

Moduł 2

Parametry techniczne i budowa maszyn elektrycznych

1. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu stałego
2. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu zmiennego
3. Podstawowe parametry techniczne transformatorów
4. Budowa maszyn prądu stałego
5. Budowa maszyn prądu zmiennego
6. Budowa transformatorów

1. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu stałego

Dostępne obecnie na rynku silniki prądu stałego można podzielić na następujące grupy:

- silniki szczotkowe,
- silniki bezszczotkowe,
- silniki bez przekładni,
- silniki z przekładnią czołową,
- silniki z przekładnią ślimakową,
- napędy liniowe.

Podstawowymi parametrami technicznymi maszyn prądu stałego są:

- **napięcie** – wyrażane w V (voltach) – to napięcie, na jakie zbudowany jest silnik,
- **liczba obrotów** – wyrażana w rpm (ang. *revolutions per minute* – obroty na minutę – jednostka miary częstotliwości obrotu wyrażająca prędkość obrotową maszyn wirujących) lub prędkość obrotowa (obr/min) – liczba obrotów wału maszyny wykonywana w jednostce czasu,
- **moment obrotowy silnika na wale** – wyrażany w Nm (niutonometrach). Moment obrotowy na wale opisuje się wzorem:

$$M = \frac{P}{\omega}$$
$$\omega = \frac{2\pi}{60} \cdot n$$

$$M = \frac{30 \cdot P}{\pi \cdot n}$$

gdzie: P – moc

n – prędkość obrotowa

ω – prędkość kątowna

- **moment obrotowy prądnicy na wale** – wyrażany w Nm (niutonometrach). Moment obrotowy na wale opisuje się wzorem:

$$M = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{P}{\eta_g n}$$

gdzie: P – moc

n – prędkość obrotowa

η_g – wartość sprawności prądnicy prądu stałego

- **prąd w uzwojeniu twornika** – wyrażany w A (amperach) i opisany wzorem:

$$I_a = \frac{U - E}{R_{at}} = \frac{|U - E| - 2U_c}{\Sigma R_a + R_{ad}}$$

gdzie: R_{ad} – rezystancja całkowita twornika, łącznie z rezystancjami dodatkowych innych uzwojeń włączonych w szereg z twornikiem, wyrażona w Ω
 U – napięcie na zaciskach twornika w V
 E – siła elektromotoryczna (napięcie indukowane) w uzwojeniu twornika w V

- **prąd pobierany z sieci** – wyrażany w A (amperach) i opisany wzorem:

$$I = \frac{P}{\eta_s U}$$

gdzie: η_s – sprawność silnika

- **prąd oddawany do sieci** – parametr charakterystyczny dla prądnicy prądu stałego, wyrażany w A (amperach) i opisany wzorem:

$$I = \frac{P}{U}$$

gdzie: η_s – sprawność silnika

- **moc znamionowa silnika** – wyrażona w kW (kilowatach) jest to moc mechaniczna oddawana przez silnik. Dla silnika prądu stałego moc tą opisuje się wzorem:

$$P = U \cdot I \cdot \eta \cdot 10^{-3}$$

gdzie: U – wartość napięcia stałego w V

I – wartość prądu stałego w A

η – współczynnik sprawności

- **waga** – inaczej masa silnika wyrażona w kg (kilogramach),
- **masowy moment bezwładności** – to miara bezwładności ciała w ruchu obrotowym względem osi obrotu wyrażona w kgm^2 (kilogramach na metr kwadratowy), im większy jest moment bezwładności, tym trudniej wprowadzić w ruch wał wirnika,
- **żywołność silnika** – określająca przewidziany przez producenta czas pracy silnika, wartość wyrażona w godzinach.

Każda maszyna prądu stałego powinna posiadać tabliczkę z danymi znamionowymi, umieszczoną na korpusie w miejscu umożliwiającym łatwe odczytanie zapisanych na niej informacji. W przypadku małych silników tabliczka znamionowa powinna zawierać co najmniej:

- nazwę producenta,
- numer fabryczny,
- rok produkcji,
- oznaczenie typu maszyny,
- rodzaj maszyny np. silnik bocznikowy,
- napięcie znamionowe,
- rodzaj prądu (stały).

W przypadku większych silników oprócz danych wymienionych wyżej na tabliczce znamionowej powinny się znaleźć:

- moc znamionowa,

- prąd znamionowy,
- prędkość znamionowa lub zakres prędkości,
- największa dopuszczalna prędkość obrotowa – jeżeli jest ograniczona,
- klasa ciepłoodporności lub dopuszczalny przyrost temperatury izolacji,
- numer normy,
- dla silników ze wzbudzeniem obcym – prąd i napięcie wzbudzenia,
- maksymalna temperatura otoczenia i wysokość nad poziomem morza w przypadku gdy są one inne, jak 40°C i 1000 m,
- masa silnika,
- stopień ochrony,
- najmniejszy prąd wzbudzenia, jeżeli jest przewidziana regulacja prędkości obrotowej przez zmianę pola.

2. Podstawowe parametry techniczne maszyn prądu zmiennego

Podstawowymi parametrami maszyn prądu zmiennego są:

- **moc** – wyrażana w W (watach) jest zależnością napięcia, prądu, współczynnika mocy i sprawności maszyny. W silnikach prądu przemiennego rozróżnia się następujące moce:
 - o moc oddawana P – jest to moc mechaniczna na wale silnika, równoznaczna mocy znamionowej. Inaczej jest to moc jaką silnik przekazuje napędzanemu urządzeniu. Moc ta dla silnika indukcyjnego trójfazowego lub synchronicznego jest wyrażana wzorem:

$$P = \sqrt{3} U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

gdzie: U – napięcie międzyprzewodowe sieci zasilającej

I – prąd przewodowy

η – sprawność silnika

$\cos\varphi$ – współczynnik mocy

Moc oddawana silnika jednofazowego:

$$P = U \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot \eta$$

- o moc pobierana P_1 – jest to moc elektryczna pobierana przez silnik z sieci. Moc pobierana jest większa od mocy oddawanej o straty w silniku ΔP
Moc pobieraną dla silników trójfazowych opisuje wzór:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

dla silników jednofazowych:

$$P_1 = U \cdot I \cdot \cos\varphi$$

Moc pobieraną przez każdy silnik można wyrazić wzorem:

