**MASZYNY I URZĄDZENIA ELEKTRYCZNE**

Maszyna elektryczna jest urządzeniem elektromechanicznym przetwarzającym, za pośrednictwem pola magnetycznego, energię elektryczną w energię mechaniczną lub odwrotnie,
z udziałem ruchu.

Przemiany energii elektrycznej na energię elektryczną o innych parametrach, bez udziału ruchu, zachodzą np. w transformatorach i przetwornicach elektrycznych.

W transformatorach jak i w maszynach elektrycznych zachodzą zjawiska wspólne, związane z indukcją elektromagnetyczną.

Najliczniejszą grupę maszyn elektrycznych stanowią silniki elektryczne, szeroko stosowane w przemyśle, komunikacji i transporcie, rolnictwie, a także w napędach urządzeń gospodarstwa domowego. Silniki elektryczne prądu przemiennego są obecnie największą grupą odbiorników energii elektrycznej w świecie.

Ze względu na rodzaj prądu i zasadę działania maszyny elektryczne dzieli się na:
      1. maszyny prądu przemiennego:
          a) maszyny synchroniczne,
          b) maszyny indukcyjne (asynchroniczne);
              - jednofazowe,
              - trójfazowe,
          c) maszyny komutatorowe prądu przemiennego:
              - jednofazowe,
              - wielofazowe.
      2. maszyny prądu stałego.

W zależności od rodzaju energii przetwarzanej, każda maszyna elektryczna może pracować jako prądnica lub silnik (bez zasadniczych zmian konstrukcyjnych).
Z tego względu rozróżnia się:
      **- prądnice**- przetwarzające energię mechaniczną na elektryczną;
      **- silniki** - przetwarzające energię elektryczną na mechaniczną;
      **- przetwornice** - przetwarzają energię elektryczną na taką samą energię lecz o innych
 parametrach, np. przetwornice: prądu, napięcia, częstotliwości.

**Podstawowe parametry maszyn elektrycznych**

Każdą maszynę elektryczną charakteryzują znamionowe wartości wielkości elektrycznych
i mechanicznych, do których należą: moc, napięcie, prąd, prędkość obrotowa i inne. Ustalone przez wytwórcę dane znamionowe odnoszą do pracy maszyny w określonych warunkach klimatycznych, tj. w miejscu zainstalowania położonym na powierzchni ziemi na wysokości do 1000 m n.p.m., gdzie temperatura otoczenia nie przekracza 40oC.

Jeżeli maszyna pracuje w temperaturze wyższej niż 40 o*C*, to obciążenie maszyny powinno być odpowiednio mniejsze niż moc znamionowa. W maszynach przeznaczonych do pracy na wysokości ponad 1000 m  n.p.m. dopuszczalne przyrosty temperatury powinny być przyjmowane zgodnie z PN-EN 60034-1:2011 Maszyny elektryczne wirujące -- Część 1: Dane znamionowe
i parametry.

Do znamionowych wielkości elektrycznych charakteryzujących każdą maszynę elektryczną należą:
**1) Napięcie znamionowe***U*N, w V, jest to:

          - wartość skuteczna napięcia przemiennego międzyfazowego dla maszyn trójfazowych
          - wartość napięcia stałego, dla maszyn prądu stałego).

 Napięcia znamionowe maszyn i urządzeń elektrycznych (zalecane dla silników):
          a) maszyn i urządzeń prądu stałego: 6, 12, 24, 36, 48, 60, 72, 96, 110, 220, 440 V.
          b) maszyn i urządzeń prądu przemiennego: 6, 12, 24, 48, 110, 120, 230, 400, 690, 1000,
 3000,6000.
          Napięcia znamionowe prądnic są wyższe o około 5%;

