

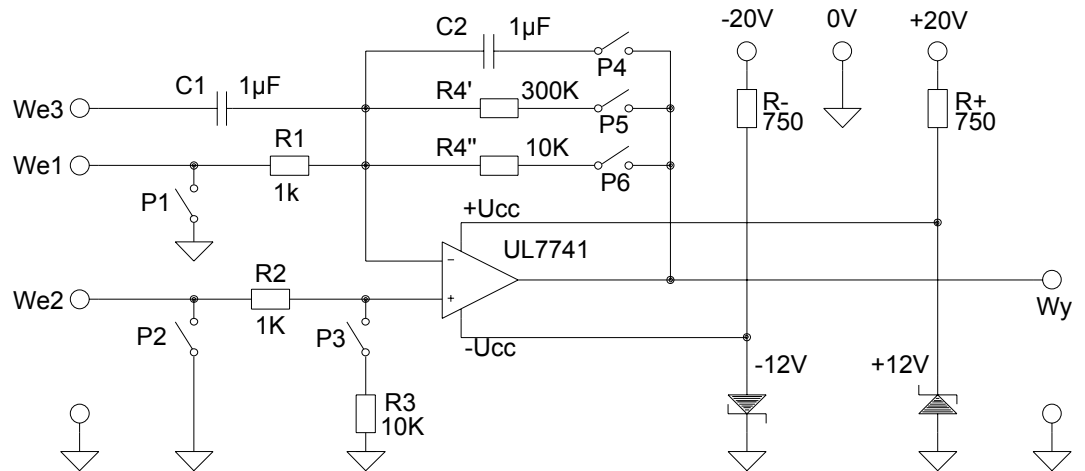
WZMACNIACZ OPERACYJNY

TEMATYKA ĆWICZENIA	Celem ćwiczenia jest poznanie niektórych układów pracy wzmacniacza operacyjnego oraz pomiar wybranych parametrów, istotnych dla tych układów. Badane są następujące układy: wzmacniacz odwracający, wzmacniacz nieodwracający, wtórnik napięciowy, komparator napięcia, układ całkujący i układ różniczkujący. W ćwiczeniu wykorzystano wzmacniacz operacyjny ULY7741 (LM741C, μ A741C), kartę katalogową tego układu przedstawiono na końcu instrukcji.
WYMAGANE WIADOMOŚCI	<ul style="list-style-type: none">◇ podstawowe właściwości wzmacniaczy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym◇ właściwości wzmacniacza operacyjnego: napięcie niezrównoważenia, dryf, wejściowe prądy polaryzacji, CMRR, wzmocnienie, charakterystyka częstotliwościowa,◇ podstawowe konfiguracje pracy wzmacniacza operacyjnego i ich parametry: wzmocnienie, rezystancja wejściowa i wyjściowa, CMRR itp.
LITERATURA PODSTAWOWA	Praca zbiorowa – Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków, WNT 2004. A. Filipkowski – Układy elektroniczne analogowe i cyfrowe, WNT 1993. Z. Nosal, J. Baranowski – Układy elektroniczne cz.1, WNT 1993, rozdz. 7.
LITERATURA UZUPEŁNIAJĄCA	U. Tietze, H. Schenk – Układy półprzewodnikowe P. Górecki – Wzmacniacze operacyjne, wyd. BTC 2004.
OBJAŚNIENIA	Wszystkie pomiary i badania wykonuje się używając jednej płytki opisanej <i>WZMACNIACZ OPERACYJNY</i> . Układ zasilany jest z dwóch napięć zasilających symetrycznie względem masy. W celu zabezpieczenia elementów przed zniszczeniem podczas badania należy ograniczyć maksymalny prąd zasilaczy do ok. 50 mA. Należy poprosić prowadzącego ćwiczenie o poinstruowanie jak się to robi, zależnie od konstrukcji zasilaczy znajdujących się na stanowisku badawczym.

OBJAŚNIENIA

Schemat układu pomiarowego zamieszczono na rys. 1.

