

Jerzy AUGUSTYN  
Józef KWICZALA

## FAZOCZUŁY DETEKTOR SIŁY MAGNETOMOTORYCZNEJ MAGNETYCZNEGO KOMPARATORA PRĄDU PRZEMIENNEGO

**Streszczenie.** Opisano metodę fazoczułej detekcji sił magnetomotorycznych w magnetycznym komparatorze prądów przemiennych. Wykazano przydatność metody w procesie automatyzacji pomiaru składowych błęd przekładników prądowych.

## PHASE-SENSITIVITY DETECTOR OF MAGNETOMOTIVE FORCE IN AC CURRENT COMPARATOR

**Summary.** A method of phase-sensitivity detection of magnetomotive force in AC current comparator has been described. Suitability of the method for automatic process measurement of current transformer error components has been proved.

## МЕТОД ФАЗОВОГО ДЕТЕКТИРОВАНИЯ МАГНИТОДВИЖУЩИХ СИЛ В МАГНИТНЫХ КОМПАТОРАХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

**Резюме.** Описывается метод фазового детектирования магнитодвижущих сил в магнитных компараторах переменного тока. Указывается пригодность этого метода для автоматизации процесса измерения компонент погрешности трансформатора тока.

### 1. Wprowadzenie

Magnetyczne komparatory prądu przemiennego stosowane są między innymi w układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych [3], [4]. Wartość składowej amplitudowej  $\delta_1^*$  oraz katowej  $\gamma_1^*$  względnego błędu badanego przekładnika  $\delta_p^*$  wyznacza się w tych układach poprzez wymuszenie w uzwojeniu kompensacyjnym komparatora prądu kompensującego  $I_k$  [1]. W stanie kompensacji, w magnetowodzie detekcyjnym komparatora, różnicowej siły magnetomotorycznej pochodzącej od prądów: pierwotnego  $I_1$  i wtórnego  $I_2$

przekładnika prądowego przez siłę magnetomotoryczną pochodzącą od prądu kompensującego, prąd  $I_k$  jest proporcjonalny do bezwzględnego błędu badanego przekładnika prądowego:

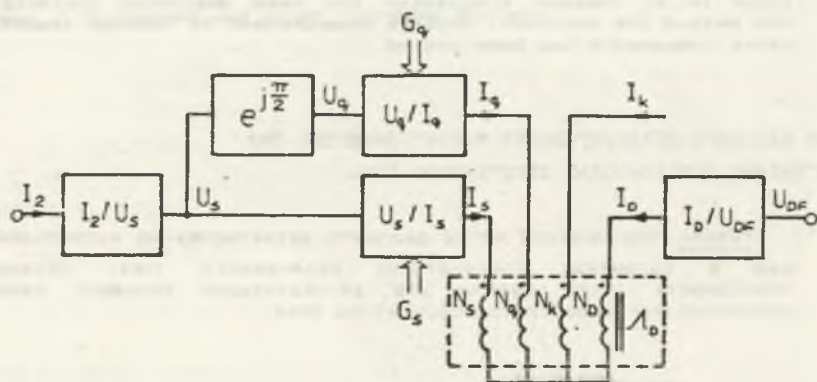
$$I_k = -\delta_p^* I_2 \frac{N_2}{N_k} = -\frac{N_2}{N_k} I_2 \left[ \delta_1^* + j\gamma_1^* \right], \quad (1)$$

gdzie:  $N_2, N_k$  - liczby zwojów uzwojenia prądu wtórnego i kompensującego komparatora.

Z zależności (1) wynika, że wyznaczenie składowych błędu przekładnika wymaga wyznaczenia dwóch ortogonalnych składowych prądu kompensującego: synfazowej  $I_{k*}$  i kwadraturowej  $I_{k\theta}$  z prądem wtórnym przekładnika.

