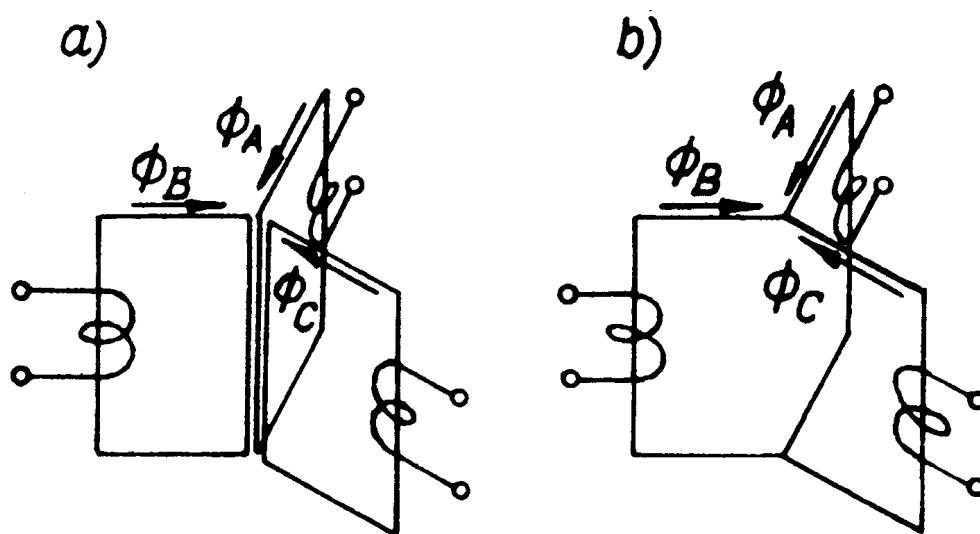
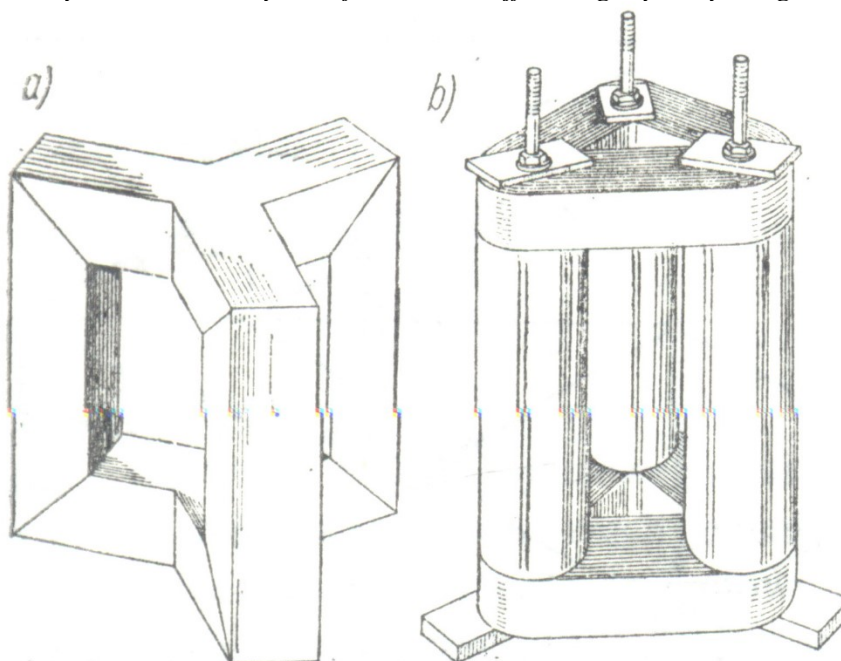


TRANSFORMATOR TRÓJFAZOWY

Do transformacji energii elektrycznej w układach trójfazowych można wykorzystać trzy jednostki jednofazowe. Rozwiązanie takie jest jednak nieekonomiczne. Na Rys. 1 pokazano jakie są wady użycia trzech jednostek jednofazowych. Jeśli ustawimy trzy jednostki jednofazowe tak jak na Rys. 1 a) to widzimy, że w trzech stykających się kolumnach występuje pole magnetyczne przesunięte w dziedzinie czasu o kąt 120° . Suma tych trzech pól magnetycznych jest równa zero, zatem możemy te kolumny usunąć bez zmiany działania tych trzech samodzielnych jednostek. Pierwsze transformatory miały podobną konstrukcję (Rys. 2)

