

# Wzmacniacze

W poprzednim wykładzie przedstawiliśmy możliwość wykorzystania wzmacniaczy instrumentalnych:

- W wersji ogólnego zastosowania
- W wersji specjalizowanej (low bias, low noise lub low drift).

Obecnie opiszemy inne wzmacniacze a mianowicie:

1. Wzmacniacze izolujące a więc wzmacniacze w których nie ma galwanicznego połączenia wejścia z wyjściem.

2. Wzmacniacze ładunku – a więc wzmacniacze o ekstremalnie dużej rezystancji wejściowej.

3a. Wzmacniacz małych sygnałów AC, gdzie głównym problemem jest eliminacja szumów.

3b. Wzmacniacze małych sygnałów AC+DC gdzie głównym problemem jest eliminacja temperaturowego pełzania zera

4. Wzmacniacze wykonujące operacje matematyczne a więc:

-Wzmacniacze całkujące

-Wzmacniacze różniczkujące

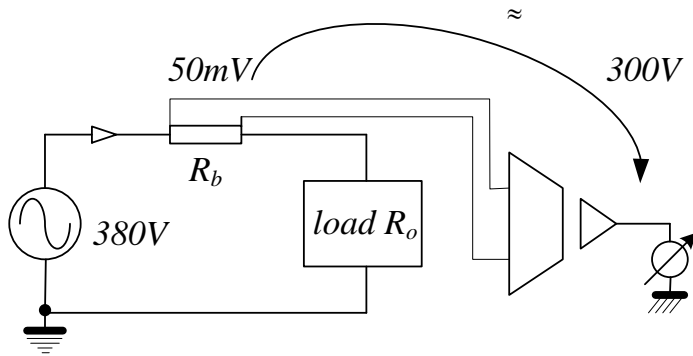
-Wzmacniacze logarytmujące i wykładnicze

-Mnożniki

-- komparatory

# Wzmacniacze izolujące

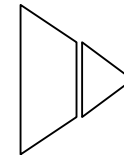
Rys. 1. Przy użyciu wzmacniacza o pomiaru napięcia na boczniku mamy sytuację że mierzone napięcie o poziomie mV jest na potencjale napięcia zasilającego kilkaset V. Taka sytuacja jest niebezpieczna dla użytkownika i należy zastosować wzmacniacz izolujący bez połączenia galwanicznego wejścia z wyjściem.



Generalnie jeśli to możliwe należy stosować wzmacniacze izolujące, tak np. w medycynie ze względów bezpieczeństwa jest to konieczność.

Ale i w innych przypadkach izolacja galwaniczna jest gwarancją bezpieczeństwa sprzętu i użytkownika.

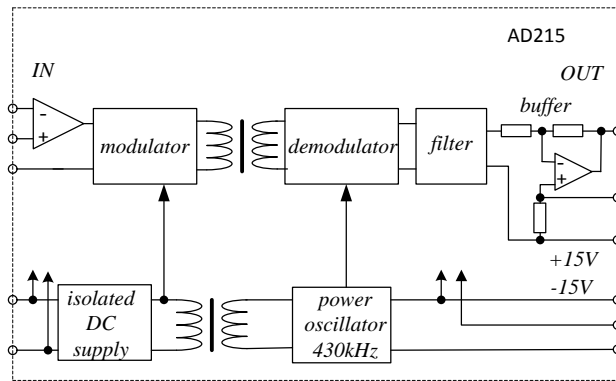
Problem w tym że wzmacniacze izolujące są znacznie bardziej skomplikowane i droższe niż wzmacniacze konwencjonalne.



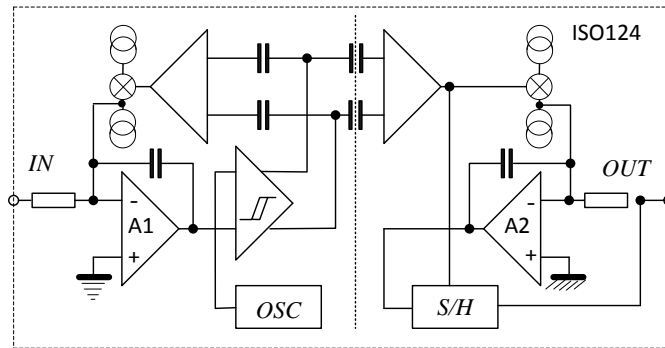
Rys. 2. Symbol wzmacniacza izolującego

# Wzmacniacze izolujące - cd

Rys. 3. Wzmacniacz izolujący model AD215



Rys. 4. Wzmacniacz izolujący model ISO124



Teoretycznie dobrą metodą oddzielenia galwanicznego jest zastosowanie transformatora lub pojemności. Ale ta metoda może być stosowana jedynie w przypadku napięć przemiennych.

