

Władysław MIZIA

WPLYW ROZMIESZCZENIA UZWOJEŃ CYLINDRYCZNYCH NA PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO TRANSFORMATORA DWUUZWOJENIOWEGO

Streszczenie. W pracy analizuje się transformatory dwuuzwojeniowe z uzwojeniami cylindrycznymi. Analiza uwzględnia sprzężenia wzajemne uzwojeń wynikające z pola magnetycznego rozproszenia, które zależą od rozmieszczenia uzwojeń na rdzeniu magnetycznym. W wyniku określono wpływ rozmieszczenia uzwojeń - pierwotnego i wtórnego na parametry schematu zastępczego transformatora i podano sposób ich wyznaczenia.

THE INFLUENCE OF CYLINDRICAL WINDINGS DISTRIBUTION UPON PARAMETERS OF THE SUBSTITUTE DIAGRAM OF TRANSFORMER WITH TWO WINDINGS

Summary. The paper contains an analysis of transformers with two cylindrical windings. This analysis takes into consideration mutual couplings of windings resulting from the stray field, which depend on the distribution of the windings on the magnetic core. Finally, the influence of the distribution of the primary and secondary windings on the parameters of the substitute diagram of the transformer is determined and the way of their determination is suggested.

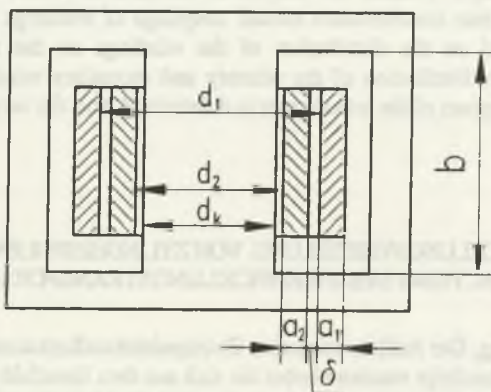
EINFLUSS DER WICKLUNGSVERTEILUNG VON ZYLINDERSPULEN AUF DIE PARAMETER DER ERSATZSCHALTUNG DES ZWEIWICKLUNGSTRANSFORMATORS

Zusammenfassung. Der Aufsatz analysiert Zweispulentransformatoren mit walzenförmigen Wicklungen. Berücksichtigt wurden hierbei die sich aus dem Streufeld ergebenden gegenseitigen Kopplungen, die von der Verteilung der Wicklungen auf dem Magnetkern abhängig sind. Somit wurde der Einfluss der Anordnung der Primär- und der Sekundärwicklung auf die Parameter des Ersatzschaltplans des Transformators ermittelt, und schliesslich auf die Art und Weise deren Bestimmung angezeigt.

1. WSTĘP

Właściwości transformatora zależą głównie od przestrzennych rozkładów indukcji pola magnetycznego w strefie uzwojeń. W transformatorach z rdzeniem ferromagnetycznym wyróżnia się strumień magnetyczny główny, wynikający z pola, którego linie zamykają się wyłącznie w rdzeniu magnetycznym oraz strumień magnetyczny pola rozproszenia magnetycznego, którego linie w strefie uzwojeń zamykają się poza rdzeniem magnetycznym. Strumienie te przy określonych wymiarach i konfiguracji rdzenia magnetycznego i uzwojeń określa się przyjmując założenia upraszczające. Znaczne założenia upraszczające dotyczą określenia rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej pola rozproszenia ze względu na trudności związane z uwzględnieniem środowiska zawierającego rdzeń magnetyczny. Przyjmowane uproszczenia wpływają na dokładność określenia parametrów uzwojeń - rezystancji i indukcyjności - a tym samym na parametry schematu zastępczego transformatora, będącego podstawą analizy właściwości transformatora w stanie ustalonym i nieustalonym.

Problem jest złożony i ograniczono się do analizy transformatora dwuuzwojowego z uzwojeniami cylindrycznymi. W transformatorze takim moce uzwojeń są jednakowe i równe mocy znamionowej transformatora, a uzwojenia umieszczone są na kolumnie rdzenia magnetycznego jedno na drugim, przy czym uzwojenie o mniejszym napięciu znamionowym jest uzwojeniem wewnętrznym.



