

# Badanie wzmacniacza operacyjnego I i II

## 1. Cel ćwiczenia

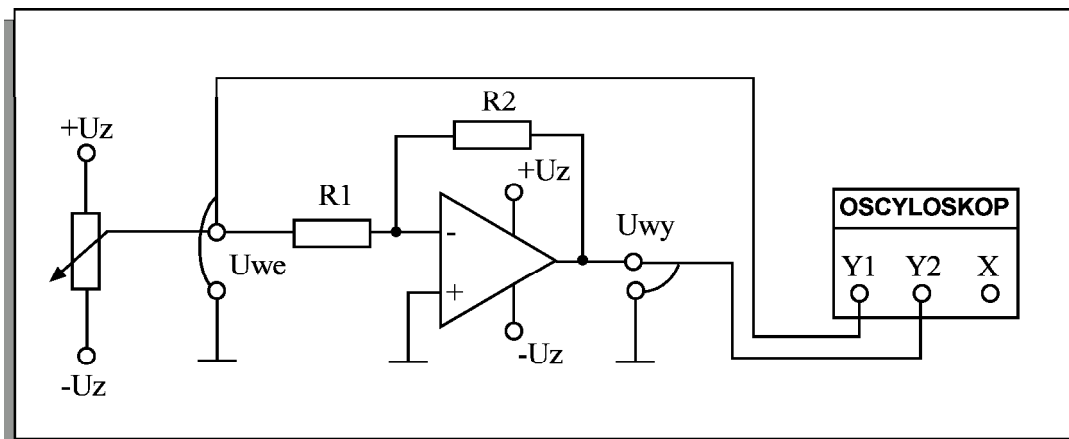
Celem ćwiczenia jest przeprowadzenie badania wzmacniacza operacyjnego pracującego w podstawowych konfiguracjach oraz poznanie jego właściwości.

## 2. Przebieg ćwiczenia

Należy zestawić układy zgodnie ze schematami ideowymi przestawionymi poniżej. Załączenie zasilania układu następuje po sprawdzeniu poprawności połączeń przez prowadzącego. Jeśli nie jest podane inaczej napięcie  $U_z$  zasilające wzmacniacz operacyjny ustawić na +/-13V.

### 2.1. Wzmacniacz odwracający

Wyznaczyć wartości rezystorów koniecznych do budowy układu o wzmacnieniu  $k_u = -10$  z uwzględnieniem dostępnych wartości rezystorów oraz zestawić układ przedstawiony na poniższym schemacie.



Rys. 1. Wzmacniacz odwracający

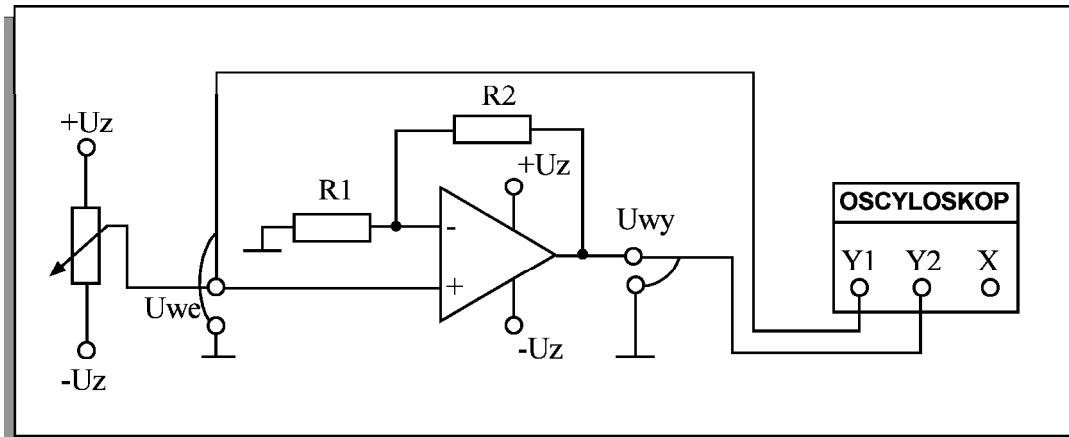
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Następnie wyznaczyć charakterystykę stałoprądową zadając skokowo napięcie wejściowe  $U_{we}$  od  $-U_z$  do  $+U_z$ . Dla każdej wartości napięcia wejściowego  $U_{we}$  dokonać pomiaru napięcia wyjściowego wzmacniacza  $U_{wy}$ . Wykreślić charakterystykę  $U_{wy} = f(U_{we})$ .

