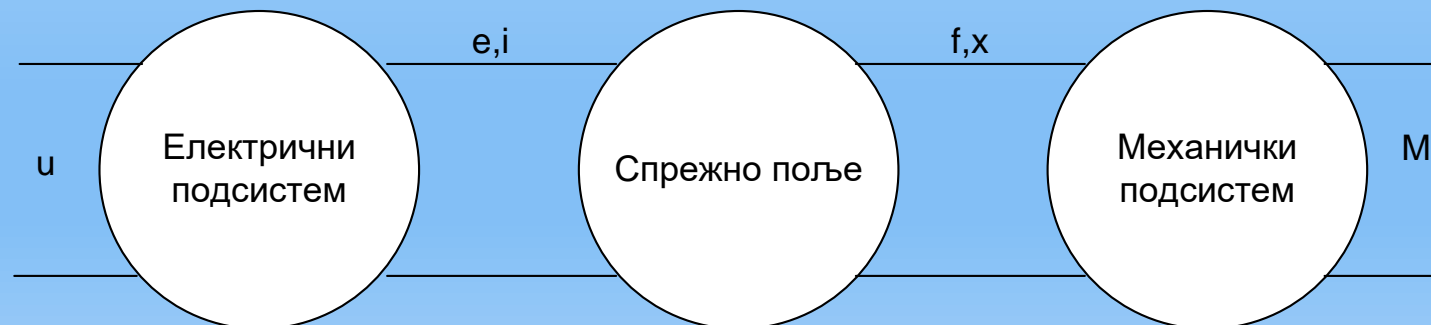
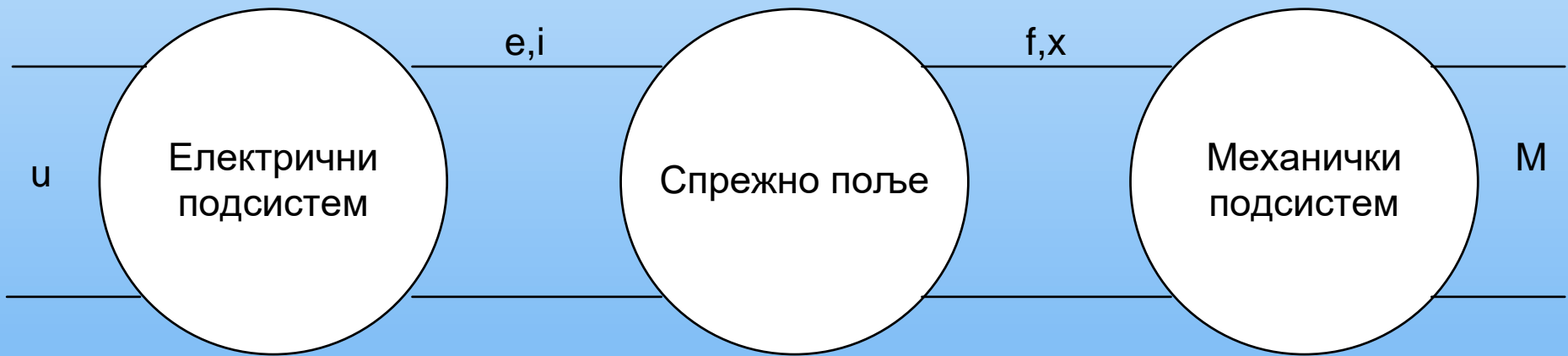


# OSNOVNI PRINCIPI I JEDNAČINE KRETANJA KOD EMP-a II/2 DEO



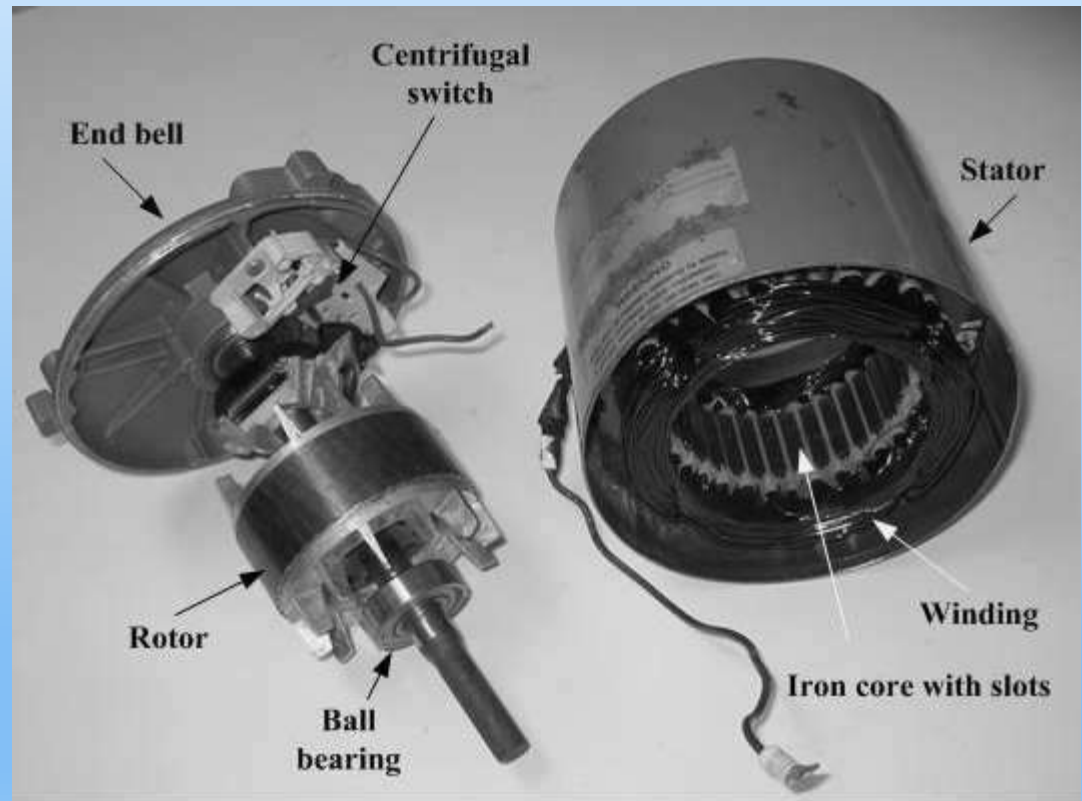
**Električni i mehanički podsistemi posebno sadrže svoje elemente u kojima se gubi energija, dok se u sprežnom polju gomila energije a proces pretvaranja odvija se bez gubitaka.**



## Konstrukcija mašina

Rotacione električne mašine imaju dva osnovna dela: stator i rotor.

