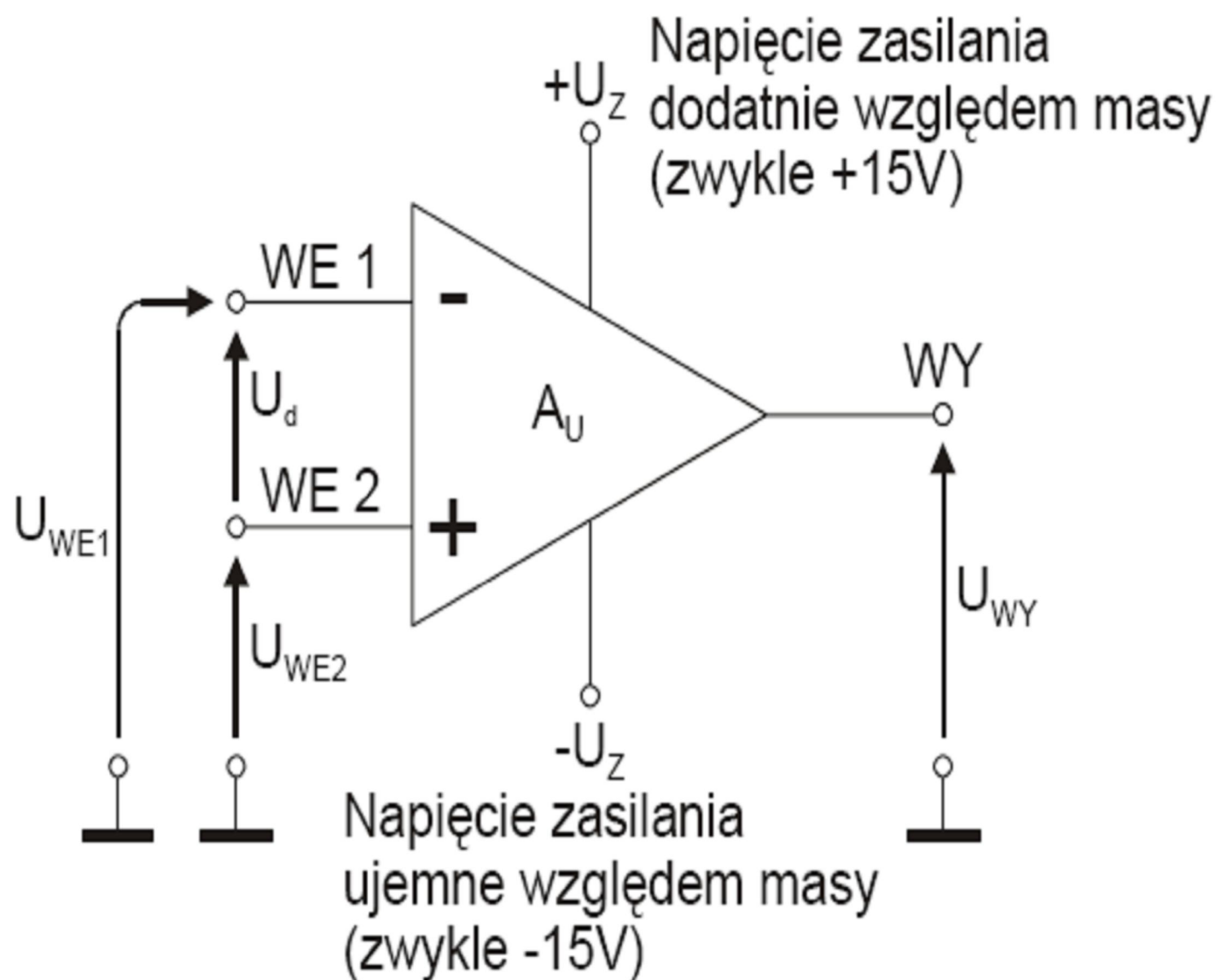


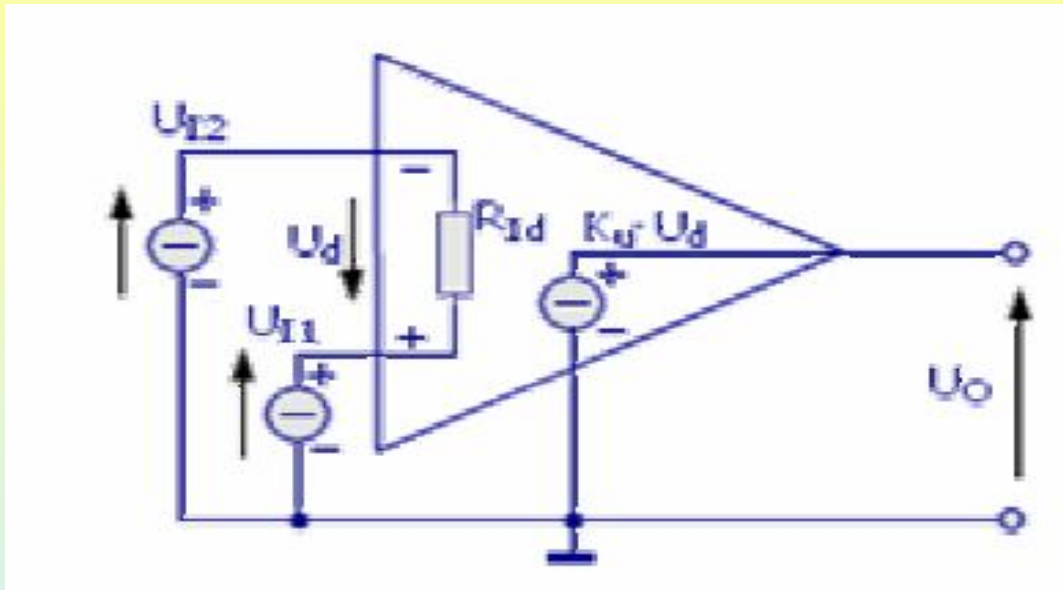
Wzmacniacz operacyjny

opisywany jest jako wzmacniacz prądu stałego, czyli wzmacniacz o sprzężeniach bezpośrednich, który charakteryzuje się bardzo dużym wzmocnieniem, wejściem różnicowym (symetrycznym) i wyjściem asymetrycznym - są również wzmacniacze z wyjściem symetrycznym.

Wzmacniacz operacyjny służy podobnie jak inne wzmacniacze do wzmocnienia napięcia czy też mocy, różni się jednak od zwykłych wzmacniaczy tym, że w przeciwieństwie do nich sposób jego działania zależy głównie od zastosowanego zewnętrznego obwodu sprzężenia zwrotnego (najczęściej silnego ujemnego sprzężenia zwrotnego).



Na rysunku pokazany jest najprostszy schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego. Na wejście odwracające doprowadzony jest sygnał U_{I2} , na wejście nieodwracające U_{I1} .



Sygnał wejściowy występujący pomiędzy wejściami wzmacniacza jest sygnałem różnicowym U_d i jest to różnica sygnałów wejściowych $U_{I1} - U_{I2}$.

Pomiędzy wejściami wzmacniacza występuje wejściowa rezystancja różnicowa R_{Id} . Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do wejściowego napięcia różnicowego U_d , a współczynnik K_u jest nazywany wzmocnieniem napięciowym wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego (open loop gain). Napięcie na wyjściu wzmacniacza można więc opisać zależnością

$$U_O = K_u \cdot (U_{I1} - U_{I2}) = K_u \cdot U_d$$

Właściwości idealnego wzmacniacza operacyjnego

można w skrócie przedstawić następująco:

nieskończenie duże wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego K_u ,

nieskończenie duża wejściowa impedancja zarówno różnicowa ($R_{id} \rightarrow \infty$) jak i pomiędzy każdym wejściem i masą ($R_{ic} \rightarrow \infty$),

impedancja wyjściowa równa zero ($Z_{wy}=0$),

nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości ($\omega_d=0$, $\omega_g \rightarrow \infty$),

napięcie wyjściowe równe zero przy równych napięciach wejściowych (napięcie niezrównoważenia $U_{os}=0$),

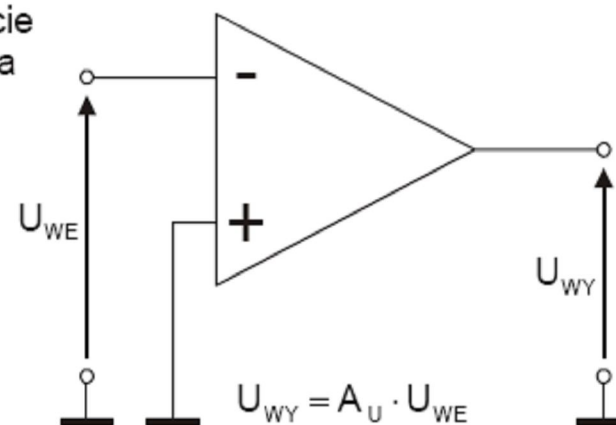
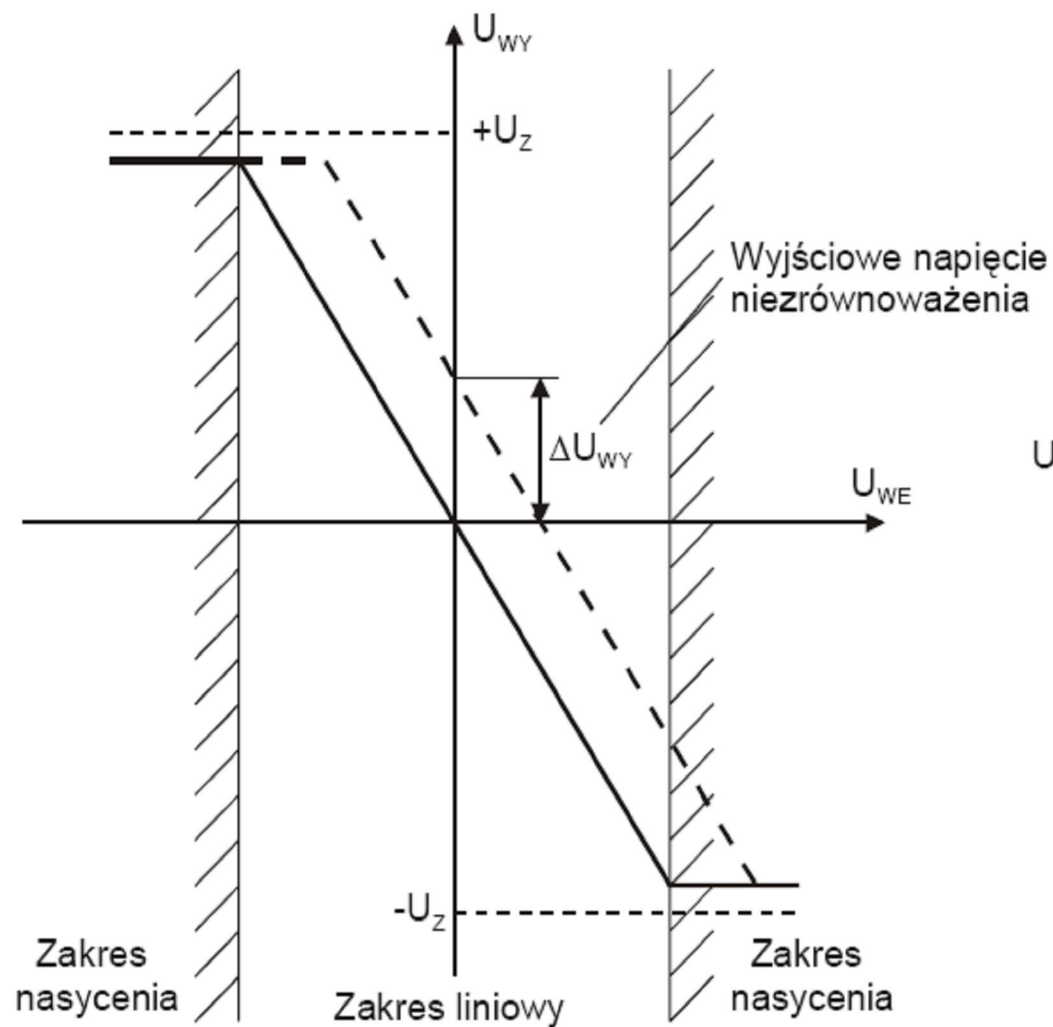
zerowy prąd wejściowy,

nieskończenie duży dopuszczalny prąd wyjściowy,

nieskończenie duże tłumienie sygnału współbieżnego (współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego $CMRR \rightarrow \infty$),

niezmiennność parametrów pod wpływem temperatury.

Charakterystyka przenoszenia WO z otwartą pętlą sprzężenia



Charakterystyka przenoszenia wzmacniacza operacyjnego.

Na tej charakterystyce można wyróżnić trzy zakresy pracy WO: zakres pracy liniowej i dwa zakresy nasycenia.

W zakresie pracy liniowej napięcie wyjściowe jest określone wzorem:

$$U_{wy} = K_u * U_{we}$$

W zakresie nasycenia napięcie wyjściowe przyjmuje dodatnią, albo ujemną wartość napięcia nasycenia, które jest zwykle mniejsze co do wartości bezwzględnej, o 1 do 2V od napięcia zasilania.

Zakres liniowości WO pracującego bez sprzężenia zwrotnego jest bardzo mały.

Przykładowo, gdy WO ma napięcie nasycenia rzędu 10V, a wzmacnienie K_u wynosi 100000V/V, wówczas zakres liniowości napięcia wejściowego znajduje się w przedziale do 0,1mV.

Po przekroczeniu zakresu liniowości WO przechodzi do stanu nasycenia. Napięcie wyjściowe WO powinno być równe zero przy zerowej różnicy napięć wejściowych ($U_{we}=0$).

