

ROZDZIAŁ V.

ZWARCIE TRANSFORMATORA.

1. Zwarcie ustalone.

Już poprzednio poznaliśmy zwarcie normalne (patrz I-7). Przy tem zwarcu zaciski uzwojenia wtórnego były zwarte na bardzo małą oporność (np. amperomierza), do zacisków zaś pierwotnych było przyłożone takie napięcie — by w uzwojeniach uzyskać przepływ prądu nominalnego. Napięcie to nazwaliśmy napięciem zwarcia (V_z):

$$V_z = I_{1n} z_z \quad \dots (1)$$

W tym wzorze I_{1n} — prąd nominalny; z_z — oporność pozorna zwarcia transformatora.

Podnosząc stopniowo napięcie po stronie pierwotnej, będziemy mieli w naszych uzwojeniach coraz większy prąd. Prąd, który popłynie w uzwojeniach, gdy napięcie po stronie pierwotnej osiągnie (przy stopniowym zwiększaniu) swą wartość nominalną (V_1), będziemy nazywali *prądem ustalonym zwarcia* (I_z):

$$\boxed{I_z = \frac{V_1}{z_z}} \quad \dots (2)$$

Przesunięcie fazowe tego prądu w stosunku do napięcia określi wyrażenie:

$$\boxed{\operatorname{tg} \varphi_z = \frac{x_z}{r_z} = \frac{x_1 + x'_2}{r_1 + r'_2}} \quad \dots (2')$$

Z równań (1) i (2) otrzymamy $\frac{I_z}{I_{1n}} = \frac{V_1}{V_z}$, skąd

$$I_z = I_{1n} \frac{V_1}{V_z} \quad \dots (3)$$

Napięcie zwarcia podawane bywa zwykle w $\%$ w stosunku do napięcia pierwotnego $\frac{V_z}{V_1} 100 = v_{z\%}$, stąd $\frac{V_1}{V_z} = \frac{100}{v_{z\%}}$.

Podstawiając do (3), otrzymamy:

$$I_z = I_{1n} \frac{100}{v_{z\%}} \quad \dots (4)$$

Jeżeli np. napięcie zwarcia wynosi 4% , wtedy prąd ustalony zwarcia równa się 25-cio krotnemu prądowi nominalnemu.

Prąd ustalony zwarcia uzyskaliśmy, podnosząc stopniowo napięcie po stronie pierwotnej. Możemy postąpić inaczej — zewrzeć zaciski wtórne przy pełnym napięciu na zaciskach pierwotnych. Przez bardzo krótki czas zjawiska, występujące w transformatorze, będą miały przebieg nieustalony, poczem prąd przybierze wartość, określoną równaniem (4).

Uwaga. Należy tu przyjąć, że sieć zasilająca transformator jest tak pojemna, że zwarcie naszego transformatora nie spowoduje nadmiernych spadków napięcia i nie obniży napięcia pierwotnego.

2. Zjawiska nieustalone.

Postaramy się zbadać bliżej zjawiska, występujące w transformatorze w okresie nieustalonym, przejściowym. W tym celu wyjdziemy z równań:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= i_1 r_1 + \mathcal{L}_{S1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} \\ 0 &= v_2 + i_2 r_2 + \mathcal{L}_{S2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} \end{aligned} \right\} \quad \dots (5)$$

Pierwsze z nich oznacza, że napięcie, przyłożone do zacisków uzwojenia pierwotnego jest równoważone w każdej chwili przez spadek napięcia na oporności omowej, oraz przez SEM-e, wzniecone przez strumień rozproszenia (spadek nap. induk.) i strumień roboczy Φ_t , skojarzony z obu uzwojeniami.

Drugie równanie odnosi się do uzwojenia wtórnego i stwierdza, że suma SEM-ych, wznieconych przez strumień rozproszenia tego uzwojenia oraz przez strumień roboczy, napięcia na zaciskach i spadku napięcia omowego w każdej chwili równa się zeru. \mathcal{L}_{S1} i \mathcal{L}_{S2} —są to współczynniki indukcji, odpowiadające indukcyjnym spadkom napięcia, wywołanym przez strumienie rozproszenia.

$$\mathcal{L}_{S1} = \frac{x_1}{\omega}; \quad \mathcal{L}_{S2} = \frac{x_2}{\omega}$$

Wartość chwilową strumienia roboczego Φ_t , wytworzonego przez sumę amperozwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego możemy wyrazić: $\Phi_t = \frac{i_1 w_1 + i_2 w_2}{R}$, gdzie R — oporność magnetyczna obwodu.

