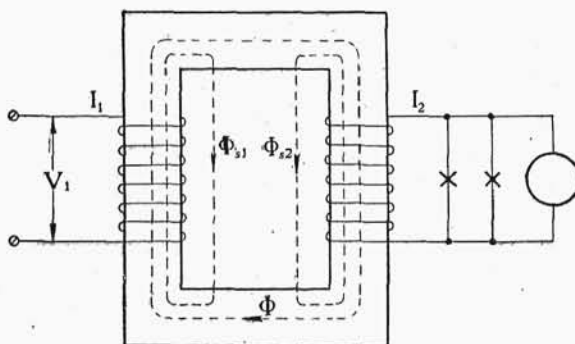


#### 4. Strumienie rozproszenia i indukcyjne spadki napięć w transformatorze.

a) *Istota zjawiska.* Dotychczas przyjmowaliśmy, że mamy w transformatorze do czynienia z jednym tylko strumieniem, skojarzonym z obu uzwojeniami. W rzeczywistości jest inaczej.

Gdy prąd przepływa przez uzwojenia, wówczas występują dodatkowo strumienie skojarzone tylko z jednym uzwojeniem — bądź pierwotnym, bądź wtórnym — te strumienie przebiegają nie tylko w żelazie, większą część ich drogi stanowi powietrze, miedź i izolacja. Zatem oporność magnetyczna dróg tych strumieni jest bardzo znaczna, lecz i SMM b. duża (są to całkowite amperozwoje bądź uzw. pierwotnego bądź wtórnego). W rezultacie będziemy mieli strumienie, które w pracy transformatora odgrywają ważną rolę — strumienie rozproszenia  $\Phi_{s1}$  i  $\Phi_{s2}$  (rys. 19).



Rys. 19.

Linie sił strumieni rozproszenia nie są pożyteczne — nie pracują, gdyż rolą pożyteczną jest przenoszenie energii z jednego uzwojenia do drugiego — strumień zaś rozproszenia jest skojarzony tylko z jednym uzwojeniem.

Strumienie rozproszenia jednakże wznecają w uzwojeniach, z którymi są skojarzone, siły elektromotoryczne, utrudniające przepływ prądu w odpowiednich uzwojeniach. Te SEM-e zatem odgrywają rolę spadków napięć.

W uzwojeniu pierwotnym taki spadek napięcia, łącznie ze spadkiem napięcia omowym odejmuje się od napięcia przyłożonego z zewnątrz, zmniejszając siłę elektromotoryczną, wznieczoną przez strumień roboczy (wypadkowy).

W uzwojeniu wtórnym spadek ten, łącznie ze spadkiem omowym odejmuje się od siły elektromotorycznej, wznieczonej w uzwojeniu wtórnym transformatora przez strumień  $\Phi$ , zmniejszając w ten

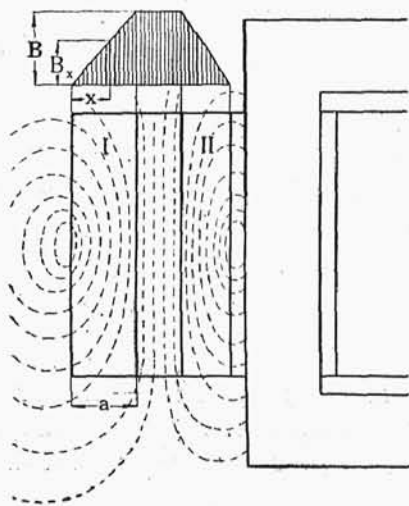
sposób napięcie na zaciskach uzwojenia wtórnego. Strumienie rozproszenia są proporcjonalne do prądów, które te strumienie wytworzyły i są z nimi w fazie (gdyż główną oporność dla nich stanowi ośrodek niemagnetyczny); SEM zaś przez nie wzniesione i traktowane przez nas, jako spadki napięć, są o  $90^\circ$  spóźnione w stosunku do odpowiednich prądów.

Widzimy zatem, że SEM-e, wywołane przez strumienie rozproszenia, mają całkowicie charakter indukcyjnych spadków napięcia na stałych opornościach indukcyjnych. Do wyznaczenia tych oporności teraz przejdziemy.

*b) Obliczenie oporności indukcyjnych uzwojeń transformatora.*

Zacznijmy od *uzwojenia cylindrycznego*,

Linie sił strumienia rozproszenia uzwojenia I (rys. 20) przebiegają przez szczelinę powietrzną między uzwojeniami. Szczelina ta, posiadając mały przekrój, stawia strumieniowi opór bardzo duży w porównaniu z przestrzenią zewnętrzną, gdzie linie sił mogą się zamykać swobodnie.



rys. 20.

