

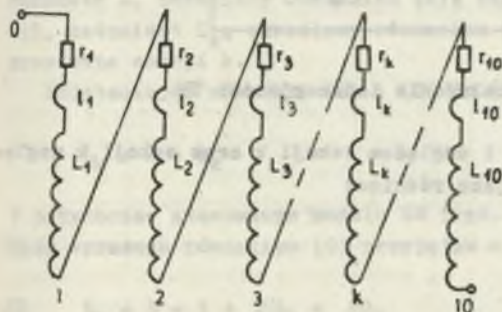
Tadeusz SKUBIS

DOKŁADNY MODEL I POMIARY INDUKCYJNOŚCI
ROZPROSZENIA UZWOJEŃ MULTIFILARNYCH

Streszczenie. Przedstawiono wyniki dokładnych badań indukcyjności uzwojeń multifilarnych; przedstawiono dokładniejszy model opisujący, wykazano związek indukcyjności rozproszenia z rozkładem gęstości prądu wzdłuż uzwojenia. Podano sposoby wyznaczenia indukcyjności rozproszenia. Zastosowano metodę doświadczalnych badań modelowych uzwojenia na rdzeniu nieferromagnetycznym.

1. Wprowadzenie

Uzwojenie multifilarne (UM), stosowane m.in. w konstrukcji dokładnych narzędzi mierzących lub odtwarzających stosunek dwu wartości wielkości elektrycznej, opisano w pracy [2]. Rezystancja oraz indukcyjność rozproszenia UM są parametrami współdecydującymi o błędzie przekładni. Wpływ tych parametrów na błąd przekładni jest analizowany zawsze przy założeniu, że rezystancje (r_k) oraz indukcyjności rozproszenia (l_k) każdej sekcji UM są włączone szeregowo z indukcyjnościami głównymi L_k tych sekcji (rys. 1) [1], [3]. Jednym z warunków obliczenia błędów przekładni, np. dzielnika



Rys. 1. Fragment stosowanego dotychczas modelu UM

indukcyjnego, jest znajomość wartości r_k oraz l_k . Z analizy schematu zastępczego podanego na rys. 1 wyciąga się wniosek ogólny, że parametry r_k oraz l_k powinny mieć możliwie małe i wyrównane wartości [4], [8].

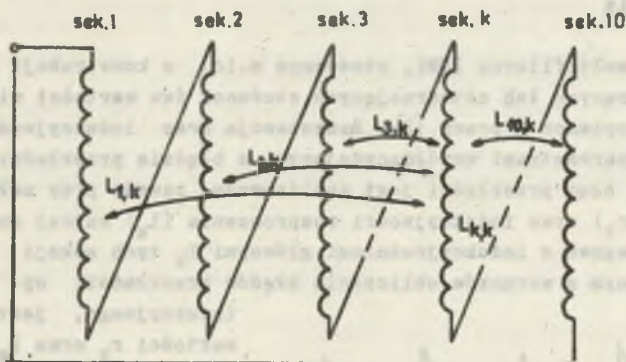
Rezystancje r_k można zmierzyć oddzielnie dla każdej sekcji UM, np. mostkiem prądu stałego. Przyjmuje się, że w zakresie małych częstotliwości wartości r_k są takie same jak przy prądzie stałym. Po-

szukiwanie równie prostego sposobu pomiaru indukcyjności l_k doprowadziło autora do postawienia pytania: jaki strumień jest źródłem indukcyjności rozproszenia l_k oraz jaka jest fizyczna interpretacja tego parametru. Od-

powieść na to zasadnicze pytanie wymagała rozbudowania modelu z rys. 1. Analizę wykonano dla uswojenia 10-sekcyjnego. Okazało się, że nie ma prostej analogii między rezystancją r_k a indukcyjnością l_k , ponieważ fizycznie parametry L_k oraz l_k są związane nie tylko z uswojeniem sekcji k ale także z uswojeniami wszystkich pozostałych sekcji.

2. Model rozłożenia indukcyjności UM

W proponowanym modelu (rys. 2) indukcyjności własne, wzajemne i rozproszenia poszczególnych sekcji mają po dwa wskaźniki: pierwszy oznacza sekcję wytwarzającą strumień magnetyczny, od którego zależy dana indukcyjność, natomiast drugi oznacza sekcję, do której dana indukcyjność jest włączona szeregowo w schemacie następczym. Zgodnie z tą umową $L_{i,k}$ oznacza indukcyjność wzajemną sekcji i względem sekcji k , natomiast $l_{k,k}$ oznacza indukcyjność własną sekcji k .



