

3. PODSTAWY FIZYCZNE DZIAŁANIA MASZYN ELEKTRYCZNYCH

3.1. POJĘCIA PODSTAWOWE

Maszyna elektryczna jest to urządzenie, które na zasadzie indukcji magnetycznej przetwarza energię albo bez udziału ruchu mechanicznego (transformator), albo z udziałem ruchu mechanicznego (maszyna elektryczna wirująca albo liniowa).

W maszynie elektrycznej wirującej część ruchoma wykonuje ruch obrotowy. Przy nieskończonym wielkim promieniu obrotu ($R = \infty$) ruch postępowy może być traktowany jako krańcowy przypadek ruchu obrotowego. W tym rozumieniu maszyna elektryczna liniowa (o ruchu postępowym) może być traktowana jako krańcowy przypadek maszyny elektrycznej wirującej.

Funkcją spełnianą przez transformator jest przetwarzanie energii elektrycznej o danych parametrach (np. o danym napięciu i danym prądzie) na energię elektryczną o innych (na ogół) parametrach.

Przyjmując za kryterium klasyfikacyjne funkcję spełnianą przez maszyny elektryczne wirujące można wyodrębnić następujące grupy tych maszyn:

- prądnice, czyli generatory, przetwarzające energię mechaniczną na elektryczną;
- silniki, czyli motory, przetwarzające energię elektryczną na mechaniczną;
- przetwornice, przetwarzające energię elektryczną jednego rodzaju (np. prądu przemiennego) na energię elektryczną innego rodzaju (np. prądu stałego).

W każdej maszynie elektrycznej kierunek przepływu energii może być zmienny, np. każda prądnica może także pracować jak silnik, każdy silnik może także pracować jak prądnica, każdy transformator może przetwarzać energię o wyższym napięciu na energię o niższym napięciu i na odwrót.

Stojan (stator) jest to część nieruchoma, a *wirnik* (rotor) jest to część wirująca maszyny elektrycznej wirującej.

Twornik (może to być stojan albo wirnik) jest to część maszyny wirującej, do której doprowadza się energię elektryczną do przetworzenia, albo od której odprowadza się energię elektryczną przetworzoną w maszynie.

Magneśnica (może to być także stojan albo wirnik) jest to część maszyny elektrycznej wirującej, służąca do wytworzenia strumienia magnetycznego, ale w której nie występuje przetwarzanie energii (z wyjątkiem zjawiska dyssypacji).

Każda maszyna elektryczna ma obwód dla strumienia magnetycznego Φ , czyli rdzeń, i obwód dla prądu, czyli *uzwojenie*. Uzwojenie musi mieć dużą konduktancję G , czyli małą rezystancję R , a więc musi być wykonane z materiału o małej rezystywności ρ , najczęściej z miedzi, czasem z aluminium. Rdzeń musi mieć dużą permeancję Λ , a więc musi być wykonany z materiału o dużej przenikalności magnetycznej μ , najczęściej z żelaza.

Części rdzenia, w których strumień jest niezmienny w czasie i względem których jest nieruchomy, są wykonane jako odkuwki ze stali magnetycznej o dużej przenikalności μ .

Zmiennosc strumienia w rdzeniu może być spowodowana zmiennością strumienia w czasie albo zmianą położenia strumienia względem rdzenia (współrzędnej x), czyli

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.1)$$

Zmienność strumienia w rdzeniu powoduje powstawanie *strat w rdzeniu*

$$P_{Fe} = P_h + P_w \quad (3.2)$$

przy czym: P_h – straty od histerezy; P_w – straty od prądów wirowych.

Dla zmniejszenia strat od prądów wirowych rdzenie wykonuje się z blach spakietowanych w płaszczyznach równoległych do kierunku strumienia, nakrziemionych (dla zwiększenia rezystywności) i izolowanych między sobą przez oklejenie jednostronne cienkim papierem, pokrycie lakierem izolacyjnym albo utlenienie powierzchni. Blachy nakrziemione są kruche i twarde. W blachach do maszyn wirujących zawartość krzemu dochodzi do 2,5%, a w blachach transformatorowych, których obróbka mechaniczna jest prostsza, do 4%. W dobrze nakrziemionych blachach walcowanych na gorąco jest $P_w \approx 0,25P_{Fe}$ i $P_h \approx 0,75P_{Fe}$. Zmniejszenie strat od histerezy można uzyskać przez walcowanie blach na zimno, dzięki czemu uzyskuje się odpowiednią strukturę krystaliczną materiału. Blachy walcowane na zimno mogą mieć budowę anizotropową: dużą permeancję w kierunku zgodnym z kierunkiem walcowania i małą permeancję w kierunku prostopadłym do kierunku walcowania. Takie blachy mogą być stosowane do budowy transformatorów, gdzie łatwo można blachy ułożyć tak, aby kierunek o dużej permeancji był zgodny z kierunkiem przewodzonego strumienia. Do budowy maszyn wirujących muszą być stosowane blachy o budowie praktycznie izotropowej, co można uzyskać przez odpowiednią obróbkę. Dobre właściwości blach (małe straty, dużą permeancję) można uzyskać także przez odpowiednią obróbkę termiczno-mechaniczną blach nienakrziemionych (miękkich). W przybliżeniu *stratność blach* (straty na jednostkę masy) od histerezy p_h i od prądów p_w można wyrazić wzorami

$$p_h = \varepsilon \frac{f}{100} \left(\frac{B_m}{1,5} \right)^k \quad (3.3)$$

$$p_w = \sigma \left(\frac{f}{100} \right)^2 \left(\frac{B_m}{1,5} \right)^k \quad (3.4)$$

w których: f – częstotliwość przemagnesowywania, w Hz; B_m – amplituda indukcji w T; ε, σ – współczynniki zależne od rodzaju materiału.