      **2) Prąd znamionowy *I*N**, w A, jest to wartość skuteczna prądu przemiennego lub wartość prądu
 stałego pobieranego z sieci elektroenergetycznej przy obciążeniu maszyny mocą znamionową
 w stanie nagrzanym (w przypadku prądnic i kompensatorów jego wartość wynika z wartości
 mocy i napięcia znamionowego). Jest to wartość skuteczna prądu przemiennego lub wartość
 prądu stałego;

**3) Moc znamionową silnika *P*N**jest mocą mechaniczną oddawaną przez silnik.

*P*N= *P*in*η*N

           Podstawowy wzór na moc znamionową ma postać:
           - dla trójfazowych silników prądu przemiennego:

*P*N= √3 *U*N *I*N cos*φ*N*η*N

           - dla jednofazowych silników prądu przemiennego:

*P*N= *U*N *I*N cos*φ*N*η*N

            - dla silników prądu stałego:

*P*N= *U*N *I*N *η*N

           przy czym:
      *P*N - moc znamionowa silnika, w W;
      *P*in - moc pobierana przez silnik, w W;
      *U*N - napięcie znamionowe, w V;
      *I*N - prąd znamionowy, w A;
      *n*N - znamionowa prędkość obrotowa, obr/min;
           *η*N - znamionowa sprawność;
           cos*φ*N - znamionowy współczynnik mocy.

           Moc znamionowa silnika jest to moc, którą maszyna może dostarczyć bez przekroczenia
 dopuszczalnej
           temperatury nagrzania. Jeżeli została podana moc znamionowa *P*N przy określonej prędkości
 obrotowej *n*N, to jest ona obowiązująca również przy określonym rodzaju pracy: ciągłej,
 dorywczej lub nieokreślonej.

**4) Moc znamionowa i prędkość obrotowa silników elektrycznych małej mocy:**
         a) moc znamionowa w W:
             1; 1,6; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 90; 120; 180; 250; 370; 550; 750; 1100; 1500; 2200; 3000,
         b) prędkość obrotowa, w obr/min.:
             - silniki prądu przemiennego i uniwersalne:
               375; 500; 600; 750; 1000; 1500; 3000; 4000; 6000; 10 000; 12 000; 15 000; 18 000; 20 000;
 24 000,
             - silniki prądu stałego:
               400; 500; 600; 750; 1000; 2000; 3000; 4000; 5000; 6 000; 8 000; 10 000; 12 000; 15 000;
               20 000; 22 000; 30 000; 40 000; 60 000,

**5) Moment znamionowy silnika *M*N**, w Nm (niutonometry). Jeżeli *P*N jest w kW, a *n*N w obr/min,
 to:



## Transformatory

#### ****1. Wprowadzenie****

Transformatorem nazywamy statyczne urządzenie elektryczne, działające na zasadzie indukcji elektromagnetycznej wzajemnej, przetwarzające układ napięć i prądów przemiennych na układ napięć i prądów przemiennych najczęściej o innych wartościach, przy zachowaniu stałej częstotliwości.
Podstawową właściwością transformatora jest więc możliwość zmiany wartości napięcia i prądu w obwodzie prądu przemiennego. Potrzeba takich zmian w układach prądu przemiennego występuje zarówno w systemie elektroenergetycznym (SEE), przy przesyłaniu energii elektrycznej na duże odległości oraz jej rozdzielaniu, jak też w zakładach przemysłowych i w gospodarstwach domowych. Istnieje więc zapotrzebowanie na wiele różnych rodzajów transformatorów.

Oprócz zastosowań energetycznych, w których występują transformatory wielkich mocy, spotyka się liczne odmiany transformatorów specjalnych. Należą do nich transformatory pomiarowe zwane przekładnikami, transformatory spawalnicze i prostownikowe, autotransformatory, przesuwniki fazowe, a także transformatory miniaturowe stosowane w układach automatyki, elektroniki i przesyłania informacji.
      Zakres mocy transformatorów jest bardzo szeroki. Największe transformatory siłowe budowane są na moce rzędu 1GVA, zaś transformatory w układach  elektronicznych – na moc rzędu kilku VA lub nawet poniżej 1VA. Napięcia transformatorów – zależnie od przeznaczenia – wynoszą od kilku woltów do setek kilowoltów.
      Taka różnorodność typów transformatorów oraz zakresu ich mocy i napięć pociąga za sobą różnorodność konstrukcji, jednak zasada ich działania jest zawsze taka sama.

