

Wzmacniacze operacyjne

Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest badanie podstawowych układów pracy wzmacniaczy operacyjnych.

Wymagania

1. Zasada działania wzmacniacza operacyjnego.
2. Ujemne sprzężenie zwrotne.
3. Parametry wzmacniacza: wzmocnienie, pasmo, oporność wejściowa i wyjściowa, itp.
4. Działanie wzmacniacza odwracającego.
5. Działanie wzmacniacza nieodwracającego.
6. Działanie wzmacniacza całkującego (integratora).
7. Działanie wzmacniacza sumującego (sumator analogowy).
8. Działanie wzmacniacza różniczkującego.

Wstęp

Między zwykłym wzmacniaczem a wzmacniaczem operacyjnym nie ma w zasadzie różnicy, oba służą do wzmacniania napięć lub mocy. O ile jednak sposób działania zwykłego wzmacniacza zależy od jego budowy wewnętrznej, o tyle wzmacniacz operacyjny jest pomyślany tak, aby jego sposób działania zależał głównie od zewnętrznych obwodów sprzężenia zwrotnego. W tym celu wzmacniacze operacyjne mają stałoprądowe sprzężenie między stopniami i spoczynkowy potencjał na wejściu i wyjściu równy zero. Wzmacniacze te mają duże wzmocnienie napięciowe, dużą rezystancję wejściową i małą rezystancję wyjściową.

Idealny wzmacniacz operacyjny powinien charakteryzować się następującymi właściwościami:

- nieskończenie dużym wzmocnieniem 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,
- wzmocnieniem idealnie różnicowym, tzn. nieskończenie dużym współczynnikiem tłumienia sygnału nieróżnicowego (definicję tego współczynnika podano w dalszej części opracowania),
- zachowaniem powyższych właściwości przy zmianach temperatury.

W tabeli poniżej przedstawiono typowe parametry scalonych wzmacniaczy operacyjnych bez zewnętrznych elementów przy zasilaniu napięciem $\pm 15V$.

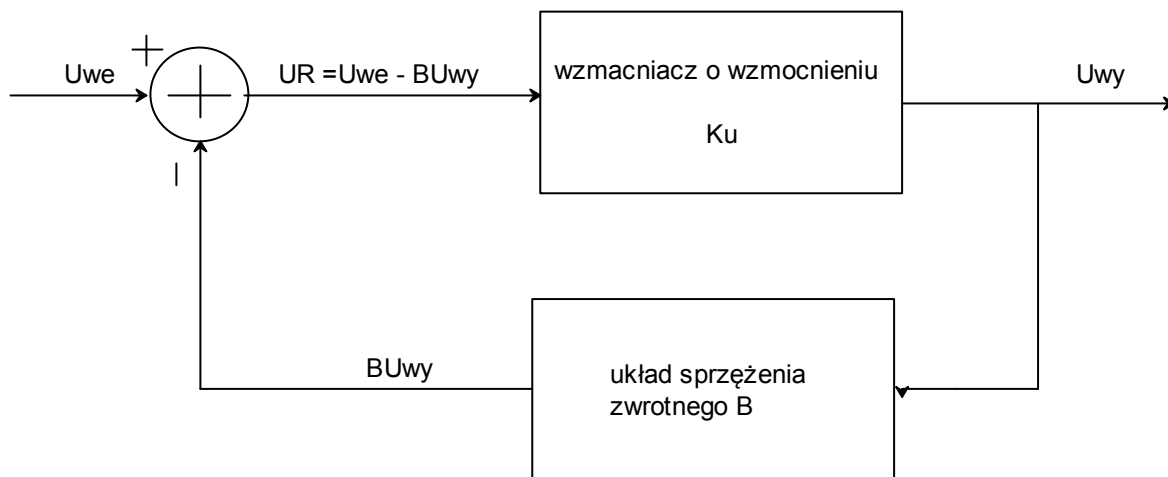
Ujemne sprzężenie zwrotne

Podstawowy układ wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym jest przedstawiony na rysunku 1. Część napięcia wyjściowego jest podawana powrotem do wejścia. Jeżeli napięcie sprzężenia zwrotnego jest odejmowane od napięcia wejściowego to mówimy o *ujemnym sprzężeniu zwrotnym*, jeżeli jest

