

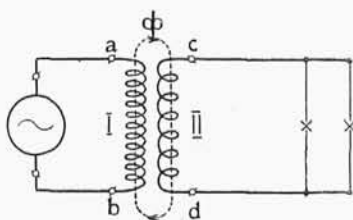
ROZDZIAŁ IV.

TRANSFORMATORY.

64. Zasada budowy.

Transformatorami nazywamy w elektrotechnice przyrządy, służące do przetwarzania pracy prądu zmiennego jednego napięcia na pracę prądu zmiennego napięcia innego, wyższego lub niższego, od poprzedniego.

Zasada budowy polega na zjawisku indukcji prądów zmiennych w pewnym obwodzie tak zwanym wtórnym, który znajduje się w pobliżu drugiego obwodu tak zwanego pierwotnego, rys. 146. W obwodzie pierwotnym mamy źródło prądu, a w obwodzie wtórnym odbiorniki prądu.



Rys. 146.

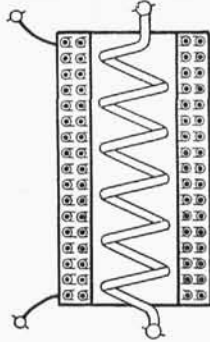
Pomiędzy sobą obwody są skojarzone strumieniem magnetycznym Φ , który przenika cewki, stanowiące transformator.

O ile cewki transformatora są umieszczone jedna w drugiej, rys. 147, lub jedna nad drugą, rys. 148, bardzo blisko do siebie, to możemy uważać w przybliżeniu, że zawsze ten sam strumień magnetyczny przenika obie cewki.

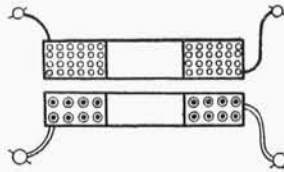
Wtedy siły elektromotoryczne, indukowane w tych cewkach, będą wyrażone wzorami:

$$E_{1t} = - \frac{d\Phi}{dt} z_1 \text{ i } E_{2t} = - \frac{d\Phi}{dt} z_2$$

gdzie z_1 i z_2 są to liczby zwojów tych cewek. Pomijając straty napięcia wewnątrz cewek w przybliżeniu można przyjąć, że liczbowo



Rys. 147.



Rys. 148.

napięcia na zaciskach a i b i c i d są równe siłom elektromotorycznym, a więc dla wartości skutecznych:

$$V_1 = E_1 \text{ i } V_2 = E_2$$

Stąd wypada następujący stosunek:

$$\frac{V_2}{V_1} \cong \frac{z_2}{z_1} = k$$

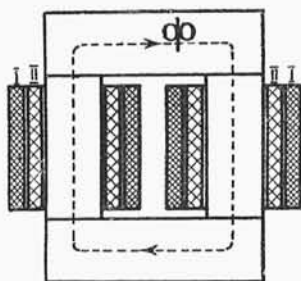
Liczbę k nazywamy przekładnią transformatora.

Prądy, które powstają w transformatorze, zależą przedewszystkiem od oporności odbiorników: im mniejsza tam będzie oporność, tem większy będzie prąd wtórny. Prąd ten ma taką fazę względem prądu pierwotnego, że osłabia nieco strumień magnetyczny i skutkiem tego prąd pierwotny również rośnie, gdyż maleje siła elektromotoryczna, indukowana w pierwotnej cewce E_1 , powstrzymująca dopływ prądu z prądnicy.

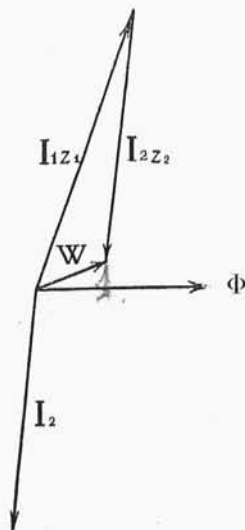
65. Stosunek prądów w transformatorze.

W elektrotechnice prądów silnych transformatory buduje się zawsze z zamkniętym obwodem magnetycznym, rys. 149. Tu cewki

pierwotna i wtórna obejmują strumień magnetyczny, przebiegający w żelaznej ramce, zwykle złożonej z kilku paczek blachy. Strumień magnetyczny jest wywołany sumą geometryczną amperozwojów pierwotnych i wtórnych, rys. 150. Wypadkowe amperozwoje W pokonywują oporność magnetyczną ramy żelaznej i niedoskonałych styków pomiędzy poszczególnymi częściami ramy, czyli tak zwanego szkieletu żelaznego transformatora.



Rys. 149.



Rys. 150.

Wobec tego, że oporność magnetyczna żelaza przy gęstościach linii od 12000 do 14000 gausów stosowanych w praktyce jest mała, a styki mogą stanowić warstwy powietrza o grubości najwyżej 0,005 cm, amperozwoje magnesujące W wypadają małe, i przy normalnem obciążeniu transformatora z wielkiem przybliżeniem można przyjąć, że

$$I_1 z_1 \cong I_2 z_2$$

Stąd:

$$\frac{I_1}{I_2} \cong \frac{z_2}{z_1}$$

przeto:

$$\frac{V_1}{V_2} \cong \frac{I_2}{I_1}$$

Do tego wzoru można dojść także inną drogą. Przyjmując, że obciążenie transformatora jest bezindukcyjne i że straty energii są znikomo małe, możemy napisać:

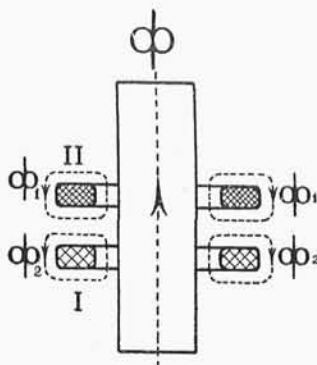
$$V_1 I_1 \cong V_2 I_2$$

Stąd:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

66. Spadek napięcia w transformatorze.

Skutkiem oporności omowej uzwojeń i strumieni magnetycznych rozproszonych Φ_1 i Φ_2 , rys. 151, wywołujących siły elektromotoryczne samoindukcji, napięcia w transformatorze nie są dokładnie



Rys. 151.

proporcjonalne do liczb zwojów cewek: pierwotnej i wtórnej. Napięcie wtórne wypada mniejsze. Różnicę pomiędzy napięciem wtórnem obliczonym według przekładni i napięciem rzeczywistym, nazywamy spadkiem napięcia w transformatorze. Spadek ten wynosi dla transformatorów oświetleniowych zazwyczaj od 2 do 3%, a w transformatorach, przeznaczonych do zasilania silników od 4 do 6%. Uzasadnienie podajemy dalej.

