

Ćwiczenie 7

WZMACNIACZ OPERACYJNY

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z podstawowymi układami wzmacniaczy operacyjnych i ich zastosowaniem.

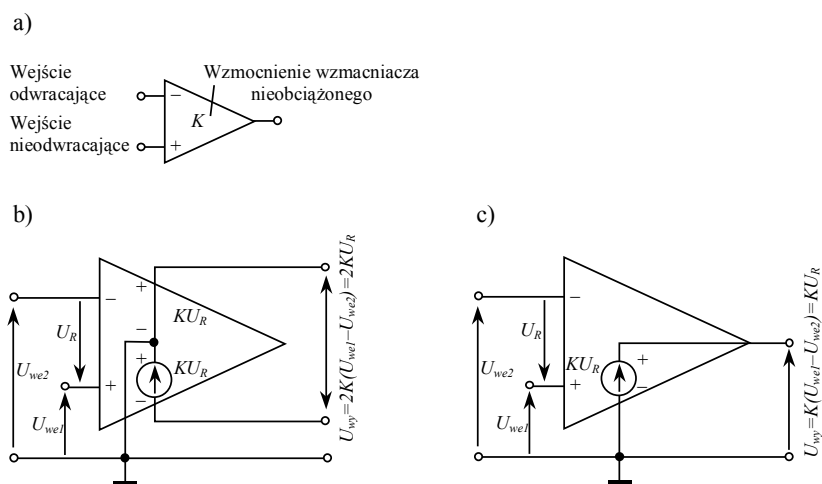
1. Wstęp

Wzmacniaczem operacyjnym nazywamy wzmacniacz prądu stałego o dużym wzmacnieniu pracujący z zewnętrznym układem silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego, które zapewnia lepszą stałość pracy, zwiększa zakres dynamiki, poprawia liniowość i poszerza pasmo przenoszenia wzmacniacza.

Wzmacniacze operacyjne w zależności od charakterystyki częstotliwościowej lub przejściowej mogą dokonywać operacji dodawania, odejmowania, całkowania, różniczkowania, logarytmowania i wielu innych i dlatego są stosowane w maszynach liczących, w przetwornikach analogowo-cyfrowych (A / D) i cyfrowo-analogowych (D / A) oraz w układach pomiarowych.

Idealny wzmacniacz operacyjny powinien charakteryzować się następującymi właściwościami:

- nieskończenie dużym wzmacnieniem przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($K \rightarrow \infty$),
- nieskończenie szerokim pasmem przenoszenia częstotliwości,
- nieskończenie dużą impedancją wejściową, zarówno między wejściami, jak i między każdym z wejść a ziemią,
- impedancją wyjściową równą zero,
- napięciem wyjściowym równym zero przy równości napięć wejściowych ($U_{wy} = 0$ przy $U_{we1} = U_{we2}$),
- nieskończenie dużym dopuszczalnym prądem wyjściowym,
- zerowym prądem wejściowym,
- wzmacnieniem idealnie różnicowym, tzn. nieskończenie dużym współczynnikiem tłumienia sygnału nieróżnicowego (definicję tego współczynnika podano w dalszej części opracowania),
- zachowaniem powyższych właściwości przy zmianach temperatury.



Rys. 7.1. Podstawowe symbole wzmacniaczy operacyjnych:
a) symbol ogólny, b) wzmacniacz idealny z wyjściem niesymetrycznym,
c) wzmacniacz idealny z wyjściem symetrycznym

Powyżej podane właściwości idealnego wzmacniacza operacyjnego stanowią granicę teoretyczną do której dąży się przy projektowaniu i produkcji tych układów. Odgrywają one także ważną rolę podczas przybliżonej ich analizy.

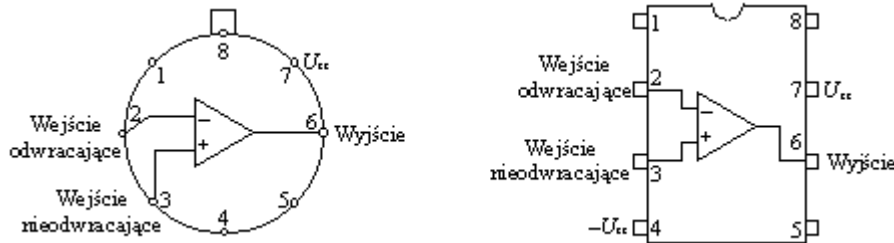
Większość produkowanych wzmacniaczy operacyjnych ma wejście symetryczne (różnicowe) oraz niesymetryczne wyjście (rys. 7.1).

Natomiast niesymetryczne wyjście dotyczy prawie wszystkich wzmacniaczy. *Wejście oznaczone jako „-” nazywamy wejściem odwracającym (inverting input). Wejście oznaczone jako „+” nazywamy wejściem nieodwracającym (non inverting input).* Jeżeli do wejścia odwracającego zostanie doprowadzone napięcie sinusoidalnie zmienne, to przesunięcie fazowe pomiędzy sygnałem wejściowym a wyjściowym będzie równe 180° . Jeżeli doprowadzimy takie samo napięcie jak poprzednio do wejścia nieodwracającego, wówczas analogicznie określone przesunięcie fazowe wyniesie zero.

