ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ

Seria: Elektryka z. 55

Nr kol. 499

Marian Miżek Insty ut Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej Politechniki Śląskiej

ANALIZA BŁĘDU POBUDLIWOŚCI KOMPARATORA PRĄDOWEGO I SPOSOBY JEGO MINIMALIZACJI

> <u>Streszczenie</u>. W artykule podano definicję błędu pobudliwości komparatora prądów stosowanego w układach pomiaru rezystancji. Określono wielkości ograniczające błąd pobudliwości oraz sformułowano warunki zmniejszenia jego wartości.

1. Wstep

Komparator prądowy KP stanowi integralną część układu pomiaru rezystancji, opracowanego przez N.L. Kustera [3], [4], przedstawionego również na rys. 3 w pracy [9]. Zadaniem KP jest porównanie dwóch prądów płynących przez rezystancje: mierzoną i wzorcową. Układ ten umożliwia pomiar rezystancji o wartościach $(10^{-5}...10^{6})$ z błędem mniejszym niż $10^{-5}...10^{-7}$, w zależności od rzędu wartości mierzonej rezystancji; stąd błąd porównania prądów powinien być $\leq (10^{-6}...10^{-8})$. Wymaganie to musi spełnić KP, którego schemat uzwojeń oraz przekrój poprzeczny przedstawiono na rysunku 1.

W KP można wyróżnić uzwojenia porównawcze z_N, uzwojenie tłumiące z_t, ekran magnetyczny oraz detektor strumienia stałego zrealizowany w układzie modulatora parzystych harmonicznych.



Rys. 1. Schemat uzwojeń oraz przekrój poprzeczny komparatora prądów

Cel stosowania oraz technologia uzwojenia tłumiącego i ekranu magnetycznego zostały omówione w pracy [6]. Elementami modulatora są:

- dwa rdzenie magnetyczne,
- uzwojenie detekcyjne z_d,
- uzwojenie wzbudzające z_m,
- ekrany elektrostatyczne, ustalające pojemności doziemne i eliminujące pojemności międzyuzwojeniowe.

Istnieje szereg alternatyw układu modulatora opisanych w pracach [1], [5] i innych. Po przeanalizowaniu poszczególnych rozwiązań przyjęto układ mostkowy z dodatkowymi uzwojeniami zasilającymi, przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. Układ mostkow: modulatora parzystych harmonicznych z dodatkowymi uzwojeniami zasilającymi

W teorii modulatorów parzystych harmonicznych [1], [5], [8], czułość modulatora zdefiniowano jako:

$$G_{2h} = \frac{dU_{2h}}{dH_a} = \frac{dU_{2h}l_r}{d\theta_a}, \qquad (1)$$

przy czym:

H. - natężenie pola magnetycznego stałego,

U_{2h} - napięcie drugiej harmonicznej,

 θ_{q} - siła magnetomotoryczna prądu stałego,

1. - długość średniej drogi magnetycznej strumienia.

W cytowanych pracach podano również zależność czułości od parametrów geometrycznych i materiałcwych:

 $\mathcal{O}_{2hmax} = 16 \text{ f } z_d \text{ s}_r \mu_o \mu, \qquad (2)$

Analiza błędu pobudliwości komparatora ...

przy czym:

 G_{2hmax} - czułość maksymalna modulatora drugiej harmonicznej przy $H_m = H_{nas}$ oraz $H_s = 0$,

H_m - natężenie pola magnetycznego wzbudzającego,

s. - pole powierzchni przekroju poprzecznego rdzenia.