$$P_1 = P + \Delta P$$

lub

$$P_1 = \frac{P}{\eta}$$

- **napięcie uzwojenia fazowego stojana** – wyrażone w V (woltach), opisywane wzorem:

przy połączeniu w trójkąt:

$$U_{pks} = U_N$$

przy połączeniu w gwiazdę:

$$U_{pks} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot U_N$$

- **prąd** – wyrażony w A (amperach), zależny od mocy, na jaką został zbudowany silnik, od napięcia zasilającego i od układu połączeń uzwojeń. W silnikach indukcyjnych trójfazowych można rozróżnić następujące prądy:
 - o prąd przewodowy I – który płynie w przewodach doprowadzających zasilanie do silnika,
 - o prąd fazowy I_f – przepływający w fazie silnika. Przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę prąd fazowy jest równy prądowi przewodowemu, natomiast przy połączeniu w trójkąt prąd fazowy $\sqrt{3}$ razy mniejszy od prądu przewodowego:

$$I_f = \frac{I}{\sqrt{3}} \text{ lub } I = \sqrt{3} \cdot I_f$$

- o prąd znamionowy I_n – czyli prąd pobierany przez silnik w stanie nagrzanym przy obciążeniu znamionowym i przy zasilaniu napięciem znamionowym,
 - o prąd biegu jałowego I_0 – czyli prąd przewodowy pobierany przez silnik na biegu jałowym (silnik nieobciążony) i niesprzęgniętym z inną maszyną bądź urządzeniem przy zasilaniu napięciem znamionowym,
 - o Prąd rozruchowy I_r – czyli prąd przewodowy pobierany przez silnik w czasie rozruchu przy zwiększaniu prędkości obrotowej od zera do wartości znamionowej.
- **prędkość obrotowa** – zależna od liczby biegunów maszyny indukcyjnej i od częstotliwości napięcia zasilającego. Opisywana jest wzorem:

$$n_s = \frac{60 \cdot f}{p}$$

gdzie: f – częstotliwość napięcia zasilającego

p – liczba par biegunów silnika

- **poślizg silnika** – różnica pomiędzy prędkością synchroniczną n_s i rzeczywistą n wyrażona w procentach (%). Opisany wzorem:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Prędkość obrotowa silnika zmienia się w niewielkim zakresie w zależności od obciążenia.

- **moment obrotowy** – zależny jest od prędkości obrotowej. Rozróżnia się kilka charakterystycznych wartości momentu obrotowego:

- moment rozruchowy – czyli moment w czasie rozruchu przy prędkości od zera do prędkości znamionowej,
 - moment rozruchowy początkowy M_r – występujący w silniku w chwili załączenia go do sieci przy znamionowej wartości napięcia zasilającego i znamionowej częstotliwości,
 - moment rozruchowy minimalny M_{min} – najmniejszy moment rozruchowy występujący w silniku podczas jego rozruchu przy znamionowych wartościach zasilania,
 - moment krytyczny (maksymalny, szczytowy) – największa wartość momentu obrotowego, jaką może wytworzyć silnik przy znamionowych wartościach zasilania
 - moment znamionowy M_n – czyli moment obrotowy występujący przy znamionowych wartościach napięcia i częstotliwości, jest to moment, na jaki maszyna została zaprojektowana i przy którym powinna pracować.
- **sprawność** – to stosunek mocy oddawanej przez silnik P do mocy pobieranej P_1 opisuje się ją wzorem:

$$\eta = \frac{P}{P_1}$$

gdzie:

$$P_1 = P + \Delta P$$

Sprawność jest zawsze mniejsza od 1 w wyraża się ją w procentach np. 85%

- **współczynniki mocy** – $\cos\varphi$ silniki indukcyjne pobierają z sieci prąd niezbędny do magnesowania. Im większy jest prąd magnesowania silnika tym większy jest pobór mocy biernej z sieci i tym niższa jest wartość współczynnika mocy.

Każda maszyna prądu przemiennego powinna posiadać tabliczkę z danymi znamionowymi, umieszczoną na korpusie w miejscu umożliwiającym łatwe odczytanie zapisanych na niej informacji. W przypadku małych silników tabliczka znamionowa powinna zawierać co najmniej:

- nazwę producenta,
- numer fabryczny,
- rok produkcji,
- oznaczenie typu maszyny,
- rodzaj maszyny np. silnik klatkowy,
- napięcie znamionowe,
- rodzaj prądu (przemienny ~).

W przypadku większych silników oprócz danych wymienionych wyżej na tabliczce znamionowej powinno się znaleźć:

- moc znamionowa,
- prąd znamionowy,
- częstotliwość znamionowa i liczba faz,
- prędkość znamionowa lub zakres prędkości,
- największa dopuszczalna prędkość obrotowa – jeżeli jest ograniczona,
- klasa ciepłoodporności lub dopuszczalny przyrost temperatury izolacji,

- numer normy,
- symbol układy połączeń uzwojeń,
- współczynnik mocy,
- maksymalna temperatura otoczenia i wysokość nad poziomem morza w przypadku, gdy są one inne jak 40°C i 1000 m,
- masa silnika,
- stopień ochrony.

3. Podstawowe parametry techniczne transformatorów

Najważniejszymi parametrami technicznymi transformatorów – w tym transformatorów energetycznych są:

- typ transformatora – zamieszczany jest zazwyczaj na tabliczce znamionowej i jest oznaczeniem producenta,
- moc znamionowa – to wartość mocy, na jaką został zaprojektowany i zbudowany transformator i przy której zagwarantowana jest jego prawidłowa praca, zgodna z normami i zaleceniami producenta. W praktyce moce znamionowe transformatorów energetycznych dopasowane są mocy generatorów. Moce transformatorów sieciowych zawierają się w granicach od 16 do 800 kVA oraz od 1 do 63 MVA, większe moce transformatorów nie są normalizowane,
- napięcie znamionowe uzwojenia GN (górnego napięcia) – znamionowa wartość napięcia strony górnej transformatora – czyli strony o większej liczbie zwojów – na jaką został zaprojektowany transformator,
- napięcie znamionowe uzwojenia DN (dolnego napięcia) – znamionowa wartość napięcia strony dolnej transformatora – czyli strony o mniejszej liczbie zwojów – na jaką został zaprojektowany transformator,
- zakres regulacji przekładni pod obciążeniem po stronie górnego napięcia – w celu utrzymania na odbiornikach możliwie niezmienną wartość napięcia należy mieć możliwość jego regulacji. W transformatorach taką regulację uzyskuje się za pomocą zmiany przekładni, zmieniając liczbę zwojów po stronie górnego napięcia za pomocą tzw. zaczepów. Zaczepy to specjalne przyłącza do uzwojeń, dzięki którym można wykorzystać albo całą liczbę uzwojeń, albo tylko jej część. Regulacja napięcia przez zmianę liczby zwojów górnych jest dogodniejsza niż przez zmianę liczby dolnych zwojów, ponieważ liczba zwojów górnych jest większa, a co za tym idzie – regulacja napięcia jest dokładniejsza. Jeżeli uzwojenie górne jest uzwojeniem pierwotnym – czyli jeżeli jest to transformator obniżający napięcie – to przez zwiększenie liczby zwojów górnych i przekładni n zmniejsza się napięcie wtórne – czyli dolne. Jeżeli uzwojenie dolne jest uzwojeniem pierwotnym – czyli jeżeli jest to transformator podwyższający napięcie, to zwiększenie liczby zwojów górnych i przekładni n zwiększy napięcie wtórne, czyli górne,
- zakres regulacji przekładni w stanie beznapięciowym po stronie dolnego napięcia,
- przekładnia transformatora – czyli stosunek górnego napięcia do dolnego napięcia w stanie jałowym. Opisuje się ją wzorem:

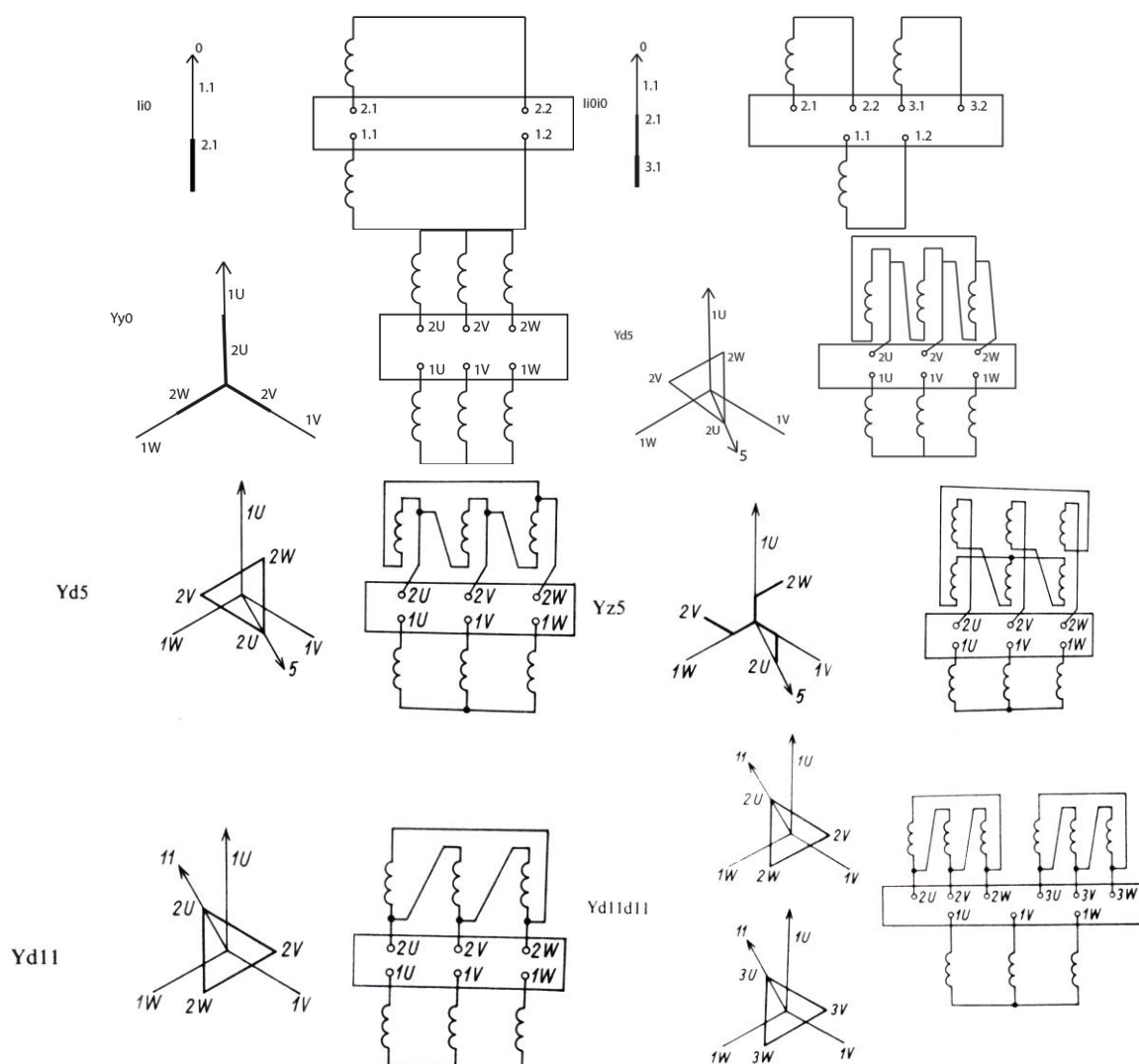
$$\vartheta = \frac{U_{g0}}{U_{d0}}$$

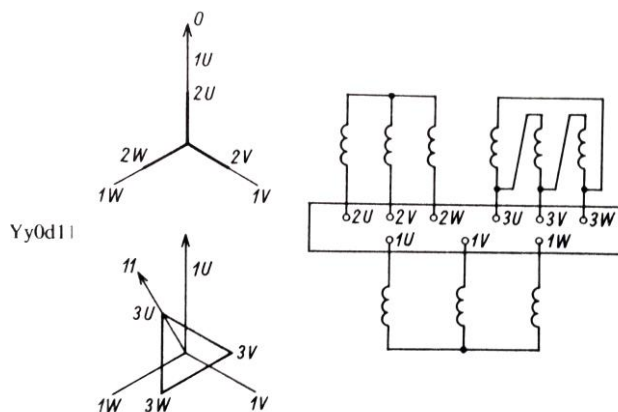
W stanie jałowym transformatora spadki napięć w uzwojeniach są pomijalnie małe, dlatego można przyjąć, że indukowane napięcia są w zasadzie równe napięciom na zaciągach. W takim przypadku przekładnia transformatora jest równa przekładni zwojowej.

