

JERZY AUGUSTYN

Katedra Metrologii i Automatyki Elektrotechnicznej
Politechnika Śląska, Gliwice

UKŁADY SAMORÓWNOWAŻENIA MAGNETYCZNEGO KOMPARATORA PRĄDU PRZEMIENNEGO

Na podstawie klasyfikacji układów pomiarowych z magnetycznym komparatorem prądu do wyznaczania błędów przekładników prądowych (rys. 1) przeprowadzono analizę porównawczą metod samorównoważenia komparatorów prądu z detektorem strumienia magnetycznego i siły magnetomotorycznej w układach: z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych, z kompensacją prądu i zmodyfikowanym układzie różnicowym Hohlego. Jako kryterium porównania przyjęto błąd samorównoważenia [7]. Wskazano wspólne źródła błędów samorównoważenia porównywanych układów, a także przedstawiono wyniki pomiarów układów samorównoważenia z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych.

1. WPROWADZENIE

Magnetyczny komparator prądu przemiennego, umożliwiający komparację prądów przemiennych z niedokładnością rzędu $10^{-5} \dots 10^{-7}$ znalazł szerokie zastosowanie w układach pomiarowych dużych dokładności. Można wyróżnić dwa główne kierunki zastosowań: układy mostkowe do pomiaru składowych impedancji [5, 8, 9, 14] oraz układy do wyznaczania błędów przekładników prądowych [3, 4, 6, 7, 9, 11, 15]. W obu kierunkach zastosowań komparatorów, zależność pomiędzy porównywanymi wartościami wielkości (np. wzorcową i mierzoną) jest określona dla stanu zrównoważenia komparatora prądów. Automatyzacja współczesnych układów pomiarowych pociąga za sobą konieczność opracowania układów samorównoważenia komparatorów i określenia warunków minimalizacji błędów związanych z samorównoważeniem. W pracy omówiono zagadnienia minimalizacji błędów samorównoważenia w układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych.

2. KLASYFIKACJA UKŁADÓW DO WYZNACZANIA BŁĘDÓW PRZEKŁADNIKÓW PRĄDOWYCH

Magnetyczne komparatory prądu stosowane są do wyznaczania błędów przekładników prądowych w trzech podstawowych układach:

1. Różnicowym z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych w komparatorze, przedstawionych na rysunku 1a, w którym stan kompensacji opisany jest zależnością:

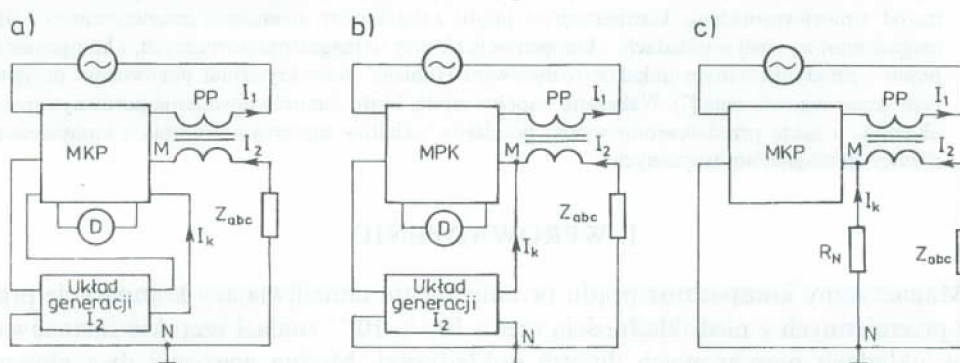
$$N_1 I_1 - N_2 I_2 = N_k I_k \mid U_D = 0 \quad (1)$$

gdzie: N_1, N_2, N_k — liczby zwojów uzwojeń porównawczych i kompensacyjnego, I_1, I_2, I_k — prądy w uzwojeniach porównawczych oraz kompensacyjnym, U_D — napięcie indukujące się w uzwojeniu detekcyjnym.

2. Różnicowym z kompensacją prądu, przedstawionym na rysunku 1b, gdzie komparator jest wzorcem stosunku prądów, przy czym detektor stwierdza stan kompensacji prądów w węźle M , zgodnie z zależnością:

$$I_2 + I_k = I_1 \frac{N_1}{N_2} \mid U_D = 0 \quad (2)$$

3. Zmodyfikowanym układzie różnicowym Hohlego, przedstawionym na rysunku 1c, gdzie komparator pełni rolę wzorcowego przekładnika prądowego lub służy do kompensacji błęd przekładnika wzorcowego.



