



Uniwersytet
Wrocławski

**Wydział Fizyki
i Astronomii**
Instytut Fizyki Doświadczalnej

pl. M. Borna 9
50-204 Wrocław
tel. +48 71 375 93 02, +48 71 328 73 65
fax +48 71 328 73 65
e-mail: sekr@ifd.uni.wroc.pl
www.ifd.uni.wroc.pl

Elektrotechnika i elektronika (konspekt)

Franciszek Gołek (golek@ifd.uni.wroc.pl)

www.pe.ifd.uni.wroc.pl

Wykład 6.

Maszyny elektryczne prądu stałego

Maszyny elektryczne

1) Przeznaczone do przetwarzania energii mechanicznej na elektryczną. Zwykle są to wirujące maszyny elektryczne jak generatory, prądnice czy alternatory.

Wchodzi energia mechaniczna – wychodzi elektryczna.

2) Przeznaczone do przetwarzania energii elektrycznej na mechaniczną. Należą do nich silniki i inne napędy.

Wchodzi energia elektryczna – wychodzi mechaniczna.

3) Do maszyn elektrycznych można zaliczyć również transformatory i przetwornice, których zadaniem jest zmiana parametrów energii elektrycznej takich jak napięcie elektryczne, natężenie prądu czy częstotliwość.

Wchodzi energia elektryczna – i wychodzi elektryczna.

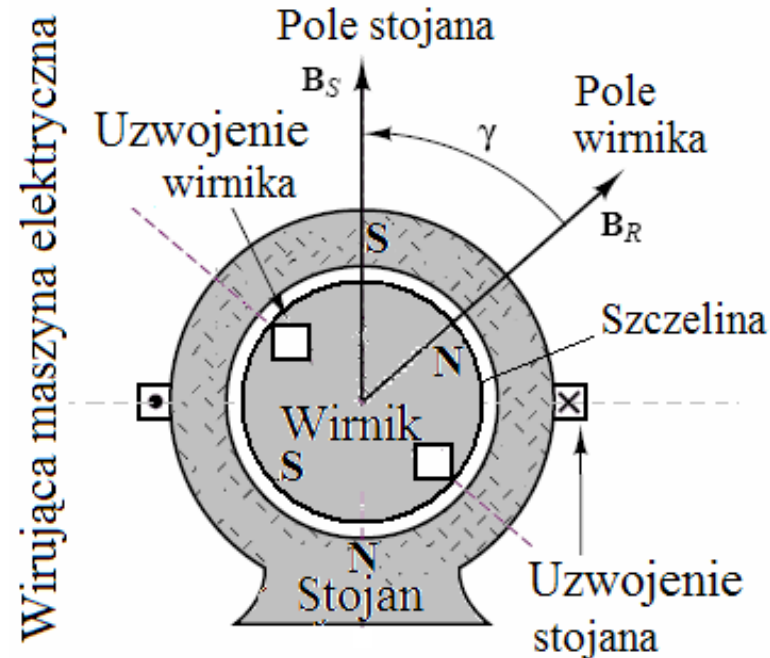
W budowie maszyn elektrycznych podstawowymi materiałami są izolowane przewody elektryczne (druty miedziane lub aluminiowe), substancje izolujące (lakiery olejne i żywicowe, mika, papier i folia), materiały o dużej przenikalności magnetycznej, szczotki węglowe, pierścienie stykowe i łożyska. Trwałość tych materiałów zależy od warunków pracy: temperatura, wilgotność i toksyczność środowiska, przeciążenia i wibracje. Przyjmuje się, że okres użytkowania maszyn powinien wynosić od 15 do 20 lat. Ze względu na użyte materiały wyróżnia się następujące klasy ciepłoodporności:

klasa A – dopuszczalna temperatura 105°C,

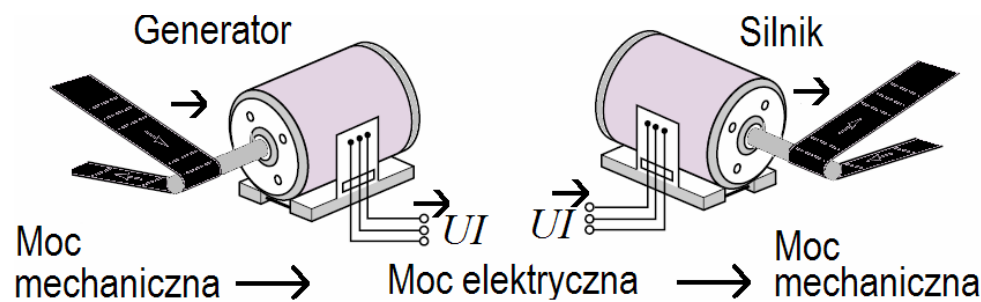
klasa E - 120°C, klasa B - 130°C, klasa F - 150°C, klasa H - 180°C.

Ważnym podzespołem maszyn elektrycznych jest układ wentylacyjny. Medium chłodzące zwykle stanowi powietrze, czasem jednak stosowany jest wodór, którego przetłaczanie przez maszynę wymaga około 10-krotnie niższej mocy a jego skuteczność chłodzenia jest większa.

Przykład wirującej maszyny elektrycznej ilustruje rysunek obok. wirnik osadzony na łożyskach tak by móc się obracać przy możliwie małej szczelinie między nim a stojanem. Wirnik (rotor) może być połączony z mechanicznym obciążeniem gdy maszyna jest silnikiem lub ze źródłem napędu (np. turbiną) gdy maszyna jest generatorem. W obu przypadkach



(generatorów i silników) pole magnetyczne jest tym co sprzęga system elektryczny z systemem mechanicznym. Gdy maszyna **jest silnikiem** wtedy siła oddziaływania biegunów magnetycznych stojana i wirnika generuje „mechaniczny” moment sił. Gdy maszyna **jest generatorem** wówczas wykorzystuje prawo indukcji Faradaya dla konwersji zmiennych pól magnetycznych na prąd elektryczny. Tu moment sił „mechaniczny” wymusza zmiany pola magnetycznego przenikającego uzwojenia.



W maszynach elektrycznych istnieje wiele konfiguracji wytwarzania pola magnetycznego: magnesy trwałe lub uzwojenia z prądem, prąd w uzwojeniach stały lub zmienny. Analizując jakiegokolwiek maszyny elektryczne należy mieć na uwadze między innymi **straty mocy** na: prądy wirowe, histerezę rdzeni, grzanie – I^2R i tarcie wirujących elementów oraz straty na tzw. potrzeby własne (wymuszanie cyrkulacji chłodziw, smarów czy zasilanie układów kontrolnych). Przy doborze rodzaju maszyny dla określonego zadania należy brać pod uwagę szczegółowe charakterystyki maszyn (jak zależność momentu obrotowego od szybkości obrotów, zależność obrotów od obciążenia itp.)

W tym wykładzie omawiamy maszyny prądu stałego (DC machines).

W maszynach prądu stałego nie ma wirującego pola magnetycznego (inaczej niż w maszynach prądu zmiennego AC) dlatego tu stosowane są odpowiednie przełączniki mechaniczne tzw. **komutatory** pozwalające na utrzymanie pól magnetycznych stojana i wirnika pod kątem 90° względem siebie.

Rysunek przedstawia graficzną metodę znajdowania punktu pracy układu maszyna – obciążenie.

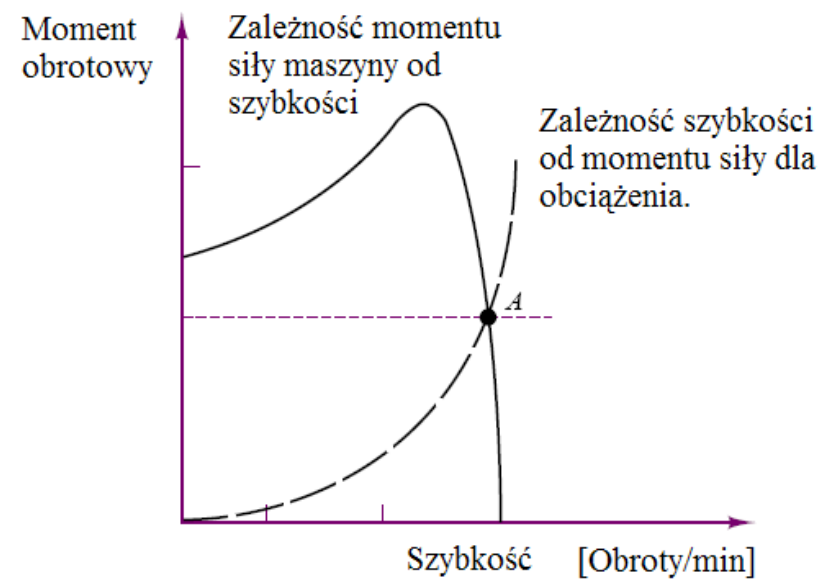
Maszyny elektryczne produkowane są w wielu formach i rozmiarach.

Silniki elektryczne można podzielić na:

a) **Silniki prądu stałego**, b) Silniki synchroniczne, c) Silniki indukcyjne i d) Silniki specjalne (silniki krokowe, bezszczotkowe silniki prądu stałego czy silniki o przełączanej reluktancji).

Uzwojenie wzbudzające zwane też magnetyzującym (wzbudzenie).

Prąd w tym uzwojeniu ma za zadanie tylko wygenerować pole magnetyczne i nie zależy od obciążenia. W takim uzwojeniu płynie zwykle prąd stały, raczej o niewielkim natężeniu – dzięki dużej przenikalności rdzenia i odpowiedniej ilości zwoi uzyskuje się jednak znaczny strumień magnetyczny.



Podstawy

We wszystkich maszynach elektrycznych

siła działająca na przewód z prądem dana jest wyrażeniem:

$$F = i l \times B$$

gdzie F – wektor siły, i – prąd w przewodzie,
 l – wektor reprezentujący odcinek przewodu,
 B – wektor indukcji magnetycznej.