Rys. 1. Podstawowe wymiary rdzenia magnetycznego i uzwojeń

Fig. 1. Fundamental dimensions of the magnetic core and windings

Na rys. 1. podano podstawowe wymiary rdzenia magnetycznego uzwojeń, przy czym:

$$d_k = \sqrt{\frac{4 S_k}{\pi}}, \quad (1)$$

gdzie: S_k - powierzchnia przekroju poprzecznego kolumny rdzenia magnetycznego, na której są umieszczone uzwojenia

2. REZYSTANCJE I INDUKCYJNOŚCI UZWOJEŃ

Rezystancja uzwojenia cylindrycznego zewnętrznego

$$R_1 = \frac{k_1}{\gamma S_1} \int_0^{z_1} \pi(d_1 + 2x) dx = \frac{k_1 z_1 l_1}{\gamma S_1} \quad (2)$$

i analogicznie uzwojenia wewnętrznego

$$R_2 = \frac{k_2 z_2 l_2}{\gamma S_2}, \quad (3)$$

gdzie:

$l_1 = \pi(d_1 + a_1)$, $l_2 = \pi(d_2 + a_2)$ - średnie długości zwojów:

uzwojenia zewnętrznego o liczbie zwojów z_1 i uzwojenia wewnętrznego

o liczbie zwojów z_2 ,

γ - konduktywność,

S_1, S_2 - łączna powierzchnia przekrojów przewodów gałęzi równoległych uzwojenia zewnętrznego i wewnętrznego,

k_1, k_2 - współczynniki powiększenia się rezystancji przy przepływie prądu przemiennego.

Współczynniki k_1, k_2 zależą od konduktywności przewodów, temperatury, częstotliwości wymiarów przekroju poprzecznego przewodu nawojowego i rodzaju przepleceń.

Indukcyjność uzwojenia

$$L = \frac{\Psi}{i}, \quad (4)$$

przy czym z podziału pola magnetycznego na pole główne i rozproszenia wynika, że

$$\Psi = \Psi_{Fe} + \Psi_{\sigma}, \quad (5)$$

a więc

$$L = L_{Fe} + L_{\sigma}. \quad (6)$$

Składowa

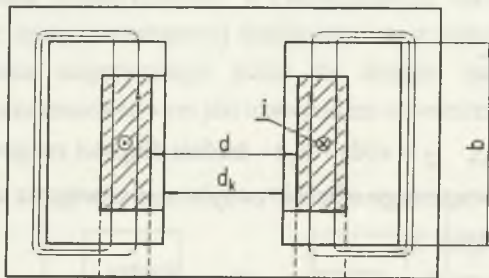
$$L_{Fe} = \frac{\Psi_{Fe}}{i} = z \frac{\Phi_{Fe}}{i} = z^2 \Lambda_{Fe}, \quad (7)$$

gdzie: z - liczba zwojów uzwojenia

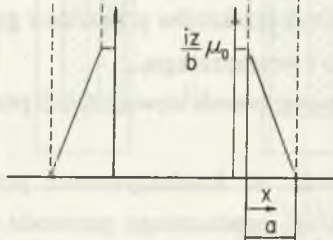
Λ_{Fe} - permeancja rdzenia.

Określenie składowej L_{σ} wymaga wyznaczenia rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej pola rozproszenia w strefie uzwojenia. Rozkład ten przy pominięciu spadku napięcia magnetycznego na odcinku linii pola w rdzeniu magnetycznym (dla rdzenia $\mu = \infty$) i założeniu równomiernego rozkładu zwojów w przekroju uzwojenia przedstawiono na rys. 2.

a)



b)



Rys. 2. a) - Rdzeń magnetyczny i uzwojenie, b) - przekrój przestrzennego rozkładu indukcji magnetycznej pola rozproszenia

Fig. 2. a) - Magnetic core and windings, b) cross-section of the spatial distribution of the stray field

