ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1980

Seria: ELEKTRYKA z. 71 Nr kol. 656

Marian MIŁEK
Józef KWICZALA

KONSTRUKCJA I TECHNOLOGIA UZWOJEŃ KOMPARATORA PRĄDÓW STAŁYCH

Streszczenie. Przedstawiono konstrukcję i technologię uzwojeń komparatora prądów stałych, służących do porównania rezystancji oporników wzorcowych o wartościach od 0,1Ω do 0,0001Ω.

1. Wstęp

Zasada działania magnetycznych komparatorów prądów stałych jest znana m.in. z prac [2], [3], [5].

Funkcją komparatora prądów jest porównanie dwóch prądów doprowadzonych do uzwojeń porównawczych n_X oraz n_N, nawiniętych na magnetowodzie w taki sposób, aby siły magnetomotoryczne odejmowały się. W przypadku komparatorów prądów stałych detektorem strumienia jest dwurdzeniowy przetwornik strumienia na napięcie o częstotliwości równej podwójnej częstotliwości fali wzbudzającej, omówiony m.in. w pracy [4].

Komparator porównuje prądy dwóch źródeł prądowych (rys. 1). Prądy te płyną przez porównywane rezystancje R_X oraz R_N. Stan równości spadków napięcia

$$I_X R_X = I_N R_N \tag{1}$$

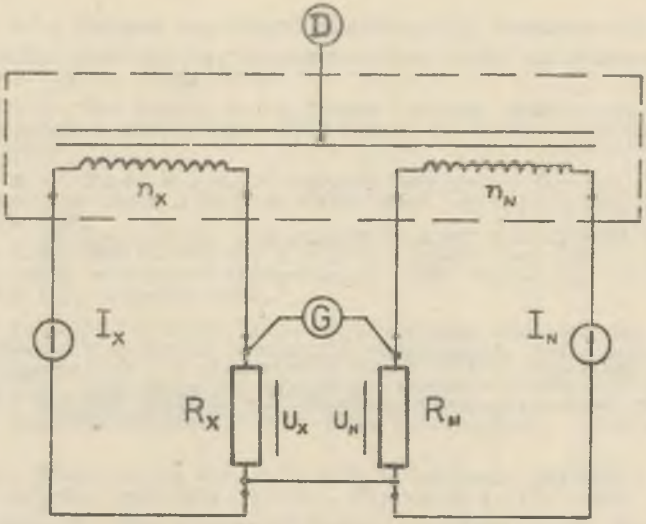
wskazuje galwanometr G.

Jednocześnie dla stanu zerowego detektora strumienia stałego D wypadkowa siła magnetomotoryczna w komparatorze jest równa zeru. Dla różnych wartości prądów I_N oraz I_X stan zerowy detektora można osiągnąć dwoma sposobami:

a) zmieniając liczbę zwojów jednego z uzwojeń, wtedy:

$$I_X n_X = I_N n_N, \tag{2}$$

b) wprowadzając dodatkowe uzwojenie, wyznaczające różnicę sił magnetomotorycznych; sposób ten jest omówiony w dalszej części pracy.



Rys. 1. Schemat układu porównania rezystancji z komparatorem

Z porównania zależności (1) oraz (2) otrzymuje się:

$$R_X = R_N \frac{I_N}{I_X} = R_N \frac{n_X}{n_N}, \tag{3}$$

Jeżeli zależność (2) jest spełniona z pomijalnie małym błędem, to błąd pomiaru rezystancji R_X zależy tylko od niedokładności wzorca. Wymaganie to, w przypadku pomiaru rezystancji wzorców np. klasy 0,005, określa wartość krańcowego, całkowitego błędu porównania sił magnetomotorycznych: $\delta_g = 10^{-6}$.

