

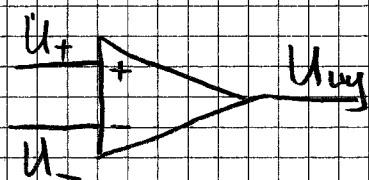
## Wykład 5. Wzmacniacz operacyjny

Literatura: Piotr Górecki, Wzmacniacze operacyjne,  
wyd. BTC, Warszawa, www.btc.pl

+ Wykład 7. Szarytko: [pe.fuw.edu.pl/pliki/Wzmacniacze-operacyjne.pdf](http://pe.fuw.edu.pl/pliki/Wzmacniacze-operacyjne.pdf)  
Wzmacniacz operacyjny = układ scalony realizujący funkcję:

$$U_{wy} = G \cdot (U_+ - U_-)$$

gdzie  $U_+$  - napięcie na wejściu tzw. nieodwracającym  
 $U_-$  - napięcie na wejściu tzw. odwracającym

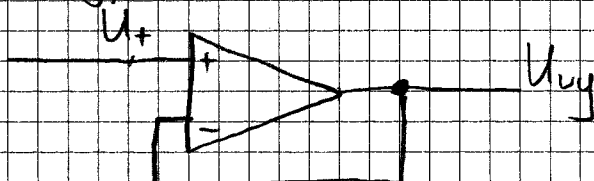


W idealnym wzmacniaczu operacyjnym:

- $G$  jest nieskończenie duże (o praktyce  $G$  jest rzędu  $10^4 - 10^6$ )
- Oporności wejści jest nieskończenie.
- Oporności wyjściowej jest zerowa

Za względu na nieskończenie (bardzo duże) wzmacnienie „goty” wzmac. op. nie nadaje się do wzmacniania. Potrzebne jest ujemne sprzężenie zwrotne, które ustali skończone wzmacnienie.

Potęczny wyjście z wejściem odwracającym:



$$U_- = U_{wy}$$

$$U_{wy} = G(U_+ - U_-) = G(U_+ - U_{wy})$$

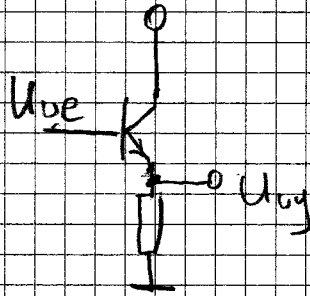
$$U_{wy} (1 + G) = G U_+$$

$$U_{wy} = \frac{G}{1+G} U_+ \xrightarrow{G \rightarrow \infty} U_+$$

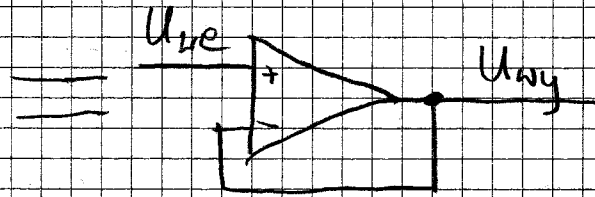
Napięcie wyjściowe jest (prawie) równe napięciu na wejściu nieodwracającym. Wzmocnienie napięciowe  $\approx 1$

Po co taki układ? Bardzo duże oporność wejściowa, bardzo mała oporność wyjściowa, czyli układ działa jak wzmacniacz prądowy. To jest wtórnik napięciowy.

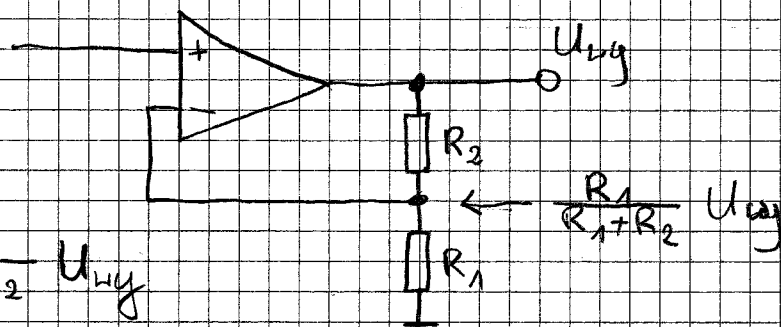
Wtórnik emiterowy



Wtórnik napięciowy



We wtórniku napięciowym na wejście odwracające podajemy całe napięcie wyjściowe, ale możemy też podać jego ułamek za pomocą dzielnika napięcia:



$$U_- = \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{wy}$$

$$U_{wy} = G(U_+ - U_-) = G \left( U_+ - \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{wy} \right)$$

$$U_{wy} \left( 1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} G \right) = G U_+$$

$$U_{wy} \left( \frac{R_1 + R_2 + R_1 G}{R_1 + R_2} \right) = G U_+$$

$$U_{wy} = \frac{G(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + GR_1} U_+ = \frac{R_1 + R_2}{\frac{R_1 + R_2}{G} + R_1} U_+$$

$$U_{wy} \xrightarrow{G \rightarrow \infty} \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_+ = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_+$$