Rys. 2. Nowy model rozłożenia indukcyjności UM

Indukcyjności wzajemne sekcji i względem sekcji k oraz sekcji k względem i można formalnie wyrazić jako różnice:

$$L_{i,k} = L_{i,i} - l_{i,k} \quad (1)$$

$$L_{k,i} = L_{k,k} - l_{k,i} \quad (2)$$

przy czym $l_{i,k}$ oraz $l_{k,i}$ są indukcyjnościami rozproszenia sekcji i względem sekcji k i odwrotnie. Z równań (1) i (2) wynika, że dla $i = k$ parametr $l_{i,k}$ ma wartość 0. Jest to równoznaczne z założeniem, że cały strumień wytworzony przez prąd w sekcji i kojarzy się z tą sekcją (por. rys. 4).

Indukcyjności wzajemne $L_{i,k}$ oraz $L_{k,i}$ są sobie równe:

$$L_{i,k} = L_{k,i} \quad (3)$$

Uwzględniając dodatnie sprzężenie wszystkich sekcji oblicza się wypadkową indukcyjność sekcji k , którą oznaczono przez L_k :

$$L_k = \sum_{i=1}^{10} L_{i,k} \quad (4)$$

Podstawiając równanie (1) do (4) otrzymuje się:

$$L_k = \sum_{i=1}^{10} L_{i,i} - \sum_{i=1}^{10} l_{i,k} \quad (5)$$

Wprowadzono oznaczenia L oraz l_k , aby proponowany model rozłożenia indukcyjności UM można było porównać z modelem stosowanym dotychczas:

$$L = \sum_{i=1}^{10} L_{i,i} \quad (6)$$

$$l_k = - \sum_{i=1}^{10} l_{i,k} \quad (7)$$

Parametr L , określony równaniem (6), nazwano indukcyjnością główną sekcji, natomiast l_k , określony równaniem (7), nazwano indukcyjnością rozproszenia sekcji k .

Podstawiając równanie (6) i (7) do (5) otrzymuje się

$$L_k = L + l_k \quad (8)$$

W dotychczas stosowanym modelu UM (rys. 1) indukcyjność główna sekcji k była wyrażona równaniem (9) przyjętym a priori [4]:

$$L_k = L + l + \Delta L_k + \Delta l_k \quad (9)$$

W równaniu (9) L oznacza średnią wartość indukcyjności głównej sekcji, l - średnią wartość indukcyjności rozproszenia tej sekcji, a ΔL_k oraz Δl_k odchylenia indukcyjności głównej i rozproszenia od wartości średnich. Parametry występujące w równaniu (9) mają znaczenie tylko arytmetyczne, ponieważ w obecnym stanie techniki nie można ich wyznaczyć pomiarowo. Nie-

którzy autorzy podają ich wartości szacunkowe [1], [4]. Równanie (9) stosowano dotychczas przez prostą analogię z modelem rozłożenia rezystancji UM (rys. 1), który nie jest kwestionowany. Równanie (9) powinno być zastąpione przez równania (8), (6) i (7), które uwzględniają naturę UM, a parametry w nich występujące mogą być zmierzone.

Z przyjętego przez autora modelu wynika ważny wniosek: wartość indukcyjności głównej L jest niezależna od k i dlatego ma jednakowe wartości dla wszystkich sekcji UM. Z tego powodu w równaniu (9) niecelowe jest uwzględnianie składnika ΔL_k . Ponadto jeżeli UM jest nawinięte na rdzeniu ferromagnetycznym o dużej przenikalności magnetycznej, to zachodzi relacja $L_{1,1} \gg l_{1,k}$, a więc np. przy obliczaniu impedancji wejściowej sekcji wystarczy uwzględnić tylko L .

3. Rozkład napięcia na indukcyjnościach UM

Konsekwencją przyjęcia modelu rozłożenia indukcyjności UM przedstawionego na rys. 2 i opisanego równaniami (6), (7) i (8) jest inny, dokładniejszy sposób obliczania napięć błędów zależnych od indukcyjności rozproszenia. Dotychczas napięcie na sekcji k opisywano równaniem (10) [7]:

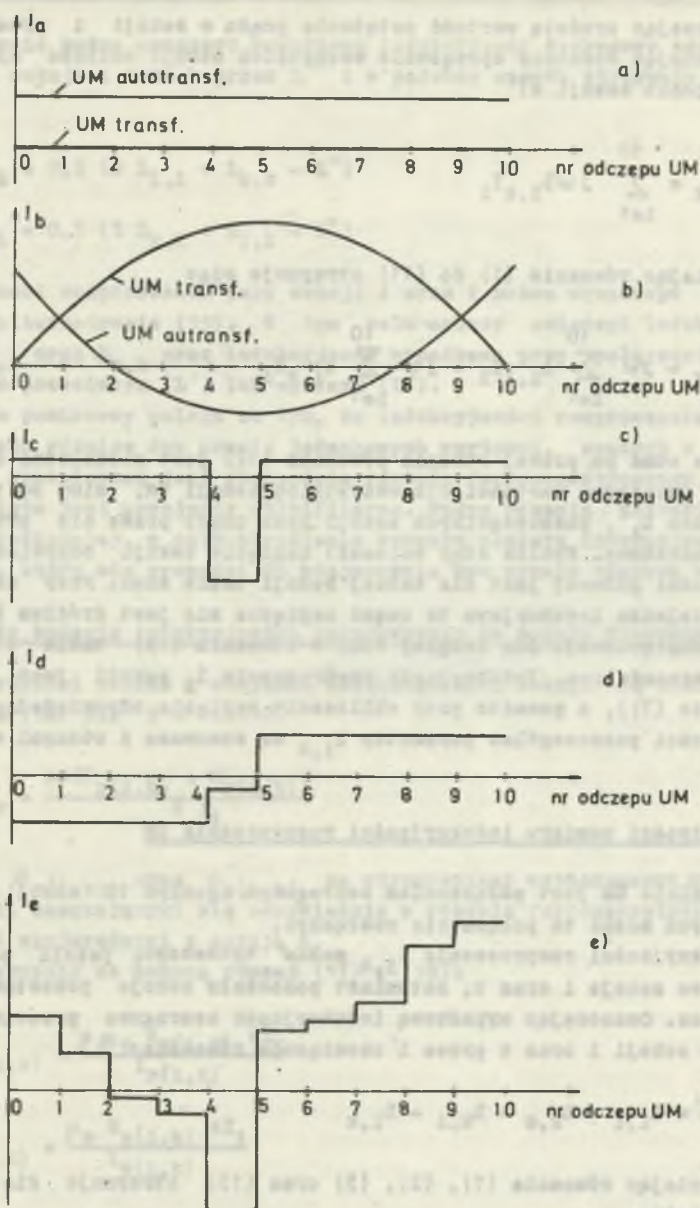
$$U_k = (r_k + j\omega L_k) I_k \quad (10)$$

w którym I_k było średnią wartością natężenia prądu w sekcji k , a L_k było wyrażone równaniem (9).

Z dotychczasowych badań wiadomo, że gęstość prądu wzdłuż UM jest niejednakowa. W prądzie tym wyróżnia się na ogół trzy składniki [6], [8]:

- 1) prąd stanu jałowego, który przenosi energię potrzebną do namagnesowania rdzenia (płyne tylko w uzwojeniu zasilanym autotransformatorowo) (rys. 3a);
- 2) prąd obciążenia wewnętrznego, zależny głównie od pojemności własnych uzwojenia, o charakterystycznym w kształcie paraboli rozkładzie gęstości wzdłuż uzwojenia (rys. 3b). Prąd ten w niektórych sekcjach może mieć znacznie większe wartości niż prąd stanu jałowego, a jego wartości w tej samej chwili w różnych sekcjach mogą mieć różne zwroty;
- 3) prąd obciążenia zewnętrznego, zależny od impedancji wejściowej dekady dołączonej kaskadowo do UM, jak i od zewnętrznej impedancji obciążenia np. dzielnika. Jego gęstość wzdłuż UM jest również niejednakowa (rys. 3c,d).

Przy obliczaniu napięć na sekcjach UM różnice gęstości wypadkowego prądu wzdłuż uzwojenia muszą być uwzględnione. Autor przyjął jednak w analizie, w celu uproszczenia zapisu, że gęstość prądu wzdłuż każdej pojedynczej sekcji UM jest jednakowa (rys. 3e), a rezystancja UM wynosi 0.



Rys. 3. Składowe natężenia prądu w poszczególnych sekcjach UM

a) prąd stanu jałowego; b) prąd obciążenia wewnętrznego; c) prąd obciążenia niższą dekadą; d) prąd obciążenia dzielnika zewnętrznej impedancją; e) wartości średnie prądu w poszczególnych sekcjach UM zasilanego autotransformatorowo ($I_e = I_a + I_b + I_c + I_d$)

Oznaczając średnią wartość natężenia prądu w sekcji i przez I_i oraz uwzględniając dodatkowo sprzężenie wszystkich sekcji oblicza się napięcie na uzwojeniu sekcji k :

$$U_k = \sum_{i=1}^{10} j\omega L_{i,k} I_i \quad (11)$$

Podstawiając równanie (1) do (11) otrzymuje się:

$$U_k = j\omega \sum_{i=1}^{10} L_{i,i} I_i - j\omega \sum_{i=1}^{10} l_{i,k} I_i \quad (12)$$

Pierwsza suma po prawej stronie równania (12) jest niezależna od k i dlatego ma jednakowe wartości dla wszystkich sekcji UM, mimo że indukcyjności własne $L_{i,i}$ poszczególnych sekcji oraz prądy przez nie przepływające są niejednakowe. Wynika stąd wniosek: napięcie sekcji odpowiadające indukcyjności głównej jest dla każdej sekcji takie samo. Przy zastosowaniu UM w dzielniku indukcyjnym ta część napięcia nie jest źródłem błędów przekładni napięciowej. Dla drugiej sumy w równaniu (12) takie stwierdzenia nie są uzasadnione. Indukcyjność rozproszenia l_k sekcji jest funkcją k (równanie (7)), a ponadto przy obliczaniu napięcia odpowiadającego tej indukcyjności poszczególne parametry $l_{i,k}$ są sumowane z różnymi wagami (I_i).

