ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ



ELEKTRYKA



POLITECHNIKA ŚLĄSKA

ZESZYTY NAUKOWE Nr 788

3347 84

MARIAN MIŁEK

ELEKTRYKA

ZESZYT DZIEWIĘĆDZIESIĄTY

MAGNETYCZNE KOMPARATORY PRĄDOWE konstrukcja, technologia, zastosowania

PRACE INSTYTUTU METROLOGII ELEKTRYCZNEJ I ELEKTRONICZNEJ

GLIWICE

1984

OPINIODAWCY:

Prof. dr hab. inż. Ryszard Gotszalk Doc. dr hab. inż. Michał Szyper

KOLEGIUM REDAKCYJNE

Wiesław Gabzdyl (redaktor naczelny), Zofia Cichowska (redaktor działu), Elżbieta Stinzing (sekretarz redakcji)

REDAKCJA

Kazimiera Rymarz

REDAKCJA TECHNICZNA

Alicja Nowacka

Wydano za zgodą Rektora Politechniki Sląskiej

PL ISSN 0072-4688

Dział Wydawnictw Politechniki Śląskiej ul. Kujawska 3, 44-100 Gliwice

Nakl. 150-55 Ark. wyd. 7 Ark. druk. 10,125 Papter offsetowy kl. III, 70x100, 70 g Oddano do druku 29.05.1984 Podpis. do druku 4.09.1984 Druk ukończ. w listop. 1984 Zam 765/94 U-24 Cena zł 105.-

Skład, fotokopie, druk i oprawę wykonano w Zakładzie Graficznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach

SPIS TREŠCI

Str.

WYKAZ OZNACZEŃ	7
1. WST&P	13
1.1. Zasada działania magnetycznych komparatorów prądowych(łEP).	13
1.2. Parametry metrologiczne LKP	18
1.3. Rys historyczny rozwoju komparatorów prądów	19
2. DETEKTORY W LKP	:3
2.1. Detekcja siły magnetomotorycznej w MKP zmiennych	20
2.1.1. Schemat zastępczy Mil zmiennych	23
2.1.2. Czułość detektora siły magnetomotorycznej	28
2.1.3. Wpływ parametrów uzwojenia detekcyjnego na czułosć .	25
2.1.4. Błąd pobudliwości LKP zmiennych	33
2.2. Detekcja siły magnetomotorycznej w MEP stułych	.03
2.2.1. Zasada dziełania detektora	33
2.2.2. Parametry metrologiczne detektora ,	35
2.2.3. Warunki realizacji detoktora	111
2,3. Detekcja siły magnetomotorycznej w MiP kriogenicznych	43
2.3.1. Efekt Josephsona	13
2.3.2. SQUID w MKP kriogenicznych	44
2.3.3. Układ elektroniczny detektora	17
3. MAGNETOWODY I EKRANY MAGNETYCZNE	49
3.1. Magnetowody	49
3.1.1. Technologia mngnetowodów	49
3.1.2. Parametry opisujące magnetowód	49
3.1.3. Niejednorodność permeanoji magnetowodu	52
3.1.4. Metody badania i minimalizacji niejednorodności	
wzdłużnej permeancji	54

		Str.
	3.2. Ekrany magnetyczne	58
	3.2.1. Funkcje ekranów magnetycznych	58
	3.2.2. Metoda wyznaczania współczynników ekranowania	59
	3.2.3. Ekrany w MKP kriogenioznych	60
4.	BLEDY MKP	62
	4.1. Definicja błędu	62
	4.2. Błędy MKP zmiennych	62
	4.3. Bledy LKP stałych	67
	4.4. Bledy MKP kriogenicznych	70
5	HZ COLENIA PORD NAWCZE	72
	5.1 Tum uzualań	72
	5 () Igendania miltifilarna	72
	5.1.1. Uzwojenia mulerillarne	10
	5,1.2. UZWDjenia ialowe	16
	5.1.3. Uzwojenia szynowe	80
	5.2. Uzwojenia kompensacyjne	81
	5.2.1. Układ kompensacji w MKP zmiennych	82
	5.2.2. Układ kompensacji w MCP stałych	54
	5.3. Uzwojenia tłumiące	86
	5.4. Uzwojenia komparatorów kriogenicznych	89
	TO ALC AND UND	0.2
υ.	AZURCUMAANIS NAAF ,	92
	6.1. Metody wzorcowania	92
	5.2. Metoda samowzoroowania MCP	92
	6.3. Metoda bezpośrednie wzproowania MKP	97
	6.4. Metoda transforu pradowego	100
7.	CHARALTERYSTYKA OBSZARU ZASTOSOWAN MKP	104
6.	ZASTOSOGANIE MCP ZNIENNYCH	107
	6,1. Mostek impendancy jny	107
	8.1.2. Mostek G-C z MCP zmiennych	114

- 4 -

			0.44
		8.1.3. Mostek R-L oraz R-M z MKP zmiennych	118
	8.2.	Zastosowanie MKP w układach wzorcowania przekładników	
		prądowych	124
9.	ZAST	OSONANIE MKP STALYCH	130
	9.1.	Nastawne źródło prądowe	130
	9.2.	Kompensator nepięcia z MKP	133
	9.3.	Komparator rezystancji z MKP	138
	9.4.	Komparacja rezystancji w układzie z kriogenicznym MKP	145
	9.5.	Woltomierz z LKP	148
LI	TERAT	URA	152
C+.		zenia	160

- Norman alakinan - Norman alakinan - Nij Mikhironikarputa temperaturun sustaisis dir - Nij Mikhironikarputa temperaturun sustaisis dir - Nemerikarputa temperaturun (). - Summistanis in pisakampini ().-); simit militiitarut - Lemenking in pilaten summisti metanisi erimitiitarut

Constants.

- Contraction in a submitted of the submitted of the submitted in

a bandhi mari ju di srama 1 menore deservitante departenti i

· Contraction and South Contraction and Contraction and Contraction

- plant then the

a print of a state insulation of

a surgest and a province of the province of the

- 5 -

WYKAZ OZNACZEŃ

01	-	stała proporcjonalności obwodu kompensacyjnego
°11	-	pojemność międzysekcyjna i-j wiązki multifilarnej
C	-	pojemność
CX, CN	-	pojemność mierzona i wzorcowa komparatora impendancji
c'	-	pojemność wejściowa wskaźnika napięcia wyjściowego
		detektora
CDopt	-	pojemność warunkująca maksymalną czułość LKP zmiennych
¢ _K	-	pojemność w obwodzie kompensacji MXP zmiennych
Cw	-	pojemność doziemna uzwojenia detekcyjnego
C,	-	pojemność doziemna uzwojenia 1
C2 .	-	pojemność doziemna uzwojenia 2
C12	-	pojemność międzyuzwojeniowa (1-2) MKP
dp	-	średnica przewodu wiązki multifilarnej
	-	ładunek elektronu
Eo	-	bariera potencjału złącza Josephsona
Ex, Ew	-	siły elektromotoryczne kompensowane w układzie MKP
f.	-	częstotliwość rezonansowa
81	-	konduktancja doziemna i-tej sekcji wiązki multifilarnej
811	-	konduktancja międzysekoyjna (i-j) wiązki multifilarnej
G'D	-	konduktancja wejściowa wskaźnika napięcia wyjściowego
		detektora
GK	-	konduktanoja w obwodzie kompensacji MKP zmiennego
Gx, GN	-	konduktancja mierzona i wzorcowa komparatora impedancji
Gw	-	konduktancja doziemna uzwojenia detekoyjnego
h	-	stała Plancka
н	-	natężenie pola magnetycznego
По	-	natężenie pola magnetycznego na zewnotrz ekranu magne-
		tycznego

Hnas	- natężenie nasycenia magne towodów
Hw	- natężenię wzbudzenia magnetowodów w detektorze MKP
	s tałych
I	- prąd krytyczny złącza Josephsona
Is	- całkowity prąd złącza Josephsona
It	- prąd w uzwojeniu tłumiącym
Id	- prąd korekcyjny, sliminujący wpływ rezystancji uzwo-
	jeń LKKP
I.v.oz	- prąd cewki sprzęgającej ze SQUID-em
IG	- prąd płynący przez pojemność C _K obwodu kompensacyjnego
IDo	- prąd zwarcia uzwojeń detekcyjnych
IG	- prąd płynący przez przewodność G _K obwodu kompensacyjnego
IKI.	1 w prądy w obwodach kompensacji MKP stałych
I	- prąd uzwojenia porównawczego i
12	- prąd uzwojenia porównawczego 2
IIK	- prąd I przyporządkowany zaciskowi K
IIL	- prąd I przyporządkowany zaciskowi L
Iđ	- blad pradowy LKP
k	- względna różnica natężeń prądów uzwojeń MKP
k _I	- nominalna przekładnia przekładnika prądowego
к	- wzmocnienie wzmacniacza elektronicznego
K.eo	- osiowy współczynnik ekranowania
Kew	- wzdłużny współczynnik ekranowania
KK	- nastawa w obwodzie kompensacji
1	- średnia długość drogi strumienia w m.gnetowodzie
1,	- indukoyjność rozproszenia i-tej sekcji wiązki multifilarnej
Lo	- indukcyjność główna sekcji uzwojenia
Ln	- indukoyjność oałkowita n-tej sekcji uzwojenia
Lns	- indukcyjność rozproszenia n-tej mokoji uzwojenia
LDW	- indukcyjność rozproszenia uzwojenia detekcyjnego
L	- indukcyjność pierścienia SęUli-u
L	- indukoyjność cewki sprzęgającej SQUID-u

Lx	- indukcyjność mierzona w komparatorze impedancji
Д	- przekładnia zwojowa MKP wzorcowego
MT	- indukcyjność wzajemna cewki i pierścienia SQUID-u
MKP	- magnetyczny komparator prądów
n	- przekładnia zwojowa MKP
n ₁ , n ₂	- liczby zwojów cewek o indukcji wzajemnej M
Nt	- liczba zwojów uzwojenia tłumiącego
Nw	- liczba zwojów uzwojeń wzbudzających w detektorze MKP
	stałych
ND	 liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego
NK	- liczba zwojów uzwojenia kompensacyjnego
N'K	- liczba zwojów w sekcji uzwojenia kompensacyjnego
N ₁	- liczba zwojów uzwojebia porównawczego 1
N ₂	- liczba zwojów uzwojenia porównawczego 2
N _{1W}	- wypadkowa liczba zwojów uzwojenia i w MKP
QT	- dobroć cewki sprzęgającej SQUID-u
r	- promień strefy chronionej ekranu
ri	- rezystancja i-tej sekcji wiązki multifilarnej
r ₁	- rezystancja uzwojenia porównawczego i
r ₂	- rezystancja uzwojenia porównawczego 2
R	- rezystancja opornika w obwodzie kompensacji
R	- rezystanoja układu mostkowego detoktora w MKP stałych
Rp	- promień ekranu magnetycznego
R	- rezystanoja w obwodzie sprzężenia zwrotnego układu
	SQUID-u
Rt	- rezystancja uzwojenia tłumiącego
RDW	- rezystancja uzwojenia dotekcyjnego
RFe	- rezystancja szeregowa gałęzi poprzecznej sohematu
And a state of the second s	zastępczego transformatora typu T
R, R, R, R, 2	- rezystancje w obwodzie kompensacji E_{χ} oraz E_{χ}
R1, R2, R3	- rezystancje oporników w obwodzie kompensacji LKP
	stałych

- 9

R 10	- rezystancja obwodu prądu I
P20	- resystancja obwodu prądu I ₂
	- pole przekroju poprzecznego magnetowodu
SH	- czułość modulatorów parzystych harmonicznych
SHIMAX	- maksymalna czułość modulatorów parzystych harmonicznych
SI	- napięciowa czułość prądowa NKP
SKI	- prądowa czułość siły magnetomotorycznej MKP
SKIO	- swarolowa prądowa czułość siły magnetomotorycznej MKP
SKU	- napięciowa czułość siły magnetomotorycznej MKP
SKUo	- bezobciążeniowa napięciowa czułość siły magnetomotorycznej
6 T	MKP
tgox	- współczynnik stratności badanego kondensatora
U	- napiçcie zasilania mostka (komparatora impedancji)
Uas	- napięcie asymetrii na wyjściu detektora MKP stałych
υ	- napięcie kompensujące spadek napięcia na uzwojeniach MKP
UD	- napiçole na wyjściu detektora siły magnetomotorycznej MKP
U Do	- napięcie na ^D wyjściu detektora w stanie bezobciążeniowym
U DS	- napięcie błędu na wyjściu detektora
UT	- napięcie na cewce sprzęgającej SQUID
Uw	- napięcie wzbudzania detektora w MKP stałyca
U1. U2	- napięcia stron wtórnych obu stopni detektora LKP stałych
U'1, U'2	- papiçola stron pier=otnych obu stopni detektora MKP stałych
U _{2h}	- napięcie parzystych harmonicznych na wyjściu detektora LKP
	statych
U2W. U2W	- napięcie w uzwojeniu porównawczym przy rozwartym i zwartym
- Min	uzwojeniu tłumiącym
U _{1k}	- spadek napięcia na uzwojeniu i MKP
xµ -	- reaktancja szeregowa gałęzi poprzecznej schematu zastępczego
-	transformatora typu T
Y _X , Y _N	- admitancja mierzona i wzorcowa komparatora impedancji
W	- nastawa indukoyjnego dzielnika napiçola w układzie wyznacza-
	nia tg δ_x

- 10 -

d	- impedancja obwodu prądu I _d
z1, z2	- impedancje własne uzwojeń porównawczych MKP
M	- impedancja reprezentująca indukcyjność wzajemną M oraz
	straty czynne R _M
x, z _N	- impedancje mierzona i wzorcowa mostka komparatora
	impedanoji
DW	- impedancja uzwojenia detekcyjnego (N _D)
DZ	- impedanoja wypadkowa zewnętrzna uzwojenia detekcyjnego
μ	- impedancja gałęzi poprzecznej schematu zastępczego typu
-	T magnetowodu
це	- impedancja gałęzi poprzecznej schematu zastępozego typu
	T ekranu
x	- kąt obrotu magnetowodu względem pola magnetycznego
Se.	- składowa pojemnościowa błędu MKP
5m	- składowa magnetyczna błędu MKP
ns	- błąd sekcji uzwojenia MKP
Co	- względna składowa błędu pojemnościowego spowodowana
	rezystancją obciążenia
ĸ	- względny błąd MKP
KW	- względny błąd MKP wzorcowego
Lr	- błąd MKP dla równoległego połączenia sekcji uzwojenia
Lsz	- błąd MKP dla szeregowego połączenia sekoji uzwojenia
I	- błąd przekładnika prądowego
0	- wypadkowa siła magnetomotoryczna w magnetowodzie
D	- siła magnetomotoryczna uzwojeń detekcyjnych
1	- siła magnetomotoryczna uzwojenia 1
2	- siła magnetomotoryczna uzwojenia 2
8	- siła magnetomotoryczna odpowiadająca U _D
1	- względna różnica sił magnetomotorycznych uzwojeń porównaw-
	ozych

- czych
- permeanoja

л.	- permeancja ekranu
٨.	- permeancja magnetowodu
#p	- względna przenikalność początkowa
μ', μ"	- składowe zespolonej przenikalności magnetycznej
● ok	- kwant struBienia magnetycznego
₹o	- wypadkowy strumień w magnetowodzie
	- strumień rozproszenia uzwojenia 1
₽ ₈₂	- strumień rozproszenia uzwojenia 2
•z	- strumień przenikający przez pierścień SQUID-u
Zo	- strumień krytyczny, przenikający przez pierścień SQUID-u
•1	- strumień w magnetowodzie związany z prądem I,
₽ 2	- strumień w magnetowodzie związany z prądem I2
ω	- pulsaoja
2,1	- reluktancja rozproszenia uzwojenia 1
a.,2	- reluktancja rozproszenia uzwojenia 2
R _µ	- reluktanoja magnetowodu
Rue	- reluktancja wypadkowa ekranu magnetycznego
R _{µD}	- zastępoza reluktancja detektora
Ruw	- wypadkowa reluktancja MCP
¢ .	

1. WSTEP

1.1. Zasada działania magnetycznych komparatorów prądowych (MIP)

Magnetyczne komparatory prądów (MKP) są jednym z najważniejszych osiągnięć metrologii w dziedzinie konstrukcji i technologii narzędzi pomiarowych wielkości elektrycznych. Ich zadaniem jest porównanie – komparacja – natężeń dwóch prądów. Współczesna technologia umożliwia realizację MKP porównujących natężenia tych prądów z niedokładnością rzędu = $(10^{-6}...10^{-9})$, w zależności od wartości natężeń porównywanych prądów oraz ich stosunku. Prądy te doprowadzone są do uzwojeń nawiniętych na magnetowidzie w taki sposób, aby siły magnetomotoryczne odejmowały się – jak to przedstawiono schematycznie na rys.i.t.



Rys.1.1. Ilustracja zasady działania LKP

go do wyznaczenia stosunku dwóch natężeń prądów; zgodnie z zależnością (1.1):

$$\frac{\mathbf{I}_1}{\mathbf{I}_2} = \frac{\mathbf{N}_2}{\mathbf{N}_1}$$

Jeżeli siły magnotomotoryczne $I_1N_1 \neq I_2N_2$, wskazanie detektora 0 można sprowadzić do zera za pomocą dodatkowego uzwojenia, zaznaczonego na

Stan równości sił magnetomotorycznych:

 $I_1 N_1 = I_2 N_2$ (1.1)

wskazuje detektor D, symbolicznie przedstawiony na rys.1.1. Rysunek ten ilustruje najprostszy przypadek komparatora, posiadającego dwa uzwojenia porównawcze, służące-

(1.2)

rys.1.1.linię przerywaną, którego siła magnetomotoryczna spełnia zależność:

$$I_1 N_1 - I_2 N_2 = I_K N_K$$
 (1.3)

Zależności (1.1) oraz (1.3) opisują idealny model MKP, nie uwzględniający błędu spowodowanego między innymi strumieniem rozproszenia.

Schemat strukturalny MKP, uwzględniający strumienie rozproszenia, przedstawiono na rys.1.28.





Rys.1.2 Schematy strukturalne MKP

a - z uwzględnieniem strumieni rozproszenia

b - z pominięciem strumieni rozproszenia

- 14 -

Strumienie Φ_{s1} oraz Φ_{s2} są strumieniami rpzproszenia przenikającymi do magnetowodu i częściowo obejmującymi uzwojenia detekoyjne – przyporządkowano im reluktancje \mathcal{R}_{s1} oraz \mathcal{R}_{s2} . Wpływ strumieni rozproszenia na wynik sumowania w węźle można zmniejszyć dwoma sposobami:

a). wyrównując strumienie rozproszenia, tak aby

$$\Phi_{g1} - \Phi_{g2} = 0,$$

 b). zmniejszając je tak, aby wpływ ich różnicy był dostatecznie mały.

W praktyce stosuje się oba sposoby: pierwszy poprzez odpowiednią technologię uzwojeń porównawczych, drugi przez stosowanie ekranów magnetycznych. Pomijając strumienie rozproszenia schemat blokowy z rys 1.2a można przekształcić do postaci przedstawionej na rys.1.2b, gdzie różnica sił magnetomotorycznych Θ_0 jest przetworzona na strumień Φ_0 . Linia przerywana obejmuje detektor MKP.

W pierwszym przypadku (a) wielkością wyjściową jest napięcie U_D proporcjonalne do pochodnej strumienia ϕ_0 , detektor jest detektorem strumienia. W drugim przypadku (b) wielkością działającą na detektor jest wypadkowa siła magnetomotoryczna Φ_0 , przetworzona na strumień ϕ_0 i następnie na napięcie U_D . Detektor taki jest detektorem siły magnetomotorycznej; dlatego w celu ujednolicenia terminologii w dalszej części pracy detektory MKP nazwano detektorami siły magnetomotorycznej.

W MKP kompensowane są wartości chwilowe sił magnetomotorycznych, stąd możliwa jest komparacja natężeń prądów zmiennych oraz stałych w czasie. Ale sposób detekcji stanu kompensacji sił magnetomotorycznych stałych oraz zmiennych jest różny.

Najprostszym sposobem stwierdzenia, ozy w magnetowodzie istnieje zmienny strumień magnetyczny jest umieszczenie na magnetowodzie dodatkowego uzwojenia. Uzwojenie to o liczbie zwojów N_D nazwano uzwojeniem detekoyjnym. Siła elektromotoryczna indukująca się w uzwojeniu detekoyjnym jest proporcjonalna do pochodnej strumienia magnetycznego w magnetowodzie. W przypadku MKP stałych detektor powinien stwierdzić zerową różnicę stałych w czasie sił magnetomotorycznych lub wielkości ściśle z nimi związanych. W praktyce, ze względu na właściwości opisane między innymi w rozdziałe 2 pracy, stosuje się detektor z wyjściem napięciowym o częstotliweściach równych parzystym harmonicznym częstotliwości prądu wzbudzającego. Schematy ideowe typowych rozwiązań MKP stałych i zmiennych przedstawiono na rys.1.3.



Rys.1.3. Sohematy ideowe typowych rozwiązań MKP

- a stałych
- b zmiennych

Detektor oddzielony jest od uzwojeń porównawozych ekranem magnetycznym. Ekran ten zwiera strumienie rozproszeń uzwojeń porówmawozych, Problem ten omówiono między innymi w rozdziale 4. Również rola uzwojenia tłumiącego w MKP stałych wyjaśniona została w rozdziale omawiającym uzwojenia MKP.

Oddzielną grupę tworzą komparatory kriogeniczne, różniące się od klasycznych komparatorów głównie sposobem detekcji, wykorzystującej zbudowany w oparciu o efekt Josephsona - SQUID (Superconducting Quantum Interference Device). Obecnie istnicją różne rozwiązania konstrukcyjne takich komparatorów; w niektórych m nich uzwojenia porównawcze nawinięte mą w mpomób analogiczny jak w klamycznych MKP, na toroidzie o bardzo dużej wartości przenikalności mugnetycznej.

Ważną rolę w kriogenicznych MKP odgrywa ekran, wykonany z materiału przewodzącego, umieszczony wraz z uzwojeniem w kriostacie.



Hys.1.4. Schemat ideowy kriogenioznego MKP

Na rys.1.4 przedstawiono najważniejsze elementy EKP kriogonicznego. Dwa przewody (lub uzwojenia) umieszczone są wewnątrz nadprzewodzącego ekranu. Wypadkowy strumień magnetyczny odpowiadnjący różnicy natężeń prądów lub sił magnetomotorycznych uzwojeń przenika przez SQUID, sprzężony magnetycznie z układem elektronicznym.

Sygnałem wyjściowym SQUID-u zostosowanego w kriegenicznych MKP jest, podobnie jak w detektorach MKP pracujących w temperaturze pokojowej, spadek napięcia (na złączu Josephsona).

Ze względu na mały błąd oraz dużą rozdzielozość na poziomie ezumów termioznych komparatory te stosuje się między innymi w komparacjach wzoroów siły elektromotorycznej o najwyższej dokładności. 1.2. Parametry metrologiczne MKP

Najważniejszymi parametrami metrologicznymi MKP są: czułość oraz błąd.

Czułość w ogólnym przypadku zdefiniowana jest jako stosunek przyrostu wielkości wyjściowej do przyrostu wielkości wejściowej. Wielkością wejściową dla komparatora jest natężenie prądu, wyjściową – napięcie wyjściowe detektora.

· Stąd czułość prądową opisuje zależność:

$$S_{I} = \frac{\Delta U_{D}}{\Delta I}$$

Tak zdefiniowana czułość nie pozwala na jakościowe porównanie MKP, ponieważ ta sama zmiana natężenia prądu spowoduje różną, w zależności od liczby zwojów uzwojeń porównawczych, zmianę siły magnetomotorycznej; przyjmując, że wielkością wejściową jest zmiana siły magnetomotorycznej jednego z uzwojeń czułość jest równa:

$$S_{KU} = \frac{\Delta U_D}{\Delta \Phi}$$
(1.5)

(1.4)

Analogicznie definiuje się prądową czułość siły magnetomotorycznej MKP.

Błąd MKP jest złożoną funkcją wielkości wpływowych oraz resztkowych. Jego efektem jest różne od zera napięcie wyjściowe detektora $U_{\rm D}$ w przypadku wymuszenia w dwóch uzwojeniach sił magnetomotorycznych o takiej samej wartości, ale przeciwnie skierowanych. Jakościową ocenę MKP umożliwia jego wartość względna, wyznaczona w zależności:

gdzie:

 siła magnetomotoryczna odpowiadająca napięciu błędu,

- siła magnetomotoryczna w uzwojeniach MKP.

Typowe wartości względnego błędu wykonywanych komparatorów są rzędu $10^{-6}...10^{-9}$. Żródła błędu są różne, w zależności od typu komparatora: prądu stałego, zmiennego lub kriogenicznego, stąd też stosuje się różne środki konstrukcyjne oraz odpowiednią technologię mającą zapewnić dostatecznie małą wartość błędu, - omówione między innymi w rozdziałe 4.

1.3. Ilys historyczny rozwoju komparatorów prądów

Przedstawione na rys.1.3 schematy ideowe MKP stałych oraz zmiennych reprezentują współcześnie stosowane konstrukoje - droga do nich nie była jednak prosta.

Protoplastą współczesnych komparatorów jest pierścień Bakera, opisany w 1918 roku w Transactions AIEE, w którym detektorem stanu różnicy sił magnetomotorycznych była wirująca w szczelinie magnetowodu cewka. Dalszym etapem rozwoju jest patent Zwieriny i Zawischy z roku 1939, [62], gdzie autorzy zastosowali jako wskaźnik zera stwierdzający zanik pola magnetycznego w magnetowodzie toroidalnym galwanometr wibracyjny podłączony do uzwojenia nawiniętego na magnetowodzie. 7 1954 roku Rump badał błędy pierścienia różnicowego (Differentialri który z kolei zastosował do wyznaczania błędów przekładników, [77]. Analogiczne badania prowadzili Wan-Dżum-Juan i Dżao-Yyo-Czuan, przedstawiając wyniki na konferencji IMECO w 1961 roku, [91]. W 1962 roku Rump przedstawił w pracy [78] możliwość zastosowania pierścienia różnicowego do pomiarów parametrów wzorców rezystancji, pojemności i indukoyjności.

Decydujące w rozwoju komparatorów okazały się prace prowadzone w NRC (National Reaserch Council) przez Miljanica, Kustersa i Moore^{*}a, publikowane od roku 1962, w którym przeanalizowano podstawowe parametry

- 19 -

komparatorów, przedstawiono tedhnologię oraz opisano układy samowzorcowania: [25], [26], [27], [28], [29], [44], [45], [46], [60], Kusters wraz ze współpracownikami rozwijają konstrukcje oraz technologie komparatorów prądów zmiennych przeznaczonych głównie do wyznaczania błędów przekładników pradowych o nateżeniach pradu strony pierwotnej rzędu kilkudziesięciu kA. [45]. Równolegle prace nad komparatorami prowadzili w PTB (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) Forger i Schlinke. W 1970 roku opublikowali w pracy [8] porównawcze wyniki samowzorcowania wykonanych komparatorów w oryginalnym układzie, opracowanym przez autorów oraz w układzie opracowanym przez Kustersa. Równocześnie trwaja prace nad zastosowaniem komparatorów pradu zmiennego do pomiaru impedancji, zwłaszoza w układach z indukcyjnymi dzielnikami napięcia. Kierunek ten obecnie zamykają prace [67] oraz [83], gdzie autorzy opisują układ pomiaru rezystancji od 10 m Ω do 1 M Ω , charakteryzujący się niedokładnością ± 10⁻⁵ przy częstotliwości 60 Hz oraz praca [4], w której autor prezentuje układ wzorcowania indukcyjności wzajemnej.

Drugim kierunkiem rozwoju komparatorów są MIP prądów stałych. Abraham 1 Heumann w 1959 roku opisali w pracy 1 komparator zawierający wszystkie podstawowe elementy przedstawione na rys.1.2b: detektor strumienia stałego, uzwojenie pierwotne oraz wtórne, rdzenie rozdzielajqoe (Abschirmkerne) oraz zwierane uzwojenia tłumiące. Komparator ten został zastosowany do pomiaru nateżenia pradu stałego do 100 kA z niedokładnością rzędu ± 10⁻⁴. W pracy tej opisano również metodę równonapięciowej komparacji oporników wzorcowych w układzie z magnetycznym komparatorem prądu, nazwaną w późniejszym okresie metodą Kustersa. Kysters rozłożył materiał magnetyczny rdzenia rozdzielającego wokół detektora, ekranując go od pól zakłócających i rozproszeń i otrzymał komparator o znacznie lepszych właściwościach metrologicznych. Dalsze doskonalenie w latach 60 technologii doprovadziło do opracowania opisanego w pracy [36], opublikowanego w 1973 roku, układu służącego do porómnania rezystancji wzoroów o wartościach od 10 Ω do 10 Ω z niedokładnością rzęda ± (10⁻⁶ ... 10⁻⁷).

Odmianą opisanych komparatorów jest komparator samorównoważący się (self-balancing), opracowany przez łetersona w 1966 roku. W pracy [70] przedstawił on analisę teoretyczną, rsalizację oraz zastosowanie takiego komparatora o przekładni i : 1000 i błędzie własnym rzędu 10⁻⁷ w zakresie częstotliwości do 10⁴Hz. Podobny komparator Lentner [40] zastosował w układzie uwierzytlenienia watomierzy do wymuszenia wysokostabilnego prądu zmiennego, płynącego przez cewkę prąłową.

Rozwój kriogeniki umożliwił konstrukoję komparatorów kriogenicznych. W 1962 roku Josephson stwierdził [21], że w nadprzewodzącym pierścieniu zawierającym złącze tunelome płynie prąd, który nazwano prądem krytycznym, nie powodujący spadku napięcia na złączu. Umieszczenie tego pierścienia w polu magnetycznym powoduje zwiększenie prądu oraz pojawienie się spadku napięcia proporcjonalnego do strumienia mignetycznego. Dla strumienia większego od kwantu strumienia oble wieliości oscylują z częstotliwością proporcjonalną do wartości strumienia. Wekt Josephsona wykprzystano przy konstrukcji SQUID-ów prądu stałego oraz prądu zmiennego, stosowanych do badań rozkładu pola magnetycznego, biopola, pomiarów temperatury, napięcia, mocy iti.

Jednym z zastosowań SQUID-ów są kriogeniczne komparatory prątów. Pierwszy komparator wykonany przez Harveya w 1972 roku [14] charakteryzował się błędem mniejszym od 10⁻⁹ oraz względną siłą magnetomotoryczną szumu mniejszą od 10⁻⁹. W komparatorze tym SQUID renguje na prąd płynący w nadprzewodzącym ekranie otaczającym magnetowdów z uzwojeniami pomiarowymi. Inną konstrukcję komparatora, w której SQUID umieszczono w płaszczyźnie uzwojeń tworzących pętlę przedstawili w opublikowanej w 1974 roku pracy [34] Sulivan i Dziuba. Równocześnie inną konstrukcję komparatora kriogenicznego, podobną do klasycznych NEP, przedstawili w pracy [12] Grochman, Hahlbohm i inni. Uzwojenia pierwotne nawinięte na magnetowodzie umieszczonym wewnątrz ekranu, sprzężono ze SQUID-em. Obecnie kriogeniczne komparatory prądów stosowane są w ozoło-

- 21 -

wych laboratoriach (NBS, NRC, NPL)[#] do wzorcowania między innymi dzielników napięcia, również kriogenicznych, przy czym spadek napięcia na jednym z oporników porównuje się z kolei ze wzorcem napięciowym Josephsona.