Rys. 1. Układy porównawcze błędów przekładników prądowych (PP) w komparatorze (MKP)

Poszczególne układy porównawcze różnią się błędem metody [10] oraz wartością obciążenia wprowadzonego do obwodu wtórnego przekładnika przez komparator. W zależności od wybranego układu pomiarowego magnetyczny komparator prądu spełnia funkcję „czystego” komparatora, opisanego zgodnie z zależnością (1), lub wspomaga pracę wzorcowego przekładnika prądowego, minimalizując jego błędy. W pierwszym przypadku komparator prądu nie przenosi energii, w drugim — przenosi pewną niewielką (w porównaniu z przekładnikiem prądowym) część energii, proporcjonalną do błęd wzorcowego przekładnika prądowego.

3. ANALIZA PORÓWNAWCZA UKŁADÓW SAMORÓWNOWAŻENIA

Samorównoważenie magnetycznego komparatora prądu polega na uzyskaniu stanu kompensacji sił magnetomotorycznych w magnetowodzie detekcyjnym, zgodnie z zależnością (1), poprzez zastosowanie układów ze sprzężeniem zwrotnym. Prąd I_k jest w stanie skompensowania sił magnetomotorycznych proporcjonalny do

bezwzględny błąd badanego przekładnika prądowego. Stosując dodatkowe układy, np. detekcji fazoczułej, można z niego wydzielić składowe błędy przekładnika.

Zasadniczym kryterium jakości układu samorównoważenia jest błąd samorównoważenia, wprowadzony w pracy [2], zdefiniowany jako różnica prądu kompensującego I_k płynącego w uzwojeniu kompensacyjnym w wyniku działania układu samorównoważenia i prądu I_{km} spełniającego równanie kompensacji sił magnetomotorycznych w komparatorze (1), odniesiona do prądu I_{km} :

$$\delta_{I_k} = \frac{I_k - I_{km}}{I_{km}} \quad (3)$$

gdzie $I_{km} = \frac{1}{N_k} (N_1 I_1 - N_2 I_2)$.

Błąd samorównoważenia komparatora, przydatny w analizie teoretycznej jest trudny do weryfikacji pomiarowej bezpośrednio ze wzoru definicyjnego (3). Miarą stopnia zrównoważenia komparatora jest w praktyce pomiarowej wartość napięcia indukującego się w uzwojeniu detekcyjnym komparatora, nawiniętym na magnetowódzie o permeancji A_1 . Dla komparatora nie zrównoważonego ($I_k = 0$) jest ono równe:

$$U_{Dn} = j\omega N_D (N_1 I_1 - N_2 I_2) A_1 \quad (4)$$

natomiast po zrównoważeniu komparatora

$$U_D = j\omega N_D (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_k I_k) A_1 \quad (5)$$

I_k jest wymuszonym przez układ samorównoważenia prądem kompensującym

$$I_k = (1 + \delta_{I_k}) I_{km} \quad (6)$$

Po podstawieniu (6) oraz (4) do (5) i uwzględnieniu, że prąd I_{km} spełnia równanie kompensacji sił magnetomotorycznych w komparatorze (1) można wyznaczyć błąd samorównoważenia jako

$$\delta_{I_k} = -\frac{U_D}{U_{Dn}} \quad (7)$$

Prąd kompensujący w zrównoważonym komparatorze, z uwzględnieniem błędu samorównoważenia, można wyznaczyć na podstawie zależności (3) oraz definicji błędu przekładnika prądowego:

$$\delta_P = \frac{N_2 I_2 - N_1 I_1}{N_1 I_1} \cong \frac{N_2 I_2 - N_1 I_1}{N_2 I_2} \quad (8)$$

gdzie: I_1, I_2 — prądy stron pierwotnej i wtórnej przekładnika prądowego, N_1, N_2 — liczby zwojów odpowiednich uzwojeń przekładnika.