Końcowym efektem pomiaru jest wyznaczenie względnych wartości składowej amplitudowej i kątowej błędu przekładnika dla określonych wartości jego prądu wtórnego.

Prąd  $I_k$  jest wymuszany w układzie samorównowazenia komparatora [1]. Do wyznaczenia jego składowych w mikroprocesorowym systemie pomiarowym wykorzystano pomocniczy komparator prądu, w którym siła magnetomotoryczna pochodząca od prądu kompensującego jest porównywana z siłą magnetomotoryczną wytworzoną przez prądy wyjściowe dwóch przetworników napięcie-prąd o programowanej transkonduktancji (rys. 1).



Rys.1. Układ równowazenia pomocniczego komparatora prądu z detekcją siły magnetomotorycznej

Fig.1. Auxiliary AC comparator balancing circuit with magnetomotive force detection

Napięcia wejściowe  $U_a$  i  $U_q$  tych przetworników, otrzymane z przetwornika  $I_2/U$  prądu wtórnego badanego przekładnika, są wzajemnie ortogonalne i można je opisać zależnościami:

$$U_a = R I_2, \quad (2)$$

$$U_q = j R I_2, \quad (3)$$

gdzie:  $R$  - transrezystancja przetwornika  $I_2/U$ .

Prądy wyjściowe przetworników są więc równe:

$$I_a = G_a U_a = G_a R I_2, \quad (4)$$

$$I_q = G_q U_q = j G_q R I_2, \quad (5)$$

gdzie:  $G_a, G_q$  - transkonduktancje przetworników napięcie-prąd.

Poprzez zmianę wartości transkonduktancji  $G_a$  oraz  $G_q$  można zmieniać wartość prądów  $I_a$  oraz  $I_q$  aż do uzyskania stanu kompensacji sił magnetomotorycznych w komparatorze pomocniczym

$$N_k I_k + N_a I_a + N_q I_q = 0, \quad (6)$$

gdzie:  $N_k, N_a, N_q$  - liczby zwojów odpowiednich uzwojeń komparatora.

Wtedy, na podstawie zależności (1) oraz (4) i (5), wartości odpowiednich składowych błędu przekładnika są równe:

$$\delta_I^* = - \frac{R}{N_2} N_a G_a, \quad (7)$$

$$\gamma_I^* = - \frac{R}{N_2} N_q G_q. \quad (8)$$

W układach, w których stan kompensacji sił magnetomotorycznych (6) uzyskiwano w wyniku ręcznego równoważenia komparatora, wskaźnikiem stanu kompensacji był detektor strumienia magnetycznego [5]. Wartość napięcia indukującego się w uzwojeniu detekcyjnym komparatora, w pobliżu stanu równowagi, dla detektora nie obciążonego opisuje zależność:

$$U_D = j \omega N_D \Lambda_D (N_k I_k + N_a I_a + N_q I_q), \quad (9)$$

gdzie:  $N_D$  - liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego.

$\Lambda_D$  - zespolona permeancja magnetowodu detekcyjnego.

Czułość napięciowa komparatora z detektorem strumienia magnetycznego ma wtedy charakter zespolony, opisany wyrażeniem:

$$S_u = \frac{dU_D}{d\theta} = j \omega N_D \Lambda_n \quad (10)$$

Zautomatyzowanie procesu równoważenia i wyznaczania błędów przekładników prądowych wymaga jednak zastosowania detekcji fazoczułej. Podczas procesu równoważenia komparatora zmienia się wartość zespolonej permeancji  $\Lambda_D$  [8]. Ujawnia się również, zwłaszcza dla dużych wartości błędów przekładnika, nieliniowość charakterystyki magnesowania. Powoduje to fluktuacje przesunięcia fazowego pomiędzy podstawową harmoniczną napięcia  $U_D$  a sygnałem odniesienia  $I_2$  podczas równoważenia układu, co uniemożliwia jednoznaczne określenie algorytmu równoważenia składowych błędów. Aby wyeliminować wpływ  $\Lambda_D$ , należy zapewnić stałą wartość wypadkowego strumienia magnetycznego w magnetowodzie detekcyjnym komparatora podczas jego równoważenia.

