

# **MASZYNY ELEKTRYCZNE**

## **część 4**

# Zakres wykładu

1. Budowa maszyn prądu stałego
2. Zasada działania prądnicy prądu stałego
3. Zjawisko komutacji
4. Rodzaje połączeń maszyn prądu stałego
5. Charakterystyki silników prądu stałego
6. Rozruch silników prądu stałego
7. Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego
8. Hamowanie elektryczne urządzenia napędzanego
9. Typowe uszkodzenia silników
10. Typowe uszkodzenia maszyn elektrycznych prądu stałego

## Budowa maszyn prądu stałego

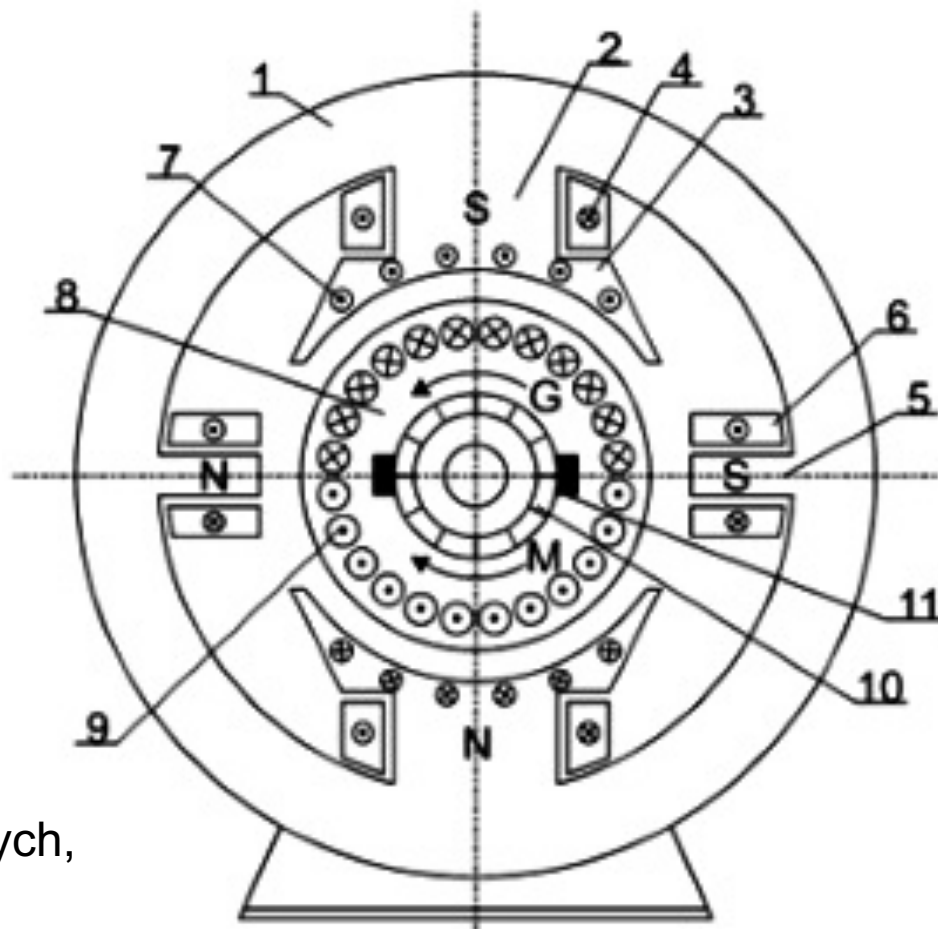
Maszyna prądu stałego składa się z dwóch głównych elementów: nieruchomego stojana i obracającego się wirnika. W skład stojana i wirnika wchodzi następujące elementy:

### a) stojan:

- jarzmo z nabiegunnikami,
- bieguny główne z uzwojeniami wzbudzającymi,
- bieguny komutacyjne z uzwojeniami komutacyjnymi,
- uzwojenia kompensacyjne,
- trzymadła szczotek oraz
- tarcze łożyskowe,

### b) wirnik:

- rdzeń wykonany z pakietu blach,
- uzwojenie wirnika, umieszczone w żłobkach rdzenia na jego obwodzie oraz
- komutator z układem szczotek, osadzony na wale wirnika, składający się z odizolowanych od siebie wycinków komutatorowych wykonanych z miedzi.



Oznaczenia:

- 1 – jarzmo stojana,
- 2 – biegun główny,
- 3 – nabiegunniki,
- 4 – uzwojenie wzbudzenia,
- 5 – biegun komutacyjny,
- 6 – uzwojenie biegunów komutacyjnych,
- 7 – uzwojenie kompensacyjne,
- 8 – twornik,
- 9 – uzwojenie twornika,
- 10 – komutator,
- 11 – szczotki

W maszynach prądu stałego obowiązuje **zasada odwracalności**, tzn. mogą pracować jako silnik i prądnica.

Obecnie powszechnie stosowane są silniki prądu stałego. Związane jest to z możliwością płynnej regulacji prędkości obrotowej oraz wytwarzaniem dużego momentu rozruchowego (szczególnie w silnikach szeregowych).

Silniki prądu stałego produkowane są w szerokim zakresie mocy (od kilku watów do kilkunastu megawatów) i znajdują zastosowanie m.in. w napędach lokomotyw, maszyn wyciągowych oraz w automatyce.

Prądnice prądu stałego są obecnie coraz rzadziej stosowane ze względu na większe wykorzystanie bardziej niezawodnych przekształtników energoelektronicznych DC/DC.

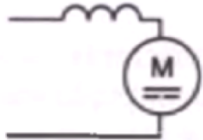
## Symbole silników prądu stałego



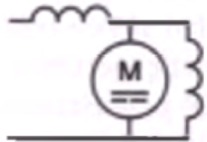
Silnik obcowzbudny



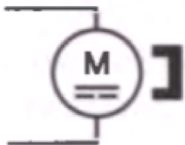
Silnik bocznikowy



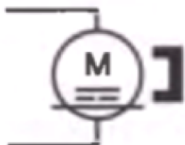
Silnik szeregowy



Silnik szeregowo – bocznikowy



Silnik z magnesami trwałymi



Silnik liniowy z magnesami trwałymi

W stojanie, wykonanym najczęściej z odlewu żeliwnego lub staliwa, są umieszczone bieguny główne z uzwojeniem wzbudzającym (zasilanym prądem stałym - w układzie zależnym od rodzaju maszyny); mogą też być bieguny pomocnicze z uzwojeniem oraz uzwojenie kompensacyjne w nabiegunnikach biegunów głównych. Na blachowanym wirniku (tworniku) znajduje się uzwojenie prądu stałego (zamknięte, bębnowe, przeważnie dwuwarstwowe). Końce każdego zezwoju są dołączone do odpowiednich wycinków komutatora, z którym współpracują szczotki.

Pola magnetyczne stojana i wirnika są stałe i nieruchome, przy tym - dla uzyskania dużego momentu elektromagnetycznego - przesunięte względem siebie o kąt elektryczny  $\pi/2$ . Osiąga się to w wyniku działania ruchomego zestyku komutator-szczotki. Istota leży w zapewnieniu przeciwnego zwrotu prądu w czynnych bokach uzwojenia twornika, położonych po przeciwnych stronach - stykających się ze szczotką - wycinków komutatora. Szczotki przylegające do sąsiednich wycinków komutatora zwierają zezwoje, których końce są dołączone do tych wycinków. Zwierane zezwoje powinny znajdować się w strefie neutralnej (indukcja równa zero), aby nie indukowały się w nich napięcia. W czasie przemieszczania się wycinków komutatora pod szczotkami, w zwieranych zezwojach ulega zmianie zwrot prądu. Proces przełączania zezwojów twornika przez zestyk komutator-szczotki nosi nazwę komutacji.

Komutacja ma złożony charakter. Składają się na nią zjawiska natury mechanicznej, elektromagnetycznej, elektrochemicznej i termicznej. Zła komutacja, objawiająca się iskrzeniem, może spowodować zniszczenie szczotek i komutatora.