Podstawiając do równań (5) tę wartość Φ_t i oznaczając przez M wyrażenie $\frac{w_1 w_2}{R}$, które nazwiemy współczynnikiem indukcji wzajemnej, otrzymamy po przekształceniu:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= i_1 r_1 + \frac{di_1}{dt} \left(\mathcal{L}_{S1} + M \frac{w_1}{w_2} \right) + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= v_2 + i_2 r_2 + \frac{di_2}{dt} \left(\mathcal{L}_{S2} + M \frac{w_2}{w_1} \right) + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \dots (6)$$

Wprowadzamy nowe oznaczenia:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}_1 &= \mathcal{L}_{S1} + M \frac{w_1}{w_2} \\ \mathcal{L}_2 &= \mathcal{L}_{S2} + M \frac{w_2}{w_1} \end{aligned} \right\} \dots (7)$$

Są to t. zw. współczynniki indukcji własnej odpowiednio uzwojeń pierwotnego i wtórnego. Odpowiadają one całkowitym strumieniom, skojarzonym z każdym z uzwojeń.

Podstawiając (7) do (6) otrzymamy:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= i_1 r_1 + \mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= v_2 + i_2 r_2 + \mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \dots (8)$$

Przy zwarcie uzwojenia wtórnego, napięcie $v_2 = 0$ i równania (8) przyjmą postać:

$$\left. \begin{aligned} v_1 &= i_1 r_1 + \mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= i_2 r_2 + \mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \dots (9)$$

Dla uproszczenia rachunku przyjmiemy, że uzwojenie wtórne jest sprowadzone do pierwotnego (patrz—I—6—b), czyli, że oba posiadają jednakową liczbę zwojów $w_1 = w_2$.

Wyrażenia (7) uproszczą się:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}_1 &= \mathcal{L}_{S1} + M \\ \mathcal{L}_2 &= \mathcal{L}_{S2} + M \end{aligned} \right\} \dots (10)$$

Z teorii równań różniczkowych wiadomo, że całka ogólna układu (9) ma postać:

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= i_1' + A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \\ i_2 &= i_2' + B_1 e^{\lambda_1 t} + B_2 e^{\lambda_2 t} \end{aligned} \right\} \dots (11)$$

gdzie i_1' i i_2' przedstawiają jakąkolwiek całkę szczególną układu (9) a wyrażenia $A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t}$ oraz $B_1 e^{\lambda_1 t} + B_2 e^{\lambda_2 t}$ — całkę ogólną układu równań jednorodnych, które otrzymamy z równań (9), jeżeli w nich przyjmiemy $v_1 = 0$.

Wiadomą nam całkę szczególną układu (9) przedstawia prąd ustalony zwarcia, określony wzorem:

$$i_1' = -i_2' = \sqrt{2} I_z \sin(\omega t + \psi - \varphi_z) \quad \dots (12)$$

φ_z — jest kątem przesunięcia fazowego ustalonego prądu zwarcia w stosunku do napięcia (wzór 2'), a kąt ψ określa chwilę, w której nastąpiło zwarcie (wartość chwilowa napięcia w chwili zwarcia $v_1 = V_1 \sqrt{2} \sin \psi$).

Prądy zwarcia ustalonego w obu uzwojeniach i_1' oraz i_2' są co do wielkości równe, a to dlatego, że przyjęliśmy jednakową liczbę zwojów w każdym z uzwojeń.