National Bureau of Standards, National Research Council, National Physical Laboratory.

2. DETEKTORY W MKP

2.1. Detekcia siły magnetomotorycznej w MKP zmiennych

2.1.1. Schemat zastępczy MKP zmiennych

W MKP magnetowód detektora o reluktancji R₁₁ jest otoczony ekranem magnetycznym o reluktancji R₁₁, wykonanym najczęściej z toroidów o odpowiednio dobranych wymiarach, jak to przedstawiono na rys.2.1a.



Rys.2.1. Przekrój poprzeczny komparatora (a), jego schemat zastępczy ze skupioną masą magnetyczną (b) oraz schemat ideowy elektryczny (c)

Na rysunku widoczne są uzwojenia porównawcze o liczbie zwojów N_1 oraz N_2 , uzwojenie detekcyjne - N_D oraz kompensacyjne - N_K . Zastępując ekran magnetyczny jednym magnetowodem (również o reluktancji $\mathcal{R}_{\mu e}$) w sposób przedstawiony na rys.2.1b, otrzymuje się dwa magnetowody z uzwojeniami porównawczymi obejmującymi oba magnetowody o reluktancji wypadkowej opisanej zależnością:

$$\frac{1}{R_{\mu\nu}} = \frac{1}{R_{\mu}} + \frac{1}{R_{\mu e}}$$
(2.1)

W sohemacie zastępczym magnetowodu (z nawiniętymi uzwojeniami) typu T właściwości magnetowodu reprezentuje impedancja gałęzi poprzeoznej (magnesująca), związana z reluktancją magnetowodu zależnością:

- 24 -

$$Z_{\mu} = j\omega N^2 \frac{1}{R_{\mu}}$$
 (2.2)

gdzie: N - liczba zwojów uzwojenia nawiniętego na magnetowodzie.

Z porównania zależności (2.1) oraz (2.2) wynika szeregowe połąozenie impedancji magnesujących reprezentujących magnetowód i ekran magnetyczny – przedstawione schematycznie na rys.2.1c. Prądy I₁ oraz I₂ = I₂n (gdzie n – przekładnia zwojowa) płyną przez obie impedancje – w uzwojeniu detekcyjnym indukuje się napięcie równe spadkowi napięcia spowodowanego przez różnicę prądów na impedancji Z_{μ} . Ze schematu wynika, że dla I₁ – I₂n = 0 – napięcie w uzwojeniu detekcyjnym jest równe zeru.

W przypadku wymuszenia prądów (co ma miejsce w kKP) impedancja $Z_{\mu e}$ nie ma wpływu na spadek napięcia na impedancji magnetowodu Z_{μ} , a tym samym na napięcie indukujące się w uzwojeniu detekoyjnym. Dlatego w dalszej analizie takich właściwości metrologicznych jak czułość i pobudliwość można pominąć ekrany magnetyczne, rozpatrując układ przedtawiony schematycznie na rys.2.2n. Przez dwa uzwojenia porównawcze o liczbie zwojów N₁ oraz N₂ płyną prądy I₁ oraz I₂: różnica sił magnetomotorycznych wywołuje w magnetowodzie strumień przenikający przez uzwojenie detekcyjne. Impedancja Z_{DW} reprezentuje rezystancję uzwojeń detekcyjnych oraz ich indukcyjność rozproszenia. Natomiast impedancja Z_{DZ}-jest wypadkową impedancji wejściowej miernika napięcia oras impedancji doziemnych uzwojenia detekcyjnego.



Rys.2.2. Schematy zastępcze detektora LKP zmiennych: ogólny (a), z uzwojeniem wypadkowym (b)oraz ideo:// magnetyczny (c)

Przyjmując cosinusoidalny przebieg strumienia napięcie pomiędzy końcówkami uzwojenia detekcyjnego jest równe:

$$J_{\rm D} = \mathbf{j} \boldsymbol{\omega} N_{\rm D} \boldsymbol{\psi}_{\rm O} - \mathbf{I}_{\rm D} \mathbf{Z}_{\rm DW}$$
(2.3)

Stosowanie rachunku zespolonego w opisie matematycznym modelu EXP jest uzasadnione, ponieważ punkt pracy komparatora znajduje się w punkcio H = 0, a więc w pierwszym obszarze liniowości charakterystyki B = f(E).

Na rys.2.2b uzwojenia KKP zastąpiono jednym wypadkowym uzwojeniem o liczbie zwojów równej N_o, w którym wymuszona siła magnetomotoryczna jest równa $\bullet_0 = I_1 N_1 - I_2 N_2$. Uwzględniając, że siła magnetomotoryczna uzwojeń detekcyjnych jest $\bullet_D = I_D N_D$, strumień w magnetowodzie o reluktancji R_{μ} wynosi:

$$\Theta_{\rm D} = \frac{U_{\rm D} N_{\rm D}}{Z_{\rm DZ}} = j \frac{\omega \phi_0 N_{\rm D}^2}{Z_{\rm DZ} + Z_{\rm DW}}$$
(2.5)

Po podstawieniu zależności (2.5) do (2.4) i przekształceniach otrzymuje się:

$$\Phi_{0} \mathcal{R}_{\mu} + j \omega \Phi_{0} \frac{N_{D}^{2}}{Z_{DZ} + Z_{DW}} = \Phi_{0} \qquad (2.6)$$

Stąć reluktancja zastępcza dla strumienia wytworzonego przez uzwojenie o liczbie zwojów N_o jest równa:

$$\mathbf{R}_{\mu_{W}} = \frac{\mathbf{\Theta}_{o}}{\mathbf{\Phi}_{o}} = \mathbf{R}_{\mu} + \mathbf{j}\omega \frac{\mathbf{N}_{D}^{2}}{\mathbf{z}_{DZ} + \mathbf{z}_{DW}} = \mathbf{R}_{\mu} + \mathbf{R}_{\mu D} \quad (2.7)$$

Jest ona sumą reluktancji magnetowodu 🔍 1 reluktancji 🔍 д D reprezentującej impedancję gałęzi detektora. Schemat ideowy detektora opisanego za pomocą wielkości magnetycznych przedstawiono na rys.2.2c.

Reluktancja magnetowodu jest wielkością zespoloną i w całym zakresie zmian swojej wartości - nieliniową. Można jednak przyjąć, że w ograniczonych obszarach zmian (dla) = 0) jest to wielkość liniowo [47], co pozwala na zastosowanie prostych metod analizy matematycznej, umożliwiając tym samym przejrzyste wnioskowanie.

Prąd w uzwojeniu detekcyjnym komparatora wyznaczony w zależno--ci (2.3) oraz (2.5) jest równy:

$$\mathbf{I}_{\mathrm{D}} = \frac{\mathbf{U}_{\mathrm{D}}}{\mathbf{Z}_{\mathrm{HZ}}} = \frac{\mathbf{\Phi}_{\mathrm{O}}}{\left[1 - \mathbf{j} \frac{\mathbf{R}_{\mathrm{H}} \left(\mathbf{Z}_{\mathrm{DN}} + \mathbf{Z}_{\mathrm{DZ}}\right)}{\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{D}}^{2}}\right]_{\mathrm{N}_{\mathrm{D}}}$$

(2.8)

.tedy na końcówkach uzwojenia detekoyjnego istnieje napięcie:

Ale

$$U_{\rm D} = \frac{\Theta_0 Z_{\rm DZ}}{\left[1 - j \frac{\Re \mu \left(Z_{\rm DZ} + Z_{\rm DZ}\right)}{\omega N_{\rm D}^2}\right] N_{\rm D}}$$
(2.9)

Jednym z wymagań stawianych wskaźnikom stanu kompensacji jest minimalny pobór energii w stanie nierównowagi układu (w stanie kompensacji przepływ energii przez wskaźnik teoretycznie nie istnieje). Stąd iloczyn Φ_0 powinien dążyć do zera. Zgodnie z zależnością (2.7) $\Phi_0 - 0$, jezeli $\mathfrak{A}_{\mu W} - \infty$. Stąd impedancja gałęzi detektora ($\mathbb{Z}_{DW} + \mathbb{Z}_{DZ}$), jak to wynika z zależności (2.7), powinna dążyć do zera. W drugim przypadku, $\Phi_0 - 0$ (dla $\Phi_0 = \text{const}$), jeżeli $\mathbf{I}_D - 0$. Odpowiada to impedancji gałęzi detektora dążącej do nieskouczoności. Z zależności (2.8) oraz (2.9) można wyznaczyć napięcie i prąd w obu granicznych przypadkach:

- 27 -

$$U_{\rm DO} = \lim_{Z_{\rm DZ}} U_{\rm D} = -j \frac{\omega N_{\rm D}}{2\mu}$$
(2.10)

dla
$$Z_{DW} + Z_{DZ} = 0$$

$$I_{DO} = \lim_{D \to \infty} I_D = \frac{\bullet_0}{N_D}$$
(2.11)
$$Z_{DW} + Z_{DZ} = 0 \qquad N_D$$

W drugim przypadku, w uzwojeniu detekcyjnym płynie prąd wymuszający siłę elektromotoryczną, równą co do wartości Θ_0 , lecz przeciwnie skierowaną:

$$I_{DO}N_D = \Theta_0 = I_1 N_1 - I_2 N_2$$
 (2.12)

Zależność (2.12) uzasadnia drugą, stosowaną dla magnetycznego komparatora prądów nazwę: kompensator siły magnetomotorycznej [81], ponieważ $\Theta_{\rm D}$ jest równe zeru w przypadku kompensacji sił magnetomotoryoznych uzwojeń porównawczych o liczbach zwojów N₁ oraz N₂. Jednak stanu pracy MKP, w którym (Z_{DW} + Z_{DZ}) = 0 nie można zrealizować: detektor zawsze ma skończoną wartość impedancji. Również nie można zrealizować stanu pracy opisanego zależnością (2.10) ze względu na obciążenia wewnętrzne przeanalizowane w dalszej części pracy.

2.1.2. Czułości detektora siły magnetomotorycznej

W pracach [41], [52] i innych analizowano czułość detektora w MKP zmiennych, przyjmując, że wielkością wyjściową jest napięcie U_D, przy czym impedanoja obolążenia $Z_D - -$. Jak wykazano, jest to przypadek skrajny, analizując czułość należy uwzględnić skończoną wartość impedanoji detektora Z_D . Wtedy wielkością wyjściową jest napięcie U_D lub prąd I_D płynący przez impedancję detektora. Stąd detektor ten chąrakteryzują dwie czułości: napięciowa S_{KU} oraz prądowa S_{KI}. Zgodnie z definicją opisaną zależnością (1.5) po uwzględnieniu (2.8) oraz (2.9) są one równe:

$$S_{RU} = \frac{Z_{DZ}}{\left[1 - j \frac{R_{\mu}(Z_{DW} + Z_{DZ})}{\omega N_{D}^{2}}\right] N_{D}}$$
 (2.13)

$$S_{\rm EI} = \frac{1}{\left[1 - j - \frac{R_{\mu} \left(Z_{\rm DW} + Z_{\rm DZ}\right)}{\omega N_{\rm D}^2}\right] N_{\rm D}}$$
(2.14)

Dla granicznych wartości impedancji gałęzi detektora,dla:

$$z_{DZ} \longrightarrow S_{KU_0} = j \frac{\omega N_D}{R_{\mu}}$$
 (2.15)

dla:

$$z_{DW} + z_{DZ} = 0$$
 $s_{KI0} = -\frac{1}{N_{D}}$ (2.16)

2.1.3. Wpływ parametrów uzwojenia detekoyjnego na czułość

Z zależności (2.13) oraz (2.14) wynika, że czułość jest funkcją reluktancji \mathbf{x}_{μ} , impedancji gałęzi detektora ($\mathbf{Z}_{D_{\mu}^{\nu}} + \mathbf{Z}_{D_{\mu}^{\nu}}$) oraz liczby zwojów N_D. Reluktancja \mathbf{x}_{μ} jest wielkością zespoloną [47]:

$$\mathbf{R}_{\mu} = \frac{1}{(2.17)}$$

gdzie: 1. s - ⁱdługość i pole przekroju poprzecznego magnetowodu, μ' , μ'' - składowe zespolone przenikalności magnetycznej.

Impedancje Z_{DW} oraz Z_{DZ} opisują w sposób ogólny parametry uzwojenia detekcyjnego, przedstawionego na rys.2.3.



Rys.2.3. Schemat ideowy gałęzi detektora MKP zmiennych

Na rysunku tym impedancja Z_{DII} reprezentuje rezystancję uzwojenia detekcyjnego R_{DII} oraz indukcyjność rozproszenia L_{DII}. Stąd

$$Z_{DW} = R_{DW} + j\omega L_{DW} \qquad (2.16)$$

Impedancja Z_{DZ} reprezentuje **impedancję** wejściową detektora (woltomierza), impedancję obciążenia wewnętrznego, reprezentującą pojemność doziemną C., oraz konduktancję doziemną G_W. Stad:

$$Z_{DZ} = \frac{1}{G'_D + G_W + j\omega(C'_D + C_W)}$$
(2.19)

Z analizy zalezności (2.13) oraz (2.14) wynika, że czułości osiągną wartość maksymalną, jeżeli mianowniki w tych zależnościach będą w przybliżeniu równe zeru:

} lo podstawicniu (2.17), (2.18), (2.19) do (2.20), przekształceniach i rozdzieleniu części rzeczywistej i urojonej równanie (2.20) przyjmuje postac:

$$\frac{-s}{1} \frac{\mu_{0} \mu'}{1} \omega N_{D}^{2} \left[G_{W} + G_{D}' + \omega (G_{W} + C_{D}') \right] +$$

$$+ \omega \left[L_{DW} \left(G_{W} + G_{D}' \right) + R_{DW} \left(C_{W} + C_{D}' \right) \right] = 0 \qquad (2.21)$$

$$\left(G_{W} + G_{D}' \right) \left(\omega N_{D}^{2} s \mu_{0} \mu' + H R_{DW} \right) -$$

$$- \left(C_{W} + C_{D}' \right) \left(\omega^{2} N_{D}^{2} s \mu_{0} \mu' + \omega^{2} 1 L_{DW} \right) + 1 = 0$$

$$(2.22)$$

are and the sparaulab leading provide Amountable of the sec-

Zależność (2.21) dla $\omega \neq 0$ nie może być spełniona: należy dążyć do tego aby wartość wyrażenia (2.21) była jak najmniejsza. Natomiast zależność (2.22) może być spełniona. W praktyce istnieje możliwość doboru takiej pojemności C_n, aby wartość lewej strony tej zależności była równa zeru:

$$C_{\text{Dopt}} = \frac{1 + (G_{W} + G_{D}) (\omega N_{D}^{2} - \frac{s \mu_{0} \mu''}{1} + R_{D_{W}^{2}})}{\omega^{2} (N_{D}^{2} - \frac{s \mu_{0} \mu}{1} + L_{D_{W}^{2}})} - C_{W} \qquad (2.23)$$

Na podstawie przeprowadzonej analizy można graficznie przedstawić przebieg zmian czułości napięciowej i prądowej, przyjmując że $R_{DW} = \frac{1}{G_W} = \frac{1}{G_D} = 0.$

Charakterystyki te przedstawiono na rys.2.4, przy czym na osi odciętych zaznaczono Im $\begin{bmatrix} Z_{DZ} \end{bmatrix}$.



Rys.2.4. Charakterystyki czułości detektora MKP zmiennych

Jeżeli punkt pracy detektora znajduje się po lewej stronie wierzchołka charakterystyki, dołączenie do kolcówek uzwejenia detekcyjnego odpowiedniej pojemności spowoduje przesunięcie punktu pracy do punktu maksimum oharakterystyki. Oczywiście, w przypadku dużej pojemności C_W (punkt pracy po prawej stronie wierzohołka oharakterystyki) dołączanie jakiejkolwiek pojemności spowoduje zmniejszenie napięcia i tym samym ozułości detektora.

Wartości maksymalne ozułości można wyznaczyć z modułu zależności (2.13) oraz (2.14).

W pracy [39] przytoczono eksperymentalne zależności czułości detektora strumienia o następujących danych:

pole przekroju poprzecznego s = 4.10^{-4} m², średnia długość drogi strumienia: l = 33 om, moduł względnej początkowej przenikalności mngnetycznej: $|\mathcal{M}_p| = 42 \quad 10^3$ liczba zwojów uzwojenia detekcyjnego N_D = 1400, średnica przewodu uzwojenia detekcyjnego d_p = 0,1 mm, dla Im $[Z_{DZ}] = 110$ kQ S_{KUmax} $\cong 51$ V/A dla Im $[Z_{DZ}] \gg 110$ kQ S_{KU} $\equiv 11$ V/A

2.1.4. Błąd pobudliwości MKP zmiennych

W MKP błąd pobudliwości powiniem być mniejszy od błędu komparatora, którego wartość jest rzędu $10^{-6}...10^{-8}$. Błąd pobudliwości rozumiany jest zgodnie z normą [63] jako najmniejsza zmiana wielkości wejściowej, dająoa zauważalną zmianę wielkości wyjściowej. Jako wielkość wejściową przyjęto siłę magnetomotoryczną \bullet_0 , natomiast wielkością wyjściową jest z reguły napięcie na koścówkach uzwojenia detekcyjnego U_D. Napięcie to można mierzyć woltomierzami o wystarozająco małej rozdzielczości. Pomiar napięcia nie jest zatem ozynnikiem ograniczającym pobudliwość. Ograniczeniem są zakłócenia zewnętrzne przenoszone przez MKP od strony zasilania oraz szumy magnetyczne. Prądy wpływające do uzwojeń zawierają wyższe harmoniczne o różnych wartościach, dające siły magnetomotoryczne nie kompensujące się wtedy, gdy różnica sił magnetomotorycznych podstawowej harmoniczne; jest równa zeru. Wpływ wyższych harmonicznych można wyeliminować, mierząc napięcie U_D za pomocą woltomierza selektywnego. Innym sposobem eliminacji wyższych harmonicznych jest ich zwarcie poprzez filtr selektywny o module transmitancji równym i dla wszystkich częstotliwości z wyłączeniem f, w sposób przedstawiony na rys.2.5.



Napięcie indukujące się w uzwojeniu detekcyjnym posiada tylko podstawową harmoniczną, W stanie kompensacji sił magnetomotorycznych na komcówkach uzwojenia detekcyjnego pozostanie tylko napięcie spowodowane szumami w paśmie częstotliwości w otoczeniu f_o. Szumy poza pasmem przenoszenia

Rys.2.5. Ilustracje sposobu eliminacji wyższych harmonicznych w detektorze stramienia MKP zmiennych

filtru w przedstawionym rozwiązaniu zostają stłumione.

Innym czynnikiem ograniczającym pobudliwość są zewnętrzne zakłócenia elektromagnetyczne. Ich efektem są napięcia indukujące się w każdym elemencię układu pomiarowego, zwłaszcza w doprowadzeniach. Dlatego realizacja układów pomiarowych z MKP wymaga szczególnego dopracowania układów pod względem ich ekranowania oraz uziemici.

2.2. Detekcja siły magnetomotorycznej w MKP stałych

2.2.1. Zasada działania detektora

W MMP stałych detektorem jest dwurdzeniowy przetwornik siły magnetomotorycznej, stałej w czasie na napięcie przemienne, zrealizowany wg schematów przedstawionych na rys.2.6.



Rys.2.6. Schematy detektorów MRP stałych: prosty (a), mostkowy (b)

Na rysunku przedstawiono schematy dwóch najczęściej spotykanych realizacji przetworników. Charakteryzują się one przeciwsobnym połączeniem uzwojen wzbudzających, o liczbie zwojów N. W przypadku braku siły magnetomotorycznej 🔍 statyczne punkty pracy obu magnetowodów znajdują się w początku charakterystyki magnesowania B = f(H). Wtedy, zakładając ijentyczność charakterystyk magnesowania obu magnetowodów oraz parametrów uzwojeń, spadki napięcia U, oraz U2 są sobie równe. Tym samym strumicnie magnetyczne w obu magnetowodach są takie same: strumienie te indukują w uzwojeniach detekoyjnych N_D napięcie U oraz U₂ również o równych wartościach. W przypadku układu prostego w wyniku odliennego, w porównaniu z uzwojeniami wzbudzającymi połączenia, napięcia 🐛 oraz U. odejmują się – stąd napięcie wyjsciowe U. jest rowne zeru. Jla układu mostkowego prądy płynące przez detektor pod wpływem napięć U, oraz U, kompensują się dając zerowe wskazanie detektora. Jeżeli siła : gnetomotoryczna 🔹 będzie różna od zera, statyczne punkty pracy magnetowodow, patrząć od strony uzwojeń uzbudzających, przesuną się na charakterystyce ca nesovania o (+ii) oraz (-ii). Žródło zasilania U.,

jest wówczas podłączone do dwóch różnych, szeregowo połączonych impedancji – stąd ten zam prąd płynący przez oba uzwojenia wzbudzające wywołuje różne strumienie w obu magnetowodach, powodując indukowanie się różnych napięć w uzwojeniach detekcyjnych. Różnica napięć U₁ oraz U₂ w układzie prostym oraz prądów płynących pod wpływem tych napięć w układzie mostkowym zamiera parzyste harmoniczne częstotliwości wzbudzającej.

W literaturze [9], [16], [37], [38], [50], [64], [66], [67], [76] i innej, konstrukcja tych przetworników (tzw. modulatorów parzystych harmonicznych) oraz ich zastosowanie są szeroko opisane. Dlatego omówione zostaną jedynie ich właściwości istotne dla metrologicznych wyczącu dotyczących konstrukcji i technologii KKP stałych.

Z punktu widzenia metrologii układy przedstawione schematycznie na ryz.2.6 są przetwornikami parametrycznymi o zmieniającej się, pod wpływem natęzenia pola magnetycznego, przenikalnowci magnetycznej. Pomiędzy natężeniem pola magnetycznego w toroidzie a siłą magnetomotoryczną • istnieje prosta proporcjonalność. Dlatego można przyjąć, że wielkością wejściową dla tego detektora jest siła magnetomotoryczna

2.2.2. Parametry metrologiozne detektora

Wielkością wyjściową detektora jest napięcie U_D zawierające szereg napięć parzystych harmonicznych częstotliwości fali wzbudzającej. Wykorzystując z tego szeregu jedną harmoniczną, poprzez ograniczenie pozostałych harmonicznych w filtrze pasmowo przepustowym, ogranicza się zakłócenia i szumy na wyjściu detektora. Ze względu na znacznie większą wartość napięcia drugiej harmonicznej od wartości napięć pozostałych harmonicznych celowe jest przyjęcie $U_D = U_{2h}$. Stad, zgodnie z zależnością (1.5), czułość napięciowa detektora siły magnetomotorycznej stałej w czasie:

$$S_{KU} = \frac{\Delta U_{2h}}{\Delta \Phi} = \frac{1}{1} \frac{\Delta U_{2h}}{\Delta U} = \frac{S_{H}}{1}$$
 (2.24)

gúzie: 1 - średnia droga magnetyczna,

gdzie:

H - natężenie pola magnetycznego odpowiadające sile magnetomotorycznej @

wielkość $\Delta U_{2h}/\Delta H = S_H$ w teorii modulatorów parzystych harmonicznych zdefiniowano jako czułość modulatorów oraz wyznaczono ją w sposób analityczny między innymi w pracach [37], [38], i innych:

 $S_{Hmax} = 16 f N_D = \mu_0 \mu$, (2.25)

N_D - liczba zwojów uzwojenia detekoyjnego,

s - pole przekroju poprzecznego magnetowodu,

f - częstotliwość fali wzbudzającej.

Stąd czułość napięciowa detektora ziły magnetomotoryoznej jest równa:

$$S_{KUmax} = \frac{16}{1} f N_D = \mu_0 \mu$$
 (2.26)

Dla układu mostkowego, przedstawionego na rys.2.6b czułość jest dwukrotnie mniejsza:

$$S'_{KUmax} = \frac{B}{1} I N_{D} B \mu_{0} \mu$$
 (2.27)

Zależność (2.26) opisuje czułość maksymalną, wyznaozoną dla stanu, gdy prąd płynący w uzwojeniach wzbudzających wymusza natężenia pola w magnetowodzie R_i, równe natężeniu nasycenia H_{nas}.

Zależność względnej czułości (S_H/S_{Hmax}) została między innymi przebadana w pracy [2] – w sposób graficzny przedstawiono ją na rys.2.7. Należy zauważyć, że w większości opracowań – [37], [43], [66] 1 in. autorzy wyprowadzają zależności opisujące czułość, aproksymując charakterystykę magnesowania trzema odcinkami, nie uwzględniając nieliniowości charakterystyki w otoczeniu punktu H $^{\circ}$ 0. W zwiąsku z tym dla wszystkich H_w < H_{nas} oraz dla Θ_0 = 0 wyznaczona analitycznie czułość
jest równa seru.



Rys.2.7 przedstawia charakterystykę rzeczywistego detektora, w którym istotną rolę odgrywają zakrzywienia początkowych części charakterystyki magnesowania. Zależność przedstawiona na rys.2.7 jest jednym z kryteriów doboru parametrów zasilania uzwojeń wzbudzających.

Rys.2.7. Charakterystyka czułości w funkcji natężenia pola wzbudzającego

Uzwojenia wzbudzające można zasilać ze źródła napięcia sinusoidalnego lub prądu sinusoidalnego - właściwości metrologiczne w obu przypadkach są zbliżone. W pracy [66] wykazano, że najlepsze właściwości ma detektor zasilany napięciem prostokątnym, przy czym wyniki analizy są zbliżone do wyników analizy zasilania sinusoidalnego.

W rzeczywistym detektorze ujawnia się wpływ nieliniowości charakterystyk w obszarze małych natężeń pola oraz w obszarze przechodzenia charakterystyki magnesowania w stan nasycenia.

Zależność U_{2h} = $f(\Theta)$, przedstawiona na rys.2.6a linią ciągłą, jest typowym przykładem charakterystyki detektora - w tym przypadku o schemacie i danych przedstawionych na rys.2.8b.

- 37 -



kys.2.5. Zmležnošć napitola wyjšolowego detektora w lunkcji siły magnetomotoryczacj a oraz jego schemat ideowy b

Cechami charakterystycznymi tej zależności; są przesunięcie minimum względem osi napięcia oraz istnienie pewnego napięcia dla • F 0. Napięcie to, nazwane napięciem asymetrii [49], jest wynikiem nieldentyczności właściwości obu magnetowodów oraz ich uzwojek i jest cechą każdego realnego detektora. Składa się ono z szeregu napięć o częstotliwościach równych wszystkim harmonicznym uzględem częstotliwości zasilania uzbudzenia.

Ogranicza ono pobudliwość detektora: mało przyrosty siły marnetomotoryoznej mogą dać niezwuważalne, w porównaniu z napięciem asymetrii, zmiany napięcia wyjściowego. Przesunięcie minimum charakterystyki jost powodem niejednoznaczności charakterystyki w obszarze małych zmian siły marnetomotorycznej, np. dla wzrastającej wartości bezwzględnej [- •] napięcie początkowo małoje a następnie rośnie.

a sietektorneh sil magnetomotoryoznych istotnym problemem jest pamiyé magnetyozna. Efekt pamiyei polega na przesuniyeiu minisum charakterystyki po jednokierunkowym przemagnesowaniu silnym polem magnetycznym magnetowodów. Ujawnia się on w zmianie wartości napięcia asymetrii po usunięciu pola ; rzemagnesowującego. Zmiana napięcia jest zależna od właściwości magnetowodów, natężenia pola przemagnesowującego jednokierunkowo "magnetowód, częstotliwości i natężenia poła wzbudzającego. Przykładowe charakterystyki zmian napięcia dla detektora o schemacie i danych przedstawionych na rys.2.6b, w funkcji stożunku natężenia pola wzbudzającego do natężenia nasycenia przedstawiono na rys.2.9, przy czym wymuszona w uzwojeniu siła magnetomotoryczna była równa 1 A.



Rys.2.9. Ilustracja efektu pamięci magnetycznej detektora siły magnetomotorycznej

Wyniki odczytywano natychaiast po wyłączeniu płynącego prądu przez uzwojenie. Po pewnym czasie napięcie wyjściowe detektora malało do napięcia w przybliżeniu równego napięciu naymetrii, przy czym czas powrotu napięcia dla np.H $_{\rm W}$ H_{nis} = 1 był rzędu kilkudziesięciu sekund, a dla H $_{\rm W}$ H_{nas} = 0,8 - rzędu minut. Cechą charakterystyczną detektora

- 39 -

jest prawie oałkowity zanik efektu pamięci dla $H_w/H_{mas} > 1,1...1,4$, w sależności od częstotliwości wzbudzania detektora. Wtedy napięcie wyjściowe detektora jest w przybliżeniu równe napięciu asymetrii. Efekt pamięci powoduje przesunięcie obarakterystyki napięcia wyjściowego w funkcji siły magnetomotorycznej - $U_{2h} = f(\bullet)$. Przykładowe przesunięcie tej obarakterystyki dla detektora poddanego działaniu podmagnesowującego pola stałego przedstawiono na rys.2.8a linią przerywaną. Przesunięcie charakterystyki decyduje o rozdzielozości MKP. Rozdzielczość komparatora powinna być większa od maksymalnego przesunięcia minimum charakterystyki spowodowanego efektem pamięci magnetycznej.

2.2.3. Warunki realizaoji detektora

W oparciu o przedstawione charakterystyki można określić warunki konstrukcji detektora siły magnetomotorycznej w MKP stałych. Dotyczą one doboru parametrów obwodu wzbudzenia oraz minimalizacji napięcia asymetrii. Głównym wymaganiem stawianym wzbudzeniu magnetowodów jest to, aby natężenie pola magnetycznego wzbudzenia H_w było równe ok. (1,2...1,4) H_{nas} . Wtedy z jednej strony prawie całkowicie zanika efekt pamięci magnetycznej, z drugiej – nieznacznie zmniejsza się czułość (zgodnie z oharakterystyką przedstawioną na rys.2.7). Liczba zwojów uzwojenia wzbudzającego N_w odgrywa drugorzędną rolę: istotne jest, aby siła magnetomotoryczna tych uzwojeń wprowadzała magnetowody w stan nasycenia.

Drugim warunkiem prawidłowego działania detektora jest możliwie najmniejsze napięcie asymetrii. Minimalizacji napięcia asymetrii dokonuje się w kilku etapach. Pierwszym etapem jest dobór magnetowodów ze względu na zbliżone charakterystyki magnesowania. Przeciętnie, z ok.20 magnetowodów permalojowych (PSO) produkcji krajowej można wybrać 2-4 pary magnetowodów o zbliżonych charakterystykach magnesowania. Z kolei, po umieszczeniu magnetowodów w karkasach, nawinięciu uzwojeń detekcyjnych i wzbudzających oraz po odpowiednim połączeniu końcówek uzwojeń dobiera się pary ze względu na najmniejszą wartość napięcia asymetrii. Na tym etapie dopasowuje się zasilanie do detektora, dobierając amplitudę napięcia zasilania powodującą zanik efektu pamięci, przy możliwie najmniejszej wartości U_{as} . Warunki te spełniają jedna lub dwie pary magnetowodów, dla których przesunięcie charakterystyki $U_{Ch} = f(9)$, przedstawione na rys.2.8a, jest niezauważalne. Z kolei należy wyeliminować niejedmoznaczność tej charakterystyki w otoczeniu H = 0, a więc spowodować przesunięcie minimum do punktu H = 0. Majłatwiej można zrealizować w układzie mostkowym, wprowadzając asymetrię obciążenia za pomocą potencjometru P oraz kondensatora C, połączonych w sposób przedstawiony na rys.2.10. Innym sposobem przesunięcia charakterystyki jest podmagnesowanie jednego z magnetowodów polem stałym. Kieranek tego pola oraz jego wartość wyznacza się eksperymentalnie.