Rys. 1 Schemat całego układu pomiarowego



Ogranicz prąd obydwoch zasilaczy do 50-150 mA

Wszystkie badane układy pracy wzmacniacza operacyjnego uzyskuje się za pomocą odpowiedniego ustawienia przełączników P1-P6. Na rys. 1 wszystkie przełączniki narysowano w pozycji zwolnionej. Schematy poszczególnych badanych układów, uwzględniające odpowiednie ustawienie przełączników, zamieszczono w kolejnych punktach instrukcji.

Układ jest gotów do pracy po dołączeniu dwóch napięć zasilających (dodatniego i ujemnego względem masy) o wartościach bezwzględnych od 15 do 20 V. Ograniczenie prądowe zasilaczy powinno być ustawione na wartość ok. 50 mA. Jako źródło napięcia wejściowego używany jest zasilacz stabilizowany napięcia stałego lub funkcyjny generator napięcia przemiennego (przebieg sinusoidalny, prostokątny lub trójkątny). Pomiar wykonuje się woltmierzem cyfrowym napięć stałych oraz oscyloskopem.

1. WEJŚCIOWE PRĄDY POLARYZACJI I NAPIĘCIE NIEZRÓWNOWAŻENIA WZMACNIACZA

1.1 Wyznaczenie wartości wejściowego prądu polaryzacji I_{IB+}

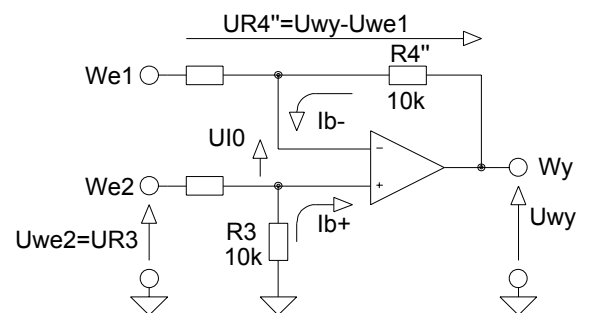
$I_{IB} = I_{\text{Input Bias}}$ (ang.)
czyli prąd wejściowy polaryzacji

Włączyć przyciski P3 i P6

Do zacisków WE2 i MASA dołączyć woltmierz cyfrowy napięcia stałego. Ustawić zakres pomiarowy 100 mV. Mierzony jest spadek napięcia na rezystorze R3 spowodowany przepływem wejściowego prądu polaryzacji I_{IB+} :

$$U_{R3} = I_{IB+} R3$$

Zaobserwować dryf wejściowego prądu polaryzacji, jako niestalość (zmiany wartości mierzonego napięcia). Obliczyć wartość tego prądu:



Rys. 2. Wejściowy prąd polaryzacji i napięcie niezrównoważenia

$$I_{IB+} = \frac{|U_{R3}|}{R3} = \dots\dots [nA]$$

**Pomiąć znak
(kierunek)
wejściowego
prądu
polaryzacji**

1.2 Wyznaczenie wartości wejściowego prądu polaryzacji I_{IB-} .

Dołączyć woltomierz do zacisków WE1 oraz WY. Mierzony jest teraz spadek napięcia na rezystorze $R4''$ spowodowany przepływem wejściowego prądu polaryzacji I_{IB-} . Obliczyć wartość tego prądu:

$$I_{IB-} = \frac{|U_{R4''}|}{R4''} = \dots\dots [nA]$$

Obliczyć wejściowy prąd niezrównoważenia jako różnicę prądów składowych:

$$I_{I0} = |I_{IB+} - I_{IB-}| = \dots\dots [nA]$$

1.3 Wyznaczenie wyjściowego i wejściowego napięcia niezrównoważenia

Dołączyć woltomierz do zacisków WY i MASA. Mierzone jest całkowite wyjściowe napięcie niezrównoważenia wzmacniacza, wynikające z sumowania się spadków napięć od przepływu wejściowych prądów polaryzacji oraz wejściowego napięcia niezrównoważenia U_{I0} . Zaobserwować dryf, jako niestałość (zmiany wartości) mierzonego napięcia. Zmierzone napięcie określone jest zależnością:

