

Marian MIŁEK

METODA OKREŚLENIA NIEJEDNORODNOŚCI PERMEANCJI MAGNETOWODÓW TOROIDALNYCH

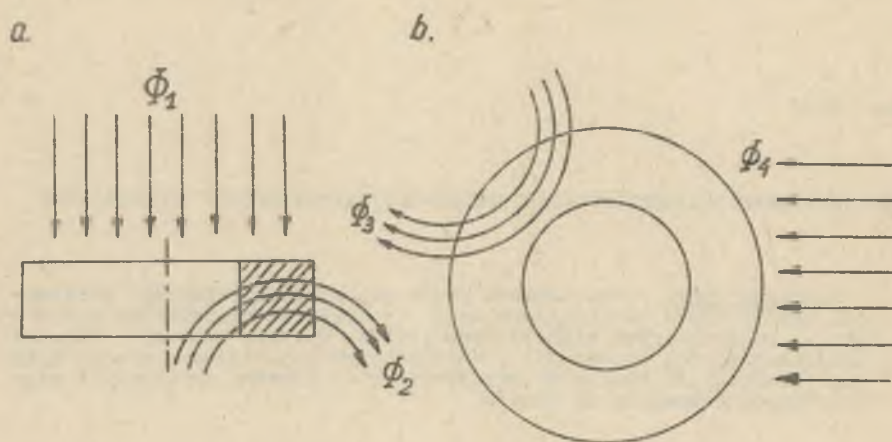
Streszczenie. Przedstawiono przyczyny niejednorodności permeancji magnetowodów toroidalnych oraz jej wpływ na właściwości metrologiczne magnetycznych komparatorów prądów. Opisano metodę badania niejednorodności permeancji i zdefiniowano jej liczbową miarę. Wykazano przydatność metody do określenia skuteczności ekranowania magnetycznych komparatorów prądów.

1. Wstęp

Magnetowody stosowane w komparatorach prądów są wykonane z taśmy permalowej o grubości 0,2; 0,1; lub 0,05 mm zwijanej w toroid. Warunki technologiczne walcowania taśmy nie zapewniają identycznej przenikalności magnetycznej w każdym punkcie taśmy. Po zwinieniu taśmy i jej obróbce termicznej, wypadkowa przenikalność w danym przekroju poprzecznym toroidu (przenikalność przekrojowa) jest średnią przenikalności miejscowej taśm w tym przekroju. Wypadkowa przenikalność magnetowodu jest z kolei średnią z przenikalności przekrojowej. Względna procentowa różnica pomiędzy modułami przenikalności przekrojowej oraz średniej, jak wynika z prac [2], [3], zawiera się w granicach kilku procent tej ostatniej.

W przypadku komparatorów prądowych [4], [5], zasadniczym warunkiem osiągnięcia wymaganej dokładności porównania prądów jest jednakowa dla obu uzwojeń pomiarowych zależność sił magnetomotorycznych i strumieni w magnetowodzie. Warunek ten spełnia się stosując odpowiednią technologię uzwojeń (multifilarne, sekcjonowane falowe) oraz bocznikując strumień rozproszenia za pomocą ekranów magnetycznych [5], [6]. Skuteczność ekranów jest ograniczona - i stąd do magnetowodu z uzwojeniem detekcyjnym dochodzi szczątkowy strumień rozproszenia. Wskutek ograniczonej skuteczności ekranów, do magnetowodu dochodzą również strumienie zewnętrznych zakłócających pól magnetycznych.

Zewnętrzne pole magnetyczne i strumienie rozproszenia mogą obejmować magnetowód w różny sposób. Szczególne przypadki, w zależności od wzajemnego położenia płaszczyzny magnetowodu i wektora strumienia - przedstawiono na rys. 1. Strumień Φ_1 przenika magnetowód prostopadle do jego płaszczyzny i powoduje indukowanie się napięcia w uzwojeniu poprzecznym (uzwojenie magnetowodu składa się z n zwojów nawiniętych wzdłuż drogi mag-