4. Możliwości pomiaru indukcyjności rozproszenia UM

Normalnie UM jest połączeniem szeregowym zgodnym 10 sekcji. W celach badawczych można te połączenia rozłączyć.

Indukcyjności rozproszenia $l_{i,k}$ można wyznaczyć, jeżeli połączy się szeregowo sekcje i oraz k , natomiast pozostałe sekcje pozostawi się niepołączone. Oznaczając wypadkową indukcyjność szeregowo połączonych sekcji i oraz k przez L' obowiązuje równanie:

$$L' = L_{i,i} + L_{k,k} - L_{k,i} - L_{i,k} \quad (13)$$

Uwzględniając równania (1), (2), (3) oraz (13) otrzymuje się po przekształceniu:

$$l_{i,k} = 0,5 (L_{i,i} - L_{k,k} + L') \quad (14a)$$

$$l_{k,i} = 0,5 (L_{k,k} - L_{i,i} + L') \quad (14b)$$

Alternatywnie można oznaczyć wypadkową indukcyjność szeregowo zgodnie połączonych sekcji i oraz k przez L'' i w podobny sposób otrzymuje się równania:

$$L_{i,k} = 0,5 (3 L_{i,i} + L_{k,k} - L'') \quad (15a)$$

$$L_{k,i} = 0,5 (3 L_{k,k} + L_{i,i} - L'') \quad (15b)$$

Indukcyjności rozproszenia pary sekcji i oraz k można wyznaczyć z równań (14) lub alternatywnie (15). W tym celu należy zmierzyć indukcyjności własne $L_{i,i}$ oraz $L_{k,k}$ oraz indukcyjność wypadkową przy połączeniu sekcji szeregowo przeciwnym (L') lub zgodnym (L'').

Problem pomiarowy polega na tym, że indukcyjności rozproszenia wyznacza się jako różnice dwu prawie jednakowych wartości, znanych z pomiaru. Taki stan spowodowany jest obecnością rdzenia ferromagnetycznego, na którym nawinięte jest uswojenie multifilarne. Wpływ rdzenia zostanie przedstawiony dokładniej, w celu określenia sposobu pomiaru indukcyjności rozproszenia, który nie prowadzi do podejmowania dwu prawie równych wartości.

4.1. Metoda badania indukcyjności rozproszenia na modelu fizycznym

Indukcyjności własne i wzajemne poszczególnych sekcji są zdefiniowane równaniami (16) dla $i = 1 \dots 10$.

$$L_{i,k} = \frac{sd(\Phi_{R(i,k)} + \Phi_{P(i,k)})}{d I_i} \quad (16)$$

przy czym $\Phi_{R(i,k)}$ oraz $\Phi_{P(i,k)}$ są strumieniami wytworzonymi przez prąd w sekcji i , samkającymi się odpowiednio w rdzeniu ferromagnetycznym i powietrzu, i skojarzonymi z sekcją k .

Możne je wyrazić za pomocą równań (17) i (18):

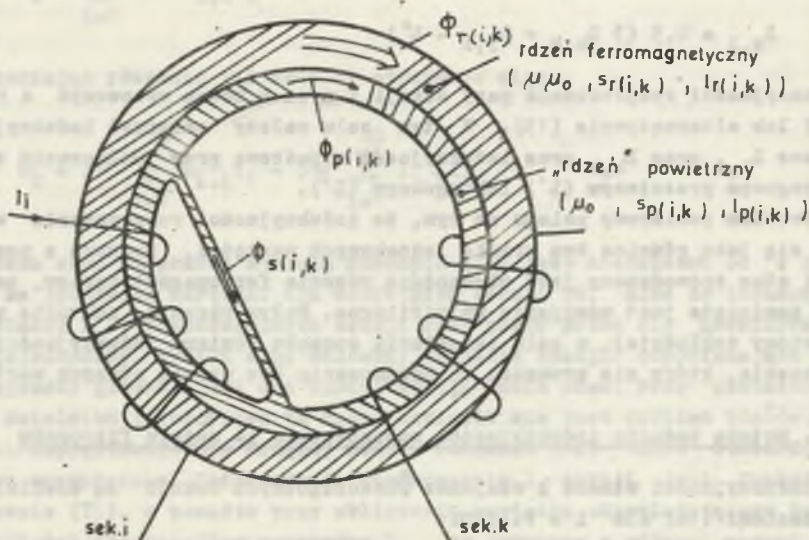
$$\Phi_{R(i,k)} = \frac{\mu \mu_0 S_{R(i,k)} I_i}{L_{R(i,k)}} \quad (17)$$