Jednym z warunków osiągnięcia małej wartości błędu jest odpowiednia konstrukcja i technologia uzwojeń porównawczych oraz uzwojeń, za pomocą których wyznacza się różnicę sił magnetomotorycznych uzwojeń porównawczych, nazwanych uzwojeniami sił magnetomotorycznych podwielokrotnych. Problemy te będą omówione w artykule.

2. Konstrukcja i technologia uzwojeń porównawczych

Liczba zwojów uzwojeń porównawczych zależy od:
- natężenia prądu płynącego przez porównywane rezystancje,
- wymiarów geometrycznych komparatora, a w szczególności ekranów magnetycznych [5].

Prądy płynące przez porównywane rezystancje muszą być jak największe. Jest to ważne zwłaszcza w przypadku porównania rezystancji o małych wartościach, ze względu na ograniczoną czułość napięciową galwanometru G (rys. 1). Wielkością ograniczającą natężenie prądu jest moc dopuszczalna opornika wzorcowego. Jeżeli komparator jest przeznaczony do porównywania jednakowych rezystancji z szerokiego przedziału wartości (np. $10^{-1}...10^{-4}\Omega$, prądy będą miały różne natężenia. Jednak nominalna siła magnetomotoryczna w każdym przypadku musi być jednakowa; jest to warunkiem stałej czułości komparatora i umożliwia porównanie rezystancji o wartościach różniących się o rząd [4], [5]. Dlatego najlepszym rozwiązaniem jest wykonanie kilku uzwojeń o różnych prądach nominalnych i różnych liczbach zwojów. Najlepsze właściwości uzwojenia otrzymuje się nawijając je na magnetowodzie równomiernie - jednowarstwowo, tak aby obwód wewnętrzny był całkowicie wypełniony uzwojeniem. Liczba zwojów jest wtedy proporcjonalna do średnicy magnetowodu komparatora. Wraz z liczbą zwojów uzwojenia porównawczego, przy danym prądzie, wzrasta czułość komparatora [4]. Ale jednocześnie czułość maleje hiperbolicznie ze wzrostem średniej drogi strumienia. [4], [5]. Stąd też wynika optymalna średnica magnetowodów, która jak wykazano w pracy [5] powinna zawierać się w granicach od 120 do 200 mm. Liczba zwojów jest zatem kompromisem pomiędzy wymaganiem dużej czułości komparatora, a technologią umożliwiającą osiągnięcie małych błędów porównania sił magnetomotorycznych.

Tok postępowania podczas wyznaczenia liczby zwojów jest następujący:

- z danych znamionowych oporników wzorcowych R_N oraz R_X określa się dopuszczalne wartości natężeń prądów I_{Nmax} i I_{Xmax} oraz przyjmuje natężenie prądów pomiarowych $I_N = kI_{Nmax}$ oraz $I_X = kI_{Xmax}$, gdzie k=0,1...0,6,
- zgodnie z wymogami technologicznymi przyjmuje się typ uzwojenia (multifilarne, bifilarne, sekcjonowane),
- oblicza się przekroje przewodów uzwojenia,
- z wymiarów geometrycznych magnetowodów, ekranu i przewodów wyznacza się liczbę zwojów uzwojenia $n_{X1} = n_{N1}$,
- w przypadku zmniejszenia natężeń prądów o rząd liczba zwojów uzwojenia $n_{X2} = 10\ n_{X1}$ oraz $n_{N2} = 10\ n_{N1}$.

W przedstawiony sposób obliczono natężenia prądów uzwojeń porównawczych komparatora w przypadku porównania dwóch rezystancji o wartościach $0,1\Omega$ oraz $0,001\Omega$. Przyjęto, że natężenie prądu płynącego przez porównywane rezystancje jest równe w przybliżeniu $0,4\ I_{max}$. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Zasadniczym wymogiem technologii jest realizacja uzwojeń porównawczych przystających przestrzennie (tzn. zajmujących tą samą przestrzeń). Wtedy indukcyjności rozproszenia oraz pojemności doziemne są dla obu uzwojeń identyczne i stąd błąd porównania sił magnetomotorycznych równy zeru. Wy-