Współczynnik potęgowy $k \approx 2$ (dla bardzo małych indukcji jest $k < 2$, przy indukcjach większych od 1,5 T jest $k > 2$). Przy $f = \text{const}$ całkowita stratność wyraża się wzorem

$$p_{Fe} \approx p_h + p_w = cB_m^2 \quad (3.5)$$

Przy $f = 50$ Hz i $B_m = 1$ T stratność całkowita blach gorąco-walcowanych wynosi zwykle 1,3÷2,7 W/kg, a blach zimnowalcowanych ok. 0,5 W/kg.

Napięcie indukowane w uzwojeniu (albo w zezwoju) można wyrazić wzorem

$$u_i = \frac{d\Psi}{dt} = \frac{\partial\Psi}{\partial t} + \frac{\partial\Psi}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (3.6)$$

w którym Ψ – strumień skojarzony z tym uzwojeniem. Wielkość

$$u_{it} = \frac{\partial\Psi}{\partial t} \quad (3.7)$$

nazywa się *napięciem indukowanym transformacji*. Jest to napięcie indukowane na skutek zmian strumienia magnetycznego w funkcji czasu. Wielkość

$$u_{ir} = \frac{\partial\Psi}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (3.8)$$

nazywa się *napięciem indukowanym rotacji*. Jest to napięcie indukowane na skutek zmiany strumienia magnetycznego skojarzonego z uzwojeniem wywołanej ruchem (rotacją) uzwojenia względem strumienia, przy czym x oznacza np. odległość osi strumienia magnetycznego od pewnego punktu rdzenia, na którym jest uzwojenie. Przykładem napięcia transformacji jest napięcie indukowane w transformatorze. Przykładem napięcia rotacji jest napięcie indukowane w maszynie prądu stałego, w maszynie synchronicznej i w maszynie indukcyjnej. W uproszczeniu strumień skojarzony $\Psi = z\Phi$, przy czym z – liczba zwojów; $\Phi = cB$ – strumień, B – indukcja. Stąd wynika, że

$$U_i = cB_m \quad (3.9)$$

czyli napięcie indukowane (skuteczna wartość) jest proporcjonalne do amplitudy indukcji (jeśli indukcja zmienia się w czasie sinusoidalnie $B = B_m \sin \omega t$, albo na obwodzie maszyny jest rozłożona sinusoidalnie) albo do stałej wartości indukcji (jeśli indukcja na obwodzie maszyny ma stałą wartość B_m). Straty w rdzeniu P_{Fe} są równe iloczynowi masy rdzenia M_{Fe} i stratności p_{Fe} , więc straty w rdzeniu

$$P_{Fe} \approx cU_i^2 \quad (3.10)$$

W przybliżeniu można uważać, że w maszynie elektrycznej $U \approx U_i$ (U – napięcie na zaciskach). Zatem

$$P_{Fe} \approx cU^2 \quad (3.11)$$

W maszynach wirujących powstają *straty mechaniczne* P_m , składające się ze strat w łożyskach i strat wentylacyjnych (od tarcia wirnika o medium chłodzące, strat

w wentylatorze itp). Sumę strat w rdzeniu i strat mechanicznych nazywa się *stratami jałowymi*

$$P_0 = P_m + P_{Fe} \quad (3.12)$$

Straty mechaniczne przy stałej prędkości obrotowej mają wartość stałą.

W uzwojeniu o rezystancji R (zmierzonej prądem stałym), przez które płynie prąd I , powstają *podstawowe straty obciążeniowe*

$$P_{Cup} = RI^2 \quad (3.13)$$

Rezystancja R miedzi i aluminium zmienia się ze zmianą temperatury ϑ według zależności

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{235 + \vartheta_1}{235 + \vartheta_2} \quad (3.14)$$

Zgodnie z tym wzorem należy przeliczać straty do odpowiedniej temperatury.

Jeśli w obwodzie prądu znajduje się zestyk ruchomy (np. zestyk szczotka – komutator albo szczotka – pierścień ślizgowy), to spadek napięcia na tym zestyku $U_p \approx \text{const}$, niezależnie od wartości prądu. Wtedy straty na tym elemencie

$$P_p = U_p I \quad (3.15)$$

W niektórych maszynach (prądu stałego, synchronicznych) są obwody wzbudzenia o rezystancji R_f , przez które płynie prąd wzbudzenia I_f , wywołując *straty wzbudzenia*

$$P_f = R_f I_f^2 \quad (3.16)$$

Ponadto wydzielają się różne straty dodatkowe (np. na skutek nierównomiernego rozkładu prądu w przekroju przewodu, od wyższych harmonicznych pola magnetycznego itd.). Suma wszystkich strat P_i zamienia się na ciepło. Aby temperatura poszczególnych elementów nie przekroczyła dopuszczalnej wartości, maszyna musi być odpowiednio chłodzona. Przy *chłodzeniu pośrednim* medium chłodzące (w maszynie wirującej powietrze albo wodór, w transformatorze powietrze albo olej) omywa z zewnątrz elementy, w których wydzielają się straty (rdzeń, uzwojenie z izolacją). Przy *chłodzeniu bezpośrednim* dużych maszyn wirujących medium chłodzące (wodór albo woda w obiegu zamkniętym) przechodzi wewnątrz przewodów z prądem. Chłodzenie bezpośrednie jest bardziej intensywne niż pośrednie. Ruch medium chłodzącego gazowego jest najczęściej wymuszony przez odpowiednie wentylatory. Ruch wody, często także oleju, jest wymuszony przez pompy.