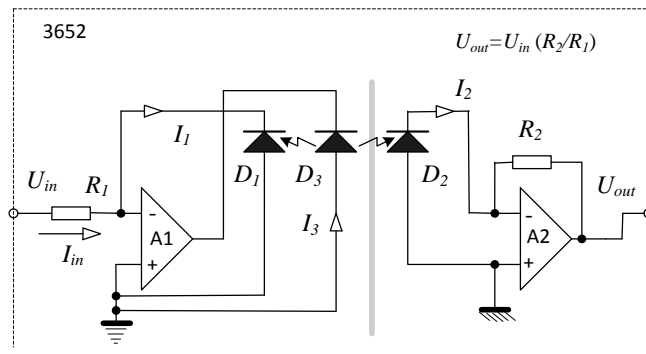
Wzmacniacz powinien jednak przenosić także składową stałą. Dlatego we wzmacniaczach izolujących konieczna jest zamiana napięcia wejściowego na napięcie przemiennego (np. przez modulację sygnału przemiennego napięciem wejściowym). Dopiero teraz można zastosować oddzielenie galwaniczne. Później z kolei trzeba zastosować demodulację sygnału – czyli usunięcie składowej nośnej.

Na rys. 1 przedstawiono wzmacniacz firmy Analog Devices gdzie sygnał zmodulowany oddzielony jest z wykorzystaniem mikro-transformatorów.

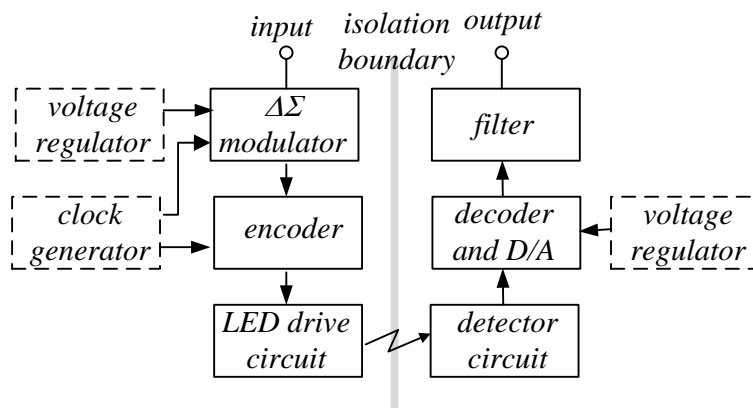
Inną strategię realizuje firma Texas (rys.4) gdzie do oddzielenia galwanicznego stosuje się dwa kondensatory

# Wzmacniacze izolujące – oddzielenie światłowodem

Rys. 5. Wzmacniacz izolujący model 3652.



Rys.6. Wzmacniacz HCPL



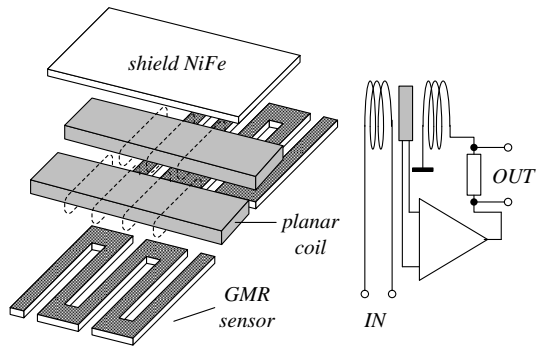
Świetnym oddzieleniem galwanicznym jest światłowód (lub para dioda świecąca i fotodiody). Niestety ta metoda transmisji sygnału jest znakomita w przypadku sygnałów cyfrowych, natomiast dość nieliniowa w przypadku sygnałów analogowych.

Problem ten rozwiązała firma Burr Brown linearyzując diody przez umieszczenie ich w pętli sprzężenia zwrotnego (rys. 5).

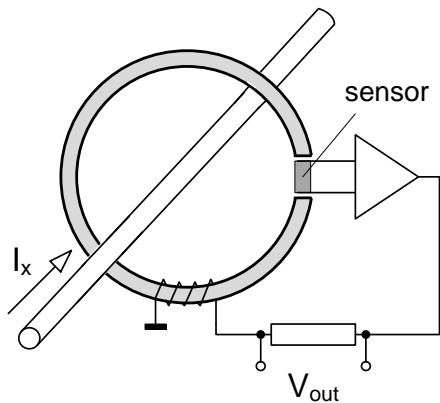
Inną strategię zastosowała firma Avago Technologies (rys.6). Jeśli światłowód jest bardzo dobry dla sygnałów cyfrowych, a przetworniki analogowo-cyfrowe sigm-delta stały się bardzo tanie to można sygnał analogowy zamienić na cfrę – następnie zastosować światłowód – a następnie zastosować przetwornik cyfrowo-analogowy.