W odległości x od wewnętrznej powierzchni bocznej uzwojenia:

- indukcja magnetyczna pola rozproszenia

$$B(x) = \mu_0 \frac{i z}{b} \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad (8)$$

- liczba zwojów sprzęgających się z polem rozproszenia

$$z(x) = z \left(1 - \frac{x}{a}\right), \quad (9)$$

a zatem strumień sprzężony wynikający z pola rozproszenia

$$\begin{aligned} \Psi_\sigma &= \frac{\pi}{4} (d^2 - d_k^2) \frac{i z^2}{b} \mu_0 + \frac{i z^2}{b} \mu_0 \int_0^a \left(1 - \frac{x}{a}\right)^2 \pi (d + 2x) dx = \\ &= \mu_0 \frac{i z^2}{b} \left[\frac{a l}{3} - \frac{\pi a^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d^2 - d_k^2) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

przy czym: $l = \pi(d + a)$ - średnia długość zwoju uzwojenia.

Składowa

$$L_\sigma = \frac{\Psi_\sigma}{i} = z^2 \Lambda_\sigma, \quad (11)$$

$$\text{gdzie: } \Lambda_\sigma = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a l}{3} - \frac{\pi a^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d^2 - d_k^2) \right]. \quad (12)$$

Na podstawie podanej analizy dla uzwojeń przedstawionych na rys. 1 otrzymuje się:

- dla uzwojenia cylindrycznego zewnętrznego

$$L_1 = L_{1Fe} + L_{1\sigma} = z_1^2 (\Lambda_{Fe} + \Lambda_{1\sigma}), \quad (13)$$

$$\Lambda_{1\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_1 l_1}{3} - \frac{\pi a_1^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_k^2) \right], \quad (14)$$

- dla uzwojenia cylindrycznego wewnętrznego

$$L_2 = L_{2Fe} + L_{2\sigma} = z_2^2 (\Lambda_{Fe} + \Lambda_{2\sigma}), \quad (15)$$

$$\Lambda_{2\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{3} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right]. \quad (16)$$

Indukcyjność wzajemna

$$M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2}, \quad (17)$$

przy czym z podziału pola magnetycznego na pole główne i rozproszenia wynika, że

$$\Psi_{12} = \Psi_{12Fe} + \Psi_{12\sigma}, \quad (18)$$

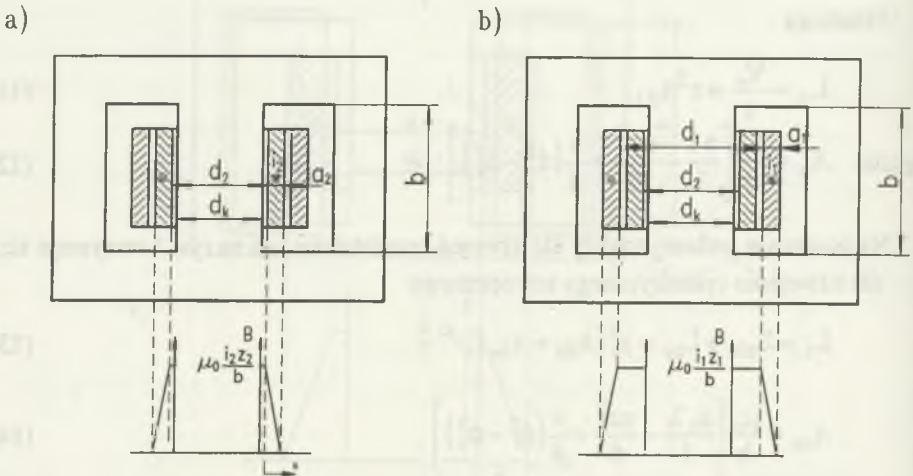
a więc

$$M_{12} = M_{12Fe} + M_{12\sigma}. \quad (19)$$

Składowa

$$M_{12Fe} = \frac{\Psi_{12Fe}}{i_2} = \frac{z_1 z_2 i_2}{i_2} \Lambda_{Fe} = z_1 z_2 \Lambda_{Fe}. \quad (20)$$

Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej pola rozproszenia wytworzonego przez siłę magnetomotoryczną uzwojenia wewnętrznego, wyznaczony tak samo jak rozkład podany na rys. 2, przedstawiono na rys. 3a.