67. Wykres wektorowy obciążonego transformatora.

Napięcie na zaciskach pierwotnych transformatora można wyrazić wzorem wektorowym:

$$\hat{V}_1 = -\hat{E}_1 + \hat{I}_1 x_1 + \hat{I}_1 r_1$$

Tu E_1 — siła elektromotoryczna, wywołana w cewce pierwotnej przez główny strumień magnetyczny,

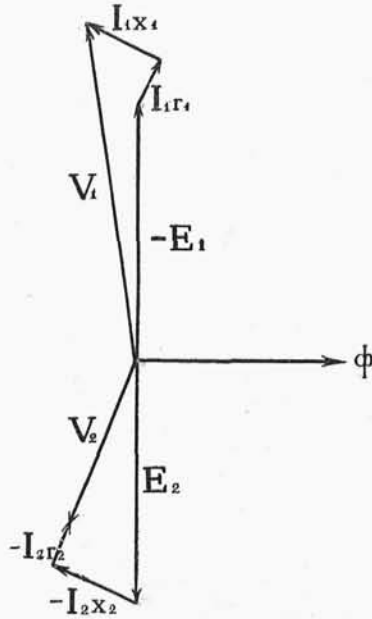
$I_1 x_1$ — spadek napięcia indukcyjny skutkiem magnetycznego rozproszenia w pierwotnej cewce,

$I_1 r_1$ — spadek napięcia omowy w pierwotnej cewce.

Podobnie dla cewki wtórnej, stanowiącej źródło prądu w obwodzie wtórnym:

$$\hat{V}_2 = \hat{E}_2 - \hat{I}_2 x_2 - \hat{I}_2 r_2$$

Przyjmując, że mamy obciążenie bezindukcyjne, wykres wektorowy łączny dla obu obwodów wypada taki, jak pokazano na rys. 152.



Rys. 152.

Układ wektorów oczywiście będzie się zmieniać w zależności od właściwości obciążenia we wtórnym obwodzie, t. j. w zależności od tego, czy obciążenie będzie indukcyjne, czy pojemnościowe i w jakiej mierze.

68. Obliczenie spadku napięcia.

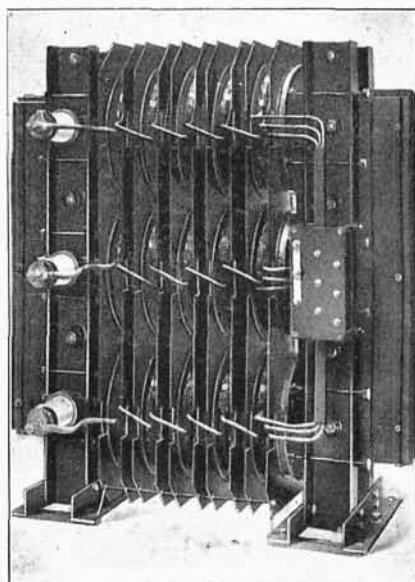
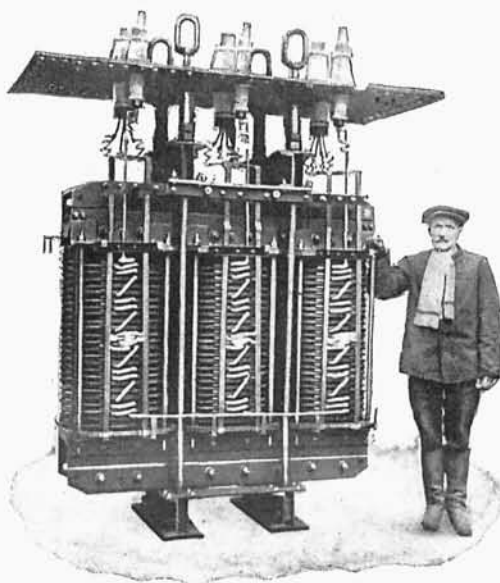
Zredukujmy wykres napięć, rys. 152, do uzwojenia pierwotnego, pamiętając, że

$$\frac{z_2}{z_1} = k$$

Wszystkie wektory wtórnego obwodu zmieńmy na wektory zredukowane:

$$\frac{V_2}{k} \quad \frac{I_2 x_2}{k} \quad \frac{I_2 r_2}{k} \quad \frac{E_2}{k}$$

Tab. V.

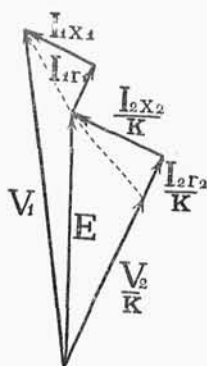


1. Transformator trójfazowy do pogrążenia w oleju, mocy 1250 kVA z pokrywą skrzyni transformatorowej.
2. Transformator trójfazowy, mocy 100 kVA, z chłodzeniem powietrznym, zaopatrzone w blachy chłodzące.

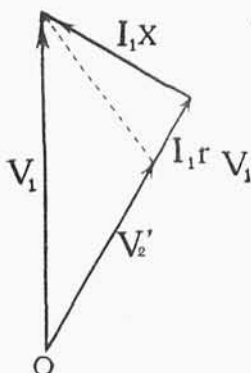
Konstrukcja firmy Polskie Towarzystwo Elektryczne w Warszawie.

Wtedy możemy układ wektorów obwodu wtórnego nałożyć na układ wektorów obwodu pierwotnego tak, aby $\frac{E_2}{k}$ pokryło E_1 , zobaczymy wtedy wyraźnie zależność pomiędzy napięciem wtórnym a pierwotnym.

