

Transformatorem w elektrotechnice nazywamy przyrząd, służący do przetwarzania energii elektrycznej na zasadzie elektromagnetycznej bez udziału ruchu mechanicznego. Nie jest on zatem maszyną elektryczną, w najściślejszym tego słowa znaczeniu.

Transformator odgrywa w elektrotechnice b. ważną rolę, zawdzięczając bowiem transform. można wytwarzać energję elektryczną tam, gdzie jest najwygodniej i najtaniej i rozprowadzać ją do punktów odbiorczych, nieraz b. odległych od wytwórni — jednym słowem transformator rozwiązuje nam problem transportu energii. Chodzi tutaj o to, że przesyłanie energii elektrycznej przy niskiem napięciu pociąga za sobą, o ile spadek napięcia ma być utrzymany w nieznacznych granicach, konieczność stosowania b. dużych przekrojów, co niepomrotnie zwiększa koszt linii. Przenosząc tę samą moc przy napięciu wyższem, zmniejszamy przekrój, a tem samem i koszt urządzenia przesyłowego. Wynika to stąd, że przekrój przy tym samym procentowym spadku napięcia, jest odwrotnie proporcjonalny do kwadratu napięcia.

W miejscu dostarczenia energii elektrycznej napięcie trzeba zniżyć — gdyż takie odbiorniki, jak żarówki, grzejniki, małe silniki są zbudowane na niskie napięcie.

Zarówno do podnoszenia napięcia, jak i do jego obniżania służą zazwyczaj transformatory.

W zależności od rodzaju prądu dzielimy transformatory na jednofazowe i wielofazowe.

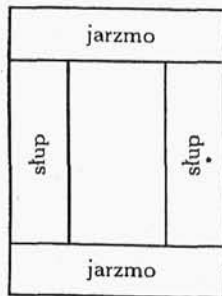
## ROZDZIAŁ I.

### TRANSFORMATOR JEDNOFAZOWY.

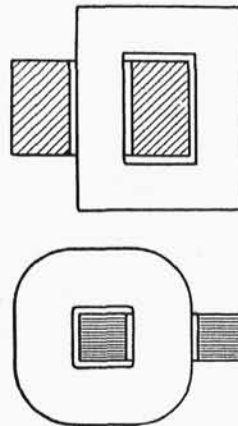
#### 1. Pojęcia ogólne.

Transformator jednofazowy składa się zwykle z dwóch lub kilku izolowanych od siebie obwodów elektrycznych (najczęściej dwóch) i jednego wspólnego dla nich obwodu magnetycznego. Zaznaczyć należy, że niekiedy transformator może posiadać tylko jeden obwód elektryczny, o tem jednakże będziemy mówili później (patrz autotransformator).

Na obwód magnetyczny składają się słupy i jarzma (rys. 1), wykonane z cienkich blach żelaznych. Do budowy obwodu elektrycznego używane są zwykle przewody miedziane. Transformator jednofazowy jest przedstawiony schematycznie na rys. 2.



Rys. 1.



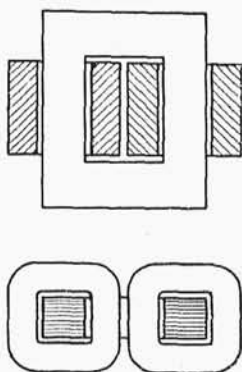
Rys. 2.

Z rysunku tego widzimy, że obwody elektryczny i magnetyczny są ze sobą wzajemnie sprzężone.

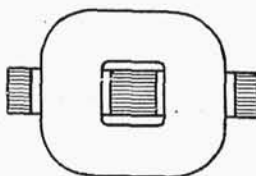
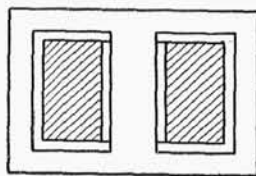
W ten sposób, jak na rys. 2, transformatory są budowane rzadko (tylko dla b. małych mocy). Zwykle albo uzwojenie jest rozłożone

na dwa słupy (rys. 3), albo jeden ze słupów jest podzielony na 2 części (rys. 4). W pierwszym wypadku otrzymujemy transformator typu rdzeniowego (wykonanie z rys. 2 również nosi często tę samą nazwę), w drugim — płaszcзовego.

W Europie są budowane przeważnie transformatory rdzeniowe, w Ameryce można b. często spotkać się z płaszcзовym.



Rys. 3.



Rys. 4.

W ostatnich czasach zaczęto stosować w Europie transformatory płaszcзовые tam, gdzie wymagane jest niskie napięcie i duży prąd — np. w wypadku transformatorów do zasilania pieców metalurgicznych, tam zaś, gdzie chodzi o wysokie napięcie i stosunkowo nieduże prądy, używa się typu rdzeniowego.

*Uzwojenia transformatorów.* Normalnie transformator jednofazowy posiada dwa uzwojenia — wyższego i niższego napięcia (inaczej górnego i dolnego napięcia).

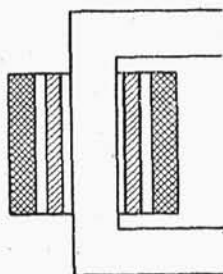
Transformatory płaszcзовые interesować nas nie będą ze względu na ich małe u nas rozpowszechnienie.

W transformatorze rdzeniowym (rys. 3) uzwojenia znajdują się na obu słupach. W zależności od sposobu rozmieszczenia uzwojeń na słupach, dzielimy uzwojenia na *cyldryczne* i *krążkowe*.

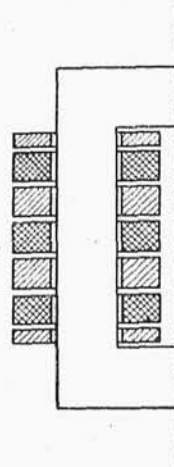
W pierwszym wypadku uzwojenia górnego i dolnego napięcia są umieszczone współśrodkowo (rys. 5), przyczem uzwojenie napięcia górnego znajduje się zwykle nazewnątrz, przy takim bowiem umieszczeniu łatwiej jest to uzwojenie odizolować od żelaza. Przy wyższych napięciach uzwojenie, przypadające na słup, jest dzielone na kilka cewek, przy napięciach zaś niskich — tworzy jedną cewkę.

Cel podziału, jak również sposoby łączenia cewek omówimy później (patrz VIII — 2 — b i c).