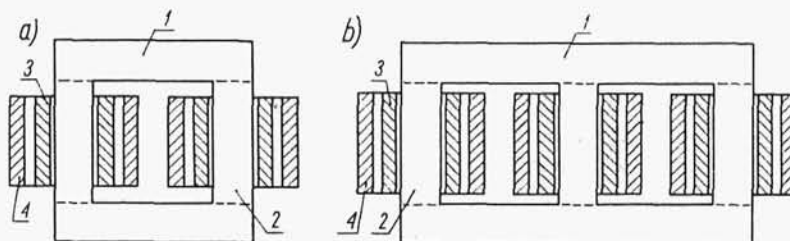
Pomiędzy uzwojeniem i rdzeniem jest izolacja uzwojeń. Poszczególne pręty uzwojenia wielozwojnego mają izolację zwojów.

3.2. TRANSFORMATORY

3.2.1. Zasada budowy

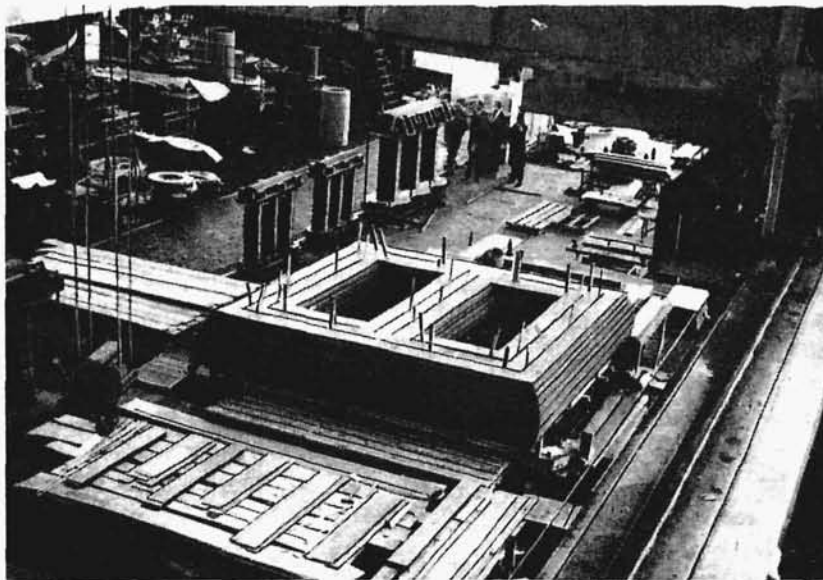
Zasadniczymi elementami czynnymi są: *rdzeń* (droga dla strumienia magnetycznego) i *uzwojenie* (droga dla prądu). Na rysunku 3.1 pokazano szkice elementów transformatorów.

Rdzeń transformatora składa się z jarzma (1) i kolumn (2). Na kolumnach w odległości ustalonej przez izolację (nie uwidocznioną na rysunkach) jest osadzone cylindrycznie nawinięte uzwojenie niższego (dolnego) napięcia (3) i wyższego (górnego) napięcia (4). Między uzwojeniem górnego i dolnego napięcia jest szczelina, w środku której jest umieszczona niewidoczna na rysunku tuleja izolacyjna. W transformatorze jednofazowym uzwojenie fazy (dolnego i górnego napięcia) jest osadzone na obydwóch kolumnach. W transformatorze trójfazowym na każdej kolumnie znajduje się uzwojenie innej fazy (dolnego i górnego napięcia).



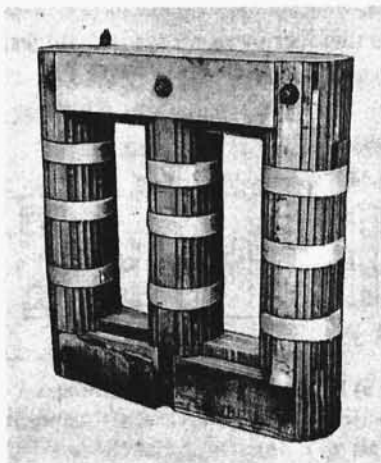
Rys. 3.1. Elementy transformatora: a) jednofazowego; b) trójfazowego
1 – jarzmo, 2 – kolumna, 3 – uzwojenie niższego napięcia, 4 – uzwojenie wyższego napięcia

nego) napięcia (4). Między uzwojeniem górnego i dolnego napięcia jest szczelina, w środku której jest umieszczona niewidoczna na rysunku tuleja izolacyjna. W transformatorze jednofazowym uzwojenie fazy (dolnego i górnego napięcia) jest osadzone na obydwóch kolumnach. W transformatorze trójfazowym na każdej kolumnie znajduje się uzwojenie innej fazy (dolnego i górnego napięcia).



Rys. 3.2. Rdzeń transformatora 240 MV·A, 110kV firmy Elta w czasie składania (fot. AGPOL)

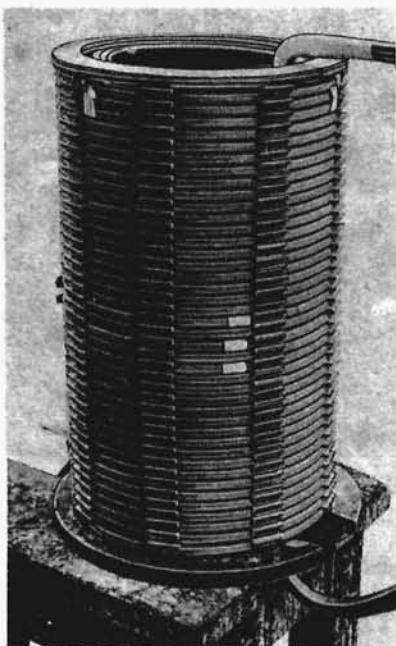
Jarzma i kolumny są wykonane z blach. Na rysunku 3.2 pokazano rdzeń transformatora 240 MV·A w czasie składania, a na rys. 3.3 zmontowany rdzeń transformatora 630 kV·A.