# Wzmacniacze izolujące – oddzielenie magnetyczne

Rys. 7. Izolator magnetyczny



Rys. 8. Przetwornik typu LEM



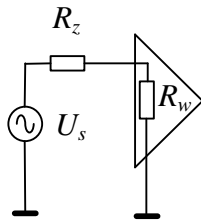
Bardzo dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie czujników pola magnetycznego – magnetorezystorów bądź hallotronów ponieważ czujniki te poprawnie reagują na pole stałe i przemienne – nie ma więc potrzeby modulacji sygnału.

W układzie scalonym firmy Nonvolatile Electronics (rys. 7) prąd wejściowy przepływając przez cienką ścieżkę wytwarza pole magnetyczne. To pole jest wykrywane przez czujnik magnetorezystancyjny podający ten sygnał na wzmacniacz. Wzmacniacz wytwarza prąd wyjściowy który w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego wytwarza pole równoważące pole magnetyczne. Czujnik MR spełnia więc rolę detektora zera a cały układ spełnia rolę transformatora pola DC i AC.

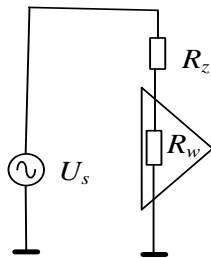
Podobną ideę realizuje popularny przetwornik typu LEM (rys. 8). Prąd  $I_x$  wytwarza w rdzeniu strumień magnetyczny. Ten strumień wykrywany jest przez czujnik hallotronowy umieszczony w szczelinie rdzenia. Prąd wyjściowy wytwarza strumień przeciwnie skierowany z wykorzystaniem cewki na rdzeniu..

# Wzmacniacze ładunku

Rys. 9. Źródło o rezystancji  $R_z$  podłączone do wzmacniacz o rezystancji  $R_w$ .



Rys. 10. Ten sam układ inaczej narysowany



Na rynku dostępne są elektrometry firmy Keithley o rezystancji wejściowej  $10^{15} \Omega$  - prądzie wejściowym  $400 \cdot 10^{-18} \text{ A}$ .

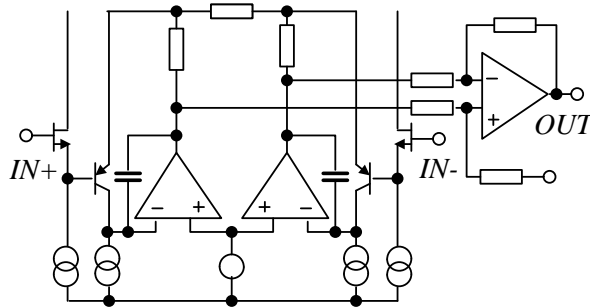
W normalnym przypadku rezystancja wejściowa wzmacniacza jest bardzo duża i znacznie większa niż rezystancja źródła. Są jednak czujniki o bardzo dużej rezystancji np. czujniki piezoelektryczne – o rezystancji porównywalnej z rezystancją wzmacniacza. Powstaje wówczas znaczny błąd. Jak wynika z rys. 10 rezystancje  $R_w$  i  $R_z$  tworzą dzielnik napięcia i na wzmacniacz dostaje się napięcie:

$$U_w = \frac{R_w}{R_w + R_z} \cdot U_s$$

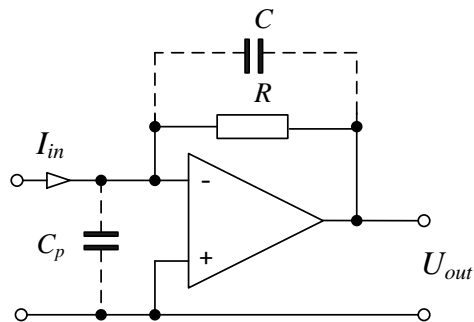
A więc jeśli  $R_z = R_w$  to na wejście wzmacniacza dostaje się zaledwie połowa sygnału źródła. W takim przypadku należy stosować specjalne wzmacniacze o ekstremalnie dużej rezystancji wejściowej tzw. Wzmacniacze ładunku (charge amplifier) zwane też elektrometrami.

# Wzmacniacze ładunku - układy

Rys. 11. Wzmacniacz instrumentalny AD 8220 typu „low bias” o prądzie wejściowym 600 fA i rezystancji  $10^{13} \Omega$ . Tak dużą rezystancję uzyskano dzięki zastosowaniu tranzystorów FET.



