



Uniwersytet  
Wrocławski

**Wydział Fizyki  
i Astronomii**  
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9  
50-204 Wrocław  
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65  
fax +48 71 328 73 65  
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl  
www.ifd.uni.wroc.pl

# Elektrotechnika i elektronika (konspekt)

**Franciszek Gołek** (golek@ifd.uni.wroc.pl)

[www.pe.ifd.uni.wroc.pl](http://www.pe.ifd.uni.wroc.pl)

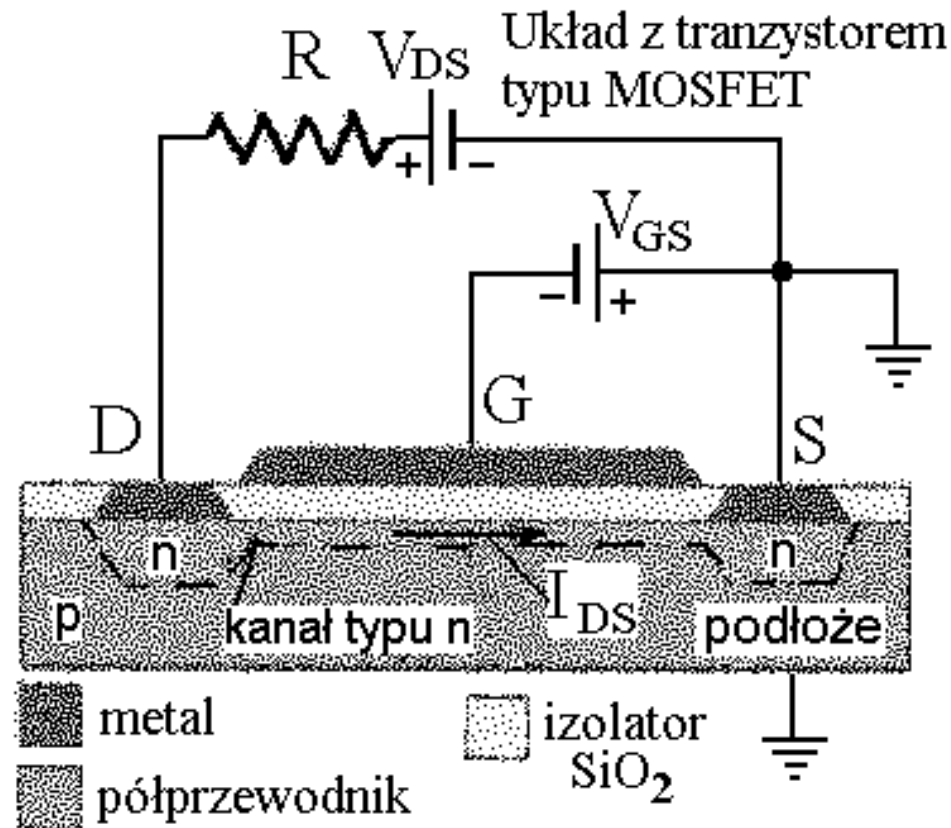
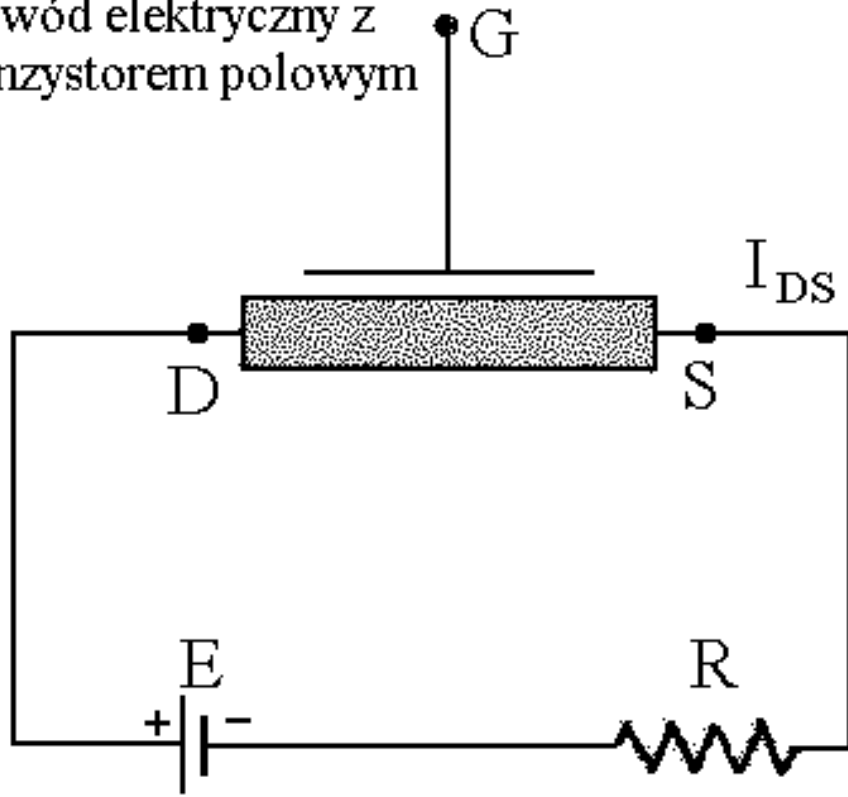
## Wykład 11.

# Tranzystory polowe i wzmacniacze operacyjne

# Tranzystory polowe FET (field effect transistors)

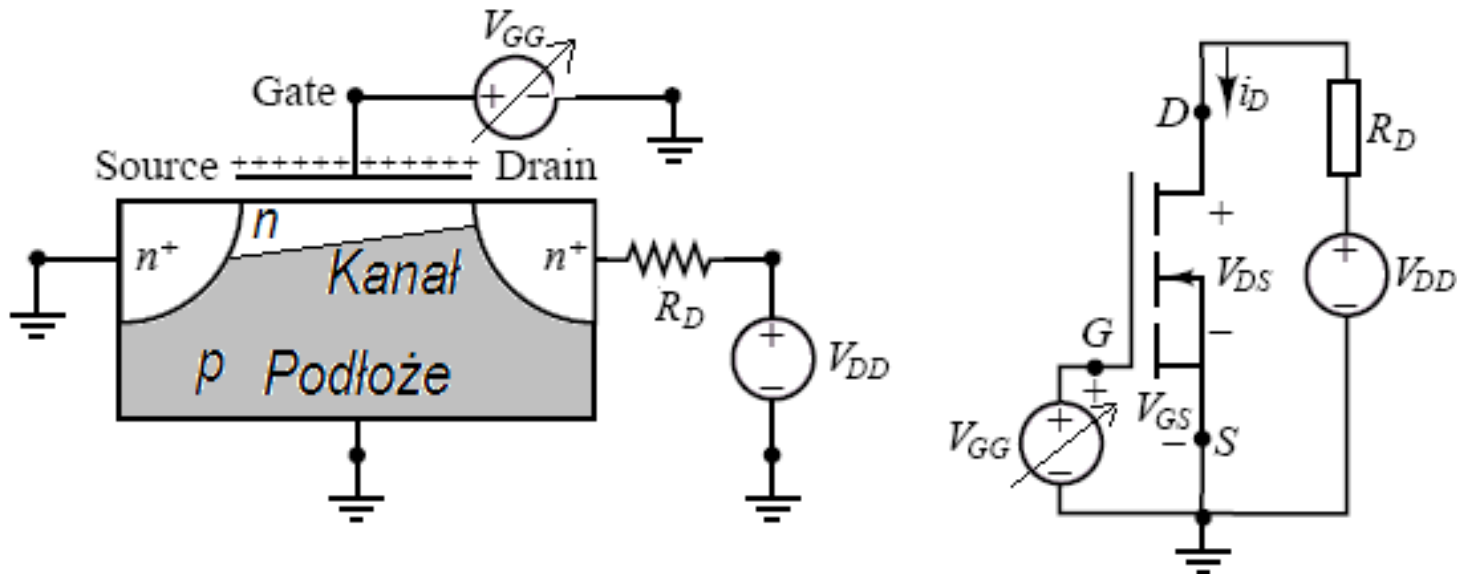
W przeciwieństwie do tranzystorów bipolarnych tranzystory polowe są sterowane polem elektrycznym, w zasadzie bez prądu a zatem bez poboru mocy (zależnie od typu tranzystora oporność wejściowa może wynosić  $10^8 \Omega$  do około  $10^{14} \Omega$ ). Ta cecha powoduje, że tranzystory polowe są jak dotąd niezastąpione w budowie układów o dużej skali scalenia (LSI) jak mikroprocesory, pamięci itp. Elektroda sterującą jest bramka G (gate), której potencjał wpływa na rezystancję między dwoma innymi elektrodami: drenem D (drain) i źródłem S (source).

Obwód elektryczny z tranzystorem polowym



W tranzystorach polowych szerokość przewodzącego kanału w półprzewodniku regulowana jest polem elektrycznym. Tranzystory FET można zatem traktować jako oporniki sterowane napięciem na elektrodzie zwanej bramką. Prąd w tej elektrodzie, odizolowanej warstwą tlenku lub szerokim (bo zaporowo spolaryzowanym) złączem pn od reszty tranzystora, jest znikomy. Potrzebne jest tylko ułożenie niewielkiego ładunku aby uzyskać na bramce pożądany potencjał. Kanał przewodzący w tranzystorze polowym może być dwojakiemu rodzaju: typ n (przewodnictwo elektronowe) albo typ p (przewodnictwo dziurowe). (Kanał w postaci prawie dwuwymiarowej warstwy mobilnych nośników ładunku wykazuje interesujące własności kwantowe, szczególnie widoczne w niskich temperaturach i silnych polach magnetycznych).

Przykładowy obwód z tranzystorem polowym



# 6 typów tranzystorów polowych

Cztery pierwsze FET-y normalnie (przy  $U_{GS} = 0$ ) przewodzą, przewodzenie znika dopiero przy znacznym  $|U_{GS}|$ . Dwa ostatnie przy małym  $|U_{GS}|$  nie przewodzą.

Tranzystory polowe (U. Tietze, Ch. Shlenk "Układy półprzewodnikowe")					
złączowe (JFET)		z izolowaną bramką (MOSFET, MISFET)			
		z kanałem zubożonym		z kanałem wzbogacającym	
		z kanałem typu n	z kanałem typu p	z kanałem typu n	z kanałem typu p
<p>Wzmacniacze zbudowane z elementów dyskretnych. Analogowe układy scalone</p>		<p>Wzmacniacze w. cz. zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone</p>		<p>Wzmacniacze w. cz. zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone</p>	
<p>Wzmacniacze zbudowane z elementów dyskretnych. Analogowe układy scalone</p>		<p>Wzmacniacze w. cz. zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone</p>		<p>Wzmacniacze mocy zbudowane z elementów dyskretnych. Cyfrowe układy scalone</p>	

Dla tranzystorów polowych poniżej progu otwarcia  $I_D \propto \exp(V_{GS})$ , ale powyżej progu  $I_D = k(V_{GS} - V_P)^2$  co daje

transkonduktancję:  $g_m = \partial I_D / \partial U_{GS} = 2(k I_D)^{1/2}$

Jest ona mała (około 4 mS dla charakterystyki przejściowej obok) w porównaniu z  $g_m = I_C / 25\text{mV}$  dla tranzystorów bipolarnych.

Przykładowa charakterystyka wyjściowa pokazuje dwa obszary zależności  $I_D$  od  $U_{GS}$ .