####  ****2. Budowa i podział transformatorów****

      Każdy transformator składa się z następujących podstawowych elementów:
      a) z rdzenia ferromagnetycznego stanowiącego obwód magnetyczny oraz
      b) z dwóch obwodów elektrycznych:
          - uzwojenia pierwotnego oraz
          - uzwojenia wtórnego.

Rdzeń tworzy obwód magnetyczny transformatora złożony z pakietu blach transformatorowych o grubości 0,3 do 0,5 mm, wzajemnie od siebie odizolowanych, np. warstwą lakieru, krzemu, papieru, szkła wodnego itp. Części rdzenia, na których są umieszczone uzwojenia, nazywa się kolumnami lub słupami, a części łączące kolumny od góry i od dołu - jarzmami. Przestrzeń między kolumną a jarzmem nazywa się oknem (Rys. 1 i 2). Izolacja oddzielająca blachy transformatorowe ogranicza przepływ prądów wirowych i zapobiega nadmiernemu nagrzewaniu sie rdzenia.

Obwód elektryczny transformatora stanowią uzwojenia wykonane w układzie współśrodkowym (cylindrycznym)  lub krążkowym z przewodów miedzianych, podzielone na połówki i umieszczone na obu kolumnach rdzenia.

Uzwojenie górnego napięcia jest najczęściej podzielone na kilka cewek, oddzielonych od siebie szczelinami umożliwiającymi lepsze chłodzenie. Uzwojenie dolnego napięcia jest dokładnie odizolowane od uzwojenia górnego napięcia

W układach rzeczywistych spotyka się szereg typów transformatorów o różnorodnej konfiguracji obwodu magnetycznego. Na rysunku 1. przedstawiono transformator jednofazowy, w którym na obu kolumnach umieszczone są dwa niezależne uzwojenia o znanej liczbie zwojów oraz jarzmo górne i dolne łączące obie kolumny.
      W tym przypadku stronę pierwotną transformatora stanowi uzwojenie, do którego podłączone jest źródło transformowanej energii elektrycznej, tzw. uzwojenie pierwotne o liczbie zwojów z1. Stroną wtórną o liczbie zwojów z2 jest uzwojenie, do którego przyłączony jest odbiornik energii elektrycznej o impedancji Zc.


**Rys. 1. Przykład budowy transformatora jednofazowego**
Oznaczenia: 1 - główny strumień magnetyczny Φ, 2 - jarzmo górne i dolne, 3 - kolumny.
Z1 - liczba zwojów uzwojenia pierwotnego, Z2 - liczba zwojów uzwojenia wtórnego.

      Ze względu na kształt obwodu magnetycznego transformatory jednofazowe dzielą się na:
      1) transformatory rdzeniowe,
      2) transformatory płaszczowe.

      **W transformatorze rdzeniowym**(Rys. 2a) uzwojenia pierwotne i wtórne są dzielone na połówki i umieszczone na obu kolumnach. Pola przekroju kolumn i jarzm są wówczas jednakowe.
     **W transformatorach płaszczowych**(Rys. 2b) oba uzwojenia - pierwotne i wtórne - są umieszczone tylko na kolumnie środkowej. Pole przekroju tej kolumny jest około dwukrotnie większe niż pola przekrojów kolumn zewnętrznych i jarzm. A zatem, strumień magnetyczny zamykający się w kolumnie środkowej jest dwukrotnie większy niż strumienie zamykające się przez kolumny i jarzma skrajne.