Najvažnije komponente i statora i rotora su magnetno kolo i namotaji.



# GUBICI SNAGE KOD MJS

- Mehanički gubici:
  - gubici na trenje u ležištima,  $P_t$
  - gubici na trenje dirki na komutatoru,  $P_c$
  - ventilacioni gubici (usled trenja rotora pri obrtanju o vazduh),  $P_v$
- Gubici u gvozdju:  $P_{Fe} = P_H + P_F$
- Gubici u bakru:  $P_{Cu} = P_{Cu_a} + P_p + P_d$
- Stepen iskorišćenja

## DC mašine – mašine jednosmerne struje

Mašina jednosmerne struje (DC mašina) može da se koristi kao motor ili kao generator. Ako je povezan naponski izvor, električna energija se transformiše u mehaničku i mašina se ponaša kao motor. Ako se mehanička sila primeni na osovinu (rotira je), mehanička energija se transformiše u električnu i mašina se ponaša kao generator.

DC mašina se najčešće koristi kao motor, jer se DC generator danas najčešće realizuje korišćenjem naizmjeničnog generatora i ispravljača.

Glavne prednosti DC mašina su lako upravljanje brzinom i momentom.

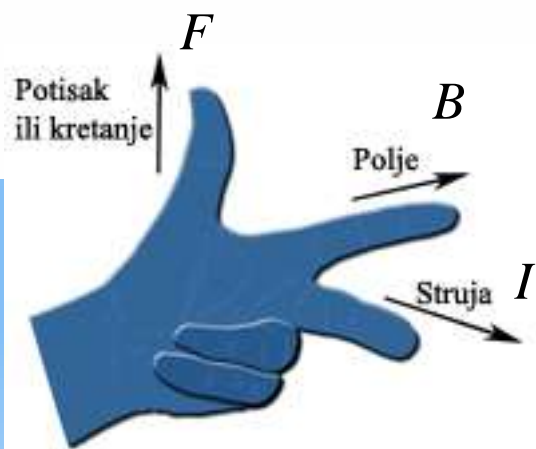
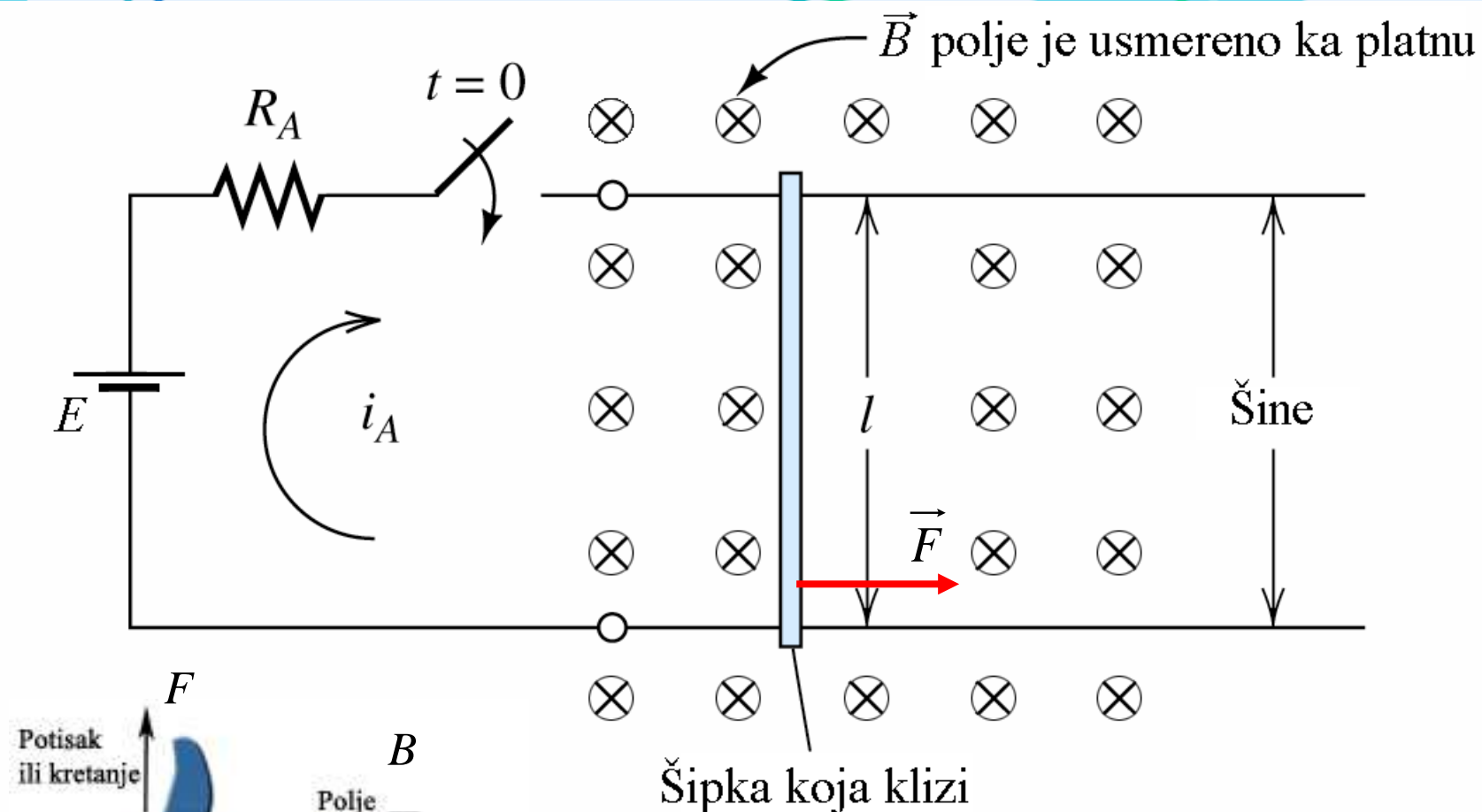
Danas, njihova primena je ograničena na pokretne trake, rudnike i vozove. Na primer, DC motori se mogu upotrebljavati u trolejbusima i podzemnoj železnici (metrou).