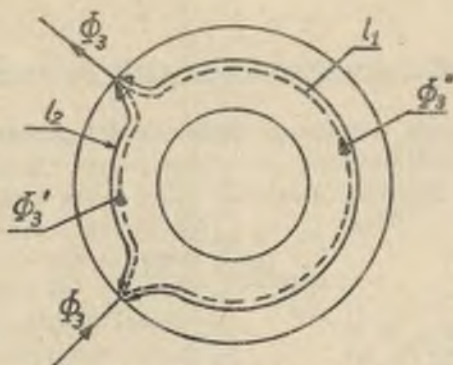
Rys. 1. Szczególne przypadki przenikania strumienia przez magnetowód

netycznej oraz w przypadku uzwojenia jednowarstwowego - jednego zwoju poprzecznego, o długości równej średniej drodze magnetycznej strumienia). W celu wyeliminowania wpływu strumienia Φ_1 należy, po nawinięciu uzwojenia detekcyjnego, poprowadzić przewód w kierunku przeciwnym do kierunku nawinięcia - do początku uzwojenia i następnie wyprowadzić skrócone końce uzwojenia.

Najbardziej niekorzystnym przypadkiem jest przenikanie magnetowodu przez strumień Φ_2 . Strumień ten zamyka się spiralnie wzdłuż taśmy tworzącej magnetowód, obejmując wielokrotnie całe uzwojenie detekcyjne. Jedynym sposobem zmniejszenia wpływu strumienia o takim kierunku, poza ekranowaniem, jest wykonanie magnetowodu z małej liczby zwojów, czyli dla danego pola przekroju poprzecznego magnetowodu, taśmy o większej grubości. Jednak rozwiązanie to z innych względów nie jest wskazane [6]. W praktyce w przypadku normalnej pracy komparatora, strumienie o kierunku Φ_2 nie występują (źródło strumienia musiałoby obejmować przekrój magnetowodu).

Typowymi strumieniami zamykającymi się przez magnetowód są strumienie: Φ_3 - strumień rozproszenia uzwojeń porównawczych oraz Φ_4 - strumień zaskóbkającego zewnętrznego pola, równoległy do płaszczyzny magnetowodu. Strumienie te wnikając do magnetowodu rozdzielają się na dwa strumienie o wartościach proporcjonalnych do permeancji dróg magnetycznych tych strumieni - rys. 2. Permeancje są funkcją przenikalności przekrojowej $\mu(1)$ oraz pola przekroju poprzecznego magnetowodu $s(1)$:

$$\Lambda_1 = \int_0^{l_1} \frac{\mu(1) \mu_0}{s(1)} dl; \quad \Lambda_2 = \int_0^{l_2} \frac{\mu(1) \mu_0}{s(1)} dl \quad (1)$$



Rys. 2. Rozpływ strumieni zakłócających równoległych do płaszczyzny magnetowodu

Wypadkowe napięcie indukujące się w uzwojeniu nawiniętym na magnetowodzie jest równe:

$$\underline{e} = n_1 \frac{d\phi_3'}{dt} - n_2 \frac{d\phi_3''}{dt} = \frac{\mu_0}{\Lambda_1 + \Lambda_2} \cdot \frac{d\phi_3}{dt} \left[n_1 \int_0^{l_1} \frac{\mu(l)}{s(l)} dl - n_2 \int_0^{l_2} \frac{\mu(l)}{s(l)} dl \right] \quad (2)$$

gdzie:

n_1, n_2 - liczby zwojów skojarzonych ze strumieniami ϕ_3' oraz ϕ_3'' ,

$\Lambda_1, \Lambda_2 = \text{const.}$ - wypadkowa permeancja magnetowodu.

Stąd warunkiem zerowego napięcia uzwojenia magnetowodu jest:

$$n_1 \int_0^{l_1} \frac{\mu(l)}{s(l)} dl = n_2 \int_0^{l_2} \frac{\mu(l)}{s(l)} dl \quad (3)$$

W praktyce zależność (3) nie jest spełniona. Ze względu na nieokreślony charakter zmian przenikalności $\mu(l)$ oraz pola przekroju poprzecznego magnetowodu $s(l)$ nie można wyznaczyć wartości napięcia z zależności (2). Przedstawiony opis modelowy uwzględnia tylko jedną linię strumienia - ϕ_3 ; w rzeczywistości z każdym zwojem skojarzony jest strumień o innej wartości. Uwzględnienie tego faktu w opisie modelowym uczyniłoby model zbyt skomplikowanym i tym samym nieczytelnym.