Dla obszaru liniowego:

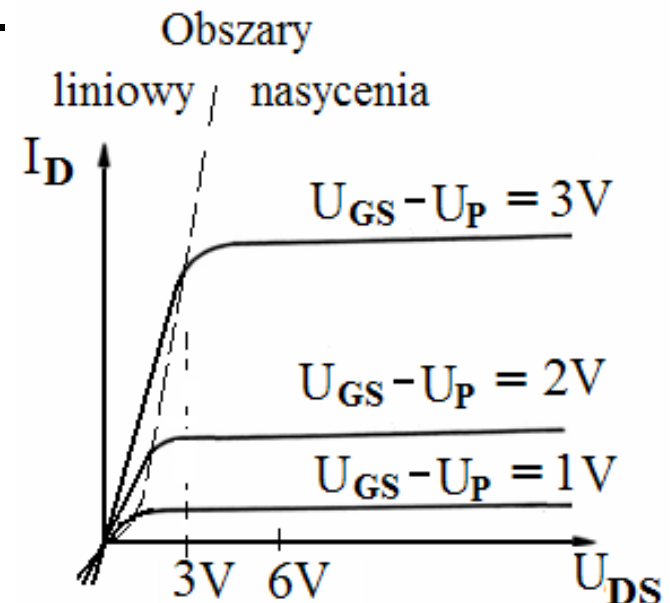
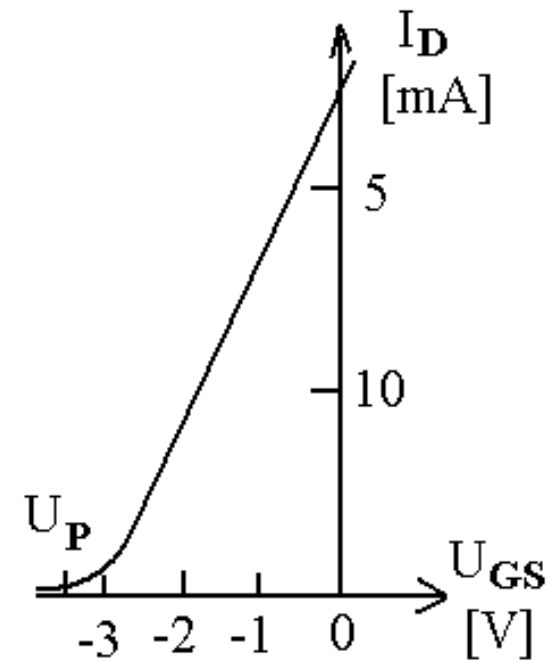
$$I_D = 2k[(U_{GS} - U_P)U_{DS} - (U_{DS})^2/2]$$

(tu robimy rezystory).

Dla obszaru nasycenia:

$$I_D = k(U_{GS} - U_P)^2$$

(tu robimy źródła prądowe).

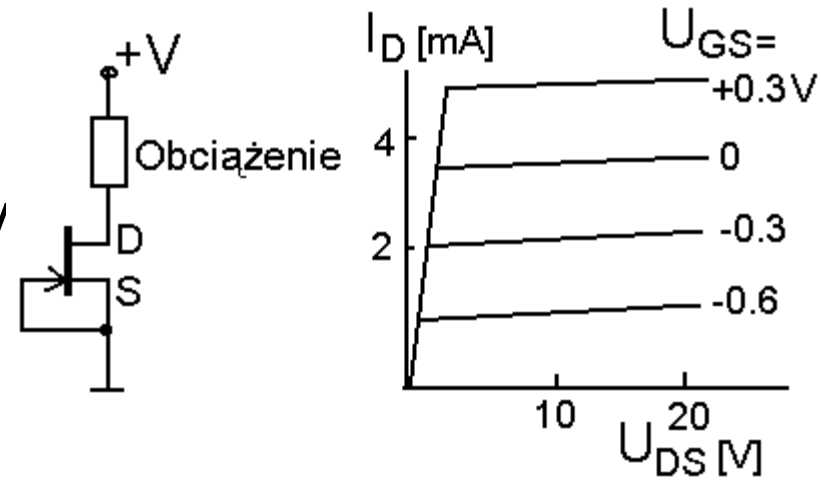


## Źródło prądowe z tranzystora JFET.

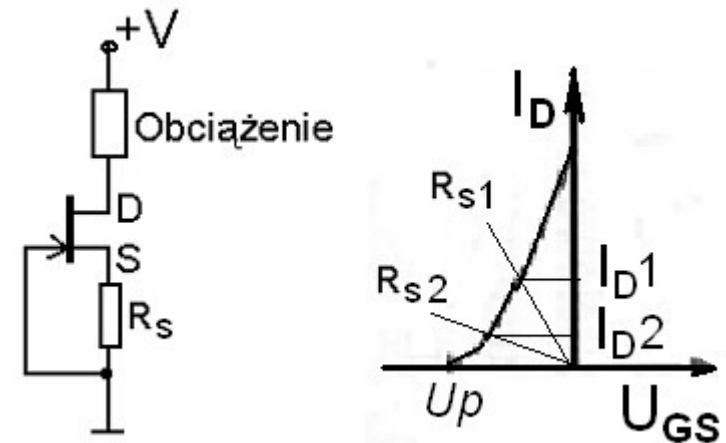
Aby zrozumieć stabilizację prądu płynącego przez obciążenie wystarczy spojrzeć na charakterystykę

$I_D = I_D(U_{DS})$ . Widać, że dla napięć  $U_{DS}$  powyżej około 3V prąd  $I_D$  jest prawie

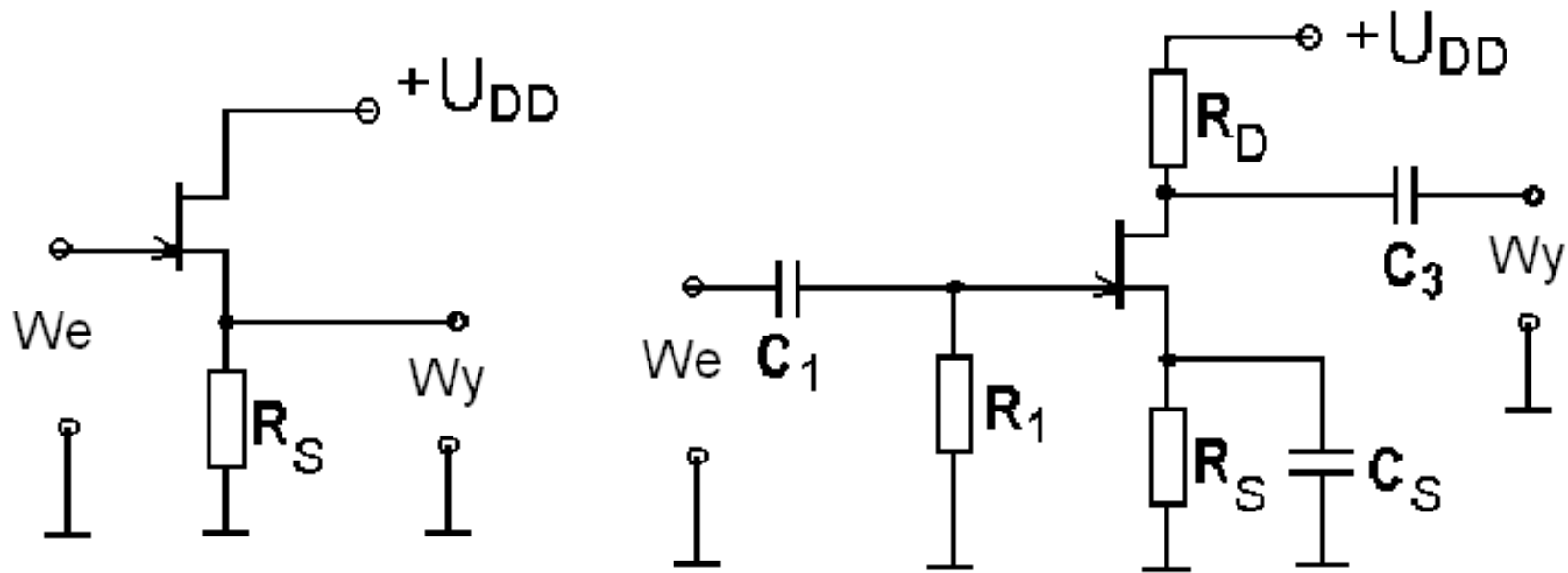
stały. Niestety wartość tego prądu zależy od egzemplarza tranzystora.



Dodając opornik  $R$  do obwodu źródła  $S$  możemy dobrać pożądaną wartość stabilizowanego prądu (poprzez automatyczne polaryzowanie bramki).



## Wtórnik źródłowy i wzmacniacz o wspólnym źródle.



Ze względu na małą transkonduktancję tranzystorów polowych b.dobrym rozwiązaniem jest układ wzmacniacza WE z tranzystorem bipolarnym, na wejściu którego znajduje się wtórnik źródłowy. Całość ma olbrzymią impedancję wejściową i dobrą transkondutancję.

# Zasada działania inwertora (negatora) CMOS.

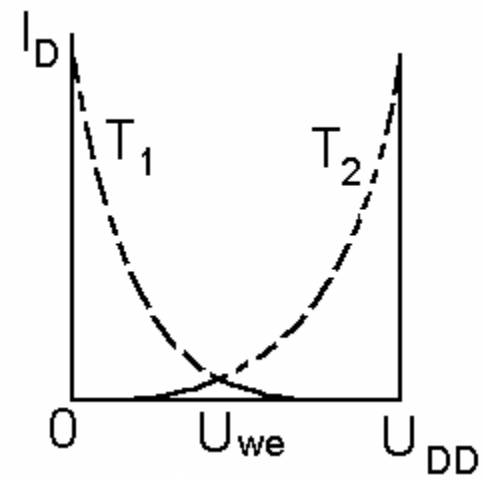
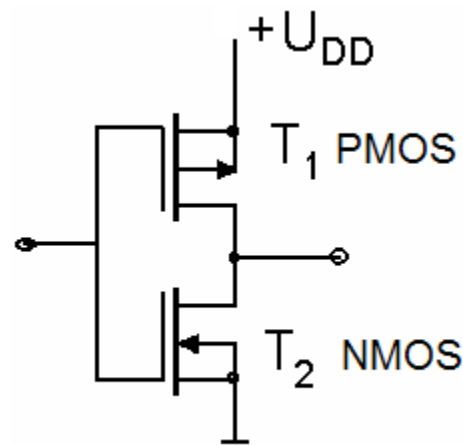
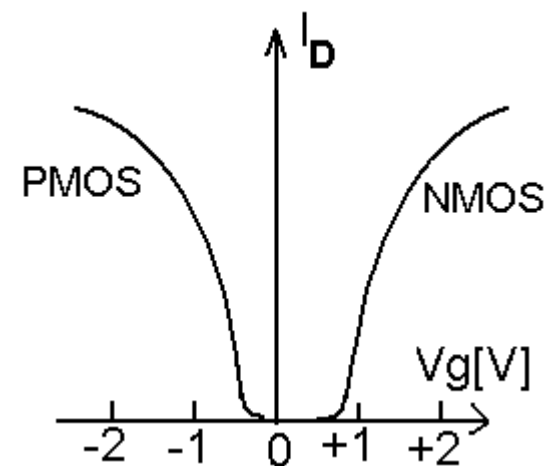
Komplementarna para tranzystorów polowych zapewnia

minimalną (niemal zerową) moc traconą na podtrzymanie stanu logicznego (0 lub 1). W obu przypadkach nie ma prądu (tj. przepływu ładunku) do „masy”. Dla sterującego stanu wysokiego mamy na wyjściu stan niski: kanał w T1 zatkany

a w T2 otwarty. Dla stanu niskiego na wejściu układu; mamy kanał w T1 otwarty a w T2 zamknięty.

W CMOS moc tracona jest tylko w momencie przełączania. To daje przewagę

tranzystorom polowym w wielu zastosowaniach zwłaszcza przy dużej skali integracji.