Ostvareni napredak u energetskej elektronici omogućava bolju kontrolu brzine motora naizmjenične struje, pa DC motori postaju suvišni.

Elektronski kontrolisani motori naizmjenične struje postepeno zamenjuju DC motore u fabrikama.

Na primer, u prošlosti (do 60tih godina), u automobile je ugrađivan DC dinamo za punjenje akumulatora, ali danas alternatori i ispravljači vrše tu funkciju.

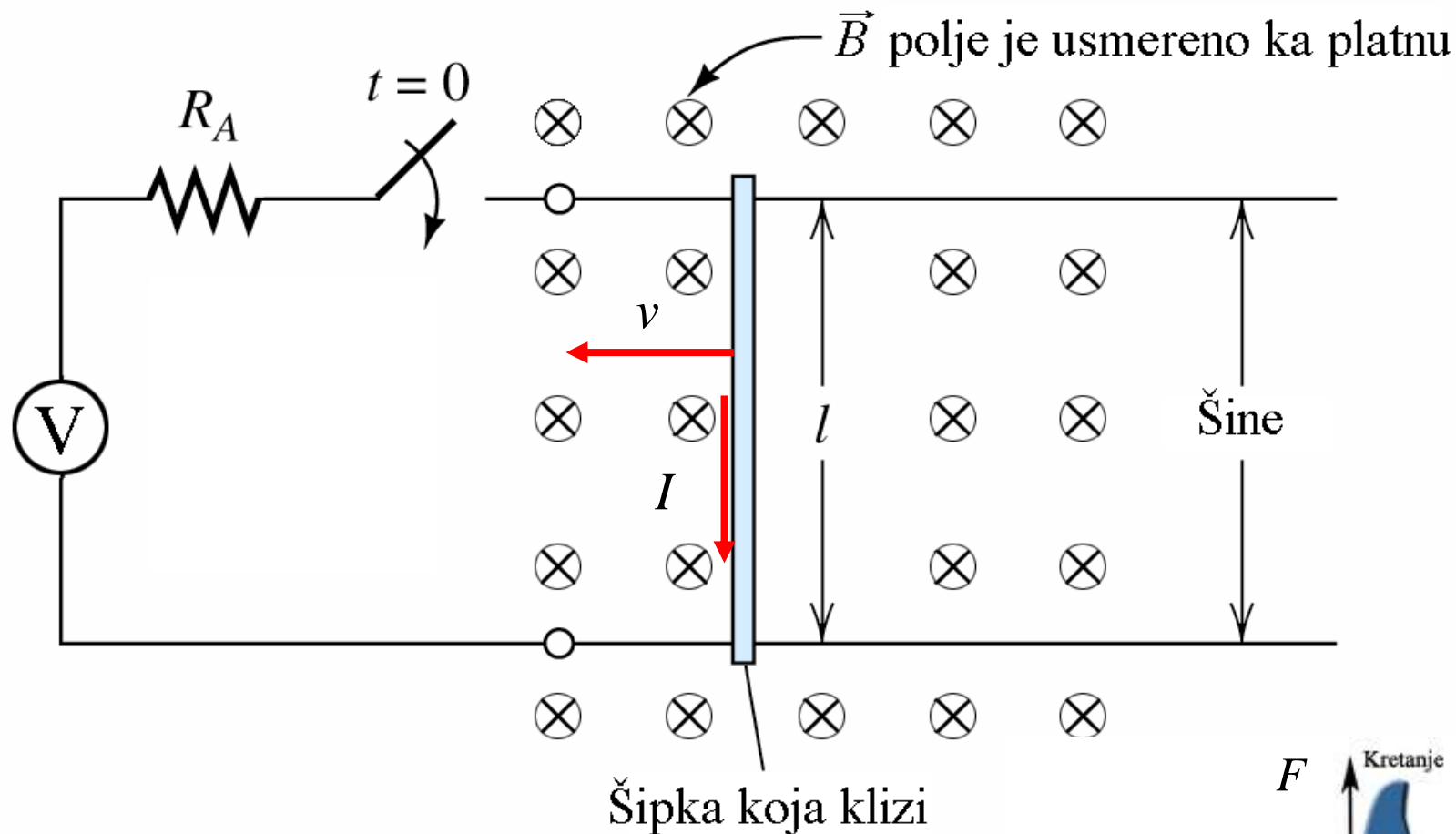
# Princip funkcionisanja - motor



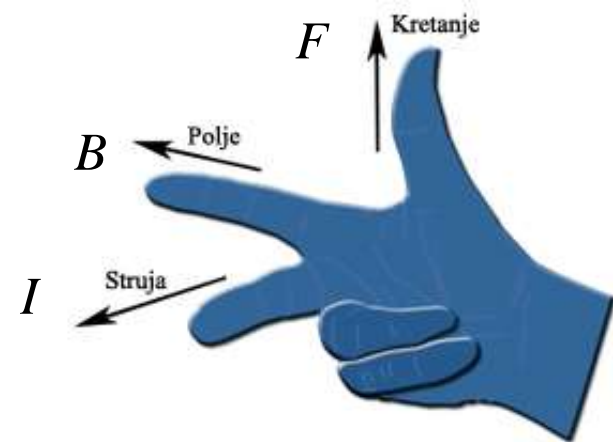
Pravilo leve ruke navodi da će sila pokretati šipku sa leve na desnu stranu.