Parametr	Symbol	Wzmacniacze standardowe		Wzmacniacze specjalne	
		μA 741 (bipolarny)	TL 051 (FET)	OP 177 (dokładny)	EL 2038 (szybki)
Wzmocnienie różnicowe	k_{ur}	10^5	$2 \cdot 10^5$	10^7	$2 \cdot 10^4$
Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego	$CMRR$	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	10^7	$3 \cdot 10^4$
Rezystancja wejściowa różnicowa	r_r	$10^6 \Omega$	$10^{12} \Omega$	$5 \cdot 10^7 \Omega$	$10^4 \Omega$
Rezystancja wejściowa wspólna	r_s	$10^9 \Omega$	$10^{14} \Omega$	$2 \cdot 10^{11} \Omega$	$10^7 \Omega$
Wejściowy prąd polaryzacji	I_B	80 nA	5 pA	1 nA	5 μA
Wejściowe napięcie niezrównoważenia	U_O	1 mV	0,5 mV	10 μV	0,5 mV
Temperaturowy współczynnik wejściowego napięcia niezrównoważenia	$\Delta U_O / \Delta \vartheta$	6 $\mu\text{V/K}$	10 $\mu\text{V/K}$	0,1 $\mu\text{V/K}$	20 $\mu\text{V/K}$
Maksymalne napięcie wspólne	U_{Smax}	$\pm 13 \text{ V}$	+14,5 V -12 V	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 12 \text{ V}$
Maksymalne napięcie wyjściowe	U_{WYmax}	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 13 \text{ V}$	$\pm 14 \text{ V}$	$\pm 12 \text{ V}$
Maksymalny prąd wyjściowy	I_{WYmax}	$\pm 20 \text{ mA}$	$\pm 20 \text{ mA}$	$\pm 20 \text{ mA}$	$\pm 50 \text{ mA}$
Rezystancja wyjściowa	r_{wy}	1 k Ω	100 Ω	60 Ω	30 Ω
Prąd zasilania	I_{ZZ}	1,7 mA	1,4 mA	1,6 mA	13 mA
Trzydecybelowa częstotliwość graniczna	f_g	10 Hz	30 Hz	0,06 Hz	50 kHz
Pole wzmocnienia	f_T	1 MHz	3 MHz	0,6 MHz	1 GHz
Maksymalna szybkość zmian sygnału na wyjściu	dU_{WY}/dt	0,6 V/ μs	18 V/ μs	0,3 V/ μs	1000 V/ μs
Szerokość pasma przenoszenia mocy	f_P	10 kHz	290 kHz	5 kHz	16 MHz

Tabela 1.

dołączane to o dodatnim sprzężeniu zwrotnym. W dalszych rozważaniach zajmiemy się tylko ujemnym sprzężeniem zwrotnym.



Rys. 1. Zasada ujemnego sprzężenia zwrotnego.

W celu jakościowego zbadania układu z rysunku 1. założymy, że napięcie wyjściowe skacze od zera do pewnej dodatniej wartości U_{WE} . W pierwszej chwili napięcie U_{wy} a zatem i napięcie βU_{wy} jest jeszcze równe zero. Na wejściu wzmacniacza wystąpi więc napięcie $U_R = U_{WE}$, ponieważ napięcie to zostaje wzmacnione z dużym dodatnim współczynnikiem wzmacnienia k_{ur} , wobec tego napięcie U_{wy} szybko wzrasta w kierunku dodatnim, a wraz z nim także βU_{wy} . Powoduje to zmniejszenie napięcia U_R . Fakt przeciwdziałania zmianom napięcia wejściowego przez zmiany napięcia wyjściowego jest charakterystyczny dla ujemnego sprzężenia zwrotnego. Można stąd wnioskować, że ustali się jakiś stabilny stan końcowy. Osiągnięty zostanie on wówczas, gdy napięcie wyjściowe wzrośnie na tyle, że zostanie spełniony warunek

$$U_{wy} = k_{ur} U_R = k_{ur}(U_{WE} - \beta U_{wy})$$

Po rozwiązaniu względem U_{wy} otrzymamy

$$k_{uf} = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{k_{ur}}{1 + \beta k_{ur}} \quad 1.$$

