

ĆWICZENIE 3

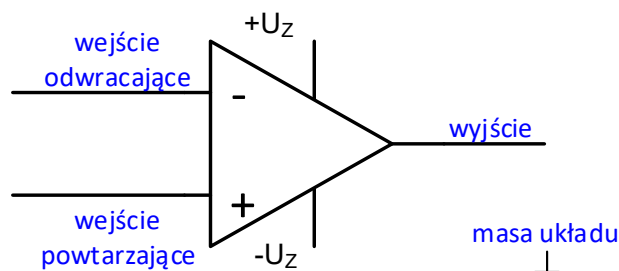
Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego
– układy liniowe

3.1. Wstęp – przygotowanie do zajęć

Obecnie w większości dziedzin techniki analogowej zamiast tranzystorów dyskretnych stosuje się wzmacniacze operacyjne. Wzmacniacz operacyjny jest elementem elektronicznym aktywnym, wielobiegunkowym (wielozaciskowym). Ze względu na wszechstronne zastosowanie w technice pomiarowej i regulacji automatycznej do przekształcania i wzmacniania sygnałów analogowych można powiedzieć, że jest to układ uniwersalny, który zachował jedynie historyczną nazwę związaną z analogowymi maszynami matematycznymi, w których realizował operacje matematyczne.

Wzmacniacz operacyjny

Symbol graficzny i nazwy najważniejszy wyprowadzeń wzmacniacza operacyjnego pokazano na Rys. 3.1. Warto zauważyć, że wzmacniacz operacyjny nie ma zacisku masy. Tzw. masę układu stanowi punkt wspólny zasilaczy $+U_Z$ i $-U_Z$ wzmacniacza operacyjnego. Ze względu na wymaganą uniwersalność każdy wzmacniacz operacyjny ma w stopniu wejściowym wzmacniacz różnicowy z dwoma wejściami: wejście $-$ (minus) lub n nazywa się **odwracającym** lub inwertującym, a wejście $+$ (plus) lub p nazywa się wejściem **powtarzającym** lub nieodwracającym

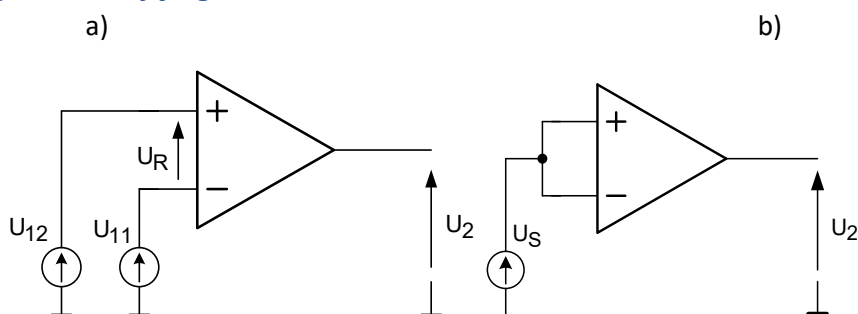


Rys. 3.1. Symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego i opis oznaczeń.

Najczęściej wzmacniacze operacyjne są zasilane symetrycznym napięciem $\pm U_Z$, np. ± 10 V.

W większości układów wykonanych w technice analogowej zamiast tranzystorów dyskretnych stosuje się wzmacniacze operacyjne. Są one często częściami składowymi bardziej rozbudowanych struktur specjalizowanych układów np. przetworników cyfra – analog C/A i analog – cyfra A/C.

Składowe sygnału sterującego



Rys. 3.2. Sposobyysterowania wzmacniacza operacyjnego: a)ysterowanie sygnałem różnicowym U_R , b)ysterowanie sygnałem wspólnym U_S .

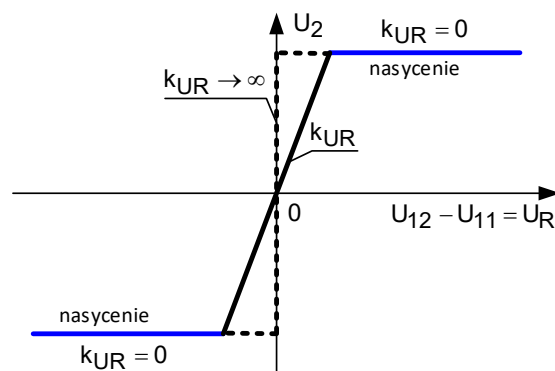
We wzmacniaczu operacyjnym można wyróżnić dwie składowe sygnału sterującego: składową różnicową i składową zgodną. Składowa różnicowa nazywana jest napięciem różnicowym, a składowa wspólna napięciem zgodnym lub napięciem sumacyjnym.

Sygnał napięciowy u_R doprowadzony do wejść $+$ i $-$ wzmacniacza nazywa się **wejściowym sygnałem różnicowym**. Wzmacniacz operacyjny wzmacnia k_{UR} razy napięcie u_R . Na wyjściu wzmacniacza jest zatem napięcie:

$$u_2 = k_{UR}(u_{12} - u_{11}) = k_{UR} \cdot u_R \quad (3.1)$$

Ponieważ wzmacniacz operacyjny wzmacnia także sygnały stałe można we wzorze na wartość napięcia wyjściowego zamiast oznaczenia napięć chwilowych u wpisać oznaczenie napięcia stałego U .

Charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego

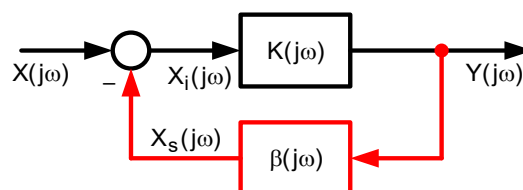


Rys. 3.3. Aproxymowana charakterystyka wzmacniacza operacyjnego idealnego (linia przerywana) i rzeczywistego (linia ciągła – dwukolorowa)

Dla bardzo małych napięć U_R , w pobliżu początku układu współrzędnych, wzmacniacz pracuje w stanie aktywnym i rzeczywiście pełni w układzie elektronicznym rolę wzmacniacza. Dla większych napięć U_R wzmacniacz wchodzi w stany plus lub minus nasycenia. Wartość nasycenia zbliżona jest do wartości napięcia zasilania wzmacniacza. W tej sytuacji wzmocnienie napięciowe k_{UR} sygnału różnicowego jest teoretycznie równe zero. Wzmacniacz praktycznie nie wzmacnia sygnału.

W układach liniowych ze wzmacniaczami operacyjnymi pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego tak oddziałuje na napięcie różnicowe U_R , aby jego wartość była jak najmniejsza i w przybliżeniu równa zero, $U_R \rightarrow 0$.

Jak wspomniano wyżej w liniowych układach przekształcania sygnałów wzmacniacz operacyjny pracuje z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Układ taki z punktu widzenia teorii sterowania to układ zamknięty o strukturze pokazanej na Rys. 3.4.