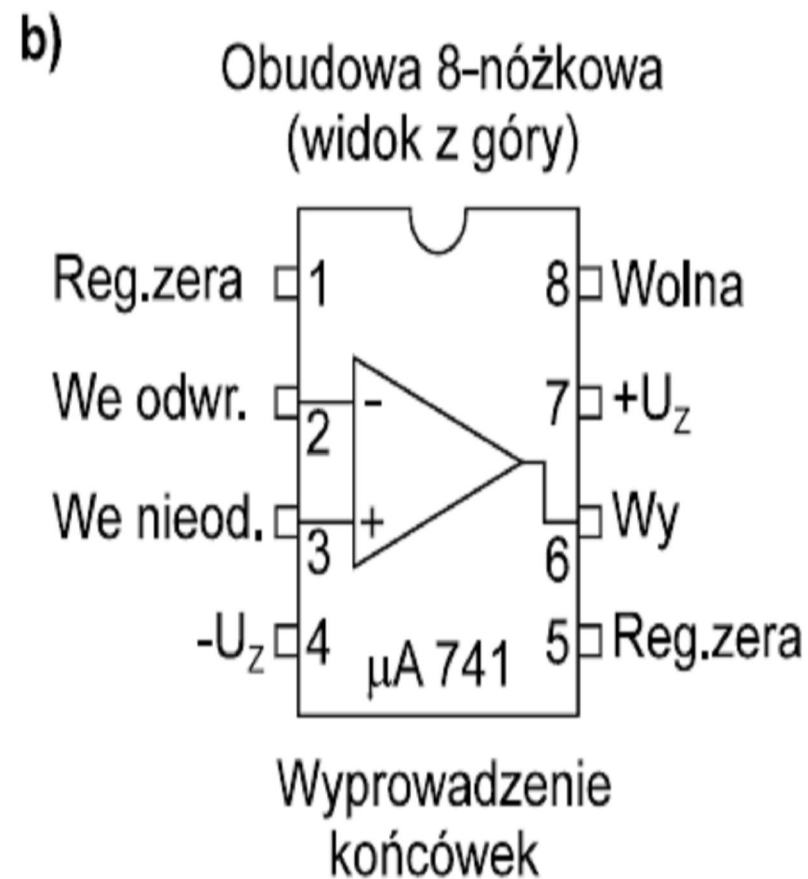
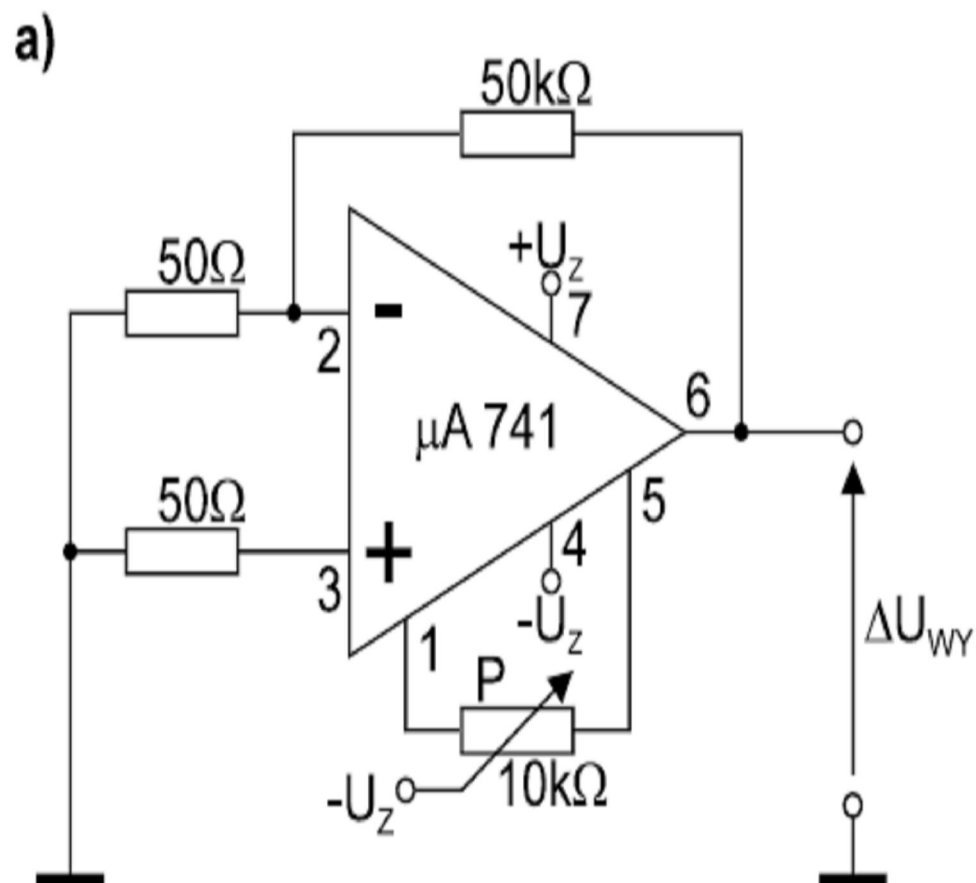
W rzeczywistości występuje w tej sytuacji pewne napięcie, nazywane **wyjściowym napięciem niezrównoważenia**.

Na rysunku powyżej linią przerywaną przedstawiono charakterystykę przenoszenia dla przypadku, gdy wyjściowe napięcie niezrównoważenia jest większe od zera ($U_{wy} > 0$).

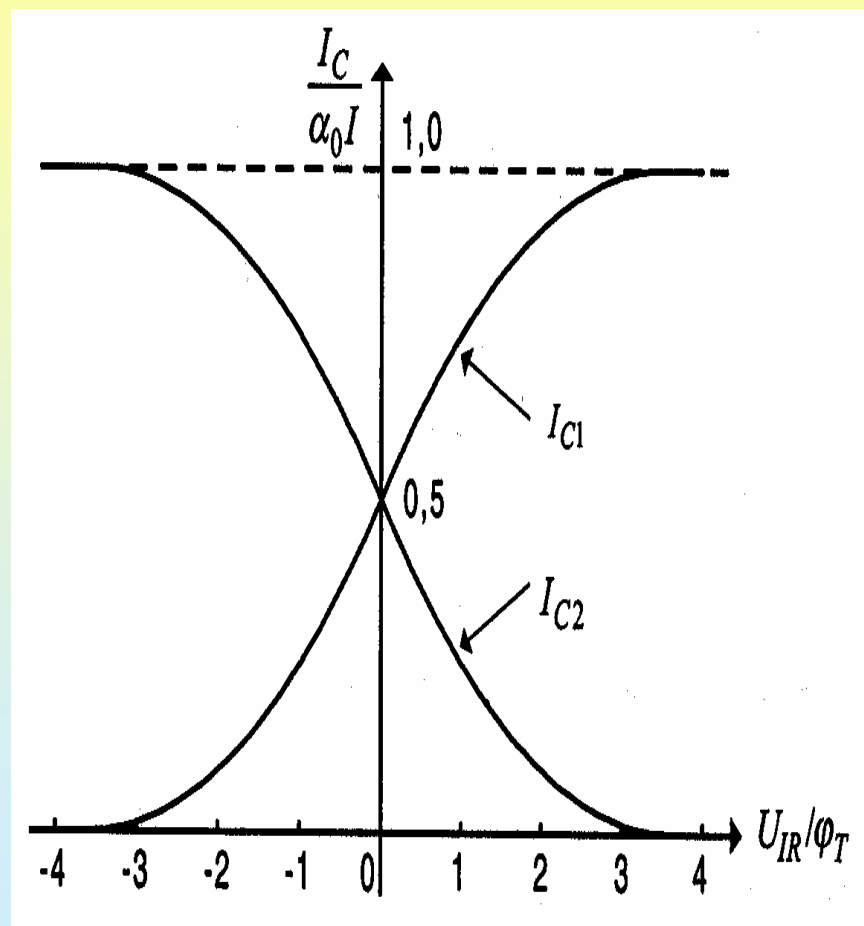
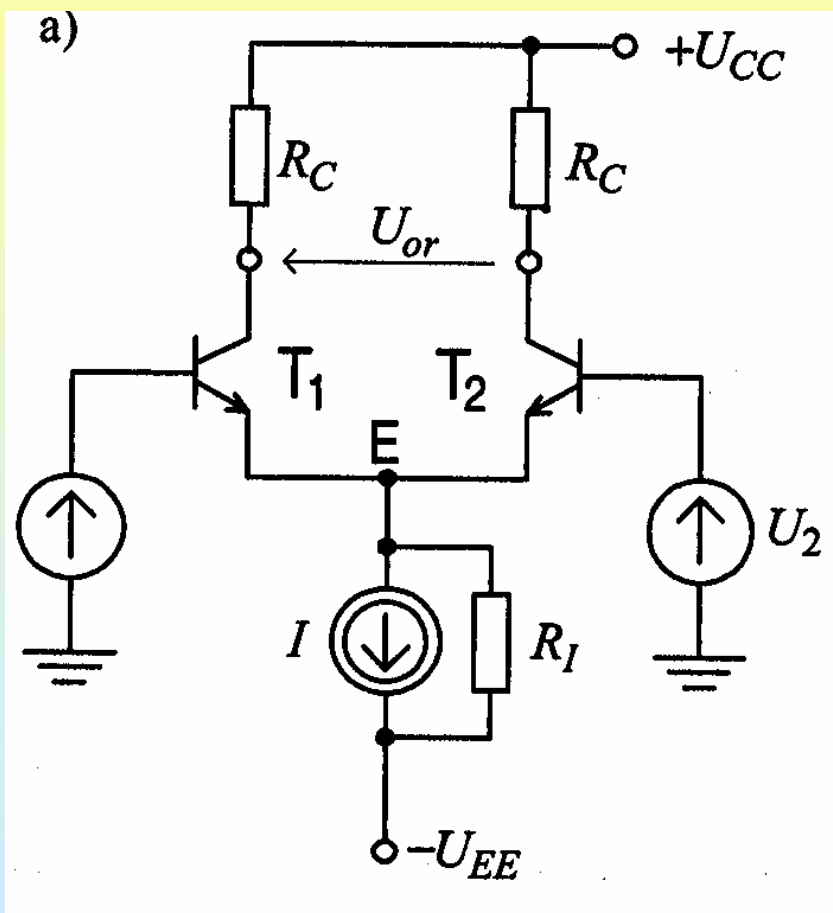
Nowoczesne WO posiadają możliwość prostej kompensacji wyjściowego napięcia niezrównoważenia poprzez doprowadzenie do wejścia różnicowego, odpowiedniej wartości napięcia - takiej, aby uzyskać zerową wartość napięcia na wyjściu.

W praktyce, kompensacja ta odbywa się za pomocą potencjometru P dołączonego do specjalnie wyprowadzonych końcówek wzmacniacza.

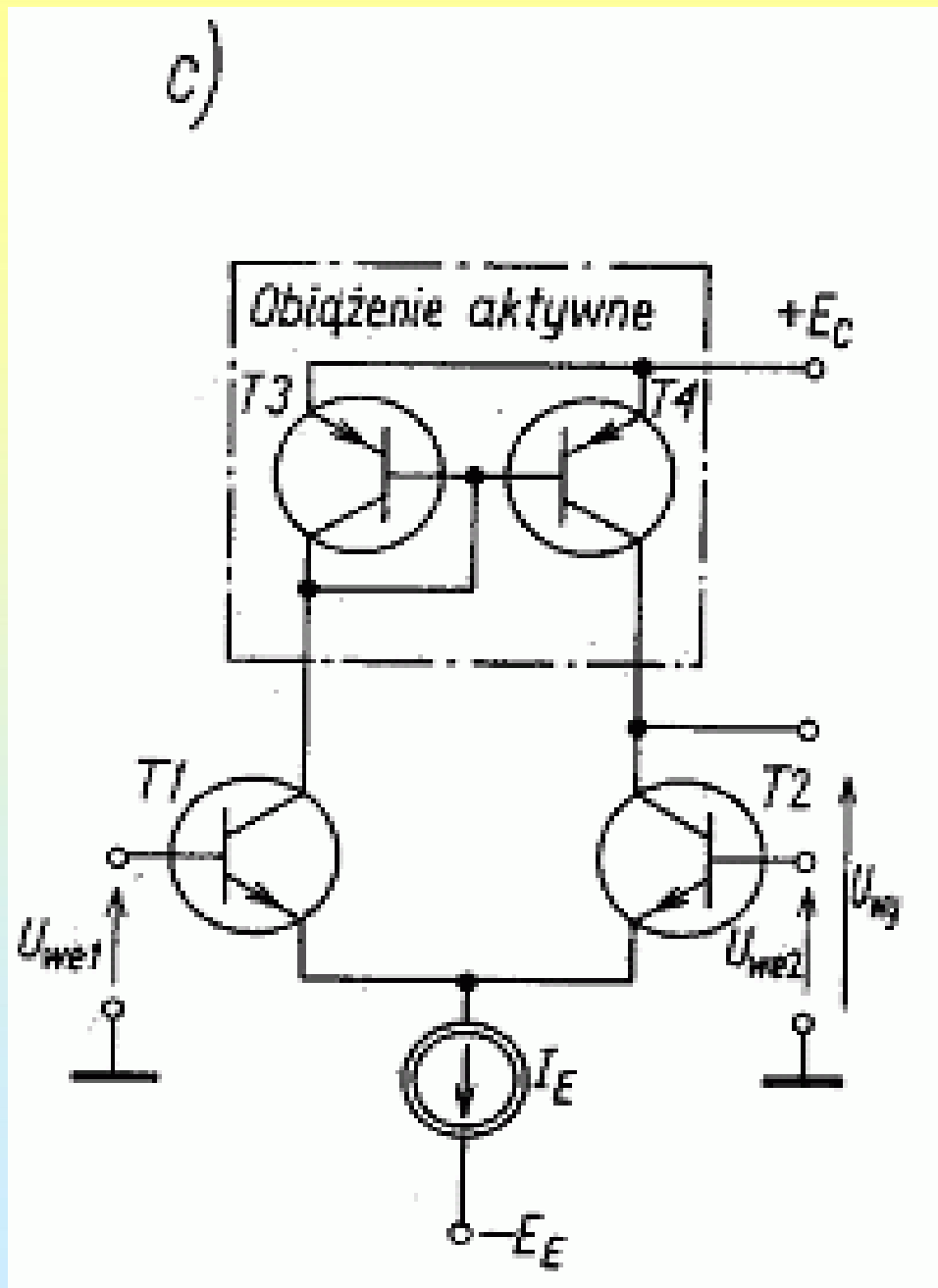
Kompensacja (równoważenie, zerowanie) napięcia niezrównoważenia
WO μA 741 (a) i rozmieszczenie jego końcówek (b)



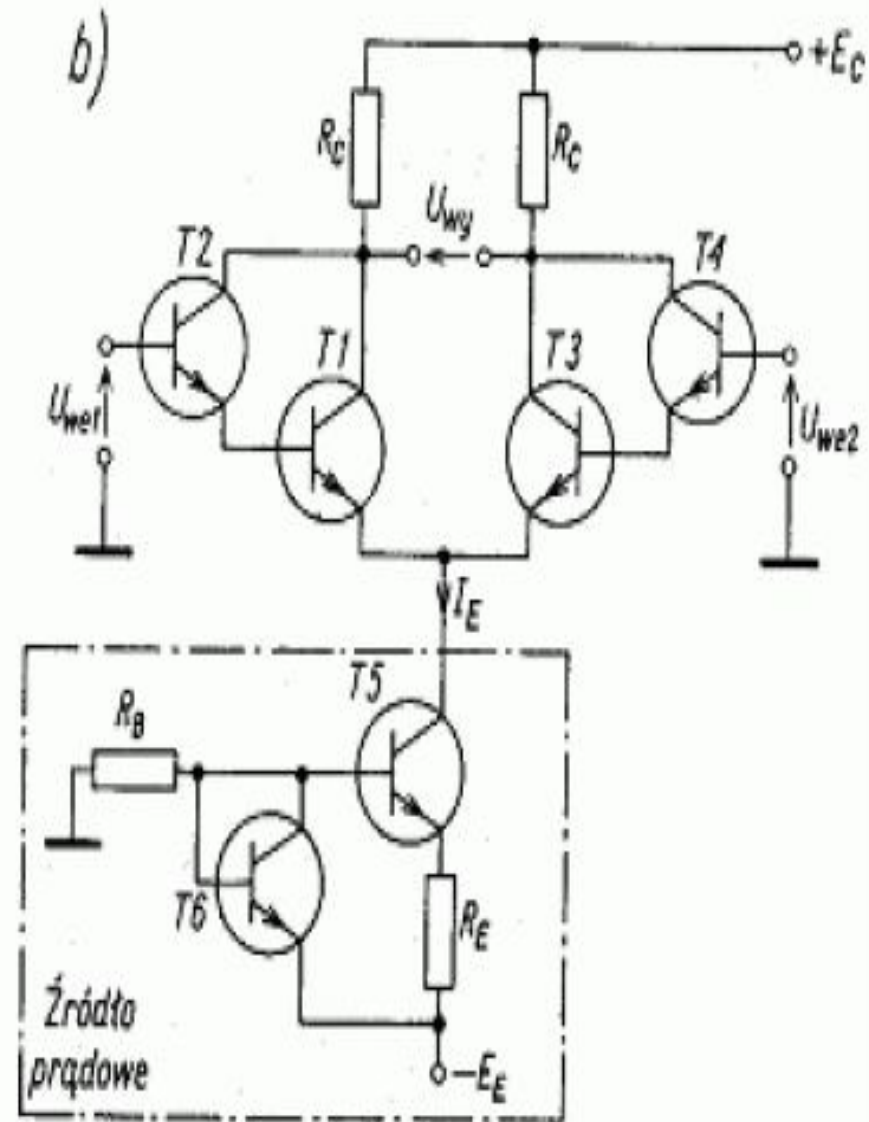
Podstawowym układem wzmacniacza operacyjnego jest wzmacniacz różnicowy (układ i jego charakterystyka)



**Wzmacniacz
operacyjny
z obciążeniem
aktywnym**



**Wzmacniacz
operacyjny
z źródłem
prądowym
i tranzystorami
w układzie
Darlingtona**



Wzmacniacze różnicowe stosowane są :

1. jako stopnie wejściowe wzmacniaczy operacyjnych
2. jako stopnie pośrednie we wzmacniaczach szeroko pasmowych (wzmacniają sygnały o szerokim widmie częstotliwości)
3. jako stopnie wejściowe lub pośrednie we wzmacniaczach w pośredniej częstotliwości

We wzmacniaczach operacyjnych stopniem wejściowym jest wzmacniacz różnicowy zoptymalizowany dla uzyskania minimalnego dryfu, dużej impedancji wejściowej oraz dużego tłumienia sygnałów sumacyjnych CMRR.

