

SERIA I

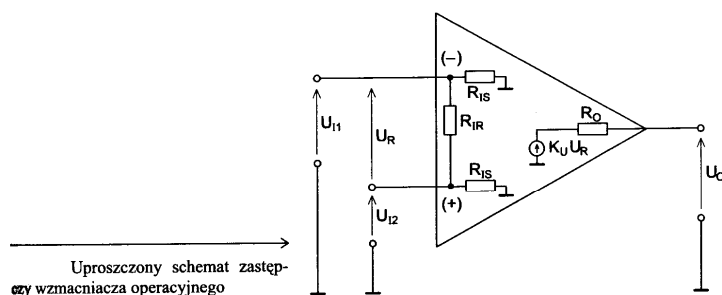
ĆWICZENIE 3

Temat ćwiczenia: Badanie układów pracy wzmacniacza operacyjnego.

Wiadomości do powtórzenia:

1. Definicja i parametry wzmacniacza operacyjnego.

Wzmacniacz operacyjny jest wielostopniowym, scalonym wzmacniaczem prądu stałego, mającym dwa wejścia: odwracające oznaczone jako „-” i nieodwracające oznaczone jako „+” oraz jedno niesymetryczne wejście. Charakteryzuje się go podając zewnętrzne parametry, zdefiniowane jednakowo dla wszystkich rozwiązań technologicznych. Dzięki temu wzmacniacz operacyjny można traktować jako pojedynczy element układu, pomimo jego złożonej struktury wewnętrznej.



Cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego:

- Nieskończenie duże wzmocnienie napięciowe w układzie z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego $K_{UR} \rightarrow \infty$ (w rzeczywistych układach $K_{UR} = 10^4 \div 10^6$ V/V; czyli $80 \div 130$ dB).
- Nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia (w rzeczywistych układach od 1 MHz do ponad 1000 MHz).
- Nieskończenie duża impedancja wejściowa różnicowa (między wejściami odwracającymi (-) i nieodwracającymi (+) oraz impedancja wejściowa sumacyjna (między jednym z wejść a masą) – od 50Ω do $50 M\Omega$ dla stopni wejściowych z tranzystorami bipolarnymi i do $10^4 M\Omega$ z tranzystorami unipolarnymi).
- Impedancja wyjściowa równa zero (w rzeczywistych układach średnio kilkadziesiąt omów).
- Prądy wejściowe równe zero (w rzeczywistych układach od ułamka nA do kilku μA).
- Nieskończenie duży współczynnik tłumienia sygnału wspólnego (w rzeczywistych układach $70 \div 120$ dB).

- Odwraca fazę sygnału wyjściowego w stosunku do sygnału podawanego na wejście odwracające (–) lub zachowuje zgodność w fazie, jeżeli sygnał wejściowy jest podawany na wejście nieodwracające (+).

Podstawowe parametry wzmacniacza rzeczywistego:

- **wzmocnienie napięciowe przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego K_{UO}** (Open Loop Voltage Gain) – to stosunek zmiany napięcia wyjściowego do wywołującej ją zmiany napięcia wejściowego różnicowego ($10^4 \div 10^6$ V/V)

$$K_{UO} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_{we(-)} - U_{we(+)})}$$

Wzmocnienie to jest nazywane **wzmocnieniem napięciowym sygnału różnicowego**. Jeżeli wzmacniacz jest objęty ujemnym sprzężeniem zwrotnym, to o wzmocnieniu tego układu (przy dużym wzmocnieniu wzmacniacza operacyjnego) decyduje układ sprzężenia zwrotnego.

- **wzmocnienie napięciowe sygnału współbieżnego K_{USW}** – jest to stosunek zmiany napięcia wyjściowego ΔU_{wy} do wywołującej ją zmiany napięcia współbieżnego.

$$K_{USW} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{weS}}$$

Jeżeli wzmacniacz zostanieysterowany napięciem współbieżnym (inaczej wspólnym, sumacyjnym), czyli do obu wejść zostaną doprowadzone np. jednakowe, współbieżne (będące w fazie) przebiegi sinusoidalne lub jeden przebieg na wejścia zwarte ze sobą, to napięcie na jego wyjściu powinno być równe zero. W rzeczywistym wzmacniaczu pojawi się jednak na wyjściu nie stłumione napięcie wspólne. Jego wartość zależy od wzmocnienia wzmacniacza z otwartą pętlą dla sygnału sumacyjnego K_{USW} .