Przejdźcie do granicy dla $\beta k_{ur} \gg 1$ daje wzór na wzmacnienie układu z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

$$k_{uf} \approx \frac{1}{\beta} \quad 2.$$

Przy tych założeniach wzmacnienie zależy tylko od zewnętrznych obwodów sprzężenia zwrotnego, a nie zależy od wzmacniacza.

W najprostszym przypadku obwód sprzężenia zwrotnego składa się z dzielnika napięcia. Układ pracuje wówczas jako liniowy wzmacniacz, a jego wzmacnienie zależy tylko od podziału dzielnika. Jeśli w układzie sprzężenia zastosuje się układ RC to powstaje filtr aktywny. Można stosować też nieliniowe elementy w sprzężeniu jak np. diody czy tranzystory i w ten sposób realizować np. logarytmowanie czy potęgowanie.

Cechy idealnego i rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego

idealny w.o.	rzeczywisty w.o.
<ul style="list-style-type: none"> - nieskończenie duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($K_U \rightarrow \infty$); - nieskończenie szerokie pasmo przenoszonych częstotliwości; - nieskończenie dużą impedancję wejściową (zarówno między wejściami, jak i między każdym wejściem a masą); - impedancja wyjściowa równa zeru; - wejścia wzmacniacza nie pobierają żadnego prądu z obwodów zewnętrznych; 	<ul style="list-style-type: none"> - współczynnik wzmocnienia przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego osiąga b. duże, ale określone skończone wartości. W typowych układach $K=10^4-10^7$. W specjalistycznych do 10^{10}. - górną granicą pasma przenoszonych częstotliwości są wartości kilkudziesięciu MHz - impedancja wejściowa może posiadać wartość z przedziału $10^4-10^{13} \Omega$ - impedancja wyjściowa jest niewielka, z reguły kilkadziesiąt Ω - prąd wejściowy jest niezerowy (to tzw. prąd polaryzacji), może on przyjmować wartości rzędu $10^{-4}-10^{-15} A$
<ul style="list-style-type: none"> - napięcie wyjściowe równe zeru przy równości napięć na obydwu wejściach (tzn. $U_{WY} = 0$ gdy napięcia wejściowe $U_1=U_2$) - wzmocnienie idealnie różnicowe, tzn. $U_{WY}=K_U(U_2 - U_1)$ - nieskończenie duża szybkość narastania napięcia wyjściowego; - nieskończenie duży dopuszczalny prąd wyjściowy; - nieograniczony zakres zmian napięcia wyjściowego; - niezależność parametrów od temperatury, - brak efektów starzenia (czyli parametry wzmacniacza nie zmieniają się wraz z czasem użytkowania), - brak szumów własnych (zakłóceń własnych) 	<ul style="list-style-type: none"> - wzmocnienie rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego nie jest idealnie różnicowe - szybkość narastania napięcia wyjściowego w typowych wzmacniaczach jest rzędu kilku, kilkudziesięciu V/μS - napięcie wyjściowe jest ograniczone – zwykle mniejsze o 1-2 V od napięcia zasilania (rys 20 w pkt. 10) - właściwości wzmacniaczy zależne są od temperatury (tabela 2), zmieniają się wraz z czasem użytkowania - wzmacniacze wytwarzają zakłócenia własne

Tabela 2. Porównanie parametrów idealnego i rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego.

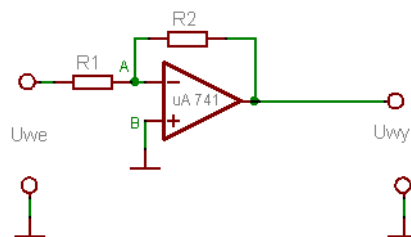
W kolejnej tabeli przedstawiono podstawowe parametry jakimi powinien charakteryzować się wzmacniacz idealny w zestawieniu z parametrami masowo produkowanego i najpowszechniej

stosowanego wzmacniacza μA 741 firmy FAIRCHILD (odpowiednik polski ULY 7741N) oraz z typowymi przedziałami wartości parametrów obecnie używanych wzmacniaczy operacyjnych.

