

ROZDZIAŁ II.

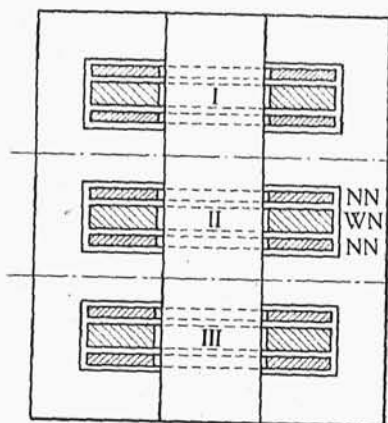
TRANSFORMOWANIE PRĄDU TRÓJFAZOWEGO

może się odbywać: 1) przez zastosowanie 3-ch jednakowych transformatorów jednofazowych; 2) przez zastosowanie jednego transformatora trójfazowego właściwego.

W Europie spotykamy się ze sposobem drugim, w Ameryce często jest używany pierwszy. Przy tej samej mocy i napięciu międzyczasiskowym transformator trójfazowy jest tańszy niż trzy jednofazowe. Droższą natomiast jest rezerwa, wtedy bowiem, gdy w 2-gim przypadku rezerwę musi stanowić transformator trójfazowy, w przypadku 1-szym wystarczy jeden jednofazowy.

1. Transformator trójfazowy.

W zależności od budowy obwodu magnetycznego dzielimy transformatory trójfazowe na płaszczowe i rdzeniowe. Na rys. 46 widzimy schematyczne przedstawienie transformatora płaszczowego.



Rys. 46.

Można go rozpatrywać, jako 3 transform. płaszczowe jednofazowe (rys. 4), złączone ze sobą swymi jarzmami. Jak rysunek wskazuje, stosuje się tutaj uzwojenie krążkowe, przyczem zewnętrznymi cewkami dla każdej z 3-ch faz są zazwyczaj cewki niskiego napięcia. Transformatorów płaszczowych używa się stosunkowo rzadko (np. do zasilania pieców metalurgicznych, gdzie są wymagane przy niskim napięciu b. duże natężenia prądu). Najczęściej spotykamy się z *typem rdzeniowym*. O nim w dalszym ciągu będzie mowa.

Transformator rdzeniowy może posiadać obwód magnetyczny
a) symetryczny, b) niesymetryczny.

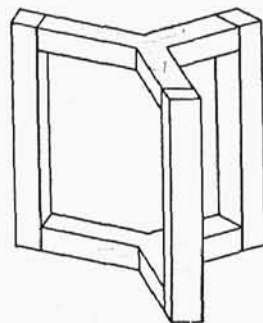
Na rys. 47 widzimy transformator z obwodem symetrycznym. Jest on otrzymany z 3 jednofazowych rdzeniowych transformatorów (rys. 2), w każdym z których uzwojenia pierwotne i wtórne są umieszczone na jednym słupie, a trzy wolne słupy są zlane ze sobą; ponieważ suma wartości chwilowych strumieni, przepływających przez wspólny słup, równa się zeru (układ trójfazowy), słup ten może być usunięty. Przy układzie symetrycznym oporności magnetyczne dla strumieni poszczególnych faz są jednakowe. Strumienie magnetyczne każdego z 3-ch uzwojeń fazowych w każdej chwili przepływają całkowicie przez swój rdzeń i po połowie przez rdzenie sąsiednie.

Układ symetryczny pod względem magnetycznym jest najlepszy, jednak z powodu trudności, związanych z jego wykonaniem, używany jest powszechnie układ niesymetryczny — przy którym słupy wszystkich trzech faz leżą w jednej płaszczyźnie, jak to widzimy na rys. 48.

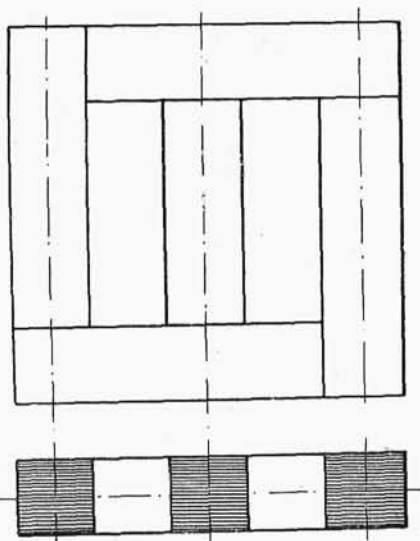
Tutaj oporności magnetyczne dla strumieni poszczególnych faz są niejednakowe — najmniejszą oporność ma strumień fazy środkowej.