Ażeby wyznaczyć dla układu (11) współczynniki λ_1 , λ_2 oraz A_1 , A_2 , B_1 i B_2 , podstawimy do układu równań jednorodnych:

$$0 = i_1 r_1 + \mathcal{L}_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$

$$0 = i_2 r_2 + \mathcal{L}_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$

wyrażenia $i_1 = A e^{\lambda t} \qquad i_2 = B e^{\lambda t}$

Po skróceniu otrzymamy:

$$\left. \begin{aligned} (\mathcal{L}_1 \lambda + r_1) A + M \lambda B &= 0 \\ M \lambda A + (\mathcal{L}_2 \lambda + r_2) B &= 0 \end{aligned} \right\} \dots (13)$$

Stąd wynika równanie:

$$\begin{vmatrix} \mathcal{L}_1 \lambda + r_1 & M \lambda \\ M \lambda & \mathcal{L}_2 \lambda + r_2 \end{vmatrix} = 0.$$

Po rozwiązaniu otrzymamy:

$$(\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_2 - M^2) \lambda^2 + (\mathcal{L}_1 r_2 + \mathcal{L}_2 r_1) \lambda + r_1 r_2 = 0.$$

Na pierwiastki tego równania mamy wzory:

$$\lambda_{12} = \frac{-(r_2 \mathcal{L}_1 + r_1 \mathcal{L}_2) \pm \sqrt{(r_2 \mathcal{L}_1 + r_1 \mathcal{L}_2)^2 + 4 r_1 r_2 M^2}}{2 (\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_2 - M^2)} \quad \dots (14)$$

Biorąc pod uwagę, że w rozpatrywanym przez nas wypadku (przekładnia $\mathfrak{D} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = 1$):

$$r_1 \cong r_2 = r \quad \mathcal{L}_1 \cong \mathcal{L}_2 = \mathcal{L} \quad \mathcal{L}_{S1} \cong \mathcal{L}_{S2} = \mathcal{L}_S$$

oraz że naogół w transformatorze mamy do czynienia ze ściśłem sprzęgnięciem obwodów, czyli:

$$M \cong \sqrt{\mathcal{L}_1 \mathcal{L}_2} \cong \mathcal{L}$$

upraszczamy wyrażenie (14) i otrzymujemy wzór przybliżony:

$$\lambda_{12} \cong \frac{-2r \mathcal{L} \pm 2Mr}{2(\mathcal{L}-M)(\mathcal{L}+M)} \cong \frac{-2r \pm 2r}{4\mathcal{L}_S}$$

gdyż $\mathcal{L} - M = \mathcal{L}_S$.

Ostatecznie:

$$\lambda_1 \cong 0; \quad \lambda_2 \cong -\frac{2r}{2\mathcal{L}_S} = -\frac{r_z}{2\mathcal{L}_S} \quad \dots (15)$$

gdyż $r_z = r_1 + r_2' \cong 2r_1 = 2r$

Jeżeli w jednym z równań (13) np. w pierwszym, przyjmiemy kolejno $\lambda = \lambda_1, \lambda_2$, to dla współczynników A i B , które teraz odróżnimy za pomocą wskaźników 1, względnie 2, otrzymamy związki:

$$(\mathcal{L}_1 \lambda_1 + r_1) A_1 + M \lambda_1 B_1 = 0$$

$$(\mathcal{L}_1 \lambda_2 + r_1) A_2 + M \lambda_2 B_2 = 0$$

Stąd wynikają wzory:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= M \lambda_1 \alpha & B_1 &= -(\mathcal{L}_1 \lambda_1 + r_1) \alpha \\ A_2 &= M \lambda_2 \beta & B_2 &= -(\mathcal{L}_1 \lambda_2 + r_1) \beta \end{aligned} \right\} \dots (16)$$

gdzie α i β są nowymi stałymi dowolnymi.

Stałe te wyznaczmy z warunku, że dla $t=0$ równania (11) powinny dać: $i_1 = i_2 = 0$, gdyż przyjmujemy, że przed zwarcie transformator był nieobciążony. Prąd biegu jałowego jest pominięty.

