

Henryk URZĘDNICZOK
Politechnika Śląska

MOSTKI RÓWNOWAŻONE CZĘSTOTLIWOŚCIOWO JAKO PRZETWORNIKI POMIAROWE Z WYJŚCIEM CZĘSTOTLIWOŚCIOWYM

Streszczenie. W artykule podano warunki równowagi dla kilku typów układów mostkowych wykorzystanych jako przetworniki typu „parametr/częstotliwość” (P/f). Wymieniono czynniki wpływające na niepewność przetwarzania. Omówiono wpływ ograniczonej pobudliwości detektora zera na niepewność wyniku przetwarzania. Podano przykładowe wyniki obliczeń niepewności dla dwóch układów mostków, przy różnych wartościach parametrów elementów. Wykazano możliwość uzyskania niepewności na poziomie setnych części procenta, przy odpowiednim wyborze układu i doborze wartości parametrów.

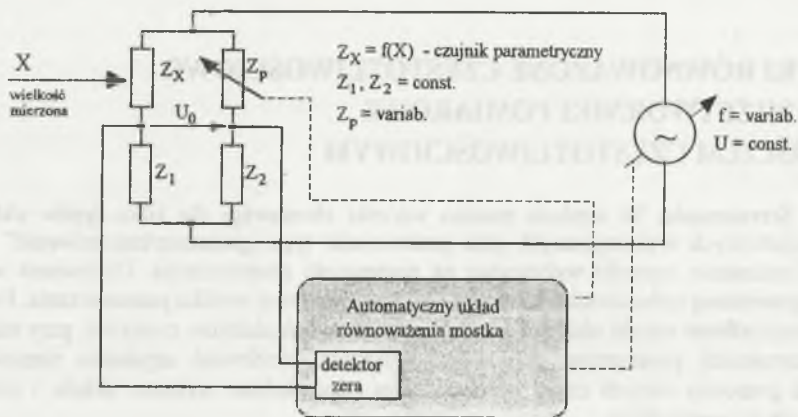
FREQUENCY BALANCED BRIDGES AS PARAMETER-TO-FREQUENCY MEASURING CONVERTERS

Summary. The balance relationships for some of frequency dependent AC bridges are given in this paper. Such types of bridges can be applied as parameter-to-frequency converters. The main factors determining the uncertainty of conversion are mentioned. One of them - the discrimination threshold limited value of the zero-detector in balancing circuit - is detaily considered. Results of uncertainty calculations for two bridges are presented. It is shown, that when choosing properly the type of bridge and parameters of elements, the uncertainty can be within the range of a hundred of ppm.

1. WPROWADZENIE

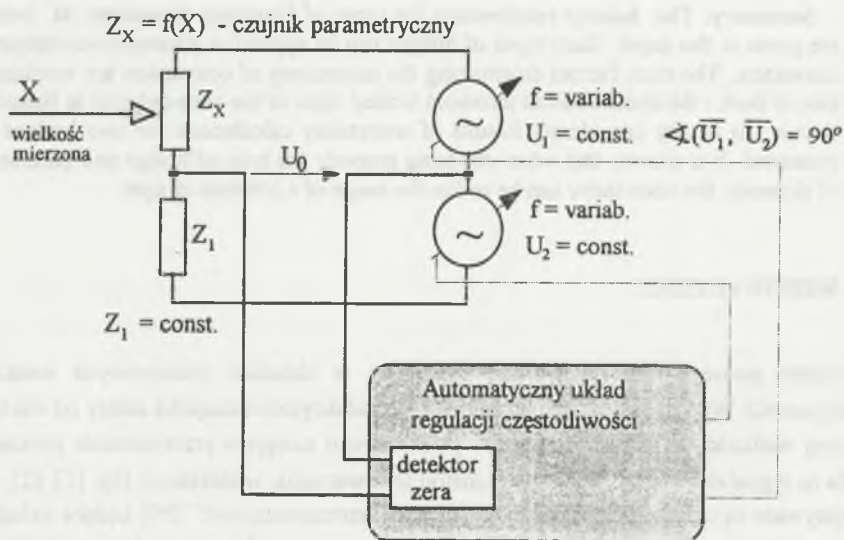
Czujniki parametryczne są szeroko stosowane w układach pomiarowych wielkości nieelektrycznych. Wartość rezystancji, pojemności lub indukcyjności czujnika zależy od wartości mierzonej wielkości. W dalszej części toru pomiarowego następuje przetwarzanie parametru czujnika na sygnał elektryczny. Wśród wielu metod przetwarzania, w literaturze (np. [1], [2], [3], [4]) opisywane są układy przetworników typu „parametr/częstotliwość” (P/f) będące układami mostków zmiennoprądowych równoważonych przez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego. Częstotliwość tego napięcia w stanie równowagi mostka jest proporcjonalna do parametru czujnika, a zatem jest miarą wielkości mierzonej.