Skutkiem tego prąd magnesujący, a przez to i biegu jałowego, w fazie środkowej będzie mniejszy, niż w fazach skrajnych. Ponieważ nasycenia magnetyczne, spotykane w transformatorach, nie są duże (indukcja naogół nie przekracza 14000 — 14500 G), więc i asymetria magnetyczna nie odgrywa większej roli i może być dopuszczona.

Przy transformowaniu prądu trójfazowego (niezależnie jakim sposobem — za pomocą jednego trójfazowego, czy też 3-ch jednofazowych transform.) uzwojenia fazowe zarówno po stronie pierwotnej, jak i wtórnej są zwykle łączone ze sobą w gwiazdę lub trójkąt. Poza temi układami możliwe są inne, o czym później. Narazie omówimy obszerniej łączenie w Δ i Δ .



Rys. 47.



Rys. 48.

2. Łączenie uzwojeń fazowych po stronie pierwotnej.

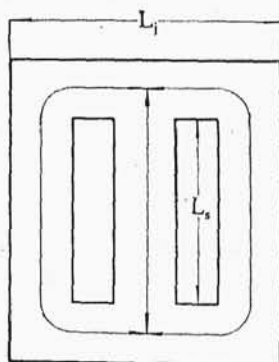
Gdy mamy do czynienia z trzema transformatorami jednofazowymi, to łączenie strony pierwotnej w gwiazdę, lub trójkąt nie nasuwa żadnych trudności. Obwody magnetyczne każdego z transformatorów są od siebie niezależne — łączyć więc zaciski możemy w sposób dowolny; przy łączeniu w Δ możemy wybrać po jednym (dowolnym) zacisku uzwojenia pierwotnego w każdym z 3-ch transformatorów i połączyć je elektrycznie ze sobą, pozostałe 3 wolne zaciski będą stanowiły wyprowadzenia gwiazdy; przy łączeniu strony pierwotnej w trójkąt bierzemy jeden zacisk uzwojenia pierwotnego w jednym z transformatorów, łączymy go z jakimś zaciskiem drugiego transformatora, wolny zacisk drugiego z dowolnym zaciskiem trzeciego i pozostałe wolne zaciski transformatora pierwszego i trzeciego ze sobą.

Przy transformatorze trójfazowym właściwym tak postępować nie można, gdyż obwody magnetyczne poszczególnych faz są ze sobą skojarzone, tworząc t. zw. *gwiazdę dwustronną* (rys. 49).

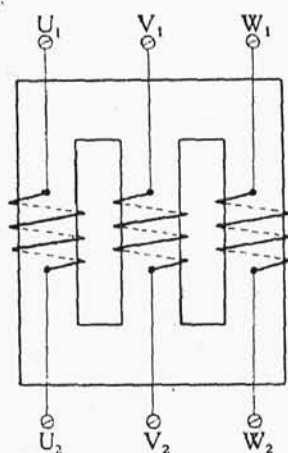
Z tego wynika, że uzwojenia fazowe należy połączyć tak, aby w każdej chwili strumień magnetyczny, wytwarzany przez amperozwoje jakiejś fazy, był równy i skierowany przeciwnie w stosunku do sumy strumieni, wytwarzanych przez amperozwoje dwóch faz pozostałych. Jednym słowem *w każdej chwili suma wartości chwilowych strumieni, wytwarzanych przez amperozwoje poszczególnych faz, z uwzględnieniem kierunków, musi być równa zero.*

Wtedy strumienie te będą się wzajemnie wspomagały.

Jeżeli uzwojenia pierwotne są nawinięte na wszystkich trzech słupach zgodnie (rys. 50), wtedy zaciski $U_1 - V_1 - W_1$ możemy traktować



Rys. 49.



Rys. 50.

naprzykład jako „początki”, a zaciski $U_2 - V_2 - W_2$ — jako „końce” uzwojeń (lub odwrotnie — jest to bowiem tylko kwestja umowy).