Pamiętając o tem i biorąc pod uwagę (12) i (16), otrzymamy:

$$\begin{aligned} \sqrt{2} I_z \sin (\psi - \varphi_z) + M \lambda_1 \alpha + M \lambda_2 \beta &= 0 \\ -\sqrt{2} I_z \sin (\psi - \varphi_z) - (\mathcal{L}_1 \lambda_1 + r_1) \alpha - (\mathcal{L}_1 \lambda_2 + r_1) \beta &= 0. \end{aligned}$$

Ponieważ $\lambda_1 \cong 0$, z pierwszego z tych równań mamy:

$$\beta \cong -\sqrt{2} I_z \sin (\psi - \varphi_z) \frac{1}{M \lambda_2} = \sqrt{2} I_z \sin (\varphi_z - \psi) \frac{1}{M \lambda_2}$$

Podstawiamy do drugiego równania otrzymaną wartość na β i wyznaczamy α :

$$\alpha = \sqrt{2} I_z \sin (\varphi_z - \psi) \frac{M \lambda_2 - \mathcal{L}_1 \lambda_2 - r_1}{r_1 M \lambda_2}.$$

Ponieważ $M \cong \mathcal{L}_1$ i $\lambda_2 = -\frac{r_z}{2 \mathcal{L}_s}$

$$\alpha = \sqrt{2} I_z \sin (\varphi_z - \psi) \frac{2 \mathcal{L}_s}{M r_z}.$$

Spółczynnik indukcji \mathcal{L}_s , odpowiadający strumieniowi rozproszczenia, w porównaniu do współczynnika indukcji wzajemnej M , odpowiadającego strumieniowi robocznemu, skojarzonemu z obu uzwojeniami, stanowi zaledwie parę %. Możemy bez większego błędu przyjąć $\frac{\mathcal{L}_s}{M} \cong 0$, co da nam:

$$\alpha \cong 0.$$

Jeżeli znalezione przed chwilą wartości na α i β podstawić do wzorów (16), otrzymamy:

$$A_1 = B_1 = 0$$

$$A_2 = -B_2 = \sqrt{2} I_z \sin (\varphi_z - \psi).$$

Podstawiając te wartości do równań (11), oraz biorąc pod uwagę zależność (12) i znalezione wartości $\lambda_1 \cong 0$; $\lambda_2 \cong -\frac{r_z}{2 \mathcal{L}_s}$ otrzymamy:

$$\boxed{i_1 = -i_2 = \sqrt{2} I_z \sin (\omega t + \psi - \varphi_z) + \sqrt{2} I_z \sin (\varphi_z - \psi) e^{-\frac{r_z}{2 \mathcal{L}_s} t}} \quad (17)$$

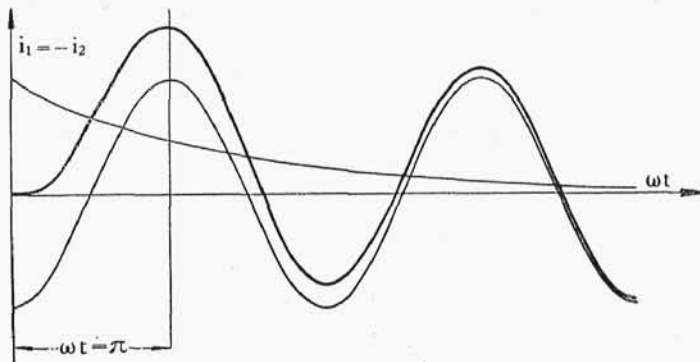
Widzimy, że do prądu zwarcia ustalonego dochodzi pewna składowa jednokierunkowa o charakterze zanikającym.

Rola tej składowej zanikającej jest zależna od wartości $\sin(\varphi_z - \psi)$, czyli od tego, w jakiej chwili (kąt ψ) nastąpiło zwarcie. Jeżeli się zdarzy, że kąt ψ będzie równy kątowi φ_z , $\psi = \varphi_z$, $\sin(\varphi_z - \psi) = 0$ — wyraz zanikający odpada, otrzymamy od razu zjawisko ustalone.

Przeciwnie, gdy $\varphi_z - \psi = \pm \pi/2$, $\sin(\varphi_z - \psi) = \pm 1$ — składowa zanikająca odegra rolę największą. Obojętnem jest przytem, jeżeli chodzi o największą bezwzględną wartość prądu, czy weźmiemy znak plus czy minus. Podstawiając $\varphi_z - \psi = \frac{\pi}{2}$, otrzymamy:

$$|i_1 = -i_2 = \sqrt{2} I_z (-\cos \omega t + e^{-\frac{r_z}{2x_s} t})| \quad \dots (18)$$

Wykreślne przedstawienie tego równania mamy na rys. 86. Nasza funkcja, jak widać, osiągnie max. przy $\omega t = \pi$, czyli po upływie $t = \frac{\pi}{\omega}$ sek.