Z zależności (6), przy założeniu H_m = H_{nas}, przechodząc na przyrosty skończone obliczono:

$$\Delta \Theta_{g} = \frac{\Delta U_{2h} I_{x}}{62 \text{hmax}}.$$
 (3)

Najczęściej pomiędzy przetwornikiem elektromechanicznym wskazującym wartość napięcia drugiej harmonicznej, a zaciskami wyjściowymi uzwojeń detekcyjnych, znajduje się wzmacniacz selektywny o wzmocnieniu dla częstotliwości drugiej harmonicznej równym k_{2h}. Stąd wskazanie przetwornika elek-;romechanicznego:

$$\Delta U_{p} = \Delta U_{2h} k_{2h}$$
(4)

Zgodnie z PN-71/N-02050 zdefiniowano bezwzględny błąd pobudliwości komparatora prądowego $\Delta \Theta_{\rm p}$, jako przyrost wartości siły magnetomotorycznej $\Theta_{\rm g}$ powodujący zauważalną zmianę położenia wskazówki przetwornika elektromechanicznego. Wartość napięcia na wejściu przetwornika, powodującą zauważalną zmianę położenia wskazówki oznaczono jako $\Delta U_{\rm pp}$. Z zależności (2) (3) oraz (4) wynika:

$$\Delta \theta_{\rm p} = \frac{\Delta U_{\rm pp} l_{\rm r}}{k_{\rm 2h} 6_{\rm 2hmax}} = \frac{\Delta U_{\rm pp} l_{\rm r}}{16 f z_{\rm d} s_{\rm r}^{\mu} o_{\rm r}^{\mu} k_{\rm 2h}}.$$
 (5)

Względna wartość błędu pobudliwości jest równa:

$$\delta \theta_{\rm p} = \frac{\Delta U_{\rm pp} l_{\rm r}}{16 f z_{\rm d} s_{\rm r} \mu_{\rm o} \mu k_{\rm 2h} \theta_{\rm s}} \tag{6}$$

W prawidłowo zaprojektowanym układzie pomiarowym wartość błędu pobudliwości powinna być co najmniej o rząd mniejsza od wartości błędu pomiaru. Stąd dla błędu porównania sił magnetomotorycznych, rzędu (10⁻⁶...10⁻⁸)wartość błędu pobudliwości powinna wynosić (10⁻⁷...10⁻⁹).

Z zależności (6) wynika teoretyczna możliwość konstrukcji KP charakteryzującego się dowolnie małą wartością błędu pobudliwości.W rzeczywistych układach występują dwie wielkości ograniczające wartość tego błędu.Są to: napięcie asymetrii modulatora drugiej harmonicznej oraz szumy magnetyczne i elektryczne.

Wartość napięcia szumów magnetycznych i elektrycznych w przypadku stosowania wzmacniaczy selektywnych jest pomijalnie mała (rzędu ułamków nV), w porównaniu z wartością napięcia asymetrii. Napięcie asymetrii jest zatem wielkością decydującą o wartości błędu pobudliwości KP i w konsekwencji o jego dokładności. Dlatego należy przeanalizować wpływ parametrów elektrycznych i geometrycznych modulatora na wartość napięcia asymetrii i określić sposoby jego minimalizacji.

2. Analiza napięcia asymetrii modulatora drugiej harmonicznej

Analizując napięcie asymetrii przyjęto następujące założenia. Uwzględniając, że liczba zwojów uzwojenia wzbudzającego jest kilkakrotnie mniejsza niż liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego można pominąć wpływ obciążenia wewnętrznego uzwojeń wzbudzających. Obciążenie wewnętrzne uzwojeń detekcyjnych przy pominięciu upływności przez izolację międzyzwojową i doziemną ma charakter pojemnościowy. Stąd efekt tego obciążenia jest równoważny z przyłączeniem na końcówki uzwojeń detekcyjnych pojemności C'_{u} oraz C''_{u} . Ponadto założono bliską nieskończoności wartość rezystancji wejściowej detektora napięcia drugiej harmonicznej.



Rys. 3. Schemat modulatora parzystych harmonicznych bez podmagnesowania przepływem stałym a) ideowy. b) obliczeniowy

Analiza błędu pobudliwości komparatora ...

Układ zastępczy modulatora (dla stanu bez strumienia stałego) przedstawiono na rys. 3a. W schemacie uwzględniono rezystancje uzwojeń wzbudzających r oraz detekcyjnych r_{d^2} reaktancje rozproszenia X_{gm} oraz X_{gd} , impedancje gałęzi poprzecznych ($R_{Fe} + jX\mu$) oraz pojemności u odpowiadające obciążeniu wewnetrznemu. Wszystkie wielkości związane z pierwszym rdzeniem modulatora oznaczono symbolem "prim" ('), z drugim symbolem "bis"(").

