

INSTRUKCJA DO ĆWICZENIA

NR.7

Badanie scalonego wzmacniacza prądu stałego.

Wzmacniacze prądu stałego są to wzmacniacze przebiegów, których dolna granica widma częstotliwości sięga 0Hz (składowa stała). Najistotniejszym problemem występującym przy wzmacnianiu takich przebiegów jest wpływ czynników związanych z polaryzacją elementów aktywnych wzmacniacza na napięcie wyjściowe. Głównymi źródłami błędów występujących przy wzmacnianiu prądu stałego są:

- przesunięcie charakterystyki przejściowej wzmacniacza względem zera wskutek oddziaływania układów polaryzacji elementów aktywnych (wejściowe napięcie niezrównoważenia),
- zmiany przesunięcia charakterystyki przejściowej wzmacniacza względem zera wskutek dryfu (pełzania) punktów pracy (dryft napięcia niezrównoważenia),
- spadki napięć spowodowane prądami polaryzacji wejścia (wejść) wzmacniacza (wejściowy prąd polaryzacji, wejściowy prąd niezrównoważenia).

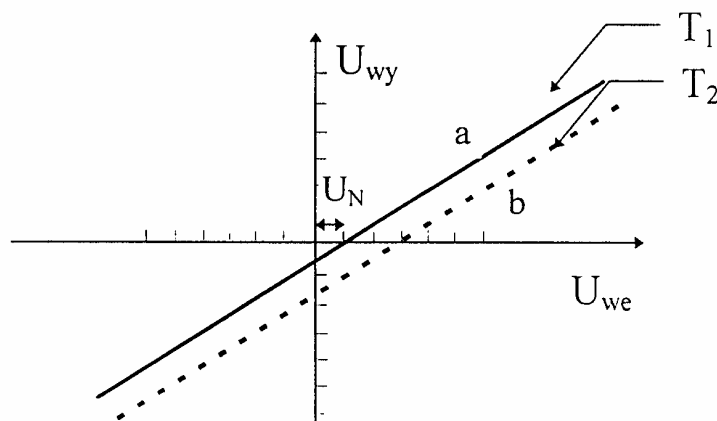
Istotą trudność techniczną sprawia jednocześnie uzyskanie dużego wzmocnienia i szerokiego pasma wzmacniacza.

Stosowane są dwa rozwiązania wzmacniaczy prądu stałego:

- wzmacniacze różnicowe ze sprzężeniem bezpośrednim (galwanicznym),
- wzmacniacze z przetwarzaniem.

W trakcie niniejszego ćwiczenia badany będzie wzmacniacz operacyjny należący do pierwszej grupy.

Wpływ wejściowego napięcia niezrównoważenia na charakterystykę przejściową wzmacniacza ilustruje rys. 1.



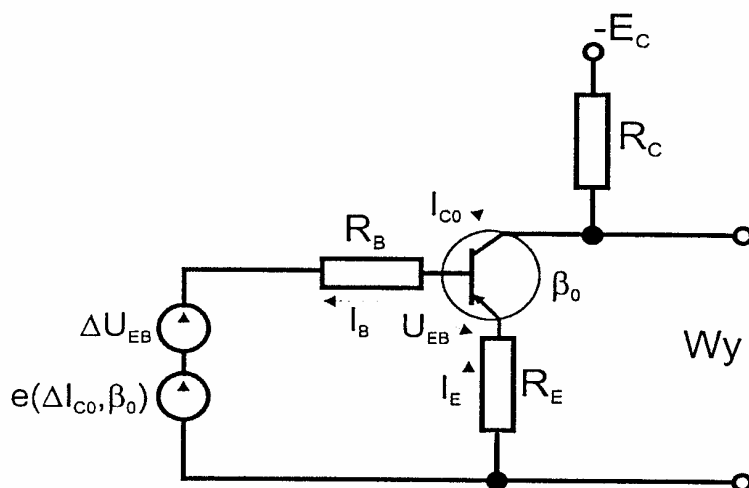
Rys. 1. Przesunięcie charakterystyki przejściowej wzmacniacza spowodowane (a) wejściowym napięciem niezrównoważenia. (b) dryftem wejściowego napięcia niezrównoważenia.

