

Jerzy AUGUSTYN

ANALIZA METOD SAMORÓWNOWAŻENIA MAGNETYCZNEGO  
KOMPARATORA PRĄDU PRZEMIENNEGO

**Streszczenie.** Przedstawiono analizę porównawczą metod samorównoważenia magnetycznego komparatora prądu w układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych. Przeanalizowano komparatory z detektorem strumienia magnetycznego oraz siły magnetomotorycznej w układach: z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych, z kompensacją prądu oraz różnicowym prądowym Hohlego. Jako kryterium porównania przyjęto błąd samorównoważenia oraz impedancję wejściową obwodu prądu wtórnego komparatora. Wskazano wspólne źródła błędów samorównoważenia porównywanych układów. Przedstawiono wnioski dotyczące możliwości zastosowania analizowanych metod w układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych.

1. Wprowadzenie

Magnetyczny komparator prądu (MKP) jako wzorzec stosunku dwóch prądów o błędach własnych rzędu  $10^{-6} \dots 10^{-7}$  znalazł zastosowanie m.in. w układach do wzorcowania przekładników prądowych [3][4][7][8]. Poszczególne rozwiązania stosowane w tych układach różnią się szczegółami budowy komparatora, sposobem kompensacji błędów badanego przekładnika. Przekładnia MKP jest zawsze równa nominalnej przekładni badanego przekładnika prądowego (PP). W wyniku przepływu przez uzwojenia porównawcze komparatora ( $N_1$  i  $N_2$ ) prądów porównawczych  $I_1$  i  $I_2$  w magnetowodzie detekcyjnym 1 otoczonym ekranem magnetycznym 2 powstaje strumień magnetyczny proporcjonalny do różnicy sił magnetomotorycznych (SMM) wytworzonych przez te prądy (tablica 1). W celu skompensowania tej SMM należy wymusić w uzwojeniu kompensacyjnym  $N_k$  (lub w jednym z uzwojeń porównawczych) prąd  $I_k$  o takiej wartości, aby napięcie indukujące się w uzwojeniu detekcyjnym  $N_D$  było równe zero. Spełniana jest wtedy zależność:

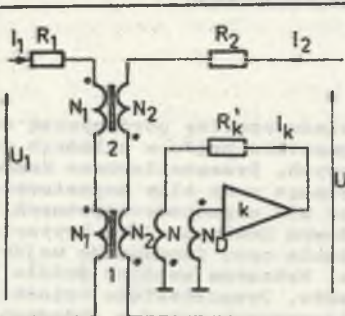
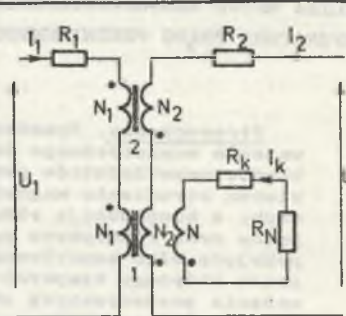
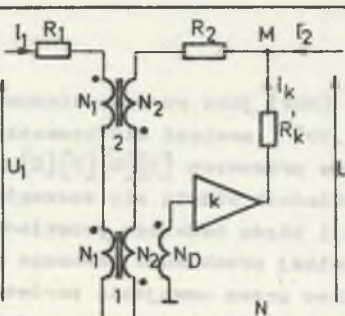
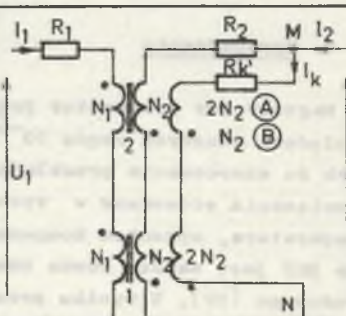
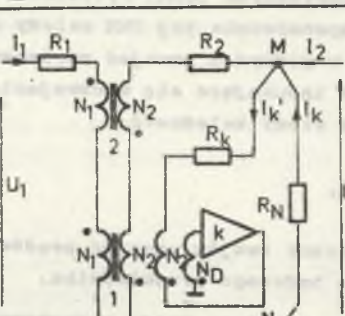
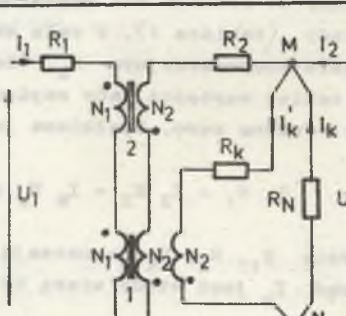
$$I_1 N_1 - I_2 N_2 - I_k N_k = 0, \quad (1.1)$$

gdzie  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_k$  oznaczają liczby zwojów uzwojeń prądów  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_k$ . Prąd  $I_k$  jest wtedy miarą błędów badanego przekładnika.