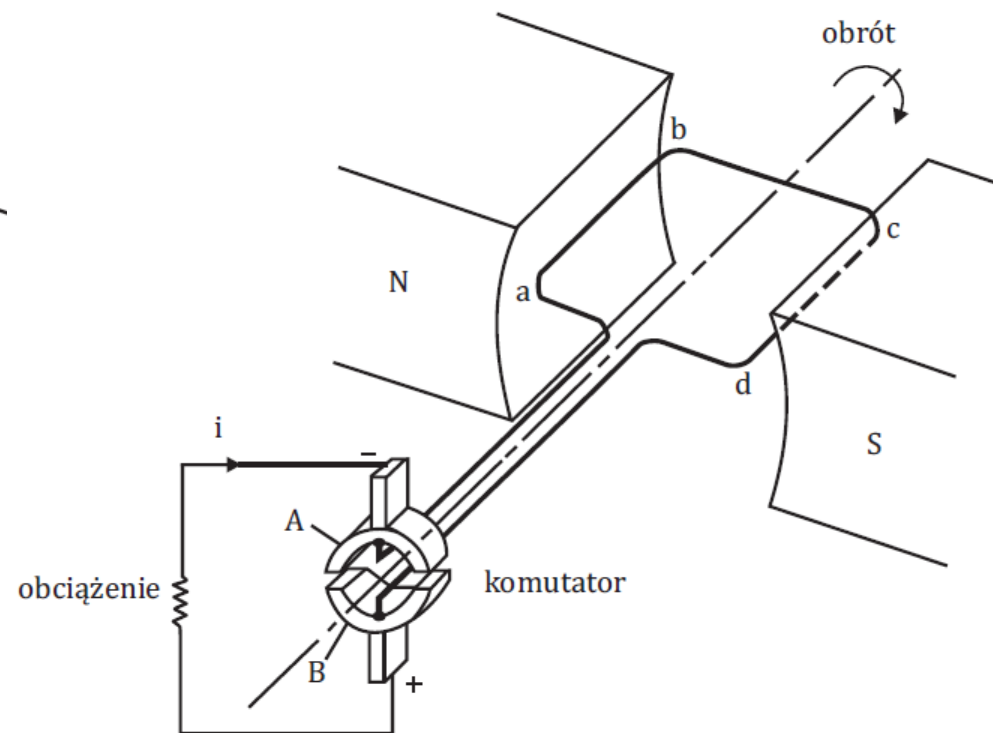
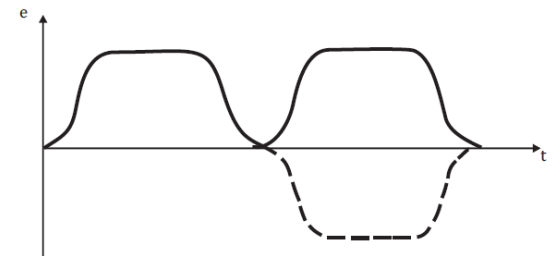
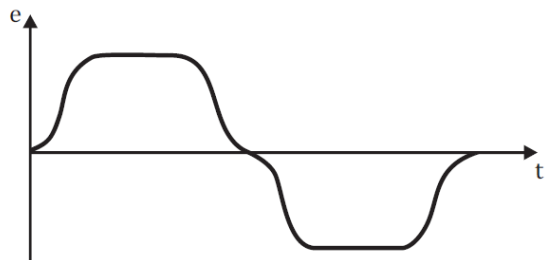
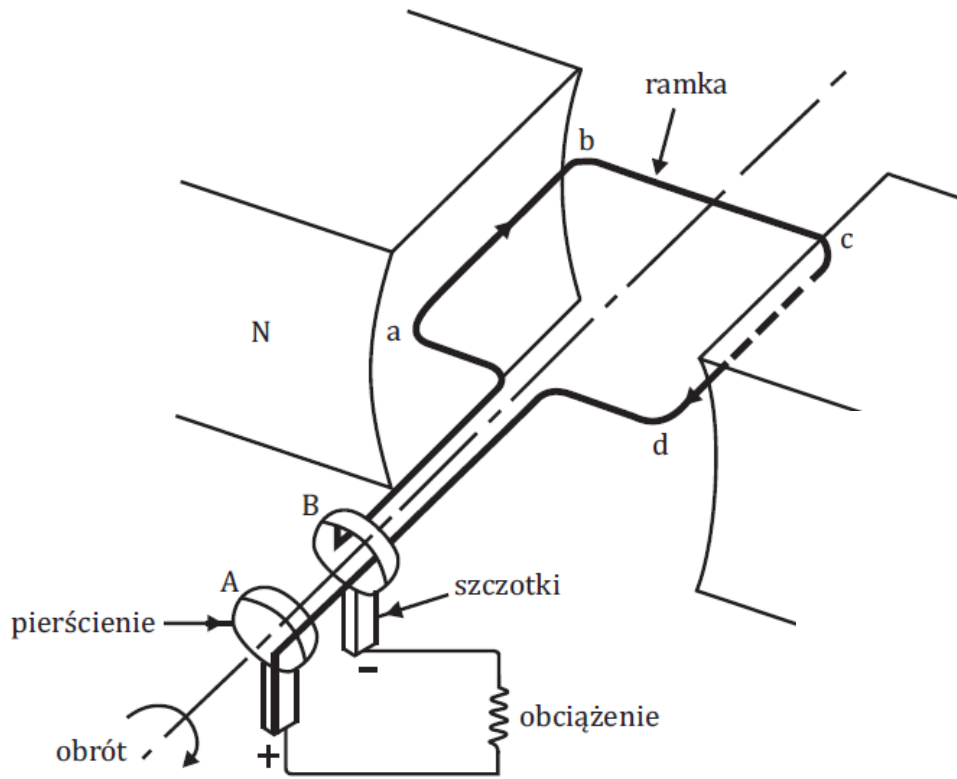
Przepływ twornika zniekształca pole w maszynie. Zjawisko to określa się jako oddziaływanie twornika. Skutki oddziaływania twornika (strumienia poprzecznego) są następujące:

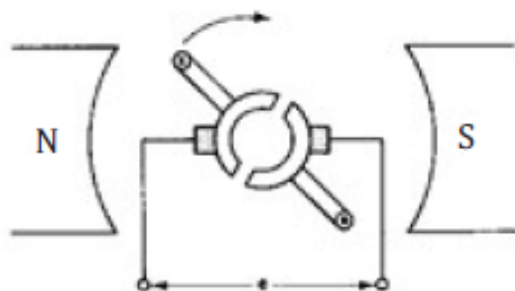
- przesunięcie strefy neutralnej a stąd gorsza komutacja;
- odmagnesowywanie jednej połówki i domagnesowywanie drugiej połówki nabiegunnika, a stąd wzrost maksymalnego napięcia między wycinkami komutatora oraz zmniejszenie sem twornika (w wyniku nasycenia magnetycznego jednej połówki nabiegunnika);
- wzrost strat w żelazie wirnika.

Niekorzystnemu przesunięciu osi neutralnej przeciwdziała się przez umieszczenie biegunów pomocniczych (komutacyjnych), a zniekształceniu pola w strefie biegunów głównych - przez wykonanie uzwojenia kompensacyjnego. Uzwojenia: biegunów pomocniczych i kompensacyjne, łączy się szeregowo z uzwojeniem twornika.

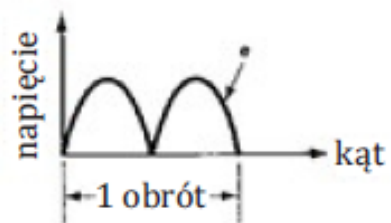
Końcówki (zaciski) uzwojenia twornika oznacza się symbolami **A1** i **A2**, przy czym napięcie między **A1** i **A2** jest dodatnie. Końcówki uzwojenia **biegunów pomocniczych** oznacza się symbolami **B1** i **B2**, a **uzwojenia kompensacyjnego** - symbolami **C1** i **C2**; zwrot prądu względem wskaźników cyfrowych końcówek tych uzwojeń jest w nich taki sam, jak w uzwojeniu twornika. Końcówki **uzwojenia wzbudzającego**: **szeregowego** (łączonego szeregowo z uzwojeniem twornika) oznacza się symbolami **D1** i **D2**, **bocznikowego** (łączonego równolegle z uzwojeniem twornika) - symbolami **E1** i **E2**, **zasilanego z obcego** (innego) źródła - symbolami **F1** i **F2**; zwrot prądu względem wskaźników cyfrowych końcówek tych uzwojeń jest następujący: od 1 do 2 - przy prawym kierunku obrotów wirnika, a od 2 do 1 - przy lewym. Kierunek obrotów określa się patrząc od strony wału napędowego (zwykle - przeciwległej komutatorowi). **Normalnym kierunkiem obrotów wału prądnicy jest kierunek lewy, a silnika - prawy.**

Nazwy maszyn (prądnic i silników) prądu stałego: obcowzbudne, bocznikowe, szeregowe i szeregowo-bocznikowe pochodzą od sposobu zasilania uzwojeń wzbudzających. Maszyna szeregowo - bocznikowa ma dwa uzwojenia wzbudzające: bocznikowe i szeregowe, przy czym zwrot prądu w uzwojeniu szeregowym względem wskaźników cyfrowych końcówek jest taki sam, jak w uzwojeniu bocznikowym, jeśli przepływy obu uzwojeń dodają się (mają ten sam zwrot)

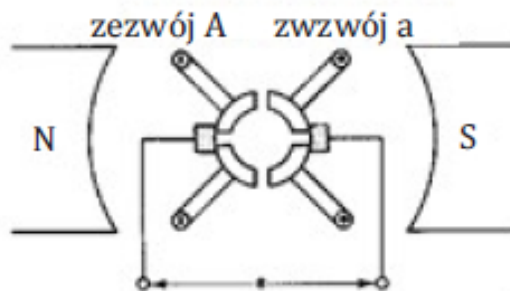




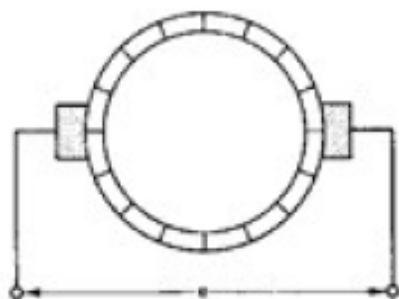
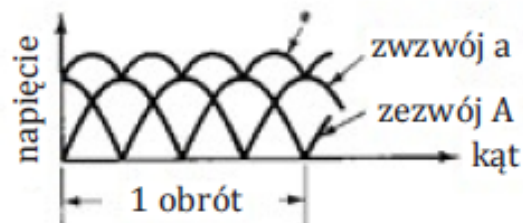
a)



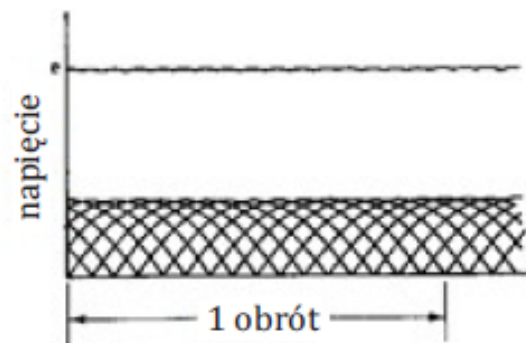
Zależność oscylacji napięcia indukowanego w wirniku od liczby wycinków komutatora