$$U_{wyN} = U_{I0} - I_{IB-} R4'' + I_{IB+} R3$$

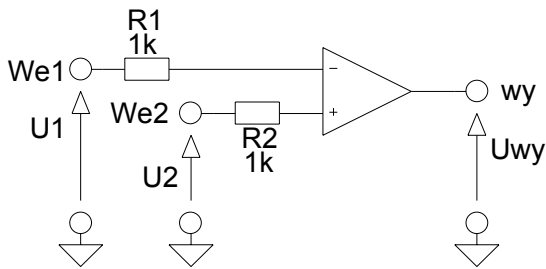
Obliczyć wyjściowe napięcie niezrównoważenia U_{I0} [mV]. Przy jakim wzmacnieniu układu wyznaczono tę wartość?

Wyniki pomiarów zebrać w tabelce i porównać z danymi katalogowymi wzmacniacza ULY7741 (LM741C, uA741C):

**Dlaczego tutaj
całkowite wyj-
ściowe napięcie
niezrównoważe-
nia jest równe
całkowitemu
wejściowemu
napięciu nie-
zrównoważenia?**

Parametr		wartość zmierzona	wartość katalogowa
wej. prąd polaryzacji I_{IB+} , I_{IB-}	[nA]		
wej. prąd niezrównoważenia I_{I0}	[nA]		
wej. napięcie niezrównoważenia U_{I0}	[mV]		

2. PRACA WZMACNIACZA OPERACYJNEGO BEZ SPRZĘŻENIA ZWROTNEGO — KOMPARATOR



Rys. 3. Komparator

Wyłączyć wszystkie przełączniki P1-P6. Realizowany jest wówczas układ bez sprzężenia zwrotnego, przedstawiony na rys. 3.

Do wejścia WE1 doprowadzić poprzez dzielnik 1:10 napięcie stałe o wartości $U_{we}=1,00\text{ V} \pm 0,010\text{ V} = \text{const}$.

Do wejścia WE2 doprowadzić poprzez drugi dzielnik 1:10 napięcie stałe o wartości regulowanej w zakresie $[0,950...1,050]\text{ V}$. Zmierzyć charakterystykę $U_{wy}(U_{we2})$ wg. tabelki:

U_{we2}	[V]	0,950	0,960	0,970	0,980.....1,030	1,040	1,050
U_{wy}	[V]						

Dobierz odpowiednio skalę rysunku!

Zajrzyj do karty katalogowej wzmacniacza!

Narysować otrzymaną charakterystykę. Na rysunku zaznaczyć wartość napięcia U_{we1} równą 1V. Przez punkt $(U_{we1},0)$ narysować prostą o nachyleniu odpowiadającym minimalnemu wzmocnieniu napięciowemu A_{VDmin} wzmacniacza operacyjnego, przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego, odczytanemu z danych katalogowych. Narysować dwie dodatkowe proste o takim samym nachyleniu, przesunięte w prawo i w lewo o 6 mV, odpowiadające przebiegowi charakterystyki przejściowej przy granicznych wartościach wejściowego napięcia niezrównoważenia $U_{I0} = \pm 6\text{ mV}$.

Określić niedokładność komparatora, czyli zakres napięć wejściowych dla których napięcie wyjściowe może nie odpowiadać stanowi nasycenia wzmacniacza:

$$\Delta = \dots\dots[\text{mV}]$$

Podać wartość napięcia wyjściowego komparatora przy napięciu U_{we2} wystarczająco mniejszym i większym od napięcia U_{we1} :

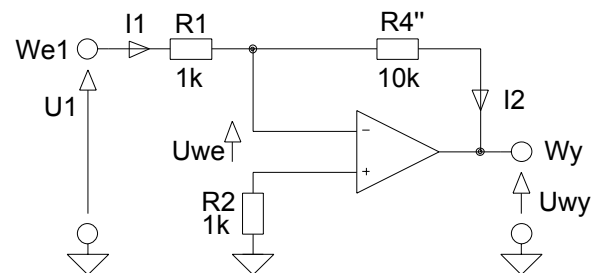
$$U_{wy}(U_{we2} \ll U_{we1}) = \dots\dots[\text{V}]; \quad U_{wy}(U_{we2} \gg U_{we1}) = \dots\dots[\text{V}]$$

3. WZMACNIACZ ODWRACAJĄCY

Co to znaczy „odwracający”?