Podobnie sprawa przedstawia się ze strumieniem rozproszenia uzwojenia II, który, napotykając w szczelinie taką samą oporność, jak strumień uzwojenia I, zamyka się z drugiej strony przez żelazo. Można uważać, że oporności magnetyczne na drodze obu strumieni są jednakowe. Z tego wynika, że indukcja magnetyczna na całej szerokości szczeliny powietrznej jest stała.

Maksymalna wartość tej indukcji wyraża się wzorem:

$$B = \frac{0,4 \pi I w \sqrt{2}}{b_s} \quad \dots (27)$$

gdzie  $I$  — oznacza wartość skuteczną prądu w uzwojeniu,  $w$  — liczbę zwojów,  $b_s$  — długość drogi linii sił rozproszenia (w cm.).

W lewo i prawo od szczeliny indukcja, jak uwidacznia rysunek 20, maleje do zera. Przyjmować będziemy, że spadek ten odbywa się jednostajnie — według linii prostej.

Indukcja, również maksymalna, w dowolnym miejscu, np. w odległości  $x$  od zewnętrznej powierzchni cewki:

$$B_x = B \frac{x}{a} = \frac{0,4 \pi I w \sqrt{2}}{b_s} \frac{x}{a}$$

W obu powyższych wzorach wielkością narazie nieokreśloną jest długość  $b_s$ , gdyż nie wszystkie linie sił zamykają się wzdłuż tych samych dróg. Należy wziąć jakąś długość średnią.

Rachunek najdokładniej sprawdza się z rzeczywistością, gdy zamiast  $b_s$  brać drogę w powietrzu najkrótszej linii sił, obejmującej całe uzwojenie, jak to jest zaznaczone na rys. 21.

Dla wyznaczenia SEM-ych, wznieconych przez strumienie rozproszenia, należy obliczyć liczbę sprzęgnięć magnetycznych strumienia rozproszenia z jego uzwojeniem.

Linie sił rozproszenia każdego z uzwojeń możemy podzielić na dwie grupy: 1) na skojarzone ze wszystkimi  $w$  zwojami swego uzwojenia; 2) na skojarzone tylko z częścią (większą lub mniejszą) tych zwojów.

Strumień, który tworzy pierwsza grupa linii sił, obejmujących wszystkie zwoje wyrazi się wzorem:

$$B l_{sr} \frac{\delta}{2} \dots (28)$$

W tym wzorze  $l_{sr}$  oznacza średnią ze średnich długości zwojów obu uzwojeń. Wprowadzenie tej długości pociąga za sobą pewną nieścisłość — pozwala to jednakże na jednoczesne traktowanie obu uzwojeń (zresztą nam będzie chodziło, jak zobaczymy później, o łączny spadek napięcia indukcyjnego w obu uzwojeniach — a wtedy niedokładności się wyrównają).

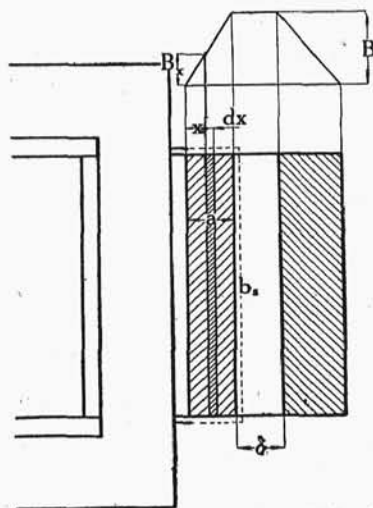
Liczba sprzęgnięć rozpatrywanego uzwojenia ze strumieniem (28) będzie się równała

$$B l_{sr} \frac{\delta}{2} w \dots (29)$$

Obliczymy teraz liczbę sprzęgnięć dla linii sił grupy drugiej (skojarzenie niezupełne).

Weźmy pasemko o szerokości

$dx$ , zawierające  $w \frac{dx}{a}$  zwojów.



Rys. 21.