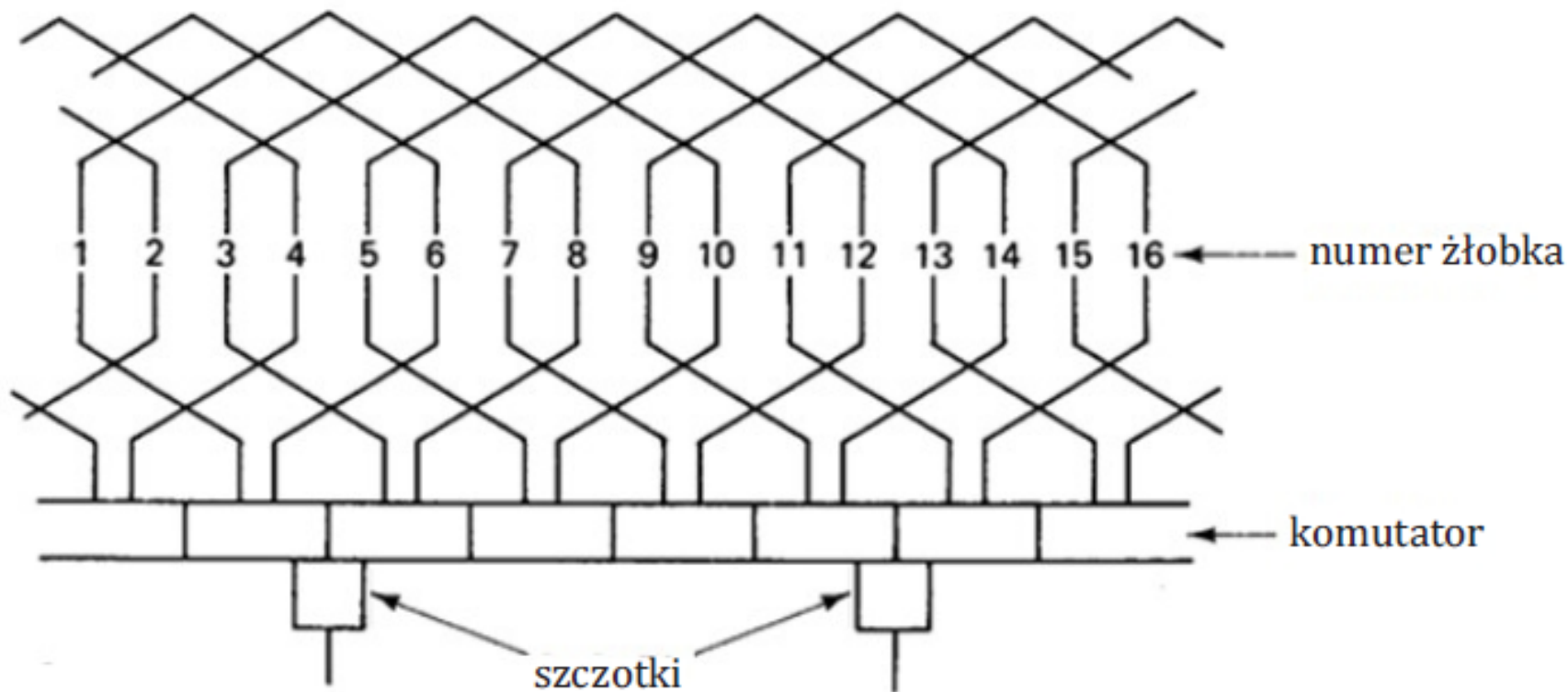


b)



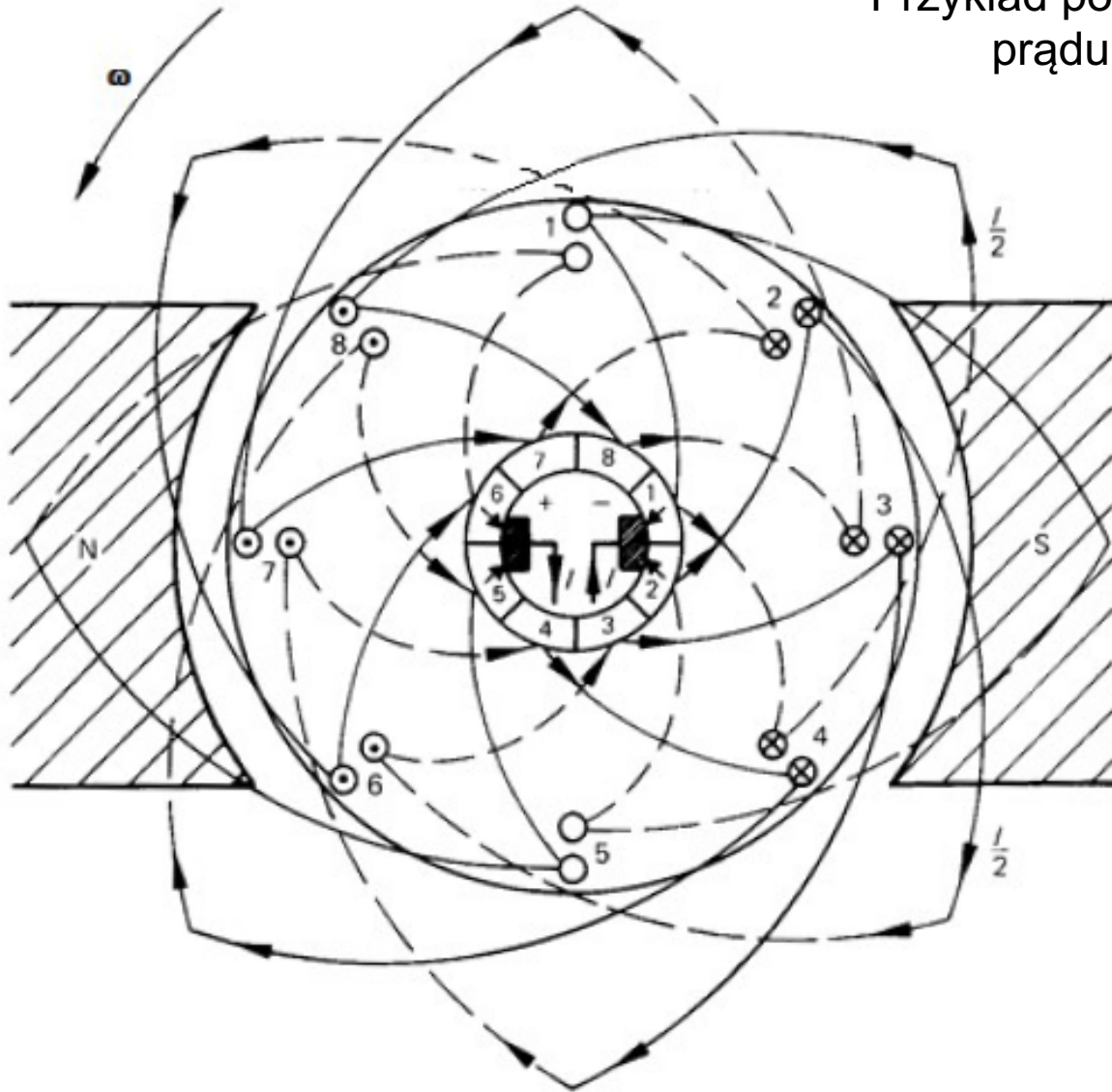
c)

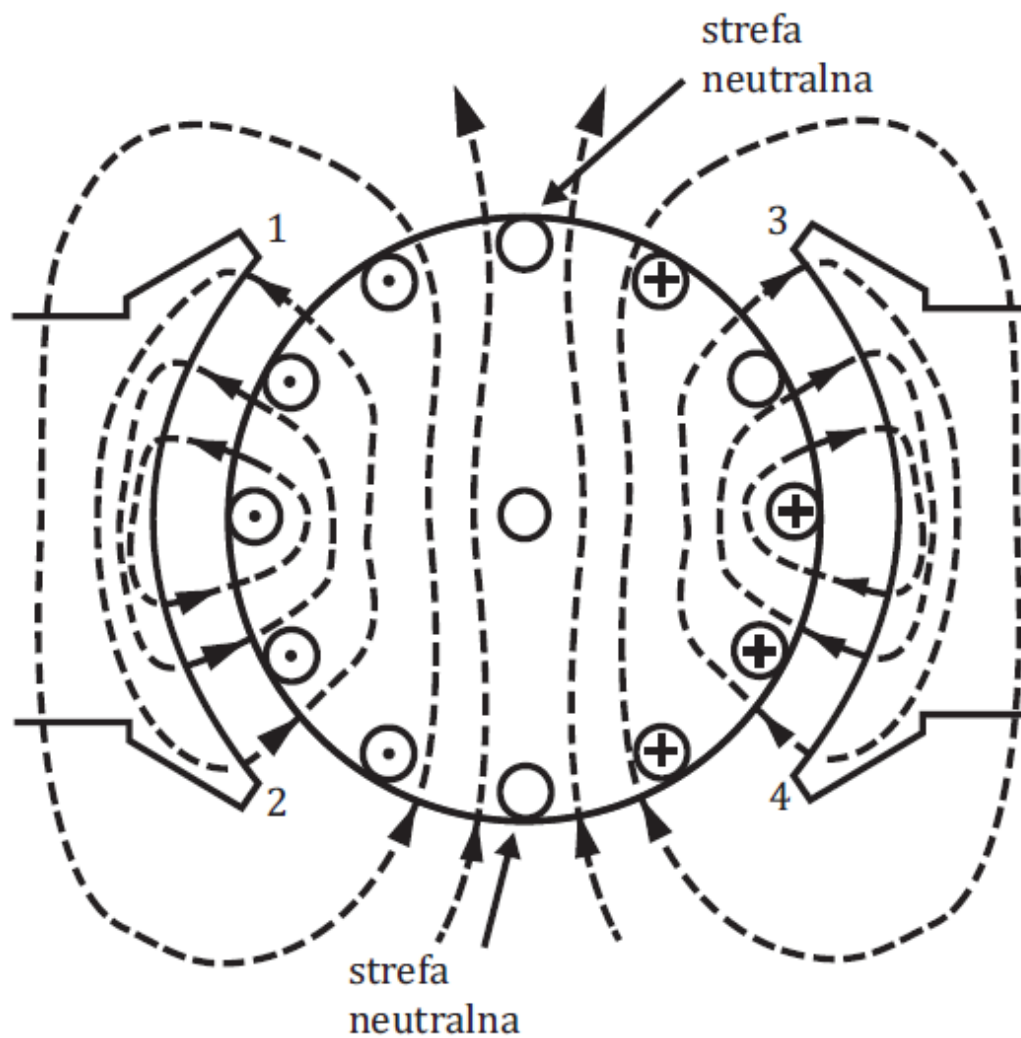




Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Richtera)

Przykład połączeń uzwojenia maszyny prądu stałego (schemat Arnolda)





Rozkład pola magnetycznego od prądu twornika (reakcja twornika)



Jeżeli w uzwojeniu twornika znajduje się  $N$  prętów i określona liczba gałęzi równoległych, to siła elektromotoryczna wzbudzana w tworniku, w V:

$$E = \frac{PN}{a} \frac{n}{60} \Phi$$

Na wirnik maszyny prądu stałego, niezależnie od tego, czy pracuje jako silnik, czy jako prądnica, działa moment obrotowy, w N·m:

$$M = c_M I_a \Phi$$

Przy czym:

$\Phi$  – strumień magnetyczny jednego bieguna, w Wb;

$N$  – liczba prętów uzwojenia twornika;

$a$  – liczba gałęzi równoległych uzwojenia twornika;

$p$  – liczba par biegunów;

$n$  – prędkość obrotowa;

$I_a$  – prąd twornika, w A;

$c_M$  – stała zależna od parametrów mechanicznych maszyny.