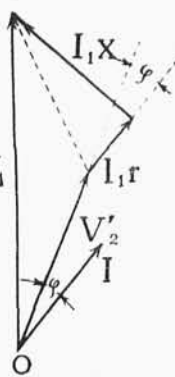
Napięcia te wypadłyby równe, o ile nie byłoby spadków napięć. Na wykresie rys. 153, otrzymanym po nałożeniu, $I_1 x_1$ jest niemal równoległe do $\frac{I_2 x_2}{k}$, co wynika z uwag, poczynionych w § 64-ym.



Rys. 153.



Rys. 154.



Rys. 155.

Zmieniając porządek układu wektorów i oznaczając ogólny spadek omowy napięcia przez $I_1 r$, a indukcyjny przez $I_1 x$, oraz zredukowane napięcie wtórne przez V_2' , otrzymamy wykres wektorowy, podany na rys. 154.

Tu:

$$I_1 x = I_1 x_1 + \frac{I_2 x_2}{k} = I_1 x_1 + \frac{I_1 x_2}{k^2} = I_1 \left(x_1 + \frac{x_2}{k^2} \right)^{1)}$$

Stąd:

$$x = x_1 + \frac{x_2}{k^2}$$

Tak samo:

$$I_1 r = I_1 \left(r_1 + \frac{r_2}{k^2} \right)$$

Jeżeli obciążenie wtórne będzie indukcyjne, to wektory prądów obróca się wstecz i wykres wektorowy przybierze postać, wskazaną na rys. 155.

¹⁾ Przyjmujemy $I_2 = \frac{I_1}{k}$ zgodnie z wywodami § 64.

Spadek napięcia wyraża się tu odcinkiem, który może być w przybliżeniu uważany za sumę rzutów odcinków $I_1 r$ i $I_1 x$ na kierunek V_2' , wobec tego, że kąt pomiędzy V_1 i V_2' jest mały, gdyż $I_1 x$ i $I_1 r$ są odcinki małe w porównaniu do wektorów V_1 i V_2' .

Możemy więc w przybliżeniu obliczyć spadek napięcia w transformatorze ze wzoru:

$$I_1 r \cos \varphi + I_1 x \sin \varphi$$

Z tego samego wykresu można łatwo wyprowadzić i wzór dokładniejszy, w procentach od napięcia pierwotnego.

Założmy:

$$\frac{100}{V_1} (I_1 r \cos \varphi + I_1 x \sin \varphi) = e_1$$

$$\frac{100}{V_1} (I_1 r \sin \varphi - I_1 x \cos \varphi) = e_2$$

wtedy procentowy spadek napięcia będzie ¹⁾:

$$\Delta v = e_1 + 100 - \sqrt{10000 - (e_2)^2}$$

Przy obliczaniu spadku napięcia, należy brać r dla uzwojeń w stanie gorącym ²⁾.

69. Wykres Kappa.

Wpływ zmiany przesunięcia fazy prądu wtórnego względem napięcia wtórnego, na spadek napięcia, wyraża się szczególnie jasno zapomocą wykresu Kappa.

$$^1) \quad V_1 = \sqrt{\frac{e_2^2 V_1^2}{100^2} + \left(\frac{e_1 V_1}{100} + V_2'\right)^2}$$

$$V_2' = V_1 - \frac{\Delta v V_1}{100}, \text{ więc}$$

$$V_1 = \sqrt{\frac{e_2^2 V_1^2}{100^2} + \left(\frac{e_1 V_1}{100} + V_1 - \frac{\Delta v V_1}{100}\right)^2}$$

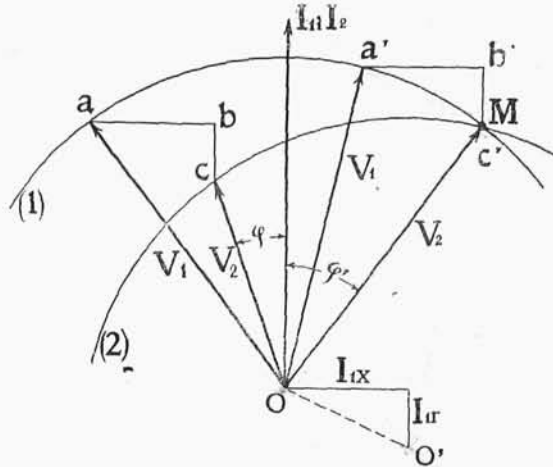
Stąd:

$$\Delta v^2 - 2(e_1 + 100) \Delta v + e_1^2 + e_2^2 + 2e_1 100 = 0$$

²⁾ Zwykle 50°C ponad temperaturę otoczenia, o ile transformator nie jest pogrążony w oleju, a w oleju — 70°C ponad temperaturę otaczającego powietrza. W praktyce obliczamy zmianę napięcia transformatora przy obciążeniu w % od wtórnego napięcia normalnego.

Wykres ten układamy w sposób następujący, rys. 156.

Kierunek pionowy obieramy na rysunku jako stały kierunek wektora I_1 ¹⁾. Przy podstawie wektora I_1 , wykreślamy trójkąt spadków napięć²⁾, prowadząc I_1 r równoległe do I_1 . Z punktów O i O' zakreślamy dwa jednakowe koła (1) i (2) promieniem, którego długość wyraża napięcie pierwotne transformatora V_1 . Jeżeli



Rys. 156.

prąd wtórny spóźnia się względem swego napięcia o kąt φ , to wielobok napięć przybierze położenie $OabcO$. Przy zmianie kąta φ , koniec wektora napięcia V_1 posuwać się będzie po okręgu koła (1), a koniec wektora napięcia V_2 po okręgu koła (2), wynika to stąd, że zawsze odcinek $O'c$ ³⁾ jest równy i równoległy odcinkowi Oa .

Z wykresu widzimy, że w miarę zwiększania się kąta φ napięcie wtórne maleje, a więc spadek napięcia rośnie.