Rys.2.10. Schemat blokowy elektronicznego układu detektora MKP stałych

- 41 -

Na rys.2.10 przedstawiono schemat blokowy układu elektronicznego, w którym wyeliminowano wpływ napięcia asymetrii oraz dzięki zastosowaniu detekcji fazoczułej otrzymano możliwość rozróznienia znaku siły magnetomotorycznej Θ_0 . Uzwojenia wzbudzające zasilano z generatora fali prostokątnej o ozęstotliwości podstawowej harmonicznej f_0 , synchronizowanego dodatnimi impulsami z wyjścia przerzutnika P.

Przerzutnik zmienia swój stan pod wpływem irpulsów uniwibratora U o częstotliwości $2f_0$. Napięcie wyjściowe U_D poprzez wzmacniacz oraz filtr, a częstotliwości przepuszczenia równej $2f_0$, doprowadzone jest do detektora fazoczułego, sterowanego napięciem wyjściowym przerzutnika P. Jeżeli siła magnetomotoryczna o zmienia kierunek, zmienia się również o kąt % faza napięcia drugiej harmonicznej. Stąd napięcie wyjściowe detektora fazoczułego zmienia swój znak - dla $\Theta = 0$ napięcie odpowiada napięciu asymetrii. Jednak napięcie to można w łatwy sposób skompensować, doprowadzająto do wzmacniacza, w którym za pomocą potencjometru P1 eliminuje się składową stałą napięcia wyjściowego. Charakterystykę detektora wraz z układem elektroniczuym przedstawiono na rys.2.11. Realizacja detektora o takiej charakterystyce umożliwia



automatyczne sterowanie np. źródła jednego z prądów płynących przez uzwojenie MKP stałych.

Rys.2.11. Charakterystyka detektora MKP stałych wraz z układem elektronicznym

- 42 -

2.3. Detekoja siły magnetomotorycznej w MKP kriogenicznych

2.3.1. Efekt Josephsona

Klasyczne złącze Josephsona [21] przedstawione w sposób schematyczny na rys.2.12 składa się z dwóch nadprzewodzących powierzchni



rozdzielonych cienką warstwą izolacyjną. Złącze takie posiada historezową obarakterystykę I = f(U).





b.

Booznikując je rozystancją otrzymuje się charakterystykę bezhistorezową, przedstawioną na rys.2.13.

Rys.2.13. Symbol złącza bocznikowanego rezystancją (a) oraz jego charakterystyka (b)

α.

gdzie:

Pok = 2 · 10⁻¹⁵ Wb - kwant strumienia.

(2.28)

Jezeli przez złącze przepływa prąd większy od I_c, np. spowodowany strumieniem przenikającym przez obwód złącza, to wówozas na złączu pojawia się spadek napięcia, a prąd oscyluje z częstotliwością:

$$f = \frac{2e}{h} \quad U = \frac{U}{\Phi_{ok}}$$
(2.29)

Złącze Josephsona zostało wykorzystane do wykonania SQUID-ów prądu stałego [50]. Taki SQUID tworzę dwa złącza połączone w pierścień , spolaryzowane prądem stałym: wtedy prąd płynący przez obwód ze złączami (pierścień) oraz spadek napięcia na złączach jest oscylującą funkcją strumienia magnetycznego przenikającego pierścien – , przy czym okres określa kwant strumienia Φ_{ok} . SQUID-y te stanowiły pierwszą generaoję, charakteryzującą się gorszą od współczesnych czułością i dużymi szumami.

W MKP kriogenicznych stosowane są SQUID-y prądu zmiennego, składające się z jednego złącza Josephsona zbocznikowanego rezystancją i pojemnością, reagujące na strumień S_z pola stacjonarnego lub quasistacjonarnego.

2.3.2. SQUID w MKP kriogenioznym.

Symbol SQUID-u przedstawia rys.2.14, gdzie L_j jest indukcyjnością własną pierścienia o wartości rzędu 10⁻⁹ H. Krytyczny prąd złącza I_c jest w przybliżeniu równy Φ_{ok}/L_j . Prąd płynący przez złącze, w przypadku pojawienia się strumienia 🤌 przenikającego przez złącze, jest rowny [50] :

Rys.2.14. Symbol SQUID-u prom

zmiennego

$$I_s = I_0 \sin \frac{2\pi \phi}{\Phi_z}$$
 (2.20)

gdzie:

- calkowity strumień pierścienia
- calkowity strumień pierścienia

 $\phi = \phi_z - L_1 I_s \tag{2.31}$

Zaleznose (2.01) przedstawiono graficznie na rys.2.15.



Пув.2.15. Zzleznose ∮ = 1(♦,)

wzrasta np. od zera, to wypadkowy strumiem nie wzrasta o tę somą wertość, ponieważ wzrasta prad I_s, kompensujący strumiem §., Jeżeli prad I_s zrówna się z prądem I_c, następuje skokowa zmiana strumienia

Ježeli strusien

przechodzącego re stanu kwantowego rownego zeru do stanu kwantowego równego jeden. Analogi= ozny skok stracienia wy= stąpi przy dalszya wzw= ście Ø., skokowej zatonia

- 45 -

strumienia towarzyszy zmiana energii, w przybliżeniu równa $\frac{1}{2}$, I_{c} : zmiane te można wykryć w układzie przedstawionym na rys.2.16a.



Rys.2.16. SQUID i oewka sprzęgająca (a) oraz charakterystyka napięcia U_{T} od prądu I_{w.cz.} (b)

SQUID jest sprzężony magnetycznie z cewką o parametrach L_T, C_T, R_T i o częstotliwości rezonansowej fr. Jeżeli do cewki zostanie doprowadzony prąd I_{w.cz} o częstotliwości równej częstotliwości rezonansowej cewki rzędu 30 kHz i o takiej wartości, że strumien związany z tym prądem nie przekracza strumienia Φ_{Zc} zaznaczonego na rys.2.15, to wtedy przez SQUID nie jest pobierana energia, a napięcie na cewce jest liniową funkcją prądu I_{w.cz}, jak to przedstawiono na rys.2.16b. Zmiana napięcia w obszarze liniowości jest równa:

 $\Delta U_0 = Q_T I_{skok} \ \omega \ L_T \qquad (2.32)$

gdzie:

Przy dalszym wzroście prądu następuje pobór energii przez SQUID, odpowiadający zmianie prądu:

$$I_{krok} = 2 I_0 M_T / I_T \qquad (2.33)$$

gdzie:

M_T - indukoyjność wzajemna pierścienia i cewki

Analogiozny efekt otrzymuje się przy zmianie strumienia \clubsuit_z . Zmiana energii przy pojedyńczym skoku jest mała i praktycznie nie nożna jej wyróżnić z szumu termicznego, ale ujawnia się ona wrzy cyklicznym przemagnesowaniu pierścienia. Dlatego wprowadza się dodatkowe pole modulujące o częstotliwosci 100 kHz. Amplituda tego sygnału tworzy obwiednię napięcia na obwodzie rezonansowym o częstotliwości 30 MJz. Pobór energii przez SQUID powoduje zmniejszenie napięcia na obwodzie rezonansowym na czas wielu okresów napięcia o częstotliwości 30 MJz.

2.3.3. Układ elektroniczny detektora

Schemat blokowy typowego układu elektronicznego współpracującego ze SGUD-em [00] przedstawia rys.2.17.



Rys.2.17. Schemat blokowy układu elektronicznego SQUID-u

- 47 -

Układ ten ma zapewnić polozenie punktu przey SQUID-u, niezależnie od wartości strumienia (, na pierwszym odcinku proporcjonalności charakterystyki U_T = f (I_{w.cz}). Realizację tego warunku spełnia układ sprzężenia zwrotnego.

Sygnał napięciowy na cewce składa się z napięcia . częstotliwości 20 kHz, napięcia modulującego, najczęściej o częstotliwosci 100 kHz i spadku napięcia spowodowanego prądem sprzężenia zwrotnego. Sygnał ten po ograniczeniu wysokich częstotliwości w układzie całkującym w.cz. zawiera tylko czestotliwość 100 kHz oraz jej parzyste harmoniczne. Ich amplitudy zmieniają się proporcjonalnie do wartości ϕ_z . Po dalszym przetworzeniu w prostowniku fazoczułym oraz we wzmaeniaczu pradu stałego prąd wyjsciowy wzmaeniacza wymusza strumień kompensujący strumień ϕ_z tak, aby ich różnicz była mniejsza od ϕ_{Ze} . Sygnałem wyjsciowym jest spadek napięcia U_D na rezystancji R_g, proporcjonalny do prądu sprzężenia zwrotnego, a więc do strumienia kompensującego strumien ϕ_z .

- 45 -

3. MAGNETOWODY I EKRANY MAGNETYCZNE

3.1. Magnetowody

3.1.1. Technologia magnetowodów

Magnetowody w MKP powinny się charakteryzować możliwie jak największą wartością modułu zespolonej przenikalności magnetycznej - jest to wymóg decydujący. Uzasadnieniem jego jest analog elektro-magnetyozny podstawowego obwodu. W przypadku obwodu elektrycznego, opisanego prawem Ohma, odstęp rzędów wartości pomiędzy konduktaneją przewodnika i powietrza jest równy 10¹⁵ - 10¹⁸. Natomiast dla najprostszego obwodu magnetycznego odstęp rzędów wartości permeaneji magnetowodu i powietrza jest w najlepszym przypadku równy 10⁵....10⁶. Stęd w większości sytuacji pomiarowych prądy upływnościowe w obwodzie elektrycznym nie odgrywają istotnej roli, natomiast strumienie rozproszenia (odpowiednik prądów upływnościowych) w narzędziach pomiarowych odgrywają decydującą rolę - są źródłem błędu.

Wymóg jak największej wartości $|\mu|$ spełnia grupa materiałów magnetycznych, wykonanych ze stopu żelaza, niklu oraz dodatków, nazwana permalojami. Bardzo dobrymi właściwościami magnetycznymi charakteryzują się permaloje o zawartości (77 - 80) % niklu. Posiadają one wąską pętlę historezy oraz $|\mu| = (1...6) 10^5$ i $|\mu_p| = (3...10) 10^4$. W przypadku MKP ze względu na punkt pracy najistotniejszą rolę odgrywa moduł zespolonej przenikalności początkowej: pole pętli historezy nie ma istotnego znaczenia, ponieważ w stanie kompensacji sił magnetomorycznych strumień w magnetowodzie jest równy zeru. Magnetowód taki jest wykonany z cienko rozwalcowanej taśmy permalojowej zwiniętej w toroid.

Grubość taśmy (typowa 0,05 lub 0,1 mm) ma wpływ na wypadkowy strumień w magnetowodzie i tym samym na $|\mu|$ - od niej zależą prądy mirowe indukujące się w magnetowodzie i osłabiające strumień. Taśma pokryta jest jednostronnie tlenkami tworzącymi izolację elektryczną dla prądów wirowych. Po zwinięciu taśmy w toroid jest on poddany dalszej obróbce termicznej.

Z kolei magnetowód należy umieścić w karkasie przejmującym nacisk uzwojenia. Karkas może być wykonany z materiału izolacyjnego np. tekstolitu lub |bakelitu albo z aluminium. W tym ostatnim przypadku należy wykonać w ekranie szozelinę zapobiegającą tworzeniu się zwoju zwartego. Nawinięcie uzwojenia bezpośrednio na magnetowodzie powoduje, wskutek efektu magnetostrykoji, zgniejszenie modużu przenikalności magnetycznej o ok. (10...15)%.

Również próby zalewania magnetowodu np. epidianem dały podobne wyniki; tym razem wskutek dużej ściśliwości epidianu w procesie utwardzania.

Należy podkreślić, że technologia wykonania magnetowodu jest ozynnikiem decy njącym o jakości magnetowodu. Z bardzo dobrego permaloju można wykonać przeciętny magnetowód i odwrotnie, z przeciętnego permaloju - dobry magnetowód. Tym samym nie można odnosić wartości modułu przenikalności materiału magnetycznego do magnetowodu i odwrotnie. Zmierzona przenikalność charakteryzuje konkretny magnetowód a nie materiał.

3.1.2. Parametry opisuiace magnetowód

W przypadku magnetowodów permalojowych, już przy częstotliwości rzędu kilkudziesięciu Hz, w dużym zakresie zmian indukcji, zarówno siła magnetomotoryczna (proporcjonalna do natężenia prądu) jak i strumień (proporcjonalny do napięcia) są w przybliżeniu sinusoidalne. Współczynnik zawartości harmonicznych w prądzie przy wymuszeniu napięciowym dla B 2 0.5 B_{nas} omaz f = 100 Hz dla typowego magnetowodu jest rzędu 10^{-2} . Pętla histerczy magnetycznej jest w przybliżeniu elipsą, która dla B >0.8 B_{nas} odkształca się przyjmując znany kształt. Stąd dla dużego zakresu zmian indukcji można jednoznacznie określić zespoloną przenikalność magnetyczną. Przykładową zależność modułu zespolonej przeni-

- 50 -

ralności magnetycznej oraz jej argumentu w funkcji indukcji B dla permaloju P80 przedstawiono na rys.3.1.



Rys.3.1. Typowa zależność modułu oraz argumentu zespolonej przenikalności magnetycznej w funkcji indukcji dla P60

W pracy [47] wykazano, że składowe zespolonej przenikalności są proporcjonalne do składowych impedancji z₁₁, dla szeregowego połączenia elementów R_{Fe} oraz z₁₁ gałęzi poprzecznej schematu zastypczego typu T.

$$Z_{\mu} = R_{p_{0}} + jX_{\mu} = j\omega N^{2}A = j\omega N^{2}\mu_{0} \cdot \frac{s}{1}(\mu' - j\mu') \quad (3.1)$$

gdzie:

N - liczba zwojów uzwojenia,

A - permeancja magnetowodu,

- s pole przekroju poprzecznego magnetowodu,
- 1 dlugość drogi strumienia,

μ', μ' - składowe zespolonej przenikalności magnetycznej.

3.1.3. Niejedporodność permeancji magnetowodu

Warunki technologiczne nie zapewniają identycznych właściwości magnetowodu w każdym punkcie drogi strumienia: zmienia się zespolona przenikalność magnetyczna µ oraz pole przekroju poprzecznego magnetowodu s. Te zmiany permeancji wzdłuż drogi nazwano niejednorodnością permeancji magnetowodu. Na rys.3.2. przedstawiono w sposób modelowy strumien ∰_{Zn} przenikający magnetowód z równomiernie nawiniętym uzwoje-



Rys.3.2. Modelowy rozpływ strumieni przenikających przez magnetowód niem N_D. Jeżeli permeancja wzdłuż magnetowodu byłaby jednakowa, strumień ten rozdzielałby się na dwa strumienie proporcjonalnie do permeancji dróg tych strumieni. Wtedy w częściach uzwojeń obejmujących obie drogi indukowałyby się równe co do wartości napięcia, lecz przeciwnie skierowane: napięcie wypadkowe Un byłoby równe zeru. Jednak w wyniku niejednorodności permeancji rozpływ strumieni nie jest proporcjonalny do ich dróg, w obu częściach uzwojenia indukują się różne napięcia - ich różnica UD jest

różna od zera.

Przedstawiony modelowy rozpływ strumieni opisuje zarówno przenikanie przez magnetowód strumieni zakłócających, pochodzących od zewnętrznych pól magnetycznych, jak i tej części strumieni rozprosze-

- 52 -

nia uzwojeń MKP, która przenika przez powietrze oraz częściowo przez magnetowód.

W opisanym modelu strumień wnika do magnetowodu w płaszczyźnie tego magnetowodu - efekt niejednorodności ujawniający się w takim przypadku nazwano efektem niejednorodności wzdłużnym. Jeżeli strumień wnika do magnetowodu prostopadle do jego płaszczyzny, w uzwojeniu indukuje się również napięcie spowodowane:

 a) niejednorodnością permeancji - strumień Ž₂₁ może ulec przesunięciu w płaszczyźnie pionowej, przenikając przez część zwojów w sposób pokazany na rys.3.3: efekt ten nazwano niejednorodnością poprzeczną



permeancji - jego wpływ można zmniejszyć nawijając uzwojenie N_D o małej gęstości zwojowej, tak by przesunięcie strumienia nie obejmowało zwojów,

- Rys.3.3. Ilustracja przenikania przez magnetowód strumienia prostopadłego do jego płaszczyzny
- b) zwojem poprzecznym po nawinięciu uzwojenia jednowarstwowo na caływ obwodzie magnetowodu powstaje zwój poprzeczny o średnicy rownej średniej średnicy magnetowodu: wpływ jego można wyeliminowa, prowadząc przewód po nawinięciu uzwojenia wzdłuż obwodu magnetorodu ale w kierunku przeciwnym do tego uzwojenia - wtedy napięcia indukujące się w zwoju poprzecznym oraz w zwoju dodatkowym są w przybliżeniu takie same, lecz przeciwnie skierowane.

3.1.4. Metody badania i minimalizacii miejednorodności wzdłużnej permeancji

Najprostszą metodą badania niejednorodności wzdłużnej permeanoji jest umieszczenie magnetowodu w polu magnetycznym jednokierunkowym, wytworzonym w cewce Helmholtza. Wówczas strumień wnikający do magnetowodu indukuje w użwojeniu nawiniętym na magnetowodzie napięcie w sposób opisany w rostziałe 3.1.3. Napięcie to zależy od wzajemnego usytuowania pola oraz magnetowodu. Stąd obracając magnetowód w jego płaszczyźnie w sposób przedstawiony na rys.3.4a, otrzymuje się różne napięcia. Przebieg zmian napięcia w funkcji kąta obrotu przedstawiono na rys.3.4b.



Bys.3.4. Ilustracja metody wysnaczania niejednorodności permeanoji -(a), oraz typowy przebieg zmian napięcia w funkcji kąta cz obretu - (b)

- 54 -

Takt sam przebieg smian mapięcia w funkcji kąta obrotu otrzymuje się wymuszając rozpływ strumienia od wewnętrznej strony magnetowodu poprzez umieszczenie dipola magnetycznego w środku magnetowodu w sposób przedstawiony na rys.3.5.



Rys.3.5. Stanowiska do badania niejednorodności permeancji wstoda dipola

Metodę tę stosowano w badaniach magnetowodów opisanych między innysi w pracy [25] samą metodę przebadano w pracy [51], natomiast w pracy [68] wykazano równorzędność metod cewki Helmholtza oraz dipola, « obu metodach ujawnia się niejednorodność średnia permeancji obu częsci magnetowodu, przez które przenikają strumienie. W związku z tym tej metody badania nie można wykorzyątać do korekcji niejednorodności permeancji. Można natomiast wyrównać napięcia indukujące się w obu częs ściach magnetowodu poprzez nawinięcie uzwojeń wyrównawczych: sposób ten, opisany w pracy [25], nie dawał zadowalających wyników. Funktem wyjścia korekcji niejednorodności permeancji jest znajomość niejednorodności miejscowej lub różnicy niejednorodności permeanoji miejscowych.

Wyznaczenie niejednorodności miejscowej jest możliwe stosując metodę cewek skupionych, gdzie różnica napięć cewek nawiniętych na wąskich karkasach, umieszczonych na magnetowodzie w różnych kombinaojach ich rozstawienia jest pewną miarą niejednorodności miejscowej permeancji. Pierwsze charakterystyki zmian różnicy niejednorodności były przedstawione w pracy [24]. W pracy [68] wykazano, że najlepszą kombinacją cewek są dwie cewki detekcyjne, przesunięte względem siebie o kąt % oraz jedna cewka wzbudzająca, przesunięta względem detekcyjnych o kąt % /2, przy czym ruchomym elementem jest magnetowód.

Układ takich oewek przedstawiono na rys.3.6. Na rys.3.7 przedsta-



Rys.3.6. Rozstawienie cewek w metodzie cewek skupionych badania różnicy niejednorodno^ści

wiono we współrzędnych blegunowych przykładową zależność różniov napieć w funkcji kąta obrotu. Wartość maksymalna na krzywej a odpowiada zakończeniem taśm. Sciecie zakończeń ukośnie na długości obwodu magnetowodu zmniejszyło różnicę napięć - ilustruje to krzywa b. Rozwijając krzywą b otrzymuje się obraz odpowiadający różnicy niejednorodności fragmentów obu połówek obwodu magnetowodu. Zmieniając miejscowo permeancję poprzez zmianę przekroju (wycinając taki profil na jednej



Rys.3.7. Charakterystyki zmian różnicy napięć w funkcji kąta obrotu magnetowodu

taśmie obwodu magnetowodu) w sposób opisany w pracy [68] można doprowadzić do prawie całkowitego wyrównania permeancji.

wykres zmian napięcia w funkcji kąta obrotu po korekcji niejednorodności przedstawia na rys.3.7 krzywa c. w praonch [51], [68] zaproponowano miarę niejednorodności permeancji. Zdefiniowano ją jako stosunek napięcia maksymalnego do minimalnego na wykresie przedstawionyw na rys.3.7. Przedstawione metody wyrównywania pereancji magnetowodów spowodowały zmniejszenie przyjętej miary niejednorodności z ok. 40 do ok. 2, dla typowych magnetowodów. Ideałem byłby magnetowód o kołowej charakterystyce, dla którego współczynnik niejednorodności byłby równy 1.

3.2. Ekrany magnetyczne

3.2.1. Funkcie ekranów magnetycznych

Ekrany magnetyczne, otaczając magnetowód z uzwojeniami detekcyjnymi, zwierają prawie całkowicie strumienie rozproszenia oraz zakłócające, nie dopuszczając ich do uzwojeń detekcyjnych. Mogą być wykonane jako lite lub składać się z toroidów o odpowiednio dobranych wymiarach.

Lite charakteryzują się izotropią magnetyczną, jednak ze względu na małą permeancję ich skuteczność ekranowania jest ograniczona. Ekrany składane z toroidów obarakteryzują się anizotropią: skuteczność ekranowania w płaszczyźnie toroidu jest znacznie większa od skuteczności w kierunku prostopadłym do płaszczyzny toroidu. Stąd miarą skuteczności ekranowania będą dwa współczynniki ekranowania - osiowy K_{eo} dla kierunku pola prostopadłego do płaszczyzny magnetowodu oraz wzdłużny K_{ew} (dla kierunku pola zgodnego z płaszczyzną magnetowodu).

$$K_{eo} = \frac{H_o}{H_{eo}}, \quad K_{ew} = \frac{H_o}{H_{ew}}$$
(3.2)

gdzie:

 H_o - natężenie pola magnetycznego na zewnątrz ekranu magnetycznego
H_{eo}, H_{ew} - natężenie pola magnetycznego wewnątrz ekranu dla kierunku osiowego oraz wzdłużnego.

Współczynniki ekranowania zależą od modułu przenikalności magnetycznej, kształtu ekranu oraz jego grubości. Współczynnik ten można wyznaczyć w sposób analityczny jedynie dla ekranów o prostych kształtach, np. cylindrycznego lub kulistego [72]. Z tych analitycznych równań można wyciągnąć wniosek dotyczący grubości ekranu. Na rys.3.8 przedstawiono zależność współczynnika ekranowania zdefiniowanego zależnością (3.2) w funkcji stosunku r/R_r, gdzie r jest promieniem strefy chronionej ekranu, R_- promieniem zewnętrznym ekranu, przy czym para-



metrem jest stosunek przenikalności magnetycznej ekranu do przenikalności strefy chronionej. Z charakterystyk wynika, że dla r/R_r ≤ 0,5 współczynnik čkranowania zmienia się w sposób nieznaczny, natomiast silnie dla 0,5≤r/R_r<1. Stąd wniosek, że najlepszym rozwiązaniem jest ekran, którego grubość jest w przybliżeniu równa promieniowi strefy chronionej.

Rys.3.8. Zależność współczynnika ekranowania w funkcji ^r.

3.2.2. Metoda wyznaczania współczynników ekranowania [42]

Wyznaczenie analityczne współczynników ekranowania w przypadku bardziej złożonych konstrukcji ekranów przy uwzględnieniu ich anizotropii oraz nieliniowości charakterystyk magnesowania jest problemem bardzo złożonym. Dlatego celowe jest wyznaczenie współczynników ekrano mania opisanych zależnością (3.2) na drodze doswindezalnej. Najwłasciwszym sposobem badania współczynników ekranowania jest ich wyznaczenie w warunkach normalnej pracy MKP, więc wtedy, gdy magnetowód z uzwojeniami znajduje w przestrzeni chronionej ekranem. W celu przeprowadzenia takiego badania można wykorzystać efekt niejednorodności permeancji. Łatwo wykazać, że napięcia indukujące się w uzwojeniu na ma netowodzie umieszczonym w polu magnetycznym, są proporcjonalne do H_o, natomiast w ekranie - odpowiednio do H_{eo} oraz H_{ew}. Napięcie indukujące się w uzwo-

- 59 -

jeniu magnetowodu, w przypadku wyznaczania współczynnika ekranowania wzdłużnego K_{ew}, jest między innymi zależne od wzajemnego usytuowania pola magnetycznego magnetowodu. Dlatego, w celu jednoznaczego określenia współczynnika ekranowania, należy go obliczyć z wartości maksymalnych napięcia w funkcji kąta œ przed i po umieszczeniu magnetowodu w ekranie. Dla konstrukcji ekranu przedstawionej na rys.2.1a wartość tego współczynnika, w zależności od materiału ekranu jest rzędu 10²-10⁴.

Współczynnik ekranowania osiowy można wyznaczyć w analogiczny sposób, wykorzystując efekt niejednorodności osiowej lub zwój poprzeczny. Wartości współczynnika tego dla konstrukcji ekranu składającej się z toroidów są znacznie mniejsze niż współczynnika K_{ew} (rzędu kilkunastu). Dlatego MKP musi posiadać jeszcze jeden ekran o dużej permeancji w kierunku osiowym. Warunek ten spełnia ekran taśmowy, Lawijany na uzwojeniach MKP w sposób opisany w pracy [53].

W wyniku zastosowania ekranu taśmowego wypadkowy współczynnik ekranowania osiowego dla poprzednio omówionej konstrukcji wzrasta do wartości 80-120.

3.2.3. Ekrany w MEP kriogenicznych

Najważniejszą rolę w LKP krisgenicznych odgrywają ekrany kriogeniczne, których celem jest eliminacja strumieni rozproszenia. Ich kształt zależy od wzajmenego usytuowania uzwojeń porównawczych oraz SQUID-u, wspólną cechą jest rozdzielenie uzwojeń i SQUID-u. Strumień związany z prądem płynącym w uzwojeniach indukuje w ekranie kriogenicznym od strony uzwojeń prąd, zamykający się po drugiej stronie ekranu efekt kcisnera [50]. Jeżeli prądy w uzwojeniach wymuszają siły magnetomotoryczne przeciwnie skierowane, to w ekranie od strony SQUID-u płynie prąd odpowiadający różnicy sił magnetomotorycznych. Nadprzevodzące materiały ekranują zarówno od pól elektrycznych, jak i magnetycznych, a więc także od strumieni rozproszeń i dlatego prąd w ekranie od strony SQUID-u odpowiada z dużą dokładnością różnicy sił magnetomotorycznych.

- 60 -

Strumienie zewnętrzne zakłócające zmniejsza się stosując ekrany z materiału przewodzącego oraz z materiału magnetycznego. Typowe wykonanie ekranu chroniącego SąUID przed polami wielkiej częstotliwości (rzędu MHz) składa się z dwóch osłon wykonanych z blachy miedzianej, zapewniającej tłumienie zakłóceń w wymienionym paśmie częstotliwości rzędu 100 dB.

Zakłócenia o częstotliwościach niższych zuniejsza się, stosując ekrany magnetyczne, otaczające kriostat w dwóch lub trzech warstwach.

4. BLEDY MKP

4.1. Definicja błędu

Zależność (1.1) w realizowanych MKP nie jest spełniona w sposób dokładny jest ona obarczona błędem \mathcal{S}_{K} :

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 (1 + \mathcal{O}_K)$$
 (4.1)

Względny błąd LKP zmiennych jest wielkością zespoloną, stałych - rzeczywistą. Jeżeli MKP posiada uzwojenie kompensacyjne, to w zależności (4.1) należy uwzględnić błąd uzwojeń kompensacyjnych, stąd:

$$I_{1}N_{1} = I_{2}N_{2} (1 + \delta_{K}) + I_{K}N_{K} (1 + \delta_{K_{r}})$$
(4.2)

Jeżeli $I_{K}N_{K} \ll I_{1}N_{1}$, to wielkością decydującą o jakości MKP jest błąd \mathcal{O}_{K} . Żródła tego błędu dla MKP zmiennych są odmienne od źródeł błędu przekładnika prądowego mimo podobieństwa formalnego zapisu definicji błędu. W przekładniku prądowym głównym źródłem błędu jest impedancja gałęzi poprzecznej schematu zastępczego transformatora typu T. Prąd płynący.w tej gałęzi reprezentuje strumień magnetyczny. Natomiast w MKP, w stanie kompensacji sił magnetomotorycznych strumień jest równy zeru.

4.2. Bledy MEP zmiennych

W MKP zmiennych można rozróżnić błąd magnetyczny δ_m oraz błąd pojemnosciowy δ_n :

8 = 8 + 8

(4.3)

obie wielkości – δ_m oraz δ_0 są wielkościami zespolonymi.

Žródłem błędu magnetycznego są strumienie rozproszeń uzwojeń oraz strumienie zewnętrzne zakłócające. Wpływ strumieni rozproszenia dla określonego natężenia prądu jest stały w.konkretnej realizacji MKP, więc ta składowa błędu magnetycznego ma charakter błędu systematycznego. Natomiast wpływ zewnętrznych pól magnetycznych jest zależny od chwilowego rozkładu pola magnetycznego, z reguły nieznanego. Stał składowa błędu magnetycznego, której źródłem są zewnętrzne pola magnetyczne zakłócające, ma charakter błędu przypadkowego.

W modelowym ujęciu wpływu strumieni zakłócających i rozproszenia strumienie te można podzielić na trzy części:

- zamykające się przez powietrze, obejmujące częściowo uzwojenia poronawcze: strumienie te indukują napięcia w uzwojeniach porownawczych, ale ze względu na wymuszenie prądowe w obwodach z uzwojeniaci (duca wyjściowa impedancja źródeł prądowych) napięcia te z reguły nie powodują znaczącego przepływu prądu:
- zamykające się przez powietrze i obejmujące uzwojenih detekcyjne: strumienie te indukują w uzwojeniu detekcyjnym napiscie będące składową błędu:
- zamykające się przez magnetowód: strumienie to wnikają do magnetowodu w sposób przedstawiony na rys.3.2 rozdzielają się na dwa strumienie o wartościach, w idealnym przypadku proporcjonalnych do permeancji dróg strumieni - w przypadku modelowym nie powinny one indukować napięć, ale ze względu na istnienie niejednorodności permeancji na zaciskach uzwojeń pojawia się napięcie.