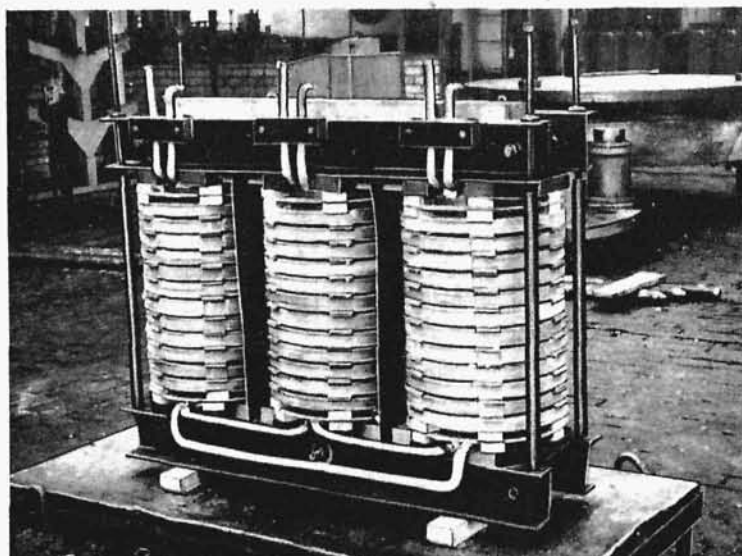
Rys. 3.3. Rdzeń transformatora
630 kV·A, 15 kV firmy Elta
(fot. AGPOL)

Uzwojenie jest zwykle wykonane w formie cylindrów nawiniętych wielowarstwowo (rys. 3.4 i 3.5).

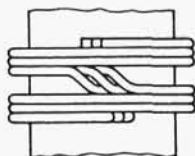
Dla zapewnienia jednakowej gęstości prądu w całym przekroju przewodu, przewody o dużych przekrojach dzieli się na kilka elementarnych przewodów połączonych równolegle na końcach i odpowiednio przeplecionych (rys. 3.6) dla zapewnienia jednakowego średniego położenia elementów przewodu względem rdzenia, a tym samym jednakowej indukcyjności rozproszenia każdego z elementarnych przewodów.



Rys. 3.4. Uzwojenie górnego napięcia
transformatora 10 MV·A, 110 kV
firmy Elta (fot. AGPOL)



Rys. 3.5. Uzwojenie i rdzeń transformatora 400 kV · A, 10 kV firmy Elta (fot. AGPOL)

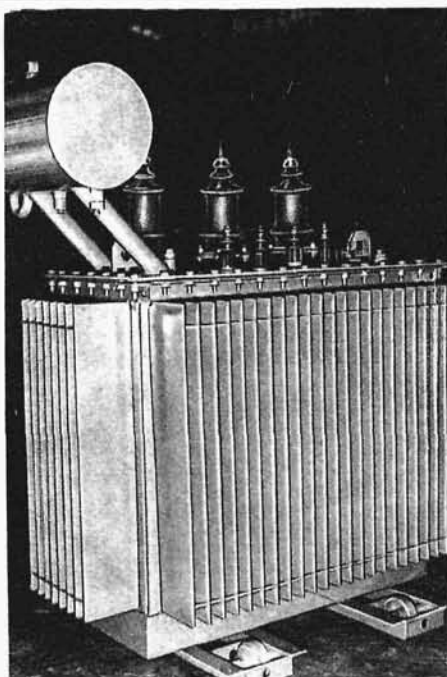


Rys. 3.6. Przeplatanie przewodów w uzwojeniu transformatora

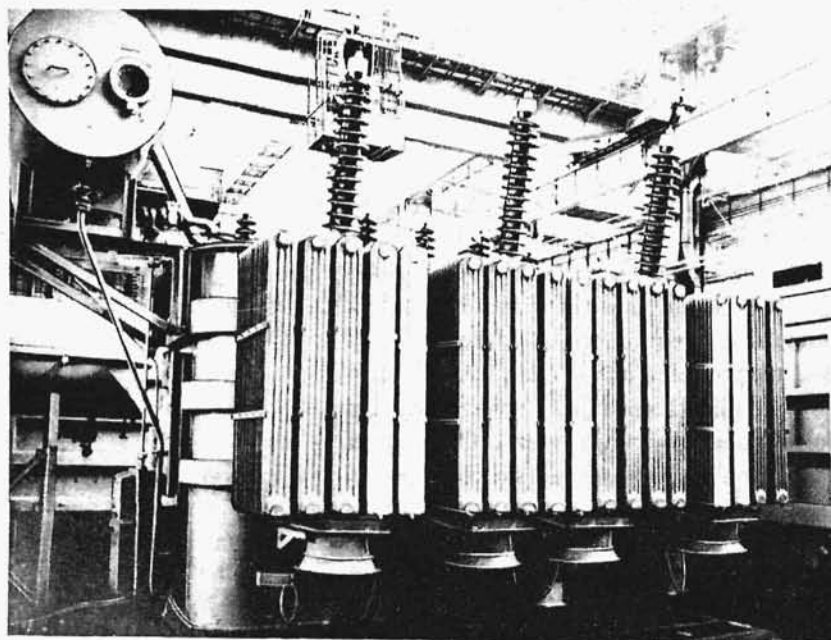
Dla zapewnienia dobrej izolacji i dobrego chłodzenia uzwojenie z rdzeniem jest zanurzone w oleju w kadzi. Kadź jest zamknięta pokrywą (z zastosowaniem odpowiednich uszczelek), w której znajdują się izolatory przepustowe z umieszczonymi w ich osiach prętami. Do końców tych prętów wewnątrz transformatora są dołączone końcówki uzwojeń. Dobre chłodzenie oleju uzyskuje się stosując jedno z następujących rozwiązań: faliste ścianki kadzi; radiatory, wewnątrz których cyrkuluje olej; wentylatory chłodzące ścianki kadzi; pompy, przetłaczające w obiegu zamkniętym olej przez kadź i umieszczoną na zewnątrz chłodnicę wodną.

