

Podamy jeszcze wzór na obliczenie całkowitej oporności indukcyjnej (oporn. indukc. zwarcia) transformatora przy zygżaku od strony wtórnej.

Według Richtera:

$$x_z = x_1 + x'_2 = 7,9 \frac{f l_{sr} w_1^2}{b} \left( \delta + \frac{a_1 + a_2}{3} + \frac{\delta'}{3} + \frac{a_2}{36} \right) 10^{-8} \quad \Omega \quad (2)$$

W tym wzorze

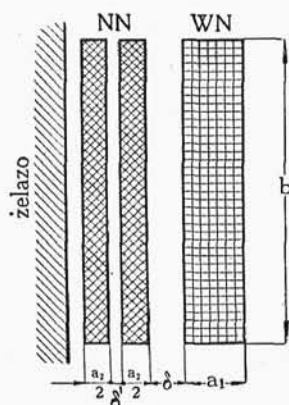
$f$  — oznacza częstotliwość,

$l_{sr}$  — średnią długość zwojów cewek  $NN$  i  $WN$

$w_1$  — liczbę zwojów pierwotnych.

Pozostałe wielkości — jak na rys. 60.

Wymiary w cm.



Rys. 60.

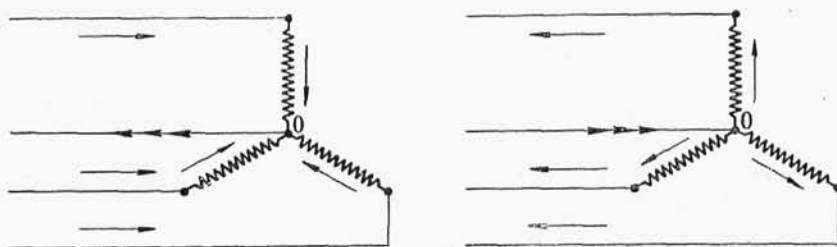
## 5. Trzecia harmoniczna prądu magnesującego w transformatorze trójfazowym.

Z rozpatrzenia prądu magnesującego w transformatorze jednofazowym widzieliśmy, że, o ile strumień ma mieć zmienność sinusoidalną, prąd magnesujący winien zawierać wyższe harmoniczne, przede wszystkim trzecią. W transformatorze jednofazowym to jest możliwe zawsze, w transformatorze trójfazowym w pewnych wypadkach, jak zobaczymy dalej, prąd magnesujący może trzeciej harmonicznej nie posiadać.

Jeżeli mamy do czynienia z 3-ma transformatorami jednofazowymi, połączonymi po stronie pierwotnej w  $\Delta$  z przewodem zerowym (łączącym punkt zerowy transformatorów z punktem zerowym generatora), lub z jednym transformatorem trójfazowym, połączonym również w  $\Delta$  z przewodem zerowym (w obu wypadkach narażenie damy po stronie wtórnej również  $\Delta$ ), to wyższe harmoniczne prądu magnesującego będą swobodnie krążyły w każdym z uzwojeń fazowych pierwotnych i przewodzie zerowym; każda faza będzie zachowywała się niezależnie (jak transform. jednofazowy) i będzie mogła czerpać wszystkie potrzebne jej wyższe harmoniczne — wobec tego strumień i wzniecona przez niego SEM będą sinusoidalne. Jeżeli teraz przewód zerowy usunąć — to prąd sinusoidy pod-

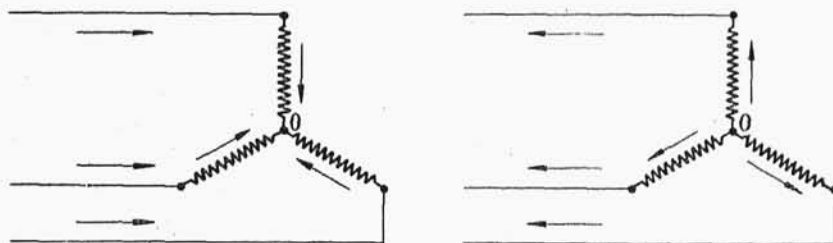
stawowej i harmonicznym piątej, siódmej i innych, niepodzielnych przez 3, będzie normalnie płynął w uzwojeniach fazowych strony pierwotnej transformatora, gdyż zarówno sinusoida podstawowa, jak i wyższe harmoniczne niepodz. przez 3, będą w poszczególnych fazach przesunięte względem siebie o  $120^\circ$  — czyli będą tworzyły normalne układy trójfazowe. Trzeciej harmonicznej natomiast nie będzie, gdyż, jak wiemy, prądy potrójnej częstotliwości we wszystkich 3-ch fazach są ze sobą w fazie, — to znaczy we wszystkich trzech fazach mają w każdej chwili jednakową wielkość i kierunek — albo od punktu zerowego, albo do punktu zerowego.

Na rys. 61 widzimy transformator z przewodem zerowym i z zaznaczeniem dróg prądu trzeciej harmonicznej.



Rys. 61.

Rys. 62 wskazuje, że bez przewodu zerowego, który byłby przewodem powrotnym lub dosyłowym, trzecia harmoniczna prądu nie może być dostarczona do transformatora.



Rys. 62.

Jeżeli prąd magnesujący nie będzie posiadał trzeciej harmonicznej, zmienność strumienia przestanie być sinusoidalna — strumień będzie zawierał trzecią harmoniczną, jak również i SEM fazowa, wzniesiona przez ten strumień. Gdy mamy do czynienia z 3-ma transformatorami jednofazowymi (układ amerykański), strumienie potrójnej częstotliwości w każdym z transformatorów posia-

dają zamknięte drogi żelazne o małej oporności magnetycznej — wpływ zatem ich na odkształcenie SEM fazowych jest duży.

Według obliczeń Vidmara amplituda 3-ciej harmonicznej strumienia wynosi (przy 3-ch jednof. transf.) przy max. indukcjach:

$B = 20000 \text{ G} - 28,2\%$  amplitudy sinusoidy podstawowej.

