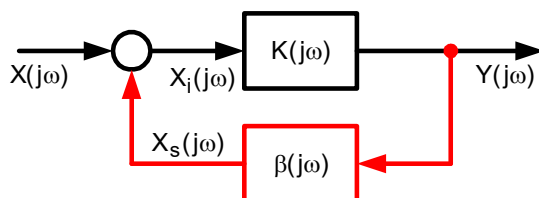


3. Wzmacniacz operacyjny

Obecnie w większości dziedzin techniki analogowej zamiast tranzystorów dyskretnych stosuje się wzmacniacze operacyjne. Wzmacniacz operacyjny jest elementem elektronicznym aktywnym, wielobiegunkowym (wielozaciskowym). Ze względu na wszechstronne zastosowanie w technice pomiarowej i regulacji automatycznej do przekształcania i wzmacniania sygnałów analogowych można powiedzieć, że jest to układ uniwersalny, który zachował historyczną nazwę związaną z analogowymi maszynami matematycznymi, gdzie realizował odpowiednie operacje matematyczne. Najczęściej wzmacniacz operacyjny pracuje z silnym ujemnym sprzężeniem zwrotnym z tego względu wymagane jest, aby miał bardzo duże wzmocnienie.



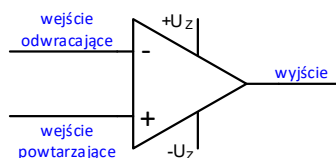
$$K_z(j\omega) = \frac{Y(j\omega)}{X(j\omega)} = \frac{K(j\omega)}{1 + K(j\omega) \cdot \beta(j\omega)} = \frac{1}{\frac{1}{K(j\omega)} + \beta(j\omega)} = \frac{1}{\beta(j\omega)} \Big|_{K(j\omega) \rightarrow \infty}$$

Rys. 3.1. Układ z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

W tym wypadku układ ze wzmacniaczem operacyjnym można traktować jak układ zamknięty, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 3.1. Wzmocnienie takiego układu, kiedy $K(j\omega) \rightarrow \infty$, zależy wyłącznie od parametrów pętli sprzężenia zwrotnego i jest równe $1/\beta(j\omega)$ razy.

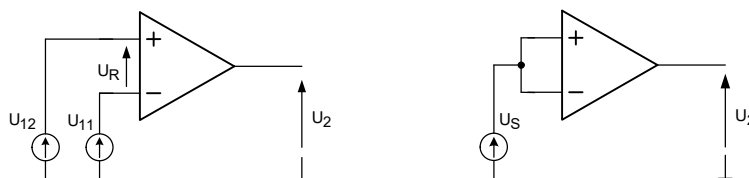
Idealny wzmacniacz operacyjny

Symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na rys. 3.2.



Rys.3.2. Symbol wzmacniacza operacyjnego

Ze względu na swoją budowę wewnętrzną każdy wzmacniacz operacyjny ma dwa wejścia: wejście – lub **n**, które nazywa się **odwracającym** lub inwertującym oraz wejście + lub **p**, które nazywa się wejściem **powtarzającym** lub nieodwracającym.



Rys. 3.3. Sposobyysterowania wejść wzmacniacza operacyjnego

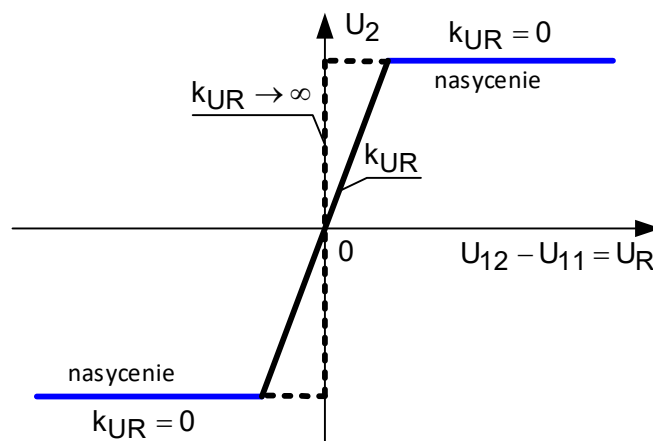
Sygnał napięciowy **u_R** doprowadzony do wejść + i – nazywa się **wejściowym sygnałem różnicowym**.