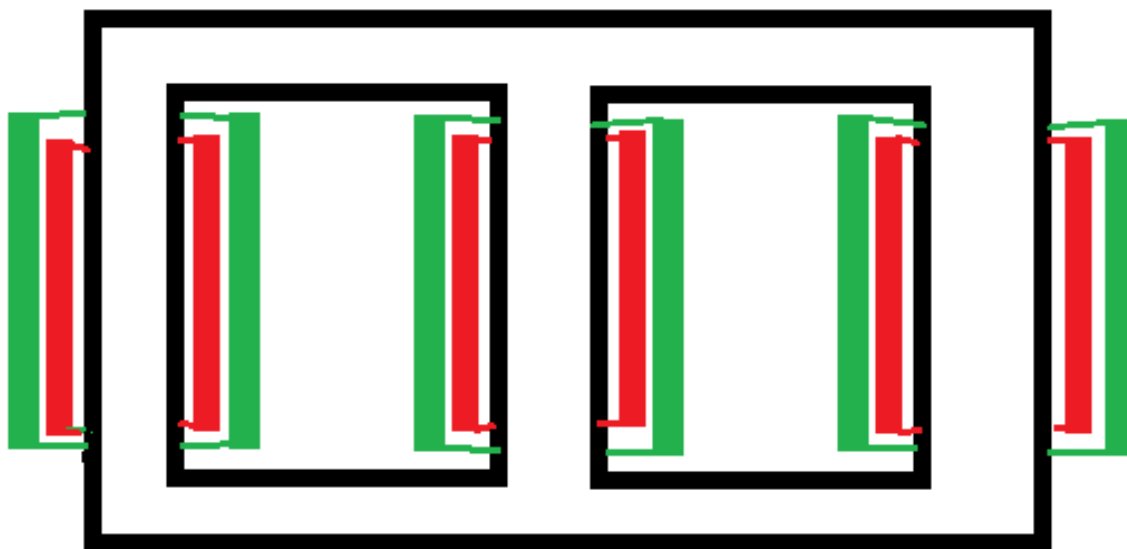


Rys. 1 Idea budowy transformatora trójfazowego symetrycznego.