Stąd otrzymano

$$I_k = -\delta_P I_2 \frac{N_2}{N_k} (1 + \delta_{I_k}) \quad (9)$$

Miarą błędu przekładnika prądowego w układach z komparatorem prądu jest wartość prądu kompensującego I_k odniesiona do prądu wtórnego I_2

$$\delta_{pm} = -\frac{N_k I_k}{N_2 I_2} \quad (10)$$

Poprawną wartość błędu przekładnika, uwzględniając błąd samorównoważenia, można obliczyć na podstawie zależności (9); stąd

$$\delta_p = -\frac{N_k I_k}{N_2 I_2} \frac{1}{1 + \delta_{I_k}} \quad (11)$$

Błąd samorównoważenia wpływa na całkowity błąd komparatora prądu. W komparatorze bez układów samorównoważenia błąd jest definiowany jako

$$\delta_K = \left. \frac{(\Theta_1 - \Theta_2 - \Theta_{km}) + \Theta_\delta}{\Theta_2} \right|_{U_\theta=0} \quad (12)$$

gdzie Θ_δ jest siłą magnetomotoryczną konieczną dla uzyskania zerowego wskazania detektora, pomimo formalnego spełnienia równania kompensacji sił magnetomotorycznych (1), a wynikającą z istnienia składowej magnetycznej i admitancyjnej błędu komparatora [12].

Po wprowadzeniu układu samorównoważenia, dla uzyskania zerowego napięcia detekcyjnego, należy skorygować Θ_δ o wartość wynikającą z błędu samorównoważenia komparatora. Stąd całkowity błąd komparatora z układem samorównoważenia

$$\delta_{Kc} = \left. \frac{(\Theta_1 - \Theta_2 - \Theta_{km}) + (\Theta_{Km} - \Theta_k) + \Theta_\delta}{\Theta_2} \right|_{U_\theta=0} \quad (13)$$

Na podstawie (6) $(\Theta_{km} - \Theta_k) = -\delta_{I_k} \Theta_{km}$, ponieważ jednocześnie z definicji wynika, że $\Theta_{km} = -\delta_p \Theta_2$ otrzymano

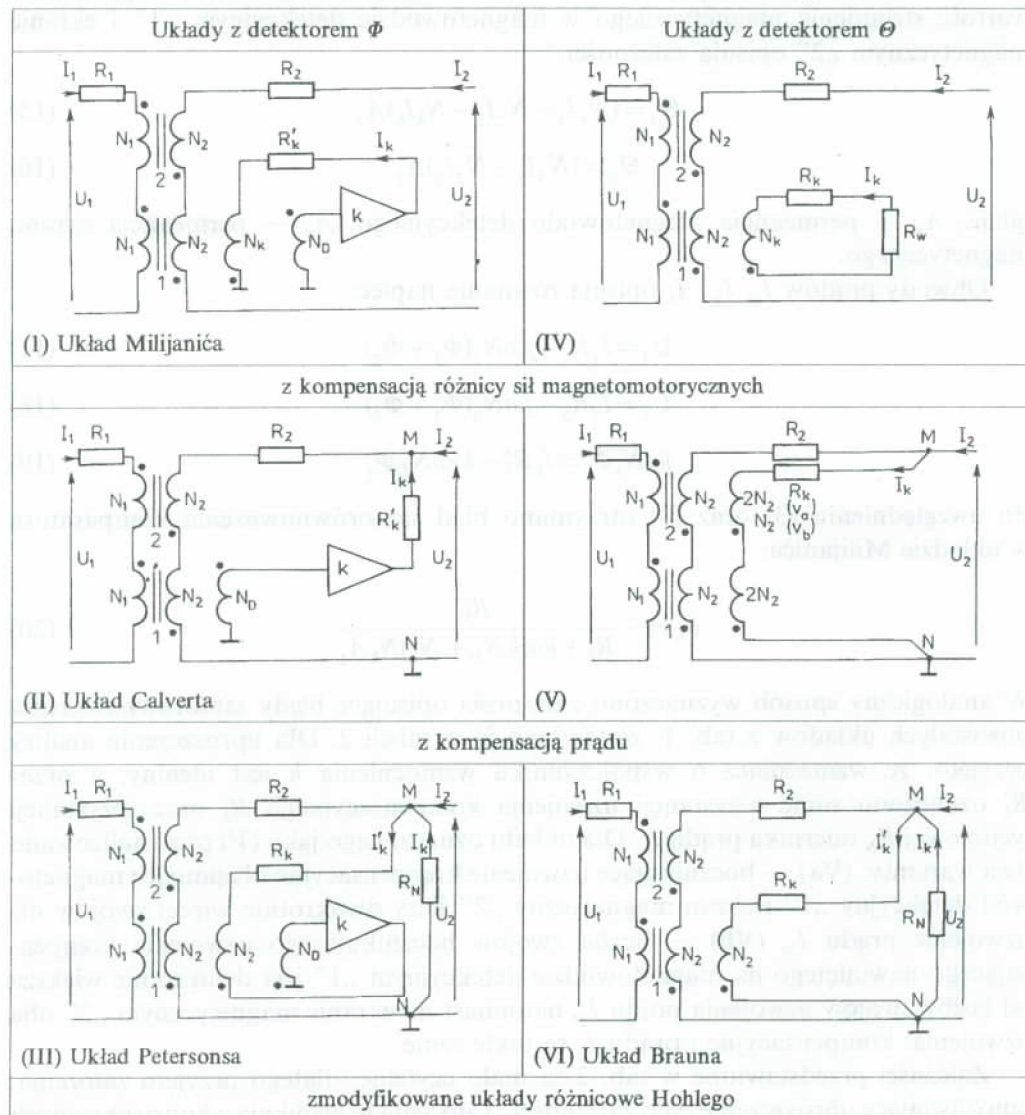
$$\delta_{Kc} = \delta_p \delta_{I_k} + \delta_K \quad (14)$$