## Zasada działania prądnicy prądu stałego

Zasadę działania prądnicy można przedstawić np. jako układ składający się z jednego zwoju obracającego się między dwoma biegunami magnesu trwałego. Początek i koniec tego zwoju są przyłączone do pierścieniami ślizgowych, po których ślizgają się szczotki doprowadzające prąd. Jeżeli znajdujący się w polu magnetycznym o indukcji  $B$  zwój obraca się z prędkością  $\vartheta$ , to w tym zwoju, o długości  $l$ , indukuje się siła elektromotoryczna, o wartości:

$$E = B l \vartheta$$

a siła elektromotoryczna wzbudzana w tworniku:

$$E = c \Phi \omega$$

gdzie:

$c = N / 2\pi a$ ; stała niezależna od parametrów silnika;

$\Phi$  – strumień magnetyczny jednego bieguna;

$N$  – liczba prętów uzwojenia twornika;

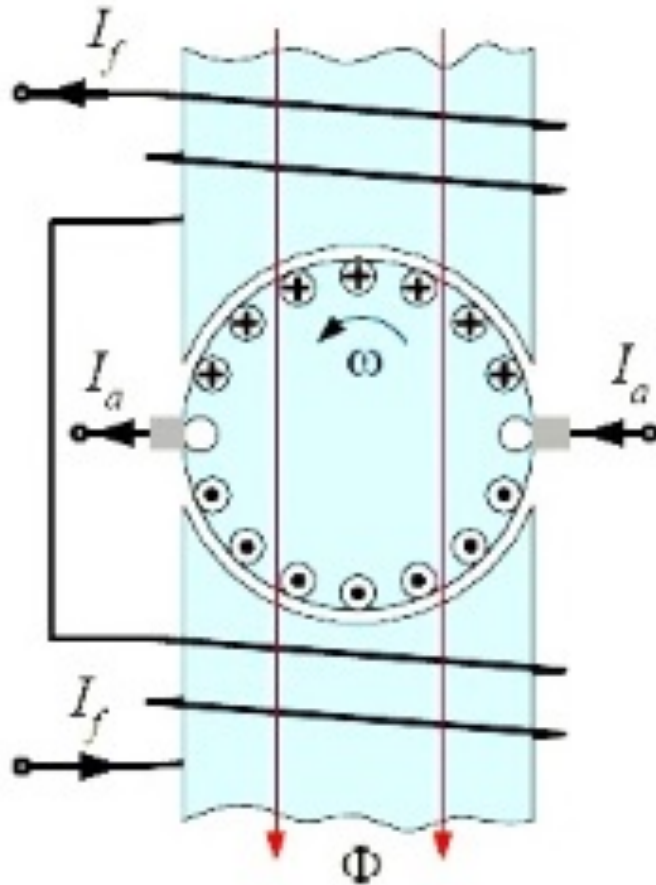
$a$  – liczba gałęzi równoległych uzwojenia twornika.

Moment obrotowy ( $M = F \cdot r$ ) można wyrazić zależnością:

$$M = c \Phi I_a$$

gdzie

$$I_a = \frac{U - E}{\sum R_a}$$



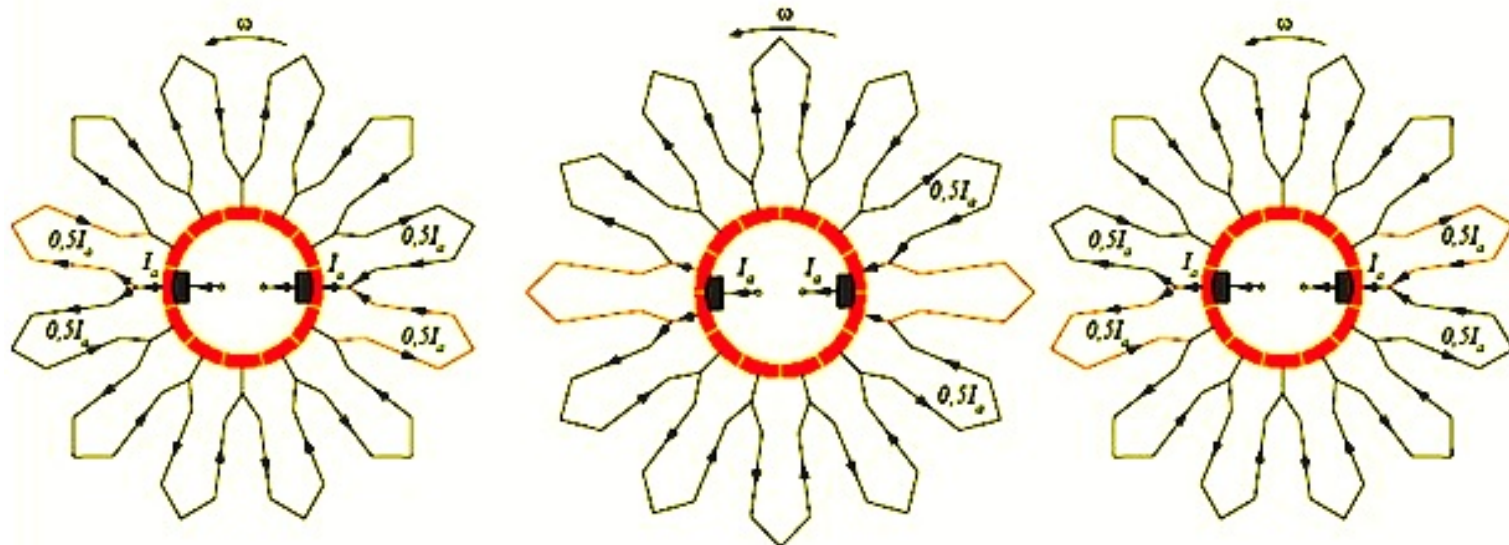
Przy założeniu, że pole magnetyczne prądnicy jest jednorodne, a boki zezwoju poruszają się ruchem jednostajnym postępowym, to przez zamknięty zwoj popłynie prąd o kierunku zgodnym ze zwrotem indukowanej siły elektromotorycznej. Indukowana w czasie jednego obrotu siła elektromotoryczna będzie miała w tym przypadku przebieg jednego okresu sinusoidy, a napięcie odbierane na szczotkach będzie napięciem przemiennym.

## Zjawisko komutacji

Aby otrzymać napięcie o dostatecznej równomierności, w polu biegunów umieszcza się nie jeden a większą liczbę zwojów przyłączonych do pierścieni, czyli do odpowiednich wycinków komutatora.

Komutacją nazywa się proces zmiany kierunku prądu w zezwoju i występujący przy tym zespół zjawisk elektromagnetycznych, mechanicznych, elektrochemicznych i termicznych.

Zwiększenie liczby wycinków (działek) komutatora wpływa na to, że przebieg napięcia odbieranego z prądnicy jest bardziej równomierny, a prąd o dostatecznej równomierności nazywa się **prądem stałym**.



W okresie komutacji (w czasie przejścia szczotki z jednej działki komutatora na drugą) prąd w cewce komutowanej zmienia kierunek na przeciwny. Zmienny w czasie prąd cewki indukuje w niej SEM samoindukcji, co powoduje przepływ prądu w zwartej przez szczotkę cewce i iskrzenie między działkami komutatora a szczotkami. Celem skompensowania SEM samoindukcji stosuje się bieguny komutacyjne wytwarzające strumień indukujący w komutowanej cewce przeciwnie skierowaną SEM rotacji.

W maszynie prądu stałego, odwrotnie niż w prądnicy synchronicznej, wirnik jest twornikiem wytwarzającym napięcie, a stojan – magneśnicą. Zasada działania prądnicy jest zawsze taka sama, niezależnie od tego, czy pole magnetyczne zostało wytworzone przez magnes trwały, czy elektromagnes.

W maszynach prądu stałego obowiązuje również zasada odwracalności; każda maszyna może pracować jako prądnica lub silnik. Jeżeli do uzwojenia wirnika maszyny prądu stałego doprowadzone zostanie napięcie, to w uzwojeniach wirnika popłynie prąd i wirnik zaczyna się obracać w wyniku oddziaływania pola magnetycznego. Maszyna będzie wówczas przetwarzała energię elektryczną na mechaniczną, będzie pracować jako silnik.

Maszyna prądu stałego, w której pole magnetyczne jest wytwarzane przez elektromagnes, może być maszyną:

- a) **obcowzbudną**, w której uzwojenie wzbudzające jest zasilane z oddzielnego źródła
- b) **samowzbudną**, w której uzwojenie wzbudzające jest zasilane z tego samego źródła, co uzwojenie twornika (prądnice).

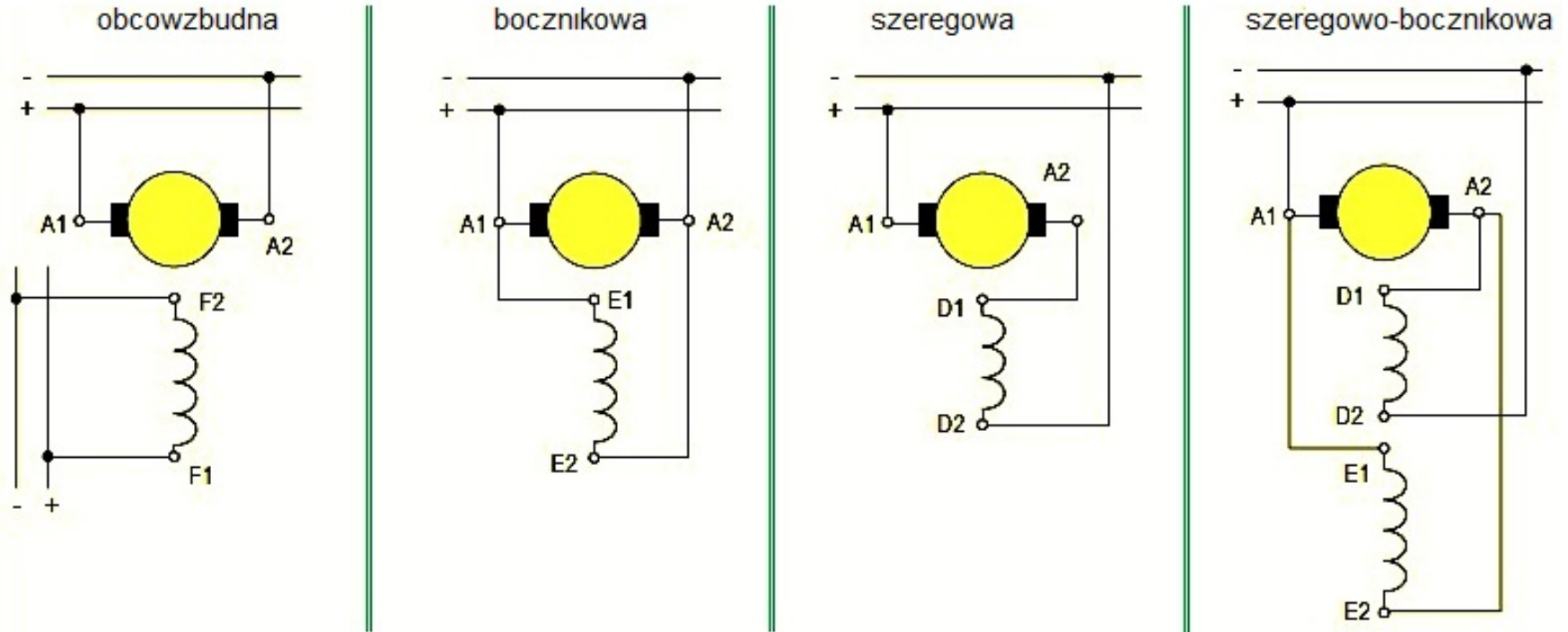
## Rodzaje połączeń maszyn prądu stałego

Sposób połączenia uzwojenia wzbudzenia względem uzwojenia twornika decyduje o właściwościach maszyny prądu stałego.