$$\Phi_{P(i,k)} = \frac{\mu_0 S_{P(i,k)} I_i}{L_{P(i,k)}} \quad (18)$$

przy czym przyjęto oznaczenia: μ, μ_0 - przenikalności względna rdzenia ferromagnetycznego oraz bezwzględna próżni; $S_{R(i,k)}, S_{P(i,k)}$ - średnie wartości przekrojów poprzecznych rdzenia ferromagnetycznego i równoległego "rdzenia" powietrznego pary sekcji i oraz k ; $L_{R(i,k)}, L_{P(i,k)}$ - średnie wartości dróg strumieni w rdzeniu ferromagnetycznym i powietrzu pary sekcji i oraz k (rys. 4).

Podstawiając równania (17) i (18) do (16) otrzymuje się:

$$L_{i,k} = s^2 \mu_0 \left[\frac{\mu S_{r(i,k)}}{l_{r(i,k)}} + \frac{S_{p(i,k)}}{l_{p(i,k)}} \right] \quad (19)$$



Rys. 4. Schemat rozplywu strumienia wytworzonego przez prad w sekcji i oraz oznaczenie parametrów

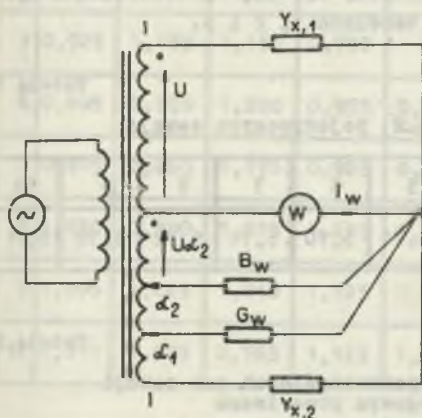
W praktyce zachodzą relacje $\mu \gg 1$ oraz $S_{r(i,k)} \gg S_{p(i,k)}$. Zakłada się, że parametrami różnicującymi poszczególne wartości $L_{i,k}$ są $S_{p(i,k)}$ oraz $l_{p(i,k)}$, natomiast pozostałe parametry mają wartości niezależne od numeru sekcji i . Z tego założenia i z równania (19) wynika ważny wniosek: wartości różnic $L_{j,j} - L_{i,k}$ dla $i, j, k = 1 \dots 10$ nie zależą od obecności rdzenia ferromagnetycznego w UM, czyli również wartości L' , $l_{1,k}$ oraz $l_{k,1}$ (równania (13), (14a) i (14b)) są niezależne od obecności tego rdzenia, natomiast indukcyjności $L_{i,k}$ są prawie wprost proporcjonalne do μ . Oznacza to, że w przypadku uzwojenia nawiniętego na rdzeniu nieferromagnetycznym, np. tekstolitowym, przy założeniu powtarzalności geometrii nawinięcia, indukcyjności własne są μ -krotnie mniejsze niż w przypadku nawinięcia UM na rdzeniu ferromagnetycznym o takich samych wymiarach, natomiast indukcyjności rozproszenia są niezmiennicze. O wartościach $l_{1,k}$ oraz $l_{k,1}$ (równania (14)) decyduje L' , które jest mierzone bezpośrednio.

Powyższe ustalenia wskazują sposób pomiaru indukcyjności rozproszenia, który może być wykorzystany do doskonalenia technologii wykonania UM: należy nawinąć uzwojenie na rdzeniu nieferromagnetycznym, łączyć sekcje parami szeregowo przeciwnie, zmierzyć wartości $L_{1,1}$ oraz L' i obliczyć $l_{1,k}$

oraz $l_{k,i}$ z równań (14). Zastosowanie połączeń szeregowych zgodnych jest niecelowe, ponieważ w równaniach (15) nadal występują różnice prawie jednakowych wartości.

4.2. Metoda mostka różnicowego

W przypadku UM nawiniętego na rdzeniu ferromagnetycznym nie ma możliwości usunięcia tego rdzenia bez naruszenia geometrii uzwojenia. Sposób pomiaru opisany w rozdziale 4.1 jest wtedy nieprzydatny. Proponuje się w takim przypadku zastosowanie mostka transformatorowego, mierzącego bezpośrednio różnicę admittancej (rys. 5).