Nawet wtedy, gdy niejednorodność magnetowodu zostanie wyrównana, co przy stałej gęstości zwojowej powoduje indukowanie się jednakowych napięć w obu częściach magnetowodu, istnieje pośredni wpływ strumieni zakłecających i rozproszeń. Strumienie przenikając przez obie części magnetowodu przemagnesowują je cyklicznie. Wynikiem tego przemagnesowania magnetowodu (lub jego fragmentów) są skokowe zmiany indukcji (skoki Barkhausena), ujawniające się na zaciskach uzwojenia w postaci szumu.

Wpływ strumieni rozproszeń i zakłócających istnieje w każdym zrealizowanym MKP. Można na drodze konstrukcyjnej oraz technologicznej dążyć do zmniejszenia tego wpływu do takiego stanu, gdy będzie on pomijalnie mały. Jednym ze środków technicznych są omówione w rozdziałe 3 ekrany magnetyczne - zwierają one w znacznym stopniu strumienie rozproszeń i zakłócające, zmniejszając tym samym strumień dochodzący do magnetowodu i uzwojenia. Z rys.1.2 wynika, że wpływ strumieni rozproszeń można wyeliminować doprowadzając je do równych wartości, co osiąga się przez odpowiednią technologię uzwojeń porównawczych, omówionych w rozdziałe 5.

Mimo stosowania wymienionych środków błędu magnetycznego nie można wyeliminować w sposób całkowity. Również nie można go wyznaczyć pomiarowo, ponieważ nie można go oddzielić od błędu pojemnościowego.

Źródłem błędu pojemnościowego są:

- pojemności międzyzwojowe, międzysekcyjne, międzyuzwojeniowe oraz doziemne,
- dyspersja dielektryka, (izolacji, przekładek, itp.),
- konduktancje upływnościowe, powodujące przepływ prądu będącego
 - w fazie z wymuszającym je napięciem.

Najistotniejszą rolę odgrywają pojemności międzyuzwojeniowe oraz doziemne, dlatego analizę modelu błędu pojemnościowego można ograniczyć do tych dwóch źródeł. Na rys.4.1a przedstawiono schemat połączenia MKP z obiektem badanym (OB), którego prądy są porównywane w MKP. Na rys.4.1b przedstawiono schematycznie uzwojenia porównawcze MKP, gdzie: I_{1K} oraz I_{2K} - prądy przyporządkowane początkom uzwojeń I_{1L} oraz I_{2L} - prądy przyporządkowane kcucom uzwojeń

- 64 -



C1 oraz C2 - pojemności doziemne: C12 - pojemności międzyuzwojeniowe.

Rys.4.1. Schemat uzwojeń MKP zmiennych: podłączenie uzwojeń do obiektu badanego - (a), rozpływ pradów i rozkład pojemnosci - (b) oraz rozkład potencjału na uzwojeniu - (c)

Na rys.4.1c przedstawiono rozkład napięć na uzwojeniach porosnawczych, przy czym przyjęto, że przez uzwojenie płynie prąd I_{1K} oraz I_{2K} . Rezystancje r_1 oraz r_2 są rezystancjami uzwojeń, netomiest R_{10} oraz R_{20} rezystancjami zewnętrznymi (obciążenia).

W wyniku istnienia pojemności prąd wpływający do zacisku K nie jest równy prądowi wypływającemu z zacisku L. Różnica prądów jest opisana zależnością:

 $\Delta I_{1} = I_{1K} - I_{1L} = \left(\frac{I_{2K}r_{2}}{2} + I_{2K}R_{20} + I_{1K}R_{10} + \frac{I_{1K}r_{1}}{2}\right) \omega C_{12} + \left(\frac{I_{2K}r_{2}}{2} + I_{2K}R_{20}\right) \omega C_{2}$ (4.4)

Prąd ΔI_1 nie płynie przez całe uzwojenie o liczbie zwojów N_1 . Rozpatrując model uzwojenia można przyjąć, że prąd ΔI_1 wypływa z uzwojenia w jego połowie, nie przepływając przez dalsze $N_1/2$ zwojów. Fakt ten jest źródłem błędu pojemnościowego, przy czym prąd pojemnościowy, jak to wynika z wykresu napięć, w uzwojeniu 1 odejmuje się od prądu I_{1K} , w uzwojeniu 2 dodaje się do prądu I_{2L} .

Rezystancja uzwojeń MKP jest z reguły znacznie mniejsza od rezystancji obciążenia ($r_1 \ll R_{10}$, $r_2 \ll R_{20}$), stąd w zależności (4.4) można pominąć wyrażenia zawierające r_1 oraz r_2 . Tym samym otrzymano zależność prądu ΔI_1 od zmiany rezystancji obciącżnia R_{10} oraz R_{20} :

$$\Delta I_{1} = (I_{2K}R_{20} + I_{1K}R_{10}) j\omega C_{12} + I_{2K}R_{2}j\omega C_{2}$$
(4.5)

Po obliczeniu w sposób analogiczny prądu ∆I₂ wyznaczono siłę magnetomotoryczną odpowiadającą różnicy prądów pojemnościowych:

$$N (\Delta I_{1} - \Delta I_{2}) = I_{1K}R_{10} j \omega C_{1} \frac{N}{2n} - I_{2K}R_{20} j \omega C_{2} \frac{N}{2} + j \omega C_{12} (I_{1K}R_{10} + I_{2K}R_{20}) (\frac{N_{1}}{2n} - \frac{N_{1}}{2}), \qquad (4.6)$$

gdzie: n - przekładnia nominalna MKP.

Uwzględniając, że I_{1K} ^g nI_{2K} obliczono składową względnego błędu pojemnościowego, spowodowaną rezystancją obciążenia komparatora:

$$\delta_{C0} = \frac{N \left(\Delta I_1 - \Delta I_2\right)}{N I_{1K}} =$$

= $j\omega \left(\frac{R_{10}C_1}{2} - \frac{R_{20}C_2}{2} - \frac{n-1}{2} R_{10}C_{12} - \frac{n-1}{2n} R_{2}C_{12}\right)$ (4.7)

Stąd zmianie rezystancji ΔR₂ gałęzi uzwojenia i odpowiada przyrost składowej błędu Δở_{Co}, równy:

$$\Delta \vartheta_{\rm Co} = -j\omega \frac{\Delta R_2}{2} \left[\frac{(n-1)}{2} C_{12} + C_2 \right] \qquad (4.8)$$

- Z zależności (4.4) + (4.8) można wyciągnąć następujące wnioski:
- a) eliminacja pojemności C_{12} , jak to wynika z zależności (4.7), zmniejsza składową błędu pojemnościowego δ_{Co} : warunek ten można zrealizować oddzielając uzwojenia ekranem elektrostatycznym – wzrastają wtedy pojemności C_1 oraz C_2 ale w zależności (4.7) istotna jest różnica $H_{10}C_1 - H_{20}C_2$:
- b) różnicę prądów ΔI₁ można zmniejszyć eliminując składniki I_{2K^R20} oraz I_{1K^R10} - odpowiada to w praktyce uziemieniu zacisków jednoimiennych, dlatego MKP zmiennych musi posiadać zaciski znaczone, tj. takie, które podczas pracy muszą być uziemione::
- o) należy dążyć do tego, by pojemności C₁ i C₂ były możliwie mnłe, oddalając ekrany elektrostatyczne od uzwojeń.

W MKP składowa pojemnościowa błędu obliczona po podstawieniu zmierzonych pojemności i rezystancji uzwojenia, dla MKP opisanych w pracach [26], [27], jest rzędu kilku części na milion - (2...5) 10⁻⁶. Składową tę można zmniejszyć poprzez wyrównanie wpływu pojemności, dobierając pojemności korekcyjne, np. bocznikujące uzwojenia.

4.3. Bledy MKP stalych

Żródła błędów w MKP stałych ozęściowo różnią się od źródeł w MKP zmiennych. Przyczyną jest inny rodzaj detekcji siły magnetomotorycznej oraz pomijalny wpływ pojemności międzyzwojowych oraz doziemnych.

Model błędu MKP stałych przedstawiono w postaci schematu blokowego na rys.4.2.

Błędy podzielono ze względu na umiejscowienie ich źródła na błędy powstające w detektorze siły magnetomotorycznej oraz w uzwojeniach porównawczych. Najistotniejszą rolę odgrywają błędy przypadkowe umiejsco-

- 67 -

wione w detektorze - błąd spowodowany istnieniem efektu pamięci magnetycznej (histerezą), oraz zewnętrznymi zakłócającymi polami magnetycznymi. Sposobem minimalizacji wpływu histerezy jest odpowiedni dobór parametrów magnetowodów opisany w rozdziale 2.2. Mimo tego w fizycznych MKP stałych błąd ten istnieje. Ważnym stanem pracy MKP stałych ze względu na powstawanie tego błędu jest włączenie oraz wyłączenie pradów



Rys.4.2. Model bledu MKP stałych

w uzwojeniach porównawozych. Nimo jednoczesnego np. włączania prądów, wskutek różnych stałych czasowych obwodów, wartości chwilowe sił magnetomotorycznych w uzwojeniach mogą się znacznie różnić i w efekcie następuje silne przemagnesowanie magnetowodów. Efekt ten można zmniejszyć, dobierając odpowiednie parametry uzwojenia tłumiącego w sposób omówiony w rozdziale 5.3.

60

Drugim ważnym źródłem błędu są zewnętrzne pola magnetyczne. Sposobem ich eliminacji jest właściwe ekranowanie. Należy dążyć do stosowania dwóch lub trzech ekranów, wtedy wypadkowe współozynniki ekranowania, opisane zależnością (3.2), są iloczynem współozynników charakteryzujących pojedyńcze ekrany. Identyczny wpływ na błąd MKP stałych jak strumienie zakłócające mają rozproszenia – ich działanie na magnetowody opisane jest w rozdziale 3.2.1. W wyniku niejednorodności permeancji magnetowodów i ich nieliniowości na wyjściu detektora pojawia się napięcie będące składową błędu.

Wrażliwość MKP stałych na zewnętrzne pola magnetyczne stałe oraz zmienne można zbadać, umieszczając komparator w cewce Helmhotzu, zasilanej prądem stałym oraz zmiennym. Zastosowanie trzech ekranów, wykonanych z toroidów permalojowych, z taśmy permalojowcj nawiniętej na komparatorze oraz z materiału ferromagnetycznego obudowy wystarczająco chroni komparator przed wpływem pola o natężeniu rzędu dziesiątek A/m.

Istotną rolę odgrywają parametry prądu wzbudzującego magnetomody. W pracy [3] wykazano, że parzyste harmoniczne w przebie u wielkości wzbudzającej przenoszą się na stronę uzwojeń detekcyjnych w fazie przeciwnej względem wymuszenia. Stąd przebieg zasilania prostokątny musi być symetryczny dla dodatniej połówki względem kąta %/2. Nie może on posiadać zwisu, a czasy narastania i opadania powinny być równe zeru. Analogiczne wymaganie odnosi się do ujemnego napięcia w drugiej połowie okresu. Warunku tego nie można zrealizować, dopuszcza się zatem istnienie drugiej harmonicznej w przebiegu wzbudzenia asymetrii przebiegu wymagając, aby wartość tej harmonicznej była stała: wtedy można ją skompensować w układzie elektronicznym, przedstawionym w postaci schematu blokowego na rys.2.10. Warunek ten wymaga stabilizacji zasilania zeneratora oraz minimalizacji dryftów termicznych i długookresowych. Również układy elektroniczne detektora muszą spełniać wymagania dużej stabilności termicznej i czasowej oraz charakteryzować się małymi szumami własnymi.

Żródłami błędów związanych z uzwojeniami porównawczymi są nieidentyczne strumienie rozproszenia oraz konduktancje doziemne oraz międzyuzwojeniowe. Ostatnie źródło błędu w większości MKP stałych można pominąć ponieważ odgrywa ono rolę w przypadku uzwojeń komparatorów niskoprądowych, a więc o dużej liczbie swojów i tym samym o dużej rezystancji. Wówczas napitcia na końcówkach uzwojenia mogą dochodzić do 100 V, rezystencje uzwojeń do 1 k Ω . Błędy te można oszacować mierząc odpowiednie konduktancje i obliczając prądy upływnościowe. Przyjmując, że konduktancja wypadkowajest dołączona do środka uzwojeń, łatwo obliozyć siłę magnetomotoryczną spowodowaną przepływem prądu upływnościowego przez połowę uzwojenia N./2.

Składową błędu spowodowaną nieidentycznością strumieni rozproszeń zmuisjsza się stosując odpowiednią technologię uzwojeń porównawczych omówioną w rozdziałe 5.

Ogólnie należy stwierdzić, że błędu MKP stałych nie można obliczyć lecz trzeba wyznaczyć w procesie wzorcowania.

4.4. Bledy MKP Kriogenicznych

Źródła błędów MKP kriogenicznych można podzielić na dwie grupy: - rozbieżności modelowe,

- szumy termiczne.

W modelowym MKP konduktancja ekranu oddzielającego SQUID od uzwojeń pomiarowych powinna być równa nieskończoności - w fizycznym posiada wartość skończoną. W związku z tym ekranowanie SQUID-u nie jest idealne i strumienie rozproszenia oraz zakłócające powodują obniżenie dokładności komparacji. Wpływ strumieni zakłócających ma charakter przypadkowy, rozproszenia - systematyczny. Jeżeli uwzględnić tylko błędy systematyozne, to błąd komparacji natężeń prądów rzędu 10⁻⁹ lub mniej oraz pobudliwość rzędu 10⁻¹¹...10⁻¹² wyznaczone eksperymentalnie [7], [18] ozyni MKP kriogeniczne bezkonkurencyjnymi narzędziami pomiarowymi w klasie magnetycznych komparatorów prądów.

Istotną rolę odgrywają szumy SQUID-u, ceski sprzęgającej oraz przedwzmacniacza. Wpływ szumów ujawnia się między innymi w zmianie przebiegu charakterystyki $U_T = f(I_{w.cz})$ przedstawionej na rys.2.16b. Przejścia pomiędzy obszarami proporojonalności i niezależności od prądu w wyniku szumów termicznych nie są ostre: zmianie ulega także nachylenie poszczególnych części charakterystyki.

5. UZNOJENIA PORÒNNAWCZE

5.1. Typy uzwojeń

W zależności (1.3) opisującej stan kompensacji sił magnetomotorycznych występują trzy siły magnetomotoryczne: I_1N_1 , I_2N_2 oraz I_KN_K , gdzie $I_KN_K \ll I_1N_1$ oraz I_2N_2 . Jak wynika z zależności (4.2), uzwojenie kompensacyjne. N_K może charakteryzować się większym błędem (najczęściej o dwa rzędy), natomiast jego siła magnetomotoryczna powinna zapewnić rozdzielczość MKP rzędu $10^{-5}...10^{-7}$. Najostrzejsze wymagania technologiczne stawia się uzwojeniom porównawczym, dlatego przedstawione zostaną metody realizacji tylko tych uzwojeń, natomiast w przypadku uzwojeń kompensacyjnych zostaną omówione sposoby wymuszania siły magnetomotorycznej I_KN_K z wymaganą rozdzielczością.

Obwód magnetyczny, w którym wymuszona jest w uzwojeniach nawiniętych na magnetowodzie siła magnetomotoryczna I M lub I_2N_2 , możne zamodelować zgodnie z rys.1.2a, uwzględniając strumień przenikający tylko przez magnetowód o reluktancji R_{μ} , równy odpowiednio foraz (dla $I_1N_1 = I_2N_2$, $I_1 = \Phi_2$) oraz strumienie Φ_{s1} oraz Φ_{s2} , przenikające przez reluktancje R_{s1} oraz R_{s2} . deluktancje te odpowiadają drodze strumieni przenikających przez ekran, powietrze oraz częściowo przez magnetowód z uzwojeniem detekcyjnym, indukując w tym uzwojeniu napięcia. Stąd, na podstawie zależności (4.1), otrzymano:

$$\frac{\mathbf{I}_{1}\mathbf{N}_{1}}{\mathbf{I}_{2}\mathbf{N}_{2}} = \frac{\phi_{1} \mathcal{R}_{\mu}}{\phi_{2} \mathcal{R}_{\mu}} + \frac{\phi_{s1} \mathcal{R}_{s1}}{\phi_{s2} \mathcal{R}_{s2}} = \mathbf{I} + \frac{\phi_{s1} \mathcal{R}_{s1}}{\phi_{1} \mathcal{R}_{\mu}} - \frac{\phi_{s2} \mathcal{R}_{s2}}{\phi_{2} \mathcal{R}_{\mu}} =$$

= 1 + 5

(5.1)
Z zależności (5.1) wynikają następujące wnioski:

a) blad $\mathcal{O}_{K} \longrightarrow 0$, ježeli $\Phi_{s1} \mathcal{R}_{s1} \ll \Phi_{1} \mathcal{R}_{\mu}$ oraz $\Phi_{s2} \mathcal{R}_{s2} \ll \Phi_{2} \mathcal{R}_{\mu}$ b) blad $\Phi_{K} \longrightarrow 0$, ježeli $\Phi_{s1} \mathcal{R}_{s1} = \Phi_{s2} \mathcal{R}_{s2}$; warunek ten može być spełniony tylko dla $\mathcal{R}_{s1} = \mathcal{R}_{s2}$ oraz $\Phi_{s1} = \Phi_{s2}$.

Ostatni warunek może być spełniony jedynie wtedy, gdy drogi strumieni Φ_{s1} oraz Φ_{s2} będą się pokrywały, a strumienie będą posiadały taką samą wartość ale przeciwne zwroty: stąd uzwojenia porównawcze MEP muszą zajmować tę samą przestrzeń przenikając przez siebie wzajemnie – nuszą syć przestrzennie przystające. Warunku tego w praktyce nie można zrealizować, można się do niego w ograniczonym zakresie zbliżyć, stosując odpowiednią technologię uzwojeń.

Najbliższm spełnienia wymagań jest uzwojenie multifilarne, umoźliwiające realizację przekładni zwojowej i:n, gdzie n <20, przy czym ze względów technologicznych natężenia porownywanych prądów są mniejsze od 0,5...iA. Szczególnym przypadkiem tego typu uzwojenia jest uzwojenie bifilarne (przekładnia zwojowa 1:1) - natężenia porównywanych prądów mogą wtedy być odpowiednio większe. Dokładną realizację przekładni zwojowych i:n dla natężeń prądów większych od 1A umożliwia uzwojenie falowe: typowe górne wartości natężeń porównywanych prądów są rzędu kilkunastu amperów. Dla wyższych prądów można stosować uzwojenia warstwowe, charakteryzujące się gorszymi, w porównaniu z poprzednimi typami uzwojeń, właściwościami metrologicznymi. Dla dużych przekładni zwojowych, n \$50, oraz natężeń prądu większych od kilkudziesięciu amperów jedno z uzwojeń wykonane jest w postaci szyny przenikającej przez okno toroidu.

5.1.1. Uzwojenia multifilarne

Technologia uzwojeń multifilarnych rozwinęła się w wyniku doskonalenia indukcyjnych dzielników napięcia. Informacje na ten temat zawarte są miedzy innymi w pracach [20], [24], [02]. Sposób wykonania uzwojeń multifilarnych opisano w pracy [78].

Uzwojenia mutlifilarne wykonane są wiązką multifilarną nawijaną na magnetowód, najczęściej zwój obok zwoju lub w sposób falowy, opisany szczegóżowo w rozdziałe 5.1.2. Wiązka mutifilarna składa się z n skręconych, względem siebie izolowanych przewodów. Najlepszym materiałem wyjściowym wykonania wiązki jest drut nawojowy izolowany emalią specjalną i opleciony jedwabiem (DNEsJ) lub drut izolowany podwójną emalią specjalną (DN2Es). Jakość izolacji odgrywa istotną rolę, ponieważ przewody w wiązce poddawane są podczas wykonania wiązki skręceniu, wykonywania uzwojenia - zginaniu. Kumulacja naprężeń powoduje, w przypadku złej jakości lakieru izolacyjnego, jego odpryskiwanie od przewodu, a tym samym możliwość powstania zwarć w uzwojeniu.

W indukoyjnych dzielnikach napięcia uzwojenia multifilarne wykonane są z przewodów o średnicach od 0,4 do 0,65 mm [73], [92]. Średnica przewodu w wiązce przeznaczonej do wykonania uzwojeń w MKP jest zależna od nominalnego natężenia prądu i może być równa (0,1...1) mm. Dolna wartość jest ograniczona właściwościami mechanicznymi przewodu, który podozas wykonywania wiązki może łatwo ulec zerwaniu. Średnica maksymalna przewodu jest wynikiem trudności technologicznych występujących przy nawijaniu uzwojeń: wiązka taka jest sztywna, co utrudnia równomierne układanie zwojów multifilarnych.

Cechą charakterystyczną wiązki jest liczba skrętów na długościi m. Jest ona zależna od średnicy przewodów d_p wiązki: dla d_p Ξ 0,2 mm powinna być równa 60-140 skrętów/m, dla d_p Ξ 0,6 mm - ok. 60-50 skrętów/m, dla d_p Ξ 1 mm - ok. 30 skrętów/m. Każdą sekcję wiązki (przewód) charakteryzują parametry wzdłużne 1 poprzeczne, przedstawione schematycznie na rys.5.1, gdzie:

r, - rezystancja i-tego przewodu wiązki,

1, - indukoyjność rozproszenia,

- 04 pojemność doziemna,
- gi konduktanoja doziemna,

- 74 -

01j - pojemność między sekcjami i - j, E11 - konduktancja między sekcjami i - j.



Rys.5.1. Parametry sekcji wiązki multifilarnej Rosrsut tych parametrów, ale już w uzwojeniu nawiniętym na ekranie, jest międży innymi źródłem błędów. Istotną rolę odgrywają pojer mności oraz konduktaneje międzysekcyjne, których typowe wartości oraz ich rozrzut uzwojenia multifilarnego o średnicy przewodu d_p = 0,6 mm są równe [73]: $c_{ij} = (60 \pm 30)$ pF/m, $g_{ij} = (20 \pm 10)$ nS/m, 1, = (1 ± 0,2)µil/m,

 $r_i = (80 \pm 0,5) m \Omega/m$. Pojemności oraz konduktancje doziemne są w przybliżeniu równe pojemnościom oraz konduktancjom międzysekcyjnym. Wartości parametrów uzwojeń wykonanych z przewodów o innych średnicach różnią się od wartości parametrów dla średnicy przewodów równej 0,6 mm, przy czym ogólnie wraz ze wzrostem średnicy rezystancja, konduktancja i pojemność maleją, natomiast indukcyjność rośnic. Parametry te zależą również od sposobu nawinięcia uzwojenia multifilarnego.

Wprawdzie uzwojenia multifilarne są najbardziej zbliżonym typem do uzwojeń idealnych, spełniających warunek przystawania przestrzennego uzwojeń porównawczych, to jednak jego realizacja wskutek między innymi różnych parametrów kolcjnych sekcji nie jest idealna. Aby zmniejszyć wpływ nierówności parametrów poprzez ich wyrównanie zwoje multifilarne powinny się znajdować w jednakowych warunkach. Oznacza to jednakową długość zwoju każdej sekcji uzwojenia multifilarnego i jednakową średnicą odległość zwojów poszczególnych sekcji od ekranu magnetycznego. Warunek ten może spelniać uzwojenie uporządkowane w jeden z następujących sposobów:

a) uzwojenie wypełnia ściśle wewnętrzny obwód ekranu magnetycznego: na zewnętrznym jest rozłożone równomiernie w sposób przedstawiony na rys.5.2a (uzwojenie takie nazwano uzwojeniem multifilarnym prostym jednowarstwowym),



Rys.5.2. Uzwojenia multifilarne proste jednowarstwowe (a), oraz dwuwarstwowe (b)

b) uzwojenie wypełnia całkowicie zewnętrzny obwód, na wewnętrznym ułożone jest w dwóch warstwach w sposób przedstawiony na rys.5.2b – uzwojenie takie nazwano multifilarnym prostym dwuwarstwowym (średnica zewnętrzna ekranu musi być dwukrotnie większa od wewnętrznej).

Wymaganą przekładnię zwojową 1:n można otrzymać dla wiązki liczącej (n+i) sekcji poprzez połączenie n sekcji szeregowo. Błąd takiego połączenia zależy od rozrzutu wartości parametrów sekcji oraz od wyboru przewodu wiązki, będącego jednym z uzwojeń porównawczych: wyboru tego przewodu można dokonać na podstawie pomiarów błędów międzysekcyjnych. Pomiar ten należy wykonać łącząc kolejno jedną, dowolnie wybraną sekcję w sposób przeciwsobny z pozostałymi 1 wymuszając w nich siłę magnetomotoryczną o tej samej wartości. Przykładowe wyniki pomiaru błędu emplitudowego i kątowego dla uzwojenia multifilarnego prostego jednowarstwowego o (n+i) = 11 przedstawiono na rys.5.3.



Rys.5.3. Przykładowe charakterystyki błędów międzysekcyjnych uzwojenia multifilarnego prostego jednowarstwowego

Przebieg charakterystyk zależy od przyporządkowania nuczerów poszczególnym sekcjom, dlatego w zależności od przyjęcia sekcji odniesienia i kolejmości dalszych charakterystyki mogą być różne. Jednak suma błędów amplitudowych dla połączenia szeregowego n sekcji jest w przybliżeniu taka sama, niezależnie od kolejności sekcji. Stąd w celu otrzymania małej wartości błędu należy jako sekcję odniesienia, a tym samym uzwojenie porównawcze, przyjąć sekcję charakteryzującą się w przybliżeniu błędem równym sumie błędów pozostałych sekcji. Podobny tok postępowania należy przeprowadzić z błędem kątowym. Wyniki porównania mogą nie być zbieżne. Należy wtedy dokonać wyboru sekcji odniesienia w sposób kompromisowy. Przedstawiona metoda jest słuszna przy założeniu, że wartości błędów sekcji nie zmieniają się przy szeregowym połączeniu sekcji. Założenie to jest spełnione w zakresie małych częstotliwości, dla wyższych częstotliwości, rzędu kilkuset liz, znuczącą zmieniają wartość prądy pojemnościowe i tym samym zmienia się błąd kątowy.

Ogólnie należy stwierdzić, że dzięki omowionym właściwościom uzwojenia multifilarnego namet przypadkowy wybór sekcji odniesienia w uzwojeniu o przekładni zwojowej 1:n daje błądy umplitudowy i katowy

- 77 -

wystarczająco małe dla większości praktycznych zastosowań.

5.1.2. Uzwojenia falowe

Uzwojenie to umożliwia realizację przekładni zwojowej MKP 1:n, gdzie n ≤10, przy czym nominalne natężenie prądu w uzwojeniu porównawozym może osiągnąć kilkanaście lub kilkadziesiąt amperów. Wykonuje się je nawijając na ekranie magnetycznym równocześnie (n+1) przewodów w sposób przedstawiony na rys.5.4. W ten sposób każdy przewód uzwojenia sek-



Rys.5.4. Sposób nawijania; uzwojenia falowego cji obejmuje cały obwód magnetowodu, dzięki temu w znacznym stopniu zmniejsza się wpływ niejednorodności permsancji magnetowodu.

Šrednica przewodów, w typowych przypadkach typu DN2Es, mieści się w granicach od 1 mm do ok.4 mm. Najczęściej w przedstawiony sposób realizuje się przekładnię zwojową 1:10. Uzwojenie falowe można wykonać, podobnie jak multifilarne,

jednowarstwowo na wewnętrznym obwodzie ekranu lub jednowarstwowo na zewnętrznym obwodzie ekranu, jak to przedstawiono na rys.5.5a, b. Ze względu na to, że kolejnym przewodom uzwojenia (sekcjom) można przyporządkować w sposób jednoznaczny numery, charakterystyki będą również jednoznaczne: na rys 5.6a, b, przedstawiono błędy amplitudowe kolejnych sekcji względem pierwszej, odpowiadające typom uzwojenia przedstawionym na rysunku 5.5a, b (charakterystyki błędów kątowych mają podobny przebie) wartości błędów są przeciętnie o rząd większe w porównaniu z błędami uzwojeń multifilarnych, jednak łącząc sekcje szeregowo można je dobrać



Rys.5.5. Sposoby wykonania uzwojenia falowego: jednowarstwowe - a , dwuwarstwowe - b , sekcjonowane - o



Rys.5.6. Charakterystyki błędów amplitudowych sekcji uzuojenia falowego: (jednowarstwowego - (a), (dwuwarstwowego) - (b), sekcjonowanego - (c)

w taki sposób, by wypadkowy błąd uzwojeń był minimalny. Sposób doboru sekcji jest analogiczny jak w przypadku uzwojeń multifilarnych. Charakterystyka przedstawiona na rys.5.6b jest charakterystyką błędu amplitudowego uzwojenia dwuwarstwowego, w którym druga warstwa została przesunięta o 5 zwojów. Dzięki temu natąpiło lepsze wyrównanie parametrów uzwojeń i tym samym wartości błędów są ok. dwukrotnie mniejsze w porównaniu z uzwojeniem jednowarstwowym. Liniową charakterystykę błędów posiada uzwojenie falowe sekcjonowane przedstawione na rys.5.5c. Przewody uzwojenia skupia się w cewkach rozłożonych na obwodzie i po nawinięciu kilku warstw w cewce. Równocześnie wszystkie przewody przeprowadza się do następnej cewki, nawijając ją w sposób uporządkowany, tj. tak, by w każdej warstwie przewody były ułożone wg kolejności ich numerów. Łącząc, jak to wynika z rys.5.5c, wszystkie przewody szeregowo, z wyjątkiem oznaczonego numerem sześć, stanowiącego jedno uzwojenie porównawcze, otrzymuje się przekładnię 1:10 z błędem tego samego rzędu lub mniejszym jak w przypadku łączenia sekcji uzwojenia multifilarnego.

Uzwojenie falowe można wykonać również z wiązki mutlifilarnej - uzwojenie multifilarne falowe (jedno lub dwuwarstwowe). Ten typ uzwojenia charakteryzuje się lepszym wyróznaniem parametrów i tym samym mniejszym rozrzutem błędów.

5.1.3. Uzwojenia szynowe

Jeżeli natężenie jednego z porównywanych prądów jest większe od kilkudziesięciu amperów, to LKP musi posiadać uzwojenie szynowe - szynę przenikającą przez okno ekranu magnetycznego. Wymiary przekroju poprzecznego szyny zależą od nominalnego natężenia prądu. Duża wartość tego natężenia prądu powoduje powstanie w otoczeniu MKP pół magnetycznych. Szczególnie szkodliwe są pola nieostowe, tzn. takie, których linie pół nie tworzą okręgów centrycznych z osią szyny i magnetowodu. Pola takie działają na magnetowód i wskutek istnienia niejednorodności pereancji powodują indukowanie się napięć w uzwojeniu detekcyjnym. Wpływ tych pół można zmniejszyć przez właściwe ekranowanie oraz przez oddalenie końcó-

- 80 -

wek szyny od magnetowodu. Drugie uzwojenie porównawcze powinno być wykonane jednowarstwowo na całym obwodzie toroidu. W ten sposób można zrealizować MKP o jednej przekładni zwojowej. Dla kilku przekładni zwojowych w uzwojeniu należy wykonać odczepy. Wtedy uzwojenie porówawcze dla dużych przekładni obejmuje tylko część drogi strumienia, co jest powodem znacznego wzrostu błędu. Błąd ten można zmniejszyć nawijając na ekranie z magnetwowodem dwa uzwojenia przesunięte względem siebie o kąt X. Wyprowadzenia odczepów tych uzwojeń są również przesunięte względem siebie o kąt X. Lącząc je równolegle dzięki wyrównaniu parametrów otrzymuje się zmniejszenie błędów JKP. O ile w przypadku uzwojeń multifilarnych lub falowych można było na podstawie pomiarów błędów międzysekcyjnych oszacować błąd porównania prądów o stosunku natężeń 1:n, to w przypadku MKP z uzwojeniem szynowym takiej możliwości nie ma. Dlatego błędy takiego MKP należy wyznaczyć w procesie wzorcowania, przy użyciu MKP wzorcowego.

