



AGH



Studia Podyplomowe

EFEKTYWNE UŻYTKOWANIE ENERGII ELEKTRYCZNEJ



Euro - Centrum

w ramach projektu

Śląsko-Małopolskie Centrum Kompetencji Zarządzania Energią

Wprowadzenie do maszyn i napędów elektrycznych

dr hab. inż. Wiesław Jażdżyński, prof. n. AGH

I. Zasady fizyki związane z wytwarzaniem i przetwarzaniem energii elektrycznej i mechanicznej

/zestawienie/

1. Wytwarzanie energii elektrycznej (prądnice)

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faraday'a (1831)

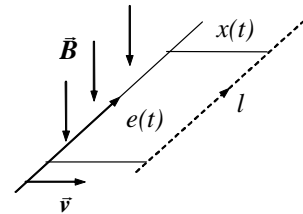
$$e = \oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} \quad \begin{array}{l} \vec{E} - \text{wektor pola elektrycznego} \\ \Phi - \text{strumień magnetyczny} \\ t - \text{czas} \end{array}$$

Ilustracja dla przypadku: $\vec{v} = \text{const}$, $\vec{B} \perp \vec{v}$, $\vec{B} \perp \vec{l}$, $\vec{v} \perp \vec{l}$

$$S(t) = l \cdot x(t)$$

$$\Phi(t) = BS(t) = Blx(t)$$

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} = -Bl \frac{dx(t)}{dt} = -B \cdot l \cdot v$$



2. Przetwarzanie energii elektrycznej (transformatory)

Przypadek szczególny prawa Faraday'a - nieruchomy, zamknięty obwód elektryczny w zmiennym polu magnetycznym

Reguła Lenza (prawo akcji i reakcji)

zwrot indukowanej siły elektromotorycznej SEM jest taki, aby powodowała przepływ prądu wytwarzający strumień Φ_i przeciwdziałający zmianom strumienia Φ wywołującego to SEM.

$$SEM = e = -\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d\Phi_{ind}}{dt}$$

przy zgodnym nawinięciu uzwojenia o z zwojach strumień skojarzony $\Psi = \sum_{i=1}^z \Phi_i = z\Phi$

oraz:
$$e = -\frac{d\Psi}{dt}$$

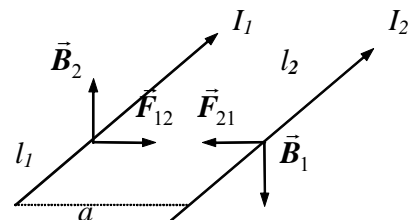
3. Siły i moment elektromagnetyczny (silniki)

prawo Laplace'a $\vec{F} = i(\vec{l} \times \vec{B})$

przypadek oddziaływania dwóch przewodów z prądem

$$B_2 = \mu \frac{I_2}{2\pi a} \quad \vec{F}_{12} = I_1(\vec{l}_1 \times \vec{B}_2) \quad F_{12} = \frac{\mu}{2\pi a} l_1 I_1 I_2$$

zachodzi: $F_{21} = F_{12}$



4. Przetwarzanie energii, w szczególności elektryczna \Leftrightarrow mechaniczna (wszystkie maszyny oraz napędy elektryczne)

wariacyjna zasada najmniejszego działania Hamiltona
równania Eulera-Lagrange'a dla systemów niekonserwatywnych:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_j F_{D_{ij}} = \sum_j F_{z,ij}$$

II. Transformatory i maszyny elektryczne - wiadomości ogólne

Transformator - urządzenie elektryczne do przetwarzania energii elektrycznej; typ energii nie ulega zmianie (w szczególności częstotliwość napięcia przemiennego); w przypadku idealnym nie zmienia się moc, a zmieniają się amplitudy napięć i prądów; nie ma ruchu elementów mechanicznych

Maszyny elektryczne - przetworniki elektromechaniczne służące do przemiany energii:

- a) mechanicznej na elektryczną (generatory, inaczej prądnice)
- b) elektrycznej na mechaniczną (silniki)
- c) elektrycznej na elektryczną (przetwornice)

Cechą charakterystyczną jest ruch obrotowy (maszyny wirujące) lub postępowy (maszyny liniowe) elementów mechanicznych

W przeciwieństwie do transformatorów przetwornice pozwalają zmienić częstotliwość napięcia

Ta sama maszyna elektryczna może pracować jako silnik lub jako generator, jednak maszyny projektowane do konkretnych zastosowań są efektywniejsze energetycznie.

Klasyfikacja maszyn elektrycznych (przykłady):

- prądu przemiennego i stałego
- jednofazowe i wielofazowe (3-fazowe)
- bezkomutatorowe i komutatorowe
- z magnesami trwałymi i bez magnesów
- z polem magnetycznym i elektrycznym (piezoelektryczne)

Napęd elektryczny - złożony układ elektromechaniczny zawierający przynajmniej jeden silnik elektryczny i urządzenie robocze sprzęgnięte mechanicznie (praca silnikowa maszyny) lub źródło energii mechanicznej (np. turbina wodna, parowa, dieslowa, wiatrowa) oraz prądnicę elektryczną (praca generatorowa).

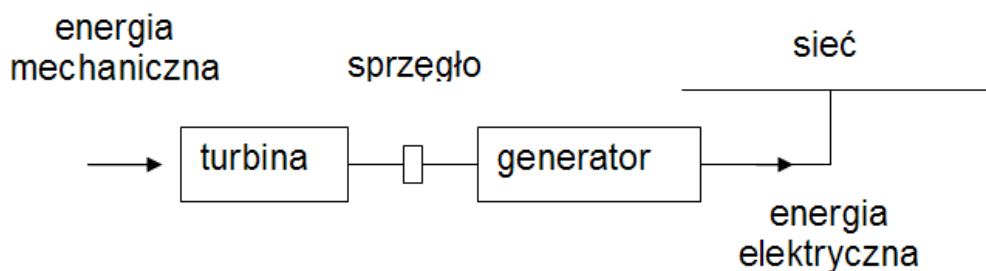
Przepływ mocy elektrycznej (P_{e1}) oraz mechanicznej (P_m) w napędach elektrycznych (praca maszyny elektrycznej jako prądnica (1), silnik (2) i przetwornica (3)):

- 1) $\{ \text{maszyna napędzająca /turbina/} \} \xRightarrow{P_m} \text{prądnica} \xRightarrow{P_{e1}} \{ \text{sieć elektryczna} \}$
- 2) $\{ \text{sieć elektryczna} \} \xRightarrow{P_{e1}} \{ \text{silnik} \} \xRightarrow{P_m} \{ \text{maszyna napędzana /urządzenie robocze/} \}$
- 3) $\{ \text{sieć el. } (U_1, f_1) \} \xRightarrow{P_{e11}} \{ \text{silnik} \} \xRightarrow{P_m} \text{prądnica} \xRightarrow{P_{e12}} \{ \text{sieć el. } (U_2, f_2) \}$

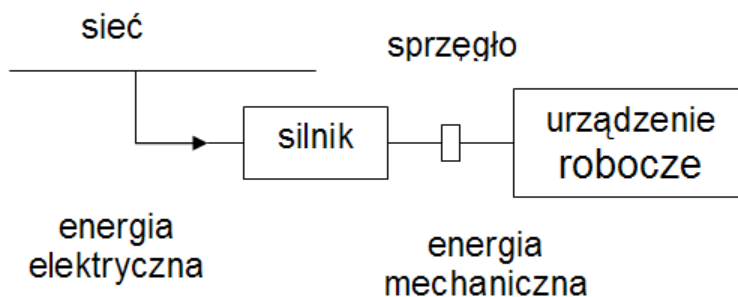
Każdy etap przetwarzania energii jest związany ze stratami energii, a ich minimalizacja jest elementem energooszczędności.

