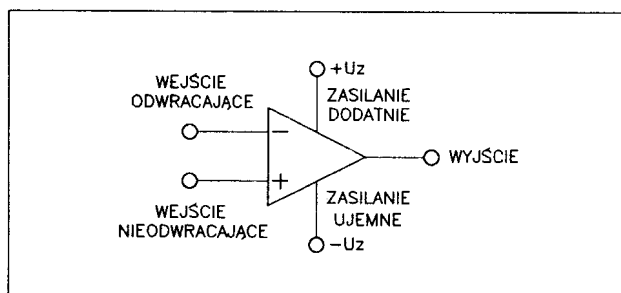


Elektronika inaczej cz. 5 – wzmacniacz operacyjny

Ogólne właściwości wzmacniacza operacyjnego

Wzmacniaczem operacyjnym nazywany jest najczęściej układ scalony charakteryzujący się bardzo dużą rezystancją wejściową i bardzo małą wyjściową, posiadający bardzo duże wzmocnienie napięciowe w obszarze liniowej części charakterystyki przejściowej. Podstawowymi elementami z jakich zbudowany jest wzmacniacz operacyjny są tranzystory. Brak znajomości teorii działania tranzystorów nie przeszkodzi nam jednak w analizie układów zrealizowanych z wykorzystaniem wzmacniaczy operacyjnych. Będziemy je traktowali jako podzespoły o podanych wyżej właściwościach, za pomocą których można realizować układy przetwarzania sygnałów – nie wnikając w ich wnętrze.

Oznaczenie schematowe wzmacniacza operacyjnego przedstawiono na rys. 1. Widzimy, że posiada on pięć wyprowadzeń. Dwa wejściowe, dwa zasilające i wyjście. Przy analizie działania można pominąć zasilanie. Wiele wzmacniaczy operacyjnych posiada dodatkowe wyprowadzenia służące do podłączania zewnętrznych elementów poprawiających właściwości wzmacniacza (symetryzacja, kompensacja częstotliwościowa, eliminacja wzbudzeń).



Rys. 1 Oznaczenie wzmacniacza operacyjnego

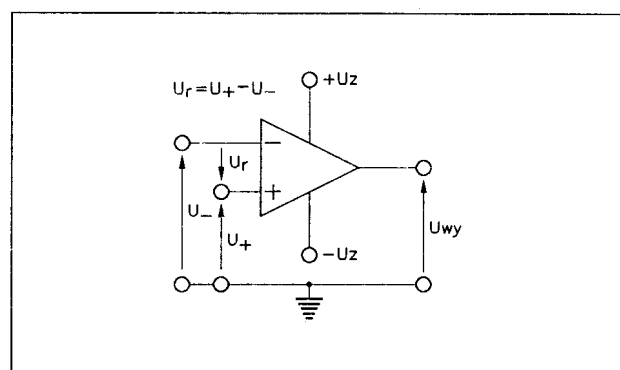
Każde wyprowadzenie wzmacniacza operacyjnego oprócz swego przeznaczenia posiada także specyficzną nazwę. Wyprowadzenia wejściowe to *wejście odwracające* oznaczone znakiem "–" i *wejście nieodwracające* oznaczone znakiem "+". Znaki "+" i "–" nie mają związku z polaryzacją sygnału wejściowego, a jedynie wskazują zmianę fazy sygnału wyjściowego względem wejściowego. Oba wejścia razem tworzą tzw. *wejście symetryczne* zwane także *różnicowym*.

Kolejne dwa wyprowadzenia przeznaczone są do doprowadzenia napięcia zasilającego. Wzmacniacze operacyjne zasilają się najczęściej napięciami symetrycznymi względem odniesienia, czyli masy (np. +12 V i –12 V). Dlatego nazywane są odpowiednio *zasilaniem dodatnim* i *zasilaniem ujemnym*. Zadaniem napięcia zasilającego jest zapewnienie odpowiednich warunków pracy elementów składowych wzmacniacza (tranzystorów) i dostarczenie energii do obciążenia podłączonego do wyjścia wzmacniacza.

Wzmacniacz operacyjny posiada jedno wyjście zwane *wyjściem niesymetrycznym*. Spotyka się układy

z dwoma wyjściami, na których występują sygnały o przeciwnych fazach. Jest to tzw. *wyjście symetryczne*.