Właściwe wzajemne ustosunkowanie się strumieni fazowych otrzymamy, jeżeli:

1) przy \wedge zwiążemy w punkt zerowy albo wszystkie „końce” $U_2 - V_2 - W_2$, albo „początki” $U_1 - V_1 - W_1$;

2) przy \triangle będziemy łączyli odpowiednio „początek” z „końcem”. W ten sposób mamy dwie możliwości:

$$a) \quad U_1 - V_2; \quad V_1 - W_2; \quad W_1 - U_2$$

$$b) \quad U_1 - W_2; \quad W_1 - V_2; \quad V_1 - U_2.$$

Niespełnienie podanych sposobów łączenia pociąga za sobą osłabianie się wzajemne strumieni fazowych, transformator zacznie czerpać z sieci nadmierny prąd, uniemożliwiający normalną pracę.

Nadmienić należy, że transformatory są budowane na określony układ połączeń. Zmiana układu od strony pierwotnej — a więc przełączenie z \wedge na \triangle , lub naodwrot — bez odpowiedniej zmiany napięcia sieci — może uniemożliwić pracę transformatora, lub obniżyć jego moc. Rozpatrzmy oba wypadki.

1) Przełączenie uzwojenia pierwotnego z \wedge na \triangle pociąga za sobą zwiększenie się napięcia fazowego $\sqrt{3}$ razy (przy tej samej sieci pierwotnej), to z kolei wywoła powiększenie się strumienia mniejwięcej w tym samym stosunku.

Przy takim strumieniu prąd magnesujący będzie tak duży (patrz krzywą magnesowania), że praca transformatora przestaje być możliwa.

2) Przy przełączeniu uzwojenia pierwotnego z \triangle na \wedge obniżamy napięcie fazowe zarówno po stronie pierwotnej, jak wtórnej $\sqrt{3}$ razy. Ponieważ prąd nie może przekroczyć swej wartości nominalnej — ze względu na grzanie się uzwojeń — moc pozorna transformatora $P = 3 V_f I_f$ spadnie $\sqrt{3}$ razy (V_f zmalało $\sqrt{3}$ razy).

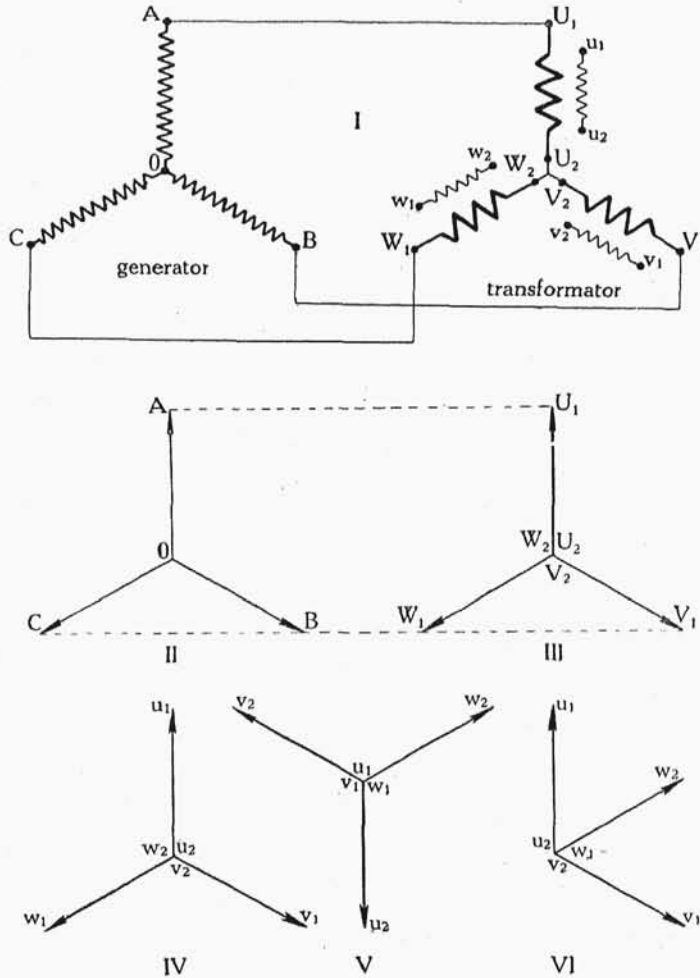
3. Łączenie uzwojeń fazowych po stronie wtórnej.