Stosując transfigurację Δ / \perp przekształcono układ z rys. 3a, otrzymując schemat obliczeniowy przedstawiony na rys. 3b. Wartości impedancji są odpowiednio równe:

$$\begin{aligned} \dot{z}_{01} &= \frac{(r_{d}^{'} + jx_{sd}^{'}) - (R_{Fe}^{'} + jx_{\mu}^{'})}{r_{d}^{'} + R_{Fe}^{'} + j(x_{sd}^{'} + x_{\mu}^{'} - \frac{1}{\omega C_{u}^{'}})} + r_{m}^{'} + jx_{sm}^{'} \\ \frac{z_{02}}{z_{02}} &= \frac{(R_{Fe}^{'} + jx_{\mu}^{'}) - \frac{1}{j\omega C_{u}^{'}}}{r_{d}^{'} + R_{Fe}^{'} + j(x_{sd}^{'} + x_{\mu}^{'} - \frac{1}{\omega C_{u}^{'}})} \end{aligned}$$
(7)

$$\frac{Z'_{o3}}{r_{d} + R_{Fe} + j(X_{sd} + X'_{\mu} - \frac{1}{\omega c_{\mu}})}$$

Analogicznie można wyznaczyć $\underline{Z}_{01}'', \underline{Z}_{02}'', \underline{Z}_{03}''$. Dla układu z rys. 3b napięcie asymetrii wynosi:

$$\underline{\underline{U}}_{\text{es}} = \underline{\underline{U}}_{\text{m}} \left[\frac{\underline{\underline{Z}}_{02} \underline{\underline{Z}}_{03}^{*} \underline{\underline{$$

Z metrologicznego punktu widzenia interesujące są sposoby minimalizacji i kompensacji napięcia asymetrii - będzie ono równe zeru gdy:

$$\frac{\underline{z}_{02}'}{\underline{z}_{03}'} = \frac{\underline{z}_{02}''}{\underline{z}_{03}''}$$
(9)

Podstawiając zależność (7) do (9), po uporządkowaniu otrzymano:

$$\frac{R'_{Fe} + jX'_{\mu}}{(r'_{d} + jX'_{gd})(1 + j\omega C'_{u}R') + j\omega C'_{u}R'(R_{Fe} + jX'_{\mu}) + R'} = \frac{R''_{Fe} + jX''}{(r'_{d} + jX'_{gd})(1 + j\omega C''_{u}R'') + j\omega C''_{u}R''(R_{Fe}' + jX''_{\mu}) + R''}$$
(10)

W ogólnym przypadku warunkiem zerowego napięcia asymetrii jest równość obydwu ilorazów. Uwzględniając, że wielkości zawarte we wzorze (15) są wielkościami nieliniowymi spełnienie równości jest praktycznie niemożliwe. Aby umożliwić dalszą analizę wpływu parametrów modulatora na napięcie asymetrii, mającą na celu sformułowanie praktycznych wniosków, rozpatrzono stan idealizowany. Przyjęto równość odpowiednich składników obydwu stron równania, otrzymując w ten sposób warunki zerowej wartości napięcia asymetrii:

I;	R _{fe} +	jX'u =	R _{Fe} +	jX"µ	lub	$\underline{Z}_{m}' =$	<u>Z</u> ^{<i>n</i>} _m		(11)
----	-------------------	--------	-------------------	------	-----	------------------------	---	--	------

II;
$$r'_{d} + jX'_{sd} = r''_{d} + jX''_{sd}$$
, (12)

III;
$$C'_{u} = C''_{u}$$
, (13)

$$IV; R' = R''.$$
 (14)

Najistotniejszą rolę dogrywa warunek (11) - odpowiada on identyczności sił elektromotorycznych gałęzi poprzecznych schematu zastępczego:

$$\underline{\mathbf{E}}' = \underline{\mathbf{E}}'' \tag{15}$$

Warunek (15) wiąże parametry geometryczne i materiałowe obydwu rdzeni modulatora i dlatego należy rozpatrzyć zależność pomiędzy tymi parametrami a SEM gałęzi poprzecznej. Rozumowanie będzie dotyczyło pierwszego rdzenia modulatora - oznaczenie "prim".

