

Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny**Cel ćwiczenia:**

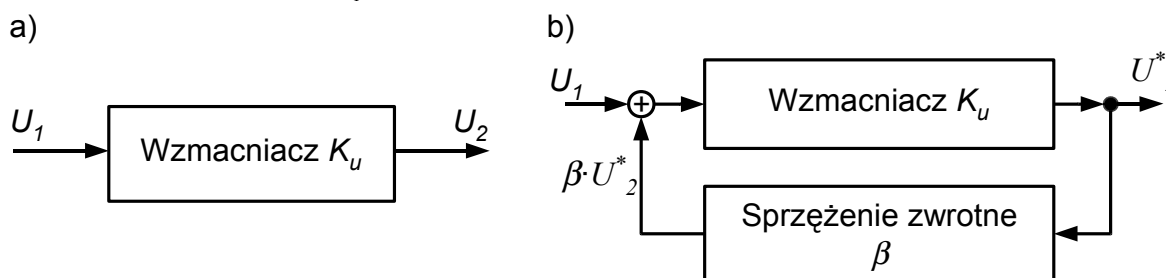
Praktyczne poznanie podstawowych parametrów wzmacniaczy operacyjnych oraz ich możliwości i ograniczeń. Wyznaczenie charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej wzmacniacza operacyjnego.

Wprowadzenie**1. Sprzężenie zwrotne**

Sprzężenie zwrotne w układach elektronicznych polega na doprowadzeniu części sygnału wyjściowego z powrotem do wejścia. Część sygnału wyjściowego, zwana **sygnałem zwrotnym**, zostaje skierowana do wejścia układu i zsumowana z sygnałem wejściowym, wskutek czego ulegają zmianie warunki sterowania układu.

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza bez sprzężenia zwrotnego jest równe stosunkowi napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego (rys.1a).

$$K_u = \frac{U_2}{U_1} \quad \text{gdzie: } K_u - \text{wzmocnienie otwartej pętli.} \quad (1.1)$$



Rys.1. Układy blokowe wzmacniaczy a) bez sprzężenia zwrotnego b) ze sprzężeniem zwrotnym

Przy dołączeniu pętli sprzężenia zwrotnego (rys.1.b) całkowite napięcie wejściowe składa się z sygnału początkowego U_1 oraz części β sygnału wyjściowego doprowadzonego z powrotem na wejście. Suma tych sygnałów zostaje wzmocniona przez wzmacniacz K_u razy, a na wyjściu powstaje napięcie wyjściowe U_2^* , które możemy opisać następująco:

$$U_2^* = (U_1 + \beta U_2^*) K_u \quad (1.2)$$

Po przekształceniu równania (1.2) otrzymujemy:

$$\frac{U_2^*}{U_1} = \frac{K_u}{1 - \beta \cdot K_u} \quad (1.3)$$

Stosunek $\frac{U_2^*}{U_1}$ stanowi wypadkowe wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym (wzmocnienie zamkniętej pętli) i oznaczany jest przez K_u^* .

2. Ujemne sprzężenie zwrotne

Ujemne sprzężenie zwrotne polega na doprowadzeniu sygnału z wyjścia układu z powrotem do jego wejścia w taki sposób aby „skasować” część sygnału wejściowego, co powoduje zmniejszenie wzmocnienia wzmacniacza. Wynika to z faktu, iż w układzie z ujemnym sprzężeniem zwrotnym doprowadzona na wejście część sygnału wyjściowego ma przeciwną fazę niż napięcie wejściowe, a więc odejmuje się od napięcia wejściowego. W przypadku ujemnego sprzężenia zwrotnego znak współczynnika β jest ujemny. W związku z tym wyrażenie (1.3) ulega modyfikacji i przyjmuje następującą postać:

Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny

$$K_u^* = \frac{K_u}{1 + \beta \cdot K_u} \quad (2.1)$$

Prawdą jest, że ujemne sprzężenie zwrotne powoduje zmniejszenie wzmocnienia, ale w zamian otrzymuje się poprawę innych parametrów, a w szczególności:

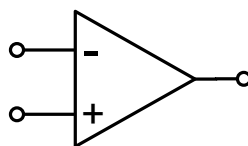
- poprawia się stabilność wzmocnienia (układ jest mniej wrażliwy np. na wahania napięć zasilających i zmianę temperatury),
- zmniejszają się szумы i zniekształcenia (tak liniowe, jak i nieliniowe),
- zwiększa się górna częstotliwość graniczna (czyli ulega poszerzeniu pasmo),
- możliwe jest kształtowanie charakterystyki częstotliwościowej,
- możliwa jest modyfikacja impedancji wejściowej i wyjściowej.