Tabela 1

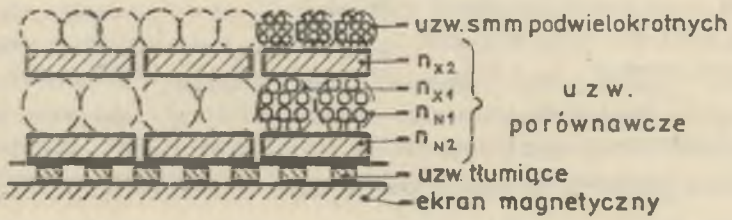
Obliczenie natężenia prądów uzwojeń porównawczych

	$R_X = R_N$ [Ω]	P_{max} [W]	I_{max} [A]	$I_X = I_N$ [A]	$P_{rzecz.}$ [W]
1	0,1	1	3,33	1,5	0,225
2	0,001	1	33,3	15	0,225

Tabela 2

Dane techniczne uzwojeń porównawczych

	Uzwojenie	Liczba zwojów	Typ uzwojenia	Wymiary mm	$\Theta_N = \Theta_X$ [A]
1	$n_{X1} = n_{N1}$	10x28	multifilarne	przewodu $d_p = 1,05$ wiązki $d_w = 3,6$	420
2	$n_{X2} = n_{N2}$	28	bifilarne	płaskownik 7,5x1	420



Rys. 2. Rozłożenie uzwojeń komparatora prądów

magania tego nie można spełnić w sposób dokładny - w przybliżeniu spełnia je uzwojenie multifilarne [1]. Jednak zakres stosowania uzwojenia tego typu jest ograniczony jego prądem nominalnym. Dla prądów o natężeniu większym od ok. 2 A istnieją trudności technologiczne z wykonaniem wiązki i uzwojenie multifilarnego (wiązka ma średnicę równą 6...7 mm). Dlatego dla natężeń prądów większych od ok. 2A uzwojenia wykonuje się inną technologią. Dla prądów o natężeniu kilkunastu amperów uzwojenia wykonuje się, dla przekładni zwojowej równej 1, jako bifilarne. Ze względów technologicznych najbardziej odpowiednim przekrojem uzwojenia jest przekrój prostokątny. Uzwojenia są wtedy nawinięte dwoma płaskownikami, przy czym położenie

poszczególnych przewodów (dół-góra) zmienia się np. co 1/4 obwodu komparatora. Rozłożenie uzwojeń na obwodzie komparatora przedstawia rys. 2. Na rysunku zaznaczono uzwojenie tłumiące oraz ekrany magnetyczne - omówione w pracy [5]. Dane techniczne uzwojenia zestawiono w tabeli 2.

3. Konstrukcja oraz błędy dodatkowe uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych

Wartości rzeczywiste rezystancji oporników wzorcowych różnią się od swojej wartości nominalnej o mniej niż ± 1%. Stąd siły magnetomotoryczne i prądy muszą również zmieniać się w granicach ± 1% swoich wartości nominalnych. Wynik pomiaru, ze względu na wymaganą dokładność (błąd mniejszy niż 10^{-6}), powinien posiadać nie mniej niż 6 cyfr znaczących. Stąd z zależności (3) dla takich samych wartości nominalnych rezystancji wynika:

$$R_{Xg} = R_N \frac{I_N}{I_X} = R_N \frac{n_X}{n_N} = R_N \ (1{,}000000 \pm 0{,}010000). \tag{4}$$

Wykonanie przekładni zwojowej o stosunku zwojów określonych za pomocą 6 cyfr znaczących jest z punktu widzenia technologii niemożliwe. Dlatego na rdzeniu komparatora nawinięto dodatkowe uzwojenie, nazwane uzwojeniem sił magnetomotorycznych podwielokrotnych. Przez uzwojenie to płyną prądy I_1, I_2, I_3..., o ściśle określonej części prądu I_X, jak to przedstawiono na rys. 3. Obwody uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych zasilano z dodatkowego źródła I_p o prądzie równym cI_x. Rozwiązanie takie zapewnia, dla takiej samej wartości siły magnetomotorycznej nominalnej uzwojeń porównawczych (420 A z tabeli 2), jednakową czułość komparatora.