Sygnał doprowadzony jednocześnie do obu wejść wzmacniacza nazywa się **sygnałem wspólnym**.

W odróżnieniu od innych grup wzmacniaczy sygnałów elektrycznych, idealne wzmacniacze operacyjne charakteryzują się:

- bardzo dużym wzmocnieniem napięciowym sygnału różnicowego $k_{UR} \rightarrow \infty$,
- bardzo małym wzmocnieniem napięciowym sygnału wspólnego $k_{US} \rightarrow 0$
- bardzo dużą rezystancją wejściową $R_S, R_R \rightarrow \infty$,
- bardzo małą rezystancją wyjściową $R_{OUT} \rightarrow 0$,
- szerokim, obejmującym częstotliwość $f = 0$ Hz, pasmem przenoszenia $\Delta f = BW \rightarrow \infty$.

Charakterystykę przejściową wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na rys. 3.4.



Rys. 3.4. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego

W zakresie pracy liniowej wzmacniacz operacyjny wzmacnia k_{UR} razy napięcie różnicowe u_R . Na wyjściu wzmacniacza jest zatem napięcie:

$$u_2 = k_{UR}(u_p - u_n) = k_{UR} \cdot u_R$$

3.1

Należy zauważyć, że w zakresie pracy liniowej, kiedy $k_{UR} \rightarrow \infty$ to napięcie $u_R \rightarrow 0$.

Ponieważ wzmacniacz operacyjny wzmacnia także sygnały stałe można we wzorze na wartość napięcia wyjściowego zamiast oznaczenia napięć chwilowych u wpisać oznaczenie napięcia stałego U .

Najczęściej wzmacniacze operacyjne są zasilane symetrycznym napięciem $\pm U_Z$, np. ± 15 V.

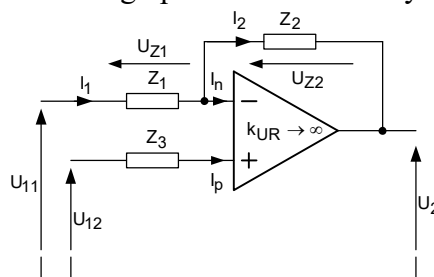
Poza zakresem pracy linowej wzmacniacz wchodzi w stany nasycenia. Jeżeli na wyjściu wzmacniacza jest napięcie dodatnie to w stanie nasycenia jest ono praktycznie równe dodatniemu napięciu zasilania. Jeżeli na wyjściu wzmacniacza jest ujemne napięcie to w stanie nasycenia jest ono praktycznie równe ujemnemu napięciu zasilania.

W stanach nasycenia k_{UR} znacznie zmniejsza się (w idealnym wzmacniaczu $k_{UR} \rightarrow 0$) i napięcie u_R może przyjąć dowolną wartość znacznie różniącą się od zera ($u_R \neq 0$).

Podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego

Bardzo duże wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego jest warunkiem koniecznym do tego, aby o właściwościach układu ze sprzężeniem zwrotnym, w którym zastosowano ten wzmacniacz decydowały praktycznie tylko elementy zastosowane w pętli sprzężenia zwrotnego tj. najczęściej rezystory i kondensatory.

Podstawowy schemat wzmacniacza napięciowego, w którym zastosowano wzmacniacz operacyjny objęty pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego przedstawiono na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Podstawowa topologia układu wzmacniającego

W idealnym wzmacniaczu operacyjnym dzięki $k_{UR} \rightarrow \infty$ napięcie wyjściowe U_2 oddziałuje przez pętlę ujemnego sprzężenia zwrotnego zawsze tak, aby napięcie różnicowe było równe zero oraz dzięki $R_S, R_R \rightarrow \infty$ wzmacniacz nie obciąża źródeł sterujących (stopień wejściowy nie pobiera prądu)

$$I_N = I_P = 0$$

Można zatem napisać następujący układ równań,

$$I_1 - I_2 = 0$$

$$U_R = 0$$

$$U_{11} - U_{Z1} - U_{12} = 0$$

3.2

$$U_2 + U_{Z2} - U_{12} = 0$$

$$U_{Z1} = I_1 \cdot Z_1$$

$$U_{Z2} = I_2 \cdot Z_2$$

z którego po przekształceniu można wyprowadzić równanie ogólne idealnego wzmacniacza operacyjnego:

$$U_2 = -\frac{Z_2}{Z_1} U_{11} + \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) U_{12}$$