$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

# Princip funkcionisanja - generator



Ako se šipka pomera sa desne na levu stranu, unutar magnetnog polja, generiše se struja i možemo izmeriti elektromotornu silu volmetrom  $V, e_{ind} = B \cdot l \cdot v$ , gde je  $v$  brzina pomeranja šipke.



## DC mašina - smer

Flemingova pravila desne i leve ruke se koriste za utvrđivanje smera kretanja.

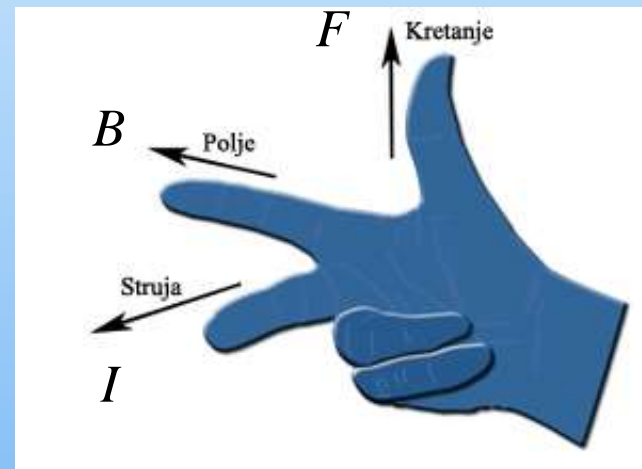
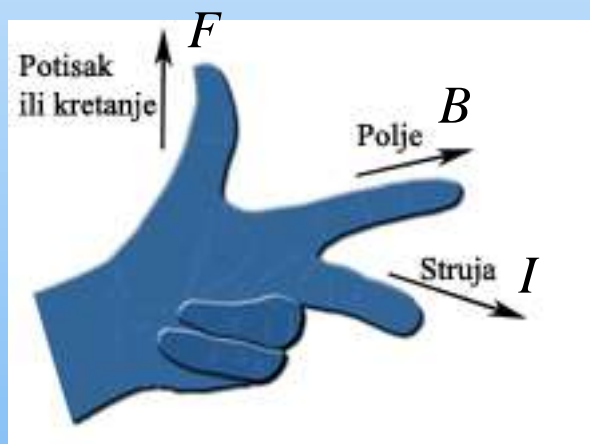
Pravilo leve ruke koristi se za električne motore.

Pravilo desne ruke se koristi za električne generatore.

Palac predstavlja silu,  $F$ .

Kažiprst predstavlja gustinu magnetnog fluksa,  $B$ .

Srednji prst predstavlja električnu struju,  $I$ .



- Odvojena pravila se primenjuju za motore i za generatore, zbog različitih uzroka i posledica.
- Kod motora, struja i magnetno polje koji postoje (uzrok), dovode do sile koja proizvodi kretanje (posledica). Kod generatora, kretanje i magnetno polje postoje (uzrok), što dovodi do generisanja struje (posledica).



# DC mašine – osnovni principi

Najjednostavnija DC mašina sastoji se od jedne konture žice koja rotira unutar magnetnog polja oko fiksne ose.

Magnetno polje stvaraju severni i južni polovi magneta.

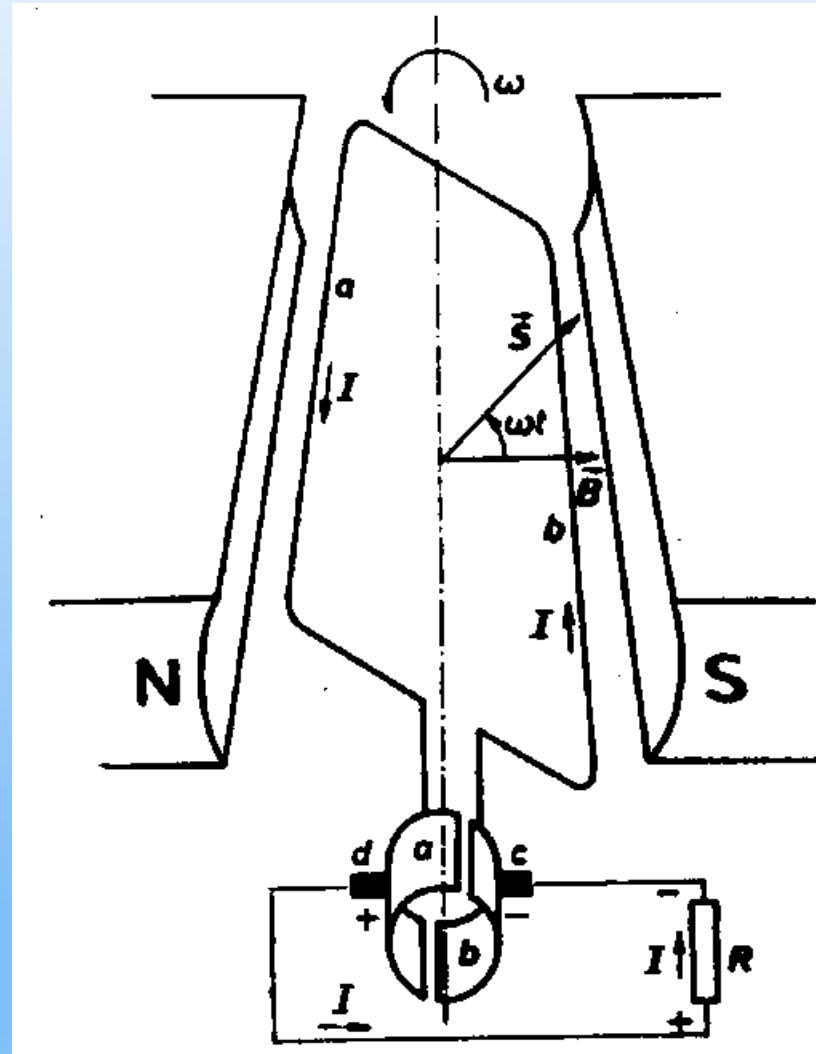
Najčešće, magnet nije stalan, već elektromagnet, čije magnetno polje nastaje usled proticanja električne struje (kroz zavojnicu obmotanu oko čeličnog jezgra).