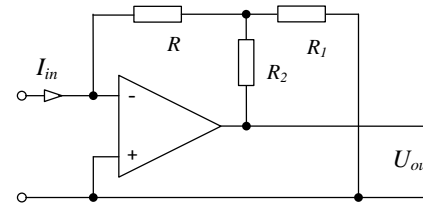
Rys. 12 Przetwornik prąd-napięcie



Dużą rezystancję wejściową zapewnia przetwornik prąd/- napięcie (rys.11). W przetworniku tym

$$U_{out} = -I_{in}R$$

a więc rezystancja wejściowa jest równa R.



Rys. 13. Zmodyfikowany układ przetwornika

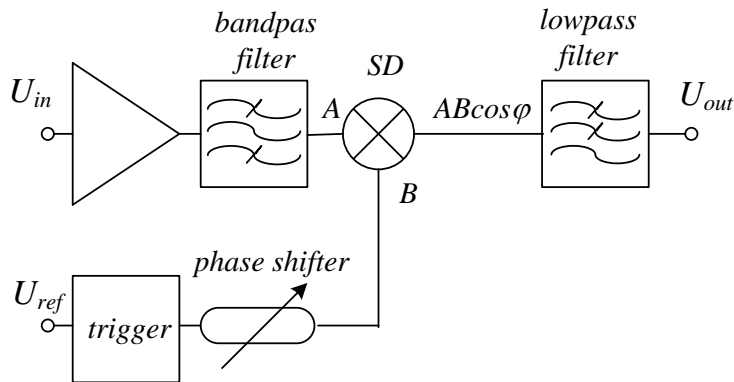
Jeśli zmodyfikujemy ten układ jak na rys. 13 to mamy:

$$U_{out} = -I_{in} \left[ R_2 + R \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \right] \approx -I_{in} R \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

A więc rezystancja wejściowa wzrośnie o  $R_2/R_1$ .

# Wzmacniacze małych sygnałów AC

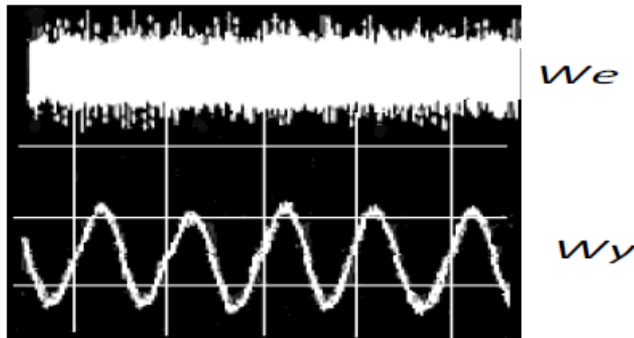
Rys. 14 Wzmacniacz typu lock-in (SD – synchronous detector – prostownik fazoczuły – tu mnożnik)



W tym przypadku największym problemem są szумы. Przypomnijmy że szумы 1 kHz typowego wzmacniacza instrumentalnego są rzędu 10 nV/rtHz (rtHz – pierwiastek z pasma częstotliwości).

Możemy też zastosować specjalne wzmacniacze typu „low noise” i wówczas możemy zejść z szumami do poziomów 1 nV/rtHz – wzmacniacz typu AD8429.

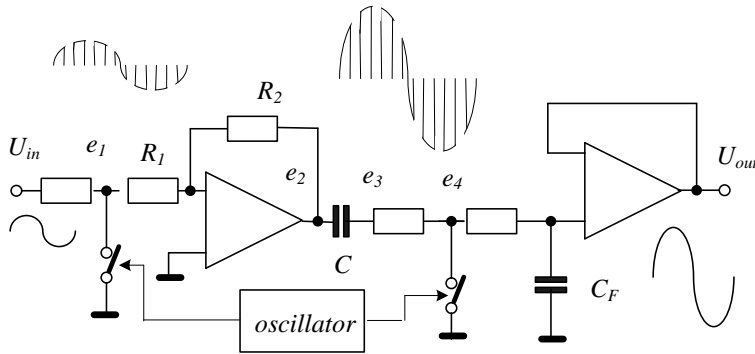
Jeśli chcemy mierzyć sygnały o poziomie NV lub niżej to jedynym rozwiązaniem jest zastosowanie wzmacniacza typu lock-in (wzmacniacza homodynowego) omawianego przy okazji wykładu o detektorach synchronicznych.





# Wzmacniacze małych sygnałów AC + DC - chopper

Rys. 15. Wzmacniacz typu chopper



We wzmacniaczu tym wejście wzmacniacza jest zwierane z częstotliwością  $\Omega$ . Następuje więc jakby siekanie sygnału i zamiana go na sygnał o częstotliwości  $\Omega$  modulowanego sygnałem o częstotliwości  $\omega$ . Synchroniczne zwieranie układu po kondensatorze pozwala na odzyskanie sygnału małej częstotliwości.