$B = 14000 \text{ G} - 22,6\%$  " " "

$B = 10000 \text{ G} - 14,8\%$  " " "

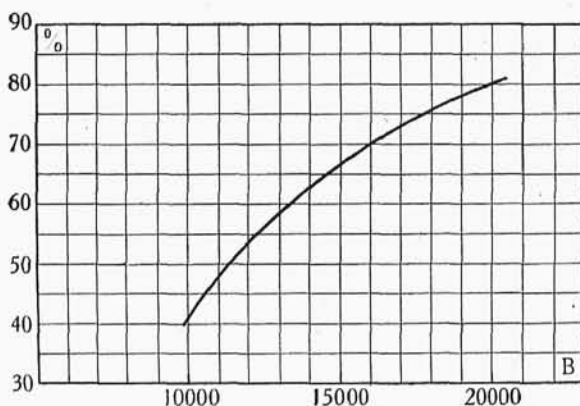
Ponieważ SEM jest proporcjonalna do strumienia i częstotliwości, więc amplituda SEM potrójnej częstotliwości będzie w stosunku do amplitudy SEM sinusoidy podstawowej wynosiła odpowiednio

przy  $B = 20000 \text{ G}$   $3 \times 28,2 = 84,6\%$

przy  $B = 14000 \text{ G}$   $3 \times 22,6 = 67,8\%$

przy  $B = 10000 \text{ G}$   $3 \times 14,8 = 44,4\%$ .

Ogólnie ta zależność jest ujęta w krzywą (rys. 63), dającą



Rys. 63.

amplitudę SEM potrójnej częstotliwości w % od amplitudy sinusoidy podstawowej — przy rozmaitych nasyceniach.

Z krzywej widzimy, że odkształcenie SEM fazowych jest duże — z tego też względu (jak i z innych — o czym

później) gwiazda w układzie amerykańskim (3 transf. jednof.) otrzymuje przewód zerowy od strony pierwotnej.

W transformatorze europejskim — trójsłupowym — strumienie trzeciej harmonicznej (będące ze sobą we wszystkich 3-ch słupach w fazie) mają do zamknięcia się tylko jedną drogę — powietrze (lub olej) (rys. 64), dlatego będą osłabiane i w bardzo małym stopniu zniekształcą SEM fazową\*).

\*) Należy zaznaczyć, że w napięciu skojarzonym, ani w jednym, ani w drugim wypadku, trzeciej harmonicznej nie będzie.

$$v_{1-11} = v_1 - v_{11}; \quad v_1 = V_{1mx} \sin \omega t + V_{3mx} \sin 3\omega t;$$

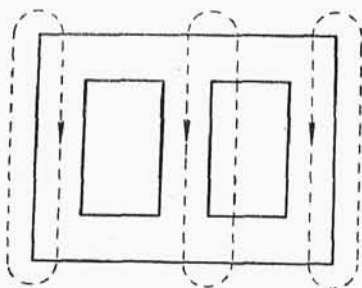
$$v_{11} = V_{1mx} \sin (\omega t - 120^\circ) + V_{3mx} \sin 3\omega t$$

$$v_{1-11} = v_1 - v_{11} = \sqrt{3} \cdot V_{1mx} \sin (\omega t + 30^\circ).$$

Tutaj  $v_1$  i  $v_{11}$  są to wartości chwilowe napięć fazowych.

$V_{1mx}$  i  $V_{3mx}$  — amplitudy sinusoidy podstawowej i 3-ciej harmonicznej.

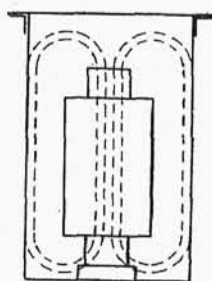
O ile transformator w celu lepszego chłodzenia i izolacji jest umieszczony w pudle żelaznym (rys. 65), wypełnionem olejem, to strumień trzeciej harmonicznej, zamykające się zasadniczo przez olej, pójdą częściowo i przez ścianki pudła — wywołując dodatkowe straty na prądy wirowe w żelazie pudła.



Rys. 64.

Dotychczas rozpatrywaliśmy układ połączeń transformatora  $\wedge/\wedge$ . Jeżeli po stronie pierwotnej dać  $\wedge$  bez przewodu zerowego, a po stronie wtórnej  $\Delta$ , to, jak zobaczymy, mimo braku przewodu zerowego, strumień będzie miał zmienność sinusoidalną. Można to wytłomaczyć w sposób następujący: z powodu

braku trzeciej harmonicznej w prądzie magnesującym, w strumieniu magnetycznym wystąpi trzecia harmoniczna, wzniecając w każdym z uzwojeń fazowych trójkąta SEM-e potrójnej częstotliwości. Te SEM, będąc ze sobą w fazie, dodadzą się do siebie, wywołując w obwodzie trójkąta przepływ prądu potrójnej częstotliwości. Prąd ten wytworzy swój strumień (potrójnej częstotl.) o kierunku przeciwnym do strumienia, który spowodował wzniesienie się SEM potrójnej częstotliwości, i ten strumień niemal w całości zgasi.



Rys. 65.

Zupełnie podobnie jest, gdy uzwojenie pierwotne będzie połączone w  $\Delta$ .

W jakim stopniu strumień 3-ciej harmonicznej, występujący w transformatorze trójślupowym przy połączeniu  $\wedge/\wedge$  bez przewodu zerowego po stronie pierwotnej i zamykający się częściowo przez ścianki pudła olejowego, może zwiększyć straty biegu jałowego, ilustruje przykład przytoczony przez Vidmara.

Transformator o mocy 20 kVA; 50 ~ /sek w połączeniu  $\wedge/\wedge$  umieszczony w pudle, wykazywał przy normalnym napięciu 454 W strat jałowych. Przy przełączeniu strony wtórnej na  $\Delta$ , straty spadły do 296 W. Po usunięciu pudła wynosiły 256 W. Jak obliczenie sprawdzające wykazało, indukcja w słupie transform. wynosiła 15300 G — nasycenie jak dla transformatora za duże — stąd poważny wpływ 3-ciej harmonicznej. Ten przykład wskazuje nam jednocześnie, że połączenie jednego z uzwojeń w  $\Delta$  nie kompensuje całkowicie 3-ciej harmonicznej strumienia — gdyż w naszym przykładzie mimo połączenia uzwojenia wtórnego w  $\Delta$  straty wy-

nosiły 296 W, wtedy gdy po usunięciu pudła tylko 256 W — czyli i przy  $\Delta$  pewne straty w żelazie pudła miały miejsce.