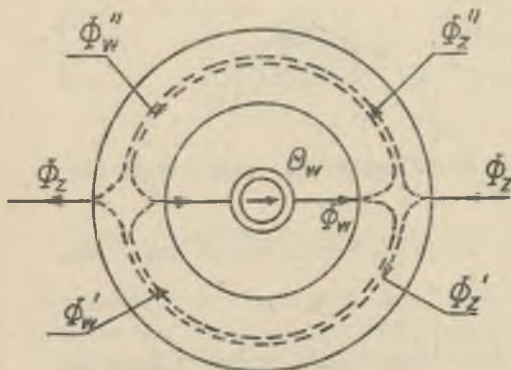
Napięcie indukujące się w uzwojeniu nawiniętym na magnetowodzie (uzwojenia detekcyjnym), opisane zależnością (2), wprowadza dodatkowy błąd, czasem porównywalny lub większy od błędu własnego komparatora. Dlatego istot-

ne jest określenie niejednorodności permeancji wzdłuż dróg magnetycznych strumieni ϕ'_3 oraz ϕ''_3 .

2. Metoda wyznaczenia niejednorodności permeancji magnetowodów

Najwłaściwszym sposobem badania niejednorodności permeancji jest umieszczenie magnetowodu w jednorodnym polu magnetycznym. Rozpływ strumieni przedstawia rys. 3; na rysunku zaznaczono tylko jedną linię $\phi_z = \phi'_z + \phi''_z$.

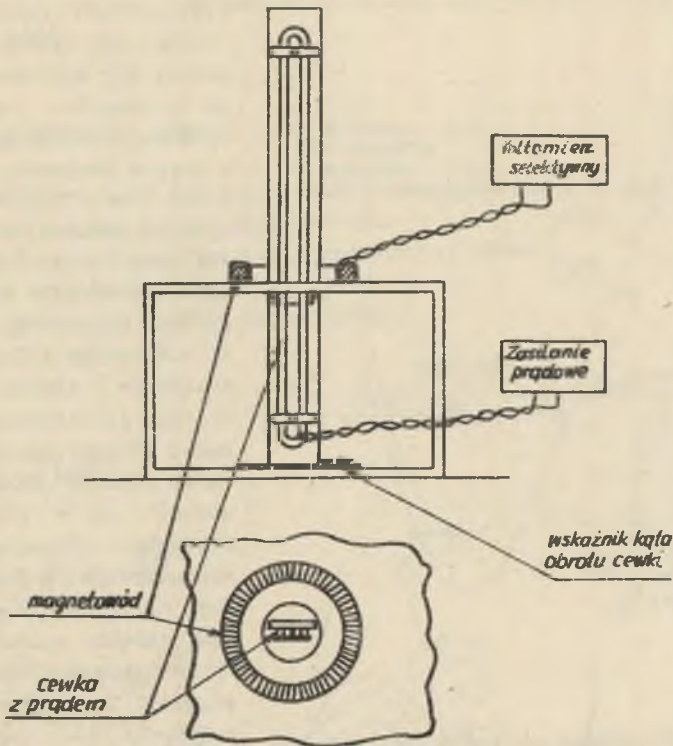
Identyczny rozpływ strumieni otrzymuje się wprowadzając strumień ϕ_w do magnetowodu od wewnątrz. Realizacja takiego wymuszenia strumienia jest znacznie łatwiejsza niż wytworzenie pola magnetycznego o jednakowej indukcji w przestrzeni obejmującej magnetowody, których średnica dochodzi do 150 mm. Siłę magnetomotoryczną θ_w można wytworzyć w uzwojeniu nawiniętym na sztabkę ferromagnetyczną o długości równej średnicy wewnętrznej magnetowodu z uzwojeniem. Sposób ten wymaga sztabek o różnych długościach. Innym sposobem