W tym przypadku największym problemem jest temperaturowe pełzanie zera (temperature zero drift). W typowych wzmacniaczach jest ono rzędu  $0.1 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ .

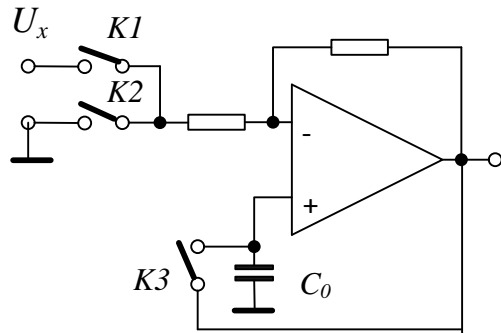
Jeśli chcemy mierzyć mniejsze sygnały to rozwiązaniem jest zastosowanie wzmacniaczy z przetwarzaniem, to jest zamieniających sygnał wolnozmienny na sygnał o częstotliwości rzędu kHz. Jedną z metod jest tu modulacja sygnału o częstotliwości  $\Omega$  sygnałem o częstotliwości  $\omega$  (musi być spełniony warunek  $\Omega > 5 \omega$ ).

Popularnym sposobem przetwarzania jest idea wzmacniacza typu chopper (rys. 15).

Wadą wzmacniaczy typu chopper jest ograniczenie częstotliwości do  $1/5$  częstotliwości sygnału zwierania wejścia.

# Wzmacniacze małych sygnałów AC+DC - autozero

Rys. 16. Zasada działania metody autozero



Inną metodą eliminacji pełzania zera jest metoda auto-zero przedstawiona na rys. 16.

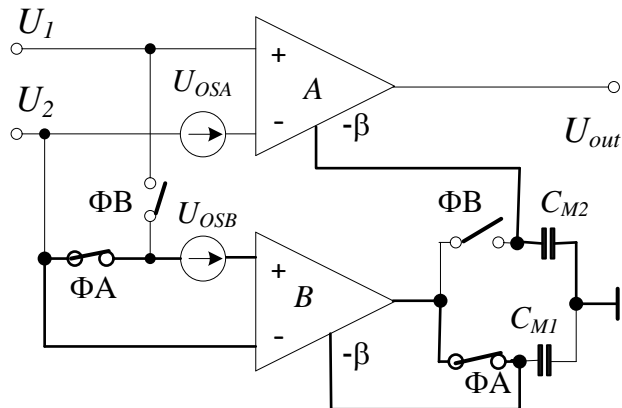
W metodzie tej wejście cyklicznie jest zwierane (klucz K2). Na wejściu wzmacniacza pozostaje więc tylko pełzanie zera  $\Delta U$ . To napięcie po wzmacnieniu odkłada się na kondensatorze  $C_0$  – zamknięty klucz K3.

W następnym kroku rozwierane są klucze K2 i K3 i na wejście + wzmacniacza podawane jest napięcie mierzone. Z kolei na wejście – podawane jest zapamiętane na kondensatorze napięcie  $\Delta U$  - w ten sposób napięcie pełzania zera  $\Delta U$  odejmuje się od napięcia wejściowego  $U + \Delta U$ .

Wadą tego rozwiązania jest ograniczenie pasma przez cykliczne zwieranie zera – wady tej nie ma przedstawiony na następnym slajdzie układ AD8551.

# Wzmacniacze małych sygnałów A+Dc – porównanie metod

Rys. 17. Wzmacniacz auto-zero typu AD 8551



Układ ten jest zmodyfikowaną wersją układu z rys. 16. Zastosowano tu dwa wzmacniacze pracujące naprzemiennie – gdy zwarte jest wejście jednego pracuje drugi.

Tabela 1. Porównanie właściwości wzmacniacza chopper i autozero

	AD4051	AD8551	AD8628
Bandwidth	125 kHz	1.5 MHz	2.5 MHz
Offset drift	20 nV/°C	50 nV/°C	2 nV/°C
Offset	2 μV	1 μV	1 μV
Noise 1 kHz	95 nV/rtHz	42 nV/rtHz	22 nV/rtHz
Noise 1/f	2 μVpp	1 μVpp	0.16 μVpp
Current noise	100 fA/rtHz	2 fA/rtHz	5 fA/rtHz

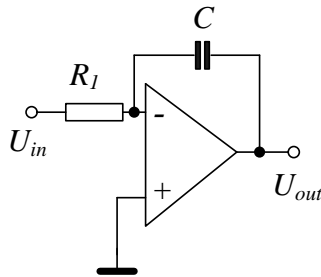
AD4051 – chopper, AD 8551 – auto-zero, AD8628 – chopper +auto-zero

Wzmacniacz typu chopper Ad4051 ma o połowę „mniejsze pełzanie ra niż wzmacniacz auto-zero AD8551. Dzieje się to jednak kosztem pasma częstotliwości – 125 kHz chopper i 1.5 MHz auto-zero.