Gdy prąd I_2 zacznie wyprzedzać w fazie napięcie V_2 , to w miarę wzrostu wartości bezwzględnej tej ujemnej różnicy faz, napięcie rośnie.

Przy kącie φ' , jak widać z wykresu, koniec wektora napięcia V_2 znajdzie się w punkcie M przecięcia się okręgów, a więc wtedy $V_2 = V_1$ i spadku napięcia nie będzie. Dalej przy wzroście ujemnej różnicy faz będziemy mieli $V_2 > V_1$, a więc nawet wzrost napięcia.

¹⁾ Zgodny z nim jest również kierunek wektora I_2 .

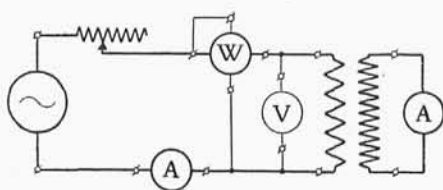
²⁾ Wielkość spadków napięć w porównaniu do wielkości napięć V_1 i V_2 , na rys. 156, jest znacznie przesadzona.

³⁾ Nie wykreślony na rysunku.

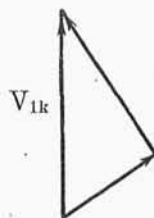
70. Zwarcie transformatora.

W celu doświadczalnego wyznaczenia omowego i indukcyjnego spadku napięcia w transformatorze, przeprowadzamy próbę zwarcia transformatora, rys. 157.

Wtórne zaciski zwieramy zapomocą krótkich przewodów, połączonych z amperomierzem i dobieramy takie napięcie pierwotne, przy którym oba amperomierze wskazują prądy normalne¹⁾.



Rys. 157.



Rys. 158.

Wobec tego, że napięcie wtórne V_2' praktycznie jest równe zeru, wykres, rys. 154, przybiera postać, wskazaną na rys. 158.

Moc, dostarczona do transformatora i wskazana przez watomierz, zużywa się tylko na straty w uzwojeniu.

Straty energii w żelazie są przy zwarcu znikomo małe, gdyż wielkość strumienia magnetycznego przystosowuje się do napięcia na zaciskach pierwotnych, a napięcie to zawsze równoważy się z siłą elektromotoryczną indukowaną i omowym spadkiem napięcia.

Jeżeli oznaczymy wskazanie watomierza, włączonego do obwodu pierwotnego, przy zwarcu obwodu wtórnego przez P_k , to mamy:

$$P_k = I_1^2 r$$

Stąd :

$$I_1 r = \frac{P_k}{I_1}$$

a także:

$$r = \frac{P_k}{I_1^2}$$

otrzymany w ten sposób opór omowy zastępczy wypada zwykle większy od obliczonego według wzoru:

$$r_1 + \frac{r_2}{k^2}$$

¹⁾ Gdy transformator ma dużą przekładnię i wtórne uzwojenie jest na wysokie napięcie, to dla osiągnięcia możliwie większej dokładności przy pomiarach, zwiera się zawsze uzwojenie niskiego napięcia, a ze źródłem prądu łączy się uzwojenie napięcia wysokiego.

jeśli r_1 i r_2 są zmierzone prądem stałym. Zachodzi to wskutek częściowego skupiania się prądu zmiennego w pobliżu powierzchni przewodów oraz z powodu ubocznych strat energii przez prądy wirowe, indukowane w różnych częściach metalowych transformatora.

Opór zastępczy r bywa o kilkanaście procentów większy od oporu, zmierzonego prądem stałym, różnica zależy od szczegółów budowy transformatora.

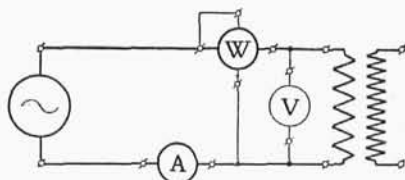
Znając V_{1k} i $I_1 r$, otrzymujemy z trójkąta na rys. 158:

$$I_1 x = \sqrt{(V_{1k})^2 - (I_1 r)^2}$$

V_{1k} zazwyczaj wynosi od 2,5 do 8% napięcia normalnego i mało się różni od $I_1 x$, o ile $I_1 r$ jest znacznie mniejsze od $I_1 x$.

71. Stan jałowy transformatora.

Jeżeli obwód wtórny jest przerwany, rys. 159, to taki stan nazywamy jałowym, gdyż prąd, płynący do transformatora, nie wykonywa pracy pożytecznej.



Rys. 159.

Tu moc, wskazana przez watomierz, zużywa się przede wszystkim na ciepło w żelazie, gdzie mamy pełny strumień magnetyczny zmienny, a więc na histerezę i prądy wirowe. Oprócz tego wytwarza się oczywiście nieco ciepła w uzwojeniach pierwotnych transformatora więc:

$$p_z = P_0 - I_0^2 r_1$$

P_0 — wskazanie watomierza,

p_z — moc, pobrana przez żelazo,

$I_0^2 r_1$ — moc, zużyta na ciepło w uzwojeniu pierwotnym.

Prąd jałowy jest zwykle bardzo znacznie opóźniony w fazie względem napięcia.

Tak, np., dla pewnego transformatora, którego pierwotne napięcie wynosiło 6000 woltów i prąd pierwotny normalny 20 A,

prąd w stanie jałowym był 1,2 A, t. j. 6% normalnego, a $\cos \varphi_0 = 0,083$ to znaczy, że prąd opóźniał się w fazie względem napięcia o 85° .

Im gorsze jest żelazo w transformatorze i im mniej starannie są wykonane styki pomiędzy poszczególnymi częściami szkieletu żelaznego tym większy będzie prąd jałowy.

72. Sprawność transformatora.

W transformatorze, przy normalnem obciążeniu, mamy straty w żelazie i w miedzi: w żelazie skutkiem prądów wirowych i histerezy, a w miedzi skutkiem oporu omowego uzwojeń.