Wzmacniacz o jednym wejściu należy traktować jako przypadek szczególny (z wejściem „+” uziemionym). Bardzo ważna właściwość wzmacniacza operacyjnego polega na tym, że jeśli do obu jego wejść zostaną doprowadzone dwa identyczne sygnały, to sygnał na wyjściu powinien być równy zero. Ten rodzaj sygnału wejściowego wzmacniacza nazywamy sygnałem nieróżnicowym (wspólnym). *Sygnał doprowadzony między wejścia wzmacniacza nazywany jest sygnałem różnicowym.*

Na rysunku 7.1 przyjęto następujące oznaczenia: U_{we1} , U_{we2} - napięcia wejściowe, U_r - napięcie wejściowe różnicowe (między końcówkami wejściowymi wzmacniacza), U_{wy} - napięcie wyjściowe, K - wzmocnienie wzmacniacza nieobciążonego (z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego).

Budowane w postaci scalonej wzmacniacze operacyjne są połączeniem wielu wzmacniaczy prądu stałego z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Mają wzmocnienie wynoszące kilkadziesiąt tysięcy a częstotliwość maksymalną rzędu 1 MHz. Na przykład stosowany powszechnie wzmacniacz $\mu A 741$ zbudowany jest z 23 tranzystorów oraz 10 rezystorów. Na rys. 7.2 przedstawiono wyprowadzenia końcówek popularnych wzmacniaczy operacyjnych.



Rys. 7.2. Wyprowadzenia końcówek wzmacniaczy operacyjnych w obudowie okrągłej metalowej oraz 8-nóżkowej dwurzędowej;(widok z góry)

2. Podstawowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych

2.1. Wzmacniacz odwracający

Na rysunku 7.3 przedstawiono najczęściej realizowaną konfigurację wzmacniacza odwracającego. Zakładamy, że wzmacniacz operacyjny ma właściwości idealne. Zatem jego rezystancja wejściowa $R_d \rightarrow \infty$ i do wejść wzmacniacza nie wpływają żadne prądy.

Czyli $I_1 = I_2$, więc

$$\frac{U_{we} + U_r}{R_1} = \frac{-U_r - U_{wy}}{R_2} \quad (7.1)$$

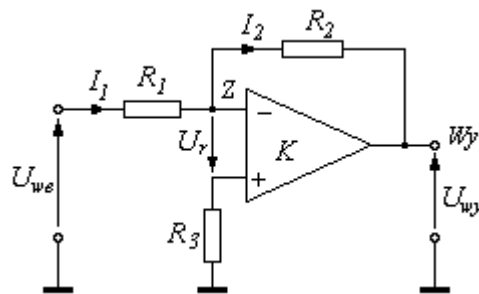
Jak widać z rysunku 7.3 potencjał na wejściu nieodwracającym jest równy potencjałowi masy (przez rezystor R_3 nie płynie żaden prąd).

Zatem:

$$U_r = \frac{U_{wy}}{K} \quad (7.2)$$

W idealnym przypadku, gdy $K \rightarrow \infty$, napięcie U_r jest bliskie zero, potencjał punktu Z jest bliski potencjałowi masy. Z tego powodu punkt ten nazywamy *masą pozorną*. Zakładając, że $U_r = 0$ otrzymujemy z powyższych wzorów wartość wzmocnienia napięciowego wzmacniacza odwracającego:

$$K_s = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (7.3)$$



Rys. 7.3. Wzmacniacz liniowy odwracający

Rezystancja wejściowa tego układu jest równa R_1 . Wartość rezystora R_3 należy dobrać równą rezystancji połączenia równoległego R_2 i R_1 . Uzyskuje się wówczas najmniejszy błąd spowodowany napięciem niezrównoważenia, powstającym na skutek przepływu wejściowych prądów polaryzujących.

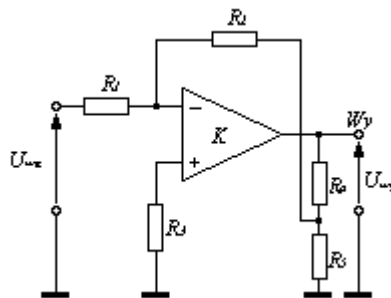
W ogólnym przypadku rezystory R_1 i R_2 należy zastąpić impedancjami Z_1 i Z_2 ma to niekiedy istotne znaczenie. Wówczas uogólniony wzór określający wartość wzmocnienia napięciowego wzmacniacza odwracającego przyjmuje postać:

$$K_s = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (7.4)$$

W zależności od doboru elementów Z_1 i Z_2 układ wzmacniacza operacyjnego może spełniać szereg funkcji.

Odmianę wzmacniacza operacyjnego stanowi układ potencjometryczny przedstawiony na rysunku 7.4. Łatwo można wykazać, że w tym przypadku:

$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_5} \right) U_{we} \quad (7.5)$$



