

Ć W I C Z E N I E 19

BADANIE PRZETWORNIKA PIERWIASTKUJĄCEGO, MNOŻĄCEGO I DZIELĄCEGO

19.1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest poznanie zasad działania, techniki wzorcowania oraz podstawowych parametrów metrologicznych przetworników realizujących operację pierwiastkowania, mnożenia i dzielenia sygnałów elektrycznych.

19.2. Wprowadzenie

Przetwornik pomiarowy jest narzędziem służącym do przetwarzania z określoną dokładnością i według określonego prawa, wartości wielkości mierzonej na wartość innej wielkości lub inną wartość tej samej wielkości.

Statyczne własności przetwornika określa zależność między sygnałem wejściowym x a sygnałem wyjściowym y , zwana statyczną funkcją przetwarzania

$$y = f(x). \quad (19.1a)$$

W większości przetworników pożądaną jest, aby funkcja przetwarzania była liniowa typu

$$y = a + bx, \quad (19.1b)$$

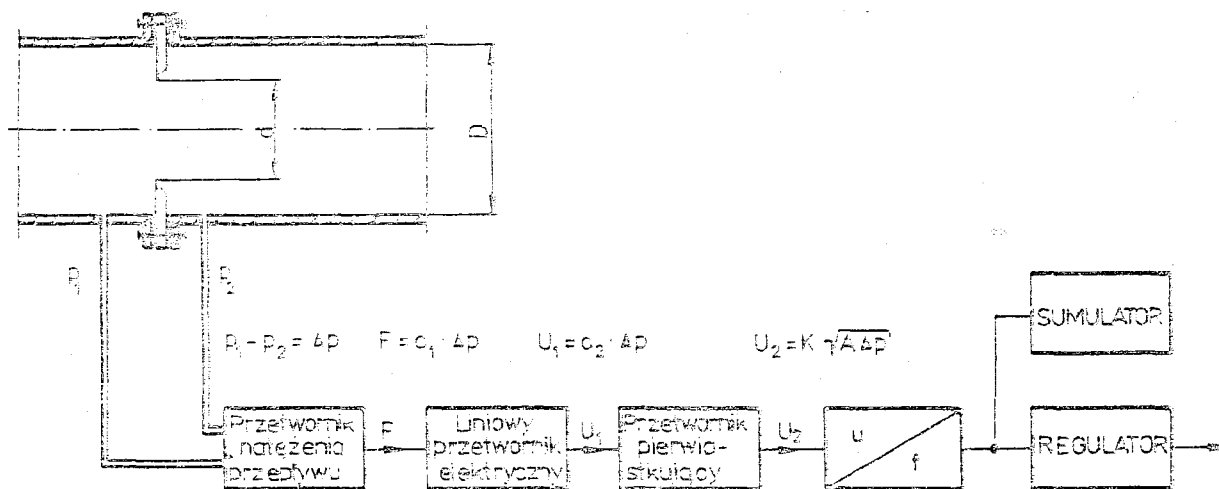
gdzie a i b - stałe.

Technika pomiarów wielkości elektrycznych i nieelektrycznych posługuje się jednak również przetwornikami o charakterystykach nieliniowych realizujących złożone funkcje matematyczne na sygnałach elektrycznych.

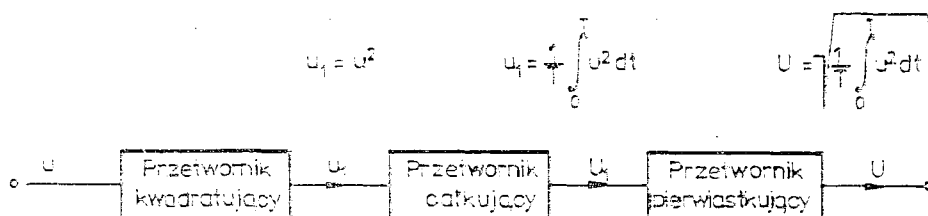
Przykładami najczęściej stosowanych charakterystyk nieliniowych są: charakterystyka kwadratowa ($y = ax^2$) i charakterystyka pierwiastkowa. Pierwsza jest stosowana w pomiarach wielkości elektrycznych, m.in. do wyznaczania wartości skutecznej prądów i napięć przemiennych, druga w pomiarach wielkości nieelektrycznych, m.in. do budowy przepływomierzy.