W uzwojeniach krążkowych mamy kolejno po sobie następujące cewki górnego i dolnego napięcia, jak na rys. 6. Cewki mają kształt krążków — stąd nazwa uzwojenia. Zewnętrznymi cewkami (przy



Rys. 5.



Rys. 6.

jarzmach) są zwykle krążki dolnego napięcia — ze względu na łatwiejsze odizolowanie od żelaza. O budowie uzwojeń krążkowych i łączeniu — patrz niżej (VIII — 2 - e).

Uzwojenie, które pobiera moc elektryczną, nosi nazwę pierwotnego; uzwojenie, które moc elektryczną oddaje, nazywamy wtórnem. Oczywiście to samo uzwojenie może być raz pierwotnem, raz wtórnem — w zależności od charakteru pracy

## 2. Zasada działania transformatora.

*Praca jałowa.* Działanie transformatora jest oparte na zjawisku indukcji elektromagnetycznej. Rozpatrzmy wypadek, gdy uzwojenie transformatora po stronie wtórnej jest otwarte. Jeżeli przyłożymy do zacisków uzwojenia pierwotnego napięcie okresowo - zmienne, to przez uzwojenie to popłynie prąd zmienny. Wywoła on (a właściwie amperozwoje uzwojenia pierwotnego) w rdzeniu żelaznym przepływ strumienia magnetycznego o kierunkach zmiennych.

Ten zmienny strumień, przepływając przez rdzeń, będzie wzniecał siły elektromotoryczne:

- 1) w uzwojeniu pierwotnem — SEM samoindukcji,
- 2) w uzwojeniu wtórnem — SEM indukcji wzajemnej.

SEM samoindukcji, wzniecona w uzwojeniu pierwotnem, prawie całkowicie równoważy napięcie, przyłożone do zacisków tego uzwojenia, będąc skierowaną przeciw niemu.

Jeżeli założymy, że cały strumień magnetyczny, wytworzony przez amperozwoje uzwojenia pierwotnego jest skojarzony z uzwojeniem wtórnym (czyli że nie mamy żadnego rozproszenia), to można napisać:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} 10^{-8} \quad \dots (1)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_t}{dt} 10^{-8} \quad \dots (2)$$

( $\Phi_t$  w obu równaniach to samo).

Jeżeli napięcie, przyłożone do zacisków uzwojenia pierwotnego, ma zmienność sinusoidalną, to siła elektromotoryczna, wzbudzona w tem uzwojeniu, będzie miała też zmienność sinusoidalną, a zatem:

$$e_1 = E_{1mx} \sin \omega t = E_1 \sqrt{2} \sin \omega t.$$

Podstawiając tę zależność do równania (1):

$$E_1 \sqrt{2} \sin \omega t = -w_1 \frac{d\Phi_t}{dt} 10^{-8}$$

stąd

$$d\Phi_t = -\frac{1}{w_1} E_1 \sqrt{2} \sin \omega t dt 10^8$$

Po scałkowaniu:

$$\Phi_t = -\frac{1}{w_1 \omega} E_1 \sqrt{2} \cos \omega t 10^8$$

$$\Phi_t = \frac{1}{w_1 \omega} E_1 \sqrt{2} \sin (\omega t + 90^\circ) 10^8$$

Widzimy, że strumień zmienia się też sinusoidalnie, ale wyprzedza o  $90^\circ$  SEM, którą wznieca.

Wartość maksymalna tego strumienia będzie:

$$\Phi = \frac{1}{w_1 \omega} E_1 \sqrt{2} \cdot 10^8$$

stąd siła elektromotoryczna:

$$E_1 = \frac{\omega}{\sqrt{2}} w_1 \Phi 10^{-8}; \quad \text{ale } \omega = 2\pi f$$

więc

$$\boxed{E_1 = 4,44 f \Phi w_1 10^{-8} \text{ woltów.}} \quad \dots (3)$$

Jest to SEM w uzwojeniu pierwotnem.

Podobnym wzorem wyrazi się SEM wzniecona w uzwojeniu wtórnym:

$$\boxed{E_2 = 4,44 f \Phi w_2 10^{-8} \text{ woltów.}} \quad \dots (4)$$

W obu ostatnich równaniach  $E_1$  i  $E_2$  oznaczają wartości skuteczne SEM-yh uzwojeń pierwotnego i wtórnego, zaś  $\Phi$  wartość maksymalną strumienia.

Dzieląc przez siebie równania (3) i (4), otrzymamy stosunek:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}$$

Stosunek ten nosi nazwę *przekładni transformatora* i jest oznaczany literą  $\vartheta$ .

$$\boxed{\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = \vartheta.} \quad \dots (5)$$

Przy biegu jałowym przekładnia transformatora z dużym przybliżeniem będzie się równała stosunkowi napięć strony pierwotnej i wtórnej:

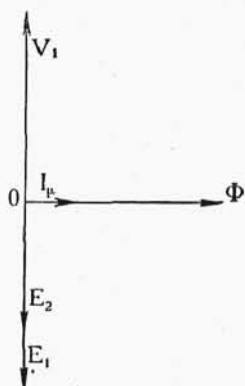
$$\vartheta \simeq \frac{V_1}{V_2} \quad \dots (6)$$

gdyż spadek napięcia w uzwojeniu pierwotnym, spowodowany prądem biegu jałowego, jest bardzo mały ( $V_1 \simeq E_1$ ), a w uzwojeniu wtórnym mierzymy siłę elektrom. ( $V_2 = E_2$ ).

Stosunki napięć, podawane w katalogach firm, dostarczających transformatory, odnoszą się zwykle do biegu jałowego.

Jeżeli narazie pominąć w transformatorze wszelkie straty i spadki napięć, to nietrudno będzie zbudować wykres wektorowy pracy jałowej, (rys. 7).

Wektor poziomy oznacza strumień  $\Phi$ , siły elektrom.  $E_1$  i  $E_2$  są przesunięte o  $90^\circ$  wstecz, jak na rys. 7.



Rys. 7.

Napięcie zzewnątrz przyłożone  $V_1$  jest równoważone przez siłę elektrom.  $E_1$  (pominawszy spadki napięć), a więc wektor napięcia ma kierunek do góry.

Prąd magnesujący  $I_1$  jest w fazie ze strumieniem.

*Transformator obciążony.* Teraz zakładamy, że transformator jest obciążony, czyli na zaciski uzwojenia wtórnego jest załączona pewna oporność. W uzwojeniu tem popłynie prąd  $I_2$ , którego kierunek będzie mniej więcej zgodny z kierunkiem SEM  $E_2$ .