Nie zmieniając wartości rezystorów, po odłączeniu potencjometru, na wejście układu wprowadzić sygnał harmoniczny z generatora funkcyjnego. Wykreślić zależność amplitudy sygnału wyjściowego w funkcji częstotliwości  $U_{wy} = f(f)$ . Częstotliwość należy zmieniać skokowo od 1Hz do maksymalnej do uzyskania na generatorze funkcyjnym (10 odczytów dla każdego zakresu).

### 2.2. Wzmacniacz nieodwracający

Wyznaczyć wartości rezystorów koniecznych do budowy układu o wzmacnieniu  $k_u = 48$  z uwzględnieniem dostępnych wartości rezystorów oraz zestawić układ przedstawiony na poniższym schemacie.



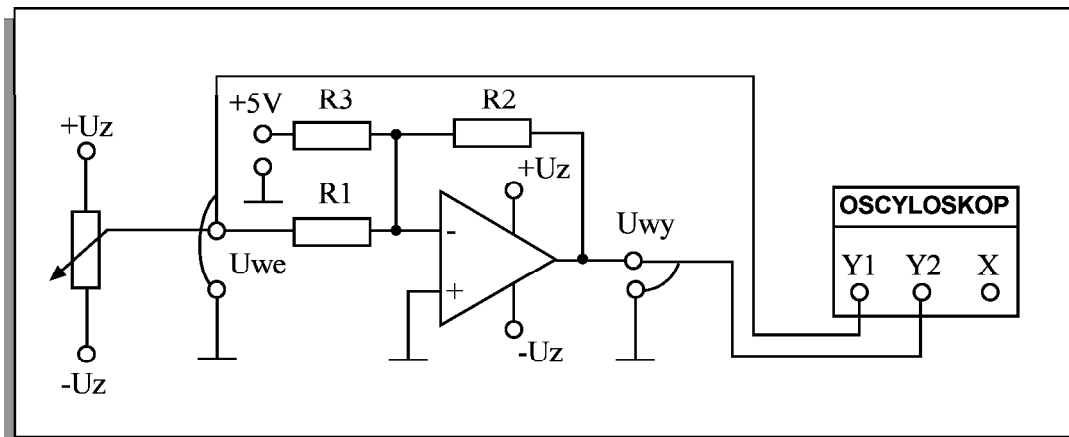
Rys. 2. Wzmacniacz nieodwracający

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Przeprowadzić pomiary jak dla punktu 2.1.

### 2.3. Wzmacniacz sumujący

Zestawić układ przedstawiony na poniższym schemacie  $R_1=150 \Omega$ ,  $R_2=1 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=1 \text{ k}\Omega$  oraz wyznaczyć wartości wzmocnień.