W prowadzonych rozważaniach często dla uproszczenia przyjmuje się, że w przetwornikach występuje tylko jeden sygnał wejściowy x i jeden

sygnał wyjściowy y . W rzeczywistości przetworniki mogą przetwarzać nie jeden, lecz kilka sygnałów pomiarowych. Wiąże się z tym odpowiednia liczba wejść zwanych wejściami informacyjnymi. Istnieją przetworniki z jednym wejściem informacyjnym, np. amperomierz, z dwoma wejściami, np. watomierz lub przetwornik fazoczuły i wieloma wejściami, np. matryce diodowo-oporowe.



Rys. 19.1. Schemat strukturalny układu do pomiaru napięcia przepływu z przetwornikiem pierwiastkującym



Rys. 19.2. Schemat strukturalny przetwornika wartości skutecznej napięcia

Przykłady wykorzystania przetworników pomiarowych o charakterystykach nieliniowych przedstawiono na rys. 19.1 i 19.2.

Przedstawiona tematyka kontynuowana jest w ćwiczeniu 20, w którym podano rozwiązanie układów wielofunkcyjnego analogowego przetwornika operacyjnego, umożliwiającego realizację złożonych operacji matematycznych.

19.3. Przetworniki pomiarowe o nieliniowych charakterystykach Krajowego Systemu Automatyki i Pomiarów POLMATIK

Krajowy System Automatyki i Pomiarów (ESAP) POLMATIK jest przeznaczony do pomiarów i regulacji procesów wolnozmiennych. W systemie tym

wyróżnia się cztery części: pomiarową, centralną, wykonawczą i sprzęgającą.

Część pomiarowa składa się z czujników i przetworników normujących sygnały przesyłowe.

W skład części centralnej wchodzi między innymi przetworniki normujące sygnały przesyłowe oraz przetworniki realizujące operacje algebraiczne. Sygnałem wewnętrznym części centralnej jest sygnał napięciowy od 0 do 10 V prądu stałego lub przemiennego. Sygnał ten wynika w sposób naturalny z parametrów scalonych wzmacniaczy operacyjnych. Przyjęcie sygnału napięciowego pozwala na stosowanie centralnego zasilacza ze wspólną szyną zerową we wszystkich podzespołach części centralnej. Do przesyłania informacji pomiędzy częściami systemu przyjęto sygnał prądowy o wartości 4–20 mA. Sygnał prądowy eliminuje wpływ zmian rezystancji linii przesyłowej, zmniejsza wpływ szeregowych napięciowych źródeł zakłócających, uniemożliwia zapalenie się łuku, a także pozwala na stosunkowo łatwe ograniczenie mocy sygnału przesyłanego.

Część wykonawcza służy do sterowania obiektami regulacji, natomiast część sprzęgająca umożliwia współpracę systemu KSAP POLMATIK z mikroprocesorem i innymi systemami.