Z zależności (14) wynika istotna właściwość układów komparatora prądu z samorównoważeniem. Dodatkowy składnik błędu komparatora związany z wprowadzeniem układu samorównoważenia (iloczyn $\delta_p \delta_{I_k}$) jest proporcjonalny do błędu badanego przekładnika; błąd wzorca (komparatora) dopasowuje się do błędu badanego przekładnika.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej układów samorównoważenia na podstawie analizy schematu zastępczego komparatora z ekranem magnetycznym wprowadzono zależności opisujące błąd samorównoważenia dla poszczególnych układów do wyznaczania błędów przekładników prądowych. Zastosowanie schematu zastępczego typu T i metody liczb zespolonych do opisu zjawisk zachodzących w komparatorze jest uzasadnione faktem, że komparator w stanie samorównoważenia — jeżeli układ samorównoważenia jest szerokopasmowy — pracuje w punkcie $H \cong 0$ odpowiadającym pierwszemu liniowemu odcinkowi charakterystyki

magnesowania. W trakcie analizy pominięto również błąd własny komparatora, gdyż jego wartość — w przypadku zapewnienia odpowiedniej technologii budowy komparatora — jest o kilka rzędów mniejsza od błędu samorównoważenia [1]. Równoważenie komparatora może nastąpić w przypadku detekcji strumienia Φ lub siły magnetomotorycznej Θ . W pierwszym przypadku stan kompensacji sił magnetomotorycznych (1) stwierdza się poprzez pomiar napięcia U_D indukującego się w rozwartym uzwojeniu detekcyjnym, w drugim — mierzy się prąd I_D płynący w uzwojeniu detekcyjnym zwartym przez miernik prądu o pomijalnie małej impedancji wejściowej R_N .

T a b e l a 1. Schematy ideowe układów samorównoważenia komparatora



W tabeli 1 przedstawiono w sposób uporządkowany schematy układów służących do wyznaczania błędów przekładników. Jako kryterium uporządkowania przyjęto w kolumnach sposób detekcji komparatora, realizowany w trzech podstawowych układach przedstawionych na rys. 1. Następnie z układów umieszczonych w tabeli zidentyfikowano układy znane z literatury — opisano je nazwiskami autorów. Dwa z przedstawionych w tabeli układów z detektorem Θ nie są znane z dostępnej literatury.

Historycznie pierwszym układem samorównoważenia jest układ oznaczony w tab. 1 przez (I) opisany w pracy [11] przez Milijaniča, Obradoviča i Spirondoviča. Wzmacniacz napięcia o współczynniku wzmocnienia k wymusza prąd kompensujący w uzwojeniu kompensacyjnym, połączonym z masą komparatora. Wypadkową wartość strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym „1” i ekranie magnetycznym „2” opisują zależności:

$$\Theta_1 = (N_1 I_1 - N_2 I_2 - N_k I_k) A_1 \quad (15)$$

$$\Theta_2 = (N_1 I_1 - N_2 I_2) A_2 \quad (16)$$

gdzie: A_1 — permeancja magnetowodu detekcyjnego, A_2 — permeancja ekranu magnetycznego.