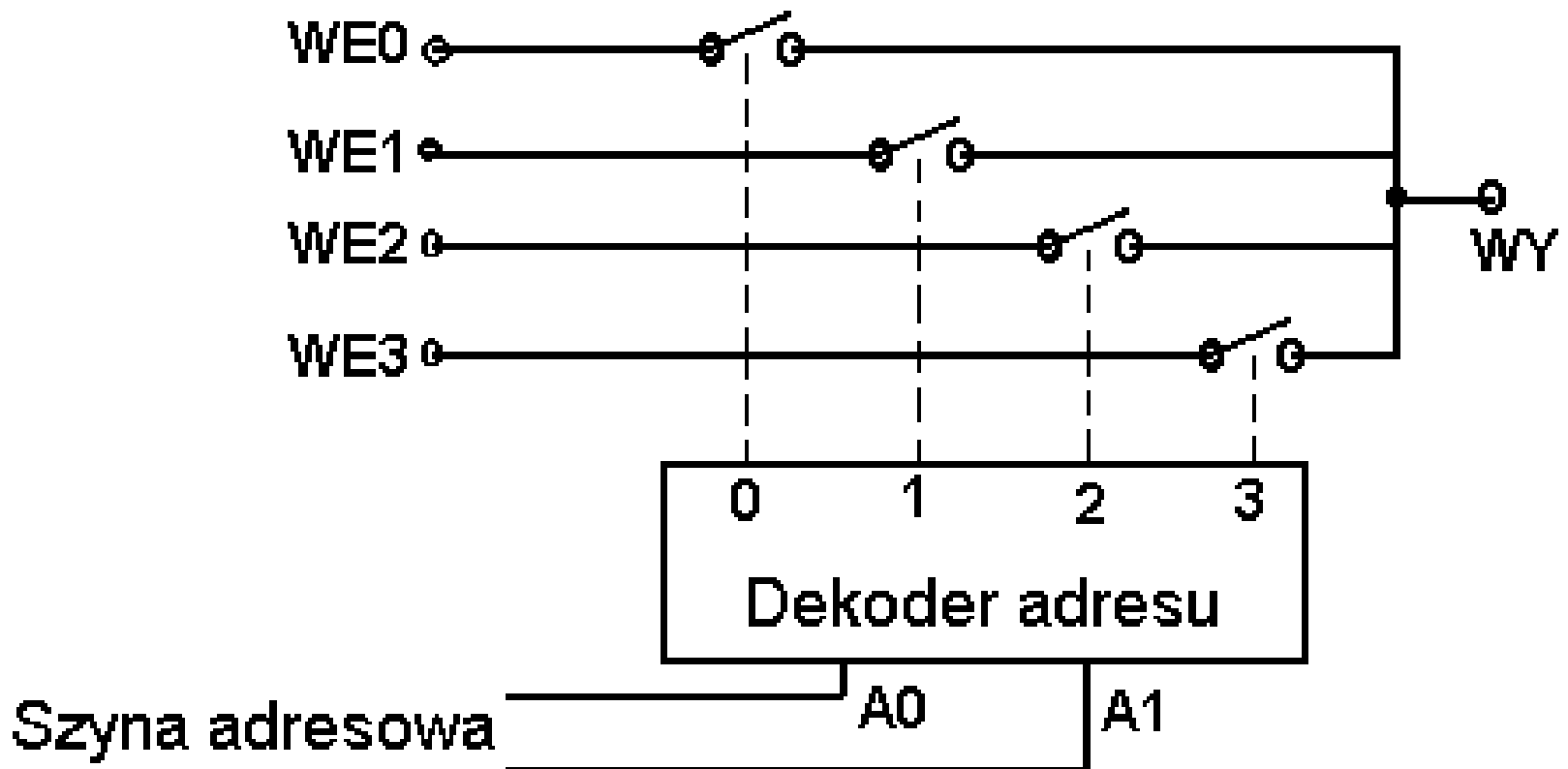




# Multiplekser analogowy

Przełączniki (klucze) z tranzystorami polowymi znalazły swoje ważne zastosowanie w multiplekserach.

W multiplekserze na pojedyncze wyjście przechodzi sygnał z tego wejścia, którego adres jest aktualnie ustawiony (cyfrowo) na szynie adresowej.



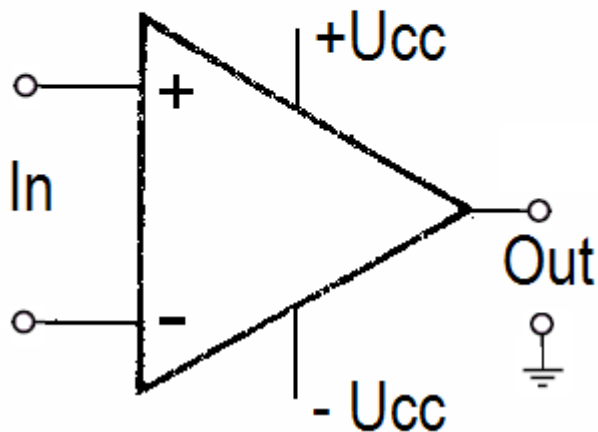
# Wzmacniacze operacyjne

Generalnie wzmacniacze spełniają jedno z podstawowych zadań elektroniki: wzmacnianie sygnałów elektrycznych.

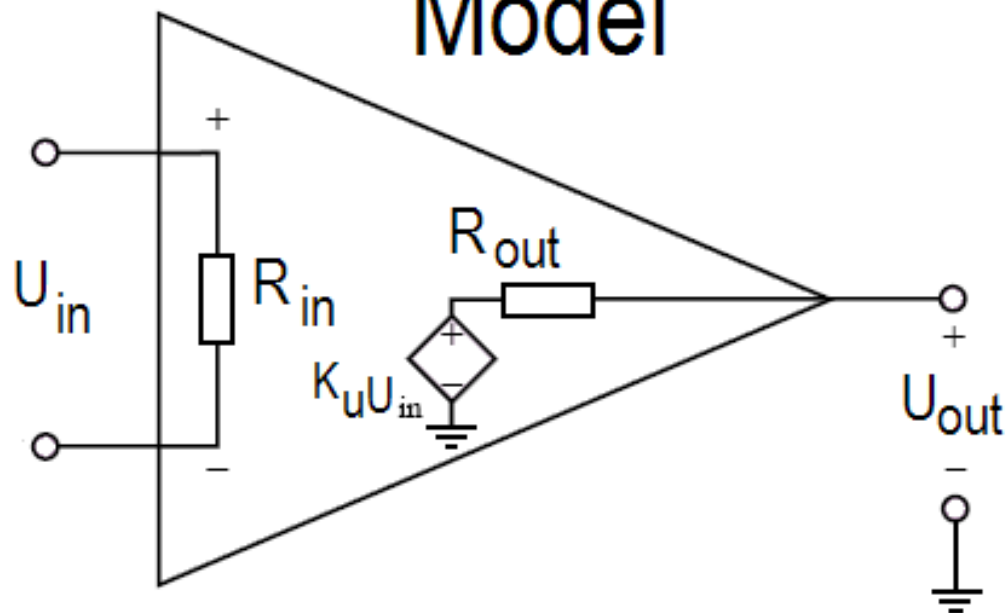
Wzmacniane są sygnały z mikrofonu, płyt gramofonowych, kompaktów, z anten odbiorników radiowych i TV, przetworników i sensorów (sygnały z bioelektrod, tensorów, czujników przyspieszenia, temperatury, oświetlenia i wiele innych).

Wzmacniacze operacyjne WO (operational amplifiers op amps) wyróżniają się olbrzymim wzmocnieniem co sprawia, że idealnie nadają się do pracy z różnymi układami ujemnego sprzężenia zwrotnego. Detale sprzężenia zwrotnego decydują o funkcji lub operacji jaką układ może spełniać to uzasadnia nazwę „operacyjny”.

## Symbol graficzny



## Model



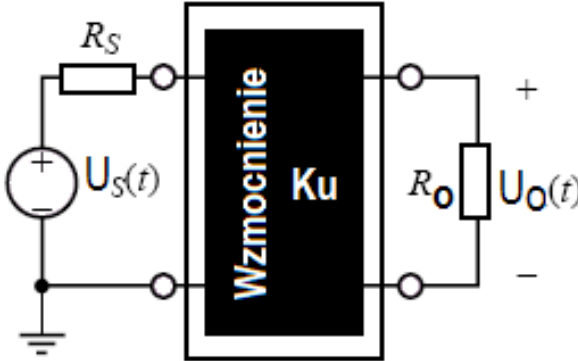
# Efektywne wzmocnienie w układzie i wzmacniacz idealny

Do wzmacniacza (czarnej skrzynki) „wchodzi” sygnał z jakiegoś źródła.

A wzmocniony sygnał przyjmuje obciążenie  $R_o$ .

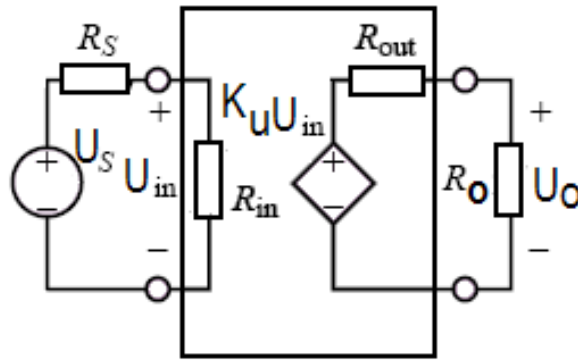
Źródło możemy zastąpić układem Thevenina

Wzmacniacz napięciowy



Źródło Wzmacniacz Obciążenie

Model wzmacniacza



o parametrach:  $U_s$  i  $R_s$ . Czarną skrzynkę wzmacniacza może reprezentować układ złożony z rezystora o rezystancji wejściowej wzmacniacza „widzianej” przez źródło oraz wyjściowego układu Theveninowskiego o parametrach: źródło napięciowe o napięciu  $K_U U_{in}$  i rezystancji  $R_{out}$  („widzianej” przez obciążenie  $R_o$ ). Wtedy wzmocnienie efektywne w układzie  $k_{Uef} = U_o / U_s$ .

Napięcie wejściowe (z wiedzy o dzielniku napięcia):  $U_{in} = U_s R_{in} / (R_{in} + R_s)$

Napięcie wzmocnione:  $U_o = K_U U_s R_{in} / (R_{in} + R_s) \times R_o / (R_{out} + R_o)$ ,

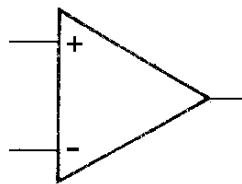
W końcu;  $k_{Uef} = U_o / U_s = K_U R_{in} / (R_{in} + R_s) \times R_o / (R_{out} + R_o)$ ,

Widać, że dla  $R_{in} = \infty$ , i  $R_{out} = 0$  wzmocnienie byłoby maksymalne =  $K_U$ .