19.3.1. Zasada działania przetwornika pierwiastkującego

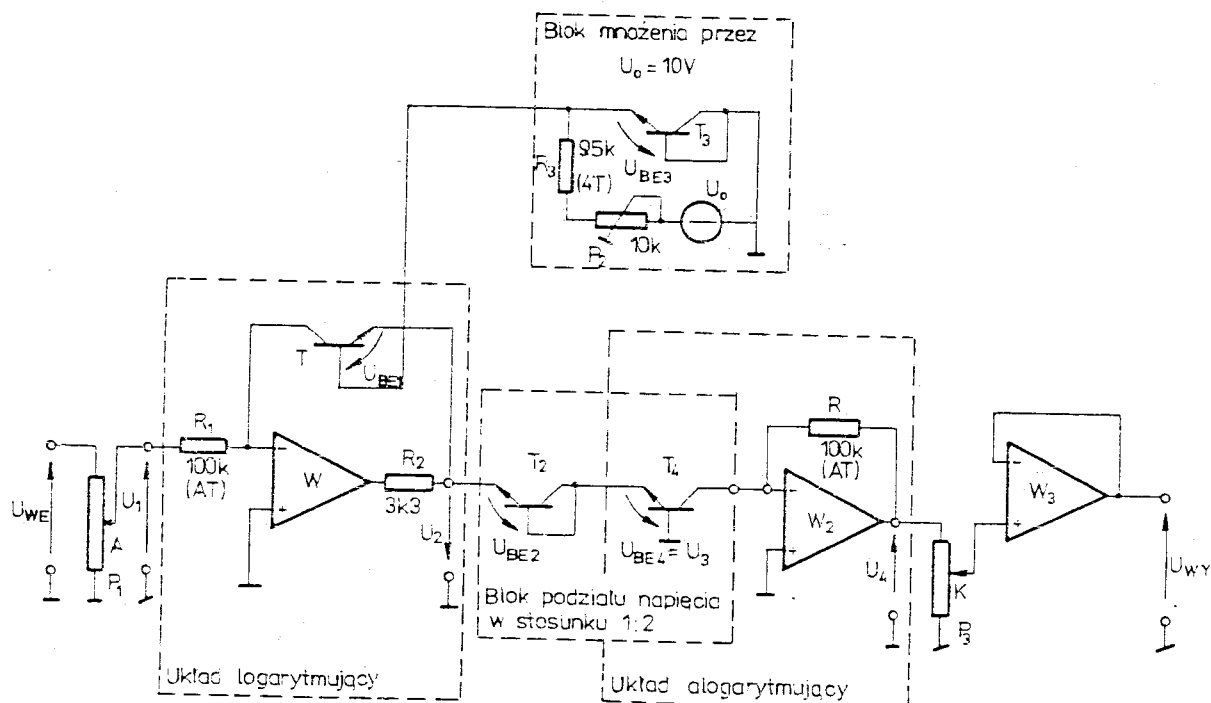
Zasadę działania przetwornika pierwiastkującego, wykonującego operację pierwiastkowania z wykorzystaniem logarytmowania, ilustruje układ podany na rys. 19.5. Sygnał wejściowy U_{we} doprowadzony do potencjometru P_1 , mnożony jest w zależności od położenia jego suwaka w zakresie $a : 0 \dots 1$. Następnie napięcie $U_1 = a U_{we}$ zostaje pomnożone w układzie mnożenia przez liczbę stałą 10 i zlogarytmowane przez wzmacniacz logarytmujący. Operacja pierwiastkowania odbywa się przez podział napięcia U_2 w stosunku 1/2. Sygnał $U_3 = U_2/2$ jest podany na wzmacniacz algorytmujący o charakterystyce wykładniczej.

Napięcie U_4 zostaje następnie pomnożone przez współczynnik $K = 0 \dots 1$, nastawiany potencjometrem P_3 . Na wyjściu wtórnika napięcia W_3 otrzymano napięcie U_{wy} wyrażone wzorem

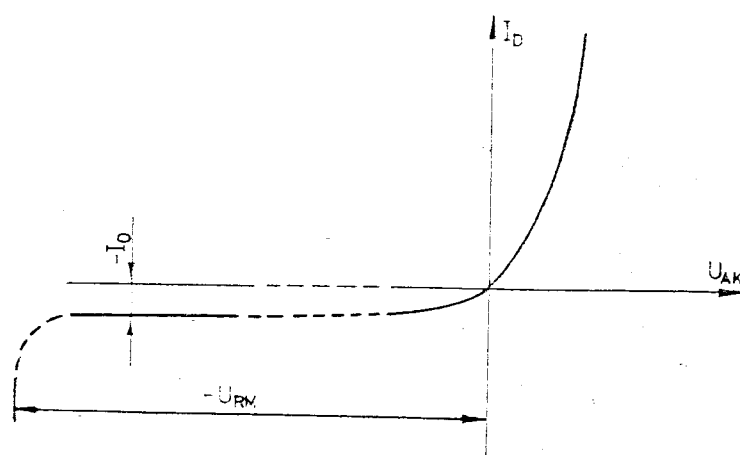
$$U_{wy} = K \sqrt{10 a U_{we}} = K \sqrt{10} \sqrt{a U_{we}} \quad (19.2)$$

19.3.2. Sposób realizacji operacji logarytmowania

Operacje logarytmowania są przeprowadzane z wykorzystaniem właściwości złącza p-n diod i tranzystorów opisanych zależnościami wykładniczymi. Charakterystykę złącza p-n pokazaną na rys. 19.4 opisuje relacja



Rys. 19.3. Przetwornik wykonujący operacje pierwiastkowania na podstawie zasady logarytmowania



Rys. 19.4. Charakterystyka złącza p-n

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{U_{AK}}{\frac{kT}{q}} \right) - 1 \right] = I_0 \left[\exp \left(\frac{U_{AK}}{U_m} \right) - 1 \right], \quad (19.3)$$

- I_D - prąd płynący przez złącze,
- I_0 - wsteczny prąd nasycenia złącza,
- U_{AK} - napięcie występujące na złączu,
- k - stała Boltzmana,

T - temperatura złącza,
 q - ładunek elektronu,
 U_T - potencjał termiczny.