Rys. 7.4. Wzmacniacz odwracający potencjometryczny

Na rys. 7.5 przedstawiono praktyczny układ wzmacniacza wykorzystującego układ $\mu A 741$. Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego jest stosunkowo mała:

$$r_{wef} = R_1 + \frac{R_2}{1 + K_{ur}} \cong R_1 \quad (7.6)$$

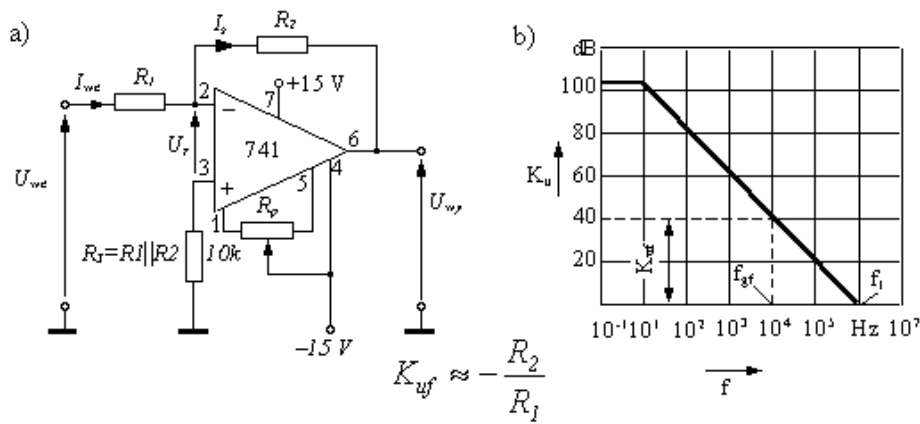
gdzie K_{ur} — wzmocnienie napięciowe różnicowe.

Zastosowanie ujemnego sprzężenia zwrotnego powoduje zmniejszenie rezystancji wyjściowej:

$$r_{wyf} = \frac{I}{K_{ur} r_{wy}} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = \frac{r_{wy}}{K_{ur}} \quad (7.7)$$

Rezystancja wyjściowa wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym nie przekracza 1Ω .

Wpływ na pracę wzmacniacza mają wejściowe napięcia niezrównoważenia oraz ich dryfty. Wejściowe napięcie niezrównoważenia można wyeliminować przez zastosowanie odpowiednich obwodów kompensacji, np. potencjometr R_p . Rezystor R_3 służy do zmniejszenia wpływu prądu niezrównoważenia, który wraz z napięciem niezrównoważenia zmienia się wraz ze zmianą temperatury i wywołują dryft napięcia na wyjściu wzmacniacza.



Rys. 7.5. Praktyczny układ wzmacniacza w konfiguracji odwracającej:
a) schemat, b) charakterystyka amplitudowa

Pasmo przenoszenia układu odwracającego zależy od właściwości częstotliwościowych samego wzmacniacza i od wzmocnienia w układzie zamkniętym (rys. 7.5b). W tabeli 7.1 podano zestawienie typowych wartości elementów wzmacniacza operacyjnego pracującego jak wzmacniacz odwracający dla różnych wartości wzmocnienia i szerokości pasma przenoszenia.

Tabela 7.1

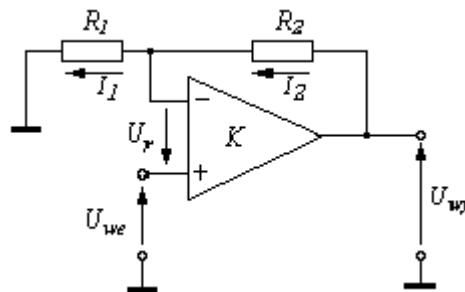
Typowe wartości elementów wzmacniacza odwracającego

K_{uf}		R_1	R_2	f_{gf}	R_{we}
dB	V/V	k Ω	k Ω	Hz	k Ω
0	-1	10	10	10^6	10
-20	-10	10	100	10^5	10
-40	-100	1	100	10^4	1
-60	-1000	1	1000	10^3	1

Wadą tego układu jest trudność jednoczesnego uzyskania dużej rezystancji wejściowej i dużego wzmocnienia. Wynika to z faktu, że rezystancja wejściowa jest równa R_1 , a wzmocnienie z zamkniętą pętlą jest odwrotnie proporcjonalne do R_1 .

2.2. Wzmacniacz nieodwracający

W układzie nieodwracającym przedstawionym na rysunku 7.6 napięcie doprowadza się do wejścia nieodwracającego, do drugiego wejścia jest doprowadzana przez dzielnik oporowy część napięcia wyjściowego.



Rys. 7.6. Wzmacniacz nieodwracający

Zgodnie z oznaczeniami na rysunku 7.6 otrzymujemy:

$$U_r K = U_{wy} \quad (7.8)$$

Zatem mamy:

$$\left(U_{we} - U_{wy} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) K = U_{wy} \quad (7.9)$$

Stąd:

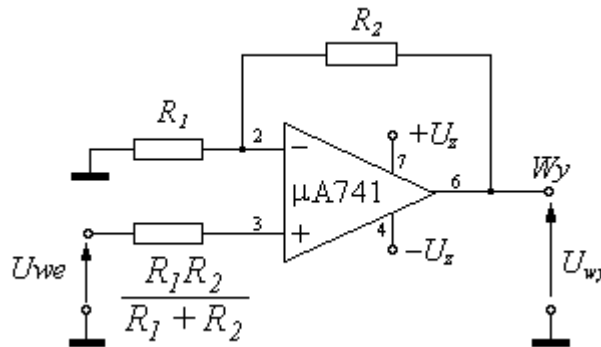
$$U_{we} = \frac{U_{wy}}{K} + U_{wy} \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (7.10)$$

Przyjmując, że $K \rightarrow \infty$ (wzmacniacz idealny) uzyskujemy wzór końcowy określający wzmacnienie napięciowe układu:

$$K_s = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (7.11)$$

Wzmacnienie układu jest zawsze równe lub większe od jedności i jego wartość zależy tylko od wartości rezystorów w układzie sprzężenia zwrotnego. W układzie wzmacniacza nieodwracającego nie ma punktu *masy pozornej*. Z warunku $K \rightarrow \infty$ wynika fakt, że $U_r \rightarrow 0$. Zatem w praktyce różnica napięć między wejściami wzmacniacza operacyjnego jest w tym układzie bardzo mała. Rezystancja wejściowa układu rzeczywistego jest bardzo duża. Jednak w układach ze sprzężeniem bezpośrednim większe znaczenie niż rezystancja wejściowa ma wejściowy prąd polaryzujący i spadek napięcia, jaki daje on na rezystancji źródła sygnału.