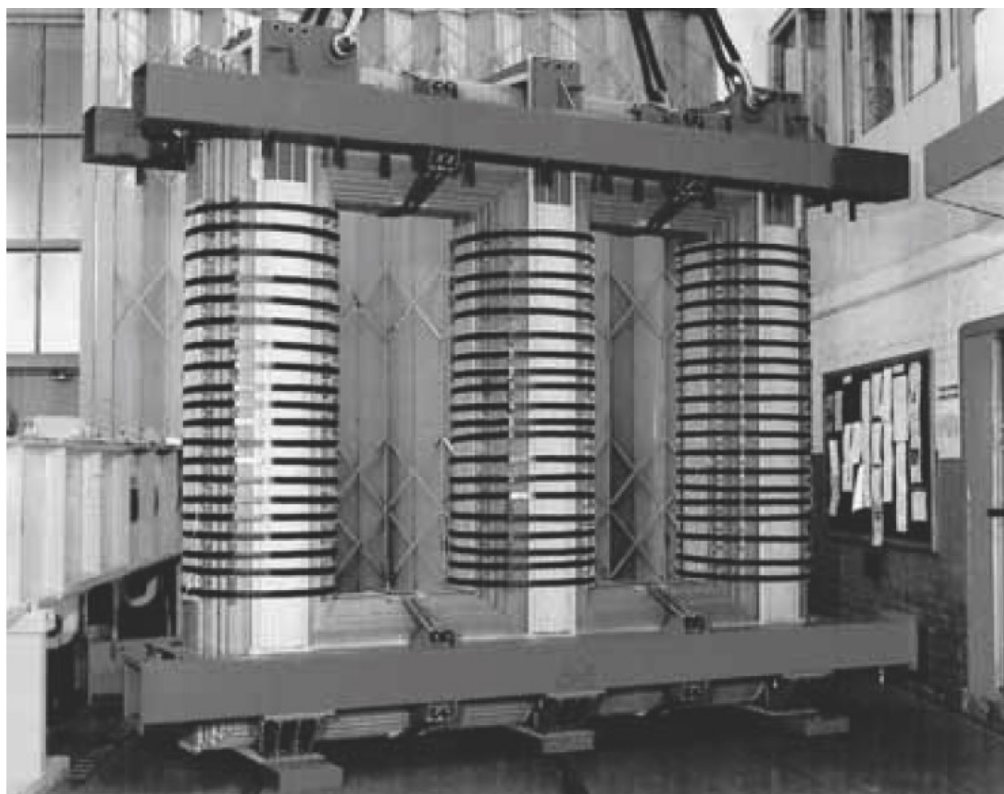


Rys. 2 Rdzeń trójfazowy symetryczny

Z taką konstrukcją wiążą się jednak duże problemy technologiczne. Współczesne transformatory energetyczne budowane są w sposób podobny do jednofazowych rdzeni płaszczowych, różnica polega na tym, że każda z kolumn ma identyczny przekrój i wysokość. Na trzech kolumnach nawija się po co najmniej po dwa uzwojenia, jedno pierwotne a drugie wtórne (Rys. 3). Przykładową konstrukcję pokazano także na zdjęciu na Rys. 4.



Rys. 3 Konstrukcja typowego transformatora 3-kolumnowego.



Rys. 4 Praktyczny rdzeń transformatora trójfazowego

Tak zbudowany rdzeń nie jest symetryczny. Pole magnetyczne w każdej kolumnie wytwarzane jest poprzez wymuszenie napięciem zasilającym i w stanie jałowym, przy założeniu o symetrii napięć zasilających, możemy napisać że w każdej kolumnie wartość maksymalna strumienia będzie równa:

$$\phi = \frac{U_1}{4.44 fZ} \quad (1)$$

Strumienie mają przebieg sinusoidalny w czasie z przesunięciem w dziedzinie czasu o kąt 120° . Strumienie te zerują się na końcach środkowej kolumny. Przy założeniu, że każda kolumna ma taką samą wartość powierzchni przekroju S , więc maksymalna wartość indukcji B w rdzeniu będzie miała identyczne wartości w każdej z kolumn:

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (2)$$

Jako, że mamy do czynienia z tym samym materiałem ferromagnetycznym, wartość natężenia pola będzie miała identyczna wartość, równą:

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (3)$$

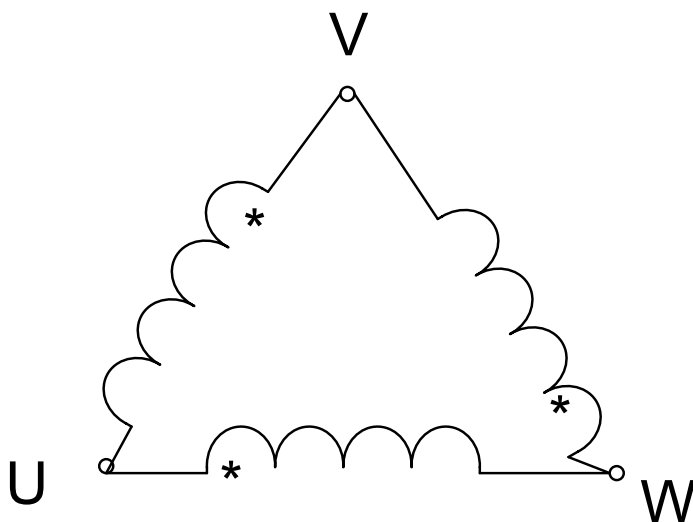
Jako, że trzy strumienie zerują się na obrzeżach środkowej kolumny, z prawa przepływu wynika, że w dwóch skrajnych kolumnach drogi pola magnetycznego są sobie równe $L_1=L_3$ a w kolumnie środkowej jest ona wyraźnie mniejsza, stąd wartości maksymalne prądów magnesujących dla uzwojeń nawiniętych w kolumnach skrajnych są większe:

$$I_{\max 1} = I_{\max 3} = \frac{HL_1}{Z} = \frac{HL_3}{Z} > I_{\max 2} = \frac{HL_2}{Z} \quad (4)$$