Dla uzyskania dużego wzmocnienia całego układu, w różnicowym stopniu wejściowym oraz stopniu pośrednim stosuje się obciążenie aktywne.

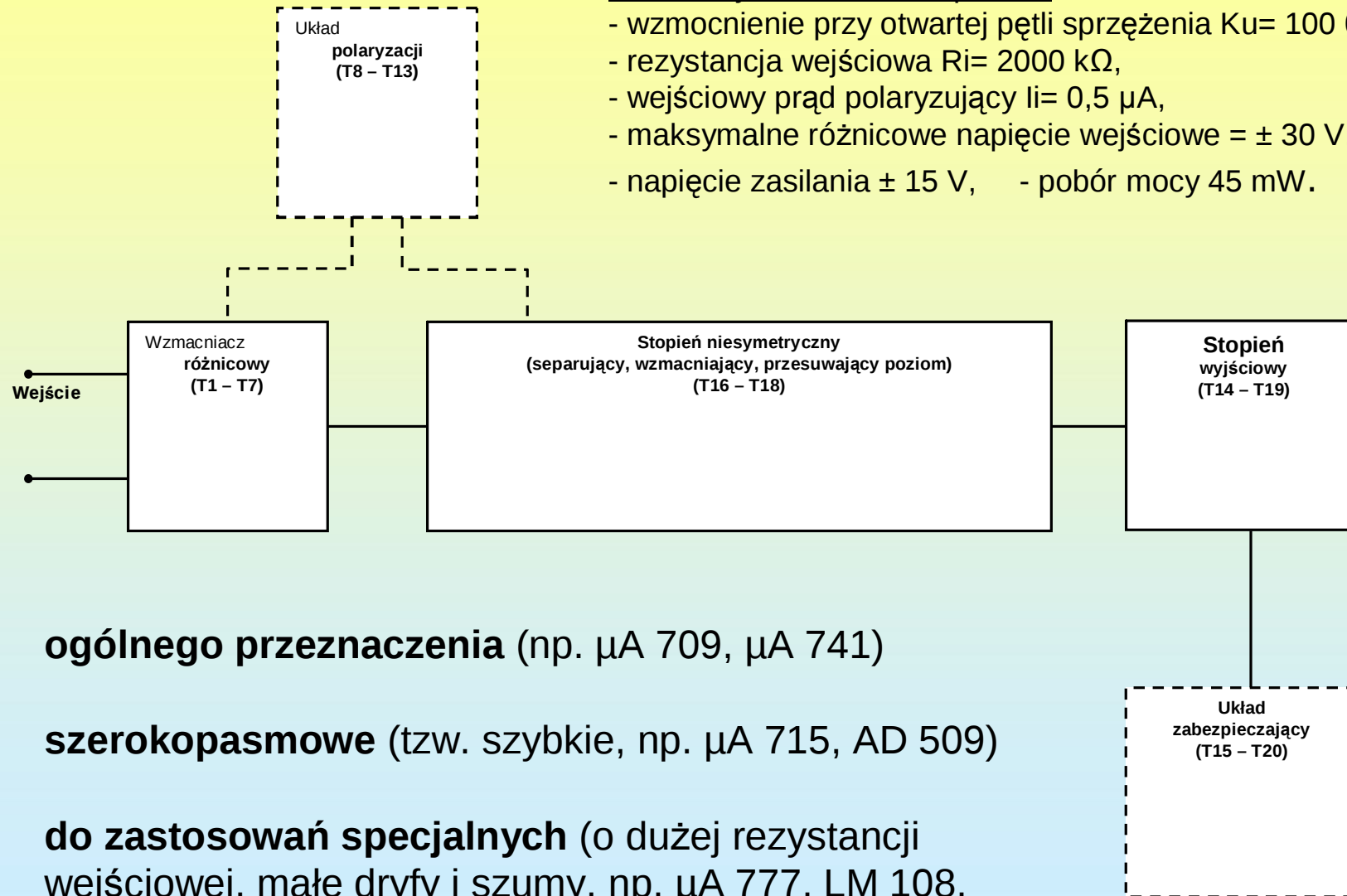
Stopień wyjściowy takiego wzmacniacza jest najczęściej symetrycznym wtórnikami emiterowym pozwalającym na uzyskanie małej impedancji wejściowej oraz dużej wartości napięcia wyjściowego i prądu obciążenia.

O wartości wzmocnienia napięciowego układu oraz o kształcie charakterystyki częstotliwościowej decydują dwa pierwsze stopnie.

Struktura blokowa wzmacniacza operacyjnego 741

Parametry wzmacniacza μA 741:

- wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia $K_u = 100\,000 [V/V]$,
- rezystancja wejściowa $R_i = 2000\,k\Omega$,
- wejściowy prąd polaryzujący $I_i = 0,5\,\mu A$,
- maksymalne różnicowe napięcie wejściowe $= \pm 30\,V$,
- napięcie zasilania $\pm 15\,V$, - pobór mocy $45\,mW$.

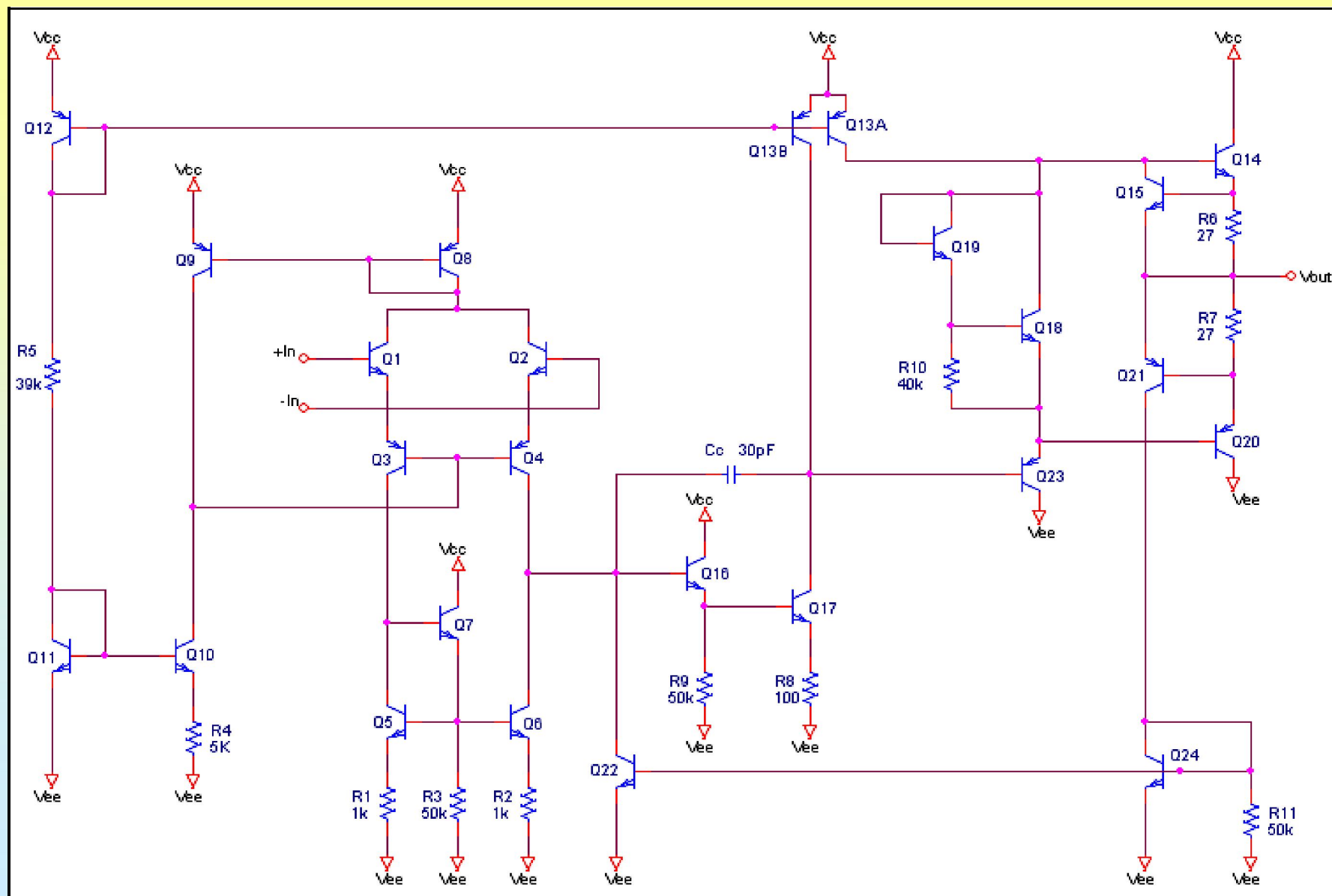


ogólnego przeznaczenia (np. μA 709, μA 741)

szerokopasmowe (tzw. szybkie, np. μA 715, AD 509)

do zastosowań specjalnych (o dużej rezystancji wejściowej, małe dryfy i szумы, np. μA 777, LM 108, CA 3130, AD 504)

Schemat wewnętrzny WO 741



Budowa WO 741

Układ składa się z 3 części:

wejściowego

(tranzystory T1 - T4) wraz z obciążeniem aktywnym
(tranzystory T5 - T7) i źródłem prądu (tranzystory T8 - T11)

stopnia pośredniego

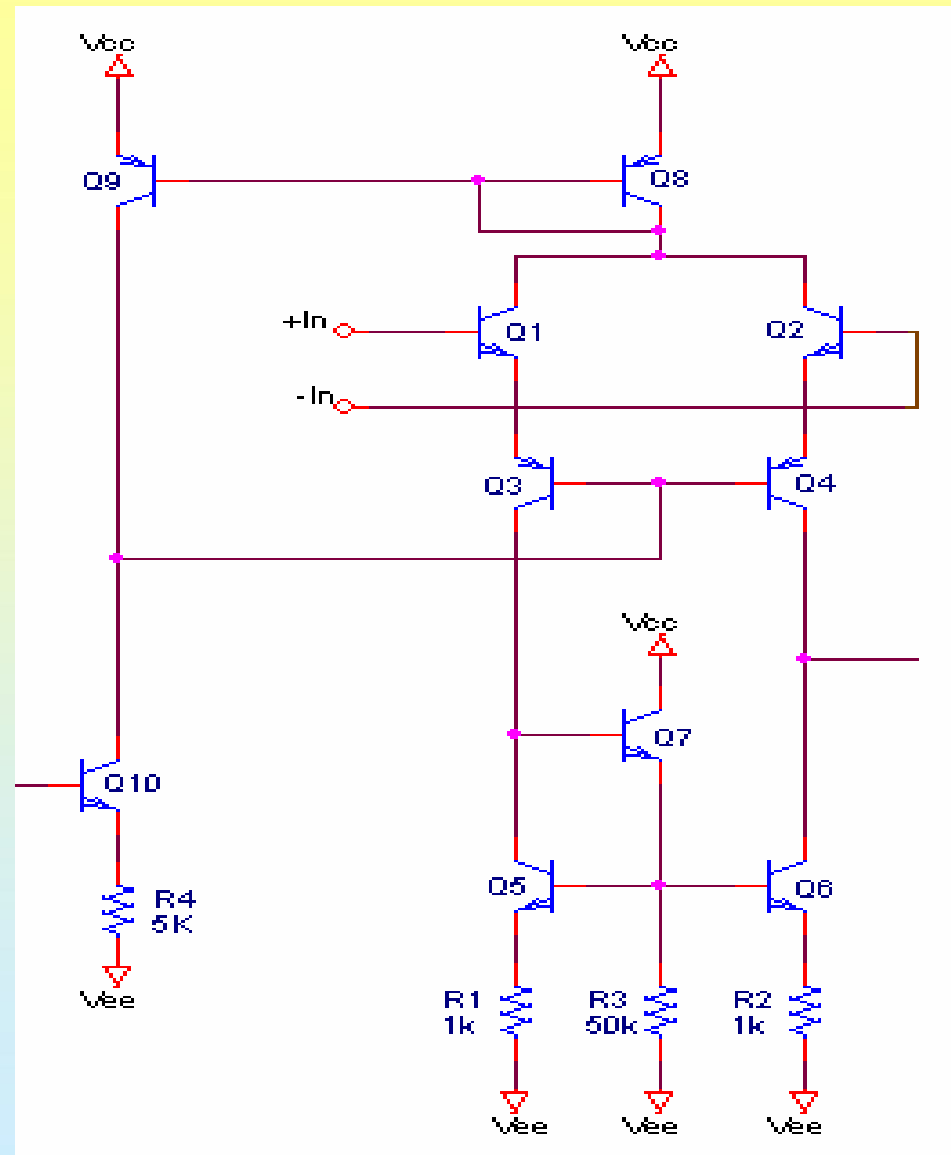
(tranzystory T16 - T17) wraz z obciążeniem
aktywnym (tranzystory T12 - T13)

stopnia wyjściowego

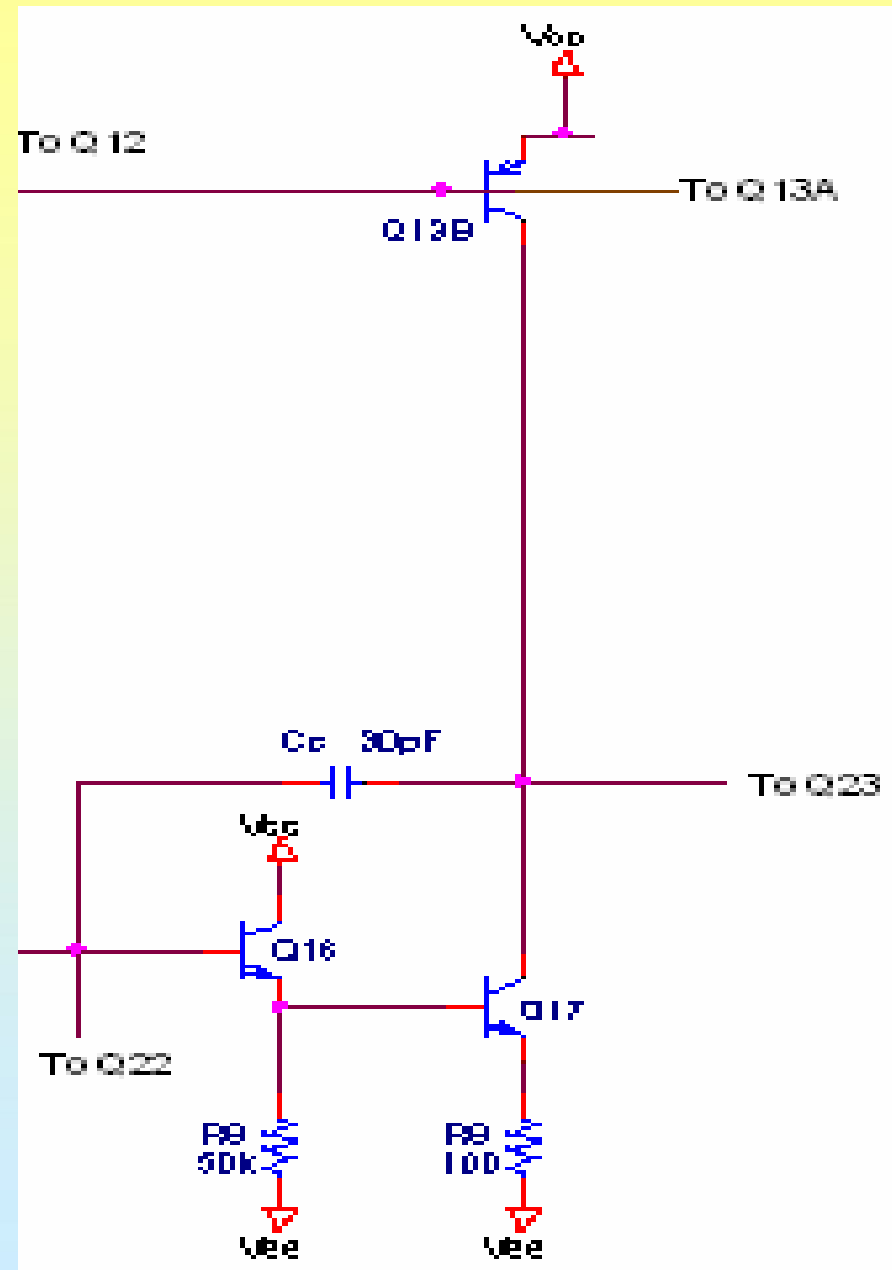
(tranzystory T14 , T20, diody T18 - T19)

W wejściowym stopniu różnicowym, tranzystory T1 ,T2 ,T3 ,T4 pracują w połączeniu OC-OB co zapewnia dobre właściwości wielkoczęstotliwościowe.