Prąd I_D płynący przez złącze p-n osiąga wartość $-I_0$, gdy napięcie U_{AK} dąży do maksymalnej wartości napięcia wstecznego $-U_{RM}$. Wsteczny prąd nasycenia dla złącza germanowego wynosi około $1 \mu A$, a dla krzemowego około $1 nA$.

Przy założeniu, że $\exp(U_{AK}/U_T) \gg 1$, równanie (19.3) można przekształcić do postaci

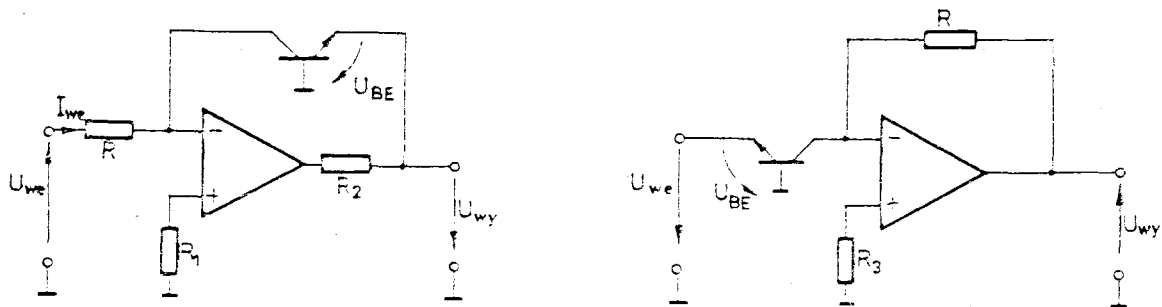
$$I_D = I_0 \exp\left(\frac{U_{AK}}{U_T}\right) \quad (19.4a)$$

lub

$$U_{AK} = U_T \ln \frac{I_D}{I_0} \quad (19.4b)$$

Przyjmuje się, że nierówność ta jest spełniona przy temperaturze złącza $T = 300 K$, gdy napięcie na złączu krzemowym $U_{AK} \geq 100 mV$. W temperaturze $T = 300 K$ potencjał termiczny $U_T = 26 mV$.

Operacje logarytmowania i alogarytmowania realizują układy pokazane na rys. 19.5.



Rys. 19.5. Układy realizujące operacje: a - logarytmowania, b - alogarytmowania

W układzie logarytmującym zachodzą zależności

$$I_{we} = I_D; \quad U_{BE} = U_{wy} \quad (19.5)$$

zatem na podstawie równania (19.4a) można zapisać

$$U_{wy} = U_T \ln \frac{I_{we}}{I_{0CB}} = U_T \ln \frac{U_{we}}{RI_{0CB}} \quad (19.6)$$

W układzie alogarytmującym

$$I = I_D; \quad U_{BE} = U_{we}, \quad (19.7)$$

stąd na podstawie zależności (19.4a)

$$U_{wy} = R I_{oB} \exp \frac{U_{we}}{U_T}. \quad (19.8)$$

Zależności (19.6) i (19.8) będą prawidłowo realizowane, gdy:

- wzmacniacze operacyjne będą miały odpowiednio małe prężanie zera oraz odpowiednio dużą wartość wzmocnienia, taką że o charakterystykach układów decydować będą własności złącz p-n,
- wejściowe prądy polaryzacji będą pomijalnie małe w porównaniu z przetwarzanymi sygnałami.

W układach logarytmujących i alogarytmujących są preferowane wzmacniacze operacyjne o małych prądach polaryzacji.

Przydatność wzmacniaczy operacyjnych do układów logarytmujących ocenić można na podstawie tab. 19.1.

T a b e l a 19.1

Wybrane parametry wzmacniaczy operacyjnych

Nazwa wzmacniacza		μA709	μA741	MC1531	LM108	μA740	LF156	CA 3140A	HA 2900
Rozwiązanie stopnia wejściowego		standard.	standard.	darlington.	super-beta	FET	B _i -FET	B _i -MOS	z przetwarz.
Wejściowy prąd polaryzacji	nA	500	500	150	2	0,2	0,1	0,04	0,15
Wejściowy prąd nierównoważenia	nA	200	200	25	0,2	0,04	0,02	0,02	0,05
Współcz. ciepłoty wejściowego napięcia nierównoważonego	KV/°C	3	6	20	15	50	5	5	0,6
Wzmocnienie z otwartą pętlą	V/V	2,5 · 10 ⁴	5 · 10 ⁴	2,5 · 10 ³	5 · 10 ⁴	3 · 10 ⁴	2,5 · 10 ⁷	10 ⁵	10 ⁶

W układach logarytmujących z tranzystorami wzmocnienie wypadkowe (pętlowe) podwyższa tranzystor o wartość swego wzmocnienia napięciowego. Gdy jest zbyt duże wzmocnienie wzmacniacza, układ ma skłonność do wzbudzenia się. Wzmocnienie napięciowe tranzystora zmniejsza się przez włą-

czenie do układu rezystora R_2 o odpowiednio dobranej wartości. Zapas stabilności układu można dodatkowo zwiększyć przez wprowadzenie różniczkującej pętli sprzężenia zwrotnego, którą realizuje kondensator włączony między wyjściem wzmacniacza a wejściem odwracającym wzmacniacza.