Rys. 3.4. Układ zamknięty z ujemną pętlą sprzężenia zwrotnego

Zastępcza transmitancja widmowa tego układu ma postać:

$$K_z(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K(j\omega)}{1 + K(j\omega) \cdot \beta(j\omega)} = \frac{1}{\frac{1}{K(j\omega)} + \beta(j\omega)} = \frac{1}{\beta(j\omega)} \Bigg|_{K(j\omega) \rightarrow \infty} \quad (3.2)$$

Jeżeli sygnały $X(j\omega)$ i $Y(j\omega)$ są sygnałami napięciowymi odpowiednio: wejściowym i wyjściowym to wzmacnienie układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym, przy założeniu, że wzmacnienie wzmacniacza operacyjnego sygnału różnicowego spełnia zależność:

$$k_{UR}(j\omega) = K(j\omega) \rightarrow \infty \quad (3.3)$$

zależy wyłącznie od parametrów pętli sprzężenia zwrotnego i jest równe $1/\beta(j\omega)$.

Podstawowe parametry wzmacniacza operacyjnego

Wzmocnienie napięciowe w układzie otwartym k_{U0} (ang. open loop voltage gain)

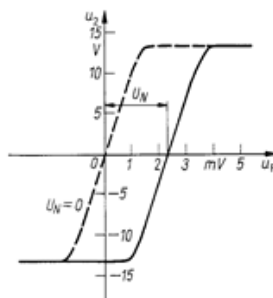
$$k_{U0} = k_{UR} = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_R} \quad (3.4)$$

wyznacza nachylenie charakterystyki przejściowej $U_2 = f(U_R)$ pomiędzy stanami nasycenia i jest podawane w V/V lub dB. Typowe wartości k_{U0} $10^4 - 10^7$ V/V.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $k_{U0} = 25\,000$ V/V.

Współczynnik tłumienia sygnału zgodnego CMRR (ang. common mode rejection ratio) jest to stosunek wzmacnienia sygnału różnicowego (wzmocnienia napięciowego w układzie otwartym k_{UR}) do wzmacnienia sygnału zgodnego. Jego wartość jest podawana w dB i zawiera się w granicach $90 \div 130$ dB. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ współczynnik CMRR jest równy 80 dB.

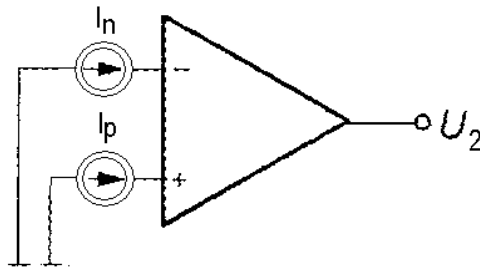
Wejściowe napięcie niezrównoważenia U_N (ang. input offset voltage). Niewielkie napięcie różnicowe, rzędu kilku mV (Rys. 3.5.) jakie należy przyłożyć do wejścia wzmacniacza operacyjnego w układzie otwartym, aby przesunąć charakterystykę przejściową $U_2 = f(U_R)$ tak, żeby przechodziła przez początek układu współrzędnych. W wielu wypadkach, gdy sygnały sterujące mają duże wartości parametr ten jest nie istotny i może być pominięty w analizie pracy układu ze wzmacniaczem operacyjnym. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ typowa wartość napięcia niezrównoważenia 6 mV.



Rys. 3.5. Rzeczywista charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego

Wejściowy prąd polaryzacji I_{IN} (ang. input bias current) definiowany jako (Rys. 3.6.):

$$I_{IN} = \frac{1}{2}(I_p + I_n) \quad (3.5)$$



Rys. 3.6. Wejściowe prądy polaryzacji

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $I_N = 500$ nA.

Wejściowy prąd niezrównoważenia I_N (ang. input offset current)

$$I_N = |I_p - I_n| \quad (3.6)$$

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $I_N = 200$ nA.

Współczynnik temperaturowy wejściowego napięcia/prądu niezrównoważenia (ang. temperature drift of input voltage/current) definiuje się jako stosunek zmiany wejściowego napięcia/prądu niezrównoważenia do wywołującej ją zmiany temperatury:

$$\delta_{UT} = \frac{\Delta U_N}{\Delta T} [\mu V / ^\circ C] \quad \delta_{IT} = \frac{\Delta I_N}{\Delta T} [\mu A / ^\circ C] \quad (3.7)$$

Typowe wartości: $0,1 \div 50 \mu V / ^\circ C$ oraz $10 \div 50 \mu A / ^\circ C$. Dla wzmacniacza $\mu A741$ $\delta_{UT} = 7 \mu V / ^\circ C$.

Współczynnik napięciowy wejściowego napięcia niezrównoważenia SVRR (ang. Supply Voltage Rejection Ratio) definiowany jako stosunek zmiany wejściowego napięcia niezrównoważenia do wywołującej ją zmiany napięcia zasilającego wzmacniacz operacyjny:

$$SVRR = \frac{\Delta U_N}{\Delta U_Z} \quad (3.8)$$

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ współczynnik SVRR = $150 \mu V / V$.

Maksymalna prędkość zmian napięcia wyjściowego SR (ang. Slew Rate) definiowana jako:

$$SR = \left. \frac{\Delta U_2}{\Delta t} \right|_{MAX} \quad (3.9)$$

Zakres występujących wartości $0,5 \div 500 V / \mu s$. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ SR równa się $0,6 V / \mu s$.

Rezystancja wejściowa (ang. input resistance) rezystancja symetryczna R_S mierzona pomiędzy wejściami +i – wzmacniacza operacyjnego. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ rezystancja $R_S = 2 M\Omega$.

Rezystancja wyjściowa (ang. output resistance) jest mierzona na zaciskach wyjściowych wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. Typowe wartości $40 \div 200 \Omega$. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $R_0 = 75 \Omega$.

Iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma (ang. gain - bandwidth product) parametr określający częstotliwość, przy której wzmocnienie K_{UR} wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego maleje do $1 V / V$ (0 dB). Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ częstotliwość $f_T = 1 MHz$.

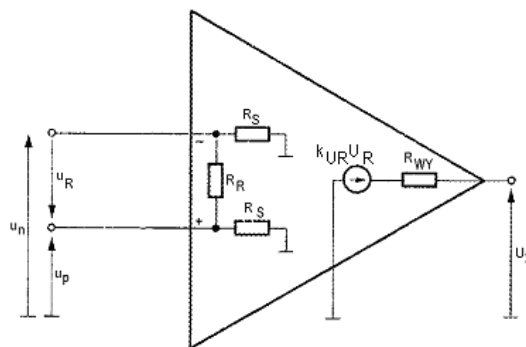
Maksymalne napięcie wejściowe różnicowe U_{IND} (ang. differential mode input voltage). Maksymalne napięcie jakie może wystąpić pomiędzy wejściami + i -. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość ± 30 V.

Maksymalne napięcie wejściowe wspólne U_{INC} (ang. common mode input voltage). Maksymalne napięcie jakie może być przyłożone pomiędzy masą układu i jednym z wejść + i - wzmacniacza operacyjnego. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość ± 15 V.

Pobór mocy P (ang. power consumption) jest mierzony dla nieobciążonego wzmacniacza operacyjnego. Typowy zakres wartości $50 \div 500$ mW. Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość 50 mW.

Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego

Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na Rys. 3.7.



