

Andrzej KRZEMIŃSKI

Instytut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej  
Politechniki Śląskiej

## PRZETWORNIK POMIAROWY REZYSTANCJA - CZĘSTOTLIWOŚĆ

**Streszczenie.** W artykule opisano dokładną metodę liniowego przetwarzania rezystancji na częstotliwość. Omówiono budowę przetwornika z podaniem zależności matematycznych. Przeanalizowano mostek automatyczny prądu stałego dwustronnie zasilany, podając jego własności.

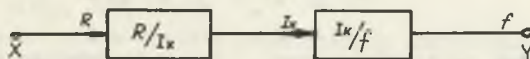
### 1. Wprowadzenie

W praktyce pomiarowej, szczególnie w przypadku zdalnych pomiarów wielkości nieelektrycznych za pomocą czujników rezystancyjnych (potencjometry rezystancyjne, tensometry, termistory, fotorezystory, magnetorezystory), celem jest przetwarzanie zmian rezystancji  $\Delta R$  na proporcjonalne zmiany częstotliwości  $\Delta f$ .

Z literatury [2], [3], [4], [5] znane są różne sposoby przetwarzania rezystancji na częstotliwość. Opisany przetwornik posiada liniową charakterystykę oraz możliwość nastawiania czułości

### 2. Opis układu przetwornika R/f

Układ pomiarowy, którego schemat blokowy przedstawiono na rys. 1 składa się z dwóch zasadniczych części:



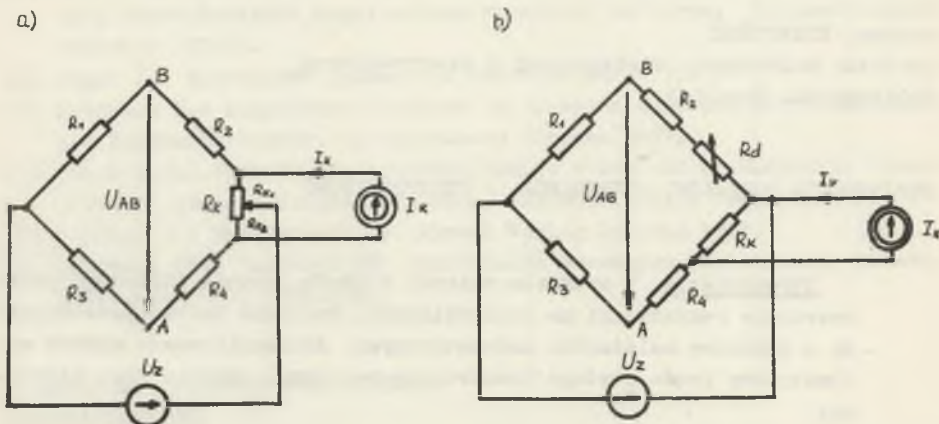
Rys. 1. Schemat blokowy przetwornika rezystancja - częstotliwość

mostka automatycznego przetwarzającego zmiany rezystancji  $R$  na proporcjonalne zmiany natężenia prądu  $I_k$  oraz przetwornika prąd - częstotliwość. Mostek automatyczny to mostek prądu stałego, dwustronnie zasilany, objęty pętlą ujemnego sprzężenia zwrotnego. Przetwornik  $I_k/f$  składa się ze źródła prądowego i generatora relaksacyjnego.

#### 2.1. Analiza mostka dwustronnie zasilanego

Na rys. 2a przedstawiono schemat mostka prądu stałego dwustronnie zasilanego. Jednym źródłem zasilania jest siła elektromotoryczna  $U_z$ , drugie

siła prądomotoryczna  $I_k$ . Suwak cpornika  $R_k$  służy do wstępnego równoważenia mostka.



Rys. 2. Mostek dwustronnie zasilany

Gdy źródło prądowe  $I_k$  zostanie odłączone, wówczas mostek można traktować jako zwykły mostek prądu stałego, w którym zmiana rezystancji w gałęziach powoduje wystąpienie napięcia nierównowagi  $U_{AB}$ . Jeżeli natomiast do rozstrojonego mostka dołączymy drugie źródło zasilania (siłę prądową  $I_k$ ), możemy tak dobrać wartość prądu  $I_k$ , aby mostek zrównoważyć. Wówczas  $U_{AB} = 0$ , a natężenie prądu kompensującego  $I_k$  zawiera informację o wartości rezystancji elementu czynnego mostka. Na podstawie rys. 2a można wyprowadzić zależność (1)

$$I_k = \frac{U_z \left( \frac{R_2 + R_{k1}}{R_1 + R_2 + R_{k1}} - \frac{R_4 + R_{k2}}{R_3 + R_4 + R_{k2}} \right) - U_{AB}}{\frac{R_1 R_{k1}}{R_1 + R_2 + R_{k1}} + \frac{R_3 R_{k2}}{R_3 + R_4 + R_{k2}}} \quad (1)$$