...		Wzmacniacz idealny	μA 741	Inne WO
Współczynnik wzmocnienia napięciowego K_U	V/V	$\rightarrow \infty$	10^5	$10^4 \dots 10^7$ (specjalistyczne 10^{10})
Impedancja wejściowa różnicowa	M Ω	$\rightarrow \infty$	1-2	$0,05 \dots 10^4$
Rezystancja wejściowa sumacyjna (rezystancja pomiędzy wejściami)	M Ω	$\rightarrow \infty$		10-100
Impedancja wyjściowa	Ω	$\rightarrow 0$	75	50...200
Częstotliwość graniczna f_T	MHz	$\rightarrow \infty$	1	1...100
Szybkość narastania napięcia wyjściowego	V/ μ S	$\rightarrow 0$	0,5	do 100 (np. LH0063C - 6000 V/ μ S)
Prąd wejściowy	nA	$\rightarrow 0$	80	najniższe 0,01 pA
Współczynnik temperaturowy napięcia wejściowego niezrównoważenia	μ V/ $^\circ$ C	$\rightarrow 0$	7	5-20

Tabela 3. Porównanie parametrów wzmacniacza μA 741 ze wzmacniaczem idealnym i innymi wzmacniaczami operacyjnymi.

Wzmacniacz odwracający



Rys. 2. Wzmacniacz odwracający

Rysunek 2) przedstawia schemat wzmacniacza odwracającego. Sygnał wejściowy przez rezystor R_1 zostaje doprowadzony do wejścia odwracającego. Do tego samego wejścia przez rezystor R_2 doprowadza się z wyjścia napięcie ujemnego sprzężenia zwrotnego. Wejście nieodwracające zostaje uziemione.

Analiza powyższego układu: 1) Wejście wzmacniacza operacyjnego nie pobiera żadnego prądu (jego impedancja wejściowa jest bardzo duża). Dlatego prąd o natężeniu I_1 płynący przez opornik R_1 musi być kompensowany prądem I_2 płynącym przez opornik R_2 :

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$\frac{U_{WE} - U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{WY} - U_{AB}}{R_2} = 0$$

2) Wzmacniacz operacyjny jest skonstruowany tak, że jego obwód wyjściowy stara się zrobić wszystko co konieczne, aby różnica napięć pomiędzy wejściami A i B była równa zero.
 -> Jeżeli punkt B dołączony jest do masy, potencjał punktu A jest również zerowy. (punkt A nazywany jest punktem masy pozornej)