Wyjdziemy z założenia, że uzwojenia pierwotne i wtórne są nawinięte zgodnie (patrz I—9), oraz że połączenie uzwojeń fazowych pierwotnych jest prawidłowe. Końcówki uzwojeń wtórnych oznaczmy temi samymi literami co pierwotnych, tylko małemi. Przy nawinięciu zgodnem potencjały zacisków U_2 i u_2 , V_2 i v_2 , W_2 i w_2 , oraz U_1 i u_1 , V_1 i v_1 , W_1 i w_1 są, jak wiemy, w każdej chwili jednakowego znaku, a więc przez analogję do uzwojenia pierwotnego końcówki u_1, v_1, w_1 będą „początkami”, u_2, v_2, w_2 — „końcami”.

Przy łączeniu uzwojeń wtórnych w gwiazdę należy połączyć ze sobą albo wszystkie „początki” $u_1 v_1 w_1$ albo „końce” $u_2 v_2 w_2$. Niespełnienie tego warunku pociągnie za sobą niesymetrię napięć po stronie wtórnej.

Objaśnimy to na przykładzie.

Załóżmy że chcemy połączyć transformator trójfazowy w układ Δ/Δ .



Rys. 51.

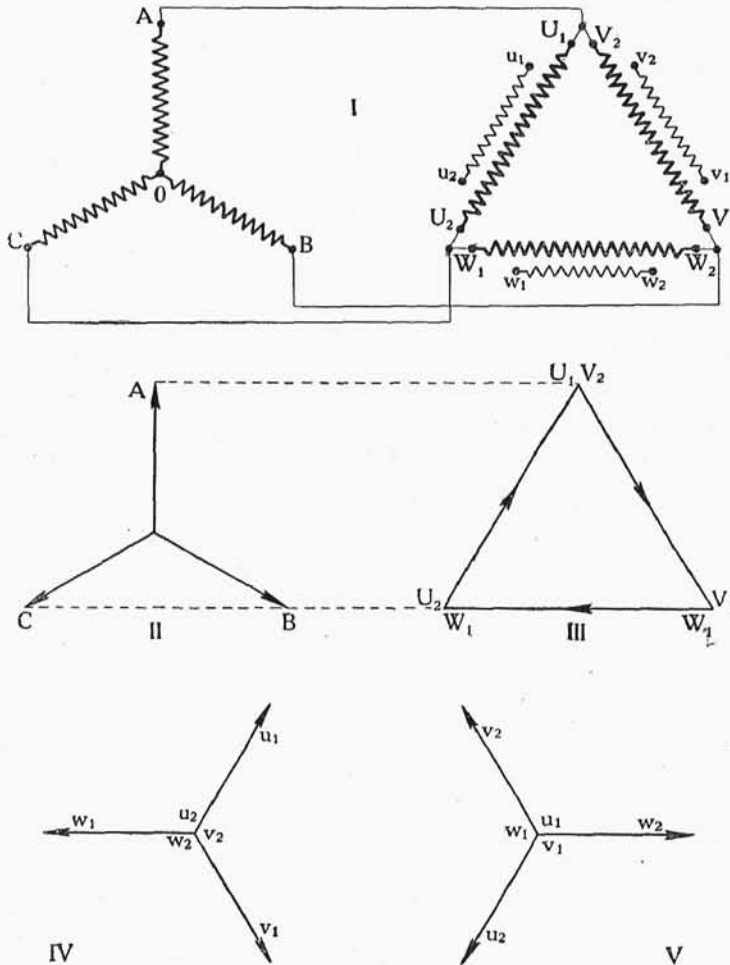
Na rys. 51^I $A-B-C$ oznaczają zaciski generatora. Uzwojenie pierwotne transformatora jest związane w „końcami” $U_2 V_2 W_2$, $u_1 - u_2$, $w_1 - w_2$, $v_1 - v_2$ są to uzwojenia fazowe wtórne transformatora. Gwiazda $A B C$ (rys. 51^{II}) jest gwiazdą napięć generatora; gwiazda $U_1 V_1 W_1$ (rys. 51^{III})—gwiazdą napięć strony pierwotnej transformatora (te gwiazdy oczywiście są identyczne). Po stronie wtórnej

możemy połączyć ze sobą końcówki $u_2 v_2 w_2$; wtedy, (ponieważ wyszliśmy ze zgodności kierunków nawinięć) uzyskamy gwiazdę o promieniach zmienionych w stosunku przekładni, na przykład:

$$\overline{u_1 u_2} = \overline{U_1 U_2} \frac{1}{\vartheta}$$

skierowanych zgodnie z promieniami gwiazdy pierwotnej (rys. 51^{IV}).