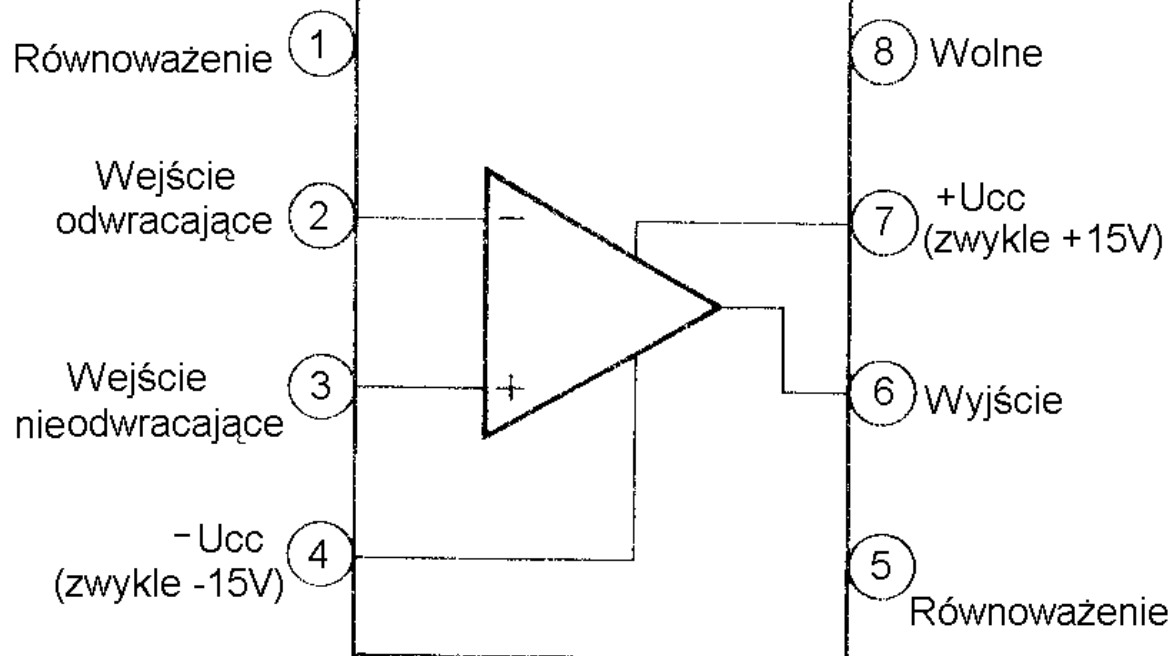
**Zatem generalnym wymaganiem wobec dobrego wzmacniacza jest: duża impedancja wejściowa i mała impedancja wyjściowa!**

Wzmacniacze operacyjne (WO) jest układem scalonym czyli zbiorem wielu obwodów elektronicznych zintegrowanych na jednym krysztale (zwykle krzemowym). Wzmacniacze operacyjne mają wielkie wzmocnienie napięciowe około  $10^6 V/V$ , pozwalające na stosowanie zewnętrznego obwodu ujemnego sprzężenia zwrotnego, który osłabia wzmocnienie ale poprawia stabilność i pasmo częstotliwości. WO mają dwa wejścia; (+) - wejście nieodwracające i (-) - wejście odwracające. Na wyjściu pojawia się wzmocniona różnica sygnałów z tych wejść:  $U_{WY}[V] = f((U_+ - U_-) [\mu V])$ .

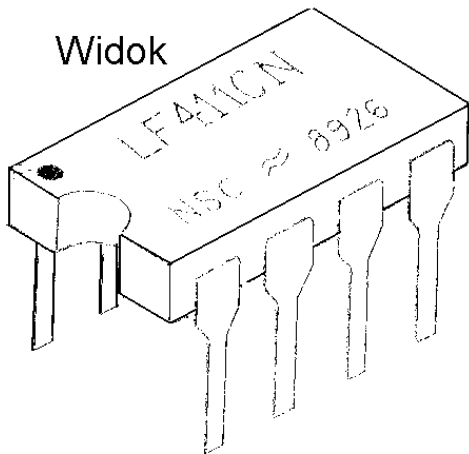
Symbol graficzny



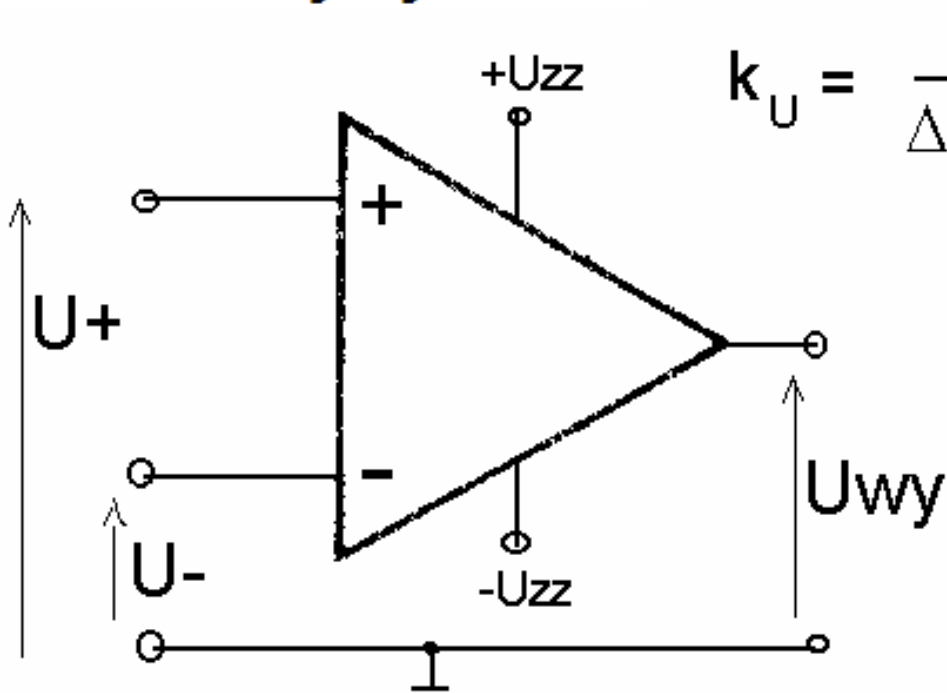
Wyprowadzenia w 411 (widok z góry)



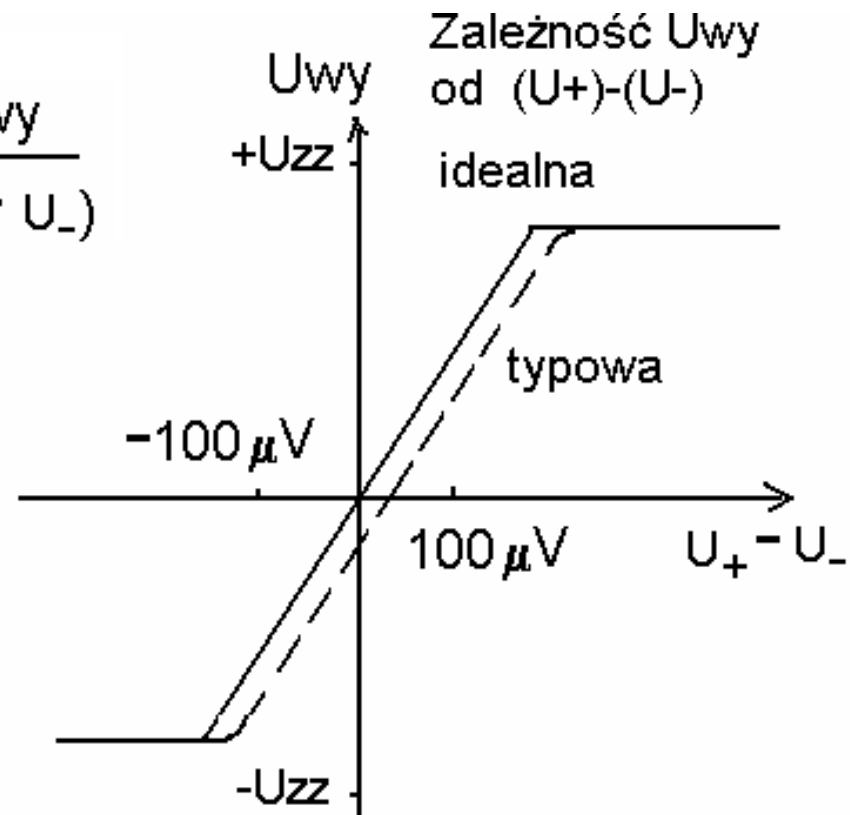
Widok



# Charakterystyka WO



$$k_U = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_+ - U_-)}$$



Zależność  $U_{wy}$   
od  $(U_+) - (U_-)$   
idealna

typowa

$-100 \mu V$

$100 \mu V$

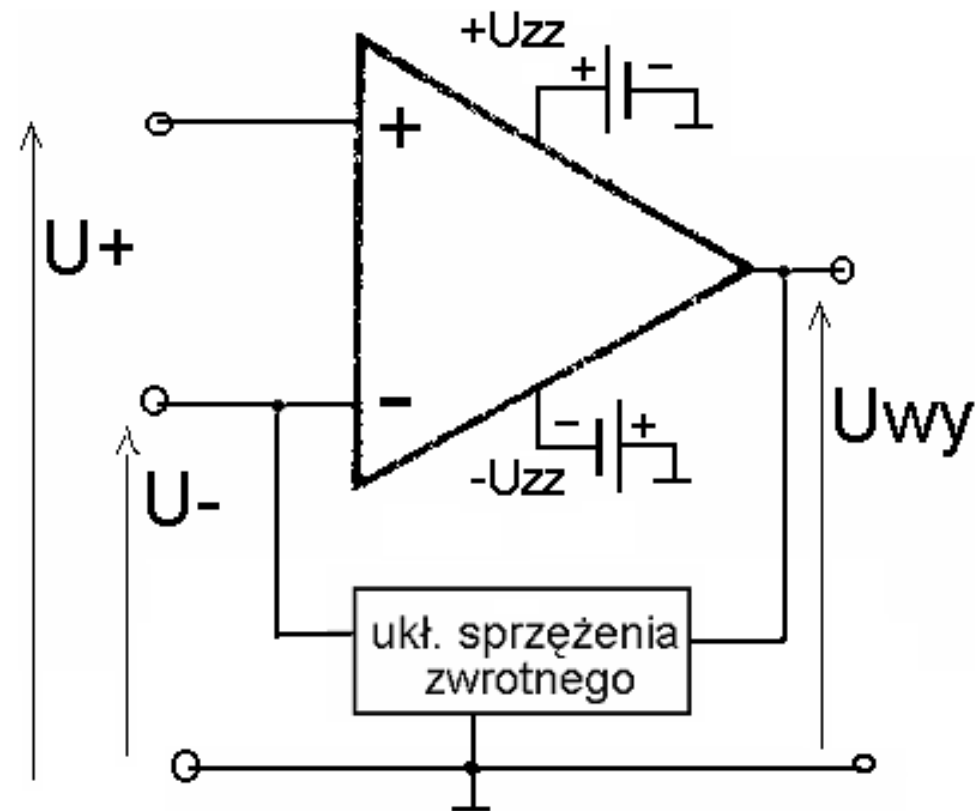
$U_+ - U_-$

$-U_{zz}$

Obecnie mamy do wyboru wiele rodzin wzmacniaczy o różnym zastosowaniu i różnych napięciach zasilania (podwójne np.  $\pm 1V$  lub  $\pm 15V$ , pojedyncze np.  $+5V$ ). Ważnymi parametrami są: i) Wejściowe napięcie niezrównoważenia (offsetu), najmniejsze jego wartości to  $\pm 1\mu V$  z temperaturowym dryfem  $0,05\mu V/^\circ C$ . ii) Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego (common-mode rejection ratio CMRR) wyrażany w dB. iii) Maksymalna szybkość zmian napięcia wyjściowego (związana z szerokością pasma) – slew rate. iv) Współczynnik szumu wyrażany w  $nV/\sqrt{Hz}$ . [http://www.williamson-labs.com/480\\_opam.htm](http://www.williamson-labs.com/480_opam.htm)

# Typowy układ z WO z zastosowaniem ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Mówimy, że jest to układ z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego (closed-loop).



# Fundamentalne założenia przy analizie układów zawierających WO.

Wzmocnienie wzmacniaczy operacyjnych jest tak wielkie, że zmiana różnicy napięć wejściowych  $\Delta(U_+ - U_-)$

o mały ułamek miliwolta powoduje pełną zmianę napięcia wyjściowego (zależnie od napięcia zasilania nawet ponad 10V). Stąd pomijamy to znikome różnicowe napięcie wejściowe co prowadzi do założenia nr.1:

1. Obwód wyjściowy WO (nie będącego w nasyceniu) robi wszystko aby  $\Delta(U_+ - U_-) = 0$ .

Wartości prądów stałych wpływających do (lub wypływających z) wejść WO są tak małe, że można je pomijać w analizie układu:

2. Wejścia wzmacniacza operacyjnego nie pobierają prądu z zewnątrz.

$$1) \quad \Delta(U_+ - U_-) = 0, \quad 2) \quad I_{we} = 0$$

1) i 2) stanowią podstawę do układania równań przy analizie układów z WO!