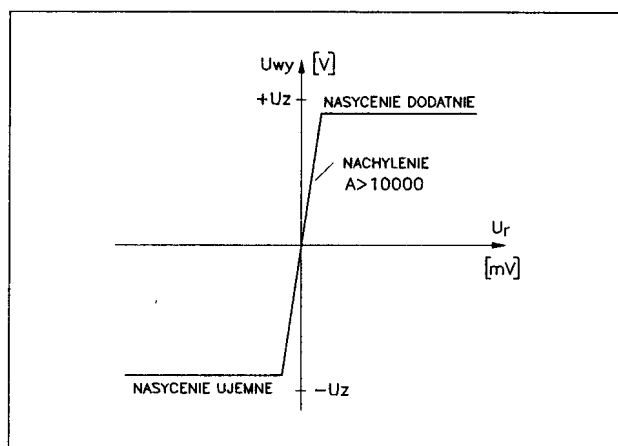
Pięć wyprowadzeń wzmacniacza operacyjnego, a zwłaszcza doprowadzone do nich napięcia i prądy powinny być jednoznacznie określone, aby nie wprowadzać niepotrzebnych wieloznaczności i nieporozumień. Pomocnym jest tutaj wprowadzenie wymienionego już wcześniej *poziomu odniesienia*. Stanowi on punkt, węzeł wspólny dla wejścia i wyjścia zwany popularnie *masą* lub *uziemieniem*. Oznaczenie napięć doprowadzonych do wzmacniacza z wykorzystaniem poziomego odniesienia pokazano na rys. 2.



Rys. 2 Oznaczenie napięć wzmacniacza operacyjnego

Idealny wzmacniacz operacyjny

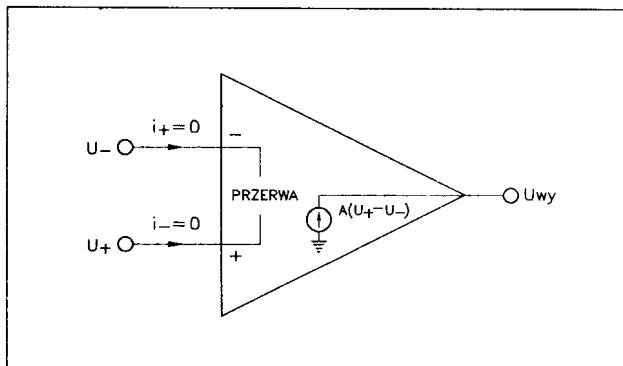
Rozpatrzmy właściwości wzmacniacza operacyjnego – jako wzmacniacza idealnego i na zakończenie opiszemy różnice występujące we wzmacniaczu rzeczywistym. Wzmacniacz idealny charakteryzuje się nieskończenie wielką rezystancją wejściową i zerową rezystancją wyjściową. Jego charakterystykę przejściową pokazano na rys. 3.



Rys. 3 Charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego

Nieskończenie wielka rezystancja wejściowa oznacza, że prądy wejściowe wzmacniacza "i₊" oraz "i_–"

" będą równe zero. Zerowa rezystancja wyjściowa z kolei oznacza, że obwód wyjściowy wzmacniacza może być reprezentowany przez idealne źródło napięciowe. W efekcie uzyskujemy schemat zastępczy idealnego wzmacniacza operacyjnego uwidoczniony na rys. 4.



Rys. 4 Schemat zastępczy idealnego wzmacniacza operacyjnego

Charakterystyka przejściowa wzmacniacza może zostać podzielona na trzy części – dwie dotyczą nasycenia, a trzecia to część liniowa. W liniowej części charakterystyki napięcie wyjściowe zależy od różnicy napięć wejściowych ($u_+ - u_-$). Współczynnik proporcjonalności (wzmocnienie napięciowe) A jest zwykle większy od 10 000 (10^4) V/V, a spotykane są wzmacniacze o wzmocnieniu rzędu 1 000 000 (10^6) V/V. Bardzo duże wzmocnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego powoduje, że zakres zmian napięcia wejściowego dotyczący części liniowej charakterystyki jest bardzo mały (rzędu 1 mV i mniej). Im większe wzmocnienie napięciowe wzmacniacza tym mniejszy jest zakres napięć wejściowych dotyczący liniowej części charakterystyki przejściowej. Jeszcze raz podkreślam, że wzmacniacz reaguje na różnicę napięć wejściowych. Na podstawie tych rozważań można określić specyfikę pracy w części liniowej charakterystyki następująco:

- 1) prądy wejściowe są równe 0,
- 2) napięcia poszczególnych wejść są praktycznie równe.