Rys. 86.

Podstawiając to do równania (18), otrzymamy największy możliwy prąd zwarcia:

$$|I_{zmx} = \sqrt{2} I_z (1 + e^{-\frac{r_z}{2x_s} \frac{\pi}{\omega}}) = \sqrt{2} I_z (1 + e^{-\frac{r_z}{x_z} \frac{\pi}{2}})| \quad \dots (19)$$

gdź $2\omega L_s = 2x = x_z$, gdzie x_z — oporność indukcyjna zwarcia transformatora.

Przy transformatorach mniejszych (rzędu 100 kVA) możemy zgrubsza przyjąć $r_z = x_z$. Podstawiając do równania (19), otrzymamy:

$$I_{zmx} = \sqrt{2} I_z (1 + e^{-\pi}) = \sqrt{2} \cdot 1,043. I_z \cong 1,5 I_z.$$

Widzimy zatem, że w małych transformatorach największy możliwy prąd zwarcia przekracza zaledwie o parę procentów amplitudę prądu zwarcia ustalonego. Przy transformatorach b. dużych stosunki przedstawiają się inaczej. Tutaj nie jest rzadkością gdy $r_z \cong \frac{1}{10} x_z$. Przeliczając, jak wyżej, otrzymamy:

$$I_{zmx} \cong 2,4 I_z$$

czyli prawie podwójną wartość amplitudy prądu zwarcia ustalonego.

3. Mechaniczne oddziaływanie uzwojeń na siebie.

Gdy w uzwojeniach transformatora płynie prąd — występuje mechaniczne oddziaływanie obwodów z prądem na siebie.

Zwoje należące do tego samego uzwojenia, mając ten sam kierunek prądu, przyciągają się do siebie; zwoje, należące do uzwojeń pierwotnego i wtórnego o kierunkach prądu przeciwnych wzajemnie się odpychają.

Nas specjalnie będzie obchodziła druga grupa zjawisk — oddziaływania uzwojeń pierwotnego i wtórnego na siebie, siły bowiem tu występujące, zwłaszcza przy zwarcu, mogą osiągnąć bardzo znaczne wartości. Postaramy się te siły obliczyć.

Jeżeli przewód z prądem znajduje się w polu magnetycznym B , to siła działająca na ten przewód wyrazi się wzorem:

$$F = \frac{B i l}{9,81} 10^{-6} \text{ kg} \quad \dots (20)$$

gdzie i — natężenie prądu w amperach; l — długość przewodu w cm.
 B — pole magnetyczne strumienia rozproszenia.

Rozpatrzmy kolejno rodzaje uzwojeń.

a) *Uzwojenie cylindryczne oraz krążkowe, złożone tylko z dwóch krążków: jednego wysokiego i drugiego niskiego napięcia.*

Jak z poprzedniego wyniku (patrz I-4-b) nie wszystkie zwoje każdego z uzwojeń są położone w jednakowych polach rozproszenia. Pole to zmienia się na szerokości cewki od $B = 0$ do $B = \frac{0,4 \pi i w}{b_s}$,

Przy obliczaniu siły możemy wprowadzić indukcję średnią $B = \frac{0,4 \pi i w}{2 b_s}$.

Długość l ze wzoru (20) $l = w l_{sr}$, gdzie l_{sr} — średnia długość zwoju. Podstawiając te wartości do równania (20), otrzymamy:

$$\left[F = \frac{0,4 \pi \cdot 10^9}{2 \cdot 9,81} \frac{(i w)^2}{b_s} l_{sr} 10^{-8} = 6,4 \frac{(i w)^2}{b_s} l_{sr} 10^{-8} \text{ kg} \right] \dots (21)$$

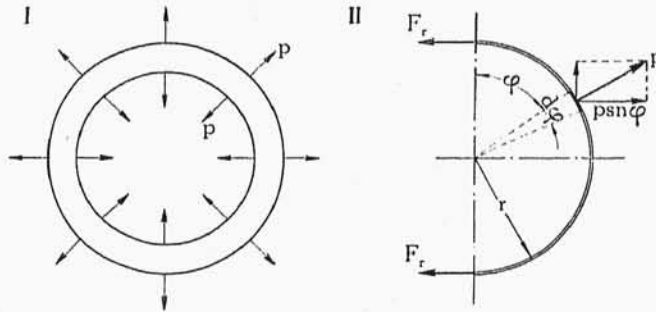
Przy uzwojeniach cylindrycznych z taką siłą jest zgniatane uzwojenie wewnętrzne i rozpychane zewnętrzne (rys. 87¹).