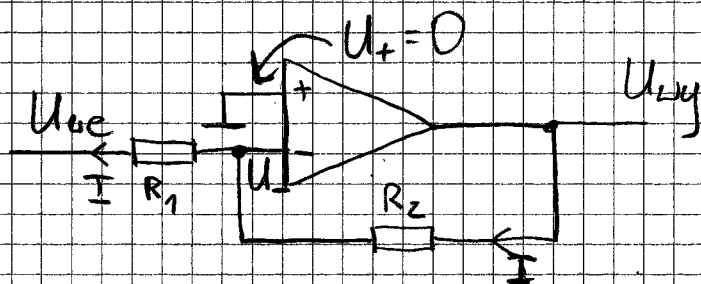
$U_+$  jest napięciem wejściowym  $U_{we}$

$$U_{wy} = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) U_{we}$$

Układ ma wzmacnienie napięciowe  $1 + \frac{R_2}{R_1}$ .  
 Sygnał wyjściowy jest zgodny w formie z sygnałem wejściowym - zmacniacz  
nieodwracający.

Co jeśli podamy napięcie z dzielnika na wejście nieodwracające, a sygnał uprost na odwracające? Sprężenie zwrotne będzie obrotowe. Jeśli przez chęć  $U_+ > U_-$ , to na wyjściu zmacniacza pojawi się duże napięcie  $U_{wy}$ , czyli  $U_+$  jeszcze wzrośnie i napięcie wyjściowe będzie dążyć do nieskończoności, które może dać zmacniacz. Taki układ byłby bezużyteczny.

Mozemy zrobić tak:



Sprężenie zwrotne jest ujemne - powinniśmy oziadać

$$U_- = U_{we} + IR_1$$

$$U_+ = 0 \text{ (musa!)}$$

$$I = \frac{U_{wy} - U_{we}}{R_1 + R_2}$$

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

$$U_{wy} = G(U_+ - U_-) = G \left[ 0 - U_{we} - \frac{R_1}{R_1 + R_2} (U_{wy} - U_{we}) \right]$$

$$U_{wy} = -G U_{we} - G \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{wy} + G \frac{R_1}{R_1 + R_2} U_{we}$$

$$U_{wy} \left( 1 + G \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right) = -U_{we} G \left( 1 - \frac{R_1}{R_1 + R_2} \right)$$

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

$$U_{wy} = -U_{we} \frac{G R_2}{R_1 + R_2 + G R_1} = -U_{we} \frac{R_2}{\frac{R_1 + R_2}{G} + R_1} \xrightarrow{G \rightarrow \infty} -\frac{R_2}{R_1} U_{we}$$

$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} U_{we}$$

Wzmocnienie napiściowe  $-\frac{R_2}{R_1}$ , to jest  
wzmocnienie odwracające

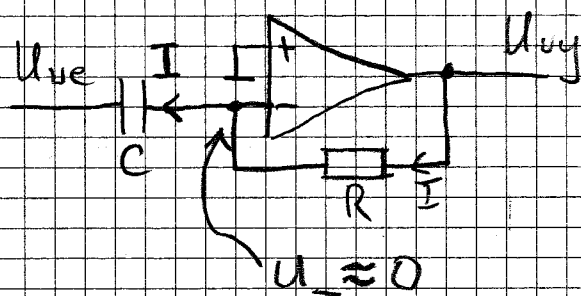
Wzmocnienie odwracające i nieodwracające oparte na wzm. operacyjnym praktycznie wyeliminowały tranzystory z układów, gdzie potrzebne jest wzmocnienie napiściowe.

Impedancje wejściowe:

- wzm. nieodwracające - bardzo duże (równie oporności wejściowej wzm. oper.)
- wzm. odwracające:  $U_- = 0$  (bo  $U_+ = U_- = 0$ ), czyli wejście jest odwołane od potencjału 0 operacjiem  $R_1 \rightarrow$  impedancja wejściowa  $= R_1$

Modyfikacje:

- We wzm. odwracającym zamieniamy  $R_1$  na  $C$ .



Analizy wzmacniaczy można uprościć, zewierając, że przed płynący w sprężeniu zwróconym ma taką wartość, tak  $U_+ \approx U_-$ , bo tylko w takim przypadku  $U_{wy}$  ma skończoną wartość. Np. tutaj:

$$U_{wy} = G(U_+ - U_-), \text{ ale } U_+ = 0, \text{ czyli } U_{wy} = -GU_-$$

$$U_- = -\frac{U_{wy}}{G} \xrightarrow{G \rightarrow \infty} 0$$

Dzielnik teniu od nowu można zapisać:

$$U_{wy} = U_- + IR = IR$$

$$U_{we} + U_c = U_- = 0$$

$$U_{we} = -U_c = -\frac{1}{C} \int I dt = -\frac{1}{RC} \int U_{wy} dt \quad / \text{ różniczkujemy}$$

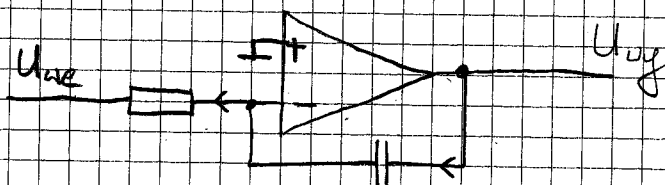
$$\frac{dU_{we}}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{wy}$$

$$U_{wy} = -RC \frac{dU_{we}}{dt}$$

To jest układ różniczkujący, bez rezerwa.

o  $U_{wy} \ll U_{we}$ , które było przy układzie różniczk. RC.

