

STANISŁAW MALZACHER

Katedra Elektroniki

PARAMETRY SCALONYCH WZMACNIACZY OPERACYJNYCH

Streszczenie. Właściwości scalonych wzmacniaczy operacyjnych ze względu na ich specyficzne warunki pracy są określane przy pomocy wielu parametrów, często nie spotykanych w innych układach. Poniżej przedstawiono próbę zestawienia i systematyzacji tych parametrów; podano również ich definicje.

1. Wstęp

Pierwszy lampowy wzmacniacz operacyjny został opracowany przez G.A. Philbricka w 1938 r.; nie znalazł jednak w tym czasie szerokiego zastosowania chociaż analogowa technika obliczeniowa była już zasadniczo znana. W 1950 r. E.A. Goldberg zbudował w Radio Corporation of America lampowy stabilizowany wzmacniacz prądu stałego o małym napięciu pełzania zera (małym dryfcie), który to układ osiągnął wkrótce szerokie zastosowanie jako wzmacniacz operacyjny w maszynach analogowych. Można uważać, że ten typ wzmacniacza miał dominujące znaczenie dla rozwoju wzmacniaczy operacyjnych pierwszej generacji (wzmacniacze lampowe).

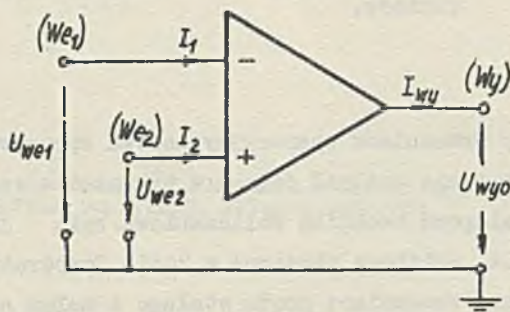
W drugiej połowie lat pięćdziesiątych zaczęły się pojawiać budowane w oparciu o układ Goldberga wzmacniacze operacyjne drugiej generacji - wykonywane techniką tranzystorową. Zarówno wzmacniacze lampowe jak i tranzystorowe pracujące w układzie Goldberga posiadały na wejściu sumujący stopień różnicowy, w którym drugie wejście było wykorzystywane do wprowadzenia sygnału kompensacji dryftu; wejście dla sygnału użytkowego pozostawało więc niesymetryczne.

W przybliżeniu od 1964 r. rozwinęła się trzecia generacja wzmacniaczy - tzw. uniwersalne wzmacniacze liniowe wykonywane techniką ukła-

dów scalonych. Na czoło producentów tych wzmacniaczy wysunęła się firma Fairchild z najbardziej popularnymi obecnie scalonymi wzmacniaczami operacyjnymi typu μA 702A i μA 709.

Sposób opisu właściwości wzmacniaczy operacyjnych trzeciej generacji, a więc i wynikające stąd parametry tych wzmacniaczy różnią się w pewnym stopniu od parametrów wzmacniaczy operacyjnych budowanych z oddzielnych elementów. Różnice te wynikają zarówno z różnic układowych jak i technologicznych.

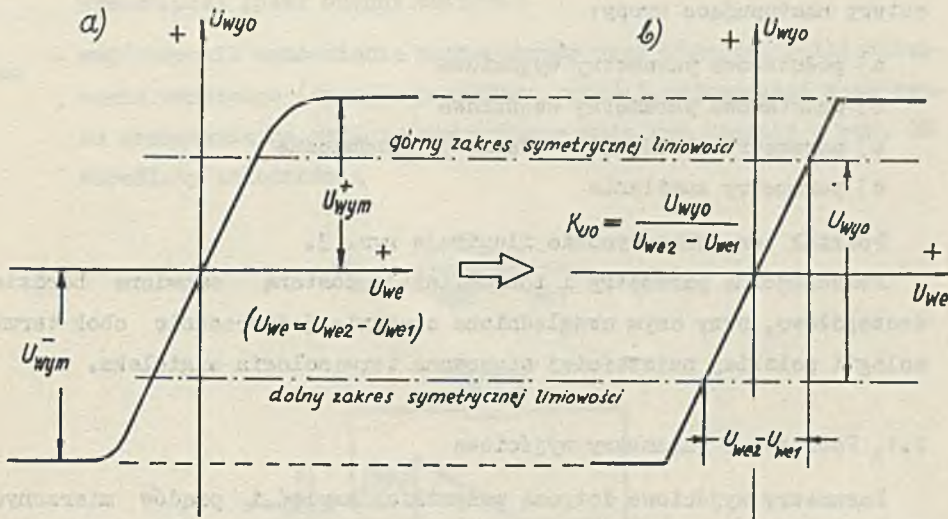
Typowy operacyjny wzmacniacz scalony ma dwa wejścia: wejście odwracające fazę (We_1) i wejście nie odwracające fazy (We_2) oraz jedno wyjście (Wy) - jak to przedstawiono na rys. 1. W zależności od zastosowania wzmacniacza mogą być wykorzystane poszczególne wejścia oddzielnie lub wspólnie.