Rotor je rotirajući deo;

Stator je stacionarni deo.

Dve četkice (c,d) pritiskaju komutator (a,b) radi omogućavanja proticanja struje kroz kolo.

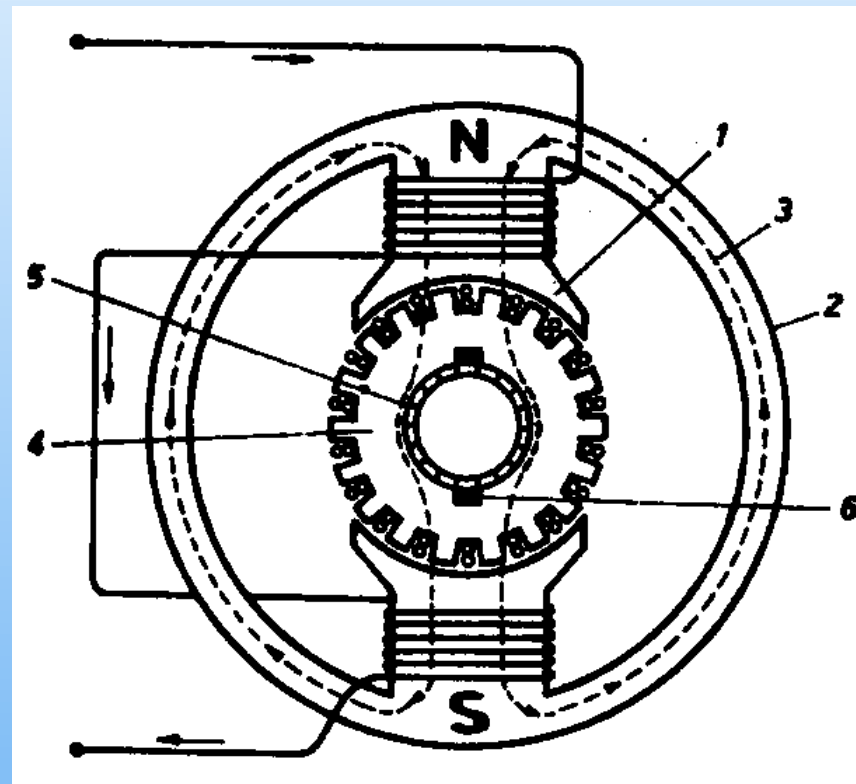
Ako se kontura rotira ugaonom brzinom  $\omega$ , ova mašina će se ponašati kao generator.



# DC mašine

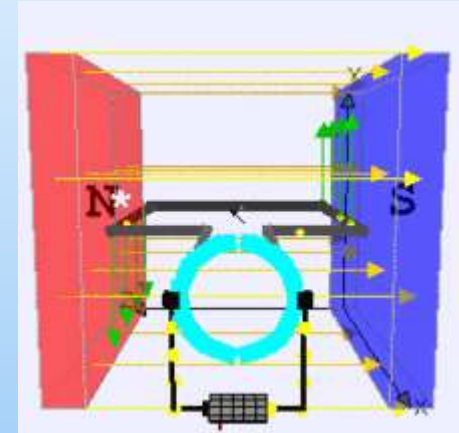
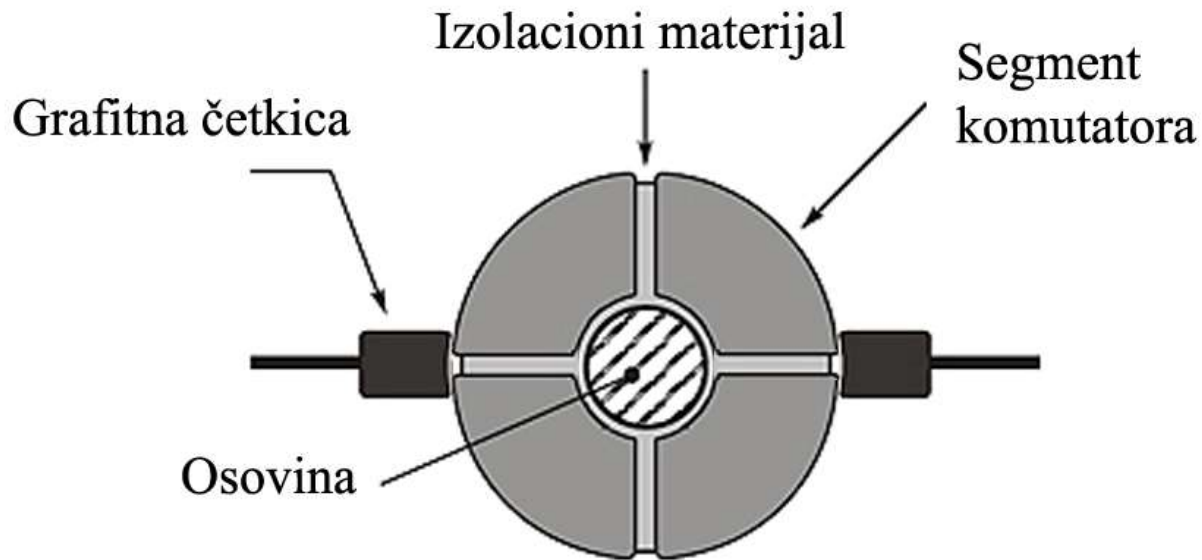
1. Pol
2. Jezgro
3. Linije magnetnog polja
4. Armatura
5. Komutator
6. Četkice

- Magnetno polje generiše zavojnica obmotana oko polova.
- Jezgro je čelično.
- Stator čine jezgro, polovi i namotaji.
- Armatura je napravljena od laminiranog gvožđa.
- Armatura, žice i osovina čine rotor.