Kierunek prądu w uzwojeniu pierwotnym  $I_1$  będzie mniej więcej zgodny z napięciem  $V_1$ , bo transformator po stronie pierwotnej jest odbiornikiem.

Ponieważ wektory  $E_2$  i  $V_1$  są skierowane przeciwnie, więc i wektory prądów  $I_2$  i  $I_1$  będą również skierowane w przybliżeniu przeciwko sobie.

Amperozwoje uzwojeń pierwotnego ( $I_1 w_1$ ) i wtórnego ( $I_2 w_2$ ), jak również i strumień przez nie wytworzone, są skierowane, jak odpowiednie wektory prądu — czyli mniej więcej przeciwnie.

Z tego wnosimy, że przepływ prądu w uzwojeniu wtórnym powoduje osłabienie strumienia wywołanego przez prąd uzwojenia pierwotnego; należałoby się spodziewać zmniejszenia strumienia wypadkowego — tak jednak nie jest.

Napięcie, przyłożone do zacisków uzwojenia pierwotnego  $V_1$ , ma stałą wartość. Jest ono równoważone przez SEM  $E_1$ , wznieconą w tem uzwojeniu, oraz spadki napięć. Spadki napięć, nawet przy pełnem obciążeniu, są naogół nieznaczne (kilka %), można więc uważać, że SEM  $E_1$  jest prawie równa napięciu  $V_1$  — czyli jest stała.

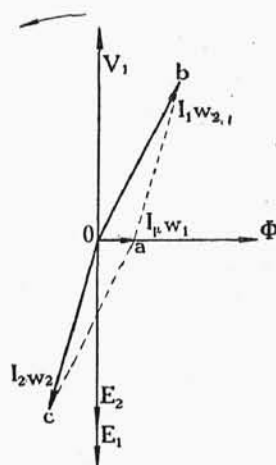
SEM  $E_1$  jest wzniecona przez strumień, wywołany wypadkowymi amperozwojami uzwojeń pierwotnego i wtórnego.

Ponieważ SEM  $E_1$  ma praktycznie wartość stałą, więc i strumień wypadkowy, który ją wzniecił, jak również amperozwoje wypadkowe, winny być stałe.

To może mieć miejsce tylko wtedy, gdy prąd pierwotny wzrośnie — i to tak, aby suma geometryczna amperozwojów uzwojenia pierwotnego i wtórnego była prawie równa amperozwojom przy pracy jałowej.

Widzimy zatem, że *wzrostowi prądu po stronie wtórnej musi odpowiedzieć wzrost prądu czerpanego z sieci przez uzwojenie pierwotne transformatora*. Na rys. 8 widzimy wykres amperozwojów, działających w transformatorze. Wektor  $\vec{Oc}$  przedstawia amperozwoje wtórne  $I_2 w_2$ , wektor  $\vec{Ob}$  — amperozwoje pierwotne  $I_1 w_1$ . Suma geometryczna tych wektorów  $\vec{Ob}$  da wektor wypadkowy, który praktycznie będzie taki sam, jak amperozwoje uzwojenia pierwotnego przy biegu jałowym.

Wektor ten będzie skierowany wzdłuż wektora  $\Phi$ , gdyż przy naszych rozważaniach są pominięte straty w żelazie transformatora. Ponieważ wektor  $\vec{Oa}$  w porównaniu do wek-



Rys. 8.

tora  $\overline{Oc}$  i  $\overline{Ob}$  jest mały (praktycznie stanowi  $5 \div 15\%$  wektora  $\overline{Ob}$ ), więc można przyjąć, że  $\overline{Ob} \simeq \overline{Oc}$ ; czyli

$$I_1 w_1 \simeq I_2 w_2 \quad \dots (7)$$

amperozwoje uzwojeń pierwotnego i wtórnego są prawie równe.

Zależność (7) możemy przekształcić tak:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1} \quad \dots (8)$$

Ponieważ  $\frac{w_1}{w_2} = \frac{E_1}{E_2}$ , więc, podstawiając do (8) otrzymamy  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{E_2}{E_1}$  skąd

$$I_1 E_1 = I_2 E_2 \quad \dots (9)$$

**Wniosek:** Moc, odbierana od sieci przez pierwotną stronę transformatora jest za pośrednictwem strumienia magnetycznego przekazywana do obwodu wtórnego.

To pośrednictwo jednak pociąga za sobą straty wskutek przepływu w żelazie zmiennego strumienia magnetycznego.

### 3. Straty mocy w żelazie i prąd biegu jałowego.

a) *Straty mocy w żelazie.* Straty te dzielimy na dwie grupy:

- 1) naskutek histerezy,
- 2) „ prądów wirowych.

Można je obliczyć bądź każdą oddzielnie — bądź łącznie.

Według Arnolda straty na histerezę:

$$\Delta P_h = \sigma_h \frac{f}{100} \left( \frac{B}{1000} \right)^{1,6} V_{zel} \text{ watów.} \quad \dots (10)$$

$f$  — częstotliwość;  $B$  — max. wartość indukcji;  $V_{zel}$  — objętość żelaza w  $\text{dcm}^3$ .

$\sigma_h = 1$  — dla dobrych gatunków żelaza bez krzemu;

$\sigma_h = 0,5 \div 0,63$  — dla żelaza z domieszką krzemu.

Straty zaś na prądy wirowe:

$$\Delta P_w = \sigma_w \left( \Delta \frac{f}{100} \frac{B}{1000} \right)^2 V_{zel} \text{ watów.} \quad \dots (11)$$



$\Delta$  — grubość blachy w mm.

$\sigma_w = 1,3 \div 1,6$  dla żelaza bez krzemu,

$\sigma_w = 0,4 \div 0,5$  „ „ z krzemem.

Przy projektowaniu jednak najczęściej straty na histerezę i prądy wirowe oblicza się razem, przyjmując, że jedno i drugie są proporcjonalne do kwadratu indukcji (co nie jest dla strat histerytycznych zupełnie słuszne).

Prof. Vidmar proponuje dla obliczenia strat w żelazie wzór empiryczny

$$\Delta P_z = \Delta p_z \left( \frac{B}{10000} \right)^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} G_z \text{ watów.} \quad \dots (12)$$

$\Delta p_z$  — straty w 1 kg. żelaza przy  $B = 10000$  G i  $f = 50$  ~ /sek.

$G_z$  — ciężar żelaza w kg., którego straty pragniemy znaleźć.

Stratność żelaza ( $\Delta p_z$ ) jest zależna od grubości blachy oraz od zawartości w żelazie krzemu.