Wypadku przytoczonego nie można uogólniać — tutaj bowiem mamy do czynienia z niewłaściwie zaprojektowanym transformatorem.

## 6. Prąd biegu jałowego w transformatorze trójfazowym.

Obwód magnetyczny, jak wspominaliśmy wyżej, tworzy gwiazdę dwustronną (rys. 49). Fazy skrajne, mając większą oporność magnetyczną (dłuższa droga), będą potrzebowały większego prądu magnesującego.

Podobnie jak przy transformatorze jednofazowym, prąd maksymalny w fazach skrajnych wynosi:

$$I_{\text{max skr}} = \frac{a w_s L_s + a w_j L_j + 1,6 \delta B_p}{w_1}$$

zaś w fazie środkowej

$$I_{\text{m sr}} = \frac{a w_s L_s + 1,6 \delta B_p}{w_1}$$

$L_s$  i  $L_j$  — długości słupa i jarzma w cm.

$a w_s$  i  $a w_j$  — amperozwoje odczytane z krzywych magnesowania dla max. indukcji w słupie i jarzmie.

$w_1$  — liczba zwojów pierwotnych;  $\delta$  — szczelina powietrzna (patrz I-3-b). Przyjmujemy, że w każdej fazie strumień ma do przebycia dwie szczeliny. Przyjąć należy  $B_p = B_s$ .

Przy założeniu sinusoidalnej zmienności prądu magnesującego, otrzymalibyśmy wartości skuteczne prądu:

$$I_{\text{skr}} = \frac{a w_s L_s + a w_j L_j + 1,6 \delta B_p}{\sqrt{2} w_1} \quad \dots (3)$$

$$I_{\text{sr}} = \frac{a w_s L_s + 1,6 \delta B_p}{\sqrt{2} w_1} \quad \dots (4)$$

Trzeba jednakże uwzględnić odkształcony charakter krzywej prądu magnesującego. Gdybyśmy po stronie pierwotnej mieli gwiazdę z przewodem zerowym, postąpić by należało tak, jak przy transformatorze jednofazowym, czyli dla indukcji w słupie i jarzmie odczytać z krzywej, na rys. 18 współczynniki  $k$  i przez nie podzielić odpowiednio amperozwoje na magnesowanie słupa i jarzma w liczniku ułamków (3) i (4).

Jeżeli gwiazda od strony pierwotnej przewodu zerowego nie posiada (z czym się właściwie zawsze spotykamy w Europie) lub

strona pierwotna jest połączona w trójkąt, wtedy prąd magnesujący nie będzie miał trzeciej harmonicznej, jego wartość skuteczna będzie niższa. Uwzględniamy to, wprowadzając współczynnik

$$K = \frac{1 + \alpha + \beta}{\sqrt{1 + \beta^2}} \quad \dots (5)$$

Otrzymać ten współczynnik możemy w sposób podobny, jak współczynnik  $k$  przy transformatorze jednofazowym, biorąc pod uwagę brak w prądzie magnesującym trzeciej harmonicznej.

Ze współczynnikiem  $K$  postępujemy tak samo jak z  $k$  — czyli dzielimy przez niego odpowiednio amperozwoje.

Współczynniki  $\alpha$  i  $\beta$  odczytujemy z krzywej na rys. 16.

W ten sposób obliczamy składową bezwątową prądu pracy jałowej. Składowa wåtowa jest b. nieznaczna. Zakładając, że na każdą z faz przypadają jednakowe straty w żelazie, otrzymamy składową wåtową średnio:

$$I_{0w} = \frac{\Delta P_z}{3 V_f}, \quad \dots (6)$$

gdzie  $\Delta P_z$  — straty w żelazie transformatora trójfazowego;

$V_f$  — napięcie fazowe pierwotne.

Prąd biegu jałowego faz skrajnych:  $I_{0skr} = \sqrt{I_{1skr}^2 + I_{0w}^2}$ ,

zaś fazy środkowej:  $I_{0sr} = \sqrt{I_{1sr}^2 + I_{0w}^2}$ .

Jeżeli mówimy wogóle o prądzie biegu jałowego transformatora trójfazowego — rozumiemy przez to prąd średni:

$$I_0 = \frac{2 I_{0skr} + I_{0sr}}{3};$$

## 7. Układy połączeń.

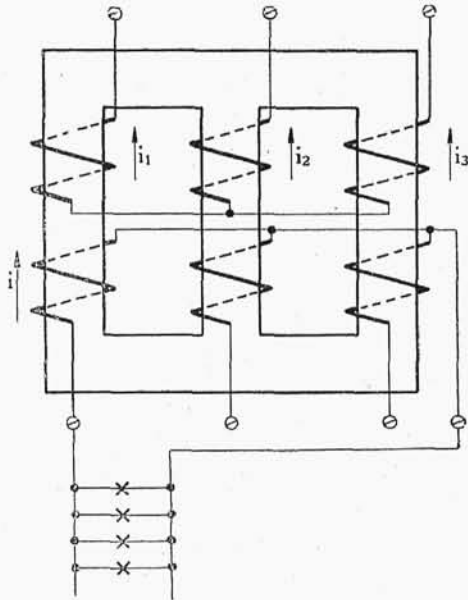
Przejdziemy teraz do omówienia właściwości poszczególnych układów połączeń.

a) *Gwiazda* — *gwiazda*. Połączenie najprostsze i najtańsze. W porównaniu z  $\Delta$  na tę samą moc i to samo napięcie międzyfazowe uzwojenie fazy posiada  $\sqrt{3}$  razy mniej zwojów o  $\sqrt{3}$  razy większym przekroju, mniej jest izolacji, mniejsza ilość cewek, na które rozbijamy zazwyczaj uzwojenie wysok. napięcia, mniej szczelin międzycewkowych, obniżających współczynnik wypełnienia okna. Zaznaczyć pozatem należy, że cena 1 kg. drutu okrągłego, który bywa używany zazwyczaj przy transformatorach mniejszych i średnich mocy do budowy uzwojenia wysokiego napięcia, jest przy

małych średnich wyższa niż przy dużych — ze względu na większe trudności, związane z ciągnięciem i izolacją drutu. Jest to jeszcze jedna przyczyna, dla której połączenie w  $\Delta$  wypada drożej.