3.3

Ponieważ w ogólnym wypadku impedancje Z_1, Z_2, Z_3 zawierają dowolne połączenia samych rezystorów lub rezystorów i kondensatorów to, w zależności od potrzeb, można modelować charakterystykę częstotliwościową układu.

Podstawowe liniowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego

Układ odwracający fazę (inwertujący)

Jeżeli napięcie sterujące $U_{12} = 0$ V (rys. 3.5.) wzmacniacz operacyjny pracuje w konfiguracji inwertującej. Napięcie wyjściowe jest równe:

$$U_2 = -\frac{Z_2}{Z_1} U_{11}$$

3.4

Impedancja wejściowa układu jest równa

$$Z_{WE} = \frac{U_{11}}{I_1} = Z_1 + \frac{Z_2}{k_{UR}} \cong Z_1$$

3.5

Impedancja wyjściowa

$$Z_{WY} = \frac{U_2}{I_O} \cong \frac{R_{OUT} \cdot Z_1}{Z_2}$$

3.6

Układ powtarzający fazę

Jeżeli napięcie sterujące $U_{11} = 0$ V (rys. 3.5.) wzmacniacz operacyjny pracuje w konfiguracji powtarzającej. Napięcie wyjściowe jest równe:

$$U_2 = \left(1 + \frac{Z_2}{Z_1}\right) U_{12}$$

3.7

W tym wypadku impedancje wejściowa i wyjściowa są opisane zależnościami:

$$Z_{WE} = \frac{U_{12}}{I_P} \rightarrow \infty$$

3.8

$$Z_{WY} = \frac{U_2}{I_O} \cong \frac{R_{OUT} \cdot Z_1}{Z_2}$$

I_P wejściowy prąd polaryzacji, a R_{OUT} rezystancja wyjściowa wzmacniacza operacyjnego.

Istotnymi zatem cechami układu powtarzającego fazę są: bardzo duża impedancja wejściowa (rzędu $10^{12} \Omega$) i mała impedancja wyjściowa (mniejsza od 1Ω) co pozwala na realizację doskonałych wtórników napięcia. W idealnym układzie wtórника napięcia wzmocnienie układu $k_U = 1$ V/V, a impedancja wejściowa $Z_{WE} = 0 \Omega$.

Układ odejmujący

Jeżeli napięcie sterujące U_{12} zmniejszy się w wymaganym stosunku podziału odpowiednio dobranym dzielnikiem napięcia Z_3, Z_4 to uzupełniając wzór 3.3 otrzymuje się

$$U_2 = \frac{Z_4}{Z_1} \frac{(Z_1 + Z_2)}{(Z_3 + Z_4)} U_{12} - \frac{Z_2}{Z_1} U_{11} \quad 3.9$$

Kiedy $Z_1 = Z_3 = R_1$ oraz $Z_2 = Z_4 = R_2$

$$U_2 = \frac{R_2}{R_1} (U_{12} - U_{11})$$

Zatem napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do różnicy napięć wejściowych. Warto zauważyć, że impedancje wejściowe obu wejść sygnałowych są różne. Dla wejścia odwracającego fazę, sterowanego sygnałem U_{11} , jest ona równa w przybliżeniu R_1 , a dla wejścia powtarzającego sterowanego sygnałem U_{12} ma wartość $R_3 + R_4$.