Przykłady napędów prostych

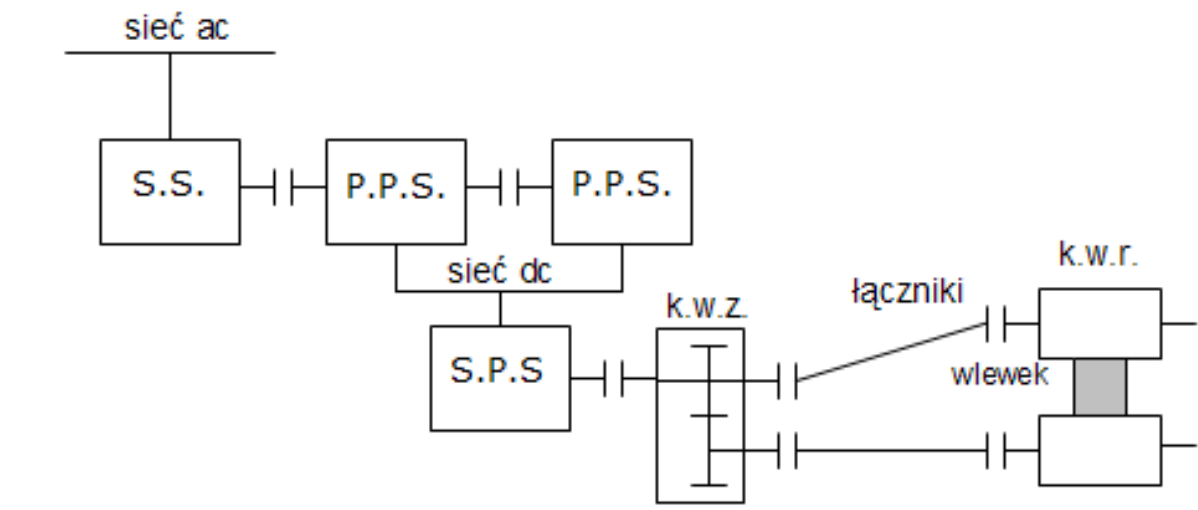
(a) wytwarzanie energii elektrycznej



(b) wytwarzanie energii mechanicznej



Przykład złożonego napędu dużej mocy (walcarka - zgniatacz)



oznaczenia: S.S. - silnik synchroniczny, P.P.S. - prądnice prądu stałego, S.P.S. - silnik prądu stałego, k.w.z. - klatka walców zębatych (przekładnia), k.w.r. - klatka walców roboczych, ac - sieć trójfazowa

Efektywne Użytkowanie Energii Elektrycznej

Wprowadzenie do maszyn i napędów elektrycznych

Ważniejsze zjawiska fizyczne występujące w maszynach i napędach elektrycznych

- zjawiska elektromagnetyczne
- zjawiska elektrodynamiczne
- zjawiska cieplne
- inne, bardziej szczegółowe: np. zjawisko magnetostrykcji, efekt piezoelektryczny, rezonans elektryczny i elektromechaniczny, nasycenie, histereza, wypieranie prądu

Ważniejsze prawa fizyki i pojęcia wykorzystywane do zapisu równań równowagi i opisu własności transformatorów, maszyn i napędów elektrycznych:

- w ogólności: prawa Maxwella, w szczególności:
- prawo Ohma: $\mathbf{U} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{I}$
(powyżej odpowiednio macierze napięć, rezystancji i prądów w układzie)
- postulaty Kirchoffa: $\sum U_i = 0$ w zamkniętym obwodzie elektrycznym
 $\sum i_i = 0$ w węźle
- równania Eulera-Lagrange'a (z zasady zachowania energii)

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} + \sum_j F_{D_{ij}} = \sum_j F_{z,ij}$$

$L = E_{ko} - V$ funkcjonał energii Lagrange'a

q_i, \dot{q}_i - i-ta współrzędna uogólniona i jej pochodna względem czasu

E_{ko} koenergia elektryczna

V - energia potencjalna

$F_{D_{ij}}, F_{z,ij}$ - siły uogólnione, odpowiednio dyssypacji (rozproszenia) i zewnętrzne

- prawa Newtona (ruch jednostajny, przyspieszony, zasada akcji i reakcji)

Przykłady równań w maszynach elektrycznych:

- równanie napięciowe (obwodowe) w uzwojeniu maszyny elektrycznej, bez sprzężeń magnetycznych:

$$U = Ri + \frac{d\Psi(i, \varphi)}{dt} = U_R + E_{tr} + E_{rot} = Ri + \frac{\partial \Psi}{\partial i} \frac{di}{dt} + \omega \frac{\partial \Psi}{\partial \varphi}$$

składowe: U_R - spadek napięcia omowy

E_{tr} - siła elektromotoryczna transformacji

E_{rot} - siła elektromotoryczna rotacji

oznaczenia:

R, i - rezystancja i prąd uzwojenia

Ψ - strumień skojarzony z uzwojeniem

φ, ω - kąt obrotu i prędkość kątowa wirnika

- prawo Faraday'a $e = -\frac{d\Psi}{dt}$ siła elektromotoryczna

Ψ - strumień skojarzony

- prawo Laplace'a - siła działająca ma przewód z prądem w polu magnetycznym

- równania momentów:

$$\mathbf{J} \frac{d^2 \boldsymbol{\varphi}}{dt^2} + \mathbf{D} \frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt} + \mathbf{K} \boldsymbol{\varphi} = \mathbf{T}$$

oznaczenia: \mathbf{J} , \mathbf{D} , \mathbf{K} - macierze bezwładności, dyssypacji i sprężystości podsystemu mechanicznego

$\boldsymbol{\varphi}$ - wektor kątów obrotu bezwładności

\mathbf{T} - wektor momentów zewnętrznych

- moment elektromagnetyczny

$$T_{el} = \frac{dE_{ks}}{d\varphi} = \frac{1}{2} \mathbf{i}^T \frac{\partial \boldsymbol{\Psi}}{\partial \varphi}$$

\mathbf{i} - wektor prądów w uzwojeniach

$\boldsymbol{\Psi}$ - wektor strumieni skojarzonych z tymi uzwojeniami

- przykład równania cieplnego uzwojenia maszyny (metoda obwodowa)
- przykład równania cieplnego uzwojenia maszyny (metoda obwodowa)

$$\frac{d\Delta\vartheta}{dt} = \frac{1}{m \cdot c} \cdot \{\Delta P - \alpha \cdot S \cdot \Delta\vartheta\} \quad (27)$$

gdzie:

$\Delta\vartheta$ - przyrost temperatury uzwojenia

c - ciepło właściwe,

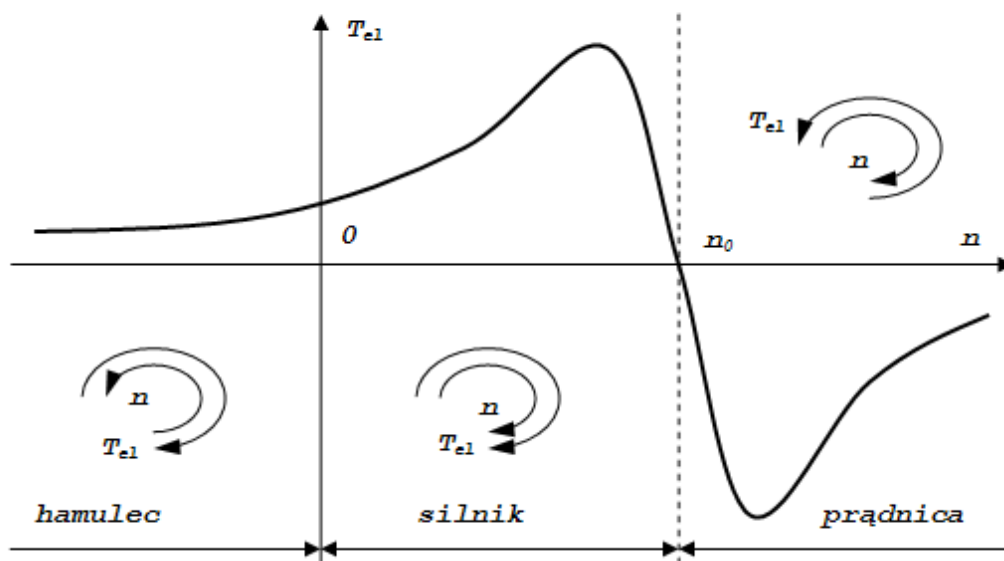
m - masa uzwojenia,

P - moc źródła ciepła,

S - pole powierzchni, przez którą ciepło jest oddawane,

α - współczynnik oddawania ciepła.

Zakresy pracy maszyny elektrycznej (na przykładzie charakterystyki momentu elektromagnetycznego maszyny asynchronicznej)



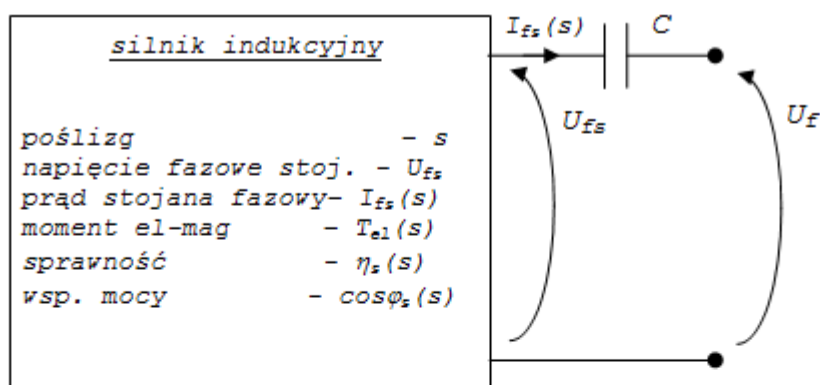
Efektywne Użytkowanie Energii Elektrycznej Wprowadzenie do maszyn i napędów elektrycznych

Moc bierna i jej kompensacja.

Praca maszyn i napędów elektrycznych związana jest nie tylko ze stratami mocy czynnej, ale również poborem lub zwrotem do sieci energii biernej.

W ogólnym, ale uproszczonym przypadku, przy założeniu liniowości i zastosowaniu zasad równoważników elektromechanicznych, napęd elektryczny „widziany” od strony sieci elektroenergetycznej można przedstawić jako równoważne rzeczywiste sterowane źródło napięciowe o zmiennych parametrach, którego impedancja jest typu dwójnika RLC (w przypadku układów wielofazowych - dla jednej fazy), najczęściej typu RL.

Przykładowo, w stanie pracy ustalonej z poślizgiem s , schemat sytuacyjny symetrycznego silnika indukcyjnego można przedstawić w postaci:



Jeżeli moc bierna $Q=3U_{fs}I_{fs}\sin\phi_s$ pobierana przez urządzenie jest większa od dopuszczalnej, również podlega opłacie przez odbiorcę. Ma to związek ze wzrostem strat energii czynnej w sieci przesyłowej. W powyższym przypadku można tego uniknąć kompensując nadmiar mocy biernej np. przy pomocy baterii kondensatorów o pojemności C spełniającej warunek:

$$\frac{(U_{fs}/I_{fs})\sqrt{(1-\cos\phi_s^2)}-1/(\omega_0 C)}{(U_{fs}/I_{fs})\cos\phi_s} \leq \operatorname{tg}\phi_{dop} \quad (=0.4)$$

Zwykle $\phi_{dop}=0.4$, o ile nie ma odrębnej umowy między odbiorcą i dostawcą energii elektrycznej, która zmienia tą wartość. Wielkość ω_0 jest pulsacją sieci.

Efektywne Użytkowanie Energii Elektrycznej

Wprowadzenie do maszyn i napędów elektrycznych

Straty w maszynach i napędach elektrycznych

Straty - część energii dostarczonej do układu, która ulega nieodwracalnej przemianie w ciepło, a następnie rozproszeniu

Ogólna zasada:

(mniejszy koszt urządzenia) => (większe obciążenia elementów wewnętrznych) => (wyższe temperatury, większe straty) => (mniejsza niezawodność i czas życia urządzenia).

Składniki strat:

- Straty mocy czynnej w uzwojeniach:

$$\Delta P = RI^2$$

R , I - rezystancja (zależna od temperatury i częstotliwości prądu elektrycznego) i prąd skuteczny uzwojenia

- efekt wypierania prądu => $R = R_{\infty} > R_{\infty}$

- straty mocy czynnej w elementach rdzeni maszyn prądu przemiennego:

straty spowodowane histerezą => $\Delta P_h \approx c_h B_m^2 f$

straty spowodowane prądami wirowymi => $\Delta P_w \approx c_w B_m^2 f^2$

c_h , c_w - współczynniki

B_m - amplituda indukcji magnetycznej w danym elemencie

f - częstotliwość

zależność przybliżona (wzór Steinmetza)

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_w \approx c_{Fe} B_m^2 f^{1.3}$$

w ogólnym przypadku straty od prądów wirowych zależą od $\frac{dB}{dt}$

- straty mocy w izolacji:

$$\Delta P_{\epsilon} \approx c_{\epsilon} U^2 f \operatorname{tg} \varphi$$

U - napięcie na izolacji

f - częstotliwość napięcia (dla napięć przemiennych)

φ - kąt stratności dielektryka

- straty mechaniczne

- tarcie wewnętrzne, strukturalne

- dla typu wiskotycznego i modelu liniowego:

$$\Delta P_D \approx \frac{1}{2} D_o \omega^2 \text{ lub } \Delta P_D \approx \frac{1}{2} D_i (\Delta \omega)^2$$

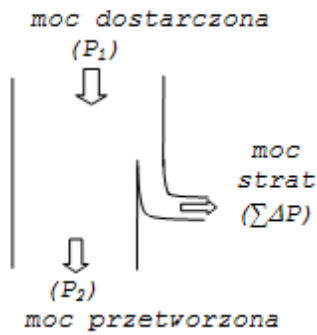
D_o , D_i - współczynniki dyssypacji

ω - prędkość kątowna (lub względna prędkość kątowna $\Delta \omega$ sąsiednich elementów wirujących)