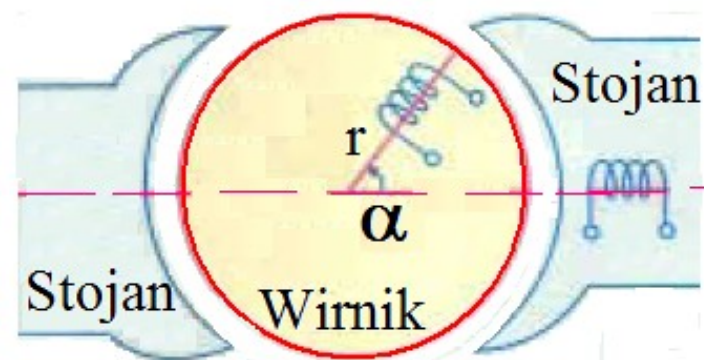
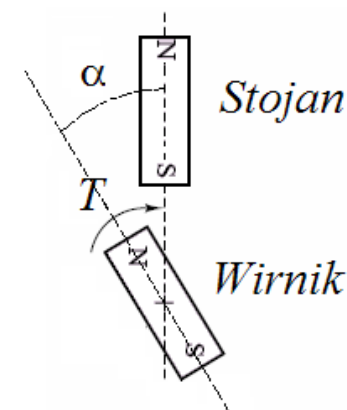
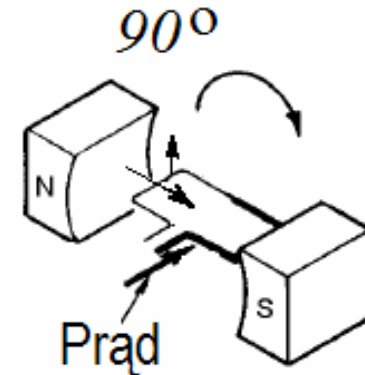
Moment obrotowy uzwojenia możemy zapisać jako:

$$T = K B i \sin \alpha$$

gdzie K - reprezentuje geometrię uzwojenia (w tym promień i ilość zwoi), B – gęstość strumienia magnetycznego (indukcja magnetyczna) generowanego przez stator, α - kąt między B i normalną do płaszczyzny uzwojenia (czyli osi uzwojenia).

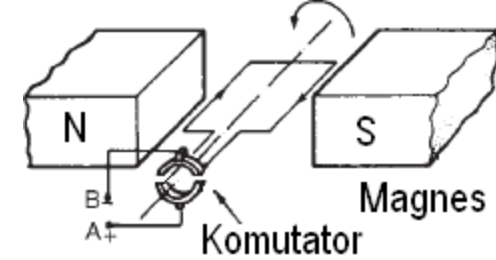
Maksimum siły mechanicznej i maksimum siły elektromotorycznej uzyskujemy w chwili gdy kąt α między polem stojana a polem twornika wynosi 90° !

Aby podtrzymać wartość kąta $\alpha \cong 90^\circ$ w czasie wirowania twornika w maszynach prądu stałego stosuje się **komutator** – urządzenie, którego zadaniem jest odpowiednie przełączanie uzwojeń twornika.



Maszyny prądu stałego

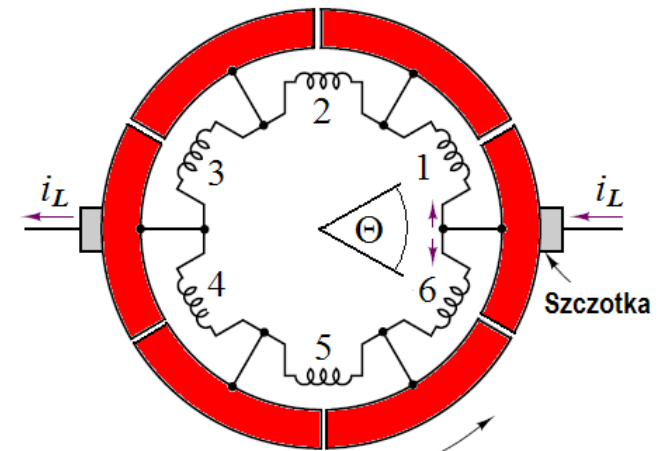
(prądnice i silniki prądu stałego).



Prąd stały można otrzymać albo prostując elektronicznie prąd zmienny pochodzący z generatorów prądu zmiennego albo bezpośrednio stosując generatory (prądnice) prądu stałego. Prądnice prądu stałego są rozwiązaniami przestarzałymi niemniej jednak nadal omawianymi w wielu dydaktycznych tekstach. Silniki prądu stałego natomiast podlegają obecnie intensywnemu rozwojowi ze względu na ich powszechne zastosowania.

Komutator

Sam komutator jest złożony z pewnej parzystej liczby przewodzących segmentów, do których dotykają tzw. szczotki jako kontakty. Komutator jest zamocowany na osi wirnika a jego segmenty połączone są z uzwojeniami twornika tak



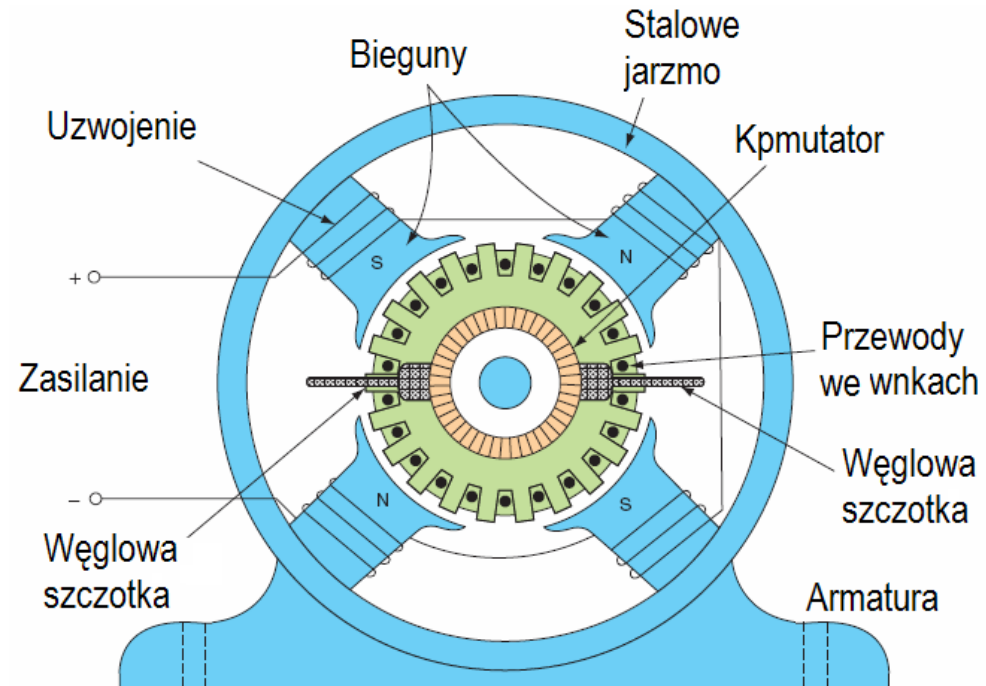
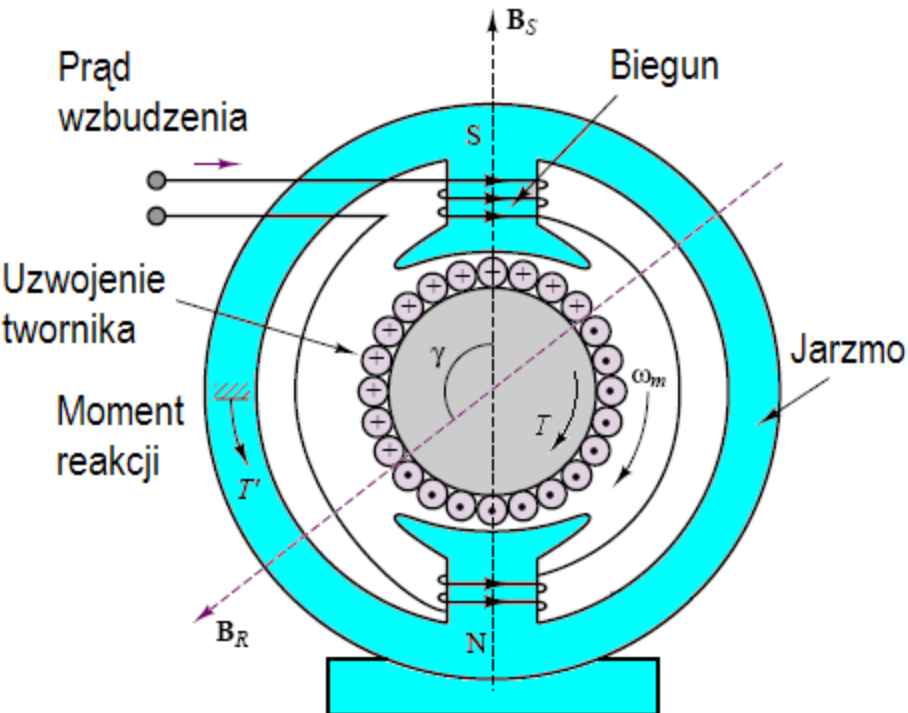
Komutator i uzwojenia wirnika

jak pokazuje to rysunek obok. Zastosowanie tylko 6 segmentów oznacza, że moment siły w takim silniku będzie pulsował gdyż kąt α nie będzie stale równy 90° lecz będzie zmieniał się w przedziale aż od $90^\circ - 30^\circ$ do $90^\circ + 30^\circ$.

Dlatego w praktyce komutatory mają znacznie więcej segmentów np. 60.

Maszyna prądu stałego zawiera stojan (jarzmo), na którym zamocowane są wyprofilowane rdzenie elektromagnesów. Wirnik wiruje między biegunami tych elektromagnesów. Uzwojenie wirnika jest połączone z obwodem zewnętrznym poprzez komutator gdzie węglowe szczotki są w ślizgowym kontakcie z segmentami wirnika. Gdy maszyna jest **silnikiem** do szczotek podłączone jest **zasilanie** prądem stałym.

Gdy zaś maszyna jest **generatorem** to do szczotek podłączony jest **obwód obciążenia** – odbiorca energii elektrycznej.

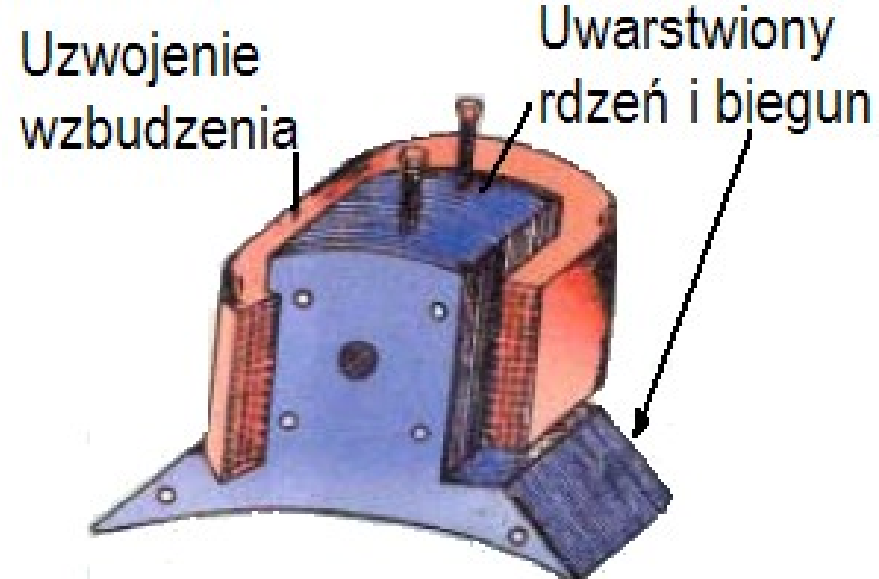


Rdzenie elektromagnesów

są wykonywane w postaci uwarstwionej (laminowanej, laminaty).