3. Dodatnie sprzężenie zwrotne

Sprężenie zwrotne nazywamy dodatnim gdy faza napięcia zwrotnego doprowadzonego z wyjścia do wejścia układu jest zgodna z fazą napięcia wejściowego. Oznacza to, że współczynnik β jest dodatni, a wzmocnienie układu z dodatnim sprzężeniem zwrotnym jest opisane zależnością (1.3). Tego typu sprzężenie znajduje zastosowanie np. do konstruowania generatorów, ale stosuje się je rzadko ze względu na m.in. możliwość wytwarzania niepożądanych drgań.

4. Wzmacniacze operacyjne

Wzmacniaczem operacyjnym nazywamy różnicowy wzmacniacz prądu stałego o bardzo dużym wzmocnieniu i niesymetrycznych wyjściach, przeznaczony do pracy z układem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Powszechnie stosowany symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego

Konwencjonalny wzmacniacz ma 2 zaciski wejściowe i 1 zacisk wyjściowy. Jeżeli zacisk oznaczony „+” jest uziemiony, a sygnał wejściowy zostanie doprowadzony do zacisku „-” to następuje odwrócenie fazy między wejściem a wyjściem, zatem wejście oznaczone symbolem „-” oznacza **wejście odwracające** wzmacniacza operacyjnego. Przeciwnie, jeżeli uziemiony jest zacisk „-”, a sygnał doprowadzony jest do zacisku „+” to nie następuje odwrócenie fazy między wejściem a wyjściem i zacisk „+” nazywany jest **wejściem nieodwracającym** wzmacniacza operacyjnego. Na graficznym symbolu wzmacniacza zazwyczaj nie oznacza się wyprowadzeń napięć zasilających. Zarówno we wzmacniaczu operacyjnym jak i w symbolu graficznym nie ma wyprowadzeń masy.

Podstawową funkcją wzmacniacza jest wzmocnienie sygnału, przy zachowaniu nie zmienionego jego kształtu. Wzmocnienie to odbywa się kosztem energii doprowadzonej z pomocniczego źródła napięcia stałego. Podstawowym parametrem wzmacniacza jest wzmocnienie (K_u), określane jako stosunek sygnału wyjściowego do wejściowego.

Cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego:

- nieskończenie duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($K \rightarrow \infty$),
- nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości,
- nieskończenie duża impedancja wejściowa, zarówno między wejściami, jak i między każdym z wejść, a ziemią,
- impedancja wyjściowa równa zero,
- napięcie wyjściowe równe zero przy równości napięć wejściowych ($U_{wy} = 0$ przy $U_{we1} = U_{we2}$),
- nieskończenie duży dopuszczalny prąd wyjściowy,
- zerowy prąd wejściowy,

Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny

- wzmocnienie idealnie różnicowe, tzn. nieskończenie duży współczynnik tłumienia sygnału nieróżnicowego,
- zachowanie powyższych właściwości przy zmianach temperatury.

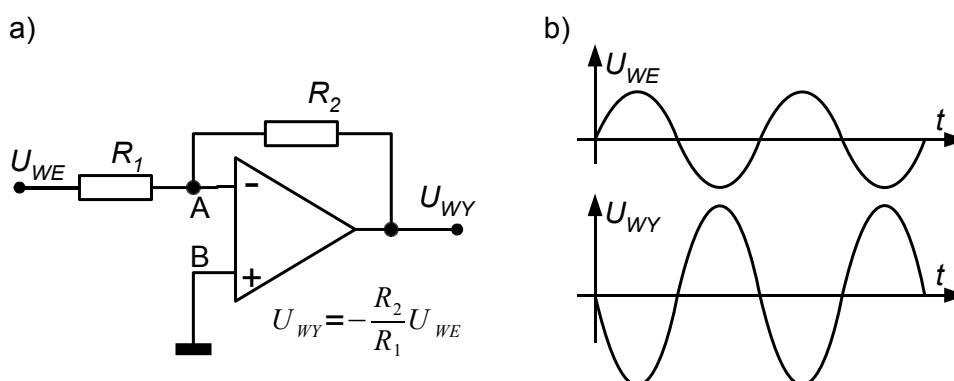
5. Podstawowe układy ze wzmacniaczami operacyjnymi