Obwody prądów I_1 , I_2 i I_k opisują równania napięć:

$$U_1 = I_1 R_1 + j\omega N_1 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (17)$$

$$U_2 = I_2 R_2 - j\omega N_2 (\Phi_1 + \Phi_2) \quad (18)$$

$$j\omega N_k \Phi_1 = I_k R'_k - k j\omega N_D \Phi_1 \quad (19)$$

Po uwzględnieniu (3) oraz (8) otrzymano błąd samorównoważenia komparatora w układzie Milijaniča:

$$\delta_{I_k} = - \frac{R'_k}{R'_k + j\omega(kN_D + N_k)N_k A_1} \quad (20)$$

W analogiczny sposób wyznaczono zależności opisujące błędy samorównoważenia pozostałych układów z tab. 1; zestawiono je w tabeli 2. Dla uproszczenia analizy przyjęto, że wzmacniacz o współczynniku wzmocnienia k jest idealny, a przez R'_k oznaczono sumę rezystancji uzwojenia kompensacyjnego R_k oraz rezystancji wejściowej R_N miernika prądu I_k . Dla układu oznaczonego jako (V) przeanalizowano dwa warianty: (Va) — bocznikujące uzwojenie kompensacyjne obejmujące magnetowód detekcyjny „1” i ekran magnetyczny „2” liczy dwukrotnie więcej zwojów niż uzwojenie prądu I_2 , (Vb) — liczba zwojów bocznikującego uzwojenia kompensującego nawiniętego na magnetowodzie detekcyjnym „1” jest dwukrotnie większa od liczby zwojów uzwojenia prądu I_2 , natomiast na ekranie magnetycznym „2” oba uzwojenia: kompensacyjne i prądu I_2 są takie same.

Zależności przedstawione w tab. 2 są mało czytelne, dlatego przyjęto założenia, umożliwiające uproszczenie tych zależności. Założenia te wynikają z konstrukcyjnych

T a b e l a 2. Błąd samorównoważenia komparatora prądu w układach komparacji błędów przekładników prądowych

Typ układu	Błąd samorównoważenia δ_k
(I) Milijaniča [11]	$-\frac{R'_k}{R'_k + j\omega(kN_D + N_k)N_k A_1}$
(II) Calverta [5]	$-\frac{\delta_p(R_2 + R'_k) - R_2}{\delta_p[R_2 + R'_k + j\omega N_2^2(A_1 + A_2) + j\omega k N_D N_2 A_1]}$
(III) Petersonsa [13]	$-\frac{\frac{R_2 R_k}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2}(\delta_p + 1) + R_N \delta_p}{\delta_p \left[R_N + j\omega N_2^2 A_1 + \frac{R_2 + j\omega N_2^2 A_2}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 A_2} (R_k + j\omega k N_D N_2 A_1) \right]}$
(IV)	$-\frac{R'_k}{R'_k + j\omega N_k^2 A_1}$
(Va)	$-\frac{\delta_p(R_2 + R'_k) + R_2}{\delta_p[R_2 + R'_k + j\omega N_2^2(A_1 + A_2)]}$
(Vb)	$-\frac{\delta_p(R_2 + R'_k) + R_2}{\delta_p(R_2 + R'_k + j\omega N_2^2 A_1)}$
(VI) Brauna [4]	$-\frac{\frac{R_2 R_k}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2}(\delta_p - 1) + R_N \delta_p}{\delta_p \left[R_N + j\omega N_2^2 A_1 + \frac{R_2 + j\omega N_2^2 A_2}{R_2 + R_k + j\omega N_2^2 A_2} R_k \right]}$