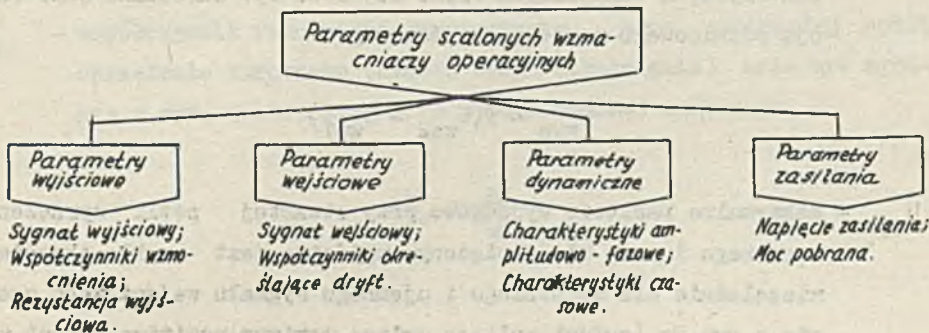
Rys. 1. Symboliczne oznaczenie wzmacniacza operacyjnego o dwóch wejściach i jednym wyjściu

Właściwości statyczne takiego wzmacniacza mogą być zilustrowane przy pomocy charakterystyki wyjściowej $U_{wy} = f(U_{we})$ przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i przy wyłączonym lub włączonym obciążeniu. Rzeczywisty i idealizowany kształt takiej charakterystyki dla typowego wzmacniacza i pełnego zakresu dynamicznego przedstawiono na rys. 2.

Określenia definicyjne parametrów wzmacniaczy scalonych, w przeciwieństwie do parametrów operacyjnych wzmacniaczy pierwszej i drugiej generacji nie są jeszcze całkowicie ustalone i różnią się zarówno w samym nazewnictwie jak i w interpretacji przez poszczególnych wytwórców. Nazewnictwo polskie jest siłą rzeczy również nieuściślone.



Rys. 2. Charakterystyka wyjściowa scalonego wzmacniacza operacyjnego a) rzeczywista; b) idealizowana



Rys. 3. Podział parametrów scalonych wzmacniaczy operacyjnych

2. Parametry wzmacniaczy

Parametry scalonych wzmacniaczy operacyjnych można podzielić na cztery następujące grupy:

- a) podstawowe parametry wyjściowe
- b) podstawowe parametry wejściowe
- c) parametry określające własności dynamiczne
- d) parametry zasilania

Podział ten schematycznie ilustruje rys. 3.

Poszczególne parametry i ich definicje zostaną omówione bardziej szczegółowo, przy czym uwzględniona zostanie jednocześnie obok terminologii polskiej najczęściej stosowana terminologia angielska.

2.1. Podstawowe parametry wyjściowe

Parametry wyjściowe dotyczą wszystkich napięć i prądów mierzonych w różnych warunkach na wyjściu wzmacniacza oraz wszystkich współczynników wzmocnienia wzmacniacza dla różnych warunków pracy. Do grupy tej zaliczane są również parametry związane z układem pracy wzmacniacza, a definiowane przez inne parametry wyjściowe (np. rezystancja wyjściowa).