Do podstawowych układów pracy wzmacniacza operacyjnego zalicza się :

- wzmacniacz odwracający fazę,
- wzmacniacz nieodwracający,
- wzmacniacz odejmujący,
- wzmacniacz sumujący,
- wzmacniacz całkujący,
- wzmacniacz różniczkujący,
- wtórnik napięciowy,
- konwerter prąd-napięcie,
- przesuwnik fazy.

5.1. Wzmacniacz odwracający fazę

Rys. 3 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 (najczęściej przez odpowiednio dobrany rezystor). Rezystory R_1 i R_2 stanowią obwód sprzężenia zwrotnego.



Rys. 3. a) schemat wzmacniacza odwracającego fazę, b) przykładowe przebiegi na wejściu i na wyjściu

Podstawowymi założeniami przy realizacji wzmacniacza o strukturze przedstawionej na rys.3 są: wzmocnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego ma nieskończenie dużą wartość ($K_u = \infty$) i wartości prądów wpływających do wejścia wzmacniacza są do pominięcia (równe zero). Prąd o natężeniu I_1 płynący przez opornik R_1 musi więc być kompensowany prądem I_2 płynącym przez opornik R_2 :

$$I_1 + I_2 = 0 \quad (5.1.1)$$

$$\frac{U_{WE} - U_{AB}}{R_1} + \frac{U_{WY} - U_{AB}}{R_2} = 0 \quad (5.1.2)$$

Obwód wyjściowy wzmacniacza 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).

$$U_{AB} = 0 \quad (5.1.3)$$

Na podstawie równania 5.1.2 mamy:

$$\frac{U_{WE}}{R_1} = -\frac{U_{WY}}{R_2} \quad (5.1.4)$$

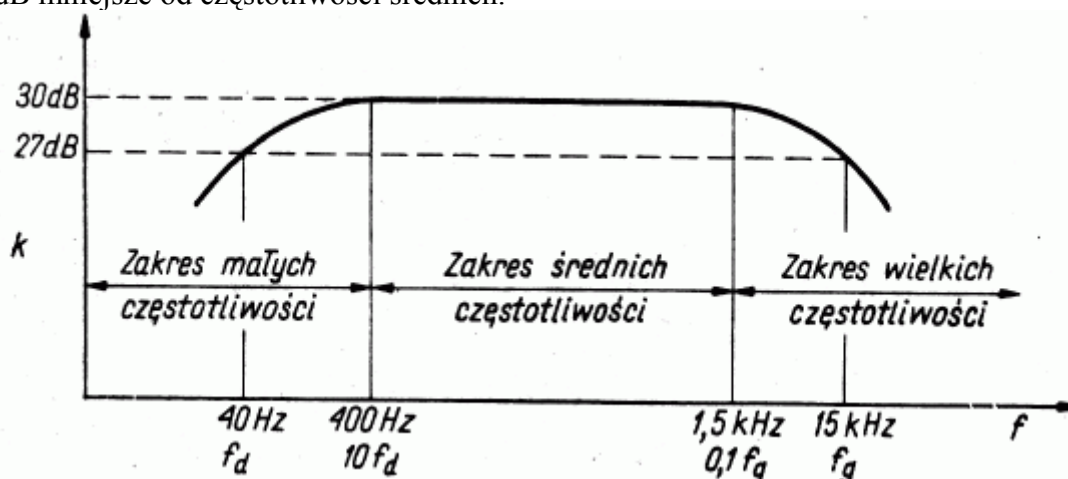
Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny

$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} U_{we} \quad (5.1.5)$$

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

6. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wzmacniacza

Z charakterystyki amplitudowej wzmacniacza (wykresu wzmocnienia wzmacniacza w zależności od częstotliwości sygnału wejściowego – rys. 4) określa się częstotliwości graniczne przenoszenia: górną (f_g) i dolną (f_d). Są to takie wartości częstotliwości, przy których wzmocnienie wzmacniacza jest o 3 dB mniejsze od częstotliwości średnich.