Możemy wyznaczyć przybliżoną wartość ciśnienia, któremu podlega powierzchnia boczna uzwojeń. W tym celu zastąpimy długość drogi linii sił rozproszenia b_s przez wysokość uzwojenia b (rys. 21 i 91), oraz przyjmiemy, że powierzchnia boczna każdego z uzwojeń wynosi w przybliżeniu $l_{sr} b$.

Ciśnienie

$$p \simeq \frac{F}{l_{sr} b} = 6,4 \left(\frac{i w}{b} \right)^2 10^{-8} \text{ kg/cm}^2$$

Uzwojenie zewnętrzne będzie, jak wspominaliśmy, rozpychane. Można obliczyć, jaka siła działa w przekroju osiowym uzwojenia, czyli z jaką siłą (F_r) będzie rozrywane to uzwojenie.



Rys. 87.

$$F_r = bpr \int_0^\pi \sin \varphi d\varphi = 2 bpr = \frac{F}{\pi} \text{ kg, gdyż } l_{sr} \simeq 2 \pi r.$$

Uzwojenie posiada w zwojów, zatem siła z jaką jest rozrywany drut, wynosi:

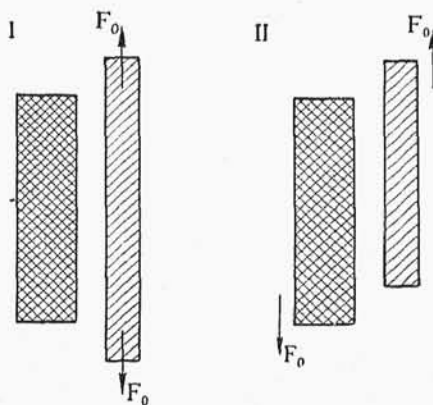
$$F' = \frac{F_r}{w} = \frac{F}{\pi w} \text{ kg.}$$

Należy pamiętać, że to jest tylko średnia wartość siły. Poszczególne zwoje na szerokości cewki są naprężane niejednakowo, w najniekorzystniejszych warunkach są zwoje położone najbliżej szczeliny.

Przy wyprowadzeniu powyższych wzorów przyjmowaliśmy, że wysokości obu uzwojeń niskiego i wysokiego napięcia są jednakowe.

Siły oddziaływania mają wtedy kierunek promieniowy, ściskając jedno i rozciągając drugie uzwojenie. Żadne siły poosiowe tutaj nie występują.

Inaczej będzie, gdy wysokości nie będą jednakowe, co może się zdarzyć np. w wypadku, jeżeli przy projektowaniu uzwojenie niskiego napięcia, przez oszczędność miejsca, otrzymało większą wysokość (rys. 88^I), lub przy stosowaniu zaczepów regulacyjnych, wykonanych na końcu uzwojenia (rys. 91), lub wreszcie wskutek wewnętrznego przesunięcia się uzwojeń (rys. 88^{II}), przyczyną którego może być zły montaż, uszkodzenia przy transporcie, osiadanie się uzwojeń i t. p.



Rys. 88.

We wszystkich tych wypadkach występują siły skierowane równoległe do osi słupa. Siły te dążą do powiększenia już istniejącej niesymetrii położenia uzwojeń.

Jeżeli chodzi o zaczepy, to niesymetrię można zmniejszyć dając odprowadzenia ze środka — jak na rys. 189.

Liczbowo ujmijmy tylko wypadek z rys. 91, jako często spotykany. Siła osiowa dla tego wypadku według obliczeń Bödefelda wynosi:

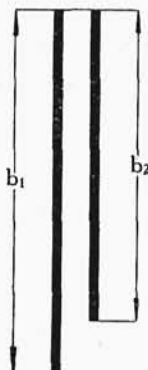
$$F_0 \cong -0,37 \varepsilon \lg (\varepsilon^2 + c^2) F \quad \dots (22)$$

gdzie

$$\varepsilon = \frac{b_1 - b_2}{b_1}; \quad c = \frac{\delta + \frac{a_1 + a_2}{3}}{b_1}$$

(oznaczenia jak na rys. 89 i 91).