Po przekroczeniu przez różnicę napięć wejściowych liniowej części charakterystyki wkraczamy w obszar nasycenia. Jeśli różnica napięć wejściowych jest dodatnia, napięcie wyjściowe będzie zbliżone do napięcia zasilania dodatniego. Jeśli różnica będzie ujemna to napięcie wyjściowe będzie zbliżone do napięcia zasilania ujemnego.

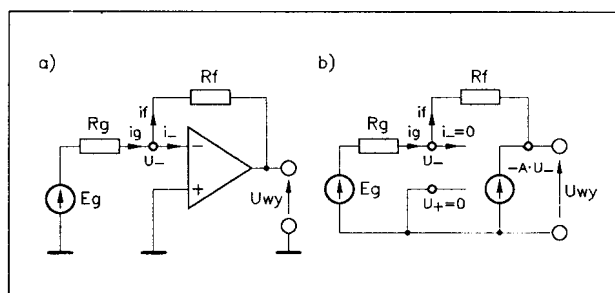
Wykorzystując wzmacniacz operacyjny bez dodatkowych elementów zewnętrznych modyfikujących jego właściwości, praktycznie zawsze znajdujemy się w obszarze nieliniowym i napięcie wyjściowe będzie zbliżone, do jednego z napięć zasilających. Mówimy wtedy o pracy z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. Wprowadzenie zewnętrznych elementów zwłaszcza między wyjściem i wejściem wprowadza tzw. sprzężenie zwrotne, czyli przekazywanie części energii sygnału z wyjścia na wejście. W efekcie parametry układu ze wzmacnia-

czem operacyjnym będą zależały właściwie od elementów sprzężenia co wykażemy dalej.

Układy liniowe ze wzmacniaczami operacyjnymi

Podstawowym zastosowaniem wzmacniaczy operacyjnych jest realizacja układów liniowych. Do grupy tej należą wzmacniacze odwracające i nieodwracające, wtórnik oraz układy sumowania i odejmowania sygnałów. Nie będziemy aktualnie zajmowali się układami filtrów, które także można realizować za pomocą wzmacniaczy operacyjnych.

Najbardziej popularnym układem jest wzmacniacz odwracający. Jego nazwa pochodzi od specyficznej cechy odwracania napięcia wyjściowego względem wejściowego, co inaczej oznacza przesunięcie fazy o 180° . Schematy ideowy i zastępczy takiego wzmacniacza są pokazane na rys. 5.



Rys. 5 Wzmacniacz odwracający

We wzmacniaczu tym za pomocą rezystora R_f jest realizowane sprzężenie zwrotne z wyjścia do wejścia odwracającego. Do wejścia odwracającego podawany jest także sygnał wejściowy z generatora o sile elektromotorycznej E_g i rezystancji wewnętrznej R_g . Ponieważ sygnał sprzężenia zwrotnego ma kierunek przeciwny do sygnału wejściowego, jest to tzw. sprzężenie zwrotne ujemne. Zakładając pracę w obszarze liniowym można skorzystać z poznanego już schematu zastępczego wzmacniacza operacyjnego. Na jego bazie skonstruowano schemat zastępczy wzmacniacza odwracającego (5 b).

Przy pracy w obszarze liniowym napięcie wejściowe $u_- = 0$ i prąd wejściowy $i_- = 0$. Wynika stąd, że prądy i_g oraz i_f będą równe (I prawo Kirchhoffa).

$$i_g = E_g/R_g \quad i_f = -U_{wy}/R_f$$

Otrzymujemy więc następującą proporcję:

$$E_g/R_g = -U_{wy}/R_f$$

A z niej obliczamy U_{wy} .

$$U_{wy} = -(R_f/R_g)E_g$$

Uzyskaliśmy prosty wzór na charakterystykę przejściową wzmacniacza odwracającego. Znak "-" wskazuje na odwrócenie napięcia wyjściowego względem wejściowego. Stosunek R_f/R_g to wzmocnienie napięciowe wzmacniacza odwracającego. Widzimy, że nie zależy