Przy transformatorach ze względów, o których powiemy później, zależy nam na specjalnie małych stratach w żelazie. Z tego powodu są stosowane blachy o dużej zawartości krzemu i cieńsze, niż np. do maszyn elektrycznych.

W tabeli I mamy podane spotykane grubości blach oraz odpowiadające im stratności przy dużej zawartości ( $\sim 4\%$ ) krzemu.

Tabela I

$\Delta =$	0,3	0,35	0,4	0,5 *)	mm.
$\Delta p_z =$	1,2	1,3	1,5	1,7	W/kg.

Ciężar właściwy  $\gamma \cong 7,6$  kg/dcm<sup>3</sup>.

Należy zaznaczyć, że są już czasami stosowane blachy o jeszcze mniejszych stratach np. 0,35 mm. — 1,0 W/kg.; 0,5 mm. — 1,3 W/kg.

Normalne wymiary blach przy grubościach 0,3, 0,35 i 0,4 mm. —  $750 \times 1500$  i  $800 \times 1600$  mm.; przy grubości 0,5 —  $1000 \times 2000$  mm. Huty na zamówienie dostarczają blach i w innych formatach.

Przy budowie transformatorów na niższe częstotliwości (np.  $16\frac{2}{3}$ , 25 ~ /sek.) używa się czasami blach z mniejszą zawartością

\*) Blacha o grubości 0,5 mm. jest przy budowie transf. używana rzadko.

krzemu, a zatem o większej stratności — np. przy grubości blachy 0,5 mm. i zawartości krzemu około 1<sup>0</sup>/<sub>0</sub> — 3 W/kg., przy 2<sup>0</sup>/<sub>0</sub> — 2,3 W/kg.

W b. dużych transformatorach straty w żelazie odgrywają stosunkowo mniejszą rolę — z tego powodu przy budowie takich transformatorów również stosują się niekiedy blachy z mniejszą domieszką Si.

W rzeczywistości straty w żelazie wypadają nieco większe (o 10 do 20<sup>0</sup>/<sub>0</sub>) niż obliczone według podanych wzorów, a to z powodu uszkodzenia izolacji między blachami przy sztancowaniu blach oraz ich zbieraniu.

Straty w żelazie noszą nazwę strat stałych, gdyż przy stałym napięciu pierwotnym wartość ich jest niezależna od obciążenia. Wynika to z tego, że strumień wypadkowy, jak już dowodziliśmy poprzednio, jest wielkością praktycznie stałą.

Straty w żelazie również często nazywamy stratami biegu jałowego.

W rzeczywistości przy biegu jałowym występują jeszcze straty w miedzi uzwojenia pierwotnego oraz straty dielektryczne. Pierwsze są skutkiem przepływu przez uzwojenie pierwotne prądu biegu jałowego. Prąd ten jest, jak zobaczymy, nieznaczny, również i straty przezeń wywołane. Np. przy prądzie biegu jałowego, równym 10<sup>0</sup>/<sub>0</sub> prądu normalnego, straty w miedzi uzwojenia pierwotnego

wynoszą  $\sim \frac{1}{200}$  strat w miedzi obu uzwojeń przy pełnym obciążeniu. Straty dielektryczne są tak samo, jak wykazują pomiary, b. małe. Ostatecznie można powiedzieć, że przy biegu jałowym praktycznie mamy do czynienia tylko ze stratami w żelazie. Straty biegu jałowego (w watach) są zwykle podawane w katalogach firm, budujących transformatory.

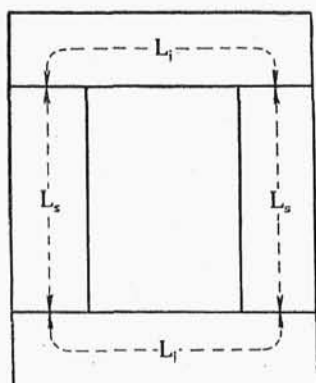
Jeżeli straty w żelazie są wiadome, możemy znaleźć składową watową prądu biegu jałowego:

$$\boxed{I_{0w} = \frac{\Delta P_z}{V_1}} \quad \dots (13)$$

gdzie  $\Delta P_z$  — straty w żelazie;  $V_1$  — napięcie na zaciskach uzw. pierwotnego.

b) *Prąd magnesujący.* Poza omówioną składową watową, prąd biegu jałowego posiada b. znaczną, w porównaniu do watowej, składową bezwatową — t. zw. prąd magnesujący. Przystąpimy teraz do wyznaczenia tego prądu.

Na rys. 9 widzimy obwód magnetyczny transformatora jednofazowego.

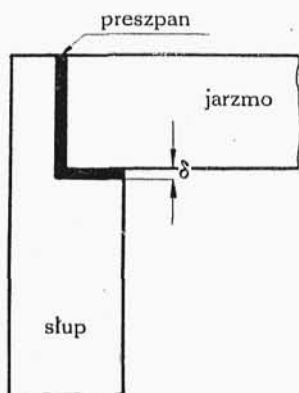


Rys. 9.

Strumień magnetyczny ma do przebycia trzy drogi:

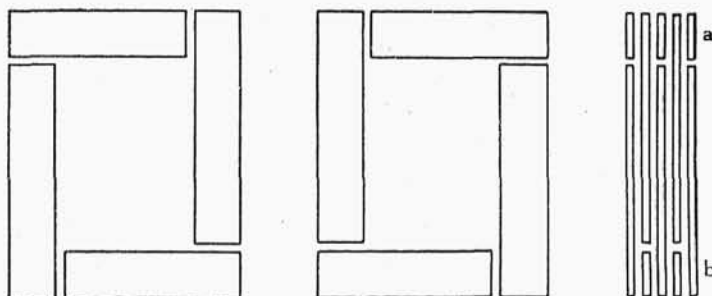
- 1) w jarzmach  $2 L_j$  (przekrój jarzma  $S_j$ ),
- 2) w słupach  $2 L_s$  (przekrój słupa  $S_s$ )
- i 3) we wszystkich szczelinach powietrznych  $\Sigma \delta$  — (przekrój  $S_p$ ).

*Uwaga:* Tylko w dużych transformatorach, gdzie oddzielnie są wykonywane słupy, a oddzielnie jarzma — i dopiero później obwód magnetyczny jest montowany, mamy do czynienia z właściwymi szczelinami powietrznymi (patrz rys. 10). Przy transformatorach mniejszych obwód magnetyczny jest wykonywany z blach odpowiednio przekładanych.