Rys. 5. Mostek do pomiaru różnicy admittancej

Stan równowagi mostka ($I_w = 0$) opisany jest równaniem (20):

$$Y_{x1} - Y_{x2} = \alpha_1 G_w + j\alpha_2 B_w \quad (20)$$

Mostek ten może dokładnie mierzyć nawet bardzo małe różnice admittancej ze względu na dużą czułość, która jest cechą charakterystyczną mostków transformatorowych. Można go wykorzystać w następujący sposób. Do wejścia Y_{x2} należy dołączyć admittancej o wartości bardzo zbliżonej do admittancej wejściowych pojedynczych sekcji sprawdzanego UM $[Y_{x2} \approx 1/(R_1 + j\omega L_{1,i})]$. Wartość Y_{x2} musi być stała w czasie wykonywania serii pomiarów. Następnie do wejścia Y_{x1} dołącza się kolejno admittancej wejściowe pojedynczych sekcji badanego UM i dokładnie mierzy się różnice (dla $i=1 \dots 10$):

$$\frac{1}{R_1 + j\omega L_{1,1}} - Y_{x2} = \alpha_{1,1} G_w + j\alpha_{2,1} B_w$$

Odejmując stronami te różnice od siebie otrzymuje się:

$$\frac{1}{R_1 + j\omega L_{1,1}} - \frac{1}{R_k + j\omega L_{k,k}} = (\alpha_{1,1} - \alpha_{1,k}) G_w + j(\alpha_{2,1} - \alpha_{2,k}) B_w \quad (21)$$

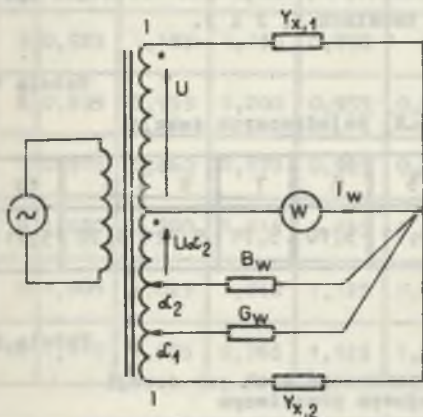
Przyjmując, że admittancej wejściowa pojedynczej sekcji UM wynosi Y_{x2} , z równania (21) oblicza się:

$$(R_k - R_1) + j\omega(L_{k,k} - L_{1,1}) \approx \frac{(\alpha_{1,1} - \alpha_{1,k}) G_w + j(\alpha_{2,1} - \alpha_{2,k}) B_w}{Y_{x2}^2} \quad (22)$$

oraz $l_{k,1}$ z równań (14). Zastosowanie połączeń szeregowych zgodnych jest niecelowe, ponieważ w równaniach (15) nadal występują różnice prawie jednakowych wartości.

4.2. Metoda mostka różnicowego

W przypadku UM nawiniętego na rdzeniu ferromagnetycznym nie ma możliwości usunięcia tego rdzenia bez naruszenia geometrii uzwojenia. Sposób pomiaru opisany w rozdziale 4.1 jest wtedy nieprzydatny. Proponuje się w takim przypadku zastosowanie mostka transformatorowego, mierzącego bezpośrednio różnicę admittancej (rys. 5).



Rys. 5. Mostek do pomiaru różnicy admittancej

Stan równowagi mostka ($I_w = 0$) opisany jest równaniem (20):

$$Y_{x1} - Y_{x2} = \alpha_1 G_w + j\alpha_2 B_w \quad (20)$$

Mostek ten może dokładnie mierzyć nawet bardzo małe różnice admittancej ze względu na dużą czułość, która jest cechą charakterystyczną mostków transformatorowych. Można go wykorzystać w następujący sposób. Do wejścia Y_{x2} należy dołączyć admittancej o wartości bardzo zbliżonej do admittancej wejściowych pojedynczych sekcji sprawdzanego UM $[Y_{x2} \approx 1/(R_1 + j\omega L_{1,1})]$. Wartość Y_{x2} musi być stała w czasie wykonywania serii pomiarów. Następnie do wejścia Y_{x1} dołącza się kolejno admittancej wejściowe pojedynczych sekcji badanego UM i dokładnie mierzy się różnice (dla $i=1 \dots 10$):

$$\frac{1}{R_1 + j\omega L_{1,1}} - Y_{x2} = \alpha_{1,i} G_w + j\alpha_{2,i} B_w$$

Odejmując stronami te różnice od siebie otrzymuje się:

$$\frac{1}{R_1 + j\omega L_{1,1}} - \frac{1}{R_k + j\omega L_{k,k}} = (\alpha_{1,i} - \alpha_{1,k}) G_w + j(\alpha_{2,i} - \alpha_{2,k}) B_w \quad (21)$$

