

Ć w i c z e n i e 8

ANALOGOWE UKŁADY FUNKCYJNE

WPROWADZENIE

W praktyce doświadczalnej dosyć często zachodzi konieczność zastosowania układu elektrycznego, którego napięcie wyjściowe nie jest liniową funkcją napięcia wejściowego albo jest pewną funkcją kilku napięć wejściowych. Taki układ nazywany będzie dalej układem funkcyjnym.

Układy funkcyjne stosuje się do modulacji, detekcji i ograniczenia poziomu sygnałów elektrycznych, do linearyzacji czujników elektrycznych (tzn. do takiej zmiany funkcji przenoszenia czujnika, aby wartość sygnału elektrycznego na jego wyjściu była liniową funkcją wielkości mierzonej) oraz do generacji przebiegów o określonym kształcie i do dopasowania sygnałów do właściwości układu transmisyjnego (zagadnienia kompresji i ekspansji). Niekiedy stosuje się układy funkcyjne również do przetwarzania sygnału i wykonywania na nim pewnych operacji matematycznych (mnożenie, dzielenie, obliczanie modułu i argumentu wektora na podstawie znajomości jego składowych itp.). Operacje matematyczne wykonywane techniką analogową cechuje mniejsza dokładność niż analogiczne operacje wykonywane techniką cyfrową, ale często są one przeprowadzane szybciej oraz, jak do tej pory, znacznie mniejszy jest koszt układu analogowego.

W niniejszym ćwiczeniu przedstawione zostaną niektóre spośród układów funkcyjnych. Są to:

- układ logarytmujący,
- układ antylogarytmujący,
- układ mnożący,
- układ kształtujący.

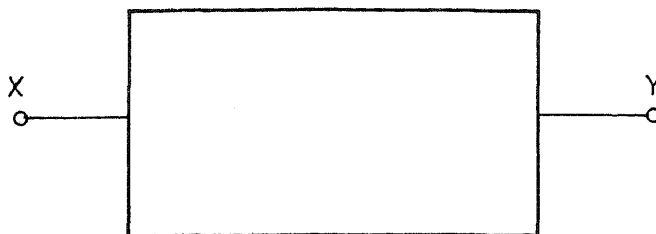
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z zasadą działania tych układów, pomiar niektórych ich charakterystyk i parametrów oraz przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników.

Układy logarytmujące

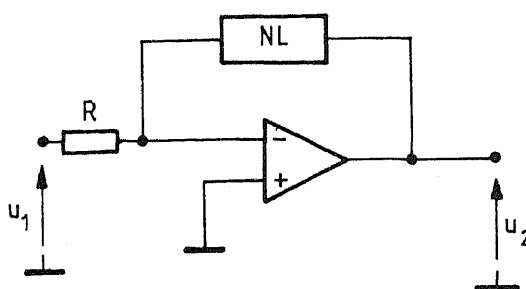
Układem logarytmującym (rys. 8.1) nazywa się układ, w którym sygnał wejściowy x (prąd lub napięcie) związany jest z sygnałem wyjściowym y (prądem lub napięciem) zależnością

$$y = a_1 + a_2 \ln x, \quad (8.1)$$

gdzie a_1 , a_2 są to stałe współczynniki liczbowe. Zwykle układy logarytmujące wykonuje się w postaci wzmacniaczy operacyjnych zawierających nieliniowy element w obwodzie sprzężenia zwrotnego. Rozważany tutaj układ zbudowany jest według schematu przedstawionego na rys.8.2, przy czym wzmacniacz operacyjny jest układem idealnym (o nieskończenie wielkim wzmocnieniu, nieskończonej oporności



Rys. 8.1



Rys. 8.2

wejściowej i o zerowej oporności wyjściowej, a element nieliniowy NL ma charakterystykę napięciowo-prądową

$$u = f(i). \quad (8.2)$$

Należy obliczyć, jaka powinna być zależność (8.2), aby układ był układem logarytmującym.

Z założenia o idealnym wzmacniaczu operacyjnym wynika, że potencjał na wejściu odwracającym wzmacniacza musi wynosić zero. Zatem napięcie na elemencie NL równe jest napięciu wyjściowemu u

$$u = u_2.$$

Prąd płynący przez element NL równy jest prądowi wejściowemu

$$i = \frac{u_1}{R}.$$

Zatem, jeśli ma być spełnione równanie (8.1) dla $x = u_1$ i $y = u_2$, to

$$u_2 = a_1 + a_2 \ln(i R) = u.$$

Stąd wynika, że charakterystyka elementu nieliniowego powinna mieć postać

$$i = I_0 e^{\left(\frac{u_2}{a_2}\right)}, \quad (8.3)$$

gdzie

$$I_0 = \frac{1}{R} e^{\left(-\frac{a_1}{a_2}\right)}.$$

Charakterystykę bardzo zbliżoną do opisanej równaniem (8.3) mają złącza p-n, a więc diody i tranzystory między zaciskami E-B.