Wyróżniane są dwa rodzaje układów mostkowych: klasyczne mostki czteroramienne oraz mostki dwuramienne z dwoma źródłami zasilania o jednakowych częstotliwościach i amplitudach, a fazach przesuniętych o 90° . Ogólny schemat przetwornika P/f z mostkiem czteroramiennym pokazano na rys. 1, a schemat przetwornika P/f z mostkiem dwuramiennym na rys. 2.



Rys. 1. Mostek czteroramienny w układzie przetwornika P/f

Fig. 1. Four branch bridge in the parameter-to-frequency converter circuit



Rys. 2. Mostek dwuramienny w układzie przetwornika P/f

Fig. 2. Two branch bridge in the parameter-to-frequency converter circuit

Wymienia się następujące zalety mostkowych przetworników P/f: duża czułość, dokładność i stabilność (w porównaniu z układami generacyjnymi), możliwa do uzyskania liniowość charakterystyki przetwarzania, krótki czas odpowiedzi skokowej, łatwość integracji z czujnikiem parametrycznym. Najistotniejsze znaczenie wydaje się mieć ta ostatnia cecha, gdyż umożliwia uniknięcie wpływu różnych czynników zakłócających (pasożytnicze pojemności, indukcyjności i upływności, temperatura itp). W przeciwieństwie do układów generacyjnych nie zachodzi przy tym konieczność integracji z czujnikiem całego układu przetwornika P/f. Elementy układu wykazujące znaczną wrażliwość na wpływ wielkości zakłócających, w szczególności temperatury, mogą zostać umieszczone poza czujnikiem. Wystarczające jest zintegrowanie w jednej strukturze z czujnikiem pozostałych elementów układu mostka (Z_1 , Z_2 , Z_p) oraz wzmacniacza napięcia nierównowagi (U_0). Wzmocnienie tego wzmacniacza powinno być znaczne, lecz nie musi być stałe. Część układu zintegrowana z czujnikiem może zatem być znacznie prostsza niż w przypadku przetworników generacyjnych.

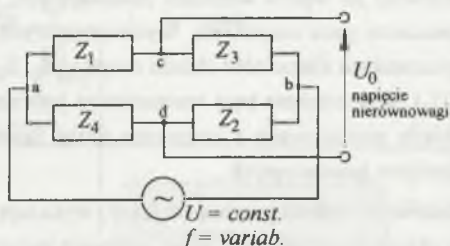
Najkorzystniejsze właściwości metrologiczne (statyczne) wykazują mostkowe przetworniki P/f przy takiej konstrukcji układu równoważenia, która zapewnia pełne zrównoważenie mostka w całym zakresie zmian parametru czujnika. Aby taki stan uzyskać, konieczne jest, oprócz równoważenia przez zmianę częstotliwości, zastosowanie elementu o sterowanym parametrze (Z_p na rys. 1). Automatyczny układ równoważenia jest wówczas skomplikowany. Właściwości dynamiczne takiego układu zwykle nie są dobre.

W niniejszej pracy przedstawione zostaną wyniki rozważań dotyczących możliwości równoważenia mostka w przetworniku P/f, przy założeniu że **równoważenie następuje jedynie poprzez zmianę częstotliwości napięcia zasilającego, bez konieczności sterowania parametrem elementu Z_p** . Celem analizy było sprawdzenie, czy przy takim założeniu możliwe jest uzyskanie dobrych właściwości metrologicznych przetworników mostkowych P/f.

2. PRZYKŁADY UKŁADÓW MOSTKÓW RÓWNOWAŻONYCH PRZEZ ZMIANĘ CZĘSTOTLIWOŚCI

Opisywane układy przetworników z mostkami czteroramiennymi można podzielić na kilka podstawowych rodzajów uwzględniając typ czujnika parametrycznego (R, C, L), podstawową strukturę mostka oraz rodzaj układu automatycznego równoważenia. W pracy [4] zaproponowano metodę klasyfikacji mostków czteroramiennych przydatną do analizy właściwości mostkowych przetworników P/f. Podstawą tej klasyfikacji jest postać warunku równowagi i wynikające z niej dwa równania: pierwsze, określające zależność częstotliwości w stanie równowagi od parametrów czujnika oraz drugie, określające wartość parametru zmiennego Z_p , zapewniającą zrównoważenie mostka. Wykorzystanie tej metody pozwala na ocenę przydatności układów mostków czteroramiennych do zastosowania w przetwornikach typu P/f.

Liczba możliwych struktur mostków czteroramiennych, które można równoważyć przez zmianę częstotliwości, jest znaczna. Przyjmując założenie, że w układzie mogą wystąpić jedynie rezystancje lub pojemności, oraz że ilość elementów w każdej gałęzi nie jest większa niż dwa (bardziej złożone gałęzie zawsze można do takiej postaci sprowadzić), przeanalizowano kilka układów. Do analizy przyjęto oznaczenia poszczególnych elementów w układzie mostka czteroramiennego, tak jak pokazano na rys.3.



Rys. 3. Ogólna struktura analizowanych układów mostków
Fig. 3. Base structure of analysed bridges

Warunek równowagi można ogólnie zapisać w postaci:

$$Z_1 Z_2 = Z_3 Z_4, \quad (1)$$

gdzie Z_1 , Z_2 , Z_3 i Z_4 są impedancjami w poszczególnych ramionach mostka.