19.3.3. Szczegółowa analiza układu

Układ pierwiastkujący przedstawiony na rys. 19.3 opisuje równanie charakteryzujące spadki napięć występujące na złączach baza-emiter tranzystorów

$$U_{BE1} + U_{BE3} = U_2 = U_{BE2} + U_{BE4}. \quad (19.9)$$

Napięcie podane na wzmacniacz operacyjny W_1 jest określone zależnością

$$U_1 = a U_{we}; \quad a = 0-1. \quad (19.10)$$

Napięcie występujące na złączach baza-emiter tranzystorów T_1 i T_3 zgodnie z równaniem (19.6) określają wzory

$$U_{BE1} = U_T \ln \frac{U_1}{R_1 I_{oB1}} = U_T \ln \frac{a U_{we}}{R_1 I_{oB1}}, \quad (19.11)$$

$$U_{BE3} = U_T \ln \frac{I_3}{I_{oB3}} = U_T \ln \frac{U_o}{(R_3 + R_{P2}) I_{oB3}}. \quad (19.12)$$

Tranzystor T_2 łącznie z tranzystorem T_4 tworzą dzielnik napięcia, dzielący napięcie U_2 w stosunku 1/2, umożliwiając wykonanie operacji pierwiastkowania drugiego stopnia.

Napięcie na złączach baza-emiter tranzystorów T_2 i T_4 określa zależność

$$U_{BE2} = U_{BE4} = \frac{1}{2} U_2. \quad (19.13)$$

Napięcie U_{BE4} zgodnie z równaniem (19.8) przetwarza układ algorytmujący na napięcie U_4

$$U_4 = R_4 I_{oB4} \exp \frac{U_{BE4}}{U_T}. \quad (19.14)$$

Po podstawieniu do równania (19.14) zależności (19.9)-(19.13) otrzymano

$$U_4 = R_4 I_{oB4} \sqrt{\frac{a U_o U_{we}}{R_1 (R_3 + R_{P2}) I_{oB1} I_{oB3}}}. \quad (19.15)$$

Prądy wsteczne baz tranzystorów zostaną wyrugowane z równania (19.15), gdy w układzie będą zamontowane tranzystory o identycznych parametrach. Warunek ten łatwo można spełnić przez zastosowanie w module pierwiastkującym układu monolitycznego UL 1111. W układzie tym obowiązuje zależność

$$I_{OB1} = I_{OB2} = I_{OB3} = I_{OB4}. \quad (19.16a)$$

Po przyjęciu, że

$$R_1 = R_4, \quad (19.16b)$$

$$U_0 \frac{R_4}{R_3 + R_{P2}} = 10 \text{ V} \quad (19.16c)$$

otrzymano wyrażenie określające napięcie U_4

$$U_4 = \sqrt{10 \text{ a } U_{we}} = \sqrt{A U_{we}}. \quad (19.17)$$

Napięcie U_4 jest podane na potencjometr P_3 , służący do nastawiania współczynnika K , a następnie na wtórnik napięciowy. Na wyjściu wtórnika występuje napięcie