Przyjmując, że admittancej wejściowa pojedynczej sekcji UM wynosi Y_{x2} , z równania (21) oblicza się:

$$(R_k - R_1) + j\omega(L_{k,k} - L_{1,1}) \approx \frac{(\alpha_{1,i} - \alpha_{1,k}) G_w + j(\alpha_{2,i} - \alpha_{2,k}) B_w}{Y_{x2}^2} \quad (22)$$

Tabela 3

Indukcyjności rozproszenia $l_{i,k}$ oraz $l_{k,i}$ [μH]
(obliczone wg równań (14))

Nr	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	0,920	0,905	0,800	0,895	0,875	0,885	0,990	0,985	0,980
2	0,940	0	1,095	1,060	1,175	0,955	0,850	0,770	1,025	0,995
3	0,945	1,115	0	1,040	1,140	1,220	1,180	1,015	1,060	0,775
4	0,840	1,080	1,040	0	0,800	0,955	0,935	1,255	1,145	1,135
5	0,925	1,185	1,130	0,790	0	0,930	0,960	1,205	0,920	1,025
6	0,895	0,955	1,200	0,935	0,920	0	0,875	1,000	0,880	1,205
7	0,915	0,860	1,170	0,925	0,960	0,885	0	0,960	0,940	1,005
8	1,030	0,790	1,015	1,255	1,215	1,020	0,970	0	0,795	1,040
9	1,005	1,025	1,040	1,125	0,910	0,880	0,930	0,775	0	0,955
10	1,010	1,005	0,765	1,125	1,025	1,215	1,005	1,030	0,965	0

Pomiary indukcyjności $L_{i,i}$ oraz L' wykonano mostkiem EM 484 firmy Tesla. Nominalna skrajna niedokładność pomiaru indukcyjności tym mostkiem na najmniejszym zakresie (100 μH) wynosi $\pm 0,5 \mu\text{H}$. Ponieważ wartości mierzone należą do wąskich przedziałów: (5,6; 5,8) μH (tab. 1) oraz (1; 2) μH (tab. 2), więc każda wartość z danego przedziału jest mierzona z takim samym błędem bezwzględnym ($\Delta_{s,L}$ lub $\Delta_{s,L'}$), który dla danego przedziału ma charakter błędu systematycznego. Błąd Δ_s obciąża również średnią wartość wyników z danego przedziału. Każdy wynik pomiaru obciążony jest, oprócz błędu Δ_s , również przypadkowym błędem przyrządowym Δ_p , który zależy głównie od oszczędności mostka. Na podstawie obserwacji wskazani mostka skrajną wartość błędu Δ_p , w wykorzystywanej oszczędności zakresu pomiarowego, oszacowano na $\pm 0,005 \mu\text{H}$. Poszczególne wartości indukcyjności rozproszenia $l_{i,k}$ (tab. 3) oraz ich skrajne błędy obliczono na podstawie równania (23), wynikającego z równania (14a):

$$l_{i,k} = 0,5 [(L_{i,i} + \Delta_{s,L} \pm \Delta_p) - (L_{k,k} + \Delta_{s,L} \pm \Delta_p) + (L' + \Delta_{s,L'} \pm \Delta_p)] \quad (23)$$

Błędy skrajne obliczonych wartości $l_{i,k}$ wynoszą:

- systematyczny: $\Delta_{s,1} = 0,5 \Delta_{s,I'} = 0,25 \mu\text{H}$; $\Delta_{s,1}^0 < 30\%$;

- przypadkowy: $\Delta_{p,1} \leq 1,5 \Delta_p = 0,0075 \mu\text{H}$; $\Delta_{p,1}^0 < 1\%$.

Dane w tabeli 3 stanowią niezbędną informację do dokładnego modelu UM i w tej formie powinny być wykorzystane.

Jakość wykonanego UM, ze względu na indukcyjność rozproszenia, może być zbiorczo scharakteryzowana przez:

- średnią wartość $\bar{l}_{i,k}$ indukcyjności rozproszenia:

$$\bar{l}_{i,k} = \frac{1}{90} \sum_{i=1}^{10} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{10} l_{i,k} \quad (24)$$

- odchylenie standardowe σ poszczególnych wartości:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{90} \sum_{i=1}^{10} \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^{10} (l_{i,k} - \bar{l}_{i,k})^2} \quad (25)$$

Dla badanego uzwojenia parametry te wynoszą $\bar{l}_{i,k} = (0,99 \pm 0,25) \mu\text{H}$;
 $\sigma = (0,12 \pm 0,01) \mu\text{H}$.