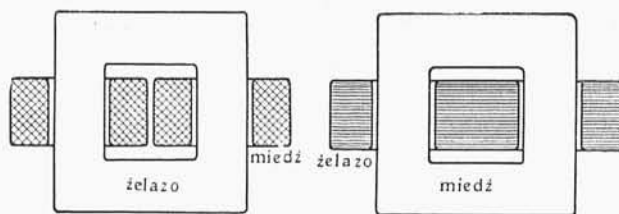
Straty w żelazie pozostają niemal stałe przy wszystkich obciążeniach tak, że zwykle straty, zmierzone w stanie jałowym, uważane są za straty w żelazie przy obciążeniu.

Natomiast straty w uzwojeniach są proporcjonalne do drugiej potęgi prądu, a więc do drugiej potęgi obciążenia.

W zależności od mocy transformatora η zmienia się od 0,93 do 0,98, jeżeli moc P_2 wynosi od 1 do 2000 kVA¹⁾.

73. Budowa transformatorów.

Są dwa układy stosowane przy budowie transformatorów: układ rdzeniowy, rys 160 i układ płaszczowy, rys. 161.



Rys. 160.

Rys. 161.

Położenia miedzianych cewek i żelaznego szkieletu w obu układach zmieniają się nawzajem.

Przy prądzie 50 okresowym, szkielet żelazny sporządza się z żelaza nakrzemionego w postaci blach o grubości 0,3 mm, natomiast przy 25 okresach można używać blach, stosowanych przy budowie maszyn elektrycznych, o grubości 0,5 mm. Blachy, z których sporządza się szkielet, są pokrywane dla izolacji lakierem, lub oklejane bibułą grubości 0,02 do 0,03 mm. Blachy

¹⁾ Szczegóły patrz § 167.

są ściskane zapomocą bolców lub nitów. Bolce i nity izoluje się dokładnie od blach w celu uniknięcia powstawania obwodów elektrycznych zamkniętych, w których mogłyby wytwarzać się prądy elektryczne wewnętrzne, wywołujące szkodliwe ciepło.

Wogóle w całej konstrukcji transformatora trzeba unikać możliwości powstawania tych szkodliwych prądów wewnętrznych, indukowanych czy to przez główny strumień magnetyczny, czy też przez strumienie rozproszenia.

Duże przekroje szkieletów żelaznych posiadają w środku szczeliny do przewietrzania.

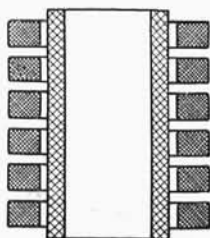
Cewki transformatorów bywają dwojakie: walcowe lub krążkowe.

Również dwojakie są układy uzwojeń.

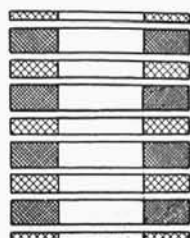
Pierwszy z cewką walcową niskiego napięcia, którą otaczają cewki krążkowe wysokiego napięcia, rys. 162.

Drugi — z cewkami krążkowymi wysokiego i niskiego napięcia przekładanemi, rys. 163.

Cewki niskiego napięcia są dokładnie izolowane od cewek wysokiego napięcia zapomocą warstwy materiału izolacyjnego odpowiedniej grubości, również odpowiednio izoluje się uzwojenia od żelaza.



Rys. 162.



Rys. 163.

Dla jeszcze lepszej izolacji i zmniejszenia wymiarów transformatora używa się bardzo często chłodzenie olejowe, wtedy transformator pracuje pogrążony w oleju, który wypełnia skrzynię żelazną.

Dla szybszego chłodzenia oleju ścianki skrzyni transformatorowej bywają wykonywane z blachy falistej, lub zaopatrywane w płaskie wystające komory czy rury, przez co znacznie zwiększa się powierzchnia chłodząca.

Transformatory olejowe na moc bardzo wielką, wynoszącą kilka tysięcy kilowoltamperów, zaopatruje się zwykle w chłodzenie wodne, w osobnej chłodnicy, przez którą stale cyrkuluje olej transformatora.

Dla uchronienia oleju od niepożądanych chemicznych wpływów powietrza atmosferycznego, skrzynie transformatorowe zaopatruje się nieraz w tak zwane konserwatory. Są to małe kociołki cylindryczne umieszczone nad górną pokrywą skrzyni transformatorowej, szczelnie zamknięte i połączone rurą ze skrzynią transformatora. Olej wypełnia skrzynię i rurę całkowicie, w konserwatorze zaś pozostawia się trochę powietrza, które zapewnia swobodę rozszerzania się całej masy oleju.

Moc transformatorów zawsze podajemy na zaciskach wtórnych w kilowoltamperach, gdyż wielkość transformatora zależy od tej mocy jaką on może dać przy obciążeniu bezindukcyjnym.

Szereg normalnych napięć stosowanych przy prądzie zmiennym jest następujący: 24, 42, 125, 220, 380, 500, 1000, 3000, 6000, 10000, 15000, 20000, 30000, 45000, 60000, 80000, 100000, 150000, 200000, 300000 woltów.

Transformatory dla probierni materiałów izolacyjnych bywają budowane na napięcia znacznie wyższe — do 2 milionów woltów.

Urządzenia tego rodzaju składają się zwykle z kilku transformatorów połączonych w kaskadę, przy zastosowaniu stopniowo coraz lepszej izolacji rdzeni żelaznych od ziemi.

Przykłady transformatorów wykonanych¹⁾:

1. Transformator trójfazowy firmy „Elin“ na 40 kVA, 5300/134 woltów, 50 okresów, chłodzenie powietrzne, ma żelazo o przekroju 105 cm² w rdzeniach i 136 cm² w jarzmie, wagę żelaza 210 kg, straty w żelazie 470 watów. Układ połączeń: gwiazda-trójkąt. Liczba zwojów 1110 i 52 na fazę, drut 2,27 mm² okrągły w pierwotnym uzwojeniu i prostokątny 12 × 3,2 mm² we wtórnym, waga miedzi 71,5 kg, straty w miedzi 780 watów, napięcie zwarcia 3,7%, sprawność 97%.