Spełnienie tego warunku umożliwia detekcja siły magnetomotorycznej. Sygnałem wyjściowym detektora jest w takim przypadku prąd  $I_D$  płynący w zwartym uzwojeniu detekcyjnym. Pomiar prądu detekcyjnego w warunkach zbliżonych do zwarcia uzyskuje się w wyniku zastosowania w uzwojeniu detekcyjnym przetwornika prąd-napięcie.

Dla wyidealizowanego detektora o zerowej wartości rezystancji uzwojenia detekcyjnego i pozbawionego strumieni rozproszeń prąd detektora jest równy:

$$I_{Dm} = \frac{1}{N_D} (N_k I_k + N_s I_s + N_o I_o), \quad (11)$$

a jego czułość zależy jedynie od liczby zwojów uzwojenia detekcyjnego i ma charakter rzeczywisty:

$$S = \frac{dI_D}{d\theta} = \frac{1}{N_D} \quad (12)$$

## 2. Detektor siły magnetomotorycznej

Detektory siły magnetomotorycznej w zautomatyzowanych układach do wyznaczania błędów przekładników prądowych nie były dotychczas stosowane. Spotykane są wyjątkowo w układach zautomatyzowanych mostków z komparatorem prądu [9], [10].

Na podstawie analizy przeprowadzonej w pracy [1] dla detektora przedstawionego na rys. 2 wartość prądu  $I_D$  jest równa

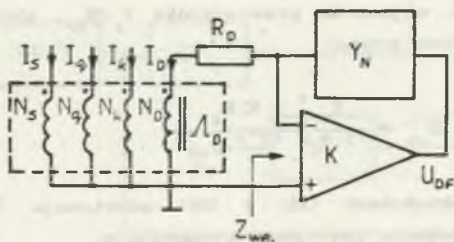


$$I_D = \frac{j\omega N_D \Lambda_D (N_k I_k + N_s I_s + N_q I_q)}{R_D + Z_{ve} + j\omega N_D^2 \Lambda_D} \quad (13)$$

Rzeczywiste parametry układu detektora (rezystancja uzwojenia  $R_D$  oraz impedancja wejściowa  $Z_{ve}$  przetwornika  $I_D/U_{DF}$ ) powodują powstawanie błędu detekcji  $\delta_D^+$ , który na podstawie wzorów (11) i (13) jest równy

$$\delta_D^+ = \frac{I_D - I_{Dm}}{I_{Dm}} = - \frac{R_D + Z_{ve}}{R_D + Z_{ve} + j\omega N_D^2 \Lambda_D} \quad (14)$$

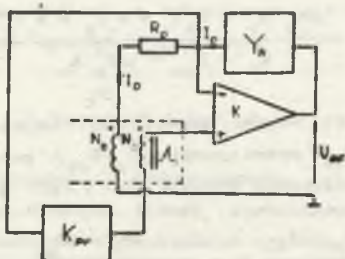
Błąd ten można zminimalizować, gdy  $(R_D + Z_{ve}) \rightarrow 0$ . Wartość  $Z_{ve}$  można zmniejszyć przez zastosowanie wzmacniacza o odpowiednio dużym współczynniku wzmocnienia napięciowego  $K$ . W celu zminimalizowania wpływu rezystancji uzwojenia detekcyjnego  $R_D$  wykorzystano, przedstawioną w pracy [7], ideę układu do zmniejszania błędów transformatorowych wzorców przekładni. Zaproponowano układ przesuwający poziom napięcia sterującego przetwornik  $I_D/U_{DF}$  o wartość wynikającą z napięcia na rezystancji  $R_D$  [2].