Gdybyśmy w punkt zerowy po stronie wtórnej złączyli końcówki u_1, v_1, w_1 (rys. 51^V), uzyskalibyśmy gwiazdę odwróconą o 180° (przełączenie zacisków jest równoznaczne z odwróceniem kierunku wektora napięć).



Rys. 52.

Przy niewłaściwym połączeniu w punkt zerowy, np. dwóch „końców” u_2 i v_2 i jednego „początku” w_1 , otrzymalibyśmy obraz niesy-

metryczny (rys. 51^{VI}). Między zaciskami u_1 i v_1 panowałoby napięcie skojarzone, $\sqrt{3}$ razy większe od fazowego, natomiast między zaciskami u_1 i w_2 oraz w_2 i v_1 — tylko fazowe.

Weźmy układ \triangle/λ .

Kierunek nawinięcia obu uzwojeń, jak poprzednio, zgodny.

Na rys. 52^{II} widzimy gwiazdę napięć generatora ABC .

Na rys. 52^{III} mamy trójkąt napięć pierwotnych transformatora — pokrywający się, oczywiście, z gwiazdą napięć generatora. By uzyskać prawidłową gwiazdę wtórną transformatora, należy połączyć ze sobą albo wszystkie „końce” — albo wszystkie „początki”.

Na rys. 52^{IV} mamy gwiazdę wtórną, uzyskaną przez połączenie „końców” u_2, v_2, w_2 . Promienie gwiazdy są odpowiednio równoległe do boków trójkąta napięć strony pierwotnej.

Rys. 52^V daje gwiazdę, otrzymaną przy połączeniu w punkt zerowy „początków” u_1, v_1, w_1 . Gwiazda ta jest w stosunku do poprzedniej odwrócona o 180° .

Rozpatrzmy jeszcze wypadek połączenia uzwojenia wtórnego w \triangle przy uzwojeniu pierwotnem połączonem w λ .

Założenie co do zgodności kierunku nawinięcia do uzwojeń zachowujemy.

Rys. 53^{II} jest gwiazdą napięć generatora.

Rys. 53^{III} jest gwiazdą napięć strony pierwotnej transformatora.

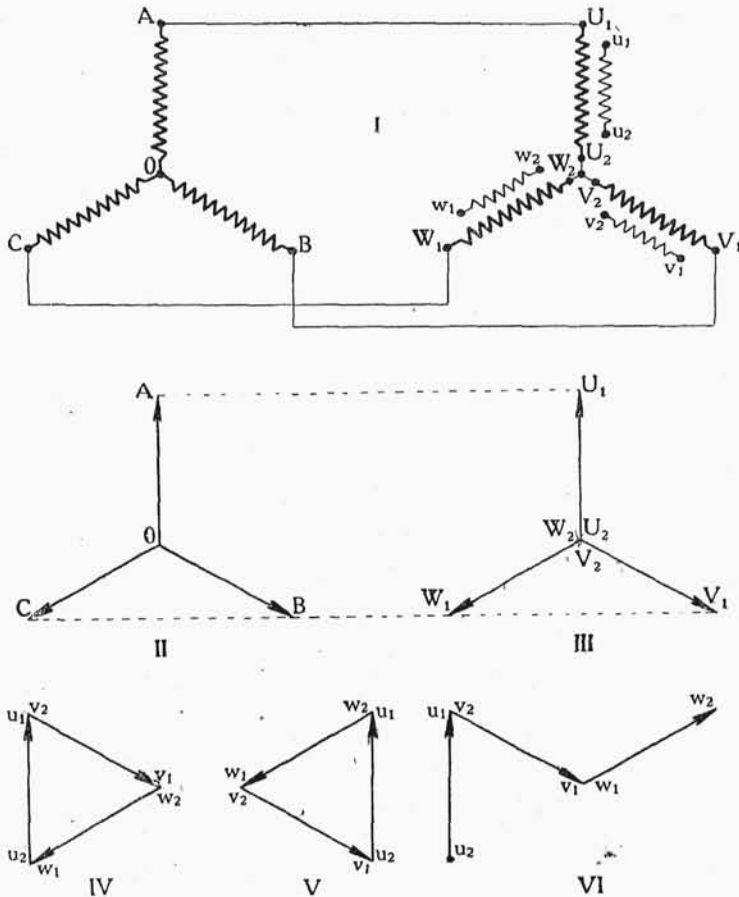
Przystępujemy do strony wtórnej. Weźmy fazę $u_1 - u_2$; ponieważ mamy założenie, że kierunek nawinięcia jest zgodny, wektor napięcia tej fazy jest skierowany zgodnie z wektorem napięcia strony pierwotnej (rys. 53^{IV}). Do początku tej fazy należy przyłączyć jakiś z „końców” dwóch pozostałych faz np. v_2 — wtedy wektor napięcia wtórnego fazy $v_1 - v_2$ będzie skierowany ukośnie na prawo ku dołowi. Do „początku” v_1 tej fazy załączamy „koniec” w_2 fazy pozostałej — otrzymujemy żądany trójkąt. Gdybyśmy do początku u_1 fazy pierwszej ($u_1 - u_2$) przyłączyli zamiast końca v_2 „koniec” w_2 , otrzymalibyśmy \triangle odwrócony o 180° (rys. 53^V).