Układ  $\Delta/\Delta$  bez przewodu zerowego od strony pierwotnej (a tak zwykle bywa w instalacjach europejskich) nie nadaje się zasadniczo do obciążeń niesymetrycznych (na przykład dla celów oświetleniowych). Wyjaśnić to może nam następujący prosty rachunek,

Mamy transformator trójfazowy w układzie  $\Delta/\Delta$  bez przewodu zerowego od strony pierwotnej. Aby uniknąć konieczności sprowadzania uzwojenia wtórnego do pierwotnego, założymy odrazu, że przekładnia naszego transformatora wynosi  $\vartheta = 1:1$ , czyli, że w każdym z uzwojeń fazowych zarówno strony pierwotnej, jak i wtórnej, mamy tę samą liczbę zwojów — oznaczmy ją przez  $w$ .



Rys. 66.

Po stronie wtórnej mamy obciążoną jedną fazę — wartość chwilową prądu oznaczmy przez  $i$ . Wartości chwilowe prądu w uzwojeniach fazowych po stronie pierwotnej oznaczamy odpowiednio przez  $i_1, i_2, i_3$ . Kierunki prądów przyjmujemy jak na rysunku. Właściwe kierunki prądu wynikną z rachunku.

Dla prądów strony pierwotnej mamy zależność:

$$i_1 + i_2 + i_3 = 0 \quad \dots (7)$$

Dla każdego z 3 zamkniętych obwodów magnetycznych, które tworzą parami słupy naszego transformatora, możemy napisać równania równowagi magnetycznej — czyli, że w każdym obwodzie zamkniętym suma sił magnetomotorycznych w nim działających, z pominięciem prądów magnesujących, równa się zero.

A więc słupy I—II:  $i_1 w - i_2 w + i w = 0$ .

Po skróceniu przez  $w$ :  $i_1 - i_2 + i = 0 \quad \dots (8)$

Słupy I—III:  $i_1 w - i_3 w + i w = 0 \quad i_1 - i_3 + i = 0$



$$\text{Słupy II—III: } i_2 w - i_3 w = 0, \text{ czyli } i_3 = i_2 \quad \dots (9)$$

Wyznaczając z równania (7) prąd  $i_1$  i mając na uwadze zależność (9), napiszemy:

$$i_1 = -i_2 - i_3 = -2i_2 \quad \dots (10)$$

Podstawiając ten wynik do równania (8)  $-2i_2 - i_2 + i = 0$ , otrzymamy

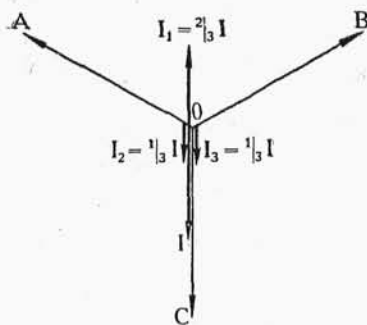
$$i_2 = \frac{1}{3} i$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{Ponieważ } i_3 = i_2, \text{ więc } i_3 = i_2 = \frac{1}{3} i \\ \text{Prąd } i_1 \quad i_1 = -2i_2 = -\frac{2}{3} i \end{array} \right\} \quad \dots (11)$$

Równania (11) dają nam zależność między wartościami chwilowymi — przechodząc do wartości skutecznych, możemy napisać (wartości skuteczne są oznaczone dużymi literami):

$$I_2 = I_3 = \frac{1}{3} I \quad I_1 = -\frac{2}{3} I \quad \dots (12)$$

Z tych równań możemy wyciągnąć następujące wnioski: prądy w uzwojeniach pierwotnych fazy drugiej i trzeciej są w fazie ze sobą i z prądem  $I$ , są sobie równe i wynoszą  $\frac{1}{3}$  prądu  $I$  płynącego w fazie wtórnie obciążonej. Prąd w uzwojeniu fazy pierwszej po stronie pierwotnej wynosi  $\frac{2}{3}$  prądu tej samej fazy po stronie wtórnej i jest przesunięty w stosunku do niego o  $180^\circ$  (znak —).



Rys. 67.

Najlepiej nasze wyniki dadzą się przedstawić na wykresie wektorowym (rys. 67). Mamy tu gwiazdę napięć strony wtórnej ( $OABC$ ). Obciążoną jest faza  $OC$  (prąd  $I$ ).

Prąd  $I_1$  jest przesunięty w stosunku do prądu  $I$  o  $180^\circ$ . Prądy  $I_2$  i  $I_3$  są z prądem  $I$  w fazie. Na słupie fazy pierwszej ( $OC$ ) prąd płynie w obu uzwojeniach — lecz większy we wtórnie, przeważają amperozwoje uzwojenia wtórnego; amperozwoje wypadko-



we wynoszą:

$$I\omega - I_1\omega = I\omega - \frac{2}{3}I\omega = \frac{1}{3}I\omega.$$

Wektor tej różnicy amperozwojów na słupie fazy pierwszej (OC) jest skierowany ku dołowi. Na słupach faz drugiej i trzeciej prądy płyną tylko w uzwojeniach pierwotnych — one zatem stwarzają wyłącznie amperozwoje tych faz, równe w każdej

$$I_2\omega = I_3\omega = \frac{1}{3}I\omega.$$

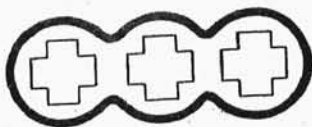
Wektory tych amperozwojów są skierowane (rys. 67) również ku dołowi. Otrzymujemy bardzo ciekawy obraz: amperozwoje czynne każdego ze słupów są sobie równe i są ze sobą w fazie. Strumienie przez te amperozwoje wytwarzane również będą równe i będą ze sobą w każdym ze słupów w fazie: będą zawsze skierowane jednocześnie bądź ku dołowi, bądź ku górze. Jedyną drogą do zamknięcia się mają te strumienie jednofazowe przez powietrze (wzgl. olej) i ewentualnie ścianki pudła olejowego. W ostatnim wypadku możliwe są dodatkowe straty na prądy wirowe w ściankach pudła. Te straty nie są jednakże główną przyczyną, uniemożliwiającą pracę w naszym układzie przy obciążeniu niesymetrycznym. Strumienie jednofazowe, zamykające się przez powietrze, wzniecają w uzwojeniach transformatora pewne SEM dodatkowe, będące ze sobą we wszystkich uzwojeniach w fazie. Te SEM dodatkowe, dodając się do napięć fazowych strony wtórnej, spowodują zniekształcenie gwiazdy napięć po stronie wtórnej: w dwóch fazach będziemy mieli nadmierny spadek napięcia, w jednej — wzrost.