5.2. Uzwojenia kompensacyjne

Z zależności (1.2) po przekształceniu otrzymano:

$$\frac{N_{1}I_{1}}{N_{2}I_{2}} = 1 + \frac{N_{K}I_{K}}{N_{2}I_{2}} = 1 + \varepsilon$$
 (5.2)

Jeżeli natężenia porównywanych prądów zmieniają się np. w granicach od $0...I_{2N}$, gdzie I_{2N} - nominalny prąd uzwojenia porównawczego N_2 , to w celu otrzymania prostej postaci wyniku, nie wymagającej przeliczen, należy zapewnić proporojonalność: $I_K = K_K o_1 I_2$. Oznacza to, że wraz ze wzrostem prądu I_2 , prąd I_K będzie wzrastał o_1 - krotnie, dla toj samej nastawy K_K . Stosunek liczb zwojów N_K/N_2 , oznaczony przez o_2 , może być stałym współczynnikiem proporcjonalności lub zmiennym - odpowiadającym zmianie nastwy K_{K} . Stąd stan kompensacji będzie realizowany w układzie przedstawionym w postaci schematu blokowego na rys.5.7.



Rys.5.7. Schemat blokowy układu kompensacji w MKP

W MKP stałych stan kompensacji można osiągnąć przez zmianę natężenia prądu I_K lub liczby zwojów N_K. W MKP zmiennych wymagana jest zmiana obu składowych siły magnetomotorycznej I_KN_K: amplitudowej i kątowej względem siły magnetomotorycznej I₂N₂.

5.2.1. Układ kompensacji w MKP zmiennych

W układzie kompensacji sił magnetomotorycznych w MKP zmiennych, przedstawionym schematycznie na rys.5.8, prąd I_2 płynie przez opornik R,



powodując na nim spadek napięcia U_R . Spadek ten wymusza poprzez dwójnik $G_K - C_K$ (dekada pojemnościowa i przewodnościowa) przepływ prądu I_K przez uzwojenie kompensacyjne N_K . Jeżeli $N_K = N_2$, to:

$$\mathbf{\hat{t}} = \frac{\mathbf{I}_{\mathbf{K}}}{\mathbf{I}_2}$$
(5.3)

Rys.5.8. Schemat układu kompensacji

w MKP zmiennych

Przyjmując, że $|I_{K}N_{K}| \ll |I_{2}N_{2}|$ i rezystancja uzwojeń kompensacyjnych R_K = 0, oraz że spełnione są warunki $\frac{1}{C_{K}} \rightarrow R$, $\frac{1}{20C_{K}} \sim R$, to:

$$\mathbf{I}_{K} \stackrel{\text{d}}{=} \mathbf{I}_{2} \mathbf{R} \left(\mathbf{G}_{K} + \mathbf{j} \boldsymbol{\omega} \mathbf{C}_{K} \right)$$
 (5.4)

Stad:

$$\boldsymbol{\ell} = \mathrm{RG}_{\mathrm{K}} + \mathbf{j}\boldsymbol{\omega}\,\mathrm{RC}_{\mathrm{K}} \tag{5.5}$$

Z zależności (5.5) wynika możliwość bezpośredniego odczytu składowych amplitudowej i kątowej: dla R = $10^{-n}\Omega$ oraz ustalonej częstotliwości wartości składowych & odczytuje się bezpośrednio na dekadzie przewodnościowej i pojemnościowej (skalę wartości C_w należy pomnożyć przez ω).

Dla typowych wartości składowej kątowej (max. 10^{-3}) pojemności C_K są rzędu dziesiątków μF - przyjmują wartości niepraktyczne. Frudność tę można częściowo wyeliminować rozdzielając uzwojenia kompensacyjno (oddzielnie dla każdej składowej I_K)i zwiększając liczbę zwojów uzwojenia, do którego doprowadza się składową kątową, np. o rząd. Jednak w tym przypadku wzrasta wpływ rezystencji uzwojenia na wartość prądu. Prawidłowym rozwiązaniem jest zastosowanie przetworników U/I o nastawianych transmitancjach K_1 oraz K_2 , przy czym składową kątową otrzymuje się doprowadzając sygnał do przesuwnika fazy, o opóźnieniu kątowym $\pi/2$. Schemat blokowy takiego rozwiązania przedstawiono na rys.5.9, przy czym na rysunku rozdzielono uzwojenie kompensacyjne na dwa uzwojenia, do których doprowadzono odpowiednie składowe prądu I_K .

Dla stanu kompensacji sił magnetomotorycznych w MCP zniennych, zakładając N₂ = N_{K1} = N_{K2}, otrzymano:

 $\mathbf{E} = \mathbf{K}_1 + \mathbf{J}\mathbf{K}_2$



Nys.5.9. Schemat blokowy elektronicznego układu kompensacji

5.2.2. Układ kompensacji w MKP stałych

Stan kompensacji sił magnetomotorycznych w MKP stałych można osiągnąć w sposób analogiczny jak w EKP zmiennych. Jednak lepszym rozwiązaniem jest zmiana siły magnetomotorycznej poprzez zmianę liczby zwojów uzwojenia N_K. W tym celu uzwojenie to wykonuje się jako multifilarne 10-sekcyjne. Do koucówek sekcji uzwojenia doprowadza się prądy wymuszając odpowiadające tym prądom przyrosty siły magnetomotorycznej. Końce sekcji doprowadzono równolegle do styków czterech przełączników rozwiązanie takie, przedstawione na rys.5.10, opisano w pracy [36].

Dla układu przedstawionego na rys.5.10 równanie kompensacji przyjmuje postać:

liczba zwojów w sekcji.

$$I_{1}N_{1} = I_{2}N_{2} + mI_{K1}N_{K} + nI_{K2}N_{K} + pI_{K3}N_{K} + qI_{K4}N_{K}$$
(5.7)

gdzie:

Stad:

$$\frac{I_1N_1}{I_2N_2} = 1 + \frac{mI_{K1}N_K}{I_2N_2} + \dots + \frac{qI_{K4}N_K}{I_2N_2} = 1 + 8$$
(5.8)

Rys.5.10 Sohemat układu kompensacji MKP stałych

Przyjęto, że graniczna względna różnica sił magnetomotorycznych $s_{g} = 0,01$: stud dla m = n = p = q = 1:

$$\frac{I_{K1}N_{A}}{I_{2}N_{2}} = 0,001$$

$$\frac{I_{K4}N_{K}}{I_{2}N_{2}} = 0,000001$$

(5.9)

Ze względu na możliwość snmowzowcowanie uzwojeń kompenskej jnych (omówioną w rozdziale 6) należy przyjąć $N_K = N_2$ lub $N_K = N_2$. Ula pierwszego przypadku oraz m = n = p = q = 10

1_{K1} = 0,01 1₂

 $I_{K4} = 0,00001 I_2$ (0.10)

Symsgany stosunek natężeń prądów zapewniają dzielniki prądowe $R-R_1$, $R-R_2$, $R-R_3$ oraz $R-R_4$, widoczne na rys.5.10.

wadą przedstawionego rozwiązania jest wpływ rezystancji uzwojenia na podział prądu, ponieważ wraz ze zmianą położenia styku na przełączniku zmienia się rezystancja uzwojeń, połączona szeregowo z rezystancjami R_1, R_2, \dots Wadę tę można wyeliminować, włączając synchronicznie, wraz ze zmianą numeru sekcji opornik o rezystancji jednej sekcji uzwojenia. Rozwiązanie takie opisano w pracy [52], gdzie przedstawiono również inne metody wyeliminowania błędów, mających swe źródło w uzwojeniach kompensacyjnych.

5.3. Uzwojenia tłumiące

Nawinięcie zwartego uzwojenia na ekranie magnetycznym w MKP stałych wprowadza dwa efekty:

 umeżliwia bezpieczną, skokową zmianę prądu w uzwojeniach porównawczych,

- powoduje tzw. ekranowanie wewnętrzne.

W czasie załączania lub wyłączania prądu w uzwojeniach porównawczych wskutek np. różnych stałych czasowych obwodów prądowych lub różnych właściwości dynamicznych źródeł prądowych chwilowa wypadkowa siła magnetomotoryczna może osiągnąć wartości zbliżone do I_2N_2 , wymuszając tym samym odpowiednio duży strumień. Zmiana strumienia powoduje indukowanie się w uzwojeniach porównawczych impulsów napięciowych, które mogą osiągnąć wartości wystarczające do uszkodzenia izolacji. Nawinięcie na ekranie magnetycznym uzwojenia zwartego, obejmującego taki sam strumień magnetyczny jak uzwojenie porównawcze, skutecznie zmniejsza do wartości bezpiecznej impulsy mapięciowe. Prąd płynący wówczas w uzwojeniu żwartym wywoływuje strumień przeciwnie skierowany do strumienia związanego z chwilową siłą magnetomotoryczną e takiej wartości, że wypadkowy strumień jest w przybliżeniu równy zeru. Wyjaśnienie drugiego efektu związanego z uzwojeniem tłumiącym wymaga rozpatrzenia obwodów magnetycznych detektora ekranu. Magnetowody detektora można zastąpić jednym magnetowodem o permeancji Λ_m , któremu przyporządkowano zmienny strumień magnetyczny równy różnicy strumieni w obu magnetowodach – Φ_{DW} . Strumień ten obejmują uzwojenia porównawcze, w których indukują się napięcia (napitcie indukujące się np. w uzwojeniu o liczbie zwojów N₂ oznaczono U_{ZW}). Pojawienie się dużych (w przypadku dużej liczby zwojów N₁ lub N₂) napięć zmiennych w obwodach prądowych może spowodować np. niestabilną pracę źródeł prądoczych lub ich uszkodzenie oraz zmniejszenie czułości MKP stałych. Materiał magnetyozny ekranów można również zebrać w jeden magnetowód o permeancji Λ_e w sposób przedstawiony na rys.5.11, przy czym na rysunku uwzględniono tylko uzwojenie porównawcze (N₂).

wypadkowy magnetowód ekranu (A.)



Pod wpływem strumienia D_{DW} w uzwojeniu tłumiącym płynie prąd wymuszający strumicń Φ_{DZ}. Napięcie indukujące się w uzwojeniu N₂ jest proporcjonalne do różnicy strumieni:

Rys.5.11. Uproszczony schemat obwodów magnetycznych i uzwojeń MKP stałych

U'_W = P (+ DW - + DZ)

(5.11)

Stąd napięcie indukujące się w uzwojeniach porównawozych jest znacznie mniejsze, ponieważ zmniejszeniu ulega wypadkowy strumień przenikający te uzwojenia.

To efektywne zmniejszenie etrumienia naswano ekranowaniem wewnętrznym, w odróżnieniu od ekranowania zewnętrznego (od zewnętrznych pół magnetyoznych). Miarą jakości tego ekranowania jest stosunek napięć indukująoych się w jednym z uzwojeń porównawczych przed i po zwarciu uzwojenia tłumiącego:

(5.12)

Przebadano, w modelu wykonanym wg rys.5.11 zależność współczynnika ekranowania wewnętrznego od etosunku modułów permeancji $|\Lambda_{\rm e}|/|\Lambda_{\rm m}|$ oraz od liczby zwojów uzwojenia tłumiącego. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys.5.12.





Z przeprowadzonych pomiarów wynikają wnioski dotyczące konstrukcji MKP stałych, Istotnym wnioskiem jest stwierdzenie, że dla $|\Lambda_{e}|/|\Lambda_{m}| > 1$ współczynnik ekranowania jest w przybliżeniu stały. Jak widać z rys.5.11, uzwojenie tłumiące jest wtórnym uzwojeniem wypadkowego magnetowodu detektora (A_m) oras pierwotnym uzwojeniem magnetowodu ekranu (A.): dla tego uzwojenia magnetowód ekranu jest dławikiem.

Impedancja dławika zależy od liczby zwojów, od której zależy również prąd I., Jak z tego wynika, związki pomiędzy tymi wielkościami są dosyć złożone i można je, ze względu np. na początkowe nieliniowości oharakterystyk magnesowania oszacować tylko w sposób jakościowy. Zwiększenie masy materiału magnetycznego ekranu powoduje zmniejszenie prądu I., jednak w taki sposób, że wypadkowy strumień, a tym samym napięcie określone zależnością (5.11) pozostaje niezmienione. Oczywisty jest wpływ rezystencji uzwojenia na współczynnik ekranowania wewnętrznego. Dobór właściwych parametrów uzwojenia tłumiącego (liczby zwojów N.,, rezystancji R,) jest istotnym problemem podczas realizacji LEAP stałych. Zwiększenie liczby zwojów uzwojenia tłumiącego N_t oraz zmnicjszcnie jego rezystancji R. poprawia wprawdzie jakość ekranowania wewnętrznego ale zwiększa stałą czasową MKP stałych. Po skokowej zmianie np. w uzwojeniu kompensacyjnym siły magnetomotorycznej wartość skuteczna napiecia drugiej harmonicznej rośnie w przybliżeniu wykładniczo: stała czasowa narastania tego napięcia w MKP z rozwartym uzwojeniem tłumiącym jest rzędu 0,1 - 3 sekund, ze zwartym - rzędu (10 - 50) sekund. Ma to istotne znaczenie w przypadku, gdy MAP stałych pracuje np. w układzie automityoznego sterowania źródłami prądowymi.

5.4. Uzwojenia komparatorów kriogenicznych

Sposób wykonania uzwojeń zależy od wzajemnego usytuowania S_UID-u ekranu oraz uzwojeń. W pracach [11], [12], [80] opisano MKP kriogeniczny, przedstawiony na rys.5.13, o konstrukcji analogicznej do konstrukcji klasycznych MKP.

Uzwojenie detekcyjne nawinięte jest na magnetowodzie 5 o dużej wartości permeancji, umieszczonym w ekranie kriogenicznym. Ma ekranie nawinięte są uzwojenia porównawcze, przy czym dzięki właściwościom ekranu kriogenicznego ich technologia nie musi spełniać wymagań stawinnych uzwojeniom MKP klasycznych. Uzwojenie detekcyjne jest zwarte poprzez pętlę

- 89 -



2 sprzężoną magnetycznie ze SOUID-em 1.

Rys. 5.13. Komparator kriogeniczny Grochmana



Inna konstrukcję uzwojeń przedtsawioną na rys.5.14, opisano w pracach [14]. Uzwojenie 5 nawinięte jest na magnetowodzie 3, umieszczonym w kriogenicznym ekranie. Prądy stron wewnętrznej i zewnętrznej ekranu przepływaja przez przewód 2, sprzężony ze SQUID-em, przy

Rys. 5.14. Komparator Kriogeniczny Harvey'a

czym rozpływ prądu na powierzchni ekranu nie zależy od położenia przewodu wewnątrz ekranu. Jeżeli siły magnetomotoryczne uzwojenia 5, odpo-

- 90 -

wiednio połączonych sekcji 6 uzwojenia, są sobie równe i skierowane przeciwnie, magnetyczne pole wewnątrz ekranu jest równe zeru i prąd przez przewód 2 nie płynie. Niedokładność porównania prądów w przedstawionej konstrukcji jest rzędu 10⁻⁹, natomiast wypadkowy szum, wyrażony w jednostkach siły magnetomotorycznej, jest mniejszy od 10⁻⁹A.



Rys.5.15. Komparator kriogeniczny Sullivana i Dziuby

W pracach [84], [85] opisano MKP kriogeniczny, przedstawiony na rys.5.15, w którym SQUID 4, umieszczono w płaszczyznie uzrojeu 3, znajdujących się w nadprzowodzącym ekranie. Błędy wykonanych i ofisanych tam MKP kriogenicznych są mnicjsze od 5.10⁻¹⁰.

Przedstawione MKP kriogeniczne znajdują zastosowanie miely innymi w laboratoriach NML, NBS, w układach porównujących napiscie wzorca Josephsona ze spadkami napięcia na rezystancyjnych dzielnikach kriogenicznych. Wówczas wszystkie elementy układu (komparator, dzielnik i wzorzec Josephsona) umieszczone są w jednym kriostacie.

- 91 -

6. WZORCOWANIE MKP

6.1. Metody wzorcowania

W rozdziałe 4 wykazano, że najistotniejsze znaczenie z punktu widzenia metrologicznego posiada błąd związany z uzwojeniami porównawozymi. Jeżeli w obu uzwojeniach wymusi się tę samą siłę magnetomotoryczną 0, to w wyniku istnienia tego błędu pojawia się na wyjściu detektora napięcie U_{D0}. Miarą błędu jest siła magnetomotoryczna Θ_{δ} ; jaką należy wymusić w jednym z uzwojeń porównawczych lub w uzwojeniu dodatkowym, aby napięcie U_D było równe zeru. Problem jest prosty, gdy przekładnica zwojowa MKP jest równa 1:1: wtedy wyzkaczenia błędu dokonuje się metodą samowzoroowania: [5], [25], [54], [61], [65]. W przypadku przekładni większych od jedności wzorcowania można dokonać w jednym z układów opisanych w pracach [44], [65], [89], wykorzystujących MKP wzoroowe o znanych błędach. Grupę tych metod wzorcowania nazwano metodami bezpośredniego wzoroowania. Wadą tych metod jest konieczność posiadania MKP wzorcowego.

whether points in the standards, at white the strength

Innym sposobem jest połączenie szeregowo równolegle sekoji uzwojeń porównawczych. Ze względu na analogię do transferu rezystancyjnego metodę nazwano metodą transferu prądowego.

6.2. Metoda samowzoroowania MKP

Samowzoroowania MKP można dokonać w jednym z trzech podstawowych układów, przedstawionych na rys.6.1.

Najprostszym sposobem realizacji metody samowzorcowania MKP jest wymuszenie w obu uzwojeniach tej samej siły magnetomotorycznej 🖲 = I₁N₁ = = I₂N₂. Wtedy detektor symbolicznie zaznaczony na rys.6.1a wskaże napiecie błędu Upa-



Rys.6.1. Schematy ilustrujące metody samowzorcowania: napięcia błędu -(a), bocznikowania uzwojenia porównawczego - (b), uzwojenia dodatkowego - (o)

Zakładając stałość czułości dla 🛛 🚆 O należy obliczyć odpowiadającą napięciu U_{Def} siłę magnetomotoryczną 💁 :

Względny błąd MKP wyznacza się z zależności:

(6.2)

(6.1)

Samowzorcowanie zrealizowane w przedstawionym układzie jest poprawne dla stałej czułości. Warunek ten jest spełniony w MCP zmiennych, gdzie dla 🛛 📽 O, przyrostom siły magnetomotorycznej odpowiadają proporcjonalne przyrosty napięcia U_D.

Jednak metoda ta umożliwia tylko wyznaczenie modułu błędu. Natomiast w przypadku MKP stałych charakterystyki U_{2h} lub U_W w funkcji w mykazują w otoczeniu zera silną nieliniowość: stąd stosowanie tej metody daje fałszywe wyniki. w sposób przedstawiony na rys.6.1b. Wtędy dla N₁ = N₂:

$$I_1 = I_2 - I_0$$
 (6.3)

Stad

$$\frac{I_1}{I_2} = 1 - \frac{I_d}{I_2}$$
(6.4)

Metodę tę można zastosować zarówno dla MKP zmiennych, jak i stałych. Wyznaozenie składowych prądu I wymaga wymuszenia tych składowych przez rezystancję lub konduktancję oraz przez pojemność. Schemat ideowy takiego układu przedstawiono na rys.6.2. Istotną rolę odgrywa tu układ



ziemi Wagnera (Z.W.), za pomocą którego ustala się potencjał punktu A. Dla zerowego wskazania detektora D_2 spadki napięcia na rezystancji R oraz na konduktancji G_K i pojemności C_K są takie same. Wtedy prądy są równe:

Hys.8.2. Schemat ideowy układu samowzorcowania MKP zmiennych metodą bocznikowania uswojenia

$$I_{c} = I_{2}RG_{K}; \qquad I_{c} = j\omega I_{2}RC_{K} \qquad (6.5)$$

Zgodnie z zależnością (6.4) dla zerowego wskazania detektora D₁ błąd jest równy:

$$v_{\rm K} = {\rm RG}_{\rm K} + j\omega {\rm RC}_{\rm K}$$
 (6.6)

Metoda ta pozwala na wyznaczenie składowych błędu MKP zmiennych. Można ją stosować również dla MKP stałych. Wtedy układ nie posiada gałęzi pojemnościowej i tym samym proces równoważenia układu jest prostszy.

W rozdziałe 4 wskazano na prądy pojemnościowe i konduktancyjne doziemne i międzyuzwojeniowe jako na jedno ze źródeł błędu MKP, modelując je w postaci elementów skupionych. W rzeczywistości są to wielkości rozłożone nierównomiernie na długości uzwojenia. Stąd prądy pojemnościowe i przewodnościowe zależą od potenojałów konkretnych zacisków uzwojeń porównawczych. Dlatego odtwarzalność układu i powtarzalność wyników pomiarowych wymaga wprowadzenia oznaczeń zacisków: można wtedy mówić o zaciskach znaczonych. tj. takich, których potencjał w układzie pomiarowym powinien być równy zeru.

Szeroko stosowaną metodą samowzorcowania zarówno w KKP stałych, jak i zmiennych jest metoda dodatkowego uzwojenia. W MKP wykorzystuje się wtedy uzwojenia kompensacyjne (N $_{0}$ = N_K): układy kompensacji są podobne do układów przedstawionych na rys.5.8 lub 5.10. Schemat takiego układu umożliwiającego pomiar składowych błędu we wszystkich czterech ćwiartkach płaszczyzny zespolonej przedstawiony jest na rys.6.3. W przypadku MKP z rozdzielonym uzwojeniem kompensacyjnym nie ma potrzeby stosowania autotransformatora umożliwiającego w przedstawionym układzie odwrócenie fazy składowych prądów.

W MKP przedstawionym na rys.6.3 zaznaczono ekrany magnetyczne (EN). Błąd MKP jest równy:

- 95 -

 $\delta_{\rm K} = \frac{M_{\rm K}}{N_{\rm O}} \left({\rm RG}_{\rm K} + j \omega {\rm RC}_{\rm K} \right)$



Do wyznaczenia

(6.7)

błędu można wykorzystać elektroniczny układ kompensacji, przedstawiony w postaci schematu blokowego na rys.5.9: opornik R można włączyć w taki sposób, by możliwe było uziemienie zacisków znaczonych.

Rys.6.3. Schemat układu wyznaczania błędu MKP zmiennych metodą dodatkowego uzwojenia



Rys.6.4. Schemat układu wyznaczania błędu LKP stałych metodą dodatkowego uzwojenia W MKP stałych wyznaczenie błędu jest znacznie prostsze – wystarczy zmierzyć np. za pomocą amperomierza natężenia prądów przepływających przez uzwojenia porównawcze oraz uzwojenia kompensacyjne w stanie kompensacji sił magnetomotorycznych. Układ przedstawiono w postaci schematu ideowego na rys.6.4, przy czym detektor został zaznaczony w sposób symboliczny, pominięto również ekrany magnetyczne. Dla zerowego wskazania detektora D, przez uzwojenie kompensacyjne płynie prąd I, Wtedy:

$$S_{\rm K} = \frac{I_{\odot} N_{\rm K}}{I_{\rm N_1}}$$

(6.5)

Pomiar natężeń prądów może być wykonany z niedokładnością rzędu 10⁻².

6.3. Metoda bezpośrednia wzorcowania MAP

Metoda ta polega na porównaniu błędów MKP badanogo i wzorcowego o znanych błędach. Najprościej można zrealizować układ porównujący błędy MKP o jednakowych przekładniach - 1:n. Schemat takiego układu przedstawiono na rys.6.5.



Rys.6.5. Ilustracja metody bezpośredniego wzorcowania LNP o przekładni 1:n

LEEP wzorcowy dla stanu, gdy napięcie na wyjściu detektora jest równe zeru(U_D = 0), charakteryzuje się błędem \hat{U}_{KW} . Należy więc ustalić natężenie prądu I_D w taki sposób, by napięcie $U_D = 0$, wtedy prądy doprowadzone do uzwojeń MKP badanego wymuszają siły magnetomotoryczne, których względna różnica jest równa σ_{KW} . W wyniku różnego od σ_{KW} błędu MKP badanego napięcie $U'_D = 0$. Należy więc doprowadzić do uzwojeń taki prąd I, by napięcie U'_D było równe zeru. Wtedy błąd MKP badanego jest równy:

$$\delta_{K} = \delta_{KW} + \frac{1}{I_{2}} \delta_{KW}$$
 (6.9)

Sposób wymuszenia odpowiedniego prądu I przedstawiono na rys.5.6. Uwzględniając zależność (6.6) otrzymano:

$$\boldsymbol{\delta}_{\mathrm{K}} = \boldsymbol{\delta}_{\mathrm{KW}} + \mathrm{RG}_{\mathrm{K}} + \mathbf{j}\boldsymbol{\omega}.\mathrm{RC}_{\mathrm{K}}$$
(6.10)

Istotną rolę odgrywają w układzie zaciski znaozone, których potencjały w czasie pomiaru muszą być równe zeru.

bysponując dwoma MKP wzorcowymi, o przekładniach zwojowych równych 1:n oraz 1:m, można wyznaczyć błędy MKP badanego o przekładni 1: (m + n), w układzie sumującym, przedstawionym na rys.6.6.



Rys.6.6. Sohemat układu sumującego wzoroowania MEP

- 99 -

Prąd I₂ wpływający do uzwojenia MKP badanego o liczbie zwojów N₂ jest sumą prądów I_{2n}+|I_{2m}. Dla zerowego wskazania detektorów D₁ oraz D₂ prądy te w porównaniu z prądem I₁ są obciążone błędami MKP wzorcowych - δ_{Kn} oraz δ_{Kn} . Z kolei wskazanie detektora D₃ równe zeru otrzymuje się dla pewnego prądu I₆. Stąd względny błąd MKP badanego jest równy:

$$\delta_{K} = \frac{I_{\delta}}{I_{2}} + \frac{\delta_{Kn} I_{2n}^{N_{2n}} + \delta_{Kn} I_{2n}^{N_{2n}}}{I_{2}N_{2}}$$
(6.11)

Z analiz, schematu na rys.6.6 wynika, że w układzie nie można uziemić wszystkich zacisków znaczonych.

Błędy MKP o dużej wartości przekładni (np. MKP z uzwojeniem szynowym) można wyznaczyć w układzie kaskadowym, wymagającym, podobnie jak w poprzednim przypadku, dwóch MKP wzorcowych o przekładniach i:n oraz 1:m. Schemat ideowy układu przedstawiono na rys.6.7.



Natężenia prądów I = I m, I 2m oraz I 2n należy tak ustalić, aby napigeia na wyjściu detektorów MAP wzorcowych były równe zeru, Wówczas stosunck nateżel pradów I in/I 2n jest okre-Slony z błydem dent pradów I 10/I 2m - z blyden dama. Dla takiego stanu układu, zmieniając wartość prądu I , należy sprowadzić wskazanie de-

Rys.6.7. Schemat układu kaskadowego wzorcowania LKP

tektora do zera.

Błąd MKP badanego jest równy:

$$\vartheta_{\rm K} = \vartheta_{\rm KW1} + \vartheta_{\rm KW2} + \frac{{\rm I}_{\vartheta}}{{\rm I}_2}$$
 (6.12)

Realizacja obu układów sumującego i kaskadowego wymaga trzech niezależnych źródeł zasilania o bardzo dużej stabilności. Układy te zostały opisane w pracach [27], [54] i innych, ale nie podano tam sposobu rozwiązania obwodów zasilających. Natomiast w pracy [65] podano, że prawidłowa realizacja układu kaskadowego wymaga wysoko stabilnych Zródeł prądowych, wysoko stabilnych źródeł napięciowych oraz 6 wskaźników zera, określających jednocześnie stan równowagi układu. Realizacja takiego układu jest praktycznie niemożliwa.

6.4. Letoda transferu pradowego

Transfer prądowy [48] jest odmianą MKP, posiadającego dwa uzwojenia wykonane jedną wiązką multifilarną. Z wiązki tej wybiera się w sposób opisany w rozdziale 5.1.1 jedną sekcję stanowiącą jedno uzwojenie. Drugie uzwojenie tworzą pozostałe sekcje łączone równolegle lub szere-



Rys.6.8. Schemat uzwojeń porównawczych transferu prądowego gowo w sposób przedstawiony na rys.6.8.

Przyjmując, że prąd I₂ doprowadzony do uzwojeń o liczbie zwojów N₂ jest prądem nie zmieniającym się, siłę magnetomotoryczną I₂N₂ można traktować jako wielkość odniesienia. Równanie sił magnetomotorycznych w przypadku połączenia szeregowego sekoji ma postać:

$$0 I_1 N_2 = I_2 N_2,$$
 (6.13)

dla równoległego:

$$I_1 N_8 = I_2 N_2$$
 (6.14)

Liczby zwojów w każdej sekcji (N_g) są równe liczbie zwojów uzwojenia odniesienia (N_2) , stąd dla połącząnia szeregowego:

101 -

$$I_1 = 0, 1 I_2$$
 (6.15)

równoległego:

$$I_1 = I_2$$
 (6.16)

Zmieniając kombinację połączenia sekcji dla tej samej siły magnetomotorycznej odniesienia I₂N₂ stan równości sił magnetomotorycznych otrzymuje się dla doprowadzonych do uzwojeń prądów o natężeniach różniących się o rząd. Właściwość ta jest pewną analogią do zmiany rezystancji o dwa rzędy w przypadku kombinacji szeregowej i równoległej dziesięciu oporników: narzędzie pomiarowe realizujące te połączenia nazwano transferem rezystancyjnym. W przypadku transferu rezystancyjnego względny błąd wynikający z rozbieżności wartości łączonych oporników dla obu kombinacji połączeń jest w przybliżeniu taki sam.

W przypadku transferu prądowego każdej n-tej sekcji uzwojenia multifilarnego przyporządkowano indukcyjność główną L_o oraz rozproszenia L_{ns}:

$$L_n = L_0 + L_{ns} \tag{6.17}$$

Dla połączenia szeregowego wypadkowe indukcyjności główne oraz rozproszenia są równe:

$$L_{o}(sz) + L_{s}(sz) = 10 L_{o} + \sum_{n=1}^{10} L_{ns}$$
 (6.18)

Stąd błąd względny wynikający z indukcyjności rozproszenia dla połącze-

nia szeregowego sekoji jest równy:

$$L_{(sz)} = \frac{L_{s(sz)}}{L_{o}(sz)} = 0, 1 \qquad \sum_{n=1}^{10} \frac{L_{ns}}{L_{o}} = 0, 1 \qquad \sum_{n=1}^{10} \mathcal{S}_{L_{ns}}$$
(6.19)

gdzie:

 O_L - błąd względny n-tej sekcji wynikający z indukcyjns
 ności rozproszenia.