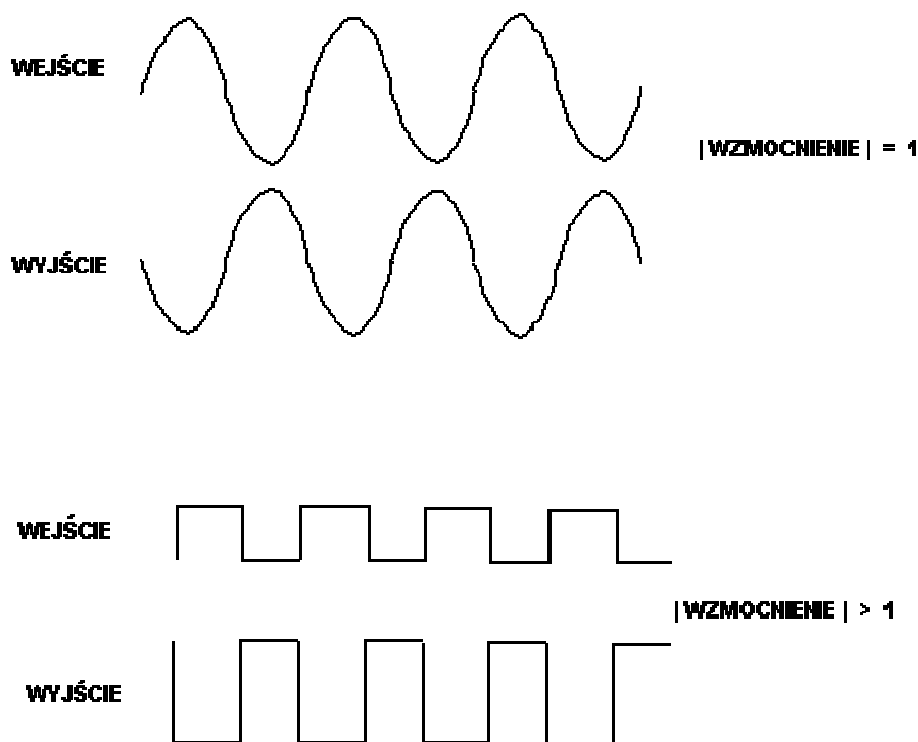
$$U_{AB} = 0$$

Uwzględniając punkty 1) i 2) mamy:

$$\frac{U_{WE}}{R_1} = -\frac{U_{WY}}{R_2}$$

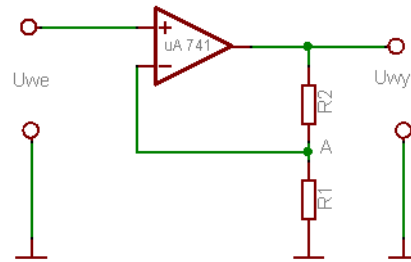
$$U_{WY} = -\frac{R_2}{R_1} U_{WE}$$

Niekorzystną cechą przedstawionego układu - wzmacniacza odwracającego fazę - jest mała wartość impedancji wejściowej równa rezystancji R_1 .



Rys. 3 Przykładowe przebiegi na wejściu i na wyjściu wzmacniacza odwracającego

Wzmacniacz nieodwracający fazy



Rysunek 4. Wzmacniacz nieodwracający.

Prowadząc analizę jak poprzednio:

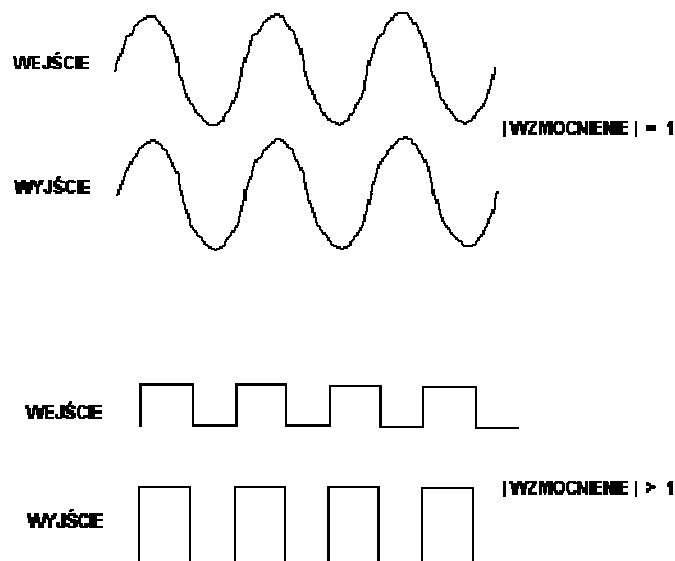
$$1) \quad \frac{U_A}{R_1} = \frac{U_{WY}}{R_1 + R_2}$$

$$2) \quad U_{WY} = U_{WE} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Na podstawie 1) i 2):

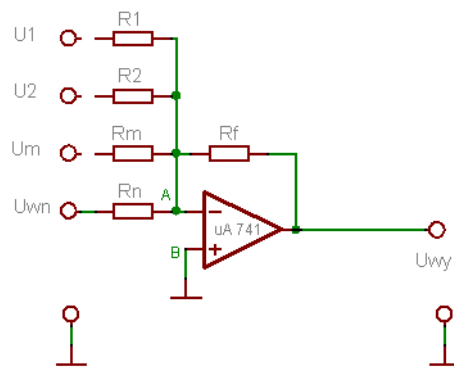
$$U_{WY} = U_{WE} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Układ wzmacniacza nieodwracającego charakteryzuje się bardzo dużą wartością impedancji wejściowej, praktycznie równą impedancji wejściowej zastosowanego wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 5 Przykładowe przebiegi na wejściu i na wyjściu wzmacniacza nieodwracającego

Wzmacniacz sumujący (sumator analogowy)



Rys. 6 Wzmacniacz sumujący - schemat układu.