Dominującą w zakresie przewodzenia złącza składową dyfuzyjną prądu diody opisuje zależność

$$i = I_s \left(e^{\frac{u}{M\phi_T}} - 1 \right), \quad (8.4)$$

gdzie:

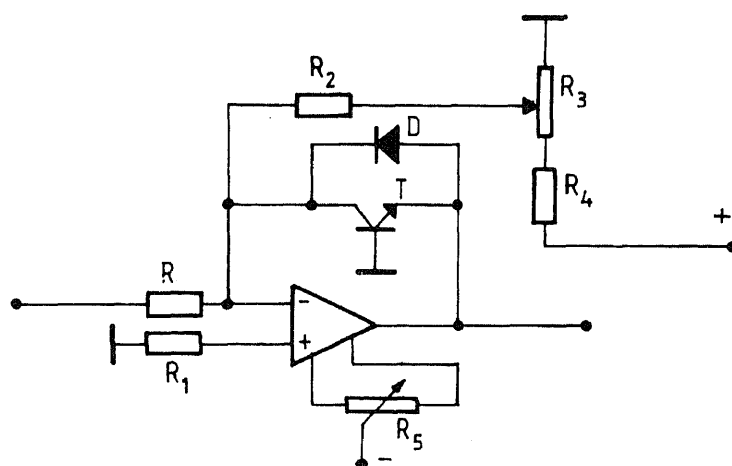
$\phi_T [\text{V}] = \frac{kT}{e} \approx \frac{T[\text{K}]}{11600}$, T – temperatura złącza, M – współczynnik liczbowy zawierający się w przedziale od 1 do 3.

Dla tranzystora BC 238A, w którym zwarto bazę z kolektorem, zmierzono: $I_s = 75 \cdot 10^{-14} \text{ A}$, $M\phi_T \approx 28 \text{ mV}$. Dla $u \gg M\phi_T$ można przyjąć, że

$$i = I_s e^{\frac{u}{M\phi_T}}, \quad (8.5)$$

W praktyce przybliżenie to stosuje się już od $u \geq 100\text{--}150 \text{ mV}$. W przypadku diod krzemowych zależność (8.5) obowiązuje w przedziale prądów od ułamków nanoampera do części miliampera.

W przypadku epiplanarnych tranzystorów krzemowych zależność (8.5) obowiązuje od prądów rzędu 10^{-13} A aż do 10^{-3} A , a więc w przedziale 9 ÷ 10 dekad. Układ wzmacniacza logarytmującego, który będzie badany w trakcie ćwiczenia, przedstawiono na rys.8.3. W układzie tym elementem nieliniowym jest tranzystor T. Jego



Rys. 8.3

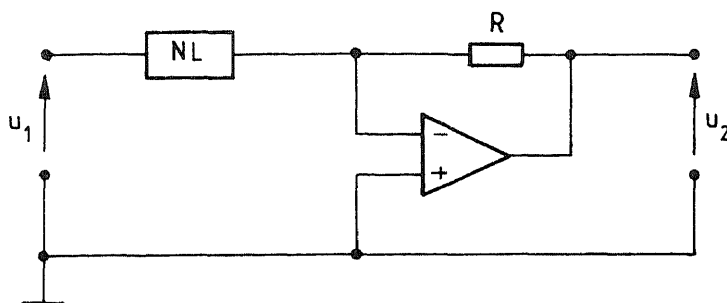
baza i kolektor mają potencjał zerowy. Napięcie wyjściowe wzmacniacza równe jest napięciu między emiterem i bazą tranzystora T. Dioda D zabezpiecza układ przed pojawieniem się na wyjściu przypadkowych dużych impulsów dodatnich, które mogłyby uszkodzić tranzystor. Układ pracuje poprawnie tylko w zakresie dodatnich napięć wejściowych. Regulacje za pomocą potencjometrów R_5 i R_3 służą odpowiednio do symetryzacji wzmacniacza operacyjnego i do ustalenia wartości napięcia wyjściowego, przy której napięcie wyjściowe przyjmuje określoną wartość.

Układy antylogarytmujące

Układami antylogarytmującymi nazywa się układy, w których sygnały: wejściowy x i wyjściowy y (rys.8.1) są ze sobą związane zależnością

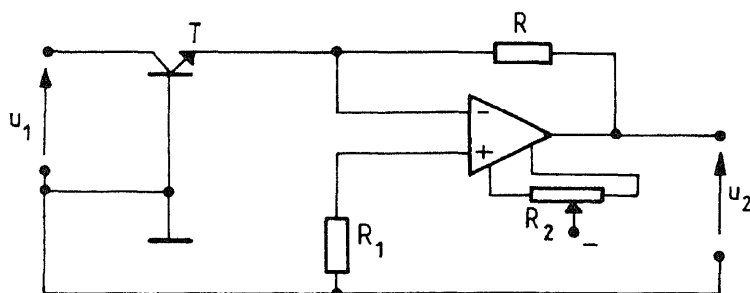
$$y = b_1 e^{b_2 x}. \quad (8.6)$$

Można wykazać, że zależność taką spełniają układy nieliniowe o charakterystyce opisanej równaniem (8.5), połączone z układem wzmacniającym w sposób pokazany na rys.8.4.