Równanie sił magnetomotorycznych komparatora przedstawionego na rys. 3 ma postać:

$$I_X n_{X1} + I_1 m n_U' + I_2 n n_U' + I_3\, p n_U' + I_4\, q n_U' = I_N n_N \tag{5}$$

gdzie:

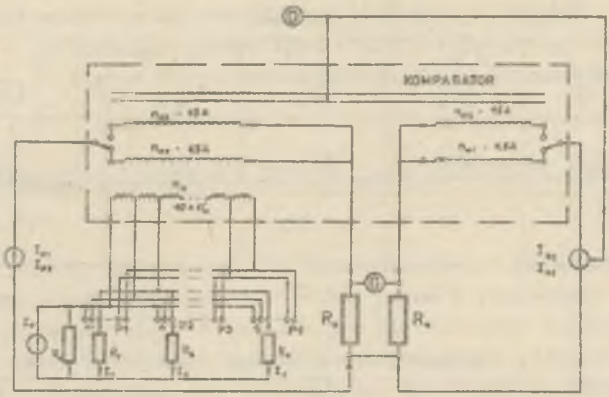
n_U' - liczba zwojów w sekcji uzwojenia sił magnetomotorycznych podwielokrotnych,

m, n, p, q - nomery pozycji przełączników.

Jeżeli:

$$I_1 n_U' = 0{,}001\ I_X n_{X1} \tag{6}$$

$$I_2 n_U' = 0{,}0001\ I_X n_{X1} \text{ itd.}$$



Rys. 3. Schemat uzwojeń porównawczych komparatora z jednym uzwojeniem sił magnetomotorycznych podwielokrotnych

to

$$\frac{I_N}{I_X} = \frac{n_{X1}}{n_{N1}} (1+10^{-3}m+10^{-4}n+10^{-5}p+10^{-6}q). \tag{7}$$

Stąd dla $n_{X1} = n_{N1}$ w celu osiągnięcia stanu równowagi komparatora, należy zmieniać jeden z prądów: I_N lub I_X. Najprostszą realizacją zapewniającą liniową zależność natężenia prądu i numerów pozycji przełączników jest sterowanie źródłem prądowym I_N przedstawione na rys. 3.

Liczba zwojów uzwojenia sił magnetomotorycznych podwielokrotnych n_U może być określona w dowolny sposób, z zachowaniem warunku (6). Przyjęcie jednak zależności pomiędzy liczbami zwojów $n_U = n_{X1} = 10\ n_{X2}$ oraz równości prądów $I_{X1} = I_p$ umożliwia wyznaczenie błędu własnego uzwojenia sił magnetomotorycznych podwielokrotnych.

W przypadku uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych istnieje błąd własny uzwojenia spowodowany różnym, w porównaniu z uzwojeniami n_{X1} i n_{N1}, sprzężeniem magnetycznym z detektorem strumienia oraz błędy dodatkowe spowodowane:

a) wpływem rezystancji uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych,
b) wpływem temperatury na rezystancję uzwojeń.

Błąd spowodowany rezystancją uzwojeń jest funkcją położenia zwieracza przełączników P1, P2, P3... (rys. 3). Gdy rośnie numer sekcji włączonej w obwód prądów I_1, I_2... wzrasta rezystancja w obwodach i maleją wartości tych prądów. Błąd ten zdefiniowano dla obwodu prądu I_1 jako:

$$\delta_{Iu} = \frac{I_{10} - I_1}{I_{10}} \tag{8}$$

gdzie:

I_{10} - prąd w układzie bez rezystancji uzwojeń,

I_1 - prąd uzwojenia zwojów ułamkowych z uwzględnieniem rezystancji uzwojeń.