Jeżeli mostek jest zrównoważony,  $U_{AB} = 0$ , wówczas równanie przybiera postać (2).

$$I_k = U_z \frac{\frac{R_2 + R_{k1}}{R_1 + R_2 + R_{k1}} - \frac{R_4 + R_{k2}}{R_3 + R_4 + R_{k2}}}{\frac{R_1 R_{k1}}{R_1 + R_2 + R_{k1}} + \frac{R_3 R_{k2}}{R_3 + R_4 + R_{k2}}} \quad (2)$$

Rezystancję w poszczególnych gałęziach mostka oznaczamy przez:

$$R_1 = R + \Delta R_1 \quad (3)$$

$$R_2 = R + \Delta R_2 \quad (3)$$

$$R_3 = R + \Delta R_3$$

$$R_4 = R + \Delta R_4$$

Podstawiając zależności (3) do równania (2) otrzymuje się

$$I_k = U_z \frac{\frac{R + \Delta R_2 + R_{k1}}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + R_{k1}} - \frac{R + \Delta R_4 + R_{k2}}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4 + R_{k2}}}{\frac{(R + \Delta R_1) R_{k1}}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + R_{k1}} + \frac{(R + \Delta R_3) R_{k2}}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4 + R_{k2}}} \quad (4)$$

Z równania (4) wynika, że prąd kompensujący  $I_k$  jest funkcją zmian rezystancji  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$ ,  $\Delta R_4$  w gałęziach mostka.

Podstawiając do wzoru (4) możliwe kombinacje zmian rezystancji nie uzyskuje się liniowej charakterystyki. Wprowadzając założenia ograniczające wartość względnej zmiany rezystancji  $R$ , tzn.  $\Delta R \ll R$ , zależność (4) można traktować jako liniową.

Analizując w podobny sposób mostek przedstawiony na rys. 2b. otrzymuje się równanie, które po wprowadzeniu podstawień (3) ma postać (5).

$$I_k = U_z \frac{\frac{R + \Delta R_2 + R_d}{2R + \Delta R_1 + \Delta R_2 + R_d} - \frac{R + \Delta R_4 + R_k}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4 + R_k}}{\frac{(R + \Delta R_3) R_k}{2R + \Delta R_3 + \Delta R_4 + R_k}} \quad (5)$$

Prąd  $I_k$  jest funkcją napięcia zasilania  $U_z$  oraz wszystkich elementów biernych mostka. Równanie (5) zmienia budowę w zależności od zmian rezystancji  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$ ,  $\Delta R_3$ ,  $\Delta R_4$ .

W tabelicy 1 przedstawiono kilka spośród przebadanych przypadków, a otrzymane równania mają postać

$$I_k = I_{k0} + I_{k1} \quad (6)$$

Pierwszy człon równania reprezentuje prąd początkowy  $I_{k0}$ , którego wartość w przypadku 4 i 5 (tabela 1) zależy od parametrów stałych oraz jednego elementu  $R_d$  o nastawianej rezystancji. Daje to możliwość regulowania wartości prądu początkowego  $I_{k0}$ , poprzez zmianę rezystancji  $R_d$ . Chcąc zlikwidować człon stały prądu  $I_k$ , należy spełnić warunek  $R_d = R_k$ .

Druga część równania (6), prąd  $I_{k1}$ , jest funkcją zmiany rezystancji w gałęziach mostka.