Rys. 8.4

W układzie badanym elementem nieliniowym jest tranzystor, a układ ma schemat połączeń przedstawiony na rys.8.5.



Rys. 8.5

W układzie badanym musi być $u_1 < 0$. Wówczas $u_2 > 0$. Regulacja opornikiem R_2 prowadzi do symetryzacji wzmacniacza.

Układy mnożące

Układami mnożącymi nazywa się układy o dwóch wejściach i jednym wyjściu, przy czym sygnał wyjściowy y związany jest z sygnałami wejściowymi x_1 i x_2 (rys.8.6) zależnością

$$y = ax_1 x_2. \quad (8.7)$$



Rys. 8.6

Istnieje wiele różnych metod realizacji takich układów. I tak np. operację mnożenia można wykonać za pomocą wzmacniaczy logarytmujących, sumatora i wzmacniacza antylogarytmującego (rys.8.7), przy wykorzystaniu hallotronu, którego napięcie wyjściowe (napięcie Halla jest proporcjonalne do iloczynu natężenia prądu płynącego przez hallotron i indukcji magnetycznej pola, w którym hallotron umieszczono (rys.8.7b).

Istnieje również duża liczba różnych rozwiązań układów mnożących, wykorzystujących zarówno właściwości nieliniowe różnych elementów elektronicznych (tranzystorów, diod, tranzystorów polowych), jak i specyficzne relacje między parametrami czasowymi przebiegów impulsowych (np. związek wartości średniej ciągu impulsów z ich amplitudą i czasem trwania). Opis tych układów wykracza poza ramy tego ćwiczenia. Dlatego przedstawiony zostanie jedynie układ mnożący, działający na zasadzie sterowania rozplywem prądów, a składający się z mnożnika transkonduktancyjnego i z przetwornika Gilberta. Układ ten cechuje możliwość pracy z sygnałami wejściowymi dodatnimi i ujemnymi (tzn. praca w czterech ćwiartkach), dosyć duży zakres napięć wejściowych, duża dokładność mnożenia, szeroki zakres częstotliwości przenoszonych sygnałów (rzędu kilkunastu MHz). Jest rozwiązaniem, które nadaje się do wykonania w postaci układu scalonego. (Układ ten zastosowano w opracowaniach firm: Motorola MC 1595 oraz Fairchild μA 795).

Zasadę działania mnożnika transkonduktancyjnego najłatwiej jest wyjaśnić na jego uproszczonej wersji – mnożniku dwućwiartkowym (rys.8.8). W układzie tym napięciem wyjściowym u_2 jest napięcie między kolektorami tranzystorów T1 i T2, a napięciami wejściowymi – napięcia u_{11} i u_{12} , przy czym $u_{12} < 0$. Dlatego układ nazywa się dwućwiartkowym. Napięcie wyjściowe w tym układzie wynosi

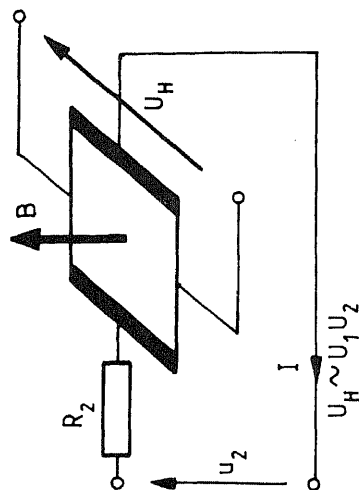
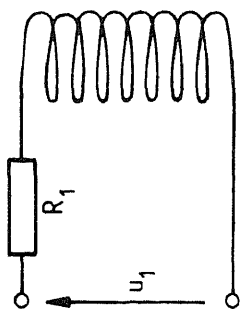
$$u_2 = R(i_{C2} - i_{C1}), \quad (8.8)$$

gdzie i_{C1} i i_{C2} – prądy kolektorowe tranzystorów T1 i T2.