Przedstawiony zostanie sposób zmniejszenia na drodze konstrukcyjnej, wpływu rezystancji na wynik pomiaru.

W pierwszej realizacji układu uzwojeń sił magnetomotorycznych w obwodach prądów I_1, I_2 itd. włączone były tylko rezystancje R_1, R_2 itd., jak to pokazano na rys. 3. Rozpatrując tylko obwody prądów I_1 oraz I_2 (w pozostałych obwodach rezystancji R_3, $R_4 \gg r'_u$, gdzie r'_u - rezystancja sekcji uzwojenia n'_U), wyznaczono zależność błędu spowodowanego rezystancją [4] i obliczono jego wartość dla typowych danych:

$$r'_u = 4{,}0\Omega \qquad R_1 = 100\,\Omega$$
$$R_w = 1\Omega; \qquad R_2 = 1000\Omega.$$

Dla sytuacji $m < n$

$$\delta_{I'u} = \frac{\alpha + m\vartheta + (m\vartheta - 0{,}1\alpha)\,[(n-m)\vartheta + 10]}{\alpha + m\vartheta + (\alpha + m\vartheta + 1)\,[(n-m)\vartheta + 10]} \tag{9}$$

gdzie:

$\vartheta = \frac{r_u}{R}$; $\quad \alpha = \frac{R_w}{R_1}$,

m,n - numery sekcji.

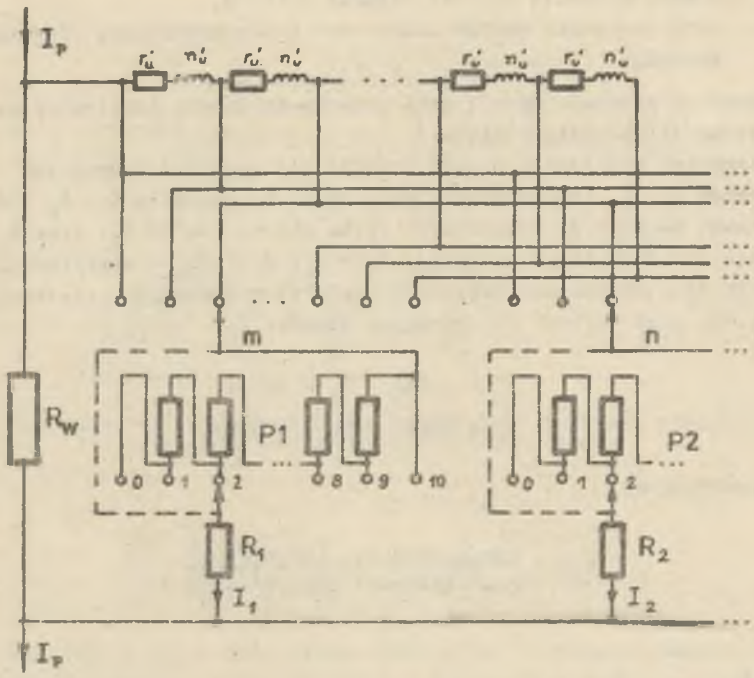
Przyjmując $m = 9$, $n = 10$ otrzymano $\delta_{I'u} \approx 10^{-1}$.

Sposobem zmniejszenia tego błędu jest wyrównanie rezystancji w obwodach prądów I_1 oraz I_2, poprzez synchroniczne włączanie dodatkowych rezystancji o wartościach $r_d = r'_u$, wraz ze zmianą położenia zwieracza przełączników P_1 oraz P_2, jak to pokazano na rys. 4.

W przedstawionym układzie istnieje jednak błąd spowodowany spadkiem napięcia, wywołanym prądem I_2, na rezystancji r'_u przez którą przepływa również prąd I_1.