- układ (grupa) połączeń – połączenie uzwojeń fazowych transformatora trójfazowego w gwiazdę, trójkąt lub zygzak oznacza się odpowiednio literami Y, D i Z (dla uzwojenia górnego napięcia) i y, d i z (uzwojenie dolnego napięcia). Uzwojenia z wyprowadzonym punktem gwiazdowym oznacza literami YN lub yn oraz ZN lub zn, uzwojenia transformatorów jednofazowych literami I oraz i. Symbol układu połączeń (grupy połączeń) tworzy się podając symbol literowy uzwojenia górnego napięcia a następnie symbole pozostałych uzwojeń i odpowiadające im kąty godzinowe np.:

- YNd11, Yzn5, Dyn5.

Kąt przesunięcia (w godzinach) otrzymuje się przyjmując fazor górnego napięcia za wskazówkę minutową ustawioną na godzinę 12, a odpowiedni fazor dolnego napięcia za wskazówkę godzinową. Układy połączeń uzwojeń transformatorów przedstawiają poniższe rysunki:





Rys. 2.1 Układy połączeń uzwojeń transformatorów

Źródło: Praca zbiorowa, *Poradnik inżyniera elektryka*, tom 2, WNT, Warszawa 1995 r., s. 174

- sposób chłodzenia – straty w rdzeniu transformatora występujące podczas jego pracy powodują wydzielanie się dużych ilości ciepła. Z uwagi na fakt, że transformator nie posiada części wirujących – chłodzenie transformatorów staje się niełatwym zadaniem. Najczęściej spotykane są transformatory olejowe – umieszczone w kadzi, a absorpcja ciepła odbywa się przez zewnętrzne ściany kadzi. Ciepło z kadzi transformatora do powietrza odbywa się metodą konwekcji, promieniowania i przewodnictwa. Ciepło oddawane od rdzenia i uzwojeń do oleju oddawane jest tylko przez konwekcję. Zasadność stosowania oleju jako chłodziwa wynika z tego, że współczynnik konwekcji oleju w stosunku do powietrza jest 10-krotnie większy,
- straty jałowe – straty prądu jałowego są pomijalnie małe. Jednostkowe straty w rdzeniu nazywa się stratnością blach i oznacza symbolem P_{Fe} . Straty w rdzeniu dzielą się na straty histerezy i P_h straty z prądów wirowych P_w :

$$P_{Fe} = P_w + P_h$$

- straty obciążeniowe – to straty w uzwojeniach (miedzi) i w rdzeniu (żelazie),
- straty zwarcia – z uwagi na bardzo małą indukcyjność i bardzo małe straty w rdzeniu, cała moc pobrana przez transformator jest równa stratom w uzwojeniu,
- napięcie zwarcia – $U_k(V)$ jest to napięcie na zaciskach transformatora w stanie zwarcia normalnego, czyli jest to napięcie na zaciskach pierwotnych transformatora, przy zwartym uzwojeniu wtórnym, pod wpływem którego w uzwojeniach transformatora płyną prądy znamionowe. Wartość względna napięcia zwarcia to stosunek napięcia zwarcia do napięcia znamionowego i wyrażona jest wzorem:

$$U_{kr} = \frac{U_k}{U_n}$$

- dopuszczalny poziom hałasu,
- stopień ochrony,
- masa całkowita,
- rodzaj pracy – rozróżnia się następujące rodzaje pracy transformatorów:
 - o praca ciągła (S1) – jest to praca przy znamionowym obciążeniu w nieograniczonym okresie czasu lub do momentu osiągnięcia ustalonej wartości temperatury.
 - o praca dorywcza (S2) – jest to praca w określonym czasie, począwszy od stanu zimnego transformatora, przy czym przerwy w pracy są wystarczająco długie,

aby ochłodzić transformator do temperatury otoczenia. Do symboliki dorywczej pracy transformatora dodaje się czas, np. S2-20min.

- o praca przerywana (S3) – jest to praca w jednakowych cyklach pracy wykonywana kolejno po jednakowych odstępach czasu przerwy. Do symboliki pracy przerywanej dodaje się wartość procentową np. S3-20%, gdzie wartość %-owa oznacza procentowy stosunek czasu pracy t_p do czasu trwania okresu t_o , czyli czasu pracy i następującej po nim przerwy:

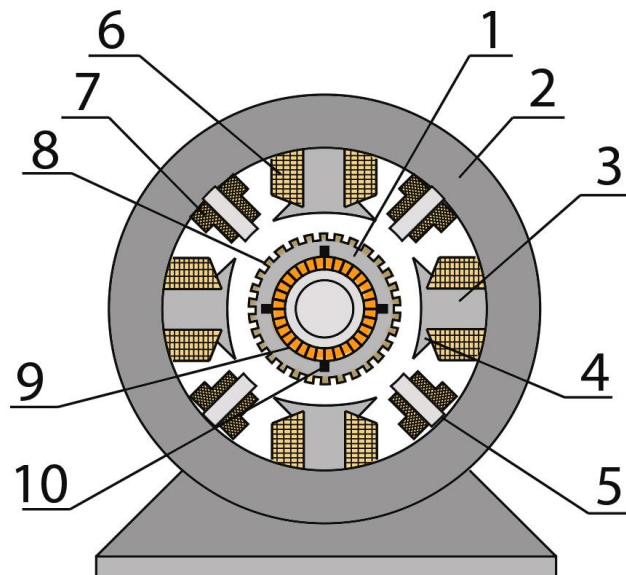
$$S3 = \frac{t_p}{t_p + t_s} \cdot 100\%$$

- klasa izolacji – to określony za pomocą liter rodzaj zastosowanych materiałów izolacyjnych informujący o maksymalnej temperaturze pracy transformatora. Przekroczenie tej temperatury podczas pracy ciągłej skraca żywotność i czas bezawaryjnej pracy transformatora. Rozróżnia się następujące klasy izolacji:
 - o A – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 105°C
 - o E – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 120°C
 - o B – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 130°C
 - o F – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 155°C
 - o H – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 180°C
 - o C – gdzie maksymalna, trwale dopuszczalna temperatura wynosi 220°C

4. Budowa maszyn prądu stałego

Maszyna prądu stałego składa się z dwóch zasadniczych części:

- nieruchomej czyli stojana,
- wirującej czyli wirnika.



