

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **220272**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **397074**

(51) Int.Cl.  
**G01R 21/02 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **22.11.2011**

(54)

**Sposób i układ do pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:

**27.05.2013 BUP 11/13**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:

**30.09.2015 WUP 09/15**

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**MIROSLAW MAGNUSKI, Piekary Śląskie, PL**

(74) Pełnomocnik:

**rzec. pat. Urszula Ziółkowska**

**PL 220272 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych wykorzystujący bolometr a w szczególności bolometr termistorowy oraz automatyczny układ pomiarowy przeznaczony do pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych za pomocą bolometru.

Znany sposób pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych wykorzystujący bolometr polega na utrzymywaniu założonej rezystancji bolometru poprzez automatyczne zrównoważenie mostka, którego jednym z ramion jest bolometr – co objawia się ustaleniem zerowego napięcia na właściwej przekątnej mostka. W znanym układzie automatycznie zrównoważonego mostka osiąga się przez to, że mostek jest zasilany napięciem stałym z wyjścia wzmacniacza różnicowego, którego wejścia dołączone są do przekątnej mostka w taki sposób, że układ pracuje z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Napięcie zasilające mostek, będące napięciem na wyjściu wzmacniacza, ma zawsze taką wartość by rezystancja bolometru osiągnęła wartość, dla której występuje zrównoważenie mostka. Doprowadzenie sygnału mierzonego do bolometru zakłóca równowagę mostka, powrót do stanu równowagi wymaga zmiany napięcia zasilania mostka przeprowadzonej w taki sposób aby suma składowych mocy wydzielanych w bolometrze pochodzących od sygnału i od układu zasilania napięciem stałym powodowała nagrzanie bolometru do temperatury, dla której jego rezystancja ma wartość powodującą zrównoważenie mostka. Zmiana składowej mocy wydzielanej w bolometrze pochodząca od układu zasilania, która może być określona za pomocą znanych zależności matematycznych, spowodowana doprowadzeniem bolometru napięcia mierzonego jest proporcjonalna do mocy sygnału mikrofalowego doprowadzonego do bolometru.

Znany automatyczny układ pomiarowy wykorzystywany do pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych za pomocą bolometru zbudowany jest z mostka Wheatstone'a, którego jedno ramię stanowi bolometr i wzmacniacza różnicowego napięcia stałego o dużym wzmocnieniu i konstrukcji umożliwiającej wstępne spolaryzowanie mostka Wheatstone'a.

Sposób według wynalazku polega na tym, że zmiana rezystancji bolometru spowodowana jego ogrzaniem powoduje zmianę przesunięcia fazowego wnoszonego przez przesuwnik fazowy, którego przesunięcie fazowe jest funkcją rezystancji bolometru, przesuwnik fazowy jest pobudzany z generatora sinusoidalnego, kąt fazowy napięcia występującego na wyjściu przesuwnika jest porównywany z kątem fazowym napięcia występującego na jego wejściu w detektorze fazowym, napięcie z wyjścia detektora fazowego poprzez filtr podawane jest na wejście sterowanego źródła prądowego, którego prąd wyjściowy polaryzuje bolometr w taki sposób, aby przesunięcie fazowe wnoszone przez przesuwnik miało zadaną wartość, w trakcie pomiaru określa się dwie wartości napięcia stałego na wyjściu filtru występujące dla stanu układu, w którym do bolometru doprowadzono napięcie mierzone i dla stanu, w którym bolometr nie jest pobudzany napięciem mierzonym, moc sygnału mierzonego doprowadzonego do bolometru wyznacza się stosując znaną zależność matematyczną na podstawie znajomości dwóch napięć stałych zmierzonych w trakcie pomiaru na wyjściu filtru.