Błąd ten analizowano w pracy [4]; jego wartość dla $m < n$ wyznacza się z zależności:

$$\delta_{I''u} = \frac{[1+(10-m)\vartheta](\alpha+m\vartheta) - \alpha\,\frac{1+10\vartheta}{10+10\alpha}[10+(10-m)\vartheta]}{(\alpha+10\vartheta+1)\,[10-(10-m)\vartheta] + [1+(10-m)\vartheta](m\vartheta+1)} \tag{10}$$



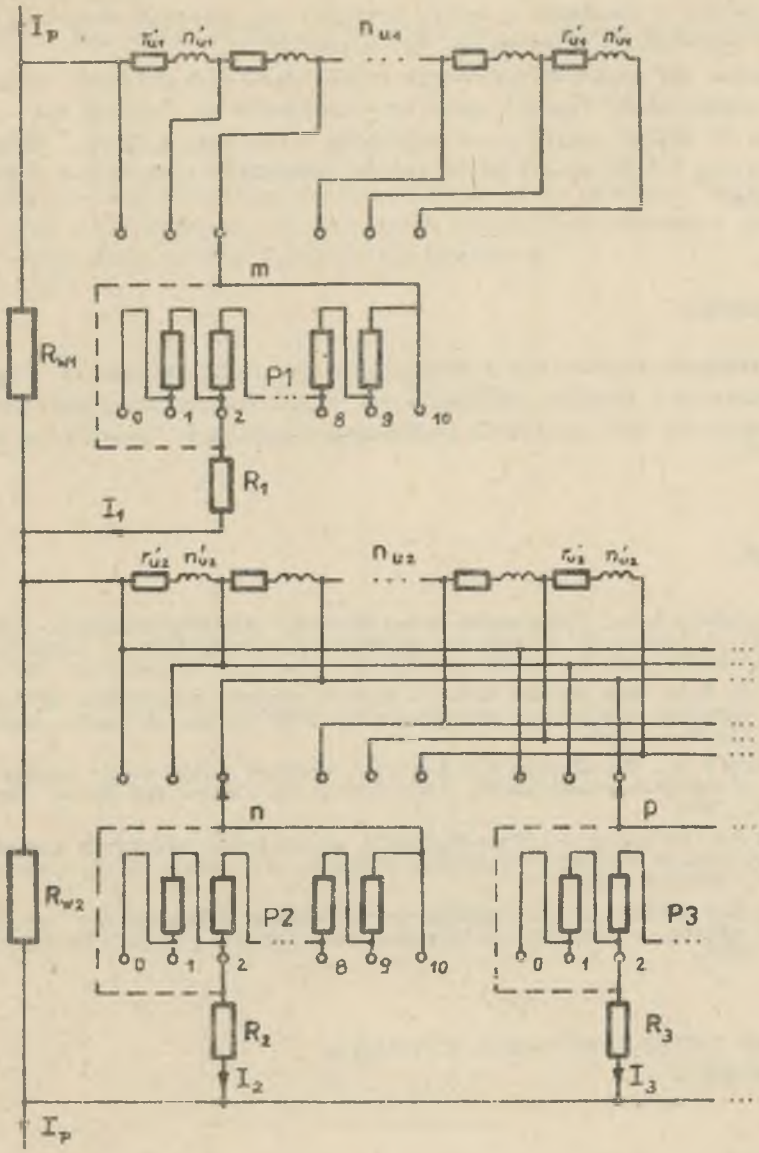
Rys. 4. Schemat uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych z kompensacją wpływu rezystancji uzwojeń

Dla identycznych jak w poprzednim przypadku parametrów α oraz ϑ, błąd spowodowany rezystancją uzwojeń zmniejszył się do wartości

$$\delta''_{Iu} \cong 7 \cdot 10^{-3}.$$

Wpływ rezystancji r_u na wartość błędu można jeszcze zmniejszyć o rząd, wykonując w komparatorze dwa uzwojenia sił magnetomotorycznych podwielokrotnych - jedno uzwojenie włączone tylko w obwód prądu I_1, drugie w obwód prądów I_2, I_3, I_4 (rys. 5).