Zastosowanie magnetycznego komparatora prądu w zautomatyzowanych stanowiskach do wyznaczania błędów przekładników prądowych wymaga zautomatyzowania procesu równoważenia komparatora. Spotykane rozwiązania układów samorównoważenia są przedstawione w sposób opisowy.

Tablica 1

Schematy ideowe układów samorównoważenia MKP

	Układy z detektorem $\Phi$	Układy z detektorem $\Theta$
Układy z kompensacją różnicy SMM	 <p>① Układ Milijaniča</p>	 <p>④</p>
Układy z kompensacją prądu	 <p>② Układ Calverta</p>	 <p>⑤</p>
Zmodyfikowane układy różnicowe Hahlega	 <p>③ Układ Petersona</p>	 <p>⑥ Układ Brauna</p>

Różne są również metody ich analizy. Uniemożliwia to porównanie tych układów ze względu na wartości podstawowych parametrów, różnych w zależności od przyjętej metody analizy. W artykule dokonano jednolitej analizy możliwości rozwiązań układów samorównoważenia oraz porównania ich właściwości metrologicznych.

## 2. Kryteria klasyfikacji układów samorównoważenia komparatora

Główne kryterium podziału układów samorównoważenia na układy samorównoważące  $\Theta$  oraz  $\Phi$  wynika z zasady działania detektora w komparatorach. Detektory strumienia  $\Phi$  oraz siły magnetomotorycznej  $\Theta$  mogą być zastosowane w komparatorach pracujących w trzech podstawowych układach:

- kompensacji różnicy sił magnetomotorycznych  $\Theta_k$ ,
- kompensacji prądu  $I_k$ ,
- różnicowym prądowym Hohlego.

Podział ten stanowi drugie kryterium klasyfikacji komparatorów z samorównoważeniem.

Ze względu na zasadę działania detektora siły magnetomotorycznej  $\Theta$  komparatory z takim detektorem są komparatorami samorównoważącymi się - różnica polega na sposobie połączenia obwodu wymuszającego kompensującą siłę magnetomotoryczną  $\Theta_k$ .

W przypadku komparatora z detektorem  $\Phi$  realizacja samorównoważenia wymaga przetworzenia strumienia magnetycznego poprzez napięcie indukujące się w uzwojeniu detekcyjnym na prąd wymuszający osiągnięcie stanu kompensacji strumieni. Dlatego układy samorównoważenia muszą zawierać elementy aktywne. W tabelicy 1 zebrano w sposób uporządkowany wg obu kryteriów układy samorównoważących się komparatorów. Tablica zawiera najprostsze układy, ilustrujące zasadę działania - ich realizacja może być bardziej złożona (układy rozbudowane).

Porównanie poszczególnych układów wymaga jednolitej ich analizy.

Jako podstawowe kryterium porównania przyjęto wprowadzony w pracy [2] błąd samorównoważenia  $\delta_{Ik}^{\circ}$ , zdefiniowany jako różnica prądu kompensującego  $I_k$  płynącego w obwodzie samorównoważenia komparatora i prądu  $I_{km}$  wynikającego z równania kompensacji SMM w komparatorze (1.1), odniesiona do prądu  $I_{km}$ :

$$\delta_{Ik}^{\circ} = \frac{I_k - I_{km}}{I_{km}}, \quad (2.1)$$

gdzie

$$I_{km} = \frac{N_1 I_1 - N_2 I_2}{N_k} \quad (2.2)$$

W układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych istotnym zagadnieniem jest wartość impedancji obciążenia wprowadzanej do obwodu wtórnego przekładnika przez komparator. Dlatego pomocniczym kryterium porównania jest impedancja wejściowa  $Z_{wg2}$  obwodu prądu wtórnego  $I_2$  komparatora. Minimalizacja tej impedancji jest odrębnym zagadnieniem omówionym m.in. w pracach [1], [9].

Dla uproszczenia rozważań założono zerowe wartości strumieni rozprożeń i prądów admitancyjnych w komparatorze.