Pewną nieznaczną asymetrię obciążenia nasz układ dopuszcza; prąd w przewodzie zerowym (po stronie wtórnej) jednakże nie może przekroczyć 10% prądu w przewodach skrajnych.

Jeżeli mamy trzy jednofazowe transformatory, połączone w układ  $\Delta/\Delta$  bez przewodu zerowego od strony pierwotnej, to rozpatrywane przez nas strumienie dodatkowe mają drogi zamknięte w obwodach żelaznych każdego z transformatorów i z tego powodu nie ulegną osłabieniu. Zniekształcenie gwiazdy napięć po stronie wtórnej, już przy małych asymetriach obciążenia, będzie tak znaczne, że gwiazda pierwotna bez przewodu zerowego nie może być dopuszczona.

Ostatecznie należy stwierdzić, że główną przyczyną, uniemożliwiającą pracę transformatora w naszym układzie przy obciążeniach niesymetrycznych, stanowią strumienie dodatkowe, występujące w każdym ze słupów i będące ze sobą w fazie. Zniszczenie ich rozwiązałoby zagadnienie i pozwoliłoby na dowolne obciążenie

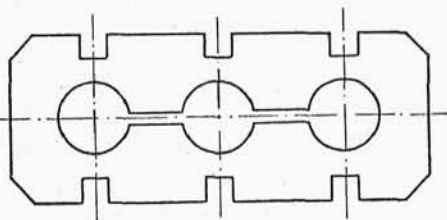
transformatora. Możemy to uskutecznić, zaopatrując transformator w zwój zwarty (o odpowiednio dobranym przekroju), obejmujący jednocześnie wszystkie 3 słupy, jak na rys. 68. Strumienie jedno-



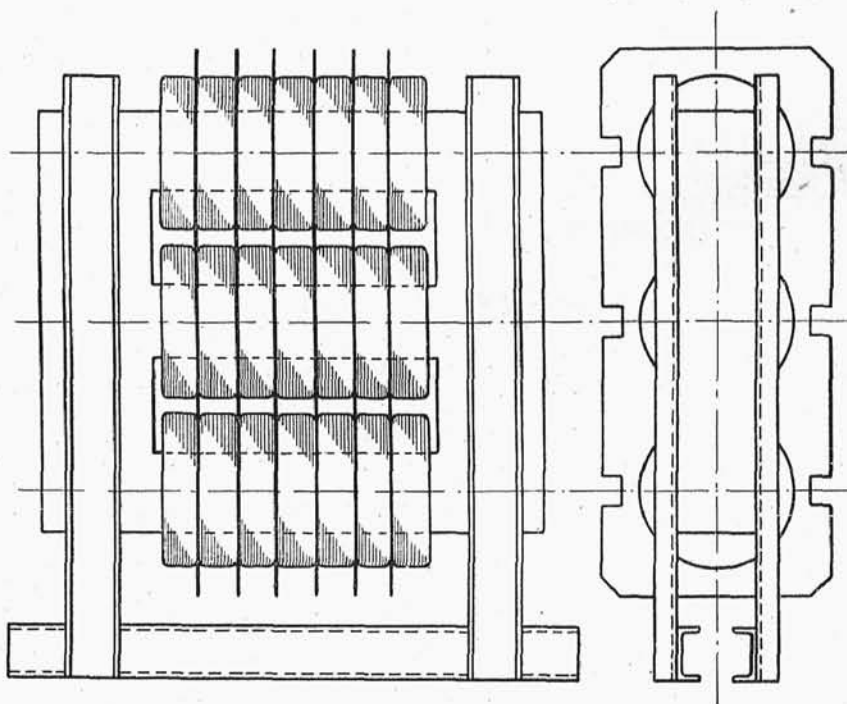
Rys. 68.

fazowe tych słupów wznicią w naszym zwoju SEM-e będące ze sobą w fazie i dodające się do siebie algebraicznie; one spowodują przepływ w zwartym zwoju prądu, który wytworzy swój strumień, przeciwdziałający i gaszący szkodliwe strumienie jednofazowe. SEM-e wzniesione w zwartym zwoju przez strumienie robocze każdego ze słupów (przesunięte w stosunku do siebie o  $120^\circ$ ) dadzą w sumie zero i żadnego prądu nie wywołają.

Zamiast zwoju zwanego można dać blachę odpowiednio wyciętą (rys. 69). Transformator suchy z takimi blachami, które jednocześnie znakomicie przyczyniają się do odprowadzania ciepła, zbudował F. Pichler (rys. 70). Transformator ma uzwojenie krążkowe, między krążkami mieszczą się blachy. Transformator Pichlera nadaje się do obciążeń niesymetrycznych, posia-



Rys. 69.

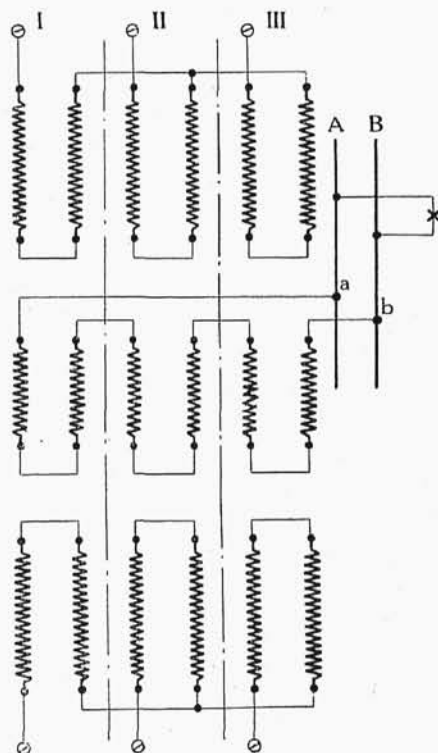


Rys. 70.

da dobre warunki chłodzenia, jednakże ma stosunkowo nieduże zastosowanie z tych samych powodów, jak i wszystkie transformatory suche: gorsze warunki izolacji oraz mniejsza pewność ruchu.