Rys. 10.

Rys. 11 przedstawia 2 kolejne warstwy, następujące jedna po drugiej. Tutaj ze szczeliną we właściwym znaczeniu tego słowa nie mamy do czynienia — jednakże nie mamy również zupełnej ciągłości żelaza. Tę nieciągłość uwzględniamy w ten sposób, że zakładamy w miejscach przekładania blach (a, b) pewną fikcyjną szczelinę. Według Arnolda grubość takiej szczeliny przy obliczaniu amperozwojów magnesujących, należy szacować na  $0,0035 \div 0,005$  cm.



Rys. 11.

Według prawa Ohma dla obwodu magnetycznego mamy:

$$\Phi = \frac{SMM}{R_m} \quad \dots (14)$$

gdzie  $\Phi$  oznacza strumień maksymalny;  $SMM$  oznacza siłę magnetyczną, która wytwarza ten strumień (czyli też maksymalną).

$$SMM = 0,4\pi I_{\text{max}} w_1 \quad \dots (15)$$

$R_m$  — oporność magnetyczną obwodu, równą sumie oporności dróg w słupach ( $R_s$ ), w jarzmach ( $R_j$ ) i szczelinach powietrznych ( $R_p$ ).

$$R_m = R_s + R_j + R_p = \frac{2L_s}{\mu_s S_s} + \frac{2L_j}{\mu_j S_j} + \frac{\Sigma \delta}{\mu_p S_p} \quad \dots (16)$$

W ostatnim wyrażeniu  $\mu_s$ ,  $\mu_j$  i  $\mu_p$  — są to przenikalności magnetyczne ( $\mu_p = 1$ ).

Podstawiając do równania (14) zależności (15) i (16) otrzymamy:

$$\Phi = \frac{0,4\pi I_{\text{max}} w_1}{\frac{2L_s}{\mu_s S_s} + \frac{2L_j}{\mu_j S_j} + \frac{\Sigma \delta}{S_p}}$$

skąd:

$$0,4\pi I_{\text{max}} w_1 = \frac{\Phi}{S_s} \frac{1}{\mu_s} 2L_s + \frac{\Phi}{S_j} \frac{1}{\mu_j} 2L_j + \frac{\Phi}{S_p} \Sigma \delta.$$

Ponieważ  $\frac{\Phi}{S} = B$ , więc:

$$I_{\text{max}} w_1 = 0,8 \frac{B_s}{\mu_s} 2L_s + 0,8 \frac{B_j}{\mu_j} 2L_j + 0,8 B_p \Sigma \delta \quad \dots (17)$$

Z zasad elektrotechniki wiemy, że  $0,8 \frac{B}{\mu} = aw$ , gdzie  $aw$  są to amperozwoje na przeprowadzenie strumienia przy danej indukcji na drodze 1 cm. Ponieważ operujemy strumieniem maksymalnym, więc i indukcje i amperozwoje  $aw$  — będą również maksymalne.

Z równania (17) mamy:

$$I_{\text{max}} = \frac{2aw_s L_s + 2aw_j L_j + 0,8 B_p \Sigma \delta}{w_1} \quad \dots (18)$$

Jeżeli narazie założyć, że zmiana prądu magnesującego jest sinusoidalna, otrzymamy wartość skuteczną:

$$I_{\mu} = \frac{I_{\text{max}}}{\sqrt{2}} = \frac{2aw_s L_s + 2aw_j L_j + 0,8 B_p \Sigma \delta}{\sqrt{2} w_1} \quad \dots (19)$$

We wzorze tym należy przyjąć  $B_p = B_s$ . Amperozwoje  $aw_s$  i  $aw_j$  odczytujemy dla odpowiednich indukcji z krzywej magnesowania dla danego gatunku żelaza. Na rys. 12 mamy taką krzywą dla żelaza z dużą ( $\sim 4\%$ ) domieszką krzemu.

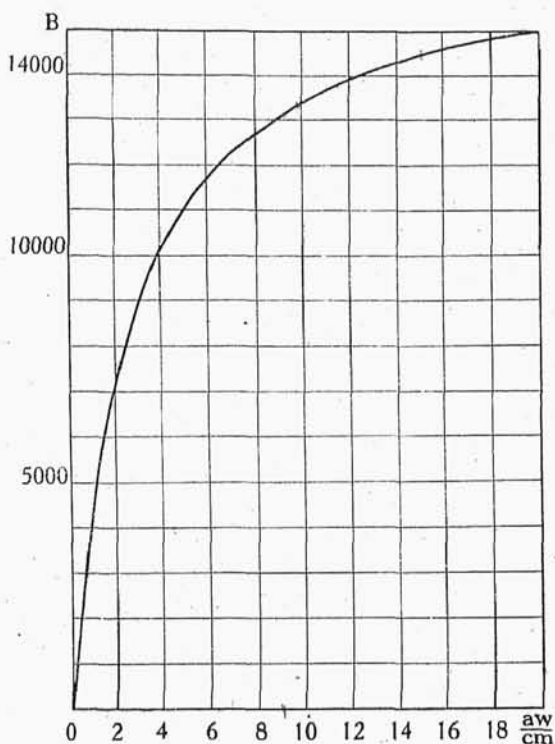
Trzeba zaznaczyć, że wzór (19) z powodu założonej sinusoidalnej zmienności prądu — daje wyniki za duże. W jaki sposób uwzględnić odkształcony charakter prądu — zobaczymy niżej.

Gdy obie składowe watowa i bezwatowa prądu biegu jałowego są znane, możemy ten prąd obliczyć.

$$I_0 = \sqrt{I_{0w}^2 + I_{0p}^2} \quad (20)$$

Bywa on często wyrażany w  $\%$  w stosunku do prądu pierwotnego:

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_1} 100 \% \dots (21)$$



Krzywa magnesowania dla blach transformatorowych o wysokiej zawartości krzemu ( $\sim 4\%$ ).

Rys. 12.

c) Wyższe harmoniczne w prądzie magnesującym. Przy omawianiu prądu biegu jałowego przyjęliśmy narazie, że posiada on zmienność sinusoidalną. W rzeczywistości tak nie jest. Przyczyna tkwi w zjawisku nasycenia magnetycznego żelaza.