Układ pomiarowy według wynalazku charakteryzuje się tym, że zbudowany jest z bolometru, generatora sinusoidalnego, układu zasilania bolometru, który posiada dwa wejścia i dwa wyjścia, detektora fazy, który posiada dwa wejścia i jedno wyjście oraz z aktywnego filtru proporcjonalno-całkującego, bolometr dołączony jest do pierwszego wyjścia układu zasilania bolometru, generator sygnału sinusoidalnego dołączony jest do pierwszego wejścia układu zasilania bolometru oraz do pierwszego wejścia detektora fazy, drugie wejście detektora fazy dołączone jest do drugiego wyjścia układu zasilania bolometru, wyjście detektora fazy dołączone jest do wejścia filtru aktywnego proporcjonalno-całkującego, wyjście filtru dołączone jest do drugiego wejścia układu zasilania bolometru, wyjściem układu pomiarowego jest wyjście filtru proporcjonalno-całkującego.

Układ zasilania bolometru charakteryzuje się tym, że jest zbudowany z trzech wzmacniaczy operacyjnych, ośmiu rezystorów i dwóch kondensatorów, pierwszym wejściem układu jest jedno z doprowadzeń pierwszego rezystora, drugim wejściem układu jest jedno z doprowadzeń drugiego rezystora pozostałe doprowadzenia wymienionych rezystorów dołączone są do wejścia odwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego, do wejścia odwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego dołączone jest również jedno z doprowadzeń trzeciego rezystora oraz jedno z doprowadzeń czwartego rezystora drugie doprowadzenie czwartego rezystora dołączone jest do wyjścia pierwszego wzmacniacza operacyjnego, do wyjścia pierwszego wzmacniacza operacyjnego dołączone jest również jedno z doprowadzeń piątego rezystora, drugie doprowadzenie piątego rezystora dołączone jest do pierwszego wyjścia układu zasilania bolometru, pierwszego kondensatora, drugiego kondensatora

i szóstego rezystora, drugie doprowadzenie drugiego kondensatora jest dołączone do masy układu, drugie doprowadzenie pierwszego kondensatora jest dołączone do wejścia nieodwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego, do tego wejścia dołączone jest również pierwsze doprowadzenie ósmego rezystora i wejście nieodwracające trzeciego wzmacniacza operacyjnego, drugie doprowadzenie szóstego rezystora dołączone jest do wejścia odwracającego drugiego wzmacniacza operacyjnego, wejście nieodwracające drugiego wzmacniacza operacyjnego jest dołączone do masy układu, do wejścia odwracającego drugiego wzmacniacza operacyjnego dołączone jest również pierwsze doprowadzenie siódmego rezystora, drugie doprowadzenie siódmego rezystora dołączone jest do wyjścia drugiego wzmacniacza operacyjnego, do wyjścia drugiego wzmacniacza operacyjnego dołączone jest również drugie doprowadzenie trzeciego rezystora, drugim wyjściem układu zasilania bolometru jest wyjście trzeciego wzmacniacza operacyjnego, do wyjścia trzeciego wzmacniacza operacyjnego dołączone jest jego wejście odwracające.

Układ pomiarowy według wynalazku posiada właściwości metrologiczne zbliżone do układu mostka o automatycznym równoważeniu. Układ pomiarowy wykorzystujący zależności fazowe do stabilizacji punktu pracy bolometru jest mniej wrażliwy na zakłócenia niż układ stałoprądowy posiadający w swej konstrukcji wzmacniacz o bardzo dużym wzmocnieniu, dzięki czemu może posiadać większą czułość. W układzie według wynalazku łatwiej jest również uzyskać odpowiedni stopień ekranowania kabla w przypadku połączenia układu pomiarowego z bolometrem za pomocą kabla, niż w przypadku układu zawierającego wzmacniacz prądu stałego o dużym wzmocnieniu pracujący ze sprzężeniem zwrotnym, którego jedno z wejść dołączone jest do przewodu kabla łączącego bolometr ze wzmacniaczem.

Wynalazek przedstawiono w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat blokowy układu pomiarowego przeznaczonego do pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych za pomocą bolometru a fig. 2 schemat ideowy układu zasilania bolometru.