$$U_{wy} = K \sqrt{A U_{we}}. \quad (19.18)$$

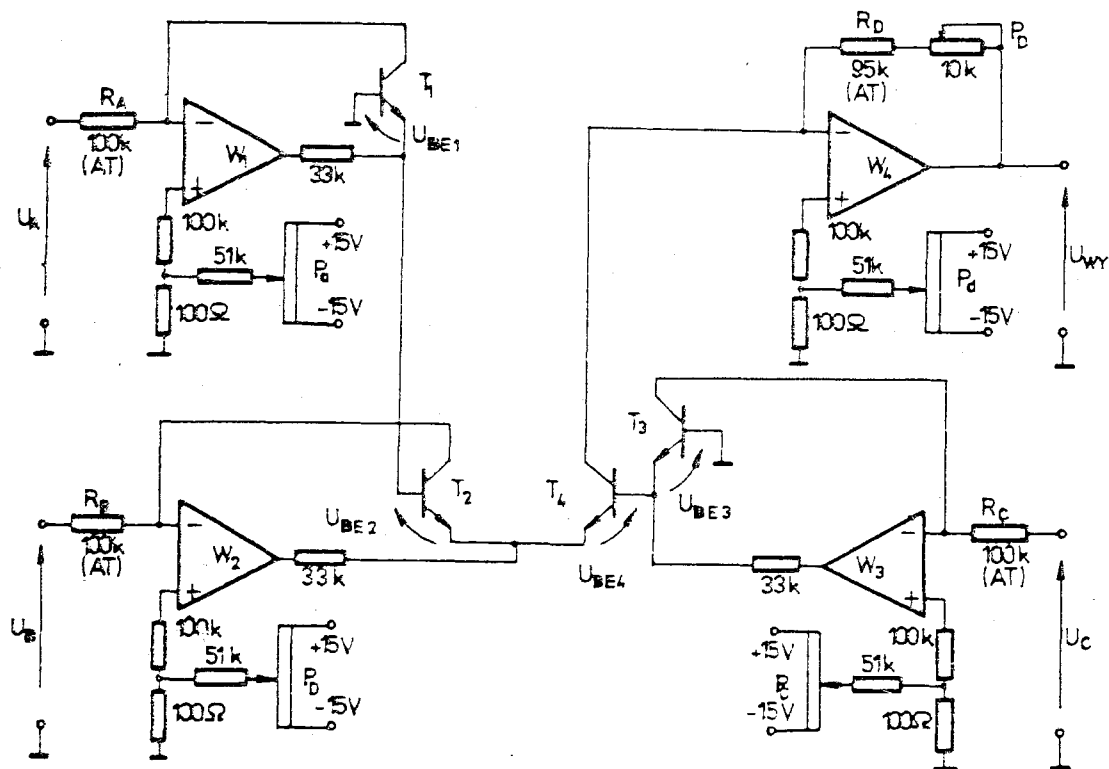
Ze wzoru (19.15) oraz relacji (19.16a), (19.16b) i (19.16c) wynika, że niedokładność operacji pierwiastkowania zależy od

- identyczności parametrów tranzystorów T_1, T_2, T_3, T_4 ,
- dokładności rezystancji rezystorów R_1 i R_4 ,
- stałości napięcia U_0 i rezystancji rezystorów R_3 i R_{P1}, R_{P2}, R_{P3} .

Wzór (19.15) dowodzi, że wpływ zmian napięcia U_0 , rezystancji rezystorów R_{P1}, R_{P2}, R_1 i R_3 na wynik operacji pierwiastkowania jest dwukrotnie mniejszy, ponieważ wielkości te występują pod pierwiastkiem drugiego stopnia. Zmiany rezystancji R_4 i rezystancji R_{P3} bezpośrednio oddziałują na wynik pomiaru.

19.4. Zasada działania przetwornika mnożąco-dzielącego

Układ pokazany na rys. 19.6 wykonuje operację mnożenia i dzielenia zgodnie ze wzorem



Rys. 19.6. Zasada działania przetwornika mnożąco-dzielącego

$$U_{wy} = \frac{U_A U_B}{U_C} \quad (19.19)$$

na podstawie zasady logarytmowania i alogarytmowania, która zwięza działania matematyczne na wielkościach A, B i C do obszaru I ćwiartki współrzędnych prostokątnych.

Sygnaly wejściowe U_A , U_B i U_C podlegają operacji logarytmowania z wykorzystaniem wzmacniaczy W_1 , W_2 i W_3 . Następnie są sumowane zlogarytmowane sygnaly U_A i U_B i od ich sumy jest odejmowany zlogarytmowany sygnal U_C . Uzyskany sygnal $\ln U_A + \ln U_B - \ln U_C$ jest alogarytmowany za pomocą wzmacniacza W_4 .