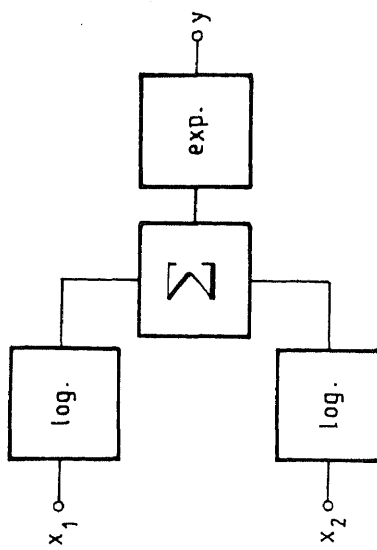
Z kolei można wykazać, że

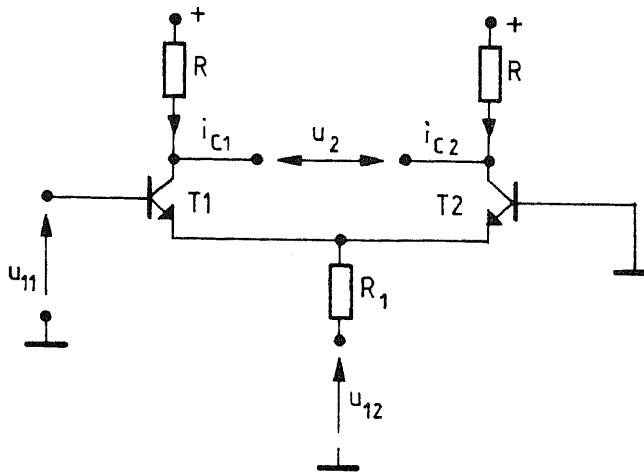
$$\frac{i_{C1}}{i_{C2}} = e^{\frac{u_{11}}{M\Phi_T}}, \quad (8.9)$$

b)



a)





Rys. 8.8

Jeśli $|u_{12}| \gg u_{be}$, to

$$i_{C1} + i_{C2} = -\frac{u_{12}}{R_1}. \quad (8.10)$$

Z równań (8.9) i (8.10) można wyznaczyć i_{C1} oraz i_{C2} , a stąd wartość napięcia wyjściowego

$$u_2 = \frac{R}{R_1} u_{12} \operatorname{th}\left(\frac{u_{11}}{2M\phi_T}\right). \quad (8.11)$$

Dla małych napięć $|u_{11}| \gg 2M\phi_T$ otrzymuje się

$$\operatorname{th}\left(\frac{u_{11}}{2M\phi_T}\right) \simeq \frac{u_{11}}{2M\phi_T}$$

i równanie (8.11) przybiera postać

$$u_2 \simeq \frac{R}{R_1} u_{11} \cdot \frac{1}{2M\phi_T} u_{12}. \quad (8.12)$$

Układ ten jest więc układem mnożącym, który działa tylko wtedy, gdy $u_{12} < 0$ i $|u_{11}| \ll 2M\phi_T$ (dla krzemu w $T = 300$ K mamy: $2M\phi_T \simeq 50$ mV). Prócz tego napięcie wyjściowe silnie zależy od temperatury (bo $\phi_T = kT/e$, gdzie e – ładunek elektronu, k – stała Boltzmanna, a T – temperatura złącza).

Istotną poprawę właściwości przetwornika uzyskuje się po wprowadzeniu następujących zmian układowych:

– zastąpieniu oporności R_1 sterowanym źródłem prądowym,

- dołączeniu równolegle do wzmacniacza różnicowego T1, T2 drugiego identycznego wzmacniacza sterowanego napięciami o przeciwnych fazach,
- sterowaniu obu wzmacniaczy nie napięciami u_{11} i $-u_{11}$, ale napięciami proporcjonalnymi do ich logarytmów naturalnych; uzyskuje się to w przetworniku Gilberta.

Schemat tak zmodyfikowanego układu przedstawiono na rys.8.9. W układzie tym tranzystory T1 i T2 oraz T3 i T4 stanowią dwie pary wzmacniaczy różnicowych identycznych z przedstawionymi na rys.8.8. Wzmacniacze te są tak połączone wyjściami, że przy napięciu $u_{12} = 0$ (tzn. przy równych prądach $i_5 = i_6$) wartości prądów płynących przez oporniki R są stałe i nie zależą od różnicy napięć na bazach tranzystorów T1 i T2 oraz T3 i T4. Podobnie przy $u_{11} = 0$ (tzn. przy równych potencjałach baz tranzystorów T1, T2, T3 i T4) zmiana napięcia u_{12} nie spowoduje żadnej zmiany wartości prądów płynących przez opornik R, bo zmieni się tylko rozptyw prądów między tranzystory T5 i T6, a sumaryczny prąd płynący przez nie pozostanie stały i wynosi I_{02} . Układ pracuje poprawnie przy napięciach u_{11} i u_{12} zarówno dodatnich, jak i ujemnych. Jest więc układem czteroćwiartkowym. Wzmacniacz różnicowy zbudowany na tranzystorach T7 i T8, obciążony diodami D1 i D2, wykonuje logarytmowanie sygnału u_{11} i nazywa się przetwornikiem Gilberta. Zapewnia on poprawną pracę układu w szerszym zakresie napięć u_{12} i lepszą kompensację temperaturową współczynnika przenoszenia α (równanie (8.7)) układu. Wzmacniacz operacyjny IC zapewnia uzyskanie na wyjściu układu napięcia u_2 proporcjonalnego do różnicy natężeń prądów w opornikach R.