Układ pomiarowy według wynalazku zbudowany jest z generatora sinusoidalnego ( $G$ ), układu zasilania bolometru ( $UZB$ ), detektora fazowego ( $DF$ ) i aktywnego filtra proporcjonalno-całkującego ( $F$ ). Generator ( $G$ ) pracuje na częstotliwości akustycznej, jako generator można wykorzystać scalony syntezer DDS. Układ zasilania bolometru ( $UZB$ ) posiada dwa wejścia ( $W_{e1}$ ) i ( $W_{e2}$ ) i dwa wyjścia ( $W_{y1}$ ) i ( $W_{y2}$ ), na pierwsze wejście układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) podawane jest napięcie stałe służące do polaryzacji bolometru, od wejścia pierwszego ( $W_{e1}$ ) do wyjścia pierwszego ( $W_{y1}$ ), do którego dołączony jest bolometr, układ zasilania bolometru ( $UZB$ ) jest idealnym źródłem prądowym sterowanym napięciem, na drugie wejście ( $W_{e2}$ ) układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) podawane jest napięcie z generatora akustycznego ( $G$ ), od drugiego wejścia ( $W_{e2}$ ) do drugiego wyjścia ( $W_{y2}$ ) układ zasilania bolometru ma charakter filtra pasmowo-przepustowego, którego przesunięcie fazowe i częstotliwość środkowa są funkcją rezystancji bolometru dołączonego do pierwszego wyjścia ( $W_{y1}$ ). Przesunięcie fazowe występujące w układzie zasilania bolometru na drodze pomiędzy drugim wejściem ( $W_{e2}$ ) tego układu a jego drugim wyjściem ( $W_{y2}$ ), dla nominalnej rezystancji bolometru, wynosi zero stopni. Częstotliwość środkowa toru układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) od wejścia ( $W_{e2}$ ) do wyjścia ( $W_{y2}$ ) jest równa częstotliwości sygnału sinusoidalnego wytwarzanego przez generator ( $G$ ). Detektor fazowy ( $DF$ ) służy do porównania kąta fazowego sygnału sinusoidalnego występującego na wyjściu ( $W_{y2}$ ) układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) z kątem fazowym napięcia występującym na wyjściu generatora ( $G$ ). Jako detektor fazowy można wykorzystać każdy układ o znanej konstrukcji, który charakteryzuje się zerową wartością napięcia wyjściowego dla sygnałów wejściowych o różnicy kątów fazowych zero stopni. Napięcie z wyjścia detektora fazowego ( $DF$ ) podawane jest na aktywny filtr proporcjonalno-całkujący ( $F$ ) o znanej konstrukcji. Napięcie z wyjścia filtra ( $F$ ) podawane jest na pierwsze wejście ( $W_{e1}$ ) układu zasilania bolometru ( $UZB$ ). Wyjściem układu pomiarowego przeznaczonego do pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych za pomocą bolometru jest wyjście filtra proporcjonalno-całkującego ( $F$ ). Układ pomiarowy pracuje z ujemnym sprzężeniem zwrotnym stabilizując wartość mocy wydzielanej w bolometrze w taki sposób, że w stanie ustalonym utrzymuje zerowe przesunięcie toru występującego w układzie zasilania bolometru pomiędzy wejściem ( $W_{e2}$ ) a wyjściem ( $W_{y2}$ ), którego przesunięcie fazowe jest funkcją rezystancji bolometru. Rezystancja bolometru jest funkcją mocy sygnału mierzonego i mocy doprowadzonej do bolometru z układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) poprzez tor układu zasilania bolometru o wejściu ( $W_{e1}$ ), który to tor ma charakter sterowanego napięciem źródła prądowego. Pomiar mocy ( $P$ ) sygnału mikrofalowego za pomocą układu według wynalazku polega na określeniu dwóch wartości napięcia stałego ( $U_1$ ), ( $U_2$ ) występujących na wyjściu filtra proporcjonalno-całkującego ( $F$ ) (wejściu ( $W_{e1}$ ) układu zasilania bolometru) występujących odpowiednio; dla przypadku, w którym bolometr nie

jest pobudzony mierzonym sygnałem mikrofalowym i dla przypadku, w którym do bolometru doprowadzono mierzony sygnał mikrofalowy i zastosowaniu zależności

$$P = g_{m1}^2 R (U_2^2 - U_1^2)$$

w której ( $R$ ) oznacza rezystancję widzianą na doprowadzeniach bolometru określoną dla temperatury roboczej bolometru, a ( $g_{m1}$ ) oznacza transkonduktancję występującą między wejściem ( $W_{e1}$ ) układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) a jego wyjściem ( $W_{y1}$ ).