### 3. Układy MKP z detektorem strumienia magnetycznego

Samorównoważenie MKP z detektorem  $\Phi$  realizuje się poprzez wprowadzenie wzmacniacza napięciowego o dużym współczynniku wzmocnienia  $k$ , wymuszającego w odpowiednim uzwojeniu komparatora przepływ prądu zapewniający skompensowanie różnicy strumieni w magnetowodzie detekcyjnym. Sygnałem podawanym na wejście wzmacniacza jest napięcie na uzwojeniu detekcyjnym komparatora. Dla uproszczenia analizy przyjęto, że impedancja wejściowa wzmacniacza jest nieskończenie wielka, natomiast jego impedancję wyjściową włączono do rezystancji  $R_k$  uzwojenia kompensacyjnego. Przez  $R'_k$  oznaczono sumę rezystancji uzwojenia kompensacyjnego  $R_k$  oraz rezystancji wejściowej miernika prądu  $I_k$ .

#### 3.1. Układ Milijaniča

Układ samorównoważenia MKP oznaczony w tablicy 1 przez ① został opisany w pracy [11] przez Milijaniča, Obradowiča i Spirondoviča. W swojej pierwotnej wersji był to komparator bez ekranu magnetycznego - wprowadzenie ekranu nie zmienia istotnych cech układu samorównoważenia.

Wzmacniacz napięcia wymusza prąd kompensujący w uzwojeniu kompensacyjnym połączonym z masą komparatora. Obwód samorównoważenia może być galwanicznie oddzielony od pozostałych uzwojeń komparatora. Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależności:

$$\Phi_1 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_k I_k) \Lambda_1 \quad (3.1)$$

$$\Phi_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2) \Lambda_2 \quad (3.2)$$

Obwody prądów  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_k$  opisują równania napięć:

$$U_1 = I_1 R_1 + j\omega N_1 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.3)$$

$$U_2 = I_2 R_2 - j\omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.4)$$

$$j\omega N_k \Phi_1 = I_k R'_k - k j\omega N_D \Phi_1. \quad (3.5)$$

Błąd badanego przekładnika prądowego  $\delta_P^\circ$  jest równy:

$$\delta_P^\circ = \frac{\frac{N_2}{N_1} I_2 - I_1}{I_1} \approx \frac{\frac{N_2}{N_1} I_2 - I_1}{\frac{N_2}{N_1} I_2}. \quad (3.6)$$

Po podstawieniu zależności (3.1) do (3.5) i uwzględnieniu (3.6) otrzymano prąd kompensujący równy:

$$I_k = -I_2 \delta_P^\circ \frac{j\omega(N_k + k N_D) N_k \Lambda_1}{R'_k + j\omega(N_k + k N_D) N_k \Lambda_1} \quad (3.7)$$

oraz na podstawie zależności (2.1) błąd samorównoważenia:

$$\delta_{Ik}^\circ = -\frac{R'_k}{R'_k + j\omega(N_k + k N_D) N_k \Lambda_1} \quad (3.8)$$

Impedancję wejściową MKP od strony uzwojenia prądu  $I_2$  wyznaczono z zależności (3.4), stąd:

$$Z_{we2} = \frac{U_2}{I_2} = R_2 + \delta_P^\circ j\omega N_2^2 (\Lambda_2 - \delta_{Ik}^\circ \Lambda_1). \quad (3.9)$$

Impedancja wejściowa komparatora bez układów samorównoważenia jest równa [1]:

$$Z_{we2} = R_2 + \delta_P^\circ j\omega N_2^2 \Lambda_2, \quad (3.10)$$

Układ samorównoważenia nie wpływa więc na wartość impedancji wejściowej MKP, co wynika z porównania zależności (3.9) i (3.10) (składnik  $\delta_P^\circ \delta_{Ik}^\circ j\omega N_2^2 \Lambda_1 \approx 0$ ).

### 3.2. Układ Calverta

Układ samorównoważenia oznaczony w tablicy 1 przez ② został opisany przez Calverta i Mildwata w pracy [6]. Zastosowano go do samorównoważenia transformatorowego mostka impedancyjnego.

Wzmacniaoz napięcia wymusza prąd kompensujący w uzwojeniu prądu  $I_2$  komparatora. Uzwojenie kompensacyjne nie jest wymagane. Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależności:

$$\Phi_1 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k) \Lambda_1 \quad (3.11)$$

$$\Phi_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k) \Lambda_2. \quad (3.12)$$

Z kolei obwody prądów  $I_1$ ,  $I_2$  i  $I_k$  opisują równania napięć:

$$U_1 = I_1 R_1 + j\omega N_1 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.13)$$

$$U_2 = I_2 R_2 + I_k R_2 - j\omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.14)$$

$$U_2 = -I_k R'_k + j\omega k N_D \Phi_1. \quad (3.15)$$

Po podstawieniu (3.11) i (3.12) do (3.14) i (3.15) otrzymano prąd  $I_k$  równy:

$$I_k = -I_2 \frac{R_2 + \delta_P^0 [j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) + j\omega k N_D N_2 \Lambda_1]}{R_2 + R'_k + j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) + j\omega k N_D N_2 \Lambda_1}. \quad (3.16)$$