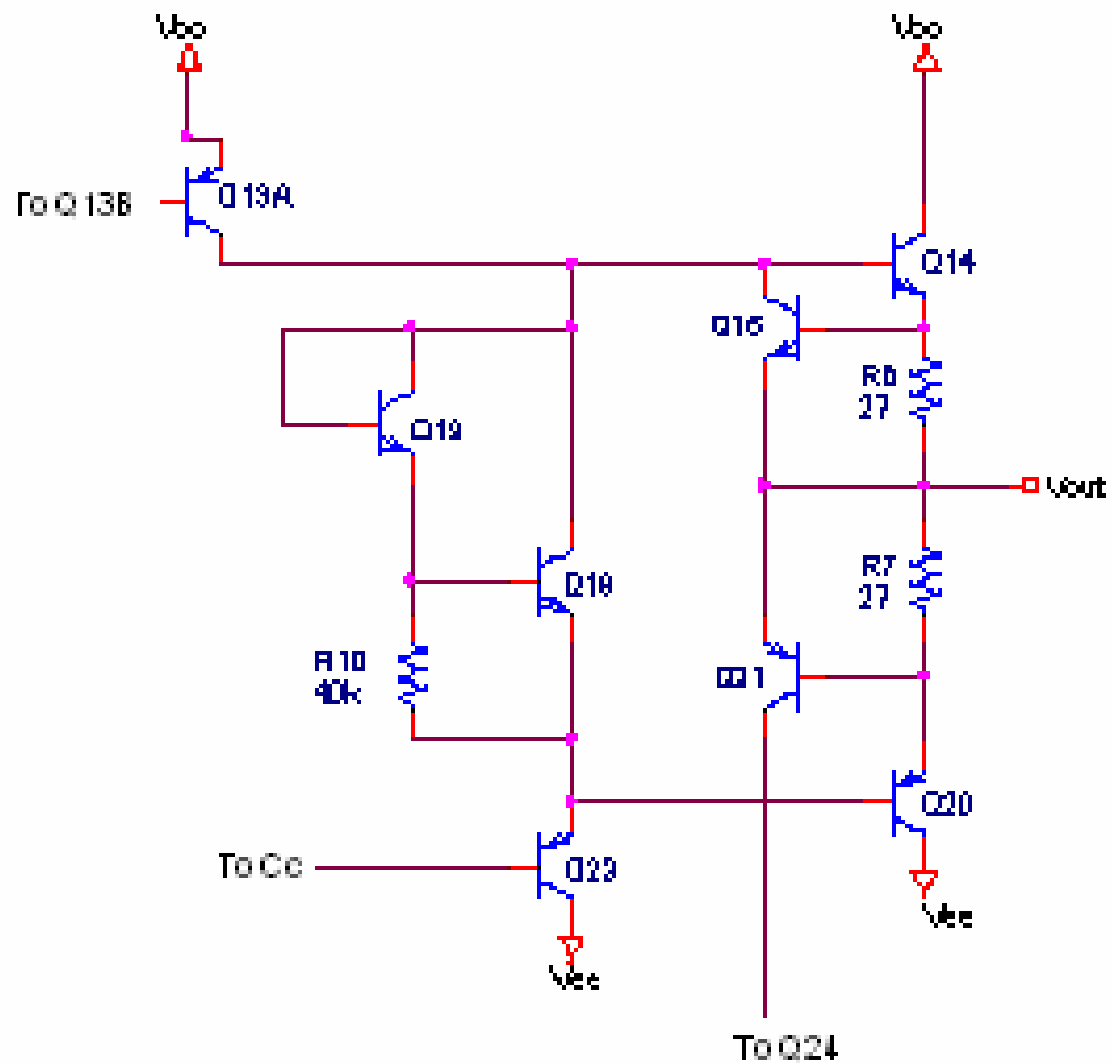
Tranzystor T8 jest źródłem stałoprądowym, a tranzystory T5 i T6 tworzą obciążenie aktywne pary różnicowej. Na bazach tranzystorów T1 i T2 jest zerowy potencjał stały względem masy.



W drugim stopniu tranzystor T16 pracuje w konfiguracji OC zapewniając dużą rezystancję wejściową tego stopnia. Stopień ten zapewnia duże wzmocnienie dzięki zastosowaniu wzmocnienia aktywnego w obwodzie kolektora tranzystora T17 a ponadto przesuwa poziom napięcia stałego.



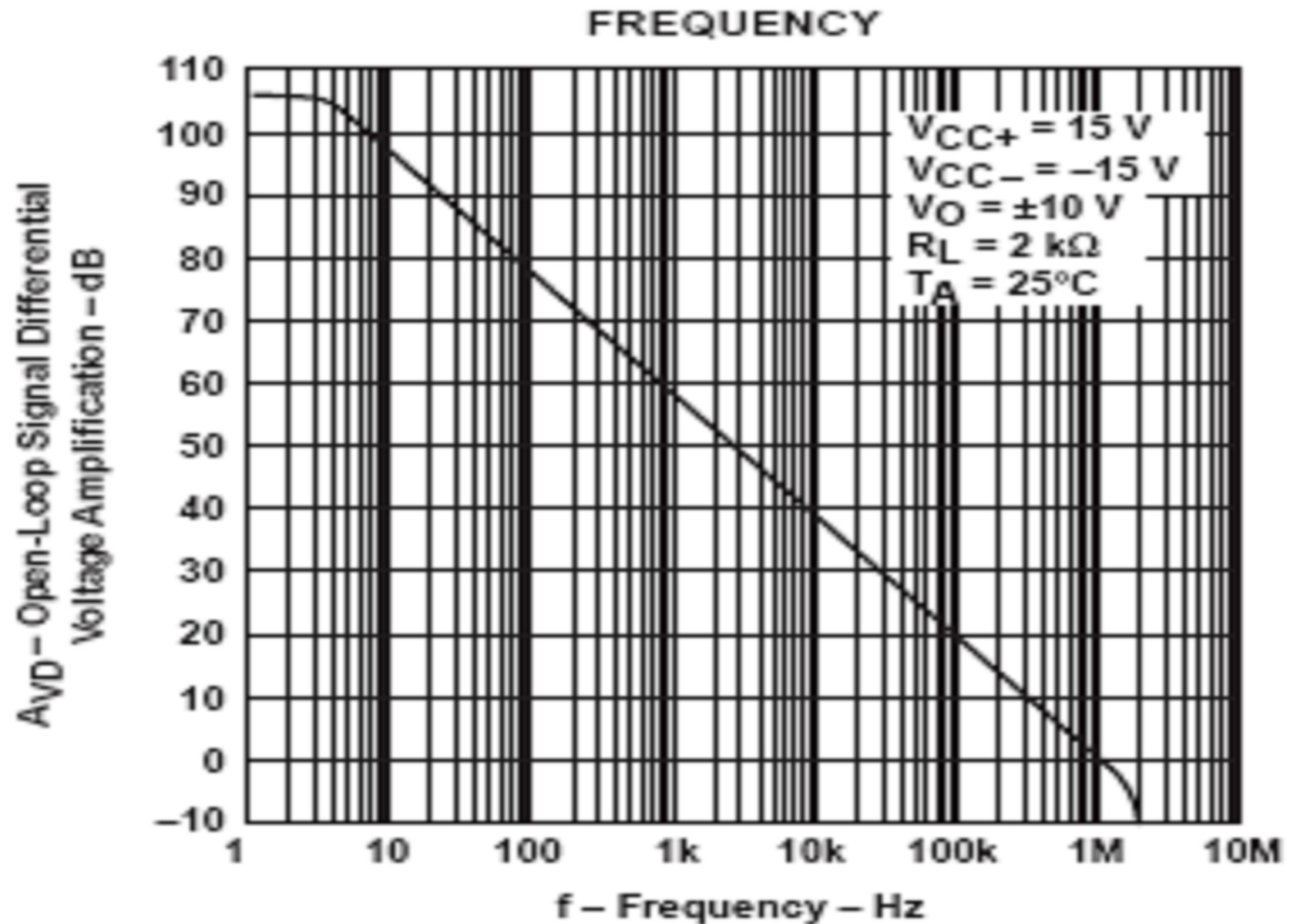
Stopień wyjściowy z tranzystorami T14 i T20 zapewnia małą rezystancję wyjściową i przepływ stosunkowo dużego prądu obciążenia.



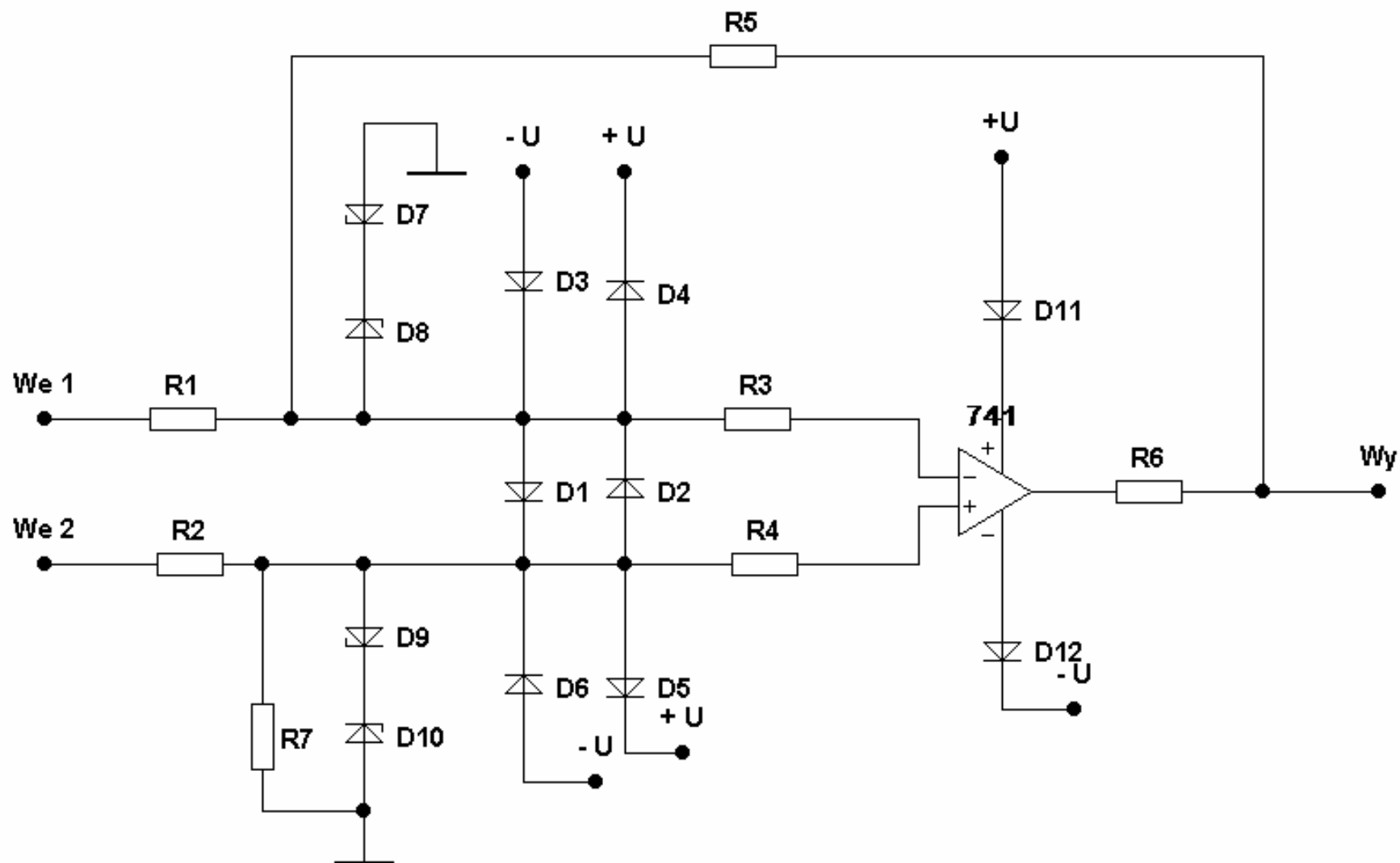
Typowe parametry WO 741

PARAMETER	TEST CONDITIONS	$\mu A741Y$			UNIT
		MIN	TYP	MAX	
V_{IO} Input offset voltage	$V_O = 0$		1	6	mV
$\Delta V_{IO(adj)}$ Offset voltage adjust range	$V_O = 0$		± 15		mV
I_{IO} Input offset current	$V_O = 0$		20	200	nA
I_{IB} Input bias current	$V_O = 0$		80	500	nA
V_{ICR} Common-mode input voltage range		± 12	± 13		V
V_{OM} Maximum peak output voltage swing	$R_L = 10\text{ k}\Omega$	± 12	± 14		V
	$R_L = 2\text{ k}\Omega$	± 10	± 13		
A_{VD} Large-signal differential voltage amplification	$R_L \geq 2\text{ k}\Omega$	20	200		V/mV
r_i Input resistance		0.3	2		M Ω
r_o Output resistance	$V_O = 0$, See Note 5		75		Ω
C_i Input capacitance			1.4		pF
CMRR Common-mode rejection ratio	$V_{IC} = V_{ICRmin}$	70	90		dB
k_{SVS} Supply voltage sensitivity ($\Delta V_{IO}/\Delta V_{CC}$)	$V_{CC} = \pm 9\text{ V to } \pm 15\text{ V}$		30	150	$\mu V/V$
I_{OS} Short-circuit output current			± 25	± 40	mA
I_{CC} Supply current	$V_O = 0$, No load		1.7	2.8	mA
P_D Total power dissipation	$V_O = 0$, No load		50	85	mW

