## ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLASKIEJ Seria: ELEKTRYKA z. 165

Andrzej MET Instytut Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej Politechnika Śląska

# KOMPARATOR WZORCÓW INDUKCYJNOŚCI

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ do bezpośredniego pomiaru małych różnic indukcyjności i rezystancji szeregowych dwu wzorców indukcyjności. Układ jest zastosowany do sprawdzania państwowego wzorca indukcyjności w PTB Berlin.

# THE BRIDGE FOR CHECKING OF INDUCTANCE STANDARD

Summary. In the paper the circuit for direct measurement of small differences of inductance and series resistance of two standards is presented. The circuit is used for checking of national inductance standard in PTB Berlin.

### **1. WPROWADZENIE**

Wyznaczenie lub sprawdzenie wartości wzorca indukcyjności dokonywane jest przez porównanie go ze wzorcem odniesienia. Pomiar wartości obu wzorców, a następnie wyznaczenie różnicy między nimi są obarczone dużym błędem. Wynika to z małych różnic między wzorcami, które często są porównywalne z błędami pomiaru. Problem ten występuje nie tylko przy przenoszeniu wartości między pojedynczymi wzorcami, ale również przy realizacji grupowego wzorca indukcyjności, gdzie konieczny jest pomiar różnic między wszystkimi wzorcami grupy [3,4].

Rozwiązaniem tego problemu może być bezpośredni pomiar różnicy indukcyjności. Popełniany przy pomiarze różnicy błąd odniesiony do wartości wzorca jest bardzo mały. Jest to istotna zaleta bezpośredniego pomiaru różnicy. Przyrządy pomiarowe do pomiaru różnicy indukcyjności nie są produkowane, dlatego podjęto się zadania opracowania i wykonania takiego przyrządu.

# 2. ZASADA POMIARU RÓŻNICY INDUKCYJNOSCI

Do pomiaru różnicy indukcyjności zastosowano układ niezrównoważonego mostka transformatorowego (rys1). Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania dwóch jednakowych napięć -  $E_1$  i  $E_2$  - o bardzo dobrej zgodności i stabilności czasowej (z błędem względnym około 10<sup>-8</sup>).



Rys. 1. Schemat układu podstawowego Fig. 1. Basic circuit diagram

Napięcie nierównowagi  $\Delta U$  zależne jest od różnicy indukcyjności i rezystancji wzorców oraz od prądu pomiarowego I<sub>x</sub>. Przy założeniu, że napięcia E<sub>1</sub> i E<sub>2</sub> są jednakowe, wartość napięcia  $\Delta U$  określa zależność:

$$\Delta U = I_{x}[(R_{2} - R_{1}) + j\omega(L_{2} - L_{1})]/2.$$
(1)

Dla łatwego wyznaczenia różnic rezystancji i indukcyjności napięcie  $\Delta U$  mierzone jest metodą kompensacyjną za pomocą kompensatora (rys.2).



Rys. 2. Schemat układu kompensatora Fig. 2. Compensatory circuit diagram

W układzie kompensatora prąd Ix przetwarzany jest za pomocą transformatora

prądowego i przetwornika I/U na napięcie U<sub>0</sub> [2], które jest następnie podawane na dwa tory, zawierające mnożące przetworniki cyfrowo-analogowe. W pierwszym torze, zawierającym przetwornik MD/A-1, napięcie U<sub>0</sub> przesuwane jest o kąt 90°, natomiast w drugim podawane jest bezpośrednio na przetwornik MD/A-2. Napięcie wyjściowe kompensatora U<sub>c</sub> jest proporcjonalne do prądu I<sub>x</sub> i ma możliwość niezależnej regulacji składowej ortogonalnej i synfazowej za pomocą współczynników N<sub>1</sub> i N<sub>2</sub>, co opisuje zależność:

$$U_{\rm C} = I_{\rm X} k_{\rm p} (N_2 + j\omega N_1), \qquad (2)$$

przy czym kp - współczynnik przetwarzania prądu Ix na napięcie Uo.

W układzie pomiarowym (rys.3) napięcie nierównowagi  $\Delta U$  porównywane jest z napięciem kompensatora U<sub>c</sub> za pomocą detektora zera.