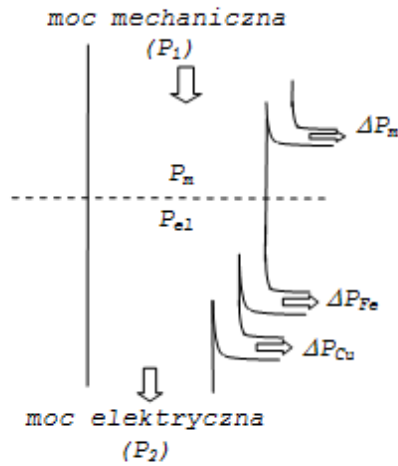
Bilans mocy, sprawność

Bilans mocy

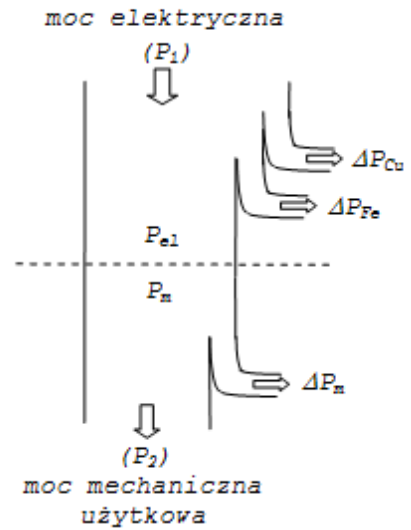
Maszyna elektryczna



Prądnica



Silnik



Sprawność maszyny:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P_i} = \frac{P_1 - \sum \Delta P_i}{P_1}$$

ΔP_{Cu} - straty w uzwojeniach (najczęściej miedzianych lub aluminiowych)

ΔP_{Fe} - straty w elementach ferromagnetycznych (prądy wirowe, histereza, dodatkowe)

ΔP_n - straty mechaniczne (tarcie w łożyskach, szczotkach, wentylacja)

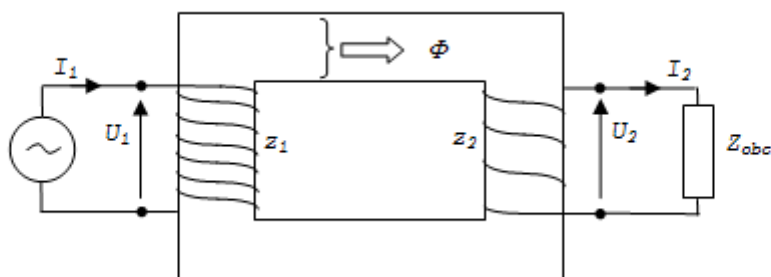
Wybrane własności podstawowych typów maszyn

Transformatory (1-fazowy)

Typy: transformatory mocy, specjalne, jedno- i wielofazowe

Elementy budowy: rdzenie, jarzma, kolumny, uzwojenia, układ izolacji, układ chłodzenia

Zasada działania (model idealny, pominięte straty)



związki:

$$\text{SEM w uzwojeniu „1”} - e_1(t) = -\frac{d(z_1\Phi(t))}{dt} \qquad \Phi(t) = \Phi_m \sin\omega_0 t$$

$$\text{wartości skuteczne} \qquad U_1 \approx E_1 = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} z_1 \Phi_m \qquad U_2 \approx E_2 = \frac{\omega_0}{\sqrt{2}} z_2 \Phi_m$$

$$\text{przekładnia zwojowa} \qquad g_z = \frac{E_1}{E_2} = \frac{z_1}{z_2}$$

$$\text{przekładnia napięciowa} \qquad g_u = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{z_1}{z_2}$$

$$\text{związki między mocami} \qquad P_1 \approx P_2, \quad Q_1 \approx Q_2, \quad S_1 \approx S_2$$

$$\text{związek między prądami} \qquad S_1 = S_2 \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = \frac{z_2}{z_1}$$

model rzeczywisty (ze stratami)

$$\text{dla } i\text{-tej fazy} \qquad u_i(t) = R_i i_i - e_i = R_{\Delta} i_i + \frac{d(z_i \Phi_i)}{dt}$$

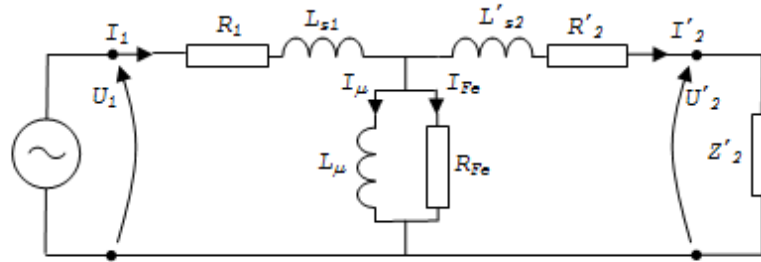
Znamionowe tryby pracy

znamionowy bieg jałowy:	$\{Z_{obc} = \infty, U_1 = U_{1N}\} \Rightarrow \{I_2 = 0, I_1 = I_{10}, P_1 = P_{10} \cong \Delta P_{Fe0}\}$
znamionowy stan zwarcia:	$\{Z_{obc} = 0, I_2 = I_{2N}\} \Rightarrow \{U_1 = U_{1z}, I_1 = I_{1z}, P_1 = P_{1z} \cong \Delta P_{Cu,z}\}$
praca znamionowa:	$\{Z_{obc} = Z_N, U_1 = U_{1N}\} \Rightarrow \{U_2 = U_{2N}, I_2 = I_{2N}, S_1 = S_N\}$

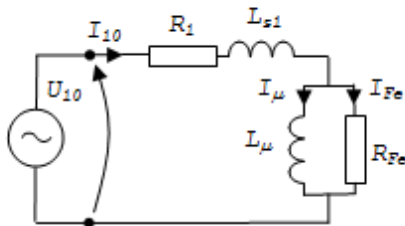
Tabliczka znamionowa: dane producenta o transformatorze

Schemat zastępczy

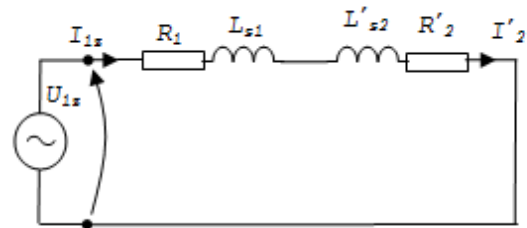
a) stan pracy ($Z_2=Z_{obc}$)



b) stan jałowy

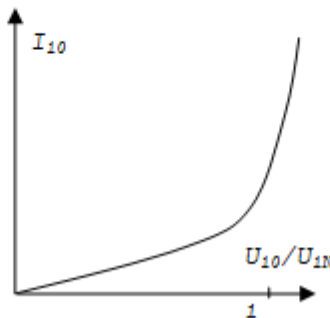
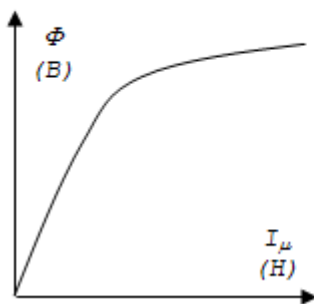


c) stan zwarcia

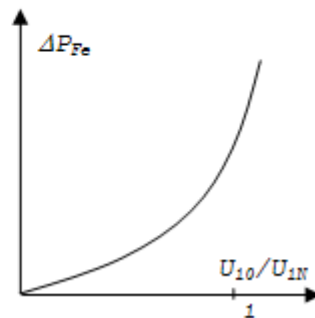


Charakterystyki

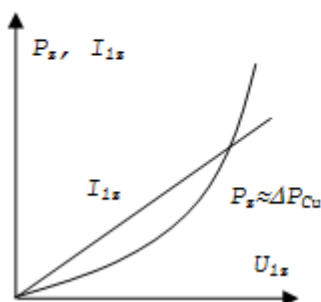
bieg jałowy



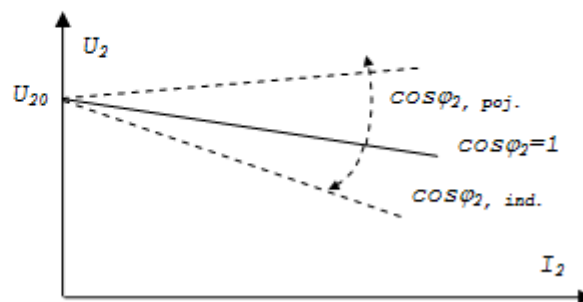
$$\Delta P_{Fe} \approx U_{10}^2 (c_1 + c_2 / f)$$