Włączyć (wcisnąć) przełączniki P2 i P6, pozostałe przełączniki zostawić zwolnione. Uzyskuje się w ten sposób wzmacniacz odwracający o schemacie przedstawionym na rys. 4.

Przy założeniu idealnych właściwości wzmacniacza operacyjnego wzmocnienie napięciowe układu określone jest wzorem:



Rys. 4. Wzmacniacz odwracający

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_1} = -\frac{R4''}{R1}$$

Dla użytych w układzie rezystorów $R1 = 1k\Omega$ oraz $R4'' = 10 k\Omega$, wzmacnienie nominalne

$$k_{nom} = -10$$

Do wejścia WE1 dołączyć poprzez dzielnik napięcia źródło napięcia stałego U1. Ustawić zakres woltomierza 100 V. Zmierzyć charakterystykę $U_{wy}(U_1)$ dla napięć wejściowych o wartościach od +0,2 V do +1,2 V co 0,2 V oraz następnie od -0,2 V do -1,2 V co 0,2 V.

Zmianę znaku napięcia wejściowego uzyskuje się przez zamianę przewodów +/- dołączonych do zasilacza napięcia wejściowego.

W dwóch punktach (np. dla $U_1 = -0,800$ V oraz $U_1 = +0,800$ V, w przybliżeniu) pomiary wykonać z niedokładnością ± 5 mV (zakres woltomierza 10 V). Dla tych punktów obliczyć rzeczywistą wartość wzmacnienia:

$$k_{rzecz} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_1} = \dots\dots\dots$$

Uwaga: żaden z biegunów zasilacza wejściowego nie może być połączony z jego masą!

Wykreślić otrzymaną charakterystykę.

Pomiędzy wejście wzmacniacza a dzielnik napięcia włączyć szeregowo miliamperomierz i zmierzyć prąd wejściowy I1 przy dwóch wartościach napięcia wejściowego: $U_{11} = +0,8$ V oraz $U_{12} = -0,8$ V. Obliczyć rezystancję wejściową wzmacniacza

$$R_{WE} = \frac{\Delta U_1}{\Delta I_1}$$

i porównać wynik z wartością rezystancji R1.

Odłączyć źródło U1 i wcisnąć przycisk P1; wówczas $U_1 = 0$ V. Zmierzyć w tych warunkach wyjściowe napięcie niezrównoważenia $U_{wy}(U_1=0) = U_{wyN}$. Jak wpływa niezrównoważenie na przebieg charakterystyki $U_{wy}(U_1)$?

Zmierzone wzmacnienie rzeczywiste różni się od wzmacnienia nominalnego k_{nom} . Spowodowane to jest rzeczywistymi właściwościami elementów użytych do budowy wzmacniacza.

Obliczyć błąd względny zmierzonej wartości rzeczywistej wzmacnienia w stosunku do wartości nominalnej:

$$\delta_{krzecz} = \dots\dots\dots[\%]$$

Obliczyć maksymalny błąd względny wzmacnienia nominalnego k_{nom} spowodowany tolerancją wykonania rezystorów R1 ($1k\Omega \pm 0,5\%$) i R4'' ($10 k\Omega \pm 1\%$):

$$\delta_k(R) \cong \delta_{R1} + \delta_{R4''} = \dots\dots\dots [\%]$$

Obliczyć maksymalny błąd względny wzmacnienia nominalnego k_{nom} spowodowany skończoną wartością wzmacnienia wzmacniacza operacyjnego A, ze wzoru:

$$\delta_k(A) = \frac{1 + k_{nom}}{A_{VDmin}} \cdot 100\% = \dots\dots\dots[\%]$$