„Mercedesem” w tej dziedzinie jest układ AD8628 łączący w sobie obie metody – osiągnięto pełzanie zera rzędu 2 nV/°C.

# Wzmacniacze całkujące

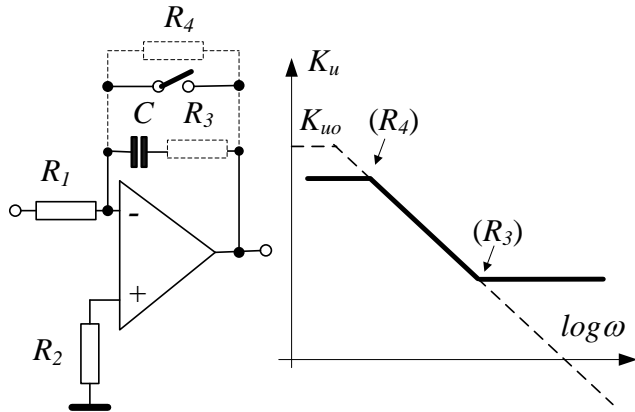
Rys. 18. Układ wzmacniacza całkującego



Wzmacniacz przedstawiony na rys. 18 realizuje funkcję:

$$u_{out}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_{t_0}^{t_0+T} u_{in}(t) dt + U_0$$

Rys. 19. Zmodyfikowany układ wzmacniacza

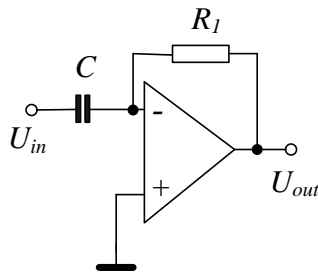


W układzie przedstawionym na rys. 18 charakterystyka częstotliwościowa rośnie ze zmniejszaniem częstotliwości. Grozi to dużym pełzaniem zera  $U_0$ . Dlatego zazwyczaj rozbudowuje się układ jak na rys. 19 gdzie elementami  $R_3$  i  $R_4$  ograniczamy pasmo wzmacniacza.

Wzmacniacze całkujące są bardzo popularne w pomiarach magnetycznych, ponieważ napięcie indukowane w cewce zgodnie z prawem Faradaya jest proporcjonalne do  $dB/dt$ . Chcąc wyznaczyć indukcję musimy sygnał całkować.

# Wzmacniacze różniczkujące

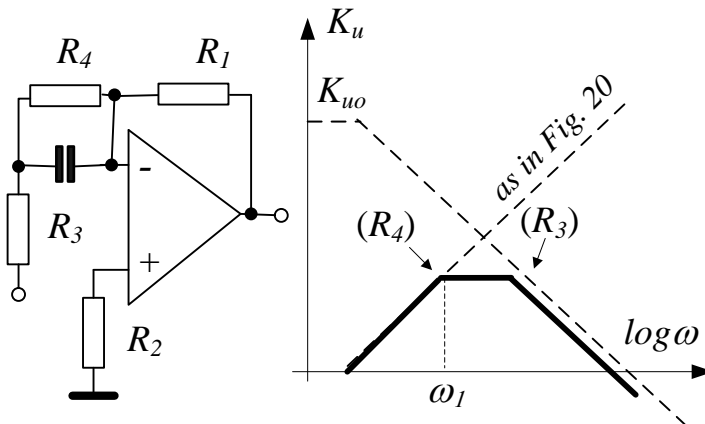
Rys. 20. Układ wzmacniacza różniczkującego



Wzmacniacz różniczkujący powstaje po zamianie miejscami elementów R i C układu całkującego. Układ przedstawiony na rys. 20 realizuje funkcję

$$u_{out}(t) = -R_1 C \frac{du_{in}(t)}{dt}$$

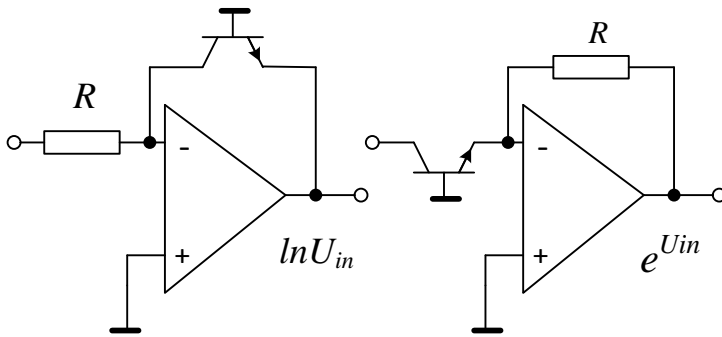
Rys. 21. Zmodyfikowany układ wzmacniacza



Tu z kolei charakterystyka częstotliwościowa różnie z częstotliwością co grozi wzbudzeniem się układu. Dlatego zazwyczaj ograniczamy pasmo stosując zmodyfikowany układ przedstawiony na rys. 21.