Przedstawiony sposób pracy wzmacniacza operacyjnego nie występuje jednak w praktyce. W rzeczywistym układzie na wejściach występuje jednocześnie sygnał różnicowy i współbieżny. Sygnał wspólny definiuje się wówczas jako przyrost średniej arytmetycznej na obu wejściach. Wzór na wzmocnienie sumacyjne przyjmuje więc postać:

$$K_{USW} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta \frac{(U_{we(-)} + U_{we(+)})}{2}}$$

Jest ono znacznie mniejsze od wzmocnienia przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (dla wzmacniacza idealnego równe zero).

- **wejściowe napięcie niezrównoważenia U_{IO}** (Input Offset Voltage) – jest to stałe napięcie różnicowe ($U_{we(-)} - U_{we(+)}$), jakie należy podać na wejście, aby uzyskać zerową wartość napięcia wyjściowego przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego. Im mniejsza wartość tego parametru, tym bardziej symetrycznie zbudowany jest wzmacniacz.

- **wejściowy prąd polaryzacji:**

Stopień wejściowy wzmacniacza operacyjnego stanowi wzmacniacz różnicowy. Jeżeli między wejściami (–) i (+) wzmacniacza operacyjnego zostanie wytworzone wejściowe

$$I_{IB} = \frac{I_{IB(+)} + I_{IB(-)}}{2}$$

napięcie różnicowe, to przez bazy obu tranzystorów stopnia wejściowego popłyną prądy $I_{IB(-)}$ oraz $I_{IB(+)}$, wprowadzające je w stan przewodzenia. Prądy te są nazywane prądami polaryzacji. Wartość wejściowego prądu polaryzującego I_{IB} jest średnią arytmetyczną obu prądów tzn.

- **wejściowy prąd niezrównoważenia** – jest to prąd wypadkowy prąd wejściowy, który płynie w obwodzie wejściowym wskutek doprowadzenia do wejścia wejściowego napięcia niezrównoważenia U_{I0} . Jest on różnicą wejściowych prądów polaryzacji:

$$I_{I0} = I_{IB(-)} - I_{IB(+)}$$

- **rezystancje wejściowe:**

R_{IR} – rezystancja określana dla sygnału różnicowego, czyli rezystancja „widziana” między wejściami wzmacniacza (odwracającym i nieodwracającym) z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego;

R_{IS} – rezystancja określana dla sygnału współbieżnego, czyli rezystancja „widziana” między jednym z wejść wzmacniacza a masą lub między zwartymi wejściami a masą.

- **rezystancja wyjściowa** – jest mierzona we wzmacniaczu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego przy napięciach $U_{we(-)}$ i $U_{we(+)}$ równych zeru. Jej wartość decyduje o rezystancji wyjściowej całego wzmacniacza.
- **zakres zmian napięcia wejściowego (Input Voltage Range)** – jest to zakres zmian napięcia na każdym z wejść względem masy, przy którym wzmacniacz pracuje prawidłowo (tzn. w zakresie liniowym).
- **współczynnik tłumienia sygnału współbieżnego CMRR** (Common Mode Rejection Ratio) – jest to stosunek wartości wzmocnienia napięciowego układu z otwartą pętlą (różnicowego) do wartości wzmocnienia napięciowego sygnału współbieżnego.

$$CMRR = \frac{K_{U0}}{K_{USW}}$$

Tłumienie sygnału współbieżnego ma największe znaczenie w tych układach, w których sygnały są poddawane na oba wejścia.

- **maksymalne napięcie wyjściowe (Output Voltage Swing)** – jest to maksymalna wartość napięcia wyjściowego wzmacniacza, gdy nie zniekształca on przebiegu wyjściowego. Maksymalne napięcie wyjściowe wynosi nieco mniej niż podwojona wartość napięcia zasilania.
- **szybkość zmian napięcia wyjściowego S_{UOW}** – jest to stromość napięcia na wyjściu wzmacniacza

$$S_{UOW} = \frac{\Delta U_o}{\Delta t}$$

Stanowi ona bardzo ważny parametr wzmacniacza operacyjnego wówczas gdy jest on stosowany w układach cyfrowych lub impulsowych.