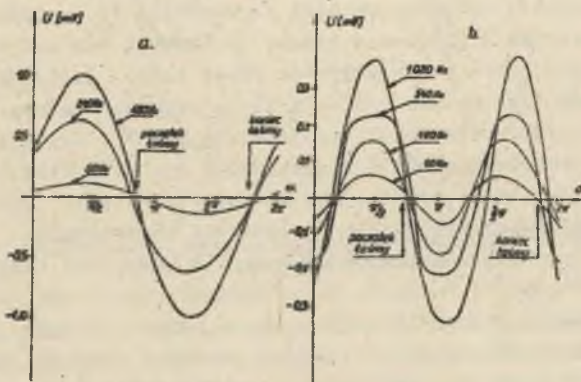
Rys. 3. Równowaga rozpływu strumieni wymuszonych z zewnątrz i z wewnątrz magnetowodu

wymuszenia siły magnetomotorycznej jest umieszczenie wewnątrz magnetowodu cewki z prądem. Metoda ta charakteryzuje się uniwersalnością; jedną cewkę można stosować do różnych średnic magnetowodów.

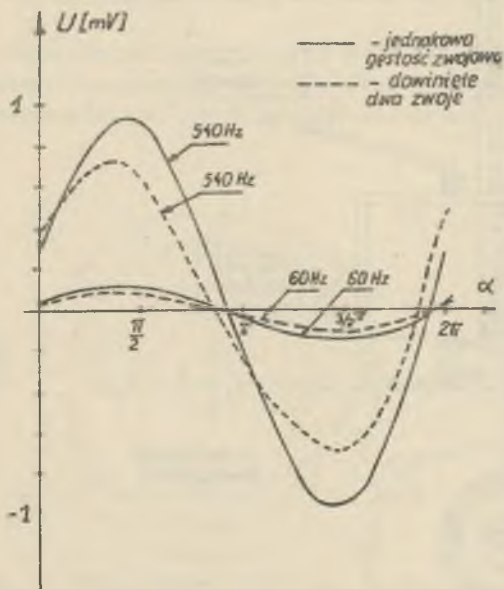
Szkic urządzenia do badania niejednorodności permeancji magnetowodów przedstawia rys. 4. Cewka umieszczona jest obrotowo i centrycznie względem osi magnetowodu. Kąt obrotu cewki wynosi $2\mathcal{F}$ i odczytywany jest na skali w dolnej części konstrukcji wsporczej. Cewka została wykonana z 10 zwojów przewodu o przekroju 1 mm^2 . Na badanym magnetowodzie, umieszczonym w tekstolitowym karkasie, nawinięto za pomocą nawijarki do toroidów uzwojenie charakteryzujące się jednakową gęstością zwojową. Napięcie będące wynikiem niejednorodności permeancji magnetowodu jest mierzone manowoltmierzem selektywnym. W celu wyeliminowania zakłóceń o częstotliwości 50 Hz przez cewkę przepuszczono prąd o częstotliwościach 60, 180, 370, 540 Hz i natężeniu 1,5 A. Zmiana kąta obrotu cewki spowodowała okresową zmianę napięcia, o okresie \mathcal{F} lub $2\mathcal{F}$. Zależność zmian napięcia w funkcji kąta obrotu dla dwóch reprezentatywnych przypadków przedstawia rys. 5. Punkty początkowe charakterystyk ustalono w sposób dowolny; zależą one od początkowego ustawienia magnetowodu względem wskaźnika kąta obrotu cewki. Znak minus oznacza zmianę fazy.



Rys. 4. Urządzenie do badania niejednorodności permeancji magnetowodów



Rys. 5. Zależność zmian napięcia w funkcji kąta obrotu dla magnetowodów: a) z jednym maksimum permeancji, b) z dwoma naprzeciwległymi maksimumi permeancji



Rys. 6. Wpływ zmiany gęstości zwojowej na napięcie uzwojenia magnetowodu

towodu przesuniętych o kąt π - jednak sposób zakończenia (zgrzewanie) jest jedną z przyczyn niejednorodności permeancji. Na rysunkach 5a oraz 5b zaznaczono miejsca zakończenia taśmy - pokrywają się one w przybliżeniu z punktami przejścia charakterystyk przez zero. Najlepszym sposobem zakończenia taśmy jest skośne jej ścięcie na długości połowy obwodu w początku i końcu taśmy, przesunięte wzajemnie o kąt π . Ścięcia te powinny być wykonane w trakcie produkcji magnetowodów przed obróbką termiczną, ponieważ chwilowe działanie mechaniczne na magnetowód (np. podczas odrywania końców taśmy) zmieniają trwale właściwości magnetyczne.