Tri osnovna dela DC mašine su stator, rotor i komutator.

# Komutator



Komutator sadrži izolovane bakarne segmente postavljene na izolovanu cev. Navoji armature povezani su na segmente komutatora, jedna žica na par segmenata.

Četkice su najčešće grafitne.

Dve četkice pritiskaju komutator kako bi omogućile proticanje struje.

Četkice se postavljaju u neutralnoj zoni, gde je magnetno polje blisko nuli, da bi se smanjilo varničenje.

## Praktični problemi pri komutaciji

Komutator menja proticanje struje iz jednog smera kroz zavojnicu u suprotan smer.

Komutacija zahteva prekid struje zavojnice.

Zavojnica je induktivno opterećenje, pa je napon na zavojnici proporcionalan prvom izvodu struje kroz zavojnicu (pomnoženo sa induktivnošću).

Nagle promene struje zavojnice stvaraju visoke napone.

Visok napon uzrokuje pražnjenje i varničenje između segmenata komutatora i četkica.

Kako većine mašina funkcionišu na gustinama fluksa bliskim zasićenju, na mestima površine polova gde se magnetomotorna sila (mms) rotora sabira sa mms polova dolazi do malog povećanja fluksa (zbog zasićenja), dok na mestima površine polova gde se mms rotora oduzima od mms polova dolazi do velikog smanjenja fluksa.

Uopšteno, ukupan prosečni fluks ispod polova slabi.

Slabljenje fluksa dovodi do smanjenja napona generatora.

Kod motora, slabljenje fluksa dovodi do povećanja brzine motora. Povećanje brzine može da poveća opterećenje, što zauzvrat dovodi do dodatnog smanjenja fluksa...

## Rešenja problema komutacije

Da bi se smanjio problem varničenja, četkice se postavljaju u neutralnu zonu, gde je magnetno polje blisko nuli.

Još jedan način za smanjenje varničenja je smanjenje induktivnosti zavojnica.

Nažalost, smanjenje induktivnosti zavojnica znači i smanjenje izlaznog napona, zbog čega se mora povećati broj namotaja.

Povećanje broja namotaja otežava dizajn, jer iziskuje povećani broj segmenata komutatora.

Najčešće rešenje za izbegavanje varnica na četkicama je uvođenje malih polova (komutacionih polova) između glavnih polova, kako bi napon na komutacionim žicama bio jednak nuli, jer oni proizvode fluks koji može da poništi napon na zavojnici.

Komutacioni polovi ne menjaju princip rada mašine, jer su toliko mali da utiču na neznatni broj provodnika koji se komutira.

Upotreba komutacionih polova je veoma česta jer reguliše problem varničenja u DC mašinama.

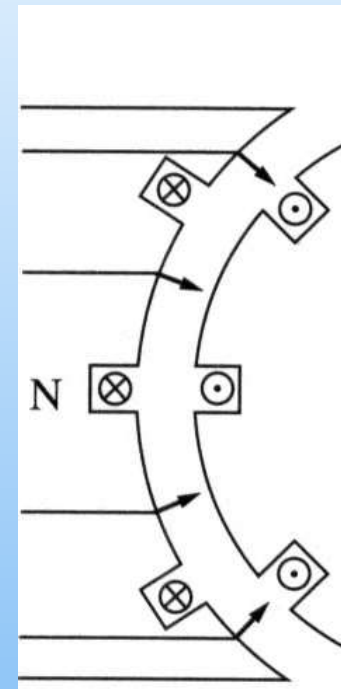
Problem slabljenja fluksa može se rešiti postavljanjem kompenzacionih navoja u proreze na stranama polova paralelno provodnicima rotora.

Kompenzacioni navoji se redno povezuju sa navojima rotora, pa kada dođe do promene opterećenja rotora, struja kroz kompenzacione navoje se takođe menja.

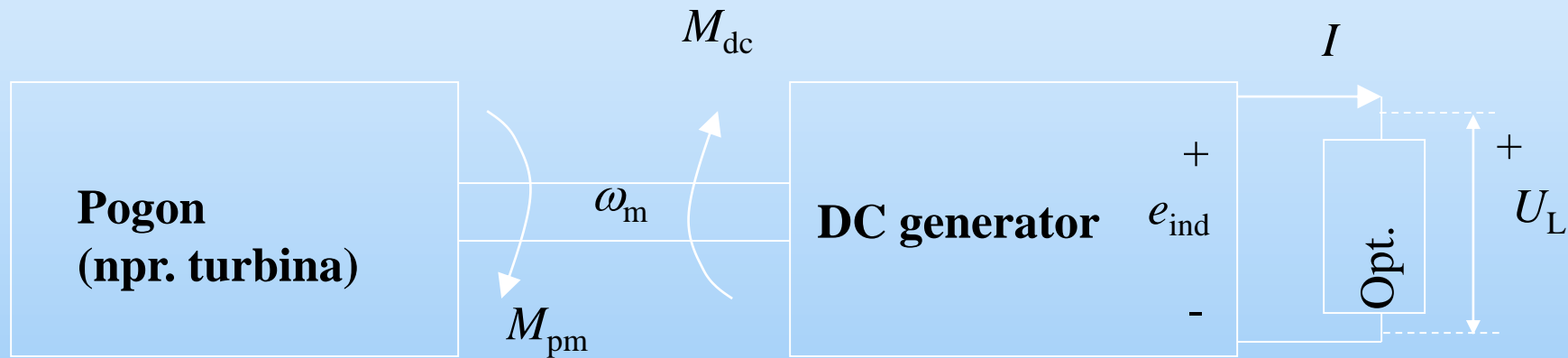
Pošto se mms usled kompenzacionih navoja projektuje da bude jednaka i suprotnog smera mms rotora, ove dve mms se poništavaju, što dovodi do toga da se fluks unutar mašine ne menja.