Rys. 4. Przykładowa charakterystyka amplitudowa – częstotliwościowa wzmacniacza

Szerokość pasma wzmacniacza (B) definiuje się jako różnicę częstotliwości między dwoma punktami charakterystyki, dla których wzmocnienie jest o 3 dB niższe niż przy częstotliwościach średnich:

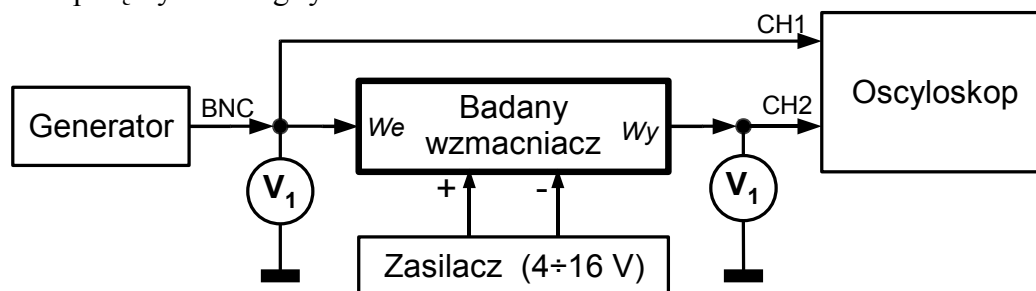
$$B = f_g - f_d \quad (6.1)$$

Malenie wzmocnienia przy małych częstotliwościach powodowane jest wzrostem reaktancji kondensatorów sprzęgających i emiterowych wzmacniacza. W zakresie dużych częstotliwości charakterystyka opada ze względu na malenie ze wzrostem częstotliwości wzmocnienia tranzystorów, a także z powodu istnienia w układzie pojemności montażowych i pasożytniczych. W środkowej części charakterystyki wzmocnienie praktycznie nie zależy od częstotliwości. W tym przedziale zmian częstotliwości nazywanym zwyczajowo zakresem średnich częstotliwości, można traktować wzmacniacz jako układ bez ograniczeń częstotliwościowych.

Program ćwiczenia

1. Budowa układu pomiarowego:

- a. Układ połączyć według rys.5.



Rys.5. Schemat blokowy układu do badania sygnałów przekształconych przez wzmacniacz.

Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny

- Ustawić napięcie zasilające w zakresie 4÷16V, np. $U_Z=10,5V$ (nastawa skokowa na makiecie zasilacza).
- Za pomocą generatora ustawić parametry sygnału wejściowego: $U_{WE}=1V$ (amplituda), $f=1kHz$.
- Ustawić wzmocnienie $K_u=10$ za pomocą zworki Z_3 na makiecie wzmacniacza.
- Uzyskać stabilny obraz obu sygnałów (U_{WE} i U_{WY}) na ekranie oscyloskopu.
- W celu pomiaru wartości skutecznej napięcia (U_{WE} i U_{WY}) podłączyć woltomierz napięcia zmiennego.

2. Pomiar wzmocnienia wzmacniacza i obserwacja pracy wzmacniacza w warunkach przesterowania.

- Wygenerować sygnał sinusoidalny o częstotliwości f w zakresie 1÷10 kHz.
- Zmierzyć wartość sygnału na wyjściu wzmacniacza (U_{WY}) dla trzech różnych wartości napięć wejściowych (U_{WE}) i policzyć wzmocnienie dla tych trzech przypadków zgodnie ze wzorem:

$$K_u = \frac{U_{WY}}{U_{WE}}$$

Wyniki zapisać w tabeli nr 1. Pomiaru napięć dokonywać za pomocą woltomierza napięcia zmiennego. Na oscyloskopie obserwować zmiany napięcia wyjściowego (U_{WY}).

- Zmienić napięcie wejściowe w taki sposób aby zaobserwować zniekształcenie sygnału wzmocnionego. Zapisać wartość U_{WE} i U_{WE} , przy którym zaobserwowano przesterowanie wzmacniacza. Narysować sygnał na wyjściu wzmacniacza (U_{WY}) i zinterpretować wynik.
- Zmienić wartość współczynnika sprzężenia zwrotnego poprzez przełożenie zworki Z_3 na makiecie wzmacniacza i powtórzyć pomiary.

