ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1974

Seria: Automatyka z. 26 Nr kol. 395

Leon Lasek

WZMACNIACZ SCALONY PRĄDU STAŁEGO JAKO NIEAUTONOMICZNY ELEMENT WIELOBIEGUNOWY

Streszczenie. W pracy przedstawiono macierz admitancyjną scalonego wzmacniacza prądu stałego oraz wzory, które pozwalają obliczyć poszczególne jej elementy na podstawie typowych danych katalogowych. W następnej części, wykorzystując tą macierz, przytoczono kilka typowych przykładów jej zastosowania. Obliczone układy są często spotykane w literaturze, co pozwala na porównanie wyników. W ten sposób praca uzupełnia admitancje elementów czynnych o następny nieautonomiczny wielobiegunnik, a tym samym pozwala na sformalizowanie obliczeń układów, które jako element składowy zawierają wzmacniacz scalony.

W ostatnim czasie pojawiła się duża ilość układów, których struktura oparta jest o wzmacniacz scalony prądu stałego. Obliczenie dowolnej transmitancji tak zbudowanego układu prowadzi do rozwiązywania bardzo kłopotliwych układów równań. Natomiast stosowanie bardziej wydajnych metod, jak na przykład metody uogólnionej napięć węzłowych [1] napotyka na dość zasadniczą trudność, jaką stanowi brak macierzy admitancyjnej wzmacniacza scalonego. Niniejszy artykuł stara się wypełnić tę lukę.

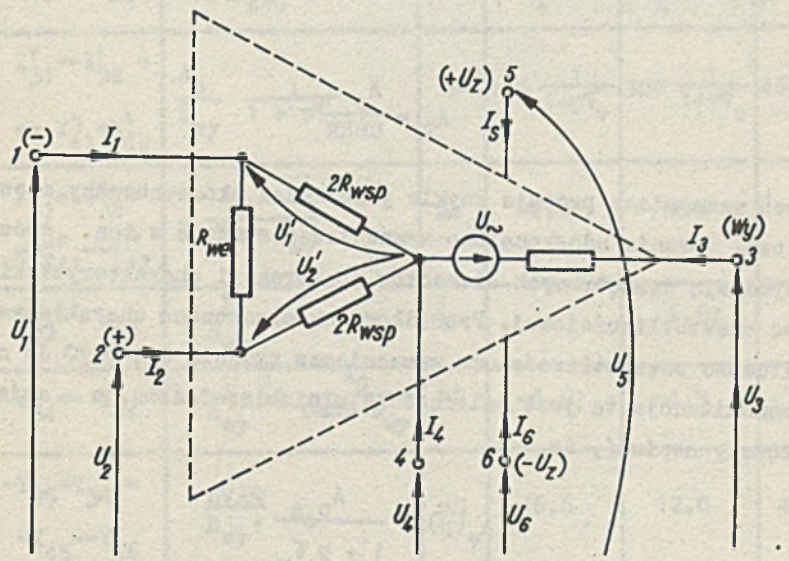
Za podstawę do utworzenia wyżej wymienionej macierzy muszą służyć zarówno parametry katalogowe tych wzmacniaczy, jak i ich własności. W innym bowiem przypadku napisanie takiej macierzy mijało by się z celem. W tabeli 1 podano spotykane w katalogach dane odnośnie najbardziej popularnego wzmacniacza scalonego firmy Texas Instruments SN52709A (odpowiednik μA709), przy czym parametry te podzielono na 3 grupy. Do 1 grupy zaliczono wszystkie te parametry, których znajomość jest niezbędna dla opisania macierzy admitancyjnej wzmacniacza