Błąd samorównoważenia układu jest równy:

$$\delta_{Ik}^0 = - \frac{\delta_P^0 (R_2 + R'_k) - R_2}{\delta_P^0 [R_2 + R'_k + j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) + j\omega k N_D N_2 \Lambda_1]}. \quad (3.17)$$

Z zależności (3.15) wyznaczono impedancję wejściową komparatora od strony uzwojenia prądu  $I_2$ :

$$Z_{we2} = R_2 \left[ 1 - \delta_P^0 (1 + \delta_{Ik}^0) \right] - j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) \delta_P^0 \delta_{Ik}^0. \quad (3.18)$$

Dla  $\delta_{Ik}^0 \ll 1$  zależność (3.18) upraszcza się do postaci:

$$Z_{we2} = R_2. \quad (3.19)$$

Z zależności (3.10) został wyeliminowany składnik związany z napięciem na impedancji ekranu magnetycznego.

### 3.3. Układ Petersonsa

Układ MKP oznaczony w tablicy 1 przez ③ został opisany przez Petersonsa w pracy [12] i był wykorzystywany jako wzorcowy przekładnik do zmiany zakresów pomiarowych mostka impedancyjnego.

W układzie tym ekran magnetyczny wraz z uzwojeniami porównawczymi  $N_1$  i  $N_2$  pełni funkcję wzorcowego przekładnika prądowego. Błędy tego przekładnika są elektronicznie kompensowane przez wymuszenie w obwodzie prądu  $I_2$  dodatkowego prądu  $I'_k$ , zapewniającego odtworzenie stosunku prądów wynikającego z przekładni zwojowej komparatora.

Połączenie następujących podzespołów: komparator bez ekranu magnetycznego - ekran magnetyczny z uzwojeniami porównawczymi - wzmacniacz napięcia tworzy łącznie wzorcowy przekładnik prądowy zastosowany do wyznaczenia błędów przekładnika badanego w układzie różnicowym Hoblego. Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależności:

$$\Phi_1 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k) \Lambda_1 \quad (3.20)$$

$$\Phi_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k + N_2 I'_k) \Lambda_2 \quad (3.21)$$

Z kolei obwody prądów  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I'_k$ ,  $I_k$  opisują zależności:

$$U_1 = I_1 R_1 + j\omega N_1 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.22)$$

$$U_2 = I_2 R_2 + I_k R_2 - I'_k R_2 - j\omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (3.23)$$

$$U_2 = I'_k R_k - j\omega N_2 \Phi_1 - j\omega k N_D \Phi_1 \quad (3.24)$$

$$U_2 = -I_k R_N \quad (3.25)$$

Po przekształceniu zależności (3.20) - (3.25) prąd  $I_k$  jest równy:

$$I_k = -I_2 \frac{R_2 R_k + \delta_p^0 [R_k j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) + (R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2) [R_N + R_k + j\omega (k N_D + N_2) N_2 \Lambda_1] + (R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2) j\omega (k N_D + N_2) N_2 \Lambda_1]}{(R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2) [R_N + R_k + j\omega (k N_D + N_2) N_2 \Lambda_1] + R_k (R_N + j\omega N_2^2 \Lambda_1)} \quad (3.26)$$

Błąd samorównoważenia MKP w układzie Petersonsa opisuje zależność:

$$\delta_{Ik}^{\circ} = - \frac{\delta_P^{\circ} R_N + \frac{(\delta_P^{\circ} - 1) R_2 R_k}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 \Lambda_2}}{\delta_P^{\circ} \left[ R_N + j\omega N_2^2 \Lambda_1 + \frac{R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 \Lambda_2} (R_k + j\omega k N_D N_2 \Lambda_1) \right]} \quad (3.27)$$

Analogicznie do poprzednio analizowanych układów wyznaczono impedancję wejściową MKP od strony uzwojeń prądu  $I_2$ :

$$Z_{we2} = R_N \delta_P^{\circ} (1 + \delta_{Ik}^{\circ}). \quad (3.28)$$

Dla  $\delta_{Ik}^{\circ} \ll 1$  zależność ta upraszcza się:

$$Z_{we2} = R_N \delta_P^{\circ}. \quad (3.29)$$

Impedancja wejściowa komparatora jest funkcją rezystancji wspólnej  $R_N$  oraz błędu badanego przekładnika. W przypadku zastąpienia jej przetwornikiem I/U można uzyskać pomijalnie małe wartości impedancji wejściowej komparatora przy zachowaniu dostatecznie dużej czułości pomiaru prądu  $I_k$ .