Rys. 3. Rozkłady przestrzenne indukcji magnetycznej pola rozproszenia wytworzonego przez siły magnetomotoryczne uzwojenia; a) wewnętrznego, b) zewnętrznego
 Fig. 3. Spatial distributions of the magnetic induction of the stray field due to magnetomotive forces of the windings; a) interior winding, b) exterior winding

Z uzwojeniem zewnętrznym sprzęga się cały strumień magnetyczny $\Phi_{2\sigma}$ pola rozproszenia wytworzonego przez siłę magnetomotoryczną uzwojenia wewnętrznego, a więc strumień sprzężony

$$\begin{aligned}\Psi_{12\sigma} &= z_1 \Phi_{2\sigma} = z_1 \left[\mu_0 \frac{i_2 z_2 \pi}{b} \frac{1}{4} (d_2^2 - d_k^2) + \int_0^{a_2} \mu_0 \frac{i_2 z_2}{b} \left(1 - \frac{x}{a_2} \right) \pi (d_2 + 2x) dx \right] = \\ &= z_1 z_2 i_2 \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right].\end{aligned}\quad (21)$$

Składowa

$$M_{12\sigma} = \frac{\Psi_{12\sigma}}{i_2} = z_1 z_2 \Lambda_{12\sigma}, \quad (22)$$

przy czym

$$\Lambda_{12\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right]. \quad (23)$$

Indukcyjność uzwojenia

$$M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1}, \quad (24)$$

przy czym z podziału pola magnetycznego na pole główne i rozproszenia wynika, że

$$\Psi_{21} = \Psi_{21\text{Fe}} + \Psi_{21\sigma}, \quad (25)$$

a więc

$$M_{21} = M_{21\text{Fe}} + M_{21\sigma}. \quad (26)$$

Składowa

$$M_{21\text{Fe}} = \frac{\Psi_{21\text{Fe}}}{i_1} = \frac{z_2 z_1 i_1}{i_1} \Lambda_{\text{Fe}} = z_1 z_2 \Lambda_{\text{Fe}}. \quad (27)$$

Rozkład przestrzenny indukcji magnetycznej pola rozproszenia wytworzonego przez siłę magnetomotoryczną uzwojenia zewnętrznego przedstawiono na rys. 3b.

Strumień sprzężony z uzwojeniem wewnętrznym wynikający z pola rozproszenia wytworzonego przez siłę magnetomotoryczną uzwojenia zewnętrznego

$$\begin{aligned}\Psi_{21\sigma} &= z_2 \mu_0 \frac{i_1 z_1 \pi}{b} \frac{1}{4} (d_2^2 - d_k^2) + \mu_0 \frac{i_1 z_1}{b} \int_0^{a_2} z_2 \left(1 - \frac{x}{a_2} \right) \pi (d_2 + 2x) dx = \\ &= z_1 z_2 i_1 \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right],\end{aligned}$$

a zatem składowa

$$M_{21\sigma} = \frac{\Psi_{21\sigma}}{i_1} = z_1 z_2 \Lambda_{21\sigma}, \quad (28)$$

przy czym

$$\Lambda_{21\sigma} = \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_2^2 - d_k^2) \right]. \quad (29)$$

Z wyrażeń (19, 20, 22, 23, 26, 27, 28, 29) wynika, że:

$$M_{12Fe} = M_{21Fe} = M_{Fe} = z_1 z_2 \Lambda_{Fe}, \quad (30)$$

$$M_{12\sigma} = M_{21\sigma} = M_{\sigma} = z_1 z_2 \Lambda_{\sigma}, \quad (31)$$

$$\Lambda_{12\sigma} = \Lambda_{21\sigma} = \Lambda_{\sigma}, \quad (32)$$

$$M_{12} = M_{21} = M = M_{Fe} + M_{\sigma}. \quad (33)$$

Permeancję Λ_{σ} określa wyrażenie (29). a więc jest ona zależna od wymiarów geometrycznych uzwojenia wewnętrznego oraz średnicy i wysokości kolumny rdzenia magnetycznego.