Rys.2. Detektor siły magnetomotorycznej komparatora z przetwornikiem prąd-napięcie

Fig.2. AC comparator magnetomotive force detector with current to voltage converter

Wprowadzono dodatkowe uzwojenie korekcyjne o takiej samej liczbie zwojów jak uzwojenie detekcyjne oraz przesuwnik fazowy o transmitancji  $K_{pf}$ , ograniczający wartość składowej stałej prądu detektora, połączone z przetwornikiem  $I_D/U_{DF}$  w sposób przedstawiony na rys. 3.



Rys.3. Detektor siły magnetomotorycznej komparatora z układem minimalizującym wpływ rezystancji uzwojenia detekcyjnego  
 Fig.3. AC comparator magnetomotive force detector with resistance minimization of detection winding

Błąd detekcji takiego układu można opisać zależnością:

$$\delta_D^* = - \frac{R_D [1 + K(1 - K_{PF})] + Y_N^{-1}}{R_D [1 + K(1 - K_{PF})] + Y_N^{-1} + j\omega N_D^2 \Lambda_D [1 + K(2 - K_{PF})]} \quad (15)$$

Natomiast impedancja wejściowa przetwornika  $I_D/U_{DF}$ , obciążająca uzwojenie detekcyjne jest wtedy równa:

$$Z_{we}^* = \frac{Y_N^{-1} - K R_D}{1 + K(2 - K_{PF})} \quad (16)$$

Występująca w zależnościach (15) i (16) admittanceja  $Y_N$  reprezentuje transmitancję pętli sprzężenia zwrotnego wzmacniacza.

Jeżeli dla pulsacji sygnału mierzonego zachodzi  $K_{PF} = 1$  oraz  $K \gg 1$ , to  $Z_{we}^* \cong -R_D$ , natomiast błąd detekcji:

$$\delta_D^* \cong - \frac{R_N}{j\omega N_D^2 \Lambda_D K} \quad (17)$$

Aby zapewnić czułość umożliwiającą wyznaczenie względnych błędów przekładnika z rozdzielczością rzędu  $10^{-5}$  w pętli sprzężenia zwrotnego przetwornika  $I_D/U_{DF}$ , zastosowano czwórnik kształtu T.

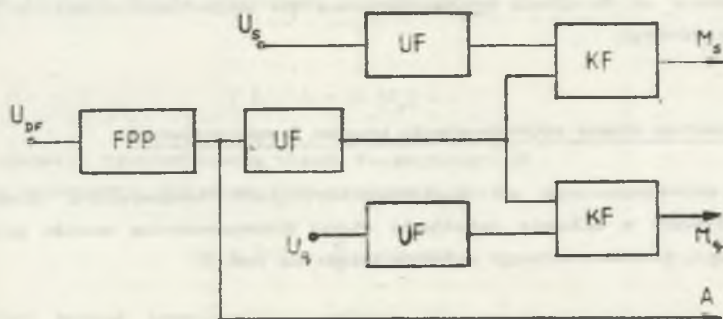
Transmitancja  $Y_N$  tego czwórnika ogranicza jednocześnie wartość składowej stałej napięcia wyjściowego przetwornika. Napięcie wyjściowe detektora jest wtedy równe:

$$U_{DF} \cong \frac{I_2 N_2}{Y_N N_D} \left[ \left[ \delta_I^* + j \gamma_I^* \right] - \frac{R}{N_2} \left[ N_a G_a + j N_q G_q \right] \right] \quad (18)$$

### 3. Komparator fazy składowych błędu

Automatyzacja procesu pomiaru składowych błędu przekładnika prądowego wymaga zastosowania w torze pomiarowym detekcji fazoczułej. Wektor napięcia wyjściowego przetwornika prądu detektora sił magnetomotorycznych komparatora pomocniczego należy porównać ze składowymi ortogonalnymi, gdzie jedna ze składowych błędu powinna być w fazie z prądem wtórnym badanego przekładnika. Układ spełniający te warunki nazwano komparatorem fazy składowych błędu i przedstawiono schematycznie na rys. 4.