Wzmacniacz sumujący (rys. 6) jest specjalnym przypadkiem wzmacniacza odwracającego fazę. Analizując układ analogicznie jak poprzednio :

- 1) $I_1 + I_2 + \dots + I_n + I_f = 0$
- 2) $U_{AB} = 0$

Na podstawie 1) i 2):

$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} + \frac{U_{wy}}{R_f} = 0$$

Stąd:

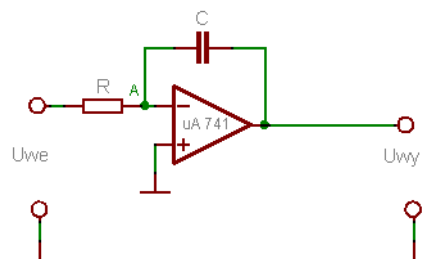
$$U_{wy} = -R_f \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

W szczególnym przypadku zaś:

$$\begin{aligned} R_1 = R_2 = \dots = R_n = R_f \\ U_{wy} = - (U_1 + U_2 + \dots + U_n) \end{aligned}$$

W tym ostatnim przypadku napięcie wyjściowe układu jest sumą algebraiczną napięć wejściowych.

Wzmacniacz całkujący (integrator)



Rys. 7. Wzmacniacz całkujący - schemat układu.

Analiza tak jak w przypadku układu wzmacniacza odwracającego:

- 1) $I_1 + I_2 = 0$ (w punkcie A)
- 2) $U_A = 0$

Na podstawie 1) i 2) :

$$\frac{U_{WE}}{R} + C \frac{dU_{WY}}{dt} = 0$$

$$U_{WY} = -\frac{1}{RC} \int U_{WE} dt + U_0$$

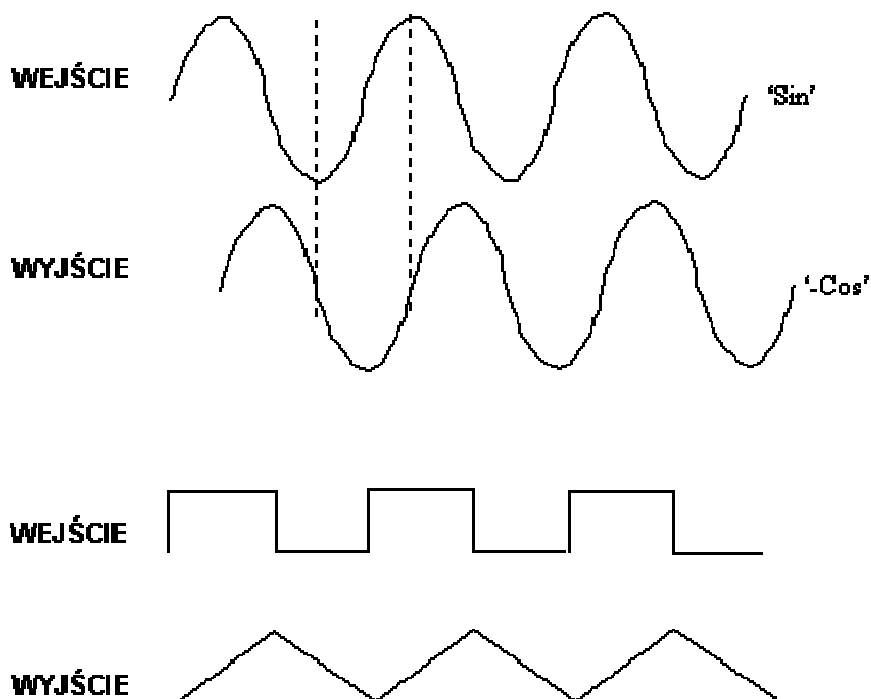
gdzie U_0 - jest stałą (jest to napięcie U_{WY} w chwili $t = 0$).