#### 4. Układy MKP z detektorem siły magnetomotorycznej

##### 4.1. Układ ze zwartym uzwojeniem kompensacyjnym

W układzie oznaczonym w tabelicy 1 przez ④ uzwojenie kompensacyjne jest zwarte przez impedancję wejściową miernika prądu  $R_N$ . Obwód samorównoważenia może być galwanicznie oddzielony od pozostałych uzwojeń komparatora. Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależności (3.1) i (3.2), natomiast obwody prądów  $I_1$  i  $I_2$  zależności (3.3) i (3.4).

Obwód prądu kompensującego  $I_k$  opisuje równanie napięć:

$$j\omega N_k \Phi_1 = I_k R'_k \quad (4.1)$$

gdzie  $R'_k = R_k + R_N$ .

Po przekształceniach zależności (3.1), (3.2), (3.4) i (4.1) prąd  $I_k$  jest równy:

$$I_k = - I_2 \frac{\delta_P^{\circ} j\omega N_k N_2 \Lambda_1}{R'_k + j\omega N_k^2 \Lambda_1} \quad (4.2)$$



Błąd samorównoważenia MKP opisuje zależność:

$$\delta_{Ik}^{\circ} = - \frac{R'_k}{R'_k + j\omega N_k^2 \Lambda_1}, \quad (4.3)$$

natomiast impedancję wejściową komparatora od strony uzwojenia prądu  $I_2$  analogicznie do komparatora w układzie Milijaniča (zależność (3.9)).

Ze względu na stosunkowo duże wartości  $\delta_{Ik}^{\circ}$  układy takie były jedynie sporadycznie stosowane jako detektory stanu kompensacji SMM komparatora w układzie mostka impedancyjnego opisanego w pracy [5] przez Budnicką i Novika i w układzie do wzorcowania watomierzy Moora i Ayukawy [10].

#### 4.2. Układ ze zbcznikowanym uzwojeniem $N_2$

Uzwojenie prądu  $I_2$  MKP, w układzie oznaczonym przez ⑤ w tabelicy 1, jest zbcznikowane uzwojeniem kompensacyjnym. Możliwe są dwa warianty tego układu:

- wariant A: bocznikujące uzwojenie kompensacyjne obejmujące magnetowód detekcyjny i ekran magnetyczny liczy dwukrotnie więcej zwojów niż uzwojenie prądu  $I_2$ ,
- wariant B: liczba zwojów bocznikującego uzwojenia kompensacyjnego nawiniętego na magnetowodzie detekcyjnym jest dwukrotnie większa niż liczba zwojów uzwojenia prądu  $I_2$ , natomiast na ekranie magnetycznym oba uzwojenia: kompensacyjne i prądu  $I_2$  są takie same.

Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależności:

$$\Phi_1 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k) \Lambda_1; \quad (4.4)$$

wariant A:

$$\Phi_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_2 I_k) \Lambda_2, \quad (4.5)$$

wariant B:

$$\Phi_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2) \Lambda_2 \quad (4.6)$$

Obwody prądów  $I_1$ ,  $I_2$  i  $I_k$  opisują zależności:

$$U_1 = I_1 R_1 + j\omega N_1 (\Phi_1 + \Phi_2), \quad (4.7)$$

$$U_2 = I_2 R_2 - I_k R_2 - j\omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2), \quad (4.8)$$

variant A:

$$U_2 = I_k R'_k - 2 j \omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2), \quad (4.9)$$

variant B:

$$U_2 = I_k R'_k - 2 j \omega N_2 \Phi_1 - j \omega N_2 \Phi_2. \quad (4.10)$$

Na podstawie powyższych zależności otrzymano prąd  $I_k$  równy:

- dla wariantu A:

$$I_k = - I_2 \frac{-R_2 + \delta_P^0 j \omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2)}{R_2 + R'_k + j \omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2)}, \quad (4.11)$$

- dla wariantu B:

$$I_k = - I_2 \frac{-R_2 + \delta_P^0 j \omega N_2^2 \Lambda_1}{R_2 + R'_k + j \omega N_2^2 \Lambda_1} \quad (4.12)$$

oraz błąd samorównoważenia:

- dla wariantu A:

$$\delta_{Ik}^0 = - \frac{\delta_P^0 (R_2 + R'_k) + R_2}{\delta_P^0 [R_2 + R'_k + j \omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2)]}, \quad (4.13)$$

- dla wariantu B:

$$\delta_{Ik}^0 = - \frac{\delta_P^0 (R_2 + R'_k) + R_2}{\delta_P^0 (R_2 + R'_k + j \omega N_2^2 \Lambda_1)}. \quad (4.14)$$

Dla obu wariantów układu wyznaczono także impedancję wejściową komparatora  $Z_{we2}$ , równą:

- dla wariantu A:

$$Z_{we2} = R_2 [1 + \delta_P^0 (1 + \delta_{Ik}^0)] - j \omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) \delta_P^0 \delta_{Ik}^0, \quad (4.15)$$

- dla wariantu B:

$$Z_{we2} = R_2 [1 + \delta_P^0 (1 + \delta_{Ik}^0)] + \delta_P^0 j \omega N_2^2 (\Lambda_2 - \delta_{Ik}^0 \Lambda_1). \quad (4.16)$$

Dla  $\delta_{Ik}^{\circ} \ll 1$  impedancja wejściowa redukuje się do wartości:

- dla wariantu A:

$$Z_{we2} = R_2, \quad (4.17)$$

- dla wariantu B:

$$Z_{we2} = R_2 + \delta_P^{\circ} j\omega N_2^2 \Lambda_2. \quad (4.18)$$

Przedstawiony układ nie jest znany z literatury. Nawinięcie uzwojenia prądu kompensującego na ekranie magnetycznym jest źródłem dodatkowego błędu komparatora.

### 4.3. Układ Brauna

Układ oznaczony w tablicy 1 przez ⑥ został opisany przez Brauna w pracy [4].

Uzwojenie kompensacyjne nawinięte na magnetowodzie detekcyjnym jest połączone równolegle z uzwojeniem prądu  $I_2$  nawiniętym na ekranie magnetycznym i zbocznikowane rezystancją wejściową miernika prądu  $I_k$ . Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym 1 i ekranie magnetycznym 2 opisują zależnościami (3.20), (3.21), natomiast obwody prądów  $I_1$ ,  $I_2$  - zależnościami (3.22) i (3.23).

Z kolei obwody prądów  $I_k'$  oraz  $I_k$ :

$$U_2 = I_k' R_k - j\omega N_2 \Phi_1 \quad (4.19)$$

$$U_2 = - I_k R_N. \quad (4.20)$$

Na podstawie zależności (3.20), (3.21), (3.23), (4.19) i (4.20) prąd  $I_k$  jest równy:

$$I_k = - I_2 \frac{R_2 R_k + \delta_P^{\circ} [R_k j\omega N_2^2 (\Lambda_1 + \Lambda_2) + (R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2) j\omega N_2^2 \Lambda_1]}{(R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2)(R_N + R_k + j\omega N_2^2 \Lambda_1) + R_k (R_N + j\omega N_2^2 \Lambda_1)}$$

Wartość błędu samorównoważenia opisuje zależność:

$$\delta_{Ik}^{\circ} = - \frac{\delta_P^{\circ} R_N + \frac{(\delta_P^{\circ} - 1) R_2 R_k}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 \Lambda_2}}{\delta_P^{\circ} (R_N + j\omega N_2^2 \Lambda_1) + \frac{R_2 + j\omega N_2^2 \Lambda_2}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 \Lambda_2} R_k}, \quad (4.22)$$

natomiast impedancja wejściowa komparatora od strony prądu  $I_2$  jest równa:

$$Z_{we2} = R_N \delta_P^0 (1 + \delta_{Ik}^0) \quad (4.23)$$

analogicznie do układu Petersona.

### 5. Porównanie układów samorównoważenia MKP

Po uwzględnieniu zakresu zmienności parametrów magnetycznych komparatorów prądu w granicach realnie spotykanych konstrukcji dokonano uproszczeń w zależnościach opisujących błąd samorównoważenia układów opisanych w punktach 3 i 4. Uproszczone zależności opisujące błąd samorównoważenia oraz impedancję wejściową analizowanych układów samorównoważenia zebrano w tabelicy 2.

Analizowane układy samorównoważenia można podzielić na dwie grupy. W układach ① oraz ④ w wyrażeniu opisującym błąd samorównoważenia nie występuje względny błąd  $\delta_P^0$  badanego przekładnika - błąd przekładnika prądowego mierzy się więc ze stałym błędem względnym. W pozostałych układach w mianowniku wyrażenia opisującego błąd samorównoważenia występuje względny błąd  $\delta_P^0$  badanego przekładnika; oznacza to pomiar błędu przekładnika ze stałym błędem bezwzględnym.