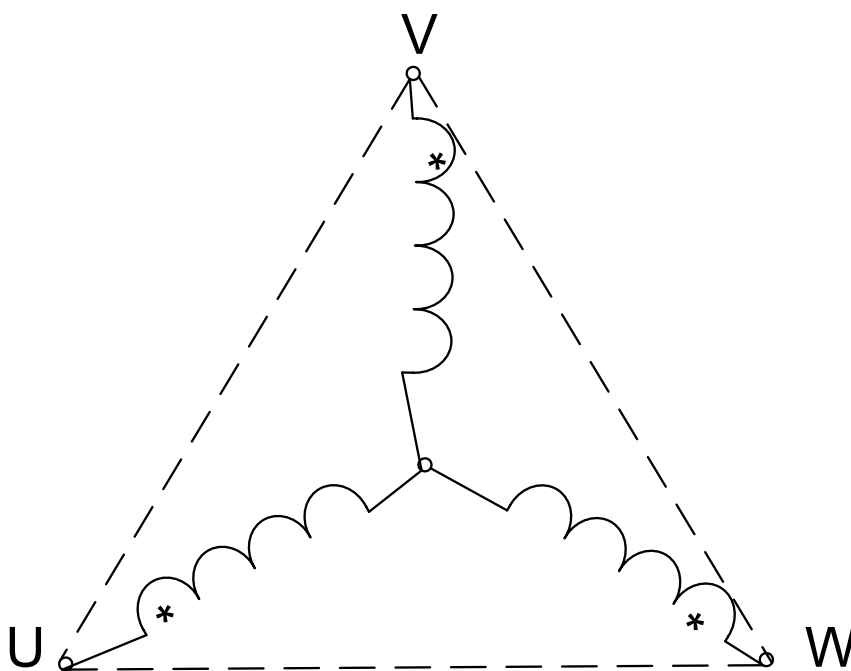
Jako, że wartości prądów magnesujących są znacznie mniejsze od wartości znamionowych to fakt ich niesymetrii nie ma praktycznego znaczenia. W transformatorze obciążonym prąd biegu jałowego można praktycznie pominąć.

Analiza transformatora trójfazowego, przy symetrycznym zasilaniu i obciążeniu, polega na wykorzystaniu schematu zastępczego identycznego jak w transformatorze jednofazowym. W przypadku symetrii obciążenia w każdej fazie będzie występował prąd o identycznej wartości skutecznej. Przebiegi czasowe napięć, strumieni w każdej kolumnie są symetryczne i przesunięte względem siebie o kąt 120° . Analizę takiego transformatora można sprowadzić do jednej fazy i wykorzystać rozwiązania podane dla transformatora jednofazowego.

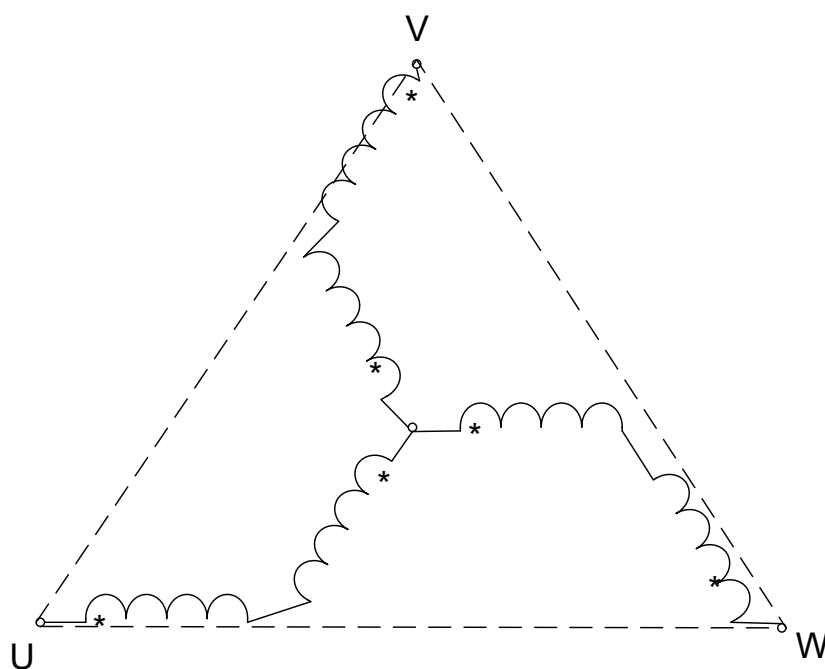
Należy przy tym pamiętać, że parametry znamionowe podawane są jako napięcie międzyprzewodowe oraz prądy przewodowe, a w schemacie zastępczym używamy tylko wielkości fazowych. Efektem jest zatem konieczność uwzględnienia w analizie transformatorów trójfazowych sposobu skojarzenia uzwojeń strony pierwotnej i wtórnej. Uzwojenia strony pierwotnej i wtórnej mogą być łączone w trójkąt (Rys. 5), w gwiazdę (Rys. 6), zygzak (Rys. 7) lub tzw. otwarty trójkąt (Rys. 8).