Rys. 2.2 Szkic maszyny prądu stałego

1 – twornik, 2 – jarzmo stojana, 3 – biegun główny, 4 – nabiegunnik, 5 – biegun komutacyjny, 6 – uzwojenie wzbudzące, 7 – uzwojenie biegunów komutacyjnych, 8 – uzwojenie twornika, 9 – komutator, 10 – szczotki

Źródło: Opracowanie własne

Zadaniem stojana, zwanego inaczej magneśnicą, jest wytworzenie przez magnesy trwałe lub elektromagnesy napięcia magnetycznego powodującego powstanie strumienia magnetycznego. W tej części maszyny prądu stałego można wyróżnić:

- jarzmo,
- bieguny główne wraz z nabiegunnikami,
- bieguny komutacyjne.

Nabiegunniki wykonane są z blach o płaszczyznach prostopadłych do osi maszyny, czyli powierzchnie blach nabiegunnika, mają kierunek zgodny z kierunkiem blach w wirniku. Taki układ stosuje się dla zmniejszenia strat pulsacyjnych powstających na wewnętrznej (od strony wirnika) powierzchni nabiegunników. Na biegunach znajdują się uzwojenia wykonane w formie cewek z izolowanego drutu nawojowego, są to uzwojenia wzbudzenia. Przez połączone ze sobą w szereg uzwojenia magnesów płynie podczas pracy maszyny prąd zwany prądem magnesowania lub prądem wzbudzenia.

Jarzmo jest najczęściej odlewem żeliwnym i stanowi część obwodu magnetycznego. Jednocześnie pełni rolę obudowy maszyny. Maszyny elektryczne prądu stałego średniej mocy mają najczęściej cztery bieguny magnetyczne. Pomiędzy biegunami z uzwojeniami wzbudzającymi umieszczane są bieguny komutacyjne służące do poprawy komutacji (zmianie kierunku przepływu prądu), a uzwojenia tych biegunów są połączone w szereg z uzwojeniem twornika. Na stojanie umieszczona jest tabliczka zaciskowa. Na tabliczce znajdują się zaciski, do których dołączone są końce uzwojeń biegunów magnetycznych oraz zaciski połączone przewodami z grupami jednoimiennych szczotek.

Zadaniem wirnika, zwanego inaczej twornikiem, jest wytworzenie napięcia warunkującego przepływ odpowiedniego prądu. Rdzeń twornika spełnia dwie zasadnicze role:

- tworzy drogę o małej reluktancji dla strumienia magnetycznego od jednego nabiegunnika do drugiego,
- służy jako konstrukcja nośna dla prętów miedzianych, w których płynie prąd i indukuje się napięcie.

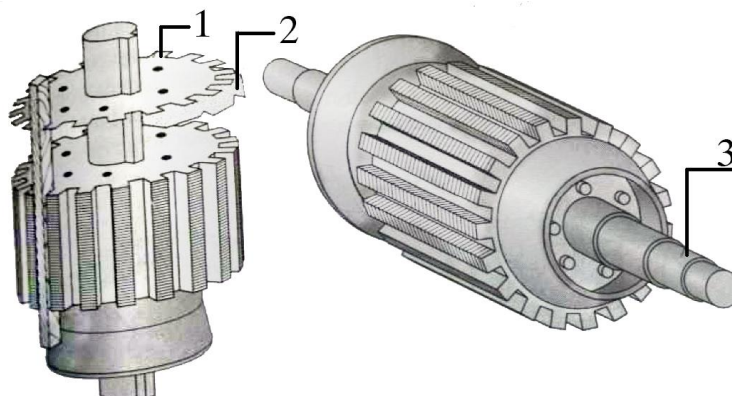
Stalowy rdzeń twornika, wirując w przestrzeni, przecina nieruchome linie pola magnetycznego, w skutek czego indukują się w rdzeniu napięcia wywołujące w nim prądy wirowe. Powoduje to powstawanie strat. Aby straty były jak najmniejsze, rezystancja stawiana prądom wirowym powinna być jak największa. Napięcie indukowane w rdzeniu twornika, podobnie jak napięcia indukowane w prętach uzwojenia, są skierowane wzdłuż maszyny. Prąd płynący pod ich wpływem ma kierunek zgodny z nimi. Aby zapobiec powstawaniu zbyt dużego prądu, twornik musi być wykonany z izolowanych od siebie blach stalowych z dodatkiem krzemu ułożonych prostopadłe do osi wału maszyny. Blachy są izolowane jednostronnie w jeden z następujących sposobów:

- pokrycie ich lakierem izolacyjnym,
- pokrycie ich szkłem wodnym,
- poprzez oklejenie cienką bibułą,
- poprzez utlenienie,
- lub fosforanowanie powierzchni.

Pakiet blach jest osadzony na wale maszyny bezpośrednio albo za pośrednictwem piasty.

Na zewnętrznym obwodzie wirnika wykonane są w blachach żłobki, w których umieszczone są pręty uzwojenia. W jednym żłobku znajduje się zwykle kilka prętów uzwojenia. Pręty uzwojenia zabezpieczone są przed wypadnięciem klinami z materiału

niemagnetycznego. Końce elementów uzwojenia przyłączone są do wycinków komutatora, umocowanego obok żelaza wirnika na wspólnym wale. Wycinki komutatora są izolowane od siebie i od wału. Na komutatorze są ustawione szczotki utrzymywane przez szczotkotrzymacze. Do obu stron jarzma przykręcone są tarcze z łożyskami, w których obraca się wał wirnika.



Rys. 2.3 Budowa wirnika

1 – izolacja, 2 – blacha, 3 – miejsce na komutator

Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, s. 257

Aby zapewnić prostoliniowy przebieg napięcia otrzymanego z maszyny prądu stałego, komutator musi mieć odpowiednio dużo wycinków. Do każdego z tych wycinków przymocowane jest odpowiednie odprowadzenie uzwojenia bezpośrednio lub za pomocą chorągiewki. Charakterystyczny jaskółczy ogon przy wycinkach komutatorowych służy do ich umocowania za pomocą specjalnych pierścieni. Wycinki komutatorowe są wykonane z miedzi i izolowane między sobą miką lub mikanitem. Wszystkie zamocowane wycinki tworzą miedziany walec, poprzedzielany zakładkami izolacyjnymi.