Na rys. 7.7 przedstawiono układ wzmacniacza operacyjnego nieodwracającego z układem $\mu A 741$.



Rys. 7.7. Układ wzmacniacza nieodwracającego ze wzmacniaczem operacyjnym $\mu A 741$

Rezystancja mierzona między jednym z wejść a masą wynosi w tym wzmacniaczu $400 M\Omega$, czyli przy wejściach zwartych $200 M\Omega$.

W tabeli 7.2 zestawiono typowe wartości elementów dobranych dla różnych wzmacnień i szerokości pasma.

Tabela 7.2

Typowe wartości elementów wzmacniacza nieodwracającego dobranych dla poszczególnych wzmacnień i szerokości pasma

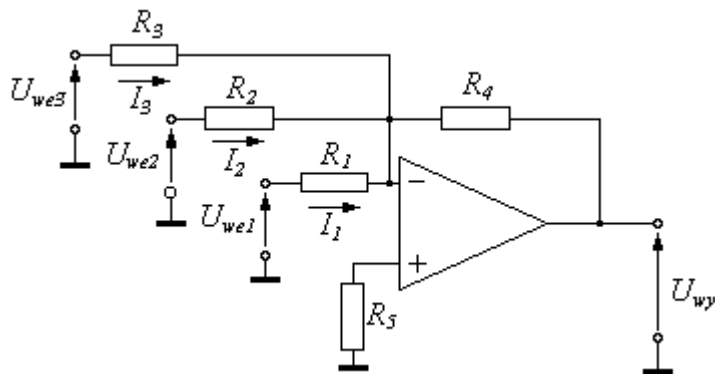
Wzmacnienie	V/V	1	10	100	1000
R_1	k Ω	∞	1000	0,1	0,1
R_2	k Ω	0	9	9,9	100
Szerokość pasma	kHz	1000	100	10	1
Rezystancja wejściowa	M Ω	400	400	280	80

2.3. Wzmacniacz sumujący

Za pomocą wzmacniacza operacyjnego można łatwo zrealizować operację matematyczną sumowania napięć, stosując układ pokazany na rysunku 7.8.

Zakładając, że rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego jest duża, otrzymamy następującą zależność:

$$I_1 + I_2 + I_3 = I_4 \quad (7.12)$$



Rys. 7.8. Schemat wzmacniacza sumującego

Stąd łatwo można obliczyć, że:

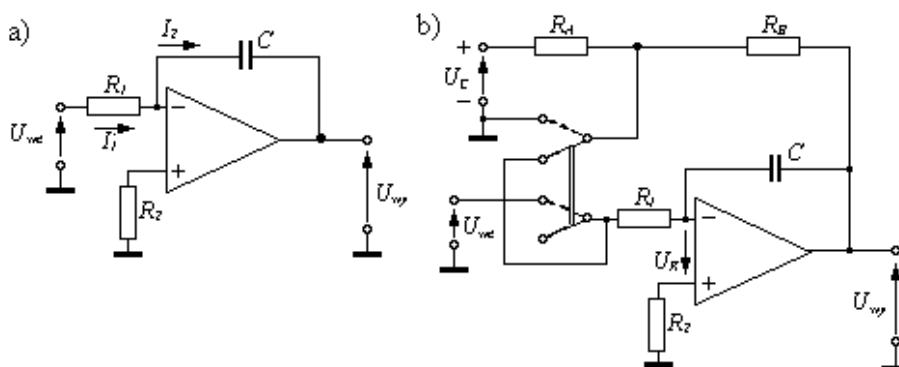
$$U_{wy} = -R_4 \left(\frac{U_{we1}}{R_1} + \frac{U_{we2}}{R_2} + \frac{U_{we3}}{R_3} + \dots \right) \quad (7.13)$$

Przy doborze jednakowych wartości rezystorów $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ uzyskuje się w tym układzie *algebraiczne sumowanie napięć*.

Rezystancje wejściowe układu widziane z każdego z wejść wynoszą odpowiednio R_1 , R_2 i R_3 . Wartość rezystora R_5 należy dobrać równą rezystancji połączonych równolegle R_1 , R_2 , R_3 i R_4 .

2.4. Integrator

Stosując kondensator w obwodzie sprzężenia zwrotnego wzmacniacza odwracającego, tak jak pokazano na rysunku 7.9a) otrzymamy układ całkujący.



Rys. 7.9. Integrator: a) układ podstawowy, b) układ z uwzględnieniem warunków początkowych

Jak wiadomo z wykładu teoretycznego w *zapisie operatorowym* mamy:

$$Z_1 = R \quad (7.14)$$

$$Z_2 = \frac{1}{sC} \quad (7.15)$$

gdzie $s = j\omega$ dla wymuszenia sinusoidalnego.