3. RÓWNANIA OGÓLNE - SCHEMAT ZASTĘPCZY

Przy obciążeniu transformatora pole magnetyczne główne, którego linie zamykają się wyłącznie w rdzeniu magnetycznym, wytwarza siła magnetomotoryczna

$$i_0 z_1 = i_1 z_1 - i_2 z_2 \quad (34)$$

i w przybliżeniu jest ona taka sama jak w stanie jałowym, jeżeli napięcie zasilania uzwojenia pierwotnego i jego częstotliwość nie uległy zmianie.

Napięcie zasilania transformatora ma zwykle znamionową częstotliwość, a jego wartość jest zbliżona do napięcia znamionowego uzwojenia pierwotnego. W tych warunkach zasilania parametry elektromagnetyczne uzwojeń są praktycznie stałe i przyjmuje się, że transformator jest elementem liniowym. Dodatkowo, z wyjątkiem zagadnień dotyczących strat i sprawności, pomija się straty w rdzeniu a ponadto pojemności międzyuzwojowe i międzyuzwojeniowe.

Napięcie zasilania uzwojenia pierwotnego np. zewnętrznego

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d \Psi_1}{dt}, \quad (35)$$

natomiast siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wtórnym

$$\frac{d \Psi_2}{dt} = R_2 i_2 + u_2, \quad (36)$$

przy czym:

$$\Psi_1 = L_1 i_1 - M i_2, \quad (37)$$

$$\Psi_2 = M i_1 - L_2 i_2, \quad (38)$$

a po uwzględnieniu zależności (34)

$$\Psi_1 = \left(L_1 - \frac{z_1 M}{z_2} \right) i_1 + \frac{z_1 M}{z_2} i_0, \quad (39)$$

$$\Psi_2 = M i_0 - \left(L_2 - \frac{z_2 M}{z_1} \right) i_2. \quad (40)$$

Przyjmując oznaczenia:

$$L_T = \frac{z_1}{z_2} M, \quad (41)$$

$$L_{11} = L_1 - \frac{z_1}{z_2} M, \quad (42)$$

$$L_{12} = L_2 - \frac{z_2}{z_1} M \quad (43)$$

i wprowadzając zależności (39, 40, 41, 42) do równań (35, 36) otrzymuje się:

$$u_1 = R_1 i_1 + L_{11} \frac{d i_1}{dt} + L_T \frac{d i_0}{dt}, \quad (44)$$

$$M \frac{d i_0}{dt} = R_2 i_2 + L_{12} \frac{d i_2}{dt} + u_2, \quad (45)$$

przy czym napięcie strony wtórnej, a więc napięcie na odbiorze np. o szeregowym połączeniu elementów liniowych R, L, C

$$u_2 = R i_2 + L \frac{d i_2}{dt} - \frac{1}{C} \int i_2 dt.$$

Jeżeli równanie (45) pomnożymy przez z_1/z_2 , co oznacza sprowadzenie strony wtórnej na stronę pierwotną, wówczas

$$L_T \frac{d i_0}{dt} = R_2' i_2' + L_{t2}' \frac{d i_2'}{dt} + u_2', \quad (46)$$

a z zależności (34) wynika, że:

$$i_0 = i_1 - i_2', \quad (47)$$

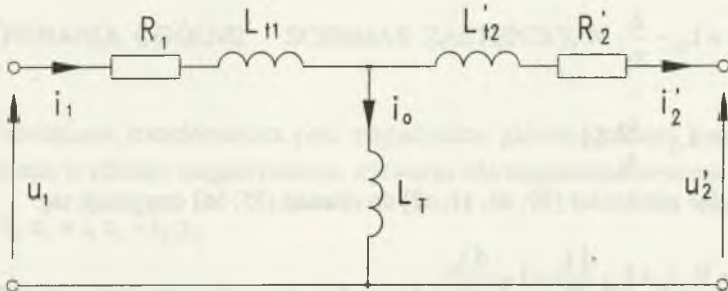
przy czym:

$$u_2' = u_2 \frac{z_1}{z_2} = R_2' i_2' + L' \frac{d i_2'}{dt} + \frac{1}{C'} \int i_2' dt, \quad (48)$$

$$i_2' = i_2 \frac{z_2}{z_1}, \quad R_2' = R_2 \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2, \quad L_{t2}' = L_{t2} \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2,$$

$$R' = R \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2, \quad L' = L \left(\frac{z_1}{z_2} \right)^2, \quad C' = C \left(\frac{z_2}{z_1} \right)^2.$$

Równaniom (43, 46, 47) odpowiada schemat zastępczy transformatora (rys. 4) o galwanicznym połączeniu obu stron i stronie wtórnej sprowadzonej na stronę pierwotną. Zależności (48) określają zasady sprowadzania wielkości strony wtórnej na stronę pierwotną.



Rys. 4. Schemat zastępczy transformatora ze stroną wtórną sprowadzoną na stronę pierwotną

Fig. 4. Substitute diagram of the transformer

Zachowując równanie (45) i mnożąc równanie (44) przez z_2/z_1 , można otrzymać schemat zastępczy, w którym strona pierwotna jest sprowadzona na stronę wtórną.

4. PARAMETRY SCHEMATU ZASTĘPCZEGO I ICH WYZNACZANIE

Z zależności (2, 3, 48) wynika, że stosunek rezystancji

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{k_1 l_1 z_2 S_2}{k_2 l_2 z_1 S_1} \quad (49)$$

a po uwzględnieniu zależności

$$S_1 = \frac{I_{1n}}{J_1}, \quad S_2 = \frac{I_{2n}}{J_2}, \quad \frac{z_2}{z_1} = \frac{U_{2n}}{U_{1n}}$$

otrzymuje się:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{k_1 l_1 J_1 S_{n2}}{k_2 l_2 J_2 S_{n1}} \quad (50)$$

W transformatorze dwuuzwojeniowym:

- moce znamionowe uzwojeń są zwykle jednakowe ($S_{n1} = S_{n2} = S_n$) i określają moc znamionową,
- warunki chłodzenia uzwojeń różnią się nieznacznie i w przybliżeniu gęstość prądu $J_1 = J_2$,
- w przybliżeniu $k_1 l_1 = k_2 l_2$

i na ogół z wystarczającą dokładnością można przyjąć, że $R_1 = R_2'$ lub $R_1' = R_2$, jeżeli strona pierwotna jest sprowadzona na stronę wtórną.

Z zależności (13, 15, 30, 31, 41, 42, 43) wynika, że w schemacie zastępczym transformatora:

- indukcyjność główna

$$L_T = L_{Fe1} + \frac{z_1}{z_2} M_\sigma \quad (51)$$

- indukcyjność rozproszenia strony pierwotnej

$$L_{t1} = L_{\sigma 1} - \frac{z_1}{z_2} M_{\sigma} \quad (52)$$

- indukcyjność rozproszenia strony wtórnej

$$L_{t2} = L_{\sigma 2} - \frac{z_2}{z_1} M \quad (53)$$

Indukcyjność główna L_T nie jest składową indukcyjności uzwojenia pierwotnego, wynikającą z pola magnetycznego głównego, a indukcyjności L_{t1} , L_{t2} nie są indukcyjnościami rozproszenia uzwojeń odpowiednio pierwotnego i wtórnoego. Z tego powodu przyjęte oznaczenia tych indukcyjności są odmienne od powszechnie stosowanych w teorii transformatorów.