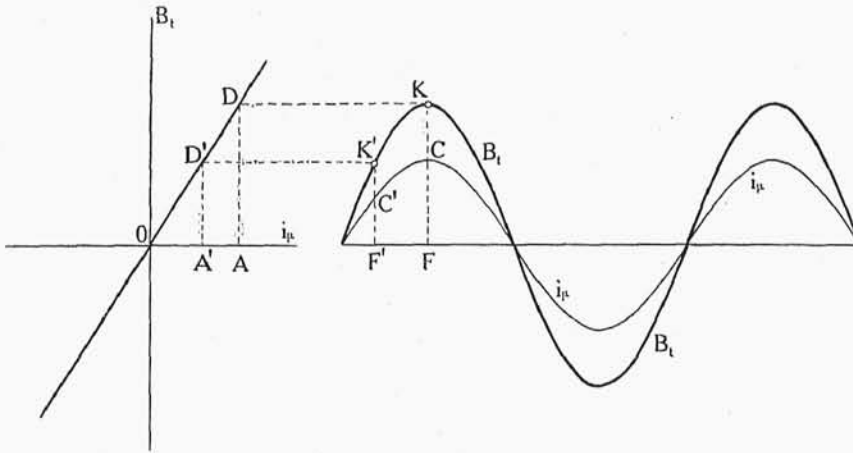
Jeżeli uzwojenie pierwotne załączymy na napięcie sinusoidalnie zmienne, to strumień magnetyczny, przepływający w rdzeniu żelaznym, winien mieć zmienność również sinusoidalną — by wzniecana przezeń SEM o charakterze takim jak strumień — czyli sinusoidalnym, mogła zrównoważyć przyłożone napięcie.

Zobaczymy teraz, jaki przebieg będzie miał w rzeczywistości prąd magnesujący, gdy zmienność strumienia lub indukcji magnetycznej — która jest do strumienia proporcjonalna — będzie sinusoidalna.

Gdyby między indukcją a prądem magnesującym istniała proporcjonalność (czyli, gdyby przenikalność magnetyczna żelaza była

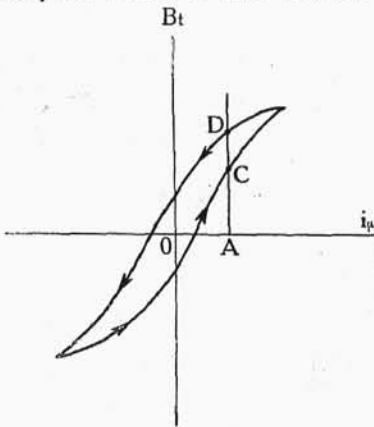
wartością stałą i zjawisko nasycenia magnetycznego nie istniało), przebieg prądu byłby tak samo sinusoidalny jak i strumienia.

Ilustruje nam to rysunek 13.



Rys. 13.

W rzeczywistości — linowej zależności między prądem a indukcją nie mamy — wchodzi tu bowiem w grę nasycenie magnetyczne żelaza, odgrywa pewną rolę również zjawisko histerezy; zależność między indukcją a prądem magnesującym przedstawia krzywa obok, t. zw. pętlica histeretyczna. (rys. 14).



Rys. 14.

Z krzywej widzimy, że tej samej wartości prądu magnesującego  $i_p = OA$  odpowiadają dwie różne wartości indukcji  $AD$  i  $AC$  — w zależności od tego, czy obserwujemy indukcję przy prądzie wzrastającym ( $B_t = AC$ ) czy też malejącym ( $B_t = AD$ ).

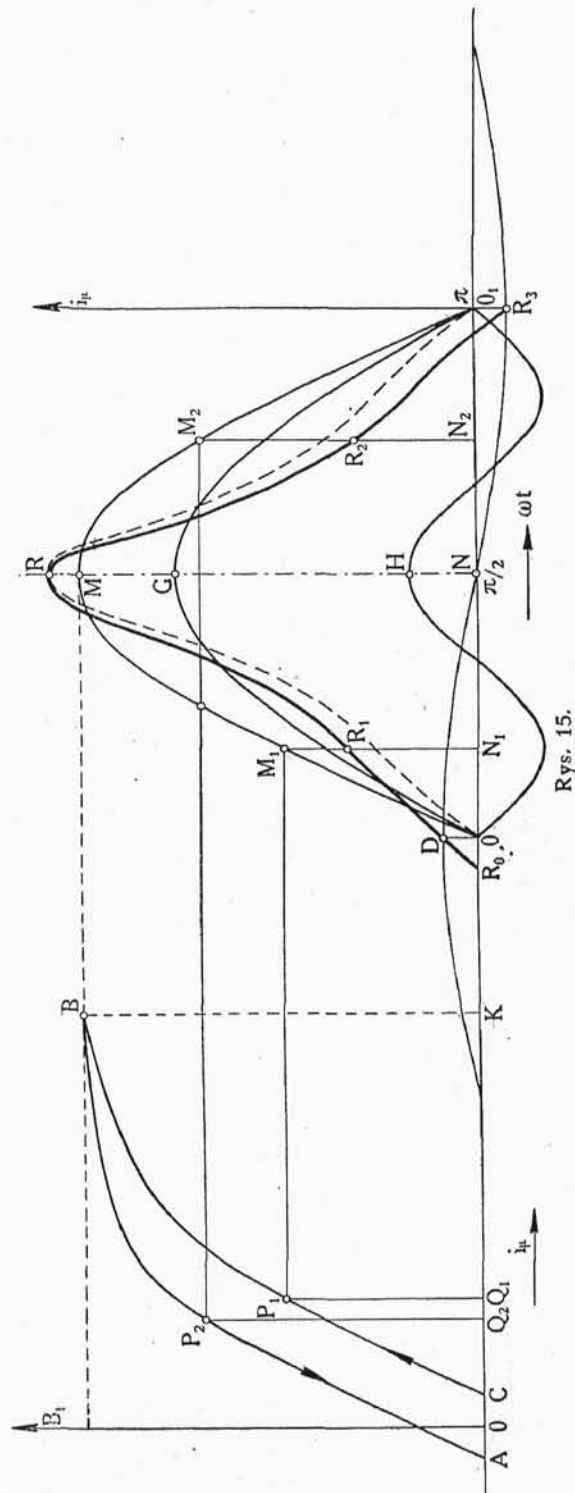
Wychodząc z tej zależności między indukcją a prądem i przyjmując indukcję sinusoidalną, możemy wykreślić wyznaczyć przebieg prądu magnesującego.