W tabeli 1 scharakteryzowano wybrane układy mostków. Na podstawie równania (1), przez podstawienie parametrów odpowiednich dla każdej z badanych struktur wyprowadzono dwa warunki równowagi. Pierwszy, podany w kolumnie 3, określa częstotliwość napięcia zasilającego, przy której następuje zrównoważenie mostka. Zależność tej częstotliwości od wartości parametrów niektórych elementów, z których każdy może być czujnikiem, stanowi charakterystykę przetwarzania przetwornika P/f. Drugi, podany w kolumnie 5, podaje zależności pomiędzy parametrami elementów dla osiągnięcia pełnego zrównoważenia. Obydwa warunki muszą być spełnione jednocześnie, co sprawia, że układ automatycznego zrównoważenia mostka musi zapewniać jednoczesną regulację częstotliwości napięcia zasilającego i wartości jednego z parametrów w układzie. Jest to więc układ dwuwymiarowy, a przez to skomplikowany.

Tabela 1

Lp.	Układ	Częstotliwość równowagi	Z_p	Drugi warunek równowagi	Z_x
1	2	3	4	5	6
1		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_2 C_4 R_2 R}$	$R_1,$ R_3	$\frac{R_1}{R_3} = \frac{R_4}{R_2} + \frac{C_2}{C_4}$	--
2		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_3 C_4 R_3 R_4}$	$R_1,$ C_2	$\frac{R_1}{C_2} = \frac{R_4}{C_3} + \frac{R_3}{C_4}$	--
3		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_2 C_4 R_2 R}$	C_1 C_3	$\frac{C_3}{C_1} = \frac{R_4}{R_2} + \frac{C_2}{C_4}$	--
4		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_3 C_4 R_3 R}$	$R_1,$ C_2	$\frac{C_2}{R_1} = \frac{C_3}{R_4} + \frac{C_4}{R_3}$	--
5		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 R_3 R_4} \left(\frac{1}{C_3 C_4} - \frac{1}{C_1 C_2} \right)$	$R_2,$	$\frac{R_2}{C_1} = \frac{R_3}{C_4} + \frac{R_4}{C_3}$	C_2
6		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_3 R_4} \left(\frac{1}{R_3 R_4} - \frac{1}{R_1 R_2} \right)$	C_2	$\frac{C_2}{R_1} = \frac{C_3}{R_4} + \frac{C_4}{R_3}$	R_2
7		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_2 R_4} \left(\frac{1}{R_2 C_4} - \frac{1}{C_1 R_3} \right)$	C_3	$\frac{C_3}{C_1} = \frac{R_4}{R_2} + \frac{C_2}{C_4}$	R_3
8		$f_r^2 = \frac{1}{4\pi^2 C_3 R_2} \left(\frac{1}{R_3 C_2} - \frac{1}{R_1 C_4} \right)$	R_4	$\frac{R_4}{R_1} = \frac{R_2}{R_3} + \frac{C_3}{C_2}$	C_4

cd. tabeli 1

1	2	3	4	5	6
<p>W kolejnych kolumnach tabeli podano:</p> <p>(2) szczegółowy schemat układu mostka,</p> <p>(3) wartość częstotliwości zapewniającą równowagę mostka — charakterystyka przetwarzania,</p> <p>(4) element nie występujący w równaniu z kolumny 3 — ozn. to, że ten element najdogodniej jest wykorzystać jako parametr sterowany przez układ równoważenia mostka (Z_p na rys. 1), ponieważ pozwala to uzyskać niezależność równoważenia,</p> <p>(5) warunek określający wartość parametru sterowanego, przy której zachodzi pełna równowaga mostka ($U_0 = 0$),</p> <p>(6) element brakujący w równaniu z kolumny 5 — element ten nie może być sterowany przez układ równoważenia, natomiast dogodnie jest wykorzystać go jako czujnik parametryczny, ponieważ równoważenie mostka może wówczas odbywać się niezależnie.</p>					

Analizowane układy można podzielić na dwie grupy. Grupa pierwsza (wiersze 1, 2, 3 i 4 w tabeli 1) to mostki, wymagające równoważenia zarówno przez zmianę częstotliwości, jak i parametru jednego z elementów, ponieważ parametry wszystkich elementów występują w warunku równowagi (kolumna 5). Przez zmianę jedynie częstotliwości można doprowadzić układ do stanu quasi-równowagi, w którym napięcie nierównowagi U_0 osiąga wartość minimalną, jednak różną od zera. Aby częstotliwość odpowiadająca temu stanowi była zależna od parametru czujnika, nie może nim być element wymieniony w kolumnie 4. Z postaci równań w kolumnie 5, wyrażających drugi warunek równowagi, wynika jednak, że przez dobór odpowiednich proporcji wartości elementów układu można osiągnąć praktyczną niezależność wartości regulowanego parametru (Z_p) od wartości parametru czujnika. Na przykład, dla układu nr 1, przy stosowaniu czujnika pojemnościowego C_2 (C_{2min} , C_{2max}), dobierając $R_4/R_2 \gg C_{2max}/C_4$, uzyskuje się niezależność wartości parametru elementu regulowanego (R_1 lub R_3) od parametru czujnika. Bardziej szczegółowe wyniki analizy ilościowej dla tego układu, jako reprezentanta układów z grupy pierwszej, podano w punkcie 3.1.