Rys. 3.7. Uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego

W odróżnieniu od innych grup wzmacniaczy, wzmacniacze operacyjne charakteryzują się:

- nieskończenie dużym wzmocnieniem napięciowym sygnału różnicowego ($k_{UR} \rightarrow \infty$),
- zerowym wzmocnieniem napięciowym sygnału sumacyjnego ($k_{US} = 0$),
- nieskończenie dużymi rezystancjami wejściowymi ($R_S, R_R \rightarrow \infty$),
- zerową rezystancją wyjściową ($R_{WY} = 0$),
- nieskończenie szerokim pasmem przenoszenia zawierającym składową stałą ($f = 0$),
- nieskończenie dużą stromość narastania napięcia wyjściowego ($SR = \infty$),
- nieskończenie szerokie pasmo wzmocnienia jednostkowego ($B_1 = \infty$),
- nieskończenie duży współczynnik tłumienia sygnału wspólnego ($CMRR = \infty$).

Dla rzeczywistych układów wzmacniaczy operacyjnych parametry te nie są idealne, ale z technicznego punktu widzenia można uznać, że są one zbliżone do wartości układu idealnego.

Założenie, że zastosowany wzmacniacz operacyjny jest idealny sprawdzają się, gdy rezystory w pętli sprzężenia zwrotnego mają wartości rzędu od kilku do kilkudziesięciu kiloomów, a maksymalna stromość zbroczy narastania wzmacnianego sygnału jest znacznie mniejsza od wartości współczynnika SR.

W idealnym wzmacniaczu operacyjnym dzięki $k_{UR} \rightarrow \infty$ napięcie wyjściowe U_2 oddziałuje przez pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego na wejście wzmacniacza zawsze tak, aby napięcie różnicowe

było równe zero oraz dzięki $R_S, R_R \rightarrow \infty$ wzmacniacz nie obciąża źródeł sterujących (stopień wejściowy nie pobiera prądu) $I_N = I_P = 0$.

Bardzo duże wzmocnienie napięciowe k_{UR} wzmacniacza operacyjnego jest warunkiem koniecznym do tego, aby o właściwościach układu ze sprzężeniem zwrotnym, w którym zastosowano ten wzmacniacz decydowały praktycznie tylko elementy zastosowane w pętli sprzężenia zwrotnego (w układach ze wzmacniaczami operacyjnymi pętla sprzężenia zwrotnego są realizowane wyłącznie za pomocą rezystorów i kondensatorów).

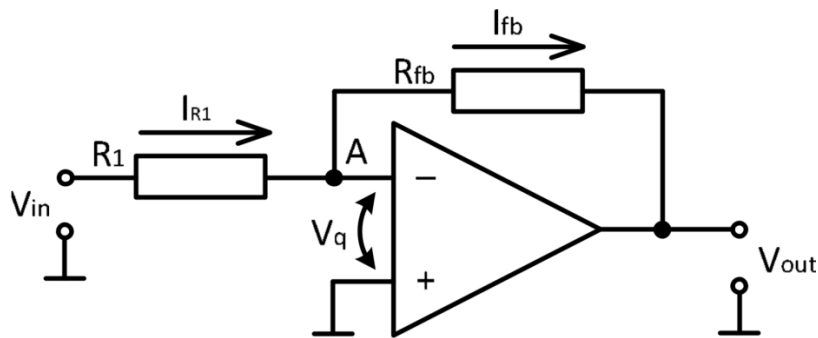
Do grupy układów liniowych z ujemnym sprzężeniem zwrotnym bazujących na układzie inwertującym i powtarzającym zalicza się min.:

- Sumatory
- Układy odejmujące
- Układy ze zmiennym znakiem współczynnika wzmocnienia
- Integratory
- Układy różniczkujące
- Sterowane źródła napięcia
- Sterowane źródła prądu

3.2. Podstawowe liniowe układy ze wzmacniaczami operacyjnymi

Wzmacniacz odwracający fazę

We wzmacniaczu odwracającym dodatni przyrost sygnału wejściowego powoduje ujemny przyrost sygnału na wyjściu wzmacniacza i odwrotnie. Kiedy sygnałem sterującym jest przebieg sinusoidalny można powiedzieć, że sygnały wejściowy i wyjściowy we wzmacniaczu są przesunięte w fazie o 180° (są w przeciwfazie) Wzmacniacze odwracające są stosowane, gdy wymagane jest wzmocnienie sygnału i zmiana jego polaryzacji lub kiedy należy dodać do siebie kilka sygnałów analogowych. Schemat ideowy wzmacniacza odwracającego przedstawiono na Rys. 3.8.



Rys. 3.8. Schemat wzmacniacza odwracającego fazę.

Sygnał wejściowy V_{in} steruje wejściem odwracającym wzmacniacza (wejście „-”) poprzez rezystor R_1 . Część sygnału wyjściowego V_{out} jest również podawana do wejścia odwracającego przez rezystor sprzężenia zwrotnego R_{fb} . Źródło sygnału wejściowego V_{in} wymusza w rezystorze R_1 prąd I_{R1} . W węzle A obwodu prąd ten dodaje się do prądu jaki wymusza w rezystorze R_{fb} napięcie wyjściowe V_{out} wzmacniacza. Napięcie V_{out} zmienia się i ustala na takiej wartości, przy której wartości prądów rezystora R_{fb} i I_{R1} będą równe. W tej sytuacji napięcie różnicowe V_R jest równe zero, bo silne sprzężenie zwrotne tak oddziałuje na układ, żeby potencjały na obu wejściach wzmacniacza operacyjnego były sobie równe.

Jeżeli wzmacniacz operacyjny jest idealny (rezystancja wejściowa wzmacniacza $R_{in} = \infty$), prąd wejściowy wejścia „-” jest równy zero. Zatem zgodnie z prawem Kirchhoffa:

$$I_{R1} = I_{fb} \quad (3.10)$$

Potencjał węzła A jest równy potencjałowi masy. Zatem $I_{R1} = V_{in}/R_1$ oraz $I_{fb} = -V_{out}/R_{fb}$.

Stąd po przekształceniu:

$$\frac{V_{in}}{R_1} = -\frac{V_{out}}{R_{fb}} \quad (3.11)$$

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = -\frac{R_{fb}}{R_1} \quad (3.12)$$

Znak minus we wzorze oznacza, że przyrosty napięcia wyjściowego i wejściowego w układzie odwracającym mają przeciwne znaki. Dzięki temu, że przyjęto założenie, że wzmacniacz operacyjny jest idealny wzmocnienie układu nie zależy od parametrów wzmacniacza operacyjnego tylko od parametrów obwodu sprzężenia zwrotnego. Zwykle wartość R_1 jest rzędu kiloomów zatem można uznać, że wzmacniacz nie obciąża źródła sygnału wejściowego. Rezystor sprzężenia zwrotnego R_{fb} ma także dużą rezystancję i nie przeciąża wyjścia wzmacniacza. Ponieważ napięcie różnicowe $U_R=0$ i potencjał węzła A jest także równy 0 to rezystancję wejściowa obwodu jest równa $R_{we} = \frac{V_{in}}{I_{R1}} = R_1$.