Rys. 3. Wzmacniacz sumujący

$$k_{u1} = \frac{U_{wy}}{U_{we1}}, k_{u2} = \frac{U_{wy}}{U_{we2}}$$

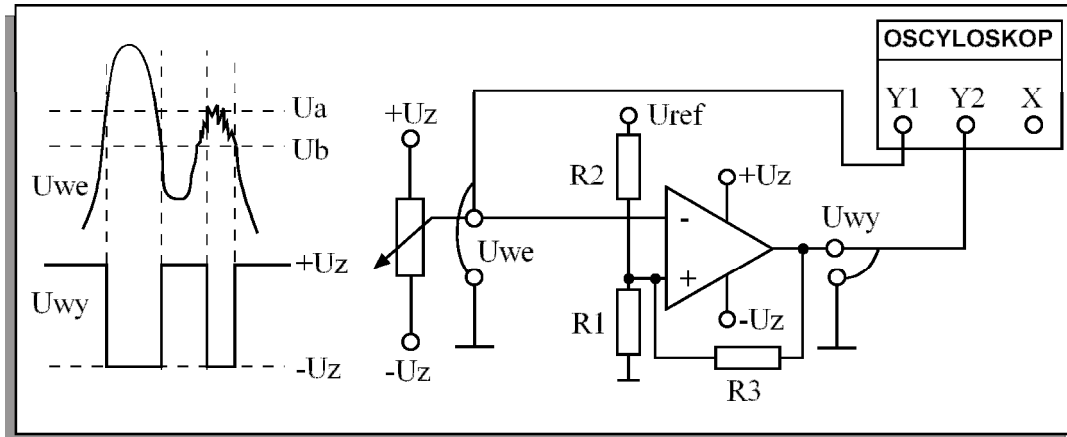
Pomiary wykonać analogicznie jak w punkcie 2.1.

### 2.3. Przerzutnik Shmitta (z histereza)

Wzmacniacz operacyjny o dużym wzmocnieniu może zostać wykorzystany do porównywania napięć. Wyjście wzmacniacza nasycy się w pobliżu ujemnego lub dodatniego napięcia zasilania, albo zbliża się do zera w przypadku, gdy napięcia wejściowe są sobie równe. Wprowadzenie dodatniego sprzężenia zwrotnego pozwala na wykonanie przerzutnika bistabilnego. Wzmacniacze operacyjne wykorzystywane są jako precyzyjne dyskryminatory

regeneracyjne ze względu na małe napięcie niezrównoważenia, dobrą kompensację temperaturową i dużą rezystancję wejściową wzmacniaczy scalonych.

W celu przeprowadzenia ćwiczenia należy zestawić układ przedstawiony na poniższym schemacie. Wyznaczyć wartości rezystorów R1, R2, R3 tak, aby uzyskać  $U_a=2.3V$ ,  $U_b=2.6V$  przy  $U_z=10V$  oraz  $U_{ref}=5V$ .



Rys. 4. Przerzutnik Shmitta: zasada działania oraz schemat

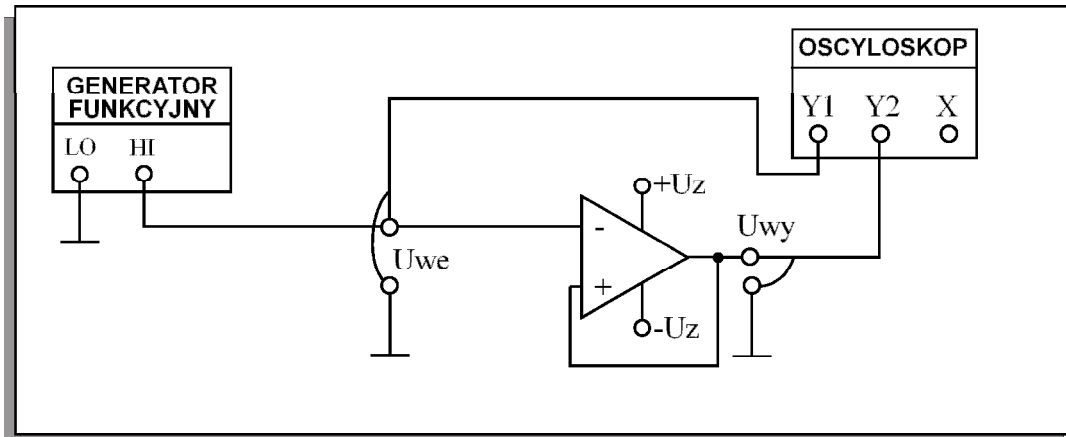
$$U_a = \frac{R_{123}}{R_2} U_{ref} + \frac{R_{123}}{R_3} U_z$$

$$U_b = \frac{R_{123}}{R_2} U_{ref} - \frac{R_{123}}{R_3} U_z, \quad R_{123} = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3$$

Przerzutniki wykonane z w oparciu o wzmacniacze operacyjne cechują się znaczną bezwładnością, która wynika z budowy wewnętrznej wzmacniacza. Budowa standartowych wzmacniaczy operacyjnych nie jest z reguły optymalizowana pod kątem szybkości przełączania, z tego względu ich zastosowanie do pracy impulsowej są ograniczone. W rezultacie występuje znaczny czas opóźnienia (kilkadziesiąt ns) i powolne narastanie napięcia na wyjściu, co jest związane z ograniczoną maksymalną szybkością zmian tego napięcia.