Impedancja magnesująca wg pracy [7]:

$$\underline{Z}_{m}' = R_{Fe}' + jX_{\mu}' = \omega (z_{m}')^{2} \underline{\Lambda}_{m}' = \omega \frac{(z_{m}')^{2} B_{\mu}'}{1 + \omega} (\mu_{cz}' - j\mu_{b}'), \quad (16)$$

przy czym:

 Λ_m - permeancja zespolona rdzenia,

 μ_{cz} - składowa czynna zespolonej przenikalności magnetycznej,

μ. - składowa bierna zespolonej przenikalności magnetycznej.

Moduł przenikalności magnetycznej oraz jej składowe zmieniają się wzdłuż drogi magnetycznej w granicach od kilku do kilkunastu procent średniej wartości przenikalności magnetycznej [2]. Rozpatrując element długości toroidu dl'_r można mu przypisać wartości zespolonej przenikalności $\mu'_{cz}(l'_r)$ oraz $\mu'_b(l'_r)$, przekroju s' $_r(l'_r)$ oraz przyjmując ciągłość nawinięcia uzwojenia wzbudzającego - różniczkę uzwojenia dz'_m. Stąd na podstawie wzoru (16) mamy:

$$d\underline{Z}'_{m} = \frac{(dz'_{m})^{L}}{dl'_{r}} \omega s'_{r}(l'_{r}) \left[\mu'_{cz}(l'_{r}) - j\mu'_{b}(l'_{r}) \right]$$
(17)

oraz:

$$\underline{d\underline{E}}' = j \underline{I}_{m} \underline{d\underline{Z}}'_{m} = j \underline{I}_{m} \frac{(\underline{dz}'_{m})^{2}}{\underline{dI}'_{r}} \omega s'_{r}(\underline{l}'_{r}) \left[\mu'_{cz}(\underline{l}'_{r}) - j\mu'_{b}(\underline{l}'_{r}) \right]$$
(18)

wprowadzając:

$$\frac{dz_{in}}{dl'_{r}} = n'_{m}(l_{r}) - gestość uzwojenia wzbudzającego$$

otrzymano:

$$d\underline{\mathbf{z}}' = j \left[\mathbf{n}'_{m}(\mathbf{l}'_{r}) \right]^{2} \omega \mathbf{s}'_{r}(\mathbf{l}'_{r}) \underline{\mathbf{I}}_{m} \left[\boldsymbol{\mu}'_{cz}(\mathbf{l}'_{r}) - j \boldsymbol{\mu}'_{b}(\mathbf{l}'_{r}) \right] d\mathbf{l}'_{r}.$$
(19)

Całkując wzdłuż drogi magnetycznej:

$$\underline{\mathbf{E}} = \mathbf{j}\omega \underline{\mathbf{I}}_{m} \int_{0}^{\mathbf{L}_{m}} \left[n_{m}'(\mathbf{1}_{m}') \right]^{2} \left[\mu_{cz}'(\mathbf{1}_{n}') - \mathbf{j}\mu_{b}'(\mathbf{1}_{n}') \right] \mathbf{s}_{r}'(\mathbf{1}_{n}') d\mathbf{1}_{r}'.$$
(20)

Funkcja podcałkowa jest niezdeterminowaną zmienną drogi całkowania i dlatego nie ma praktycznego znaczenia. Aby umożliwić dalszą analizę, należy przyjąć, że wielkości występujące we wzorze są równe wartościom średnim. Założenie to odpowiada warunkom:

V: $s'(l'_r) = \bar{s}'$ - jednakowy przekrój wzdłuz drogi całkowania, VI: $n'(l'_r) = \bar{n}'$ - jednakowa gęstość zwojowe, VII: $\mu'_{cz}(l'_r) = \bar{\mu}'_{cz}$ - stała wartość składowych przenikalności wzdłuż drogi całkowania. VIII: $\mu'_b(l'_r) = \bar{\mu}'_b$