Silniki prądu stałego charakteryzują się dobrymi właściwościami ruchowymi np. dużym zakresem prędkości obrotowej i dużym momentem obrotowym przy rozruchu. Ich własności użytkowe zależą od liczby i sposobu połączenia uzwojeń wzbudzających.

Ze względu na sposób połączenia uzwojenia wzbudzającego i uzwojenia twornika, rozróżnia się maszyny samowzbudne:

- a) **bocznikowe** – uzwojenie wzbudzające jest połączone równolegle z uzwojeniem twornika;
- b) **szeregowe** – uzwojenie wzbudzające jest połączone szeregowo z uzwojeniem twornika;
- c) **bocznikowo-szeregowe** – uzwojenie wzbudzające składa się z dwóch części, z których jedna jest połączona szeregowo, a druga równolegle z uzwojeniem twornika.



W większych maszynach prądu stałego znajdują się tzw. uzwojenia pomocnicze połączone szeregowo z uzwojeniem twornika, służące do poprawy warunków pracy maszyny, np.:

- a) uzwojenia komutacyjne,
- b) uzwojenia kompensacyjne.

**Uzwojenie biegunów komutacyjnych** (pomocniczych) połączone jest szeregowo na stałe z twornikiem, a punkt połączenia nie jest wyprowadzony na zewnątrz silnika. Po przyłączeniu silnika do zasilania, poprzez szczotki i uzwojenie wirnika, płynie prąd. Uzwojenie to znajduje się w polu magnetycznym uzwojenia stojana, które oddziałując siłą elektrodynamiczną na pręty uzwojenia twornika, powoduje wprowadzenie wirnika w ruch obrotowy.

Zastosowanie przekształtników umożliwia zasilanie i regulację silników prądu stałego z sieci prądu przemiennego, co zwiększa ich konkurencyjność wobec urządzeń napędowych z silnikami prądu przemiennego.

W celu eliminacji oddziaływania twornika w strefie biegunów głównych, w nabiegunnikach biegunów głównych umieszcza się specjalne uzwojenie, zwane **uzwojeniem kompensacyjnym**. Uzwojenie to jest połączone szeregowo z uzwojeniem twornika, przy czym kierunek prądu musi być przeciwny do kierunku prądu twornika od danym biegunem.

## Charakterystyki silników prądu stałego

Właściwości ruchowe silników prądu stałego można przedstawić za pomocą:

a) charakterystyk mechanicznych silnika prądu stałego  $n = f(I)$  lub  $n = f(M)$

przy  $U = \text{const.}$  i  $R_f = \text{const.}$  oraz

a) charakterystyk momentu silnika prądu stałego  $M = f(I)$  przy  $U = \text{const.}$  i  $R_f = \text{const.}$

Silniki obcowzbudne wymagają niezależnego źródła do zasilania uzwojenia wzbudzającego. Znajdują często zastosowanie w układach napędowych z przekształtnikami tyrystorowymi.

Właściwościami ruchowe ogólnie dla wszystkich typów maszyn prądu stałego można określić na podstawie następujących zależności:

$$M = c \Phi I_a$$

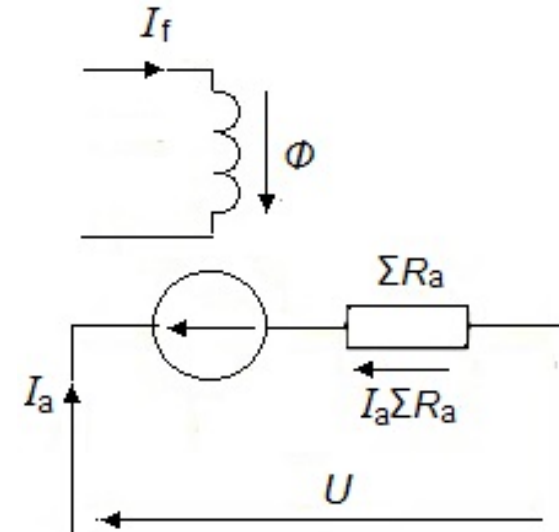
Ponieważ:  $U = E + R_a I_a$  oraz  $U = c \Phi n + R_a I_a$

to prędkość obrotową silnika można obliczyć ze wzoru:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c \Phi}$$

## Charakterystyka mechaniczna silnika bocznikowego

W silniku bocznikowym uzwojenie wzbudzące jest połączone równoległe z uzwojeniem twornika – zasilane napięciem sieci

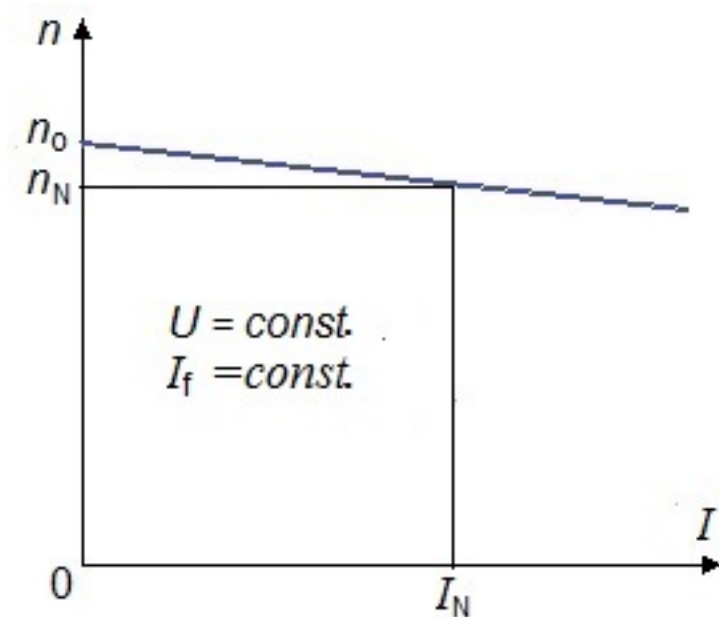


Charakterystykę mechaniczną silnika bocznikowego wyznacza się przy  $U = \text{const}$  i  $R = \text{const}$  (prąd wzbudzenia jest stały). Prędkość obrotową silnika  $n$  można wyznaczyć, z pominięciem oddziaływania twornika, jako przebieg w przybliżeniu prostoliniowy, w postaci:

$$n = \frac{U}{c_E \Phi} - \frac{R_a}{c_E \Phi} I_a$$

po przekształceniu:

$$n = n_0 - k M$$



W przypadku maszyny bocznikowej, przy pominięciu oddziaływania twornika można przyjąć, że wartość strumienia magnetycznego ( $\Phi$ ) jest proporcjonalna do prądu, a wzór na moment ma postać:

$$M = c_M \Phi I_a \text{ lub po przekształceniu } M \approx c_1 I_a$$

Przy rozpatrywaniu pracy napędów elektrycznych bardziej przydatna jest zależność prędkości obrotowej od momentu obciążenia, czyli charakterystyka  $n = f(M)$  przy  $U = \text{const}$  i  $R_a = \text{const}$ .

Przebieg tej charakterystyki w przypadku silnika bocznikowego jest taki sam, jak dla przebiegu zależności  $n = f(I)$ .

## Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego

Uzwojenie wzbudzające w silniku szeregowym jest połączone szeregowo z uzwojeniem twornika i uzwojeniem biegunów komutacyjnych. Prąd pobierany z sieci jest jednocześnie prądem twornika i prądem wzbudzenia, czyli w przypadku silnika szeregowego:  $I = I_a = I_f$ .

Z tego względu właściwości ruchowe silników szeregowych różnią się od właściwości ruchowych silników bocznikowych.

Strumień w silnikach szeregowych zależy od prądu obciążenia, (strumień  $\Phi$  jest wprost proporcjonalny do prądu obciążenia  $I_a$ ), natomiast wzrostowi momentu obciążenia odpowiada prąd obciążenia i wzrost strumienia – zgodnie z charakterystyką magnesowania.