F — siła oddziaływania uzwojeń, obliczona według wzoru (21).



Rys. 89.

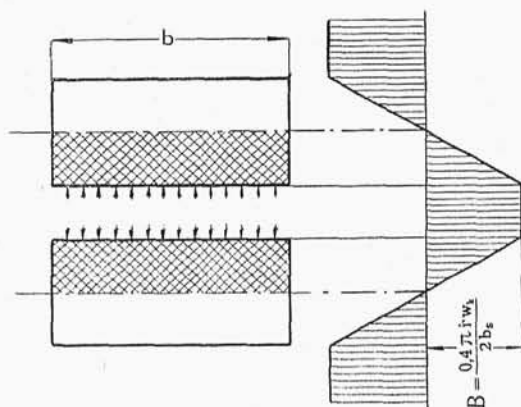
Wzór ostatni daje tylko przybliżoną wartość siły — zazwyczaj mniejszą od rzeczywistej.

Według Richtera, o ile $c \leq \varepsilon \leq 0,1$ błąd nie przekracza 30%.

Przy uzwojeniu krążkowym, złożonym tylko z dwóch cewek (jak na rys. 23) siły oddziaływania uzwojeń na siebie obliczamy również według równania (21), gdyż mamy to samo wyrażenie na pole rozproszenia i każdy z krążków zawiera pełną liczbę zwojów.

Z taką siłą będą krążki od siebie odpychane i przyciskane do jarzma.

b) *Uzwojenie krążkowe symetryczne* — każde z uzwojeń niskiego i wysokiego napięcia jest podzielone na n krążków, przyczem jedno uzwojenie (zwykle wysokiego napięcia) posiada n krążków, drugie (niskiego napięcia) — $(n-1) + 2 \times \frac{1}{2} = n$ (rys. 24).



Rys. 90.

Indukcja w szczelinie między krążkami wyrazi się (patrz I-4-b)

$$B = \frac{0,4 \pi i w_k}{2 b_s}$$

gdzie w_k — liczba zwojów w krążku. Indukcja w płaszczyźnie symetrii krążka wynosi zero. Dla obliczenia siły znowu weźmiemy indukcję średnią

$$B = \frac{0,4 \pi i w_k}{4 b_s}$$

Oddziałują na siebie połówki krążków zakreskowane (rys. 90), posiadające każda $\frac{w_k}{2}$ zwojów o łącznej długości $l_{sr} \cdot \frac{w_k}{2}$. Podstawiając do wzoru (20) wartości na B i l , otrzymamy:

$$\left[F = \frac{0,4 \pi}{9,81} \cdot \frac{(i w_k)^2}{8 b_s} l_{sr} 10^{-6} = 1,6 \frac{(i w_k)^2}{b_s} l_{sr} 10^{-8} \text{ kg.} \right] \dots (23)$$

By wyznaczyć ciśnienie, jakie wywierają na siebie krążki, zastąpimy długość drogi linii rozproszenia b_s (rys. 24) przez szerokość cewki b (rys. 90):

$$p \approx \frac{F}{b l_{sr}} = 1,6 \left(\frac{i w_k}{b} \right)^2 10^{-8} \text{ kg/cm}^2$$

Przytoczyliśmy wzory na obliczenie sił, występujących między uzwojeniami przy przepływie przez nie prądu.

Osiągną one swą wartość największą przy nagłym zwarciu.

Dla obliczenia tych sił należy w podanych wzorach podstawić na miejsce prądu i prąd, obliczony z równania (19).

c) *Przykłady.* Dla zorientowania się w rzędzie wielkości sił, występujących przy zwarciu, przerobimy parę przykładów.