Uwarstwienie obniża straty związane z prądami wirowymi powstającymi w wyniku wszelkich pulsacji strumienia pola magnetycznego. Pulsacje powstają, między innymi, gdy wirnik z nacięciami (slotami zaburzającymi jednorodność struktury magnetycznej) wiruje w przy rdzeniach elektromagnesów.

Linie strumienia pola magnetycznego łatwo układają się wzdłuż magnetycznych (duże μ) blaszek laminatu natomiast powstawanie prądów wirowych w kierunku prostopadłym do powierzchni **odizolowanych od siebie blaszek** jest skutecznie ograniczone.

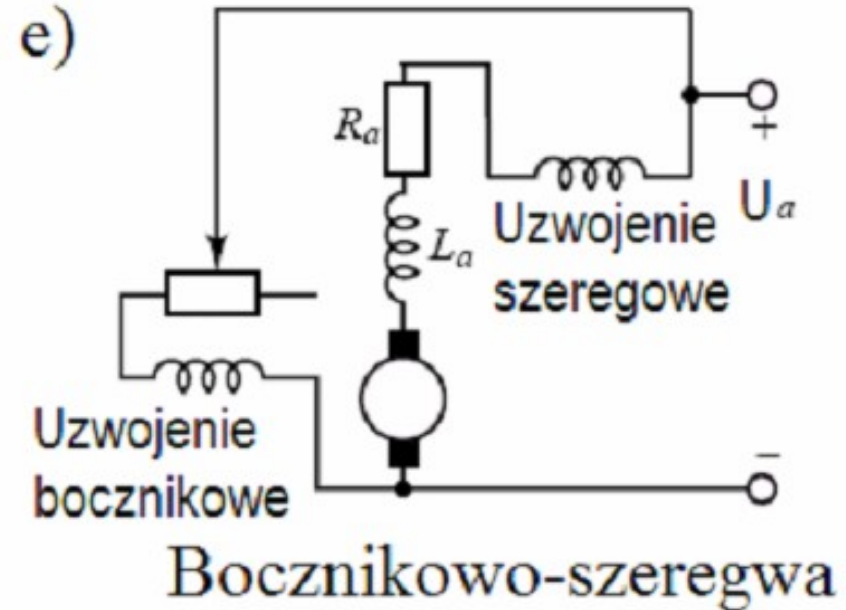
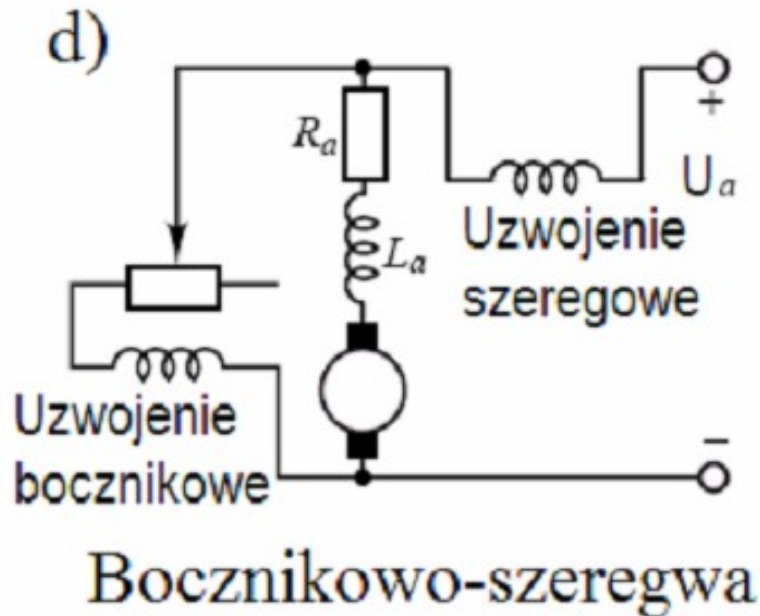
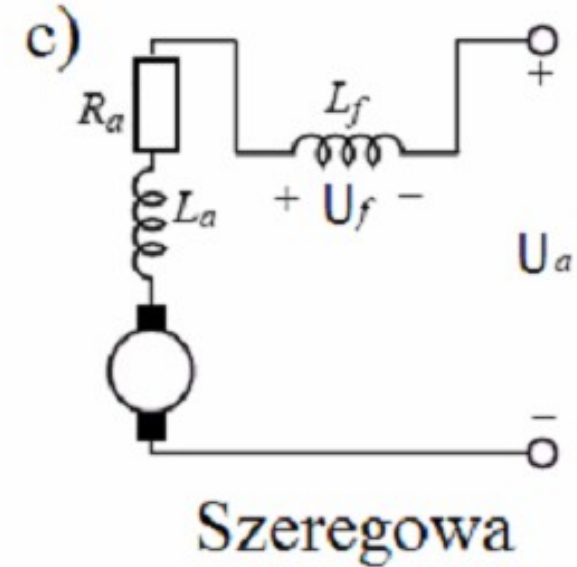
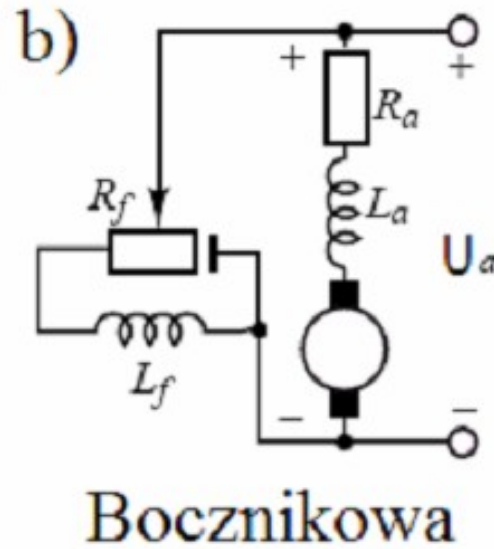
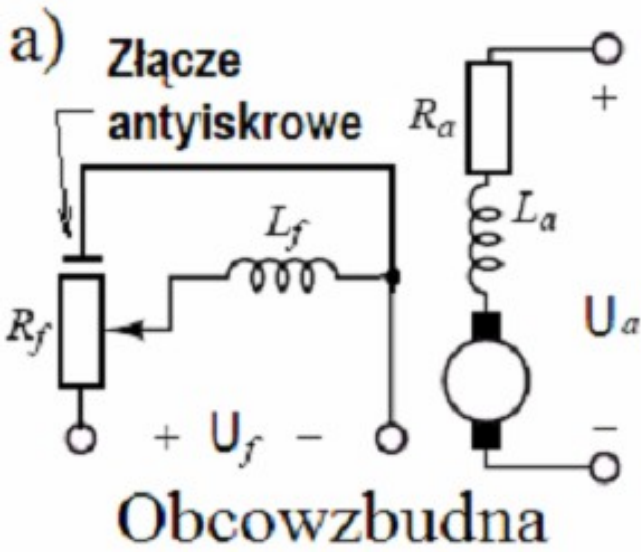


Rodzaje maszyn prądu stałego

Wśród maszyn prądu stałego czasem można spotkać wersję nazywaną **maszyną obcowzbudną**. W tej wersji do wzbudzenia pola magnetycznego, w którym wiruje twornik wykorzystywane jest zewnętrzne (dodatkowe źródło prądu) – rysunek (a) na następnym slajdzie. Znacznie częściej spotykamy wersje, w których wzbudzenie zapewnia napięcie na zaciskach twornika i takie maszyny nazywane są **samowzbudnymi**. Nie trzeba tu dodatkowego źródła napięcia i takie wersje są w praktyce preferowane. Wśród wersji samowzbudnych jednym ze sposobów jest połączenie uzwojenia wzbudzania równoległe z uzwojeniem twornika (rys. b), ta wersja nazywana jest **maszyną bocznikową**. Należy podkreślić, że impedancja uzwojenia wzbudzającego jest znacznie większa od impedancji uzwojenia twornika, dzięki czemu wzbudzenie nie podkrada znaczącego prądu twornikowi! Impedancja twornika musi być mała – tam płyną znaczne prądy (tak w silnikach jak i w prądnicach). Do uzwojenia wytwarzającego pole L_f (field) czyli wzbudnicy może być szeregowo dołączony rezystor aby niezależnie wyregulować prąd wzbudzenia.

Innym rozwiązaniem jest szeregowe połączenie wzbudzenia z twornikiem co nazywamy **maszyną szeregową** (rys. c). W tej wersji cały prąd twornika idzie przez wzbudzenie, zatem uzwojenie wzbudzenia musi mieć małą impedancję (kilka zwoi). Maszyny szeregowe występują **głównie jako silniki**. Generatory mają zbyt dużą impedancję wewnętrzną – tu napięcie zależy od obciążenia.

Rodzaje maszyn prądu stałego



Ostatnią grupę maszyn prądu stałego, pokazaną na rysunku, stanowią maszyny szeregowo-bocznikowe gdzie mamy połączenie **blisko-równoległe** rys. d i połączenie **daleko-równoległa** rys. e. W obu przypadkach jest możliwość takiej orientacji że szeregowo uzwojenie dodaje albo odejmuje swoje pole od pola uzwojenia równoległego.

W maszynach elektrycznych mamy dwa stadia pracy:

Stan rozruchowy i stacjonarny.

W stanie stacjonarnym, gdy prąd wzbudzenia I_f wytwarza strumień magnetyczny Φ wiemy z wyrażenia na moment obrotowy: $T = K B I_a \sin\alpha$ lub $T = k \Phi I_a \sin\alpha$, że moment siły działający na wirnik jest proporcjonalny do iloczynu indukcji magnetycznej (czy też strumienia) i natężenia prądu w tworniku I_a (**a – w armaturze czyli tworniku**). Przy założeniu, że komutator ma na tyle dużo segmentów, że kąt α jest utrzymywany bardzo blisko wartości 90° możemy napisać:

$$T = K B I_a = k \Phi I_a.$$

Mechaniczna moc P_m generowana w silniku (lub absorbowana w prądniczy) jest dana iloczynem momentu siły i prędkości kątowej twornika ω_w :

$$P_m = \omega_w T = \omega_w k \Phi I_a.$$

$$P_m = \omega_w T$$

$$P_m = \omega_w k \Phi I_a$$

Wiemy, że w wirującym uzwojeniu twornika indukuje się siła elektromotoryczna reakcji (wsteczna $E_{\text{back}} = E_b$) - hamująca twornik:

$$E_b = k_a \Phi \omega_w$$

gdzie k_a opisuje geometrię i własności magnetyczną armatury. E_b jest albo **generowanym napięciem** gdy maszyna jest prądnicą albo jest napięciem (**spadkiem napięcia**) pokonywanym przez zasilanie gdy maszyna jest silnikiem.