Nad kadzią jest umieszczony konserwator oleju wykonany w kształcie walca, połączony rurą z kadzią. Olej wypełnia całą kadź i część konserwatora oleju. Umożliwia to rozszerzanie się oleju pod wpływem nagrzewania. W rurze „oddechowej” wyprowadzonej z konserwatora na zewnątrz mogą być umieszczone pochłaniacze wilgoci. W transformatorze znajduje się także urządzenie do zmiany liczby zwojów uzwojenia górnego napięcia, co pozwala na regulację napięcia po stronie górnego albo dolnego napięcia albo na dopasowanie napięcia transformatora do napięcia sieci.

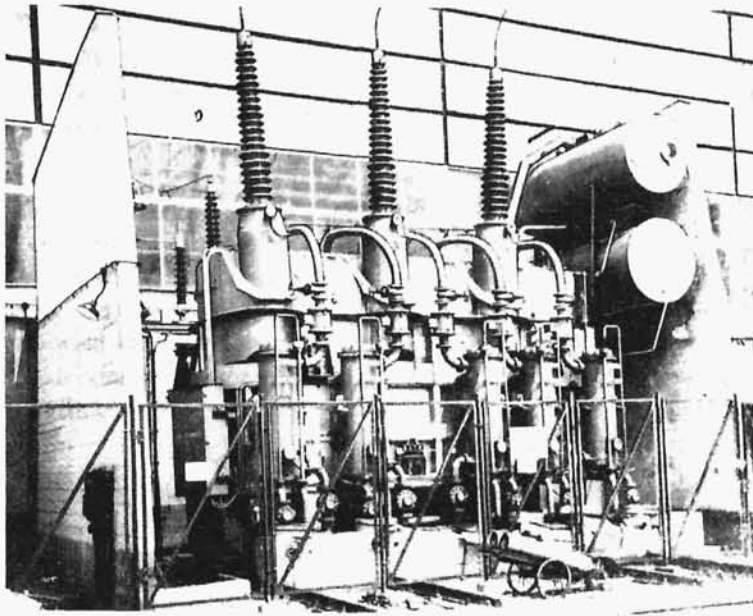
Na rysunkach 3.7 ÷ 3.9 pokazano różne konstrukcje transformatorów.



Rys. 3.7. Transformator 630 kV·A, 15 kV firmy Elta z chłodzeniem za pomocą żeber



Rys. 3.8. Transformator 40 MV·A, 110 kV firmy Elta z chłodzeniem za pomocą radiatorów

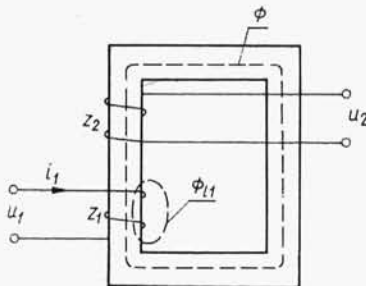


Rys. 3.9. Transformator blokowy 240 MV·A, 110 kV firmy Elta z chłodzeniem zewnętrznym

3.2.2. Zasada działania

3.2.2.1. Napięcia indukowane w stanie jałowym

Zasadę działania transformatora ilustruje szkic przedstawiony na rys. 3.10. Uzwojenie pierwotne jest dołączone do źródła napięcia przemiennego, a uzwojenie wtórne jest otwarte. Przy napięciu pierwotnym, zmieniającym się sinusoidalnie, np. według



Rys. 3.10. Ilustracja zasady działania transformatora

zależności $u_1 = U_{1m} \cos \omega t$, płynie pewien prąd i_1 powodujący powstanie strumienia

$$\Phi_1 = \Phi + \Phi_{11} \quad (3.17)$$

przy czym: Φ – strumień główny, skojarzony z uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojów z_1 i z uzwojeniem wtórnym o liczbie zwojów z_2 ; Φ_{11} – strumień rozproszony, skojarzony tylko z uzwojeniem pierwotnym.

Strumień Φ płynie przez rdzeń, czyli drogą o dużej permeancji. Strumień Φ_{11} płynie na dużej części swej drogi przez powietrze, czyli drogą o małej permeancji. Dlatego strumień Φ_{11} jest bardzo mały w porównaniu ze strumieniem Φ .

Strumień magnetyczny skojarzony z obwodem pierwotnym

$$\Psi_1 = z_1 \Phi_1 = z_1(\Phi + \Phi_{11}) \quad (3.18)$$

Bilans napięć w uzwojeniu pierwotnym wyraża się równaniem

$$u_1 = R_1 i_1 + \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (3.19)$$

w którym pierwszy człon prawej strony oznacza spadek napięcia na rezystancji R_1 uzwojenia pierwotnego, a drugi – napięcie indukowane przez cały strumień pierwotny. Zwykle spadek napięcia na rezystancji jest bardzo mały w porównaniu z napięciem indukowanym, czyli

$$u_1 \approx \frac{d\Psi_1}{dt} \quad (3.20)$$

lub

$$u_1 \approx u_{11} + u_{x11} \quad (3.21)$$

przy czym

$$u_{11} = z_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.22)$$

oznacza napięcie indukowane w uzwojeniu pierwotnym przez strumień główny, czyli *napięcie indukowane pierwotne*, a

$$u_{x11} = z_1 \frac{d\Phi_{11}}{dt} \quad (3.23)$$

oznacza napięcie indukowane w uzwojeniu pierwotnym przez strumień rozproszony.