2. Transformator trójfazowy firmy AEG, 1900 kVA, 70000/7200—6000 woltów, 50 okresów, w oleju.

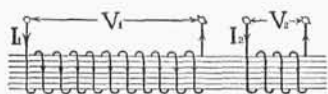
Przekrój rdzenia 690 cm², jarzma 840 cm², waga żelaza 4150 kg. Straty w żelazie 14000 watów. Układ połączeń: pierwotne gwiazda, wtórne trójkąt, zwojów pierwotnych 1818, wtórnych 270 + 54. Drut w pierwotnym uzwojeniu okrągły średnicy 2,6 mm, we wtórnym taśma 3 × 10 mm² i 3 × 18 mm². Waga miedzi 845 kg, straty w miedzi 18200 albo 16200 watów. Napięcie zwarcia 5,1%. Sprawność 98,4%. Waga oleju 6300 kg.

¹⁾ E. v. Rziha u. J. Seidener — Starkstromtechnik.

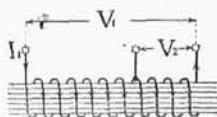
74. Autotransformatory.

Przy małej przekładni transformatora, np., 2:1, lub jeszcze mniejszej, zamiast osobnego uzwojenia, rys. 164, bierzemy odgałęzienie od uzwojenia napięcia wyższego, rys. 165.

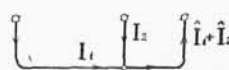
Wtedy w odcinku uzwojenia, wspólnym dla niższego i wyższego napięcia, przepływa prąd równy sumie geometrycznej prądów: I_1 oraz I_2 . Wynika to z uwzględnienia dodatnich kierunków, wskazanych na rys. 164, oraz na rozwiniętym schemacie na rys. 166.



Rys. 164.



Rys. 165.

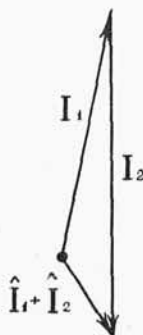


Rys. 166.

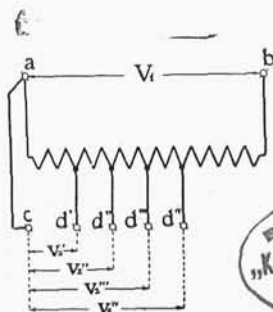
Pamiętać jednak należy, że prądy I_1 i I_2 są przesunięte w fazie niemal o 180° , i I_2 jest większy od I_1 , przeto, jak wynika z wykresu wektorowego na rys. 167, prąd w odcinku wspólnym uzwojenia równa się niemal różnicy algebraicznej:

$$I_2 - I_1$$

Przez to daje się zaoszczędzić na miedzi, oraz zmniejszyć straty na ciepło w uzwojeniu.



Rys. 167.



Rys. 168

Na tej samej zasadzie buduje się autotransformatory stopniowe, rys. 168, w których napięcie wtórne można zmieniać skokami, odprowadzając prąd od cd' , cd'' i t. d.

$$V_2''' > V_2'' > V_2' > V_2$$

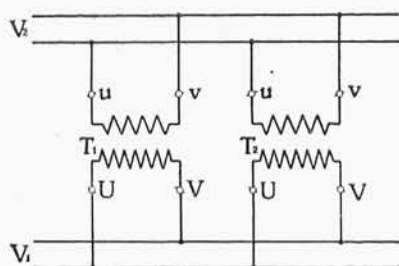
Autotransformatory mają zastosowanie głównie do lamp łukowych, a transformatory stopniowe do rozruchu zwartych silników asynchronicznych.



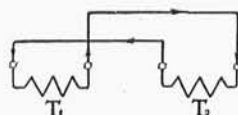
75. Równoległe połączenie kilku transformatorów.

Jeżeli do zasilania pewnej sieci prądem, istniejący transformator nie wystarcza, to włącza się drugi równolegle.

Czasem i w nowym urządzeniu, zamiast jednego wielkiego transformatora, włącza się kilka mniejszych równolegle, aby w razie uszkodzenia jednego można było, chociaż częściowo, zasilać sieć z pozostałych, lub też potrzebny jest transformator rezerwowy.

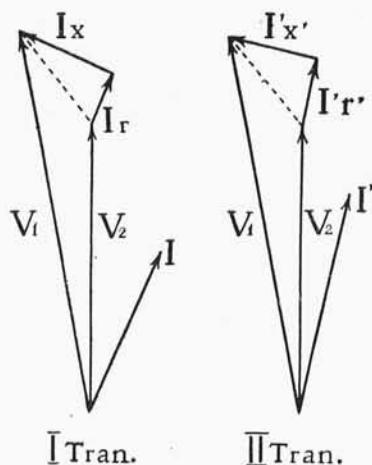


Rys. 169.



Rys. 170.

Jeżeli sieć niskiego napięcia rozciąga się na znaczny obszar, to w celu uniknięcia znacznych spadków napięcia, zasilamy ją w kilku punktach, zapomocą oddzielnych transformatorów, które będą ze sobą również połączone równolegle.



Rys. 171.

Rozważmy transformatory jednofazowe, rys. 169. Dla prawidłowego działania, takie transformatory powinny samoczynnie brać na siebie obciążenie proporcjonalne do ich mocy normalnej, określonej przez konstruktora i zaznaczonej na tabliczce cechowej,

poza tem nie powinny powstawać wewnętrzne prądy wyrównawcze w obwodzie wtórnych cewek, połączonych szynami, rys. 170. Dla osiągnięcia tego, transformatory, które mają być połączone równolegle, powinny mieć:

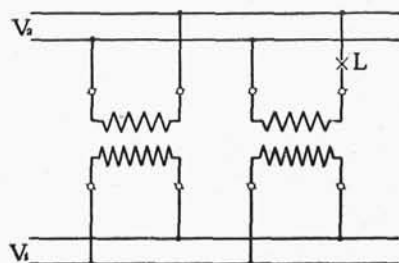
1. równe napięcia pierwotne i wtórne w stanie jałowym,
2. równe napięcia przy zwarciu, co powoduje równy spadek napięcia przy obciążeniu (zwykle wystarcza dokładność $\pm 10\%$),
3. równe stosunki spadku napięcia omowego do spadku napięcia indukcyjnego. Jeżeli te stosunki nie byłyby równe, to, jak widać z rys. 171, prądy transformatorów nie byłyby ze sobą w fazie. Przez to prąd wypadkowy, pobierany przez sieć, nie byłby najekonomiczniejszy, gdyż dla otrzymania pewnego prądu wypadkowego, dwa prądy składowe wypadną najmniejsze wtedy, gdy będą zgodne w fazie.