Tablica 1

Gr.	Parametr	Symbol	Jedn.	Wielkość liczbowa		
				Min.	Typ.	Max
I	1. Wzmocnienie napięciowe	A_o	-	25000	45000	70000
	2. Rezystancja wejściowa	R_{we}	kΩ	350	750	
	3. Rezystancja wejściowa wspólna	R_{wsp}	MΩ	3	7	
	4. Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego	CMRR	dB	80	110	
	5. Współczynnik tłumienia napięcia zasilania	SURR	μV/V		40	100
	6. Częstotliwość graficzna	f_{gr}	MHz		1	
	7. Oporność wyjściowa	R_{wy}	Ω		150	
II	8. Napięcie zasilające	U_z	V	± 9		± 15
	9. Prąd polaryzacji wejść	I_B	nA	100	200	500
	10. Wejściowy prąd niezrównoważenia	I_{DB}	nA	10	50	200
	11. Wejściowe napięcie niezrównoważenia	U_{DB}	mV		0,6	2
III	12. Pełzanie temperaturowe wejściowe nap. niezrównow.	αU_{DB}	μV/°C		2	15
	13. Pełzanie temperaturowe prądu polaryzacji	αI_B	nA/°C		0,08	0,5
	14. Maksymalne wejściowe napięcie różnicowe	U_D	V			5
	15. Maksymalne wejściowe napięcie wspólne		V			± 10
	16. Częstotliwość zapewniająca znamionową amplitudę napięcia wyjściowego		kHz		3	
	17. Szybkość narastania napięcia wyjściowego		V/μS		0,25	

scalonego. Grupa 2 zawiera wielkości niezbędne dla prawidłowego spolaryzowania wzmacniacza. W grupie trzeciej zawarto parametry, na podstawie których można obliczyć wpływ temperatury na wartość zera nominalnego wzmacniacza oraz pozostałe wielkości niezbędne przy projektowaniu układów, jak na przykład dopuszczalne napięcia niszczące układ wzmacniacza itp.

Na rys. 1 przytoczono najbardziej pełną strukturę [2] wzmacniacza scalonego. Wydaje się, że jest to najbardziej doskonały schemat zastępczy dzięki temu, że wszystkie jego elementy są definiowane przez dane katalogowe (patrz tabela 1). Dla układu z rys. 1 możemy napisać macierz admitancyjną kwadratową o sześciu wierszach i kolumnach jak na rys. 2.



Rys. 1. Schemat zastępczy scalonego wzmacniacza prądu stałego

Obecnie przystąpimy do obliczenia elementów macierzy admitancyjnej wzmacniacza scalonego. W tym celu skorzystamy z definicji, a więc

$$Y_{kS} = \left(\frac{I_K}{U_S}\right)_{U_i=0} \quad (i \neq S). \tag{1}$$

Ze wzoru tego wynika, że poszczególne admitancje są równe liczbowo prądowi, który wpływa przez K-ty zacisk, gdy do zacisku S-tego doprowadzono napięcie jednostkowe, a pozostałe zaciski zwarto z zaciskiem odniesienia. Opierając się na zależności (1) obliczono poszczególne elementy macierzy admitancyjnej wzmacniacza scalonego, biorąc jako podstawę schemat zastępczy z rys. 1 oraz definicje parametrów zawartych w tabeli 1. Wydaje się, że przytaczanie tych definicji w tym miejscu jest zbyteczne, bowiem wielkości te są już dość szeroko omówione i można je znaleźć w katalogach firmowych względnie w literarurze [3,4]. Jedynie wyjaśnienia wymaga wielkość siły elektromotorycznej $U_{\sim}$ (rys.1). Wielkość tą można opisać zależnością

$$U_{\sim} = A_v(p)\,(U_2' - U_1') + A_T(U_1' + U_2') + \mathrm{SVRR}\; A_o(U_5 - U_6), \tag{2}$$

gdzie

$$A_T = \frac{A_o}{\mathrm{CMRR}}.$$

W układach wzmacniacz pracuje zwykle jako układ skompensowany częstotliwościowo. Obecnie udoskonalono wzmacniacze scalone w ten sposób, że nie wymagają zewnętrznych elementów do korekcji charakterystyki amplitudowo częstotliwościowej. Prawidłowo skompensowana charakterystyka amplitudowo częstotliwościowa wzmacniacza zmienia się o 20 dB na dekadę. Transmitancja ta jest zależnością minimalno-fazową, w związku z czym możemy napisać, że

$$A_v(p) = \frac{A_o}{1 + p\,\tau_v}, \tag{3}$$

gdzie

τ_v - stała czasowa wprowadzona przez biegun, układu korekcji częstotliwościowej.