Zjawisko dryfu polega na przesuwaniu się punktów pracy elementów aktywnych wskutek zmian wartości parametrów elementów lub zmian warunków pracy (temperatury, zasilania itp.). Wskutek dryfu następuje zmiana składowej stałej wyjściowego napięcia wzmacniacza. Napięcie stałe spowodowane dryfem nie może być odróżnione od napięcia stałego sygnału użytecznego, w rezultacie wartość dryfu ogranicza czułość wzmocnienia wzmacniacza ze sprzężeniami bezpośrednimi.

W tranzystorowych wzmacniaczach prądu stałego głównym powodem występowania dryfu są temperaturowe zmiany punktu pracy tranzystorów (zwłaszcza stopnia wejściowego) oraz temperaturowe zmiany wartości niektórych parametrów tranzystorów. Największy wpływ na wartość napięcia dryfu mają zmiany:

- napięcia złącza baza - emiter U_{BE} ,
- prądu zerowego kolektora I_{C0} ,
- zmiany zwarciovego współczynnika wzmocnienia tranzystora h_{21e} ,
wywołane zmianami temperatury. Zmiany napięcia baza - emiter dla pewnej klasy tranzystorów przy przyroście temperatury o 1°C wynoszą ok. -2mV , natomiast zmiany współczynnika wzmocnienia wynoszą ok. $2-5\%/^{\circ}\text{C}$.

Wpływ dryfu na wartość napięcia wyjściowego wygodnie jest określać przy użyciu napięcia dryfu sprowadzonego do wejścia wzmacniacza. Wartość tego napięcia można wyznaczyć w oparciu o analizę układu danego wzmacniacza. Poniżej zostanie rozpatrzony układ wzmacniacza jednotranzystorowego, z tranzystorem pracującym ze sprzężeniem emiterowym. Działanie tego układu zilustrowano na rys. 2 (przy braku wejściowego napięcia sterującego).



Rys. 2. Ilustracja wyznaczenia dryfu w przykładowym wzmacniaczu tranzystorowym.

Napięcia dryfu na wejściu można traktować jako sumę dwóch sił elektromotorycznych dryfu. Jedna pochodzi wyłącznie od zmian termicznych napięcia baza - emiter i oznaczona jest tutaj jako ΔU_{BE} . Druga siła elektromotoryczna pochodzi od zmian prądu zerowego tranzystora ΔI_{C0} a także zmian termicznych współczynnika $\Delta \beta_0$. Tutaj oznaczona jest jako $e(\Delta I_{C0}, \Delta \beta_0)$. Jej wartość można wyznaczyć posługując się równaniami prądowymi tranzystora. Wykazano, że wartość tej drugiej składowej opisana jest następującym wzorem

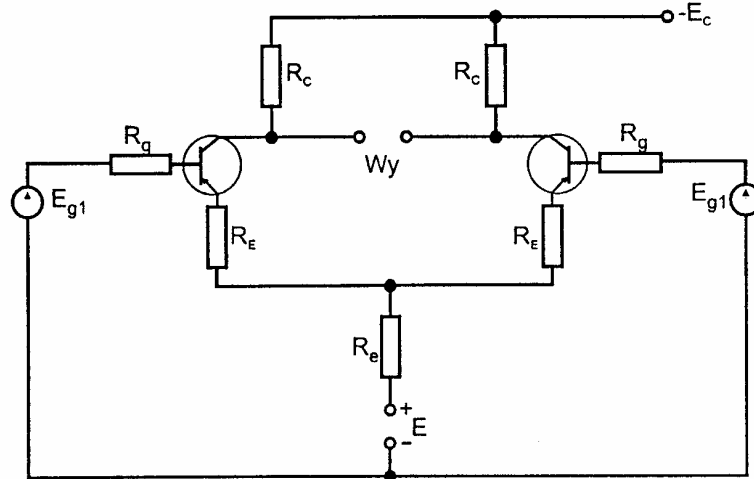
$$e(\Delta I_{C0}, \Delta \beta_0) = (R_B + R_E) \cdot \left(\frac{I_C \cdot \Delta \beta_0}{\beta_0^2} + \Delta I_{C0} \right)$$