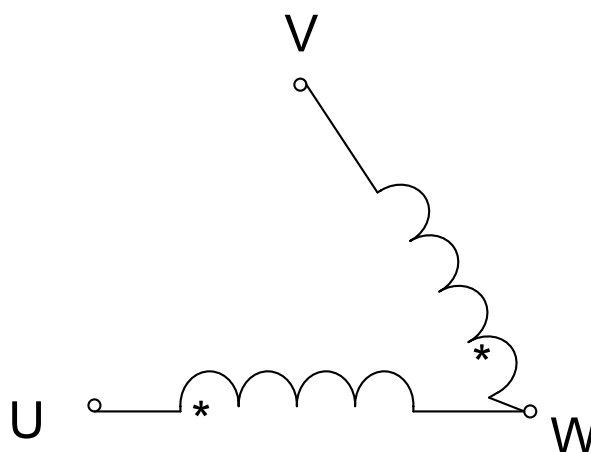
Rys. 5 Połączenie uzwojeń transformatora w trójkąt (D).



Rys. 6 Połączenie uzwojeń transformatora w gwiazdę (Y).

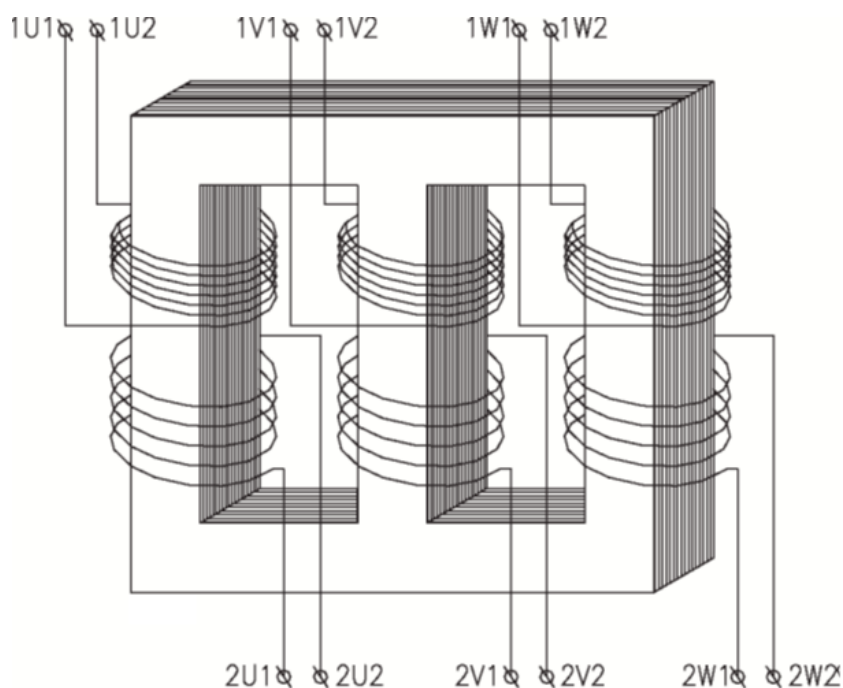


Rys. 7 Połączenie uzwojeń transformatora w zygzak (Z).



Rys. 8 Połączenie uzwojeń transformatora w tzw. otwarty trójkąt (V).

Sposób połączeń uzwojeń oznaczany jest jako tzw. grupa połączeń transformatora trójfazowego. Producent transformatorów energetycznych zwykle nie podaje oznaczeń znamionowych w odniesieniu to strony pierwotnej i wtórnej. Przyjęto oznaczać wielkości znamionowe jako odniesione do tzw. strony górnej i dolnej. Strona górna dotyczy uzwojeń o wyższej wartości napięcia znamionowego, stąd grupa połączeń składa się z dużych i małych liter oznaczających sposób skojarzenia strony górnej i dolnej. Ważnym parametrem jest także cyfrowe oznaczenie tzw. przesunięcia godzinowego. Przesunięcie godzinowe jest kątem przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem napięcia międzyfazowego strony górnej i dolnej, liczonej od strony górnej w kierunku zgodnym z kierunkiem ruchu wskazówek zegara do wektora odpowiadającego takim samym oznaczeniom końcówek wektora strony dolnej.