Do realizacji ćwiczenia zdefiniowano następujące wielkości:

- teoretyczna wartość wzmocnienia wzmacniacza:

$$Gain_{theo} = -\frac{R_{fb}}{R_1} \quad (3.13)$$

- rzeczywista wartość wzmocnienia wzmacniacza:

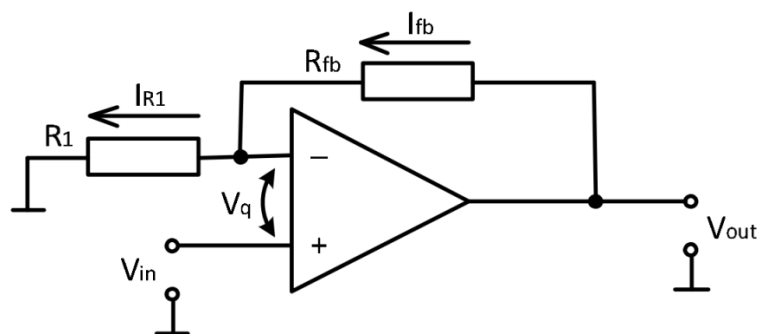
$$Gain_{exp} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.14)$$

- błąd pomiarowy:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{Gain_{exp}}{Gain_{theo}}\right) \cdot 100\% \quad (3.15)$$

Wzmacniacz powtarzający fazę

Wzmacniacze nieodwracające są używane, gdy wymagane jest wzmocnienie sygnału bez zmiany jego polaryzacji. Schemat wzmacniacza nieodwracającego pokazano na Rys. 3.9.



Rys. 3.9. Schemat wzmacniacza nieodwracającego.

Sygnal wejściowy V_{in} steruje wejście nieodwracające wzmacniacza (wejście "+"), natomiast część sygnału wyjściowego podawana jest podobnie jak w układzie odwracającym na wejście odwracające (wejście "-") przez dzielnik utworzony przez rezystory R_{fb} i R_1 .

Zasada działania układu jest podobna jak układu odwracającego. Na wyjściu wzmacniacza operacyjnego jest napięcie wyjściowe V_{out} , dla którego napięcie różnicowe będzie równe $V_R = 0$.

Jeżeli wzmacniacz operacyjny jest idealny (rezystancja wejściowa wzmacniacza $R_{in} = \infty$), prąd wejściowy wejścia „-” jest równy zero. Zatem zgodnie z prawem Kirchhoffa:

$$I_{R1} = I_{fb} \quad (3.16)$$

Potencjał węzła A jest równy potencjałowi wejścia nieodwracającego, dlatego

$$I_{R1} = V_{in}/R_1 \text{ oraz } I_{fb} = (V_{out} - V_{in})/R_{fb}.$$

Stąd po przekształceniu:

$$\frac{V_{out}-V_{in}}{V_{in}} = \frac{R_{fb}}{R_1}, \quad (3.17)$$

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_{fb}}{R_1}. \quad (3.18)$$

Tak jak w układzie odwracającym wzmocnienie układu nieodwracającego zależy tylko od rezystorów sprzężenia zwrotnego i nie zależy od wzmocnienia wzmacniacza operacyjnego.

Do realizacji ćwiczenia zdefiniowano następujące wielkości:

- teoretyczna wartość wzmocnienia wzmacniacza:

$$Gain_{theo} = 1 + \frac{R_{fb}}{R_1} \quad (3.19)$$

- rzeczywista wartość wzmocnienia wzmacniacza:

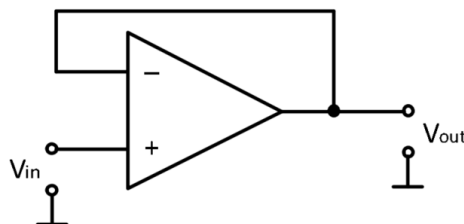
$$Gain_{exp} = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3.20)$$

- błąd pomiarowy :

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{Gain_{exp}}{Gain_{theo}}\right) \cdot 100\% \quad (3.21)$$

Wtórnik napięcia

Wzmacniacz buforowy lub wtórnik napięcia jest wzmacniaczem nieodwracającym, w którym pełny zakres sygnału wyjściowego jest podawany do wejścia odwracającego (wejście "-", 100% ujemnego sprzężenia zwrotnego). Schemat obwodu wtórnika napięcia przedstawiono na Rys. 3.10.



Rys. 3.10. Wzmacniacz operacyjny w układzie wtórnika napięcia

Wtórnik napięcia jest specyficznym przypadkiem wzmacniacza nieodwracającego (Rys. 3.9), gdy $R_{fb} \approx 0$ i $R_1 \approx \infty$, wtedy wzmocnienie wtórnika:

$$Gain_{vfb}^- \approx \frac{V_{out}}{V_{fb1}} = 1 \quad , \quad (3.22)$$

$$V_{out} = V_{in}. \quad (3.23)$$

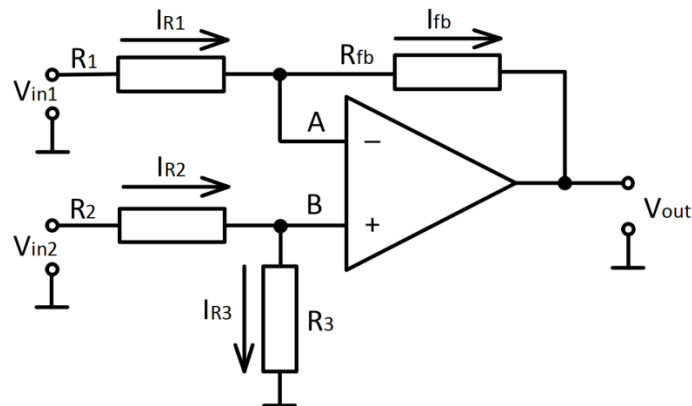
Wtórniky napięcia służą do dopasowywania wysokiej impedancji wewnętrznej źródła napięcia do obciążenia, które ma małą impedancję wejściową.

Wzmocnienie układu:

$$Gain = \frac{V_{out}}{V_{in}}. \quad (3.24)$$

Wzmacniacz różnicowy

Wzmacniacz różnicowy wzmacnia różnicę dwóch sygnałów zastosowanych do jego wejść. Schemat układu został przedstawiony na Rys. 3.11.



Rys. 3.11. Wzmacniacz operacyjny w układzie wzmacniacza różnicowego

Część sygnału wyjściowego jest podawana do wejścia odwracającego jako sprzężenie zwrotne przez dzielnik R_{fb} , R_1 . Z powodu wysokiego wzmocnienia wzmacniacza napięcie między wejściami **A** i **B** zbliży się do zera, a potencjały na wejściach wzmacniacza operacyjnego są równe.

Przy założeniu, że wzmacniacz operacyjny jest idealny ($R_{in} = \infty$), nie ma prądu płynącego do wejścia wzmacniacza operacyjnego.

Dlatego napięcie w punkcie **A**:

$$V_A = V_{in1} \frac{R_{fb}}{R_1 + R_{fb}} + V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_{fb}} \quad , \quad (3.25)$$

napięcie w punkcie **B**:

$$V_B = V_{in2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}. \quad (3.26)$$

Dlatego:

$$V_{in1} \frac{R_{fb}}{R_1 + R_{fb}} + V_{out} \frac{R_1}{R_1 + R_{fb}} = V_{in2} \frac{R_3}{R_2 + R_3}, \quad (3.27)$$

stąd

$$V_{out} = V_{in2} \frac{R_3}{R_2} \frac{1 + \frac{R_{fb}}{R_1}}{1 + \frac{R_3}{R_2}} - V_{in1} \frac{R_{fb}}{R_1}. \quad (3.28)$$

Jeżeli $\frac{R_{fb}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2}$,

$$V_{out} = Gain \cdot (V_{in2} - V_{in1}) = Gain \cdot \Delta V_{in}, \quad (3.29)$$

Gdzie:

$$Gain = \frac{R_{fb}}{R_1} = \frac{R_3}{R_2} \quad (3.30)$$

Dlatego z równania (3.29) wynika, że obwód wzmacnia różnicę napięcia między wejściami.