Dalsze rozważania dotyczyć będą opisu działania układu z rys.8.9. Można wykazać, że z dobrym przybliżeniem obowiązują zależności

$$u_{11} = R_1(i_7 - i_8), \quad (8.13)$$

$$u_{12} = R_2(i_5 - i_6). \quad (8.14)$$

Równocześnie zachodzą związki, na podstawie których

$$u'_{11} = (u_{DD} - u_{D2}) - (u_{DD} - u_{D1}) = M\phi_T \ln\left(\frac{i_7}{i_8}\right) \quad (8.15)$$

oraz na podstawie równania (8.9)

$$u'_{11} = M\phi_T \ln\left(\frac{i_3}{i_4}\right) = M\phi_T \ln\left(\frac{i_2}{i_1}\right) \quad (8.16)$$

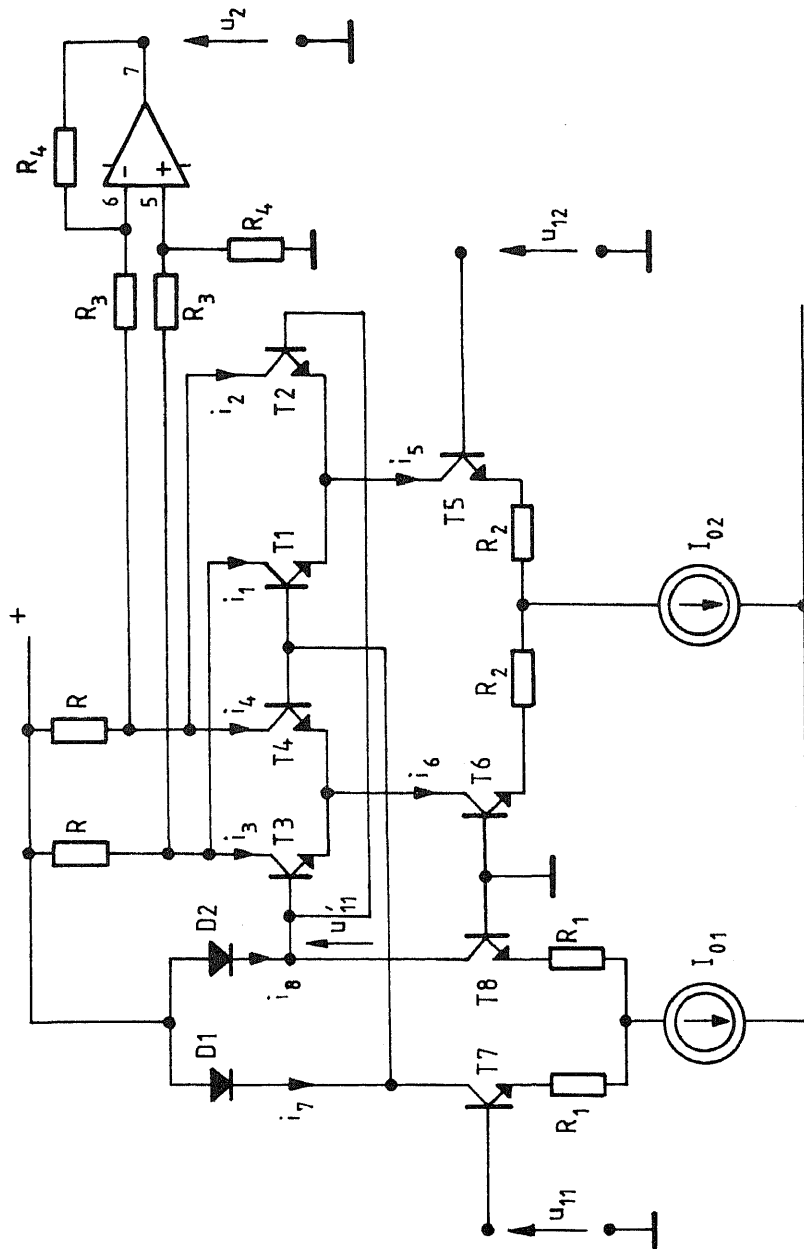
(przez u_{D2} i u_{D1} oznaczono w równaniu (8.15) napięcia na diodach D1 i D2).