Komutator maszyny prądu stałego jest elementem zużywającym bardzo dużo miedzi, dlatego w znacznym stopniu wpływa on na wysoką cenę. Z tej też przyczyny wszędzie tam, gdzie jest to możliwe, maszyna prądu stałego jest zastępowana tańszymi rozwiązaniami maszyn prądu przemiennego.

5. Budowa maszyn prądu zmiennego

Maszyna prądu zmiennego składa się z dwóch zasadniczych części:

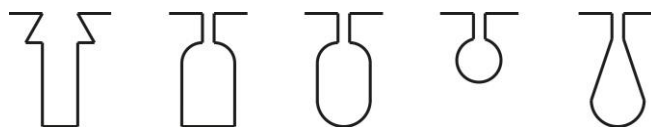
- nieruchomej, czyli stojana,
- wirującej, czyli wirnika.

Strumień magnetyczny maszyny indukcyjnej, wirując w przestrzeni, przemagnesowuje rdzeń stojana z częstotliwością f , zaś rdzeń wirnika z częstotliwością sf . Przy czym s to poślizg wirnika w silniku asynchronicznym, opisujący różnicę pomiędzy prędkością obrotową wirnika a prędkością wirowania pola magnetycznego. Na skutek tego zjawiska powstają prądy wirowe generujące straty, dlatego też w celu zmniejszenia tych strat rdzeń stojana i wirnika wykonany jest w formie pakietów blach z dodatkiem krzemu o grubości nie większej jak 0,5 mm. Blachy te są izolowane w jeden z następujących sposobów:

- jednostronne oklejenie cienkim papierem,
- powlekanie odpowiednim lakierem izolacyjnym.

Odpowiednio sprasowany pakiet blach stojana jest osadzony w kadłubie i zamocowany za pomocą śrub lub przez ściśnięcie odpowiednimi pierścieniami dociskowymi. Wzdłuż osi maszyny blachy są podzielone kanałami, które pełnią rolę wentylacji promieniowej. Przy promieniowym systemie wentylacji powietrze wyrzucane jest z maszyny na zewnątrz w kierunku promieniowym. Pomiędzy pakietem blach a kadłubem znajduje się zazwyczaj wolna przestrzeń umożliwiająca chłodzenie blach stojana od strony zewnętrznej przez zapewnienie przepływu powietrza.

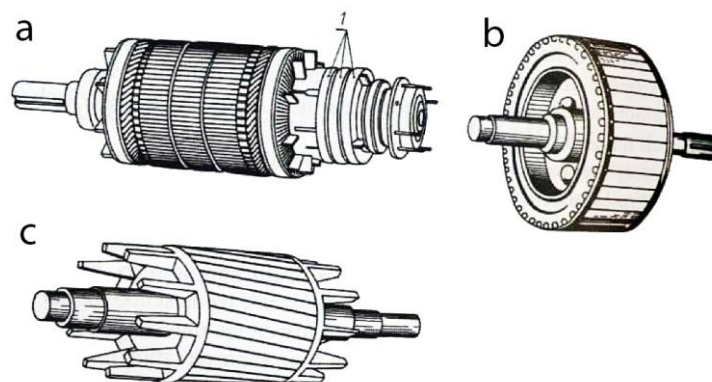
Kadłub maszyny jest odlewem żeliwnym lub stalowy (spawany) i nie stanowi części czynnej maszyny, pełni tylko rolę konstrukcyjną. Blachy wirnika i stojana są ułożkowe dla umieszczenia w nich uzwojeń. Własności maszyn są uzależnione od kształtu żłobków. Wyróżnia się kilka kształtów żłobków:



Rys. 2.4 Kształty żłobków

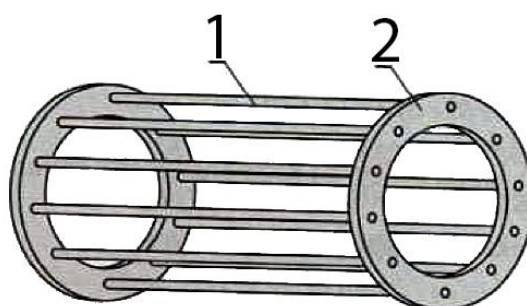
Źródło: Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1978, 171 s

Żłobki otwarte są najwygodniejsze przy układaniu uzwojeń, ale powodują zwiększenie szczeliny przywirnikowej, czyli zwiększenie prądu magnesowania. To zjawisko jest bezpośrednim skutkiem zmniejszenia współczynnika mocy $\cos\varphi$ maszyny prądu przemennego. Przed wypadnięciem uzwojeń za żłobków zabezpieczają specjalne kliny wykonane z materiału izolacyjnego, jakim może być preszpan lub drewno. Na stojanie znajduje się tabliczka zaciskowa, do której doprowadzone są końcówki uzwojeń stojana. Jeżeli maszyna ma wirnik z uzwojeniem fazowym, a nie klatkowym, to na stojanie znajduje się także tabliczka zaciskowa, do której doprowadzone są końcówki uzwojenia wirnika za pośrednictwem pierścieni ślizgowych na wirniku i szczotek na stojanie. Szczotki umieszczone są w odpowiednich gniazdach szczotkowych. Szczotki mogą stale przylegać do pierścieni lub mogą być podnoszone przy równoczesnym zwieraniu pierścieni ślizgowych przez przesunięcie odpowiedniego zwieracza. Wirnik może posiadać również uzwojenie klatkowe. Klatki wirników odlewane są najczęściej z aluminium, które wypełnia żłobki wirnika, tworząc pręty uzwojenia i pierścienienie zwierające pręty po obu stronach wirnika. Wraz z pierścieniami odlewane są skrzydełka wentylatora. Na wale wirnika osadzony jest wentylator.