Do grupy drugiej należą układy pokazane w wierszach 5, 6, 7 i 8 tabeli 1. Z przedstawionych równań równowagi wynika, że istnieją takie elementy, które nie wpływają na drugi warunek równowagi, pozostając jednak w równaniu określającym częstotliwość równowagi. Jeżeli tego typu element zostanie wybrany jako czujnik parametryczny, możliwe jest pełne zrównoważenie układu jedynie poprzez zmianę częstotliwości. Wyniki analizy ilościowej układu nr 8, należącego do tej grupy, podano w punkcie 3.2.

3. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH UKŁADÓW MOSTKOWYCH JAKO PRZETWORNIKÓW P/F

Błędy odwzorowania parametru czujnika w częstotliwość za pomocą omawianych mostkowych przetworników P/f wynikają z następujących czynników:

- ograniczonej pobudliwości detektora zera,
- zmian wartości zastosowanych elementów (wpływ temperatury, czasu itp.),
- odkształceń napięcia zasilającego układ mostka od kształtu sinusoidalnego (wyższe harmoniczne),
- wpływu napięć indukowanych wskutek zakłóceń elektromagnetycznych,
- pasywnych pojemności, upływności i indukcyjności w układzie.

Czynniki b), c), d) i e) można ograniczyć przez właściwą konstrukcję układu oraz dobór elementów. Wpływ tych czynników nie jest przedmiotem niniejszej analizy.

Ze względu na ograniczoną pobudliwość detektora zera odchylenie częstotliwości napięcia zasilającego mostek o pewną minimalną wartość nie jest „zauważane” przez układ równoważenia. Układ ten jest w stanie doprowadzić częstotliwość do wartości leżącej wewnątrz przedziału, którego granice wynikają z ograniczonej pobudliwości detektora zera. Analogicznie zmiana parametru czujnika o pewną wartość, przy stałej częstotliwości zasilania mostka, może zostać „niezauważona” przez detektor zera. Ograniczona pobudliwość detektora zera jest więc przyczyną błędów przetwarzania wartości parametru czujnika na częstotliwość. Dla scharakteryzowania błędów granicznych wynikających z ograniczonej pobudliwości detektora zera dogodnie jest określić zależność stosunku napięcia nierównowagi u_0 od odchylenia częstotliwości wokół częstotliwości równowagi lub od względnej zmiany parametru czujnika. Dogodnie jest wyrazić powyższe wielkości w miarach względnych. Wartości względne można zdefiniować jako:

$$u_0 = \frac{U_0}{U}, \quad u_p = \frac{U_p}{U} \quad \text{lub} \quad u_p = \frac{1}{K \cdot 2^n}, \quad \lambda = \frac{f - f_r}{f_r}, \quad p = \frac{P_x - P_r}{P_r}, \quad (2)$$

gdzie:

U_0 — bezwzględne napięcie nierównoważenia,

U — napięcie zasilania mostka (rys.3),

U_p — próg pobudliwości detektora zera,

n — liczba bitów, w przypadku gdy w układzie równoważenia zastosowano przetwornik analogowo-cyfrowy,

K — wzmocnienie wzmacniacza wstępnego w detektorze zera,

f_r — częstotliwość równowagi mostka dla aktualnej wartości parametru czujnika P_r ,

f — częstotliwość ustalana przez układ równoważenia w wyniku procesu równoważenia,

P_r — wartość parametru czujnika dla stanu równowagi mostka, P_x — dowolna wartość tego parametru, niewiele różniąca się od wartości P_r .

Względne napięcie nierównowagi u_0 w układzie mostkowym, które można obliczyć jako:

$$u_0 = \frac{U_{sz} - U_{sd}}{U} = f(\lambda, p_x), \quad (3)$$

jest funkcją względnej częstotliwości λ i względnej wartości parametru czujnika p_x .

Z charakterystyki $u_0 = f(\lambda)$, przy stałych wartościach parametrów elementów, wynika, w jakim przedziale częstotliwości detektor zera nie „zauważa” odstrojenia od stanu równowagi. Szerokość tego przedziału określa niepewność wyniku przetwarzania wynikająca z ograniczonej pobudliwości detektora zera. Analogicznie z charakterystyki $u_0 = f(p_x)$, uzyskanej przy $\lambda = 0$, można określić przedział zmian wartości parametru czujnika, nie „zauważanych” przez układ równoważenia. Przedziały te wyznaczają składowe niepewności przetwarzania parametru czujnika na częstotliwość.