Wróćmy do rys. 53^{IV}, fazy $u_1 - u_2$ i $v_1 - v_2$ są połączone dobrze końcówkami u_1 i v_2 . Do „początku” v_1 przyłączamy fazę trzecią, lecz nie końcem w_2 , jak to by być powinno, a początkiem w_1 .

Wektor $w_2 - w_1$ zmieni kierunek (rys. 53^{VI}).

Między końcówkami $u_2 - w_2$ będzie panowało podwójne napięcie fazowe — gdybyśmy te końcówki połączyli elektrycznie ze sobą, w obwodzie zamkniętym, złożonym z uzwojeń naszych trzech faz, popłynąłby prąd, wywołany podwójnem fazowem napię-

ciem i ograniczony opornością uzwojeń fazowych. Uzwojenia wtórne od tego nadmiernego prądu mogłyby się uszkodzić.



Rys. 53.

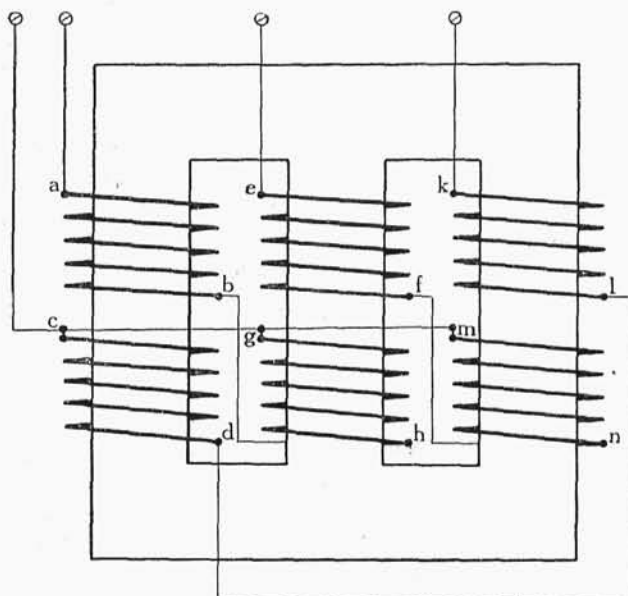
Podobnie możemy rozpatrzyć wszelkie możliwe kombinacje połączeń uzwojeń fazowych strony pierwotnej i wtórnej.

Otrzymane wykresy wektorowe napięć strony pierwotnej i wtórnej transformatora pozwolą nam, jak zobaczymy w przyszłości, zorientować się, co do możliwości współpracy równoległej transformatorów.

4. Połączenie w zygzak.

Poza normalnymi połączeniami w gwiazdę i trójkąt, spotykamy b. często po stronie niskiego napięcia u transformatorów, przeznaczonych do celów oświetlenia — przy mocach mniejszych (do 200 ÷ 400 kVA), połączenie specjalne — *zygzak*, lub jak Czesi mówią poglądowo — *gwiazdę łamaną*.