W oparciu o powyższą zależność można analizować wpływ zmian parametrów tranzystora, elementów zewnętrznych oraz współrzędnych elektrycznych punktu pracy na wielkość napięcia dryfu.

Napięcie dryfu można traktować jako napięcie stałe bądź bardzo wolno zmieniające się w czasie. Sprowadzone do wejścia napięcie dryfu podlega wzmocnieniu przez wzmacniacz

wraz z sygnałem użytecznym i pojawia się na wyjściu jako sygnał szkodliwy. Problem ten nie istnieje we wzmacniaczach, w których nie zastosowano sprzężeń bezpośrednich (np. zastosowano sprzężenia RC).

Jedną z najbardziej skutecznych metod eliminacji dryfu jest stosowanie układu różnicowego. Ideę takiego wzmacniacza pokazano na rys. 3. W układzie różnicowym napięcia dryfu obu stopni wzmacniających mają ten sam znak i zbliżoną wartość. Sygnał wyjściowy pobierany jest w taki sposób, że stanowi różnicę sygnałów wyjściowych obu stopni wzmacniających, zatem dryf jest kompensowany.



Rys. 3. Schemat ideowy układu różnicowego.

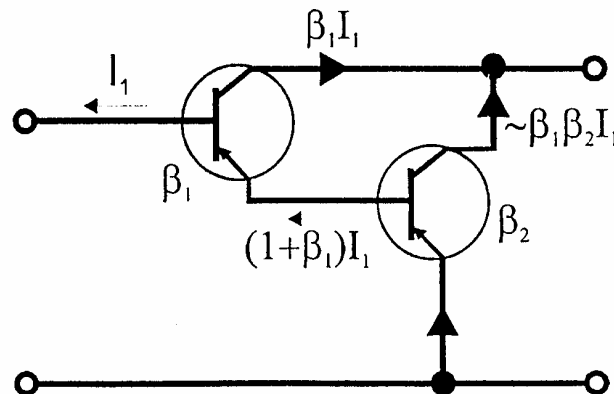
Kompensacja dryfu na wyjściu jest bardziej skuteczna im bardziej zbliżone są parametry tranzystorów T_1 i T_2 .

Napięcie wyjściowe układu różnicowego jest proporcjonalne do różnicy sił elektromotorycznych występujących w obwodach baz.

Różnica parametrów tranzystorów układu różnicowego powoduje przesunięcie charakterystyki przejściowej wzmacniacza względem zera. Miarą przesunięcia charakterystyki jest wartość wejściowego napięcia niezrównoważenia U_N (rys. 1). Na wyjściu wzmacniacza wzmocnione napięcie sygnału użytecznego sumuje się ze wzmocnionym napięciem niezrównoważenia.

Źródłem błędów mogą być prądy polaryzacji (prądy bazy) tranzystorów układu różnicowego. Spadki napięć spowodowane przepływem tych prądów przez rezystancje szeregowe w obwodach baz dodają się do napięć sterujących układ E_g (rys. 3) i podlegają wzmocnieniu wraz z sygnałem użytecznym.

Modyfikacją różnicowego wzmacniacza stałoprądowego jest wzmacniacz w którym tranzystory T_1 i T_2 są zastąpione tzw. tranzystorami złożonymi (układ Darlingtona, super beta). Tranzystor złożony jest układem dwutranzystorowym, połączonym jak na rys. 4.