Zatem równanie określające napięcie wyjściowe wzmacniacza odwracającego przyjmie w tym przypadku postać:

$$U_{wy}(s) = -\frac{U_{we}(s)}{RCs} \quad (7.16)$$

Przyjmując warunek $I_1 = I_2$, można obliczyć:

$$U_{wy} = -\frac{I}{R_1 C} \int_0^t U_{we} dt \quad (7.17)$$

Wartość R_2 należy dobierać równą R_1 . W ten sposób zmniejszamy do minimum błąd spowodowany wejściowymi prądami polaryzującymi. Jeżeli chcemy w procesie całkowania uwzględnić warunki początkowe, należy zastosować układ podany na rysunku 7.9b). Kondensator C jest wstępnie naładowany do napięcia U_C dzięki zastosowaniu przełącznika. Zauważmy, że napięcie U_R jest bardzo małe i wejście wzmacniacza operacyjnego jest praktycznie na potencjale ziemi. Po przełączeniu, źródło napięcia U_C jest uziemione przez rezystor R_4 . W wyniku otrzymamy:

$$U_{wy} = -\frac{I}{R_1 C} \int_0^t U_{we} dt - \frac{R_B}{R_A} U_C \quad (7.18)$$

Jeżeli U_{we} jest napięciem stałym, to napięcie wyjściowe będzie się zmieniać zgodnie z zależnością:

$$U_{wy} = -\frac{U_{we} t}{R_1 C} - \frac{R_B}{R_A} U_C \quad (7.19)$$

Proces ten zachodzi aż do momentu nasycenia się wzmacniacza.

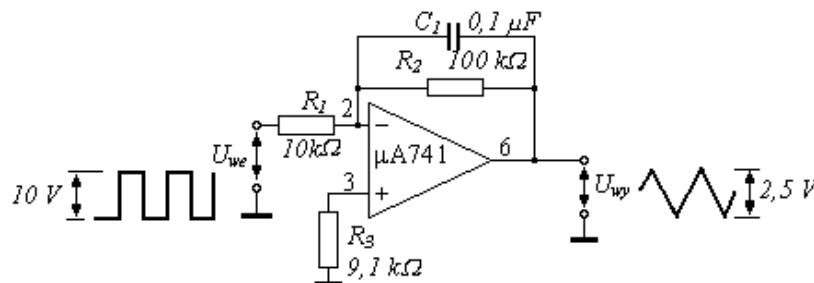
Uwaga: zwielokrotniając liczbę wejść w układzie z rysunku 7.9a) można podobnie jak we wzmacniaczu sumującym otrzymać układ zwany *integratorem sumującym*:

$$U_{wy} = -\frac{I}{CR} \int_0^t (U_{we1} + U_{we2} + U_{we3} + \dots) dt. \quad (7.20)$$

Pod warunkiem, że $R_1 = R_2 = R_3$.

Na rysunku 7.10 pokazano praktyczne rozwiązanie układu integratora analogowego z zastosowaniem wzmacniacza operacyjnego $\mu A 741$. Jak wcześniej podano napięcie na wyjściu układu określa zależność:

$$U_{wy} = -\frac{I}{R_1 C} \int_0^t U_{we} dt. \quad (7.21)$$



Rys. 7.10. Układ praktyczny integratora ze wzmacniaczem operacyjnym $\mu A 741$

Przykład: założmy, że na wejście integratora podano falę prostokątną o napięciu średnim równym zeru, okresie T i amplitudzie E . Amplitudę przebiegu piłowego na wyjściu określa wzór:

$$U_{wy \max} = -\frac{1}{R_1 C_1} \int_0^{T/2} E dt = \frac{E}{R_1 C_1} \cdot \frac{T}{2} \quad (7.22)$$

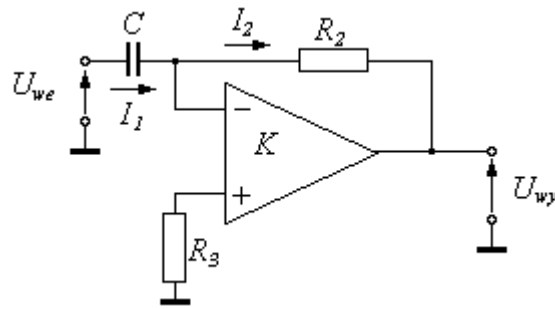
Przyjmując wartości podane na rysunku 7.10 obliczamy wartość $U_{wy \max} = 2,5 V$.

Dla zapewnienia dobrej liniowości przebiegu wyjściowego, częstotliwość fali prostokątnej na wejściu powinna być co najmniej 10 razy większa od f_{\min} . Wzór określający f_{\min} :

$$f_{\min} = \frac{1}{2\pi R_2 C_1} \quad (7.23)$$

(układ pracuje jako integrator przy wartościach większych od f_{min}). Rezystor R_2 służy do poprawy stabilności punktu pracy integratora ograniczając wzmacnienie przy małych częstotliwościach i zmniejszając dryft.