Szczegółowa analiza układu

Działanie układu jest oparte na porównaniu spadków napięć występujących na złączach emiter-baza tranzystorów T_1 , T_2 , T_3 i T_4 , powiązanych relacją

$$U_{BE1} + U_{BE2} = U_{BE3} + U_{BE4}. \quad (19.20)$$

Napięcia występujące na złączach tranzystorów T_1 , T_2 , T_3 zgodnie z zależnością (19.6) określono wzorami

$$U_{BE1} = \frac{kT}{q} \ln \frac{U_A}{R_A I_{CB1}}, \quad (19.21)$$

$$U_{BE2} = \frac{kT}{q} \ln \frac{U_B}{R_B I_{CB2}}, \quad (19.22)$$

$$U_{BE3} = \frac{kT}{q} \ln \frac{U_C}{R_C I_{CB3}}. \quad (19.23)$$

Po wprowadzeniu równań (19.21)-(19.23) do zależności (19.20) otrzymuje się

$$U_{BE4} = \frac{kT}{q} \ln \frac{U_A U_B R_C I_{CB3}}{U_C R_A R_B I_{CB1} I_{CB2}}. \quad (19.24)$$

Gdy napięcia baza-emiter tranzystora T_4 , $U_{BE4} \geq 100$ mV, wówczas prąd I_{C4} kolektora tranzystora T_4 jest powiązany z napięciem U_{BE4} relacją

$$I_{C4} = I_{CB4} \exp \left(\frac{q}{kT} U_{BE4} \right). \quad (19.25)$$

Po podstawieniu wyrażenia (19.24) do wzoru (19.25) otrzymuje się

$$I_{C4} = \frac{U_A U_B R_C I_{CB3} I_{CB4}}{U_C R_A R_B I_{CB1} I_{CB2}}. \quad (19.26)$$

Jeżeli zastosowane tranzystory będą miały wstępne prądy nasycenia tranzystorów o tej samej wartości, to

$$I_{CB1} = I_{CB2} = I_{CB3} = I_{CB4}. \quad (19.27)$$

Warunek ten w wystarczającym stopniu jest spełniony, ponieważ w układzie zastosowano obwód scalony UL 1111, zawierający pięć tranzystorów wykonanych w jednym kryształu i w tym samym procesie technologicznym.

Po uwzględnieniu, że

$$U_{wy} = (R_D + R_{PD}) I_{C4} \quad (19.28)$$

otrzymano wyrażenie opisujące operację mnożenia i dzielenia

$$U_{wy} = c \frac{U_A U_B}{U_C}, \quad (19.29)$$

gdzie

$$C = \frac{R_C(R_D + R_{PD})}{R_A + R_B} - \text{stała przetwornika.}$$

Z przedstawionej analizy działania układu wynika, że dokładność operacji mnożenia i dzielenia zależy od:

- identyczności parametrów tranzystorów T_1, T_2, T_3 i T_4 ,
- właściwości wzmacniaczy operacyjnych,
- niedokładności i stałości wartości rezystorów R_A, R_B, R_C, R_D i R_{PD} .

Z zasady działania przetwornika pokazanego na rys. 19.6 wynika również, że operacje dzielenia i mnożenia można przeprowadzić na sygnałach prądowych i napięciowych lub ich sumach.

19.5. Analiza metrologiczna układu pomiarowego do wyznaczania błędów przetworników

Analizę metrologiczną układu pomiarowego do wyznaczania błędów przetworników przedstawionych w p. 19.3 podano na przykładzie układu do badania przetwornika pierwiastkującego. Błędy przetwornika określa się dla zadanych wartości A i K przez pomiar napięcia wejściowego U_{we} i wyjściowego U_{wy} przetwornika i podstawienie wartości tych wielkości do wzoru

$$\delta P = \frac{U_{wy} - K \sqrt{A U_{we}}}{U_{wyn}} = \frac{U_{wy} - K \sqrt{A U_{we}}}{10}, \quad (19.30)$$

U_{wyn} - znamionowe napięcie wyjściowe, dla analizowanych przetworników
 $U_{wyn} = 10 \text{ V}$.

Niedokładność wyznaczenia błędu przetwornika $\Delta(\delta P)$ określono na podstawie zależności (19.30)

$$\delta P \pm \Delta(\delta P) = \frac{U_{wy} \pm \Delta U_{wy} - (K \pm \Delta K) \sqrt{(A \pm \Delta A)(U_{we} \pm \Delta U_{we})}}{10}. \quad (19.31)$$

$\Delta U_{wy}, \Delta K, \Delta A, \Delta U_{we}$ - bezwzględne błędy graniczne systematyczne pomiaru odpowiednio: napięcia U_{wy} , nastawy wartości K , nastawy wartości A , napięcia U_{we} .