Zwoje te są skojarzone ze strumieniem:

$$\frac{1}{2} \left( B + B \frac{x}{a} \right) (a - x) l_{sr}$$

Liczba sprzęgnięć dla tego elementarnego pasemka wyrazi się wzorem:

$$\frac{1}{2} \left( B + B \frac{x}{a} \right) (a - x) l_{sr} \frac{w}{a} dx$$

Dla całego zaś uzwojenia:

$$\int_0^a \frac{1}{2} \left( B + B \frac{x}{a} \right) (a - x) l_{sr} \frac{w}{a} dx$$

Po scałkowaniu otrzymamy:

$$B l_{sr} \frac{a}{3} w \quad \dots (30)$$

Łącząc ze sobą sprzęgnięcia (29) i (30), otrzymamy:

$$B l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right) w \quad \dots (31)$$

Zamiast  $B$  podstawimy wartość poprzednio wyznaczoną (27):

$$\frac{0,4 \pi I \sqrt{2}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right) w^2$$

Wyrażeniem tem należy zastąpić „ $\Phi w$ ” w ogólnym wzorze na SEM:  $E = 4,44 f \Phi w 10^{-8}$ ; wtedy otrzymamy SEM ( $E_s$ ), wznieconą przez strumień rozproszenia — czyli, jak wyjaśniliśmy, indukcyjny spadek napięcia w uzwojeniu.

$$E_s = 4,44 f \frac{0,4 \pi I \sqrt{2}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right) w^2 \cdot 10^{-8}$$

$$E_s = I \frac{7,9 f w^2 10^{-8}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right)$$

Jeżeli  $E_s$  jest spadkiem napięcia, to oporność indukcyjna, na której wystąpił ten spadek:

$$x = \frac{E_s}{I} = \frac{7,9 f w^2 10^{-8}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right) \text{ omów} \quad \dots (32)$$

Podstawiając do tego wzoru (rys. 22)  $w = w_1$  oraz  $a = a_1$ , otrzymamy oporność indukcyjną uzwojenia pierwotnego:

$$x_1 = \frac{7,9 f w_1^2 10^{-8}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right) \text{ omów} \quad \dots (33)$$

Biorąc zaś  $w = w_2$  i  $a = a_2$  — uzwojenia wtórnego:

$$x_2 = \frac{7,9 f w_2^2 10^{-8}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_2}{3} \right) \text{ omów} \quad \dots (34)$$

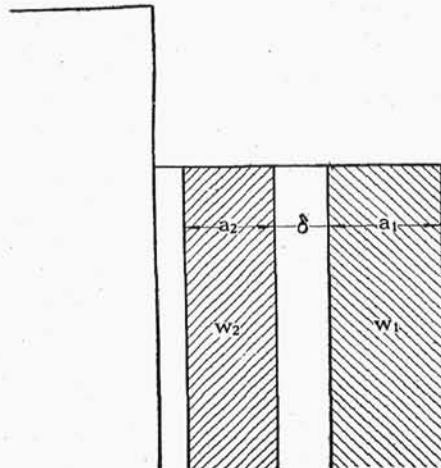
*Uwaga:* wszystkie wymiary w cm.

*Uzwojenie krążkowe.*

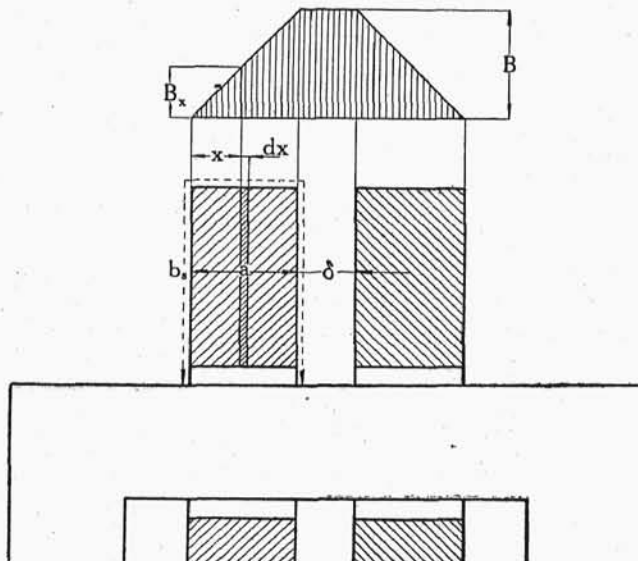
Zacniemy od wypadku najprostszego—gdy uzwojenie składa się tylko z 2-ch krążków. Stosując to samo rozumowanie, co przy uzwojeniu cylindrycznym i korzystając z oznaczeń na rys. 23, otrzymamy to samo wyrażenie (32) na oporność indukcyjną uzwojenia, co przy uzwojeniu cylindrycznym

$$x = \frac{7,9 f w^2 10^{-8}}{b_s} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a}{3} \right)$$