      Liczba zwojów uzwojenia wynika z wartości napięcia znamionowego transformatora i wymiarów rdzenia.


**Rys. 2 Transformator jednofazowy**
Oznaczenia: a) rdzeniowy, b) płaszczowy, 1 jarzmo górne,
2 - jarzmo dolne, 3 - kolumna, 4 - uzwojenie wtórne, 5 - uzwojenie pierwotne.

      Ze względu na różnice w budowie transformatory można podzielić na trzy podstawowe grupy:
      **1) Transformatory energetyczne** - nazywane również transformatorami mocy, stosuje się przy
          przesyłaniu i rozdziale energii elektrycznej;
    **2) Transformatory małej mocy**– stosowane w urządzeniach elektrycznych i elektronicznych,
          w automatyce, łączności, telemechanice;
**3) Transformatory specjalne** – budowane dla różnych celów specjalnych, np. przekładniki pomiarowe,
          transformatory spawalnicze, probiercze, piecowe, prostownikowe, bezpieczeństwa.

#### ****3. Zasada działania transformatorów****

      Istotę działania transformatora jednofazowego można wyjaśnić na przykładzie transformatora idealnego (tzn. bez strat i rozproszeń magnetycznych), o rozwartych zaciskach uzwojenia wtórnego - w stanie jałowym (Rys. 3).


**Rys. 3. Transformator idealny - stan jałowy**

       Po przyłożeniu do zacisków uzwojenia pierwotnego o liczbie zwojów z1 napięcia sinusoidalnie zmiennego o skutecznej wartości U1(t) = Um cosωt i oczęstotliwości f1popłynie w nim prąd I1 zwany prądem biegu jałowego I0.

      Pod wpływem prądu magnesującego Iμ = I0 zostanie wzbudzony w rdzeniu transformatora strumień magnetyczny Φ(t) = Φm sinωt, opóźniony w fazie o kąt π/2 w stosunku do źródłowego napięcia U1 i wartości maksymalnej strumienia Φm.
      Strumień magnetyczny Φ(t)  skojarzony z uzwojeniami: pierwotnym o liczbie zwojów z1i wtórnym o liczbie zwojów z2, umieszczonymi na kolumnie rdzenia, indukuje w nich, zgodnie z prawem indukcji elektromagnetycznej, napięcia (sem) e1 (i analogicznie  e2) o wartościach chwilowych:



      Wartości skuteczne tych napięć indukowanych w uzwojeniu pierwotnym i wtórnym wynoszą:

E1 = 4,44 z1 Φm f

E2 = 4,44 z2 Φm f

      Iloraz indukowanego napięcia w uzwojeniu pierwotnym E1 i napięcia w uzwojeniu wtórnym E2 określa przekładnię napięciową transformatora, równą przekładni zwojowej nz:



      Przekładnia jest parametrem transformatora określającym jego zdolność do zmiany wartości napięcia i prądu przy stałej częstotliwości.

      Siły elektromotoryczne indukowane w obu uzwojeniach pozostają do siebie w stosunku liczb zwojów i wartości napięć obu uzwojeń:



      W przypadku obciążenia transformatora idealnego zobc > 0,    zobc > ∞,  pod wpływem siły elektromotorycznej E2, o przebiegu przesuniętym w stosunku do strumienia Φ o kąt φ = π/2, w uzwojeniu wtórnym pojawi sie prąd I2 o przebiegu przesuniętym w stosunku do przebiegu E2 = U2 o kąt fazowy φ2, zależny od charakteru odbiornika Zobc.