Jeżeli wartość stosunku względnych napięć niezrównoważenia i pobudliwości detektora zera jest większa niż jeden, to układ równoważenia reaguje, powodując dostrojenie częstotliwości w celu zrównoważenia mostka. Wartością graniczną, określającą odpowiednie składowe niepewności, jest $u_0/u_p = 1$. W obliczeniach ilustrujących powyższe stwierdzenia obliczono u_0/u_p , przy założeniu że detektor zera ma względny próg pobudliwości równy 10^{-6} . Należy zwrócić uwagę, że wartość ta wynika z iloczynu wzmocnienia wstępnego w detektorze zera i rozdzielczości zastosowanego przetwornika a/c. Założono stosowanie czujnika pojemnościowego, o pojemności zmiennej w zakresie (20100) pF. Parametry pozostałych elementów układu mostka dobrano tak, aby częstotliwość równowagi dla średniej wartości parametru czujnika była rzędu 100 kHz. Przy innych wartościach tych parametrów zmianie ulegają bezwzględne wartości częstotliwości równowagi i napięć niezrównoważenia, jednakże opisane niżej prawidłowości zostają zachowane.

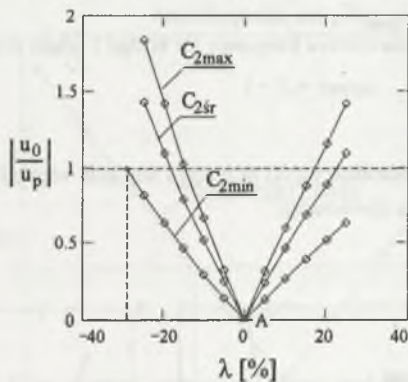
3.1. Charakterystyka układu nr 1

Rolę czujnika parametrycznego spełnia w tym przypadku kondensator C_2 . Osiągnięcie pełnego zrównoważenia mostka opisanego w pierwszym wierszu tabeli 1 wymaga regulacji częstotliwości oraz jednego z parametrów układu. Przedstawione niżej wyniki uzyskano przyjmując sformułowane wcześniej założenie, że równoważenie odbywa się tylko poprzez zmianę częstotliwości. Wartość parametru dodatkowego przyjęto tak, aby mostek był w pełni zrównoważony dla jednej tylko wartości parametru czujnika odpowiadającej środkowi zakresu zmian (C_{2sr}). Dla innych wartości parametru czujnika mostek może być zatem jedynie w stanie quasi-równowagi, tzn. napięcie nierównowagi osiąga wartość minimalną, lecz różną od zera.

Stosunek napięcia nierównowagi do progu pobudliwości (w obliczeniach założono $u_p=10^{-6}$) określa zależność:

$$\frac{u_0}{u_p}(\lambda) = \frac{R_1}{R_1 + R_3} - \frac{1 - \lambda^2 + j2\pi f_r(C_2R_2 + C_4R_4)\lambda}{1 - \lambda^2 + j2\pi f_r(C_2R_2 + C_4R_4 + C_4R_2)\lambda} \quad (4)$$

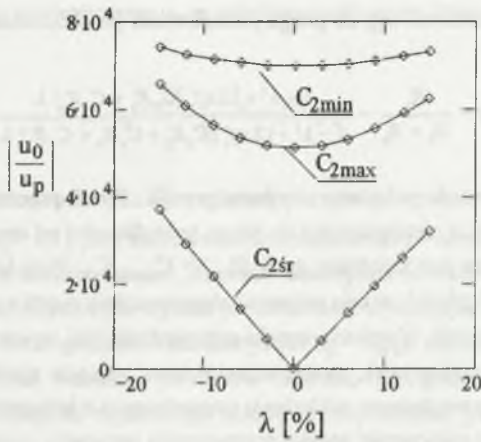
Na kolejnych rysunkach pokazano uzyskane wyniki. Rys.4 przedstawia zależności stosunku względnego napięcia nierównowagi do progu pobudliwości od częstotliwości względnej w sytuacji, gdy spełnione jest założenie, że $R_4/R_2 \gg C_{2\max}/C_4$. Przy takim założeniu, jak to wynika ze wzoru w kol. 5 tabeli 1, w celu pełnego zrównoważenia mostka praktycznie wystarczy zmieniać tylko częstotliwość. Uzyskane wyniki potwierdzają taki wniosek — patrz pkt A na rys.4. Jak wynika z charakterystyk, przekroczenie przez napięcie nierównowagi progu pobudliwości następuje przy względnym odchyleniu częstotliwości o kilkanaście do kilkudziesięciu procent — taka byłaby też niepewność wyniku przetwarzania parametru czujnika na częstotliwość. Aby niepewność tę zmniejszyć, należałoby zmniejszyć próg pobudliwości detektora zera.