- **częstotliwość graniczna „ f_T ”** – jest to częstotliwość, przy której moduł wzmocnienia maleje do jedności; decyduje ona o paśmie przenoszenia wzmacniacza.
- **pasmo przenoszenia B** – może być określane jako:

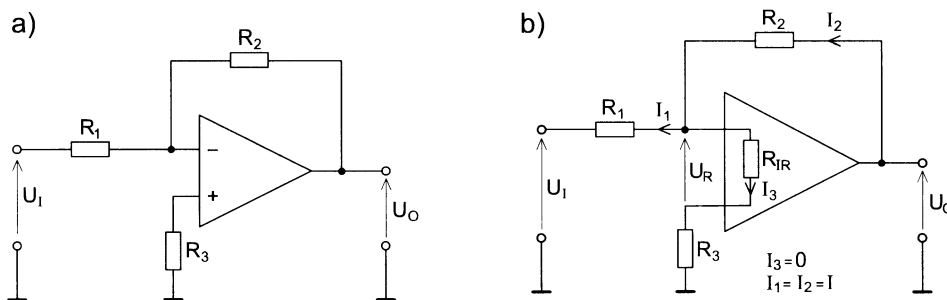
- **pasmo trzydecybelowe** – zakres częstotliwości mierzony od zera (napięcie stałe) do częstotliwości, przy której wzmacnienie napięciowe maleje o 3 dB w stosunku do wzmacnienia dla prądu stałego;
- **pasmo jednostkowe** – zakres częstotliwości mierzony od zera (napięcie stałe) do częstotliwości przy której wzmacnienie napięciowe maleje do jedności.

Wzmacniacze operacyjne, jako układy uniwersalne, mogą pracować w różnych konfiguracjach. Powszechnie stosowany jest układ z zamkniętą pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego. **Charakter obwodu sprzężenia zwrotnego decyduje o właściwościach całego układu.** Sprzężenie zwrotne zmniejsza nieliniowość charakterystyk, poszerza pasmo zmniejszając przy tym wzmacnienie wzmacniacza, umożliwia dobór wzmacnienia napięciowego, zmniejsza nieznacznie nierównowagę. Podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego to jednoweściowe układy: odwracający i nieodwracający oraz dwuweściowy układ różnicowy. Możliwe są też inne układy realizujące różnorodne funkcje.

2. Układy pracy wzmacniacza operacyjnego i ich właściwości:

a) wzmacniacz odwracający

Zakładając, że rzeczywisty wzmacniacz operacyjny ma parametry zbliżone do parametrów wzmacniacza idealnego, można przyjąć wzmacnienie wzmacniacza jako nieskończenie duże ($K_{UR} \rightarrow \infty$). Wówczas przy danym napięciu wyjściowym U_0 napięcie wejściowe różnicowe U_{IR} będzie dążyło do zera. Potencjały wejść odwracającego (–) i nieodwracającego (+) będą sobie równe. Jednocześnie prąd wejściowy płynący między wejściami (przez rezystancję wejściową różnicową, której wartość dąży do nieskończoności) jest bliski zera. Nie wytwarza więc spadku napięcia na rezystorze R_3 i rezystancji R_{IR} . Stąd wniosek, że potencjał zera przeniesienie na zacisk wejścia nieodwracającego (–), tworząc punkt tzw. **masy pozorniej**. Przyjęcie założenia, że prąd wejściowy wzmacniacza operacyjnego jest równy zero oznacza, że w układzie odwracającym płynie jeden prąd między wyjściem i wejściem.



Rys. 4.9. Wzmacniacz odwracający: a) schemat zasadniczy; b) uproszczony schemat zastępczy

Wzmacnienie układu, definiowane jako stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego, przyjmuje więc wartość:

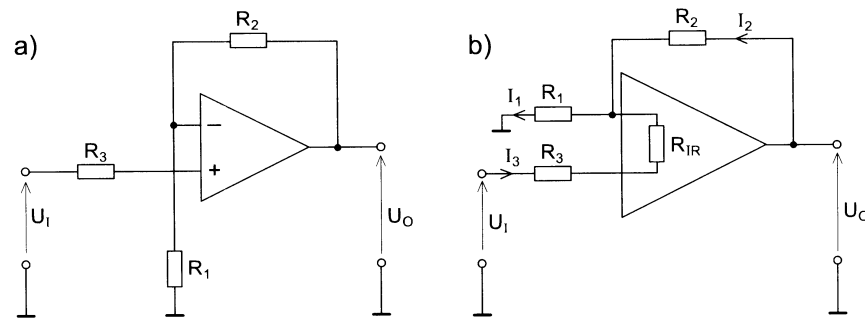
$$K_U = \frac{U_{wyj}}{U_I} = -\frac{R_2}{R_1}$$

przy czym znak „–” oznacza odwrócenie fazy napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego.