      Oprócz przepływu Θ1 = I1 z1 pojawi się w transformatorze również przepływ Θ2 = I2 z2, który wytworzy strumień przeciwdziałający, w wyniku czego wypadkowy strumień Φ oraz siła elektromotoryczna E1, będą mniejsze niż w stanie jałowym transformatora idealnego.
      Ponieważ napięcie źródła energii transformowanej jest nadal takie same i równe U1, popłynie w sieci dodatkowy prąd I1. W wyniku tego przepływu wypadkowy strumień magnetyczny Φ zachowa swoją poprzednią wartość. Tak więc w transformatorze idealnym prąd obciążenia zależy wyłącznie od Zobc i od E2.
      Ponieważ w transformatorze idealnym moc pozorna S1 = S2, można wyciągnąć wniosek, że:



      co oznacza, że po podwyższeniu napięcia za pomocą transformatora prąd się nie zmniejsza, a przy jego obniżaniu prąd wzrasta.

           Oprócz podstawowego zadania (zmiana wartości napięcia i prądu przy stałej częstotliwości) transformator może pełnić również inne funkcje, np.:
      1) izolować od siebie galwanicznie obwody elektryczne (np. transformator separacyjny),
      2) służyć jako filtr do eliminacji składowych stałych prądu i napięcia, przy zachowaniu składowych przemiennych,
      3) wzajemnie dopasowywać parametry dwóch części obwodu elektrycznego, aby uzyskać optymalne warunki ich współpracy,
      4) jako czwórnik o odpowiedniej impedancji może być włączony między źródło i odbiornik, np. w celu ograniczenia prądu zwarcia.

      **Transformator rzeczywisty**
      W transformatorze rzeczywistym do zacisków uzwojenia wtórnego jest przyłączony odbiornik (Rys. 4). W zamkniętym obwodzie tego uzwojenia, pod wpływem siły elektromotorycznej E2, popłynie prąd przemiennyI2.
      Powstały przepływ Θ2w uzwojeniu wtórnym wytworzy strumień rozproszenia Φr2. Zmieni się również wartość prądu I1 w uzwojeniu pierwotnym i wartość strumienia rozproszenia Φr1 wytworzonego przez przepływ pierwotny Θ1.
      W tym czasie, gdy w uzwojeniach pierwotnym i wtórnym płyną prądy I1 i I2, strumień magnetyczny Φzamykający się przez rdzeń transformatora jest strumieniem wypadkowym powstałym w wyniku działania dwóch przepływów - Θ1 i Θ2. W powstałym układzie energia elektryczna dostarczana do uzwojenia pierwotnego przy napięciu U1 i prądzie I1 zostaje przetworzona na energię elektryczną otrzymywaną z uzwojenia wtórnego przy napięciu U2 i prądzie I2.


**Rys. 4. Transformator rzeczywisty z1 = z2**
Φr1 - strumień rozproszenia uzwojenia 1, Φr2 - strumień rozproszenia uzwojenia 2.

      Występujące w transformatorze rzeczywistym strumienie rozproszenia Φr1 i Φr2(Rys. 4), zamykają się przez powietrze i sprzęgają się tylko z jednym uzwojeniem: Φr1 z uzwojeniem pierwotnym o liczbie zwojówz1, Φr2 z uzwojeniem wtórnym o liczbie zwojów z2 . W efekcie, wytworzony w rdzeniu rzeczywisty strumień magnetyczny Φ sprzężony z dwoma uzwojeniami będzie nieco mniejszy niż w transformatorze idealnym. Wynika stąd następujący wniosek: nie cała energia bierna bierze udział w wytwarzaniu siły elektromotorycznej.
      Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego, o przekładni 1 : 1, ułatwiający opis analityczny bez konieczności każdorazowego przeliczania poszczególnych wielkości, przedstawia rysunek 5.


**Rys. 5. Schemat zastępczy transformatora rzeczywistego**
Xr1, Xr2 - reaktancje odpowiadające strumieniom rozproszenia odpowiednio: uzwojenia 1 (Φr1) i uzwojenia 2 (Φr2).