2.5. Wzmacniacz różniczkujący



Rys. 7.11. Wzmacniacz różniczkujący

Rysunek 7.11 przedstawia najprostszy sposób realizacji układu różniczkującego ze wzmacniaczem operacyjnym. Przyjmujemy założenia analogiczne jak w przypadku integratora:

$$Z_1 = \frac{1}{sC}, \quad Z_2 = R_2$$

Mamy:

$$U_{wy}(s) = U_{we}(s) R_2 C s \quad (7.24)$$

$$\text{oraz} \quad I_1 - I_2 = 0 \quad (7.25)$$

Wiadomo również, że:

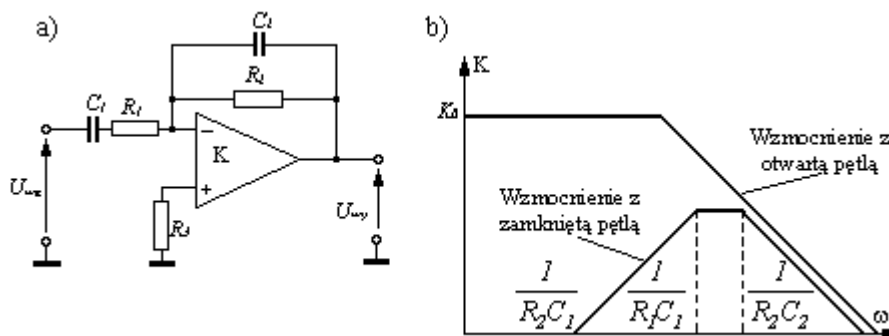
$$I_1 = C \frac{dU_{we}}{dt} \quad (7.26)$$

$$\text{oraz} \quad I_2 = -\frac{U_{wy}}{R_2} \quad (7.27)$$

$$\text{Zatem:} \quad U_{wy} = -R_2 C \frac{dU_{we}}{dt} \quad (7.28)$$

Rezystor R_3 należy dobierać równy R_2 .

Uwaga: układ różniczkujący podany na rysunku 7.11 należy traktować jako teoretyczny i niedogodny w praktyce! Jego wada to duża wrażliwość na szумы o wielkiej częstotliwości. Spowodowane jest ona wzrostem charakterystyki $K_s(f)$ o -6 dB/oktawę . Oprócz tego obwód sprzężenia wprowadza przesunięcie fazy, które może wywołać *niestabilność* nawet we wzmacniaczu skompensowanym przy wzmacnieniu 1 . Z tych względów należy oddzielnie opisać praktyczny układ różniczkujący.

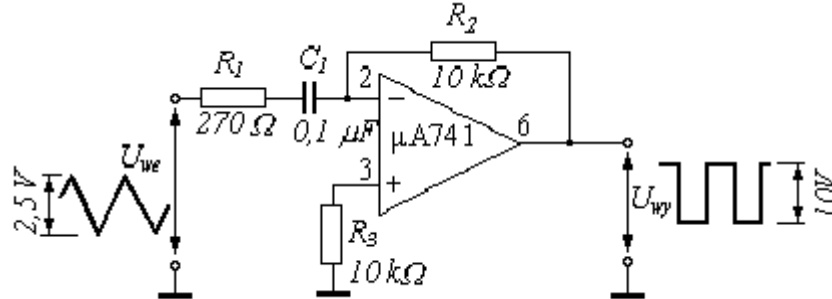


Rys. 7.12. Zmodyfikowany układ różniczkujący: a) schemat, b) wykres Bodego

Na rysunku 7.12 pokazano zmodyfikowany układ różniczkujący w którym wprowadzono dwa nowe elementy R_1 i C_2 w celu wyeliminowania jego wad. Rezystor R_1 powoduje ograniczenie wzmocnienia przy większych częstotliwościach, dzięki niemu układ jest mniej wrażliwy na szumy. Z kolei kondensator C_2 wprowadza dodatkowe przesunięcie fazy, poprawiające stabilność układu.

Rysunek 7.13 przedstawia praktyczny układ różniczkujący z zastosowaniem wzmacniacza $\mu A 741$. Napięcie wyjściowe układu określa wzór:

$$U_{wy} = R_2 C_1 \frac{dU_{we}}{dt} \quad (7.29)$$



Rys. 7.13. Praktyczny układ różniczkujący ze wzmacniaczem operacyjnym $\mu A 741$

Tabela 7.3

Uprozczone schematy i wzory podstawowych zastosowań wzmacniaczy operacyjnych

Wzmacniacz odwracający		$U_o = -\frac{R_F}{R_1} U_i$
Wzmacniacz nieodwracający		$U_o = \frac{R_1 + R_F}{R_1} U_i$ Dla $R_1 \rightarrow \infty$ otrzymuje się wtórnik napięciowy
Wzmacniacz sumujący		$U_o = R_F \left(\frac{U_{I1}}{R_1} + \frac{U_{I2}}{R_2} + \dots \right)$
Układ różniczkujący		$U_o = -R_F C \frac{dU_i}{dt}$
Układ całkujący		$U_o = \frac{1}{R_1 C} \int U_i dt$

Jak widać na rysunku 7.13 w odpowiedzi na ciąg impulsów podanych na wejście układu, na jego wyjściu pojawia się fala prostokątna. W przypadku podanym na opisywanym rysunku dla fali

trójkątnej o amplitudzie $2,5\text{ V}$ podanej na wejściu układu, na jego wyjściu powinna się ukazać fala prostokątna o tej samej częstotliwości i amplitudzie 10 V .