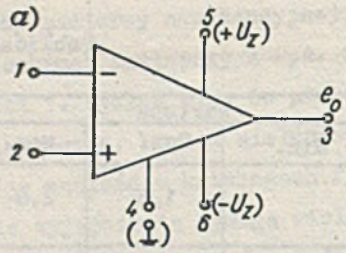
Wielkość τ_v możemy obliczyć z zależności (4)

$$\tau_v = \frac{A_o}{2\pi f_{gr}}. \tag{4}$$

W ten sposób mamy wystarczającą ilość informacji dla prawidłowego opisania macierzy admitancyjnej elementu wielobiegunowego, jakim jest wzmacniacz scalony prądu stałego. Poszczególne admitancje Y_{KS} zestawiono w tabeli 2. Wartości niezamieszczone w tabeli należy przyjąć jako równe zeru. Z tego powodu nie umieszczono ich w macierzy z rys. 2b.

Tablica 2

Lp.	Parametr	Wzór		Wartość		
				Min.	Typ.	Max.
1	$Y_{11} = Y_{22}$	$\frac{1}{R_{we}} + \frac{1}{2\,R_{wsp}}$	μS		1,8	2,8
2	$Y_{12} = Y_{21}$	$-\frac{1}{R_{we}}$	μS	-2,8	-1,8	
3	$Y_{14} = Y_{24}$	$-\frac{1}{2\,R_{wsp}}$	μS	-0,16	-0,07	
4	$Y'_{31} = -Y'_{32} = -Y'_{41} = Y'_{42}$	$\frac{A_o}{R_{wy}}\,\frac{1}{1+p\tau_v}$	S	$165\,\frac{1}{1+p\tau_v}$	$300\,\frac{1}{1+p\tau_v}$	$465\,\frac{1}{1+p\tau_v}$
5	$Y''_{31} = Y''_{32} = -Y''_{41} = -Y''_{42}$	$-\frac{A_o}{CMRR\,R_{wy}}$	ms	-4,6	-0,9	-0,5
6	$Y_{33} = -Y_{43}$	$\frac{1}{R_{wy}}$	ms		6,67	
7	$Y_{34} = -Y_{44}$	$-\frac{1}{R_{wy}} + 2\,\frac{A_o}{CMRR\,R_{wy}}$	mS	-5,67	-4,9	2,5
8	$-Y_{35} = Y_{36} = Y_{45} = -Y_{46}$	$\frac{SVRR}{E_{wy}}\,A_o$	mS	6,6	12,0	46,5



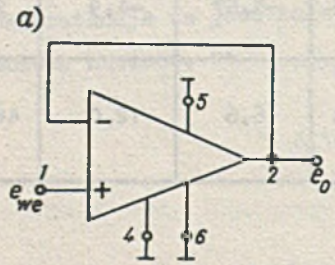
b)

	1	2	3	4	5	6
1	Y_{11}	Y_{12}		Y_{14}		
2	Y_{21}	Y_{22}		Y_{24}		
3	$Y'_{31}+Y''_{31}$	$Y'_{32}+Y''_{32}$	Y_{33}	Y_{34}	Y_{35}	Y_{36}
4	$Y'_{41}+Y''_{41}$	$Y'_{42}+Y''_{42}$	Y_{43}	Y_{44}	Y_{45}	Y_{46}
5						
6						