# Wzmacniacze logarytmujące i wykładnicze

Rys. 22. Wzmacniacze: logarytmujący i wykładniczy



$$U_{out} = -U_T \ln \frac{I_{in}}{I_s} = -U_T \ln \frac{U_{in}}{R I_s}$$

$$U_{out} = I_s R \cdot e^{-U_{in}/U_T}$$

Dla układu z rys. 23:

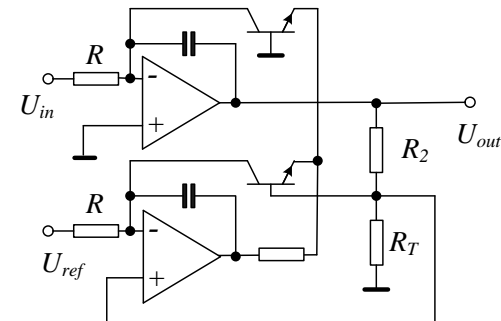
$$U_{out} = -\frac{R_T + R_2}{R_T} U_T \ln \frac{U_{in}}{U_{ref}}$$

Wykorzystujemy właściwości wykładnicze tranzystora bowiem między prądem kolektora  $I_c$  oraz napięciem baza-emiter  $U_{BE}$  obowiązuje zależność

$$I_c = I_s e^{U_{BE}/U_T}$$

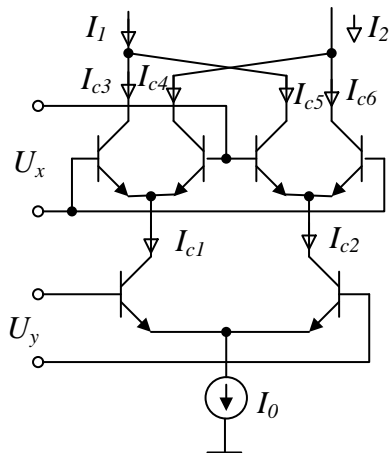
Wystarczy więc odpowiednio włączyć tranzystor w pętlę sprzężenia zwrotnego jak na rys. 22. Niestety sygnał zależy też od częstotliwości i układ z rys. 22 należy odpowiednio zmodyfikować jak to przedstawiono na rys.23.

Rys. 23. Pełny układ wzmacniacza logarytmującego



# Mnożniki – mnożnik Gilberta

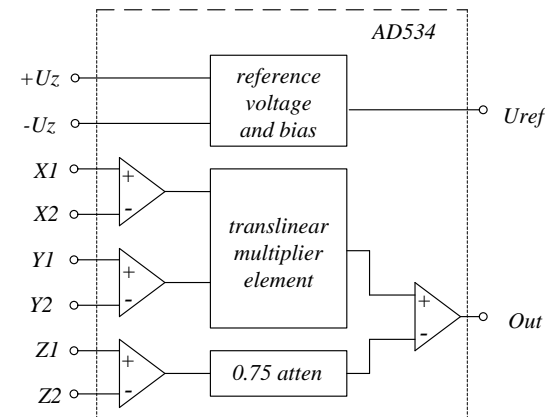
Rys. 24. Transkonduktancyjny mnożnik Gilberta



$$\Delta I = I_1 - I_2 = \frac{I_0}{4U_T^2} \cdot U_x U_y = K \cdot U_x U_y$$

Najpopularniejszym układem mnożącym jest układ zaproponowany przez Gilberta – rys. 24. Układ ten wykorzystuje właściwości logarytmujące tranzystora zgodnie z zasadą  $\log X + \log Y = \log XY$ .

Rys. 25. Mnożnik AD534

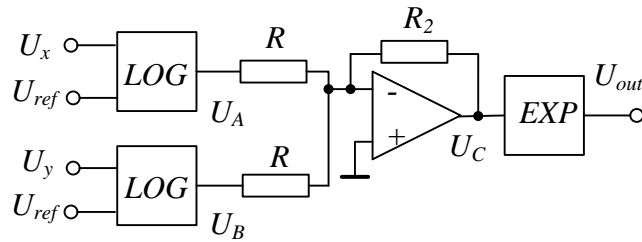


Mnożnik ten realizuje funkcję

$$U_{out} = \frac{(X_1 - X_2)(Y_1 - Y_2)}{10V} + (Z_1 - Z_2)$$

# Mnożniki – mnożniki logarytmujące

Rys. 26. Mnożnik z układami logarytmującymi



$$U_A = K_1 \log \frac{U_x}{U_{ref}}$$

$$U_B = K_2 \log \frac{U_y}{U_{ref}}$$

$$U_C = -(U_A + U_B) = -K \log \frac{U_x U_y}{U_{ref}^2}$$

Pojawienie się tanich wzmacniaczy logarytmujących stworzyło możliwości opracowania nowych mnożników działających na zasadzie  $\log X + \log Y = \log XY$ .