Układ zasilania bolometru jest zbudowany z trzech wzmacniaczy operacyjnych ( $WO_1$ ), ( $WO_2$ ), ( $WO_3$ ), ośmiu rezystorów ( $R_1$ )–( $R_8$ ) i dwóch kondensatorów ( $C_1$ ), ( $C_2$ ), ma dwa wejścia ( $W_{e1}$ ) i ( $W_{e2}$ ) i dwa wyjścia ( $W_{y1}$ ) i ( $W_{y2}$ ). Pierwszym wejściem układu jest jedno z doprowadzeń rezystora ( $R_1$ ), drugim wejściem jest jedno z doprowadzeń rezystora ( $R_2$ ). Pierwszym wyjściem układu jest węzeł, w którym zbiegają się doprowadzenia rezystorów ( $R_5$ ) i ( $R_6$ ) i kondensatorów ( $C_1$ ) i ( $C_2$ ), drugim wyjściem układu jest wyjście trzeciego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_3$ ). Układ zasilania bolometru według wynalazku spełnia jednocześnie dwie funkcje od wejścia ( $W_1$ ) do wyjścia ( $W_{y1}$ ) (do zacisków bolometru) stanowi idealne źródło prądowe sterowane napięciem, od wejścia ( $W_2$ ) do wyjścia ( $W_{y2}$ ) układ jest filtrem pasmowym. Dla prądu stałego rezystory ( $R_1$ ), ( $R_2$ ), ( $R_3$ ), ( $R_4$ ) wraz z wzmacniaczem operacyjnym ( $WO_1$ ) tworzą układ sumatora. Napięcie z wyjścia sumatora podawane jest przez rezystor ( $R_5$ ), na wyjście ( $W_{y1}$ ), do którego dołączony jest bolometr i na rezystor ( $R_6$ ), będący elementem wzmacniacza odwracającego zbudowanego z rezystorów ( $R_6$ ), ( $R_7$ ) i ze wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ). Napięcie z wyjścia wzmacniacza ( $WO_2$ ) podawane jest na rezystor ( $R_3$ ) układu sumatora. Wzmacniacz odwracający jest elementem pętli sprzężenia zwrotnego, dzięki któremu, po spełnieniu warunku

$$R_3R_6 + R_3R_5 - R_4R_7 = 0$$

wiążącego rezystancje rezystorów ( $R_3$ ), ( $R_4$ ), ( $R_5$ ), ( $R_6$ ), ( $R_7$ ), prąd płynący do wyjścia ( $W_{y1}$ ), czyli prąd płynący przez bolometr, jest niezależny od wartości rezystancji bolometru a zależy jedynie od napięcia na wejściu ( $W_{e1}$ ) i rezystancji rezystorów ( $R_1$ ), ( $R_2$ ), ( $R_5$ ), w taki sposób, że transkonduktancja ( $g_{m1}$ ) od wejścia ( $W_{e1}$ ), do wyjścia ( $W_{y1}$ ) wynosi

$$g_{m1} = \frac{-R_4}{R_1R_5}$$

Zmiennoprądowy sygnał wejściowy podawany jest na wejście ( $W_{e2}$ ) układu zasilania bolometru, a sygnał wyjściowy odbierany z wyjścia wzmacniacza ( $WO_3$ ) pracującego jako wtórnik. Dla napięć zmiennych źródło prądowe, które tworzą elementy ( $R_2$ ), ( $R_3$ ), ( $R_4$ ), ( $R_5$ ), ( $R_6$ ), ( $R_7$ ), ( $WO_1$ ), ( $WO_2$ ), ma dodatkowe dodatnie selektywne sprzężenie zwrotne od wyjścia ( $W_{y1}$ ) do nieodwracającego wejścia wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ) poprzez czwórnik zbudowany z bolometru dołączonego do wyjścia ( $W_{y1}$ ), rezystora ( $R_8$ ) i kondensatorów ( $C_1$ ), ( $C_2$ ). Dzięki selektywnemu sprzężeniu zwrotnemu tor układu zasilania bolometru ( $UZB$ ) od wejścia ( $W_{e2}$ ) do wyjścia wzmacniacza ( $WO_3$ ) jest filtrem pasmowym o transmitancji