charakterystyki zwarcia



charakterystyki zewnętrzne



Straty i sprawność; warunki na obciążenie do osiągnięcia maksymalnej sprawności

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum \Delta P_i} = \frac{I_2 S_N \cos \varphi_2}{I_2 S_N \cos \varphi_2 + (I_2)'^2 \Delta P_{2N} + \Delta P_j}$$

$$\max(\eta) \text{ gdy } \frac{\partial \eta}{\partial I_2} = 0 \rightarrow (I_2)_{opt}^2 = \frac{\Delta P_j}{\Delta P_{2N}}$$

$$I_2 = \frac{I_2}{I_{2N}} \rightarrow (I_2)'^2 = \left(\frac{I_2}{I_{2N}} \right)^2 \cong \frac{\Delta P_2}{\Delta P_{2N}}$$

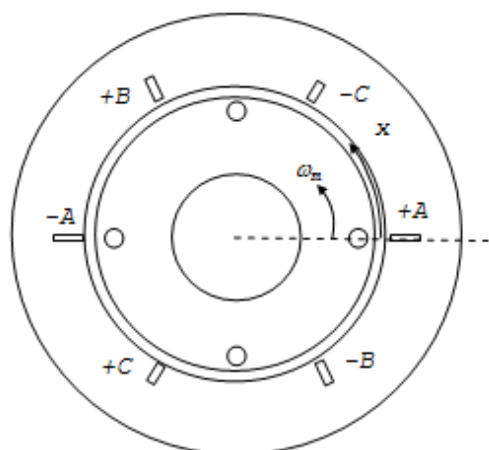
$$\max \eta \rightarrow \Delta P_2 = \Delta P_j \quad \text{lub} \quad \max \eta \rightarrow \Delta P_{Cu} \cong \Delta P_{Fe}$$

Maszyna asynchroniczna 3-fazowa

Budowa:

- pierścieniowa
- klatkowa, 2-klatkowa, głębokożłobkowa
- uzwojenia
- chłodzenie

Pole wirujące (dla podstawowej harmonicznej)



cewki uzwojeń fazowych:

$\{ (+A, -A), (+B, -B), (+C, -C) \}$ → przesunięte w fazie pola pulsujące (dwa przeciwbieżne pola wirujące dla każdej fazy)

$\{ (+A, -A) + (+B, -B) + (+C, -C) \}$ → pole wirujące

indukcja magnetyczna w szczelinie powietrznej stojan-wirnik:

$$B(x,t) = B_m \sin\left(\frac{x}{\tau} \pi - \omega_0 t\right) \quad \text{gdzie:}$$

$$B_m = \frac{3}{2} B_{Am} = \frac{3}{2} B_{Bm} = \frac{3}{2} B_{Cm} \quad \text{- amplituda indukcji pola wirującego}$$

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} \quad \text{- podziałka biegunowa w szczelinie stojan-wirnik}$$

Poślizg, prędkość obrotowa, kierunek wirowania

prędkość kątowna synchroniczna: $\omega_{0m} = \frac{\omega_0}{p}$ (rad/s), $p = 1.$ par biegunów

prędkość obrotowa synchroniczna: $n_s = \frac{30 \omega_{0m}}{\pi}$ (obr/min)

prędkość obrotowa n (obr/min)

poślizg $s = \frac{n_0 - n}{n_0}$

zmiana kierunku wirowania: zamiana zacisków jednego z uzwojeń fazowych

Rozruch silnika indukcyjnego:

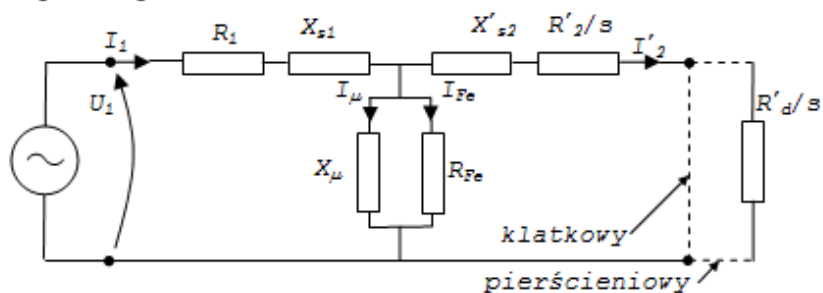
- bezpośredni
- przełącznik Y/ Δ
- wirnik 2-klatkowy, głębokożłobkowy
- opory rozruchowe (pierścieniowy), rozruszniki wiroprowadowe
- soft-start

Regulacja prędkości obrotowej

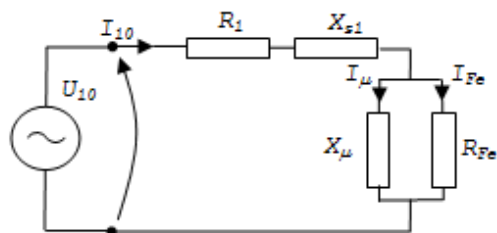
- zmiana liczby par biegunów
- zmiana częstotliwości napięcia zasilającego (falowniki)
- zmiana oporu w obwodzie wirnika (s. pierścieniowy, sposób energo-chłonny)
- źródło napięcia o zmiennej częstotliwości w obwodzie wirnika (pierścieniowy, maszyna dwustronnie zasilana)

Schematy zastępcze

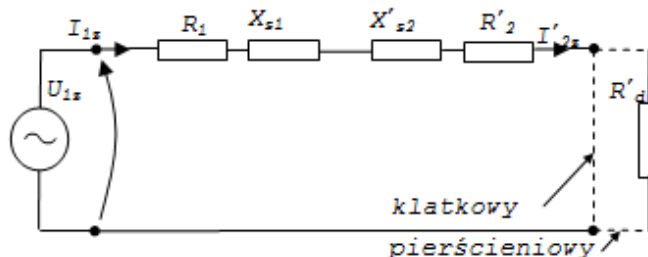
a) stan ustalony z poślizgiem s



a) stan ustalony biegu jałowego



b) stan ustalony dla zablokowanego wirnika



Pomiar: $(P_0, I_{10}, U_{10}) \Rightarrow$

X_μ, R_{Fe}

(założenie: $R_1=0, X_{s1}=0$)

Pomiar: $(P_s, I_{1s}, U_{1s}), \Rightarrow$

R_1, X_{s1}

(założenie: $R_1=R'_2, X_{s1}=X'_{s2}$,
 R_1 można zmierzyć bezpośrednio w klatkowym, a w pierścieniowym również R'_2)

Moment elektromagnetyczny (stan ustalony)

wzór Klossa

$$\frac{T_{el}}{T_k} = \frac{2 + \beta s_k}{s_k / s + s / s_k + \beta s_k} \quad \text{gdzie:}$$

$$s_k \cong \frac{R_2' + R_d'}{X_{s1} + X_{s2}'} \quad \beta = \frac{2R_1}{R_2' + R_d'} \quad T_k = \frac{3}{\omega_m} \frac{U_1^2}{2(X_{s1} + X_{s2}')}$$