Zachowanie powyższych warunków, zapewnia równość napięć na transformatorach przy wszystkich obciążeniach.

Włączając równolegle dwa transformatory, należy baczyć, aby połączenia z przewodami wysokiego i niskiego napięcia były wykonane symetrycznie, jak na rys. 169.

Tu można powodować się umownymi oznaczeniami końcówek.

W Europie środkowej końcówki wysokiego napięcia oznaczają się zazwyczaj dużymi literami „U” i „V”, a odpowiednie końcówki niskiego napięcia — małymi literami „u” i „v”.



Rys. 172.

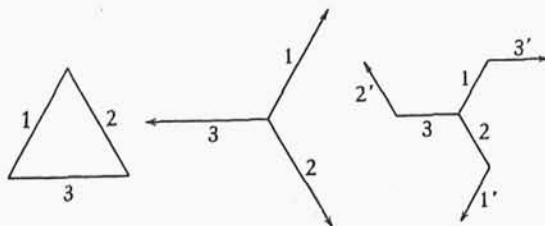
Dla uniknięcia pomyłek i dla sprawdzenia, należy, przy pierwszej próbie równoległego połączenia, w jeden z łączników niskiego napięcia, rys. 172, wprowadzić próbną lampkę żarową. Jeżeli nie zaświeci, to dobrze.

Przy łączeniu równoległym transformatorów trójfazowych, należy przestrzegać jeszcze dwóch dodatkowych warunków, wywołanych koniecznością zgodności faz napięć tych zacisków

różnych transformatorów, które mają być przyłączone do tych samych przewodów.

Pierwszym warunkiem powyższej zgodności faz jest odpowiedni układ skojarzenia faz na niskim i wysokim napięciu.

Wogóle rozróżniamy trzy układy połączeń uzwojeń fazowych w transformatorach, rys. 173: 1) w trójkąt, 2) w gwiazdę i 3) w zygzak.

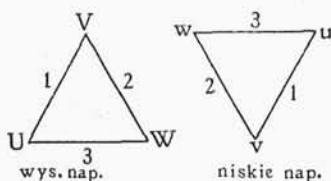


Rys. 173.

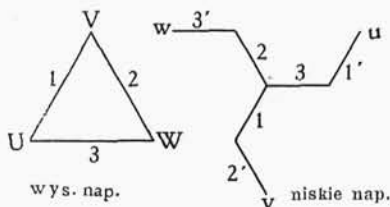
W układzie zygzakowym napięcia pomiędzy zaciskami powstają, jak widać z rysunku, przez skojarzenie połówek uzwojeń fazowych: ma to na celu złagodzenie różnic w obciążeniu faz w razie nierównych prądów, pobieranych przez odbiorniki z przewodów trójfazowej sieci.

Otóż z tych trzech sposobów skojarzenia uzwojeń można utworzyć dużo układów, które jednak nie wszystkie dają się łączyć równolegle, gdyż przy uzgodnieniu faz uzwojeń pierwotnych, wtórne mogą być niezgodne.

Niewątpliwie dają się łączyć układy jednakowe, a pozatem i niektóre różne, ale tak dobrane, że przy uzgodnieniu faz napięć



Rys. 174.



Rys. 175.

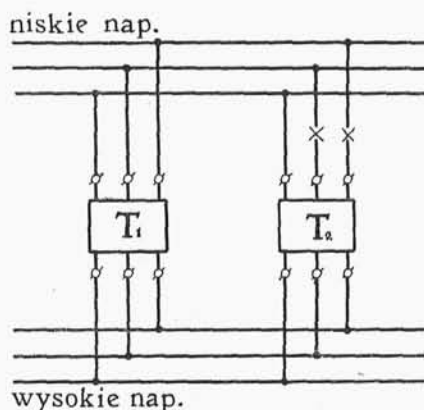
pierwotnych i wtórne również będą w fazie. Np., układ rys. 174, można połączyć równolegle z układem, rys. 175¹⁾.

Drugim nieodzownym warunkiem równoległego łączenia jest przyłączanie odpowiednich zacisków do tych samych przewodów, gdyż tylko wtedy fazy napięć będą zgodne.

¹⁾ Szczegóły — patrz przepisy na transformatory.

Tu znowu pomocnem jest znakowanie zacisków. W środkowej Europie przyjęto znakowanie pokazane na rys. 174 i 175. „U” „V” „W” oznacza zaciski wysokiego napięcia, „u” „v” „w” — zaciski niskiego napięcia. Czwarty zacisk, połączony w razie potrzeby z punktem zerowym, oznacza się zerem.

Gdy potrzeba skontrolować połączenia, umieszczamy w dwóch fazach przyłączanego transformatora na niskim napięciu dwie lampki próbne, rys. 176.

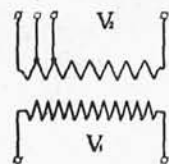


Rys. 176.

Jeśli lampki nie świecą, wszystko jest w porządku i można zaciski transformatora połączyć wprost z szynami.

Praktycy zalecają unikać równoległego łączenia transformatorów przy stosunku normalnej mocy transformatorów, większym od 3:1.

Dla ułatwienia przystosowania do siebie napięć równoległe łączonych transformatorów, lub też w celu ustalenia wysokości wtórnego napięcia do wielkości wymaganej przez odbiorniki, uzwojenia wtórne transformatorów zaopatruje się w tak zwane zaczepek y, t. j. odgałęzienia w kilku miejscach przy końcu cewek, rys. 177.



Rys. 177.