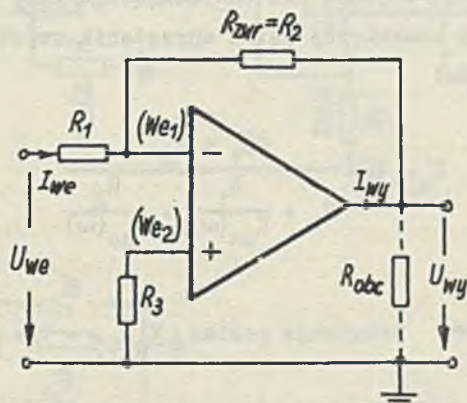
U_{wyo} - napięcie wyjściowe przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (open-loop voltage). Napięcie to jest najczęściej podawane dla wzmacniacza o nieobciążonym wyjściu. Zgodnie z idealizowaną charakterystyką wzmacniacza (rys. 2b) może być określane jako funkcja różnicowego napięcia wejściowego

$$U_{wyo} = f(U_{we2} - U_{we1})$$

U_{wym} - maksymalne napięcie wyjściowe przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego i przy nie obciążonym wyjściu; jest zwykle określane niezależnie dla dodatniego i ujemnego sygnału wejściowego zgodnie z rys.2a (output voltage swing; maximum positive output voltage swing; maximum negative output voltage swing)

- I_{wym} - maksymalny dopuszczalny prąd wyjściowy określany dla pełnego wysterowania przy minimalnej dopuszczalnej rezystancji obciążenia wzmacniacza (peak output current)
- K_{uo} - współczynnik wzmocnienia napięciowego przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (open loop voltage gain) i najczęściej przy braku obciążenia na wyjściu wzmacniacza może być zgodnie z rys. 2b określony zależnością

$$K_{uo} = \frac{U_{wyo}}{U_{we2} - U_{we1}}$$



Rys. 4. Typowy układ połączeń wzmacniacza operacyjnego z dwoma wejściami i zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego

- K'_u - współczynnik wzmocnienia napięciowego przy zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego (closed loop voltage gain) może być zgodnie z rys. 4 określony przy pomocy ogólnej zależności

$$K'_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

Wzmocnienie K'_u jest zasadniczo zależne od reżimu pracy wzmacniacza operacyjnego. Przy wykorzystaniu wejścia odwracającego fazę (rys. 5a) wynosi ono zgodnie z klasycznym równaniem wzmacniacza operacyjnego

$$K'_{u(-)} = \frac{-R_2}{R_1 + \frac{R_1}{K_{uo}(\omega)} + \frac{R_2}{K_{uo}(\omega)}}$$

i dla $K_{uo}(\omega) \rightarrow \infty$ przyjmuje postać $K'_{u(-)} = -\frac{R_2}{R_1}$

Przy wykorzystaniu wejścia nie odwracającego fazy (rys. 6a) wzmocnienie $K'_{u(+)}$ przy zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego może być określone z zależności