6. Wnioski

Wnioski szczegółowe zostały sformułowane przy wyprowadzonych zależnościach, głównie w rozdz. 2 i 3. Wnioski ogólne są następujące:

1. Model rozłożenia indukcyjności UM stosowany dotychczas jest mało dokładny i nie uwzględnia natury indukcyjności głównej i rozproszenia poszczególnych sekcji. W nowym modelu indukcyjności te są bezpośrednio uzależnione od indukcyjności własnych i wzajemnych poszczególnych par sekcji. Wartości indukcyjności głównej L oraz rozproszenia l_k (równania (6) i (7)), stosowane również dotychczas, są uproszczonymi elementami charakterystyki UM i nie mogą być stosowane do dokładnych obliczeń błędów.
2. Pełną informację o indukcyjności rozproszenia UM należy zapisać w formie tabeli zawierającej 90 wartości. W równaniach napięć błąd wartości te występują z różnymi wagami i dlatego przy obliczeniach dokładnych stosowanie wartości średniej jest nieuzasadnione. Średnia wartość indukcyjności rozproszenia i odchylenie standardowe poszczególnych war-

tości mogą służyć jako zbiorcze wskaźniki jakości wykonanego uzwojenia.

3. Za pomocą typowego mostka do pomiarów małych indukcyjności można zmierzyć indukcyjności rozproszenia $L_{i,k}$ z niedokładnością rzędu kilkadziesiąt %, a ich rozrzut z niepewnością kilku %, jeżeli UM jest nawinięte na rdzeniu nieferromagnetycznym. Istotnymi cechami takiej konstrukcji są: 1) μ -krotne zmniejszenie indukcyjności własnych i wzajemnych poszczególnych sekcji w stosunku do uzwojenia nawiniętego na rdzeniu ferromagnetycznym; 2) niezmiennosc indukcyjności rozproszenia. Taki sposób wykonania UM i pomiaru może być stosowany np. przy doskonaleniu technologii wykonania UM.
4. Mostek różnicowy umożliwia wykonanie pomiarów indukcyjności rozproszenia UM, nawiniętego na rdzeniu ferromagnetycznym o wysokiej przenikalności.
5. Mimo że przedstawiona analiza jest wykonana dla uzwojenia 10-sekcyjnego, to jednak wyprowadzone zależności dają się łatwo przystosować do opisu uzwojeń o innej liczbie sekcji.

LITERATURA

- [1] Binnie A.J., Foord T.R.: Toroidal Ratio Transformers. Electronic Engineering, Nov. 1964.
- [2] Dudziewicz J. (red.): Etalony i precyzyjne pomiary wielkości elektrycznych, WKiŁ, Warszawa 1982.
- [3] Emschermann H.H., Fuhrmann B.: Low-Frequency One-Step Inductive Voltage Divider with Ratio up to 1:1000. IEEE Trans. on Instr. and Meas., vol. IM-24, nr 4, Dec. 1975.
- [4] Hill J.J., Deacon T.A.: Theory, design and measurement of inductive voltage dividers. Proc. of IEE, vol. 115 nr 5, May 1968.
- [5] Puśledzki J., Skubis T.: Niektóre praktyczne aspekty wykonania uzwojeń multifylarnych. ZN Pol. Śl. Elektryka nr 55, Gliwice 1976.
- [6] Skubis T.: Konstrukcja i błędy indukcyjnych dzielników napięcia. Normalizacja nr 4, 1979.
- [7] Skubis T.: Źródła błędów autotransformatorowych indukcyjnych dzielników napięcia. ZN Pol. Śl. Elektryka nr 55, Gliwice 1976.
- [8] Skubis T.: Opracowanie konstrukcji i technologii wzorcowych wielodekadowych indukcyjnych dzielników napięcia. Praca doktorska, Pol. Śl. Gliwice 1975.

Recenzent doc. dr inż. Świątozar Sorokowski

Wpłynęło do Redakcji dnia 15.XI.1983 r.

ТОЧНАЯ МОДЕЛЬ И ИЗМЕРЕНИЯ ИНДУКТИВНОСТИ РАССЕЯНИЯ МУЛЬТИФИЛАРНЫХ ОБМОТОК

Р е з ю м е

В статье представляются результаты тщательных исследований индуктивности мультифилярных обмоток; представляется точнейшая описывающая модель, выявляется взаимосвязь между индуктивностью рассеяния и распределением плотности тока вдоль обмотки. Даются способы определения индуктивности рассеяния. Применяется метод опытных модельных исследований обмотки на неферромагнитных сердечниках.

PRECISE MODEL AND MEASUREMENTS OF LEAKAGE INDUCTANCE OF MULTIFILAR WINDINGS

S u m m a r y

Results of precise testings of multifilar windings inductance have been presented as well as a more precise descriptive model is given. There has been found out relation between leakage inductance and current density distribution along the windings. Some methods of leakage inductance determining have been given. There has been applied a method of experimental model testing of winding coiled on nonferromagnetic core.