Wzmacniacz operacyjny rzeczywisty

Idealny wzmacniacz operacyjny nie istnieje, chociaż bardzo często ten model jest wystarczający do tego, aby można było dobrać elementy sprzężenia zwrotnego w projektowanym układzie. Wybierając natomiast określony typ wzmacniacza operacyjnego posługujemy się często różnymi parametrami podanymi w katalogach przez producentów układów i bierzemy pod uwagę te parametry, które są najistotniejsze w danej, konkretnej aplikacji, np. w układzie całkującym ze wzmacniaczem operacyjnym szukamy wzmacniacza o możliwie małych prądach wejściowych wzmacniacza (prądach polaryzacji).

Podstawowy schemat zastępczy rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego uwzględnia:

- skończoną wartość wzmocnienia sygnału różnicowego k_{UR} i wspólnego k_{US}
- rezystancje wejściowe:

R_S – nieróżnicową (pomiędzy wejściem + lub – i masą) oraz

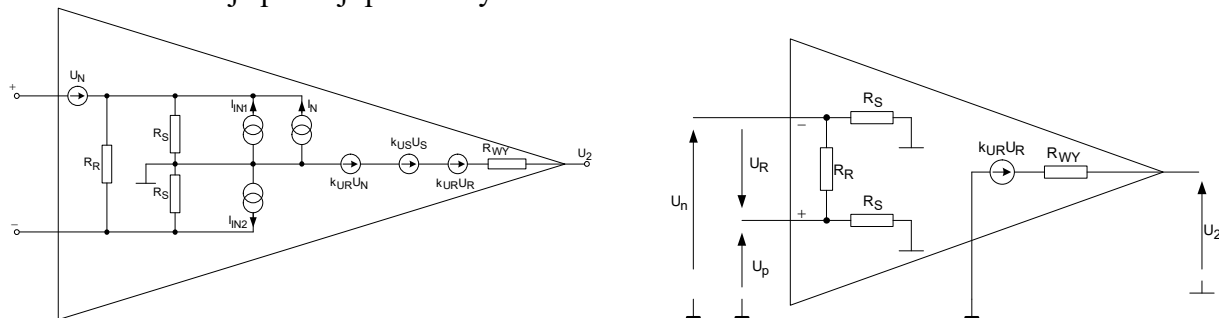
R_R – różnicową,

- rezystancją wyjściową R_{OUT}
- wejściowy prąd polaryzacji I_{IN}
- wejściowy prąd niezrównoważenia I_N
- wejściowe napięcie niezrównoważenia U_N

Zamiast współczynnika wzmocnienia sygnału wspólnego (zgodnego) k_{US} podaje się współczynnik tłumienia TC sygnału wspólnego lub częściej współczynnik CMRR, gdzie

$$TC = \frac{k_{UR}}{k_{US}} \quad CMRR = 20 \lg TC$$

Schemat zastępczy zawierający w/w elementy, zależnie od potrzeb, można upraszczać pomijając nieistotne w danej aplikacji parametry.



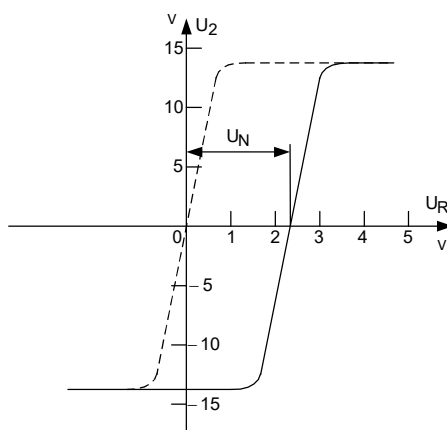
3.6. Podstawowy i uproszczony schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego

Ważniejsze parametry wzmacniacza operacyjnego

Wzmocnienie napięciowe w układzie otwartym k_{U0} (ang. open loop voltage gain) także nazywane wzmocnieniem sygnału różnicowego

$$k_{U0} = k_{UR} = \frac{\Delta U_2}{\Delta U_R}$$

wyznacza nachylenie charakterystyki przejściowej $U_2 = f(U_R)$ wzmacniacza bez pętli sprzężenia zwrotnego i jest podawane w V/V lub dB. Typowe wartości $k_{U0} 10^4 - 10^7$ V/V.
Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $k_{U0} = 25\,000$ V/V.