Korzystając z zależności (13, 14, 15, 16, 29, 31, 32) i uwzględniając, że

$$\frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) = a_2 l_2 + \delta l_{\delta} \quad (54)$$

przy czym:

δ - grubość szczeliny między uzwojeniami (rys.1)

l_{δ} - średnia długość szczeliny między uzwojeniami

otrzymuje się:

$$L_T = z_1^2 \left\{ \Lambda_{Fe} + \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_2 l_2}{2} - \frac{\pi a_2^2}{6} + \frac{\pi}{4} (d_1^2 - d_2^2) \right] \right\} \quad (54)$$

$$L_{t1} = z_1^2 \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_1 l_1}{3} + \frac{a_2 l_2}{2} + \delta l_{\delta} - \frac{\pi}{6} (a_1^2 - a_2^2) \right] \quad (55)$$

$$L_{t2} = z_2^2 \frac{\mu_0}{b} \left(-\frac{a_2^2 l_2}{6} \right) \quad (56)$$

W p. 3 przyjęto, że uzwojenie pierwotne jest uzwojeniem zewnętrznym (typowy układ uzwojeń w transformatorze obniżającym napięcie) i w tym przypadku indukcyjność

rozproszenia strony wtórnej schematu zastępczego $L_{t2} < 0$ i jest określona przez wysokość kolumny rdzenia magnetycznego oraz wymiary i liczbę zwojów uzwojenia wewnętrznego. Gdyby uzwojeniem pierwotnym było uzwojenie wewnętrzne (typowy układ uzwojeń w transformatorze podwyższającym napięcie), wówczas w wyniku analogicznej analizy można stwierdzić, że indukcyjność rozproszenia strony pierwotnej schematu zastępczego będzie ujemna. Ujemną wartość indukcyjności rozproszenia ma więc ta strona (pierwotna lub wtórna), której uzwojenie jest uzwojeniem wewnętrznym.

Indukcyjność rozproszenia strony wtórnej sprowadzona na stronę pierwotną, zgodnie z zależnościami (48), (56)

$$L'_{t2} = z_1^2 \frac{\mu_0}{b} \left(-\frac{a_2 l_2}{6} \right). \quad (57)$$

Indukcyjność zwarcia

$$L_z = L_{t1} + L'_{t2}, \quad (58)$$

a po wprowadzeniu zależności (55, 57)

$$L_z = z_1^2 \frac{\mu_0}{b} \left[\frac{a_1 l_1}{3} + \frac{a_2 l_2}{3} + \delta l_\delta - \frac{\pi}{6} (a_1^2 - a_2^2) \right]. \quad (59)$$

Otrzymane wyrażenie na indukcyjność zwarcia transformatora z uzwojeniami cylindrycznymi jest więc takie samo jak wyrażenie powszechnie wprowadzone w teorii transformatorów.

Na podstawie wyników pomiarów w stanie zwarcia określa się dla transformatora rezystancję zwarcia R_z i indukcyjności zwarcia L_z . Przedstawiona analiza wykazuje, że:

- w przybliżeniu $R_1 = R_2 = 0,5 R_z$, jeżeli moce znamionowe uzwojeń są jednakowe
- nawet przybliżone określenie indukcyjności L_{t1}, L'_{t2} przy znanej indukcyjności zwarcia nie jest możliwe.

Z zależności (41), (42), (43), (48), (58) wynika, że w schemacie zastępczym transformatora:

- indukcyjność główna

$$L_T = 0,5(L_1 + L'_2 - L_z), \quad (60)$$

- indukcyjność rozproszenia strony pierwotnej

$$L_{11} = 0,5(L_1 - L'_2 + L_2), \quad (61)$$

- indukcyjność rozproszenia strony wtórnej

$$L'_{12} = 0,5(L'_2 - L_1 + L_2). \quad (62)$$

Indukcyjności te, przy znanej indukcyjności zwarcia L_z , można więc określić, jeżeli dodatkowo są znane indukcyjności własne uzwojeń L_1 , L_2 i przekładnia zwojowa. Wyznaczenie indukcyjności L_1 , L_2 i przekładni zwojowej wymaga dwukrotnego przeprowadzenia pomiarów transformatora w stanie jałowym przy zasilaniu uzwojenia górnego a następnie dolnego napięcia.