Z porównania (8.15) i (8.16) wynika, że

$$\frac{i_7}{i_8} = \frac{i_3}{i_4} = \frac{i_2}{i_1}. \quad (8.17)$$

Równocześnie zachodzą związki

$$i_3 + i_4 = i_6, \quad (8.18)$$



Rys. 8.9

$$i_1 + i_2 = i_5. \quad (8.19)$$

Z porównania (8.17), (8.18), (8.19) można wyznaczyć i_1 , i_2 , i_3 oraz i_4 . Uwzględniając fakt, że $i_7 + i_8 = i_{01}$, otrzymuje się

$$i_1 = \frac{i_5 i_8}{i_{01}}, \quad i_2 = \frac{i_5 i_7}{i_{01}}, \quad (8.20a)$$

$$i_3 = \frac{i_6 i_7}{i_{01}}, \quad i_4 = \frac{i_6 i_8}{i_{01}}. \quad (8.20b)$$

Napięcie wyjściowe u_2 jest proporcjonalne do różnicy prądów płynących przez oporniki R

$$u_2 = K_1(i_3 + i_1 - i_2 - i_4)R. \quad (8.21)$$

Po podstawieniu równań (8.20) otrzymuje się

$$u_2 = K_1 \frac{(i_5 - i_6)(i_8 - i_7)}{i_{01}} R, \quad (8.22)$$

a stąd po uwzględnieniu zależności (8.13) i (8.14)

$$u_2 = K_1 \frac{u_{11} u_{12}}{I_{01} R_1 R_2} R. \quad (8.23)$$

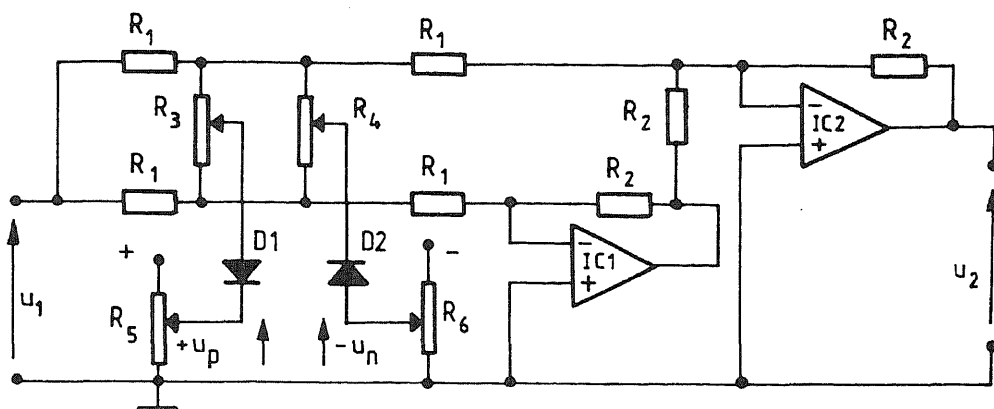
Jak widać, jest to układ mnożący. Jego współczynnik przenoszenia nie zależy od temperatury.

Układy kształtujące

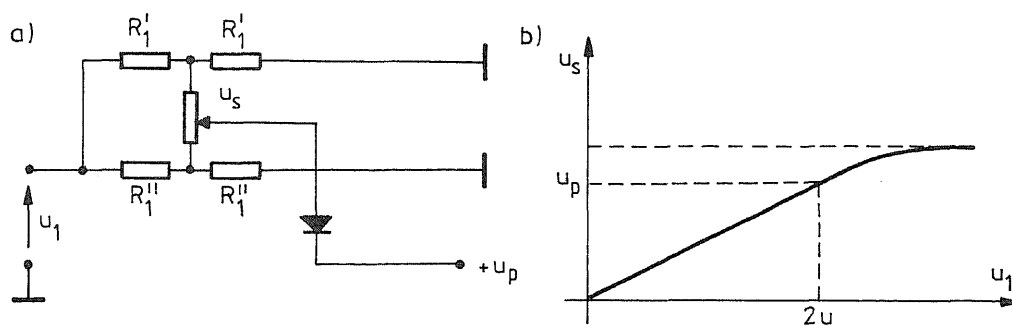
Układem kształtującym nazywa się tu układ wzmacniający, który zawiera w obwodzie sprzężenia zwrotnego element nieliniowy o charakterystyce $u = f(i)$. Elementem takim może być np. sieć złożona z oporników i diod pełniących funkcje przełączników. Działanie takich układów omówione zostanie na przykładzie układu przedstawionego na rys.8.10.

Układ działa następująco: wzmacniacze operacyjne IC1 i IC2 mają takie napięcia na wyjściach, że potencjały wejść odwracających są równe zero. Napięcie wejściowe wynosi u_1 . Dopóki napięcie na suwaku potencjometru R_3 nie przekroczy napięcia $+u_p$, dopóty dioda D1 nie przewodzi i ma oporność nieskończoną. Dla napięcia większego od $+u_p$ dioda zaczyna przewodzić i jej oporność gwałtownie maleje. Dlatego na suwaku ustala się, niezależnie od u_1 , potencjał nieco wyższy od u_p . Przedstawiono to na rys.8.11.