Przykład zastosowania:

W szczególnym przypadku, gdy napięcie wejściowe jest stałe ($U_{WE} = \text{const.}$) oraz $U_0 = 0$ w chwili $t = 0$, napięcie wyjściowe układu opisuje zależność:

$$U_{WY} = -\frac{U_{WE}}{RC} \cdot t$$

I tak sterowany wzmacniacz całkujący staje się generatorem liniowo narastającego napięcia.



Rys. 8. Przykładowe przebiegi na wejściu i na wyjściu wzmacniacza całkującego

Zadania pomiarowe

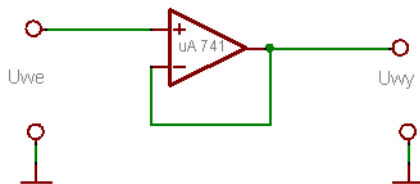
1. Pomiar charakterystyki amplitudowo częstotliwościowej (charakterystyki Bodego) układu odwracającego. Do wejścia wzmacniacza i wejścia pierwszego kanału oscyloskopu podłączyć przebieg sinusoidalny o amplitudzie 10 mV. Drugi kanał oscyloskopu podłączyć do wyjścia wzmacniacza, dokonać pomiarów dla wzmocnienia 10, 100 i 1000. Wyniki zanotować w tabeli a następnie przedstawić w skali logarytmicznej na wspólnym wykresie. Porównać wartość wzmocnienia z wyznaczoną teoretycznie. Jaki wpływ ma wzmocnienie układu na pasmo przenoszenia.

Częstotliwość w kHz	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	50	100	200	300
U_{wy} w mV										
U_{wy}/U_{we}										
K_u w dB										

2. Pomiar charakterystyki amplitudowo częstotliwościowej (charakterystyki Bodego) układu nieodwracającego. Do wejścia wzmacniacza i wejścia pierwszego kanału oscyloskopu podłączyć przebieg sinusoidalny o amplitudzie 10 mV. Drugi kanał oscyloskopu podłączyć do wyjścia wzmacniacza, dokonać pomiarów dla wzmocnienia 10, 100 i 1000. Wyniki zanotować w tabeli a następnie przedstawić w skali logarytmicznej na wspólnym wykresie. Porównać wartość wzmocnienia z wyznaczoną teoretycznie. Jaki wpływ ma wzmocnienie układu na pasmo przenoszenia.

Częstotliwość w kHz	0,01	0,02	0,05	0,1	0,2	50	100	200	300
U_{wy} w mV										
U_{wy}/U_{we}										
K_u w dB										

3. Zbudować układ wtórnika napięciowego przedstawionego na rysunku poniżej. Zmierzyć szybkość narastania impulsu. W tym celu na wejście wzmacniacza podać fale prostokątną o możliwie dużej amplitudzie i częstotliwości większej niż 10 kHz. Obserwować impulsy



wyjściowe na ekranie oscyloskopu. Zarejestrować ten

przebieg, wyznaczyć czas narastania impulsu. Z badać pasmo przenoszenia tego wzmacniacza. Wyniki porównać z uzyskanymi w punktach 1 i 2.

4. Zrealizować układ z rysunku 7. Wyznaczyć charakterystyką częstotliwościową, porównać ja z uzyskanymi wcześniej. Podać na wejście impuls prostokątny o częstotliwości 1kHz, 10kHz i 100kHz i zarejestrować obserwowane przebiegi. Jaki wniosek można wysnuć z obserwacji.
5. Zrealizować układ z rysunku 6. Sumowanie sygnału przeprowadzić dla napięcia 0,1V dla opornika w sprzężeniu równego $1M\Omega$ i oporników wejściowych $10k\Omega$ i $100k\Omega$. Sprawdzić poprawność sumowania.