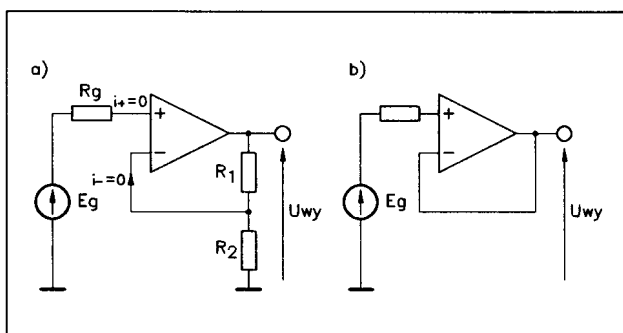
ono od parametrów samego wzmacniacza. Wprowadzenie ujemnego sprzężenia zwrotnego prowadzi do zmniejszenia wynikowego wzmocnienia wzmacniacza, co odpowiada jednocześnie poszerzeniu zakresu napięć wejściowych dla pracy liniowej.

$$E_{gm} = U_z/k_u \quad \text{gdzie: } k_u = R_f/R_g$$

Wzmocnienie napięciowe rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego przy rozwartej pętli sprzężenia zależy silnie od temperatury i egzemplarza wzmacniacza. Uniezależnienie się od tego parametru przez wprowadzenie sprzężenia zwrotnego jest szczególnie cenne.

Sprzężenie zwrotne nie zmienia właściwości samego wzmacniacza operacyjnego. Powstaje nowy układ o wejściu E_g i wyjściu U_{wy} , o nowych właściwościach, którego działanie nie byłoby możliwe bez wzmacniacza operacyjnego.

Wyobrazić sobie można układ posiadający sprzężenie zwrotne jak wzmacniacz odwracający a sygnał wejściowy podawany na wejście nieodwracające. Układ taki narysowany jest na rysunku 6a.



Rys. 6 Wzmacniacz nieodwracający i wtórnik

Brak przepływu prądów wejściowych (i_+ , i_-) oraz założenie pracy liniowej powodują, że napięcia na obu wejściach wzmacniacza operacyjnego będą równe E_g . Między wyjściem wzmacniacza a wejściem odwracającym, układ sprzężenia zwrotnego tworzy znany już nam dzielnik napięciowy. Możemy więc napisać:

$$E_g = U_{wy}R_2/(R_1 + R_2)$$

A po przekształceniu.

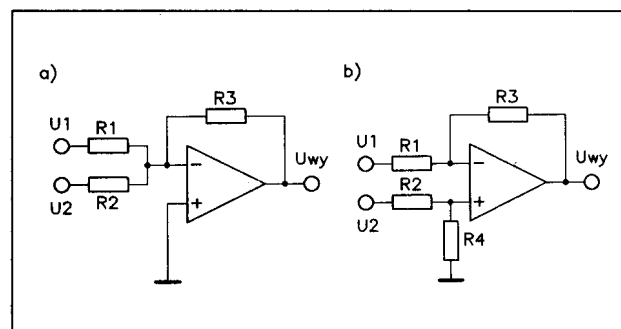
$$U_{wy} = E_g(R_1 + R_2)/R_2$$

Otrzymaliśmy więc tzw. *wzmacniacz nieodwracający*, którego wzmocnienie napięciowe wynosi $(R_1 + R_2)/R_2$. Wzmacniacz ten nie zmienia fazy sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego.

Zwiększanie wartości R_2 i zmniejszanie wartości R_1 prowadzi do zmniejszania wzmocnienia wzmacniacza. W skrajnym przypadku kiedy R_2 będzie stanowił rozwarcie a R_1 zwarcie, wzmocnienie wyniesie 1 V/V (volt/volt jest jednostką wzmocnienia). Przypadek ten jest pokazany na rys. 6b. Jest to tzw. wtórnik

– układ powtarzający napięcie wejściowe na wyjściu. Jego istotną właściwością jest bardzo duża rezystancja wejściowa i bardzo mała wyjściowa.

Na bazie wzmacniaczy operacyjnych można w prosty sposób realizować układy sumowania i odejmowania sygnałów. Takie układy pokazane są na rys. 7.



Rys. 7 Układy sumujący i odejmujący

Układ sumujący działa jako wzmacniacz odwracający, na którego wejścia podawane są dwa sygnały U_1 i U_2 (7a). Sygnał wyjściowy będzie określony następującym wyrażeniem:

$$U_{wy} = -(U_1R_3/R_1 + U_2R_3/R_2)$$

Napięcie wyjściowe będzie odwrócone względem sumy napięć wejściowych pomnożonych przez tzw. współczynniki wagowe określone wielkościami rezystorów w układzie sprzężenia zwrotnego.