Możemy zamienić miejscami C i R:



Analogiczny rachunek, po skorzystaniu z faktu, że  $U_- \approx 0$ .

$$U_{we} + IR = 0$$

$$0 + \frac{1}{C} \int I dt = U_{wy}$$

$$I = -\frac{1}{R} U_{we}$$

$$U_{wy} = -\frac{1}{RC} \int U_{we} dt$$

Układ (wzmacniacz) całkujący bez rezerwy  
o relacji  $U_{we}$  i  $U_{wy}$ .

Mozemy też analizować te układy w dziedzinie częstotliwości.

Dla wzmacniacza odwracającego, który jest podstawę wzmacniaczy całkującego i różniczkującego wzmacnienie:

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

opornik sprzężenie zwrotne  
opornik na wejściu

Dla sygnału o częstotliwości  $\omega$ :

• Wzmacniacz różniczkujący:

$$R_2 \rightarrow R \quad R_1 \rightarrow \frac{1}{\omega C}$$

Współczynnik wzmacnienia amplitudowego:

$$k = \left| \frac{R}{\frac{1}{\omega C}} \right| = \omega RC$$

• Wzmacniacz całkujący:

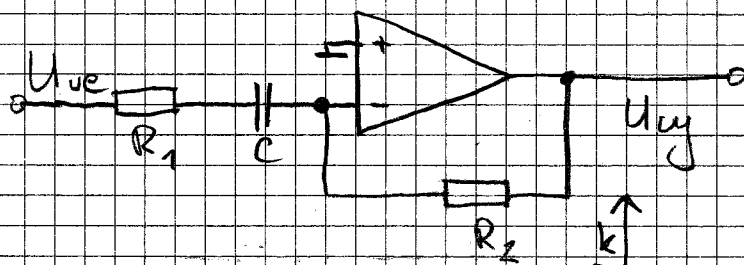
$$R_2 \rightarrow \frac{1}{\omega C} \quad R_1 \rightarrow R$$

$$k = \left| \frac{1}{\omega RC} \right| = \frac{1}{\omega RC}$$

To nie są charakterystyki częstotliwościowe filtrów górno- i dolnoprzepustowego.

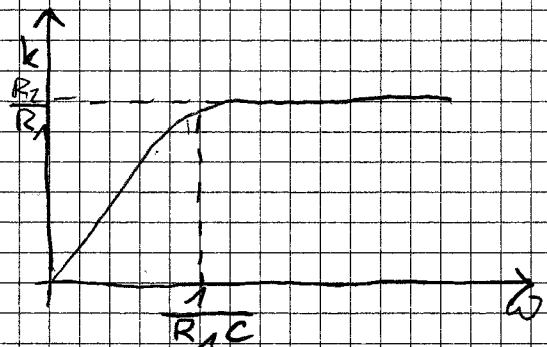
Jak zrobić układy o charakterystyce filtrów?

Filtr górnoprzepustowy (ze wzmacnieniem):



$$R_2 \rightarrow R_2$$

$$R_1 \rightarrow R_1 + \frac{1}{\omega C}$$



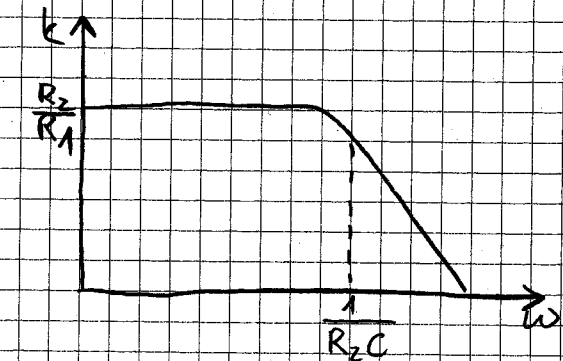
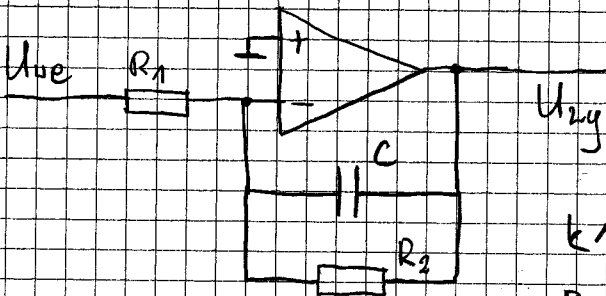
$$k = \left| - \frac{R_2}{R_1 + \frac{1}{i\omega C}} \right| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega R_1 C)^2}}$$