Rys. 3.7. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego i napięcie niezrównoważenia

Współczynnik tłumienia sygnału zgodnego CMRR (ang. common mode rejection ratio) jest to stosunek wzmocnienia sygnału różnicowego (wzmocnienia napięciowego w układzie otwartym k_{UR}) do wzmocnienia sygnału zgodnego (k_{US}). Jego wartość jest podawana w dB i zawiera się w granicach $90 \div 130$ dB.

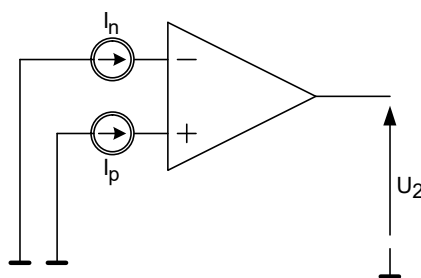
Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ współczynnik CMRR jest równy 80 dB.

Wejściowe napięcie niezrównoważenia U_N (ang. input offset voltage) (rys. 3.7.). Niewielkie napięcie różnicowe (kilka mV) jakie należy przyłożyć do wejścia wzmacniacza operacyjnego w układzie otwartym, aby przesunąć charakterystykę przejściową $U_2 = f(U_R)$ tak, żeby przechodziła przez początek układu współrzędnych. W wielu wypadkach, gdy sygnały sterujące mają duże wartości parametr ten jest nie istotny i może być pominięty w analizie pracy układu ze wzmacniaczem operacyjnym.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ typowa wartość napięcia niezrównoważenia 6 mV.

Wejściowy prąd polaryzacji (rys. 3.8) I_{IN} (ang. input bias current) definiowany jako:

$$I_{IN} = \frac{1}{2}(I_p + I_n)$$



Rys. 3.8. Wejściowe prądy polaryzacji

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $I_{IN} = 500$ nA.

Wejściowy prąd niezrównoważenia I_N (ang. input offset current)

$$I_N = |I_p - I_n|$$

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $I_N = 200$ nA.

Współczynnik temperaturowy wejściowego napięcia/prądu niezrównoważenia

(ang. temperature drift of input voltage/current) definiuje się jako stosunek zmiany wejściowego napięcia/ prądu niezrównoważenia do wywołującej ją zmiany temperatury:

$$\delta_{UT} = \frac{\Delta U_N}{\Delta T} [\mu V / ^\circ C] \quad \delta_{IT} = \frac{\Delta I_N}{\Delta T} [\mu A / ^\circ C]$$

Typowe wartości dryftów temperaturowych : $0,1 \div 50 \mu V / ^\circ C$ oraz $10 \div 50 pA / ^\circ C$.

Dla wzmacniacza $\mu A741$ $\delta_{UT} = 7 \mu V/^{\circ}C$.

Dryft napięciowy napięcia niezrównoważenia SVRR (ang. supply voltage rejection ratio) definiowany jako stosunek zmiany wejściowego napięcia niezrównoważenia do wywołującej ją zmiany napięcia zasilającego wzmacniacz operacyjny:

$$SVRR = \frac{\Delta U_N}{\Delta U_Z}$$

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ współczynnik $SVRR = 150 \mu V/V$.

Maksymalna prędkość zmian napięcia wyjściowego SR (ang. slew rate) definiowana jako:

$$SR = \left. \frac{\Delta U_2}{\Delta t} \right|_{MAX}$$

Zakres występujących wartości $0,5 \div 500 V/\mu s$.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ SR równa się około $0,6 V/\mu s$.

Rezystancja wejściowa (ang. input resistance) rezystancja mierzona pomiędzy jednym z wejść + lub – a masą układu przy drugim wejściu zwartym do masy przy czym, tak zmierzona rezystancja jest praktycznie równa rezystancji różnicowej R_R wzmacniacza operacyjnego.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ rezystancja $R_R = 2 M\Omega$.

Rezystancja wyjściowa (ang. output resistance) jest mierzona na zaciskach wyjściowych wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. Typowe wartości $40 \div 200 \Omega$.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ $R_0 = 75 \Omega$.