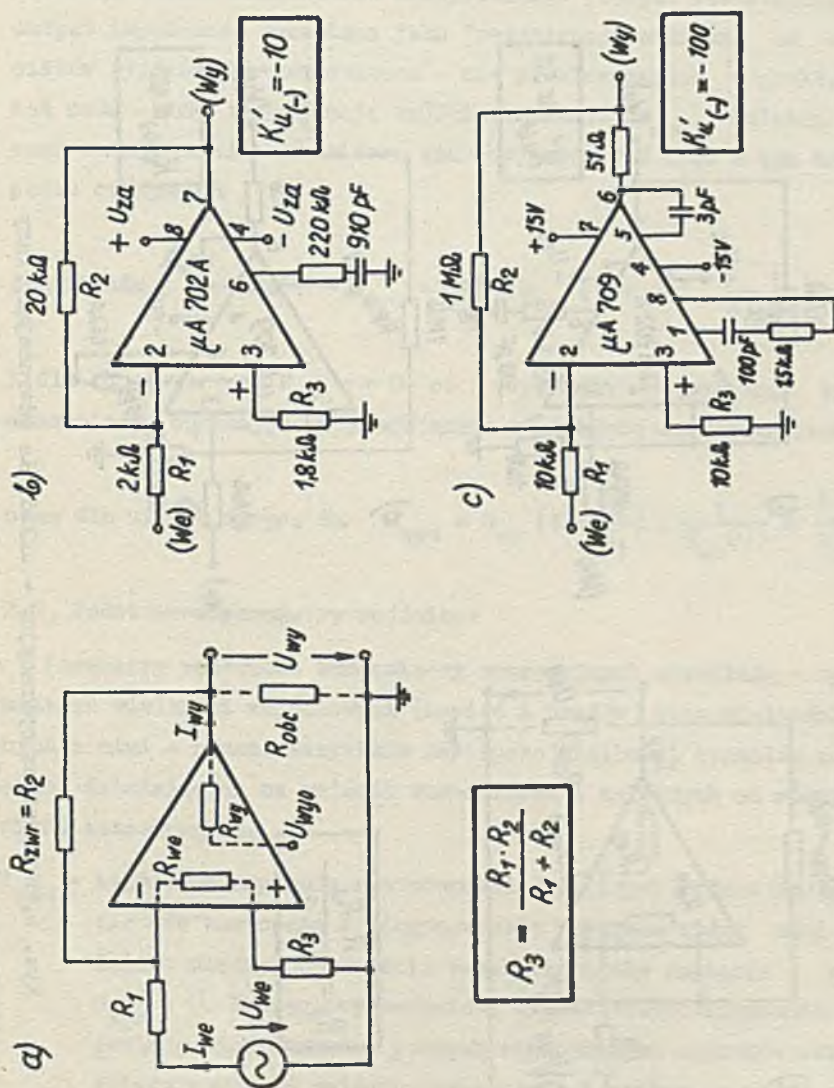
$$K'_{u(+)} = \frac{R_1 + R_2}{R_1 + \frac{R_1}{K_{uo}(\omega)} + \frac{R_2}{K_{uo}(\omega)}}$$

i dla $K_{uo}(\omega) \rightarrow \infty$ przyjmuje postać $K'_{u(+)} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$

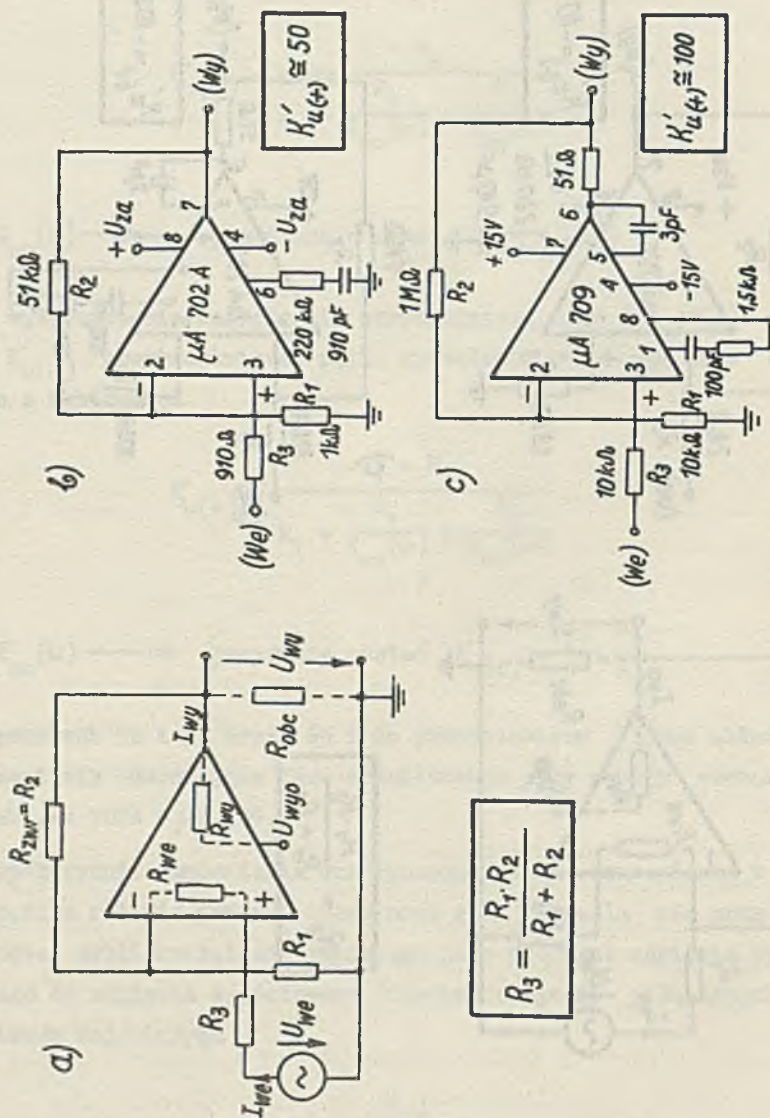
Na rysunkach 5b i 5c oraz 6b i 6c przedstawiono typowe układy odwracające i nie odwracające fazę zrealizowane przy pomocy wzmacniaczy scalonych $\mu A 702A$ i $\mu A 709$.