Właściwości ruchowe silników szeregowych można również określić na podstawie następujących zależności:

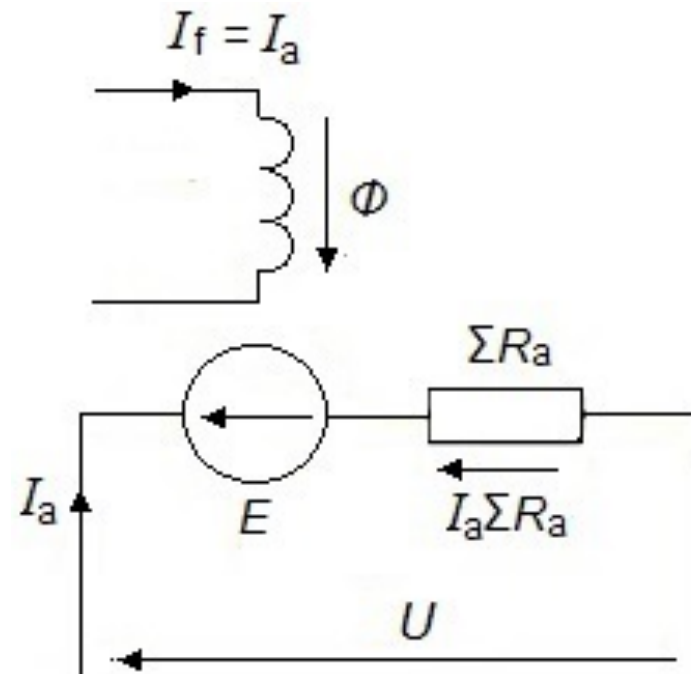
Ogólny moment rozruchowy;

$$M = c \Phi I_a$$

po przekształceniu:

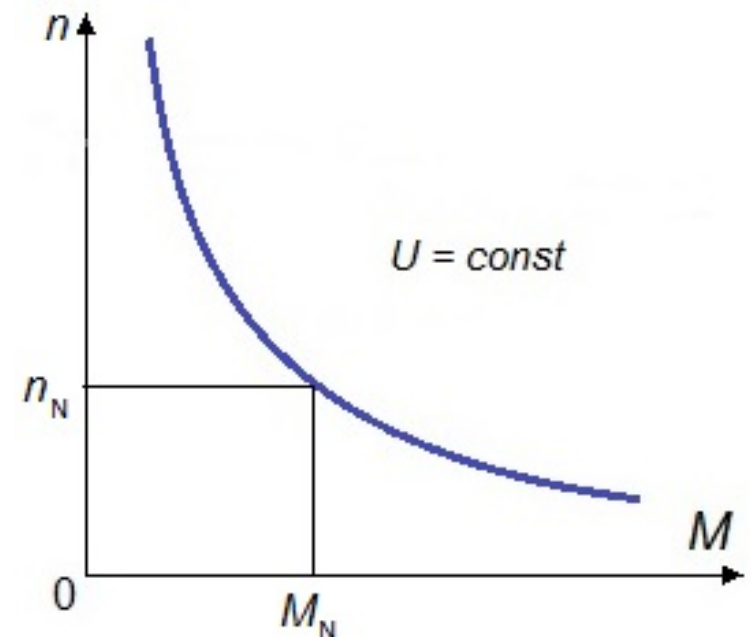
$$n = \frac{k_1}{\sqrt{M}} - k_2$$

Wynika stąd, że przy małym momencie ( $M$ ) obciążenia prędkość obrotowa przybiera duże wartości, wirnik się rozbiega.



Przy prędkościach zbliżonych do prędkości znamionowej można przyjąć, że charakterystyka mechaniczna silnika szeregowego ma przebieg zbliżony do hiperboli

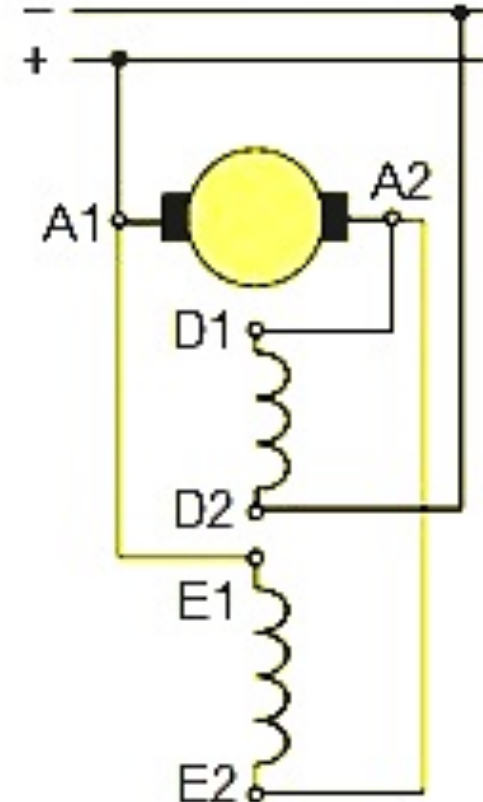
Przy zbyt małym obciążeniu na wale silnik szeregowy może osiągać niedopuszczalnie duże prędkości obrotowe (może się rozbiegać). Dlatego silniki te należy łączyć z napędzanymi przez nie maszynami za pomocą sprzęgieł nierozłącznych lub przekładni zębatej (nie powinno się stosować przekładni pasowych). Silniki szeregowy nie powinny pracować przy biegu jałowym. Możliwość rozbiegania się silnika jest jego wadą. Do zalet silnika szeregowego należy zaliczyć duży moment rozwijany podczas rozruchu. Z tego właśnie względu silniki szeregowy mają zastosowanie w napędach wymagających rozruchu pod dużym obciążeniem.



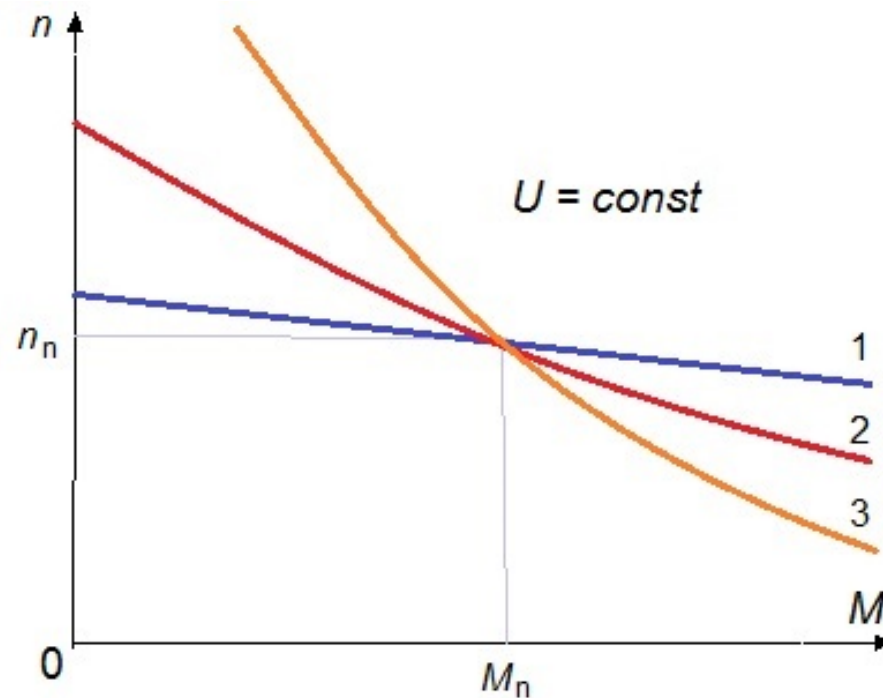
## Charakterystyka mechaniczna silnika szeregowo-bocznikowego

Silnik szeregowo-bocznikowy składa się z dwóch uzwojeń wzbudzających: bocznikowego i szeregowego.

Właściwości silnika szeregowo-bocznikowego są zbliżone do silnika bocznikowego lub szeregowego, w zależności od ich przepływów. Najczęściej stosuje się zgodne połączenie uzwojeń, to znaczy takie, że strumienie wytworzone przez uzwojenie bocznikowe i szeregowe dodają się, przy czym pierwszorzędną rolę odgrywa przepływ bocznikowy.



Porównując charakterystyki mechaniczne silników: bocznikowego (1) szeregowego (3) i szeregowo-bocznikowego (2) można stwierdzić, że silnik szeregowo-bocznikowy nie ma ujemnej cechy rozbiegania się w stanie jałowym, jaką miał silnik szeregowy, natomiast w porównaniu z charakterystyką silnika bocznikowego, silnik szeregowo-bocznikowy wykazuje duży moment rozruchowy.



## Rozruch silników prądu stałego

### Sposoby rozruchu silnika prądu stałego:

- a) Rozruch za pomocą bezpośredniego włączenia do sieci – może być stosowany tylko do silników małych, o mocy znamionowej nie większej niż 1 kW;
- b) Rozruch za pomocą rozrusznika oporowego włączonego szeregowo w obwodzie twornika – może być prowadzony przy wymaganym momencie oraz prądzie rozruchowym;
- c) Rozruch silnika obcowzbudnego za pomocą regulowanego napięcia twornika; jest powszechnie stosowany dzięki rozwojowi sterowanych układów półprzewodnikowych;
- d) Rozruch silnika szeregowego następuje za pomocą rozrusznika oporowego lub za pomocą regulowanego napięcia zasilania.

## Przebieg rozruchu silnika prądu stałego

W pierwszej chwili rozruchu, gdy prędkość silnika jest równa zero, siła elektromotoryczna  $E = 0$ , równanie napięć dla silnika prądu stałego  $U = E + R_a I_a$  przyjmuje postać:  $U = R_a I_r$ .

Prąd rozruchowy pobierany przez silnik jest wielokrotnie większy od prądu znamionowego:

$$I_r = \frac{U}{R_r}$$

osiąga dużą wartość w porównaniu z prądem pobieranym w czasie pracy:

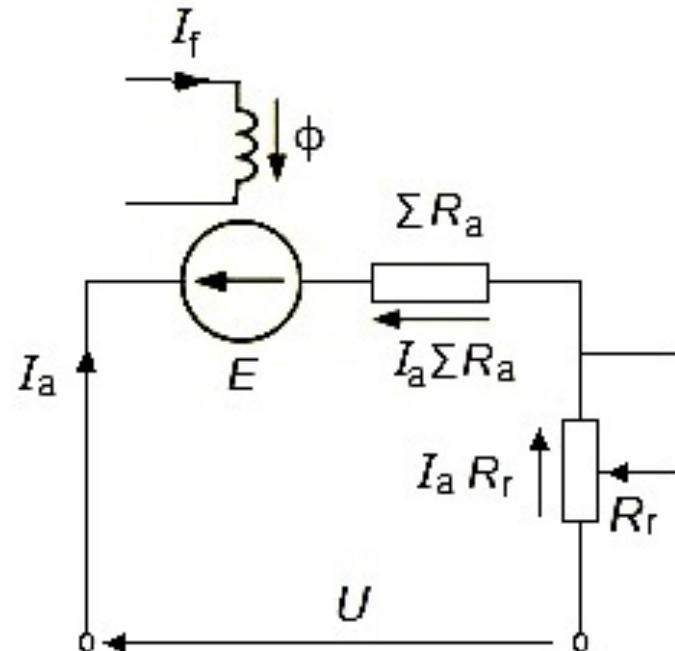
$$I_a = \frac{U - E}{\sum R_a}$$

Prąd twornika włączonego bezpośrednio na napięcie znamionowe może być bardzo duży (20 – 30 razy większy od znamionowego), co mogłoby doprowadzić do zniszczenia silnika.

Celem jego ograniczenia w obwód twornika jest włączany, na czas rozruchu, rezystor  $R$ , zwany **rozzrusznikiem**.

$$I_{\text{rozr}} = I_a = \frac{U}{\sum R_a + R_r}$$

Innym sposobem zmniejszenia prądu rozruchowego jest włączenie twornika na obniżone napięcie.