## Przykłady

Wzmacniacz odwracający.

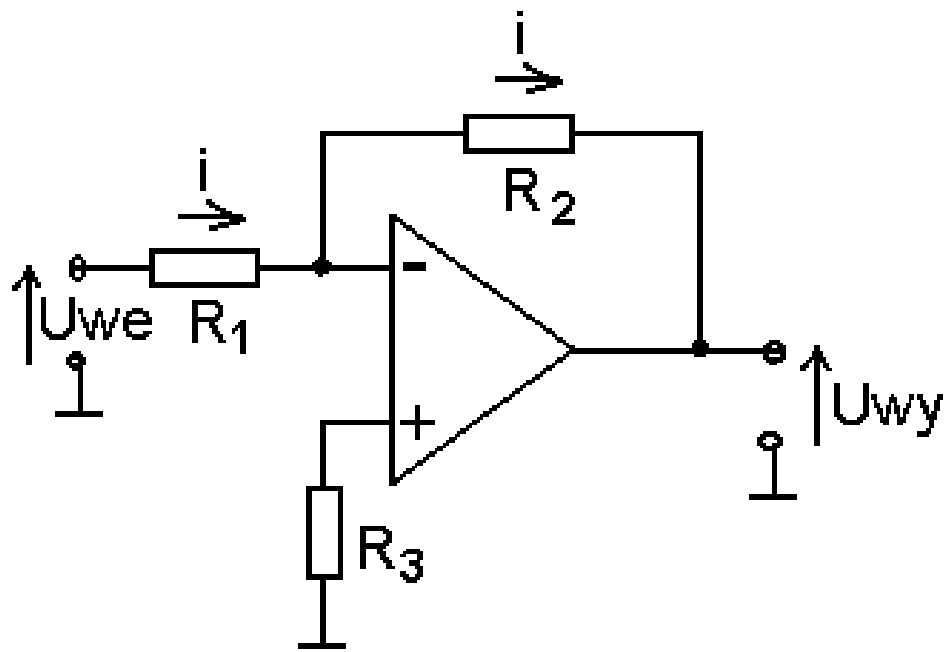
Zgodnie z założeniami I i II

$U_+ = U_- = 0$ , a prąd „i” nie rozgałęzia się do wejścia „-”.

Stąd wzmacnienie

napięciowe  $k_U = U_{wy}/U_{we} =$

$-R_2/R_1$ , a  $R_{we} = R_1$ .



Wzmacniacz nieodwracający.

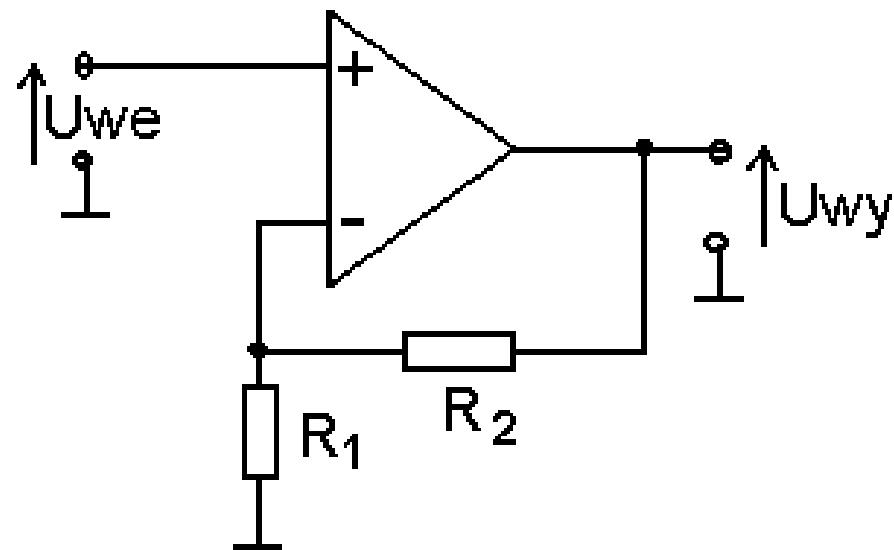
Z 1) i 2) mamy:  $U_+ = U_{we} = U_- =$

$iR_1$ , a  $U_{wy} = i(R_1 + R_2)$ . Stąd

$k_U = (R_1 + R_2)/R_1 = 1 + R_2/R_1$ .

$R_{we} > 10^8 \Omega$  lub  $> 10^{12} \Omega$

zależnie od typu WO.

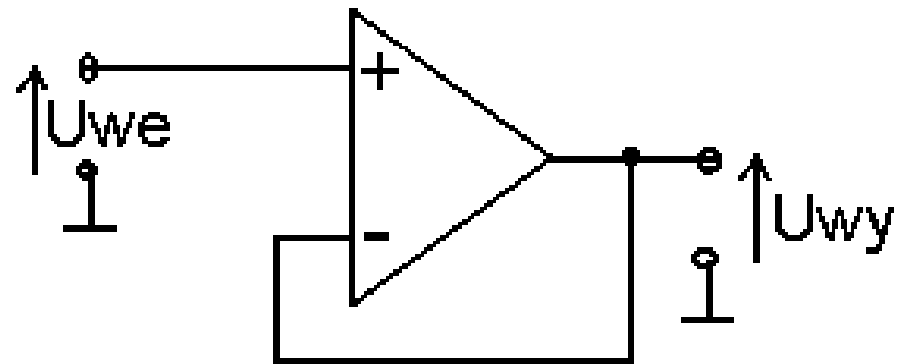


## Przykłady

Wtórnik napięciowy.

$$R_{we} \gg R_{wy},$$

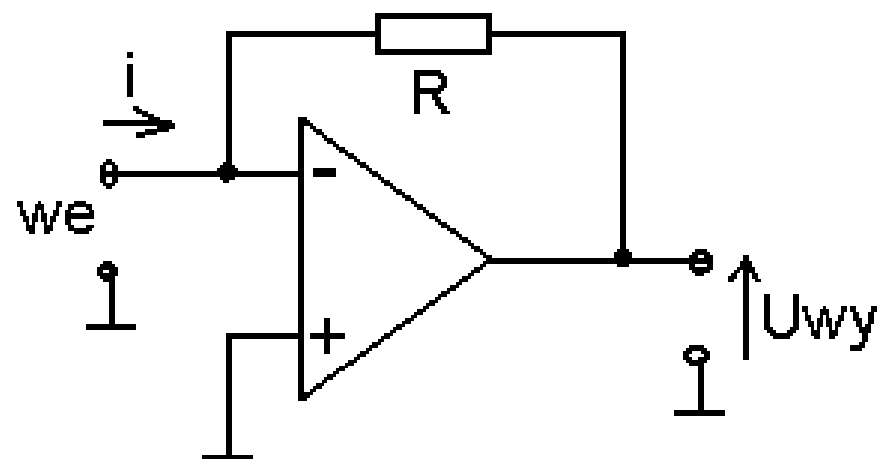
$$U_{wy} = U_{we}.$$



Przetwornik prąd-napięcie.

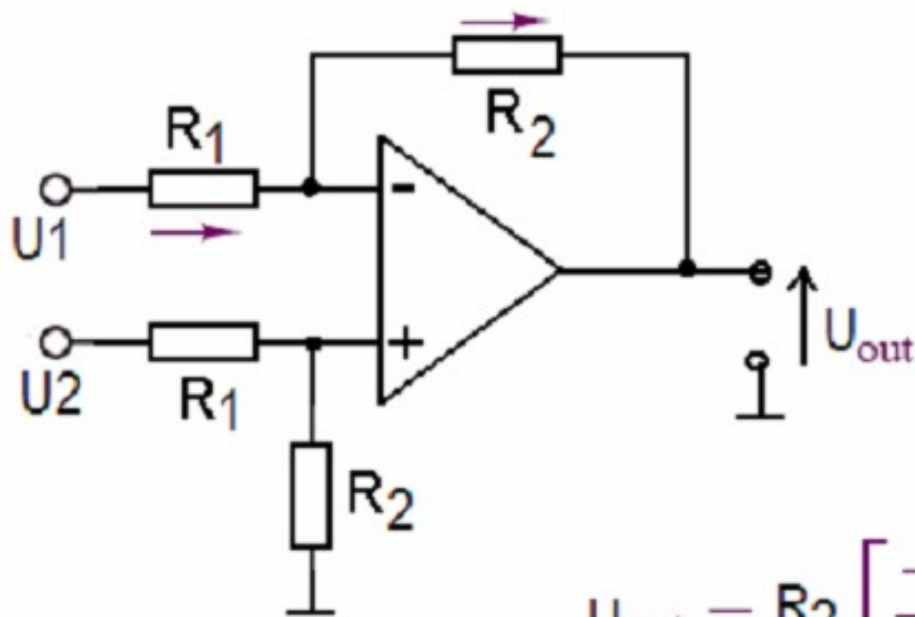
$$U_{we} \cong 0.$$

$$U_{wy} = -iR$$



**Połączenie wyjścia z wejściem (-) stanowi pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego obniżającego wzmacnienie.** Więcej o sprzężeniach zwrotnych (feedback) w następnym wykładzie.

# Wzmacniacz różnicowy



$$U^- = U^+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_2$$

$$\frac{U_1 - U^+}{R_1} = \frac{U^+ - U_{out}}{R_2}$$

$$U_{out} = R_2 \left[ \frac{-U_1}{R_1} + \frac{1}{R_1 + R_2} U_2 + \frac{R_2}{R_1(R_1 + R_2)} U_2 \right]$$

$$U_{out} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

# Wzmacniacz pomiarowy

Wzmocnienie  $K_U = U_{out}/(U1 - U2)$ .

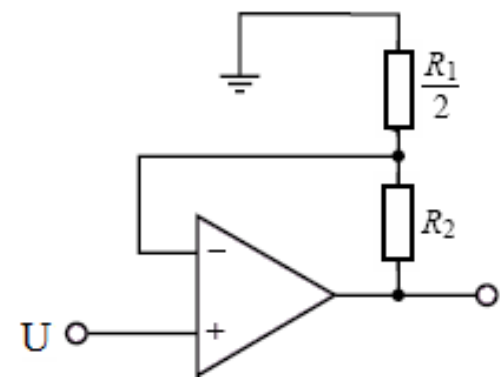
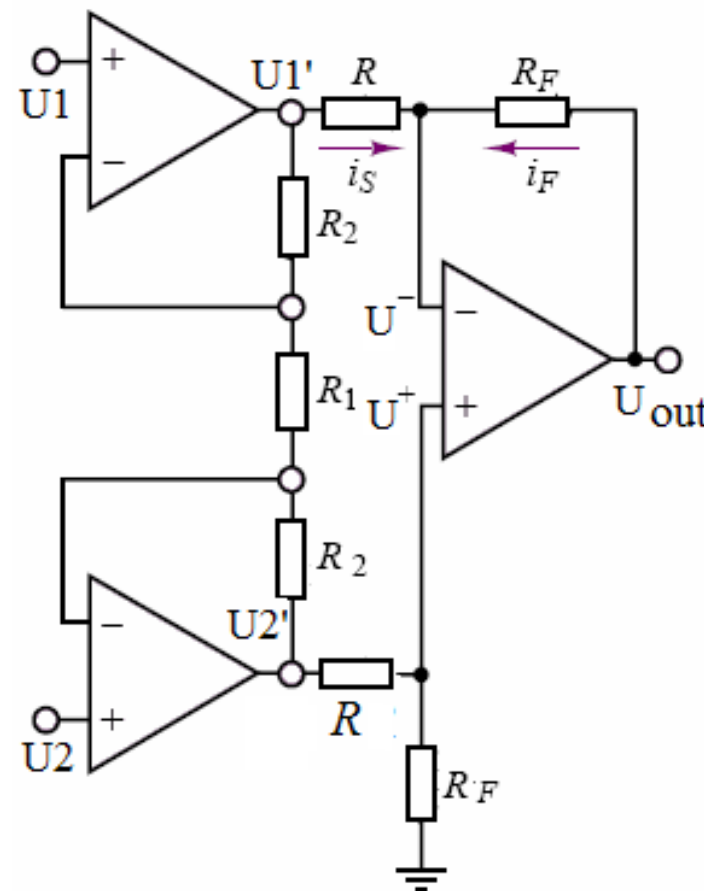
Dzięki symetrii możemy każdą z połówek pierwszego stopnia przedstawić jako wzmacniacz nieodwracający tak jak na schemacie dolnym. Jego wzmocnienie wynosi:  $K_{U1} = K_{U2} = 1 + R_2/(R_1/2) = 1 + 2R_2/R_1$ . Każda z połówek stanowi wejście do drugiego stopnia, który jest wzmacniaczem różnicowym (strona 18). Mamy więc:

$$U_{out} = (K_{U1}U1 - K_{U2}U2)R_F/R$$
$$= (R_F/R)(1 + 2R_2/R_1)(U1 - U2).$$

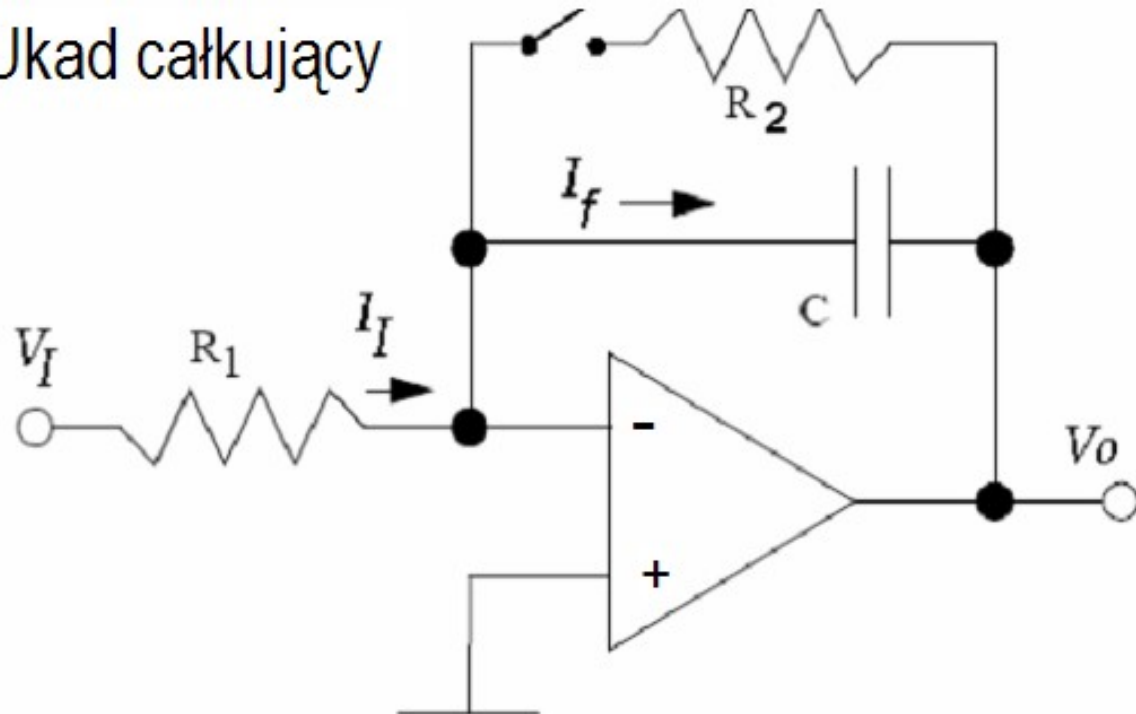
Zatem wzmocnienie wzmacniacza pomiarowego możemy wyrazić jako:

$$K_U = U_{out}/(U1 - U2) = (R_F/R)(1 + 2R_2/R_1).$$

Taki wzmacniacz (z dobrze dobranymi rezystorami) można nabyć jako jeden układ scalony np. AD625.



## Układ całkujący



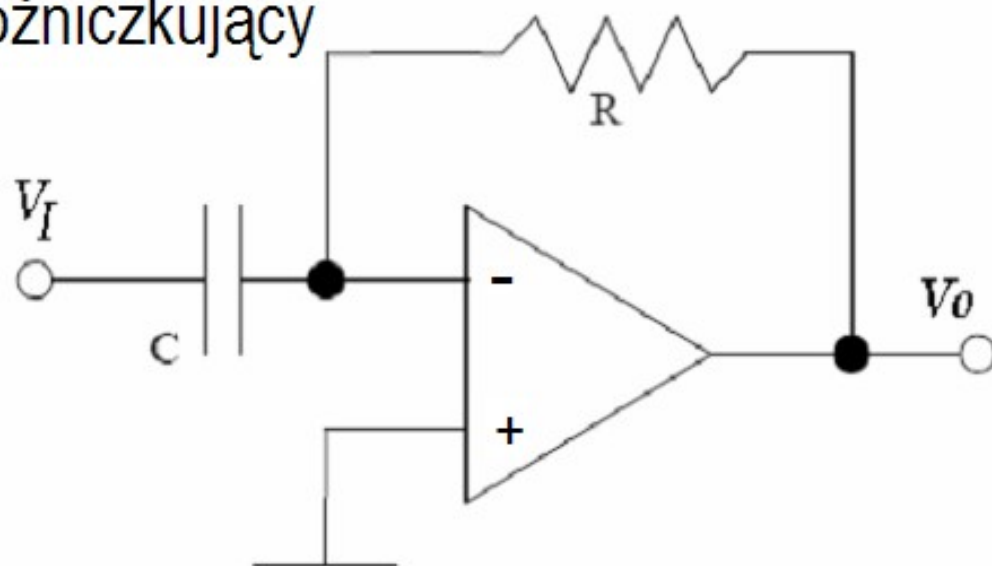
$$V_- = V_+ = 0$$

$$I_I = \frac{V_I}{R_1} \quad I_f = -C \frac{d}{dt} V_o$$

$$\sum I_n = I_I - I_f = 0 = \frac{V_I}{R_1} + C \frac{d}{dt} V_o$$

$$V_o = -\frac{1}{R_1 C} \int V_I dt + \text{const}$$

## Układ różniczkujący



$$I = C \frac{d}{dt} V_I$$

$$V_o = -IR = -RC \frac{d}{dt} V_I$$

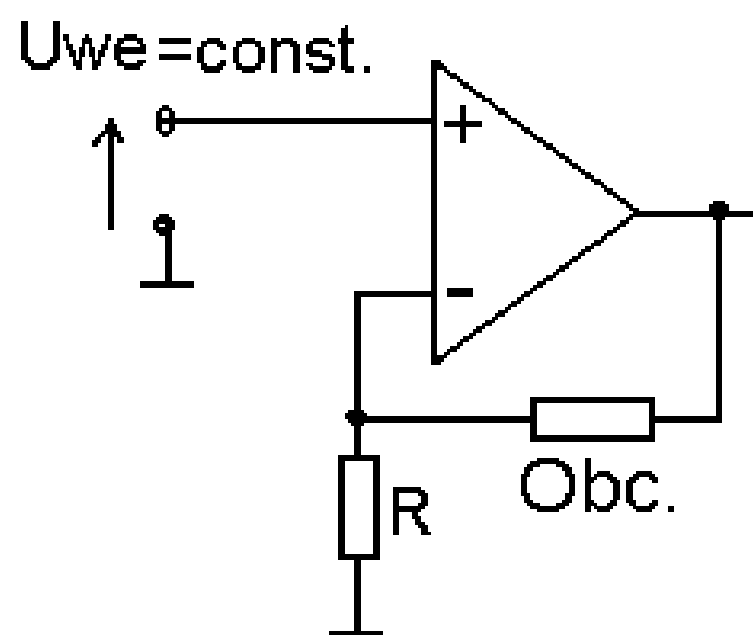
$$V_o = -RC \frac{d}{dt} V_I$$

# Przykłady

Źródło prądowe.

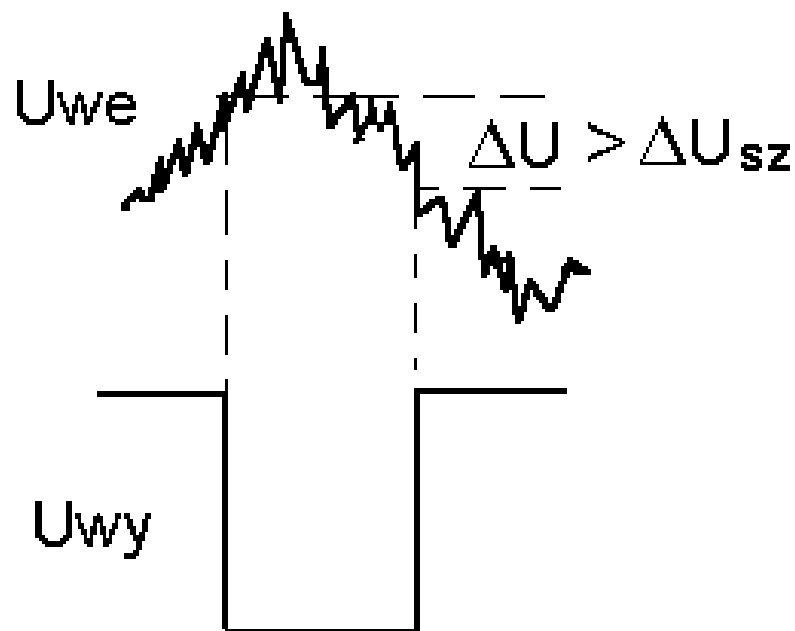
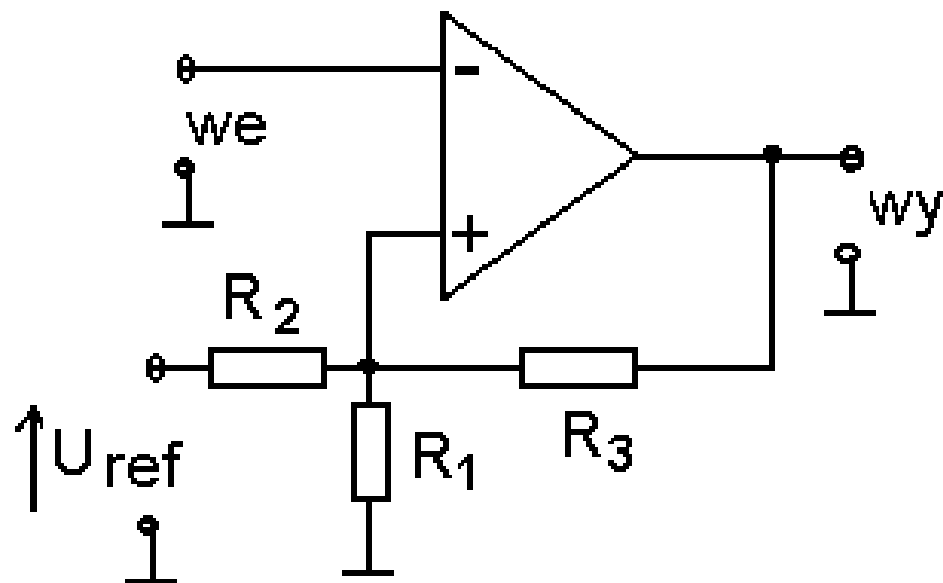
$$I = U_{we}/R.$$

Jedyna wada to brak uziemienia obciążenia.