Przestawiając odprowadzający przewód z jednego odgałęzienia na drugie, można zmieniać wtórne napięcie zwykle w granicach $\pm 4\%$ napięcia normalnego.

ROZDZIAŁ V.

PRZETWARZANIE PRĄDU TRÓJFAZOWEGO NA PRĄD STAŁY.

76. Przetwornica dwumaszynowa silnikowo-prądnicowa.

Gdy zależy na tem, aby prąd trójfazowy był zupełnie niezależny od prądu stałego, to bierzemy dwie maszyny, zazwyczaj mające wał wspólny lub wały sprzężone sztywnem czy elastycznym sprzęgłem.

Jedna z tych maszyn jest silnikiem elektrycznym, druga zaś prądnicą; obie maszyny mogą być przystosowane odpowiednio do rodzaju prądu, który bierzemy z sieci i, który mamy dostarczać.

Regulacja napięcia prądu stałego, o ile jest potrzebna, nie nastręcza żadnych trudności. Wielką jednak wadą takich zespołów dwumaszynowych jest ich mały współczynnik sprawności.

Pochodzi to oczywiście stąd, że mamy tu dwustopniowe przekształcanie energii.

77. Przetwornica jednomaszynowa.

Lepszą sprawność od przetwornic dwumaszynowych mają przetwornice jednomaszynowe.

Przetwornica jednomaszynowa stanowi prądnicę prądu stałego, która z przeciwnej strony kolektora ma na wale pierścienie, połączone z uzwojeniem twornika w ten sposób, jak w prądnicach prądu zmiennego.

Przez te pierścienie doprowadzamy prąd zmienny, który w znacznej części przechodzi wprost na kolektor.

Niewielka część energii prądu zmiennego, wpływającego do przetwornicy, zużywa się na wprowadzenie w ruch wirowy twornika maszyny.

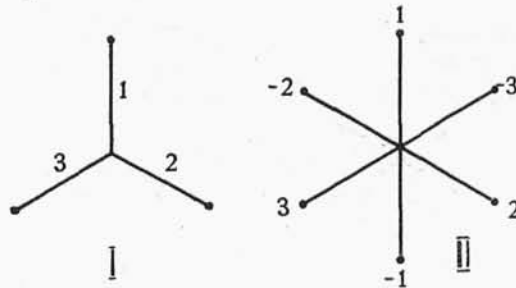
Dla przykładu podaję zestawienie sprawności dwumaszynowej przetwornicy, prądu zmiennego ze sprawnością przetwornicy jednomaszynowej, przy różnych stopniach obciążenia, wykonanej na moc normalną $P=300$ kw.

M O C	SPRAWNOŚĆ	
	dwumasz.	jednomasz.
P	0,87	0,92
$\frac{3}{4}P$	0,86	0,90
$\frac{1}{2}P$	0,82	0,87
$\frac{1}{4}P$	0,73	0,83



Napięcie prądu stałego w przetwornicy jednomaszynowej jest w ścisłej zależności od napięcia prądu zmiennego według zasad, omówionych w §§ 38 i 39-ym.

Jeżeli napięcie sieci trójfazowej jest nieodpowiednie, to oczywiście trzeba przed przetwornicą wprowadzić transformator. Zresztą ten transformator i bez tego jest potrzebny, gdyż przetwornice są tańsze i sprawniejsze, gdy przetwarzają prąd sześciofazowy na stały.



Uzwojenie pierwotne.

Uzwojenie wtórne.

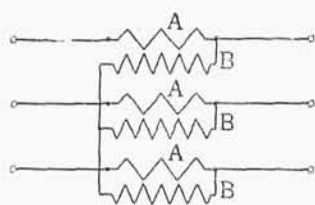
Rys. 178.

Z tego więc powodu zawsze przetwarzamy wpierw prąd trójfazowy na sześciofazowy, a potem sześciofazowy na stały.

Przetwarzanie prądu trójfazowego na sześciofazowy odbywa się w zwykłych transformatorach, w których wtórne uzwojenia są

podzielone na połówki i połączone według zasady podanej na rys. 178.

Przy tej transformacji oczywiście odrazu można przystosować i napięcie. Dla regulacji napięcia prądu stałego, należy w obwód prądu zmiennego włączyć w szereg dławik o zmiennej indukcyjności, lub też jeszcze lepiej obrotowy transformator, w którym, przez obracanie zwojów pierwotnych względem wtórnych, można



Rys. 179.

zmieniać przekładnię. Taki transformator wytwarza zazwyczaj tylko dodatkowe napięcie, które dodaje się lub odejmuje od napięcia transformatora głównego. Układ połączeń takiego trójfazowego transformatora dawkowego widzimy na rys. 179; tu prąd, odgałęziony do uzwojeń B,

wzniera przez indukcję dodatkowe siły elektromotoryczne w uzwojeniach A.

Niektóre wiadomości o rozruchu tych przetwornic podane są w rozdziale o silnikach synchronicznych¹⁾.

Gdy kilka przetwornic pracuje równolegle na jedną sieć, to każda z nich powinna mieć swój własny transformator.

Jeżeliby wszystkie przetwornice zasilać z jednego transformatora, to z jednej strony odpowiednie szczotki prądu stałego, a z drugiej strony odpowiednie szczotki prądu zmiennego byłyby między sobą połączone przez szyny zbiorcze o małym oporze i niewielkie naruszenie symetrii w oporach przejściowych kontaktów szczotek, mogłoby spowodować nieodpowiedni rozptyw prądów i znaczne przeciążenie poszczególnych szczotek.

Gdy kilka przetwornic pracuje równolegle, lub przetwornice pracują równolegle ze zwykłymi prądnicami, czy też z baterią akumulatorów, to dla osiągnięcia prawidłowego rozdziału obciążeń, nieraz wypada zaopatrywać przetwornice po stronie prądu trójfazowego w dławiki i po stronie prądu stałego w uzwojenia szeregowo na magniesnicy, zlekka rozmagnesowujące magniesnicę.

¹⁾ O przetwornicach kaskadowych patrz § 139.