Jak się zachowuje nasz układ pod względem trzeciej harmonicznej — już mówiliśmy — prąd magnesujący trzeciej harmonicznej pobierać z sieci nie może, wobec czego trzecia harmoniczna wkradnie się do strumienia. Rola jej w transformatrach trójslupowych jest nieznaczna. Przy trzech transformatrach jednofazowych, o ile strona pierwotna nie posiada przewodu zerowego, z trzecią harmoniczną strumienia, która ma zamkniętą drogę w żelazie o małej oporności magnetycznej, należałoby się liczyć. Przy tym sposobie transformowania, jak wspomnieliśmy, gwiazdy bez przewodu zerowego po stronie pierwotnej naogół się nie daje. Możliwe jest tutaj jednakże ciekawe połączenie, gdy trzecia harmoniczna strumienia będzie wykorzystana — mianowicie przy transformatrach przeznaczonych do zasilania silników trakcyjnych, budowanych dla częstotliwości od 16 do 25  $\sim$ /sek. Każdy z trzech

transformatrów, (rys. 71) posiada 3 uzwojenia — 2 normalne i jedno pomocnicze. Uzwojenia normalne ze strony pierwotnej i wtórnej są powiązane w gwiazdy. Uzwojenia pomocnicze wszystkich 3-ch transformatrów są połączone ze sobą w szereg, skrajne końce *a* i *b* są wyprowadzone na szyny *A* i *B*. Uzwojenia pomocnicze służą właśnie do wykorzystania trzeciej harmonicznej. Ponieważ strumienie potrójnej częstotliwości są ze sobą we wszystkich transformatrach w fazie, więc i SEM, indukowane przez nie w uzwojeniach pomocniczych są ze sobą w fazie, dodając się arytmetycznie do siebie. Na szynach *A—B* panuje napięcie o częstotliwości potrójnej w stosunku do częstotliwości zasadniczej transformatrów czyli, jeżeli ta ostatnia wynosiła np. 16  $\frac{2}{3}$   $\sim$ /sek, to na szynach mamy napięcie o częstotliwości  $3 \times 16 \frac{2}{3} = 50 \sim$ /sek. Prąd o takiej częstotliwości dobrze



Rys. 71.

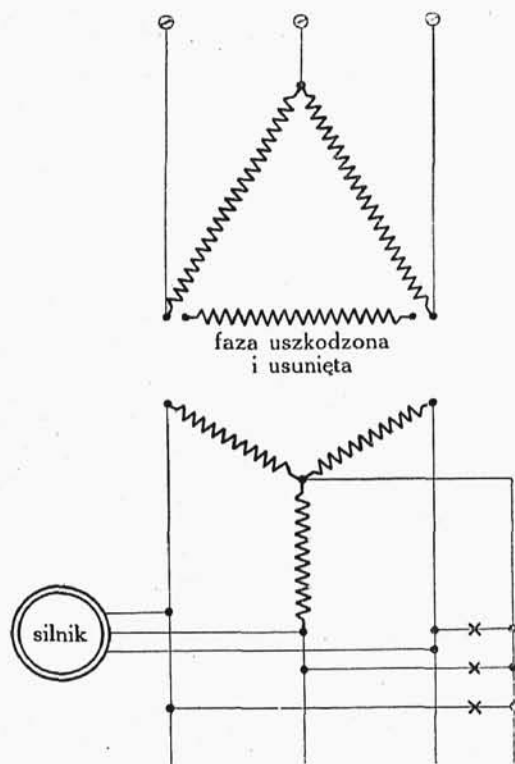
się nadaje do oświetlenia (przy częstotliwości  $16\frac{2}{3}\sim/\text{sek.}$  mamy miganie żarówek). W ten sposób nasz transformator daje prąd o częstotliwości  $16\frac{2}{3}\sim/\text{sek.}$  dla celów trakcyjnych, oraz zasila pewną liczbę żarówek prądem o częstotliwości  $50\sim/\text{sek.}$

b) *Układ trójkąt — gwiazda.* Układ dobrze się nadaje dla obciążeń niesymetrycznych. Rachunek przez nas wyżej przerebiony dla układu  $\wedge/\wedge$  i tutaj oczywiście obowiązuje, lecz powstałe naskutek asymetrii obciążenia strumienie jednofazowe będą zgazzone dzięki obecności zamkniętego uzwojenia, jakim jest trójkąt. Z tego punktu widzenia zatem, trójkąt odgrywa taką samą rolę, jak np blacha (rys. 69) w transformatorze Pichlera.

W idealnym wypadku całkowitego stłumienia strumieni jednofazowych, będziemy mieli po stronie pierwotnej prąd tylko w tej fazie, która jest obciążona po stronie wtórnej.

Układ rozpatrywany, zwłaszcza przy mniejszych mocach, jest nieco droższy od układu  $\wedge/\wedge$  (na to samo napięcie międzyczacisko- $\sim$  i tę samą moc) z powodów już omawianych.