Moc elektryczna generowana w prądnicy (albo tracona w silniku) jest iloczynem:

$$P_e = E_b I_a$$

Przy idealnej konwersji energii w prądnicach i w silnikach należy przyjąć:

$$P_m = P_e \quad \text{co pociąga za sobą równość: } k = k_a.$$

P = Liczba biegunów magnetycznych (czasem liczba par biegunów)

$N = Z$ = Liczba zwoi w tworniku (zależnie od podręcznika)

$M = c$ = Liczba równoległych uzwojeń, zwykle $M = 2$ lub p ($2p_{\text{parny}}$)

$$k_a = \frac{pN}{2\pi M}$$

Wyjaśnienie stałej

$$k_a = \frac{pN}{2\pi M}$$

„siedzącej” w

$$E_b = k_a \Phi \omega_w$$

Ze względu na różne postacie tej stałej w różnych podręcznikach warto wyjaśnić czym fizycznie jest ta stała. Musi ona zapewnić zgodność z doświadczeniem czyli z wynikającym z prawa Faradaya związkem:

$$E_b = N_{\text{liczba szeregowo połączonych zwoi}} \cdot \frac{d\Phi}{dt} \text{ szybkość zmian strumienia w jednym zwoju}$$

Wynika stąd, że przykładowo podając szybkość wirowania w obrotach na minutę n [obr/min] otrzymamy:

$$E_b = k'_a \Phi n$$

$$k'_a = \frac{pN}{60M}$$

$$\text{bo } \omega_w = \frac{2\pi}{60} n$$

Wytwarzanie siły elektromotorycznej i momentu siły ma miejsce niezależnie od charakteru pracy maszyny. Z tym, że do silnika „wkładamy” moc elektryczną (pokonując reakcję: siłę elektromotoryczną) a odbieramy moc mechaniczną (oś silnika pokonuje opór odbiornika mocy mechanicznej), a do prądnicy „wkładamy” moc mechaniczną (pokonujemy reakcję: moment sił) i odbieramy moc elektryczną (która wymusza przepływ prądu w odbiorniku mocy elektrycznej).

W konsekwencji oczywiste są związki między wsteczną SEM - E_b , napięciem na zaciskach twornika - U_a i prądem twornika - I_a w stadium stacjonarnym:

$$\begin{array}{l} U_a = E_b + R_a I_a \quad (\text{w przypadku silnika}) \\ U_a = E_b - R_a I_a \quad (\text{w przypadku prądnicy}) \end{array}$$

oraz wyrażenie na prąd wzbudzenia:

$$I_f = U_f / R_f \quad (\text{w obu przypadkach})$$

R_a – rezystancja twornika, R_f – rezystancja wzbudzenia.

Z zależności: $E_b = k_a \Phi \omega_w$ oraz $U_a = E_b + R_a I_a$ otrzymujemy:

wyrażenie na prędkość kątową silnika:

$$\omega_w = \frac{U_a - R_a I_a}{k_a \Phi}$$

Dla stadium rozruchowego

związki między SEM E_b , napięciem na zaciskach twornika U_a i prądem twornika I_a w silniku obcowzbudnym możemy zapisać w postaci:

$$U_a(t) = E_b(t) + R_a I_a(t) + L_a \frac{dI_a(t)}{dt} \quad (\text{dla twornika})$$

$$U_f = R_f I_f + L_f \frac{dI_f(t)}{dt} \quad (\text{w obwodzie wzbudzenia})$$

gdzie L_a – indukcyjność twornika, L_f – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia.

Te równania można sprząc z równaniem opisującym obciążoną mechanicznie maszynę. Zakładając, że T_{ob} – jest momentem sił jakie stanowi „obciążenie” (może to być nawet turbina dla prądnicy), występuje tarcie o współczynniku proporcjonalności b do prędkości kątowej $\omega_w(t)$ oraz jest rozpędzana pewna masa o momencie bezwładności J otrzymamy:

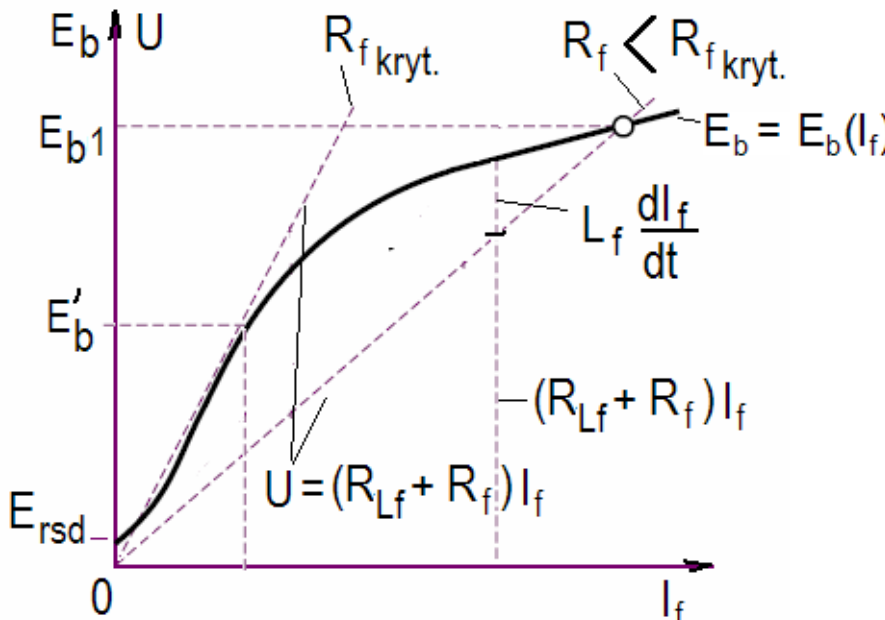
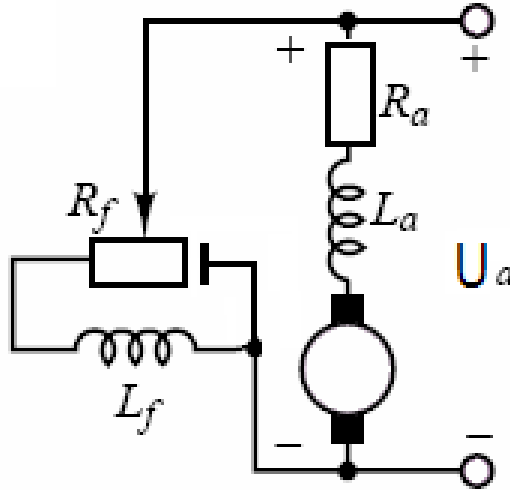
$$T(t) = k \Phi(t) I_a(t) = T_{ob}(t) + b\omega_w(t) + J \frac{d\omega_w(t)}{dt}$$

$$\Phi(t) = k_f I_f(t)$$

Przebieg wzbudzania prądnicy samowzbudnej bocznikowej.

Z wykresu (magnetyzacji) widać, że dla zbyt dużej rezystancji R_f - większej lub równej wartości krytycznej $R_{f\text{ kryt}}$ prądnica wygeneruje małą wartość SEM E_b , pomiędzy wartością resztkową E_{rsd} , którą uzyskuje dzięki strumieniowi resztkowemu rdzenia Φ_{rsd} a niewiele większą wartością E_b' . Dla mniejszej wartości R_f osiągnięta jest wartość SEM znacznie większa bo E_{b1} zgodnie ze

współrzędnymi przecięcia się charakterystyk $E_b = E_b(I_f)$ i $U = (R_{L_f} + R_f)I_f$, gdzie I_f - prąd w uzwojeniu wzbudnicy, R_{L_f} - rezystancja uzwojenia wzbudnicy, R_f - rezystancja rezystora wzbudnicy (R_a małe). Zmieniając wartość rezystancji rheostatu R_f możemy regulować wartość generowanej SEM E_b .



Przykład.

Mając dane nominalne generatora prądu stałego obcowzbudnego: SEM $E_{bn} = 100 \text{ V}$, $I_a = 100 \text{ A}$, 1000 obrotów/min oraz dane: $R_a = 0,14 \Omega$, $U_f = 100 \text{ V}$, $R_f = 100 \Omega$ określić:

- 1) napięcie na jego zaciskach U_a gdy jest on napędzany turbiną o prędkości 800 obr/min.
- 2) napięcie U_a gdy generator zostanie podłączony do obciążenia $R_o = 1\Omega$.

Rozw.

1) Nominalny prąd wzbudnicy $I_f = U_f/R_f = 100\text{V}/100\Omega = 1 \text{ A}$ przy nominalnej SEM $E_b = 100 \text{ V}$ i obrotach $n_n = 1000 \text{ obr/min}$. W przybliżeniu liniowym (800 nie jest bardzo odległe od 1000 obr/min) przyjmujemy, że:

$$E_b/E_{bn} = n/n_n \rightarrow E_b = n/n_n E_{bn} = (800/1000) 100 \text{ V} = 80 \text{ V}.$$

2) Po włączeniu obciążenia zaczną płynąć prąd $I_a = I_o = E_b/(R_a + R_o) = 80/(0,14 + 1) = 70,2 \text{ A}$. Zatem na zaciskach generatora będzie $U_a = U_o = I_o R_o = 70,2 \text{ V}$.

Przykład.

Mając dane nominalne generatora prądu stałego obcowzbudnego:

$U_{an} = 2000 \text{ V}$, $P_n = 1000 \text{ kW}$, $n_n = 3600 \text{ obr/min}$ oraz następujące parametry: $R_a = 0,1 \ \Omega$, strumień na jeden biegun $\Phi = 0,5 \text{ Wb}$, obliczyć: 1) indukowaną SEM E_b , 2) stałą maszyny k_a , 3) moment sił przy nominalnych warunkach.

Rozw.

1) Nominalny prąd twornika $I_a = P_n/U_n = 10^6/2000 = 500 \text{ A}$. SEM w generatorze jest sumą spadków napięć na oporze wewnętrznym i na obciążeniu:

$$E_b = U_a + I_a R_a = 2000 + 500 \times 0,1 = 2050 \text{ V}.$$

2) Prędkość kątowna przeliczona na rad/s wyniesie:

$$\omega_w = 2\pi n/60 = (2 \times 3,14 \times 3600 \text{ obr/min})/(60 \text{ s/min}) = 377 \text{ rad/s}$$

Stała maszyny $k_a = E_b/(\Phi \omega_w) = 2050/(0,5 \times 377) = 10,876 \text{ (V}\cdot\text{s/Wb}\cdot\text{rad)}$.