K'_{us} - współczynnik wzmocnienia sumarycznego czyli wzmocnienia w sumarycznym reżimie pracy (common mode gain) określa się przy zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego jako stosunek napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego doprowadzonego do połączonych zacisków wejściowych

$$K'_{us} = \frac{U_{wy}}{U_{we1,2}}$$



Rys. 5. Wzmacniacz operacyjny - układ z odwracaniem fazy
 a) podstawowy schemat blokowy; b) wzmacniacz μA 702A; c) wzmacniacz μA 709



Rys. 6. Wzmacniacz operacyjny - układ nie odwracający fazy

a) podstawowy schemat blokowy; b) wzmacniacz μA 702A; c) wzmacniacz μA 709

Rezystancja wyjściowa wzmacniacza może być rozumiana w dwojaki sposób. Należy tu zasadniczo rozróżnić rezystancję wyjściową R_{wy} (wewnętrzna) samego wzmacniacza uniwersalnego (output resistance; intrinsic output impedance) rozumianą jako "rezystancja widziana od strony zacisków wyjściowych wzmacniacza" - nie przekraczającą w praktyce kilkuset omów - oraz rezystancję wyjściową układu R_{wyu} , zależną od połączeń zewnętrznych wzmacniacza operacyjnego. Tak więc w tym drugim przypadku otrzymamy:

$$\text{dla układu z rys. 5a} \quad R_{wyu} = \frac{U_{wy}}{I_{wy}} = R_{wy} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{K_{uo}(\omega)}$$

i dla $K_{uo}(\omega) \rightarrow \infty$ $R_{wyu} \rightarrow 0$ co odpowiada rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego pracującego w układzie idealnego inwertora;

$$\text{oraz dla układu z rys. 6a} \quad R_{wyu} = R_{wy} \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot \frac{1}{K_{uo}(\omega)} \approx \frac{K'_{u(+)}(\omega)}{K_{uo}(\omega)}$$

2.2. Podstawowe parametry wejściowe

Parametry wejściowe wzmacniaczy operacyjnych określają - oprócz normalnych wielkości wejściowych (napięć i prądów) oraz wielkości związanych z nimi - przede wszystkim zastępcze wielkości sygnałów zakłócających, działających na wejściu wzmacniacza i zależnych od różnych czynników zewnętrznych.

U_{wen} - wejściowe napięcie niezrównoważenia (input offset voltage) określa się wartością i biegunowością napięcia które musi być przyłożone między oba wejścia wzmacniacza aby napięcie wyjściowe $U_{wy} = 0$. Napięciowy wejściowy sygnał niezrównoważenia U_{wen} odpowiada więc wartości pewnych równoważnych sygnałów szkodliwych działających na wejście wzmacniacza i pochodzących od zmian temperatury, zmian napięć zasilających, starzenia się elementów czynnych i biernych itp. Jest to ważny parametr informujący o jakości wzmacniacza scalonego; idealny wzmacniacz ma $U_{wen} = 0$; w praktyce wartość napięcia niezrównoważenia zawiera się w gra-

nicach od ułamków do kilku mV. Wartości U_{wen} są podawane w katalogach dla normalnej temperatury otoczenia (25°C).