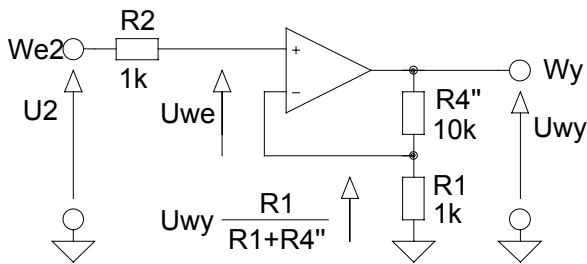
Zajrzyj do karty katalogowej wzmacniacza! ($A_{VDmin} = \dots$)

Wyniki obliczeń zestawić w tabelce i skomentować w sprawozdaniu:

k_{nom}	k_{rzecz}	δ_{krzecz}	$\delta_{k(R)} _{max}$	$\delta_{k(A)} _{max}$

Co to znaczy „nieodwracający”?

4. WZMACNIACZ NIEODWRACAJĄCY



Rys. 5. Wzmacniacz nieodwracający

Włączyć (wcisnąć) przełączniki P1 i P6, pozostałe przełączniki zostawić zwolnione. Uzyskuje się w ten sposób wzmacniacz nieodwracający, o schemacie przedstawionym na rys. 5.

Przy założeniu idealnych właściwości wzmacniacza operacyjnego, to znaczy jego wzmocnienia

$$A = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \infty$$

i rezystancji wejściowej $R_{we} = \infty$ przyjąć można $U_{we} = 0$ i zerowe prądy wejść „+” i „-” wzmacniacza (rys. 5); stąd wynika:

$$U_2 = U_{R1} = U_{wy} \frac{R1}{R1 + R4''}$$

Zatem wzmocnienie napięciowe wzmacniacza wyraża się wzorem:

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_2} = 1 + \frac{R4''}{R1}$$

Obliczyć nominalną wartość wzmocnienia k_{nom} układu z rys. 5.

Do wejścia WE2 dołączyć poprzez dzielnik napięcia źródło napięcia stałego U_2 . Ustawić zakres woltomierza 100 V. Zmierzyć charakterystykę $U_{wy}(U_2)$ dla napięć wejściowych o wartościach od +0,2 V do +1,2 V co 0,2 V oraz od -0,2 V do -1,2 V co 0,2 V. Zmianę znaku napięcia wejściowego uzyskuje się przez zamianę przewodów +/- dołączonych do zasilacza wejściowego. W dwóch punktach (np dla $U_2 = -0,800$ V oraz $U_2 = +0,800$ V) pomiary wykonać z niedokładnością ± 5 mV (zakres woltomierza 10 V). Dla tych punktów obliczyć rzeczywistą wartość wzmocnienia:

$$k_{rzecz} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_2} = \dots\dots\dots$$

Wykreślić otrzymaną charakterystykę $U_{wy}(U_2)$.

Pomiędzy dzielnik napięcia a zaciski wejściowe włączyć szeregowo mikroamperomierz i zmierzyć zmianę prądu wejściowego ΔI_2 wzmacniacza przy zmianie napięcia wejściowego od $U_2 = +0,8$ V do $U_2 = 0$ V (UWAGA! po ustawieniu $U_{21} = +0,8$ V odłączyć woltomierz od wejścia, tak aby mikroamperomierz nie mierzył prądu woltomierza; wartość $U_{22} = 0$ uzyskać przez odłączenie zacisku „+” zasilacza wejściowego od dzielnika napięcia): $\Delta I_2 \leq \dots\dots \mu A$. (Jeśli nie da się zmierzyć, oszacować wynik jako nierówność.)

Jeśli nie da się zmierzyć, oszacować wynik jako nierówność

Oszacować rezystancję wejściową wzmacniacza:

$$R_{we} \geq \frac{\Delta U_2}{\Delta I_2} =$$

Otrzymaną wartość porównać z wartością rezystancji wejściowej wzmacniacza odwracającego, obliczoną w p. 3.