Rys. 2. Wzmacniacz scalony i jego macierz admitancyjna

Korzystając z admitancji wzmacniacza scalonego obliczymy wzmocnienie układu jak na rysunku 3. Jest to wzmacniacz o dużej rezystancji wejściowej oraz o współczynniku wzmocnienia bliskim jedności dla prądu stałego. Obliczymy go z zależności

$$\frac{e_o}{U_{we}} = \frac{\Delta_{12}}{\Delta_{11}} = -\frac{Y_{12} + Y'_{32} + Y''_{32}}{Y_{11} + Y'_{31} + Y''_{31} + Y_{33}} .$$



b)

	1	2
1	Y_{22}	Y_{21}
2	$Y_{12}+Y'_{32}+Y''_{32}$	$Y_{22}+Y'_{31}+Y''_{31}+Y_{11}$

Rys. 3. Wzmacniacz o $K_u=1$

Po uwzględnieniu faktu, że $Y'_{32} + Y''_{32} \gg Y_{12}$ i $Y'_{31} + Y''_{31} \gg Y_{12}$ otrzymamy

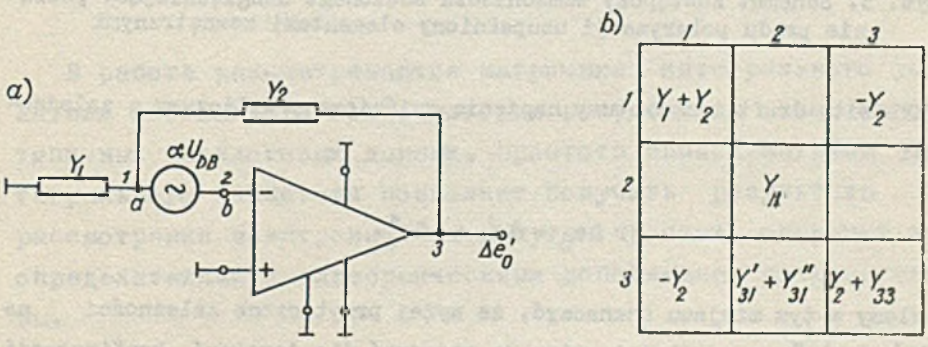
$$\frac{e_o}{U_{we}} = \frac{1 + \frac{1}{CMRR}}{1 + \frac{1}{A_o} - \frac{1}{CMRR}},$$

którą to zależność często przytacza się w literaturze. Łatwo również udowodnić, że wartość oporności wejściowej jest bardzo duża i wynosi $2\,R_{wsp}$. Wielkość ta może być nawet o dwa rzędy większa od R_{we} wzmacniacza scalonego.

Pozostaje do omówienia problem obliczenia wpływu temperatury na przyrost napięcia wyjściowego $\Delta e'_o$ ponad wartość zera nominalnego. Na rys. 4 przytoczono schemat zastępczy wzmacniacza scalonego, w którym uwzględniono pełzanie wejściowego napięcia niezrównoważenia αU_{DB}. Wartość napięcia $\Delta e'_o$ obliczymy z zależności

$$\frac{\Delta e'_o}{U_{DB}} = \frac{\Delta_{(a+b)c}}{\Delta_{(a+b)(a+b)}} =$$

$$= \frac{Y_{11}\Gamma Y_2 + (Y_1 + Y_2)(Y'_{31} + Y''_{31})}{Y_{11}\Delta(Y_2+Y_{33}) + Y_2(Y'_{31} + Y''_{31}) + (Y_1 + Y_2)(Y_2 + Y_{33}) - Y_2^2} = \frac{Y_1 + Y_2}{Y_2}.$$