Związek między mocą i momentem elektromagnetycznym w silniku

$$T_{el} = \frac{P_2 + \Delta P_m}{\omega_m} = \frac{P_1 - \Delta P_{Cu} - \Delta P_{Fe}}{\omega_{0m}} \quad \omega_m = \frac{\pi n}{30} \quad \omega_{0m} = \frac{\omega_0}{p} \quad \omega_0 = 2\pi f$$

n - prędkość obrotowa (obr/min)

ω_0 - pulsacja sieci

p - liczba par biegunów silnika (jeżeli częstotliwość sieci $f_N=50\text{Hz}$, to p - liczba całkowita najbliższa $3000/n_N$, n_N - znamionowa prędkość obrotowa)

Zależność funkcji momentu od parametrów $\{R_1, R_2', f, U_1\}$

Straty, sprawność, współczynnik mocy

straty w uzwojeniach: (5-15) % P_N
zależność od U, f, T_{obc}
małe maszyny - więcej
stożan, wirnik - około po połowie

straty w rdzeniach (2-5) % P_N
zależność od $\sim U^2 \cdot f^{1.3}$
praktycznie stożan

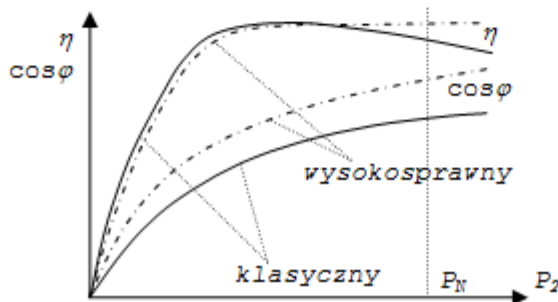
straty dodatkowe (0.5-2) % P_N
prądy wirowe w aktywnych oraz biernych elementach maszyny

straty mechaniczne ((0.5-1.5) % P_N
łożyska, wentylacja

zapotrzebowanie mocy na wykonanie pracy - moc czynna
pobierana $P_1 = 3UI \cos\varphi$ i wydawana $P_2 = 3UI \eta \cos\varphi$

zapotrzebowanie na moc źródeł energii - moc pozorna
 $S = 3UI$

przykład zależności sprawności η i współczynnika mocy $\cos\varphi$ od obciążenia P_2 dla klasycznego i wysokosprawnego silnika indukcyjnego



Maszyny synchroniczne

- ustalona elektryczna prędkość kątowna wirnika i pola wirującego
- charakter pracy (prądnicą lub silnik) zależy od kąta mocy (kąt elektryczny między różnoimiennymi biegunami pola wirującego i wirnika)

prądnicą - $f = \frac{p \cdot n}{60}$ częstotliwość napięcia stojana

amplituda pola wirnika „wyprzedza” amplitudę pola wirującego

silnik - $n = \frac{60f}{p}$

amplituda pola wirującego „wyprzedza” amplitudę pola wirnika

Budowa

- cylindryczne (zwykle szybkobieżne, głównie prądnice)
- jawnobiegunowe (zwykle wolnobieżne, głównie silniki)
- z magnesami trwałymi
- ważniejsze elementy:
 - uzwojenie stojana
 - uzwojenie wzbudzenia (układy szczotkowe, bezszczotkowe, samowzbudne)
 - klatka tłumiąca
 - nierównomierna szczelina powietrzna
 - układ chłodzenia (powietrzny, wodny, wodorowy)

Straty

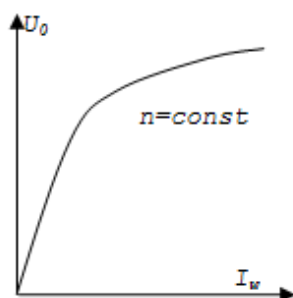
- w uzwojeniu twornika $\Delta P_{Cu} = (0.3-0.8) \% P_N$
- wzbudzenia $\Delta P_w = (0.3) \% P_N$
- mechaniczne (tarcia i wentylacji) $\Delta P_m = (1.0 - 1.5) \% P_N$ (chłodzenie wodorowe - 0.2-0.3%)
- w rdzeniu $\Delta P_{Fe} = (0.5-1.0) \% P_N$

Koncepcja analizy

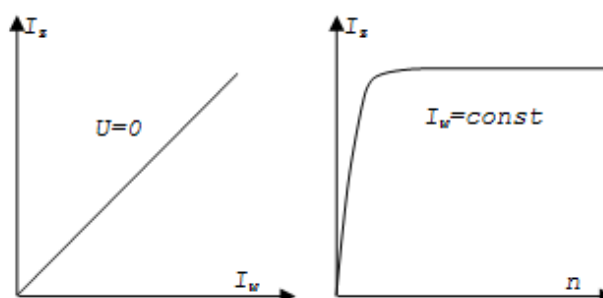
- współrzędne dq (Parka) - wielkości fizyczne (prądy, napięcia) w układzie współrzędnych wirnika w stanie ustalonym = const

Charakterystyki prądnicy

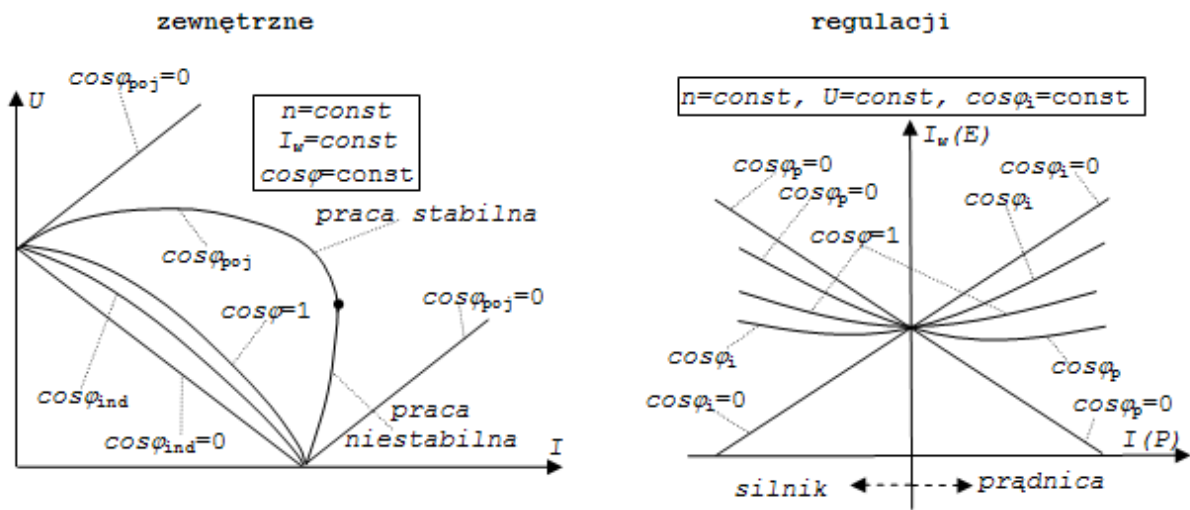
biegu jałowego



zwarcia



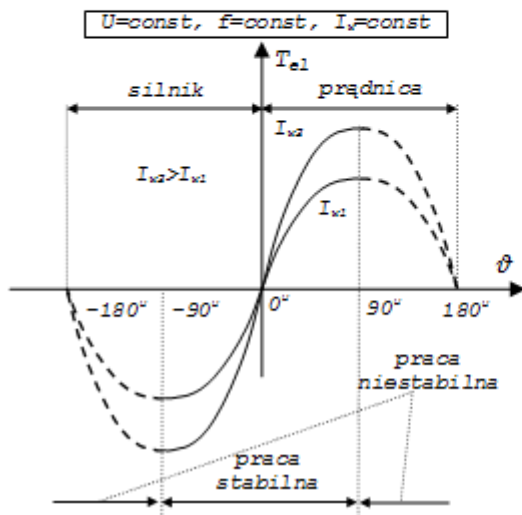
Charakterystyki prądnicy c.d.