Rys. 4. Schemat ideowy układu Darlingtona.

Wzmocnienie prądowe układu z rys. 4 wynosi w przybliżeniu $\beta = \beta_1 \beta_2$, rezystancja wejściowa wynosi $h_{11e} = h'_{11e} + \beta_1 h''_{11e}$. Zastosowanie układu Darlingtona w stopniu wejściowym wzmacniacza prądu stałego ułatwia uzyskanie dużego wzmocnienia i dużej rezystancji wejściowej.

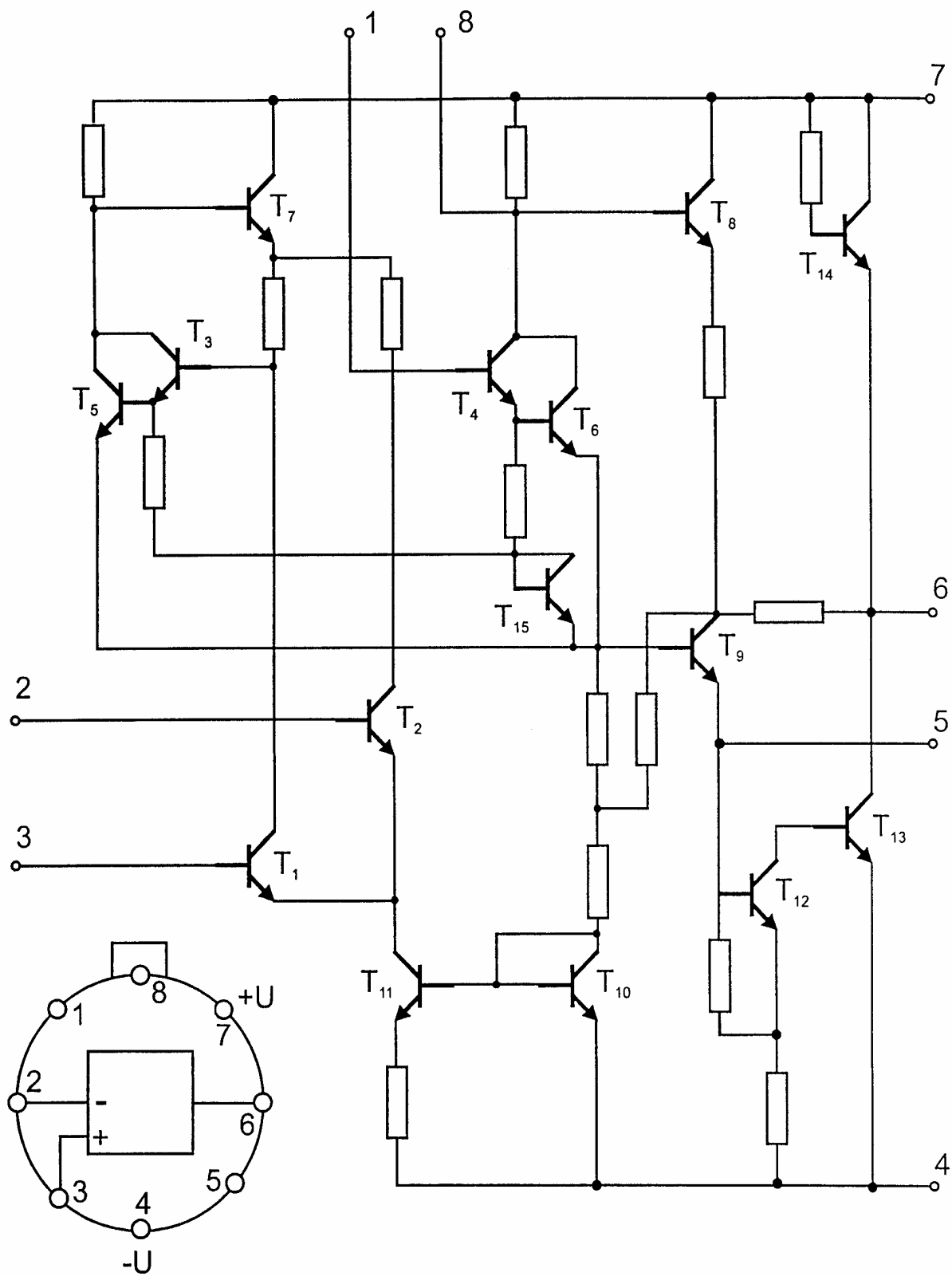
Wzmocnienie napięciowe układu różnicowego może być bardzo duże. Wzmocnienie napięciowe jest tym większe im większe jest wzmocnienie prądowe tranzystora i im większa jest wartość rezystancji kolektora obu tranzystorów. Zastosowanie układów Darlingtona jest jednym ze sposobów uzyskania dużego wzmocnienia napięciowego układu różnicowego. Innym sposobem jest zastąpienie rezystorów kolektorowych (rys. 3) obciążeniami aktywnymi, w postaci tranzystorowych źródeł prądowych, o bardzo dużej rezystancji dynamicznej. Ponieważ wzmacnianiu sygnałów zmiennych przez układ różnicowy towarzyszy efekt Millera, duże wzmocnienie napięciowe powoduje, że 3 dB pasmo układu jest małe. Iloczyn pasma i wzmocnienia dla danego układu pozostaje wartością stałą.