I_{wen} - wejściowy prąd niezrównoważenia (input offset current), określa się różnicą między wartościami prądów w obu wejściach przy napięciu wyjściowym $U_{wyo} = 0$. Prądowy sygnał niezrównoważenia $I_{wen} = I_{we1} - I_{we2}$, należy więc podobnie jak napięciowy sygnał niezrównoważenia, rozumieć jako wartość prądu który musi być do prowadzony do wejścia wzmacniacza dla skompensowania i sprowadzenia do zera zmian na wyjściu. I_{wen} określa również jakość wzmacniacza scalonego; wzmacniacz idealny ma $I_{wen} = 0$; w praktyce wejściowy prąd niezrównoważenia zawiera się w granicach od 0,01 do $1\mu\text{A}$. Wartości I_{wen} podobnie jak U_{wen} są podawane w katalogach dla normalnej temperatury otoczenia (25°C).

I_{we} - prąd wejściowy lub prąd polaryzacji wejścia (input bias current) jest określany jako średnia arytmetyczna obu prądów wejściowych

$$I_{we} = \frac{I_{we1} + I_{we2}}{2}$$

Przeciętna wartość I_{we} waha się w granicach od ułamków do kilku μA .

$\alpha(U_{wen})$ - temperaturowy współczynnik wejściowego napięcia niezrównoważenia (temperature coefficient of input offset voltage) służy do określenia temperaturowego dryftu wejściowego napięcia niezrównoważenia, wywołanego zmianą temperatury w stosunku do normalnej temperatury otoczenia. Współczynnik ten dla fabrycznych scalonych wzmacniaczy operacyjnych wynosi zwykle kilka $\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ i jest w przybliżeniu stały dla dość szerokiego zakresu temperatur (np. od -50 do $+100^{\circ}\text{C}$).

$\alpha(I_{wen})$ - temperaturowy współczynnik wejściowego prądu niezrównoważenia (temperature coefficient of input offset current) służy do określenia temperaturowego dryftu wejściowego prądu niezrównoważenia. Omawiany współczynnik wynosi zwykle kilka $nA/^{\circ}C$ (dla zakresu temperatur pracy wzmacniacza od około -50 do około $+100^{\circ}C$). Na wartość współczynnika $\alpha(I_{wen})$ można wpływać przez odpowiedni dobór wartości oporników wejściowych i oporników sprzężenia zwrotnego we wzmacniaczu operacyjnym. Najmniejszą wartość przyjmuje współczynnik dla optymalnego

$$R_3 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

U_{wes} - napięcie wejściowe sumaryczne (input common mode voltage) określa dla sumarycznego reżimu pracy graniczną wartość napięcia wejściowego doprowadzanego do połączonych zacisków wejściowych i masy.

Rezystancja wejściowa, podobnie jak w przypadku rezystancji wyjściowej, musi być rozpatrywana oddzielnie dla samego wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego i dla układu z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego.

Rezystancja wejściowa R_{we} (różnicowa) - "widziana między zaciskami wejściowymi, odwracającym i nieodwracającym fazę" (input resistance; intrinsic input impedance) osiąga w praktycznych układach wzmacniaczy wartość kilkadziesiąt do kilkuset tysięcy omów. Rezystancja wejściowa układowa R_{weu} , przy zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego, ma wartość uzależnioną od połączeń zewnętrznych we wzmacniaczu operacyjnym. Dla R_{weu} otrzymamy więc przy układzie z rys. 5a:

$$R_{weu} = R_1 + R_2 \frac{R_{we} + R_3}{R_{we}} \cdot \frac{1}{K_{uo}(\omega)}$$

przy czym dla $R_{we} \gg R_3 \dots R_{weu} = R_1 + \frac{R_2}{K_{uo}(\omega)}$

i dla $K_{uo}(\omega) \rightarrow \infty \dots R_{weu} = R_1$.