Rys. 2.5 Wirniki silników indukcyjnych

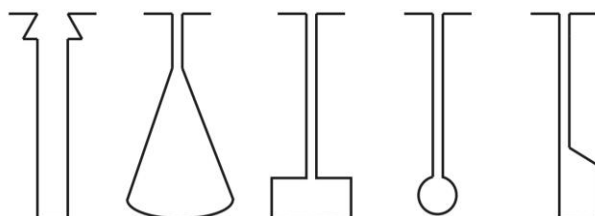
a – pierścieniowy, b – klatkowy, c – klatkowy o żłobkach skośnych
 Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 142 s



Rys. 2.6 Uzwojenie klatkowe wirnika maszyny indukcyjnej

1 – pręty, 2 – pierścienie
 Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 142 s

Wirnik z uzwojeniem fazowym ma żłobki o kształcie podobnym do żłobków stojana, zaś wirnik klatkowy posiada żłobki okrągłe. Dla poprawienia parametrów rozruchowych bardzo często stosuje się w wirniku uzwojenia dwuklatkowe lub głębokożłobkowe. Pręty uzwojenia dwuklatkowego mogą być zwierane w taki sposób, że pręty zewnętrznej klatki są zwarte za pomocą jednego pierścienia, natomiast pręty klatki wewnętrznej za pomocą drugiego pierścienia. W innym rozwiązaniu wszystkie pręty są połączone ze sobą jednym pierścieniem zwierającym.



Rys. 2.7 Kształty żłobków wirników głębokożłobkowych

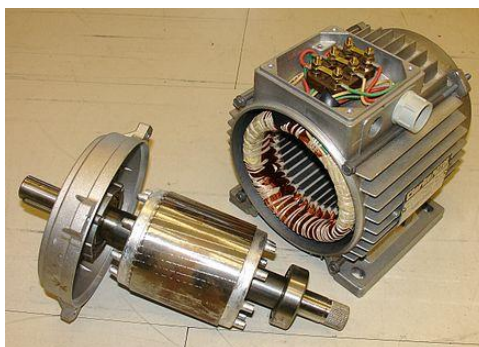
Źródło: Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1978, 173 s



Rys. 2.8 Żłobek wirnika dwuklatkowego

Źródło: Latek W., *Zarys maszyn elektrycznych*, WNT, Warszawa 1978, 173 s

Pomiędzy blachami wirnika i stojana znajduje się tzw. szczelina przywirnikowa. Prąd magnesujący maszyny indukcyjnej jest częścią prądu płynącego w obwodzie maszyna-sieć. Aby współczynnik mocy $\cos\varphi$ był duży, prąd magnesujący powinien mieć jak najmniejszą wartość. Szczelina powietrzna stanowi dla strumienia magnetycznego drogę, na której znajduje się największa reluktancja (rezystancja magnetyczna). Dlatego w celu zmniejszenia oporu magnetycznego szczelina powietrzna powinna być jak najmniejsza – a to uwarunkowane jest względami konstrukcyjnymi. W dużych maszynach szczelina nie przekracza 2 mm.



Rys. 2.9 Silnik indukcyjny klatkowy

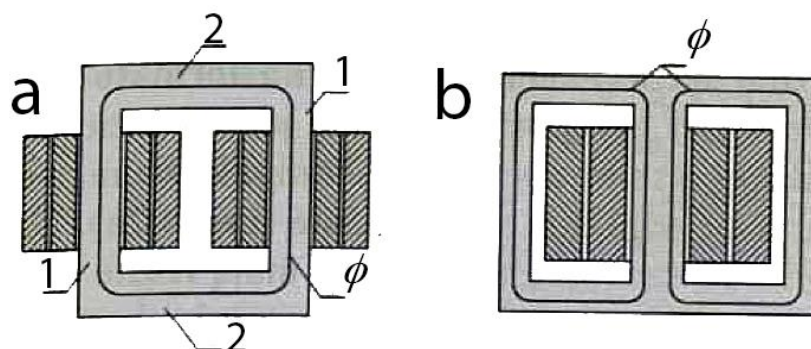
Źródło: <http://www.wikipedia.org/>, stan na dzień: 07.08.2013

6. Budowa transformatorów

Zasadniczymi częściami transformatora są:

- rdzeń wykonany z blach technicznych,
- uzwojenia wykonane z miedzi lub aluminium.

Poza powyższymi transformator ma zawsze układ izolacyjny oraz bardzo często kadz z olejem, rury lub radiatory chłodzące, izolatory przepustowe i przełącznik zacze-pów. Obwodem magnetycznym służącym do przewodzenia strumienia magnetycznego jest rdzeń transformatora. Składa się on z kolumn, na których osadzone są uzwojenia i z jarzm łączących kolumny. Strumień magnetyczny w transformatorze jest strumie-niem zmiennym w czasie, dlatego też w rdzeniu powstają straty na skutek prądów wi-rowych i histerezy. Dla zmniejszenia tych strat rdzeń transformatora buduje się z blach technicznych o grubości 0,35 mm odpowiednio izolowanych. Są to blachy z dużą, bo 4%, domieszką krzemu. Tak duża zawartość Si powoduje, że blachy transformatorowe są twarde i kruche.



Rys. 2.10 Budowa rdzenia transformatora jednofazowego.

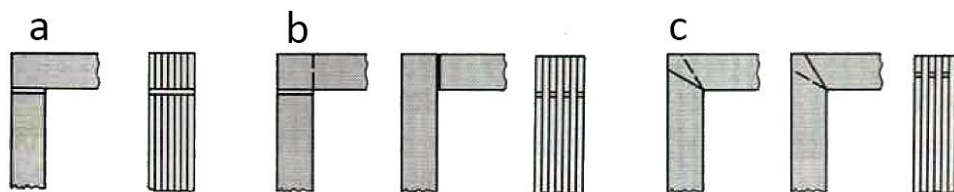
a) rdzeniowego, b) płaszczonego, 1 – kolumny, 2 – jarzma

Źródło: Goźlińska E., *Maszyzny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 63 s

Jednofazowy transformator rdzeniowy posiada dwie kolumny połączone ze sobą jarzmami. Uzwojenia górne oraz dolne umiejscowione są na obydwóch kolumnach transformatora. W transformatorze płaszczyznowym całe uzwojenie jest osadzone na kolumnie środkowej. Druga kolumna jest podzielona na połowy, z których każda – podobnie jak jarzmo – przewodzi połowę strumienia. Dlatego też przekroje jarzm i zewnętrznych kolumn są odpowiednio mniejsze.

Większość transformatorów ma kolumny, jak i jarzma, składane z pojedynczych blach. Blachy jarzm mogą się łączyć z blachami kolumn na zakładkę.