Wyższe harmoniczne sygnału wyjściowego  $U_{DF}$  przetwornika prądu detekcyjnego są odfiltrowane w aktywnym filtrze pasmowo-przepustowym FPP o częstotliwości środkowej równej częstotliwości podstawowej harmonicznej prądu przekładnika.



Rys.4. Komparator fazy składowych błędu; FPP-filtr pasmowo-przepustowy, UF-układy formujące, KF-komparatory fazy

Fig.4. Error components phase comparator; FPP-bandpass filter, UF-wave-form system, KF-phase comparator

Odpowiednią czułość układu komparatora fazy zapewnia układ formujący UF. Układ ten pełni rolę komparatora przejścia sygnału detektora przez zero, przetwarzając sinusoidalny sygnał wyjściowy detektora siły magnetomotorycznej w ciąg impulsów prostokątnych, który podawany jest na wejścia komparatorów fazy KF błędu amplitudowego oraz katowego.

Na pozostałe wejścia tych komparatorów podawany jest odpowiednio uformowany sygnał z przetwornika prąd-napięcie  $I_{\pm} / U_{\pm}$ :

- na wejście komparatora fazy błędu amplitudowego - sygnał  $U_s$  - tj. sygnał w fazie z prądem wtórnym badanego przekładnika,
- na wejście komparatora fazy błędu katowego - sygnał  $U_q$  - tj. sygnał przesunięty w fazie o  $\pi/2$  względem prądu wtórnego badanego przekładnika.

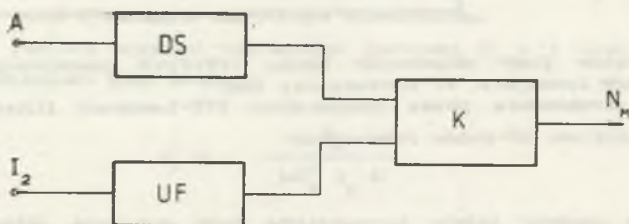
Sygnały te generowane są w układzie równoważenia pomocniczego komparatora prądu z detekcją siły magnetomotorycznej przedstawionym na rys. 1. Na wyjściach komparatorów fazy otrzymujemy sygnały stanu komparacji fazy, odpowiednio błędu amplitudowego  $W_a$  oraz kąтового  $W_k$ .

Sygnały stanu skomparowania faz składowych błędu sterują układami mnożącymi przetworników C/A, które są elementami przetworników napięcie-prąd o sterowanej transkonduktancji. Zmiana stanu tych sygnałów powoduje zakończenie cyklu zmian stanów na wejściach cyfrowych przetworników C/A generujących prądy kompensujące  $I_q$  oraz  $I_d$  (rys. 1). Sygnały wyjściowe komparatorów fazy ustalają zatem zakończenie równoważenia odpowiedniej składowej błędu, jak również pozwalają na określenie zwrotu równoważenia, t.j. określenie kierunku zmian transkonduktancji przetworników U/I.

Zmiana wartości prądów kompensujących dokonywana jest na przemian, t.j. kolejno  $I_q$  oraz  $I_d$  w kilku następujących po sobie cyklach równoważenia aż do chwili skompensowania sił magnetomotorycznych komparatora pomocniczego.

#### 4. Detektor stanu zrównoważenia prądów kompensujących

Stan skompensowania sił magnetomotorycznych komparatora pomocniczego jest wykrywany w układzie detektora stanu zrównoważenia modułu prądu kompensującego, przedstawionego schematycznie na rys. 5.