Katalogowa charakterystyka z otwartą pętlą WO 741

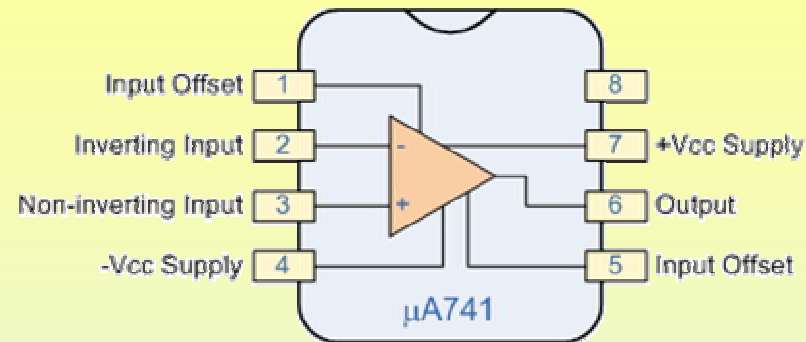


Kompleksowe prezentacja zabezpieczeń wzmacniacza operacyjnego



1. Diody D1 i D2 zabezpieczają przed przekroczeniem napięcia różnicowego do $\pm 0,7V$
2. Rezystory R1, R2, R5 – są elementami sprzężenia zwrotnego (mogą również pełnić rolę ograniczenia prądu)
3. Rezystory R3 i R4 pełnią rolę ograniczników prądu ,jeżeli diody D1 i D2 wbudowane są wewnątrz wzmacniacza. (np. WO typ LM 108)
4. Diody D3, D4, D5 i D6 zabezpieczają przed przekroczeniem nieróżnicowego napięcia wejściowego , które nie powinno przekroczyć napięcie zasilania
5. Diody Zenera D7, D8, D9 i D10 służą do ograniczenia nieróżnicowego napięcia wejściowego
6. Diody D11 i D12 włączone w obwodzie zasilania wzmacniacza operacyjnego zabezpieczają przed omyłkową zmianą biegunowości zasilania
7. Rezystor R6 służy do zabezpieczenia przed zwarcie wyjścia wzmacniacza do masy (np. WO typ 709-51 Ω).Większość wzmacniaczy 2-giej generacji (np.. 741) posiada zabezpieczenie wbudowane do struktury układu

Obudowy i wyprowadzenia WO 741



Two Most Common 741 Types

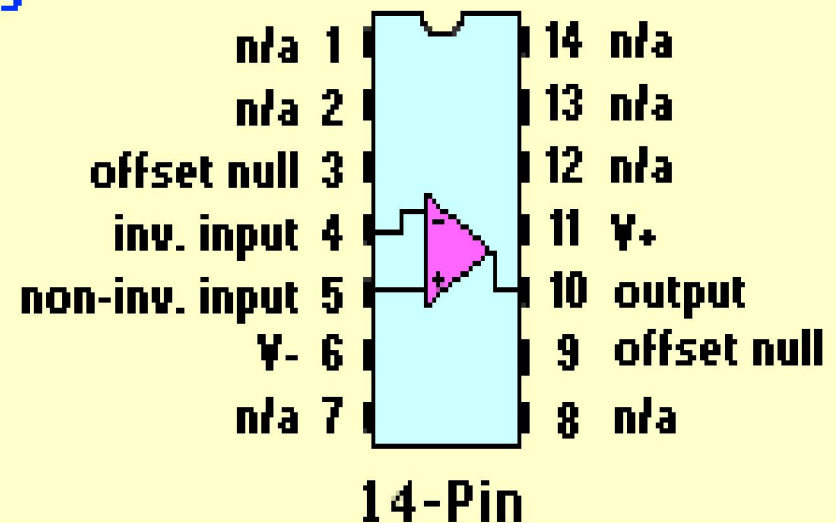
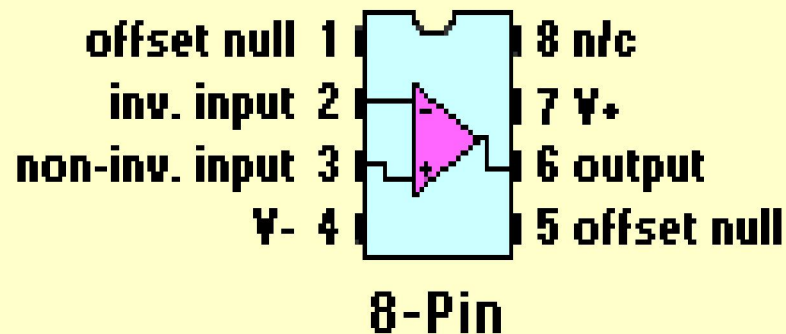
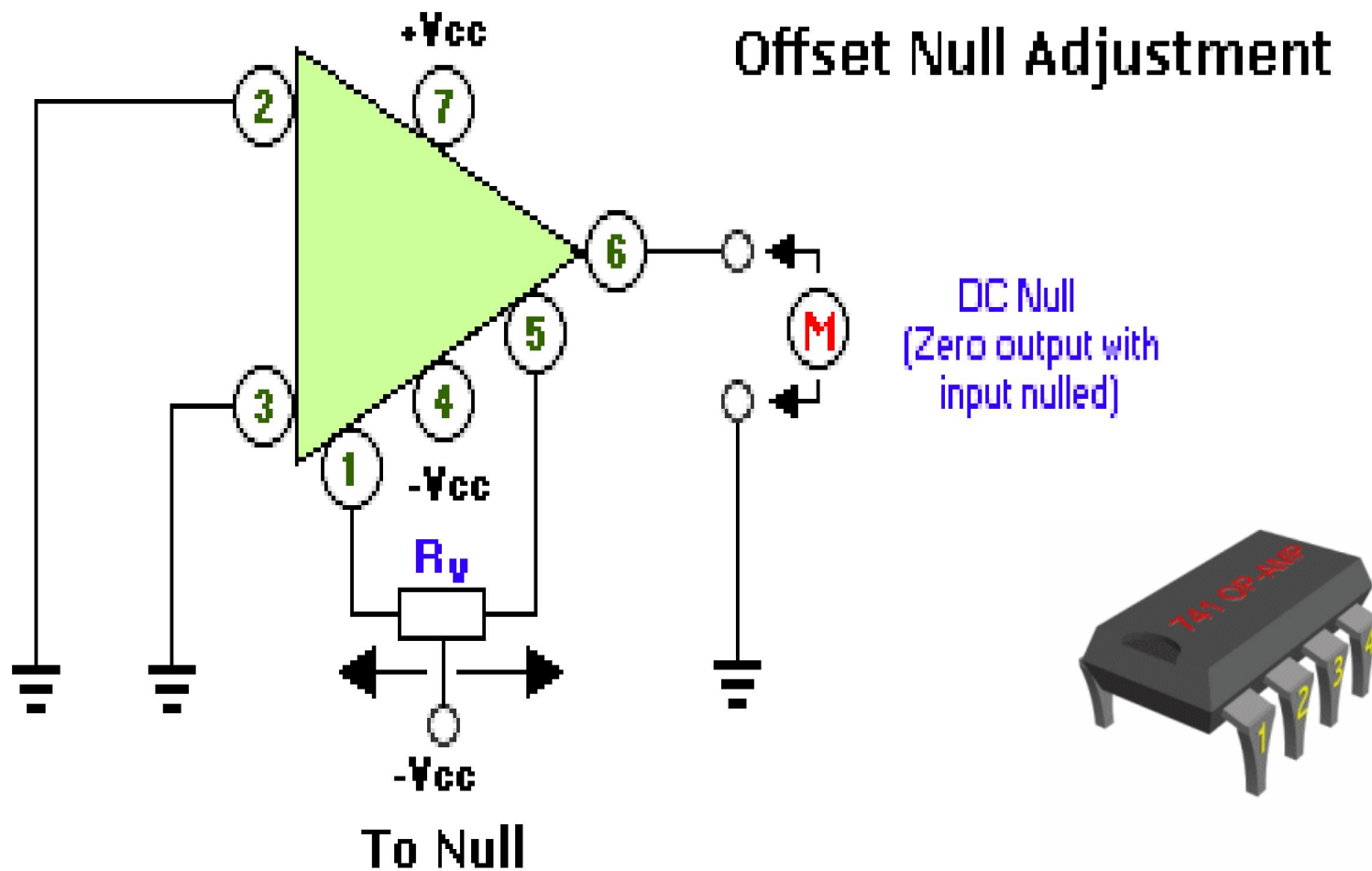


Fig. 6

Kompensacja napięci niezrównoważenia WO 741



- **Podstawowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych**

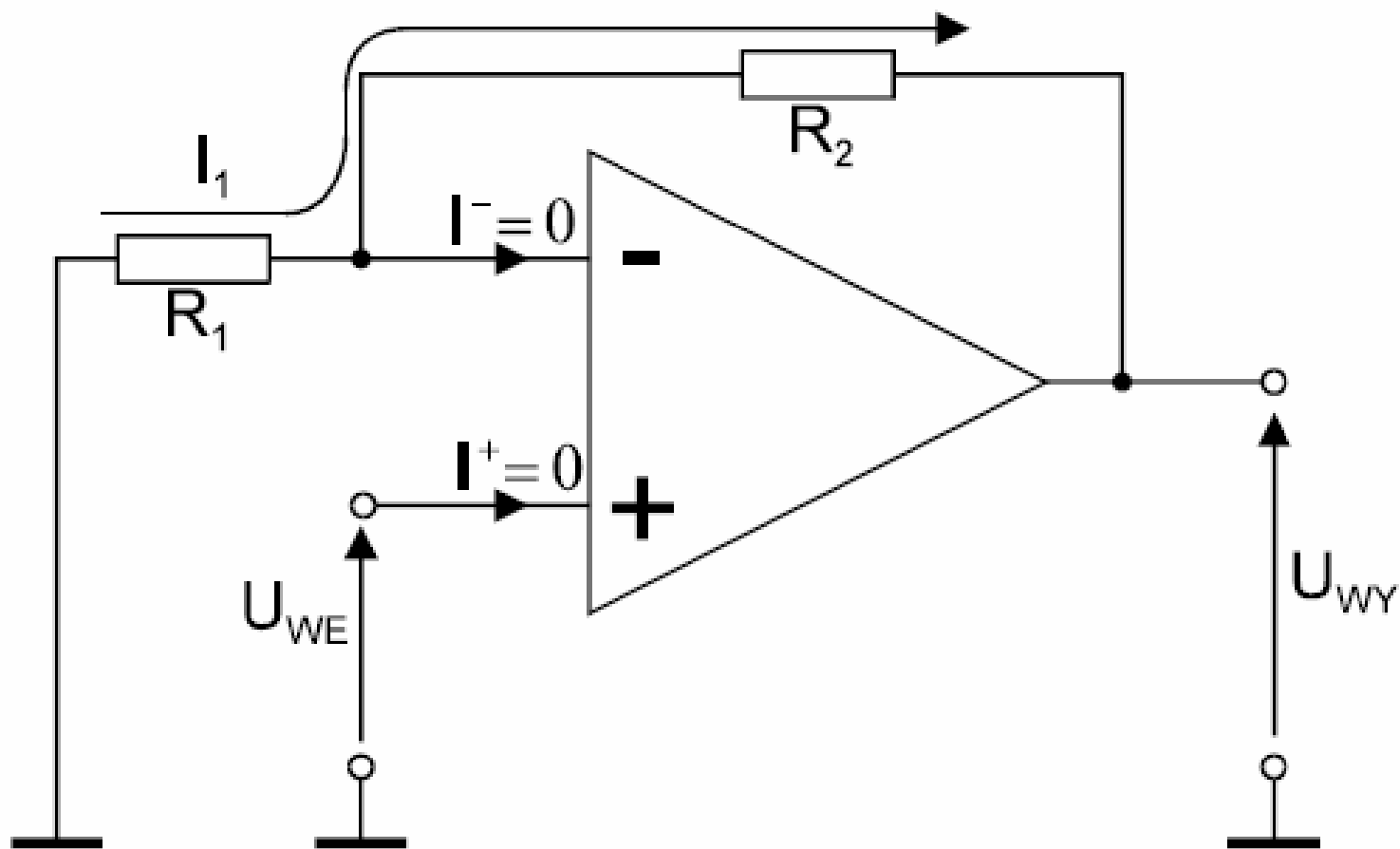
WO mogą pracować w wielu różnych konfiguracjach układowych.

Najprostszą możliwością jest zastosowanie układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego.

W tym przypadku WO pracuje jako komparator napięcia, to znaczy już przy niewielkich wartościach różnicowego napięcia wejściowego wchodzi, zależnie od znaku tego napięcia, w jeden z dwóch stanów nasycenia.

Jego praca jest w tym układzie bardzo niestabilna.

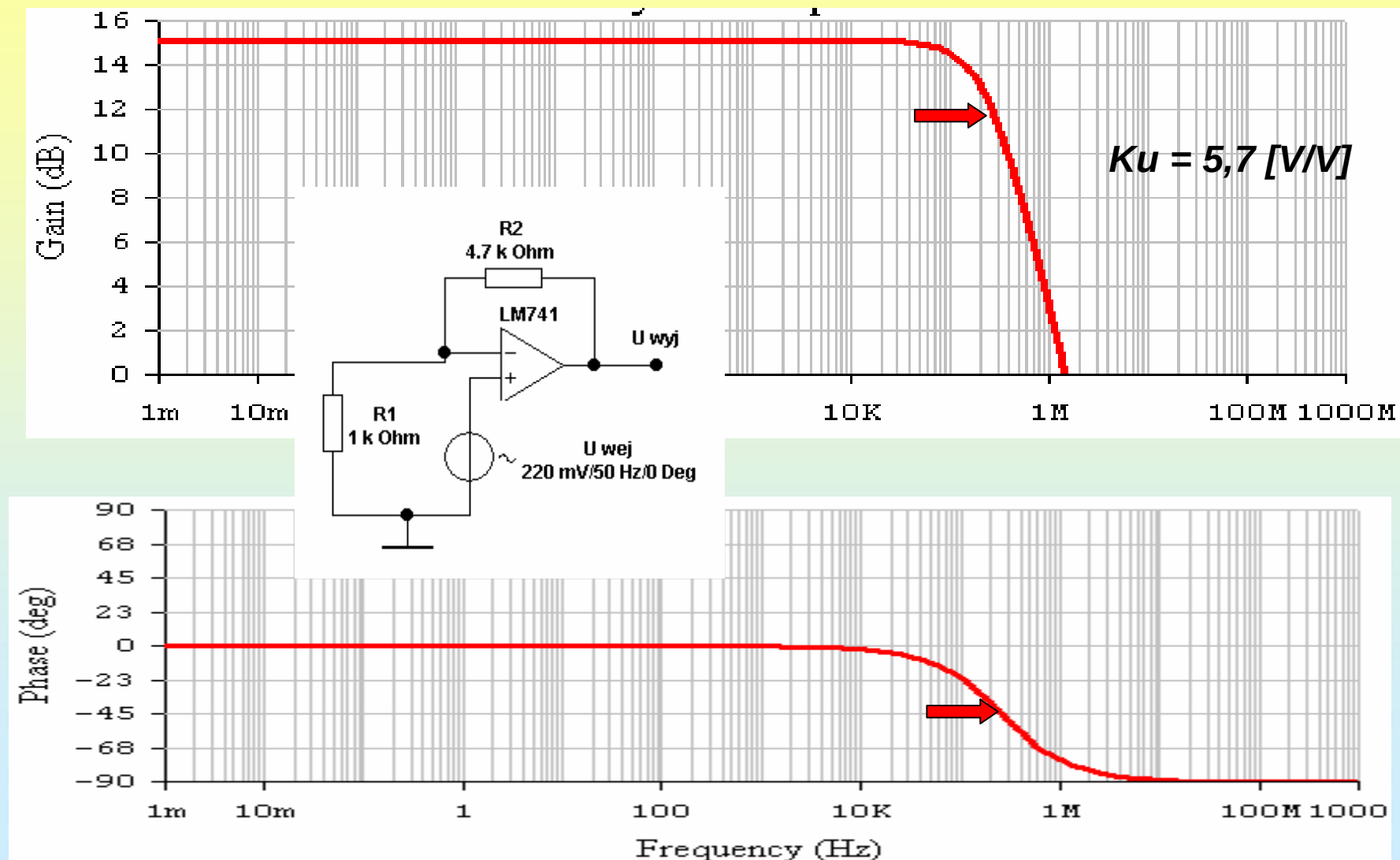
WO są stosowane przede wszystkim w układach z zewnętrznym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Sprzężenie to polepsza właściwości wzmacniacza - zmniejsza nieliniowość charakterystyk i niezerównoważenie, poszerza pasmo, poprawia stałość parametrów i umożliwia dobór wzmocnienia.