### Rys. 3. Układ pomiarowy Fig. 3. Measurement circuit

oraz

Przez wprowadzenie odpowiednich liczb  $N_1$  i  $N_2$  do mnożących przetworników cyfrowo-analogowych układu kompensatora doprowadza się do równości napięć  $\Delta U$  i  $U_c$ , która jest wykrywana przez detektor zera (D). Wtedy z równań (1) i (2) wynika:

$$R_2 - R_1$$
) + j $\omega(L_2 - L_1) = 2k_p(N_2 + j\omega N_1)$ . (3)

Porównując części rzeczywiste i urojone otrzymuje się

$$R_2 - R_1 = 2k_p N_2$$
 (4)

 $L_2 - L_1 = 2k_p N_1.$  (5)

Ustalając wartość k<sub>p</sub> = " równania (4) i (5) przyjmują postać:

$$R_2 - R_1 = N_2$$
, (6)

$$L_2 - L_1 = N_1. (7)$$

Z równań (6) i (7) wynika, że w stanie kompensacji liczby  $N_1$  i  $N_2$  wprowadzone do mnożących przetworników cyfrowo-analogowych są odpowiednio równe różnicy indukcyjności i rezystancji porównywanych wzorców.

## 2. ZASADA POMIARU RÓŻNICY INDUKCYJNOSCI

Do pomiaru różnicy indukcyjności zastosowano układ niezrównoważonego mostka transformatorowego (rys1). Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość uzyskania dwóch jednakowych napięć -  $E_1$  i  $E_2$  - o bardzo dobrej zgodności i stabilności czasowej (z błędem względnym około 10<sup>-8</sup>).



Rys. 1. Schemat układu podstawowego Fig. 1. Basic circuit diagram

Napięcie nierównowagi  $\Delta U$  zależne jest od różnicy indukcyjności i rezystancji wzorców oraz od prądu pomiarowego I<sub>x</sub>. Przy założeniu, że napięcia E<sub>1</sub> i E<sub>2</sub> są jednakowe, wartość napięcia  $\Delta U$  określa zależność:

$$\Delta U = I_{x}[(R_{2} - R_{1}) + j\omega(L_{2} - L_{1})]/2.$$
(1)

Dla łatwego wyznaczenia różnic rezystancji i indukcyjności napięcie  $\Delta U$  mierzone jest metodą kompensacyjną za pomocą kompensatora (rys.2).



Rys. 2. Schemat układu kompensatora Fig. 2. Compensatory circuit diagram

W układzie kompensatora prąd Ix przetwarzany jest za pomocą transformatora

prądowego i przetwornika I/U na napięcie U<sub>0</sub> [2], które jest następnie podawane na dwa tory, zawierające mnożące przetworniki cyfrowo-analogowe. W pierwszym torze, zawierającym przetwornik MD/A-1, napięcie U<sub>0</sub> przesuwane jest o kąt 90°, natomiast w drugim podawane jest bezpośrednio na przetwornik MD/A-2. Napięcie wyjściowe kompensatora U<sub>c</sub> jest proporcjonalne do prądu I<sub>x</sub> i ma możliwość niezależnej regulacji składowej ortogonalnej i synfazowej za pomocą współczynników N<sub>1</sub> i N<sub>2</sub>, co opisuje zależność:

$$U_{\rm C} = I_{\rm X} k_{\rm p} (N_2 + j\omega N_1), \qquad (2)$$

przy czym kp - współczynnik przetwarzania prądu Ix na napięcie U0.

W układzie pomiarowym (rys.3) napięcie nierównowagi  $\Delta U$  porównywane jest z napięciem kompensatora U<sub>c</sub> za pomocą detektora zera.



### Rys. 3. Układ pomiarowy Fig. 3. Measurement circuit

Przez wprowadzenie odpowiednich liczb N<sub>1</sub> i N<sub>2</sub> do mnożących przetworników cyfrowo-analogowych układu kompensatora doprowadza się do równości napięć  $\Delta U$  i U<sub>c</sub>, która jest wykrywana przez detektor zera (D). Wtedy z równań (1) i (2) wynika:

$$R_2 - R_1) + j\omega(L_2 - L_1) = 2k_p(N_2 + j\omega N_1).$$
(3)

Porównując części rzeczywiste i urojone otrzymuje się

$$\mathbf{R}_2 - \mathbf{R}_1 = 2\mathbf{k}_p \mathbf{N}_2 \tag{4}$$

$$L_2 - L_1 = 2k_p N_1.$$
 (5)

Ustalając wartość k<sub>p</sub> = " równania (4) i (5) przyjmują postać:

$$R_2 - R_1 = N_2,$$
 (6)

$$L_2 - L_1 = N_1. (7)$$

Z równań (6) i (7) wynika, że w stanie kompensacji liczby  $N_1$  i  $N_2$  wprowadzone do mnożących przetworników cyfrowo-analogowych są odpowiednio równe różnicy indukcyjności i rezystancji porównywanych wzorców.

### **3. KONSTRUKCJA**



Uproszczony schemat blokowy komparatora wzorców indukcyjności przedstawiony jest na rysunku 4.