Na rysunku 15 widzimy połowę pętlicy histeretycznej  $ABC$  i sinusoidę indukcji  $OMO_1$ , przyczem rysunek jest tak wykonany, że  $BK = MN$ . Indukcji maksymalnej  $MN = KB$  odpowiada prąd magnesujący  $OK$ . Z punktu  $M$  opuszczamy prostopadłą do przecięcia się z osią poziomą w punkcie  $N$ , i odkładamy odcinek  $NR = OK$

— mamy punkt  $R$  — pierwszy punkt krzywej prądu. Podobnie postępujemy z innymi punktami.

Indukcji  $\overline{M_1 N_1} = \overline{P_1 Q_1}$  odpowiada prąd  $\overline{O Q_1}$ . Z punktu  $M_1$  opuszczamy prostą do przecięcia się z osią poziomą w punkcie  $N_1$ , od punktu  $N_1$  odkładamy ku górze odcinek  $\overline{N_1 R_1} = \overline{O Q_1}$  — mamy punkt  $R_1$ .

Indukcji  $\overline{M_2 N_2} = \overline{P_2 Q_2}$  odpowiada prąd  $\overline{O Q_2} = \overline{N_2 R_2}$  — mamy punkt  $R_2$ . Postępując w ten sam sposób dalej, i łącząc wyznaczone p-kty  $R_1, R, R_2$  i t. d. — otrzymamy krzywą zmienności prądu  $R_0 R_1 R R_2 R_3$ . Jak widzimy prąd nie ma przebiegu sinusoidalnego — jest odkształcony, widzimy również, że nie jest w fazie z krzywą indukcji  $OMO_1$  — czyli nie jest całkowicie bezwatuowy — ma składową watową. Tę składową watową możemy wyodrębnić, winna ona być przesunięta w stosunku do sinusoidy indukcji ( $OMO_1$ ) o  $90^\circ$ , czyli przecinać oś poziomą w punkcie  $N$  (gdzie mamy max. indukcję), i osiągnąć max. w punktach  $O$  i  $O_1$  (gdzie

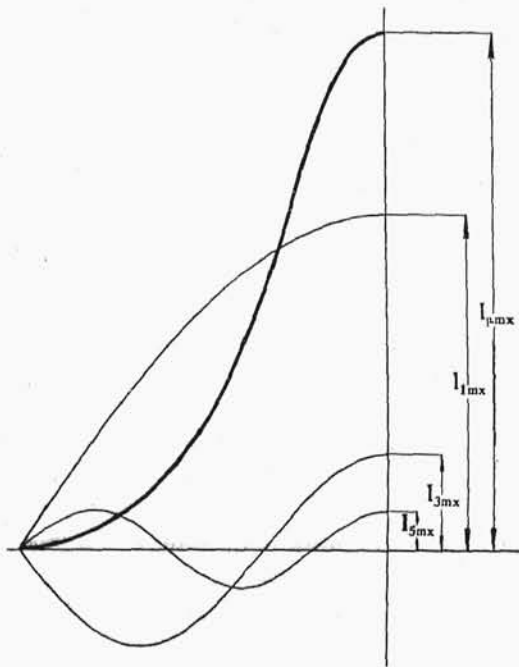






— zawiera szereg harmoniczných, z których trzecia odgrywa najpoważniejszą rolę.

Vidmar przeprowadził analizę odkształconych krzywych prądu magnesującego przy rozmaitych nasyceniach. Wyniki zostały ujęte w wykres (rys. 16). Była brana pod uwagę blacha z dużą domieszką krzemu. Krzywa  $\alpha$  daje nam stosunek amplitudy 3-ciej harmonicznej do amplitudy sinusoidy podstawowej. Krzywa  $\beta$  — to samo dla 5-ej harmonicznej.



Rys. 17.

$$i_p = I_{1mx} \sin \omega t - I_{3mx} \sin 3\omega t + I_{5mx} \sin 5\omega t = \\ = I_{1mx} (\sin \omega t - \alpha \sin 3\omega t + \beta \sin 5\omega t)$$

Wartość skuteczna prądu:

$$I_p = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_p^2 d(\omega t)}$$

Podstawiając do tego równania wyrażenie na prąd (22) i biorąc pod uwagę, że  $\omega = 2\pi f$ , otrzymamy po scałkowaniu:

$$I_p = \frac{I_{1mx}}{\sqrt{2}} \sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2} \quad \dots (23)$$

Poprzednio (patrz wzór 19) wartość skuteczną prądu magnesującego obliczaliśmy, wychodząc z założenia że prąd zmienia się

Mając te krzywe, możemy obliczyć dokładnie wielkość prądu magnesującego.

Na rysunku 17:

$I_{pmax}$  — max. wartość prądu magnesującego.  $I_{1mx}$ ,  $I_{3mx}$ ,  $I_{5mx}$  — amplitudy sinusoidy podstawowej, trzeciej i piątej harmonicznej:

$$I_{3mx} = \alpha I_{1mx}; \quad I_{5mx} = \beta I_{1mx}.$$

Jeżeli poza sinusoidą podstawową wziąć pod uwagę tylko harmoniczne trzecią i piątą, możemy napisać że wartość chwilowa prądu magnesującego:



sinusoidalnie, ze wzoru:

$$I_p = \frac{I_{pmax}}{\sqrt{2}} \quad \dots (24)$$

Jak z rys. 17 widzimy:  $I_{pmax} = I_{1mx} + I_{3mx} + I_{5mx} + \dots$

Ograniczając się do piątej harmonicznej:

$$I_{pmax} = I_{1mx} + I_{3mx} + I_{5mx} = I_{1mx} (1 + \alpha + \beta).$$

Podstawiając to do równania (24), mamy:

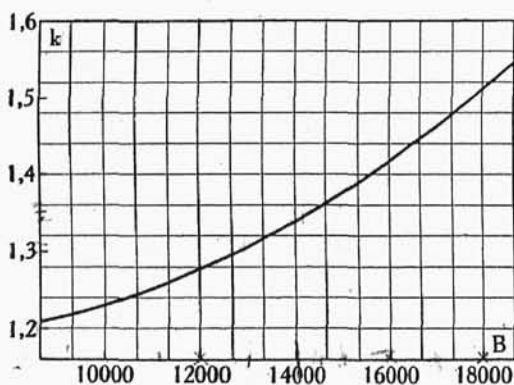
$$I_p = \frac{I_{1mx}}{\sqrt{2}} (1 + \alpha + \beta). \quad \dots (25)$$

Biorąc pod uwagę, że suma  $1 + \alpha + \beta$  jest większa od pierwiastka  $\sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}$ , możemy powiedzieć, że prąd magnesujący, obliczony według wzoru (25), wypadnie większy niż ze wzoru dokładnego (23).