Na podstawie wzoru uproszczonego pierwiastkowania, który jest spełniony z wystarczającą dokładnością, ponieważ $A \gg \Delta A$ i $U_{we} \gg \Delta U_{we}$, oraz po prostych przekształceniach, otrzymano zależność

$$\delta P \pm \Delta(\delta P) = \frac{U_{wy} - K \sqrt{A U_{we}}}{10} \pm \frac{U_{wy} \delta U_{wy} + K \sqrt{A U_{we}} \left[\frac{1}{2} (\delta U_{we} + \delta A) + \delta K \right]}{10}, \quad (19.32)$$

δU_{wy} , δK , δA , δU_{we} - względne błędy graniczne systematyczne.

We wzorze tym, zgodnie z zależnością (19.31), pierwszy wyraz określa błąd przekładnika pierwiastkującego, drugi zaś wyraz opisuje niedokładność wyznaczenia błędu tego przetwornika.

Błąd przetwornika mnożąco-dzielącego i niedokładność wyznaczenia błędu przetwornika wyznacza się na podstawie analogicznego rozumowania.

19.6. Program ćwiczenia

I. Badanie przetwornika pierwiastkującego

1. Wyznaczyć błąd podstawowy układu pierwiastkującego dla dwóch wartości współczynnika A i K .

2. Wyznaczyć błąd dodatkowy układu pierwiastkującego dla przyjętych współczynników A i K , gdy temperatura otoczenia wynosi 40°C .

II. Badanie przetwornika mnożąco-dzielącego

1. Przygotowanie układu do wykonywania operacji matematycznych

a) gdy $U_A = U_B = 0$, $U_C = +10\text{ V}$, regulujemy potencjometrem P_d tak aby $U_{wy} = 0$,

b) gdy $U_A = 0$, $U_B = U_C = +10\text{ V}$, regulujemy potencjometrem P_a tak aby $U_{wy} = +0$,

c) gdy $U_B = 0$, $U_A = U_C = +10\text{ V}$, regulujemy potencjometrem P_b tak, aby $U_{wy} = +0$,

d) gdy $U_A = +10\text{ V}$, $U_B = U_C = \text{var}$, regulujemy potencjometrem P_c tak, aby $U_{wy} = \text{const}$,

e) gdy $U_A = U_C = \text{var}$, $U_B = +10\text{ V}$, regulujemy potencjometrem P_c tak, aby $U_{wy} = \text{const}$,

f) ostatnią operacją jest wzorcowanie; na wejścia podajemy napięcia o wartości $U_A = U_B = U_C = +10\text{ V}$ i regulujemy potencjometrem P_d tak, aby napięcie $U_{wy} = +10\text{ V}$.

2. Wyznaczyć błąd podstawowy układu

- a) gdy $U_A = U_C = +10 \text{ V}$ i $U_B = \text{var}$, badanie układu mnożącego,
 b) gdy $U_B = U_C = +10 \text{ V}$ i $U_A = \text{var}$, badanie układu mnożącego,
 c) gdy $U_A = +10 \text{ V}$ i $U_B = U_C = \text{var}$, badanie układu dzielącego,
 d) gdy $U_B = +10 \text{ V}$ i $U_A = U_C = \text{var}$, badanie układu dzielącego.

3. Wyznaczyć błąd dodatkowy układu dla temperatury otoczenia $t = 40^\circ\text{C}$.

Wyniki pomiarów podać w formie tabelarycznej (tab. 19.2 i 19.3) i graficznej.

Wzorcowe tabele pomiarów podano dla przetwornika pierwiastkującego.

T a b e l a 19.2

Błędy przetwarzania przetwornika pierwiastkującego

$t = \dots^\circ\text{C}$

Lp	A	δA	K	δK	U_{we}	δU_{we}	U_{wy}	δU_{wy}	$K\sqrt{AU_{we}}$	$\delta P \pm \Delta(\delta P)$
	-	%	-	%	V	%	%	%	V	%

T a b e l a 19.3

Podatność przetwornika pierwiastkującego na zmiany temperatury

Lp	A	δA	K	δK	t	U_{we}	δU_{we}	U_{wy}	δU_{wy}	$K\sqrt{AU_{we}}$	$\delta P \pm \Delta(\delta P)$
	-	%	-	%	$^\circ\text{C}$	V	%	V	%	V	%

LITERATURA

- [1] KULKA Z., KADACHOWSKI M., Liniowe układy scalone i ich zastosowania, WKiŁ, Warszawa 1974.
 [2] KULKA Z., KADACHOWSKI M., Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowanie, cz. 2, Realizacje praktyczne, WNT, Warszawa 1982.
 [3] SHEINGOLD D.H., Nonlinear circuits handbook, Norwood, Massachusetts USA, Analog Device, Inc. 1976.