Podstawiając do wzoru (20) wartości średnie otrzymano:

$$\underline{\mathbf{E}}' = \mathbf{j} (\overline{\mathbf{n}}'_{\mathrm{m}})^2 \ \overline{\mathbf{s}}'_{\mathrm{r}} (\overline{\mu}'_{\mathrm{OZ}} - \mathbf{j} \overline{\mu}'_{\mathrm{O}}) \ \mathbf{1}_{\mathrm{r}} \ \omega \ \underline{\mathbf{I}}_{\mathrm{m}}.$$
(21)

Korzystając z uśrednionej gęstości uzwojenia n'_m , wyrażenie (21) można przekształcić do postaci:

$$\underline{E}' = j \ \overline{n}'_{m} \ \overline{s}'_{m} (\overline{\mu}'_{CZ} - j\overline{\mu}'_{D}) \ \omega \ \underline{0}_{m},$$
(22)

gdzie:

$$\Theta_{\rm m} = I_{\rm m} Z_{\rm m}$$

Stad SEM asymetrii:

$$\underline{\underline{B}}_{ac} = \underline{\underline{B}}'_{1} - \underline{\underline{B}}'_{1} = \omega \underline{\underline{\theta}}_{m} (\overline{\underline{n}}'_{L} \ \overline{\underline{s}}'_{T} \ \overline{\underline{\mu}}'_{D} - \overline{\underline{n}}''_{m} \ \overline{\underline{s}}''_{T} \ \overline{\underline{\mu}}'_{D}) +$$

$$+ j \omega \underline{\theta}_{m} (\overline{\underline{n}}'_{m} \ \overline{\underline{s}}'_{T} \ \overline{\underline{\mu}}'_{C2} - \overline{\underline{n}}''_{m} \ \overline{\underline{s}}''_{T} \ \overline{\underline{\mu}}'_{C2}).$$
(23)

Z zależności (23) otrzymano dalsze warunki minimalizacji napięcia asymetrii:

IX: $\vec{n}'_{m} = \vec{n}''_{m}$, X: $\vec{s}'_{r} = \vec{s}''_{r}$, XI: $\vec{\mu}'_{b} = \vec{\mu}''_{b}$, XII: $\vec{\mu}'_{cz} = \vec{\mu}''_{cz}$.

Z warunków I ... XII wynika, że napięcie asymetrii należy minimalizować następującymi sposobami:

- dobierając rdzenie o identycznych parametrach geometrycznych zwijanych z najcieńszej, możliwej do otrzymania taśmy,
- wykonując uzwojenia modulujące i detekcyjne o jednakowej gęstości wzdłuż drogi magnetycznej toroidu,
- stosując ekrany elektrostatyczne w celu wyeli inowania pojemności międzyuzwojeniowych i jednocześnie w celu ustalenia pojemności dozie mych (C₁ = C₁),
- sprowadzając do równości parametry elektryczne uzwojeń: $r'_d = r''_d$ oraz $X'_{gd} = X''_{gd}$; praktyczna realizacja drugiego warunku jest trudna, ponieważ wartość reaktanuji rozproszenia zależy między innymi od miejscowej przenikalności magnetycznej toroidu,
- spełniając warunek równości składowych przenikalności magnetycznej obu rdzeni.

Z wymienionych warunków najtrudniej spełnić ostatni. Wykonanie dwóch rdzeni permalojowych o identycznych charakterystykach jest z punktu widzenia technologii praktycznie niemożliwe. Ponadto składowe zespolonej przenikalności magnetycznej są nieliniową funkcją zarówno częstotliwości jak i natężenia pola megnetycznego. W funkcji natężenia pola wartość ich może się zmienić (3...7)-krotnie, przy zmianie natężenia pola od H = O do H= = H_{nas} [7]. Stąd w każdym rzeczywistym układzie magnetycznego modulatora drugiej harmonicznej pojawi się napięcie asymetrii, którego wartość może być większa niż wartość wynikająca z warunku błędu pobudliwości.