Ponieważ  $b_s$  przy naszym uzwojeniu jest mniejsze, niż

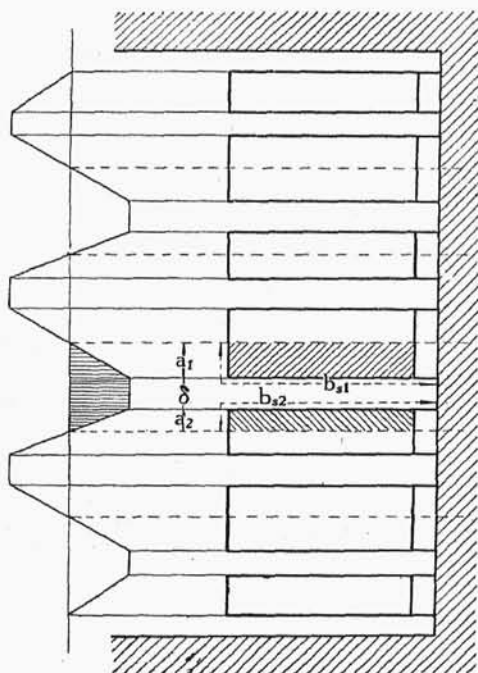


Rys. 22.



Rys. 23.

w wypadku uzwojenia cylindr., przeto oporność indukcyjna wypadnie naogół zbyt duża—by temu zapobiec każde z uzwojeń jest dzielone na kilka cewek (krążków), które na słupie następują po sobie na przemian — rys. 24. Cewki przy jarzmie otrzymują zwykle połowę tej liczby zwojów, co cewki pozostałe tego uzwojenia. Półcewki te należą zazwyczaj do uzwojenia niskiego napięcia, dającego się prościej odizolować od żelaza jarzma.



Rys. 24.

z rysunku, część uzwojenia, zawarta między dwiema sąsiednimi płaszczyznami (np.  $P_4$  i  $P_3$ ), zachowuje się pod względem strumienia rozproszenia tak, jak uzwojenie z rys. 23, tylko długość średnich dróg strumienia rozproszenia ( $b_s$ ) zmniejszyła się.

Uzwojenie, zawarte między dwiema płaszczyznami składa się z połówki cewki jednego i połówki cewki drugiego napięcia.

Oporność indukcyjną jednej połówki możemy obliczyć ze wzoru (32), korzystając z oznaczeń na rys. 24 i podstawiając na miejsce

„ $w$ ” liczbę zwojów jednej połówki, czyli  $\frac{w}{2}$ .

W ten sposób oporność indukcyjna połowy cewki np. uzwojenia pierwotnego przedstawi się wzorem:

Na rys. 24 widzimy przykład uzwojenia krążkowego, w którym każde z uzwojeń jest podzielone na 3 części, przyczem jedno uzwojenie (wysokiego napięcia) składa się z 3 cewek całkowitych (ogólnie z  $n$  cewek); drugie zaś (niskiego napięcia) z 2 pełnych cewek i dwóch połówek [ogólnie z

$$(n-1) + 2 \frac{1}{2} = n \text{ cewek.}]$$

Jest to tak zwany układ symetryczny, przy którym wszystkie cewki są pod wpływem jednakowych pól rozproszenia jak to widać na rys. 24.

Jeżeli poprowadzimy szeregi płaszczyzn równoległych  $P_1, P_2, P_3, \dots$ , to, jak widać

$$\frac{7,9 f \left( \frac{\tau w_1}{2n} \right)^2 10^{-8}}{b_{s1}} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right)$$

Całe uzwojenie ma takich połówek  $2n$ , oporność indukcyjna zatem będzie  $2n$  razy większa:

$$x_1 = 2n \frac{7,9 f \cdot \left( \frac{\tau w_1}{2n} \right)^2 10^{-8}}{b_{s1}} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right)$$

$$\boxed{x_1 = \frac{3,95 f \tau w_1^2 10^{-8}}{n b_{s1}} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right) \text{ omów}} \quad \dots (35)$$

Analogicznie dla uzwojenia wtórnego:

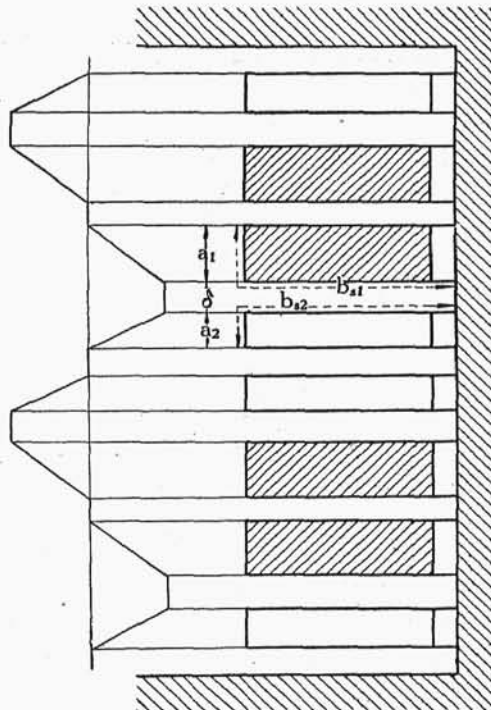
$$\boxed{x_2 = \frac{3,95 f \tau w_2^2 10^{-8}}{n b_{s2}} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_2}{3} \right) \text{ omów}} \quad \dots (36)$$

Dosyć często, dla stworzenia lepszych warunków odprowadzenia ciepła, każda z pełnych cewek jest podzielona na dwie połówki, między którymi daje się szczelinę, umożliwiającą cyrkulację powietrza, względnie oleju. Podział taki widzimy na rysunku 25. W szczelinie między półcewkami jednego napięcia nie mamy żadnego strumienia rozproszenia, szerokość tych szczelin przeto nie powinna wpływać na wielkość oporności indukcyjnej.

Z tego powodu i w tym wypadku możemy korzystać ze wzorów (35) i (36), uwzględniając oznaczenia na rys. 25.

Ołączeniu równoległym cewek przy uzwojeniu krążkowym, oraz o uzwojeniach krążkowych niesymetrycznych będzie mowa przy opisie budowy uzwojeń.

Na zakończenie należy nadmienić, że z powodu niemożności ścisłego określenia długości  $b_s$  dokładność obliczeń według powyższych wzo-



Rys. 25.

rów nie jest zbyt duża; wielkości oporności indukcyjnych obliczonych i pomierzonych mogą się różnić o  $10 \div 15\%$ .

c) *Przykład.* Obliczyć oporności indukcyjne uzwojeń transformatora jednofazowego o mocy 65 kVA;  $f = 42 \sim/\text{sek}$ ;  $\frac{12000}{200} \text{ V}$ .

Średnica koła opisanego na przekroju słupa  $D = 165 \text{ mm}$ .

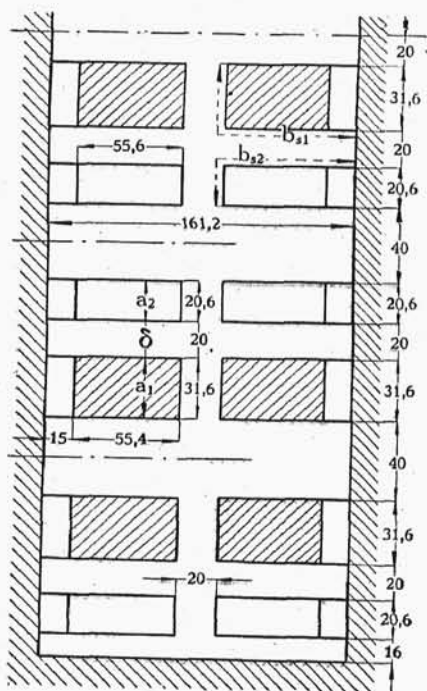
Rozmieszczenie uzwojeń, jak na rys. 26. Z powodu symetrii narysowane są cewki połowy słupa. Opis uzwojeń:

1) Wysokie napięcie.

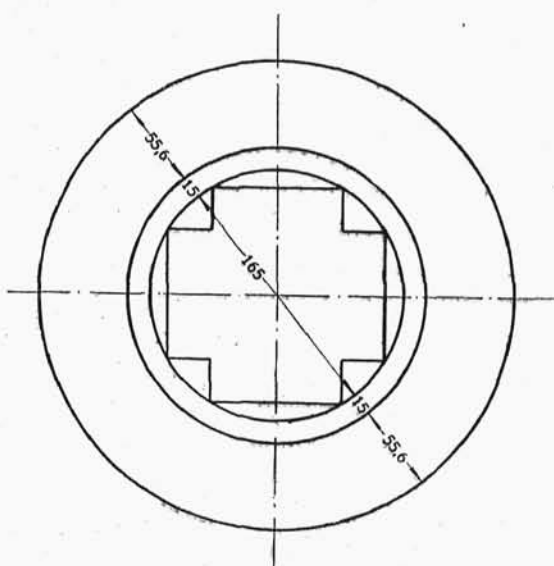
12 półcewek po 6 na każdym słupie; 240 zwojów w każdej (20 warstw po 12 zwojów w warstwie). Między warstwami przekładka papierowa o grubości 0,2 mm. Przewód okrągły o średnicy  $\frac{2,0}{2,5} \text{ mm}$ . Półcewka jest otąśmowiana taśmą bawełnianą o grubości 0,2 mm. poczwórnice.