Wzmocnienie

filtr odcinający

Częstota graniczna:  $\omega_{gr} = \frac{1}{R_1 C}$

Filtr dolnoprzepustowy:



$$R_2 \rightarrow \frac{1}{i\omega C + \frac{1}{R_2}}$$

$$R_1 \rightarrow R_1$$

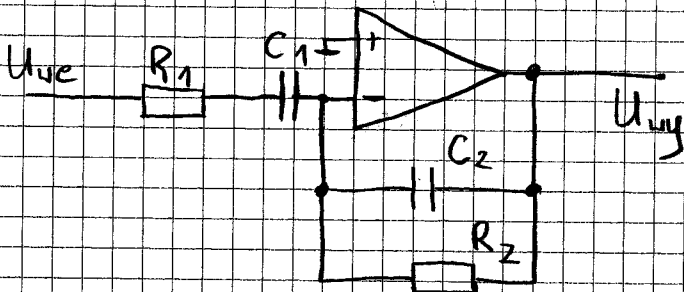
$$k = \left| - \frac{\frac{1}{i\omega C + \frac{1}{R_2}}}{R_1} \right| = \frac{R_2}{R_1} \frac{1}{\sqrt{(\omega R_2 C)^2 + 1}}$$

Wzmocnienie

filtr dolnoprzepustowy

Częstota graniczna:  $\omega_{gr} = \frac{1}{R_2 C}$

Filtr pasmowy:



$$R_1 \rightarrow R_1 + \frac{1}{i\omega C_1}$$

$$R_2 \rightarrow \frac{1}{i\omega C_2 + \frac{1}{R_2}}$$

$$k = \left| \frac{1}{(i\omega C_2 + \frac{1}{R_2}) \cdot (R_1 + \frac{1}{i\omega C_1})} \right|$$

licznik i mianownik  
mnożymy przez  $\frac{R_2}{R_1}$

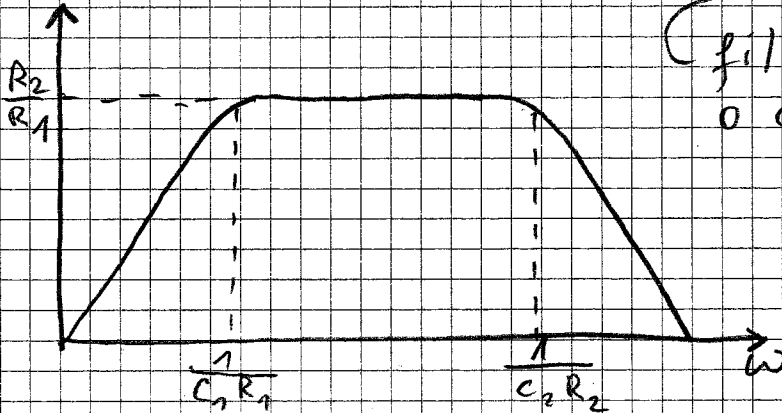
$$k = \left| -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{i\omega C_2 R_2 + 1} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{i\omega C_1 R_1}} \right|$$

$$k = \frac{R_2}{R_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\omega C_2 R_2)^2 + 1}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega C_1 R_1)^2}}}$$

Wzmocnienie

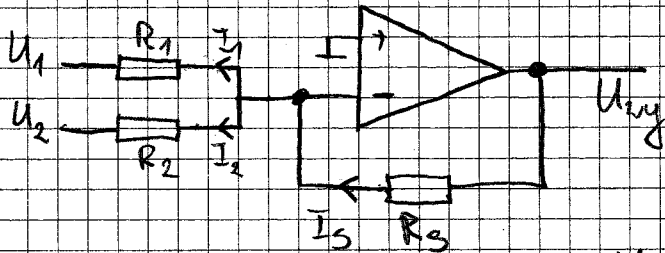
filtr dolnoprzepustowy  
 $\omega_{gr} = \frac{1}{C_2 R_2}$

filtr gornoprzepustowy  
 $\omega_{gr} = \frac{1}{C_1 R_1}$



### Wzmocnienie sumujący

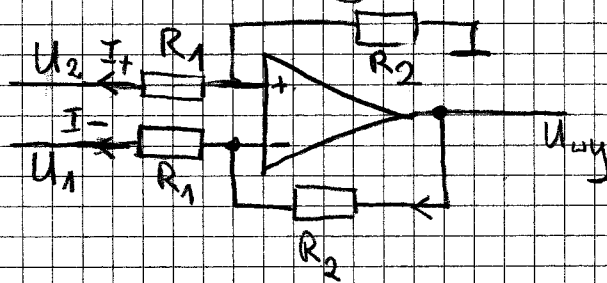
(tzw. mikser, nie mylić z mieszalnikiem)



$$U_{wy} = I_s \cdot R_3 = (I_1 + I_2) R_3 = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2}\right) R_3$$

$$U_{wy} = -\left(\frac{R_3}{R_1} U_1 + \frac{R_3}{R_2} U_2\right) \quad (\text{itd., jeśli jest więcej wejść})$$