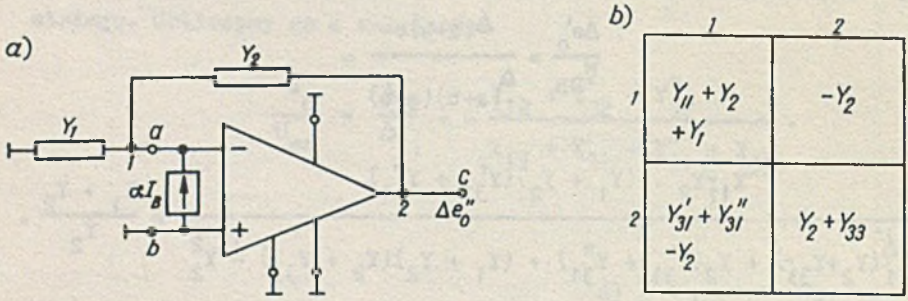
Rys. 4. Schemat zastępczy wzmacniacza scalonego uwzględniający pełzanie wejściowego napięcia niezrównoważenia uzupełniony elementami zewnętrznymi

Założeniem upraszczającym w powyższej zależności było przyjęcie faktu, że dowolna admitancja pomnożona przez wielkość $Y'_{31} + Y''_{31}$ jest znacznie większa od pozostałych.

Podobnie postępujemy w przypadku, gdy chcemy obliczyć wpływ pełzania temperaturowego prądu polaryzacji αI_B na przyrost napięcia wyjściowego $\Delta e''_o$ (rys. 5). Napięcie wyjściowe obliczymy z zależności

$$\frac{\Delta e''_o}{I_B} = \frac{\Delta_{(a+b)c}}{\Delta} = \frac{Y_2 - Y'_{31} - Y''_{31}}{(Y_{11} + Y_2 + Y_1)(Y_{33} + Y_2) + Y_2(Y'_{31} + Y''_{31} - Y_2)} =$$

$$= - \frac{1}{Y_2} = - R_2.$$



Rys. 5. Schemat zastępczy wzmacniacza scalonego uwzględniający pełzanie prądu polaryzacji uzupełniony elementami zewnętrznymi

Całkowity draft temperatury napięcia wyjściowego wyliczymy z zależności

$$\Delta e_o = \Delta e'_o + \Delta e''_o.$$

Należy w tym miejscu zaznaczyć, że wyżej przytoczone zależności na $\Delta e'_o$ i $\Delta e''_o$ są ogólne i można je stosować dla dowolnej konfiguracji

sprzężeń zwrotnych obejmujących wzmacniacz scalony. Tak opisany wzmacniacz pozwala na obliczenie dowolnych innych transmitancji, jak na przykład wpływu napięć zasilających na zmiany napięcia względnie prądu wyjściowego itp. Również wyznaczenie warunków generacji dla dowolnej struktury generacyjnej nie nastręcza większych trudności. Wydaje się, że wyżej zaproponowana struktura wzmacniacza scalonego spełni zadanie jakim niewątpliwie jest uzupełnienie admitancji elementów czynnych o scalony wzmacniacz prądu stałego, dzięki czemu będzie można sformalizować obliczenia układów zawierających te elementy, przy pomocy uogólniony metody napięć węzłowych.

LITERATURA

1. Sigorski W.P.: Analiza układów elektronicznych. WNT, Warszawa 1965.
2. Messen der kengreben von operationsverstarkern. Informacja techniczna firmy Valvo.
3. Eimbinder J.: Application Considerations for Linear Integrated Circuits. New York 1969.
4. Lasek L.: Liniowe układy scalone. Konferencja zastosowania układów scalonych w Hutnictwie 1971.

ИНТЕГРАЛЬНЫЙ УСИЛИТЕЛЬ КАК МНОГОПОЛЮСНИК

Р е з ю м е

В работе рассматриваются матричные интегрального усилителя постоянного тока, которые разработаны на основе типичных каталоговых данных. Простота записи матрисы интегрального усилителя позволяет получить результаты из рассмотрения электронных схем путем простых операций над определителями и алгебраическими дополнениями матрицы схемы.

OPERATIONAL AMPLIFIER AS A MULTIPOLE ELEMENT

S u m m a r y

The admittance matrix describing an operational amplifier has been given. The values of the admittances were calculated using suitable catalogue ratings.