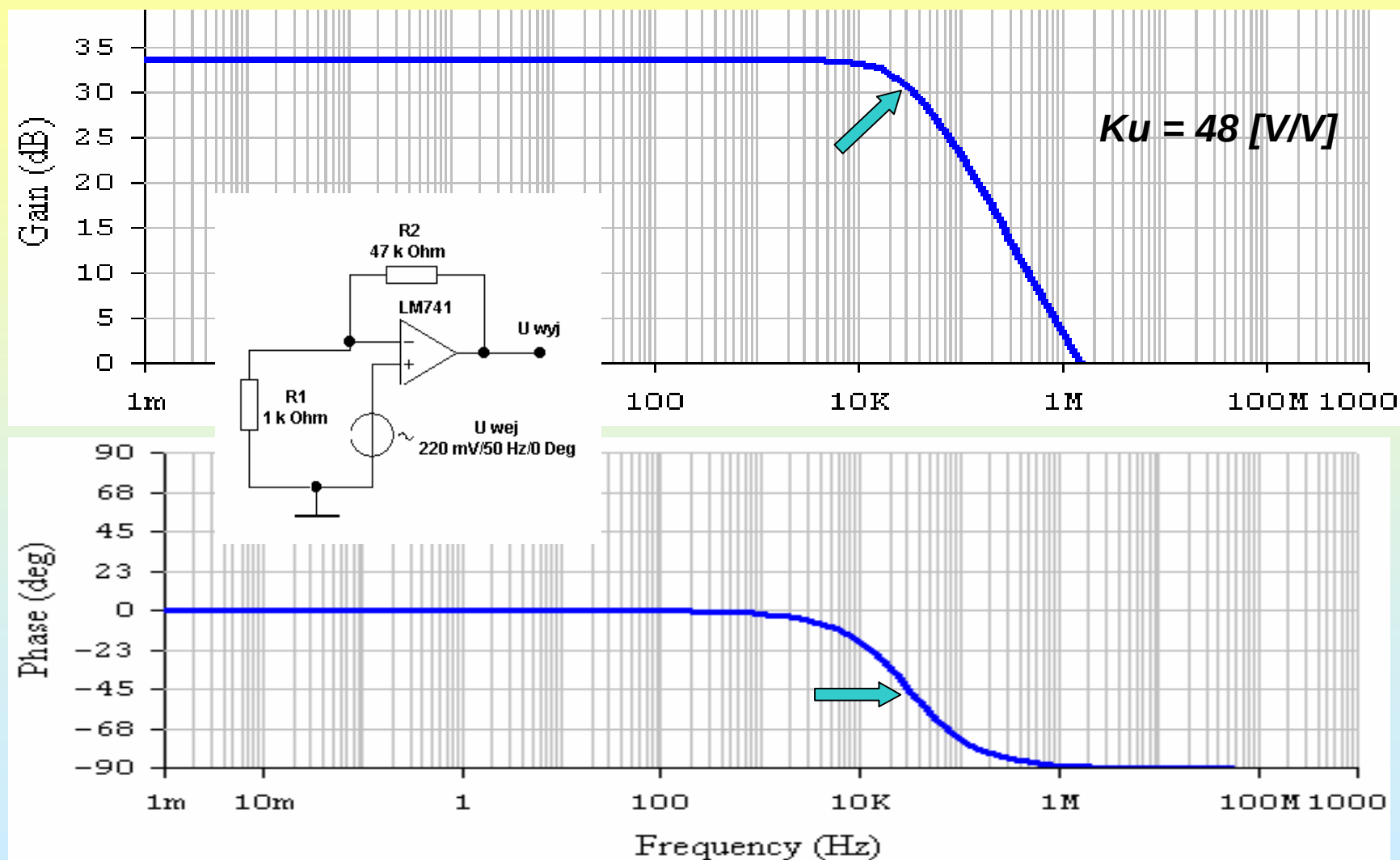
Wzmacniacz nieodwracający

$$K_u = U_{wy} / U_{we} = 1 + (R_2 / R_1) \text{ [V/V]}$$

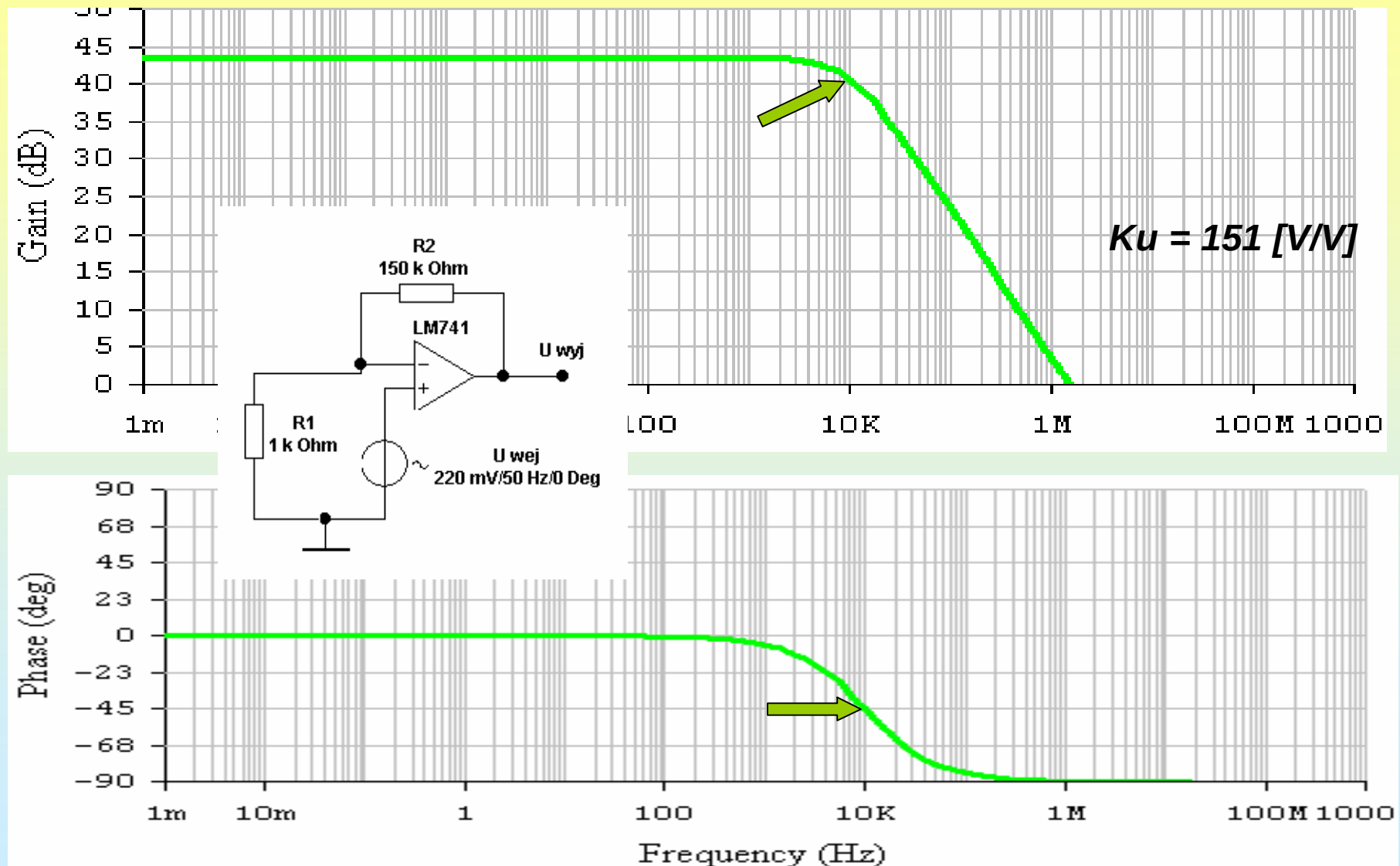
Wpływ wzmacnienia na pasmo WO nieodwracającego



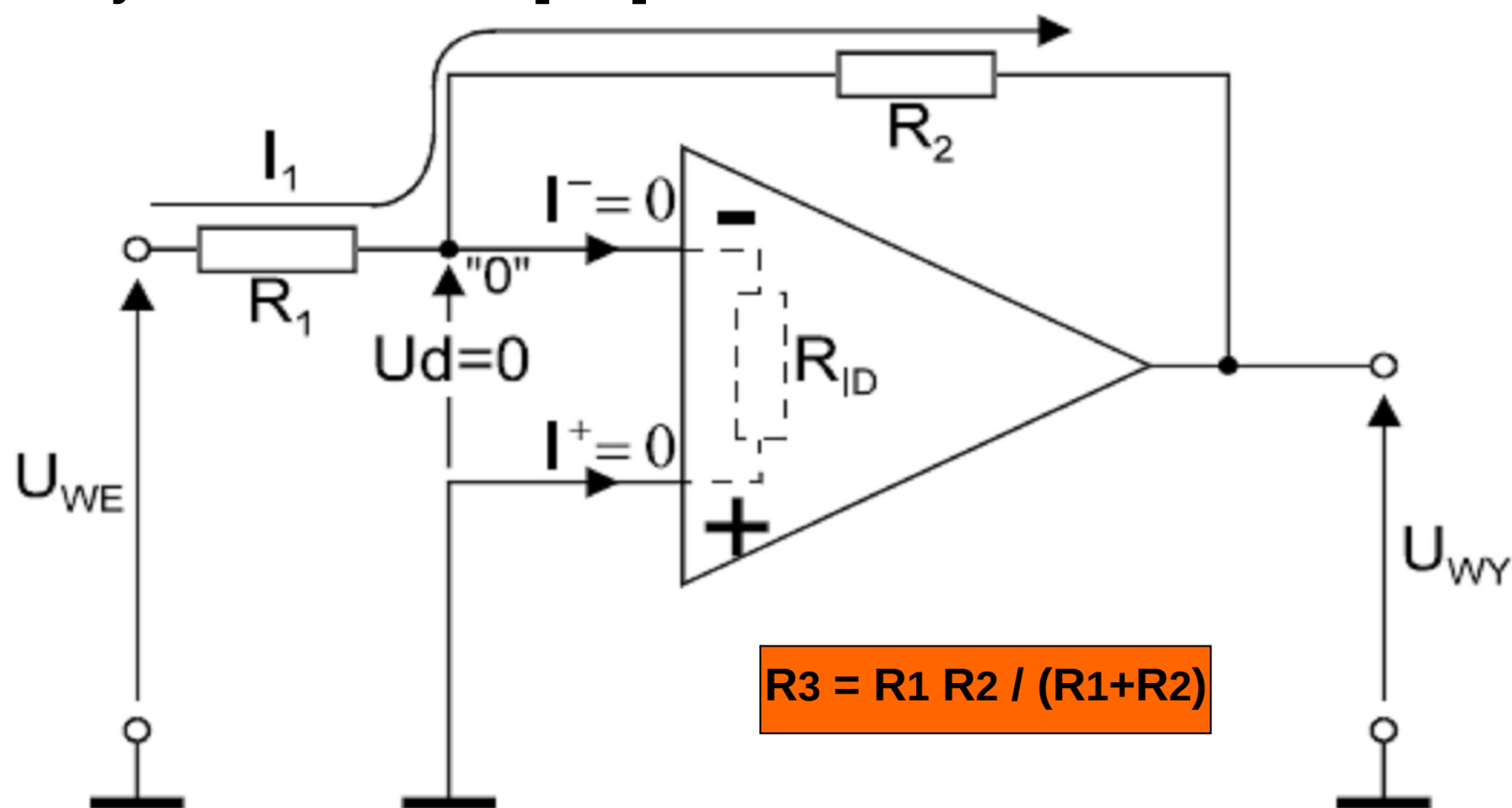
Wpływ wzmacnienia na pasmo WO nieodwracającego



Wpływ wzmacnienia na pasmo WO nieodwracającego



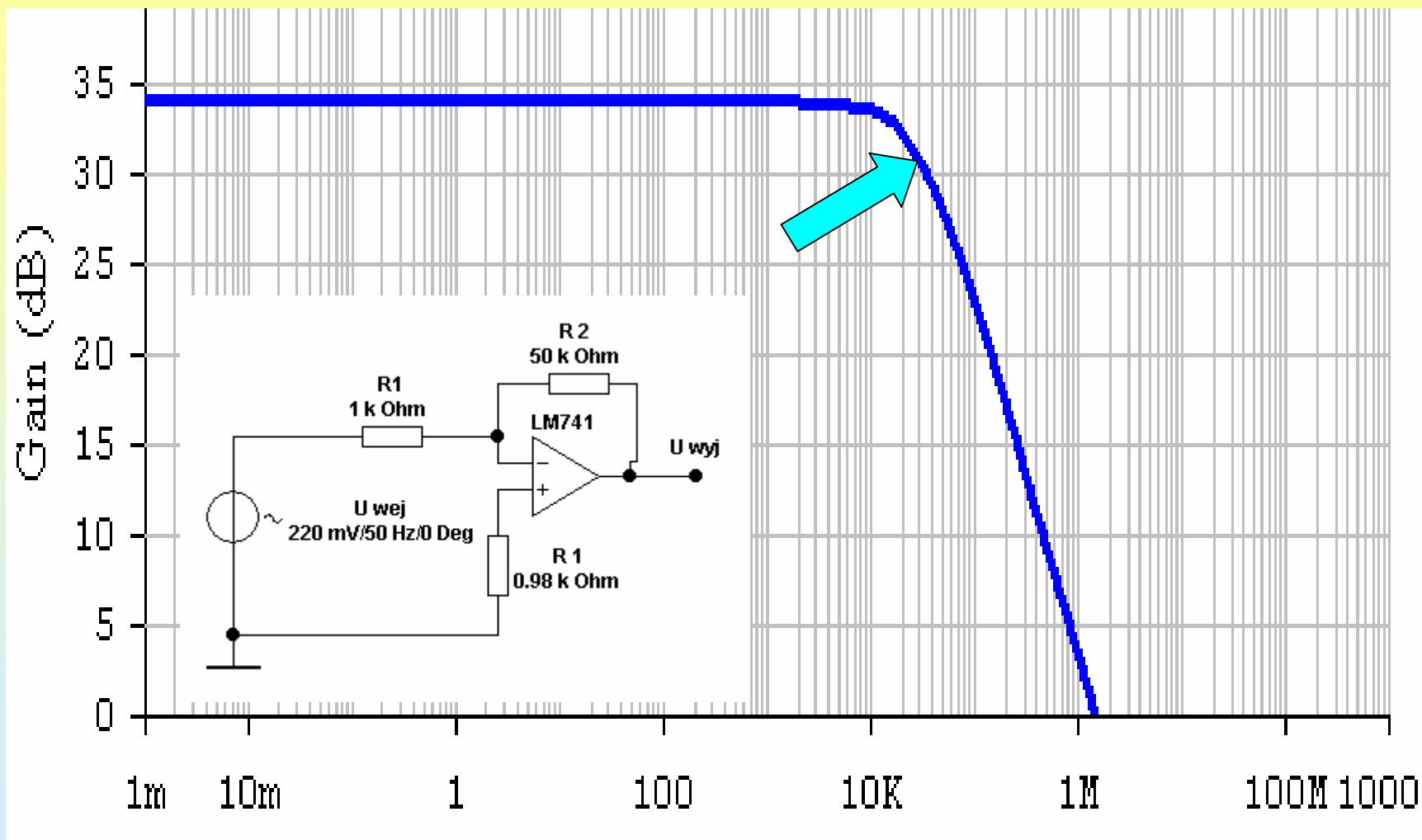
$$K_u = U_{wy} / U_{we} = R_2 / R_1 \text{ [V/V]}$$



Wzmacniacz odwracający.