i technologicznych możliwości realizacji komparatorów; dotyczą one przedziałów zmienności parametrów występujących w tych zależnościach. W związku z przeznaczeniem komparatora do wyznaczania błędów przekładników prądowych przyjęto zakres zmian częstotliwości 50...60 Hz. Założono ponadto, że błąd amplitudowy przekładnika jest ujemny, a kątowy — dodatni. Do budowy komparatora wykorzystano permalój P-80 o zespolonej przenikalności magnetycznej początkowej $\mu_p = 30000e^{-j0,0698}$; w zależnościach uproszczonych pominięto część urojoną przenikalności. Do określenia zakresu zmienności permeancji magnetowodu detekcyjnego posłużono się stosunkiem przekroju poprzecznego magnetowodu s do średniej długości drogi strumienia magnetycznego d . Przyjęto zakresy prądów pierwotnych badanych przekładników 10^{-1} ... 10^4 A. Ponadto założono, że wartości rezystancji uzwojeń: porównawczego N_2 oraz kompensacyjnego N_k są proporcjonalne do liczby zwojów tych uzwojeń. W związku z tym w zależnościach opisujących błąd samorównoważenia posługiwano się wartością rezystancji przypadającej na jeden zwoj

uzwojenia. Założono, że do pomiaru prądu kompensującego zostanie użyty przetwornik I/U , a także, że podczas pomiaru tego prądu będzie zachowana stała czułość tego przetwornika dla danego zakresu błędów przekładnika prądowego; jest to równoważne założeniu, że $R_N | \delta_p | = \text{const}$. Przyjęte zgodnie z tymi założeniami przedziały

T a b e l a 3. Graniczne wartości parametrów komparatora prądu

Parametr		Wartość minimalna	Wartość maksymalna
N_2	[zwoje]	20	2000
N_k	[zwoje]	20	2000
kN_D	[zwoje]	5×10^2	5×10^5
R_2/N_2	[Ω/zwoj]	5×10^{-4}	5×10^{-3}
R_k/N_k	[Ω/zwoj]	2×10^{-3}	1×10^{-2}
$R_N \delta_p $	[Ω]	1×10^{-7}	1×10^{-6}
s/d	[m]	1×10^{-3}	1×10^{-2}
A_2/A_1		1	20
$Re \{ \delta_p \}$		-1×10^{-5}	-1×10^{-2}
$Im \{ \delta_p \}$		1×10^{-5}	1×10^{-2}

T a b e l a 4. Błąd samorównoważenia komparatora; zależności uproszczone

Typ układu	Błąd samorównoważenia δ_s
(I) Milijaniča	$j \left(\frac{N_2}{N_k} \right)^2 \frac{R'_k}{\omega N_2^2 A_1 \left(1 + k \frac{N_D}{N_2} \right)}$
(II) Calverta	$-j \frac{R_2}{\delta_p \omega N_2^2 A_1 \left(1 + \frac{A_2}{A_1} + k \frac{N_D}{N_2} \right)}$
(III) Petersonsa	$- \frac{R_2 R_k}{\delta_p (\omega N_2^2 A_1)^2 \left(1 + k \frac{N_D}{N_2} \right) \frac{A_2}{A_1}}$
(IV)	$j \left(\frac{N_2}{N_k} \right)^2 \frac{R'_k}{\omega N_2^2 A_1}$
(Va)	$j \frac{R_2}{\delta_p \omega N_2^2 A_1 \left(1 + \frac{A_2}{A_1} \right)}$
(Vb)	$j \frac{R_2}{\delta_p \omega N_2^2 A_1}$
(VI) Brauna	$- \frac{R_2 R_k}{\delta_p (\omega N_2^2 A_1)^2 \frac{A_2}{A_1}}$

zmian parametrów komparatora zestawiono w tabeli 3, natomiast zależności uproszczone zebrano w tablicy 4. Zasadność dokonanych uproszczeń została potwierdzona odpowiednimi obliczeniami [1].

Z zależności przedstawionych w tabeli 4 wynika, że jedynie dla układów samorównoważenia z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych ((I), (IV)) wartość błędu samorównoważenia nie zależy od wartości błędu δ_p badanego przekładnika. Po podstawieniu do (11) uproszczonych zależności opisujących błąd samorównoważenia z tablicy 4 podzielono wszystkie analizowane układy samorównoważenia na dwie grupy.

W układach z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych poprawną wartość błędu przekładnika prądowego opisuje zależność

$$\delta_p = -\frac{N_k I_k}{N_2 I_2} (1-a) \quad (21)$$

gdzie $a = \delta_{I_k}$ — stała równa wartości błędu samorównoważenia układu (I) lub (IV) niezależna od wartości błędu przekładnika.