Rys. 5. Detektor stanu zrównoważenia modułu prądu kompensującego; DS - detektor szczytowy, UF - układ formujący, K - komparator

Fig. 5. Steady balancing detector of absolute value of compensation current; DS - peak detector, UF - wave-form system, K - comparator

Odfiltrowany sygnał wyjściowy przetwornika prądu detekcyjnego A, otrzymany w komparatorze fazy składowych błędów (rys. 4), jest poddany detekcji szczytowej. Na wyjściu detektora szczytowego otrzymuje się sygnał stały, proporcjonalny do amplitudy sygnału nierównoważenia  $I_d$  pomocniczego komparatora prądu. Wartość tego sygnału nie może jednak stanowić o zakończe-



niu procesu równoważenia. Amplituda sygnału błędu (amplituda sygnału wyjściowego detektora sił magnetomotorycznych komparatora pomocniczego) jest bowiem wprost proporcjonalna do wartości prądu wtórnego badanego przekładnika. Z zależności (18) wynika :

$$|U_{DF}| = k |I_2| \cdot (\delta_1 - \alpha G_S) + j(\gamma_1 - \beta G_Q) = k |I_2| \cdot |\Delta + j\Gamma|, \quad (19)$$

gdzie  $k, \alpha, \beta$  - współczynniki proporcjonalności,

$\Delta, \Gamma$  - sygnały składowych błędu w stanie zrównoważenia

W celu uniezależnienia chwili zakończenia procesu równoważenia od wartości prądu wtórnego badanego przekładnika, a ściślej uzyskania stałej względnej niedokładności pomiaru składowych błędu przekładnika prądowego, sygnał z detektora szczytowego DS porównuje się w układzie komparatora K z sygnałem proporcjonalnym do wartości prądu wtórnego  $I_2$  przekładnika. Sygnał ten otrzymuje się poprzez odpowiednie uformowanie prądu wtórnego  $I_2$ . Schemat blokowy układu porównania przedstawiono na rys. 5.

Wówczas :

$$|U_{DF}| = C |I_2|, \quad (20)$$

gdzie  $C = \text{const}$  - transmitancja układu formującego UF.

Porównując zależności (19) oraz (20) otrzymuje się :

$$|\Delta + j\Gamma| = \frac{C}{k} = \text{const}. \quad (21)$$

Wyjściowy sygnał komparatora napięcia  $W_M$  niesie informacje o stanie zrównoważenia modułu prądu kompensującego komparatora i jest podstawą do określenia chwili zakończenia procesu równoważenia komparatora prądu. Sygnał  $W_M$  jest wykorzystany w systemie sterowania procesem równoważenia do zakończenia cyklu równoważenia i przetworzenia stanów wejściowych przetworników C/A na wartość błędów badanego przekładnika. Znaki błędów amplitudowego oraz kąтового są określane podczas pierwszego cyklu równoważenia (komparacji fazy) na podstawie fazy sygnałów  $W_S$  oraz  $W_Q$  względem fazy sygnału proporcjonalnego do prądu wtórnego badanego przekładnika.

## 5. Wnioski

W układzie detekcji siły magnetomotorycznej zredukowany został wpływ rezystancji uzwojenia detekcyjnego komparatora na błąd samorównoważenia. Napięcie wyjściowe tego przetwornika jest proporcjonalne do wartości prądu w uzwojeniu detekcyjnym komparatora, a przesunięcie fazowe między tym napięciem a wypadkową siłą magnetomotoryczną w magnetowodzie detekcyjnym

komparatora jest stałe, niezależnie od stanu zrównoważenia komparatora.

Zaletą fazoczułej detekcji siły magnetomotorycznej magnetycznego komparatora prądu przemiennego jest możliwość niezależnego określenia stanu skompensowania składowej synfazowej i kwadraturowej błędu przekładnika prądowego, a także, dzięki zastosowaniu detektora stanu zrównoważenia modułu prądu kompensującego, zachowanie stałej względnej niedokładności pomiaru składowych błędów przekładnika niezależnie od wartości prądu wtórnego.