3) Moment sił $T = k \Phi I_a = 10,876 \text{ (V}\cdot\text{s/Wb}\cdot\text{rad)} \cdot 0,5 \text{ Wb} \times 500 \text{ A} = 2718,9 \text{ Nm}$.

Komentarz. W praktyce łatwo jest posługiwać się wielkościami mierzalnymi jak np. E_b i ω_w , wtedy też zamiast współczynnika k lepiej operować iloczynem $k\Phi$ bo przykładowo dla szeregowej maszyny prądu stałego $k\Phi = E_b/\omega_w = (U_o + I_a R_a + I_a R_s)/\omega_w$, R_s – rezystancja uzwojenia wzbudnicy szeregowej.

Prądnicą bocznikowo szeregową

W tej prądnicie strumień pola magnetycznego w szczelinie, od którego zależy generowana SEM jest sumą (lub różnicą) dwuskładnikową:

$$\Phi = \Phi_{ru} \pm \Phi_{sz} = \Phi_{ru} \pm k_s I_a,$$

SEM:

$$E_b = k_a \Phi \omega_w,$$

Napięcie na obciążeniu:

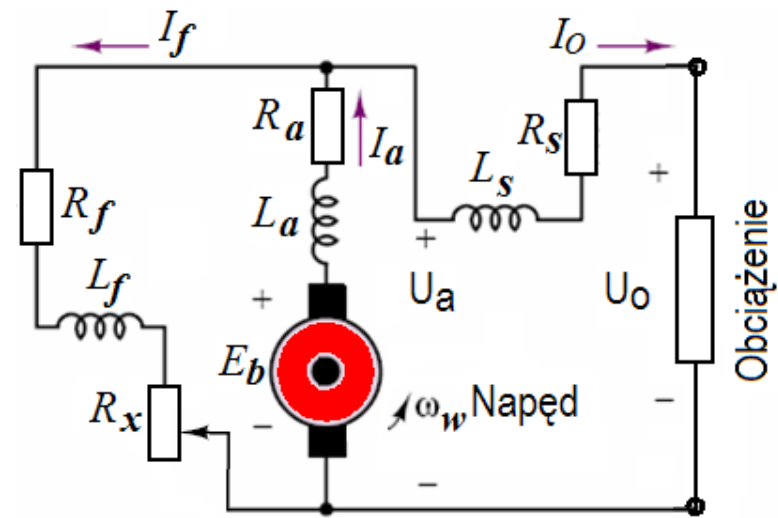
$$U_o = E_b - I_a R_a - I_s R_s,$$

prąd twornika (armatury):

$$I_a = I_f + I_o,$$

Moment sił napędu wynosi:

$$T = P/\omega_w = E_b I_a / \omega_w = k_a \Phi I_a.$$



Silniki prądu stałego

to w zasadzie prądnice, w których odwrócono role wejścia i wyjścia mocy: moc elektryczna wchodzi i jest zamieniana na moc mechaniczną. Charakterystyki dwóch elementarnych wersji silnika prądu stałego ilustruje rysunek.

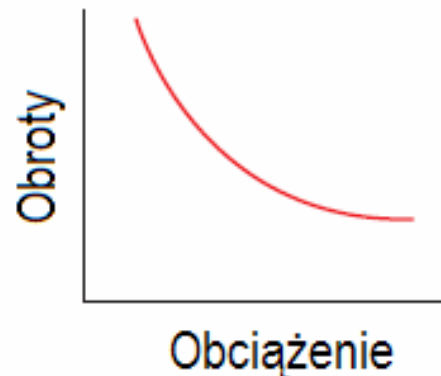
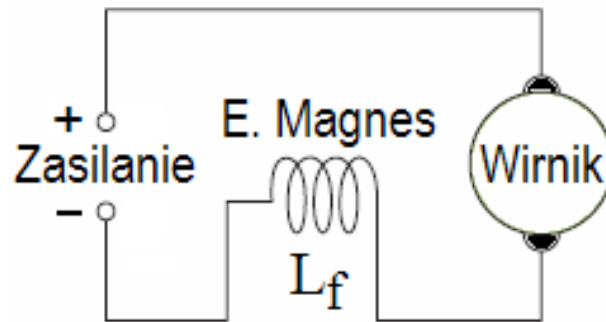
Silnik szeregowy wykazuje duży spadek obrotów ze wzrostem obciążenia.

Wynika to ze wzrostu spadku napięcia na L_f

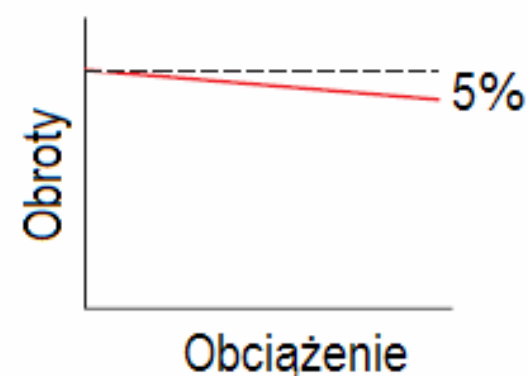
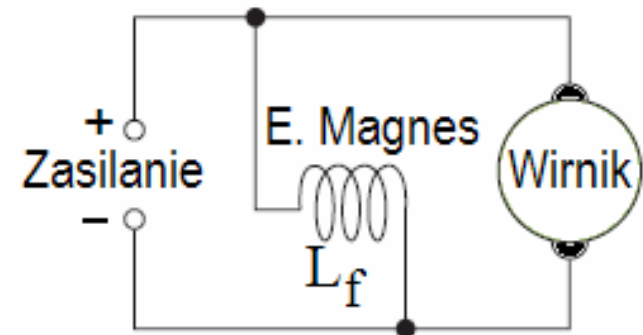
i przez to zmniejszenia napięcia na tworniku gdy rośnie natężenie pobieranego prądu wymuszone zwiększonym obciążeniem.

Silnik bocznikowy jest pod względem stabilności obrotów lepszy.

Szeregowy



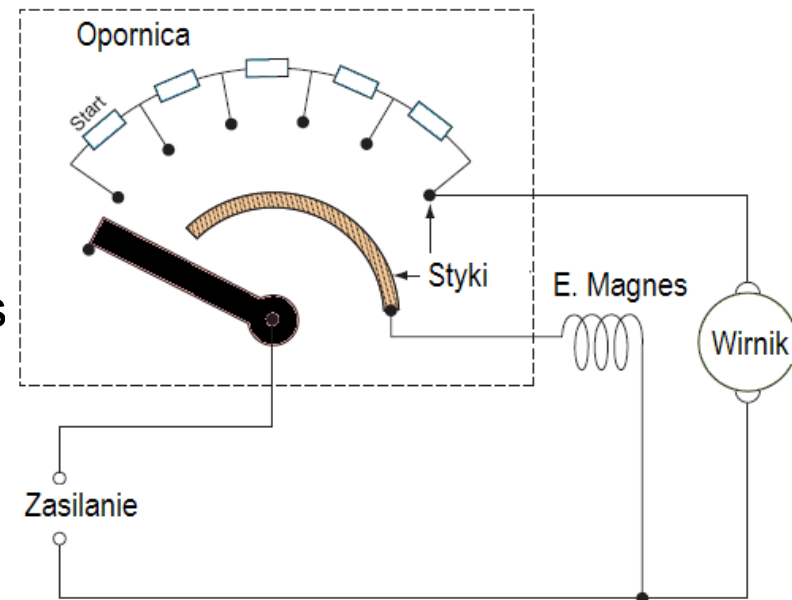
Równoległy (Bocznikowy)



W silniku szeregowym uzwojenie elektromagnesów połączone jest szeregowo z uzwojeniem wirnika. Ten typ silnika ma znaczny początkowy moment obrotowy ale szybkość obrotów silnie maleje z obciążeniem. Teoretycznie silnik taki bez obciążenia może doprowadzić do samo-destrukcji (patrz charakterystyka obrotów). Ze względu na duży moment startowy stosowane są w windach i tramwajach. Mogą też być stosowane jako małe silniki w odkurzaczach.

W silniku równoległym uzwojenia elektromagnesów i wirnika są połączone równolegle i tak włączane do zasilania. Aby zmienić kierunek obrotów wystarczy odwrócić kierunek prądu albo w wirniku albo w stojanie (elektromagnesie) przez przełączenie odpowiednich zacisków. Taki silnik ma mały początkowy (rozruchowy) moment siły ale mając stałe obroty ma duże zastosowanie w takich narzędziach

jak wiertarki czy tokarki. Ponieważ szybkość obrotów (przy stałej mocy) jest odwrotnie proporcjonalna do wielkości strumienia pola mag. wytwarzanego przez elektromagnes regulacja obrotów jest łatwa. Wystarczy do uzwojenia elektromagnesów dołączać szeregowo odpowiednią rezystancję.



Charakterystyka silników

Silnik bocznikowy

$$I_z = I_f + I_a, \quad E_b = k_a \Phi \omega_w,$$

$$I_a = (U_z - E_b) / R_a = (U_z - k_a \Phi \omega_w) / R_a$$

lub z równości: $T = k_a \Phi I_a$.

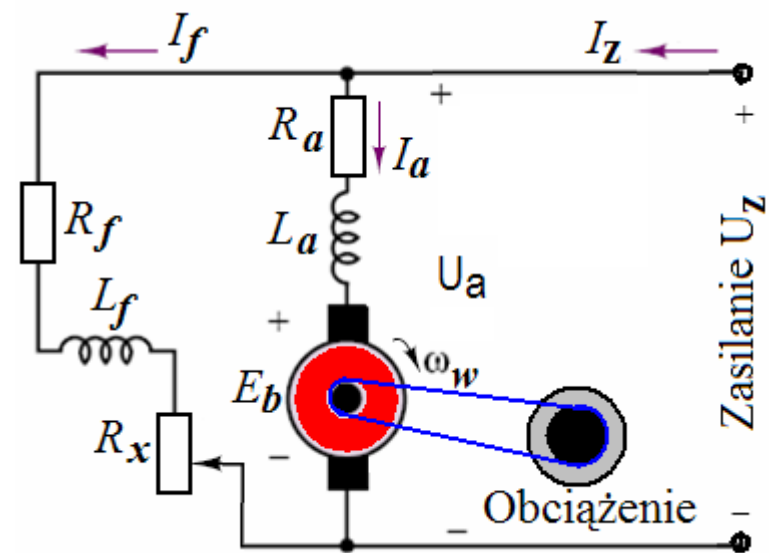
$I_a = T / (k_a \Phi)$ co pozwala wiązać

moment sił z prędkością kątową:

Widać, że przy ustalonych: U_z , $k_a \Phi$ i R_a

obniżenie prędkości ω_w (wywołane zwiększeniem obciążenia) pociąga za sobą wzrost prądu I_a (większy pobór to i większa dostawa mocy). Ustali się nowy punkt równowagi „Moc oddawana = moc pobierana czyli”: $E_b I_a = T \omega_w$. Proste przekształcenie daje nam zależność prędkości katowej od prądu I_a bądź od momentu sił T :

Równanie spełnia się dla wartości nominalnej U_z i pewnego jej otoczenia co



$$I_a = \frac{T}{k_a \Phi} = \frac{U_z - k_a \Phi \omega_w}{R_a}$$

$$\omega_w = \frac{U_z - I_a R_a}{k_a \Phi} = \frac{U_z}{k_a \Phi} - \frac{R_a T}{(k_a \Phi)^2}$$

Silnik

bocznikowo-szeregowy

Mamy jak poprzednio:

$$I_z = I_f + I_a, \quad T = k_a \Phi I_a, \quad E_b = k_a \Phi \omega_w.$$

E_b – jak poprzednio mamy jako spadek napięcia wymuszony (i pokonywany) zasilaniem.