W tabeli 7.3 przedstawiono uproszczone schematy i wzory podstawowych zastosowań wzmacniaczy operacyjnych.

3. Wykonanie ćwiczenia

3.1. Wyznaczenie charakterystyki statycznej wzmacniacza

Pomiar charakterystyki statycznej $U_{wy} = f(U_{we\ o})$ przeprowadza się w układzie przedstawionym na rys. 7.14 dla dwóch wartości rezystora dekadowego podanych przez prowadzącego zajęcia. Pomiar wykonujemy dla dwóch układów wzmacniacza operacyjnego:

a) wzmacniacz liniowy odwracający.

Wejście nieodwracające (+) wzmacniacza połączyć z masą $U_{we\ n} = 0$.

Na wejście odwracające (-) wzmacniacza podawać napięcie $U_{we\ o}$ o wartości w przedziale od $+2\text{ V}$ do -2 V . Wykonać 10 pomiarów. Otrzymane wyniki zamieścić w tabeli 7.4.

Tabela 7.4.

$$U_{we\ n} = 0; \quad R_2 + R_{dek} = \dots\dots \text{ k}\Omega$$

$U_{we\ o}$	V										
U_{wy}	V										

b) wzmacniacz liniowy nieodwracający

Wejście odwracające (-) wzmacniacza połączyć z masą $U_{we\ o} = 0$.

Na wejście nieodwracające (+) wzmacniacza podawać napięcie $U_{we\ n}$ o wartości w przedziale od $+2\text{ V}$ do -2 V . Wykonać 10 pomiarów. Otrzymane wyniki zamieścić w tabeli 7.5.

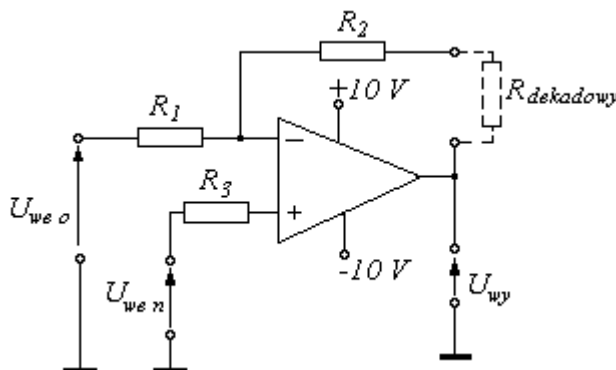
Tabela 7.5.

$$U_{we\ o} = 0; \quad R_2 + R_{dek} = \dots\dots \text{ k}\Omega$$

$U_{we\ n}$	V										
U_{wy}	V										

Na podstawie otrzymanych wyników pomiarów wykreślić charakterystyki statyczne $U_{wy} = f(U_{we\ o})$ dla poszczególnych przypadków. Na podstawie otrzymanych wyników obliczyć wzmocnienie wzmacniacza i porównać otrzymane wyniki z wynikami obliczonymi według wzorów (7.3) i (7.11).

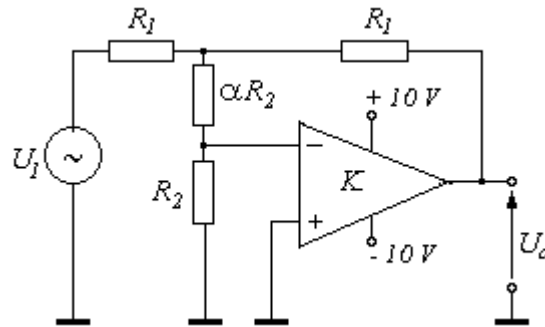
Z badać zachowanie się wzmacniacza w przypadku otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (odłączony rezystor dekadowy).



Rys. 7.14. Układ do wyznaczania charakterystyki statycznej wzmacniacza operacyjnego

3.2. Pomiar wzmocnienia napięciowego wzmacniacza w układzie z otwartą pętlą

Pomiar przeprowadza się w układzie przedstawionym na rys. 7.15.



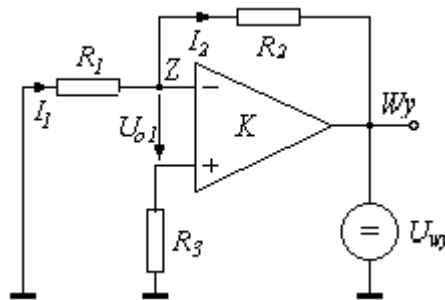
Rys. 7.15. Układ do pomiaru wzmocnienia napięciowego wzmacniacza operacyjnego

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą wyznacza się ze wzoru:

$$A_u = \frac{(\alpha + 1)U_0}{U_1} \quad (7.30)$$

3.3. Pomiar wejściowego napięcia niezrównoważenia.

Pomiar przeprowadza się w układzie o dużym współczynniku wzmocnienia napięciowego, przedstawionym na rys. 7.16.