Niezależnie od typu detektora źródłem błędu samorównoważenia jest rezystancja obwodu prądu kompensującego złożona z rezystancji uzwojenia kompensacyjnego  $R_k$ , rezystancji wejściowej miernika prądu  $R_N$ , a ponadto w układach ② i ⑤ z rezystancji  $R_2$  uzwojenia prądu  $I_2$ . Możliwości zmniejszenia rezystancji obwodu prądu kompensującego przez wykonanie uzwojeń przewodem o możliwie dużej średnicy są ograniczone ze względów konstrukcyjnych. W układach z detektorem strumienia, w celu zminimalizowania tego błędu dąży się więc do maksymalizacji wypadkowego współczynnika wzmocnienia napięciowego, charakteryzowanego przez iloczyn  $k \frac{N_D}{N_2}$ .

Zmniejszenie błędu samorównoważenia, zwłaszcza w układach ③, ⑤A i ⑥, można również uzyskać przez zwiększenie przekroju poprzecznego ekranu magnetycznego (współczynnik  $W$ ). W układach ① oraz ④ istnieje ponadto możliwość zmniejszenia błędu samorównoważenia przez zwiększenie liczby zwojów uzwojenia kompensacyjnego  $N_k$  (niezależnie od liczby zwojów uzwojeń porównawczych). Powoduje to jednak zwiększenie rezystancji  $R_k$  wskutek zwiększenia długości uzwojenia.

Spśród komparatorów z detektorem strumienia magnetycznego jedynie układy ① oraz ③ zapewniają dostatecznie małą wartość tego błędu samorównoważenia, przy czym w układzie ① wartość tego błędu jest stała, niezależnie od wartości błędu badanego przekładnika.

Tablica 2

Uproszczone zależności opisujące błąd samorównoważenia  $\delta_{Ik}^{\circ}$  oraz impedancję wejściową  $Z_{we2}$  analizowanych układów samorównoważenia MKP

Układ	$\delta_{Ik}^{\circ}$	$Z_{we2}$
1	$-\left(\frac{N_2}{N_k}\right)^2 \frac{R_k'}{j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1  \left(1 + k \frac{N_D}{N_2}\right)}$	$R_2 + \delta_P^{\circ} j\omega N_2^2 \mathcal{L}_2$
2	$\frac{R_2}{\delta_P^{\circ} j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1  \left(1 + w + k \frac{N_D}{N_2}\right)}$	$R_2$
3	$\frac{R_2 R_k}{\delta_P^{\circ} \left(j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1 \right)^2 \left(1 + k \frac{N_D}{N_2}\right) w}$	$R_N \delta_P^{\circ}$
4	$-\left(\frac{N_2}{N_k}\right)^2 \frac{R_k'}{j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1 }$	$R_2 + \delta_P^{\circ} j\omega N_2^2 \mathcal{L}_2$
5A	$-\frac{R_2}{\delta_P^{\circ} j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1  (1 + w)}$	$R_2$
5B	$-\frac{R_2}{\delta_P^{\circ} j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1 }$	$R_2 + \delta_P^{\circ} j\omega N_2^2 \mathcal{L}_2$
6	$\frac{R_2 R_k}{\delta_P^{\circ} \left(j\omega N_2^2  \mathcal{L}_1 \right)^2 w}$	$R_N \delta_P^{\circ}$

$$w = \left| \frac{\mathcal{L}_2}{\mathcal{L}_1} \right|$$

Układ ③ zapewnia najmniejszą wartość  $\delta_{Ik}^{\circ}$  dla dużych wartości modułu błędu badanego przekładnika (rzędu  $10^{-2}$  ...  $10^{-3}$ ). Dla przekładników o mniejszych błędach korzystniejszy staje się układ ①.

Wartości błędów samorównoważenia układów z detektorem siły magnetomotorycznej są większe od odpowiadających im układów z detektorem strumienia o czynnik  $(1 + \frac{N}{N_2})$ . Praktyczne wykorzystanie tego typu układów do wyznaczania błędów przekładników prądowych (z wyjątkiem układu ⑥, który może być stosowany dla  $|\delta_P^{\circ}| \geq 10^{-3}$ ) wymaga zastosowania układów aktywnych minimalizujących rezystancję obwodu prądu kompensującego.