$$I_{k1} = k f(\Delta R_1, \Delta R_2, \Delta R_3, \Delta R_4)$$

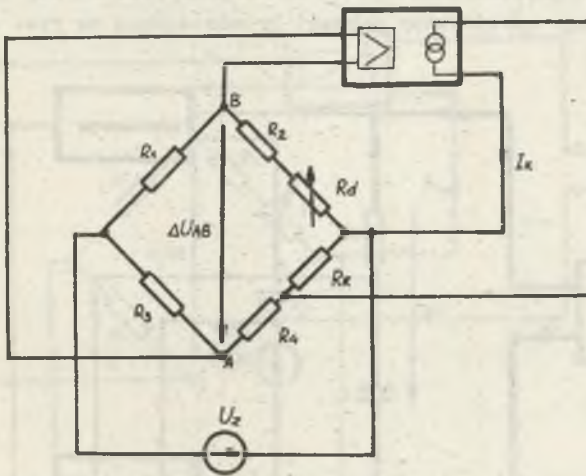
Tablica 1

Lp	SCHEMAT MOSTKA	ZMIANY REZYSTANCJI	RÓWNANIA OPISUJĄCE MOSTEK
1		$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \text{var} \\ \Delta R_2 &= 0 \\ \Delta R_3 &= 0 \\ \Delta R_4 &= 0 \end{aligned}$	$I_x = U_z \frac{R_d - R_x}{(2R + R_d + \Delta R) R_x} - U_z \frac{R + R_x}{(2R + R_d + \Delta R) R R_x} \Delta R$
2		$\begin{aligned} \Delta R_1 &= 0 \\ \Delta R_2 &= \text{var} \\ \Delta R_3 &= 0 \\ \Delta R_4 &= 0 \end{aligned}$	$I_x = U_z \frac{R_d - R_x}{(2R + R_d + \Delta R) R_x} + U_z \frac{1}{(2R + R_d + \Delta R) R_x} \Delta R$
3		$\begin{aligned} \Delta R_1 &= 0 \\ \Delta R_2 &= 0 \\ \Delta R_3 &= \text{var} \\ \Delta R_4 &= 0 \end{aligned}$	$I_x = U_z \frac{R(R_d - R_x)}{(2R + R_d)(R + \Delta R) R_x} + U_z \frac{R + R_d}{(2R + R_d)(R + \Delta R) R_x} \Delta R$
4		$\begin{aligned} \Delta R_1 &= 0 \\ \Delta R_2 &= 0 \\ \Delta R_3 &= 0 \\ \Delta R_4 &= \text{var} \end{aligned}$	$I_x = U_z \frac{R_d - R_x}{(2R + R_d) R_x} - U_z \frac{1}{(2R + R_d) R_x} \Delta R$
5		$\begin{aligned} \Delta R_1 &= \text{var} \\ \Delta R_2 &= 0 \\ \Delta R_3 &= 0 \\ \Delta R_4 &= \text{var} \end{aligned}$	$I_x = U_z \frac{R_d - R_x}{R R_x} - U_z \frac{1}{R R_x} \Delta R$

Z kilku równań przedstawionych w tabelicy 1 tylko 4 i 5 mają przebieg liniowy. Pozostałe przypadki (również nie przedstawione w tabelicy) można z niewielkim błędem traktować jako liniowe, wprowadzając założenie:  $\Delta R \ll R$ . Liniowość charakterystyk daje możliwość jednoznacznego określania wartości zmian rezystancji w gałęziach mostka na podstawie zmian natężenia prądu  $I_k$ .

## 2.2. Mostek automatyczny

Aby omówiony mostek był równoważony samoczynnie, należy uzależnić wartość prądu kompensującego  $I_k$  od napięcia nierównowagi  $\Delta U_{AB}$ . W tym celu wprowadzono silne, ujemne sprzężenie zwrotne (rys. 3). Blok sprzężenia



Rys. 3. Mostek automatyczny

składa się ze wzmacniacza o dużym współczynniku wzmocnienia oraz źródła prądowego. Napięcie nierównowagi  $U_{AB}$  podane na wejście wzmacniacza steruje źródłem prądowym. Prąd wyjściowy źródła  $I_k$  wpływa do mostka poprzez drugie wejście zasilające, wywołując na jego elementach dodatkowe spadki napięcia i obniżając napięcie  $U_{AB}$ . W idealnym przypadku napięcie nierównowagi powinno zostać skompensowane do zera. W rzeczywistości pozostaje pewne minimalne napięcie  $\Delta U_{AB}$ , które poprzez obwód sprzężenia zwrotnego podtrzymuje prąd  $I_k$ . Dlatego przy analizie mostka automatycznego należy korzystać z równania (1), podstawiając w miejsce  $U_{AB}$  napięcie  $\Delta U_{AB}$ . Zmienia to wyniki obliczeń uzyskane w punkcie 2.1. Można jednak tak dobrać parametry obwodu sprzężenia zwrotnego, aby błędy wynikające z pominięcia  $U_{AB}$  we wzorze (1) były pomijalnie małe. Wówczas analiza przeprowadzona w punkcie 2.1. będzie obowiązywać również w stosunku do mostka równoważonego samoczynnie.