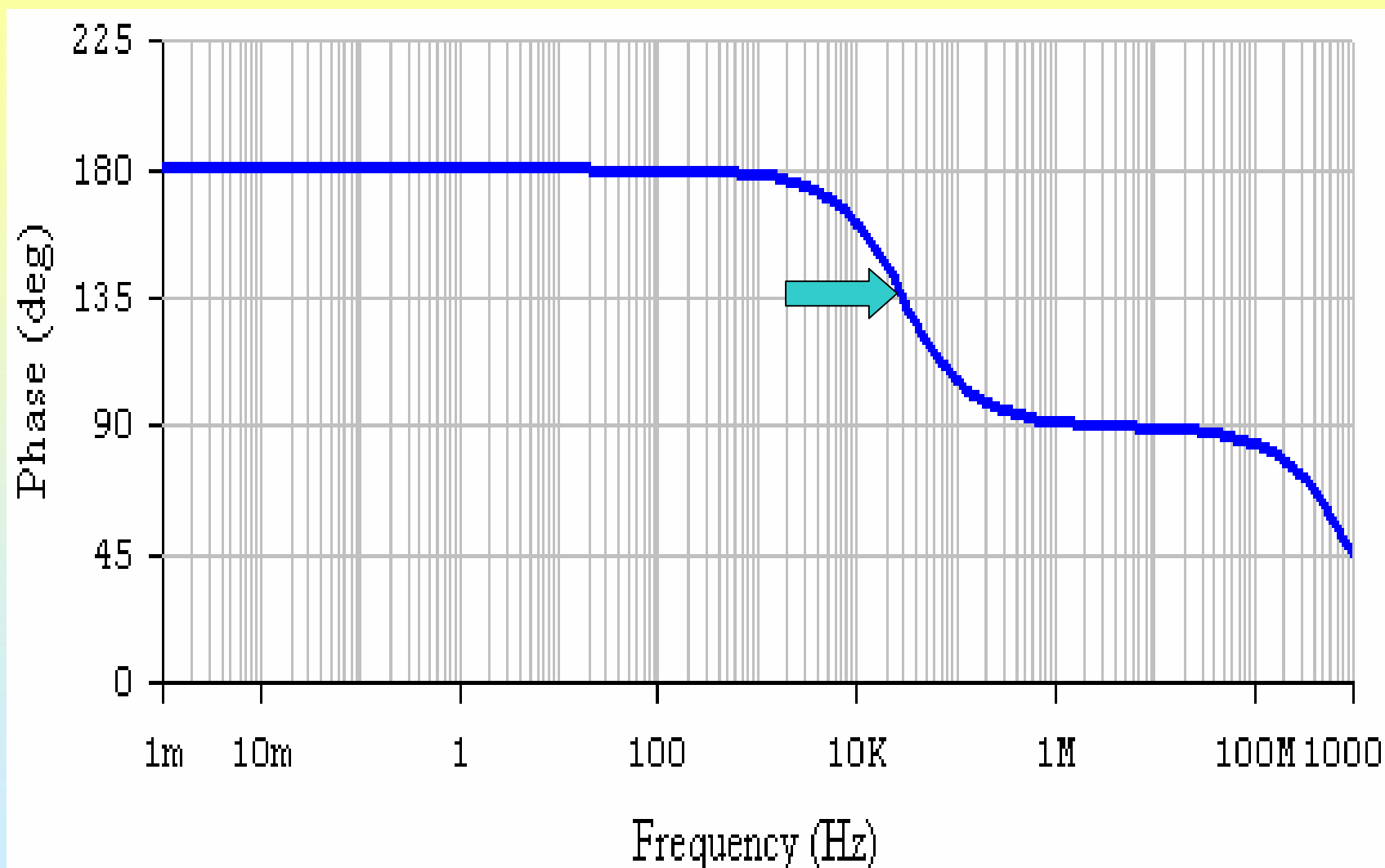
W praktyce często włącza się pomiędzy masę a wejście „+” dodatkowy rezystor R_3 o wartości równej rezystancji połączenia równoległego R_1 i R_2 , gdyż w tym przypadku uzyskuje się najlepszą kompensację błędów z napięcia niezrównoważenia.

Przykład charakterystyki amplitudowej wzmacniacza WO

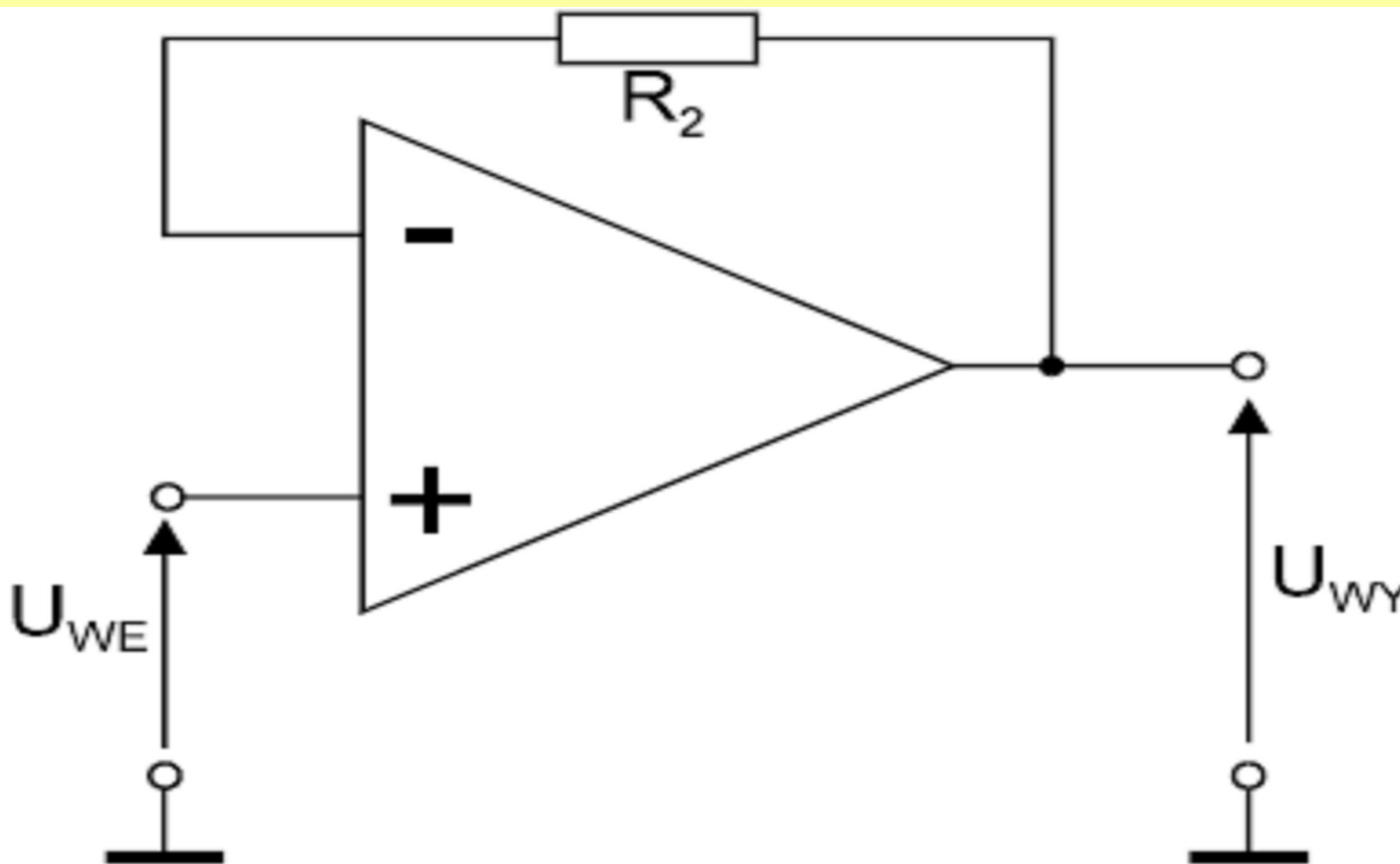


$$K_u = 50 \text{ [V/V]} = 33,98 \text{ [dB]}$$

Przykład charakterystyki fazowej wzmacniacza WO



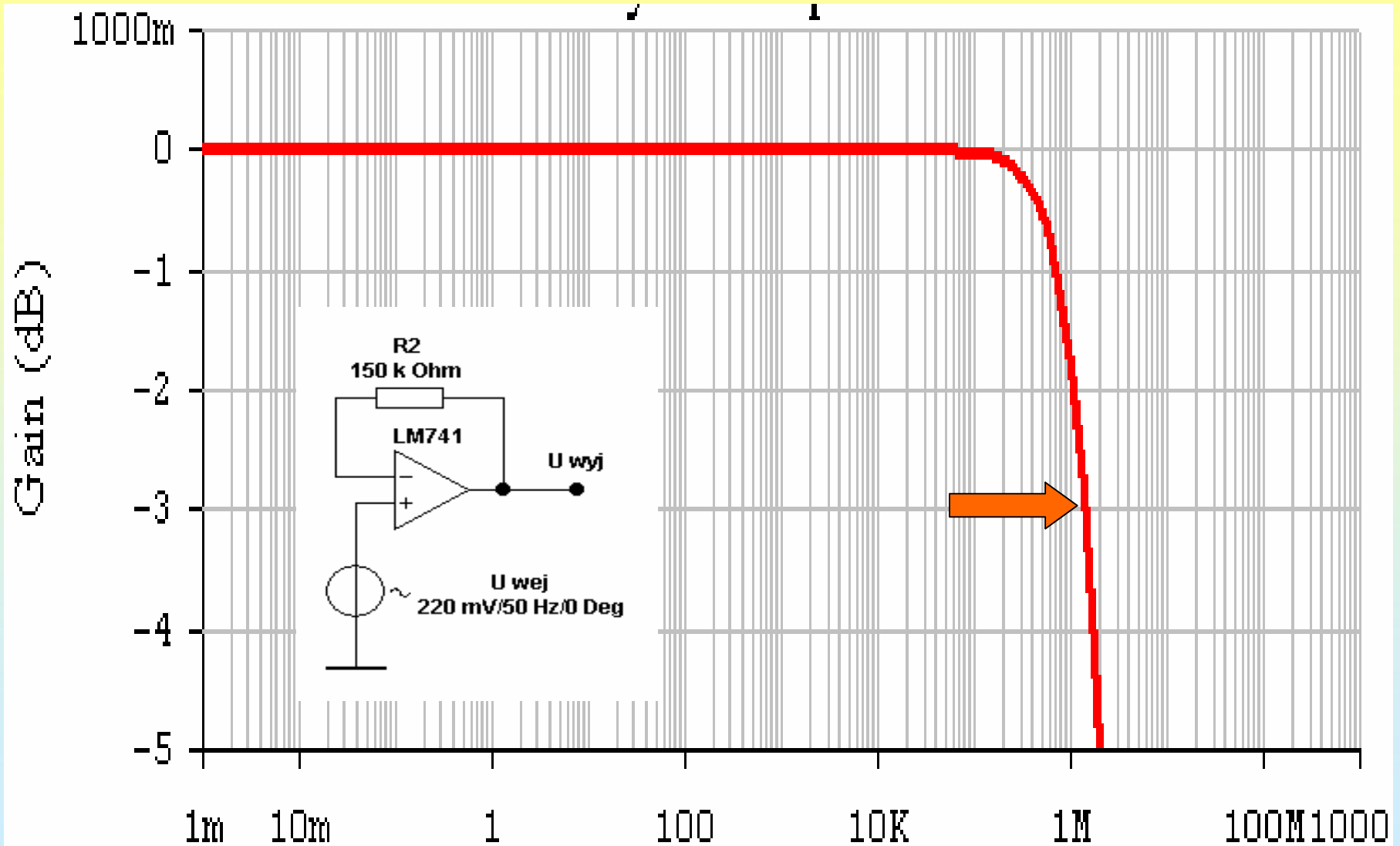
$$K_u = U_{wy} / U_{we} = 1 \text{ [V/V]}$$



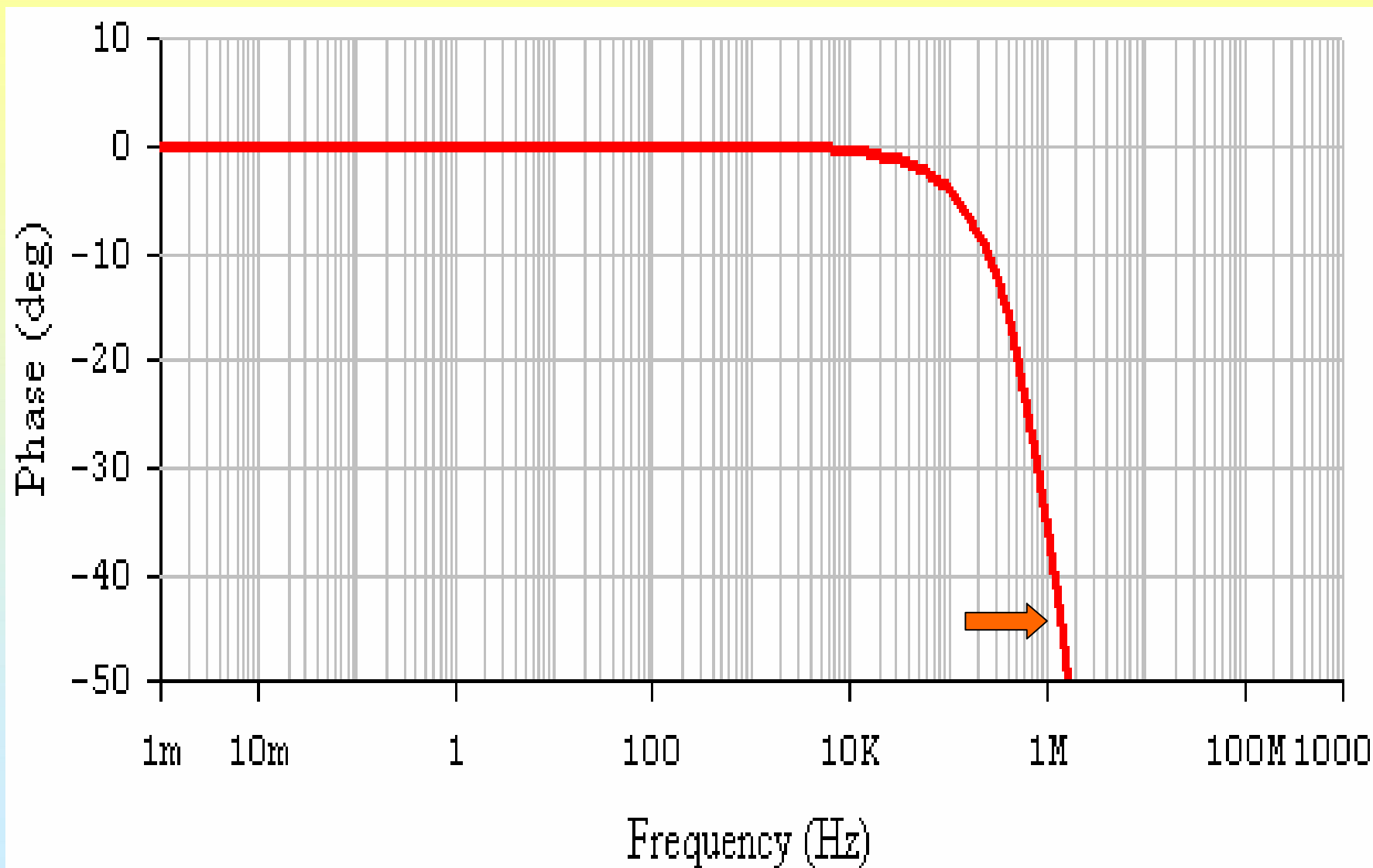
Wtórnik napięciowy

Wtórnik napięciowy ma wzmacnienie równe 1 oraz charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową. Z tego powodu nadaje się doskonale do zastosowań jako bufor separujący układy