2) Niskie napięcie.

12 półcewek po 6 na każdym słupie; każda zawiera 24 zwoje (12 warstw po 2 zwoje w warstwie). Wymiar przekroju przewodu  $8,7 \times 3,7$   $9,5 \times 4,5$ . Półcewki niskiego napięcia jednego słupa są ze sobą połączone równolegle. Równoległe grupy 2 słupów są połączone szeregowo.



Rys. 26.

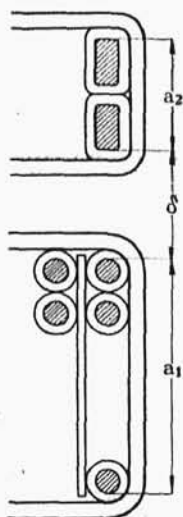


Rys. 27.



Półcewki niskiego napięcia są tak samo otaśmowane, jak cewki wysokiego napięcia.

Mamy, jak widać, uzwojenie krążkowe, wykonane z półcewek (oznaczenia jak na rys. 25, 26 i 28).



Rys. 28.

$$a_1 = 12 \times 2,5 - 0,5 = 29,5 \text{ mm.}$$

$$a_2 = 2 \times 9,5 - 0,8 = 18,2 \text{ mm.}$$

$$\delta = 0,4 + 4 \times 0,2 + 20 + 4 \times 0,2 + 0,25 = 22,25 \text{ mm.}$$

$$b_{s1} = 15 + 55,4 + 31,6 = 102 \text{ mm.}$$

$$b_{s2} = 15 + 55,6 + 20,6 = 91,2 \text{ mm.}$$

$$n = \frac{12}{2} = 6; \quad w_1 = 12 \times 240 = 2880;$$

$$w_2 = 2 \times 24 = 48;$$

$$l_{sr} = \pi \left[ 165 + 2 \times 15 + \frac{55,6 + 55,4}{2} \right] = 78,6 \text{ cm.}$$

$$x_1 = \frac{3,95 f w_1^2 10^{-8}}{n b_{s1}} l_{sr} \left( \frac{\delta}{2} + \frac{a_1}{3} \right) = \frac{3,95 \cdot 42 \cdot 2880^2 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 10,2} \cdot 78,6 \left( \frac{2,225}{2} + \frac{2,95}{3} \right) = 37,1 \Omega.$$

$$x_2 = \frac{3,95 \cdot 42 \cdot 48^2 \cdot 10^{-8}}{6 \cdot 9,12} 78,6 \left( \frac{2,225}{2} + \frac{1,82}{3} \right) = 0,00945 \Omega.$$

*Uwaga.* Przy obliczaniu długości  $b_{s1}$  i  $b_{s2}$  popełniliśmy pewną nieścisłość — nie uwzględniając warstw izolacji — jest to o tyle dopuszczalne, że długości te nie są czemś zupełnie uchwytnym.

## 5. Oporność omowa i straty mocy w miedzi uzwojeń.

a) *Oporność omowa uzwojeń.* Oporność omową każdego z uzwojeń przy przepływie prądu zmiennego możemy obliczyć według wzoru,

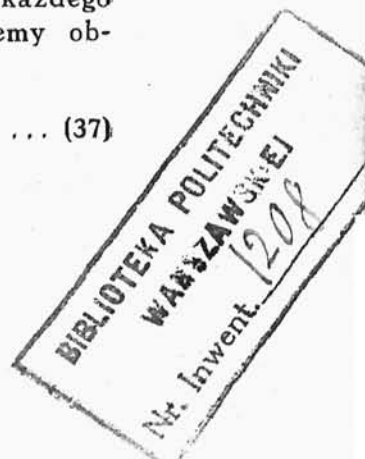
$$r = k \frac{w l_{sr} (1 + 0,004 \Delta t)}{5700 s} \quad \dots (37)$$

gdzie:

$\Delta t$  — jest to przyrost temperatury

$s$  — przekrój uzwojenia w  $\text{mm}^2$

$l_{sr}$  — średnia długość zwoju w cm.