Do realizacji ćwiczenia zdefiniowano następujące wielkości:

- teoretyczna wartość wzmacnienia wzmacniacza:

$$Gain_{theo} = \frac{R_{fb}}{R_1} \quad (3.31)$$

- rzeczywista wartość wzmacnienia wzmacniacza:

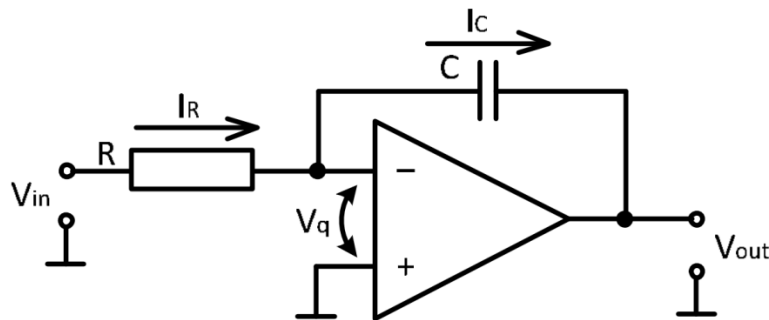
$$Gain_{exp} = \frac{V_{out}}{\Delta V_{in}} \quad (3.32)$$

- błąd pomiarowy:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{Gain_{exp}}{Gain_{theo}}\right) \cdot 100\% \quad (3.33)$$

Wzmacniacz całkujący

Obwód całkujący (*ang. Integrator*) wykonuje matematyczną operację całkowania w odniesieniu do czasu: jego napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do napięcia wejściowego scałkowanego w czasie. Obwód całkujący jest najczęściej używany w komputerach analogowych, przetwornikach analogowo-cyfrowych i układach generacji przebiegów. Schemat obwodu całkującego opartego o wzmacniacz operacyjny przedstawiono na Rys. 3.12.



Rys. 3.12. Układ całkujący oparty o wzmacniacz operacyjny.

Potencjał na wejściu odwracającym jest w przybliżeniu równy zero, a zatem napięcie na wejściu rezystora jest równe napięciu wejściowemu V_{in} , a napięcie na kondensatorze jest równe napięciu wyjściowemu V_{out} .

Prąd kondensatora:

$$I_C = -C \frac{dV_{out}}{dt}, \quad (3.34)$$

Założmy, że wzmacniacz operacyjny jest idealny ($R_{in} = \infty$) i nie ma przepływu prądu przez wzmacniacz operacyjny. Następnie zgodnie z prawem Kirchhoffa:

$$I_R = I_C, \quad (3.35)$$

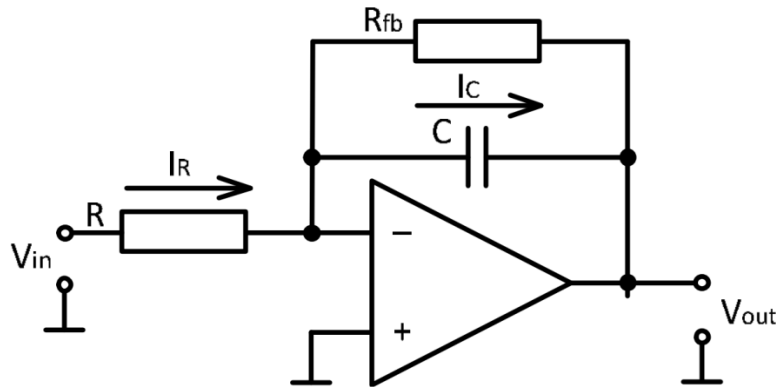
Po przemnożeniu obu części równania (3.35) przez R i podstawiając równanie (3.34), można uzyskać:

$$V_{in} = -RC \frac{dV_{out}}{dt} \quad (3.36)$$

Całkowanie obu stron równania w odniesieniu do czasu:

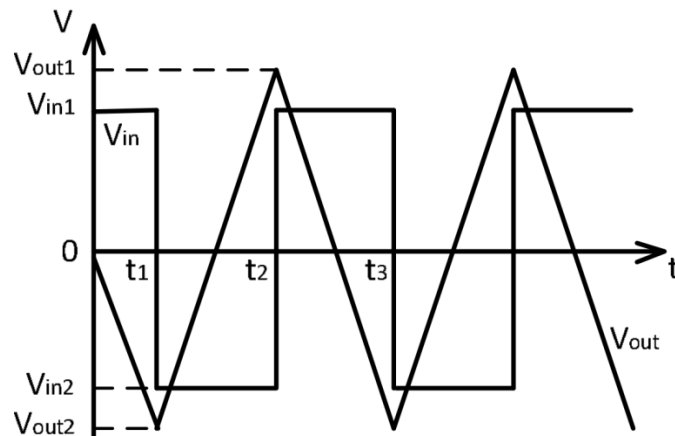
$$V_{out} = -\frac{1}{RC} \int_0^t V_{in} dt + const \quad (3.37)$$

Stała dodana do napięcia wyjściowego odpowiada początkowemu napięciu na kondensatorze. Schemat obwodu przedstawiony na Rys. 3.13. pozwala nam pozbyć się tego początkowego ładunku. Do prawidłowego działania tego obwodu rezystancja sprzężenia zwrotnego musi być wystarczająco wysoka, aby spełnić warunek $R_{fb} \gg R$.



Rys. 3.13. Układ całkujący oparty o wzmacniacz operacyjny z rezystancją w obwodzie sprzężenia zwrotnego

Rozważmy sygnał prostokątny podany do wejścia układu całkującego Rys. 3.14.



Rys. 3.14. Sygnał prostokątny podany na wejście układu całkującego oraz przebieg sygnału wyjściowego

Analizie poddano sekcję $t_1 t_2$ (Rys. 3.14). W tej sekcji, używając równania (3.37), można wywnioskować:

$$\Delta V_{out} = V_{out1} - V_{out2} = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} V_{in} dt, \quad (3.38)$$

przez przypisanie

$\tau = RC$ - stała czasowa;

Δt - czas trwania impulsu wejściowego;

można wywnioskować:

$$V_{out1} - V_{out2} = \frac{1}{\tau} V_{in} \Delta t, \quad (3.39)$$

τ można uzyskać z równania (6). Jeśli zmierzona zostanie wartość szczytowa V_{in} , to:

$$\tau = \frac{V_{in1} \Delta t}{V_{out1} - V_{out2}} = \frac{V_{inPP} \Delta t}{2(V_{out1} - V_{out2})}, \quad (3.40)$$

gdzie

V_{inPP} - różnica między szczytowymi wartościami V_{in} ,

$V_{in1} = -V_{in2}$ - wartości szczytowe sygnału wejściowego.