3. Kompensacja napiecia asymetrii

Zakładając, że "symetrię powodują tylko elementy gałęzi poprzecznej schematu zastępczego tr. nsformatora rozpatrzono możliwość lompensacji $\underline{\underline{L}}_{aB}$ -Siła elektromotoryczna asymetrii określona wzorem (23) składa się z dwóch

Analiza błędu pobudliwości komparatora....

części: czynnej i biernej. Aby skompensować napięcie asymetrii należy wprowadzić do obwodu magnetycznego dodatkowe siły magnetomotoryczne kompensacyjne o wartościach wynikających z wyrażenia (23). Jednak ze względu na zintegrowany charakter gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora zmiana siły magnetomotorycznej czynnej powoduje równocześnie zmianę siły magnetomotorycznej biernej.

Najlepszą metodą kompensacji jest proporcjonelna zmiana obydwu składowych siły magnetomotorycznej. Jednak kompensację tę, polegającą na dowinięciu kilku zwojów uzwojenia wzbudzającego, można stosować jedynie w trakcie produkcji komparatora prądowego - w sytuacji gdy na rdzeniach



Rys. 4. Sposób kompensacji napięcia asymetrii modulatora parzystych harmonicznych

znajdują się tylko uzwojenia wzbudzające i detekcyjne. Jak wykazały doświadczenia, napięcie asymetrii na tym etapie nie jest jeszcze ustalone – bardzo silnie zmienia się po nałożeniu ekranów magnetycznych. Wpływ ekranów magnetycznych na napięcie asymetrii należy wytłumaczyć zmianą reaktancji rozproszenia uzwojeń obydwu rdzeni modulatora. Dlatego też kompensację zwojową należy traktować jako wstępną, nie przynoszącą cstatecznych wyników.

Inne sposoby kompensacji wynikają z zeleżności (10). Gdy warunek

(11) nie może być spełniony istnieje możliwość zrównania obydwu stron zależności (10), zmieniając warunki (12) oraz (13). Praktyczny sposób realizacji przedstawia rys. 4.

Dodatkowymi elementami w układzie są: potencjometr P oraz pojemność C_k. Potencjometr umożliwia równoczesną zmianę R'oraz R':

$$R' = R + r'$$
(24)
 $R'' = R + r''$.

Opisany sposób umożliwia jednak kompensację napięcia asymetrii tylko dla jednego punktu pracy, określonego częstotliwością i natężeniem pola modulującego.

W praktycznych rozwiązaniach modulatorów napięcia asymetrii nie można skompensować całkowicie – nieskompensowana wartość tego napięcia określa błąd pobudliwości komparatora prądowego.

4. Wyniki pomiarów

Obiektem badań był magnetyczny modulator drugiej harmonicznej o danych:

materiał rdzeni P80

 $|\mu_{max}| = 90000; |\mu_{pocz}| = 25000$ $d_w = 90 \text{ mm}; d_z = 120 \text{ mm}; h = 15 \text{ mm}$ $z_d = 1310; d_d = 0,1 \text{ mm}$ $z_m = 300; d_m = 0,35 \text{ m}$

W układzie połączeń przedstawionym na rysunku 4 dokonano pomiaru drugiej harmonicznej napięcia asymetrii. Jego wartość w przypadku wyłączonych elementów kompensacyjnych, w zależności od natężenia i częstotliwości pola wzbudzającego zawierała się w granicach (0,5...2,0)mV, przy napięciu na jednym uzwojeniu detekcyjnym równym 30 V. Kompensacja zwojowa polegająca w tym przypadku na dowinięciu dodatkowo dwóch zwojów na jednym z rdzeni modulatora, pozwoliła na dwukrotne obniżenie wartości drugiej harmonicznej napięcia asymetrii. Zastosowanie kompensacji rezystancyjnej oraz pojemnościowej (potencjometr P oraz kondensator $C_{\rm p}$) powoduje daiszą obniżkę drugiej harmonicznej napięcia asymetrii do wartości rzędu dziesiątek mikrowoltów. Nałożenie ekranu magnetycznego oraz zastosowanie wszystkich rodzajów kompensacji pozwoliżo obniżyć drugą harmoniczną napięcia asymetrii do wartości kilkunastu mikrowol ów. Napięcie to obliczone wg wzoru (6) odpowiadało wartości błędu pobudliwości 10⁻⁷, co zostało potwierdzone doświadczalnie.