Takie połączenie pozwala na uzyskanie większej równomierności obciążenia po stronie pierwotnej — gdy strona wtórna jest obciążona nierównomiernie, jak to często może się zdarzyć przy



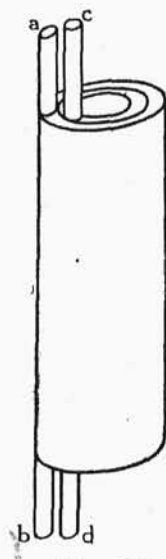
Rys. 54.

oświetleniu. Przy zygżaku po stronie niskiego napięcia uzwojenie wysokiego napięcia jest zwykle łączone w gwiazdę.

Schematycznie układ w zygżak jest przedstawiony na rys. 54. Uzwojenie wtórne każdego ze słupów jest podzielone na 2 równe części. Uzwojenie jednej fazy jest złożone z dwóch połówek osadzonych na różnych słupach. Ma to na celu rozłożenie obciążenia jednej fazy po stronie wtórnej na dwa słupy.

Przy zygżaku transformator posiada wyprowadzony punkt zerowy, by móc korzystać zarówno z napięć międzyprzewodowych, jak i fazowych.

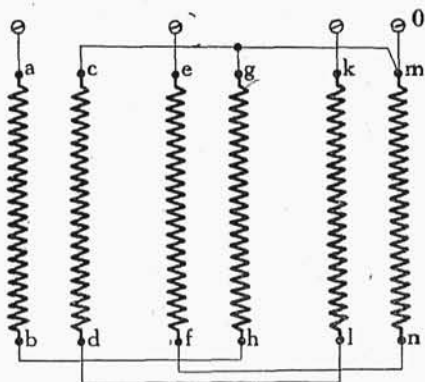
Przy połączeniu w zygżak niemal wyłącznie używa się uzwojenia cylindrycznego^w (nie krążkowego). Przytem połówki uzwojenia znajdującego się na jednym słupie (np. $a-b$ i $c-d$) nie są osadzone jedna nad drugą, jak to jest przedstawione schematycznie na rys. 54, lecz są nawinięte każda na całą wysokość słupa i są umieszczone w stosunku do siebie współśrodkowo — jak to widzimy na rys. 55.



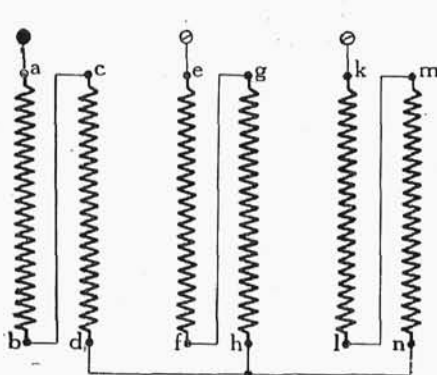
Rys. 55.

Biorąc to pod uwagę, przekształcimy schemat zasadniczy (rys. 54) na bardziej zbliżony do obrazu rzeczywistego (będzie to niejako schemat montażowy) rys. 56.

Przed wykonaniem wykresu wektorowego napięć dla zygżaka, przełączmy nasze uzwojenie na zwyczajną gwiazdę. W tym celu należy połączyć ze sobą punkty b i c ; f i g ; l i m , końcówki zaś d , h , n — związać w punkt zerowy (rys. 57).

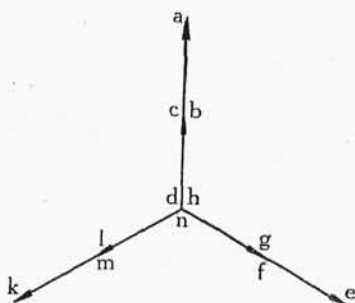


Rys. 56.

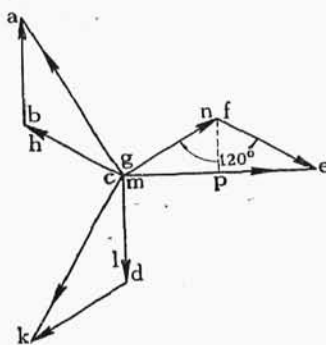


Rys. 57.