Indukoyjność wypadkowa dla połączenia równoległego sekcji jest równa:

$$\frac{1}{\frac{1}{L_{o}(r) + L_{s}(r)}} = \sum_{n=1}^{10} \frac{1}{\frac{1}{L_{o}(1 + \frac{L_{as}}{L_{o}})}}$$
(5.20)

Po rozwinięciu stron równania w szereg:

$$\frac{1}{L_{o}(\mathbf{r})} (1 - \vartheta_{L}(\mathbf{r}) + \vartheta_{L}^{2}(\mathbf{r}) - \ldots) = \frac{10}{L_{o}} - \frac{1}{L_{o}} \sum_{n=1}^{10} \frac{L_{ns}}{L_{o}} + \frac{1}{L_{o}} \sum_{n=1}^{10} \left(\frac{L_{ns}}{L_{o}}\right)^{2} - \ldots \quad (6.21)$$

Otrzymano:

$$\delta_{L(r)} = 0, 1 \sum_{n=1}^{10} \delta_{ns}$$
 (6.22)

Stąd względne błędy wynikające z indukcyjności rozproszenia dla kombinacji szeregowej oraz równoległej sekcji uzwojenia są sobie równe.

Właściwość ta została wyprowadzona dla połączenia szeregowo równoległego dziesięciu sekcji. Jest ona jednak słuszna dla dowolnej liczby sekcji n.

Przypadek n=10 jest interesujący z punktu widzenia wzorcowania LXP, gdzie wzorcowanie LXP o przekładni zwojowej 1:10 może być przeprowadzone (dla równoległego połączenia sekcji) metodą samowzorcowania w jednym z układów omówionych w rozdziale 6.2 dla przekładni zwojowej 1:1. Wynik pomiaru błędu jest jednocześnie błędem MKP w przypadku połączenia szeregowego sekcji multifilarnego, a więc dla przekładni 1:10. Należy zauważyć, że wzorcowanie MKP o przekładni zwojowej 1:10 metodami opisanymi w rozdziale 6.3 (bezpośrednią oraz sumującą) wymaga zastosowania sześciu MKP wzorcowych, o przekładniach: 1:1, 1:1, 1:2, 1:2, 1:4 oraz 1:4 i realizacji pięciu układów pomiarowych. Metoda przełączenia szeregowo – równoległego sekcji wymaga realizacji jednego układu i nie wymaga MKP wzorcowego.

Przedstawiona metoda jest słuszna, przy założeniu, że źródła błędu są niezależne od wartości natężenia pola magnetycznego, nierównomiernego rozpływu prądu w sekcjach w połączeniu równoległym oraz od zmiany potencjału końcówek sekcji uzwojenia. Uwzględniając jednak, że w stanie równości sił magnetomotorycznych przenikalność magnetyczna jest stała, równa początkowej, można przyjąć, że indukcyjności rozproszenia są stałe. Od potencjałów początków i końców sekcji sa zależne, jak wykazano w rozdziale 4.2, prądy doziemne i międzysekcyjne. Zmiana kombinacji powoduje zmianę potencjałów początków i końców, a tym samym zmianę prądów płynących przez admitancje doziemne. Diatego metodę tę można stosować bez zastrzeżeń do wzorcowania MKP stałych, gdzie konduktancje doziemne nie odgrywają istotnej roli.

W przypadku MKP zmiennych należy oszacować, w opurciu o wyniki pomiarów składowych admitancji, błędy metody wynikające ze zmiany potencjałów końcówek sekcji lub określić graniczną częstotliwość stosowania przedstawionej metody przy przyjętoj wartości dopuszczalnego błędu metody. Problem ten jest przedmiotem odrębnego opracowania.

- 103

7. CHARAKTERYSTYKA OBSZARU ZASTOSOWAN MKP

Równocześnie z rozwojem konstrukcji i tedhnologii MKP rozszerzał się zakres ich zastosowań, głównie w metrologii elektrycznej dużych dokładności. Pojawiły się nowe układy pomiarowe z MKP, charakteryzujące się bardzo dobrymi właściwościami metrologicznymi. Również dzięki zastosowaniu MKP w znanych układach poprawiono znacznie właściwości metrologiczne tych układów. Główne zastosowanie MKP przedstawiono w postaci schematu blokowego na rys.7.1.

Zastosowania MKP podzielono na dwie grupy układów: prądów zmieninychi oraz stałych. W grupie zastosowań MKP w układach prądów zmiennych najszerzej znane są układy mostkowe z tzw. transformatorami różnicowymi. Terminem tym nazwano MKP zanim nie przyjęto właściwej nazwy, wynikającej z funkcji komparatora prądów. Przy realizacji MKP stosuje się technologie opracowane w ostatnich latach oraz dodatkowe elementy niestosowane w transformatorach różnicowych, poprawiające dokładność. Stąd, dzięki zastosowaniu takich MKP w znanych konstrukcjach mostków, służąoych do pomiaru składowych impedancji lub wielkości je charakteryzujących (tgđ, Q), zmniejszono ich błąd o 2 - 4 rzędów wartości. Jednocześnie w mostkach tych stosuje się układy aktywne eliminujące źródła błędów, np. eliminujące wpływ rezystancji uzwojeń MKP.

Drugim ważnym zastosowaniem MKP zmiennych są układy służące do sorawdzania przekładników prądowych. Jeżeli prądy stron wtórnej i pierwotnej przekładnika prądowego doprowadzone zostaną do uzwojeń porównawczych MKP, to prąd płynący w uzwojeniu kompensacyjnym przedstawionym na rys.1.1, w stanie kompensacji sił magnetomotorycznych LKP jest proporojonalne do błędu przekładnika prądowego. Siłę magnetomotoryczną wymuszoną w uzwojeniu kompensacyjnym można rozłożyć względem prądu I₂ na dwie składowe: zgodną i prostopadłą, proporcjonalnie do błędu amplitudowego i kątowego. Błędy własne MKP są rzędu 10^{-6} ,.. 10^{-7} , stąd pomiar błędu przekładnika za pomocą MKP nie wymaga wprowadzania do wyniku poprawek, co było cechą dotychczas stosowanych układów wyznaczania błędów przekładników prądowych (np. odpowiedniego uwzględniania błędów przekładnika wzorcowego).



Rys.7.1. Blokowe przedstawienie zastosowań MKP

1KP stałych zastosowano w układach służących do pomiarów rezystancji lub natężenia prądu oraz napięcia, o znacznie lepszych właściwościach od układów, w których elementami nastawnymi są dekady rezystancy jne. Ważnymi podzespołami w tych układach są dwa źródła prądowe pracuisce w systemie STEROWANE - WZORCOWE (SLAVE - MASTER). Žródło WZORCOWE wymusza przepływ prądu w jednym uzwojeniu MKP. W drugim uzwojeniu płynie prąd ze źródła sterowanego sygnałem z detektora stanu kompensacji sił magnetomotorycznych. Zmiana np. liczby zwojów w jednym uzwojeniu powoduje automatyczną zmianę natężenia prądu źródła STEROWA-NE . Takie dwa źródła prądowe sprzężone przez MKP zostały wykorzystane w układzie komparacji rezystancji. Wtedy oba prądy płyną przez komparowane rezystancje, przy ozym jeden z nich zmienia swoją wartość aż do osiagniecia równości spadków napieć na rezystancjach. W komparatorze rezystancji nieważne są wartości natężenia prądu a ważny jest ich stosunek. Jeżeli nateżenie prądu źródła WZORCOWE będzie znane z dużą dokładnością, to natężenie prądu źródła STEROWANE również będzie znane z taką samą dokładnością (pomijając błędy MKP). Wymuszając przepływ tego prądu przez rezystancję otrzymuje się nastawiany za pomocą zmiany liczb zwojów spadek napięcia o wartości obciążonej błędami źródła prądowego oraz rezystancji. Ten nastawny spadek napięcia można wykorzystać do kompensacji napięcia np. SEM ogniw wzorcowych. W podobny sposób realizuje się woltomierze i amperomierze z MKP stałych.

W przedstawionym podziale zastosowań komparatory kriogeniczne umieszczono w grupie MKP stałych, ponieważ ze względów aplikacyjnych istotne są prądy doprowadzone do uzwojeń MKP, a nie sposób detekcji siły magnetomotorycznej. Z opisów literaturowych znane jest zastosowanie MKP kriogenicznych w układach komparacji rezystancji: możliwe jest ich zastosowanie w pozostałych narzędziach pomiarowych wymienionych w grupie zastosowań MKP stałych.

8. ZASTOSOWANIE MKP ZMIENNYCH

8.1. Mostek impedancy iny

Pierwszym mostkiem impendacyjnym z MKP zmiennych był mostek Kühle-Wolscha (1922 r.). Schemat ideowy tego mostka przedstawiono na rys.8.1.



Rys.8.1. Schemat ideowy mostka Kühle-

Wolscha

cia U, przez komparowane impedancje Z_X oraz Z_N płyną prądy równe:

$$I_1 = \frac{U}{Z_X};$$

 $I_2 = \frac{U}{Z_N} \quad (c.1)$

Pod wpływem napię-

zamykające się przez uzwojenia MKP. Detektor D wskaże zero w stanie równości sił magnetomotorycznych:

 $I_1 N_1 = I_2 N_2$

(6.2)

Z porównania zależności (8.1) oraz (8.2) wynika:

$$z_{\rm X} = z_{\rm N} \frac{N_{\rm i}}{N_{\rm o}}$$

(8.3)

Jeżeli:

 $Z_{X} = R_{X} + j X_{X}$ oraz $Z_{N} = R_{N} + j X_{N}$ (8.4) to na podstawie zależności (8.3):

$$R_{X} = R_{N} \frac{N_{1}}{N_{2}}$$
 oraz $X_{X} = X_{N} \frac{N_{1}}{N_{2}}$ (8.5)

Obecnie budowane mostki są jedynie rozwinięciem tej najprostszej idei. Różnica polega na zastosowaniu odpowiedniej konstrukcji 1 technologii podzespołów oraz na zastosowaniu układów elektronicznych spełniających różne funkcje. Elementem nastawczym we współczesnych mostkach są 6-7-dekadowe indukoyjne dzielniki napięcia, [6], [19], [10], [17], [29], [22], [92], umożliwiające doprowadzenie do komparowanych impedancji części napięcia zasilania o wartości nastawianej z błędem rzędu 10⁻⁶...10⁻⁷. Wtedy wzorzeo może być wzorcem jednomiarowym: wzoroe takie można wykonać z mniejszym błędem niż wzorce typu dekadowego. Bezpośrednie połączenie wyjścia dzielnika z impedancją powoduje obciążenie dzielnika - błąd podziału napięcia wtedy wzrasta. Dlatego stosuje się układy aktywne, umożliwiające dodanie do napięcia wyjściowego dzielnika, napięcia równego spadkowi napięcia spowodowanego poborem pradu z dzielnika. Układy te, eliminujące śródła błędu od strony zasilania. są opisane w literaturze [71], [74] i innych, natomiast w dalszej części przedstawione będą tylko układy eliminujące źródła błędów mostka od strony MKP.

Zależności (8.1) ... (8.5) zostały wyprowadzone przy założeniu, że impedancje uzwojeń są równe zeru. W stanie równości sił magnetomotorycznych w MKP zanika strumień magnetyczny: zanika wpływ impedancji magnesującej (modelowanej w postaci gałęzi poprzecznej schematu zastępczego typu T transformatora), ale istnieją impedancje własne uzwojeń składające się z rezystancji uzwojeń, indukcyjności rozproszenia oraz pojemności, wprowadzające efekt obciążenia wewnętrznego, omówiony w

- 108 -
rozdziale 4.2.

Impedancje te są źródłami błędu MKP i jednocześnie mostka. Błędy te można eliminować za pomocą układów elektronicznych dwoma metodami przedstawionymi między innymi w pracy [74] – metodą napięciową oraz prądową.

Uwzględniając impedancje własne uzwojeń prądy płynące przez mierzone impedancje są równe:

$$I'_1 = \frac{U}{Z_X + Z_1}$$
 : $I'_2 = \frac{U}{Z_N + Z_2}$ (0.6)

Zależności (8.6) można przedstawić w postaci różnicy napięć zasilania i spadków napięć spowodowanych prądem płynącym przez uzwojenia:

$$I'_{1} = \frac{U - \Delta U'_{X}}{Z_{X}}$$
; $I'_{2} = \frac{U - \Delta U'_{N}}{Z_{N}}$ (5.7)

Różnica prądów wynikająca z nieuwzględnienia impedancji własnej uzwojeń jest równa:

$$\Delta I_{1} = I_{1}' - I_{1}' = \frac{\Delta U_{X}'}{Z_{X}}$$

$$\Delta I_{2} = I_{2} - I_{2}' = \frac{\Delta U_{N}'}{Z_{N}}$$
(5.8)

Stąd eliminację wpływu impedancji własnej uzwojeń można osiągnąć wprowadzając do uzwojeń MKP dodatkowe prądy o wartościach określonych zależnością (8.8) w sposób przedstawiony na rys.8.2.

Stan równowagi tego mostka jest opisany zgodnie z zależnością (5.7) równaniem:

$$\frac{\mathbf{U} - \Delta \mathbf{U}_{N}'}{\mathbf{z}_{N}} N_{2} = \left(\frac{\mathbf{U}}{\mathbf{z}_{X}} + \mathbf{I}_{d}\right) N_{1}$$
 (5.9)

Równanie to sprowadza się do zależności (8.3), jeżeli spełniony jest warunek:

$$\frac{-\Delta U_{\rm N}'}{Z_{\rm N}} N_2 = I_{\rm d} N_1 \tag{8.10}$$



itys.5.2. Ilustracja metody prądowej eliminacji wpływu impedancji własnej uzwojeń LKP,

 $\frac{K \Delta U_{d}^{f}}{Z_{d}} \text{ oraz przyjmując } K = -1 \text{ warunek (8.10)}$ jest spelniony dla:

$$z_d = z_N - \frac{N_2}{N_1}$$
 (8.11)

Z saleznosci (5.11) wynikają następujące ograniczenia przedstawionej metody eliminacji upływu impedancji własnej uzwojen:

- přídí l_d može byč přídem wprowadzoným jedynie do uzwojenia 10.¹ połączonego z impedanoją Z_X, przy ozym wzorzec (Z₁)musi być wzorcem jednomiarowym; stosunek liczb zwojów uzwojenia LKP - N₂/N₁ musi być stały; zmieniając go (np. w celu zmiany zakresu) należy jednocześnie zmienić Z_d.

ketoda napięciowa eliminacji wpływu impedancji własnej uzwojenia polega na włączeniu w szereg z uzwojeniem MKP źródła napięcia o wartości równej spadkowi napięcia na uzwojeniu MKP w sposób przedstawiony na rys.8.3.



Rys.8.3. Ilustraoju metody napigolowej eliminacji wpływu impedancji własnej uzwojeń MKP

Na wejście wzmacniacza doprowadzone jest napivole

$$U_r = \Delta U_X - U_g \tag{6.12}$$

Napivole to wzmoonione K-krotnie, przeniesione przez transformator o przekładni Ψ^{0} , jest równe napięciu U_z:

$$J_{\mu} = U_{\mu} K \cdot V \qquad (6.13)$$

Stad:

$$U_{r} = \frac{\Delta U_{X}}{1 - K^{0}}$$

Z sależności (6.16) wynika, że dla K------, U_{Γ} -- O, co jest warunkiem eliminacji wpływu impedanoji własnej uzwojeń.

Przedstawione metody eliminacji wpływu impedancji własnej uzwojeń zastosowano w prostych konstrukcjach komparatorów jednordzeniowych. W komparatorach wielordzeniowych, np. dwurdzeniowych (funkcję drugiego rdzenia może spełniać ekran magnetyczny), istnieje możliwość wyeliminowania wpływu impedancji własnej prostszą metodą. Polega ona na nawinięciu dodatkowego uzwojenia obejmujacego tylko magnetowód pomiarowy i połączeniu go w sposób równoległy do uzwojenia porównawczego,w sposób przedstawiony schematycznie na rys.8.4a.



Rys.8.4. Schemat uzwojeń MKP z uzwojeniem wewnętrznym - (a),

schemat ideowy bcz uzwojenia wewnętrznego - (b), z uzwojeniem wewnętrznym - (o)

Uzwojenie to nazwano uzwojeniom wewnętrznym. Schemat ideowy elektryczny NKP bez uzwojenia wewnętrznego przedstawiono na rys.S.4b: Z₁ oraz Z₂ oznaczają impedanoje własne uzwojeń. Przes połączone szeregowo impedan-

cje magnesujące ekranu Z_µ, oraz magnetowodu Z_µ płynie róźnica prądów $(I_1 - I_2')$, gdzie prąd I_2' jest przeliczonym na stronę prądu I_1 prądem I_2 . Róźnica prądów jest kompensowana w gałęzi impedanoji magnesującej Z_{μ} prądem I_k , płynącym w przedstawionym na rys.8.4a uzwojeniu kompensacyjnym N_k . Dla stanu kompensacji $(U_D = 0)$ napięcie na zaoiskach uzwojenia (N_1) komparatora jest równe:

$$U_{1K} = (I_1 - I_2) Z_{\mu \bullet} + I_1 Z_1 = HI_1 Z_{\mu \bullet} + I_1 Z_1$$
(8.15)

Połączenie równoległe uzwojenia (N_1) oraz wewnętrznego odpowiada na schemacie ideowym-elektrycznym doprowadzeniu prądu I₁ równolegle do impedancji magnesującej ekranu Z_µ oraz magnetowodu Z_µ w sposób przedstawiony na rys.8.4c. Impedancja Z'₁ reprezentuje impedancję własną uzwojenia wewnętrznego. Spadek napięcia na uzwojeniu (N_1) jest wynikiem prądu płynącego przez impedancję Z'₁. Prąd ten można wyznaczyć jako różnicę dwóch prądów obliczonych metodą superpozycji będących częściami prądów I₁ oraz I₂, płynącymi przez impedancję Z'₁. Stąd spadek napięcia na uzwojeniu N₁:

$$U'_{1k} = \begin{bmatrix} I_1 \frac{Z_{\mu e} + Z_1}{Z_{\mu e} + Z_1 + Z'_1} & I'_2 \frac{Z_{\mu e}}{Z_{\mu e} + Z_1 + Z'_1} \end{bmatrix} Z'_1 \quad (5.16)$$

Uwzględniając na podstawie zależności (8.15), że $I_2 = (1 - k)I_1$ oraz oznaczając $Z_{\mu\nu} + Z_1 + Z_1' = M$ otrzymano:

$$U'_{1k} = (kI_1Z_{\mu e} + I_1Z_1) \frac{Z'_1}{M}$$
 (8.17)

Z porównania zależności (8.15) oraz (8.16) wynika, że spadek napięcia na uzwojeniu N₁ ulegnie L/Z'_1 - krotnemu zmniejszeniu.

Wartość M jest rzędu k Ω , natomiast Z¹ rzędu ułamków Ω lub Ω . Stąd spadek napięcia na uzwojeniu (N₁) i tak już o małej wartości zmaleje

ok. 10⁴ razy. Praktycznie potencjały obu końcówek uzwojenia są sobie równe.

8.1.2. Hostek G-C z LKP zmiennych

Mostki G-C, zwłaszcza zasilane wysokim napięciem [35], [71], są układami, w których zastosowanie MKP zmiennych zmniejszyło w sposób decydujący błąd oraz pobudliwość. Schemat ideowy podstawowego układu mostka przedstawiono na rys.8,5.



Rys.8.5. Schemat ideowy podstawowego układu mostka G-C

Dla przyjętego modelu badanego kondensatora w postaci równolegle połączonej kombinacji elementów C_X oraz G_X równanie sił magnetomotorycznych w MKP ma postać:

$$U(G_{X} + j\omega C_{X})N_{1} - j\omega C_{N}UN_{2} - G_{N}UN_{3} = 0$$
 (5.18)

Stad:

$$C_{X} = C_{N} \frac{N_{Z}}{N_{1}} : \quad C_{X} = C_{N} \frac{N_{3}}{N_{1}}$$
 (8.19)

OTAE:

$$\mathbf{t}_{\mathbf{x}} \cdot \frac{\mathbf{G}_{\mathbf{x}}}{\boldsymbol{\omega} \mathbf{C}_{\mathbf{x}}} - \frac{\mathbf{G}_{\mathbf{N}} \mathbf{N}_{\mathbf{3}}}{\boldsymbol{\omega} \mathbf{C}_{\mathbf{N}}^{\mathbf{N}_{\mathbf{3}}}}$$
(8.20)

W przedstawionym rozwiązaniu mostka wartość tg σ_X należy obliozyć z wartości czterech zmieniających się wielkości. Ze względów praktycznych w układach mostków wymagany jest niczależny odozyt C_X oraz tg σ_X bezpośrednio z wartości nastaw odpowiednich elementów mostka. W mostkach z MKP problem sprowadza się do wymuszenia w dodatkowym lub tym samym uzwojeniu, przez które płynie prąd I_{C_1} prędu przesuniętego w fazie o kąt $\pi/2$ względem prądu I_C i o nastawignym podziałe w stosunku do prądu I_C zgodnie z zależnością:

$$\operatorname{tg} \mathscr{S}_{\chi} = \frac{\operatorname{I}_{\mathcal{G}}}{\operatorname{I}_{\mathcal{C}}} = \frac{\operatorname{w} \ \operatorname{I}_{\mathcal{C}}}{\operatorname{I}_{\mathcal{C}}} \tag{(5.21)}$$

Rozwiązanie spełniające wymagania przedstawiono na rys.3.6: [71], [74].

Jeżeli wzmocnienie wzmacniacza K-- - , to napięcie na wejściu wzmacniacza:

$$U_1 = -\frac{U_2}{K} = 0$$
, (8.22)

czyli dąży do potencjału masy. Wtedy prąd płynący przez kondensator C_N , przy pominięciu rezystancji uzwojenia MKP, jest równy:

 $I_2 = j \omega C_N U$

(8.23)



Rys.8.6. Schemat ideowy mostka G-C z niezależnym odczytem Cy oraz tg d

Obwód prądu I_2 z uzwojenia N_2 zamyka się przez kondensator C_f . Napięcie na kondensatorze (U_f) jest przesunięte względem prądu o kąt X/2. Ponieważ, zgodnie z zależnością (8.22), napięcia U_2 oraz $-U_f$ muszą być sobie równe, więc napięcie na wyjściu układu całkującego jest również przesunięte względem prądu I_2 o kąt X/2. Napięcie to doprowadzone jest do indukcyjnego dzielnika napięcia (IDN). Część tego napięcia, określona nastawą w, przetworzona jest na prąd I_{Gs} , zamykający się w obwodzie $G_s - N_1 - G'_{B}$, równy:

$$I_{G_{e}} = 2WU_{2}(G_{e} + G_{e})$$
 (8.24)

Jeżeli $G_{\bullet} = G'_{\bullet}$ to:

117

Stad:

$$L_{g} \delta_{\chi} = \frac{I_{Gs}}{I_{2}} = \sqrt{\frac{G_{s}}{\omega C_{f}}}$$
(8.26)

(8.25)

Głównym źródłem błędu pomiaru tg d. jest układ całkujący a konkretnie różnica pomiędzy kątem przesunięcia fazy układu całkującero a katem X/2, spowodowana stratnością kondensatora C oraz ograniczone wzmocnienie wzmacniacza. Dlatego kondensator ten musi być kondensatorem o możliwie małym współczynniku tg δ . W pracy [71] opisano mostek zrealizowany wg schematu przedstawionego na rys.8.6, przeznaczony do pomiarów parametrów kondensatorów wysokonapięciowych, o przekładni nominalnej od 1:1 do 10⁷:1. Błąd pomiaru pojemności C. jest rzadu 10⁻⁶. Mostek pracuje przy częstotliwości 50-60 Hz z możliwością pozsterzenia zakresu częstotliwościowego do 400 Hz, przy jednocześnie rosnacym bładzie pomiaru. Współczynnik strat tg δ może być mierzony z rozdzielezością 10⁻⁷ i błędem rzędu 10⁻⁶. Próg pobudliwości sily magnetomotorycznej MKP jest rzędu 10⁻⁹ A, co przy N, = N₂ = 100 zaojow zapownie wysaganą rozdzielczość natężenia prądu rzędu 10⁻¹⁰A. Komparator ten posiada ekrany magnetyczne i uzwojenie wewnętrzne eliminujące wpływ iwpedancji własnej uzwojeń.

Podobne rozwiązanie pomiaru tg δ postada mostek wykonany w IMLIE Politechniki Šląskiej [74], [75]. Mostek ten służy do kompuracji zzorców pojemności w zakresie LpF – 1 µF z niedokławinością – 10⁻ oraz pomiaru różnicy tg δ_{11} – tg δ_{21} w zakresie – 10⁻, również z niedokładnością – 10⁻⁵. Mostek posiada wzorzec jednomiarowy o wartości 1nF. Zasilany jest napięciem sinusoidalnie zmiennym o wartości skutecznej 100 V i o częstotliwości 1000 Hz. Mostek ten służy do komparacji pojemności wzorców w Zakładzie Metrologicznym Flektroniki PKNalJ.

8.1.3. Mostek R-L oraz R-M z MKP zmiennych

We wzorcach pojemności lub rezystancji wielkości resztkowe, tzn. dla pojemności rezystancje bocznikujące a dla rezystancji - pojemności lub indukcyjności są wystarczająco małe, aby można było w większości zastosowań wzorców pominąć ich wpływ. W cewkach wzorcowych stosunek rezystancji do ich reaktancji jest znacznie większy niż stosunek odpowiednich wielkości w kondensatorach i opornikach wzorcowych. Ponadto cechą charakterystyczną wzorców indukcyjności jest zależność zarówno rezystancji, jak i indukcyjności od częstotliwości f , ściślej od stosunku f_0/f , gdzie f_0 jest częstotliwością rezonansową cewki. Stąd wynikają trudności w realizacji wzorców indukcyjności, zwłaszcza nastawnych, przeznaczonych do mostków indukcyjnościowych.

MKP umożliwia w mostku służącym do pomiaru indukoyjności zastąpienie wzorców indukcyjności wzorcami pojemności. W typowym mostku, przedstawionym schematycznie na rys.8.1, w którym impedancje mają charakter indukcyjnościowy, prądy wpływają do początku i końca odpowiednich uzwojeń, wymuszając w nich siłę magnetomotoryczną,indukcyjnościową. Taką siłę magnetomotoryczną, wymuszoną prądem o charakterze indukcyjnościowym, doprowadzonym do początku uzwojenia, można zrealizować doprowadzając do końca uzwojenia prąd o charkterze pojemnościowym [88]. W tym celu gałąź wzorcową mostka rozdzielono na dwa obwody - konduktancji wzorcowej oraz pojemności wzorcowej, w sposób przedstawiony na rys.8.7. Równanie sił magnetomotorycznych dla tego układu ma postać:

$$I_{x}N_{f} = I_{G}N_{2} - I_{C}N_{3}$$
 (8.27)

Pomijając wpływ parametrów własnych uzwojenia MAP, prądy płynące w poszczególnych obwodach są równe:

$$I_X = UY_X$$
: $I_R = UG_N$: $I_C = j\omega C_N U$ (3.26)

 $Y_X N_1 = G_N N_2 - 360 N_2 C_N$

Jeżeli mierzoną cewkę zamodeluje się w postaci równolegle połączonej konduktančji

$$Y_{X} = G_{X} - j - \frac{1}{\omega L_{X}}$$
 (5.30)

to z zależności (6.29) wynikają warunki równowagi mostka:

$$G_{X} = G_{N} \frac{2}{N_{1}};$$

 $L_{X} = \frac{N_{3}}{\omega^{2}N_{1}} \frac{1}{C_{N}}$ (2.31)

N

i indukcyjności:

(8.29)



Rys.8.7. Schemat ideowy mostka z MKP i wzorcem pojemnościowym do pomiaru indukcyjności własnej

Stad:

Zapewniając stosunek liczb zwojów $N_3/N_1 = 10^{n'}$ oraz $1/\omega^2 = 10^{n''}$ (ap.dla $\omega = 1592$ Hz) wynik pomiaru Ly jest równy:

$$L_{\rm X} = 10^{\rm n} \frac{1}{c_{\rm N}}$$

Wartość mierzonej indukcyjności można odczytać z nastary dekad pojezmościowych, w których kondensatory są połączone szeregowo. W komparatorach reaktancji wzorce pojemności są najczęściej wzorcami jednomiarowymi, natomiast elementami nastawczymi są wielodekadowe dzielniki napięcia.

Pomiaru indukcyjności wzajemnej można dokonać w różnych układach - najprościej metodą pośrednią, wykorzystując układy stosowane przy pomiarach indukcyjności własnej. Łącząc dwie cewki o indukcyjnościach własnych L₁ oraz L₂ i o indukcyjności wzajemnej M szeregowo zgodnie orąz przeciwnie otrzymuje się wypadkowe indukcyjności odpowiednio równe:

> $L' = L_1 + L_2 + 2M$ $L'' = L_1 + L_2 - 2M$ (8.32)

Stad:

$$M = \frac{L' - L''}{4}$$
(8.33)

Zmiana konfiguracji połączeń cewek, zwłaszcza przy pomiarach małych wartości indukcyjności wzajemnej, jest źródłem znaczącego błędu. Poza tym nie zawsze dostępne są oba wyprowadzenia cewek. Dlatego lepszym sposobem pomiaru indukcyjności wzajemnej jest sastosowanie układów do bezpośredniego pomiaru indukcyjności wzajemnej. Schemat ideowy podstawowego mostka z MKP, służącego do pomiaru indukcyjności wzajemnej, przedstawiono na rys.8.8 [79].

Napięcie U₂, indukowane w wyniku istnienia indukcyjności wzajemnej, jest równe:

$$U_2 = Z_M \left[I_1 - \frac{n_2}{n_1} (I_2 + I_3) \right]$$
 (8.34)

gdzie:

Rezystancja R_M reprezentuje straty ozynne spowodowane np. prądami wirowymi lub dyspersją dielektryka. Jednocześnie napięcie to jest równe:



Rys.S.C. Schemat ideowy mostka z MCP, służącego do pomiaru indukoyjności wzajemnej

Prądy płynące przez uzwojenie MKP dla zerowego wskazania detektora muszą spełniać równanie sił magnetomotorycznych:

$$I_1N_1 + I_2N_2 - I_3N_3 = 0$$
 (4.35)

Prąd pojemnościowy wpływa do końca uzwojenia, dlatego sił; magnetomotoryczną I₂N₂ w zależności (8.36) należy uwzględnić ze znakien "+".

Po porównaniu zależności (5.34) - (8.36), ich przekształceniu 1 uwzględnieniu, że:

$$\frac{R_{M}}{\omega M} = \operatorname{otg} \varphi_{0} \qquad \frac{\omega M}{Z_{M}^{2-2}} \sin \varphi_{0}$$

otrzymano:

(8.35)

(8.32)

$$|Z_{W}| = \frac{\sin \varphi_{0}}{\omega c \left(\frac{N_{2}}{N_{1}} + \frac{n_{2}}{n_{1}}\right)}$$

etg $\varphi_{0} = \frac{1}{\omega RC} \frac{\left(\frac{N_{3}}{N_{1}} - \frac{n_{2}}{n_{1}}\right)}{\left(\frac{N_{2}}{N_{1}} + \frac{n_{2}}{n_{1}}\right)}$ (8.36)

Stad:

$$\mathbf{x} = \frac{|\mathbf{Z}_{\mathrm{M}}|}{\omega} \sin \varphi_{\mathrm{o}} \tag{8.39}$$

Innym przykładem zastosowania MEP do pomiaru indukoyjności wzajemnej jest zmodyfikowany mostek rezonansowy Campbella [4], przedstawiony schematycznie na rys.5.9.