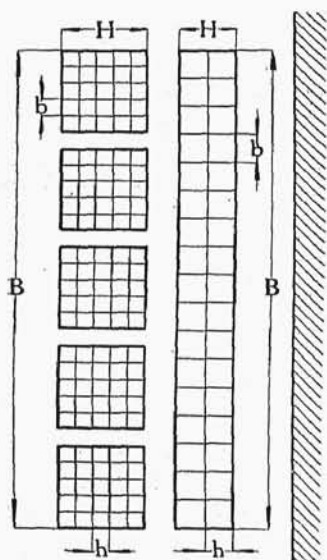


$k$  — współczynnik, większy od jedności, uwzględniający powiększenie oporności wskutek przepływu prądu zmiennego; przy prądzie zmiennym, bowiem, prąd nie rozkłada się równomiernie na cały przekrój przewodu, co jest równoznaczne z powiększeniem oporności. Współczynnik  $k$  waha się naogół w granicach

$$k = 1,05 \div 1,25$$

i zależny jest od wielkości i kształtu przekroju, oraz od budowy uzwojenia. Podamy tutaj wzory, na podstawie których współczynnik ten można obliczyć (Emde El. i M, r. 1908 str. 703, r. 1922 str. 301; Richter El. Masch. t. III str. 73).

### Uzwojenie cylindryczne.



Dla uzw. zewn.  $m = 5$ ;

$n = 25$ .

Dla uzw. wewn.  $m = 2$ ;

$n = 17$ .

Rys. 29.

### Przekrój prostokątny.

$$k_{\diamond} = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{9} \xi_{\diamond}^4,$$

gdzie

$$\xi_{\diamond} = 2 \pi h \sqrt{\frac{n b}{B + 2 H} \cdot \frac{f}{\rho \cdot 10^5}}$$

W tych wzorach  $n$  oznacza liczbę zwojów znajdujących się jeden nad drugim w kierunku osiowym,  $m$  — liczbę warstw w cewce.

Wymiary  $h, b, H, B$  — jak na rys. 29 w cm.,  $f$  — częstotliwość w  $\sim/\text{sek}$ ;

$\rho$  — oporność właściwa (dla miedzi w stanie zagrzany  $\rho \approx \frac{1}{45}$ ).

### Przekrój kołowy.

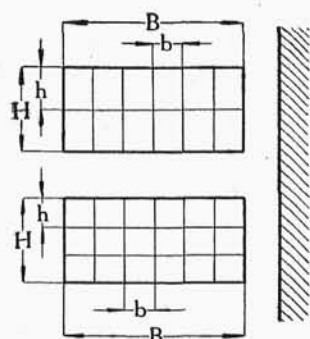
$$k_0 = 1 + \frac{m^2 - 0,2}{15,25} \xi_0^4, \text{ gdzie}$$

$$\xi_0 = 2 \pi d \sqrt{\frac{n d}{B + 2 H} \cdot \frac{f}{\rho \cdot 10^5}}$$

W ostatnim wzorze  $d$  — średnica przewodu w cm.

Pozostałe oznaczenia, jak przy przekroju prostokątnym. Budowa uzwojeń z  $\xi > 1$  jest niewskazana, ze względu na znaczne powiększenie się oporności przy prądzie zmiennym i, co stąd wynika, nadmierne straty w miedzi.

# Uzwojenie krążkowe.



Dla cewki górnej  $m=2$ ,  $n=6$   
Dla cewki dolnej  $m=3$ ;  $n=6$ .  
Rys. 30.

## Przekrój prostokątny.

$$k_{\diamond} = 1 + \frac{m^2 - 0,8}{36} \xi_{\diamond}^4, \text{ gdzie}$$

$$\xi_{\diamond} = 2 \pi h \sqrt{\frac{n b}{B + 0,6 H} \frac{f}{\rho \cdot 10^5}}$$

W tych wzorach  $n$  oznacza liczbę warstw w cewce;  $m$  — liczbę zwojów w jednej warstwie.

Wymiary  $h$ ,  $b$ ,  $H$ ,  $B$ , jak na rys. 30 w cm.  $f$  i  $\rho$  — jak wyżej.