$$K(s) = \frac{g_{m3} \frac{s}{C_1}}{s^2 + s \frac{\omega}{Q} + \omega^2}$$

gdzie:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{RR_8C_1C_2}}$$

$$Q = \frac{\sqrt{RR_8C_1C_2}}{RC_1 + RC_2 + R_8C_2 - g_{m2}RR_8C_1}$$

$$g_{m2} = \frac{\frac{R_4}{R_2} + 1}{R_5}$$

$$R_z = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}}$$

$$g_{m3} = \frac{-R_4}{R_2 R_5}$$

którego częstotliwość rezonansowa i dobroć jest funkcją rezystancji bolometru.

## Zastrzeżenia patentowe

1. Sposób pomiaru mocy sygnałów mikrofalowych wykorzystujący bolometr a w szczególności bolometr termistorowy, **znamienny tym**, że ogrzewa się bolometr i następuje zmiana rezystancji bolometru (spowodowana jego ogrzaniem), która powoduje zmianę przesunięcia fazowego wnoszonego przez przesuwnik fazowy, którego przesunięcie fazowe jest funkcją rezystancji bolometru, natomiast przesuwnik fazowy pobudza się z generatora sinusoidalnego, kąt fazowy napięcia występującego na wyjściu przesuwnika jest porównywany z kątem fazowym napięcia występującego na jego wejściu w detektorze fazowym, napięcie z wyjścia detektora fazowego poprzez filtr podawane jest na wejście sterowanego źródła prądowego, którego prąd wyjściowy polaryzuje bolometr w taki sposób, aby przesunięcie fazowe wnoszone przez przesuwnik miało zadaną wartość, w trakcie pomiaru określa się dwie wartości napięcia stałego na wyjściu filtru występujące dla stanu układu, w którym do bolometru doprowadzono napięcie mierzone i dla stanu, w którym bolometr nie jest pobudzany napięciem mierzoną, moc sygnału mierzonego doprowadzonego do bolometru wyznacza się stosując znaną zależność matematyczną na podstawie znajomości dwóch napięć stałych zmierzonych w trakcie pomiaru na wyjściu filtru.

2. Układ do pomiaru sygnałów mikrofalowych za pomocą bolometru, **znamienny tym**, że zbudowany jest z bolometru (**B**), generatora sinusoidalnego (**G**), układu zasilania bolometru (**UZB**), który posiada dwa wejścia ( $W_{e1}$ ) i ( $W_{e2}$ ) i dwa wyjścia ( $W_{y1}$ ) i ( $W_{y2}$ ), detektora fazy (**DF**), który posiada dwa wejścia ( $W_{ef1}$ ) i ( $W_{ef2}$ ) i jedno wyjście i z aktywnego filtru proporcjonalno-całkującego (**F**), bolometr (**B**) dołączony jest do pierwszego wyjścia układu zasilania bolometru (**UZB**), generator sygnału sinusoidalnego (**G**) dołączony jest do pierwszego wejścia ( $W_{e1}$ ) układu zasilania bolometru (**UZB**) oraz do pierwszego wejścia ( $W_{ef1}$ ) detektora fazy (**DF**), drugie wejście ( $W_{ef2}$ ) detektora fazy (**DF**) dołączone jest do drugiego wyjścia ( $W_{y2}$ ) układu zasilania bolometru (**UZB**), wyjście detektora fazy (**DF**) dołączone jest do wejścia filtru aktywnego proporcjonalno-całkującego (**F**), wyjście filtru (**F**) dołączone jest do drugiego wejścia ( $W_{e2}$ ) układu zasilania bolometru (**UZB**), wyjściem układu pomiarowego ( $W_y$ ) jest wyjście filtru proporcjonalno-całkującego (**F**).