Dla tego połączenia wykreślimy gwiazdę napięć (rys. 58). Widzimy, że napięcie fazy równa się podwójnemu napięciu cewki połowicznej, gdyż każda z cewek osadzona jest na tym samym słupie i napięcia tych cewek połowicznych są ze sobą w fazie. Przy zygżaku napięcie fazowe równa się sumie napięć cewek połowicznych, osadzonych na różnych słupach, a zatem napięć nie będących ze sobą w fazie — suma zatem w tym wypadku będzie geometryczna.



Rys. 58.



Rys. 59.

Na rysunku 59 widzimy wykres wektorowy napięć połączenia w zygżak dla schematu z rys. 56.

Za podstawę do wykresu służył rys. 58. Z niego wzięliśmy wielkość i kierunek napięć cewek połowicznych. Kierunek wektorów napięć cewek $c-d$, $g-h$ oraz $m-n$ został odwrócony o 180° ze względu na to, że na rys. 58 w punkt zerowy zostały powiązane końcówki d, h, n , przy zygżaku zaś końcówki c, g, m .

Jak ze stosunków geometrycznych wynika, napięcie fazowe przy zygżaku (wektor me) wyniesie:

$$\overline{me} = 2\overline{pe}; \quad \overline{pe} = \overline{fe} \sin 60^\circ = \overline{fe} \frac{\sqrt{3}}{2}; \quad \overline{me} = 2\overline{fe} \frac{\sqrt{3}}{2} = \sqrt{3} \overline{fe},$$

czyli napięcie fazowe przy zygżaku jest $\sqrt{3}$ razy większe od napięcia cewki połowicznej (\overline{fe}), wtedy, gdy przy gwiazdzie było 2 razy większe.

Jeżeli oznaczymy przez w_2 liczbę zwojów wtórnych na słupie, wtedy na jedną cewkę połowiczną przypadnie $\frac{w_2}{2}$ zwojów.

SEM wzniecona w takiej cewce:

$$E'_2 = 4,44 f \Phi \frac{w_2}{2} 10^{-8}.$$

SEM fazowa przy połączeniu w gwiazdę:

$$E_2^\lambda = 2 E'_2 = 2 \cdot 4,44 f \Phi \frac{w_2}{2} 10^{-8} = 4,44 f \Phi w_2 10^{-8}.$$

SEM fazowa przy połączeniu w zygżak:

$$E_2^z = \sqrt{3} E'_2 = \sqrt{3} \cdot 4,44 f \Phi \frac{w_2}{2} 10^{-8} = 0,865 \cdot 4,44 f \Phi w_2 10^{-8}.$$

By przy λ uzyskać takie same napięcie co przy gwiazdzie ($E_2^z = E_2^\lambda$) należy dać więcej zwojów.

$$E_2^{\lambda} = 4,44 f \Phi w_2^\lambda 10^{-8}; \quad E_2^z = 0,865 \cdot 4,44 f \Phi w_2^z 10^{-8}$$

$$E_2^\lambda = E_2^z; \quad 4,44 f \Phi w_2^\lambda 10^{-8} = 0,865 \cdot 4,44 f \Phi w_2^z 10^{-8},$$

skąd

$$\boxed{w_2^z = \frac{1}{0,865} w_2^\lambda = 1,15 w_2^\lambda} \quad \dots (1)$$

Widzimy zatem, że dla uzyskania takiego samego napięcia przy zygżaku jak przy gwiazdzie należy dać zwojów o 15% więcej. Jest to przyczyna, dla której transformator w układzie λ/λ jest zwykle nieco droższy od transformatora w układzie λ/λ przy tej samej mocy i napięciu międzyzaciśkowem.

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

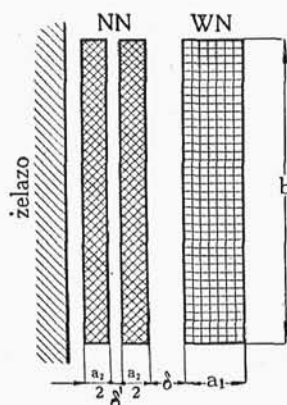
f — oznacza częstotliwość,

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 Δ z przewodem zerowym (łączącym punkt zerowy transformatorów z punktem zerowym generatora), lub z jednym transformatorem trójfazowym, połączonym również w Δ z przewodem zerowym (w obu wypadkach narażenie damy po stronie wtórnej również Δ), 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-