Taki sposób łączenia blach zmniejsza szczelinę powietrzną na drodze strumienia magnetycznego, wymaga natomiast znacznie większego nakładu pracy jak składanie kolumn i jarzm na styk. W przypadku składania rdzenia na styk, w celu uniknięcia zwarć w blachach miejsca styku izoluje się materiałem izolacyjnym np. preszpanem.

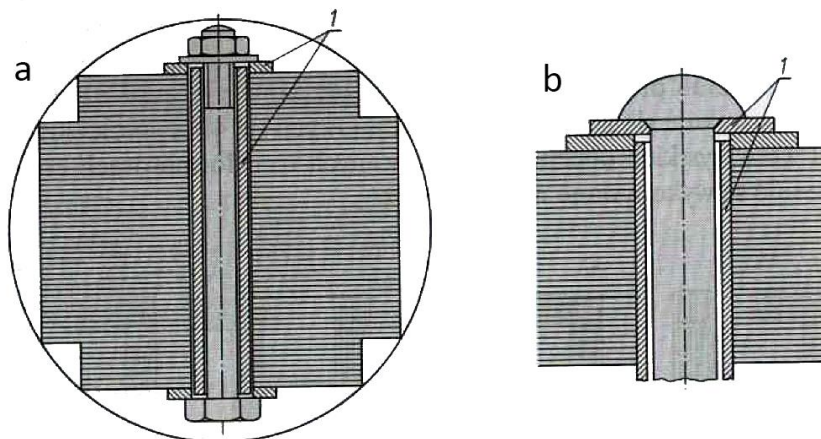


Rys. 2.11 Sposoby składania blach rdzenia

a) na styk, b) na zakładkę zaplecenie prostokątne, c) na zakładkę zaplecenie ukośne

Źródło: Goźlińska E., *Maszyzny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 65 s

Uzwojenia transformatorów osadzone na kolumnach mają kształt kołowy, dlatego dla zwiększenia przekroju żelaza kolumny objętej okręgiem uzwojenia, przekrój kolumny również powinien być zbliżony do koła. Po spakietowaniu blachy transformatora są mocowane za pomocą śrub lub nitów przechodzących na wskroś przez cały pakiet. Śruba odizolowana jest od pakietu blach za pomocą tulei wykonanej z materiału izolacyjnego. Ma to na celu wyeliminowanie zwarć w rdzeniu przez śrubę i zmniejszenie zmiennej strumienia magnetycznego przechodzącego przez litą stal śruby. Dzięki temu zmniejszają się straty energii i śruby mniej się nagrzewają.



Rys. 2.12 Sposób mocowania pakietu blach transformatora

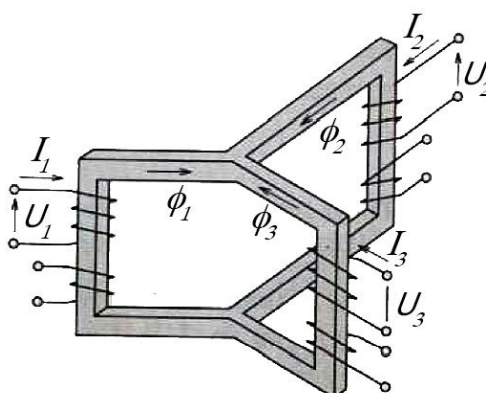
a) za pomocą śrub, b) za pomocą nitów, 1 – izolacja

Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 66 s

Trójfazowy układ transformacji można utworzyć przez zestawienie i odpowiednie połączenie ze sobą trzech oddzielnych transformatorów jednofazowych w symetryczną gwiazdę. Przy takim połączeniu suma chwilowych wartości strumieni fazowych jest równa zero:

$$\phi_1 + \phi_2 + \phi_3 = 0$$

Dzięki temu można usunąć środkowy rdzeń i uzyskać w ten sposób transformator trójfazowy.



Rys. 2.13 Zasada budowy trójfazowego transformatora symetrycznego

Źródło: Goźlińska E., *Maszyny elektryczne*, WSiP, Warszawa 2007, 63 s

Obwody elektryczne transformatora stanowią osadzone na kolumnach uzwojenia wykonane z przewodów miedzianych lub aluminium. Przy małych przekrojach przewody te mają przekroje kołowe i najczęściej izolowane są oprzędem lub oplotem. Przewody okrągłe o większych przekrojach i przewody o przekroju prostokątnym izolowane są przez taśmowanie przewodu na zakładkę lub na styk. Robi się to zwykle za pomocą taśmy papierowej. Najczęściej spotykanym uzwojeniem transformatora jest uzwojenie cylindryczne, w którym uzwojenie górne i dolne wykonane są w formie koncentrycznych cylindrów. Cylinder dolnego napięcia jest osadzony na kolumnie, a na nim znajduje się cylinder górnego napięcia. Uzwojenia są oddzielone od siebie izolacją.

Ze względu na rodzaj czynnika chłodzącego transformatory energetyczne można podzielić na trzy grupy:

- transformatory powietrzne – najczęściej chłodzone w obiegu otwartym, w którym powietrze chłodzące jest pobierane bezpośrednio z otoczenia transformatora. Tego typu transformatory są zazwyczaj stosowane w pomieszczeniach zagrożonych wybuchem,
- transformatory olejowe – są umieszczane w kadzi wypełnionej specjalnym olejem transformatorowym. Kadź jest wykonana z blachy, zaś olej oddaje ciepło do otoczenia poprzez cieńsze od podstawy i przykrywy ścianki kadzi. Olej pełni rolę chłodziwa i izolatora, dlatego też jego jakość jest bardzo istotna i badana podczas eksploatacji transformatora,
- transformatory suche – to transformatory z izolacją żywiczną, mają moce do 4 MVA i są ostatnio coraz częściej stosowane.

Bibliografia:

1. Maszyny elektryczne, E. Goźlińska, WSIP, 2013 r.
2. Zarys maszyn elektrycznych, W. Latek, WNT, 1978 r.
3. Maszyny i napęd elektryczny, Praca zbiorowa, WSIP, 1978 r.
4. Poradnik inżyniera elektryka, Praca zbiorowa, WNT, 1995 r.
5. Maszyny elektryczne w pytaniach i odpowiedziach, W. Latek, WNT, 1994 r.
6. Aparaty i urządzenia elektryczne, W. Kotlarski, J. Grad, WSIP, 2012 r.