## Przerzutnik Schmitta

(regeneracyjny komparator napięcia)



# Wzmacniacz sumujący

Prąd przez  $R$  jest sumą prądów przez  $R_0$ ,  $R_1$ ,  $R_2$  i  $R_3$ . Zatem  $U_{wy} = I_{sum}$ .

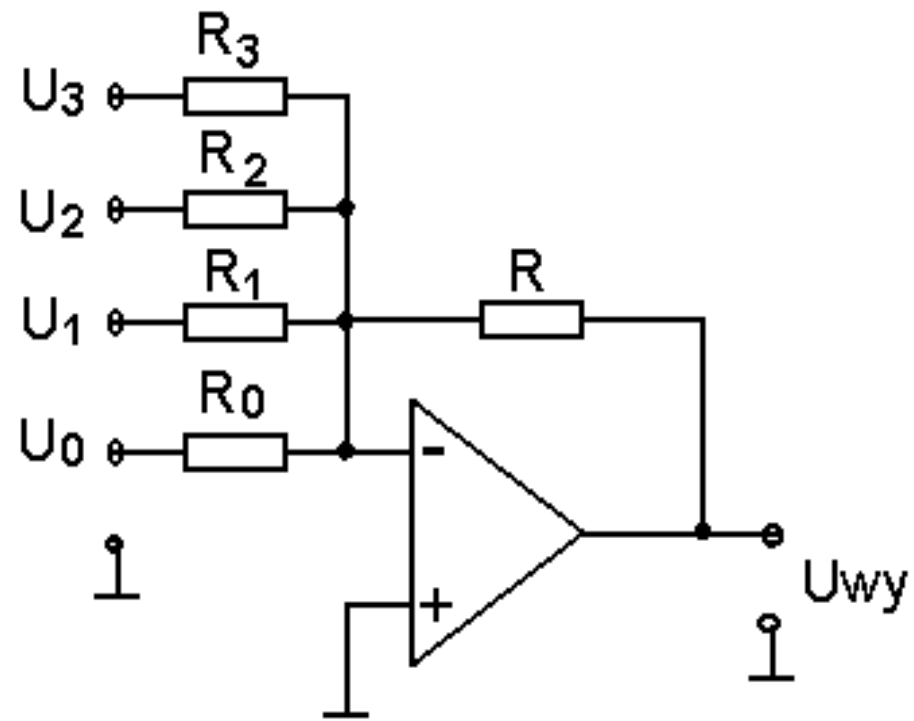
$R$  jest proporcjonalne do sumy prądów wejściowych.

To znaczy, że:

$$U_{wy} = - \left( U_0 R/R_0 + U_1 R/R_1 + U_2 R/R_2 + U_3 R/R_3 \right)$$

Czyli napięcie wyjściowe jest ważoną sumą napięć wejściowych.

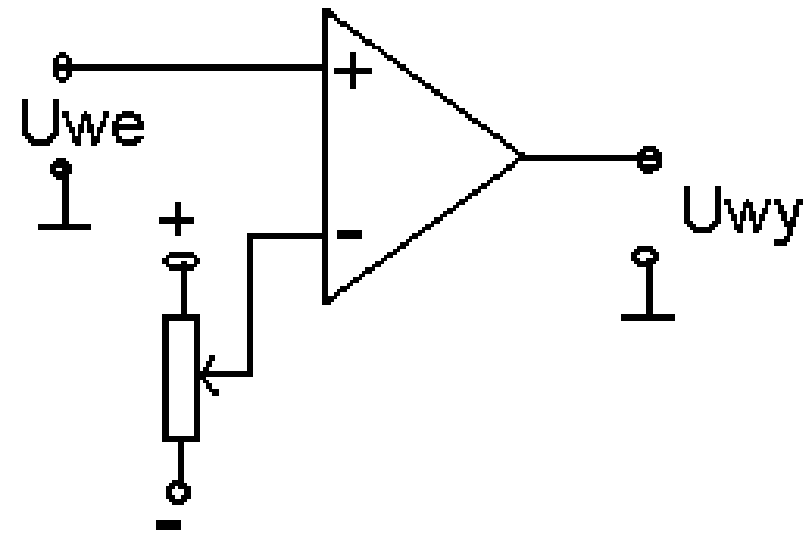
Jeżeli dobierzemy oporniki tak aby  $R_0 = 2R_1 = 4R_2 = 8R_3$ , to uzyskamy czterobitowy przetwornik cyfrowo-analogowy tzw. przetwornik C/A!



# Komparatory analogowe

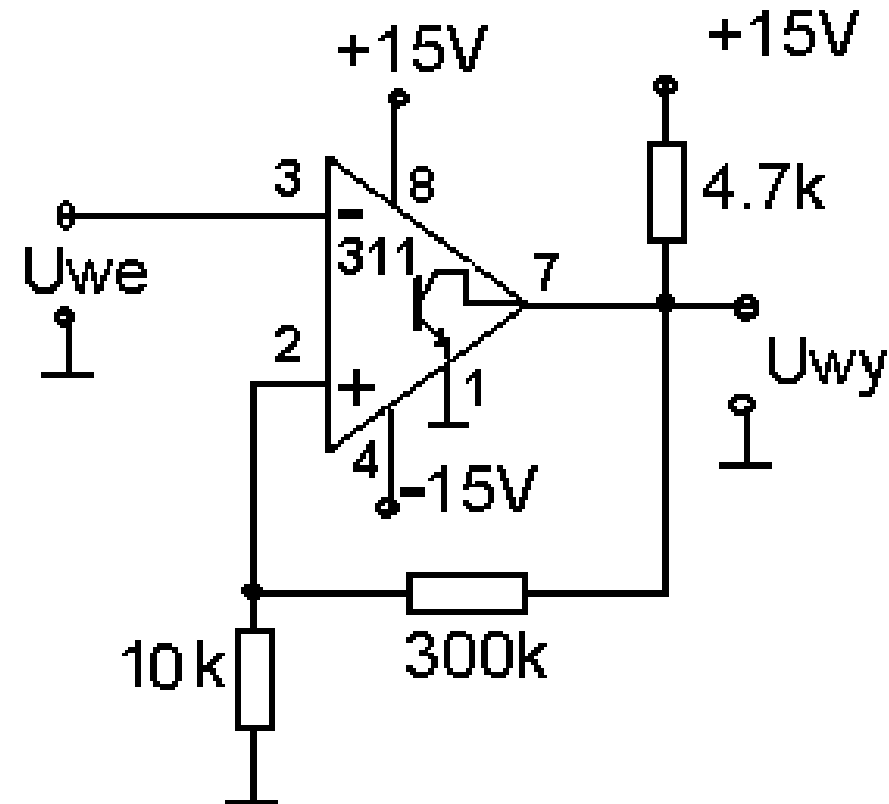
Są to wzmacniacze bez ujemnego sprzężenia zwrotnego. Na wyjściu mamy przeskok

między stanami niskim i wysokim w momencie gdy napięcie wejściowe przechodzi przez wartość napięcia referencyjnego.



Dobry komparator z dodatnim sprzężeniem zwrotnym i histerezą - przerzutnik Schmitta.

(układ typu 311 jest układem scalonym z otwartym kolektorem). Dzięki histerezie komparator nie pomnaża ilości przetwarzanych impulsów.





# Rodzaje wzmacniaczy operacyjnych

Zależnie od zastosowania można wyróżnić wzmacniacze:

- 1) Wzmacniacze precyzyjne i niskoszumowe. Zastosowania w technice pomiarowej (oraz w układach o wysokich parametrach technicznych).
- 2) Wzmacniacze oszczędne energetycznie. Stosowane w urządzeniach przenośnych (pobierają prąd poniżej  $1\mu\text{A}$ ).
- 3) Wzmacniacze transkonduktancyjne. Posiadają dodatkowe, trzecie wejście służące do regulacji wzmocnienia.
- 4) Wzmacniacze Nortona. Mają małą oporność wejściową a sterowanie jest sterowaniem prądowym. Wzmocnieniu podlega różnica prądów wejściowych.
- 5) Wzmacniacze izolacyjne. Posiadają wyjście odizolowane galwanicznie od wejścia. Umożliwiają nie tylko pomiar sygnałów ale również ich przenoszenie między różnymi piedestałami potencjału elektrycznego. Stosowane są w laboratoriach fizycznych i technikach medycznych.

# Układ próbkująco-pamiętający (S/H *sample-and-hold*)

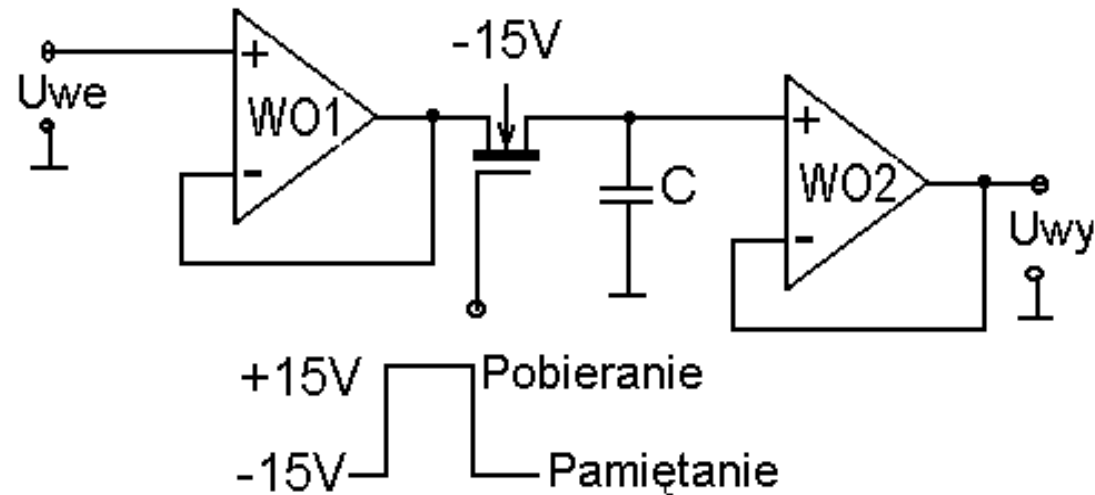
Układ ten próbkuje sygnał analogowy  $U_{we}$ .

W wybranym momencie i przez chwilę podtrzymuje jego wartość na pojemności  $C$  i na wyjściu

jako  $U_{wy}$ . Chwilowe podtrzymywanie napięcia  $U_{wy}$  jest konieczne dla dokonania przetworzenia analogowo-cyfrowego przez podłączony do wyjścia przetwornik A/C.