3. Układ do pomiaru według zastrz. 2, **znamienny tym**, że układ zasilania bolometru jest zbudowany z trzech wzmacniaczy operacyjnych, ośmiu rezystorów i dwóch kondensatorów, pierwszym wejściem układu ( $W_{e1}$ ) jest jedno z doprowadzeń pierwszego rezystora ( $R_1$ ) drugim wejściem układu ( $W_{e2}$ ) jest jedno z doprowadzeń drugiego rezystora ( $R_2$ ) pozostałe doprowadzenia rezystorów ( $R_1$ ), ( $R_2$ ) dołączone są do wejścia odwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ), do wejścia odwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ) dołączone jest również jedno z doprowadzeń trzeciego rezystora ( $R_3$ ) oraz jedno z doprowadzeń czwartego rezystora ( $R_4$ ) drugie doprowadzenie czwartego rezystora ( $R_4$ ) dołączone jest do wyjścia pierwszego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ), do wyjścia pierwszego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ) dołączone jest również jedno z doprowadzeń piątego rezystora ( $R_5$ ), drugie doprowadzenie piątego rezystora ( $R_5$ ) dołączone jest do pierwszego wyjścia z układu zasilania bolometru ( $W_{y1}$ ), pierwszego kondensatora ( $C_1$ ), drugiego kondensatora ( $C_2$ ) i szóstego rezystora ( $R_6$ ), drugie doprowadzenie drugiego kondensatora ( $C_2$ ) jest dołączone do masy układu, drugie doprowadzenie pierwszego kondensatora ( $C_1$ ) jest dołączone do wejścia nieodwracającego pierwszego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_1$ ), do tego wejścia dołączone jest również pierwsze doprowadzenie ósmego rezystora ( $R_8$ ) i wejście nieodwracające trzeciego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_3$ ), drugie doprowadzenie szóstego rezystora ( $R_6$ ) dołączone jest do wejścia odwracającego drugiego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ), wejście nieodwracające drugiego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ) jest dołączone do masy układu, do wejścia odwracającego drugiego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ) dołączone jest również pierwsze doprowadzenie siódmego

rezystora ( $R_7$ ), drugie doprowadzenie siódmego rezystora ( $R_7$ ) dołączone jest do wyjścia drugiego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ), do wyjścia drugiego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_2$ ) dołączone jest również drugie doprowadzenie trzeciego rezystora ( $R_3$ ), drugim wyjściem układu zasilania bolometru ( $W_{v2}$ ) jest wyjście trzeciego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_3$ ), do wyjścia trzeciego wzmacniacza operacyjnego ( $WO_3$ ) dołączone jest jego wejście odwracające.