Odłączyć źródło U_2 i wcisnąć przycisk P2; wówczas $U_2=0$ V. Zmierzyć w tych warunkach wyjściowe napięcie niezrównoważenia $U_{wy}(U_2 = 0) = U_{wyN} = \dots\dots$ [mV]. Jak wpływa niezrównoważenie na przebieg charakterystyki przejściowej?

Jest naprawdę duża

5. WTÓRNIK NAPIĘCIOWY

Ustawić P6 włączone, pozostałe przyciski wyłączone. Uzyskuje się w ten sposób układ wtórnika napięciowego o schemacie przedstawionym na rys. 6. Jest to szczególny przypadek wzmacniacza nieodwracającego, w którym $R_1 = \infty$ (gdyż został odłączony od układu).

Zgodnie z wyprowadzoną poprzednio zależnością nominalne wzmocnienie układu wynosi w tych warunkach

$$k_{nom} = 1$$

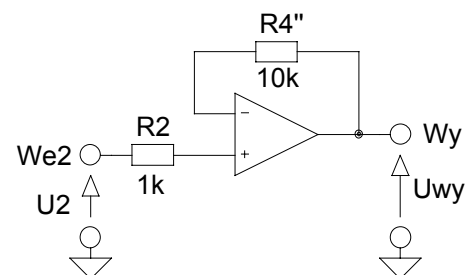
Od wejścia układu odłączyć dzielnik napięcia, a źródło napięcia wejściowego (zasilacz) dołączyć do wejścia WE2 poprzez mikroamperomierz.

Zmierzyć napięcie wyjściowe wtórnika dla dwóch wartości napięć wejściowych: $U_2 = +8,000 \pm 0,010$ V oraz $U_2 = -8,000 \pm 0,010$ V. Pomiarzy wykonać z niedokładnością ± 1 mV.

W tych samych punktach pomiarowych oszacować prąd wejściowy I_2 (UWAGA! podczas pomiaru prądu woltomierz nie może być dołączony do zacisków wejściowych). Obliczyć przyrostowe wzmocnienie napięciowe wtórnika:

$$k_{rzecz} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_2} =$$

Oszacować przyrostową rezystancję wejściową $R_{we} \geq \dots\dots$ [M Ω]. Skomentować otrzymane wyniki pomiarów.



Rys. 6. Wtórnik napięciowy

Czyli ustawić napięcie i odłączyć woltomierz

6. CHARAKTERYSTYKA CZĘSTOTLIWOŚCIOWA

Pomiar charakterystyki częstotliwościowej wykonany będzie na przykładzie wzmacniacza odwracającego (ustawić odpowiednie przełączniki). Do wejścia WE1 dołączyć generator przebiegu sinusoidalnego. Dołączyć oscyloskop, jeden kanał do

wejścia, drugi do wyjścia. Napięcia wejściowe i wyjściowe mierzyć oscyloskopem jako wartości międzyszczytowe (podwójna amplituda), oscyloskop kontroluje też prawidłowość działania układu.

Oscyloskop:

DC, wzmacnienie kalibrowane

Ustawić przełączniki tak, aby $k_{\text{nom}} = |10|$ (P2 i P6). Ustawić wartość międzyszczytową napięcia wejściowego $U_1 = 1 \text{ V} = \text{const}$, bez składowej stałej. Mierzyć napięcie wyjściowe zmieniając częstotliwość od 100 Hz do 1 MHz w sekwencji 1-2-5, wg tabelki. Utrzymywać stałą wartość napięcia wejściowego przy wszystkich częstotliwościach!

f	[Hz]	100	200	500	1k	2k	5k	10k	20k	50k	100k	200k	500k	1M
U_{wy}	[V]													
k_{10}	[dB]													
$U_{\text{wy}300}$	[V]											x	x	x
k_{300}	[dB]											x	x	x

Sekwencja 1-2-5 daje równe odcinki na logarytmicznej skali częstotliwości

Napięcie wejściowe zmniejszyć do wartości $U_1 = 30 \text{ mV} = \text{const}$. Tak zmienić ustawienie przełączników, aby $k_{\text{nom}} = |300|$. Ponownie mierzyć napięcie wyjściowe, zmieniając częstotliwość od 100 Hz do 100 kHz w sekwencji 1-2-5 wg tabelki.