Układ pokazany na rys. 7b to jakby złożenie wzmacniaczy odwracającego i nieodwracającego. Sygnał wyjściowy będzie więc proporcjonalny do różnicy sygnałów wejściowych i określony będzie dość skomplikowaną zależnością.

$$U_{wy} = [(R_1 + R_3)/R_1][(R_4/(R_2 + R_4))U_2 - U_1R_3/R_1]$$

Jeśli wszystkie rezystory będą jednakowe, wówczas:

$$U_{wy} = U_2 - U_1$$

Otrzymaliśmy więc układ odejmujący sygnały wejściowe.

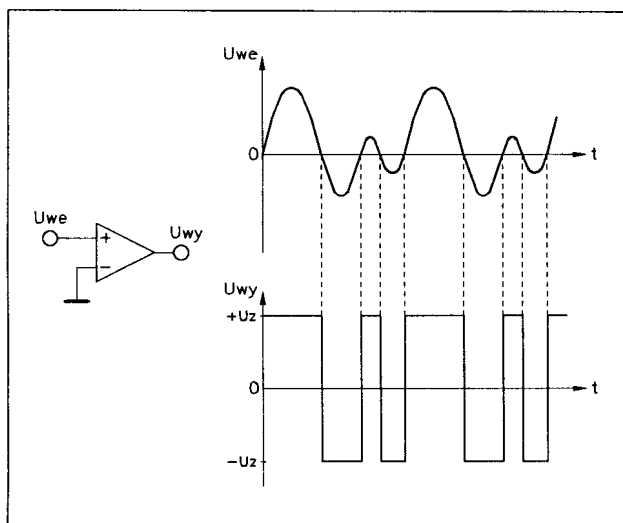
Pamiętać należy, że ujemne sprzężenie zwrotne nie jest gwarantem pracy liniowej. Napięcie wejściowe nie powinno przekroczyć wartości obliczonej w/g podanej wcześniej zależności. Zawsze należy sprawdzać czy przy założonym wzmocnieniu spodziewane napięcie wejściowe nie przekroczy wartości dopuszczalnej ze względu na liniowość.

Ogólnie można stwierdzić, że ujemne sprzężenie zwrotne poprawia liniowość układu. Przeciwnie działanie ma tzw. dodatnie sprzężenie zwrotne, powoduje ono potęgowanie się nieliniowości i prowadzi do nieliniowej pracy układu. Znalazło ono zastosowanie w kolejnej grupie układów – układach nieliniowych.

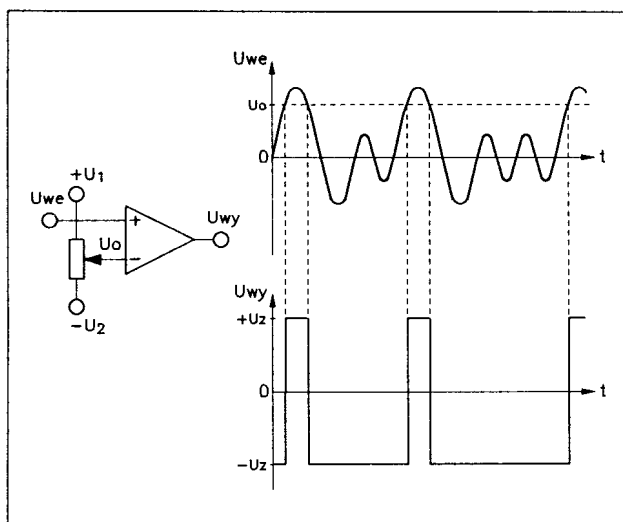
Układy nieliniowe wykorzystujące wzmacniacze operacyjne

Pierwsze, narzucające się samo zastosowanie nieliniowe wzmacniacza operacyjnego to wzmacniacz bez sprzężenia zwrotnego (z otwartą pętlą sprzężenia). Niewielkie zmiany napięcia wejściowego wprowadzają wzmacniacz w stan nasycenia. Wzmacniacz taki pracuje jako tzw. komparator tzn. układ porównujący stan napięcia na wejściu z tzw. napięciem odniesienia podawanym na drugie wejście. Na wyjściu mamy tylko dwa stany informujące o tym, które z napięć jest większe.

Pierwszy przykład komparatora to tzw. detektor znaku pokazany na rys. 8.