Iloczyn wzmocnienia i szerokości pasma (ang. gain - bandwidth product) parametr określający częstotliwość graniczną f_T , przy której wzmocnienie K_{UR} wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego maleje do $1 V/V$ ($0 dB$).

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ częstotliwość $f_T = 1 MHz$.

Maksymalne napięcie wejściowe różnicowe U_{IND} (ang. differential mode input voltage). Maksymalne napięcie jakie może wystąpić pomiędzy wejściami + i –.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość $\pm 30 V$.

Maksymalne napięcie wejściowe wspólne U_{INC} (ang. common mode input voltage). Maksymalne napięcie jakie może być przyłożone pomiędzy masą układu i jednym z wejść + lub – wzmacniacza operacyjnego.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość $\pm 15 V$.

Pobór mocy P (ang. power consumption) jest mierzony dla nieobciążonego wzmacniacza operacyjnego. Typowy zakres wartości $50 \div 500 mW$.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ ma wartość $50 mW$.

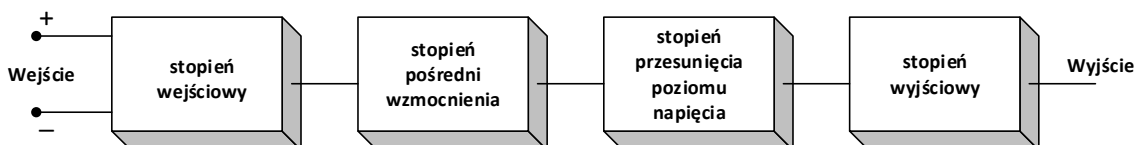
Maksymalny prąd wyjściowy (ang. maximum output current) jest to dopuszczalny prąd, którym można obciążyć wzmacniacz przy prawidłowej jego pracy. Często producenci podają także prąd zwarcia (ang. output short circuit current), przy który łączy się zabezpieczenie zwarcia.

Dla wzmacniacza typu $\mu A741$ prąd zwarcia ma wartość $25 mA$.

Budowa i rodzaje wzmacniaczy operacyjnych

Wzmacniacz operacyjny ma strukturę wielostopniową i zawiera następujące bloki funkcjonalne (rys. 3.9.):

- stopień wejściowy
- pośredni stopień wzmocnienia
- stopień przesunięcia poziomu napięcia
- stopień wyjściowy.