## Przekrój kołowy.

$$k_0 = 1 + \frac{m^2 - 0,8}{61} \xi_0^4, \text{ gdzie}$$

$$\xi_0 = 2 \pi d \sqrt{\frac{n d}{B + 0,6 H} \frac{f}{\rho \cdot 10^5}}$$

$d$  — średnica przewodu w cm. Pozostałe oznaczenia, jak wyżej. Stosowność wzorów dla uzwojenia krążkowego:

przy  $m = 1$  jeśli  $\xi \leq 2$

„  $m \geq 2$  jeśli  $\xi \leq 1$ .

Przekroczenie tych granic pociąga za sobą znaczne powiększenie dodatkowych strat mocy w miedzi uzwojeń.

Jasną jest rzeczą, że dla każdego z uzwojeń (pierwotnego i wtórnego) współczynnik  $k$  należy obliczać oddzielnie.

b) *Straty mocy w miedzi* każdego z uzwojeń mogą być wyrażone wzorem:

$$\Delta P_m = I^2 r, \text{ gdzie}$$

$I$  — prąd w uzwojeniu;  $r$  — oporność omowa uzwojenia przy prądzie zmiennym. Podstawiając do tego wyrażenia oporność  $r$  ze wzoru (37) i przyjmując  $\Delta t \cong 65^\circ \text{C}$ , otrzymamy:

$$\Delta P_m = I^2 k \frac{\omega l_{sr} (1 + 0,004 \cdot 65)}{5700 s} = k \frac{1,26 I^2}{5700 s^2} \omega l_{sr} s$$

$$\omega l_{sr} s = V_m \cdot 10^5 = \frac{G_m}{8,9} \cdot 10^5,$$

gdzie  $V_m$  — objętość miedzi w  $\text{dcm}^3$ ;

$G_m$  — ciężar tej miedzi w  $\text{kg}$ ; 8,9 — ciężar właściwy w  $\text{kg/dcm}^3$ .

$\frac{I}{s} = j$  — gęstość prądu.

Podstawiając, otrzymamy:

$$\Delta P_m = k \frac{1,26}{5700} j^2 \frac{G_m}{8,9} 10^5$$

$$\boxed{\Delta P_m = k \cdot 2,5 j^2 G_m \text{ watów}} \quad \dots (38)$$

Dla przekrojów niezbyt dużych możemy przyjąć  $k = 1,05 \div 1,1$ ; otrzymamy wtedy:

$$\boxed{\Delta P_m \approx 2,7 j^2 G_m} \quad \dots (39)$$

Widzimy, że straty mocy w miedzi są proporcjonalne do kwadratu gęstości prądu oraz do ciężaru miedzi. Ostatni wzór może służyć do orientacyjnego obliczenia strat.

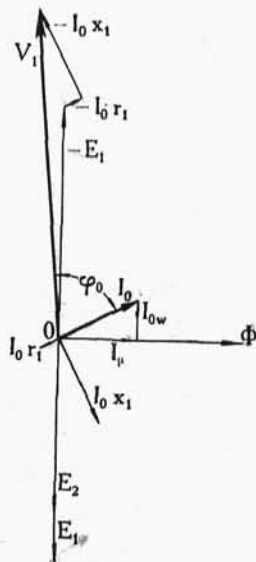
## 6. Wykresy wektorowe transformatora.

Gdy umiemy już wyznaczać prąd biegu jałowego oraz oporności uzwojeń, możemy przystąpić do dokładnego poznania pracy transformatora na podstawie wykresów wektorowych.

a) *Praca jałowa* (rys. 31). Wykres budujemy w sposób następujący. Wychodzimy z wektora strumienia  $\Phi$ . Strumień  $\Phi$  wznieca w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym SEM-e ( $E_1$  i  $E_2$ ), które w stosunku do tego strumienia spóźniają się o  $90^\circ$ .

Prąd magnesujący  $I_\mu$  (składowa bezwrotna prądu biegu jałowego) jest w fazie ze strumieniem  $\Phi$ , składowa zaś wrotna  $I_{0w}$  jest przesunięta względem  $I_\mu$  o  $90^\circ$  naprzód; suma geometr. tych dwóch wektorów daje prąd biegu jałowego  $I_0$ .

Napięcie przyłożone zzewnątrz do zacisków uzwojenia pierwotnego  $V_1$  jest równoważone przez SEM  $E_1$  oraz spadki napięć spowodowane przepływem prądu  $I_0$ . Wektory spadków napięć indukcyjnego  $I_0 x_1$  (przesuniętego o  $90^\circ$  wstecz w stosunku do prądu  $I_0$ )



Rys. 31.