### Wzmocnienie różnicowy





Z dzielnika  $R_3 - R_4$ :

$$U_+ = U_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_{wy} = U_- + I_- R_2$$

$$U_- = U_+$$

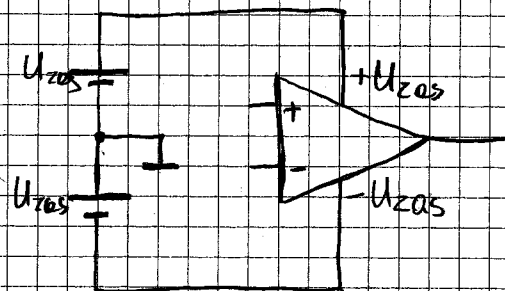
$$I_- = (U_- - U_1) \cdot \frac{1}{R_1} = (U_+ - U_1) \cdot \frac{1}{R_1}$$

$$\begin{aligned} U_{wy} &= U_+ + (U_+ - U_1) \frac{R_2}{R_1} = U_+ \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) - U_1 \frac{R_2}{R_1} = \\ &= U_+ \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1}\right) - U_1 \frac{R_2}{R_1} = U_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} - U_1 \frac{R_2}{R_1} \end{aligned}$$

$$U_{wy} = \underbrace{(U_2 - U_1)}_{\text{Różnica napięć}} \frac{R_2}{R_1} \leftarrow \text{wzmocnienie sygnału różnicowego}$$

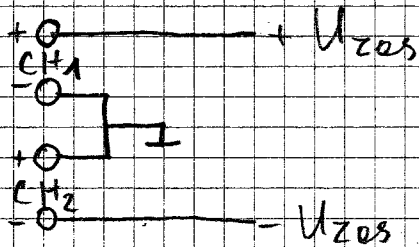
## Zasilanie wzmacniaczy operacyjnych.

Standardowo wzmacniacz operacyjny zasilany jest tzw. zasilaniem symetrycznym, polecającym wzmacniacz do napięcia dodatniego ( $+U_{zas}$ ) i ujemnego ( $-U$ ) względem masy.



Dzięki symetrycznemu zasilaniu napięcie wyjściowe i wejściowe mogą przyjmować dowolne i ujemne wartości. Napięcie wyjściowe może zmienić się w zakresie od wartości nieco wyższych (lub równych)  $-U_{zas}$  do nieco niższych (lub równych)  $+U_{zas}$ . (Będąc zakres od  $-U_{zas}$  do  $+U_{zas}$  w wzmacniaczach odrostowych rail-to-rail).

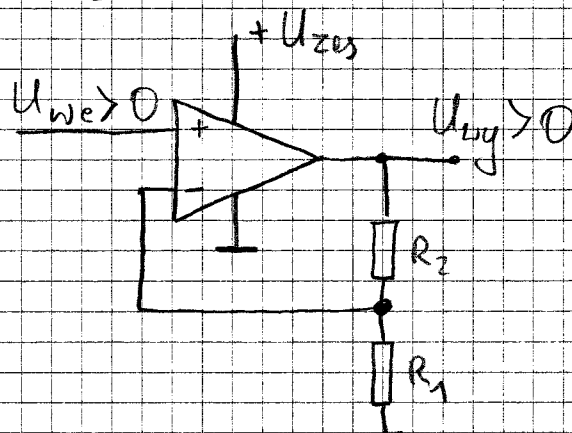
Symetryczne zasilanie uzyskujemy 3 sposoby:  
 dwie osobne zasilacze, dwie osolone zasilacze,  
 dwie baterie lub od razu projektując zasilacz  
 symetryczny z odpowiednim transformatorem.



Dla uproszczenia na schematach często  
 nie rysuje się zasilanie wzmacniaczy, ale  
 należy o nim pamiętać!

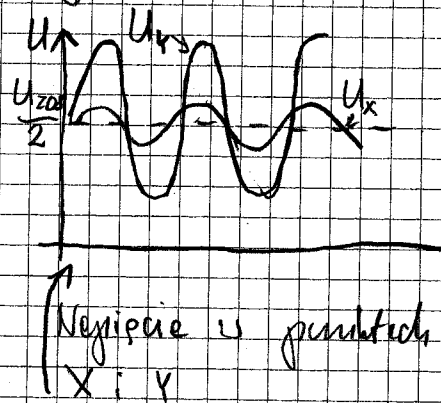
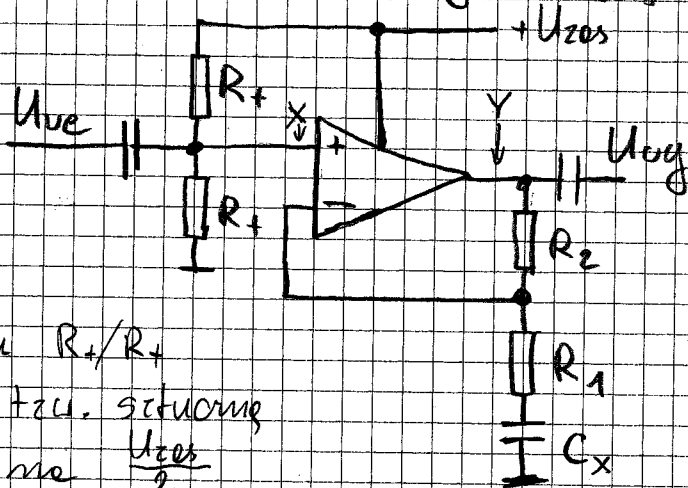
### Pojedyncze zasilanie