Jeśli napięcie u_1 zmienia się kosinusoidalnie, to zgodnie z zależnościami (3.18) i (3.20) strumień zmienia się sinusoidalnie, czyli

$$\Phi_1 = \Phi_{1m} \sin \omega t \quad (3.24)$$

a więc także

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (3.25)$$

$$\Phi_{11} = \Phi_{11m} \sin \omega t \quad (3.26)$$

Zgodnie z zależnościami (3.22) i (3.25) w uzwojeniu pierwotnym indukuje się napięcie o wartości chwilowej, amplitudzie i wartości skutecznej

$$\left. \begin{aligned} u_{11} &= 2\pi f z_1 \Phi_m \cos \omega t \\ U_{11m} &= 2\pi f z_1 \Phi_m \\ U_{11} &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f z_1 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (3.27)$$

Strumień główny Φ indukuje w uzwojeniu wtórnym napięcie o wartościach

$$\left. \begin{aligned} u_{i2} &= 2\pi f z_2 \Phi_m \cos \omega t \\ U_{i2m} &= 2\pi f z_2 \Phi_m \\ U_{i2} &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f z_2 \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (3.28)$$

Uzwojenie o większej liczbie zwojów nazywa się *uzwojeniem górnym* napięcia albo krótko *uzwojeniem górnym*. Wszystkie wielkości związane z uzwojeniem górnym nazywa się wielkościami górnymi i oznacza indeksem g : napięcie górne U_g , prąd górny I_g , liczba zwojów górnych z_g . Podobnie z uzwojeniem o mniejszej liczbie zwojów, czyli z uzwojeniem dolnym związane są: napięcie dolne U_d , prąd dolny I_d , liczba zwojów dolnych z_d . W uzwojeniu górnym i dolnym indukują się odpowiednio napięcia (wartości skuteczne)

$$\left. \begin{aligned} U_g &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f z_g \Phi_m \\ U_d &= \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f z_d \Phi_m \end{aligned} \right\} \quad (3.29)$$

Wielkość

$$\vartheta_z = \frac{z_g}{z_d} \quad (3.30)$$

nazywa się *przekładnią zwojową transformatora*.

Strumień magnetyczny skojarzony z uzwojeniem pierwotnym

$$\Psi_1 = L_1 i_1 \quad (3.31)$$

przy czym L_1 – indukcyjność uzwojenia pierwotnego.

Wobec zależności (3.17) można napisać

$$L_1 = L_f + L_{11} \quad (3.32)$$

przy czym: L_f – indukcyjność odpowiadająca permeancji Λ_f drogi strumienia głównego Φ ; L_{11} – indukcyjność odpowiadająca permeancji Λ_{11} drogi strumienia rozproszonego Φ_{11} . Strumień Φ_{11} przebiega na większym odcinku drogi przez powietrze ($\mu = \text{const}$), więc $\Lambda_{11} \approx \text{const}$ oraz $L_{11} = z_1^2 \Lambda_{11} = \text{const}$. Napięcie indukowane przez strumień rozproszony w uzwojeniu pierwotnym

$$u_{X11} = \frac{d\Psi_{11}}{dt} = \frac{d(L_{11} i_1)}{dt} \quad (3.33)$$

więc przy prądzie sinusoidalnym (jaki płynie w obciążonym transformatorze)

$$u_{X11} = X_{11} I_{1m} \cos \omega t \quad (3.34)$$

albo (w zapisie symbolicznym)

$$\underline{U}_{X11} = jX_{11} \underline{I}_1 \quad (3.35)$$

przy czym $X_{11} = \omega L_{11}$ – reaktancja rozproszenia uzwojenia pierwotnego. Ta reaktancja, zwana także krótko reaktancją uzwojenia pierwotnego, ma wartość stałą,

niezależną od nasycenia obwodu magnetycznego. Jest to cecha każdej reaktancji, odpowiadającej permeancji drogi strumienia rozproszonego. Inaczej

$$u_{X11} = 2\pi f z_1 \Phi_{11m} \cos \omega t \quad (3.36)$$

oraz

$$U_{X11} = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f z_1 \Phi_{11m} \quad (3.37)$$

Napięcie U_{X11} nazywa się także spadkiem napięcia na reaktancji uzwojenia pierwotnego. Na rezystancji uzwojenia pierwotnego R_1 występuje spadek napięcia

$$\underline{U}_{R1} = R_1 \underline{I}_1 \quad (3.38)$$

Równanie bilansu napięć (3.19) można napisać w postaci

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + jX_{11} \underline{I}_1 + \underline{U}_{i1} \quad (3.39)$$

W stanie jałowym prąd jest bardzo mały, więc prawie dokładnie jest $U_1 = U_{i1}$.