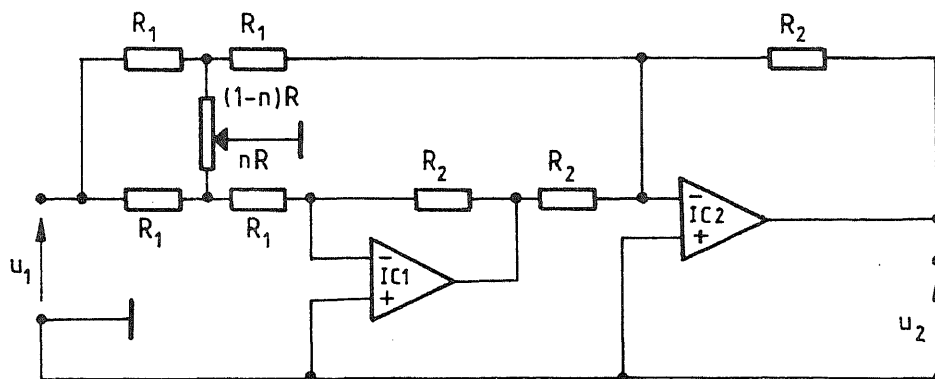
W tym zakresie napięć u_1 , w którym potencjał suwaka jest stały ($u_s \approx u_p$), w obu gałęziach obwodu ($R'_1 - R'_1$ oraz $R''_1 - R'_1$) (rys.11a) płyną różne prądy, których wartości zależą od położenia suwaka potencjometru R_3 . Nachylenie charakterystyki, jakie się wtedy uzyska, oblicza się przyjmując, że $u_p = 0$ (rys.8.12).



Rys. 8.10



Rys. 8.11



Rys. 8.12

Można wykazać, że w takim układzie nachylenie charakterystyki (wzmocnienie) wynosi

$$K(\alpha) = \frac{u_2}{u_1} = \frac{R_2 R_3}{R_1 R_1} \frac{2\alpha - 1}{\left(1 + 2\alpha \frac{R_3}{R_1}\right) \left[1 + 2(1 - \alpha) \frac{R_3}{R_1}\right]}, \quad (8.24)$$

gdzie α – liczba zawarta między 0 i 1, określająca podział opornika R_3 na dwie części.

W układzie przedstawionym na rys.8.10 takie nachylenie charakterystyki otrzymuje się dla $u_1 > +2u_p$ (włączona dioda D1) i dla $u_1 < -2u_p$ (włączona dioda D2). W zakresie $-2u_p < u < 2u_p$ obie diody nie przewodzą i nachylenie charakterystyki wynosi zero. Włączając w układzie z rys.8.10 więcej sekcji diodowych można w dowolny sposób kształtować charakterystykę $u_2(u_1)$ układu. W ten sposób można z przebiegów liniowo zmiennych w czasie doprowadzonych do wejścia u_1 otrzymywać przebiegi o określonych, z góry zadanych kształtach: sinusoidalne, paraboliczne itp.

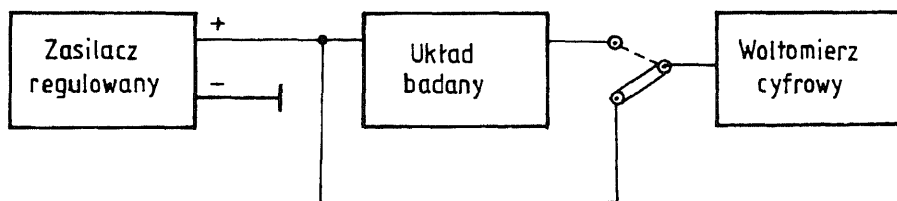
WYKONANIE ĆWICZENIA

W ćwiczeniu wykorzystuje się następujące przyrządy:

- oscyloskop,
- zasilacz,
- zasilacz regulowany,
- generator funkcyjny,
- przyrząd nr 27: analogowe układy funkcyjne,
- woltomierz cyfrowy.

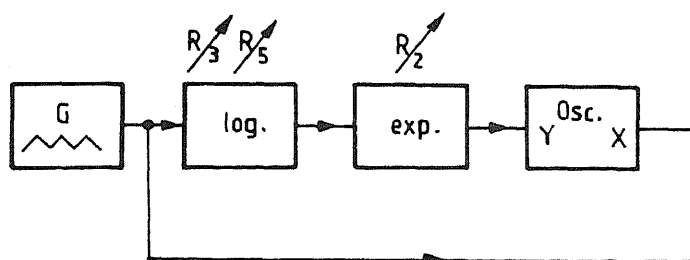
Czynności:

1. Dołączyć do gniazd BNC: wejściowego i wyjściowego wejście i wyjście układu logarytmującego.
2. Zmierzyć charakterystykę $u_{wy}(u_{we})$ w układzie pomiarowym przedstawionym na rys.8.13 dla napięć w przedziale od 0 V do -0,7 V.
3. Dołączyć do gniazd BNC wejście i wyjście wzmacniacza antylogarytmującego.
4. W układzie jak na rys. 8.13 zmierzyć charakterystykę $u_{wy}(u_{we})$ dla napięć wyjściowych w zakresie od zera do +10 V.