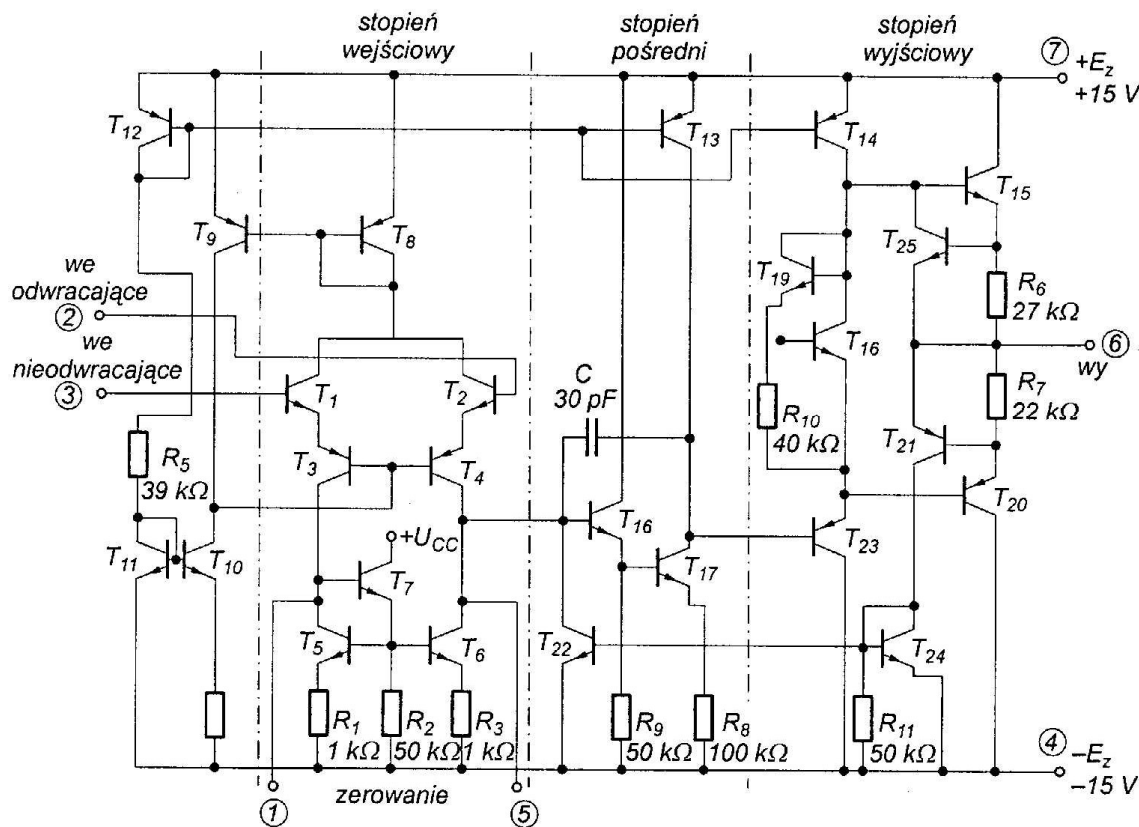


Rys. 3.9. Schemat blokowy wzmacniacza operacyjnego

Każdy blok różni się konstrukcją i realizuje inne zadania nadając wzmacniaczowi operacyjnemu określone cechy. Podstawowym celem realizowanym w stopniu wejściowy jest uzyskanie wielkiej

rezystancji wejściowej oraz możliwie małego napięcia niezrównoważenia i jego dryftów. Uzyskanie dużego wzmocnienia napięciowego K_{UR} w tym stopniu nie jest najistotniejszym celem. Ten cel jest realizowany w pośrednim stopniu wzmocnienia. Kolejne stopnie: stopień przesunięcia poziomu napięcia i stopień mocy często tworzą jeden stopień wzmacniający. Pierwszy z nich umożliwia wyprowadzenie względem masy symetrycznego sygnału z wyjścia stopnia pośredniego wzmocnienia, a drugi wzmacnia energetycznie sygnał i zapewnia bardzo małą rezystancję wyjściową wzmacniacza operacyjnego.

Topologię obwodu scalonego wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na przykładzie popularnego wzmacniacza typu $\mu A741$ (rys.3.10). Jest to układ od wielu lat powszechnie stosowany, zrealizowany w technologii bipolarnej. Na schemacie zaznaczono poszczególne bloki funkcjonalne układu.



Rys. 3.10. Schemat popularnego układ wzmacniacza operacyjnego typu $\mu A741$

Obecnie dążąc do uzyskania jeszcze lepszych parametrów użytkowych scalonych wzmacniaczy operacyjnych (większych rezystancji wejściowych i małych napięć niezrównoważenia) zaczęto stosować do budowy stopni wejściowych tranzystory unipolarne. Najczęściej są to tranzystory złączowe i dlatego tego rodzaju wzmacniacze nazywa się BiFET. Wzmacniacze operacyjne, w których stopnie wejściowe zbudowano z tranzystorów z izolowaną bramką nazywa się BiMOS, a najnowsze rozwiązania, w których zastosowano struktury komplementarne CMOS (ang. Complementary Symmetry MOS) nazywamy BiCMOS. Są także układy wzmacniaczy operacyjnych składające się wyłącznie z tranzystorów unipolarnych. Zwykle są to układy CMOS.

Produkowane obecnie scalone wzmacniacze operacyjne w większości zastosowań i w ograniczonym od góry zakresie częstotliwości można traktować jak układy idealne.

Bibliografia

Kaźmierkowski M. P., Matysik J. T.: Wprowadzenie do elektroniki i energoelektroniki, Warszawa, Oficyna Wydawnicza PW 2005

Nadachowski M., Kulka Z.: Analogowe układy scalone, Warszawa, WKiŁ, 1985

Nosal Z., Baranowski J. Układy elektroniczne. Cz. 1. Układy analogowe liniowe, Warszawa, WNT 1998