Stosunek wyników według wzorów (25) i (23) oznaczmy przez  $k$ ,

$$k = \frac{1 + \alpha + \beta}{\sqrt{1 + \alpha^2 + \beta^2}} \quad \dots (26)$$

Ten współczynnik został obliczony przez Vidmara dla rozmaitych nasycień (patrz krzywa obok). Przez współczynnik  $k$ , odczytany z krzywej dla danej indukcji, należy podzielić



Rys. 18.

odpowiednie amperozwoje na magnesowanie żelaza (w liczniku wzoru 19) — jak to jasno zobaczymy na przykładzie liczbowym.

d) *Przykład.* Znaleźć prąd biegu jałowego w transformatorze jednofazowym. Średnia długość obwodu magnetycznego—210 cm., z czego w słupach

$2 L_s = 130$  cm., w jarzmach  $2 L_j = 80$  cm.; maksymalna indukcja w słupie  $B_s = 14400$  G, w jarzmie  $B_j = 12100$  G;  $V_1 = 5000$  V.;  $w_1 = 1970$ , całkowity ciężar żelaza  $G_z = 206$  kg., żelazo jest z dużą domieszką krzemu —  $\Delta p_z = 1,3$  W/kg.

Najpierw ustalimy ciężary słupów i jarzm.

Ciężar słupów:  $G_s = 2 L_s S_s \gamma$ . Ciężar jarzm:  $G_j = 2 L_j S_j \gamma$ , gdzie  $2 L_s = 130$  cm.  $2 L_j = 80$  cm.

$S_s$  i  $S_j$  — są to odpowiednio rzeczywiste przekroje żelaza słupa i jarzma,  $\gamma$  — ciężar właściwy żelaza.

$$\frac{G_s}{G_j} = \frac{2 L_s S_s}{2 L_j S_j}$$

Przekroje mają się odwrotnie proporcjonalnie do indukcji

$$\frac{S_s}{S_j} = \frac{B_j}{B_s}$$

podstawiając, otrzymamy:

$$\frac{G_s}{G_j} = \frac{2 L_s B_j}{2 L_j B_s} = \frac{130}{80} \frac{12100}{14400} = 1,36 \dots (a)$$

Z warunków zadania mamy:  $G_s + G_j = 206 \text{ kg} \dots (b)$

Rozwiązując równania (a) i (b), otrzymamy:

$$G_s = 119 \text{ kg.} \quad G_j = 87 \text{ kg.}$$

Możemy teraz policzyć oddzielnie straty w słupach, oddzielnie w jarzmach, korzystając ze wzoru Vidmara:

$$\begin{aligned} \Delta P_{zs} &= \Delta p_z \left( \frac{B_s}{10000} \right)^2 \left( \frac{f}{50} \right)^{1,3} G_s = \\ &= 1,3 \left( \frac{14400}{10000} \right)^2 \left( \frac{50}{50} \right)^{1,3} 119 = 319 \text{ W.} \end{aligned}$$

$$\Delta P_{zj} = 1,3 \left( \frac{12100}{10000} \right)^2 \left( \frac{50}{50} \right)^{1,3} 87 = 165 \text{ W.}$$

$$\text{Razem: } \Delta P_z = \Delta P_{zs} + \Delta P_{zj} = 319 + 165 = 484 \text{ W.}$$

Wynik ten powiększamy o jakie 15%, uwzględniając straty dodatkowe:

$$\Delta P_z = 1,15 \cdot 484 \cong 550 \text{ W.}$$

Składowa watowa prądu biegu jałowego:

$$J_{0w} = \frac{\Delta P_z}{V_1} = \frac{550}{5000} = 0,11 \text{ A.}$$

Przystępujemy teraz do obliczenia składowej bezwatowej.

Przyjmujemy 4 szczeliny powietrzne po 0,004 cm.

Z krzywej magnesowania dla obranego gatunku żelaza (rys. 12):

$$\text{dla } B_s = 14400 \text{ G.} \quad aw_s = 15 \text{ az/cm.}$$

$$B_j = 12100 \text{ G.} \quad aw_j = 7 \text{ „}$$

Uwzględnimy niesinusoidalność prądu magnesującego. Z krzywej na rys. 18: dla  $B_s = 14400$  G  $k_s = 1,35$   
dla  $B_j = 12100$  G  $k_j = 1,28$ .

$$I_\mu = \frac{\frac{1}{1,35} 15 \cdot 130 + \frac{1}{1,28} 7 \cdot 80 + 14400 \cdot 0,004 \cdot 4,28}{\sqrt{2} \cdot 1970} =$$

$$= \frac{1440 + 435 + 185}{\sqrt{2} \cdot 1970} = 0,74 \text{ A.}$$

Prąd biegu jałowego:  $I_0 = \sqrt{0,11^2 + 0,74^2} = 0,748 \text{ A}$

$$\cos \varphi_0 \cong \frac{I_{0w}}{I_0} = \frac{0,11}{0,748} = 0,147 \dots \varphi_0 \sim 81^\circ 30'$$

Jak już wspominaliśmy, prąd biegu jałowego wynosi 5 ÷ 15% prądu normalnego, przyczem przy transformatorach mniejszych jest procentowo większy, gdyż amperozwoje na magnesowanie szczeliny powietrznej, mało zależne od wielkości transformatora, odgrywają tu coraz większą rolę.

Vidmar dowiódł, że istnieje pewna zależność między stratami jałowymi, a prądem biegu jałowego — np. przy indukcji 13000 G prąd biegu jałowego, wyrażony w %, w stosunku do prądu normalnego, musi być 9 ÷ 10 razy większy od strat w żelazie, tak samo wyrażonych w % w stosunku do mocy nominalnej (przy  $\cos \varphi = 1$ ).

Na poparcie swego twierdzenia podaje następującą tabelę z norm czeskich (indukcje, dopuszczane w rdzeniu żelaznym wahają się około 13000 G).

TABELA II

Moc nominalna k VA	Straty jałowe W, (Nap. pierw. $V_1 = 6000$ V)	Straty jałowe w % od mocy nominalnej	Prąd pracy jałowej w %	Stosunek % prądu jałowego do % strat jałow.
5	70	1,4	16	11,4
10	115	1,15	13	11,3
20	190	0,95	10	10,5
30	255	0,85	9	10,58
50	370	0,74	8	10,8
75	490	0,65	7	10,7
100	600	0,6	6	10,0