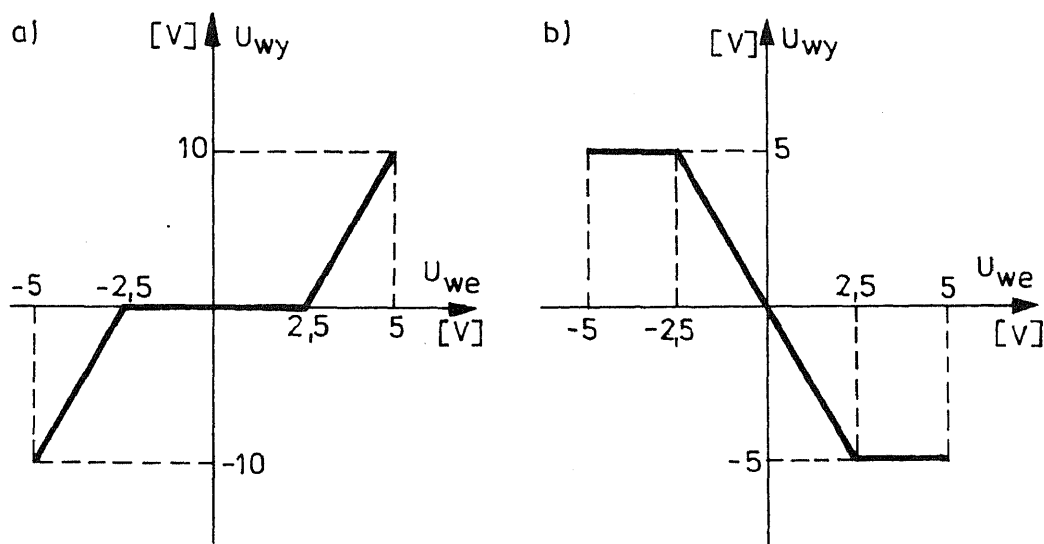
Rys. 8.13

5. Połączyć łańcuchowo układ logarytmujący i antylogarytmujący i zmierzyć ich charakterystykę $u_{wy}(u_{we})$. Dobrać tak wartości R_3 i R_5 (rys. 8.3) oraz R_2 (rys. 8.5), aby charakterystyka była możliwie liniowa. Do strojenia wykorzystać oscyloskop w układzie X-Y i generator funkcyjny (rys.8.14). Po dostrojeniu układu wykonać pomiar woltomierzem cyfrowym.



Rys. 8.14

6. Dołączyć do gniazd BNC wejścia i wyjścia układu mnożącego.
 7. Zmierzyć charakterystyki $u_{11}=f(u_{12})$ dla kilku ustalonych wartości napięcia wyjściowego, np. dla $u_{wy} = +2\text{ V}, +1\text{ V}, 0\text{ V}, -1\text{ V}, -2\text{ V}$.
 8. Dołączyć gniazda BNC do zacisków układu kształtującego.
 9. Dostroić potencjometrami R_3, R_4, R_5, R_6 (rys. 8.10) układ, tak aby jego charakterystyka miała kształt przedstawiony na rys.8.15.



Rys. 8.15

10. Zmierzyć uzyskaną charakterystykę, zanotować wartości α_1 , α_2 , u_p , $-u_n$ (rys. 8.10).

ZADANIA DO OPRACOWANIA

1. Wykreślić krzywe uzyskane w punkcie 2, 4, 7 instrukcji i obliczyć wartości stałych a_1 , a_2 (równanie (8.1)), b_1 , b_2 (równanie (8.6)) oraz a (równanie (8.7)). Podać miana stałych i określić ich zgodność z obliczonymi na podstawie analizy struktury układu (wartości elementów i szczegóły techniczne – do wglądu w laboratorium).
2. Wykreślić i zinterpretować wyniki uzyskane w punkcie 5 instrukcji.
3. Obliczyć charakterystykę przenoszenia układu kształtującego dla zanotowanych w punkcie 10 instrukcji wartości α_1 , α_2 , u_p , $-u_n$; ocenić jej zgodność z charakterystyką zmierzoną.
4. Czemu jest równa oporność wejściowa układów: logarytmującego (rys.8.3) i antylogarytmującego (rys.8.5)?
5. Jakie są zalety i wady układów mnożących przedstawionych na rys.8.6. 8.7 i 8.9?
6. Wykazać, że w układzie z rys.8.9 obowiązuje równanie (8.21). Obliczyć wartość K_1 , która jest potrzebna do wykonania punktu 1.
7. W jaki sposób w układzie przedstawionym na rys.8.10 uzyskać można charakterystykę z rys.8.15b?

LITERATURA

- [1] J. P a w ł o w s k i: Nieliniowe układy analogowe (z serii "Podstawowe układy elektroniczne"). WKiŁ, Warszawa 1979.
- [2] M. N a d a c h o w s k i, Z. K u l k a: Analogowe układy scalone. WKiŁ, Warszawa 1980.
- [3] U. T i e t z e, Ch. S c h e n k: Układy półprzewodnikowe, WNT, Warszawa 1976.