Omawiany mostek automatyczny posiada dwie ważne własności:

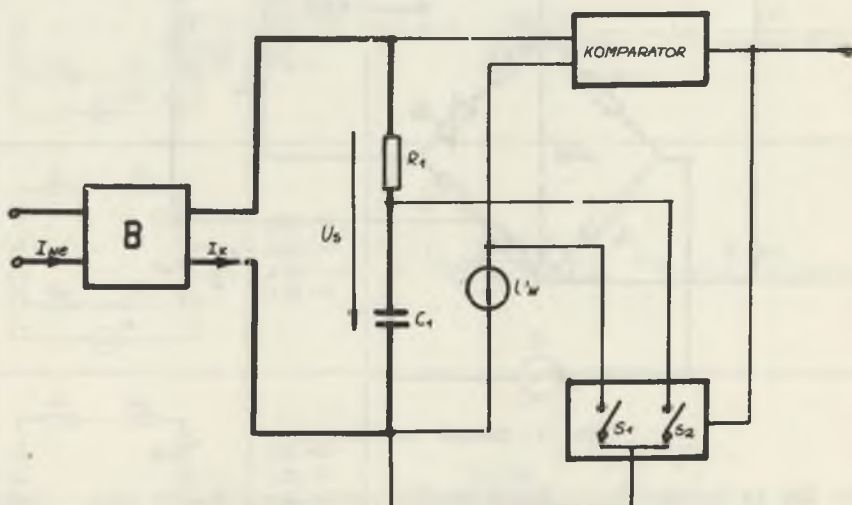
- równanie opisujące mostek jest liniowe w szerokim zakresie zmian rezystancji,
- w obwodzie mostka brak jest elementów elektromechanicznych.

Druga własność pozwala na stosowanie mostka w układach pomiarowych wielkości dynamicznie zmiennych, gdyż brak w jego konstrukcji elementów mechanicznych jest równoznaczny z brakiem inercji z ich pracą związanej.

Mostek może przenosić przebiegi szybkochodne, a ograniczeniem są tylko stałe czasowe elementów półprzewodnikowych.

### 2.3. Przetwarzanie prądu na częstotliwość

Drugim blokiem przetwornika R/f (rys. 1) jest przetwornik prądu na częstotliwość, którego uproszczony schemat przedstawiono na rys. 4. Prąd wejś-



Rys. 4. Schemat blokowy przetwornika prąd - częstotliwość

ciowy  $I_{we}$  podawany jest na wzmacniacz o dużej rezystancji wyjściowej, co stwarza warunki źródła prądowego. Współczynnik wzmocnienia wzmacniacza wynosi jeden, czyli  $I_k = I_{we}$ . Prąd  $I_k$  przepływa przez kondensator  $C_1$ , ładując go i przez opornik  $R_1$  - wytwarzając na nim spadek napięcia. Gdy suma tych napięć zrówna się z napięciem wzorcowym  $U_w$ , zadziała komparator, uruchamiając styki zwierające kondensator  $C_1$  i źródło napięcia wzorcowego  $U_w$ . Kondensator zostanie rozładowany do napięcia  $U_0$ , wówczas komparator spowoduje rozwarcie styków  $S_1$  i  $S_2$ , a proces ładowania kondensatora powtórzy się. Każdy taki cykl daje na wyjściu przetwornika impuls elektryczny. Częstotliwość impulsów w tak zbudowanym układzie będzie proporcjonalna do natężenia prądu wejściowego przetwornika, a funkcja przetwarzania ma postać (7).