5. Wnioski

Jak wynika z rozważań oraz pomiarów autora decydujący wpływ na wartość błędu pobudliwości KP ma rapięcie asymetrii modulatora drugiej harmonicznej.

Wartość napięcia asymetrii zależy głównie od technologii rdzeni magnetycznych. Powinny być one wykonane jako toroidalne, zwijane z możliwie najcieńszej taśmy permolojowej o identycznych wymiarach geometrycznych, niezmiennych wzdłuż drogi magnetycznej. Rdzenie należy umieścić w karkasach, najlepiej aluminiowych (lub bakelitowych) w celu wyeliminowania efektu magnetostrykcji.

Uzwojenia detekcyjne oraz modulujące należy nawijać za pomocą nawijarki do toroidów. Zapewni to jednakowy skok zwoju i w konsekwencji jednakową gęstość uzwojenia.

Istnieje kożliwość zmniejszenia błędu pobudliwości poza układem modulatora. Wartość błędu można zmniejszyć dwoma sposobami:

 a) stosując na wyjściu uzwojeń detekcyjnych prostowalk fazoczuły, sterowany przebiegiem i odstawowej harmonicznej. Eliminuje się wtedy składową przesuniętą o kąt I/2 (w tzw. kwadrafazie),

Analiza błędu pobudliwości komparatora ...

b) przesuwając zero elektryczne do zera mechanicznego przetwornika elektromechanicznego - można to zrealizować np. wymuszając w przetworniku prąd kompensujący początkowe wychylenie spowodowane napięciem asymetrii modulatora.

Szacuje się, że zastosowanie wskazówek wynikających z wniosków pozwoli na obniżenie błędu pobudliwości do wartości 10⁻⁸...10⁻⁹, co jest jednym z warunków zastosowania KP do pomiaru rezystancji z błędem mniejszym niż 10⁻⁷.

RECENZENT:

doc. dr hab. Ryszard Gotszalk Politechnika Wrocławska

LITERATURA

- [1] Geyger W.: Magnetic-amplifier circuit. New York 1954.
- [2] Karandiejew K.B.: Transformatornyje izmieritielnyje mosty. Energija 1970.
- [3] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct current comparator bridge for high resistance measurements. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4, 1973.
- [4] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct-current comparator bridge for measuring shunts up to 20000 amperes. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4, 1969.
- [5] Kulikowski J., Nałęcz M.: Schematy zastępcze transduktorowych czujników magnetycznych o wyjściu impulsowym. Rozprawy Elektrotechniczne z. 2, 1961.
- [6] Miłek M.: Analiza magnetycznego kompensatora przepływu prądu stałego. Materiały X Międzyuczelnianej Narady Metrologów; Szczecin 1975.
- [7] Miżek M.: Interpretacja i pomiar zespolonej przenikalności magnetycznej stopów Fe-Ni. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 48, Gliwice 1975.
- [8] Rozenbłat M.A.: Osnowy postrojenija magnitnych usilitieliej s niskim progom czuwstwitielnosti. Awtomatika i Tieliemiechanika Nr 1. 1956.
- [9] Gotszalk R., Hagel R.: Właściwości i zastosowanie komparatorów prądów. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, Elektryka z. 55, Gliwice 1976.

АРАЛИЗ ПОГРЕШНОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И МЕТОД ЕЁ МИНИМАЛИЗАЦИИ

резюме

Приведена дефиниция погрешности чувствительности компаратора токов, применяемого в схемах измерения сопротивления. Рассмотрены величины, ограничивающие погрешность чувствительности, и определены условия уменьшения её значения.

THE ANALYSIS OF SENSITIVITY ERROR OF CURRENT COMPARATOR AND THE WAYS OF ITS MINIMISATION

Summary

The sensivity error of current comparator used for resistance measurement system is defined. The quantities limiting sensitivity error are identified and the conditions of its minimisation have been put forward.