Dla układu z rys. 6a otrzymujemy:

$$R_{weu} = K_{uo}(\omega) \cdot \frac{R_{we}}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \approx R_{we} \frac{K_{uo}(\omega)}{K'_u(+)}$$

Niektóre firmy podają jeszcze rezystancję wejściową R_{wes} dla sumarycznego reżimu pracy (common mode input resistance), mierzoną przy połączonych zaciskach wejściowych względem masy.

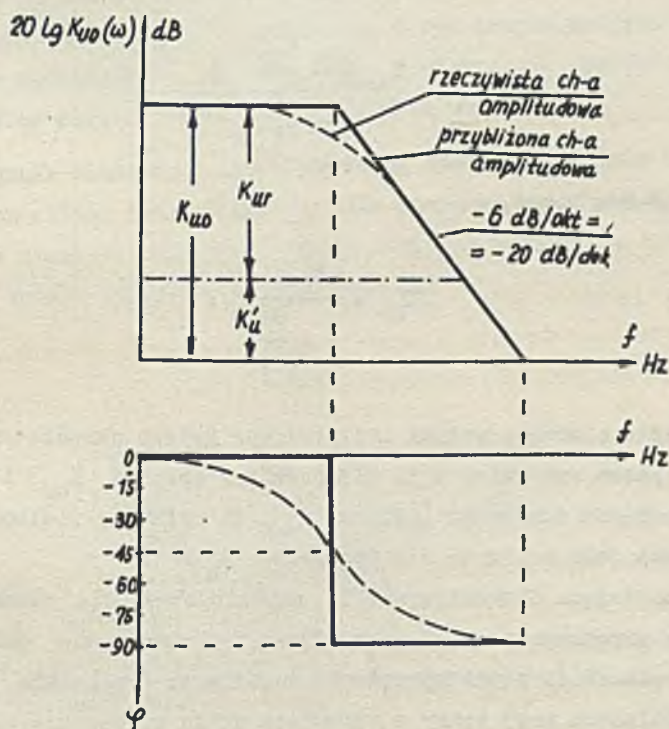
H_S - współczynnik symetrii dla sumarycznego reżimu pracy (common mode rejection ratio - CMRR) określa się jako stosunek współczynnika wzmocnienia przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego (K_{uo}) do współczynnika wzmocnienia sumarycznego (K'_{us})

$$H_S = \frac{K_{uo}}{K'_{us}}$$

Wartość współczynnika H_S może być podawana również w decybelach. Współczynnik symetrii można także wyrazić stosunkiem napięcia wejściowego przy sumarycznym reżimie pracy do różnicowego napięcia wejściowego, wytwarzającego na wyjściu wzmacniacza taką samą wartość napięcia wyjściowego. Współczynnik H_S określa więc doskonałość symetrii obwodów wejściowych wzmacniacza scalonego; jego wartość nie jest jednak stała i maleje wraz ze wzrostem częstotliwości wskutek wpływu niejednakowych pojemności wewnętrznych tranzystorów wejściowych. Także zwiększenie szeregowej rezystancji w obwodzie wejściowym wzmacniacza powoduje obniżenie H_S . Przeciętne wartości współczynnika symetrii, mierzone dla małych częstotliwości, wynoszą kilkadziesiąt decybeli.

2.3. Parametry określające własności dynamiczne

Parametry określające własności dynamiczne scalonego wzmacniacza operacyjnego odczytuje się z kształtu charakterystyki częstotliwościowej (amplitudowo-fazowa charakterystyka Bodego) oraz z przebiegu charakterystyki czasowej (odpowieź wzmacniacza na znormalizowany skok jednostkowy).



Rys. 7. Charakterystyki amplitudowo-fazowe (Bodego)