Moment elektromagnetyczny i przeciążalność

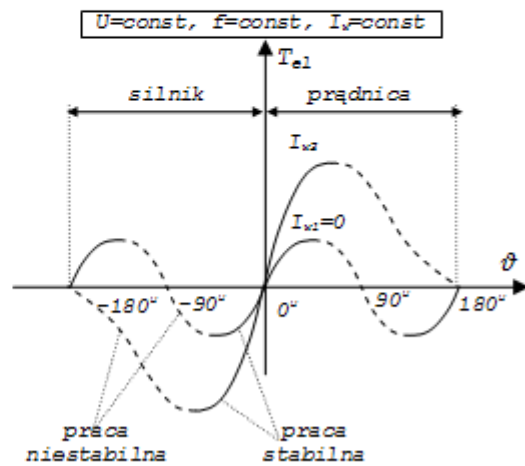
maszyna cylindryczna

$$T_{el} \cong c \frac{UE}{X_d} \sin \vartheta$$

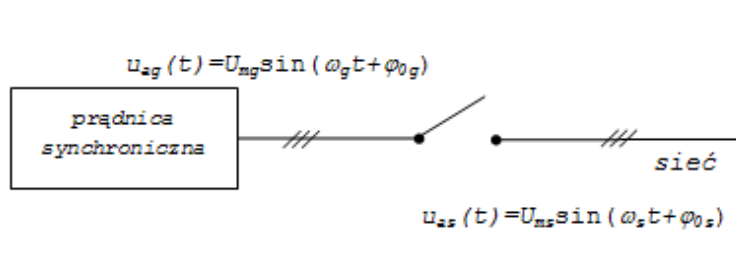


maszyna jawnobiegunowa

$$T_{el} \cong c \left[\frac{UE}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} U^2 \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2 \vartheta \right]$$



Synchronizacja z siecią

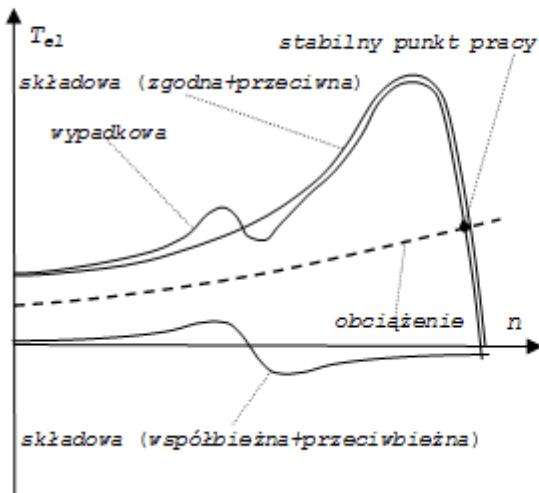


- warunki:
- a) $U_{ng} = U_{ns}$
 - b) $\omega_g = \omega_s$
 - c) $\varphi_{0g} = \varphi_{0s}$
 - d) $\varphi_{bg}(t) = \omega_g t + \varphi_{0g} + 2\pi/3 \Rightarrow \varphi_{bs}(t) = \omega_s t + \varphi_{0s} + 2\pi/3$

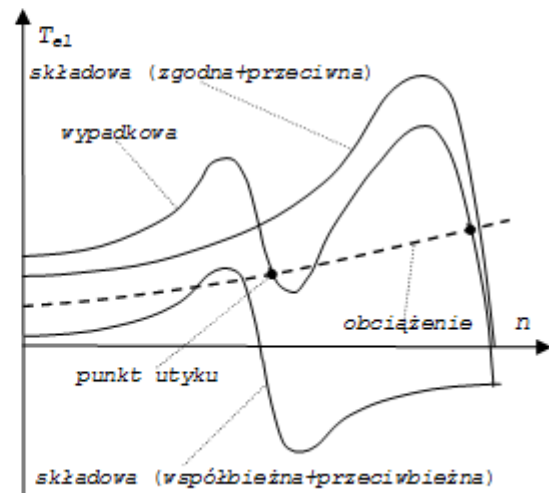
ideksy: „s” - sieć, „g” - prądnicą

Rozruch asynchroniczny

Uzwojenie wzbudzenia zwarte oporem R,
(zwykle $R=10R_w$)



Uzwojenie wzbudzenia rozzwarte



Maszyny prądu stałego

Zasada działania

Uproszczona interpretacja:

silnik: $T_{el} = c_T \cdot B_{wzb} \cdot I_{tw}$ (z prawa Laplace'a)
 c_T - stała zależna od konstrukcji
 B_{wzb} - indukcja magnetyczna pod biegunem głównym wytworzona przez prąd w uzwojeniu wzbudzenia
 I_{tw} - prąd w uzwojeniu twornika

prądnica: $E = c_E \cdot B_{wzb} \cdot \omega$ (z prawa Faraday'a)
 c_E - stała zależna od konstrukcji
 B_{wzb} - indukcja magnetyczna pod biegunem głównym wytworzona przez prąd w uzwojeniu wzbudzenia
 ω - prędkość kątowna wirnika

Budowa

Ważniejsze elementy:

- twornik
- jarzmo stojana
- bieguny główne, nabiegunniki
- bieguny pomocnicze (komutacyjne)
- uzwojenia (twornika, wzbudzenia, komutacyjne, kompensacyjne)
- komutator, szczotki

Ważniejsze zjawiska

- komutacja (prostowanie prądu uzwojenia twornika)
 - prostoliniowa
 - przyspieszona
 - opóźniona
- oddziaływanie twornika + nasycenie
 - wpływ na pracę prądnicy
 - wpływ na pracę silnika
- środki poprawy komutacji i kompensacji oddziaływania twornika

Typy maszyn

w zależności od skojarzenia uzwojenia twornika i wzbudzenia

- obcowzbudne (uzwojenia niezależne)
- bocznikowe (połączenie równoległe)
- szeregowe (połączenie szeregowe)
- bocznikowo-szeregowe (dwa uzwojenia wzbudzenia, jedno równoległe, jedno szeregowo)

Własności ruchowe prądnic

Równania dla obwodu twornika stanu ustalonego

$$U_t = E - R_t I_t = c_E \Phi(I_w) n - R_t I_t$$

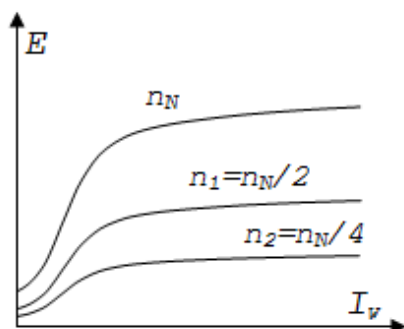
Wielkości definiujące jednoznacznie stan pracy prądnicy:

- prędkość obrotowa n
- prąd wzbudzenia
- napięcie twornika
- prąd twornika

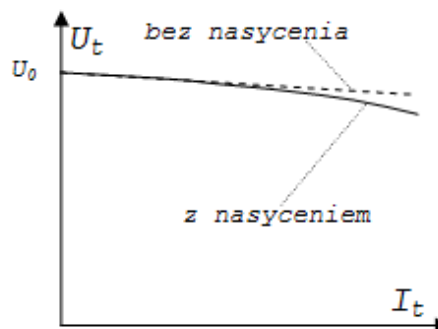
Charakterystyki:

- biegu jałowego (nasylenie, histereza, remanent,
- obciążenia $U_t = f(I_w)$, $I_t = \text{const}$, $n = \text{const}$
- regulacji $I_w = f(I_t)$, $U_t = \text{const}$, $n = \text{const}$
- zewnętrzne $U_t = f(I_t)$, $I_w = \text{const}$, $n = \text{const}$

Prądnica obcowzbudna



charakterystyka. biegu jałowego
(dla różnych prędkości obrotowych)



charakterystyka zewnętrzna

Praca samowzbudna prądnicy bocznikowej
warunki samowzbudzenia:

- istnienie remanentu,
- właściwy opór obwodu wzbudzenia
- właściwe połączenie uzwojeń twornika i wzbudzenia
- odpowiednia prędkość obrotowa

Własności ruchowe silników

Regulacja prędkości obrotowej:

$$n = \frac{U_t - R_t I_t}{c_E \Phi(I_w)} \quad T_{el} = c_T I_t \Phi(I_w)$$

c_E , c_T - stałe zależne od konstrukcji maszyny
 $\Phi(I_w)$ - strumień biegunów głównych

Charakterystyki: (dla $U_t = \text{const}$, $R_w = \text{const}$)
najczęściej:

- $n = f(I_t)$ ch-ka mechaniczna
 - $n = f(T_{e1})$
 - $T_{e1} = f(I_t)$
-

Rozruch silników prądu stałego

z reguły wykonany dla $I_w = \text{const}$

warunek: ograniczenie prądu twornika w czasie rozruchu

$$I_t(t) \leq I_{t, \text{dop}}$$

zachodzi (przy pominięciu $L_t \cdot dI_t/dt$) gdy:

$$I_t(t) \cong \frac{U_t(t) - c_E \Phi(I_w) n(t)}{R_t(t)} < I_{t, \text{dop}}$$

- rozruch napięciowy
- rozruch oporowy

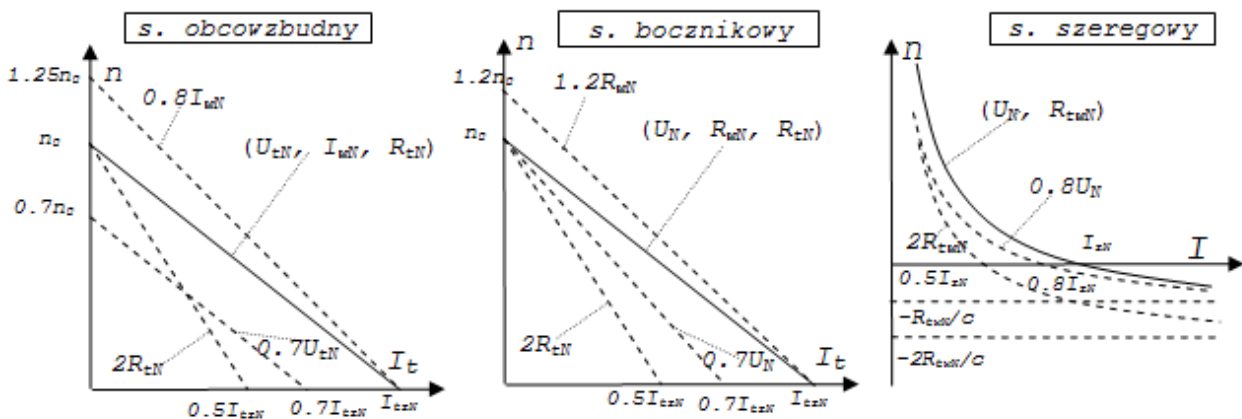
Regulacja prędkości obrotowej

Wpływ parametrów $\{U_t, R_t, \Phi(I_w)\}$ na ch-ki mechaniczne

- silnik obcowzbudny: niezależne obwody twornika i wzbudzenia
- silnik bocznikowy $U_w = U_t = U$ (połączenie równoległe obwodów)
- silnik szeregowy $I_w = I_t = I$ (połączenie szeregowe obwodów)

z równań dla liniowego obwodu magnetycznego, tzn dla $c_E \Phi_w(I_w) = c I_w$:

$$U_t = R_t I_t + c I_w n \quad I_w = U_w / R_w$$



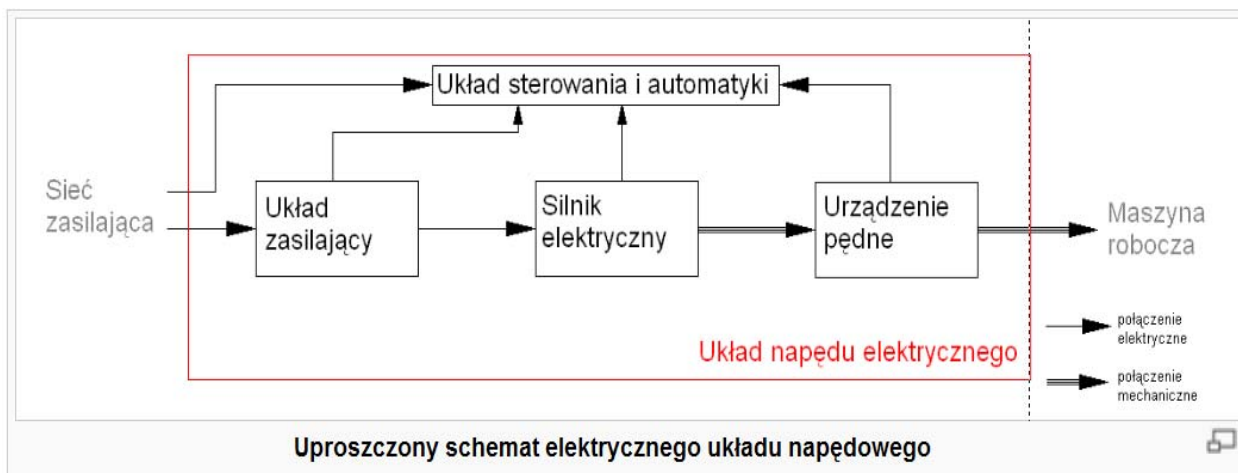
indeksy: N - znamionowy, z - zablokowany wirnik, t - obwód twornika, w - obwód wzbudzenia

Straty i sprawność

Składniki strat:

- jałowe ($\cong \Delta P_{Fe}$) (2-4) % P_N
- obciążeniowe ($\cong \Delta P_{Cu,t}$) (4-8) % P_N
- wzbudzenia ($\cong \Delta P_{Cu,w}$) (1-3) % P_N
- szczotek ($\cong \Delta P_{sz} \cong 2 I_t r$, dla $I_t > 0.3 I_{tN}$)
- mechaniczne ($\cong \Delta P_m$)

Napędy elektryczne silnikowe - uwagi wstępne



- układ zasilający - przekształca energię elektryczną pobieraną z sieci i dostarcza ją do silnika - np. prostownik sterowany,
- silnik elektryczny (lub kilka silników) - przekształca doprowadzoną energię elektryczną na energię mechaniczną,
- urządzenie pędne - przekazuje energię mechaniczną wytworzoną przez silnik do maszyny roboczej, może także zmieniać parametry przekazywanej energii mechanicznej, tj. moment, prędkość kątowna - np. sprzęgło, przekładnia zębata, przekładnia pasowa,
- urządzenia sterowania i automatyki - stosowane napęd ma być sterowany automatycznie