Na bazie układu różnicowego budowane są wzmacniacze operacyjne; zwykle stanowią kaskadę kilku układów różnicowych. Wykonanie całego układu w formie monolitycznego bloku zapewnia bardzo zbliżone wartości parametrów tranzystorów wchodzących w skład stopni wzmacniających z także niemal identyczne charakterystyki zmian tych parametrów w funkcji zmian czynników zewnętrznych m.in. temperatury. Typowe wzmacniacze scalone charakteryzują się bardzo dużym wzmocnieniem. Wartość napięcia dryfu nie przekracza kilku mikrowoltów.

W ćwiczeniu badany jest liniowy wzmacniacz scalony firmy Tesla typu MAA501. Wzmacniacz ten wykonywany jest w technologii epitaksjalno-planarnej na bazie podłoża krzemowego. Charakteryzuje się bardzo dużym wzmocnieniem napięciowym, dużą rezystancją wejściową, małą rezystancją wyjściową, bardzo małym dryfem termicznym wejścia. Wzmacniacz MAA501 przystosowany jest do pracy przy zmianach temperatury otoczenia w zakresie od -55°C do $+125^{\circ}\text{C}$.

Schemat ideowy wzmacniacza oraz topografię wyprowadzeń pokazuje rys. 5. Wzmacniacz operacyjny MAA501 posiada wejścia symetryczne (2 oraz 3), wyjście tego wzmacniacza (6) jest wyjściem niesymetrycznym. Wejście (2) jest wejściem odwracającym fazę napięcia wyjściowego o 180° , wejście (3) fazy nie odwraca. Sygnał wyjściowy zbierany jest między punktem (6) a masą układu.

Część wejściowa wzmacniacza składa się ze stopnia różnicowego (T_1 - T_2). Tranzystory wzmacniacza wstępnego pracują przy bardzo małym prądzie kolektora w celu zmniejszenia dryfu cieplnego a oprócz tego dodatkowo zasilane są ze źródła prądowego zrealizowanego na tranzystorze T_{11} skompensowanego termicznie przy pomocy tranzystora T_{10} . Stopień wstępny steruje stopniem różnicowym (T_3 - T_6) posiadającym duże wzmocnienie dzięki zastosowaniu w tym stopniu modyfikowanego układu Darlingtona. Dla zmniejszenia dryfu w tym stopniu zastosowano także źródło prądowe (T_{15}). Tranzystor T_7 symetryzuje cały układ wraz z tranzystorem T_8 który pracuje jako wtórnik emiterowy do odseparowania wyjścia stopnia różnicowego od wejścia stopnia końcowego. Stopień końcowy wzmacniacza zbudowany jest na tranzystorach stanowiących parę komplementarną (T_{13} T_{14}) pracujących w klasie B. Stopień ten sterowany jest przedwzmacniaczem wykonanym na tranzystorach T_9 oraz T_{12} . Między zaciski 1 i 8 oraz 5 i 6 najczęściej złączone są dwójniki R - C w celu kompensacji wzmacniacza.