Dla obydwu zmierzonych przypadków obliczyć dla każdej częstotliwości wzmacnienie w postaci logarytmicznej:

$$k = 20 \log \frac{U_{\text{wy}}}{U_1} = \dots \text{ [dB]}.$$

Skala logarytmiczna to NIE jest logarytm częstotliwości!

Narysować na jednym wykresie obie otrzymane charakterystyki k [dB] w funkcji częstotliwości; na osi częstotliwości przyjąć skalę logarytmiczną od 10 Hz do 1 MHz, a na osi wzmacnienia – liniową od -10 do 100 dB.

Wyznaczyć z rysunku częstotliwości graniczne (-3 dB) f_{g10} oraz f_{g300} badanych układów o wzmacnieniu 10 (czyli 20 dB) oraz 300 (czyli 49,5 dB).

Do narysowanych części opadających obu charakterystyk dopasować za pomocą równoległego przesunięcia linię prostą o nachyleniu -20 dB na dekadę i wrysować ją aż do przecięcia się z osiami wykresu. Na podstawie takiej aproksymacji spodziewanego, teoretycznego przebiegu części opadającej charakterystyki częstotliwościowej wyznaczyć częstotliwość graniczną f_{g1} wzmacniacza o wzmacnieniu 1 (0 dB, wtórnik napięciowy), oraz częstotliwość graniczną $f_{gA_{VD\text{min}}}$ samego wzmacniacza operacyjnego o wzmacnieniu $A_{VD\text{min}}$. Uzyskane wyniki zebrać w tabelce:

Przelicz $A_{VD\text{min}}$ na decybele

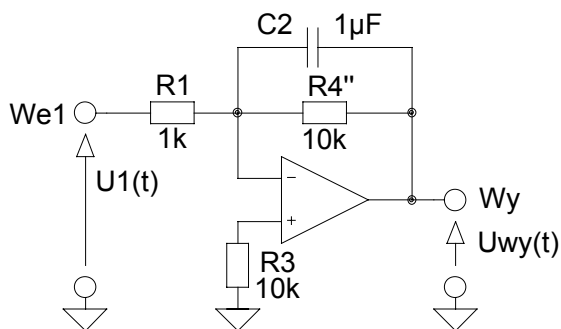
k_{nom}	1	10	300	$A_{VD\text{min}}$
f_g				
$k_{\text{nom}} \cdot f_g$				

A czy powinna być stała?

Czy wartość iloczynu wzmacnienia i częstotliwości granicznej (szerokości pasma) jest stała dla badanego egzemplarza wzmacniacza operacyjnego?

7. Układ całkujący

Ustawić włączone P3, P4 i P6, pozostałe przyciski wyłączone. Uzyskuje się układ o schemacie przedstawionym na rys. 8.



Rys. 8. Układ całkujący

Funkcja przenoszenia układu określona jest zależnością:

$$k = \frac{U_{wy}(j\omega)}{U_{we}(j\omega)} = -\frac{Z2}{Z1}$$

$$\text{gdzie: } Z2 = \frac{R4''}{j\omega C2R4''+1}, Z1=R1$$

$$\text{skąd: } k = -\frac{R4''}{R1} \cdot \frac{1}{j\omega C2R4''+1}$$

Dla częstotliwości, przy których $j\omega C2R4'' \gg 1$:

$$k = -\frac{1}{j\omega C2R1} = -\frac{1}{j\omega\tau_C}$$

co odpowiada operacji całkowania.

Do wejścia WE1 układu dołączyć generator przebiegu prostokątnego. Do wejścia i wyjścia dołączyć oba kanały oscyloskopu (oba wejścia DC). W czasie pomiarów dbać o to, aby pokręta płynnej regulacji wzmocnienia kanałów i podstawy czasu oscyloskopu znajdowały się w położeniach kalibrowanych (do końca w prawo).