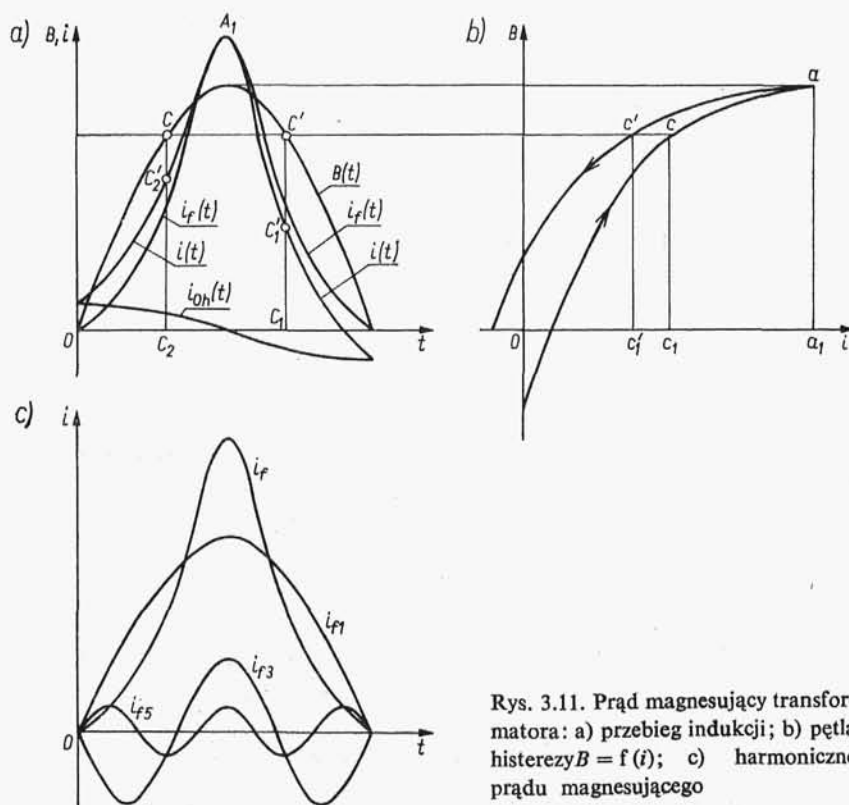
3.2.2.2. Prąd magnesujący

Obwód magnetyczny główny (rdzeń) transformatora jest elementem nieliniowym ($\Lambda_f \neq \text{const}$), więc przy sinusoidalnym napięciu prąd w stanie jałowym jest odkształcony. Przy napięciu zmieniającym się w czasie kosinusoidalnie indukcja zmienia się w czasie sinusoidalnie (rys. 3.11a). Indukcja w funkcji prądu zmienia się według pętli histerezy (rys. 3.11b). Danej wartości indukcji $\overline{CC_2}$ przy jej wzroście (albo $\overline{C'_1C_1}$ przy jej zmniejszaniu się) odpowiada według pętli histerezy prąd $\overline{Oc_1} = \overline{C_2C'_2}$ (albo $\overline{Oc'_1} = \overline{C_1C'_1}$). W ten sposób otrzymuje się krzywą $i(t)$, zawierającą składową czynną $i_{oh}(t)$ odpowiadającą stratom od histerezy oraz składową bierną $i_f(t)$ zwaną *prądem magnesującym*.

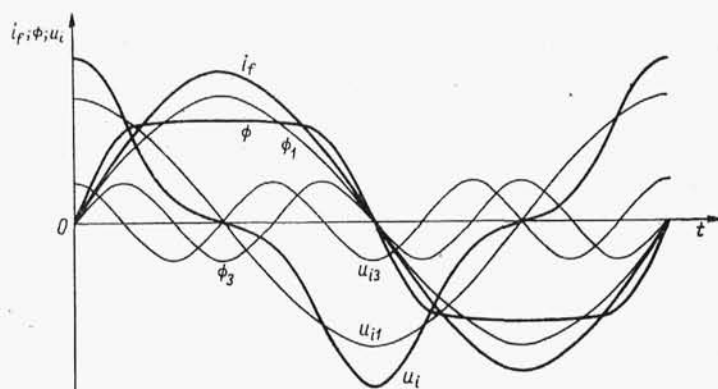
Na rysunku 3.11c przedstawiono przykładowe harmoniczne prądu magnesującego. Najważniejsze z nich są pierwsza i trzecia. Gdyby prąd magnesujący nie zawierał trzeciej harmonicznej, czyli gdyby przy pominięciu wpływu innych wyższych harmonicznych miał przebieg sinusoidalny, indukcja i strumień miałyby przebieg spłaszczony (z powodu pętli histerezy), jak na rys. 3.12, zawierający harmoniczne (najważniejsze) pierwszą i trzecią. Każda z harmonicznych strumienia indukuje odpowiednią harmoniczną napięcia u_{i1}, u_{i3} , co w wyniku daje spiczasty przebieg napięcia wypadkowego $u_i = f(t)$.

Te harmoniczne prądu, indukcji (strumienia) i napięcia są harmonicznymi czasowymi o częstotliwości v -tej harmonicznej $f_v = vf$.

Przy danym napięciu transformatora i danej liczbie zwojów można obliczyć amplitudę strumienia według wzoru (3.27). Przy danym strumieniu i danym przekroju S jarzma i kolumny można obliczyć indukcję w jarzmie i w kolumnie zgodnie z zależnością $\Phi = BS$. Natężenie pola magnetycznego H_x w danym odcinku drogi strumienia w rdzeniu przy indukcji B_x wyznacza się z krzywej magnesowania danego



Rys. 3.11. Prąd magnesujący transformatora: a) przebieg indukcji; b) pętla histerezy $B = f(i)$; c) harmoniczne prądu magnesującego