Zasilanie symetryczne bywa wygodne,  
 zwłaszcza w sprzecz zasilanym z baterii.  
 Jeśli z góry wiadomo, że wzmacniacz  
 napięć przyjmie tylko dodatnie  
 wartości można więc zrealizować  
 zasilanie napięciem pojedynczym  
 (wzmacniacz musi mieć możliwość  
 osiągnięcia napięcia 0 na wyjściu, więc nie  
 będzie się wahał):



Wzmocnienie napięć przemiennych przy symetrycznym zasilaniu też jest możliwe - analogicznie jak dla wzmacniacza tranzystorowego musimy obwód do symetrii wejściowej składowej stałej, a na wejściu i wyjściu zastosować kondensatory odciążające.

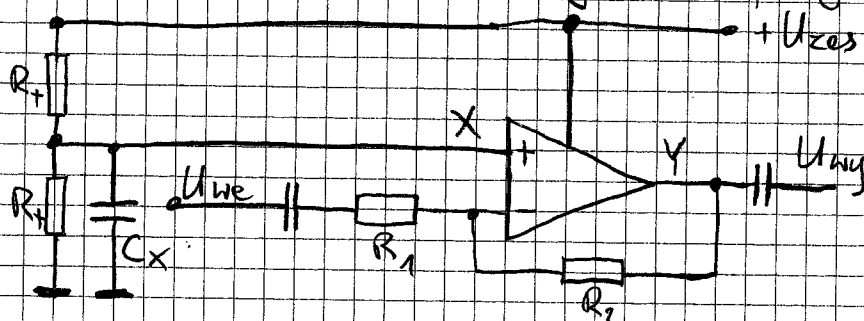
Wzm. różnicowy z pojedynczym zasilaniem.



Dzielnik  $R_+/R_-$  tworzy tzw. sytuację masę na  $\frac{U_{zes}}{2}$

Dla składowej zmiennej wzmocnienie  $= 1 + \frac{R_2}{R_1}$   
 Dla składowej stałej  $R_1 + C_x$  ma nieskończony opór, czyli wzmocnienie  $= 1$ . Dzięki temu na wyjściu wzmacniacza operacyjnego (przed kondensatorem) składowa zmienna jest różnicowa na składową stałą o wartości  $U_{zes}/2$

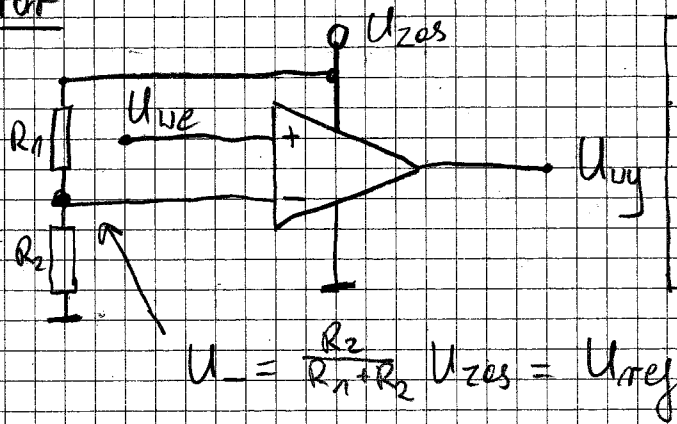
Wzmocniacz odciążający z pojedynczym zasilaniem



Dla składowej stałej sprzężenie zwrotne utrzymuje wartość  $U_+ = U_- = \frac{U_{zes}}{2}$   
 Tak jest, gdy  $U_y = U_- = \frac{U_{zes}}{2}$

$C_x$  zwiera  $U_+$  do masy dla sygnałów zmiennych, co daje wzmocnienie  $= \frac{R_2}{R_1}$