Oglądając za pomocą oscyloskopu prostokątne napięcie wejściowe ustawić: częstotliwość 100 Hz (okres $T = 10$ ms); wartość międzyszczytową napięcia równą 200 mV; napięcie bez składowej stałej. Zero składowej stałej napięcia z generatora ustawić obserwując przebieg wyjściowy, w którym składowa stała też powinna być równa zero.

Przerysować z ekranu oscyloskopu jeden pod drugim przebiegi $u_1(t)$ oraz $u_{wy}(t)$, zachowując dokładnie zależności amplitudowo-czasowe. Na ich podstawie sprawdzić zależność:

$$u_{wy}(t) = -\frac{1}{\tau_c} \int_0^t u_1(t) dt + u_{wy}(t=0)$$

Podstawiając do wzoru odczytane z rysunku przebiegów wartości (przyjąć czas całkowania $t=T/2$) obliczyć wartość stałej czasowej τ_c i porównać ją z wartością iloczynu $R1C2$, gdzie $R1 = 1k\Omega$, a $C2 = 1\mu F$:

$$\tau_c = \dots\dots [s]; \quad R1C2 = \dots\dots [s]$$

Jakie może być zastosowanie takiego układu?

Jakie są ograniczenia prawidłowej pracy układu?

Wartość $u_{wy}(t=0)$ odczytać z przebiegu oscyloskopowego

8. Układ różniczkujący

Ustawić włączone przyciski P3 i P6, pozostałe w pozycji zwolnionej. Uzyskuje się układ różniczkujący przedstawiony na rys. 9. Wejściem układu jest zacisk WE3.

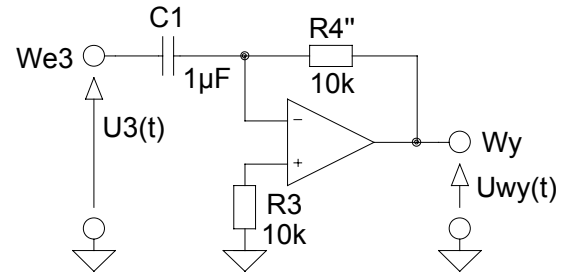
Funkcja przenoszenia układu określona jest zależnością:

$$k = \frac{U_{wy}(j\omega)}{U_{we}(j\omega)} = -\frac{Z2}{Z1}$$

$$\text{gdzie: } Z1 = \frac{1}{j\omega C1}, \quad Z2 = R4''$$

$$\text{skąd: } k = -j\omega C1R4'' = -j\omega\tau_r$$

co odpowiada operacji różniczkowania.



Rys. 9. Układ różniczkujący

Generator oraz kanał A oscyloskopu dołączyć do wejścia WE3 układu, ustawić przebieg trójkątny. Kanał B oscyloskopu pozostawić na wyjściu. Przy kalibrowanych wzmocnieniach obu kanałów i kalibrowanej podstawie czasu nastawić parametry generatora: trójkątne napięcie wejściowe o wartości międzyszczytowej 200 mV i o częstotliwości 100 Hz (okres $T = 10$ ms).

Narysować z ekranu oscyloskopu jeden pod drugim przebiegi $u_{we3}(t)$ oraz $u_{wy}(t)$, zachowując dokładnie zależności amplitudowo-czasowe. Na ich podstawie sprawdzić zależność:

$$u_{wy}(t) = -\tau_r \frac{du_{we3}(t)}{dt}$$

Podstawiając do wzoru odczytane z rysunku przebiegów wartości (przyjąć $dt = \Delta t = T/2$) obliczyć wartość stałej czasowej τ_r i porównać ją z wartością iloczynu $R4''C1$, gdzie $R4'' = 10$ kΩ, a $C1 = 1$ μF:

$$\tau_r = \dots [s]; \quad R4''C1 = \dots [s]$$

**Sprawozdanie
ZAWSZE
powinno
zawierać
wnioski
i komentarze do
otrzymanych
wyników!**