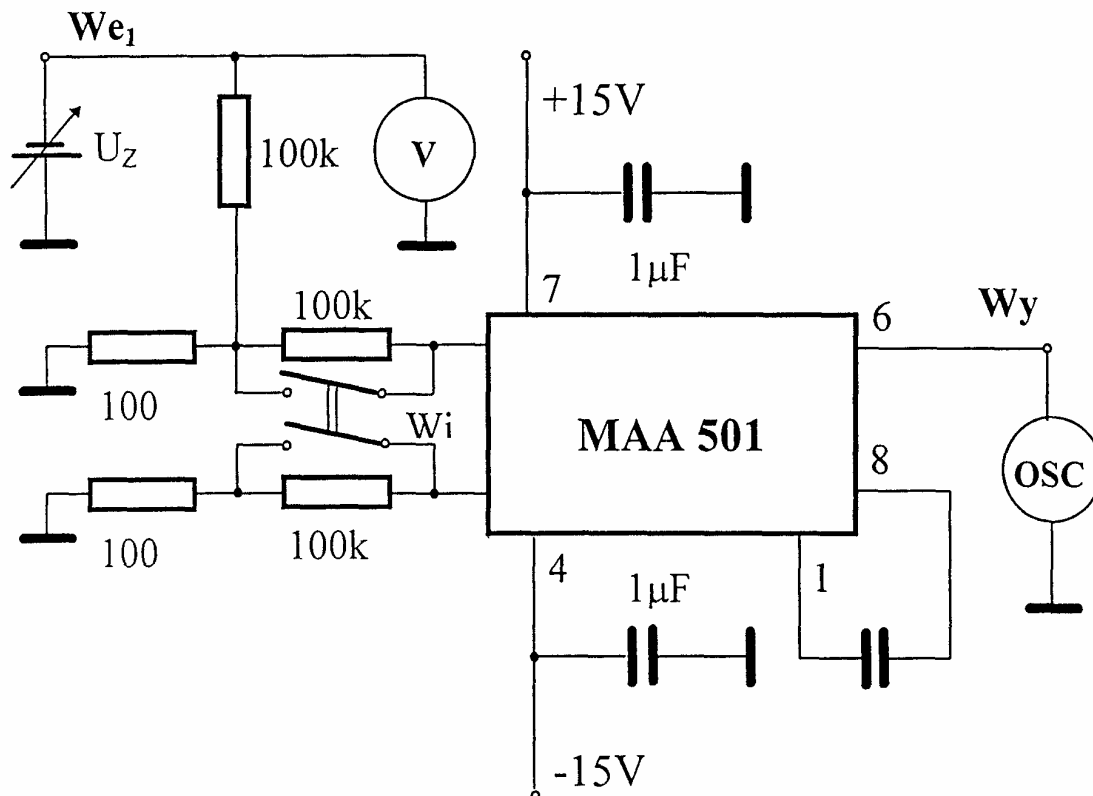
Rys. 5. Schemat ideowy i rozkład wyprowadzeń wzmacniacza MAA 501.

Przebieg ćwiczenia

Użyte przyrządy:

1. Zasilacz regulowany w zakresie $+10V \dots -10V$, np. ZS-100,
2. Oscyloskop dwukanałowy, np. DT-516A,
3. Generator np. G-432,
4. Woltomierz cyfrowy.

1. Pomiar wejściowego prądu niezrównoważenia.



Rys. 6. Pomiar wejściowego prądu niezrównoważenia.