Rys. 9 Schemat i oznaczenia uzwojeń w transformatorze trójfazowym.

(<http://www.noratel.com/fileadmin/content/downloads/school/3phTransformer.pdf>)

We wszystkich grupach połączeń mogą wystąpić przesunięcia godzinowe będące wielokrotnością 30° stąd oznaczenie grup połączeń informuje nas o sposobie połączenia uzwojeń po stronie górnej, dolnej oraz o przesunięciu godzinowym podanej w jednostkach będących liczbą całkowitą podaną jako wielokrotność 30° . Np. grupa Dy5 informuje, że strona górną połączoną jest w trójkąt, dolną w gwiazdę o przesunięciu godzinowym równym $5 \cdot 30^\circ = 150^\circ$. Przyjęto stosować litery D, Y, Z dla połączeń strony górnej (trójkąt, gwiazda, zygzak) oraz dla strony dolnej odpowiednio d, y, z. Poza literami wskazującymi połączenie uzwojeń ważnym składnikiem jest także informacja o tym, czy na tabliczkę zaciskową wyprowadzony jest przewód neutralny (N lub n). W przypadku zygzaka nie trzeba wpisywać tej informacji, gdyż zygzak używa się tylko z wyprowadzonym punktem zerowym (neutralnym). Wartość możliwych przesunięć godzinowych jest zależna od sposobu połączeń transformatorów:

Yy, Dd – 0, 2, 4, 6, 8, 10

Yd, Yz – 1, 3, 5, 7, 9, 11

Dz – 0, 2, 4, 6, 8, 10

W praktyce energetycznej buduje się transformatory o przesunięciach godzinowych zalecanych przez Polskie Normy, są to wartości 0, 5, 6 i 11.

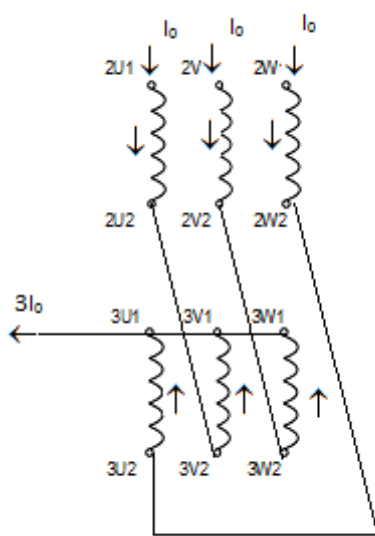
Skąd bierze się potrzeba stosowania różnych grup połączeń transformatorów trójfazowych? Związane to jest z dwoma innymi pytaniami:

- a) jakie są skutki wytworzenia pola magnetycznego w transformatorach trójkolumnowych w zależności od sposobu połączeń strony pierwotnej (zasilanej)?
- b) jakie są skutki pracy transformatorów energetycznych przy niesymetrycznym obciążeniu?

W pierwszym przypadku odpowiedzi należy szukać w analizie magnesowania rdzenia ferromagnetycznego. W przypadku wymuszenia sinusoidalnego przebiegu wartości strumienia magnetycznego w każdej fazie, prąd magnesujący zawierać musi wszystkie nieparzyste harmoniczne. Największe znaczenie mają harmoniczne niskich rzędów tzn. 1, 3, 5, 7... Ich amplitudy maleją wraz z ich rzędem, stąd największe znaczenia (poza 1 harmoniczną) ma 3 harmoniczna. Proszę zwrócić uwagę na fakt, że w układzie trójfazowym symetrycznym, 3-harmoniczna w przebiegu prądu ma przebieg identyczny w każdej fazie. W takim przypadku połączenie w trójkąt zapewnia możliwość przepływu prądu 3-harmonicznej. Prąd ten zamyka się wewnątrz trójkąta. W przypadku połączenia w gwiazdę bez przewodu zerowego składnik ten nie występuje. Jeśli nie ma składnika 3-harmonicznej w prądzie magnesującym, składnik ten pojawić się musi w przebiegu strumienia magnetycznego. Problem jest istotny przede wszystkim w transformatorach dużym mocy. Składnik 3-harmonicznej w przebiegu strumienia skojarzonych z uzwojeniami w trzech fazach sumuje się i pole magnetyczne z nim związane zamyka się poza rdzeniem ferromagnetycznym. Stanowi on tzw. składową zerową strumienia magnetycznego. W przypadku połączenia po stronie pierwotnej w gwiazdę bez przewodu zerowego a w trójkąt po stronie wtórnej występuje 3-harmoniczna w polu magnetycznym wytworzonym przez uzwojenie zasilane. W trójkącie po stronie wtórnej od tego składnika pola indukują się napięcia wewnątrz trójkąta. Napięcia te powodują przepływ prądu który będzie przeciwdziałał wymuszeniu i prąd ten będzie zmniejszał wartość tego niepożądanego składnika pola.