Do realizacji ćwiczenia zdefiniowano następujące wielkości:

- teoretyczna wartość stałej czasowej:

$$\tau_{theo} = RC, \quad (3.41)$$

- błąd pomiaru:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\tau_{exp}}{\tau_{theo}}\right) \cdot 100\%. \quad (3.42)$$

3.3. Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego

Ćwiczenie nr: 3 – Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego

Materiały obowiązujące na teście i w trakcie realizacji ćwiczenia:

- 1) Wprowadzenie teoretyczne do wzmacniaczy operacyjnych
- 2) Instrukcja ćwiczenia laboratoryjnego
- 3) Instrukcja stanowiska laboratoryjnego

Cel ćwiczenia: Analiza pracy wybranych układów z wykorzystaniem wzmacniacza operacyjnego.

Do wykonania ćwiczenia wykorzystywana jest aplikacja **Operational Amplifier** od National Instruments. Układy realizowane w trakcie laboratorium znajdują się na liście, po zalogowaniu do programu. Proces rejestracji został opisany w rozdziale „Wprowadzenie”. W przypadku pracy zdalnej, do wykonania ćwiczenia niezbędne jest oprogramowanie NI MULTISIM do którego licencja podawana jest przez prowadzących na początku kursu. W środowisku symulacyjnym zadania należy wykonywać analogicznie, z wykorzystaniem przyrządów pomiarowych symulatora.

1. Wzmacniacz odwracający fazę (ang. Inverting Amplifier).

a) Eksperymentalne wyznaczenie wzmocnienia wzmacniacza odwracającego – wykreślenie charakterystyk napięciowych $U_{out} = f(U_{in})$.

Efektom zadania będzie arkusz kalkulacyjny Excel z pomiarami napięcia wyjściowego i wyjściowego dla wariantów podanych w Tabeli 1, który należy wykorzystać do przygotowania raportu.

Tabela 3.3.1. Parametry układu dla wzmacniacza odwracającego.

Parametr	Wariant	
	1	2
R1 [Ω]	1000	5100
R2 [Ω]	5100	10000
-E [V]	0 ... -9.5	
+E [V]	0 ... 9.5	
f [kHz]	3 ... 4	
$\sim E_{pp}$ [V]	1 ... 10	

Tworzenie modelu laboratoryjnego (symulacyjnego) układu wzmacniacza odwracającego fazę

Proszę podłączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 3.1. Wartości elementów odczytać z Tabeli 3.3.1 zaczynając od wariantu 1. Dodatkowo należy uwzględnić pomiar napięcia na wejściu i wyjściu wzmacniacza. *(w symulacji – praca zdalna) Prąd w obwodzie można mierzyć korzystając z narzędzia Current Probe, zaś napięcie za pomocą narzędzia Differential Voltage Probe.*

Zmieniając napięcie źródła E1, wykreślić część charakterystyki $U_{out} = f(U_{in})$ w przedziale -9,5 V do 0 V. Przy każdym pomiarze należy wcisnąć przycisk „Record”¹, a wykreślanie charakterystyki

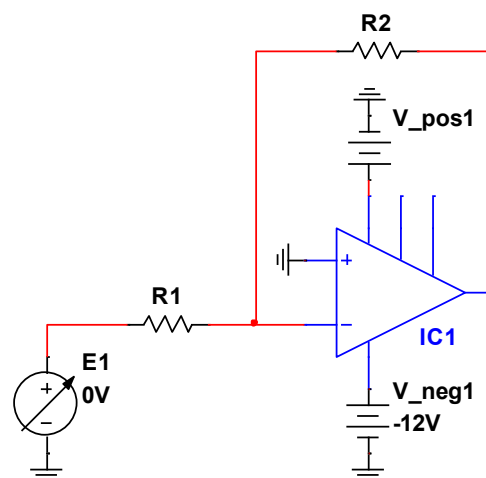
¹ Record – powoduje dodanie wiersza w arkuszu kalkulacyjnym Excel. **Proszę Pamiętać, aby zapisać arkusz przed zamknięciem programu! W przeciwnym wypadku pomiary przepadną.**

obserwować z wykorzystaniem urządzenia Graph Plotter² (NI Elvis). Proszę zwrócić uwagę, że w przypadku wystąpienia nasycenia wzmacniacza, należy zwiększyć liczbę punktów pomiarowych tak, aby „wygładzić” charakterystykę.

Zmienić schemat układu na „2” (zielona strzałka na panelu programu) i podłączyć układ zgodnie z nową konfiguracją (zmiana źródła napięcia z ujemnego na dodatnie). Wykreślić część charakterystyki $U_{out} = f(U_{in})$ dla dodatniego źródła napięcia w przedziale od 0 do 9,5 V.

Powyższą procedurę powtórzyć dla wariantu 2 z Tabeli 3.3.1 tak, aby uzyskać drugą charakterystykę.

UWAGA: Obie charakterystyki należy umieścić w jednym układzie współrzędnych i zamieścić w raporcie. Proszę pamiętać o podpisaniu osi i podaniu jednostek.



Rys. 3.3.1. Schemat układu wzmacniacza odwracającego fazę

b) Obserwacja przebiegów: wejściowego i wyjściowego układu odwracającego fazę

Efektom zadania jest wyskalowany oscylogram przebiegu napięć U_{in} oraz U_{out} dla jednego wybranego przez studenta wariantu układu z Tabeli 3.3.1.

Proszę przełączyć schemat na nr 3 (przy użyciu zielonej strzałki) i podłączyć go zgodnie z rysunkiem przedstawionym na ekranie. Zmianie nastąpiło źródło napięcia U_{in} . Generator należy ustawić zgodnie z jednym wybranym wariantem z Tabeli 3.3.1. Kształt napięcia jeden z podanych: sinusoidalny, prostokątny, trójkątny. Przebiegi proszę zaobserwować na oscyloskopie przy użyciu narzędzia Scope. Należy pamiętać o odpowiednim skonfigurowaniu oscyloskopu w taki sposób, aby wyświetlał dwa albo trzy okresy zadanego sygnału. Oscylogram należy zapisać i umieścić w sprawozdaniu.

W raporcie należy obliczyć teoretyczne wartości wzmocnienia wzmacniacza odwracającego oraz eksperymentalne wartości wzmocnienia wzmacniacza odwracającego w zakresie liniowym. Ponadto należy obliczyć błąd. Wykorzystać należy równania z „Wprowadzenia teoretycznego do wzmacniaczy operacyjnych”. Przykładowa tabela, w której należy umieścić obliczone wartości znajduje się poniżej.

Tabela 3.3.2. Przykładowy arkusz obliczeń dla badań wzmacniacza odwracającego

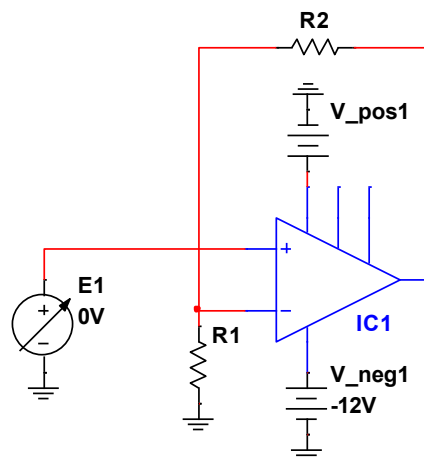
	Parametr		Pomiar		Obliczenia		
	R1	R2	V1	V2	Gain _{theo}	Gain _{exp}	Error
	[Ohm]	[Ohm]	[V]	[V]	-	-	[%]
1							
2							
3							
...							