Rys.4. Zależność napięcia nierównowagi od częstotliwości dla układu nr 1, przy spełnieniu założenia: $R_4/R_2 \gg C_{2\max}/C_4$

Fig.4. Unbalance voltage versus relative frequency for bridge 1 when fulfilling the assumption $R_4/R_2 \gg C_{2\max}/C_4$

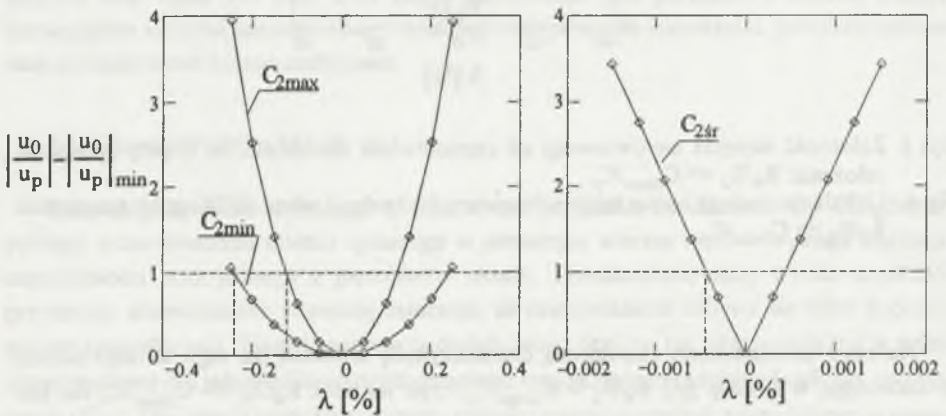
Na rys.5 przedstawiono analogiczną charakterystykę uzyskaną dla tego samego układu mostkowego, w sytuacji gdy $R_4/R_2 = C_{2\max}/C_4$, czyli warunek $R_4/R_2 \gg C_{2\max}/C_4$ nie jest spełniony. Napięcie nierównowagi osiąga znaczne wartości nawet przy częstotliwości równej częstotliwości równowagi ($\lambda = 0$) — z wyjątkiem wartości parametru czujnika odpowiadającej środkowi zakresu (co wynika z podanego wyżej założenia). Dla każdej wartości parametru czujnika napięcie nierównowagi ma wartość minimalną dla częstotliwości równowagi.



Rys.5. Zależność napięcia nierównowagi od częstotliwości dla układu nr 1, w przypadku gdy założenie $R_4/R_2 \gg C_{2max}/C_4$ nie jest spełnione

Fig.5. Unbalance voltage versus relative frequency for bridge 1 when not fulfilling the assumption $R_4/R_2 \gg C_{2max}/C_4$

Na rysunku 6 pokazano charakterystyki przyrostu napięcia względem napięcia minimalnego uzyskanego dla częstotliwości równowagi.

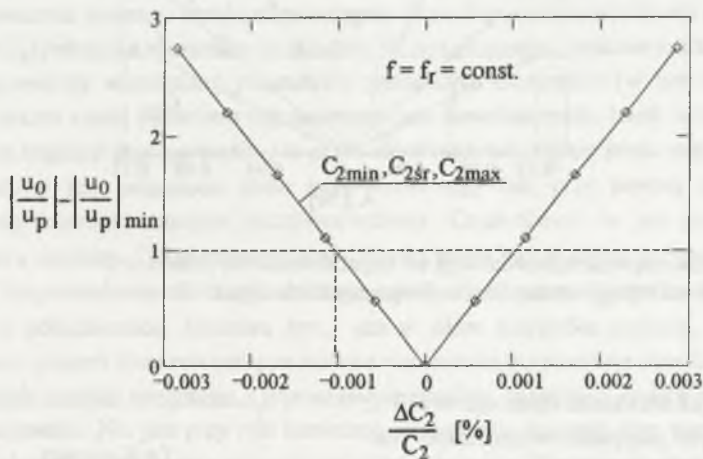


Rys.6. Zależność przyrostów napięcia nierównowagi od częstotliwości dla układu nr 1, w przypadku gdy założenie $R_4/R_2 \gg C_{2max}/C_4$ nie jest spełnione

Fig.6. Increment of unbalance voltage versus relative frequency for bridge 1 when not fulfilling the assumption $R_4/R_2 \gg C_{2max}/C_4$

W tym przypadku zmiany częstotliwości wyznaczające niepewność wyniku przetwarzania są na poziomie ułamków procenta, przy czym największe wartości (ok. 0,25%) uzyskuje się dla minimalnej wartości parametru czujnika. Dla wartości środkowej parametru czujnika, dla której układ jest w pełni zrównoważony, przedział niepewności jest o dwa rzędy mniejszy. Wykorzystanie opisaney wyżej właściwości omawianego układu jest możliwe tylko w sytuacji, gdy układ równoważenia pracuje jako przyrostowy, tzn. równoważenie odbywa się nie na podstawie wartości napięcia niezrównoważenia, lecz na podstawie jego przyrostów powodowanych zmianami częstotliwości w kolejnych krokach równoważenia. Stan równowagi uzyskuje się wówczas, gdy zmiana częstotliwości nie powoduje zauważalnych przyrostów napięcia nierównowagi.