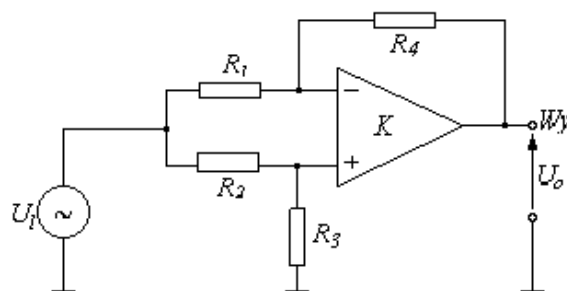
Rys. 7.16. Układ do pomiaru wejściowego napięcia niezrównoważenia

Napięcie niezrównoważenia U_{os} oblicza się po zmierzeniu napięcia wyjściowego U_{wy} , korzystając z zależności:

$$U_{os} = U_{wy} \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_{wy}}{101} \quad (7.31)$$

3.4. Pomiar współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego

Układ do pomiaru współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego przedstawiony jest na rys. 7.17.



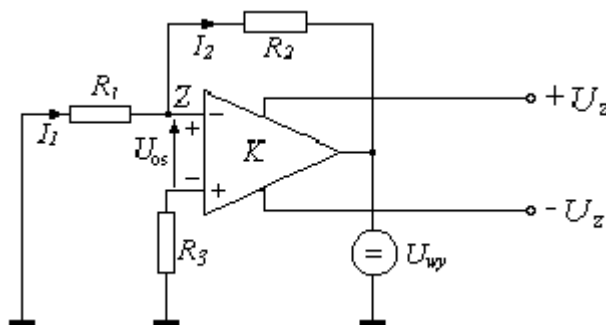
Rys. 7.17. Układ do pomiaru współczynnika tłumienia sygnału współbieżnego

Współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego wyraża się wzorem:

$$CMRR = 20 \cdot \log \frac{R_1 + R_2}{R_1} \cdot \frac{U_1}{U_0} \quad (7.32)$$

3.5. Pomiar współczynnika tłumienia wpływu zasilania.

Układ do pomiaru współczynnika tłumienia wpływu zasilania przedstawiony jest na rys. 7.18.



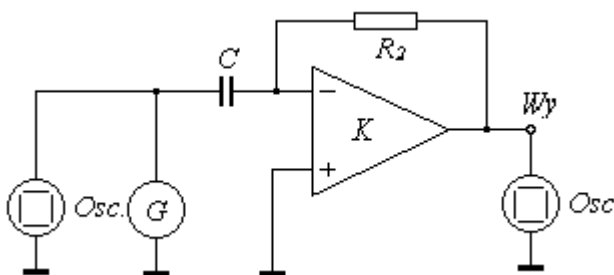
Rys. 7.18. Układ do pomiaru współczynnika tłumienia wpływu zasilania

Wpływ napięcia zasilania na pracę wzmacniacza operacyjnego wyraża się liczbowo za pomocą stosunku przyrostu napięcia niezrównoważenia do wywołującego go przyrostu napięcia zasilającego:

$$PSRR = \frac{dU_{os}}{dU_z} \quad (7.33)$$

3.6. Badanie układu różniczkującego

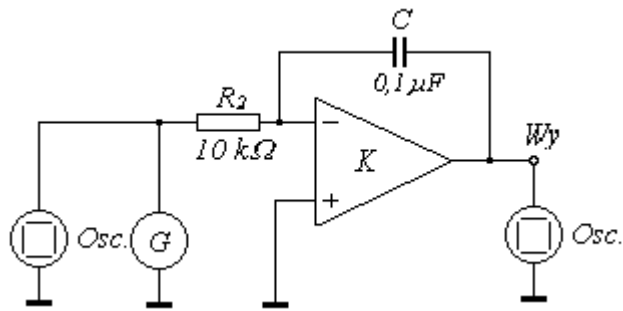
Należy połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7.19. Na wejście układu z generatora podawać kolejno przebiegi sinusoidalne, prostokątne i trójkątne. Zakres częstotliwości i wartości amplitudy sygnałów wejściowych poda prowadzący ćwiczenia. Przerysować z ekranu oscyloskopu kształt przebiegu sygnału wejściowego i wyjściowego dla poszczególnych przypadków.



Rys. 7.19 Układ do obserwacji wzmacniacza operacyjnego pracującego jako wzmacniacz różniczkujący

3.7. Badanie układu całkującego

Należy połączyć układ pomiarowy zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 7.20. Na wejście układu z generatora podawać kolejno przebiegi sinusoidalne, prostokątne i trójkątne. Zakres częstotliwości i wartości amplitudy sygnałów wejściowych poda prowadzący ćwiczenia. Przerysować z ekranu oscyloskopu kształt przebiegów sygnału wejściowego i wyjściowego dla poszczególnych przypadków.



Rys. 7.20. Układ do obserwacji wzmacniacza operacyjnego pracującego jako wzmacniacz całkujący

Zakończenie i wnioski

W sprawozdaniu z ćwiczenia przedstawić wnioski dotyczące wyników przeprowadzonych pomiarów i obliczeń oraz ich zgodności z wynikami otrzymanymi dla danych katalogowych użytych elementów.

Pytania sprawdzające

1. Podać podstawowe symbole wzmacniaczy operacyjnych.
2. Scharakteryzować właściwości idealnego wzmacniacza.
3. Podać schemat i scharakteryzować wzmacniacz odwracający.
4. Podać schemat i scharakteryzować wzmacniacz nieodwracający.
5. Podać schemat i scharakteryzować wtórnik napięciowy.
6. Podać schemat i scharakteryzować wzmacniacz sumacyjny.
7. Scharakteryzować integrator.
8. Scharakteryzować wzmacniacz różniczkujący.
9. Opisać wykres Bodego dla układu różniczkującego.