## Komparator

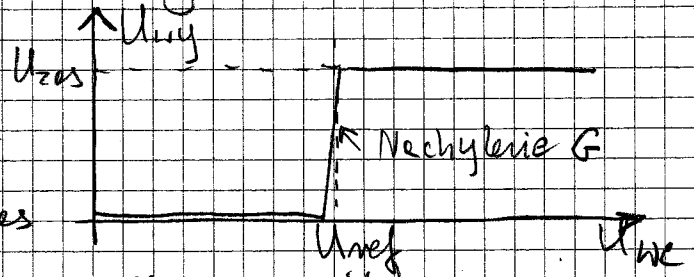


Wzmacniacz operacyjny o bardzo dużym wzmacnieniu  $G$

Nie ma sprzężenia zwrotnego. Układ działa tak:

$$U_{ve} < U_{ref} \Rightarrow U_{wy} = 0$$

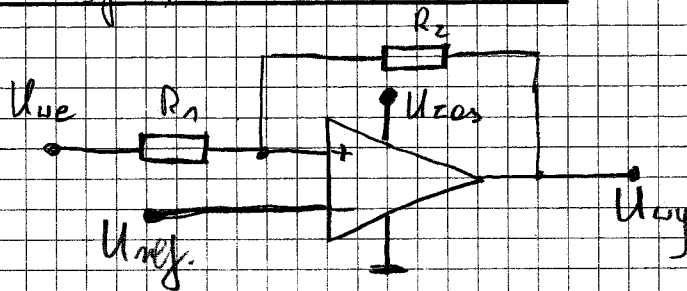
$$U_{ve} > U_{ref} \Rightarrow U_{wy} = U_{zes}$$



(o ile wzmacniacz jest rail-to-rail)

Układ porównuje  $U_{ve}$  i  $U_{ref}$  i sygnalizuje relację między nimi wysłaniem lub wstaniem słowem nie wysłaniem.

## Dodatknie sprzężenie zwrotne.



Dodatknie sprzężenie zwrotne: jeśli  $U_+ > U_-$ , to  $U_{wy} = G(U_+ - U_-)$ , a nie  $G \rightarrow \infty$ , to  $U_{wy} = U_{zes}$ . Jeśli  $U_+ < U_-$ , to  $G(U_+ - U_-) < 0$ , więc  $U_{wy}$  przyjmuje minimalną wartość wynikającą z napięcia zasilania (przyjmujemy 0). Rosnące  $U_+$  powoduje jeszcze szybszy wzrost  $U_{wy}$ , które dodaje się do  $U_+$ ; jeszcze przyspiesza zmiany.

Przyjmujemy, że wzmacniacz jest rail-to-rail.

Zbadajmy zachowanie układu.

I. Niech  $U_{ue}$  jest małe, tak, żeby  $U_+ < U_-$ .  
Wtedy  $U_{uy} = 0$ . z dzielnika napięcia:

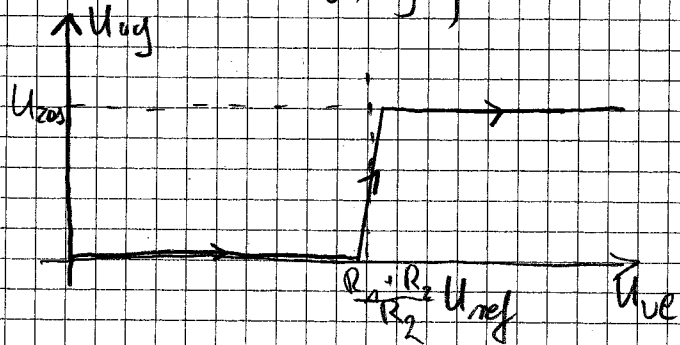
$$U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ue}$$

$U_{uy}$  zmienia wartości na  $U_{zes}$ , gdy  $U_+ = U_-$

$$U_- = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ue}$$

$$U_{ue} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_-$$

$$U_{ue} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{ref}$$



II. Niech  $U_{ue}$  ma tyle duże, żeby  $U_+ > U_-$ . Wtedy  $U_{uy} = U_{zes}$ . Prąd płynie od wyższego do niższego:

$$I = \frac{U_{uy} - U_{ue}}{R_1 + R_2}$$

$$U_+ = U_{uy} - I R_2 = U_{uy} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} (U_{uy} - U_{ue}) =$$

$$= U_{uy} \left(1 - \frac{R_2}{R_1 + R_2}\right) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ue} =$$

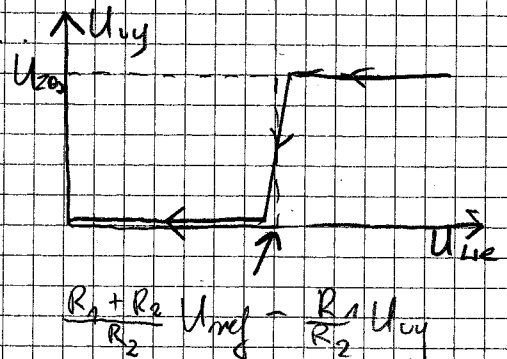
$$= U_{uy} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ue}$$

Gdy  $U_{ue}$  maleje wyjsze zmienia ston z  $U_{zes}$  na 0, wtedy  $U_+ = U_-$

$$U_- = U_{uy} \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2}\right) + \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{ue}$$