- a) do wejścia **We1** dołączyć zasilacz regulowany (druga końcówka do masy) i woltomierz cyfrowy, napięcie zasilacza **0V**,
- b) wyjście wzmacniacza dołączyć do oscyloskopu, kanał **A** bez odcięcia składowej stałej,
- c) przycisk **Wi** - wyciśnięty, pętla sprzężenia otwarta,
- d) regulując wartość napięcia zasilacza regulowanego (ewentualnie zmienić biegunowość) uzyskać napięcie **0V** na wyjściu wzmacniacza, zanotować wartość napięcia ustawionego na **We1** - U_1 ,
- e) przycisk **Wi** - wciśnięty,
- f) regulując wartość napięcia zasilacza regulowanego (ewentualnie zmienić biegunowość) ponownie uzyskać napięcie **0V** na wyjściu wzmacniacza, zanotować wartość napięcia na **We1** - U_2 ,

g) obliczyć wartość prądu niezrównoważenia z następującej zależności:

$$I_{IO} = I_{B2} - I_{B1} = \frac{\frac{R_4}{R_4 + R_3}(U_2 - U_1)}{R_i}$$

2. Wyznaczenie charakterystyki dynamicznej wzmacniacza.

Układ pomiarowy jak na rys. 6.

- do wejścia **We1** dołączyć zasilacz regulowany (druga końcówka do masy) i woltomierz cyfrowy, napięcie zasilacza **0V**,
- wyjście wzmacniacza dołączyć do oscyloskopu, kanał **A** bez odcięcia składowej stałej,
- przycisk **Wi** - wciśnięty, pętla sprzężenia otwarta,
- potencjometrem kompensacji napięcia niezrównoważenia doprowadzić do uzyskania napięcia **0V** na wyjściu wzmacniacza,
- ustawiając kolejne wartości napięcia zasilacza **U_Z** odczytywać wartości napięcia wyjściowego wzmacniacza **U_O** aż do osiągnięcia stanu nasycenia przez wzmacniacz. Pomiary wykonać dla dodatniej i ujemnej polaryzacji napięcia zasilacza. Wyniki pomiarów wpisać do Tabeli 1. Napięcie sterujące wzmacniacz **U_S** obliczyć z zależności:

$$U_s = \frac{R_4}{R_4 + R_3} U_{we1} \approx \frac{U_{we1}}{1000}$$

gdzie: **U_{We1}** - napięcie na wejściu **We1**.