Całkowitą rezystancję rozrusznika oblicza się ze wzoru:

$$R_{\text{roz}} \geq \frac{U_N}{I_{\text{roz}}} - \sum R_a$$

gdzie:

$I_{\text{roz}}$  – dopuszczalny prąd twornika przy wymaganym rodzaju rozruchu, w A;

$U_N$  – napięcie znamionowe, w V;

$\sum R_a$  – suma rezystancji w obwodzie twornika, w  $\Omega$ .

Elektromagnetyczny moment obrotowy przy rozruchu zależy od wymagań napędowych i rezystancji rozrusznika; typowy silnik jest przystosowany przez wytwórcę do momentu rozruchowego nie mniejszego niż:

- a) silnik obcowzbudny –  $1,8 M_N$
- b) silnik bocznikowy –  $1,8 M_N$
- c) silnik bocznikowo-szeregowy –  $2,0 M_N$
- d) silnik szeregowy –  $2,5 M_N$

## Regulacja prędkości obrotowej silnika prądu stałego

Prędkość obrotowa silnika prądu stałego z dodatkową rezystancją w obwodzie twornika  $R_r$  jest wyrażona wzorem:

$$n = \frac{U - I_a(\sum R_a + R_r)}{c\Phi}$$

Z zależności tej wynika, że prędkość obrotową silnika prądu stałego można regulować zmieniając:

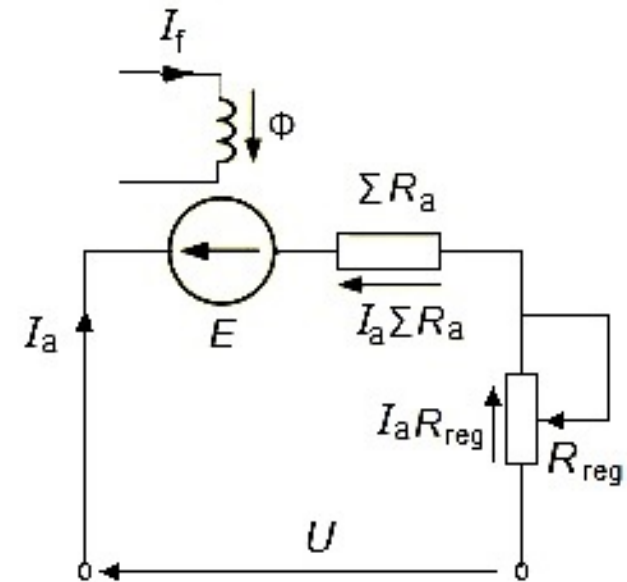
- prąd wzbudzenia,
- napięcie zasilania twornika,
- rezystancję obwodu twornika,
- strumień  $\Phi$ .

Włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wzbudzenia powoduje zmniejszenie strumienia i przy określonym prądzie powoduje wzrost prędkości obrotowej. Zwiększa się przy tym prędkość biegu jałowego oraz nachylenie charakterystyki mechanicznej.

Wymienione wyżej możliwości regulacji prędkości obrotowej różnią się od siebie pod względem:

- zakresu regulacji,
- kierunku regulacji (wzrost lub zmniejszenie prędkości obrotowej),
- ekonomicznym.

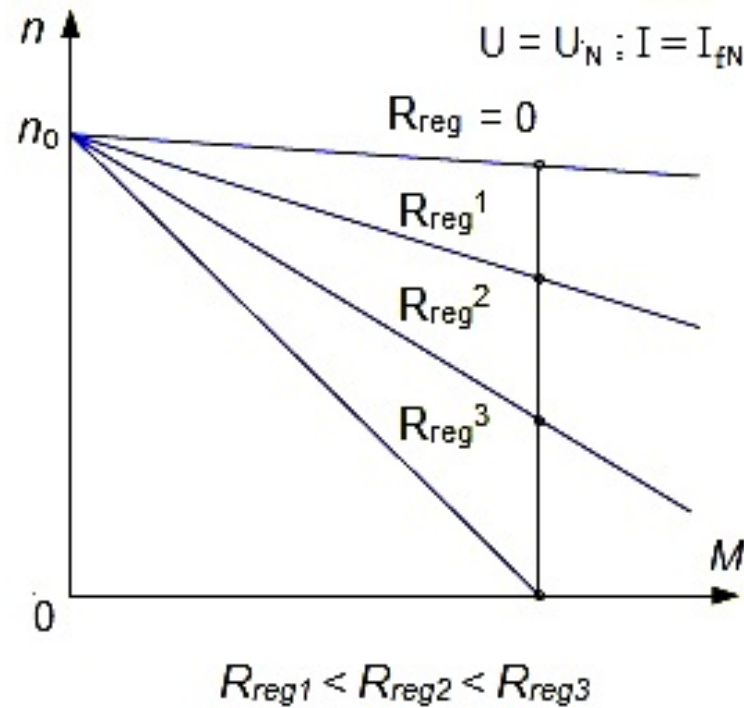
Dobór sposobu regulacji zależy od wymagań układu napędowego.



## Rodzaje regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego

Mamy następujące rodzaje regulacji prędkości obrotowej silników prądu stałego:

- 1) Regulacja szeregową** – polega na włączeniu rezystancji  $R_r$  w szereg z obwodem twornika, umożliwiając regulację w granicach od prędkości znamionowej do zera. Ten sposób regulacji jest nieekonomiczny, ponieważ przy zmniejszeniu prędkości obrotowej do połowy w oporniku regulacyjnym jest tracone dodatkowo 50% mocy pobieranej z sieci. Z tego względu ten sposób regulacji stosuje się tylko w silnikach małej mocy.
- 2) Regulacja bocznikowa** – polega na osłabieniu strumienia. Jak wynika z równania na prędkość obrotową silnika prądu stałego, włączenie dodatkowej rezystancji w obwód wzbudzenia powoduje zmniejszenie strumienia i przy określonym prądzie powoduje wzrost prędkości obrotowej. Ten sposób regulacji jest regulacją w górę od wartości  $n_N$  do ok.  $3n_N$ . Straty powstałe w rezystancji  $R_{reg}$  są pomijalnie małe;
- 3) Regulacja przez zmianę napięcia twornika** – można uzyskać zmieniając napięcie zasilające twornik, przy znamionowym obciążeniu. Regulację prędkości przeprowadza się od zera do wartości większej od prędkości znamionowej. Prąd twornika nie ulega zmianie i zależy tylko od obciążenia. Ten sposób regulacji prędkości obrotowej można uzyskać np. przez zastosowanie tyrystorowych regulatorów napięcia.



Charakterystyka regulacji prędkości obrotowej silnika bocznikowego przy włączaniu różnych dodatkowych rezystancji w obwód wzbudzenia

## Nastawianie prędkości obrotowej

Sposób regulacji prędkości obrotowej silnika prądu stałego dobiera się w zależności od wymagań układu napędowego. Z tego względu rozróżnia się trzy rodzaje nastawiania lub regulacji prędkości obrotowej:

- 1) gdy regulacja następuje od obrotów minimalnych  $n_{\min}$  do  $n_N$ , za pomocą napięcia lub rezystancji w obwodzie twornika przy stałym elektromagnetycznym momencie obrotowym,
- 2) gdy regulacja następuje od obrotów znamionowych  $n_N$  do  $n_I$  za pomocą zmniejszania strumienia magnetycznego przy stałej mocy znamionowej. Prędkość obrotowa  $n_I > n_N$ ,
- 3) gdy regulacja następuje od prędkości obrotowej  $n_I$  do  $n_{\max}$  za pomocą zmniejszania strumienia  $\Phi$  przy jednoczesnym zmniejszaniu prądu twornika. W celu osiągnięcia większej prędkości obrotowej od znamionowej przy napięciu  $U_N$  i rezystancji zewnętrznej w obwodzie twornika  $R_r = 0$  należy strumień magnetyczny zmniejszyć według wzoru:

$$\Phi = \Phi_N \frac{n_N}{n}$$

Zmniejszenie strumienia magnetycznego uzyskuje się:

- w silniku obcowzbudnym – przez obniżenie napięcia wzbudzenia.
- w silniku bocznikowym oraz bocznikowo-szeregowym – za pomocą nastawnika oporowego włączonego szeregowo z uzwojeniem wzbudzającym bocznikowym.
- w silnikach szeregowych – za pomocą nastawnika oporowego włączonego równoległe z uzwojeniem wzbudzającym.

Oznaczenia:

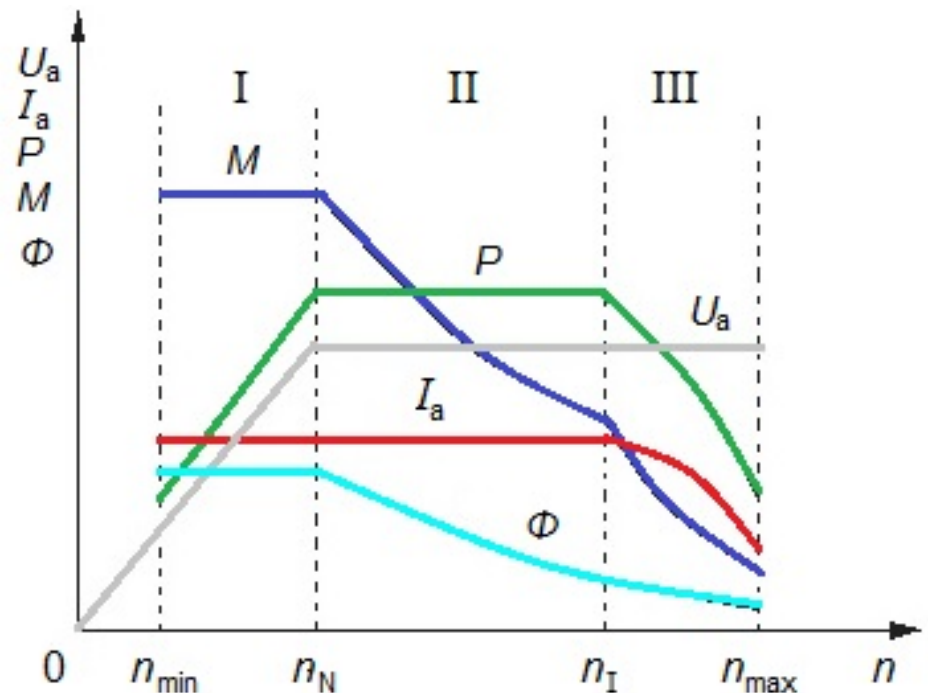
$M$  – moment obrotowy,

$P$  – moc,

$U_a$  – napięcie twornika,

$I_a$  – prąd twornika,

$\Phi$  – strumień magnetyczny główny



## Hamowanie elektryczne urządzenia napędzanego

Hamowanie elektryczne urządzenia napędzanego za pomocą maszyny prądu stałego występuje przy jej pracy prądnicowej. Wytwarzana wówczas energia może być:

- a) zwracana do sieci (hamowanie odzyskowe) lub
- b) wytracana w zamkniętym obwodzie twornika po jego odłączeniu od sieci (hamowanie dynamiczne).