## 2.4. Wtórnik napięciowy

Wtórnik napięciowy charakteryzuje się bardzo dużą impedancją wejściową oraz niewielką impedancją wyjściową. Z tego względu jest stosowany jako stopień separujący, który nie obciąża źródła sygnału pomiarowego. W układzie jak na poniższym schemacie dokonać pomiaru maksymalnej szybkości narastania sygnału wyjściowego SR (*Slew Rate*).



Rys. 5. Wtórnik napięciowy

W tym celu na wejście układu z generatora funkcyjnego podać sygnał prostokątny o podać sygnał prostokątny o częstotliwości powyżej 20kHz. Amplituda sygnału wejściowego powinna być wybrana tak, aby w sygnale wyjściowym widoczne były efekty nasycenia w pobliżu dodatniego i ujemnego napięcia zasilania. Naszkicować sygnał wejściowy oraz wyjściowy. Na podstawie wykresu oszacować czas narastania sygnału wyjściowego. Szybkość narastania napięcia wyjściowego jest podstawowym parametrem określającym właściwości dynamiczne wzmacniacza. Wyrażana jest w  $V/\mu s$  i przeważnie zawiera się w granicach 1-100  $V/\mu s$  dla wzmacniaczy ogólnego przeznaczenia.

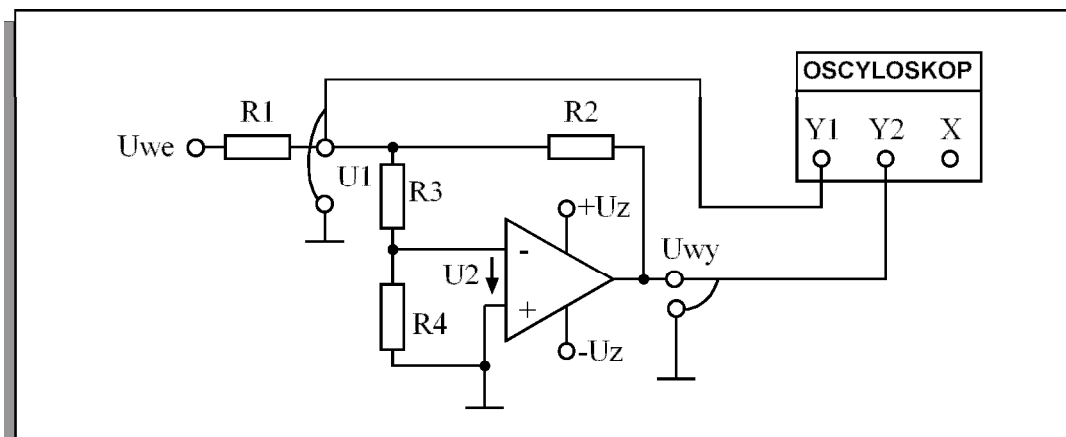
$$SR = \frac{dU_{we}}{dt} \approx \frac{\Delta U_{we}}{\Delta t}$$

## 2.5. Pomiar wzmocnienia w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego

Wzmocnienie w otwartej pętli dla rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego pracującego w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego jest na poziomie  $10^4$ - $10^6$  V/V (80-130dB). Wzmocnienie to może zostać zdefiniowane jako:

$$k_{ops} \approx \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_{we2} - U_{we1})}$$

gdzie:  $U_{we1}$  – napięcie wejściowe na wejściu odwracającym,  $U_{we2}$  – na wejściu nieodwracającym. Zakres liniowych zmian jest bardzo mały (ułamki mV) i problemem przy pomiarze  $k_{ops}$  są zakłócenia. Z tego względu wartość  $k_{ops}$  wyznacza się pośrednio poprzez pomiar w układzie z zamkniętym sprzężeniem zwrotnym jak na poniższym schemacie:



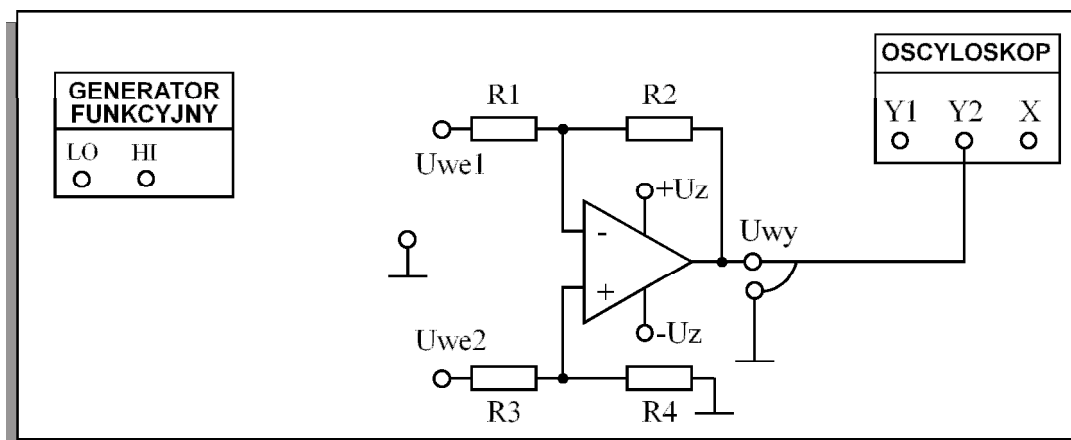
Rys. 6. Układ do pomiaru wzmocnienia w otwartej pętli sprzężenia zwrotnego

$$k_{ops} = -\frac{U_{wy}}{U_2} = -k_u \frac{U_{wy}}{U_1}, \text{ gdzie } k_u = 1 + \frac{R_3}{R_4}$$

Wyznaczyć wartość wzmocnienia przy następujących wartościach rezystorów:  $R_1=50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_2=50 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_4=1 \text{ k}\Omega$  dla kilku wartości napięcia wejściowego.

## 2.6. Wzmacniacz różnicowy

Wzmacniacz różnicowy stanowi bardzo ważny element obwodu wejściowego w układach pomiarowych. Pozwala on na pomiar sygnałów o bardzo małych wartościach w obecności zakłóceń transmisyjnych. Zbudować układ przedstawiony na poniższym schemacie:



Rys. 7. Wzmacniacz różnicowy

Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy} = k_1 U_{we1} - k_2 U_{we2}, \text{ gdzie } k_1 = \frac{R_4}{R_1} \frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4}, k_2 = \frac{R_2}{R_1}$$

jeśli spełniony jest warunek  $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3}$  wówczas napięcie wyjściowe układu opisane jest

$$\text{poprzez: } U_{wy} = \frac{R_2}{R_1} (U_{we1} - U_{we2})$$

Dobrać wartości rezystorów, aby uzyskać wzmocnienie 1000. W celu zbadania właściwości układu dokonać należy dwóch pobudeń:

- różnicowego – w tym celu należy zewrzeć wejście  $U_{we2}$  do masy a na  $U_{we1}$  podać sygnał harmoniczny z generatora funkcyjnego. Wyznaczyć wartość wzmocnienia.
- sumacyjnego – w tym celu zewrzeć wejścia  $U_{we1}$  oraz  $U_{we2}$  układu i podać sygnał z generatora funkcyjnego. Przy zachowaniu równości stosunków rezystancji sygnał wyjściowy będzie zawierał tylko składową współbieżną. Wyznaczyć wartość współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego CMRR (*Common Mode Rejection Ratio*) przy wartościach rezystorów:  $R_1=100 \text{ }\Omega$ ,  $R_2=100 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3=100 \text{ }\Omega$ ,  $R_4=100 \text{ k}\Omega$  zgodnie ze wzorem:

$$(CMRR)_{dB} = 20 \log \left( \frac{R_1 + R_2}{R_1} \frac{U_{we}}{U_{wy}} \right)$$