Rys. 8 Komparator jako detektor znaku



Rys. 9 Komparator jako dyskryminator napięcia

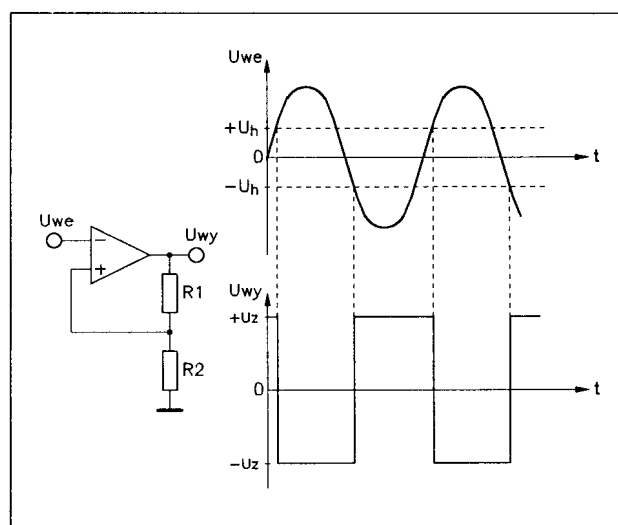
Wejście odwracające komparatora jest podłączone do masy. W efekcie układ reaguje już na niewielkie odchyłki napięcia wejściowego od 0 jako pełne zmiany napięcia wyjściowego. Dodatniemu napięciu wejściowemu odpowiada wysokie napięcie wyjściowe, a ujemnemu niskie.

Napięcie odniesienia podawane na wejście odwracające może być regulowane np. za pomocą potencjome-

tru. Zakres regulacji nie może przekraczać zakresu określonego przez napięcia zasilające. W ten sposób uzyskujemy tzw. dyskryminator napięcia – układ reagujący na przekroczenie napięcia odniesienia.

Poziom wysoki wskazuje, że napięcie wejściowe jest większe od napięcia odniesienia. Poziom niski informuje oczywiście o sytuacji przeciwnej.

Czas wreszcie na obiecywane dodatnie sprzężenie zwrotne. Przypomina ono układ ujemnego sprzężenia zwrotnego lecz jest podawane z wyjścia do wejścia nieodwracającego. Sygnał sprzężenia zwrotnego dodaje się do sygnału wejściowego i powoduje wzrost sygnału wyjściowego. Objawia się to jako zwiększenie wzmocnienia. Układem wykorzystującym dodatnie sprzężenie zwrotne jest tzw. przerzutnik Schmitta pokazany na rys. 10.



Rys. 10 Przerzutnik Schmitta

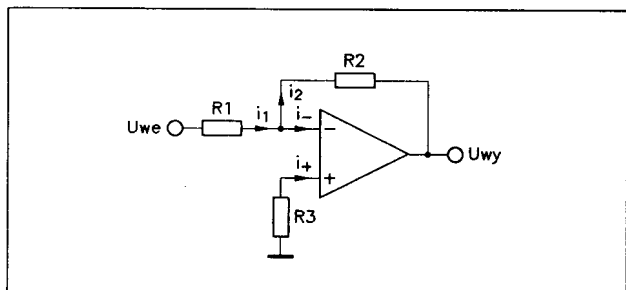
Układ ten także przyjmuje tylko dwa stany wyjściowe. W przeciwieństwie do komparatorów posiada tzw. histerezę polegającą na różnych poziomach napięć wejściowych, przy których zachodzi na wyjściu przejście z poziomu niskiego do wysokiego i odwrotnie. Układ posiada pewną bezwładność. Zmiana stanu wyjścia wymaga zwiększenia przyczyny wymuszającej. Zakres histerezy reguluje się doбором rezystorów R_1 i R_2 .

Przerzutniki Schmitta stosuje się do zamiany napięcia sinusoidalnego na prostokątne. Efekt histerezy powoduje, że nie jest on wrażliwy na niewielkie zmiany sygnału wejściowego np. zakłócenia.

Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne

Przy zwarcie zacisków wejściowych idealnego wzmacniacza operacyjnego na wyjściu uzyskamy napięcie równe 0. W rzeczywistym wzmacniaczu wskutek niedokładnej symetrii wystąpi napięcie wyjściowe różne od 0. Napięcie to odnosi się zwykle do wejścia wzmacniacza jako tzw. offset. Niektóre wzmacniacze posiadają możliwość regulacji symetrii, a więc kompensacji offsetu. Wielkość offsetu jest dość przypadkowa i dodatkowo zależy od temperatury. Jego wielkość nie gra roli przy dużych sygnałach wyjściowych, jest natomiast istotna przy małych sygnałach.