1. Transformator 75 kVA 15000 / 400 V Δ/Δ ; $w_1 = 2710$; $I_1 = 2,89$ A; $s_1 \approx 1$ mm²; $v_s\% = 4,2\%$; $b = 38,5$ cm, $l_{sr} = 68,5$ cm. Uzwojenie cylindryczne. Przy transformatorze tej mocy można przyjąć (patrz wyżej):

$$I_{zmx} \approx 1,5 \quad I_z = 1,5 \cdot 2,89 \cdot \frac{100}{4,2} = 113 \text{ A}$$

$$F = 6,4 \frac{(113 \times 2710)^2}{38,5} 68,5 \cdot 10^{-8} \approx 10000 \text{ kg.}$$

$$\text{Wartość średnia siły, rozciągającej drut } F' = \frac{F}{\pi w} = \frac{10000}{\pi \cdot 2710} \approx 1,2 \text{ kg.}$$

$$\text{Napężenie rozciągające } \frac{1,2}{0,01} = 120 \text{ kg/cm}^2.$$

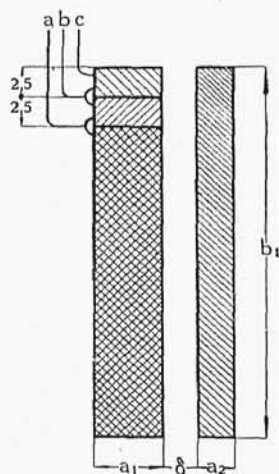
Założymy teraz że regulacja napięcia odbywa się w naszym transformatorze za pomocą zaczeów, umieszczonych na końcu uzwojenia, jak wskazuje rysunek 91. Obliczymy wartość siły osiowej, która tutaj wystąpi (zaczep b),

$$b_1 - b_2 = 2,5 \text{ cm; } a_1 = 2,5 \text{ cm } a_2 = 1,0 \text{ cm}$$

$$\delta = 1,2 \text{ cm,}$$

$$\varepsilon = \frac{b_1 - b_2}{b_1} = \frac{2,5}{38,5} \approx 0,065;$$

$$c = \frac{\delta + \frac{a_1 + a_2}{3}}{b_1} = \frac{1,2 + \frac{2,5 + 1,0}{3}}{38,5} = 0,062$$



Rys. 91.

$$F_0 \approx -0,37 \cdot 0,065 \log(6,5^2 \cdot 10^{-4} + 6,2^2 \cdot 10^{-4}) 10000 = \sim 500 \text{ kg.}$$

Gdyby transformator był załączony na sieć zaczepem a , $b_1 - b_2 = 5,0$ cm. i siła F_0 wyniosłaby ~ 800 kg. Są to już siły, które przy mocowaniu poosiowem cewek należy brać pod uwagę.

2. Transformator 5000 kVA; 30000/6000 V. λ/λ . $w_1 = 484$.
 $I_1 = 96,3 \text{ A}$; $s_1 = 34,5 \text{ mm}^2$; $v_{2\%} = 6,55\%$; $b = 73 \text{ cm}$. $l_{sr} = 187 \text{ cm}$.
 Uzwojenie cylindryczne.

Dla takiej mocy możemy przyjąć

$$I_{zm,x} \simeq 2,4 \quad I_z = 2,4 \cdot 96,3 \frac{100}{6,55} \simeq 3500 \text{ A}$$

$$F = 6,4 \frac{(3500 \times 484)^2}{73} \cdot 187 \cdot 10^{-8} = 480000 \text{ kg.}$$

Siła rozrywająca 1 drut:

$$F' = \frac{480000}{\pi \cdot 484} \simeq 310 \text{ kg,}$$

$$\text{Napężenie } \frac{310}{0,345} = 900 \text{ kg/cm}^2.$$

Porównywując wyniki z przykładów 1-go i 2-go, widzimy, że w transformatorach niedużych siły występujące przy zwarcu są stosunkowo małe — z tego powodu umocowanie uzwojeń na słupie w tych transformatorach nie nasuwa naogół trudności.

Przy transformatorach dużych siły działające są olbrzymie (setki i tysiące ton) i z tego powodu dobre umocowanie uzwojeń — narówni z chłodzeniem i izolacją — staje się jednym z głównych i trudnych zadań.

Należy pamiętać, że przez powiększenie napięcia zwarcia zmniejszamy prąd zwarcia, a wraz z nim (proporcjonalnie do kwadratu) i siłę.

Np. powiększając napięcie zwarcia z 4% na 6%, zmniejszamy siły, występujące przy zwarcu 2,25 razy.