Rys.8.9. Schemat ideowy zmodyfikowanego mostka rezonansowego Campbella z MEP, służącego do pomiaru indukoyjności wzajemnej Pod wpływem napięć zasilania U oraz U_a , przez odpowiednie pojemności oraz uzwojenie LKP, płyną prądy I₁ oraz I₂. W stanie zerowego wskazania detektora D₁ równanie sił magnetomotorycznych w LKP ma postać:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2$$
 (8.40)

lub

$$I_2 = I_1 - \frac{N_1}{N_2} = \Xi I_1$$
 (6.41)

gdzie: m - przekładnia zwojowa MKP

Prąd I₁ powoduje, w wyniku istnienia indukcyjności wzajemnej M, indukowanie się napięcia U_M. Napięcie to jest kompensowane z napięciem U_D. W stanie kompensacji detektor D₂ wskazuje zero: wtedy

$$U_{M} + U_{D} = 0$$
 (8.42)

Napięcie U_D jest napięciem nastawy w indukcyjnego dzielnika napięcia:

$$U_{\rm D} = WU_{\rm Cr} = \frac{{\rm mp \ I}}{j\omega c_{\rm r}}$$
(8.43)

Po podstawieniu do zależności (8.4):

$$J\omega MI_{1} + \frac{m v I_{1}}{J\omega C_{r}} = 0 \qquad (3.44)$$

Stad:

$$M = \frac{1}{\omega^2 C}$$
(S.45)

Cechą charakterystyczną układu jest pomiar indukcyjności wzajemnej przy braku prądu w uzwojeniu wtórnym. Dokładność pomiaru zależy od identyfikacji i usunięcia źródeł błędu. Ważnym problemem jest wyeliminowanie spadku napięcia na parametrach własnych uzwojenia (N_2) tak aby napięcie na indukcyjnym dzielniku napięcia było równe napięciu kondensatora. Kondensator ten musi charakteryzować się bardzo małym współozyanikiem tgő: współczynnik ten jest kolejnym źródłem błędu. Napięcia U oraz U_a muszą być napięciami stabilnymi, stąd układ należy zasilać poprzez transformator z jednego wspólnego dla obu kondensatorów źródła naplęcia. Napięcie U_M nie jest, w wyniku istnienia strat reprezentowanych przez rezystancję R_M w zależności (8.3), przesunięte względem prądu dokładnie o kąt %/2. Dlatego należy od strony zasilania napięcia U_a włączyć układ umożliwiający niewielkie przesunięcie kąta fazowego prądu I₂.

6.2. Zastosowanie MKP w układach wzoroowania przekładników prądowych

Przekładnik prądowy w zakresie częstotliwości do i kliz można modelować w postaci schematu zastępozego typu T. Żródła błędu przekładnika reprezentują: rezystancja R_{Fe} i reaktancja z gałęzi poprzecznej tego schematu: miarą błędu jest prąd płynący przez tę gałąź. Względna wartość tego prądu, odniegiona do prądu strony pierwotnej, jest definicyjnym błędem przekładnika prądowego:

$$S_1 = \frac{k_1 I_2 - I_1}{I_1}$$

(8.46)

gdzie $k_{I} = \frac{N_{2}}{N_{1}}$ - nominalna przekładnia przekładnika prądowego

Stad:

$$\boldsymbol{\vartheta}_{1} = \frac{\mathbf{1}_{2}\mathbf{N}_{2} - \mathbf{1}_{1}\mathbf{N}_{1}}{\mathbf{N}_{1}\mathbf{1}_{1}} = \frac{\boldsymbol{\vartheta}_{k}}{\boldsymbol{\vartheta}_{1}} \neq \frac{\boldsymbol{\vartheta}_{k}}{\boldsymbol{\vartheta}_{2}} \qquad (8.47)$$

Na rys.8.10 przedstawiono graficzną interpretację błędu opisanego zależnością (8.4). Należy zauważyć, że z formalnego punktu widzenia zależność ta jest identyczna z zależnością (1.6) opisującą błąd MKP. Ale źródła błędu w MKP i w przekładniku prądowym są różne - w MKP prąd gałęzi poprzecznej schematu zastępczego typu T jest bliski zeru (odpowiadający błędowi MKP i jego pobudliwości): źródła błędu MKP omómiono w rozdziale 4.2.

Doprowadzając prądy stron wtórnej i pierwotnej przekładnika prądowego do uzwojeń MKP o takiej samej przekładni zwojowej jak przekładnik i wymuszając w tych uzwojeniuch różne, zgodnie z zależnością (8.4) siły magnetomotoryczne Θ_1 oraz Θ_2 otrzymujo się różne od zera wskazanio detektora. Można je sprowadzić do zera wymuszając w dodatkowym uzwojeniu (N.) siłę magnetomotoryczną

Rys.8.10. Wykres wskazowy sił magnetomotorycznych w przekładniku pradowym

$$\Theta \delta_p = \Theta_k = \Theta' + j\Theta^*$$
 (8.46)

Schemat układu komparacji natężeń prądów przekładnika prądowego z wymuszeniem siły magnetomotorycznej $\phi_{\rm p}$ w sposób opisany w rodziałe 5.2.1 przedstawiono na rys.8.11a [23], [26], [33], [54], [45], [57], [69]. Błąd przekładnika prądowego dla N_k = N₂ zrodnie z zależnością (5.5)jest równy:

$$\delta_{I} = \frac{I_{K} N_{K}}{I_{2} N_{2}} = R_{2} (G_{K} + J \omega G_{K})$$
 (5.49)

Zmianę kierunku prądu w tym układzie, a tym samym zmianę znaku błędu przekładnika prądowego można zrealizować poprzez włączenie dodutkowego transformatora umowliwiającego zmianę polaryzacji napięcia doprowadzonego do dekad konduktancyjnej i pojemnościowej w sposób przedstawiony na rys.8.11b.



Rys.8.11. Schemat ideowy układu wyznaczania błędu przekładnika pradowego za pomocą MKP

Układ wymuszenia siły magnetomotorycznej $\Theta_{\rm b}$ za pomocą dekad G, C, nazwany układem admitanoyjnym [60], jest w praktyce uciążliwy. Dlatero w fabrycznie wykonanych MKP do wyznaczania błędów przekładników prądowych stosuje się metodę elektroniczną wymuszania prądu I. opisaną w rozdziałe 5.2.1. Wadą MKP w układzie wzorcowania przekładników prądowych jest wprowadzenie obciążenia obwodu wtórnego przekładnika. Frąd I., zgodnie ze schematem przedstawionym na rys.S.4b, owoduje powstanie spadku napięcia na uzwojeniu MKP, składającego się ze spadku napięcia na impedancji własnej uzrojenia oraz częściowo na impedancji magnesowania ekranu, oznaczonej Z . Ostatnia składowa napięcia, proporcjonalna do różnicy (k₁I₂ - I₁), zależy od wartości błędu przekładnika prądowego. Dla typowych realizacji ekranów MKP, przy pomlarze błędu przekładników prądowych rzędu 1% wnosi do obwodu prądu I₂ dodatkowe obciążenia rzędu kilkunastu VA, Dlatego ważną rolę w konstrukcji MKP odgrywają elementy, za pomocą których osiąga się równość potencjałów punktów M oraz N zaznaczonych na rys.8.13a. Najprostszym sposobem wyrównania potencjałów jest wprowadzenie dodatkowego uzwojenia i związanego z nim dodatkowego magnetowodu [26] w sposób przedstawiony na rys.8.12.



Rys.8.12. llustracja sposobu wyrównania potencjałów punktów M oraz N Uzwojenie oraz dodatkowy ekran mignetyczny EM2 powodują wyrównanie potencjałów punktów M oraz X w sposób opisany w rozdziale 0.2. Ekran 14 2 może być wykoneny w sposób analogiczny do konstrukeji ekrana przedstasionej na rys.2.ta, otaczając ekran EM 1 lub może stanowić dod t+ kowy magnetowód, umie-

szczony rownolegie z magnetowodem detektora, ale poza ekrausa 211. Uproszczeniem układu MAP jest wymuszenie pradu \mathbf{I}_k w uzwojeniu weznętrznym służącym do oliminacji spadku napiecia, stedy w schemete przedstawionym na rys. 14 znika uzwojenie (\mathbb{Z}_k) orad \mathbf{I}_k płynie przez uzwojenie N4. Rozwiązanie takłe zistosowano w 222 wykonawa przez firmy F 172X. Układ rdzeni tego komparatora tworzecych magnetowody i ekrany oraz uzwojeń przedstawiono na rys. 10a, natomiast na rys. 103 schemat ideowy, uwzględniający połączenia uzwojeń oraz elektroniczny układ kompensacji. Analiza układu jest analogiczna z analizą przeprowadzoną w rozdziale 8.1; wynika z niej, ża napięcie pomiędzy punktami M oraz N



jest w przybliżeniu równe zeru.

Rys.8.13. Schemat magnetowodów, ekranów i uzwojeń (a) oraz schemat ideowy (b) MNP produkcji firmy TETTEX

Dużą rolę odgrywają układy elektroniczne współpracujące z magnetycznym komparatorem prądu. Na rys.8.14 przedstawiono schemat blokowy układu elektronicznego współpracującego z MKP zmiennych o przekładniach od (15...1000) /5 A. Układ ten umożliwia cyfrowy odczyt błędów badanego przekładnika oraz kontrolę jego warunków pracy. Pomiar błędu można zrealizować dwoma sposobami: omówionym w rozdziale 5.2.1-przetwarzając napięcie na prądy oraz rozkładając napięcie wyjściowe uzwojeń detekcyjnych na dwie składowe: zgodną i prostopadłą do prądu I₂.

W pierwszym przypadku należy zmienić transmitancję obu przetworników U/I tak, aby detektor D wskazał zero. Wielkości opisujące transmitancję, przetworzone w przetworniku A/C wyświetlone są na wskażniku cyfrowym. W drugim przypadku napięcie uzwojenia detekcyjnego należy przesunąć w fazie, tak aby wyeliminować wpływ między innymi argumentu zespolonej przenikalności magnetycznej (rys.3.1) : wtedy czułość LKP opisana zależnością (2.9) jest wartością rzeczywistą. Składowe napięcia uzwojenia detekcyjnego sa proporcjonalne do błędów amplitudowego oraz kątowego. Ze względu na nieliniowość [µ] oraz • sposób ten umożliwia wyznaczenie przybliżonej wartości błędu (dokładność wyznaczenia błędu ± 5%). Kontrolę warunków pracy przekładnika umożliwiają układy: dzielący, do którego doprowadzono są napięcia proporcjonalne do: prądu I₂



Rys.8.14. Schemat blokowy układu elektronicznego MKP

oraz napięcia strony wtórnej przekładnika - panol cyfrowy wskazuje moduł impedancji; koincydencyjny, umożliwiający pomiar kąta fazowego obotążenia strony wtórnej przekładnika oraz układ umożliwiający pomiar prądu I₂, wskazanego w procentach prądu I_{2N}. Układ ten wykonano w INBIE.

- 129 -

9. ZASTOSOTANIE MKP STALYCH

9.1. Nastawne źródło prądowe

W klasycznych źródłach prądowych zmianę natężenia prądu wyjściowego realizuje się poprzez podział napięcia wzoroowego za pomocą dzielnika napięciowego. Rozwiązanie takie posiada wszystkie wady rezystenoyjnych elementów nastawnych, a przede wszystkim nieliniowość przyrostów rezystancji, a tym samym natężenia prądu dla kolejnych nastaw dzielnika oraz duży wpływ temperatury na wartość natężenia prądu. Stąd źródła prądowe z rezystancyjnymi elementami nastawnymi mogą osiągnąć niedokładność nastawienia rzędu $\pm 10^{-4}$, co dla większości zastosowań w metrologii elektrycznej dużych dokładności jest niewystarczające. Znacznie lepsze właściwości metrologiczne osiągają jednomiarowe źródła prądowe, w których natężenie prądu wyjściowego może być określone z niedokładnością rzędu $\pm 10^{-6}$ przy czym stabilność termiczna 1-godzinowa jest również rzędu $\pm 10^{-6}$. Prąd wyjściowy źródła może być wtedy dzielony w konduktanoyjnym dzielniku prądowym, znajdującym się poza źródłem rozwiązanie takie jest zastosowane w kompensatorach firmy Julie [6], [90]

W roddziałe 5.2.2 przedstawiono rozwiązanie umożliwiające realizację rozdzielczości podziału stosunku natężeń prądów rzędu $10^{-6} - 10^{-7}$ z niedokładnością tego samego rzędu. Prąd źródła "ZORCOWE – W doprowadzony jest do jednego uzwojenia MKP, natomiast źródła STEROWANE – S, sterowanego sygnałem detektora, do drugiego uzwojenia w sposób przedstawiony na rys.9.1.

Prąd źródła W przepływa przez szeregowo połączone sekcje trzech uzwojeń N₁, N₁, N₁, o liczbach zwojów kolejno różniących się o rząd wartości oraz przez uzwojenie kompensacyjne, które może być rozwiązane w różny sposób [52]: na rys.9.1 przedstawiono schemat ideowy obwodów kompensacji omówiony w punkcie 5.2.2. Układ ten przy zmianie nastaw przełączników P₁...P₄ o jednostkę realizuje wymuszenia sił magnetomotorycznych kolejno o rząd mniejszych, stąd nazwano go układem sił magnetomotorycznych podwielokrotnych (USMP).



Rys.9.1. Schemat ideowy źródła prądowego z MKP

Każda zmiana nastawy przełączników $P_{N1} - P_{N1}$ lub $P_1 - P_4$ powoduje chwilową nierówność sił magnetomotorycznych uzwojeń MKP. Sygnał niezerowej różnicy sił magnetomotorycznych poprzez detektor strumienia, omówiony w rozdziale 3.1, detektor elektroniczny i układ automatyki steruje zródło prądowe S, doprowadzając wypadkową siłę magnetomotoryczną MKP do zera. Zmienia się tym samym natężenie prądu wyjściowego źródła S, płynącego przez obciążenie, zgodnie z zależnością:

$$I_{2} = I_{1} (1 - k)$$
 (9.1)

Znaki + lub - odpowiadają zmianie kierunku prądu płynącego przez obciążenie, zrealizowanego za pomocą przełącznika P. W układzie przedstawionym schematycznie na rys.9.1 zmiana nastawy obejmuje wszystkie pozycje w wyniku 7-cyfrowym, co daje krańcowa wartość k = ± 0.9999999. Dla k = 0 natężenia prądów obu źródeł są takie same. Zmiana natężenia pradu źródła S dla K = ± 0,9 wymaga doprowadzenia do źródła odpowiednio dużego napięcia z układu automatyki. Napięcie to odpowiada z kolei istniejącej w KKP różnicy sił magnetomotorycznych, będącej składową błędu. Stąd warunkiem prawidłowej pracy źródła jest zapewnienie dostatecznie dużego wzmocnienia sygnału wyjściowego detektora, tak aby ta różnica sił magnetomotor cznych była mniejsza od błedu MKP. Realizacja układu automatyki o dostatecznie dużym wzmocnieniu, rzędu $10^5 - 10^7$. jest bardzo trudna ze względu na właściwości dynamiczne MKP, który charakteryzuje się dużą stałą czasową. Z punktu widzenia źródeł prądowych MKP jest włączony w gałąź sprzężenia zwrotnego, stąd w układzie automatyki stosuje się korekcję dynamiczną.

Cechą charakterystyczną układów z MKP jest możliwość sprawdzenia poprawności ich działania bez konieczności stosowania wzorców. W przypadku źródła prądowego sprawdzenie polega na pomiarze różnicy prądów $(I_2 - I_1)$ w gałęzi łączącej obwody tych prądów w sposób przedstawiony na rys.9.2, przy ozym na rys.9.2a przedstawiono układ kompensacji prądów, natomiast na rys.9.2b sposób realizacji sprawdzenia w układzie z rys.9.1, punkty ABCD odpowiadają punktom zaznaczonym na rys.9.2.

Dla k = 0, zgodnie z zależnością (9.1), oba prądy mają te same natężenia $(I_1 = I_2)$ - amperomiorz włączony pomiędzy obwody tych prądów powinien wskazać zero. Dla k \neq 0 zmiana natężenia źródła prądowego S powinna być równa kl₁. Poprawność wskazań amperomierza jest oznaką prawidłowości działania LEP, układów detektora strumienia magnetycznego oraz układów automatyki i źródła prądowego S.



Rys.9.2. Ilustracja metody kompensacji prądów (a) oraz sposobu sprawdzenia MKP ze źródłami prądowymi metodą kompensacji prądów (b)

9.2. Kompensator napiecia z MKP

Najprostszym sposobem realizacji kompensatora napięć z MKP, stałego jest włączenie w obwód prądu o nastawianym natężeniu opornika wzorcowego \mathbf{R}_W w sposób przedstawiony na rys.9.3. Na rysunku tym przedstawiono w sposób uproszczony uzwojenia, przez które płynie oały lub ozęść prądu I₁: uzwojenia te, przedstawione szczegółowo na rys.9.1, reprezentuje na rys.9.3 jedno uzwojenie o wypadkowej liczbie zwojów N_{1W}. Pominięto również magnetowody oraz uzwojenia detektora różnicy sił magnetomotorycznych.

Spadek napięcia na oporniku I., równy:

$$\mathbf{E}_{W} = \mathbf{I}_{2} \mathbf{R}_{W} \tag{9.2}$$

kompensuje się z mierzonym napięciem U_X w stanio kompensacji U_X = U_W. Z warunku równości sił magnetomotorycznych wynika;

$$I_2 = I_1 - \frac{N_1}{N_2}$$
 (9.3)

- 133 -

$$E_{W} = I_{1} R_{W} \frac{N_{1}}{N_{2}}$$
(9.4)

Uwzględniając zależność (9.1) wynik kompensacji jest równy:

$$J_{\mathbf{X}} = \mathbf{n} \mathbf{I}_{\mathbf{1}} \mathbf{R}_{\mathbf{y}} \left(\mathbf{1} - \mathbf{k} \right) \tag{9.5}$$

gdzie: n - nominalna przekładnia zwojowa MKP.

stąd:



Rys.9.3. Schemat ideowy kompensatora napięcia z MKP

wynik kompensacji napięć zależy między innymi od niedokładności określenia natężenia prądu I₁, rezystencji R_W oraz stabilności źródła prądu. Zależność wyniku kompensacji od natężenia prądu jest najistotniejszą wadą tego kompensatora. Wady tej pozbawiony jest układ podwójny kompensatora, przedstawiony schematycznie na rys.9.4.



- 135 -

Rys.9.4. Kompensator podwójny - kompensator sił elektromotorycznych s NKP

Wielkością najczęściej mierzoną za pomocą kompensatora jest siła elektromotoryczna ogniw uzorcowych. Źródło prądowe W jest w tym przypadku źródłem, którego natężenia prądu wyjściowego zmienia stę w niewielkich granicach. Komparację sił elektromotorycznych $v_{\rm m}$ oraz $v_{\rm m}$ przeprowadza się w dwóch fazach. W pierwszej fazie pomiaru ustała się prąd I₁ źródła W, tak aby jego natężenie było równe:

$$\mathbf{I}_1 = \frac{\mathbf{E}_{W}}{\mathbf{R}_{W1}}$$

(9.10)

Z kolei kompensuje się siłę elektromotoryczną E_X ze spadkiem napięcia na rezystancji R_{W2} , zmieniając nastawę liczb zwojów N_1 . W stanie komp nsacji sił magnetomotorycznych użwojeń LKP pręd wyj^sciowy źródła S jest równy:

$$I_2 = \frac{N_{111}}{N_2} \frac{E_1}{R_{11}}$$

(0.11)

Stad, dla zerowych wskasań galwanometrów G₁ oraz G₂, po uwzględnieniu zależności (9.1):

$$E_{\chi} = E_{W} - \frac{N_{1W}}{N_{2}} - \frac{R_{W2}}{R_{W1}} = E_{W} - n \frac{R_{W2}}{R_{W1}} - (1 \pm k)$$
 (9.12)

wynik porównania sił elektromotorycznych zależy od określenia dokładnego stosunku rezystancji R_{W2} oraz R_{W1} . Problem ten można łatwo rozwiązać poprzez wyrównanie rezystancji R_{W2} oraz R_{W1} dla k = 0 w układzie komparacji rezystancji omówionym w rozdziale 9.3.

W komparatorze sił elektromotorycznych istnieje możliwość wyeliminowania niedokładności określenia stosunku rezystancji R_{W2} oraz R_{W1} , stosując metodę przez przestawienie. Jeżeli dla sytuacji przedstawionej schematycznie na rys.9.4 siłę elektromotoryczną wyznacza się z zależności (9.12) dla np. +k₁, to po zamianie miejsc ogniw E_W oraz E_X i ponownym zrównoważeniu wartości sił elektromotorycznych związane będą zależnością:

$$E_{W} = E_{X} n \frac{R_{W2}}{R_{W1}} (1 - k_{2})$$
 (9.13)

Po podzieleniu zależności (9.12) dla k = k, oraz (9.13) otrzymano:

$$\frac{E_{\rm X}}{E_{\rm W}} = \frac{E_{\rm W}}{B_{\rm X}} \frac{1+k_1}{1-k_2}$$
(9.14)

Przyjmując, że k₁, k₂ ≪ 1, po uproszczeniu :

$$E_{x} = E_{y} - \frac{k_{1} + k_{2}}{2}$$
 (9.15)

W prawidłowo działającym MKP $k_1 = k_2$ różnica $k_1 - k_2$ jest pewną względną miarą błędu. Stąd metoda ta umożliwia sprawdzenie jakości MKP.

W pracach [42], [86], opisano kompensator wykonany w oparciu o przedstawiony na rys.9.4 schemat ideowy. Zakres nominalny kompensatora jest równy (0 - 2)V przy rozdzielczości 0,i μ V. Rezystancje R₁ = R₁ = = 10 Ω , natomiast natężenia prądu: I₁ = 100 mA, I₂ = 0...200 mA. MEP posiada uzwojenia: N₁ = 1000 zwojów, N₂ = 10 * (100, 10, 1) zwojów, umożliwiające zmianę nastaw odpowiadającym trzem pierwszym pozycjem wyniku pomiaru. Sposób otrzymaniu dalszych miejse w wynikm jest analogiczny do sposobu zilustrowanego na rys.9.1. Szumy w zakreziw częstotliwości od 0 - 10 Hz, wyrażone w jednostkach siły magnetomotorycznej, są mniejsze od 10 µA, przy nominalnej sile magnetomotorycznej uzwojeń równej 100 A.

Opisaną konstrukcję rozwinięto, wprowadzajów między innymi w miejsce rezystancji R_{W1} oraz R_{W2} dzielniki rezystancyjne, co umożliwiło rozszerzenie zakresu pomiarowego o dwa podzakresy: (0 - 0,2) V oraz (0 - 0,02) V, równicż z rozdzielczością 10⁻⁷. Kompensator taki (model 9930), produkowany przez firmę Guildline, przedstawiono na rys.9.5.



Rys.9.5. Widok kompensatora napięcia firmy Guildline - model 9930

9.3. Komparator rezystancii z MARP

Z zalożności (9.12) wynika, że dla $E_x = E_W = E$:

$$\frac{R_{W1}}{R_{W2}} = (1 \pm k)$$
(9.16)

Przyjęciu równości sił elektromotorycznych w zalożności (9.12) odpowiadałaby złożona procedura polegająca na "przenicsieniu" wartości siły elektromotorycznej E skompensowanej ze spadkiem napięcia na rezystancji R_{W1} do obwodu kompensacji spadku mapięcia na rezystancji R_{2} i ponownego doprowadzenia do stanu kompensacji. Procedurę tę można pominąć, kompensując bezpośrednio spadki napięcia na rezystancjach oznaczonych R_{X} oraz R_{N} w sposób przedstawiony na rys.9.6 : [1], [2], [30], [31], [41], [56], [59], [86], [87].



Rys.9.6. Schemat ideowy komparatora rezystancji z LLP

Stan równowagi układu określony jest dwoma warunkami: - równością sił magnetomotorycznych uzwojeń MKP

$$I_1 N_{13} = I_2 N_2$$
 (9.17)

- rómnością spadków napięć na kosporownych rezystanoj ch:

$$I_1 R_X = I_2 R_N$$
 (9.18)

Ciągłe spełnienie warunku (9.17) zapewniają układy detektora (D) oraz automatyki (UA), z których sygnał steruje źródło prędowe S. Dzięki temu każda zmiana nastawy liczb zwojów N_{1T} powoduje zgodnie z zależnościę (9.17) zmianę prędu I₂, umożliwiając osiągnięcie warunku (9.18). Po uwzględnieniu zależności (9.1) otrzymano:

$$R_{x} = R_{N} \frac{N_{1T}}{N_{2}} = n R_{n} (1 \pm k)$$
 (9.19)

Przedstawiona metoda komparacji rezystancji należy do grupy metod równonapięciowych [30], [53], tzn., że na komparowanych rozystancjach powstają takie same spadki napięć. Cochą charakterystyczną tych metod jest dysypacja większej mocy na oporniku o mniejszej rezystancji, co jest szczególnie ważne w przypadku komparacji rezystancji o małych wartościach różniących się o rząd.

W komparatorze rezystancji istnieją ograniczenia dokładności komparacji spowodowane:

 dokładnością MEP i rozdzielczością nastawienia ustężenia prądu I₂,
 pobudliwością wskażnika stanu kompensacji spadków napięć na komparowanych rezystancjach.

Podczas komparacji oporników o dużej rezystancji natężenie prądu płynącego przez oporniki powinno być odpowiednio małe – ograniczone mocą wydzieloną na komparowanych rezystancjach (dla $R > 1\Omega - 50$ m.) Stąd liczba zwojów uzwojenia MSP powinna być odpowiednio duża, tak aby siła magnetomotoryczna uzwojeń zapewniała wymaganą rozdzielczość, przy czym wartość bezwzględna rozdzielczości powinna być większa od obszaru niejednoznaczności detektora – problem ten omówiono w rozdziele 2.2.2. Z technologicznego punktu widzenia istnieją trudności w nawinięciu na magnetowodzie większej liczby zwojów uzwojenia niż 5000 – 10000 zwojów. Jest to wiedy uzwojenie nawinięte cielkim przewo em o małym dopuszczalnym natężeniu prądu 1 dużej rezystancji. Spedek napięcia na komparowanych dużych rezystancjach jest wystarczająco duży: wskaźnik stanu "ompensacji reaguje na względną zmianę napięcia rzędu 10⁻⁷. Jednak przy komparacji mniejszych rezystancji, przy tym samym natężeniu prądu spadek napięcia maleje, nalcży więc zwiększyć natężenie prądu i jednocześnie przekrój przewodów uzwojeń.

Z przedstawionych uwag wynika, że konstrukcja MNP jest kompromisem między rozdzielczością MMP oraz pobudliwościm wskaźnika komponsecji spadków napięć na komparowanych rezystancjach, przy czym wynik kompromisu jest różny dla różnych wartości rezystancji.

Podobnie jak w kompensatorze napięć z MEP istnieje poblikość sprawdzenia komperatora rezystancji. Najprościej można sprawdzić komparator za pomocą metody przestawieniowej, komperując rezystancje o stosunku nominalnych wartości 1:1. Stedy dla obu sytuacji je karovjek:

$$R_{rr} = R_{rr} (1 + k_1)$$
 (2.20)

$$\mathbf{a}_{\mathrm{N}} = \mathbf{a}_{\mathrm{N}} \quad (\mathbf{1} - \mathbf{k}_{\mathrm{N}}) \tag{(9.1)}$$

Po przekształceniach zależności (9.20) oraz (1.21) otrzymano:

$$n_{\chi} = n_{\chi} - \frac{k_1 + k_2}{2}$$
 (1.7)

Dla dostatecznie małej wartości k_1 oraz k_2 ich różnica $(k_1 - k_2)$ jest pewną miarą błędu względnogo. Sprawdzenia komparatora rezystaneji o n również dokonać mierząc różnicę prądów $(I_1 - I_2)$ w sposób przedst isny na rys.D.2, przy czym dla k = 0 różnica ta powinna być różna natomiast dla k \neq 0 powinna być różna kl₁. I przypałku komerneji rezystaneji o stosunku wartości nominalnych równych 1:10 symagane sp 3 lub 4 oporniki komparowane cyklicznie przy przekładalach 1:10, 10:1 oraz 1:1. Procedura ta jest szczegółowo opisana w przey [5].

provi o refinacți sepăterernych honstruleji konstrutore

rez; stancji była dość długa. W 1958 roku Abraham i Heuman opisali w praoy [1] układ równonapięciowej komparacji rezystancji $10^{-3}\Omega$ oraz $10^{-4}\Omega$ z LMP zawierającym wszystkie elementy współczesnych LMP, przy czym błąd porównania rezystancji był rzędu 10^{-4} . W latach 1962-65 pojariły się publikacje Kustersa i innych autorów, w których opisano badanie



Rys.9.7. Widok komparatora resystancji firm Guildline - model 9920

MKP i podano vyniki komparacji rezystancji za pomocą MKP z różnymi konstrukojami układów wyznaczania wartości k. W następnych latach firna Guildine rozpoczęła produkcję komparatora rezystancji model 0020. przedstawionego na rys. 9.7. Komparator ten jest przeznaczony do komoracji rezystanoji do 10 z rozdzielezościa 10⁻⁷ błędem rzędu 10⁻⁶. Nominalna siła augnetodotoryczna uzwoje, jest równa 100 A, szumy wyrazone w wartosolach względnych nowinalnej siły magnetohotorycznej są unicjsze nit 3.10⁻⁸. Wskaźnikiem kompensacji spałków napięć na kommerorowanych rezystancjach jest znajdujący się we wspólnej obudowie z 1222 wzmacniacz fotoelektryczny o stałej napigelowoj 0,01 µV/dz. Konstrukcję te nastennie udoskonalono, rozazerzając górny zakros komuracji rezystancji do 10 MQ, przy jednoczosnym ograniczeniu dolnego zakresu do 0,010 . Komparator ten (model 9975) jest zatem komparatorem dużych rezystanoji, uzupełniającym poprzednio omówiony model 9920 . Bląd komparaoji rezystanoji o martościach (1 - 1000) 9 jest równy 0.2 10⁻⁶: rozdzielozość zależy od wartości komparowanych rezystancji i ng. dla $R_{y} = R_{y} = 1 \Omega$ jest równa 10⁻⁸, a dla $R_{z} = R_{y} = 10^{-3} \Omega$ jest równa 10-5

Na rys.9.8 przedstawiony jest sohomat ideowy liki⁴ wykonanego w IMELE Politechniki Śląskiej. Komparator ton jest przeznaczony do porównania rezystancji wzoroów o wartościach od 0,001 Ω do 10 k Ω z błędem rzędu 10⁻⁵ – 10⁻⁶ i rozdzielozościa 10⁻⁷ dla środkowych wartości zakresu pomiarowego. Komparator umożliwia komparację rezystancji przy różnych mocach dysypacji.

Prąd źródła prodowego I_1 płynie przez uzwojenia 10 x (500, 50, 5) zwojów, odpowiadające pierwszym trzem pozycjom w wyniku pomiarowym. Dalsze miejsca odpowiadcją nastawom sekcji uzwojeń w obwodzie prądu I_p . Nastawy sił magnetomotorycznych, przez któro przepływa prąd I_1 , różnią się kolejno o rząd – siły magnetomotoryczne uzwojeń wiączonych w ob ód pradu I_1 , muszą się analogieznie różnić o rzad wurtości. Stad uwzglę-

- 143 -

dniając liczby zwojów prad $I_p = 0,01 I_1$. Spełnienie tej zależności umożliwia oryginalne rozwiązanie dwóch źródeł współbieżnych, przedstawie schematycznie na rys.9.8.