Napięcie zasilania zrównane jest jego spadkami:

$$U_z = E_b + I_a(R_a + R_s).$$

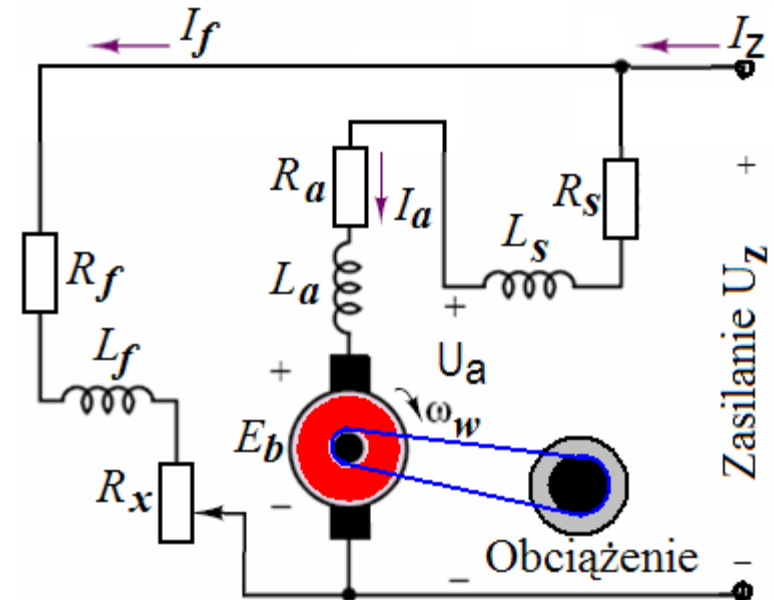


$$E_b = k_a \Phi \omega_w \rightarrow \omega_w = E_b / k_a \Phi \quad \Rightarrow$$

gdzie: Φ_{ru} – strumień od uzwojenia równoległego, $\Phi_{sz} = k_s I_a$ – strumień od uzwojenia szeregowego, (wybór znaku +/- zależy od tego czy Φ_{ru} i Φ_{sz} są zgodne czy przeciwna).

Gdy strumienie Φ_{ru} i Φ_{sz} są zgodne wzrost I_a pociąga za sobą jednoczesny wzrost mianownika i zmniejszenie licznika co w konsekwencji daje zbyt dramatyczną zmianę prędkości ω_w . To oznacza, że tu jest trudniej regulować obroty niż w silniku bocznikowym (równoległym).

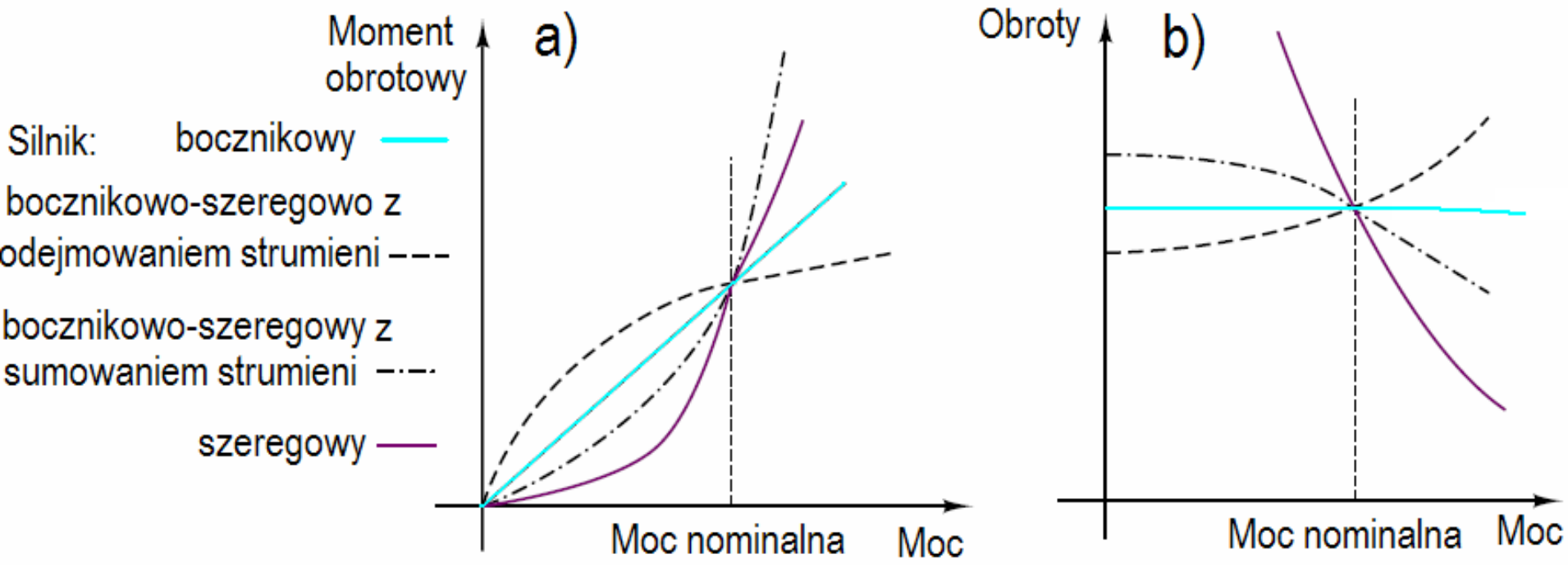
Sytuacja ulega zmianie gdy strumienie Φ_{ru} i Φ_{sz} są przeciwnie (ale tu maszyna ma słabszą wydajność). Sytuację ilustrują wykresy na następnym slajdzie:



$$\omega_w = \frac{U_z - I_a(R_a + R_s)}{k_a(\phi_{ru} \pm \phi_{sz})}$$

$$\omega_w = \frac{U_z - I_a(R_a + R_s)}{k_a(\phi_{ru} \pm \phi_{sz})}$$

Charakterystyki silników prądu stałego



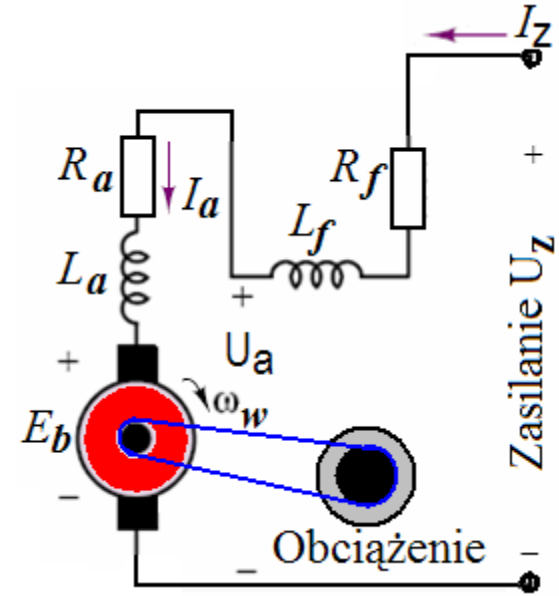
Silnik szeregowy

Gdy silnik pracuje w obszarze linowej części krzywej magnetyzacji to:

$$\Phi = k_s I_a,$$

$$E_b = k_a \Phi \omega_w = k_a k_s I_a \omega_w,$$

$$\Phi = \frac{NI}{\frac{l_1}{\mu_1 S_1} + \frac{l_2}{\mu_2 S_2} + \dots + \frac{l_n}{\mu_n S_n}} = \frac{NI}{\sum_{i=1}^n R_{mi}}$$



E_b – jak poprzednio mamy jako spadek

napięcia wymuszony (i pokonywany) zasilaniem.

Napięcie zasilania zrównane jest jego spadkami:

$$U_z = E_b + I_a(R_a + R_s) = (k_a k_s \omega_w + R_{\text{Total}}) I_a,$$

$$T = k_a \Phi I_a = k_a k_s I_a^2 \Rightarrow$$

$$T = k_a k_s \frac{U_z^2}{(k_a k_s \omega_w + R_{\text{Total}})^2}$$

Z otrzymanej równości wynika,

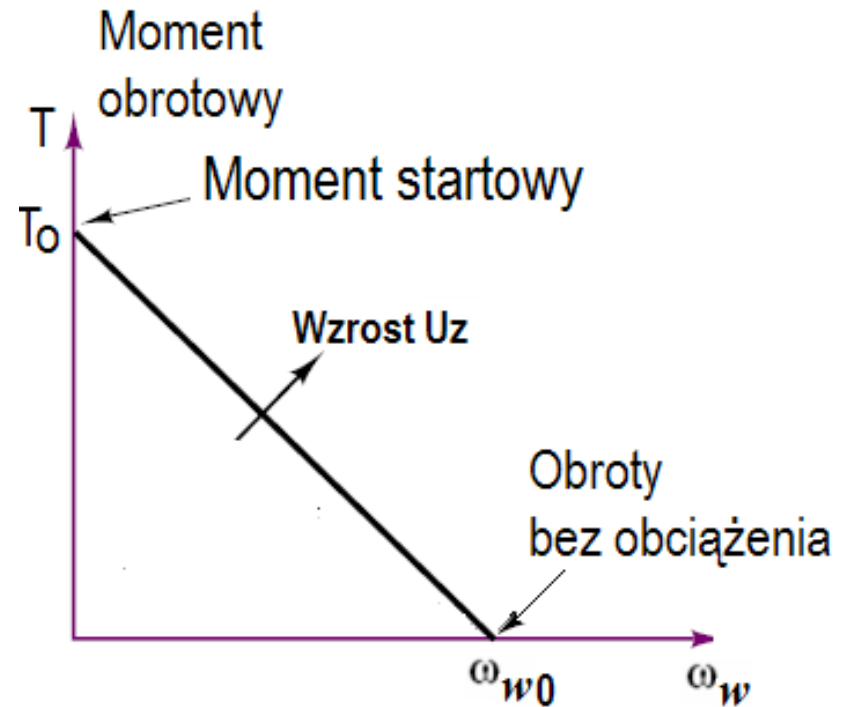
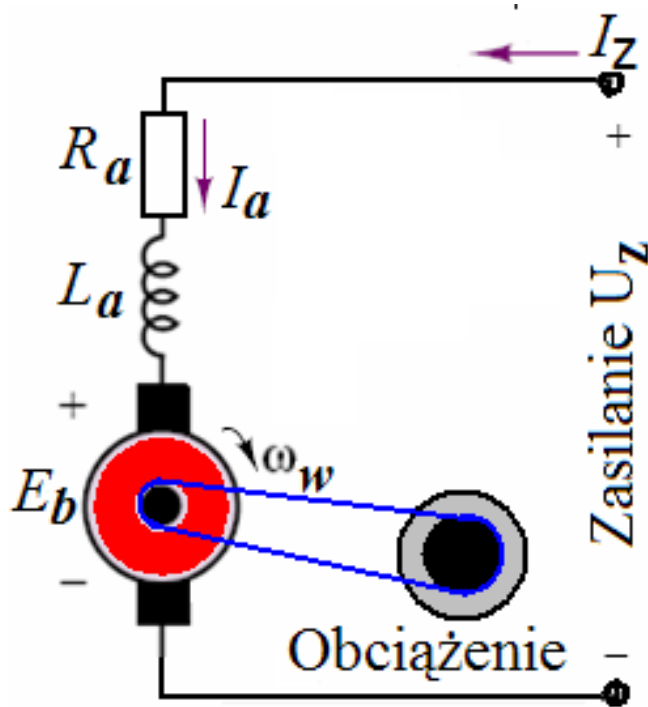
że zmniejszanie obciążenia może