$$f = \frac{I_k}{(U_w - U_0) C_1} \quad (7)$$

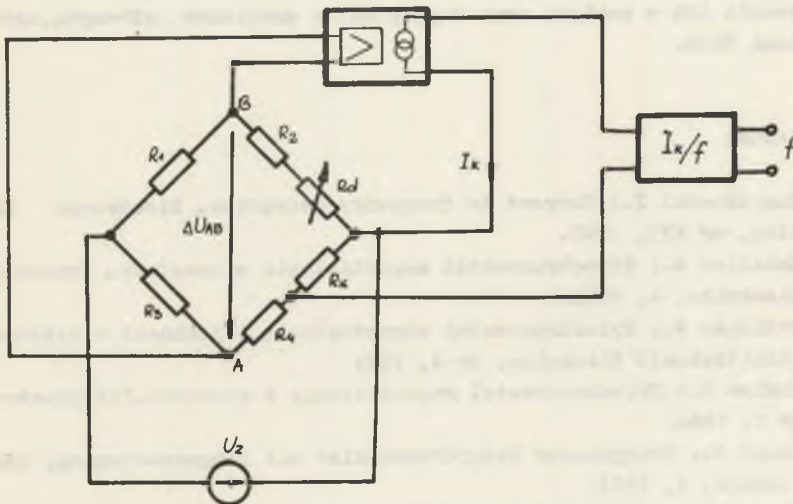
$U_w$  - wartość napięcia wzorcowego podanego na wejście komparatora (rys.4)

$U_0$  - wartość napięcia początkowego na kondensatorze  $C_1$

Układ przetwornika posiada rozwiązania ograniczające wpływy temperaturce i wpływy zmian napięcia zasilania na wielkość wyjściową.

#### 2.4. Własności przetwornika R/f

Jeżeli w obwód ujemnego sprzężenia zwrotnego mostka automatycznego włączony zostanie przetwornik prąd - częstotliwość (rys. 5) działanie układu będzie następujące.



Rys. 5. Układ przetwornika rezystancja - częstotliwość

Zmiana rezystancji  $\Delta R$ , jednego lub dwóch elementów mostka zostanie przetworzona na zmianę prądu  $\Delta I_k$  wg odpowiedniej funkcji (tablica 1). Zmiana prądu przepływającego przez przetwornik prąd - częstotliwość będzie wywoływać zmianę częstotliwości przebiegu wyjściowego. W ten sposób został zrealizowany układ przetwarzający zmiany rezystancji, np. czujnika pomiarowego włączonego w obwód mostka na proporcjonalne zmiany częstotliwości wg zależności (8).

$$f = \frac{U_z}{R R_k (U_p - U_0) C_1} \Delta R \quad (8)$$

Częstotliwość  $f$  zależy tylko od jednej zmiennej  $\Delta R$  oraz od kilku parametrów stałych, których stabilność ma duży wpływ na dokładność przetwarzania.

Linowa charakterystyka przetwarzania daje duże możliwości zastosowań oraz współpracy przetwornika z innymi układami pomiarowymi. Dobre własności dynamiczne (bezinercyjność) pozwalają na stosowanie przetwornika w układach pomiarowych różnych wielkości fizycznych, szybkozmiennych. Przetwornik posiada dużą czułość, dobieraną w zależności od wymogów pracy. Zmiany czułości przetwarzania można dokonać rezystancją  $R_k$  w mostku lub pojemnością  $C_1$  w przetworniku prąd - częstotliwość. W skonstruowanym modelu uzyskano czułość rzędu kilku kiloherców na 1% zmiany rezystancji. Impulsowe wyjście przetwornika z regulowaną w szerokim zakresie częstotliwością daje dobre warunki przesyłu wyników pomiarowych na odległość, przechowywania ich w pamięci oraz współpracy z maszynami cyfrowymi, czy urządzeniami CRPD.

#### LITERATURA

- [1] Korytkowski J.: Current to frequency converter. Electronic Engineering, nr 475, 1967.
- [2] Knieller W.: Преобразователь сопротивления в частоту, Измерительная техника, 6, 1963.
- [3] Fotlecko W.: Преобразователь сопротивления и емкости в частоту. Измерительная техника, nr 4, 1971.
- [4] Koniew N.: Преобразователь сопротивления в частоту. Приборостроение, nr 1, 1966.
- [5] Lunze K.: Hochgenauer Maßgrößenwandler mit Frequenz Ausgang, Regelungstechnik, 1, 1969.
- [6] Simon H.: Wienerstandsannahmer in RL Netzwerken ATM, nr 2, 1974.

#### ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ СОПРОТИВЛЕНИЕ - ЧАСТОТА

#### Резюме

Описан точный метод линейного преобразования сопротивления в частоту с регулируемой чувствительностью. Произведен анализ автоматического моста постоянного тока с двумя входами подачи. Сделаны выводы.



RESISTANCE TO FREQUENCY CONVERTER

S u m m a r y

The article presents the accurate method o linear converting of resistance into frequency. The set-up of the converter has been discussed and mathematical corelations given. The two-feeding automatic bridge has been analysed and its properties given.