b) wzmacniacz nieodwracający

W układzie nieodwracającym sygnał wejściowy jest doprowadzany do wejścia nieodwracającego (+) wzmacniacza. Przyjmując podobne założenia, jak podczas analizy wzmacniacza odwracającego, dochodzi się do wniosku, że napięcie wejściowe różnicowe

dąży do zera, więc potencjały wejść „-” i „+” są jednakowe. Zatem na wejściu „-” panuje napięcie wejściowe U_I . Wartość prądu wejściowego, płynącego od wejścia „+”, poprzez rezystancję wejściową różnicową, której wartość dąży do nieskończoności oraz rezystor R_1 do masy, jest bliska zero. Można więc przyjąć, że w obwodzie płynie jeden prąd z wyjścia, poprzez rezystory R_2 i R_1 do masy.



Rys. 4.10. Wzmacniacz nieodwracający: a) schemat zasadniczy; b) uproszczony schemat zastępczy

Wzmocnienie układu, definiowane jako stosunek napięcia wyjściowego do wejściowego, przyjmuje więc wartość:

$$K_u = \frac{U_{wyj}}{U_I} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

3. Wyznaczanie charakterystyki przejściowej i przenoszenia wzmacniacza.

Ćwiczenie:

Opracuj projekt realizacji prac związanych z uruchomieniem i sprawdzeniem działania wzmacniacza operacyjnego uwzględniając jego dane techniczne.

Opracuj wyniki pomiarów uzyskane podczas badania wzmacniacza operacyjnego na stanowisku wyposażonym zgodnie z instrukcją. Porównaj uzyskane wyniki z danymi technicznymi zawartymi w instrukcji, sformułuj wnioski dotyczące poprawności działania i użytkowania wzmacniacza operacyjnego w układzie odwracającym i nieodwracającym oraz sformułuj wskazania eksploatacyjne.

Dane techniczne układów dla $R_1 = 10 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 1 \text{ M}\Omega$:

– dla układu odwracającego:

- $U_{wemax} \leq 200 \text{ mV}$
- $U_{zas} = \pm 12 \text{ V}, \pm 15 \text{ V}$
- $Ku \geq 35 \text{ dB}$ w paśmie przenoszenia
- $fg \geq 6 \text{ kHz}$
- układ odwraca fazę napięcia

– dla układu nieodwracającego:

- $U_{wemax} \leq 200 \text{ mV}$
- $U_{zas} = \pm 12 \text{ V}, \pm 15 \text{ V}$
- $Ku \geq 35 \text{ dB}$ w paśmie przenoszenia
- $fg \geq 6 \text{ kHz}$
- układ nie odwraca fazy napięcia

Wyposażenie stanowiska pomiarowego:

1. Zasilacz laboratoryjny symetryczny $\pm 5 \text{ V}, \pm 12 \text{ V}, \pm 15 \text{ V}$ – szt. 1.
2. Generator funkcyjny z przewodem pomiarowym – szt. 1.
3. Oscyloskop dwukanałowy z przewodami pomiarowymi – szt. 1.
4. Zestaw przewodów połączeniowych.

Przebieg ćwiczenia:

1) Badanie wzmacniacza odwracającego:

a) sprawdzenie wzoru na wzmocnienie dla różnych wartości R_1, R_2 :

$$Ku = -\frac{R_2}{R_1}$$

R_1 [Ω]	R_2 [Ω]	Ku (ze wzoru)	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	Ku [V/V]

- b) pomiary charakterystyki przejściowej dla wybranych kombinacji R_1, R_2 ;
- c) pomiary charakterystyki przenoszenia dla wybranych kombinacji R_1, R_2 .

2) Badanie wzmacniacza nieodwracającego – jak w punkcie 1 (uwaga – inny wzór na wzmocnienie)

$$Ku = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$