Rys. 4. Uproszczony schemat blokowy komparatora indukcyjności Fig. 4. Simplified block diagram of inductance comparator

W dotychczasowych rozważaniach opisano układ pomiarowy oraz schemat blokowy kompensatora. Dalej zostaną przedstawione pozostałe bloki komparatora wzorców indukcyjności.

# 3.1. Detektor

Przy założonej rozdzielczości pomiaru różnicy indukcyjności równej 1nH i prądzie pomiarowym 10 mA detektor wykrywa różnicę między napięciem nierównowagi  $\Delta U$  i napięciem kompensacyjnym U<sub>C</sub> na poziomie 90 nV. Uzyskanie tak dużej czułości wymagało zastosowania na wejściu detektora filtru selektywnego dostrojonego do częstotliwości prądu pomiarowego (1000 Hz lub 1592 Hz). Zastosowany filtr z przełączanymi kondensatorami zapewnia automatyczne dostrajanie się do częstotliwości prądu pomiarowego poprzez doprowadzenie do niego sygnału o częstotliwości odniesienia. Częstotliwość środkowa oraz dobroć filtru jest ustawiana programowo przez mikrokontroler. Rozwiązanie takie daje możliwość optymalnego dostrojenia, zapewniającego brak przesunięcia fazowego oraz dobre tłumienie szumów i zakłóceń.

Sygnał nierównowagi po odfiltrowaniu podawany jest równolegle na dwa detektory fazoczułe. Sygnały o fazie odniesienia doprowadzone są do detektorów z wejść przetworników mnożących układu kompensatora. Ponieważ sygnały odniesienia są wzajemnie ortogonalne, na wyjściach detektorów pojawiają się napięcia, które informują, jak należy zmieniać liczby wprowadzane do przetworników C/A kompensatora, aby uzyskać stan kompensacji. Napięcia wyjściowe z detektorów fazoczułych sterują również wskaźnikami w postaci linijek świetlnych. W stanie kompensacji linijki świetlne (LED bars) są ciemne, a liczby wprowadzone do mnożących przetworników C/A odpowiadają bezpośrednio różnicom rezystancji i indukcyjności porównywanych wzorców. Polaryzacje napięć wyjściowych detektorów fazoczułych są również przetwarzane na wartości binarne i doprowadzone do mikrokontrolera w celu umożliwienia automatycznej kompensacji.

#### 3.2. Generator

Pierwszy elementem układu jest stabilny oscylator kwarcowy, który współpracując z dzielnikami częstotliwości w układzie PLL zapewnia uzyskanie napięć zmiennych o częstotliwościach 1000 Hz i 1592 Hz. Napięcie to doprowadzone jest do mnożącego przetwornika C/A, który umożliwia cyfrową regulację amplitudy. Następnym stopniem jest cyfrowo sterowany filtr, którego zadaniem jest usunięcie harmonicznych. Sygnał wyjściowy z filtru wzmacniany jest we wzmacniaczu mocy i doprowadzony do uzwojenia pierwotnego transformatora podziałowego.

#### 3.3. Miernik prądu

Wzorce indukcyjności powinny być porównywane przy ściśle określonym prądzie. Aby umożliwić pomiar prądu  $I_x$ , wystarczy zmierzyć proporcjonalne do niego napięcie na wyjściu przetwornika I/U. W tym celu napięcie wyjściowe przetwornika I/U jest przetwarzane na napięcie stałe, a następnie za pomocą przetwornika A/C przetwarzane na wartość cyfrową, która jest odczytywana przez mikrokontroler i wyświetlana na wyświetlaczu LED.

### 3.4. Część cyfrowa

Część cyfrowa zawiera typowe elementy: mikrokontroler, pamięć RAM i EPROM, klawiaturę, wyświetlacz i sterownik łącza RS z układem optoizolacji. Mikrokontroler wraz z układami peryferyjnymi realizuje następujące funkcje:

- ustawia częstotliwość generatora na 1000 lub 1592 Hz,
- programuje filtry generatora i wzmacniacza selektywnego dla wybranej częstotliwości,
- dokonuje regulacji napięcia generatora za pomocą mnożącego przetwornika C/A,
- dokonuje pomiaru prądu za pomocą przetwornika A/C i wyświetla jego wartość na wyświetlaczu,
- zmniejsza napięcie generatora w przypadku przekroczenia prądu pomiarowego,
- umożliwia wprowadzenie z klawiatury do mnożących przetworników C/A liczb N<sub>1</sub> i N<sub>2</sub> oraz wyświetlenie ich na wyświetlaczu,
- przeprowadza autokompensację w dwóch trybach (sukcesywnej aproksymacji i ciągłej nadążnej),
- dokonuje obróbki statystycznej sygnału wyjściowego detektora w trakcie autokompensacji,
- steruje diodami LED określającymi aktualny stan komparatora,
- umożliwia przesłanie wartości prądu oraz liczb N1 i N2 do komputera przez łącze RS 232,
- umożliwia odbiór rozkazów z komputera przez łącze RS232 i traktowanie ich jako poleceń z klawiatury.