Dużym plusem naszego układu jest możliwość pracy w t. zw. układzie  $\textcircled{V}$ . Jeżeli po stronie wysokiego napięcia, połączonej w  $\Delta$ ,



Rys. 72.

jedna z faz z jakiegokolwiek bądź przyczyny zostanie uszkodzona, to po usunięciu tej fazy, transformator może pracować w dal- szym ciągu (przy zmniejszo- nej mocy). W międzyczasie uzwojenie uszkodzone jest naprawione, względnie wy- konane na nowo. Ostatecz- nie przerwa w ruchu trans- formatora trwa tylko tyle czasu, ile trzeba na usunię- cie chorej fazy, oraz później na założenie naprawionej. Schematycznie pracę w uk- ładzie  $\textcircled{V}$  (inaczej otwar- tego trójkąta) przedstawia rysunek 72. Przy układzie  $\textcircled{V}$  w trójkącie napięcie strony pierwotnej brakuje jedno- go boku (trójkąt otwarty), lecz trójkąt, mimo to, po- siada swoje trzy wier-

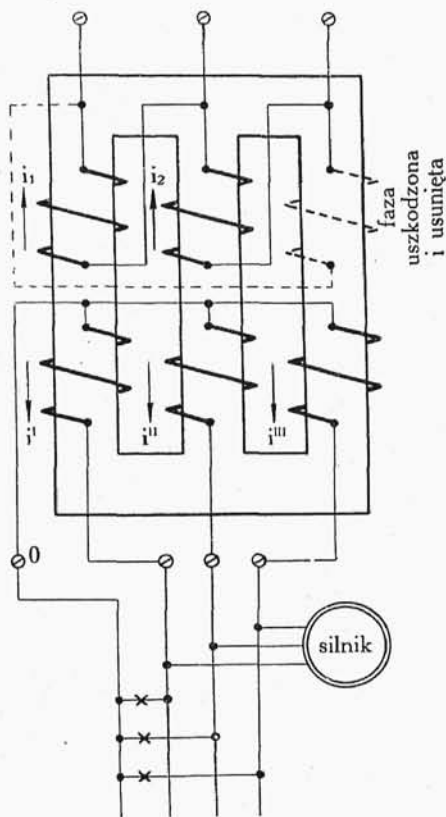
chołki, a ponieważ połączenie uzwojenia pierwotnego z siecią wykonuje się właśnie w tych punktach wierzchołkowych, więc praca transformatora jest możliwa. Obciążenie transformatora oczywiście należy odpowiednio zmniejszyć.

Postaramy się teraz ustalić do jakiej wysokości można obciążyć transformator przy układzie  $V$ —bez szkody dla jego uzwojeń.

Przyjmijmy, że po stronie wtórnej mamy obciążenie symetryczne (rys. 73), w przewodzie zerowym żaden prąd nie płynie — wartości chwilowe prądów wtórnych w poszczególnych fazach oznaczmy przez  $i^I$   $i^{II}$   $i^{III}$ . Kierunki prądów przyjmijmy jak na rys. 73. Właściwe kierunki prądu wynikną z rachunku.

Wartości chwilowe prądu w dwóch fazach zdrowych po stronie pierwotnej oznaczmy przez  $i_1$   $i_2$ .

Założymy, że przekładnia napięć fazowych wynosi jedność — czyli że uzwojenia fazowe strony pierwotnej i wtórnej posiadają jednakową liczbę zwojów  $w$ . Podobnie, jak przy rozważaniu układu  $\lambda/\lambda$ , (patrz II, 7-a) napiszemy równania równowagi magnetycznej (w każdym obwodzie żelaznym zamkniętym suma amperozwojów w nim działających — z pominięciem prądów magnesujących, równa się zero).



Rys. 73.

$$\begin{aligned} i_1 w - i_2 w + i^{II} w - i^I w &= 0 \\ i_1 w + i^{III} w - i^I w &= 0 \\ i_2 w + i^{III} w - i^{II} w &= 0 \end{aligned}$$

Po skróceniu równań przez  $w$ , otrzymamy:

$$i_1 - i_2 + i^{II} - i^I = 0 \quad \dots (11)$$

$$i_1 + i^{\text{III}} - i^{\text{I}} = 0 \quad \dots (12)$$

$$i_2 + i^{\text{III}} - i^{\text{II}} = 0 \quad \dots (13)$$

Z tych równań możemy wyznaczyć wartości chwilowe  $i_1$  oraz  $i_2$ :

$$\text{Z równania (12)} \quad i_1 = i^{\text{I}} - i^{\text{III}} \quad \dots (14)$$

$$\text{Z równania (13)} \quad i_2 = i^{\text{II}} - i^{\text{III}} \quad \dots (15)$$

Poprzednio już założyliśmy, że po stronie wtórnej mamy obciążenie symetryczne. Wobec tego możemy napisać:

$$i^{\text{I}} = I_{mx} \sin \omega t; \quad i^{\text{II}} = I_{mx} \sin (\omega t - 120^\circ); \quad i^{\text{III}} = I_{mx} \sin (\omega t - 240^\circ),$$

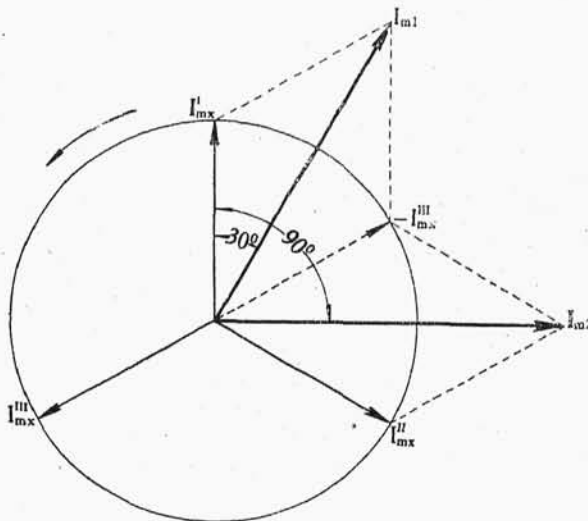
gdzie  $I_{mx}$  oznacza wartość maksymalną prądu wtórnego.

Korzystając z tych zależności i podstawiając je do równania (14), otrzymamy:

$$i_1 = i^{\text{I}} - i^{\text{III}} = I_{mx} [\sin \omega t - \sin (\omega t - 240^\circ)] = \sqrt{3} I_{mx} \sin (\omega t - 30^\circ)$$

Analogicznie, podstawiając wartości na  $i^{\text{II}}$  i  $i^{\text{III}}$  do równania (15) i przekształcając, otrzymamy:

$$i_2 = i^{\text{II}} - i^{\text{III}} = \sqrt{3} I_{mx} \sin (\omega t - 90^\circ)$$



Rys. 74.