We wzmacniaczach rzeczywistych płyną prądy polaryzacji wejść. Ich wpływ także zaznacza się przy małych sygnałach. Prądy te wywołują spadki napięć na rezystorach dołączonych do wejść, co w efekcie objawia się zmianą napięcia wyjściowego. Pewne uniezależnienie się od prądów wejściowych można uzyskać po włączeniu w obwód wejścia nieodwracającego rezystora R_3 o wartości wynikającej z równoległego połączenia rezystorów R_1 i R_2 .



Rys. 11 Układ zmniejszający wpływ prądów wejściowych

$$R_3 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$$

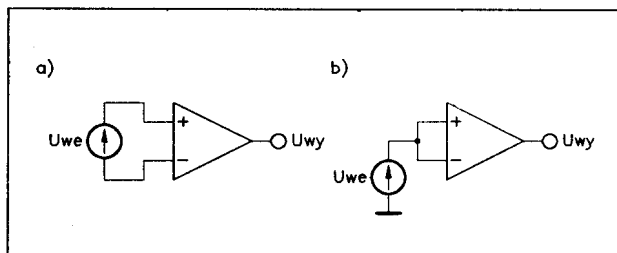
Maksymalne napięcie wyjściowe zwane napięciem nasycenia jest zazwyczaj mniejsze o 1–2 V od napięcia zasilania. Wartość ta jest podawana przez producenta w danych katalogowych wzmacniacza. Rzeczywiste wzmacniacze operacyjne posiadają rezystancję wyjściową różną od 0. Zwykle wynosi ona od kilku do 100 Ω . Sprężenie zwrotne zmniejsza jednak praktyczną wartość rezystancji wyjściowej do ułamków Ω .

Część wzmacniaczy posiada wewnątrz układ ograniczający maksymalny prąd wyjściowy. Ograniczenie prądu wyjściowego zmniejsza możliwość uszkodzenia wzmacniacza przy zbyt małej rezystancji obciążenia. Na tą właściwość trzeba zwrócić uwagę przy wyborze wzmacniacza, jak i przy określaniu warunków jego pracy.

Istotnym parametrem wzmacniacza operacyjnego jest szybkość zmian napięcia wyjściowego, zwana *szyb-*

kością narastania. Wyrażana jest w woltach na jednostkę czasu np. μs . Przykładowo wzmacniacz o szybkości narastania $2,5 \text{ V}/\mu\text{s}$ może zmienić stan z -15 V na $+15 \text{ V}$ najszybciej w ciągu $12 \mu\text{s}$. Szybkość narastania ogranicza więc najwyższe częstotliwości wzmacniane przy dużych wysterowaniach – dużych sygnałach wyjściowych.

Rozpatrywaliśmy dotychczas reakcję wzmacniacza na sygnał różnicowy zakładając brak podatności napięcia wyjściowego na jednakowe napięcie obu wejść tzw. *sygnał wspólny*. Praktycznie występuje taka zależność i jest ona określona przez tzw. *współczynnik tłumienia sygnału wspólnego*. Przykłady sygnałów różnicowego i wspólnego pokazano na rys. 12.



Rys. 12 Sygnał różnicowy (a) i wspólny (b)

Współczynnik ten jest określany jako stosunek wzmocnienia sygnału różnicowego do wzmocnienia sygnału wspólnego i wyrażany w decybelach [dB]. Przykładem często spotykanego sygnału wspólnego jest przydzźwięk sieci (50 lub 100 Hz).

Rezystancja wejściowa rzeczywistych wzmacniaczy jest zwykle mniejsza od zakładanej dla ideału. Dla wzmacniaczy z wejściowymi tranzystorami bipolarnymi jest rzędu 1 $\text{M}\Omega$, a z wejściowymi tranzystorami polowymi rzędu 100 $\text{M}\Omega$. Wpływ na rezystancję wejściową realnych układów ma także sprężenie zwrotne. Przy bardzo dużych rezystancjach wejściowych wzmacniacza zaczyna mieć znaczenie także rezystancja powierzchni płytki drukowanej.

Ciąg dalszy w następnym numerze.