#### 3.5. Płyta czołowa

Wygląd płyty czołowej przedstawiony jest na rysunku 5.



Rys. 5. Pyta czołowa Fig. 5. Front panel

W środkowej części płyty czołowej znajdują się kolejno wyświetlacze różnicy indukcyjności, rezystancji oraz wartości prądu. Nad wyświetlaczami różnicy indukcyjności i rezystancji znajdują się wskaźniki stanu kompensacji w postaci linijek świetlnych. W dolnej prawej części płyty znajduje się klawiatura umożliwiająca sterowanie funkcjami komparatora indukcyjności. Na płycie czołowej znajduje się również osiem wskaźników LED określających aktualny stan komparatora.

### 4. PARAMETRY TECHNICZNE

Komparator wzorców indukcyjności posiada następujące parametry:

•	indukcyjność nominalna wzorców:	$L_n = 10 \text{ mH},$
•	rezystancja nominalna wzorców:	$R_n = 8,2 \Omega$ ,
•	częstotliwość pomiarowa:	f = 1000 Hz (1592 Hz),
•	prąd pomiarowy:	$I_x = 10 \div 100 \text{ mA},$
•	zakres mierzonej różnicy indukcyjności:	$\Delta L = \pm 16 \ \mu H (160 \ \mu H),$
•	zakres mierzonej różnicy rezystancji:	$\Delta \mathbf{R} = \pm 160 \text{ m}\Omega (1,6 \Omega),$
•	rozdzielczość pomiaru różnicy indukcyjności:	$\Delta_{\rm r}(\Delta L) = \pm 1 \text{ nH (10 nH)},$
•	rozdzielczość pomiaru różnicy rezystancji:	$\Delta_{\rm r}(\Delta R) = \pm 10 \ \mu\Omega \ (100 \ \mu\Omega)$
•	błąd pomiaru różnicy indukcyjności:	$ \pm\Delta_{\Delta L}  = 10 \text{ nH} (20 \text{ nH}),$
	bład pomiaru różnicy rezystancji:	$ \pm\Delta_{AB}  = 1 \text{ m}\Omega (2 \text{ m}\Omega).$

#### 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony komparator wzorców indukcyjności spełnia wysokie wymagania. Umożliwia wykonanie pomiarów o dużej dokładności, także wzorców o nieliniowych charakterystykach oraz wykonanie badań stałości długoczasowej wzorców, także w funkcji temperatury. Wyniki pomiarów mają bardzo dobrą powtarzalność (w granicach błędu rozdzielczości).

## LITERATURA

- 1. Kibble B. P., Rayner G. H. Coaxial Bridges. A. Hilger Ltd., Bristol 1984
- 2. Łatka A., Met A. Bezdotykowy miernik natężenia prądu zmiennego o znikomym oddziaływaniu na mierzony obiekt. PAK nr 6, 1981
- Met A., Skubis T. Komparator wzorca grupowego indukcyjności własnej. Materiały Konferencyjne PPM'98, PAN, Gliwice – Ustroń 1998 str. 191-201

4. Skubis T., Met A., Kampik M. - Precise Comparator for Checking of Group Inductance Standard. Proc. CPEM'96, pp,406-407, Braunschweig, June 1996

Wpłynęło do redakcji dnia 1 grudnia 1998 r.

Recenzent: Dr hab. inż. Michał Szyper prof. AGH

#### Abstract

The bridge for difference measurement of two inductance standards has been constructed. Its essential metrological parameters are listed in chapter 4. It can measure directly component differences, both self inductance and series resistance. The bridge output voltage  $\Delta U$  is measured by opposition method (Fig.3). Components of the compensating voltage are inphase and quadrature with the measuring current  $I_x$ , flowing thorough the standards compared ( $L_1$ ,  $R_1$ ;  $L_2$ ,  $R_2$ ). Secondary voltages  $E_1$  and  $E_2$  of the precise transformer are as equal as possible. The voltage  $\Delta U$  can be expressed by equations (1). The bridge output voltage  $\Delta U$  is compensated by the voltage  $U_c$ , produced in the compensatory circuit (Fig.2). Component magnitudes of  $U_c$  are precisely set by two multiplying digital to analog converters with adjustable factor  $N_1$  and  $N_2$ . Equations (6) and (7) describe the equilibrium state of the bridge. Many parts of the bridge are controlled by microcontroller 80C31. Data transfer from the bridge to the computer is possible by serial interface (RS232). More detailed circuit of the bridge is given in block diagram Fig.4.