Ilustrację naszego rachunku daje wykres wektorowy (rys. 74), wykonany dla wartości maksymalnych.

$$I_{mx}^I = I_{mx}^{II} = I_{mx}^{III} = I_{mx}$$

Zarówno rachunek, jak i wykres pozwalają na wyciągnięcie następujących wniosków:

1) Maksymalne wartości prądu w dwóch zdrowych fazach po stronie pierwotnej są jednakowe,  $\sqrt{3}$  razy większe od maksymalnej wartości prądu w uzwojeniach wtórnych:

$$I_{m1} = I_{m2} = \sqrt{3} I_{mx}$$

Ponieważ mamy transformator o przekładni fazowej 1:1, więc przy normalnem projektowaniu przekroje uzwojeń pierwotnego i wtórnego są jednakowe. Stąd wynika, że, jeżeli strona wtórna była obciążona prądem nominalnym, dozwolonym ze względu na grzanie się uzwojenia, to prąd strony pierwotnej ( $\sqrt{3}$  razy większy od prądu strony wtórnej) będzie nadmierny i może uszkodzić izolację uzwojenia pierwotnego. By tego uniknąć, należy prąd obciążenia wtórnego obniżyć i to tak, by maksymalny prąd strony pierwotnej nie przekroczył  $I_{mx}$ . Innymi słowy prąd wtórny należy obniżyć  $\sqrt{3}$  razy — czyli przy układzie  $V$  możemy dopuścić tylko  $\frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,58$  obciążenia oznaczonego na tabliczce transformatora.

2) Przesunięcie fazowe między prądami po stronie pierwotnej wynosi  $60^\circ$ , zamiast wymaganych  $120^\circ$  — transformator w układzie  $V$  stanowi dla sieci — nawet przy symetrycznem obciążeniu strony wtórnej — obciążenie b. nieprzyjemne.

Mimo tych wad, zdolność układu  $\Delta/\lambda$  do pracy przy jednej uszkodzonej i usuniętej fazie należy uważać za cenną właściwość tego układu, gdyż w wypadku uszkodzenia jednej fazy wysokiego napięcia, czyni przerwę w pracy transformatora znacznie krótszą.

Dla celów oświetleniowych, używa się transformatorów w tym układzie, poczynając od jakichś 200 ÷ 400 kVA. (poniżej tej mocy najczęściej używa się  $\lambda/\lambda$ ), przyczem od strony wysokiego napięcia mamy  $\Delta$ , gwiazdę zaś po stronie wtórnej zaopatrujemy w przewód zerowy.

Układ  $\Delta/\lambda$  spotyka się często przy transformatorach podnoszących napięcie (np. dla celów przesyłania energii na dalekie odległości), przyczem  $\Delta$  dajemy po stronie niższego napięcia.

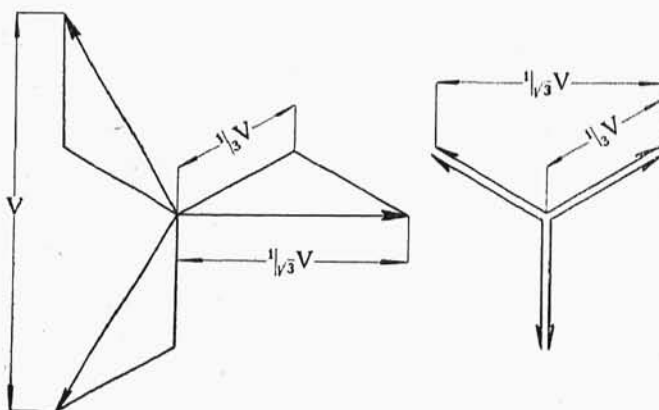
c) *Gwiazda-zygzak* jest narówni z  $\Delta/\lambda$  typowem połączeniem dla obciążeń niesymetrycznych — oświetleniowych. Oba układy, zarówno  $\Delta/\lambda$  jak  $\lambda/\lambda$  są przy tej samej mocy i tych samych napięciach międzyczaskowych nieco droższe od układu  $\lambda/\lambda$  układ  $\Delta/\lambda$  — ze względu na uzwojenie wysokiego napięcia (cieńszy drut, więcej izolacji, gorsze wyzyskanie okna); układ  $\lambda/\lambda$  — ze względu na uzwo-



jenie niskiego napięcia, gdyż wymaga o 15% więcej zwojów. Z tych dwóch układów dla transformatorów mniejszych mocy (do  $200 \div 400$  kVA) okazuje się naogół bardziej korzystnym połączenie  $\Delta/\Delta$ ; dla większych —  $\Delta/\Delta$ , gdyż im transformator jest większy, tem wykonanie trójkąta po stronie wysokiego napięcia coraz mniej daje się we znaki.

Należy zaznaczyć, że zygzak o napięciu skojarzonym  $V$  (np. 380 V.) może być przełączony na  $\Delta$  o napięciu skojarzonym  $\frac{V}{\sqrt{3}}$  ( $\frac{380}{\sqrt{3}} = 220$  V.)

Należy w tym celu uskutecznić połączenia równoległe połówek uzwojeń, osadzonych na tych samych słupach (np.  $a-b$  i  $c-d$  na rys. 55), a otrzymane grupy równoległe związać w gwiazdę. Omawiane przekształcenie jest przedstawione wektorowo na rys. 75.



Rys. 75.

Z tej możliwości w praktyce niekiedy się korzysta w ten sposób, że fabryka ma na składzie jeden typ uzwojenia niskiego napięcia i łączy je bądź w  $\Delta$  bądź w  $\Delta$  zależnie od zapotrzebowania.

d) *Trójkąt — trójkąt*. Układ ten jest stosowany w wypadkach wyjątkowych.

Zalety: 1) dopuszcza wszelkie asymetrie obciążenia; 2) pozwala na dwustronny układ  $V$ , czyli na całkowite usunięcie uzwojeń pierwotnego i wtórnego z jednego ze słupów.

Wady: 1) jest nieelastyczny w eksploatacji, pozwalając na korzystanie tylko z jednego napięcia; 2) jest stosunkowo drogi.