Zatem od strony magnesowania najlepiej jest stosować grupy, które mają połączenie w trójkąt jednej ze stron.

Istotny problem dotyczy skutków niesymetrii obciążenia transformatora trójfazowego, szczególnie w przypadku gdy dopuszczamy pracę transformatora obciążonego po stronie wtórnej prądem jednakofazowym w każdej fazie (tzw. składowa zerowa prądu obciążenia). Rozważmy przypadek połączenia strony wtórnej w gwiazdę z przewodem zerowym (np. grupę Dyn). Jeśli przez przewód neutralny płynie prąd, to w każdej fazie pojawi się prąd składowej zerowej, który będzie, zgodnie z prawem przepływu Ampera, wytwarzał pole magnetyczne (składową zerową strumienia skojarzonego z każdym z uzwojeń fazowych). Ten składnik pola zamyka się na zewnątrz transformatora. W otoczeniu transformatora pojawi się zatem pole magnetyczne w wartości zależnej od wartości prądu składowej zerowej. Transformator budujemy w taki sposób, aby jego oddziaływanie na otoczenie było jak najmniejsze. Istnienie składnika składowej zerowej strumienia może powodować silne zakłócenia w otoczeniu transformatora. Jeśli chcemy dopuścić pracę transformatora z możliwym obciążeniem składową zerową prądu, musimy dokonać zmian w połączeniu uzwojeń transformatora. Wykorzystujemy to wcześniej opisany sposób połączenia transformatora w zygzak.



Rys. 10 Idea eliminacji składowej zerowej strumienia magnetycznego przy obciążeniu transformatora składową zerową prądu

Zygzak powstaje poprzez rozdzielenie uzwojeń strony wtórnej transformatora na dwa identyczne składniki (*Rys. 10*). Zgodnie z prawem przepływu, prąd składowej zerowej wymusza powstanie pola magnetycznego w jednym kierunku a górnym składniku połączeń pokazanym na *Rys. 10*, oraz w kierunku przeciwnym w składniku dolnym. Pola magnetyczne powstaje na skutek sumy przepływu prądu z obu składników. W przypadku gdy każda z ww. części ma identyczną liczbę zwojów, wypadkowy przepływ jest równy zeru! Uzyskujemy dzięki temu efekt eliminacji składowej zerowej strumienia magnetycznego przy umożliwieniu przepływu prądu składowej zerowej. Efekt ten uzyskany jest tu jednak, przy zachowaniu takich samych napięć międzyfazowych, kosztem zwiększenia fizycznej liczby zwojów po stronie wtórnej. Jeśli przyjmiemy, że wartość skuteczna napięcia indukowanego od strumienia głównego jest równe U w każdej z części zygzaka, to napięcie fazowe, będące sumą fragmentów zygzaka z obu kolumn, gdzie strumień jest przesunięty o 120° , będzie równe:

$$U_{fz} = \sqrt{3}U \quad (5)$$

A napięcie międzyfazowe jest wówczas równe:

$$U_{pz} = \sqrt{3}\sqrt{3}U = 3U \quad (6)$$

Połączenie w gwiazdę tych samych uzwojeń spowoduje, że napięcie fazowe będzie wynosiło:

$$U_{fy} = 2U \quad (7)$$

A wartość napięcia międzyfazowego:

$$U_{py} = 2\sqrt{3}U \quad (8)$$

Stąd przy identycznej liczbie zwojów przełączenie układu z gwiazdy w zygzak powoduje zmniejszenie napięć po stronie wtórnej w proporcji:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} \approx 0.865 \quad (9)$$

W celu utrzymania takiej samej wartości napięć należy zwiększyć całkowitą liczbę zwojów po stronie wtórnej o ok 15% .