Na kształt i wartości napięć indukowanych w uzwojeniu magnetowodu ma wpływ gęstość zwojowa. W badanych magnetowodach zapewniono jednakową gęstość zwojową, wykonując uzwojenia za pomocą nawijarki magnetowodów toroidalnych. W celu określenia wpływu zmiany gęstości zwojowej na wartość napięcia, nawinięto w miejscu zakończenia uzwojenia dodatkowe dwa zwoje pokrywające się z ostatnim zwojem. Magnetowód posiadał średnią drogę magnetyczną $l = 0,4$ m, natomiast gęstość zwojowa uzwojenia wynosiła $3,1$ 1/cm. Wyniki przedstawiono na rys. 6. Jak widać z przebiegu zależności istnieje

Zmienność napięcia, w przybliżeniu sinusoidalna o okresie 2π , występuje w przypadku, gdy magnetowód posiada na długości obwodu jedno wyraźne maksimum permeancji. W drugim przypadku na długości obwodu występują dwa wyraźne maksima, przesunięte względem siebie o kąt w przybliżeniu równy π . Charakterystyczne jest to, że wartości maksymalne napięć dla magnetowodów o takich samych wymiarach geometrycznych i tej samej liczbie zwojów w przypadku jednego maksimum permeancji są w przybliżeniu dwukrotnie większe, niż dla magnetowodów z dwoma maksimumi permeancji w całym badanym zakresie częstotliwości.

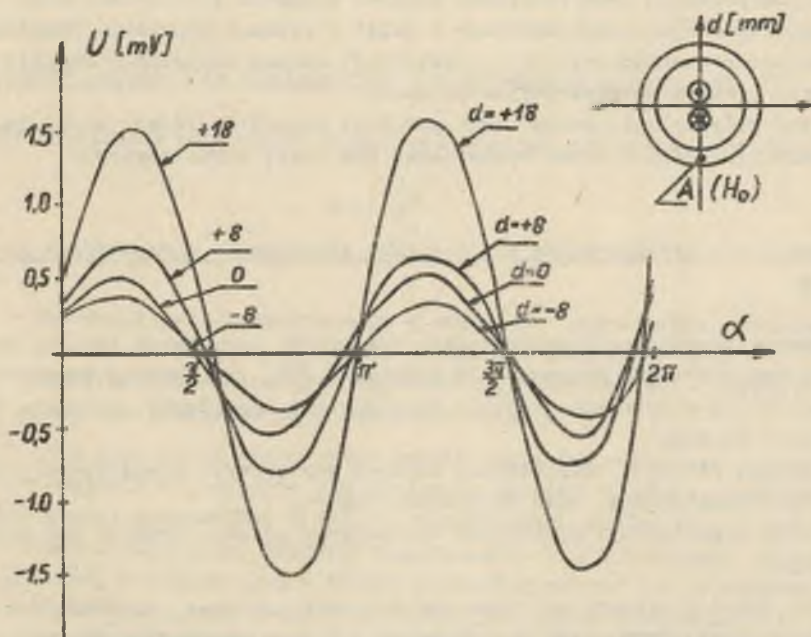
Istotnym problemem w konstrukcji magnetowodu są zakończenia taśmy permalojowej. Producent stara się wykonać zakończenia w punktach magne-

możliwość korekcji wpływu niejednorodności permeancji magnetowódów droga zmiany gęstości zwojowej. Metoda ta umożliwiła obniżenie wartości napięcia o ok. (50...80%).

3. Badanie właściwości metody

Na kształt i wartość napięcia uzwojenia magnetowodu w funkcji kąta obrotu cewki mają wpływ następujące warunki:

- zmiana centryczności ustawienia magnetowodu i cewki,
- zakłócenia zewnętrzne,
- zmiana poziomego ustawienia magnetowodu,
- skończone wymiary cewki.