W układach ③ oraz ⑥ obwód samorównoważenia minimalizuje również impedancję  $Z_{we2}$  do wartości  $R_N \delta_P^{\circ}$ . Jest ona wystarczająco mała dla większości typowych zastosowań. W pozostałych układach w celu zminimalizowania impedancji wejściowej należy zastosować dodatkowe układy, np. opisane w pracach [1], [3].

#### LITERATURA

- [1] Augustyn J.: Wybrane metody minimalizacji impedancji wejściowej magnetycznego komparatora prądu przemiennego w układzie wzorcowania przekładników prądowych. Materiały konferencyjne XVII MKM-84, t.1, Poznań 1984.
- [2] Augustyn J.: Metody samorównoważenia magnetycznego komparatora prądu przemiennego. Materiały konferencyjne XVIII MKM-85, Zielona Góra 1985.
- [3] Augustyn J.; Milek M., Pajak K.: The measuring position for evaluate current transformer errors by means current comparator to help microprocessor. Materiały konferencyjne EMISCON'87, t.2, Gottwaldov 1987.
- [4] Braun A.: Determination of current transformer errors at primary current up to 100 000 A. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-26, nr 3, 1977.
- [5] Budniakaja E.A., Novik A.I.: O svojstvach transformatornoj ciepi a korotko zamknutym komparatorom tokow. Awtomietria, nr 4, 1969.
- [6] Calvert R., Mildwater J.: Self-balancing transformer ratio arm bridge. Electronic Engineering, EE-108, nr 12, 1963.
- [7] Kusters N.L., Moore W.J.M.: The compensated current comparator; a new reference standard for current transformer calibration in industry. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-13, nr 3, 1964.
- [8] Kwiczala J., Milek M.: Magnetyczny komparator prądów przemiennych w układzie wzorcowania przekładników prądowych. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 19-20, 1981.
- [9] Milek M.: Magnetyczne komparatory prądowe - konstrukcja, technologia, zastosowanie. Zeszyty Naukowe Pol. Śląskiej; Elektryka 90, Gliwice 1984.
- [10] Moore W.J.M., Ayukawa K.: A current comparator bridge for power measurement. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-25, nr 4, 1976.

- [11] Obradowiś I., Milijanič., Spironowić S.: Prüfung von Stromwandler mittels eines Stromkomparators und eines elektrischen Hilfsystems. ETZ-A, nr 19, 1957.
- [12] Petersons O.: A self-balancing current comparator. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-15, nr 1-2, 1966.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Marian Milek

Wpłynęło do Redakcji 15 września 1987 r.

#### АНАЛИЗ МЕТОДОВ АВТОМАТИЧЕСКОГО УРАВНОВЕШИВАНИЯ МАГНИТНОГО КОМПАРАТОРА ТОКА

##### Р е з ю м е

Дается сравнительный анализ методов автоматического уравнивания магнитного компаратора тока в системах для определения погрешностей трансформаторов тока. Сделан анализ компараторов с детектором магнитного потока и магнетодвижущей силы в схемах: с компенсацией разности магнетодвижущих сил с компенсацией тока а также дифференциальной токовой по Холу. В качестве критерия сравнения принята ошибка автоматического уравнивания а также входное сопротивление цепи вторичного тока компаратора. Указаны совместные источники ошибки автоматического уравнивания сравниваемых схем. Представленные предложения относятся к возможностям применения анализированных методов в системах для определения погрешностей трансформаторов тока.

#### ANALYSIS OF A.C. CURRENT MAGNETIC COMPARATOR SELF - BALANCING METHODS

##### S u m m a r y

A comparative analysis of self - balancing methods of current magnetic comparator in circuits for current transformers' error determination has been presented.

Comparators with magnetic flux and magnetomotive force detectors have been analysed in the circuits: with magnetomotive force difference compensation, with current compensation as well as in Hohlle current differential circuit. Self - balancing error and input impedance of comparator secondary current circuit have been accepted as a criterion of comparison.

Some party sources of self - balancing error of the compared circuits have been indicated. Conclusions relating to possibility of these method application in circuits for the current transformers' error determination have been presented.

*[Faint, mostly illegible text, possibly a summary or abstract.]*

*[Faint, mostly illegible text, possibly a list of references or a detailed description.]*

[1] *[Faint reference text]*

[2] *[Faint reference text]*

[3] *[Faint reference text]*

[4] *[Faint reference text]*

[5] *[Faint reference text]*

[6] *[Faint reference text]*

[7] *[Faint reference text]*

[8] *[Faint reference text]*

[9] *[Faint reference text]*

[10] *[Faint reference text]*