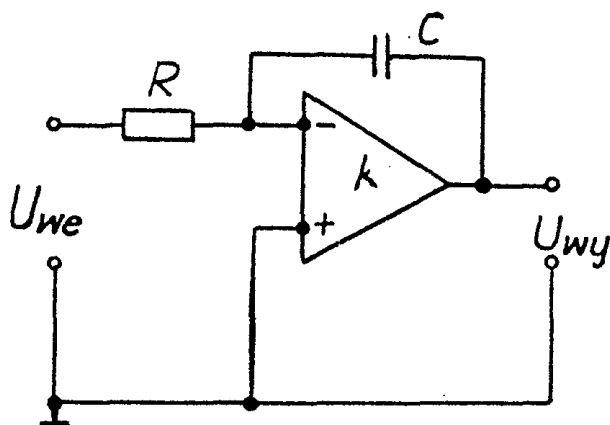
9. Wzmacniacz odwracający fazę. W układzie zastosowano ujemne sprzężenie zwrotne napięciowo-równoległe (rys. II.6.16).

Napięcie wyjściowe wynosi

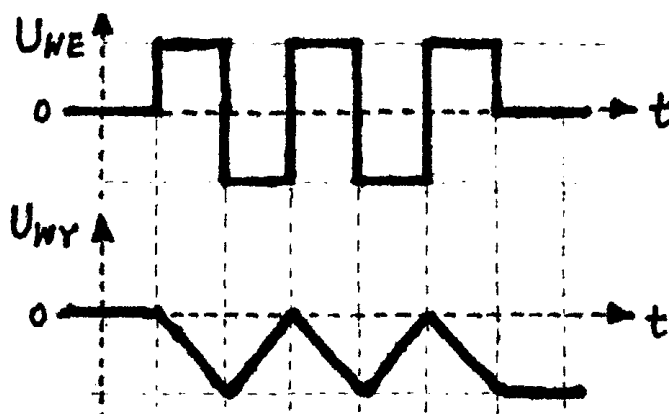
$$U_{wy} = -U_{we} \frac{R_2}{R_1}. \quad (\text{II.6.8})$$

10. Wzmacniacz całkujący. Przez zastosowanie kondensatora w obwodzie pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego używa się układu całkujący (rys. II.6.17). Można wykazać, że napięcie wyjściowe zmienia się zgodnie z zależnością

$$U_{wy} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{we} dt. \quad (\text{II.6.9})$$



Rys. II.6.17

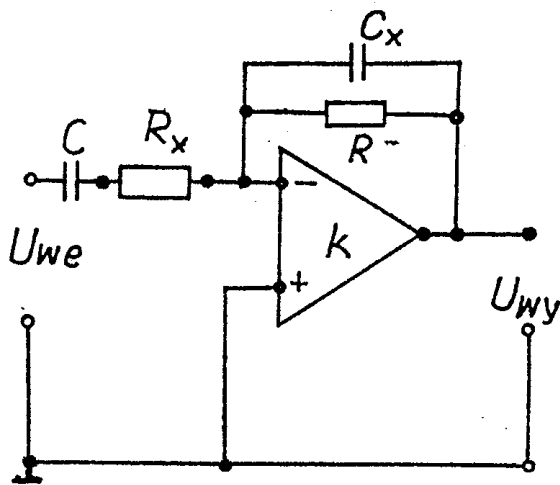


Rys. II.6.18. Przykładowy przebieg napięcia U_{we} i odpowiedzi U_{wy} wzmacniacza całkującego.

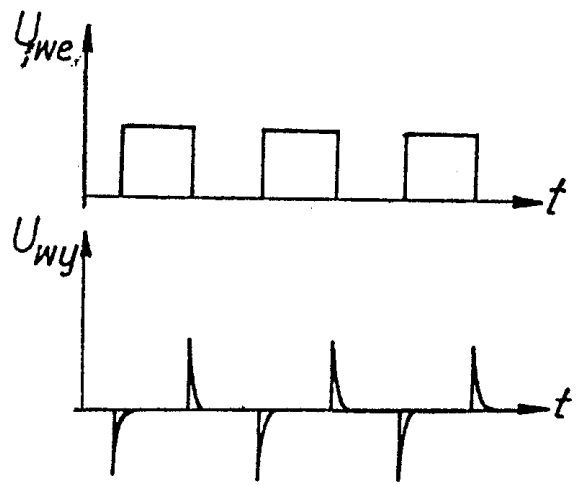
Jeśli do wejścia wzmacniacza doprowadzimy napięcie prostokątne, to przy odpowiednio dużych wartościach R i C napięcie wyjściowe będzie miało charakter trójkątny. Przykładowy przebieg U_{we} i U_{wy} dla zerowych warunków początkowych pokazano na rys. II.6.18.

11. Wzmacniacz różniczkujący. Na rysunku II.6.19 jest przedstawiony układ różniczkujący. W praktycznych układach dodaje się często dodatkowe elementy R_x i C_x , które poprawiają stabilność układu. Po doprowadzeniu na wejście napięcia prostokątnego na wyjściu wzmacniacza strome zbocza impulsów wejściowych wytworzą krótkie strome impulsy szpilkowe (rys. II.6.20). Napięcie wyjściowe wyraża się wzorem

$$U_{wy} = -RC \frac{dU_{we}}{dt}. \quad (\text{II.6.10})$$



Rys. II.6.19.



Rys. II.6.20

II.6.3. Przebieg ćwiczenia

1. Z badać wpływ zmiany punktu pracy tranzystora w jednostopniowym wzmacniaczu na kształt wzmacnianego sygnału.
2. Wyznaczyć charakterystykę częstotściową współczynnika wzmocnienia $k_u = \varphi(f)$.
3. Na podstawie danych wartości R i C wyznaczyć częstotść rezonansową członu $2T$ oraz wyznaczyć charakterystykę częstotściową współczynnika wzmocnienia $k_u = \varphi(f)$ wzmacniacza selektywnego.
4. Wyznaczyć maksymalną moc wyjściową wzmacniacza mocy (do widocznych zniekształceń) oraz współczynnik wzmocnienia mocy.
5. Określić wpływ elementów sprzężenia zwrotnego na charakterystykę częstotściową wzmacniacza mocy.
6. Wyznaczyć charakterystykę częstotściową wzmacniacza prądu stałego. Obliczyć dla danych elementów R współczynnik wzmocnienia.

7. Określić przebieg odpowiedzi wzmacniacza całkującego na podanie określonych sygnałów wejściowych.

8. Określić przebieg odpowiedzi wzmacniacza różniczkującego na podanie określonych sygnałów wejściowych.

II.6.4. Literatura

- [1] Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków. Praca zbiorowa, WNT, Warszawa 1978.
- [2] Pałczyński B., Stefański W.: Projektowanie układów z przyrządami półprzewodnikowymi. WKŁ, Warszawa 1969.
- [3] Tunia H., Winiański B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT, Warszawa 1969.
- [4] Czerniak J., Jurkovic K.: Projektowanie i konstrukcja wzmacniaczy tranzystorowych małej częstotliwości. WNT, Warszawa 1976.