Glavni nedostatak kompenzacionih navoja je njihova cena.

“Slabljenje fluksa” se naziva i “reakcijom armature” u literaturi.

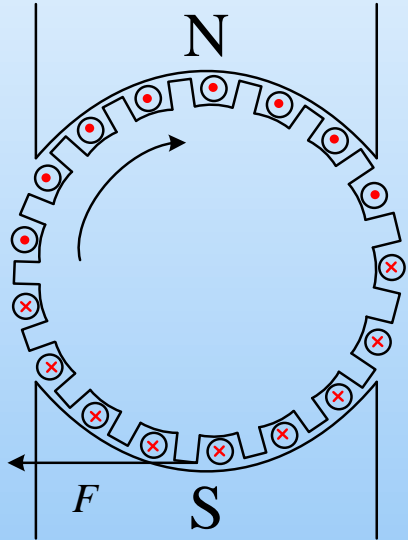


# Interakcija između pogona, DC generatora i opterećenja



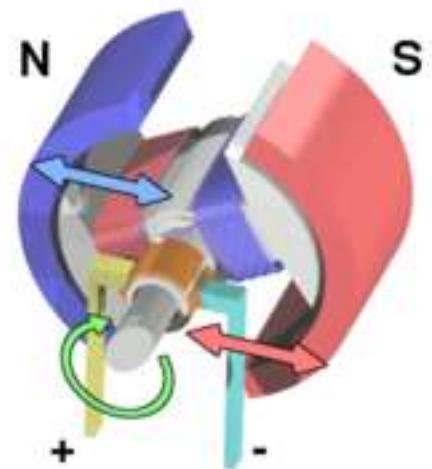
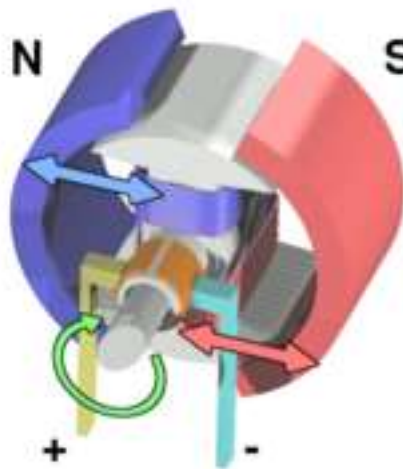
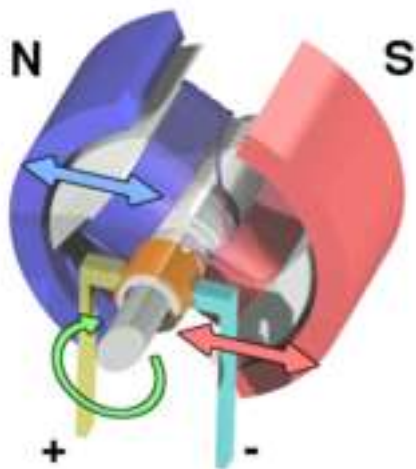
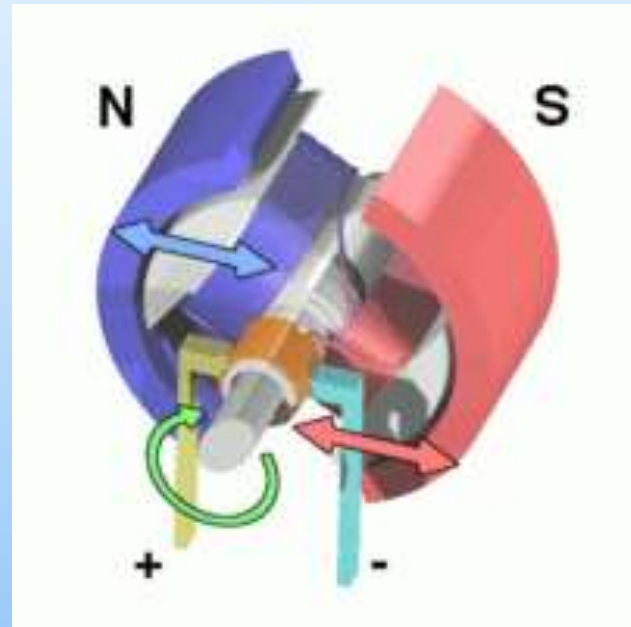
- $e_{ind}$  je generisana elektromotorna sila
- $U_L$  je napon na opterećenju koji je jednak  $e_{ind}$
- $M_{pm}$  je momenat koji generiše pogon
- $M_{dc}$  je suprotstavljeni momenat generatora
- $\omega_m$  je ugaona brzina osovine

# DC motori – osnovni principi funkcionisanja



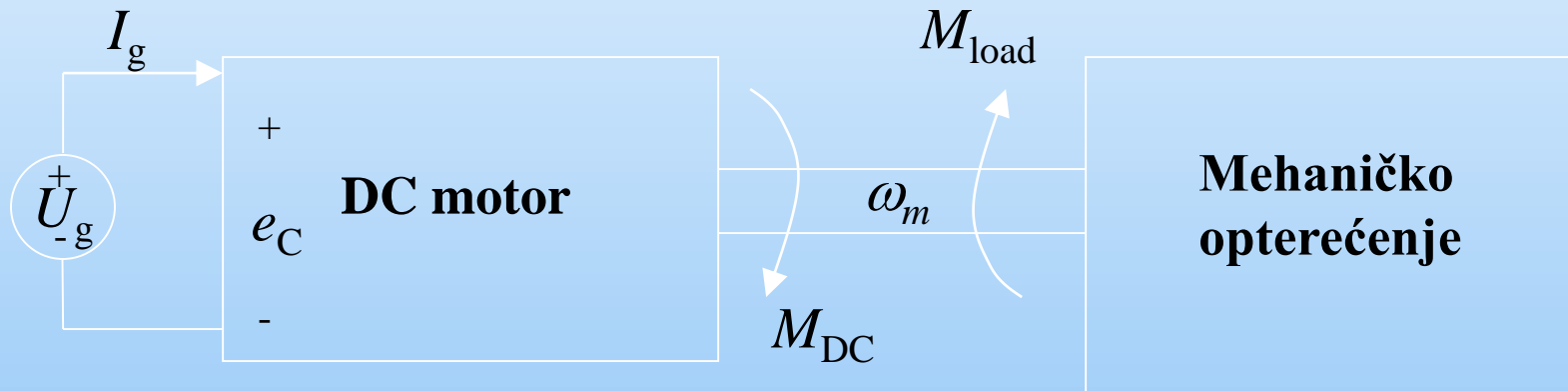
$$\vec{F} = I \cdot \vec{l} \times \vec{B}$$