Drugim dodatkowym błędem związanym z uzwojeniem sił magnetomotorycznych ułamkowych jest błąd spowodowany zmianą temperatury. Komparator, a zwłaszcza źródła prądowe wymagają stabilizacji, której czas jest równy ok. kilkunastu minut. W tym okresie czasu przez uzwojenia porównawcze płyną prądy, powodując nagrzewanie uzwojeń. Pojemność cieplna komparatora oraz jego termiczna stała czasowa są bardzo duże (duża masa elementów i kilka warstw izolacji elektrycznej). Powoduje to nagrzewanie się uzwojeń n_{U1} oraz n_{U2}, co pociąga zmianę rezystancji w obwodach prądów I_1, I_2, itd.



Rys. 5. Schemat uzwojeń sił magnetomotorycznych podwielokrotnych z oddzieleniem obwodu I_1

Z pomiarów wykonanych modeli komparatorów wynika, że po czasie t=90min temperatura wnętrza komparatora wzrasta o około 10°C. Zmiany rezystancji nie są więc znaczące dla rozpływu prądów w obwodzie n_{U2}, ale mogłyby powo-

dować dodatkowy błąd w obwodzie n_{U1} (rys. 5). Dlatego też uzwojeniu n_{U1} należy wykonać z przewodów o takiej średnicy aby stosunek rezystancji uzwojeń do rezystancji całej gałęzi był rzędu 10^{-3}.

Uzwojenia sił magnetomotorycznych podwielokrotnych wykonano również w postaci wiązki multifilarnej, przy czym uzwojenie n_{U1} składa się z 10 sekcji po 28 zwojów, nawiniętych przewodem o średnicy 0,85 mm, natomiast uzwojenie n_{U2} - z 10 sekcji po 28 zwojów, nawiniętych przewodem o średnicy 0,35 mm.

4. Zakończenie

Przedstawiona konstrukcja i technologia uzwojenia umożliwiła realizację komparatora o błędzie porównania sił magnetomotorycznych mniejszym niż 10^{-6}. Komparator taki umożliwia porównanie rezystancji wzorców z błędem rzędu 10^{-6}.

LITERATURA

[1] Grocholskij A.L., Kuszczajew E.L.: Mietody obespiecziwanija tiosnoj swjazi pliecziewych induktiwno swjazanych eliemjentow na osnowie multifiljarnych sistem. Probliemy Eliektromietrij, Nowosibirsk 1971.

[2] Kusters N.L., Mac Martin N.P.: A direct current comparator bridge for four terminal resistance measurements. IEEE Trans. on Instr. and Meas, vol. 15, Dec. 1966.

[3] Kusters N.L., Mac Martin M.: A direct current comparator bridge for high resistance measurement. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No. 4, p. 22, 1973.

[4] Miłek M., Kwiczala J.: Konstrukcja i technologia detektora strumienia magnetycznego komparatora prądów stałych. Zesz.Nauk.,Politechnika Śl., z. 71, Gliwice 1980.

[5] Miłek M.: Analiza i konstrukcja magnetycznego kompensatora przepływu prądu stałego w układzie porównania rezystancji. Praca doktorska. Gliwice 1976.

КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ОБМОТОК КОМПАРАТОРА ПОСТОЯННЫХ ТОКОВ

Р е з ю м е

Представлена конструкция и технология обмоток компаратора постоянных токов, применяемого в схемах сравнения резистанса эталонных сопротивлений стоимости (0,0001 ÷ 0,1) Ω.

CONSTRUCTION AND TECHNOLOGY OF THE WINDINGS OF DC CURRENT COMPARATORS

S u m m a r y

Construction and technology of the windings of DC current comparator designed for the comparison of resistances of standard resistors in the range of value from 0.1Ω to 0.0001Ω are presented.