## Rysunki

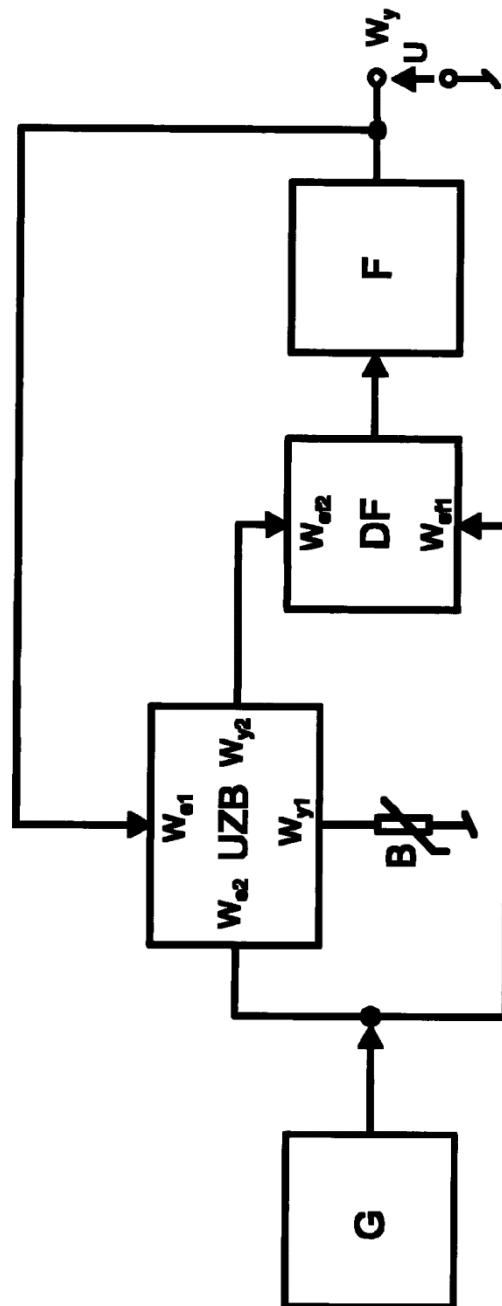


fig. 1

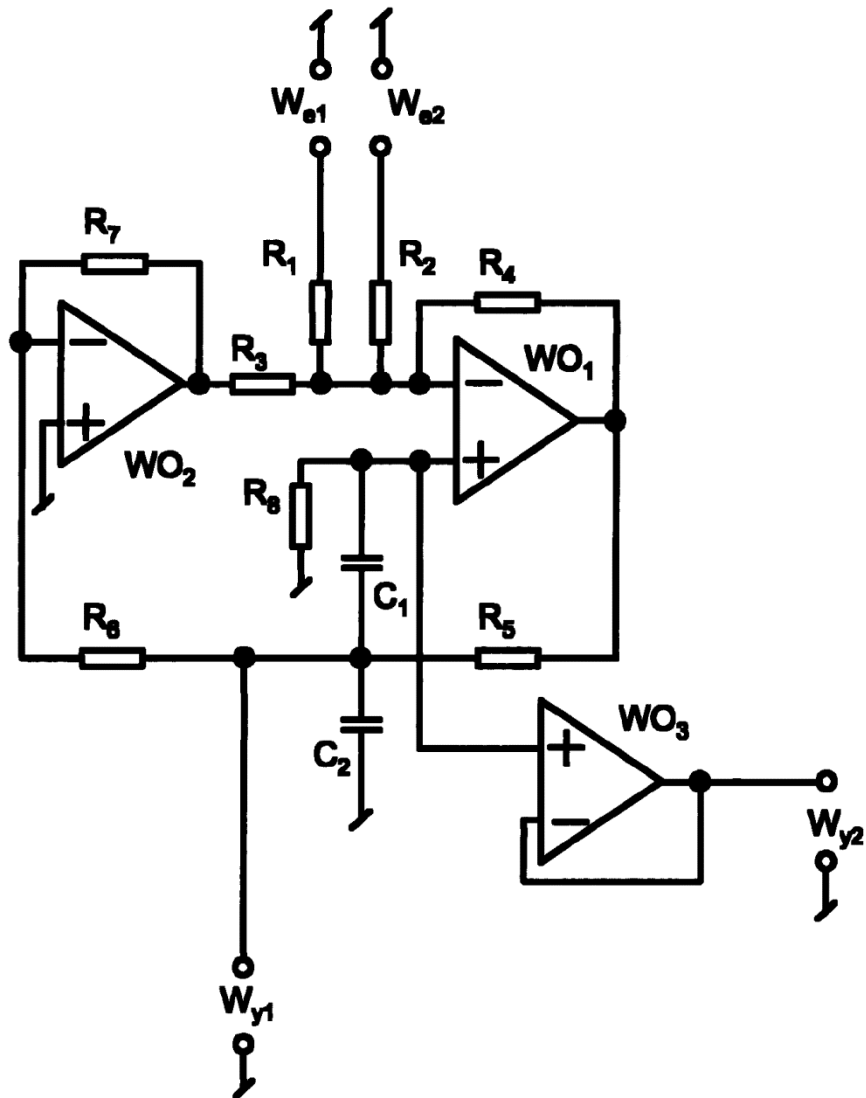


fig. 2