Rys.9.6. Schemat ideowy komparatora rezystancji wykonanego w IMEIE

Dalsze miejsca w wyniku pomiarowym otrzymano w sposób analogiczny do opisanego w rozdziale 5.2.2. Komparacja rezystancji o mniejscej wartości wymaga ze względu na próg pobudliwości galwanometru większego natężenia prądu. Prąd ten doprowadza się wtedy do uzmojonia 10 x 50 zwojów (z pominięciem 10 x 500), przy czym jego natężenie jest 10-krotnie
większe: nominalne siła magnetomotoryczna dla obu sytuacji jest taka sana. Szczegółowy schemat blokowy dstektora przedstawiono na rys.2.10. Nowym podzespołem jest układ korekcji fazy (UXF), przyśpieszający fazy sygnału wyjściowego detektora, umożliwiając tym samym sterowanie źródłem prądowym I₂.

9.4. Komparacja rezystancji w układzie z kriogenicznym MKP

Najważniejszym zastosowaniem kriogenioznego EKP jest wyznaczenie stosunku dwóch rezystancji w układziewprzenoszącym wartość napięcia wzorca Josephsona (ok. 10 mV) na wartość siły elektromotorycznej ogniwa Westona (ok. 1,016 V). Napięcie złacza Josephsona

$$\mathbf{U} = \mathbf{n} - \frac{\mathbf{h}}{2\mathbf{e}} \qquad (9.23)$$

jest napięciem bardzo stabilnym, jednak jego dokładna wartość, ze wzgledu na trudności wyznaczenia stałej h/2e, nie jest znana, wartość tej stałej jest obecnie wyznaczona na podstawie porównonia wortości nopięcia Josephsona i ogniwa Westona. Bład myznaczenia stałej h/de z vertości siły elektromotorycznej jest w przybliżeniu równy 2.10⁻⁷, [5], Jednak wzorzeć Josephsona ze względu na swoje właści osci [1], [0] tekie jak: stabilność napięcia, możliwość odtworzenie w dowolnym miejscu i czasie został wykorzystany do porównanie sił elektromotorycznych ogniw Westona w różnych laboratoriach bez konieczności ich transportu oraz do badenie stabilności czasowej tych ogniw.

Ważnym problemem w roklizacji tego układa jest wykonanie dzielnika oporowego o rezystancjach umożliwiających przy przepływie tego samego przdu porównanie spadku napiecia na jednym oporniku z napięciem wzorca Josephsona oraz na drugim oporniku z siłu elektromotoryczna ogniwa westona w sposób przedstawiony schematycznie na rys.9.10. Dokładność porównania siły elektromotorycznej ogniwa westona z napięciem wzorca Josephsona zależy od błędu wyznaczenia stosunku rezystancji.



Rys.9.10. Schemat ideowy układu porównania wartości siły elektromotorycznej ogniwa E_w oraz napięcia wzorca Josephsona

Oporniki dzielnika muszą pracować w temperaturze bliskiej zera absolutnego. Znane są dwa stopy, z których można wykonać te oporniki: w pracy [80] omówiono właściwości stopu składającego się z 96 % Cu, 3 % Si oraz 1 % Zn, natomiast w praoy [85] - stopu składającego się z 50 % Ag oraz 50 %. Cu. Cechą charakterystyczną tych oporników jest mała wartość mocowego współczynnika rezystancji, tzn., że np. dla stopu Ag-Cu w zakresie temperatur ok. 2,1 K wydzielanie się w oporniku mocy 1 mW (na rezystancji 1 Q) powoduje względną zmianę rezystancji równą (- 0,023 10⁻⁶). Współczynnik ten w zakresie temperatur (2,1 - 2,17) K jest prawie stały - po przekrocze-

niu górnej granicznej temperatury wzrasta w sposób skokowy ok. 20-krotnie [84].

Wyznaczenie stosunku rezystancji dzielnika realizuje się w układzie przedstawionym schematycznie na rys.9.11.

Równanie sił magnetomotorycznych uzwojeń kriogenicznych LKP ma postać:

$$I_1 N_1 = I_2 N_2 + I_K N_K$$
 (9.24)

gdzie: I_N - prąd w uzwojeniu kompensacyjnym

$$I_{K} = I_{2} \frac{r}{R_{o}+r}$$

(9.25)

Stosunek rezystancji dzielnika jest równy:



Rys.9.11. Schemat ideowy układu wyznaczania stosunku rezystancji za pomocą kriogenicznego MKP

Jeżeli stosunek spadków napięć na rezystenojach powinien być równy ok. 100, (10 mV oraz 1,018 V), to w układzie przedstawionym na rys. 9.11 stosunek rezystanoji $R_1:R_2$ powinien być również równy w przybliżeniu 100. Oznacza to, że stosunek liczb zwojów uzwojeń MKP $M_1/N_2 =$ = 100, przy czym równość ta jest zrealizowana z niedokładnością mniejszą niż 10⁻⁸. W pracach [7], [84] opisano kriogeniczne MAP z uzwojeniami o liczbach zwojów odpowiednio równych: $N_1 = 100, N_2 = 1, N_1 = 1.$ Wówczas I_k/I₁ = 10⁻⁵. Uwzględniając liczby zwojów, zależność (9.26) można przedstawić w postaci:

$$\frac{\frac{R_{1}}{R_{2}}}{\frac{1}{R_{2}}} = \frac{100}{\frac{1+\frac{r}{R_{W}}}{R_{W}}}$$
(9.27)

Wielkością ograniczającą dokładność są szumy termiczne oporników oraz zmiany współczynnika temperaturowego rezystancji. W pracy [80] opisano układ z kriogenicznym MKP, opracowany w NBS, w którym błąd średniokwadratowy porównania napięć 10 mV oraz 1,018 V był równy 2 10^{-8} , przy czym błąd własny kriogenicznego MKP wynosi 10^{-9} . Komparowane rezystencje miały wartości 1**Ω** oraz 100**Ω**.

9.5. Woltomierz z LKP

Przyrząd ten jest przykładem zastosowania MKP do pomiaru napięcia lub natężenia prądu stałego. W kompensatorze napięcia przedstawionym schematycznie na rys.9.4 punktem uziemionym jest biegun źródła prądowego i jednocześnie zacisk opornika wzorcowego. Jeżeli obwody prądowe będą izolowane od ziemi, to istnieje możliwość realizacji różnicy spadków napięcia na oporniku wzorcowym R_W oraz napięcia zewnętrznego, mierzonego U_v w sposób przedstawiony na rys.9.12.

Stan-zerowy różnicy napięć wskazuje detektor D - osiąga się go przez odpowiednie nastawienie liczb zwojów N_{1W} . Każda zmiana nastawienia powoduje zmianę siły magnetomotorycznej uzwojenia N_{1W} , pojawienie się różnej od zera chwilowej różnicy sił magnetomotorycznych ($I_{1W}N_1 - I_2N_2$), co w konsekwencji doprowadza do zmiany prądu płynącego przez opornik A_{W} . Spadek napięcia na nim w stanie zerowego wskazania detektora D jest równy:

$$U_{\rm X} = I_2 R_{\rm W}$$

Po uwzględnieniu zależności (9.5) otrzymano:

$$U_X = n I_1 R_W (1 \pm k)$$
 (9.29)

149 -



Rys.9.12. Uproszczony schemat ideowy woltomierza kompensacyjnego z MKP

Nastawa k może być realizowana ręcznie lub automatycznie. Automatyczny woltomierz z MRP, z odczytem cyfrowym opisany jest w pracy [32]: jego uproszczony schemat ideowy przedstawiono na rys.9.13. Prąd I₂ płynie przez jeden z oporaików o wartościach rezystancji (1, 10, 100, 1000) k Ω , służgoych do zmiany zakresu pomiarowego od i V do 1000 V. Różnica napięć

 $\Delta U_{\rm e} = I_{\rm e} R_{\rm e} - U_{\rm e}$

(9.30)

doprowadzona jest do przetwornika A/C, ustalającego w kodzie BCD styki sekcji uzwojeń N_{1W} EKP. Przetwornik A/C w pierwszym etapie powoduje ustalenie styków uzwojeń o największej liczbie zwojów (8000), odpowiadających w wyniku pomiaru pozycjom o największych wartościach. Następnie ustala położenie styków sekcji uzwojeń o mniejszych liczbach zwojów, przy czym kolcjne różnice napięć odpowiadają kolejnym miejscom dziesiętnym wyniku. Końcowe wartości w wyniku pomiaru odpowiadają kombinacji styków doprowadzających prąd z dzielnika prądowego, analogicz-



Rys.9.13. Schemat ideowy cyfrowego coltomierza kompensacyjnego z LKP

nego do przedstawionego schematycznie na rys.9.1. Przetwarzanie kończy się, gdy napięcie doprowadzone do przetwornika jest mniejsze od roz-

- 150 -

dzielczości nastawy uzwojenia N_{1W} . Przez uzwojenie MKP o liozbie zwojów $N_1 = 1000$ płynie prąd $I_1 = 10$ mA, przez $N_2 = 10000$ zwojów - prąd o natężeniu do 1 mA, przy rozdzielozości 10^{-6} . Szumy w zakresie (0,01 -- 1) Hz są rzędu 10 μV_{pp} , dryft rzędu 0,1 μV . Błąd pomiaru napięcia U, jest mniejszy niż 10⁻⁶.

Najważniejszą cechą konstrukcji woltomierza, różniącą ją od konstrukcji klasycznych woltomierzy kompensacyjnych, jest modelowanie wzorcowej siły magnetomotorycznej a nie napięcia, poprzez włączenie odpowiednich uzwojeń. Ominięto tym samym trudny z punktu widzenia technologii problem rezystancji styków zwierających odpowiednie rezystancje wzorca napięcia w klasycznym woltomiorzu kompensacyjnym.

- 151 -

LI TERATURA

- Abraham L., Heumann K.: Kompensationswandler zur Präzisionsmessung höher Gleichströme - ETZ-A Bd. 80 H.18, 11.9.1959.
 - 2. Basu S.K., Kusters N.L.: Comparision of Standard Resistors by the DC Current Comparator. IEEE Trans. on Instr. and Meas vol. IM 14 No 3.1965.
 - Berkman R.J.: O wlijanij wysszich cziotnych garmonik w ciepi wozbużdienija magnitnych moduljatorow. Awtomatika i Tieliemechanika. No 2, 1965.
 - 4. Bohağek J.: A Resonanse Bridge with a Current Comparator for Standarization of Mutual Inductance. IMECO VIII. Measurement for Progress in Science and Technology. May 1979, Moscow.
- Braun A.: A New Method for the Calibration of a National Current Matio Standard. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. 1M-29 No 4, 1980.
- budziewicz J.: Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych. WKL 1962.
- Dziuba R.F., Sullivan D.B.: Cryogenic Direct Currents Comparators and their Applicationa. IEEE Trans. Magn. Mag-11, No 2, 1975,
- Forger K:, Sohlinke H.: Investigation of AC Differential Current Transformers Using a Current Step-Up Circuit for 1-10 kHz. ISA Transactions. Vol. 9 No 3, 1970.
- 9. Geyger W.: Magnetic amplifer Circuits. NEW York 1954 ..
- Grocholkij A.L., Kaszczajew E.L.: O postrojenij priecizionnogo transformatornogo mosta. Awtomietrija No 1. 1966.
- Grochman K., Hahlbohm H.D., Lübig H., G.Ramin: Ironless Cryggenic Current Comparators for AC and Applications IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. 23, No 4, 1974.

- 12. Grochman K., Hahlbohm H.D., Lübig H.: Construction principles and properties of ironless and ac current comparators with superconducting achields. FTB Mitteilungen vol. 83, 1973.
- Gutkowski J.: Komparatory prądowe oparte na zasadzie magnetycznege detektora zerowego. PAK 10,11, 1974.
- Harvey I.K.: A precise cryogenic dc ratio transformer. Rev. Soi. Instr. vol. 43,1972.
- 15. Hahlbohm H.D., Luther H.: Nullpunktsempfindlichkeit von Präzisions-Gleichstromkomparatoren. PTB Mitteilungen No 79, 1969.
- 16. Hahlbohm H.D., Luther.: Zur Theorie von Doppelkern-Detcktorsystemen in Gleichstromkomparatoren. PTB Mitteilungen. No 1, 1970.
- 17. Hagel R., Miłek M., Skubis T.: Indukcyjne dzielniki napięcia i komparatory prądowe w układach pomiarowych. Żeszyty Naukowo Pol.Sl. s.Elektryka z.71, 1980.
- 18. Harvey I.K., Collins H.C.: Precise resisance ratio measurements using a superconducting de ratio transformer. Nev. Sci. Instr. vol.44, 1973.
- 19. Hill J.J., Miller A.P.: An a.c. double bridge with inductively coupled ratio arms for precision platinum - resistance thermometry. Proceedings the institution of elektrical engineers. vol. 110, No 2. Feb. 1963.
- Iners R.R.: Rascziot i opriedielienije paramietrow multifilernych obmotok. Trudy Tallinskogo Instituta Nr 334, 1972.
- 21. Josephson B.D.: Phys. Lett. 1, 251, 1962.
- 22. Jaskulski J.: Indukcyjne dzielniki napigoia i prądu. Zeszyty Naukowe Politechniki Wrocławskiej 1984r.
- 23. Kahler R.L.: Au Electronic Natio Error Set for Current Transformer Calibrations. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM 28. No 2 June 1979.
- 24. Karandiejew K.E.: Izmiesitielnyje transformatornyje mosty. Izd. Eniergija, 1970.

- 25. Kusters N.L.: The Precise Measurement of Current Ratios. IERE Trans. on Instr. an Meas. p. 197, 1984.
- 26. Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Compensated Current Comparator: A New Reference Standard for Current-Transformer Calibrations in Industry. IEEE. Trans. on Instr. and Meas. No 2, 1964.
- 27. Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Current Comparators and Its Applioations to the Absolute Calibration of Current Transformers. Trans. on Instr. and Meas. No 2, 1961.
- 28. Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Effect of Potentials on Current . Transformer Errors. IEKE Trans. on Instr. and Meas. No 3, 1962.
- 29. Kusters N.L., Noore W.J.M.: The Development and Performance of Current Comparators for Audio Frequencies. IEEE, Trans. on Instr. and Meas. vol. 14, No 4, 1965.
- 30. Kusters N.L., Mac Martin M.P.: A Direct-Current-Comparator Bridge for Measuring Shunts up to 20000 Ampers. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM-18 No 4 December 1969.
- 31. Kusters N.L., Mac Martin M.P.: Direct-Current-Comparator Bridge for Resistance Thermometry. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM-19 No 4 Dec. 1970.
- 32. Kusters N.L., Mac Martin M.P.: A Self-Balanoing Digital Differential Voltmeter Based on the Direct-Current Comparator. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM 24, No 4, December 1975.
- 33. Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Compensated Current Comparator: A Nev Reference Standard for Current-Transformer Calibrations in Industry. IEEE Trans. on Instr. and Meas. June-September 1964.
- 34. Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Application of the Compensated Current Comparator to the Calibration of Current Transformers at Batio Less Than Unity. IEEE Trans. on Instr. Meas. vol. IM 18 No 4. December 1969.

- 35. Kusters N.L., Petersons O.: A Transformrm-ratio-arm bridge for highvoltage capacitance measurements. INEE Trans on Com. and Elektron, vol. 82. November 1963.
- 36. Kusters N.L., Mao Martin M.P.: A direct current comparator bridge for high resistance measurements. IKEE. Trans on Instr. and Meas. No 4 1976.
- 37. Kulikowski J.: Czułość napięciowa transduktorowych czujników magnetycznych. Archiwum Automatyki 1 Telemechaniki. Tom V. Z. 3, 1960.
- 38. Kulikowski J., Nałęcz M.: Schematy zastępcze transduktorowych czujników magnetycznych o wyjściu impulsowym. Rozprawy Elektroniozne. TOM VII. Z.2. 1961.
- 39. Kwiozala J.: Czułość detektora strumienia magnetycznego komperatora prądów przemiennych. Zeszyty Naukowe Pol Sl. s.Elektryka z.92, Gliwice 1984.
- 40. Lentner K.J.: A Current Comparator System to Establish the Unif of Electrical Energy at 60 Hz. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4 1974.
- 41. Mac Martin M.P., Kusters N.L.: A Direct-Current-Comparator detio Bridge for Four-Terminal Resistance Measurement, IEEE, Trans. on Instr. and Meas. vol. IM-15. No 4. December 1966.
- 42. Mae Martin M.P., Kusters N.L. The Application of the Direct Current Comparator to a Seven-Decade Potentiometr. 1222. Trans. on Instr. Meas. vol. IM-17. No 4. December 1968.
- 43. Michałowskij W.N., Spektor Ju.I.: Niekotoryje woprosy tleorii magnitnych usilitieliej i magnitomoduljacionnych zondow tipa wtoroj garmoniki. Awtomatika i Tielicmechanika. Tom 18. No 8. 1957.
- 44. Miljanic P.N.: Capacitive Errorin Current Comparators. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4. 1964.
- 45. Miljanic P.N., Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Application of Current Comparators to the Calibration of Current Transformers at Ratios up to 36000/5 Amperes. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM.17. No 3. 1968.

- 46. Miljanio P.N., Kusters N.L., Moore W.J.M.: The Development of the Current Comparator a High-Accuracy A-C Ratio Measuring Devices Trans. on Instr. and Mass. No 1. 1962
- 47. Miłck N.: Interpretacja i pomiar zespolonej przenikalności magnetycznej stopów Fe-Ni. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.48. Gliwice 1972.
- 48. Miłek M.: Zasada transferu prądowego i sposób jej wykorzystania w procesie uwierzytelnienia komparatora prądów. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.55. Teoretyczne i praktyczne problemy indukoyjnych dzielników napięcia i komparatorów prądów. Gliwice 1976.
- 49. Miłck K.: Analiza błędu pobudliwości komparatora prądów stałych
 i sposoby jego minimalizacji. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka
 z. 55. Teoretyczne i praktyczne problemy indukcyjności dzielników
 napięcia i komparatorów prądów. Gliwice 1981.
- 50. Miłek M., Kwiczala J.: Konstrukcja i technologia detektora strumienia stałego magnetycznego komparatora prądów stałych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s. Elektryka z.71. Gliwice 1981.
- 51. L'Iłłek M.: Metoda określania niejednorodności permeancji magnetowodów toroidalnych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.71, Gliwice 1981.
- 52. kiłkek M., Kwiczała J.: Konstrukcja i technologia uzwojeń komparatora prądów stałych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.71, Gliwice 1981.
- 53. Miłek N.: Komparacja wielkości elektrycznych i magnetycznych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.77. Monografie. Gliwice 1981.
- 54. Liłek M., Kwiczała J.: Magnetyczne komparatory prądowe i metody ich uwierzytelnienia. Materiały II Sympozjum nt. Kierunki Rozwoju Metrologii Elektrycznej. Warszawa 1979.
- 55. Miłek K., Kwiczała J.: Metoda badania właściwości ekranów magnetycznych w komparatorach prądów. Materiały XV Liędzyuczelnianej konferencji Lictrologów. Warszawa 1981.

- 156 -

- 56. Litek M., Kwiczała J.: Komparator rezystancji z magnetycznym komparatorem prądów stałych. Wiadomości Elektrotechniczne, 1-15 października 1981.
- 57. Miłek M., Kwiczała J.: Magnetyczny komparator prądów przemiennych w układzie wzorcowania przekładników prądowych. Windomości Elektrotechniczne 1-15 października 1981.
- 58. Liłkek M.: Analiza i metoda wyznaczania niedokładności komparacji rezystancji wzorców w układzie z magnetycznym komparatorem prodów Zeszyty Naukowe Pól.Sl. s.Elektryka z.92, Gliwice 1984.
- 59. Moore J.M., Basu S.K.: A Direct-Reading Current Comparator Bridge for Scaling Four Terminal impedances at Audio Fragucacies. Trans on Instr. and Meas. No 4. December 1966.
- 60. Moore W.J.M., /Rusters N.L.: Direct Reading Natio-Error Sets for the Calibration of Current Transformers. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. 1M 19. No 3, 1970.
- 61. Moore W.J.M., Schlinke H.: An International Comparison of Audi-Frequency Current Transformers Calibrations. Metrologia vol. 3, No 2, 1972.
- 62. NORMA Co. Verfahren und Einrichtungen zur Messung von ungnetischen Feldern. Patentschrift Österreich 21 c, Nr 197633, 15/Juli 1939.
- 63. Norma PN-02050/N-71: Metrologia, nazwy i określenia.
- 64. Nakazone J., Haysh Y., Abe Z.: The detection of Extremely Small Voltages and Currents Using the Second - Harmonik Type of Engnetic Modulator. IEUE Trans. on Instr. and Mens. vol. 29. No 4 1980
- 65. Nawrocki Z.: Układy wzorcowania magnetycznych komparatorów prądów przemiennych. Rozprawy Blektrotechniczne. Z.23 1970.
- 66. Noble S.W.: The Fundamental Limitations of the Second Harmonic Type of Magnetic Modulator as Applied to the Amplifikation of Small DC Signal, Proceeding of the Inst. of El. Eng. vol. 97 II, 1950.

- 37. Nowacki P.J., Nałęcz M., Kulikowski J.: Pomiar małych stałych pól magnetycznych czujnikiem magnetycznym. Rozprawy Elektrotechniczne. Tom IV. 2.3-1958.
- 65. Pająk K.: Niejednorodność permeancji 1 magnetowodów toroidalnych badanie 1 minimalizacja. Zeszyty Naukowe Pol.Šl. s.Elektryk.
 z.92, Gliwice 1954.
- G9. Pandurowic N.M., Milicevic D.N., Skundric S.P.: A system for automatic testing of instrument current transformer accuracy. Third international conference on metering apparatus and tariffs for clectricity supply. London. England. November 1977.
- Fetersons 0.: A.Self Balanoing Current Comparator. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM-15. No 1-2. 1966.
- 71. Petersons O., Anderson W.E.: A wide-range high-voltage capacitance bridge with on PPM accuracy. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4 1975.
- 72. Preobrażenskij I.: Rascziot odnosłojnych magnitnych ekranow. Izwiestia WUZ-ow. Priborostrojenije. Nr 4. 1960.
- 73. Puśledzki J., Skubis T.: Niektóre praktyczne aspekty wykonania uzwojeń multifilarnych. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.55. Gliwice 1976.
- 74. řušledzki J., Skubis T.: Minimalizacja oddziaływania impedancji upływowych w mostku transformatorowym. Zeszyty Naukowe Pol.Śl.
 s. Elektryka z.71. Glinice 1981.
- 75. Puśledzki J.: Liczalny sposób wyznaczania dokładności komparatora admitancji. Zeszyty Naukowe Pol.Śl. s.Elektryka z.92. Gliwice 1984.
- 76. Rozenbłat L.: Magnitnyje usiliticli. Moskwa 1949.
- 77. Rump W.: Über die Bestimmung der Fehler von Normalstromwandlern mit dem Differentialring. Deutsche Elektrotechnik. 8.352. 1954.
- 71. kump W.: Über die Messung von Vierpolen in der Starkstromtechnik. Llektrie s.300. 1962.

- 156 -

- 79. Schmidt H.: Uber Stromkomparatoren, ihre Eigenschaften und ihre Anwendungen in der Niederfrequenz-Me technik. Z. elektr. Inform. u. Energietechnik. Leipzig 2. 1972.
- Schwartz B.B., Foner S.: Superconductor Applications SQUIDs and Nachines. New York 1977.
- Słuszkiewicz T.: Kompensacyjny pomiar przepływu prądu. Zeszyty Naukowe AGH. Rozprawy. ²eszyt 30. Kraków 1965.
- 82. Skubis T.: Patent PRL Nr 125005. Sposób wytwarzania magnetowodu zwijanego z taśmy.
- 83. So E., Moore W.J.M.: A Direkt-Reading AC Comparator Bridge for Resistance Measurement at Power Frequencies. IEEE Trans. on Instr. and Meas. vol. IM-29 No 4. 1980.
- 84. Sullivan D.B., Dziuba R.F.: A Low-Temperature Direct-Current Comparator Bridge. IEEE Trans. on Instr. and Meas. No 4, 1974.
- Sullivan D.B.: Resistance of a silicon branze at low temperatures.
 Rev. Sci. Instr. vol. 42. May 1971.
- 86. Sutcliffe J.: A New DC Resistance Bridge and DC Potentiometr Based on the Kusters Current Comparator. 22-nd Annual ISA Conference "Instrument Society of America" Chicago 1967.
- 87. Suteliffe J.: Meβbrücke und Kompensator nach dem Gleichstrom-Komparator-Prinzip. Messtechnik 4/70
- 88. Szabo W.: Eine Stromkomparator-McGbrücke für die Messung der Unmagnetisierungsverkuste. Messtechnik 5/71.
- Thurley F.: Stromkomparator mach dem Prinzip der Amperewindungswage für Frequenzen bis 10 kilz. ETZ-A. Bol. 84. H-9. 1966.
- 90. Turzeniecka D.: Kompensatory prądowe. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej - Rozprawy Nr 97. Poznań 1979.
- 91. Wan Džum Juan, Džao-Yyo-Czuan: Präcisionskontrolleinrichtung zur Kessung von Stronwandlern. Acta INECO. 25-CH-142. 1961.
- 92. Zapf T.L.: The accurate measurement of voltage ratios of inductive voltage dividers. Acta IndCO 1.3. 1964.

MAGNETYCZNE KOMPARATORY PRADO.7E -KONSTRUKCJA, TECHNOLOGIA, ZASTOSOWANIA

Streszczenie

Magnetyczne komparatory prądów LKP umożliwiają porównanie nateżeń dwooh pradów stałych lub zmiennych z błądem mniejszym od $10^{-6} - 10^{-9}$. w zależności od typu komparatora. Prądy te są doprowadzone do uzwojeń nawinietych na magnetowodzie: stan kompensacji sił magnetomotorycznych wskazuje dotektor. W pracy przedstawiono analizę właściwości detektorów w MKP stałych oraz zmiennych. Z kolei opisano obwody magnetyczne MKP przedstawiono efekt niejednorodności permeancji magnetowodów pomiarowych, metody badania niejednorodności i jej korekcji. Przeprowadzono analize błędów MKP 1 opracowano model błędu. Opisano różne typy uzwojeń komparatorów w zakresie stosowalności, zależnym od porównywanych pradów. Przedstawiono metody wyznaczania błędów MKP znane z literatury oraz zaproponowano nową metodę - transferu prądowego. Z kolei omówiono zastosowanie MKP w: układach komparacji rezystancji kompensacji sił elektromotorycznych ogniw wzorcowych oraz napięć, woltomierzy i amperomierzy najwyższych dokładności, układów wzorcowania przekładników prądowych oraz w układach mostkowych.

W pracy zamieszczono wyniki wykonanych w Instytucie Metrologii Elektrycznej i Elektronicznej badań LKP zmiennych i stałych, pracujących w temperaturze pokojowej. Przedstawiono również w oparciu o literaturę LKP pracujące w temperaturach bliskich zeru kelwinów. МАГНИТНЫЕ КОМПАРАТОРЫ ТОКОВ -КОНСТРУКЦИИ, ТЕХНОЛОГИЯ, ПРИМЕНЕНИЕ

Реврие

Магнитные компараторы токов (МКТ) дарт возможность сравнивать сиду постоянных или переменных токов с погревностью меньше 10⁻⁶ - 10⁻⁹ (в зависямости от типа компаратора).

Эти токи доведени до обмоток, намотанных на магнитоводе; состояние компенсации магнитодвижущих сил показывает детектор. В работе представлен анаикз свойств детекторов в МКТ постоянных и переменных. Описаны также магнитные цепи МТК (представлены: эффект неоднородности магнитной проводимости измерительных магнитоводов, методы последования неоднородности и её коррекции).

Проведён анадия погревностей МКГ и разработана модель погревности. Описаны разные типы обмоток компараторов с дваназоном применяемости, зависимым от сравниваемых токов. Представлены методы определения погревностей МКТ, известные из литературы, и предложен ковый метод - токоведущего трансферта. Описано также применение МКТ в системах компарирования активного сопротивления, компенсация электродвикущих сил образцовых элементов и напряжений, вольтистров и манерметров высней точности, систем эталонирования трансформаторов тока и в мостиковых схемах.

В работе представлены результаты исследований МКТ переменных в постолиных, работавщих в комматной температуре, выполненных в Институте електричесной в электротехнической метрологии.

Представлены также на основе литературы МКТ, работанцие в тенпературах близких нумо градусов Кельвина.

MAGNETIC CURRENT COMPARATORS-CONSTRUCTIONS, TECHNOLOGY, APPLICATION

Summary

Linguetic current comparators (MCC) enable comparision of two direct currents or alternating ones with an error lesser than $10^{-6} - 10^{-9}$. according to the type of comparator. These currents are conveyed to windings coiled on a magnetic core: the state of magnetomotive force is indicated by a detector. The paper presents the analysis concerning the properties of detectors in magnetic direct and alternating current comparators. Next magnetic circuits in (MCC) are described - the effect of nonpermeability of permeance concerning measuring megnetic cores, the methods of investigating nonpermeability and correction, are presented. Error analysis of MCC is carried and a model of error is worked out. There are described various types of comparator windings within the range of applicability dependent on comparable currents. The methods of calculating errors of NCC, known from bibliography are presented. Also a new method i.e. the method of current transfer is suggested. Then there is discussed the application of MCC in: the systems of resistance comparision, the compensation of electromotive forces of standard calls as well as voltages, voltmeters and ammeters of the highest accuracy, the systems of calibration of current measuring transformers and in bridge systems.

The paper comprises the results of investigations carried out in the Institute of Electric and Electronic Metrology. These are the investigations of magnetic direct and alternating ourrent comparators working in room temperature. In virtue of bibliography MCC working in temperatures close to zero kelvin, are also presented.

WYDAWNICTWA NAUKOWE I DYDAKTYCZNE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ MOŻNA NABYĆ W NASTĘPUJĄCYCH PLACÓWKACH:

44-100	Gliwice — Księgarnia nr 096, ul. Konstytucji 14 b
44-100	Gliwice - Spółdzielnia Studencka, ul. Wrocławska 4 a
40-950	Katowice — Księgarnia nr 015, ul. Żwirki i Wigury 33
40-896	Katowice — Księgarnia nr 005, ul. 3 Maja 12
41-200	Bytom - Księgarnia nr 048, Pl. Kościuszki 10
41-500	Chorzów Księgarnia nr 063, ul. Wolności 22
41-300	Dabrowa Górnicza — Księgarnia nr 081, ul. ZBoWiD-u 2
47-400	Racibórz — Księgarnia nr 148, ul. Odrzańska 1
44-200	Rybnik — Księgarnia nr 162, Rynek 1
41-200	Sosnowiec — Księgarnia nr 181, ul. Zwycięstwa 7
41-800	Zabrze — Księgarnia nr 230, ul. Wolności 288
00-901	Warszawa — Ośrodek Rozpowszechniania Wydawnictw Naukowych PAN — Pałac Kultury i Nauki

Wszystkie wydawnictwa naukowe i dydaktyczne zamawiać można poprzez Składnicę Księgarską w Warszawie, ul. Mazowiecka 9.