² Graph Plotter – patrz „Instrukcja stanowiska laboratoryjnego”

2. Wzmacniacz powtarzający fazę (ang. Noninverting Amplifier).

Ćwiczenie należy wykonać analogicznie do wzmacniacza odwracającego fazę. Układ należy podłączyć zgodnie ze schematem zamieszczonym na Rys. 3.3.2. W programie Operational Amplifier zmienić ćwiczenie na „2. Noninverting Amplifier”.

- a) **Eksperymentalne wyznaczenie wzmocnienia wzmacniacza powtarzającego fazę – wykreślenie charakterystyk napięciowych $U_{out} = f(U_{in})$.**



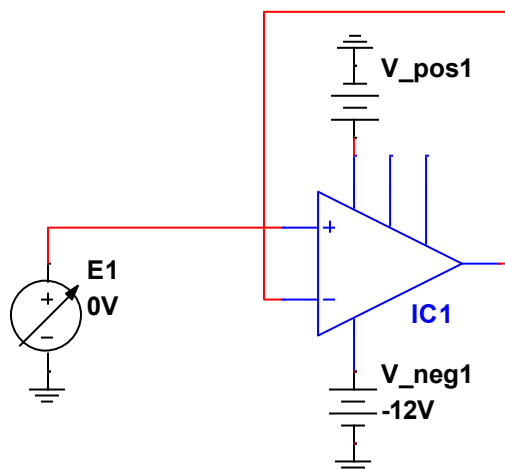
Rys. 3.3.2. Schemat układu wzmacniacza powtarzającego fazę

- b) **Obserwacja przebiegów: wejściowego i wyjściowego układu powtarzającego fazę**

3. Wtórnik napięcia (ang. Voltage Follower)

Ćwiczenie należy wykonać analogicznie do wzmacniacza odwracającego fazę. Układ należy podłączyć zgodnie ze schematem zamieszczonym na Rys.3.3. W programie Operational Amplifier zmienić ćwiczenie na „3. Buffer amplifier”

- a) **Eksperymentalne wyznaczenie wzmocnienia wzmacniacza powtarzającego fazę – wykreślenie charakterystyk napięciowych $U_{out} = f(U_{in})$.**



Rys. 3.3.3. Schemat układu wtórnika napięcia.

- b) **Obserwacja przebiegów: wejściowego i wyjściowego układu powtarzającego fazę**

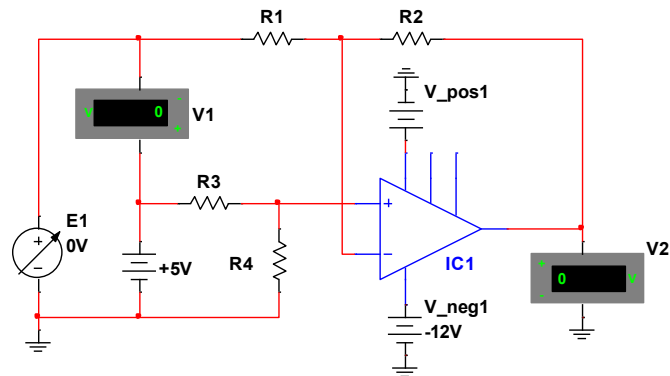
Uwaga: Ze względu na odchylenia wartości elementów wartość napięcia nasycenia wzmacniacza operacyjnego używanego na stanowisku testowym może być wyższa niż 10 V, nieznacznie przekraczając zakres woltomierza i generując komunikat o błędzie „Poza zasięgiem” (Out of range). Pomimo tego komunikatu dopuszczalne jest kontynuowanie pomiarów w tym eksperymencie, w celu zbadania nasycenia wzmacniacza operacyjnego.

4. Wzmacniacz różnicowy (ang. Differential Amplifier)

Na liście ćwiczeń programu Operational Amplifier proszę wybrać ćwiczenie: „4. Differential amplifier”.

a) Eksperymentalne wyznaczenie wzmocnienia wzmacniacza odwracającego – wykreślenie charakterystyk napięciowych $U_{out} = f(U_{in})$.

Efektom zadania będzie arkusz kalkulacyjny Excel z pomiarami napięć wejściowych i wyjściowego dla wariantów podanych w Tabeli 3.3.3, który należy wykorzystać do przygotowania raportu.



Rys. 3.3.4. Schemat układu wzmacniacza różnicowego.

Tabela 3.3.3. Parametry układu dla wzmacniacza różnicowego.

Parametr	Wariant	
	1	2
R1 [Ω]	5100	1000
R2 [Ω]	10000	5100
R3 [Ω]	5100	100
R4 [Ω]	10000	5100
+E [V]	0...10	

Tworzenie modelu laboratoryjnego (symulacyjnego) układu wzmacniacza odwracającego fazę

Proszę podłączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 3.1. Wartości elementów odczytać z Tabeli 3.3.3 zaczynając od wariantu 1. Dodatkowo należy uwzględnić pomiar napięcia na wejściu i wyjściu wzmacniacza.

Zmieniając napięcie źródła E1, wykreślić charakterystykę $U_{out} = f(U_{in})$ w przedziale od 0 do 9,5 V. Przy każdym pomiarze należy wcisnąć przycisk „Record”, a wykreślanie charakterystyki obserwować z wykorzystaniem urządzenia Graph Plotter. Proszę zwrócić uwagę, że w przypadku wystąpienia nasycenia wzmacniacza, należy zwiększyć liczbę punktów pomiarowych tak, aby „wygładzić” charakterystykę.

Powyższą procedurę powtórzyć dla wariantu 2 z Tabeli 3.3.3 tak, aby uzyskać drugą charakterystykę.

UWAGA: Obie charakterystyki należy umieścić w jednym układzie współrzędnych i zamieścić w raporcie. Proszę pamiętać o podpisaniu osi i podaniu jednostek.

W raporcie należy obliczyć teoretyczne wartości wzmocnienia wzmacniacza odwracającego oraz eksperymentalne wartości wzmocnienia wzmacniacza różnicowego w zakresie liniowym. Ponadto należy obliczyć błąd. Wykorzystać należy równania z „Wprowadzenia teoretycznego do wzmacniaczy operacyjnych”. Przykładowa tabela, w której należy umieścić obliczone wartości znajduje się poniżej.

Tabela 3.3.4. Przykładowy arkusz obliczeń dla badań wzmacniacza różnicowego

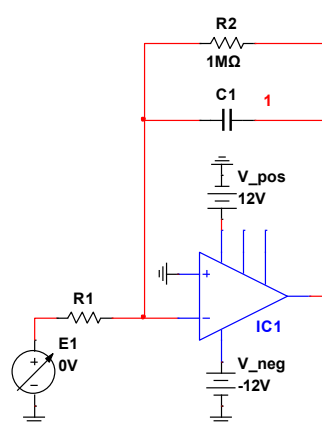
N	Parametr				Pomiar		Obliczenia		
	R1	R2	R3	R4	V1	V2	Gain _{theo}	Gain _{exp}	% Error
	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[Ohm]	[V]	[V]	-	-	[%]
1									
2									
3									
...									