Sygnały na wyjściach informacyjnych komparatorów fazy są podstawą do określania stanu skompensowania składowej synfazowej i kwadraturowej błędów przekładnika prądowego, umożliwiając automatyzację procesu pomiaru składowych błędów przekładnika prądowego.

#### LITERATURA

- [1] Augustyn J.: Analiza metod samorównoważenia magnetycznego komparatora prądu przemiennego. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 947, seria: Elektryka z. 108. Gliwice 1989.
- [2] Augustyn J.: Układ przetwornika prądu kompensującego na napięcie zwłaszcza dla magnetycznego komparatora prądu przemiennego. Projekt wynalazczy nr P 266596 z dnia 1.07.1987.
- [3] Augustyn J., Kwiczala J., Miłek M., Pajak K.: Układy z magnetycznym komparatorem prądu do pomiaru błędów przekładników prądowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 947, seria: Elektryka z. 108. Gliwice 1989.
- [4] Augustyn J., Kwiczala J.: Układ do fazoczułej detekcji siły magnetomotorycznej w magnetycznym komparatorze prądu przemiennego zwłaszcza do wyznaczania błędów przekładników prądowych. Projekt wynalazczy P-290560 z dn. 4.06.1991 r.
- [5] Kwiczala J.: Czujność detektora strumienia magnetycznego komparatora prądów przemiennych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 801, seria Elektryka z. 92. Gliwice 1984.
- [6] Met A.: Minimalizacja błędów przekładni wzorcowych transformatorów napięcia i prądu za pomocą układów aktywnych. Praca doktorska. Gliwice 1985.
- [7] Miłek M.: Magnetyczne komparatory prądu w pomiarach elektrycznych WNT, Warszawa 1990.
- [8] Miłek M.: Interpretacja i pomiar zespolonej przenikalności magnetycznej stopów Fe-Ni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej nr 431, seria: Elektryka z. 48. Gliwice 1975.
- [9] Moore W.J.M., Ayukawa K.: A Current Comparator Bridge for Power Measurement. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-25, nr 4, 1976.
- [10] Osvath P., Widmer S.: A High-Voltage High-Precision Self-Balancing Capacitance and Dissipation Factor - Measuring Bridge. IEEE Trans. on Instr. and Meas., IM-35, nr 1, 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Marian Miłek

Wpłynęło do Redakcji dnia 2 lipca 1991 r.

## PHASE-SENSITIVITY DETECTOR OF MAGNETOMOTIVE FORCE IN AC CURRENT COMPARATOR

### A b s t r a c t

One of the major applications of a current comparator is the evaluation of the current transformer errors. The compensating current  $I_k$  is proportional to the error of the current transformer tested (1). The current  $I_k$  is forced in a self-balancing system [1]. The current transformer error measurement system requires decomposition of the current  $I_k$  into two orthogonal components: the in-phase component  $I_{kp}$ , and the quadrature component  $I_{kq}$ , relating to secondary current  $I_2$ . The auxiliary current comparator has been used to evaluate orthogonal components of current  $I_k$  in a microprocessor measuring system as shown in fig.1. It is possible to change output currents  $I_p$  and  $I_q$  of two voltage - to-current converters by set transconductances  $G_p$  and  $G_q$  until the sum of magnetomotive forces in auxiliary current comparator is zero (6). The detection of the magnetomotive force is determined by a specially designed current - to-voltage converter (fig.3). Automatization of the balancing process of current transformer error evaluation uses phase-sensitive detection. It is necessary to compare the phase of output voltage  $U_{DF}$  (18) with the phases of both reference signal components:  $U_a$  and  $U_q$  (2), (3) in the error components phase comparator (fig.4). The analog - to-digital feedback loop is closed by the microprocessor which sets current  $I_p$  and  $I_q$  until the compensation state of ampere-turns of auxiliary current comparator is achieved. It is signalled by the output signal  $W_m$  from the absolute value compensating current detector (fig.5).