Charakterystyka amplitudowa wtórnika na WO



Charakterystyka fazowa wtórnika na WO



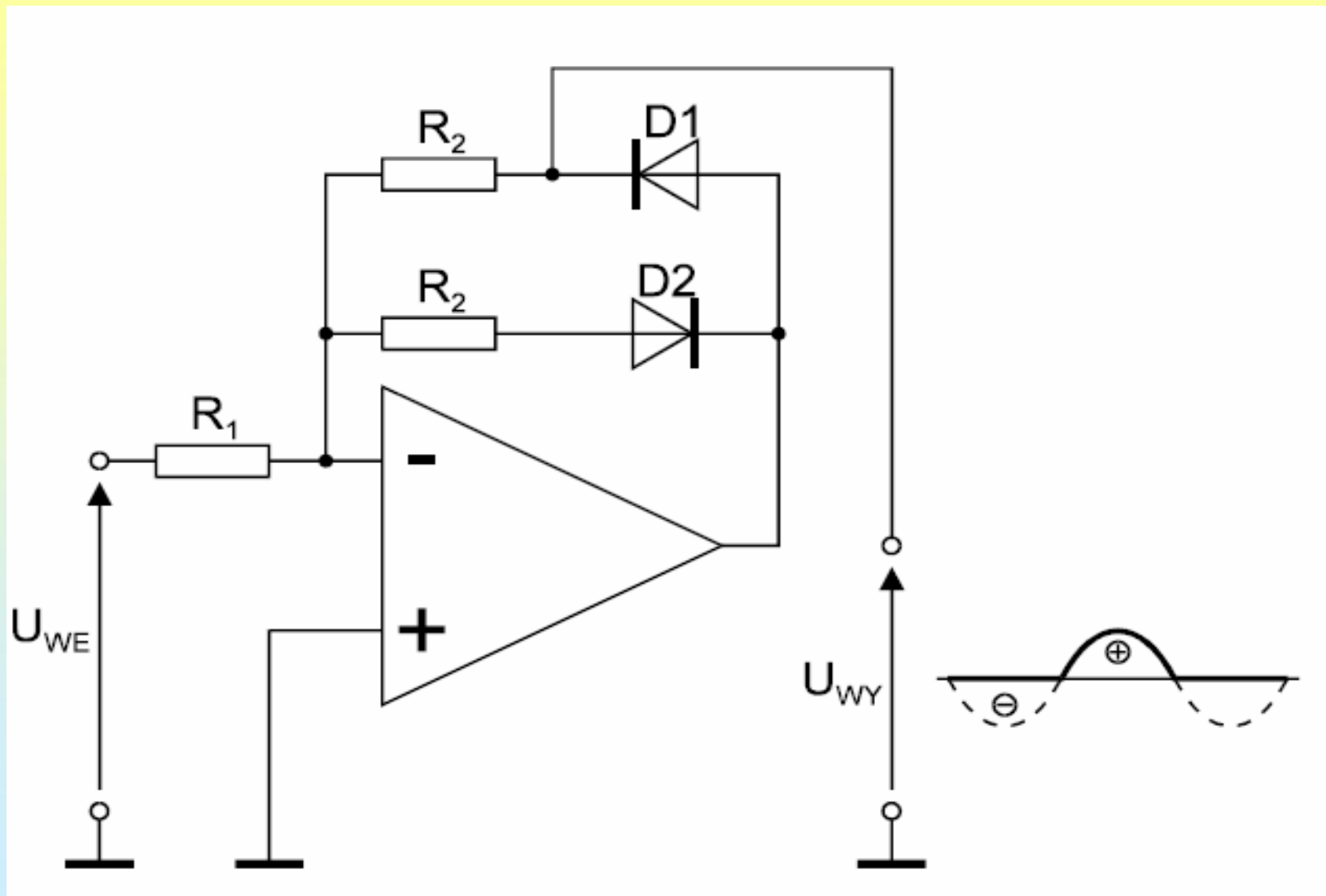
Prostownik liniowy

Zastosowanie diod półprzewodnikowych w konwencjonalnych układach prostowniczych w zakresie małych sygnałów jest ograniczone. Jest to spowodowane bardzo dużą nieliniowością tych elementów przy bardzo małych napięciach.

Np. dla diod krzemowych przy napięciach mniejszych od około 0,7V praktycznie niemożliwe jest przewodzenie prądu.

Dużą liniowość przetwarzania napięcia zmiennego na stałe, osiąga się przez umieszczenie diod w obwodzie sprzężenia zwrotnego, co powoduje, że diody przewodzą nawet przy bardzo małej wartości napięcia wejściowego.

Prostownik liniowy



Diody D1 i D2 są odcięte jeżeli napięcie na wyjściu WO jest $< |0,7V|$,
Wzmocnienie układu określone jest wtedy przez wzmocnienie różnicowe
WO (otwarte sprzężenie zwrotne).

Zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego następuje przy napięciu na
wyjściu WO $> |0,7V|$.

Strefie odcięcia diod D1 i D2 odpowiada bardzo mały zakres napięcia
wejściowego (przy WO, dla którego $KU=100\ 000\ V/V$ zakres napięć
wejściowych, przy których diody są odcięte wynosi $\pm 0,7V: 100\ 000\ V/V =$
 $\pm 7\mu V$). Tak mały zakres napięć wejściowych nieprostowanych praktycznie
nie ma żadnego wpływu na dokładność przetwarzania napięcia zmiennego
na stałe.

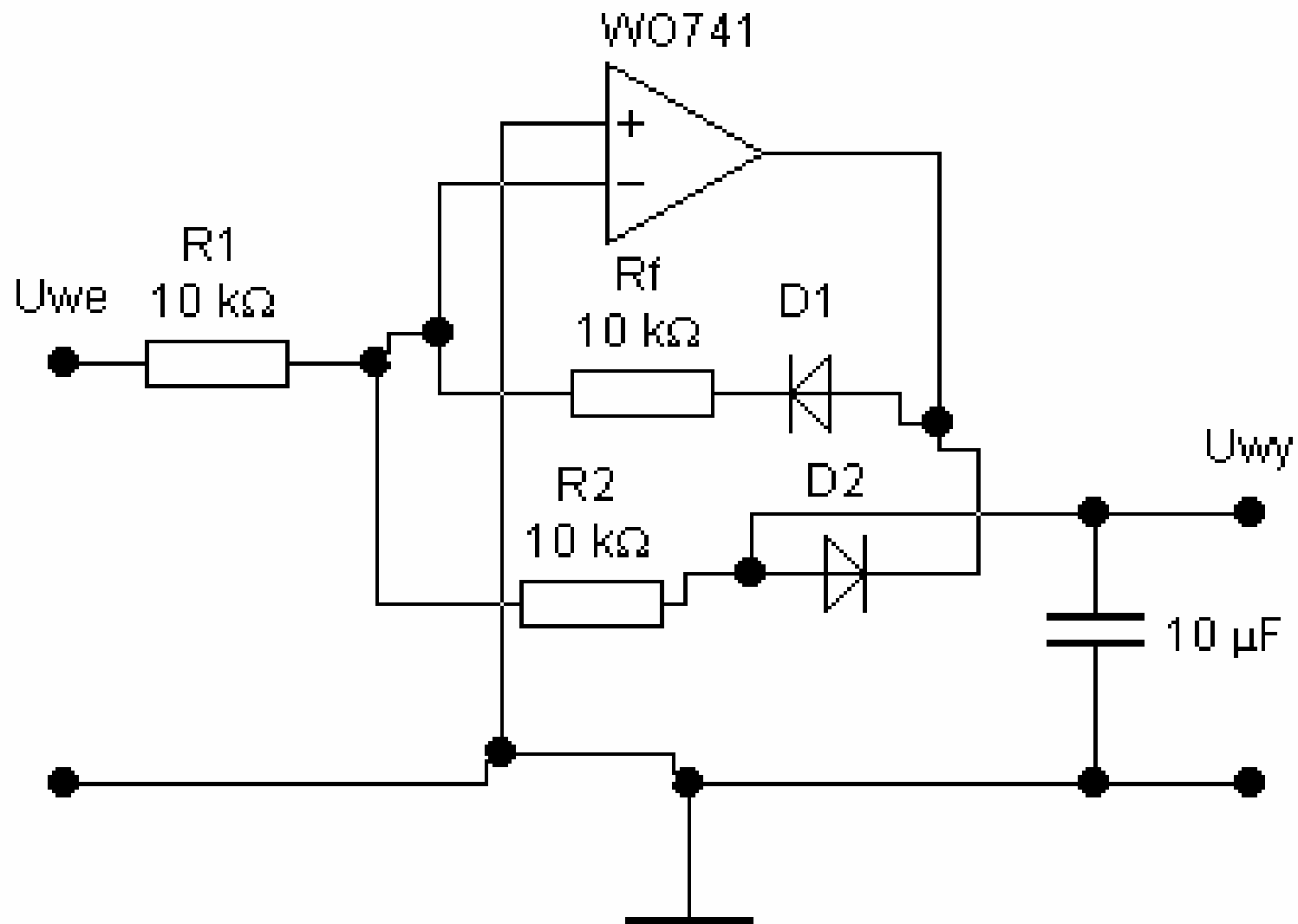
Dla wejściowych napięć dodatnich $> +7\mu V$ dioda D2 przewodzi, zatem dioda
D1 jest odcięta. Napięcie U_{wy} jest równe zeru. Dioda D2 służy do
zabezpieczenia WO przed wejściem w nasycenie i związanemu z tym
opóźnieniu czasowemu.

Przy wejściowych napięciach ujemnych $< -7\mu V$ dioda D1 przewodzi, zaś dioda
D2 jest odcięta. Napięcie wyjściowe układu jest równe:

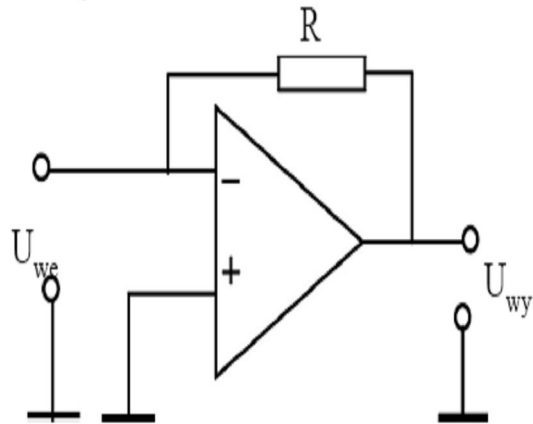
$$U_{wy} = - R2/R1 U_{we}$$

W przypadku, gdy $R1=R2$ wzmocnienie układu równa się -1 i ujemna połówka
napięcia wejściowego jest powtarzana na wyjściu jako dodatnia.

Przykład aktywnego prostownika na WO 741

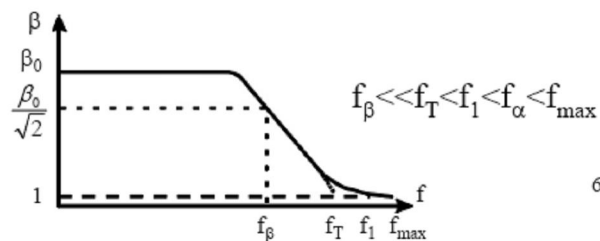


Układ wzmacniacza z **ujemnym** sprzężeniem zwrotnym



f_T – ekstrapolacja części opadającej wykresu $\beta(f)$ o stałym nachyleniu do przecięcia z prostą $\beta=1$

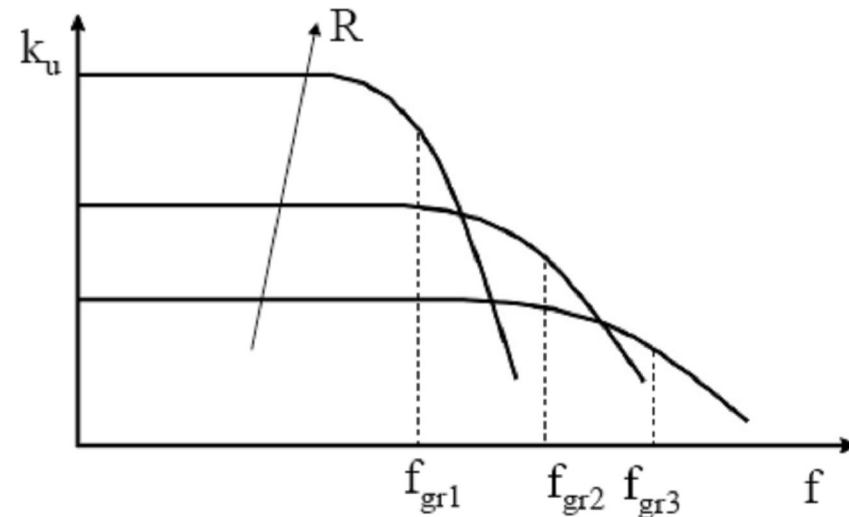
f_{max} – częstotliwość niezależna od układu pracy, przy której wzmacnienie mocy maleje do 1



61

Podsumowanie

Wielkość sprzężenia zwrotnego (wartość R) ma zasadniczy wpływ przede wszystkim na **wzmocnienie napięciowe** (k_u) i **max. częstotliwość pracy** (f_{gr}) wzmacniacza.



Gdy $R \nearrow$ to $k_u \nearrow$ $f_{gr} \searrow$

142

Definicja częstotliwości granicznej F_T

- Dla każdego wzmacniacza operacyjnego definiuje się **częstotliwość graniczną f_T** przy której jego wzmocnienie maleje do jedności.
- Częstotliwość ta jest równa jednostkowemu pasmu przenoszenia wzmacniacza, tzn. pasmu jakim cechuje się wzmacniacz przy wzmocnieniu równym $1V/V$.
- W skali logarytmicznej wzmocnienie przy częstotliwości f_T wynosi 0dB.
- Im silniejsze jest sprzężenie zwrotne tym mniejsze jest wzmocnienie i szersze pasmo przenoszenia układu.
- Pasmo to nigdy jednak nie przekroczy pasma jednostkowego

Wybrane parametry wzmacniacza operacyjnego

Wejściowe napięcie niezrównoważenia - U_{io} - jeżeli w układzie rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą napięcie różnicowe występujące między wejściami, będzie wynosiło zero, to jednak występujące w tym stanie napięcie wyjściowe będzie różne od zera. Jest to wynik niesymetrii układu.

Napięcie wyjściowe osiągnie wartość zero po przyłożeniu do wejścia pewnego napięcia różnicowego, określanego mianem wejściowego napięcia niezrównoważenia U_{io} .

Rezystancja wejściowa – w przypadku wzmacniacza operacyjnego definiowane są dwie rezystancje wejściowe:

- **rezystancja wejściowa różnicowa R_{ir}** (dla sygnału różnicowego), która występuje między wejściami: odwracającym i nieodwracającym układu z otwartą pętlą
- **rezystancja wejściowa sumacyjna R_{is}** - (dla sygnału współbieżnego), która występuje między zwartymi wejściami a masą