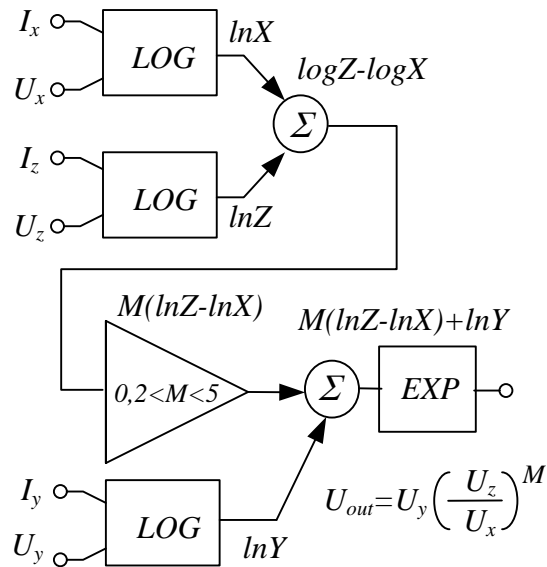
Oczywiście sygnał należy zdelogarytmować przy pomocy wzmacniacza wykładniczego i dla układu z rys. 26 otrzymujemy

$$U_{out} = U_{ref} 10^{-U_C / K_3} = \frac{U_x U_y}{U_{ref}}$$



# Mnożnik AD538

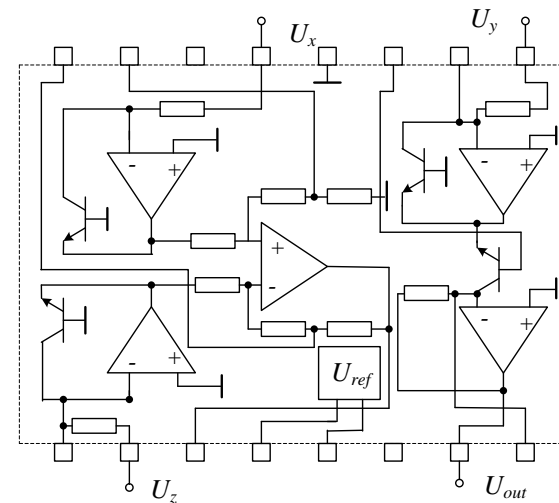
Rys. 27. Mnożnik AD538



$$U_{out} = U_y \left( \frac{U_z}{U_x} \right)^M$$

Na rys. 27 przedstawiony został obecny na rynku układ AD538 realizujący zasadę przedstawioną na rys. 26.

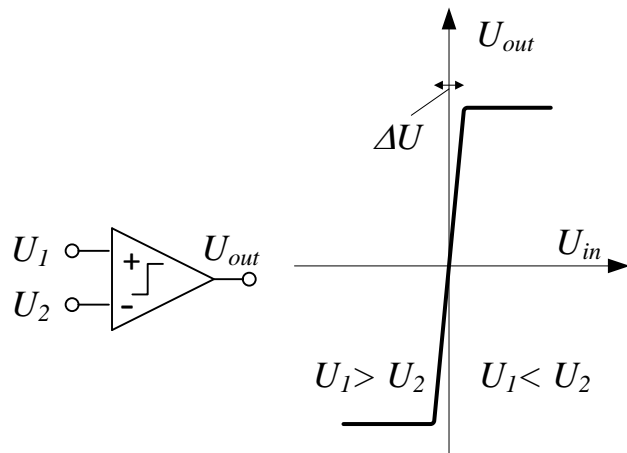
Schemat układu ze wzmacniaczami logarytmującymi przedstawiono na rys. 28.



Rys. 28. Mnożnik AD538

# Komparator

Rys. 29. Zasada działania komparatora



Komparatory odgrywają bardzo dużą rolę w technice cyfrowej jak de facto cyfrowe detektory zera. Realizują one funkcję:

$$\begin{cases} U_{out} = 1 & \text{for } \varepsilon = U_+ - U_- > 0 \\ U_{out} = 0 & \text{for } \varepsilon = U_+ - U_- < 0 \end{cases}$$

A więc zmianę stanu z 0 na 1 przy przejściu sygnału przez zero.

Rolę komparatora spełnia każdy wzmacniacz operacyjny bez sprzężenia zwrotnego ale produkowane są specjalne układy charakteryzujące się szybkim przejściem między stanem 0 a 1.