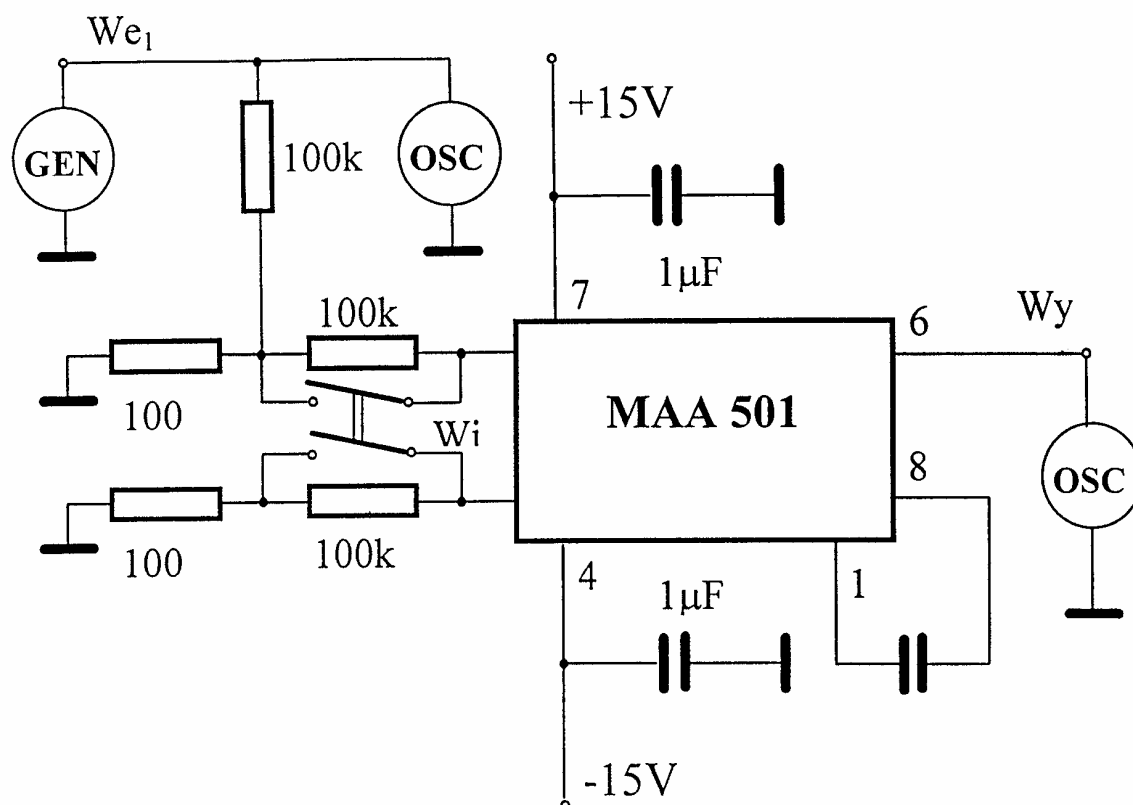
Tabela 1.

U_S	U_O
mV	V
...	...
...	...
...	...

f) korzystając z wyników umieszczonych w Tabeli 1 wykreślić charakterystykę dynamiczną wzmacniacza:

$$U_O = f(U_S)$$

3. Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza.



Rys. 7. Wyznaczenie charakterystyki częstotliwościowej.

- do wejścia **We1** dołączyć generator (druga końcówka do masy), napięcie wyjściowe generatora $U_g=100\text{mV}$ (pomiar oscyloskopem), częstotliwość **20 Hz**, składowa stała napięcia generatora **0V**,
- wyście generatora dołączyć do oscyloskopu, kanał **B** bez odcięcia składowej stałej,
- wyście wzmacniacza dołączyć do oscyloskopu, kanał **A** bez odcięcia składowej stałej, synchronizacja kanał **A i B**,
- przycisk **Wi** - wciśnięty, pętla sprzężenia otwarta,
- wcisnąć przycisk **P2**,
- zmieniając częstotliwość w zakresie **20Hz ... 1MHz** mierzyć oscyloskopem napięcie wyjściowe wzmacniacza U_o , wyniki umieścić w Tabeli 2,
- wcisnąć przycisk **P4**,
- zmieniając częstotliwość w zakresie **20Hz ... 1MHz** mierzyć oscyloskopem napięcie wyjściowe wzmacniacza U_o , wyniki umieścić w Tabeli 3.

Tabela 2. **P2** - wciśnięty

f	U_o
Hz	V
20	...
...	...
...	...

Tabela 3. P₄ - wciśnięty

f	U _o
Hz	V
20	...
...	...
...	...

h) korzystając z wyników umieszczonych w Tabeli 2 i Tabeli 3 na wspólnym wykresie umieścić odpowiednie charakterystyki częstotliwościowe:

$$A(f)=g_1(f)$$

P₂ - wciśnięty

$$A(f)=g_2(f)$$

P₄ - wciśnięty

gdzie:

A - współczynnik wzmocnienia napięciowego wzmacniacza wyrażony w decybelach, wyznaczony z zależności:

$$A = 20 \log \left(\frac{U_o}{\frac{R_4}{R_4 + R_3} U_g} \right) \approx 80 + 20 \log(U_o)$$

oś częstotliwości sporządzić w skali logarytmicznej.