K_{ur} - współczynnik rezerwy wzmocnienia (loop gain) określa tę część całkowitego wzmocnienia K_{uo} , która została zredukowana dzięki pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego. Współczynnik ten może być więc zgodnie z amplitudowo-fazową charakterystyką Bodego dla danego wzmacniacza operacyjnego (rys. 7) określony w decybelach wprost z charakterystyki amplitudowej jako

$$K_{ur} [\text{dB}] = K_{uo} [\text{dB}] - K'_u [\text{dB}]$$

względnie jako stosunek

$$K_{ur} = \frac{K_{uo}}{K'_u}$$

Dla układów z rys. 5 wartość K_{ur} przyjmuje postać

$$K_{ur} = - \frac{K_{uo}}{\frac{R_2}{R_1}}$$

zaś dla układów z rys. 6

$$K_{ur} = \frac{K_{uo}}{1 + \frac{R_2}{R_1}}$$

Z kształtu charakterystyki amplitudowej Bodego określa się poza tym szerokość pasma przepuszczania dla otwartej (poziom K_{uo}) i zamkniętej pętli sprzężenia zwrotnego (poziom K'_u). Ta ostatnia wielkość jest często podawana jako parametr dla przypadku $K'_u = 1$.

Część opadająca charakterystyki amplitudowej dla otwartej pętli sprzężenia zwrotnego pozwala przewidywać zachowanie się wzmacniacza w warunkach włączenia pętli sprzężenia zwrotnego. Wymaga się dla zachowania stabilności przy pracy z zamkniętą pętlą sprzężenia zwrotnego aby opadanie charakterystyki amplitudowej - przy otwartej pętli - nie było większe niż - 12 dB/okt.

Charakterystyka czasowa (transient response) jest podawana zwykle dla wzmacniaczy operacyjnych pracujących w specjalnych układach (np. komparatorów napięcia). Charakterystyki tego typu są uzyskiwane dla sygnałów wejściowych jednostkowych, o różnej wartości, zarówno dodatnich jak i ujemnych. Najczęściej wystarczy jednak podanie dla określo-

nego sygnału jednostkowego szybkości narastania (slew rate) v_n - sygnału wyjściowego, wyrażonej w $V/\mu s$.

2.4. Parametry zasilania

Z wielkości odnoszących się do warunków zasilania wzmacniaczy operacyjnych wymienić można dwa najważniejsze parametry: napięcie zasilania i współczynnik eliminacji zmian napięcia zasilania.

U_{za} - napięcie zasilania (supply voltage) jest w zależności od typu wzmacniacza pojedyncze lub podwójne; w tym drugim przypadku oba napięcia zasilające - dodatnie U_{za}^+ i ujemne U_{za}^- posiadają jeden wspólny punkt, którym jest tzw. masa układu.

H_u - współczynnik eliminacji zmian napięcia zasilania (supply voltage rejection ratio) jest określany jako stosunek zmian wejściowego napięcia niezrównoważenia do zmian napięcia zasilania, wywołującego tę zmianę napięcia niezrównoważenia

$$H_u = \frac{\Delta U_{weu}}{\Delta U_{za}}$$

lub

$$H_u = \frac{\Delta U_{weu}}{\Delta U_{za}^+ - \Delta U_{za}^-}$$

Wartość praktyczna współczynnika H_u wynosi zwykle kilkadziesiąt $\mu V/V$.

Omówione cztery grupy parametrów podawane są z reguły dla normalnej temperatury otoczenia $+25^\circ C$. Niektóre z nich mogą być ważne również dla szerszego zakresu temperatur (np. od -50 do $+100^\circ C$).

LITERATURA

- [1] Biażko M. - Układy mikroelektroniczne. WKiŁ, Warszawa 1969 r.
- [2] Harasimowicz J. - Wzmacniacz uniwersalny - parametry i technika wykonania. Przegląd Elektrotechniczny 1968 r. Nr 10, s. 445-449.
- [3] Die Kenndaten von Operationsverstärkern. Elektronik 1970 r. Nr 11, Arbeitsblatt Nr 37.
- [4] Katalogi firmowe: SGS-Fairchild, Texas Instruments, Philbrick-Nexus.

TERMS APPLICABLE TO OPERATIONAL AMPLIFIERS

S u m m a r y

The paper presents a list of terms applicable to integrated operational amplifiers. The definitions of commonly used terms are given.

ТЕРМИНОЛОГИЯ ПРИМЕНЯЕМАЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ
ИНТЕГРАЛЬНЫХ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ

Р е з ю м е

В статье представлено переченъ величин и терминов описывающих свойства и характеристики интегральных операционных усилителей. Представлено также определения всех этих величин и терминов.