3. Pomiar charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej wzmacniacza $K_u=f(f)$.

- Ustalić stałą wartość napięcia wejściowego np. $U_{WE}=100\text{ mV}$
- Zmierzyć wartość U_{WY} przy zmianach częstotliwości sygnału w zakresie 10 Hz do 1 MHz
- Obliczyć wzmocnienie K_u zgodnie ze wzorem:

$$K_u = 20 \log \frac{U_{WY}}{U_{WE}} [dB]$$

Wyniki pomiarów zapisać w tabeli 2a lub 2b. Napięcie wyjściowe policzyć zgodnie ze wzorem (pomiary napięć oscyloskopem):

$$U_{WY} = C_Y \cdot Y \left[\frac{V}{dz} \cdot dz \right]$$

- Wykreślić zależność $K_u=f(f)$. Na wykresie nanieść wartości f w skali logarytmicznej. Wyznaczyć częstotliwości graniczne przenoszenia f_d i f_g , policzyć szerokość pasma wzmacniacza.

Zadania dodatkowe

- Wygenerować sygnał prostokątny o częstotliwości $f=100\text{ kHz}$. Narysować sygnał po wyjściu ze wzmacniacza i zinterpretować uzyskany wynik.
- Zbadać wpływ napięcia zasilającego na napięcie nasycenia wzmacniacza. W tym celu zmierzyć za pomocą oscyloskopu wartość maksymalną napięcia wyjściowego przy dwóch wartościach napięcia zasilającego (nastawa skokowa na makiecie zasilacza) $U_Z=7,5V$ i $U_Z=4,5V$.

Ćwiczenie nr 12. Wzmacniacz operacyjny**Przykładowe tabele pomiarowe**

Tab.1. Pomiar napięcia wejściowego i wyjściowego wzmacniacza. Obliczenie wzmocnienia.

Lp.	U_{we}	ΔU_{we}	δU_{we}	U_{wy}	ΔU_{wy}	δU_{wy}	K_u	ΔK_u	δK_u
	[V]	[V]	[%]	[V]	[V]	[%]	[V/V]	[V/V]	[%]
1.									
2.									
3.									

Tab. 2a. Pomiar charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza (*pomiary napięć woltomierzem*).

Lp.	f	U_{we}	δU_{we}	U_{wy}	δU_{wy}	K_u	δK_u	K_u	ΔK_u
	[kHz]	[V]	[%]	[V]	[%]	[V/V]	[%]	[dB]	[dB]
1.									
2.									

Tab. 2b. Pomiar charakterystyki częstotliwościowej wzmacniacza (*pomiary napięć oscyloskopem*).

Lp.	f	C_y	Y	U_{wy}	ΔU_{wy}	δU_{wy}	δK_u	K_u	ΔK_u
	[kHz]	[V/dz]	[dz]	[V]	[V]	[%]	[%]	[dB]	[dB]
1.									
2.									

Zadania kontrolne

1. Wyjaśnić zasadę działania wzmacniacza operacyjnego
2. Jakie są podstawowe parametry idealnego wzmacniacza operacyjnego?
3. Czy wzmacniacz operacyjny może realizować operacje matematyczne? Podać przykłady.
4. Jakie są zalety i wady ujemnego sprzężenia zwrotnego?
5. Podać jak wygląda przykładowa charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa wzmacniacza i w jaki sposób się ją wyznacza.

Literatura

1. J. Chabłowski, W. Skulimowski "Elektronika w pytaniach i odpowiedziach"
2. M. Rusek, J. Pasierbiński "Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach"
3. P. Horowitz, W. Hill "Sztuka elektroniki"
6. O. Limann "Elektronika bez wielkich problemów"
7. W. Golde "Układy elektroniczne"
8. J. Porębski "Podstawy elektroniki"
9. S. Elonka, J. Bernstein "Elektronika w pytaniach i odpowiedziach"

Zestaw przyrządów pomiarowych

1. Makieta wzmacniacza TLC 271
2. Generator funkcyjny
3. Oscyloskop
4. Zasilacz DC
5. Multimetr cyfrowy METEX M3860D

Opracowały: dr inż. Magdalena Kasprowicz, dr inż. Sylwia Olsztyńska-Janus
Instytut Inżynierii Biomedycznej i Pomiarowej
Wydział Podstawowych Problemów Techniki Politechniki Wrocławskiej