prowadzić do olbrzymich = **niebezpiecznych obrotów**, dlatego

takie silniki są połączone z obciążeniami na stałe.

Silnik prądu stałego z magnesem stałym

Takie silniki są znacznie prostsze (i tańsze) od omówionych wcześniej bo pole magnetyczne stojana jest wytwarzane (zamiast zasilanym uzwojeniem) tylko materiałem o trwałym momencie magnetycznym. W związku z tym podstawowe zasady działania (łącznie z komutacją) są analogiczne do omówionych wcześniej. Te silniki stosowane są tam gdzie wystarcza mały moment obrotowy i wymagane są małe rozmiary silnika.



Moment siły takiego silnika: $T = k_{TPM} I_a$,

gdzie: k_{TPM} - stała zdeterminowana geometrią silnika (i jego magnesów trwałych (T - torque, PM - permanent magnet)). Podobnie mamy indukowaną sem wsteczną (back) E_b jako spadek napięcia wymuszany (i pokonywany) zasilaniem :

$$E_b = k_{aPM} \omega_w,$$

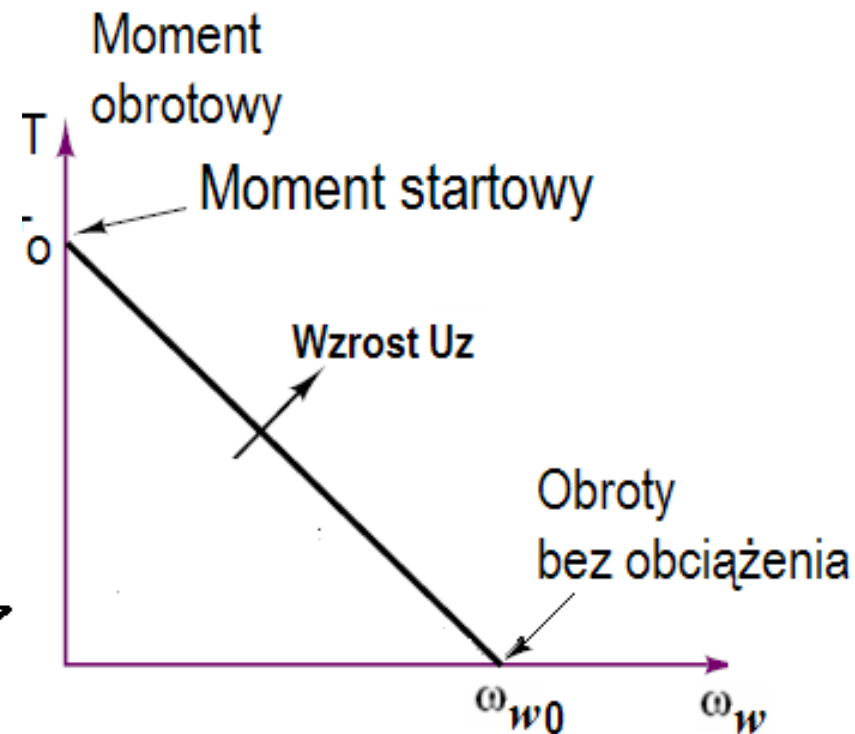
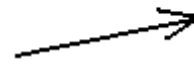
gdzie: k_{aPM} stała zawierająca geometrię silnika razem ze strumieniem magnetycznym.

$$U_z = I_a R_a + E_b = I_a R_a + k_{aPM} \omega_w$$

$$U_z = \frac{T}{k_{TPM}} R_a + k_{aPM} \omega_w$$

$$\omega_w = \frac{U_z}{k_{aPM}} - \frac{T R_a}{k_{aPM} k_{TPM}}$$

$$T = \frac{U_z}{R_a} k_{TPM} - \frac{\omega_w}{R_a} k_{aPM} k_{TPM}$$



Podsumowując można stwierdzić, że silniki z magnesem stałym:

- 1) Silniki PM (permanet magnet) są mniejsze, lżejsze i bardziej wydajne od silników z uzwojeniami stojana ale mają trochę gorszą regulację obrotów.
- 2) Odwracając bieguny zasilania w silniku PM uzyskujemy zmianę kierunku obrotów.
- 3) Wadą silników jest możliwość ich rozmagnesowania pod wpływem wysokiej temperatury lub silnego zewnętrznego pola magnetycznego.
- 4) Powtarzalność silników PM zależy od powtarzalności używanych materiałów magnetycznych.

Natomiast silniki prądu stałego z uzwojeniem w stojanach:

- 1) Silnik bocznikowy pozwala na łatwą regulację obrotów (ma płaską charakterystykę obroty/moment).
- 2) Silniki bocznikowo-szeregowe mają większy moment startowy ale gorszą regulację obrotów.
- 3) Silniki szeregowo mają bardzo duży moment startowy ale złą regulację obrotów. Nadają się w zastosowaniach o małych obrotach i dużym momencie sił.

Przykład

Określić szybkość i moment sił generowany przez silnik bocznikowy cztero-biegunowy ($p = 4$) wiedząc, że nominalna moc, napięcie i obroty wynoszą: 3 KM ($1 \text{ KM}_{\text{parowy}} = 746 \text{ W}$), 240 V, 120 obr/min. Inne parametry silnika: $N = 1000$ zwoi, $I_z = 30 \text{ A}$, $I_f = 1,4 \text{ A}$, $R_a = 0,6 \Omega$, $\Phi = 20 \text{ mWb}$, $M = 4$ (uzwojenia twornika).

Rozwiązanie. $P = 3 \text{ KM} = 3 \cdot 746 = 2238 \text{ W}$.

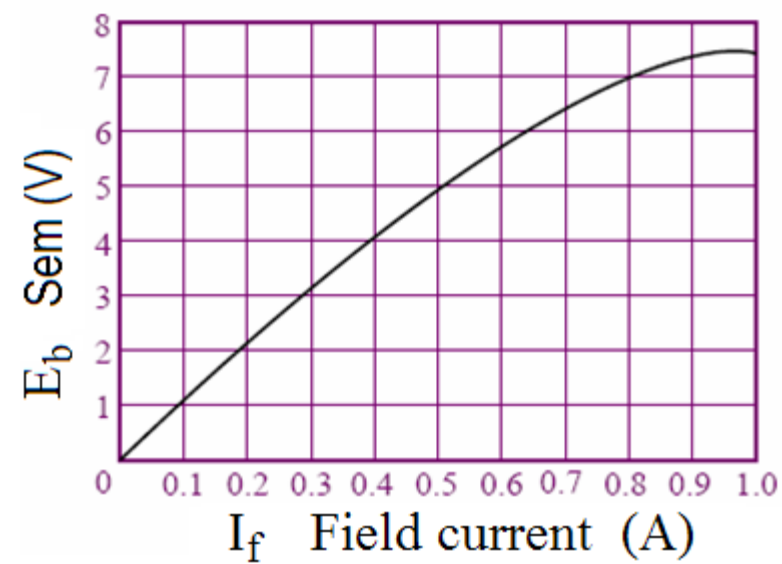
$$I_a = I_z - I_f = 30 - 1,4 = 28,6 \text{ A}, \quad E_b = U_z - I_a R_a = 240 - 28,6 \cdot 0,6 = 222,84 \text{ V},$$

$$\text{Stała silnika: } k_a = pN/(2\pi M) = 4 \cdot 1000/(2\pi \cdot 4) = 159,15 \text{ (V}\cdot\text{s/Wb}\cdot\text{rad)},$$

$$\text{Prędkość kątowna: } \omega_w = E_b/(k_a \cdot \Phi) = 222,84/(159,15 \cdot 0,02) = \underline{70 \text{ rad/s}},$$

$$\text{Moment sił: } T = P/\omega_w = 2238/70 = \underline{32 \text{ N}\cdot\text{m}}.$$

Przykład. Wiadomo, że silnik bocznikowy (równoległy) o wartościach nominalnych 8 A, 120 obr/min oraz parametrach: $R_a = 0,2 \Omega$, $U_Z = 7,2 \text{ V}$, $N = 200$ zwoi ma krzywą magnetyzacji jak na rysunku.



Wyznaczyć: I_f , n - liczbę obrotów bez obciążenia, moc nominalną i krzywą „T – n”.