W parametrach znamionowych transformatorów trójfazowych nie ma zwykle informacji o przekładni zwojowej. Podawane są wartości znamionowe napięć strony górnej i dolnej oraz oznaczenie grupy połączeń. Analiza pracy transformatora, oparta na wykorzystaniu jego schematu zastępczego wymaga wiedzy o sposobie przeliczania wielkości ze strony wtórnej na pierwotną. Wielkość ta może być wyznaczana jako skutek indukowania się napięć fazowych po obu stronach

transformatora i w praktyce przeliczana jako proporcje odpowiednich napięć fazowych strony górnej i dolnej:

$$k = \frac{U_{fG}}{U_{fd}} \quad (10)$$

Definiowana jest także wartość tzw. przekładni napięciowej jako proporcje napięć międzyfazowych strony górnej i dolnej:

$$k_u = \frac{U_G}{U_d} \quad (11)$$

Z faktu tego wynika prosty sposób wyznaczania przekładni transformatora k na podstawie znajomości przekładni napięciowej. Np. dla połączeń Dy możemy napisać:

$$k_u = \frac{U_D}{U_y} = \frac{U_{fD}}{\sqrt{3}U_{fy}} = \frac{k}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

Dla grupy Yz:

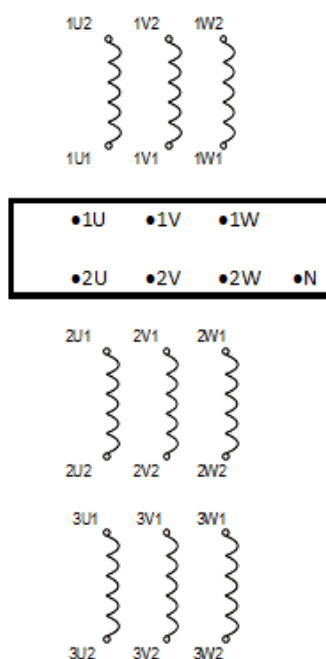
$$k_u = \frac{U_Y}{U_z} = \frac{\sqrt{3}U_{fY}}{\sqrt{3}U_{fz}} = k \quad (13)$$

Proporcja ta jest wynikiem „efektywnej” liczby zwojów po stronie zygzała. Rzeczywista liczba zwojów w każdej fazie zygzała jest większa o ok 15%, zgodnie z proporcją (9).

Sposób połączenie transformatora trójfazowego dla zadanej grupy połączeń możemy uzyskać według następującego schematu:

1. Rysujemy fizyczne rozmieszczenie uzwojeń wraz z oznaczeniami końcówek (np. wg. schematu na Rys. 11).
2. Łączymy sposób połączenia uzwojeń strony górnej.
3. Rysujemy trójkąt napięć międzyfazowych strony górnej (pamiętając o kolejności oznaczeń UVW, zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara), wraz z zaznaczeniem połączeń na tabliczce zaciskowej.
4. Rysujemy położenie wektorów napięć fazowych wewnątrz (Y lub na bokach w D) trójkąta napięć międzyfazowych.
5. Wyznaczamy kąt przesunięcia godzinowego i rysujemy trójkąt napięć strony dolnej, obrócony o kąt przesunięcia godzinowego.

6. Biorąc pod uwagę fakt, że napięcia fazowe indukowane po stronie górnej i dolnej na tych samych kolumnach są ze sobą w fazie, na boki (w trójkącie) lub do wewnątrz trójkąta strony dolnej (w gwiazdzie lub zygzaku) przesuwamy równolegle wektory odpowiednich napięć fazowych.
7. Łączymy uzwojenie strony dolnej, zgodnie z oznaczeniami uzyskanymi z p.6



Rys. 11 Schemat umieszczenia uzwojeń i tabliczki zaciskowej w transformatorze trójfazowym.

Analizę pracy transformatorów trójfazowych, łącznie z obliczaniem wartości parametrów schematu zastępczego na podstawie wiedzy o wartości mocy znamionowej, mocy strat w żelazie i w uzwojeniach, wartości prądu biegu jałowego oraz napięcia zwarcia możemy wykonać według następującego algorytmu:

- 1) Z wielkości znamionowych (międzyfazowych), w zależności od grupy połączeń, wszystkie wielkości przeliczamy do wielkości fazowych,
- 2) Wykorzystujemy przeliczone wielkości do szacowania parametrów schematu zastępczego oraz do wyznaczenia „efektywnej” przekładni zwojowej,
- 3) Wykonujemy analizę obwodu wg. schematu zastępczego dla transformatora jednofazowego.
- 4) Wyniki analiz przeliczamy na wielkości międzyfazowe dla danej grupy połączeń.