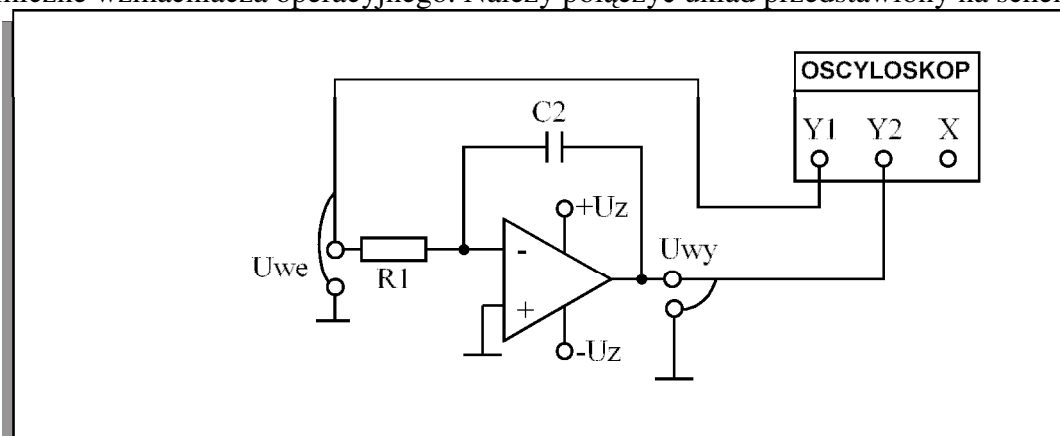
Pomiar przeprowadzić dla kilku wartości napięcia wejściowego. O dokładności pomiaru decyduje dokładność rezystorów oraz napięcie niezrównoważenia wzmacniacza.

## 2.7. Układ całkujący

Układ realizuje operację całkowania zgodnie z zależnością:

$$U_{wy} = k \int_0^t U_{we}(t) dt$$

W rzeczywistości napięcie wyjściowe może różnić się nieznacznie od wartości teoretycznej zarówno pod względem amplitudy jak i fazy. Przyczyną są właściwości dynamiczne wzmacniacza operacyjnego. Należy połączyć układ przedstawiony na schemacie:



Rys. 8. Układ całkujący

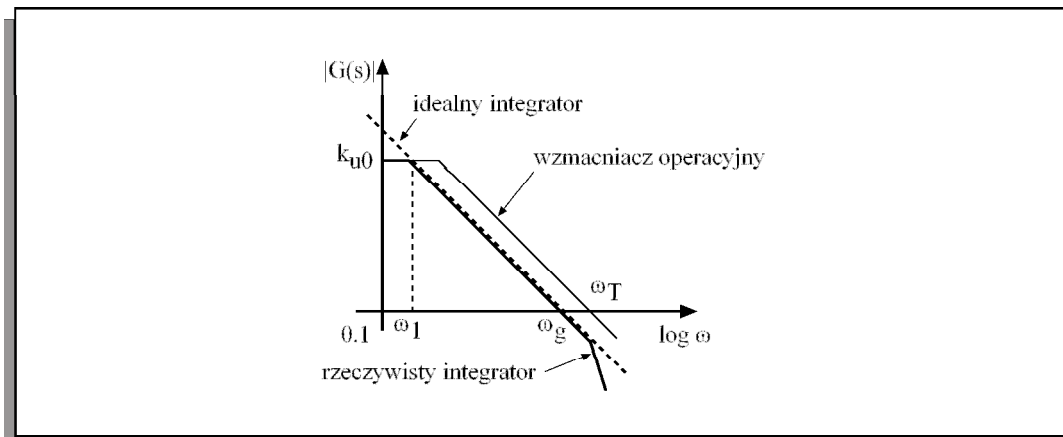
Transmitancja układu całkującego opisana jest równaniem:

$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = -\frac{1}{sR_1C_2} = -\frac{\omega_g}{s}, \quad \omega_g = \frac{1}{R_1C_2}$$