Charakterystyka zmian napięcia nierównowagi w funkcji zmian parametru czujnika, wyznaczona przy tych samych parametrach układu i dla częstotliwości równej częstotliwości równowagi ($\lambda = 0$), pokazana jest na rys.7. Wynika z niej, że czułość układu na zmiany parametru czujnika jest znacznie większa niż czułość na zmiany częstotliwości.



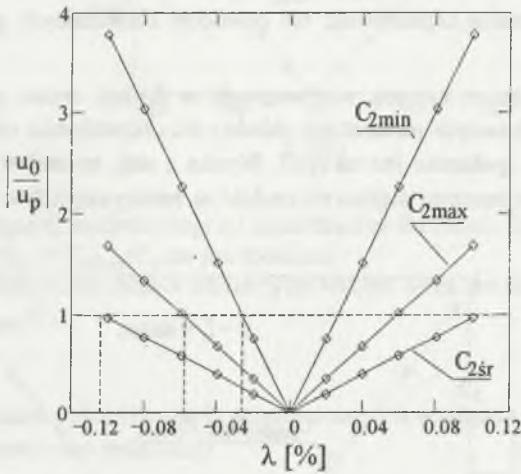
Rys.7. Napięcie nierównowagi w funkcji zmian parametru czujnika dla układu nr 1
Fig.7. Unbalance voltage versus relative changes of sensor capacitance for bridge 1

3.2. Charakterystyka układu nr 8

Jak wynika ze wzoru w kolumnie 5 tabeli 1, dla tego układu możliwe jest równoważenie tylko przez zmianę częstotliwości, w przypadku gdy jako czujnik parametryczny wybrany zostanie kondensator C_4 . Parametry pozostałych elementów w układzie powinny być dobrane

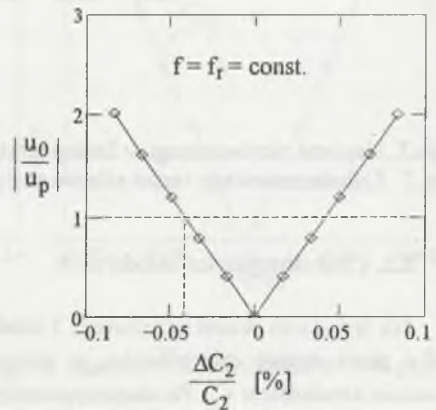
według wspomnianego wyżej wzoru, a także wzoru z kolumny 3, określającego charakterystykę przetwarzania. Napięcie nierównowagi wyraża się w tym przypadku zależnością:

$$\frac{u_0}{u_p}(\lambda) = \frac{R_1}{R_1 + \frac{R_2}{1 + j2\pi f_r C_3 \lambda}} - \frac{R_4 + \frac{1}{j2\pi f_r C_4 \lambda}}{R_4 + R_2 + \frac{1}{j2\pi f_r C_4 \lambda} + \frac{1}{j2\pi f_r C_2 \lambda}} \quad (5)$$



Rys.8. Zależność napięcia nierównowagi od częstotliwości dla układu nr 8
Fig. 8. Unbalance voltage versus relative frequency for bridge 8

Podobnie jak dla układu opisanego w p. 3.1, również w tym przypadku wyznaczono charakterystyki względnego napięcia niezrównoważenia od zmian częstotliwości i zmian parametru czujnika. Odpowiednie wykresy pokazano na rys. 8 i 9.



Rys.9. Zależność napięcia nierównowagi od zmian parametru czujnika nr 8
Fig. 9. Unbalance voltage versus relative changes of sensor capacitance for bridge 8

Uzyskane wyniki wskazują, że wartość niepewności przetwarzania ze względu na odchylenie częstotliwości jest nieco mniejsza niż w przypadku układu nr 1, natomiast wymagane zmiany parametru czujnika powodujące zauważalne zmiany napięcia nierównowagi są znacznie większe — czułość na zmiany częstotliwości jest tego samego rzędu co czułość na zmiany parametru czujnika. W tym przypadku nie jest konieczne zastosowanie układu różnicowego w układzie równoważenia.

4. PODSUMOWANIE

Istnieje szereg struktur mostków czteroramiennych zależnych od częstotliwości, przydatnych do zastosowania w przetwornikach typu „parametr/częstotliwość”. Wybór struktury podyktowany może być typem stosowanego czujnika parametrycznego lub innymi czynnikami. Układy te można podzielić na dwie grupy.