5. Układ całkujący (ang. Integrator)

Na liście ćwiczeń programu Operational Amplifier proszę wybrać ćwiczenie: „7. Integrator”.

a) Eksperymentalne wyznaczenie stałej całkowania τ_{theo} .

Efektom zadania będzie pomiar stałej czasowej dla różnych wariantów rezystorów i kondensatorów oraz porównanie ich do wartości obliczonej na podstawie podanych wartości.



Rys. 3.3.5. Schemat układu całkującego.

Tworzenie modelu laboratoryjnego (symulacyjnego) układu wzmacniacza całkującego

Tabela 3.3.5. Parametry układu dla wzmacniacza całkującego.

Parametr	Wariant		
	1	2	3
R1 [Ω]	1000		
C1 [μF]	0,01	0,022	0,1
f [kHz]	5 ... 10		2 ... 5
~Epp [V]	1 ... 4		

Proszę podłączyć układ zgodnie ze schematem przedstawionym na Rysunku 3.5. Wartości elementów odczytać z Tabeli 3.3.5 zaczynając od wariantu 1. Dodatkowo należy uwzględnić pomiar napięcia na wejściu i wyjściu wzmacniacza. Źródłem sygnału wejściowego jest generator funkcyjny ~E, który należy skonfigurować zgodnie z Tabelą 3.3.5 odpowiednio dla wykonywanego wariantu. Kształt sygnału - prostokątny.

Dla wybranych wartości rezystancji i pojemności zmierzyć wartość szczytową sygnału wejściowego i czas trwania impulsu, a także wartość szczytową sygnału wyjściowego. Pomiarów zapisać w tabeli, w protokole.

Jeśli sygnał wyjściowy układu całkującego jest odchylony, obróć potencjometr równoważący wzmacniacza operacyjnego DA1, przesuając sygnał do położenia symetrycznego wzdłuż osi X.

Wykorzystując wzory podane w dokumencie „Wprowadzenie teoretyczne do wzmacniaczy operacyjnych”, należy wykonać obliczenia: teoretycznej wartości stałej czasowej τ_{theo} oraz wartości eksperymentalnej stałej czasowej układu całkującego τ_{exp} . Błąd pomiaru jest liczony jako:

$$\varepsilon = (1 - \tau_{exp} \tau_{theo}) \cdot 100\% .$$

b) Obserwacja przebiegów: wejściowego i wyjściowego układu powtarzającego fazę.

Wykorzystując narzędzie „Scope”, proszę zaobserwować przebiegi sygnału wejściowego oraz wyjściowego układu. Oscyloskop należy skonfigurować tak, aby były widoczne tylko dwa albo trzy okresy sygnału. Oscylogram powyższych przebiegów należy zamieścić w raporcie.

Obserwacje należy powtórzyć dla sygnału trójkątnego oraz sinusoidalnego.

Podpunkty a) i b) należy powtórzyć dla wariantów 2 i 3.

3.4. Zawartość raportu z przebiegu ćwiczenia

Laboratorium podstaw elektroniki SK2A – Ćw. 3 Zastosowanie wzmacniacza operacyjnego – układy liniowe					
Rodzaj studiów:	Stacjonarne		Kierunek studiów:	Elektrotechnika	
Grupa dziekańska:		Data i godzina:		Nr zespołu:	
Skład zespołu:					

1. Wzmacniacz odwracający fazę (ang. Inverting Amplifier).

a) Charakterystyki układu

(miejsce na wklejenie charakterystyk, oba warianty na jednym układzie współrzędnych)

b) Przebieg wejściowy i wyjściowy układu

(miejsce na wklejenie przebiegów)

Wnioski

Tabele z arkusza kalkulacyjnego

2. Wzmacniacz odwracający fazę (ang. Noninverting Amplifier).

a) Charakterystyki układu

(miejsce na wklejenie charakterystyk, oba warianty na jednym układzie współrzędnych)

b) Przebieg wejściowy i wyjściowy układu

(miejsce na wklejenie przebiegów)

Wnioski

Tabele z arkusza kalkulacyjnego

3. Wtórnik napięcia (ang. Voltage Follower)

a) Charakterystyki układu

(miejsce na wklejenie charakterystyk, oba warianty na jednym układzie współrzędnych)

b) Przebieg wejściowy i wyjściowy układu

(miejsce na wklejenie przebiegów)

Wnioski

Tabele z arkusza kalkulacyjnego

4. Wzmacniacz różnicowy (ang. Differential Amplifier)

a) Charakterystyki układu

(miejsce na wklejenie charakterystyk, oba warianty na jednym układzie współrzędnych)

b) Przebieg wejściowy i wyjściowy układu

(miejsce na wklejenie przebiegów)

Wnioski

Tabele z arkusza kalkulacyjnego

5. Wzmacniacz różnicowy (ang. Differential Amplifier)

a) Eksperymentalne i teoretyczne wyznaczenie stałej całkowania τ_{theo} .

N	Parametr		Pomiar							Obliczenia		
	$R1$ [Ω]	$C1$ [μF]	$V1_{(pp)}$ [V]	$V2_{(pp)}$ [V]	Δt [μs]	V_{in1} [V]	V_{in2} [V]	V_{out1} [V]	V_{out2} [V]	τ_{theo} [μs]	τ_{exp} [μs]	Error [%]
1												
2												
3												

Obliczenia:

b) Przebieg wejściowy i wyjściowy układu

1) $R1 = \dots\dots\dots$, $C1 = \dots\dots\dots$,

przebieg prostokątny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg trójkątny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg sinusoidalny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

2) $R1 = \dots\dots\dots$, $C1 = \dots\dots\dots$,

przebieg prostokątny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg trójkątny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg sinusoidalny

(miejsce na wklejenie przebiegów)

3) $R1 = \dots\dots\dots$, $C1 = \dots\dots\dots$,
przebieg prostokątny
(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg trójkątny
(miejsce na wklejenie przebiegów)

przebieg sinusoidalny
(miejsce na wklejenie przebiegów)

Wnioski

3.5. Przykładowe pytania sprawdzające

- Proszę narysować schemat jednego z układów realizowanych na laboratorium
- Proszę narysować odpowiedź układu (wybranego przez prowadzącego) na zadany sygnał trójkątny/prostokątny/sinusoidalny
- Proszę wymienić cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego
- Proszę napisać czym jest i od czego zależy wartość napięcia nasycenia wzmacniacza operacyjnego
- Proszę krótko opisać jeden z parametrów (wybrany przez prowadzącego) wzmacniacza operacyjnego
- Proszę podać zastosowanie wybranego przez prowadzącego układu wzmacniacza operacyjnego
- Proszę wymienić sposobyysterowania wzmacniacza operacyjnego
- Proszę narysować aproksymowaną i rzeczywistą charakterystykę wzmacniacza operacyjnego
- Proszę narysować uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego
- Proszę podać wzmocnienie podanego układu dla danych wartości rezystancji
- Proszę zaproponować wartości rezystorów tak, aby uzyskać podane wzmocnienie

Odpowiedzi na pytania znajdują się w rozdziałach 3.1 oraz 3.2.