$\omega_g$  jest pulsacją graniczną integratora. W dziedzinie czasu wyjście układu opisuje zależność:

$$U_{wy} = -\frac{1}{R_1C_2} \int_0^t U_{we}(t) dt$$

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przedstawiona jest na poniższym rysunku linią przerywaną. Jest to prosta o nachyleniu  $-20\text{dB/dek}$  przecinająca oś odciętych (moduł transmitancji  $=1$  lub  $0\text{ dB}$ ) w punkcie  $\omega_g$ . Nieidealne własności wzmacniacza operacyjnego (skończone wzmocnienie, pasmo przenoszenia, niezerowe wartości prądów polaryzujących, napięcie niezrównoważenia, stratność kondensatora) powodują, że rzeczywista charakterystyka układu całkującego odbiega od idealnej i jest przedstawiona na rysunku linią ciągłą. Integrator idealny wprowadza przesunięcie fazowe  $-\pi/2$  co oznacza, że charakterystyka fazowo-częstotliwościowa jest linią prostą równoległą do osi odciętych przechodzącą przez punkt  $-\pi/2$ .



Rys. 9. Charakterystyka układu całkującego idealnego i rzeczywistego

Pasmo prawidłowej pracy rzeczywistego układu całkującego zawiera się w przedziale

$$\omega_1 < \omega < \omega_T, \quad \omega_1 = \frac{\omega_g}{k_{u0}}$$

gdzie  $k_{u0}$  – wzmacnienie stałoprądowe układu,  $\omega_T$  – pulsacja odcięcia wzmacniacza operacyjnego (moduł różnicowego wzmacnienia napięciowego otwartej pętli sprzężenia zwrotnego jest równy 1).

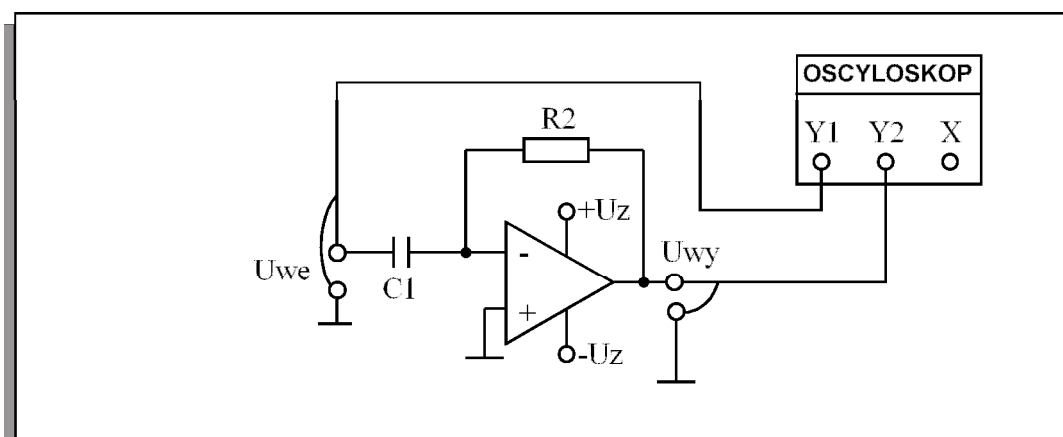
Należy wyznaczyć charakterystyki częstotliwościowe układu całkującego. W tym celu na wejście układu należy podać sygnał harmoniczny z generatora funkcyjnego. Zmieniając częstotliwość sygnału wejściowego (przy utrzymaniu stałej amplitudy) odczytać amplitudę sygnału wyjściowego oraz przesunięcie fazowe. Następnie wykreślić charakterystyki  $U_{wy}=f(f)$  oraz  $\phi=f(f)$ . Ponadto przedstawić wykresy sygnału wejściowego oraz wyjściowego dla 2 wybranych częstotliwości podając na wejście układu sygnał prostokątny oraz piłokształtny.

## 2.8. Układ różniczkujący

Układ realizuje operację różniczkowania zgodnie z zależnością:

$$U_{wy} = k \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

i jego schemat przedstawiony jest na poniżej.