Grupa pierwsza to układy, dla których stan pełnego zrównoważenia (tzn. uzyskanie napięcia niezrównoważenia równego zero) można osiągnąć przez dobranie częstotliwości oraz wartości parametru (Z_p) jednego z elementów w układzie. W tym przypadku możliwe jest takie dobranie proporcji pomiędzy wartościami parametrów pozostałych elementów (w tym czujnika), że pożądany zakres zmian parametru regulowanego jest dowolnie mały. Jeżeli w takiej sytuacji zaniecha się regulacji tego parametru, to przez równoważenie jedynie przez zmianę częstotliwości możliwe jest osiągnięcie stanu quasi-równowagi, tzn. przy pewnej częstotliwości uzyskuje się minimum napięcia niezrównoważenia. Częstotliwość ta jest proporcjonalna do parametru czujnika. Układ równoważenia mostka może być w takim przypadku znacznie prostszy. Przeprowadzone obliczenia wskazują jednak, że niepewność wyniku, powodowana ograniczoną pobudliwością detektora zera, jest w takim przypadku znaczna, może sięgać kilkudziesięciu procent. Znacznie mniejsze wartości niepewności (na poziomie ułamków procenta) można jednak uzyskać rezygnując z wymagania minimalnej zmienności dodatkowego regulowanego parametru. Nie jest przy tym konieczne zapewnienie regulacji tego parametru, o ile w układzie równoważenia mostka zastosuje się układ różnicowy. Napięcie nierównowagi osiąga wówczas znaczne wartości, jednakże osiąga również znacznie większe przyrosty przy takich samych zmianach częstotliwości lub parametru czujnika.

Dla układów drugiej grupy, przez odpowiednie wybranie elementu stanowiącego czujnik, możliwe jest uzyskanie pełnej równowagi przez regulację wyłącznie częstotliwości. Niepewność wyniku przetwarzania jest tego samego rzędu co w przypadku układów z grupy pierwszej, przy optymalnie dobranych wartościach parametrów elementów.

Podane w punkcie 3 wartości niepewności uzyskano przy założeniu określonego progu pobudliwości detektora zera. Przez obniżenie tego progu w każdym z omówionych przypadków możliwe jest odpowiednie proporcjonalne obniżenie niepewności.

W przedstawionych rozważaniach uwzględniono założenie, że parametry resztkowe czujnika i pozostałych elementów mostka (pojemność i indukcyjność doprowadzeń) są pomijalnie małe. Przez odpowiednią konstrukcję czujnika oraz układu mostkowego można zredukować wpływ tych czynników, nie jest możliwe ich całkowite wyeliminowanie. Podane wartości niepewności przetwarzania obrazują właściwości „idealnych” mostków; należy je traktować jedynie porównawczo, pozwalają bowiem na wybór samej struktury mostka i zasady działania odpowiedniego układu równoważenia.

LITERATURA

1. Schollmeyer H.: A digital AC bridge as an impedance to frequency converter. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. IM-34 no.3, september 1985.
2. Rimkus W.: Ein berührungsfreier, kapazitiver Abstandsensor mit integrierte Elektronik. Materiały symposium Tagungsband NTG/GMR fachtagung Sensoren-Technologie und Anwendung, Bad Nauheim 1982.
3. Schollmeyer H., Trenkler G.: Frequenzverschlossene digitale Brücke für Widerstandsthermometer. Materiały Sensor'83 Konferenz, Basel 1983.
4. Owen E.W.: Converting measured quantities into frequency by means of self-balancing bridges. Materiały IMEKO Symposium on Computing Measurements, Dubrownik 1981.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Michał Szyper

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 kwietnia 1998 r.

Abstract

The frequency is included in the balance relationship of many types of AC bridges. Such types of bridges can be applied as parameter-to-frequency measuring converters. Advantages of frequency dependent AC bridges can be pointed. The most important of them are: suitability for realization as integrated circuit, possibility for integration with a parametric sensor, good linearity, high sensitivity, short response time (when self-balancing is applied). The uncertainty of parameter-to-frequency conversion realized by means of self-balancing AC bridges, depends on many factors: stability of used elements, distortion of AC supply source, dissipation parameters, electromagnetic disturbance and noise voltages, sensitivity of zero-detector. In this paper influence of the last factor is considered.

Applying the classification method presented in [4], eight types of frequency dependent bridges have been analysed (see Tab. 1). Starting from their balance relationships for each kind

of bridge two balance conditions have been derived: the equations for balance frequency and the second balance conditions as a relation between parameters of bridge elements. To balance each kind of bridge both of these conditions have to be satisfied. The obtained set of conditions is given in table 1, columns 3 and 5. When analysing these conditions it may be stated, that there exist two groups of bridges. For the first group (bridges 1 to 4 in Tab. 1), except controlling the frequency, to balance the bridge fully it is necessary to control an additional parameter given in column 3 - this is because all parameters are included in the second balance condition. For the second group of bridges (5 to 8 in Tab. 1) it is not necessary to control any additional parameter, because there exists a parameter (given in col. 6), which is not included in the second balance condition.

It is evident, that the balancing circuit can be much simpler for bridges from the second group, because only the control of frequency is required to balance the bridges. Such a type of bridge can have small uncertainty, limited by the discrimination threshold of the zero-detector in the balancing circuit. Results of some calculations are presented in Figs.8 and 9.

The possibility of balancing bridges from the first group by controlling only the frequency has been considered. It may be concluded, that in this case it is possible to obtain a good result when the balancing circuit operates as an incremental one. It means, that not the value of unbalance voltage (U_0 in Fig. 1) should be treated as input signal of the balancing circuit, but changes of this voltage in successive steps of balancing. Results of the uncertainty calculations, obtained under such an assumption, are shown in Figs.6 and 7. The uncertainty level is the same as for the bridges from the other group.