Rys. 7. Wpływ przesunięcia środka magnetowodu względem środka cewki na napięcie uzwojenia magnetowodu

Wpływ zmiany centryczności zbadano doświadczalnie, przesuwając względem siebie środki cewki oraz magnetowodu. Następnie dla różnych wartości przesunięć mierzono w sposób analogiczny, jak podczas badania jednorodności permeancji, napięcie uzwojenia magnetowodu. Wyniki przedstawia rys. 7. Jak wynika z przebiegu charakterystyk, istnieje znaczący wpływ zmiany centryczności ustawienia magnetowodu i cewki na wartość napięcia. Przy roz-

gunięciu środków cewki oraz magnetowodu na odległość 8 mm wartość napięcia maksymalnego zmieniła się w porównaniu z wartością przy ustawieniu centrycznym o ok. 20%. W praktyce można z łatwością ustawić środki cewki i magnetowodu tak, by odległość między nimi była mniejsza niż 2 mm. Nie stwierdzono natomiast znaczącego wpływu pochylenia magnetowodu; zmiana płaszczyzny magnetowodu w granicach $\pm 10^\circ$ nie powoduje wyraźnych zmian napięcia. Istnieje wyraźny wpływ zakłóceń zewnętrznych, zwłaszcza pochodzących od elementów magnetycznych (np. od transformatora wyjściowego generatora), które można wyeliminować obracając urządzenie względem pozostałych narzędzi pomiarowych o określony kąt (np. $\pi/6$) i wykonując dla każdego ustawienia serię pomiarów. Jednak postępowanie takie jest żmudne i nie eliminuje zakłóceń, których źródłem jest niedoskonałość konstrukcji i wykonania urządzenia (np. skończona długość cewki; nieidealne, bezzakłócenkowe doprowadzenie prądu; oraz odprowadzenie sygnału pomiarowego). Właściwszą metodą postępowania jest przyjęcie poziomu zakłóceń jako dodatkowego błędu systematycznego, uwzględnionego z kolei w postaci poprawki. Przytoczone w artykule charakterystyki przedstawiają zmianę napięcia w funkcji kąta obrotu cewki z uwzględnieniem poprawek.

Zmiana rozstawienia boków cewki powoduje zmianę amplitudy napięcia. Dlatego należy ustalić rozstaw boków cewki dla całej serii pomiarów.

4. Wyznaczenie współczynnika skuteczności ekranowania komparatorów prądowych

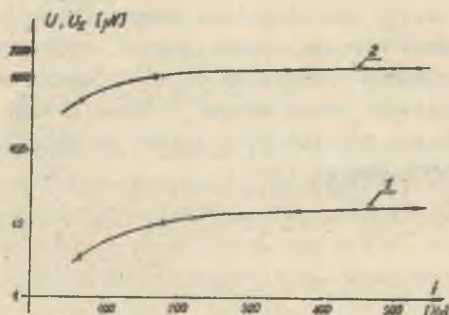
Opracowane urządzenie wykorzystano również do określenia jakości ekranowania magnetycznych komparatorów prądowych [4], [6]. Ekran komparatora składające się z czterech toroidów otaczających magnetowód, spełniają dwie zasadnicze funkcje:

- bocznikują strumień rozproszenia uzwojeń pomiarowych komparatora prądów; istotnie zmniejszając błąd porównania prądów,
- ekranują magnetowód z uzwojeniem detekcyjnym od zewnętrznych pól magnetycznych.

Miarą jakości ekranowania może być stosunek napięcia indukowanego w uzwojeniu detekcyjnym przed ekranowaniem - U oraz po ekranowaniu - U_E :

$$n_E = \frac{U}{U_E} \quad (4)$$

w sytuacji, gdy pole magnetyczne indukujące napięcie jest jednakowe. Na rys. 8 przedstawiono zmianę wartości indukowanych w uzwojeniu dedekcyjnym maksymalnych napięć w funkcji częstotliwości dla magnetowodu z ekranem - krzywa 1 oraz bez ekranu - krzywa 2. Wartości współczynnika $n_E = 80 \dots 120$ są typowe dla opisanej konstrukcji ekranów magnetycznych.