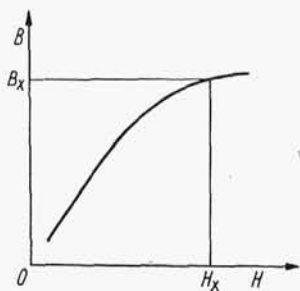


Rys. 3.12. Napięcie indukowane przez strumień o przebiegu spłaszczonym

gatunku blach według rys. 3.13. Natężenie pola magnetycznego w odcinku drogi strumienia w powietrzu oblicza się z zależności $B_\delta = \mu_\delta H$, przy czym przenikalność magnetyczna powietrza $\mu_\delta = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. Znajac długości poszczególnych odcinków drogi strumienia można obliczyć sumę spadków napięć magnetycznych na całej

drodze strumienia $\Sigma U_{\mu x} = \Sigma H_x l_x$ i z prawa przepływu wyznaczyć największą wartość prądu magnesującego

$$I_{fm} = \frac{\Sigma H_x l_x}{z} \quad (3.40)$$



Rys. 3.13. Przykładowa krzywa magnesowania

Skuteczną wartość tego prądu wyznacza się z zależności

$$I_f = \frac{1}{z} \sum \frac{H_x l_x}{\sigma_{fx}} \quad (3.41)$$

w której σ_{fx} – współczynnik kształtu odpowiadający danemu odcinkowi drogi strumienia. Przy przyjęciu w uproszczeniu przebiegów sinusoidalnych $\sigma_f = \sqrt{2}$. Do dokładniejszych obliczeń, wartość tego współczynnika odpowiadająca odcinkom drogi w żelazie wyznacza się dla konkretnych wartości amplitud poszczególnych harmonicznych. Na odcinku drogi strumienia w szczelinie powietrznej jest $\sigma_f = \sqrt{2}$. Długość drogi w szczelinie między jarzmem a kolumną łączonymi na styk jest równa grubości szczeliny powietrznej czyli $l_\delta = \delta$. Jeśli natomiast elementy te są łączone na zakładkę, to długość drogi w powietrzu jest trudna do określenia. Ponadto, ze względu na bardzo silne nasycenie się krawędzi blach grubość tej szczeliny pozornie wzrasta ze wzrostem indukcji. W tym przypadku grubość szczeliny należy wyznaczyć z krzywych podawanych w literaturze technicznej, otrzymanych na podstawie badań teoretycznych i pomiarów.

3.2.2.3. Straty w stanie jałowym

W stanie jałowym transformatora moc oddana $P = 0$, więc moc pobrana P_1 jest równa stratom w stanie jałowym P_{10} , czyli

$$P_1 = P_{10}$$

Straty w stanie jałowym transformatora

$$P_{10} = P_{Cu1} + P_{Fe}$$

przy czym: P_{Cu1} – straty w uzwojeniu pierwotnym; P_{Fe} – straty w rdzeniu.

Prąd jałowy jest bardzo mały, więc $P_{Cu1} \approx 0$. Zatem

$$P_{10} \approx P_0 = P_{Fe} \quad (3.42)$$

Wielkość P_0 zgodnie ze wzorem (3.12) oznacza straty jałowe transformatora, ponieważ w transformatorze straty mechaniczne $P_m = 0$.

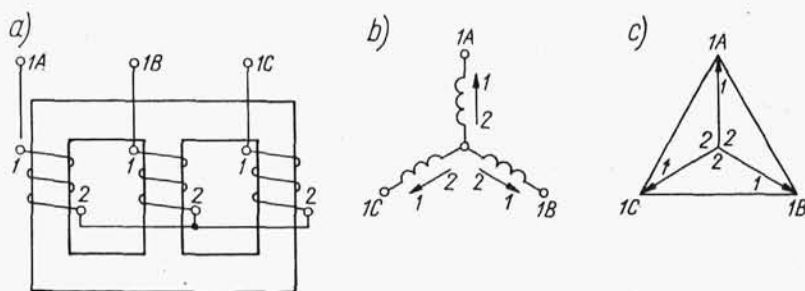
Zgodnie ze wzorem (3.11) straty w rdzeniu są w przybliżeniu proporcjonalne do kwadratu napięcia.

3.2.3. Transformatory trójfazowe

3.2.3.1. Sposoby łączenia i grupy połączeń

Transformator trójfazowy można otrzymać przez odpowiednie połączenie uzwojeń trzech transformatorów jednofazowych albo przez odpowiednie połączenie trzech uzwojeń fazowych osadzonych na trzech kolumnach rdzenia transformatora trójfazowego (np. jak na rys. 3.1b). W tym ostatnim przypadku trzy strumienie fazowe, przechodzące przez trzy kolumny spotykają się w rdzeniu nad kolumną środkową. Suma trzech strumieni fazowych przy symetrycznym zasilaniu i symetrycznym obciążeniu transformatora jest równa zero. Z powodu krótszej drogi strumienia w kolumnie środkowej, prąd jałowy tej fazy jest nieco mniejszy od prądów jałowych faz, których uzwojenia są osadzone na kolumnach skrajnych. Ta asymetria prądów jałowych nie ma większego znaczenia, ponieważ prąd jałowy jest bardzo mały w porównaniu z prądem płynącym przez transformator obciążony.

Rozróżnia się trzy rodzaje połączeń uzwojeń transformatorów trójfazowych: w gwiazdę, w trójkąt i w zygzak. Połączenie w gwiazdę (rys. 3.14a, b) otrzymuje się przez połączenie we wspólny punkt (punkt gwiazdowy) wszystkich końców (albo



Rys. 3.14. Połączenie transformatora w gwiazdę

wszystkich początków) uzwojeń fazowych górnych (oznaczenie Y) albo dolnych (oznaczenie y). Wektory symetrycznych napięć fazowych górnych pokazano na rys. 3.14b, a skojarzony wykres wektorowy napięć górnych na rys. 3.14c. Jeśli uzwojenia dolne są połączone analogicznie do uzwojeń górnych, to i wykresy wektorowe napięć obu tych uzwojeń są analogiczne.

Na rysunku 3.15 pokazano schemat układu połączeń transformatora w gwiazdę po obu stronach przy czym uzwojenie górne ma połączone we wspólny punkt gwiazdowy końce uzwojeń, a uzwojenie dolne — początki. Gwiazda napięć