      Dla transformatora o przekładni większej niż 1 wartości wielkości uzwojenia wtórnego należy przeliczyć do poziomu napięcia pierwotnego z uwzględnieniem rzeczywistej przekładni.
      W układzie przedstawionym na rysunku 5:
       - straty mocy czynnej w uzwojeniach transformatora uwzględniają rezystancje R1 i R2,
       - straty mocy czynnej w rdzeniu uwzględnia rezystancja RFe, natomiast,
       - straty mocy biernej na rozproszenie strumienia uwzględniają reaktancje Xr1 i Xr2.

      W transformatorze rzeczywistym straty mocy występują w uzwojeniach - pierwotnym i wtórnym - w wyniku przepływu prądów w obwodach o określonej rezystancji. Są to tzw. straty w miedzi oraz straty w rdzeniu magnetycznym, czyli straty histerezowe i wiroprądowe.
      Straty w rdzeniu ∆PFe są sumą  strat mocy wywołane histerezą obwodu magnetycznego ∆Phi strat mocy wywołane prądami wirowymi ∆Pw:

∆PFe = ∆Ph + ∆Pw

      Straty histerezowe (∆Ph) związane są z magnesowaniem rdzenia ferromagnetycznego i wynikają z istnienia pętli histerezy magnetycznej. Sinusoidalnie zmienny strumień magnetyczny wywołuje dwukrotne przemagnesowanie rdzenia w ciągu okresu.
      Straty histerezowe w rdzeniu są proporcjonalne do częstotliwości i w przybliżeniu do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej Bm (przy wartościach Bm ≥ 1[T] ).

      Straty wiroprądowe występują niezależnie od strat histerezowych i wywołane są prądami wirowymi w rdzeniu transformatora.


**Rys. 6. Powstawanie prądów wirowych: ( a ) w masie metalowej ( b ) w pakiecie blach**

      Zjawisko prądów wirowych można wyjaśnić na przykładzie masy metalowej znajdującej się w polu magnetycznym (Rys. 6). Jeżeli pole magnetyczne porusza się z prędkością vp, to zgodnie ze wzorem e = ± dΦ/dt w masie metalowej indukuje się siła elektromotoryczna e o zwrocie wynikającym z reguły prawej dłoni. Pod wpływem siły e w masie metalowej, będącej dobrym przewodnikiem, płyną prądy zamykające się po drodze o jak najmniejszej rezystancji. Prądy te tworzą wiry - stąd nazwa prądy wirowe.
      Z punktu widzenia zjawiska prądów wirowych jest sprawą obojętną, czy masa metalowa znajdująca się w ruchu jest umieszczona w stałym (lub zmiennym) polu magnetycznym, czy też zmienne w czasie pole magnetyczne przenika nieruchomą masę metalową. W transformatorach mamy np. do czynienia z nieruchomym rdzeniem ferromagnetycznym, umieszczonym w zmiennym polu magnetycznym. Prądy wirowe są w większości urządzeń elektrycznych zjawiskiem niepożądanym, gdyż powodują występowanie strat energii zamienianej na ciepło.
      W celu ograniczenia prądów wirowych rdzenie maszyn i urządzeń elektrycznych wykonuje się z blach bądź specjalnych materiałów ferromagnetycznych o dużej rezystywności. Na Rys.6b przedstawiono fragment rdzenia wykonanego z nadmiernie grubych blach, tak aby można było zaznaczyć linie prądów wirowych. Blachy te są od siebie odizolowane cienkim papierem i czasami lakierowane. Prądy wirowe zamykają się w obrębie każdej blachy, napotykając na swej drodze większą rezystancję ze względu na znacznie mniejszy przekrój.
      Straty wiroprądowe są proporcjonalne do kwadratu grubości blach, do kwadratu częstotliwości i do kwadratu amplitudy indukcji magnetycznej, a odwrotnie proporcjonalne do rezystywności blachy.
Zwiększenie około 5-krotnie rezystywności stali można uzyskać przez dodatek krzemu, w ilości około 2,5 do4,5 [%].