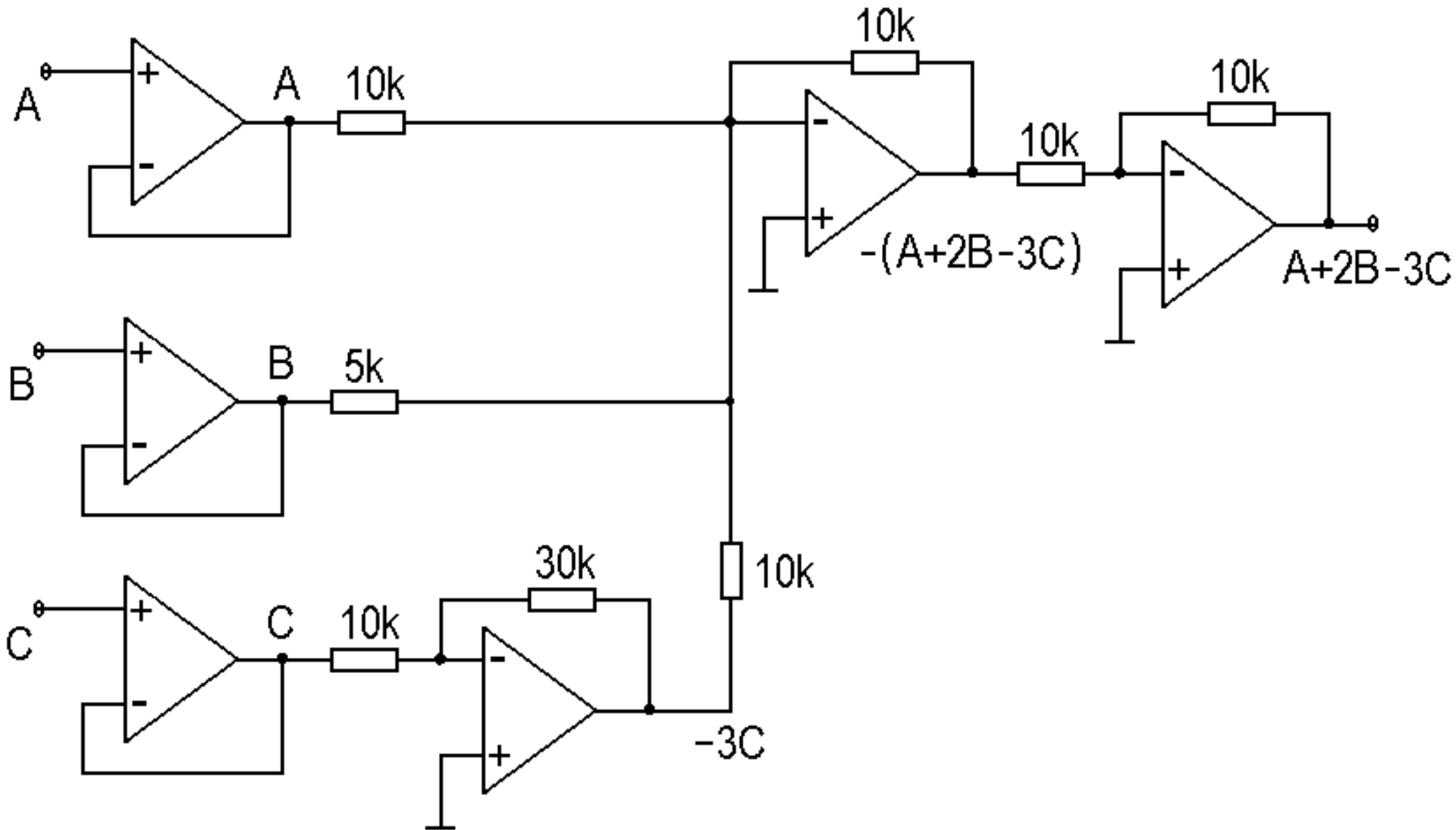
Dla szybkiego i precyzyjnego próbkowania układ WO1 musi być szybki a WO2 musi mieć tranzystory polowe na wejściu.

Układy S/H są nieodzowne gdy zachodzi potrzeba pomiaru kilku napięć (odpowiedników pewnych wielkości fizycznych) w tym samym czasie. Kilka układów S/H sterowanych wspólnym zegarem rozwiązuje problem. Podtrzymywane napięcia mogą być już przetwarzane kolejno przez jeden przetwornik A/C.

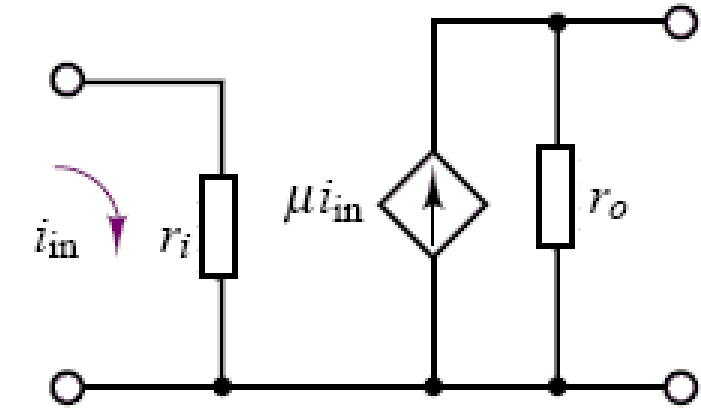


Przykład. Zaproponuj układ, który będzie „sumował” napięcia ze źródeł A, B i C w następujący sposób:  $V_{WY} = A + 2B - 3C$ .

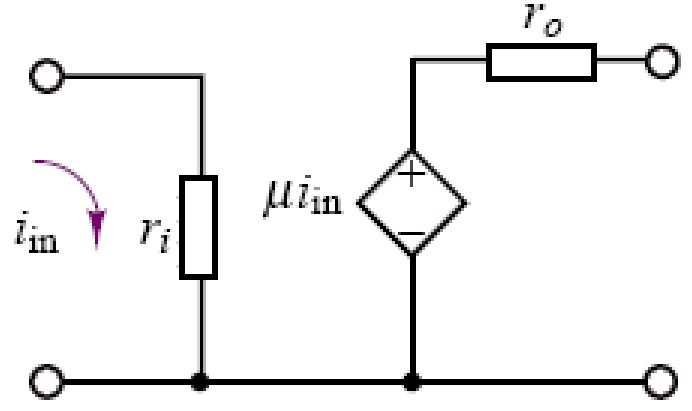
Rozwiązanie:



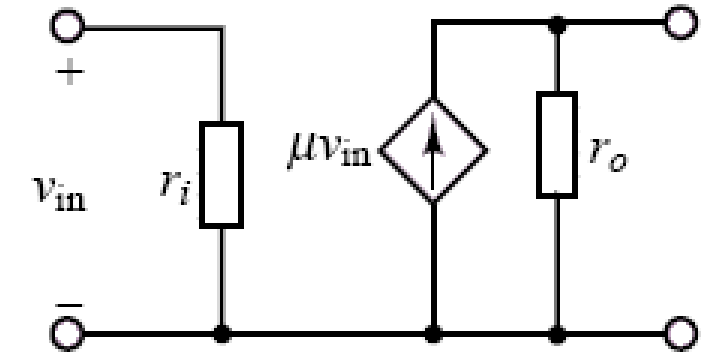
Układy zastępcze – modele (czy widać tu ideę zaczerpniętą z twierdzenia Thevenina lub Nortona?)



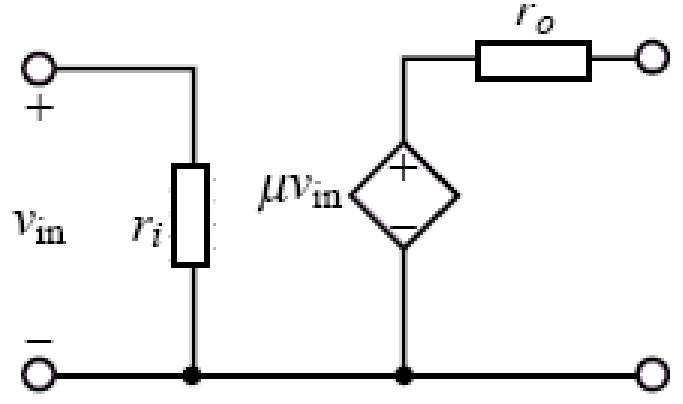
(a) Źródło prądowe sterowane prądem



(b) Źródło napięciowe sterowane prądem

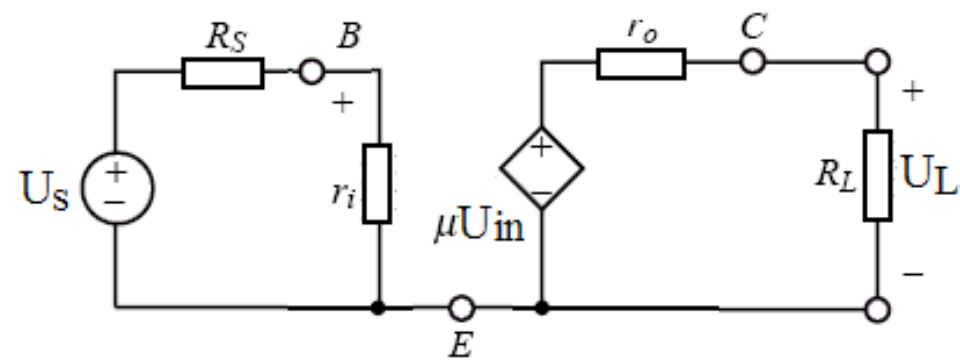


(c) Źródło prądowe sterowane napięciem



(d) Źródło napięciowe sterowane napięciem

Przykład. Obliczyć wzmacnienie napięciowe  $K_u = U_L/U_s$  mając dane: wejściową i wyjściową rezystancję,  $r_i$  i  $r_o$ ; wzmacnienie wewnętrzne  $\mu$ ; rezystancje źródła i obciążenia  $R_s$  i  $R_L$ .



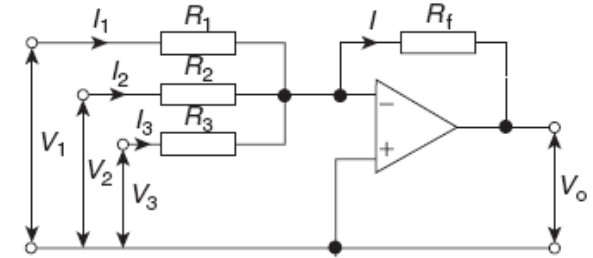
Rozw. Napięcie wejściowe wynosi:  $U_{in} = r_i/(r_i + R_s)$ , wtedy wyjściowa wartość napięcia samego źródła wyniesie:

$\mu U_{in} = \mu r_i U_s / (r_i + R_s)$ . Z działania dzielnika napięcia znajdujemy napięcie wyjściowe:  $U_L = [\mu r_i U_s / (r_i + R_s)] \times [R_L / (r_o + R_L)]$ . Zatem wzmacnienie  $K_u = U_L/U_s = [\mu r_i / (r_i + R_s)] \times [R_L / (r_o + R_L)]$ .

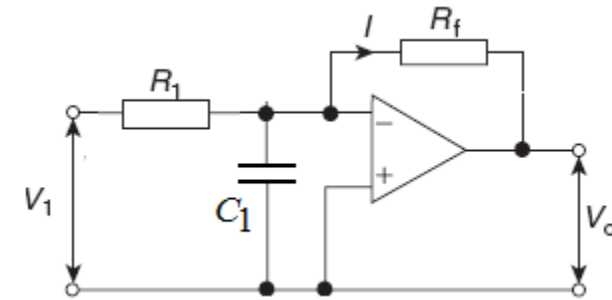
Widać, że obliczone wzmacnienie układu jest zawsze mniejsze od wzmacnienia wewnętrznego  $\mu$  i zależy od stosunku wartości rezystancji źródła do rezystancji wejściowej oraz stosunku rezystancji wyjściowej do rezystancji obciążenia.

# Elektrotechnika i elektronika lista 11

1) Oblicz natężenia prądów i napięcie wyjściowe wiedząc, że  $R_1 = 10\text{k}$ ,  $R_2 = 20\text{k}$ ,  $R_3 = 30\text{k}$ ,  $R_f = 50\text{k}$  i  $U_1 = 1\text{ V}$ ,  $U_2 = 0,4\text{ V}$ ,  $U_3 = 2,4\text{ V}$ .



2) Oblicz wzmocnienie sygnału o częstotliwości  $1/6,28\text{ MHz}$ , wiedząc, że  $R_1 = 10\text{ k}$ ,  $R_f = 100\text{ k}$ ,  $C_1 = 0,1\text{ }\mu\text{F}$ .



3) Zaproponuj przerzutnik Schmitta, który przełącza się przy napięciach wejściowych  $0,5\text{ V}$  i  $2,5\text{ V}$ . Wiadomo, że sam wzmacniacz operacyjny zasilany  $\pm 12\text{V}$  nasycy się do  $\pm 10\text{ V}$ .

4) Zaproponuj układ ze wzmacniaczami operacyjnymi realizujący funkcję:  
 $F = U_1 + 3U_2 - 4U_3$ .