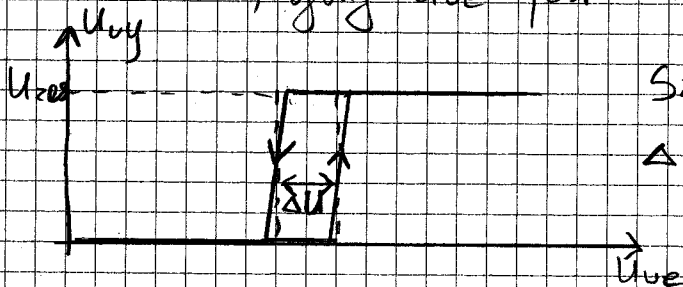
$$U_{ue} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_- - \frac{R_1}{R_2} U_{uy}$$

$$U_{ue} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{ref} - \frac{R_1}{R_2} U_{uy}$$



Jest to komparator z histerezą (przetwornik Schmitta)

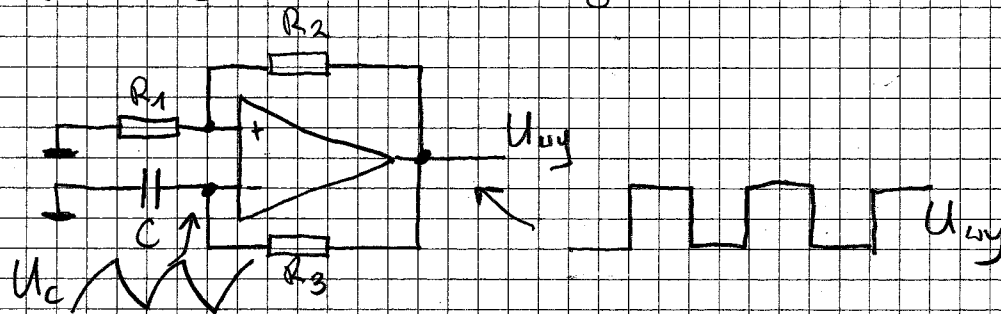
Przejsie w gore, gdy  $U_{ue} = \frac{R_1 + R_2}{R_2} U_{ref}$ , a przejsie w dol, gdy  $U_{ue}$  jest mniejsze o  $\frac{R_1}{R_2} U_{zes}$



Szerokości petli histerezy:

$$\Delta U = \frac{R_1}{R_2} U_{zes}$$

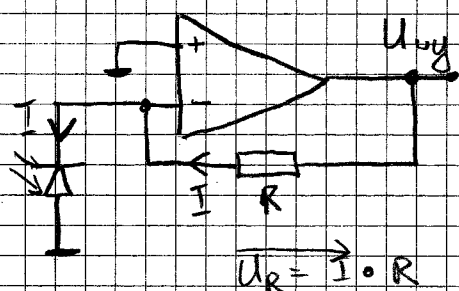
## Generator przebiegu prostokątnego,



Napięcie  $U$  po zmianie stanu  $U_{wy}$  zmienia się powoli ze względu na kondensator  $C$ , który się przeładowuje. Napięcie  $U_+$  przyjmuje tylko jedną z dwóch wartości zależnych od  $U_{wy}$ . Gdy kondensator przeładowuje się tak, że  $U = U_+$  następuje zmiana stanu wyjścia.

## Wzmacniacz transimpedansowy (konwerter prąd - napięcie)

Najczęściej używany z fotodiody spolaryzowaną zaporowo, dla której prąd ustecny zależy liniowo od natężenia padającego światła. Sygnał z fotodiody ma charakter prądowy, wyjście ze wzmacniacza - napięciowy.

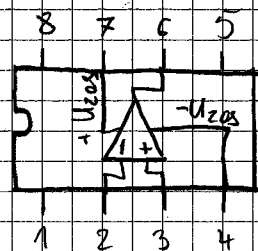


$$U_- = U_+ = 0$$
$$U_{wy} = I \cdot R$$

$$U_R = I \cdot R$$

## Podzmacniacz wzmacniacz.

W precyzji używany układ 741 - najpopularniejszy, choć już dość przestarzały i zmacniacz. Nie jest typu rail-to-rail



Zasilanie:

4:  $-U_{zas}$

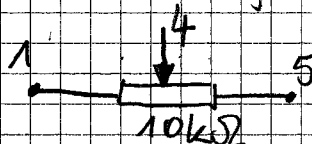
7:  $+U_{zas}$

Wejście:

2:  $U_-$

3:  $U_+$

Kompensacja:



### Kompensacja napięcia nierównoważenia.

W rzeczywistym wzmacniaczu:

$$U_{wy} = G(U_+ - U_- - U_0)$$

$U_0$  - wewnętrzne napięcie nierównoważenia

$U_0$  można sprowadzić do 0 za pomocą

zewnętrznej obwodu. W przypadku układu

741 podłączamy potencjometr  $10k\Omega$  pomiędzy

nóżki 1 i 5, z suwakiem podłączonym do  $-U_{zas}$

(nóżka 4).

Nie musimy korzystać z kompensacji, żeby

nie podłączamy nic do nóżki 1 i 5.