Rys. 10. Układ różniczkujący

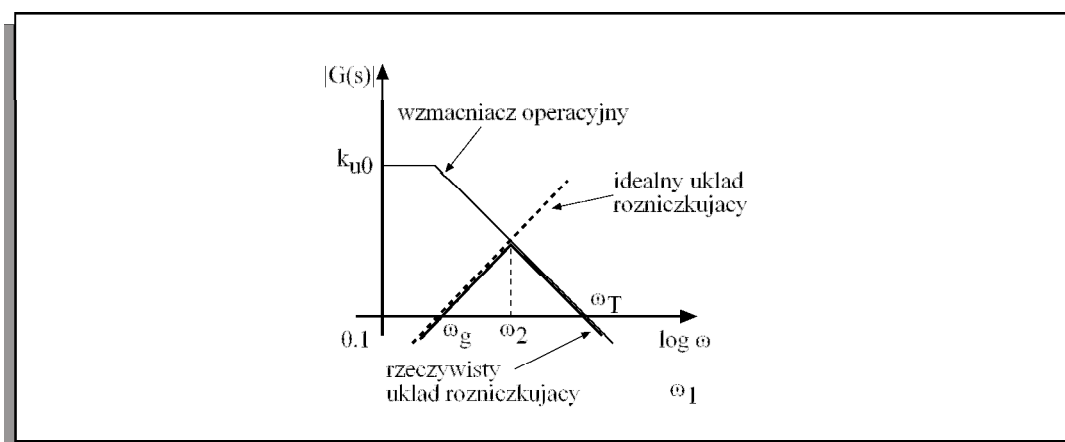
Transmitancja układu różniczkującego opisana jest równaniem:

$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = -sR_2C_1 = -\frac{s}{\omega_g}, \quad \omega_g = \frac{1}{R_2C_1}$$

$\omega_g$  jest pulsacją graniczną. W dziedzinie czasu wyjście układu opisuje zależność:

$$U_{wy} = -R_1C_2 \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przedstawiona jest na poniższym rysunku linią przerywaną. Jest to prosta o nachyleniu +20dB/dek przecinająca oś odciętych (moduł transmitancji =1 lub 0 dB) w punkcie  $\omega_g$ . Idealny układ różniczkujący wprowadza przesunięcie fazowe  $\pi/2$  co oznacza, że charakterystyka fazowo-częstotliwościowa jest linią prostą równoległą do osi odciętych przechodzącą przez punkt  $\pi/2$ .



Rys. 11. Charakterystyka układu różniczkującego idealnego i rzeczywistego

Nieidealne własności wzmacniacza operacyjnego mają znacznie większy wpływ na charakterystykę układu niż dla integratora. Z tego względu o poprawne działanie układu różniczkującego jest możliwe w zakresie pulsacji

$$\omega < \omega_2, \quad \omega_2 = \sqrt{\omega_g \omega_T} = \sqrt{\frac{k_{u0} \omega_g}{R_1 C_2}}$$

Należy wyznaczyć charakterystyki częstotliwościowe analogicznie jak w punkcie 2.7

### 3. Zagadnienia

- Cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego.
- Podstawowe układy, zasada działania, właściwości i parametry wzmacniacza odwracającego, nieodwracającego i wtórnika napięciowego, Shmitta.
- Podstawowe układy pracy, zasada działania, właściwości i parametry wzmacniacza sumującego i różnicowego.
- Charakterystyki częstotliwościowe modułu transmitancji układu całkującego i różniczkującego (idealnego i rzeczywistego) – zakresy poprawnej pracy,
- Wyznaczanie charakterystyki fazowej wzmacniacza operacyjnego za pomocą oscyloskopu.



#### **4. Literatura**

Golde W., Śliwa L.: Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowania, cz.1. podstawy teoretyczne, Warszawa, WNT, 1982.

Guziński A.: Liniowe elektroniczne układy analogowe, Warszawa, WNT, 1993.

Kulka Z., Nadachowski M.: Zastosowania wzmacniaczy operacyjnych, Warszawa, WNT, 1986.

Tietze U., Schenk Ch.: Układy półprzewodnikowe, Warszawa, WNT, 1997

Horowitz P., Hill W.: Sztuka elektroniki, Tom 1, WKŁ 1995