Rozwiązanie. Aby znaleźć I_f (prąd generujący pole mag.) nie znając R_f (i R_x), musimy obliczyć E_b z równania

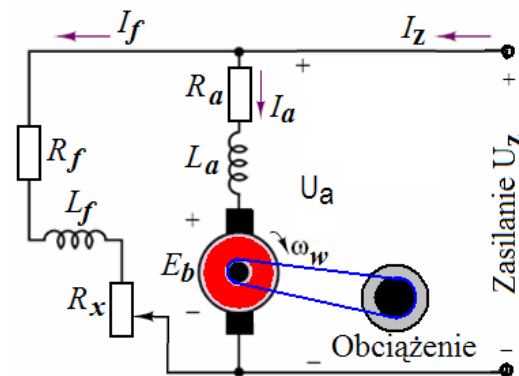
$$U_Z = E_b + I_a R_a; \quad E_b = U_Z - I_a R_a = 7,2 - 8 \cdot 0,2 = 5,6 \text{ V}.$$

Mając E_b z wykresu znajdujemy $I_f = 0,6 \text{ A}$ i $R_f = 7,2/0,6$

$= 12 \Omega$, Aby obliczyć obroty bez obciążenia uwzględnimy

równości: $E_b = k_a \Phi \omega_w = k_a \Phi (2\pi/60)n$ oraz $T = k_a \Phi I_a$: $U_Z = I_a R_a + E_b = I_a R_a + k_a \Phi (2\pi/60)n$, To: $n = (U_Z - I_a R_a) / (k_a \Phi (2\pi/60))$. Dla zerowego obciążenia $T = k_a \Phi I_a = 0 \rightarrow I_a = 0$ Dla $I_a = 0$ $n_{0-obc} = U_Z / (k_a \Phi (2\pi/60))$. Dla nominalnego

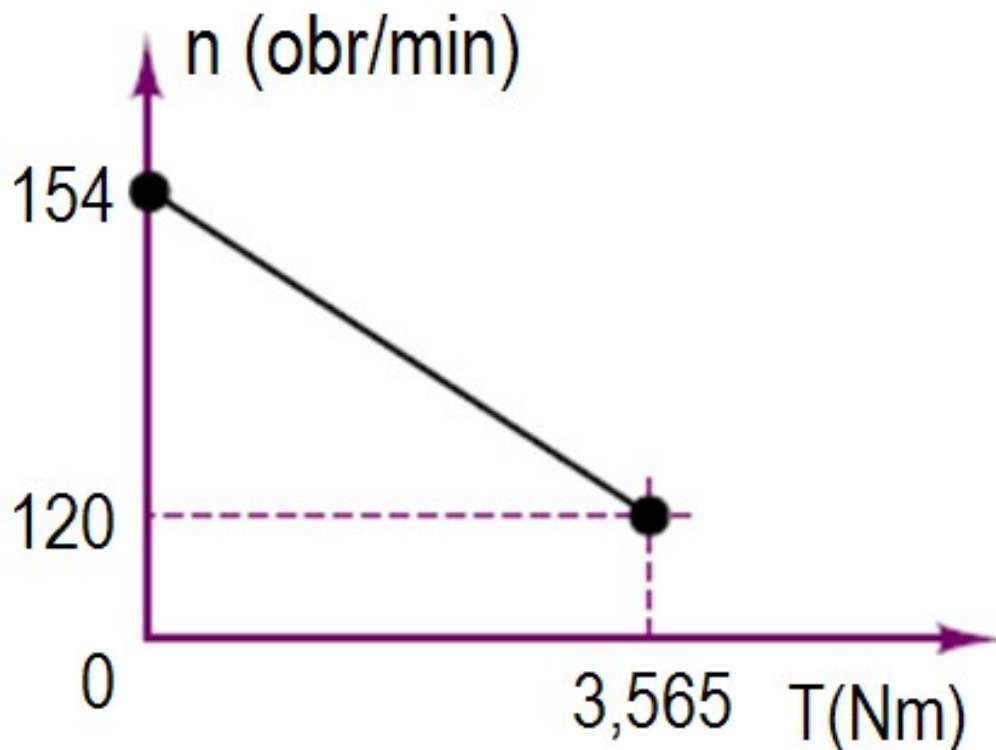
obciążenia $E_b = 5,6 \text{ V} = k_a \Phi (2\pi/60)n$ z tej równości mamy $k_a \Phi = E_b \cdot 60 / (2\pi n) = 5,6 \cdot 60 / (2\pi \cdot 120) = 0,44563 \text{ Vs/rad}$.



Obroty bez obciążenia $n_{0-obc} = U_Z / (k_a \Phi (2\pi/60)) = 7,2 / (0,44563 \cdot 2\pi/60) = \underline{154,3 \text{ obr/min.}}$

Aby wykreślić prostą „T – n” policzymy drugi punkt dla wykresu a mianowicie nominalny moment sił $T_{\text{nominal}} = k_a \Phi I_a = 0,44563 \cdot 8 = \underline{3,565 \text{ Nm.}}$

Moc nominalna $P_{\text{nominal}} = T_{\text{nominal}} \omega_w = 3,565 (120/60) 2\pi = \underline{44,8 \text{ W}} = 44,8/746 \text{ KM} = \underline{0,06 \text{ KM.}}$



Przykład.

Wiadomo, że silnik szeregowy prądu stałego ma parametry: 10 KM, 115 V, Szybkość na pełnym obciążeniu 1800 obr/min przy poborze prądu 40 A. Silnik pracuje w liniowym obszarze krzywej magnetyzacji. Obliczyć moment sił przy poborze prądu 60 A.

Rozwiązanie.

W liniowym obszarze magnetyzacji mamy liniową zależność: $\Phi = k_s I_s = k_s I_a$

Szybkość: $n = 1800 \text{ obr/min} \Rightarrow \omega_w = 2\pi n/60 = 60\pi \text{ rad/s}$.

Moc nominalna $P_{\text{nominal}} = 10 \text{ KM} \cdot 746 \text{ W/KM} = 7460 \text{ W}$. (KM jest jednostką poza układową!)

Moment sił przy nominalnym obciążeniu:

$$T_{40A} = (P_{\text{nominal}})/\omega_w = 7460/(60\pi) = 39,58 \text{ Nm}.$$

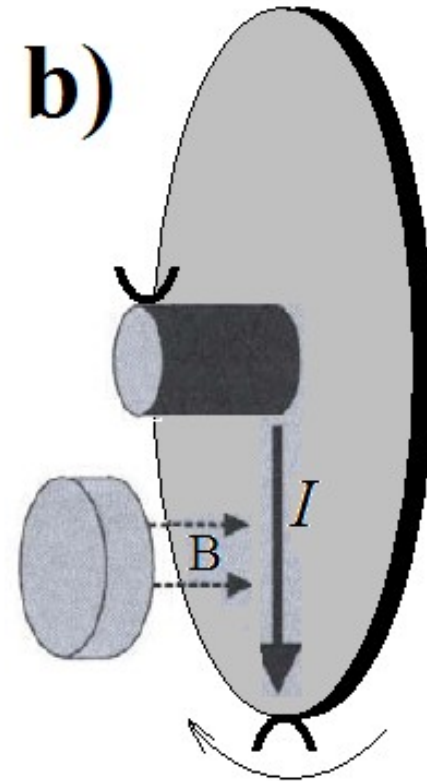
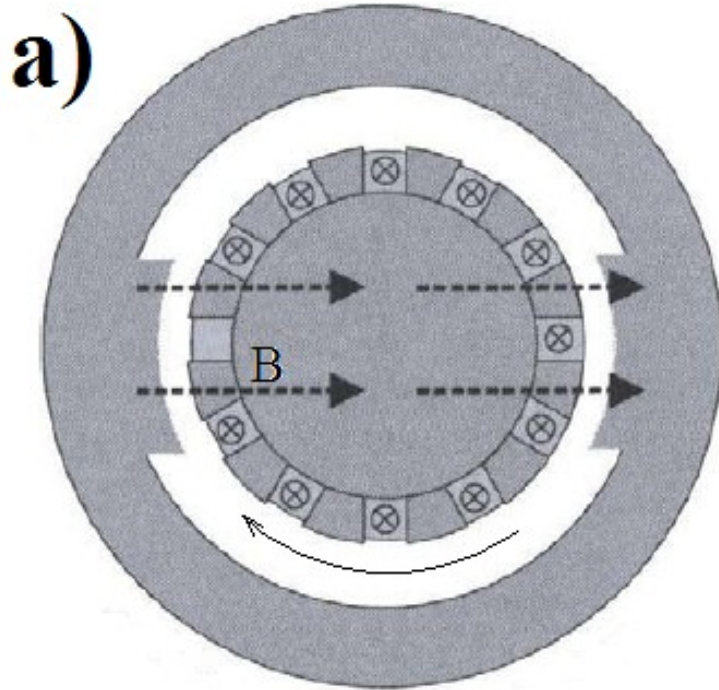
Z tego możemy obliczyć stałą maszyny K bo dla maszyny szeregowej mamy:

$$T = k_a k_s I_a^2 = K I_a^2 \Rightarrow \text{przy nominalnym obciążeniu } K = T/I_a^2 = 39,58/(40^2) = 0,0247 \text{ NmA}^{-2}.$$

$$\text{Zatem } T_{60A} = K I_a^2 = 0,0247 \cdot 60^2 = \underline{88,92 \text{ Nm}}.$$

Odnotujmy, że w zakresie liniowym obszarze magnetyzacji moment obrotowy silnika szeregowego jest proporcjonalny do kwadratu pobieranego natężenia prądu.

Różne warianty silników szczotkowych prądu stałego.



- a) Silnik podłużny z polem radialnym (z wirnikiem bezrdzeniowym lub z rdzeniem),
- b) Silnik płaski z polem osiowym i przewodami drukowanymi.

Elektrotechnika i elektronika Lista 06.

- 1) Generator 39 kW i 240V działa przy 59% obciążeniu z prędkością 1800 obr/min z wydajnością 85%. Oblicz całkowite straty i moc pobieraną przez generator.
- 2) Generator prądu stałego z dwoma biegunami o polu wzbudzenia 0,05 Wb (każdy), 24 uzwojeniami rotora po 16 zwoi jest podłączony do napędu o prędkości kątowej 180 rad/s. wyznacz stałą maszyny k_a i indukowane napięcie.
- 3) Obcowzbudny generator prądu stałego o parametrach: 1000 kW, 1000 V, 2400 obr/min ma rezystancję twornika $R_a = 0,04 \Omega$ i strumień na każdym biegunie $\Phi = 0,4$ Wb. Oblicz indukowane napięcie, stałą maszyny oraz nominalny moment sił.
- 4) Dla generatora bocznikowego o parametrach 100 kW, 250 V, rezystancja wzbudzenia $R_f = 50 \Omega$, rezystancja twornika $R_a = 0,05 \Omega$, obliczyć: a) Nominalny prąd obciążenia, b) Prąd wzbudzenia, c) Prąd twornika, d) Napięcie generatora nieobciążonego.
- 5) Silnik szeregowy pobiera prąd 25 A i uzyskuje moment obrotowy 100 Nm, oblicz : a) moment obrotowy gdy pobierany prąd wzrośnie do 30 A, a strumień pozostaje nienasycony, b) moment obrotowy gdy pobierany prąd wzrośnie do 30 A, a strumień wzrasta o 10%.
- 6) Bocznikowy silnik prądu stałego na 200 V pobiera 10 A przy obrotach 1800 obr/min. Rezystancja twornika wynosi 0,15 Ω , a rezystancja uzwojenia magnesującego 350 Ω . Jaki jest moment obrotowy silnika?