Dla pozostałych układów w mianowniku wyrażenia opisującego błąd samorównoważenia występuje czynnik δ_p . W związku z tym poprawna wartość błędu przekładnika prądowego (po uwzględnieniu, że dla tych układów $N_k = N_2$) jest równa

$$\delta_p = -\frac{I_k}{I_2} - b \quad (22)$$

gdzie b — stała niezależna od wartości błędu przekładnika.

Z porównania zależności (10) oraz (21) i (22) wynika, że w układach z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych wartość poprawną otrzymuje się przez dodanie do wartości zmierzonej poprawki, która jest funkcją błędu badanego przekładnika. W pozostałych układach poprawka ma wartość stałą i zależy jedynie od parametrów komparatora. W układach z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych mierzy się więc błąd przekładnika ze stałym błędem względnym $\delta_{\delta_p} = \frac{a}{1-a}$, natomiast w pozostałych układach — ze stałym błędem bezwzględnym równym stałej b .

Analiza zależności przedstawionych w tabeli 4 wykazuje, że dla wszystkich układów, 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 (II) i (V) — z rezystancji uzwojenia prądu I_2 . Możliwość zmniejszenia rezystancji obwodu prądu kompensującego poprzez wykonanie uzwojeń przewodem o możliwie dużym przekroju są ograniczone. 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 (III), (Va) oraz (VI) można również

uzyskać poprzez zwiększenie przekroju poprzecznego ekranu magnetycznego (współczynnik $\frac{A_2}{A_1}$). W układach (I) oraz (IV) 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. Wartości błędów samorównoważenia układów z detektorem Θ są większe od odpowiadających im układów z detektorem Φ o czynnik $\left(1 + k \frac{N_D}{N_1}\right)$.

4. POMIARY WŁAŚCIWOŚCI WYBRANYCH UKŁADÓW SAMORÓWNOWAŻENIA KOMPARATORA

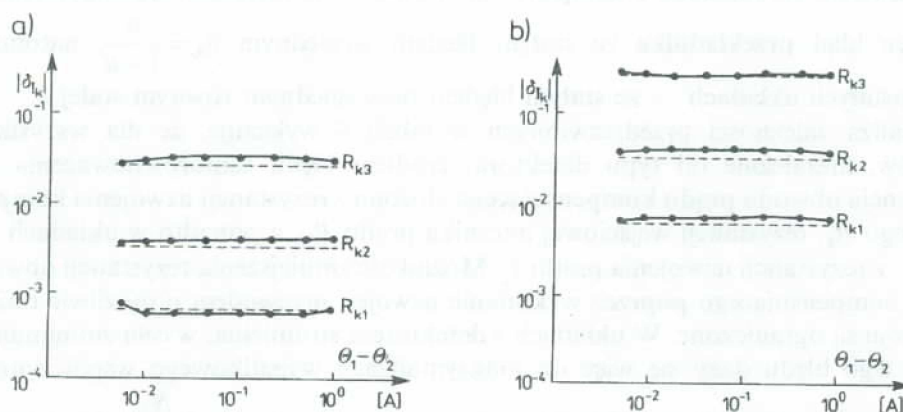
Wnioski z analizy teoretycznej zostały zweryfikowane w zrealizowanym układzie komparatora o przekładni 1000/5 A. Wykonano pomiary $|\delta_k| = f(\Theta_1 - \Theta_2)$ zgodnie z (7), przy czym ze względu na nieliniowy przebieg charakterystyki $U_D = f(\Theta_1 - \Theta_2)$ napięcie U_{Dn} wyznaczono z zależności

$$U_{Dn} = S_U (\Theta_1 - \Theta_2) \quad (23)$$

gdzie S_U jest czułością napięciową komparatora określoną na podstawie pomiaru.

Pomiary przeprowadzono dla trzech wartości rezystancji obwodu prądu kompensującego R_k ($R_{k1} = 2,3 \Omega$, $R_{k2} = 12,3 \Omega$, $R_{k3} = 102,3 \Omega$) dla układów z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych: Milijaniča ((I) w tab. 1), z detektorem Θ ((IV) w tab. 1).

Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 2a dla układów z detektorem Φ oraz na rysunku 2b dla układów z detektorem Θ . Linia przerywaną zaznaczono wartości



Rys. 2. Zależność $|\delta_k| = f(\Theta_1 - \Theta_2)$ dla komparatora prądu w układzie z kompensacją różnicy sił magnetomotorycznych: a) z detektorem Φ , b) z detektorem Θ

modułu błędu samorównoważenia obliczone z odpowiedniej zależności przedstawionej w tab. 4, po podstawieniu do niej zmierzonych wartości parametrów komparatora.

5. PODSUMOWANIE

Wyniki pomiarów w pełni potwierdziły poprawność przeprowadzonej analizy układów samorównoważenia. Uzyskano dużą zbieżność wartości $|\delta_i|$ obliczonych i wyznaczonych na podstawie pomiarów. Wartości modułu błędu samorównoważenia dla układu z detektorem Θ są ok. 10-krotnie większe od uzyskanych w układzie z detektorem Φ (współczynnik wzmocnienia wzmacniacza $k=10$). W realnych sytuacjach pomiarowych, ze względu na wymagane długości przewodów łączących i związany z tym wzrost rezystancji możliwość bezpośredniego wykorzystania układów z detektorem siły magnetomotorycznej (z wyjątkiem układu (VI), który może być stosowany dla $|\delta_p| \geq 10^{-3}$) jest ograniczona. Zastosowanie detektorów Θ w komparatorach z samorównoważeniem umożliwia układy aktywne minimalizujące rezystancję obwodu prądu kompensującego jako wspólne źródło błędu samorównoważenia [1, 2]. Budowa tego typu układów samorównoważenia komparatorów będzie przedmiotem odrębnego opracowania.

LITERATURA

1. Augustyn J.: *Analiza metod samorównoważenia magnetycznego komparatora prądu przemiennego z minimalizacją wpływu impedancji wejściowej komparatora*. Rozprawa doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1987.
2. Augustyn J.: *Metody samorównoważenia magnetycznego komparatora prądu przemiennego*. XVIII Międzyuczelniana Konferencja Metrologów, Zielona Góra 1985.
3. Augustyn J., Milek M., Pająk K.: *The measuring position for evaluate current transformer errors by means the current comparator to help microprocessor*. 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. Calvert R., Mildwater J.: *Self-balancing transformer ratio arm bridge*. Electronic Engineering EE-108, nr 12, 1963.
6. 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.
7. Kwiczała J., Milek M.: *Magnetyczny komparator prądów przemiennych w układzie wzorcowania przekładników prądowych*. Wiadomości Elektrotechniczne, nr 19–20, 1981.
8. Milek M.: *Magnetyczne komparatory prądowe — konstrukcja, technologia, zastosowanie*. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka nr 90, 1984.
9. Moore W.J.M., Milijanič P.N.: *The Current Comparator*. IEEE Electrical Measurement Series; Volume 4, Peter Peregrinus Ltd., London, 1988.
10. Nawrocki Z.: *Analiza metrologiczna układów różnicowych i kompensacyjno-różnicowych stosowanych do sprawdzania przekładników*. Rozprawy Elektrotechniczne, tom 24, nr 4, 1978.
11. Obradović I., Milijanič P.N., Spirondović S.: *Prüfung von Stromwandler mittels eines Stromkomparators und eines elektrischen Hilfssystems*. ETZ-A, nr 19, 1957.
12. Pająk K.: *Analiza i minimalizacja składowej magnetycznej błędu magnetycznego komparatora prądu przemiennego*. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska, Gliwice 1988.

13. Petersons O.: *A self-balancing current comparator*. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-15, nr 1—2, 1966.
14. So E., Moore W.J.M.: *A direct-reading AC comparator bridge for resistance measurement at power frequencies*. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-29, nr 4, 1980.
15. Souders T.M.: *A wide range current comparator system for calibrating current transformers*. AIEE Trans. Power and System. PAS-90, 1971.

A.C. COMPARATOR SELF-BALANCING CIRCUITS

Summary

A classification basic measurement systems with current magnetic comparator for current transformers' error determination has been presented (Fig. 1). Comparators with magnetic flux and magnetomotive force detectors have been analyzed in the circuits:

- with magnetomotive force difference compensation,
- with current compensation,
- Hohle current differential.

A comparative analysis of self-balancing methods of current magnetic comparator has been carried out. Self-balancing error by formula (7) has 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.

Test results for circuits with magnetomotive force difference compensation have been showed.