Hamowanie dynamiczne stosuje się zarówno w silnikach obcowzbudnych, bocznikowych jak i szeregowych. Hamowanie elektryczne silnika może wystąpić również na skutek zmiany kierunku elektromagnetycznego momentu obrotowego (np. przez zmianę zwrotu prądu w uzwojeniu twornika).

Jest to tzw. hamowanie przy przeciwwłączeniu. Polega ono na nagłej zmianie biegunowości napięcia na zaciskach twornika i jednoczesnym włączeniu opornika w szereg z twornikiem. Ten rodzaj hamowania stosuje się do wszystkich rodzajów silników prądu stałego.

## Typowe uszkodzenia silników

Typowe uszkodzenia silników prądu stałego pojawiające się w wyniku eksploatacji:

a) mechaniczne:

- nadmierne iskrzenie wynikające ze złego stanu szczotek, zanieczyszczenia komutatora,
- nadmierne zużycie szczotek spowodowane zbyt dużym dociskiem, nierównomierną powierzchnią komutatora,
- luzy w łożyskach,

b) elektryczne:

- nadmierne iskrzenie wynikające z niewłaściwego ustawienia szczotek, zwarcie między zwojami uzwojenia twornika,
- nadmierne nagrzewanie się maszyny spowodowane zbyt dużym obciążeniem, nieodpowiednim chłodzeniem, zwarciami między zwojami w uzwojeniach twornika lub wzbudzenia, zwarciami między wycinkami komutatora,

c) izolacji:

- przebicia izolacji uzwojeń w zbudzenia, twornika lub innych uzwojeń wynikające z procesu starzenia izolacji,
- uszkodzenie komutatora w wyniku zwarcie wycinków spowodowanych przebiciem izolacji między wycinkami.

## Typowe uszkodzenia maszyn elektrycznych prądu stałego

### Iskrzenie szczotek

#### Przyczyny:

- zakleszczanie się szczotek w obsadach
- nieprawidłowo ustawione szczotki
- szczotki w złym stanie
- szczotkotrzymacze ustawione nieprawidłowo lub zbyt słabo umocowane
- nieodpowiedni gatunek szczotek
- zanieczyszczony komutator, brak izolacji między wycinkami komutatora
- zwarcia między chorągiewkami komutatora
- zwarcia międzyzwojowe w cewce lub cewkach twornika

#### Objawy, wykrywanie, postępowanie:

- sprawdzić, dopasować szczotki do obsad
- sprawdzić wymiary szczotek w stosunku do szczotkotrzymacza
- sprawdzić luzy szczotkotrzymacza
- sprawdzić kąt ustawienia szczotek do kierunku wirowania
- sprawdzić stan szczotek
- gatunek szczotek porównać z zalecanym przez wytwórcę
- prądnicą źle się wzbudza, silnik trudno rusza lub pracuje z nienormalną prędkością

## Iskrzenie szczotek

## Przyczyny:

- niedostateczny styk lub brak połączeń wyrównawczych
- przerwa w połączeniu uzwojenia z wycinkiem
- nierównomierna szczelina powietrzna
- zwarcie w obwodzie zewnętrznym
  
- szczotki ustawione poza strefą neutralną
- wystająca izolacja międzywycinkowa

## Objawy, wykrywanie, postępowanie:

- sprawdzić gładkość komutatora, lutowania cewek do wycinków – powstałe uszkodzenia naprawić, oczyścić izolację międzywycinkową
- zaczernieniu ulegają niektóre wycinki komutatora. Obtoczyć komutator, sprawdzić łączenia i przerwy, sprawdzić luzy łożyskowe, sprawdzić szczelinę
- iskrzenie przy wirowaniu w jedną stronę jest intensywniejsze niż przy obracaniu się silnika w stronę przeciwną, prędkość wirowania silnika w obu kierunkach jest niejednakowa

## Nadmierny przyrost temperatury całej maszyny

### Przyczyny:

- nadmierne obciążenie
- silnik przystosowany do pracy krótkotrwałej lub dorywczej pracuje za długo
- kierunek prędkości obrotowej niezgodny z kierunkiem konstrukcyjnie zaprojektowanym
- zanieczyszczone kanały wentylacyjne
- zanieczyszczone filtry

### Objawy, wykrywanie, postępowanie:

- sprawdzić wskazania przyrządów pomiarowych
- zmienić warunki pracy

## Nadmierny przyrost temperatury twornika (wirnika)

### Przyczyny:

- nadmierne obciążenie
- pogorszenie się warunków przewietrzania
- nierównomierna szczelina powietrzna
- nieprawidłowa kolejność biegunów
- zwarcia w cewkach biegunów głównych
- zwarcia międzyzwojowe lub zwarcia w cewkach uzwojenia twornika
- zwarcia międzywycinkowe

### Objawy, wykrywanie, postępowanie:

- szczotki jednego bieguna iskrzą silniej niż szczotki innych biegunów
- nagrzewanie występuje przy braku obciążenia
- złe połączenie jednej lub kilku cewek powoduje niesymetrię magnetyczną
- występuje intensywniejsze iskrzenie szczotek jednego bieguna
- występują zwarcia między chorągiewkami komutatora

## Odbieganie prędkości obrotowej od prędkości znamionowej

### Przyczyny:












- przepalenie się bezpieczników
- przerwa w oporniku rozruchowym lub w przewodach
- przerwa w uzwojeniu twornika
- zwarcia w cewkach biegunów głównych
- zwarcie uzwojenia bocznikowego z kadłubem lub z innymi uzwojeniami
- błędne łączenie uzwojenia bocznikowego z zasilaniem
- szczotki ustawione poza strefą neutralną

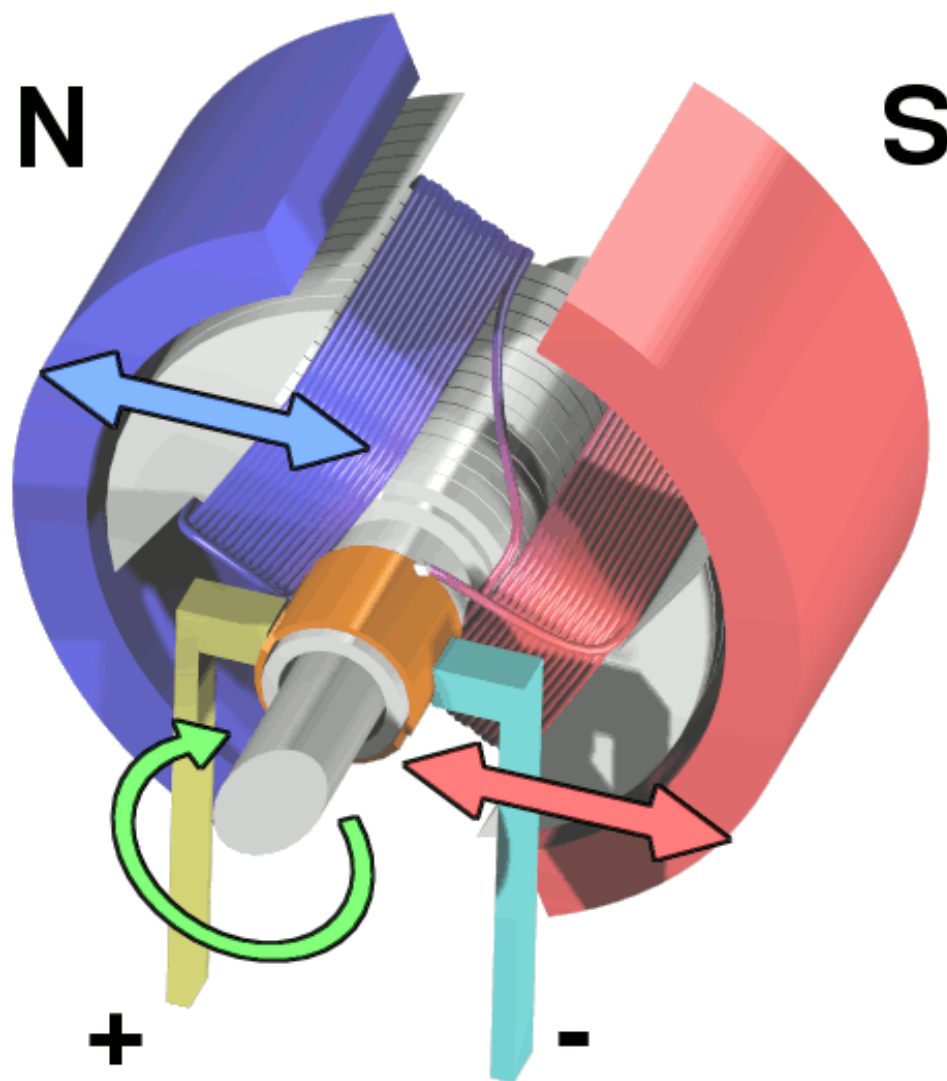
### Objawy, wykrywanie, postępowanie:

- silnik nie rusza, przyrządy nie wskazują przepływu prądu
- sprawdzić rezystancje międzyuzwojeniowe i izolację
- silnik może się rozbiegać



### Symbole i oznaczenia uzwojeń maszyn prądu stałego

rodzaj uzwojenia	obowiązujące	dawne
uzwojenie twornika (wirnika)	A1  A2	A  B
uzwojenie biegunów komutacyjnych	B1  B2	G  H
uzwojenie kompensacyjne	C1  C2	brak
uzwojenie wzbudz. szeregowo	D1  D2	E  F
uzwojenie wzbudz. bocznikowe	E1  E2	C  D
uzwojenie wzbudz. obcowzbudne	F1  F2	I  K



# Dziękuję za uwagę



mgr inż. Robert Czak

*tel: 0048 603687444*

*mail: robert.czak@op.pl*