5. UWAGI KOŃCOWE

W pracy przyjęto:

- typowe rozmieszczenia uzwojeń cylindrycznych na rdzeniu magnetycznym,
- stosowany sposób przybliżonego wyznaczenia rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej pola rozproszenia

i wykazano, że rozmieszczenie uzwojeń - pierwotnego i wtórnego - ma istotny wpływ na indukcyjności schematu zastępczego transformatora, który stanowi podstawę analizy stanów ustalonych i nieustalonych. Indukcyjność rozproszenia schematu zastępczego strony (pierwotnej lub wtórnej) jest ujemna, jeżeli jej uzwojenie jest uzwojeniem wewnętrznym. Mimo ujemnej indukcyjności rozproszenia jednej ze stron indukcyjność zwarcia transformatora określa wyrażenie powszechnie wprowadzone w teorii transformatorów. Często przyjmowana przybliżona zależność $L_{11} = L'_{12} = 0,5 L_z$ jest w ogólnym przypadku błędna i można z niej korzystać, gdy uzwojenia transformatora o szeregowym obwodzie magnetycznym nie są umieszczone jedno na drugim. W pracy podano sposób wyznaczania wprowadzonych parametrów schematu zastępczego transformatora. Z pracy wynika, że pełne ujęcie wpływu rozmieszczenia uzwojeń na parametry schematu zastępczego transformatora wymaga dokładnego wyznaczenia rozkładów przestrzennych indukcji magnetycznych pól rozproszenia wytwarzanych przez przepływy uzwojeń. Podana analiza może być wykorzystana przy rozpatrywaniu transformatorów wielouzwojeniowych z uzwojeniami cylindrycznymi.

LITERATURA

- [1] Jezewski E. : Transformatory - podstawy teoretyczne. WNT, Warszawa 1965.
- [2] Muller G.: Elektrische Maschinen - Grundlagen, Aufbau und Wirkungsweise. VEB Verlag Technik Berlin 1970.
- [3] Turowski J.: Obliczenia elektromagnetyczne elementów maszyn i urządzeń elektrycznych. WNT, Warszawa 1982.

Recenzent: Doc. dr inż. Jerzy Hickiewicz

Wpłynęło do Redakcji dnia 25 marca 1994r.

Abstract

The paper contains an analysis of transformers with two cylindrical windings, taking into consideration mutual couplings of windings resulting from the stray field, which depend on the distribution of the windings on the magnetic core. It has been assumed that

- the cylindrical windings are distributed on the magnetic core in a typical way,
- the spatial distribution of the magnetic induction of the stray field can be approximately determined.

It has also been shown that the distribution of the primary and secondary windings influences essentially the inductance of the substitute diagram of the transformer, on which analysis of the steady and unsteady states is based. The inductance of dissipation of the substitute diagram of the primary or secondary side is negative if its winding is the interior one. In spite of the negative inductance of dissipation of one of the sides, the short-circuit inductance of the transformer is expressed by the formula, generally accepted in the theory of transformers. The frequently applied approximate relation $L_{11}=L'_{12}=0,5 L_z$ (L_z - short-circuit inductance) is in general erroneous, but may be used if the transformer windings with a magnetic circuit arranged in series are not placed one above the other. The paper suggests a way of determining the applied parameters of the substitute diagram of the transformer.

It results from the paper that the influence of the distribution of the windings upon the parameters of the substitute diagram of a transformer can be determined after exact determination of the spatial distributions of the magnetic induction of the stray field brought about by the magnetomotive forces of the windings. The suggested analysis may be applied in the case of investigating transformers with several cylindrical windings.

7. CHARACTERISTICS

7.1. INTRODUCTION

The paper discusses the influence of the distribution of the windings upon the parameters of the substitute diagram of a transformer. It is shown that the influence of the distribution of the windings upon the parameters of the substitute diagram of a transformer can be determined after exact determination of the spatial distributions of the magnetic induction of the stray field brought about by the magnetomotive forces of the windings. The suggested analysis may be applied in the case of investigating transformers with several cylindrical windings.