Rys. 8. Zmiana maksymalnych napięć w funkcji częstotliwości dla magnetowodu z ekranem (1), oraz bez ekranu (2)

5. Ilościowe określenie niejednorodności permeancji magnetowodu

Niejednorodność permeancji można oszacować za pomocą współczynnika:

$$n_{\Lambda} = \frac{H_{\Lambda}}{H_0} \quad (5)$$

gdzie:

H_0 - natężenie pola magnetycznego w punkcie } magnetowodu oznaczonym przez A na rys. 7; obliczone ze znanych zależności [1],

H_{Λ} - natężenie pola magnetycznego odpowiadające wartości maksymalnej napięcia indukowanego w uzwojeniu detekcyjnym.

Natężenie pola można wyznaczyć w sposób pomiarowy - mierząc natężenie prądu w uzwojeniu w przypadku doprowadzenia do jego końcówek napięcia o wartości równej maksymalnej z rys. 5. Współczynnik ten można interpretować w sposób następujący. Strumień rozproszenia lub zakłócający wnikający do magnetowodu rozdziela się w sposób przedstawiony na rys 3. Wskutek niejednorodności permeancji rozptyw strumieni jest nieproporcjonalny do liczb zwojów skojarzonych z tymi strumieniami, (dla stałej gęstości zwojowej), w uzwojeniu indukuje się napięcie. Napięcie to jest n_{Λ} -krotnie mniejsze, niż w przypadku, gdyby strumień zakłócający był skojarzony z całym uzwojeniem. Mamy więc n_{Λ} -krotne osłabienie efektu działania strumieni rozproszonych oraz zakłócających. Oszacowanie ma charakter graniczny, ponieważ do jego wyliczenia przyjęto wartość maksymalnego napięcia - z rys. 5.

Stąd dla częstotliwości $f = 60 \text{ Hz}$ współczynnik $n_{\Lambda} = 8 \cdot 10^{-5}$, natomiast dla $f = 1540 \text{ Hz}$ - $n_{\Lambda} = 5 \cdot 10^{-4}$.

6. Uwagi końcowe

Ze względu na właściwości metrologiczne komparatorów prądów magnetowody powinny charakteryzować się jak najmniejszymi współczynnikami n_A . Wyniki badań wg metody opisanej w artykule są więc jednym z kryteriów wyboru magnetowodów do realizacji komparatorów prądów. Metodę badania niejednorodności permeancji można również wykorzystać do określenia skuteczności ekranów magnetycznych komparatora.

LITERATURA

- [1] Goworkow W.A.: Pola elektryczne i magnetyczne. WNT, 1962.
- [2] Grochlskij A.L.: Metody obospieczienja tiesnoj swjazi pliecziwych induktiwno swjazanych elementow na osnowie multifilarnych sistem. Problemy elektrometrii, Nowosibirsk 1971.
- [3] Karandiejew K.B.: Transformatornyje izmeritelnyje mosty. Energija, 1970.
- [4] Kusters N.L.: A Current Comparator for the Precision Measurement of the D-C Ratio. IEEE, March 1963.
- [5] Kusters N.L.: The Development of the Current Comparator a High-Accuracy A-C Ratio Measuring Device. IEEE, Nov. 1962.
- [6] Miłek M.: Analiza i konstrukcja magnetycznego kompensatora przepływu prądu stałego w układzie porównania rezystancji. Praca doktorska, Gliwice, luty 1976.

МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЕРМЕАНЦИИ ТОРОИДАЛЬНЫХ МАГНИТНЫХ СЕРДЕЧНИКОВ

Р е з ю м е

В статье рассматриваются причины неоднородности пермеанции магнитных тороидальных сердечников и их влияние на метрологические свойства магнитных компараторов тока. Описывается метод исследования неоднородности пермеанции и определяется его численная мера. Указывается пригодность этого метода для определения коэффициента магнитного экранирования компараторов тока.

THE METHOD FOR DEFINING PERMEABILITY UNIFORMITY
OF TOROIDAL MAGNETIC CORES

S u m m a r y

The causes of permeability uniformity of toroidal magnetic cores and its influence on metrologic properties of magnetic current comparators are presented. The method for testing permeability uniformity is described, as well as its measure is defined. The method usability for defining efficiency of screening magnetic current comparators is shown.