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \angle(\vec{l}, \vec{B})$$



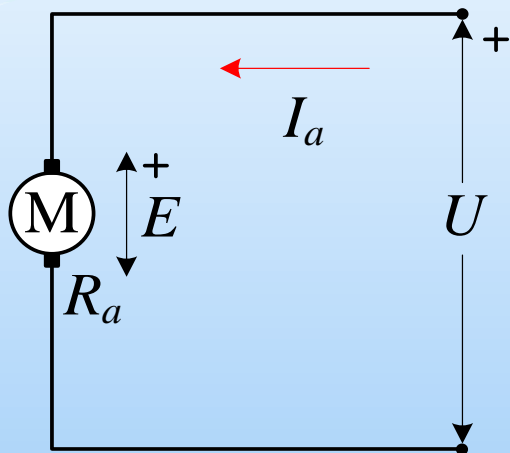


# Interakcija između DC motora i mehaničkog opterećenja



- $U_g$  je napon koji se dovodi
- $e_C$  je suprostavljena ems
- $M_{DC}$  je momenat koji razvija DC motor
- $M_{load}$  je suprostavljeni momenat opterećenja
- $\omega_m$  je ugaona brzina osovine

# DC motor – suprostavljena elektromotorna sila



$$E = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi = k_e \cdot n \cdot \Phi$$

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

- $E$  je suprostavljena ems
- $\Phi$  je fluks u motoru
- $I_a$  je struja armature
- $R_a$  je otpornost armature

- $p$  – broj parova polova
- $a$  – broj pari segmenata u armaturi (komutacionih parova)
- $N$  – broj zavojnica po segmentu
- $n$  – broj obrtaja po minuti
- $k_e$  – konstanta mašine koja zavisi od geometrije mašine
- Kada motor radi  $E \approx U$
- Pri pokretanju motora  $E \approx 0 \rightarrow I_a$  može da dostigne veoma velike vrednosti

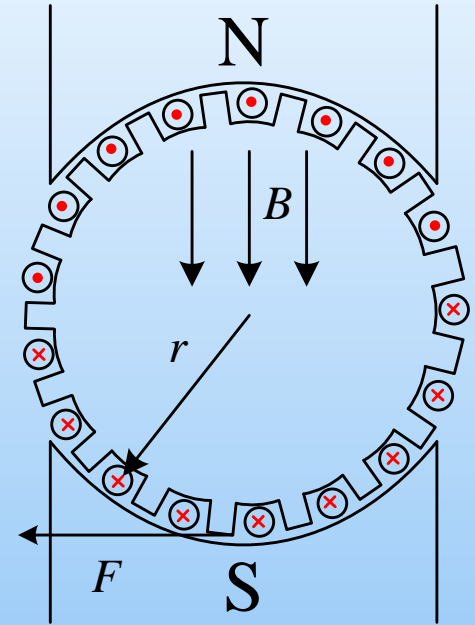
# Momenat kod DC motora

- Svaka zavojnica u armaturi je pod uticajem iste sile jer:

$$\angle(\vec{l}, \vec{B}) = \frac{\pi}{2} \Rightarrow \sin \angle(\vec{l}, \vec{B}) = 1$$

$$F = l \cdot I \cdot B$$

$$M_m = N \cdot F \cdot r = N \cdot l \cdot I \cdot B \cdot r$$



- Momenat je proporcionalan broju zavojnica u armaturi  $N$ , dužini žica  $l$ , struji armature  $I$ , magnetnoj indukciji  $B$  i prečniku armature  $r$ .
- $B$  najčešće nije fiksno, jer se stalni magneti retko kada koriste kao pobuda. Obično, momenat izražavamo kao funkciju fluksa  $\Phi$  odnosno:

$$\Phi = B \cdot S$$

gde  $S$  predstavlja površinu omotača armature ispod jednog pola.

$$S = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l}{2 \cdot p}$$

- gde  $p$  predstavlja broj pari polova. Ako je  $a$  broj komutacionih parova, ukupna struja armature može se predstaviti kao:

$$I_a = 2 \cdot a \cdot I$$

- zamenom  $B$  i  $I$  u jednačini, momenat se može izračunati kao:

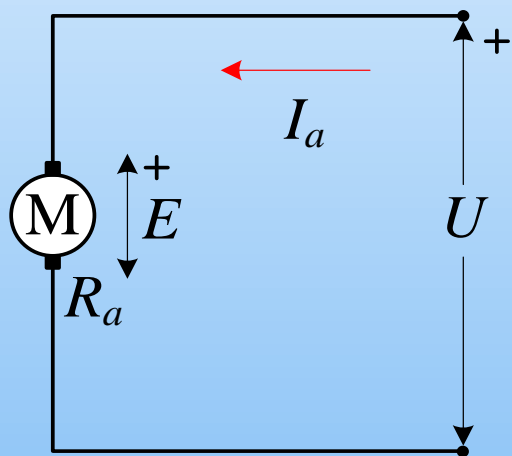
$$M_m = N \cdot l \cdot r \cdot \frac{\Phi}{2 \cdot \pi \cdot r \cdot l} \cdot \frac{I_a}{2 \cdot a}$$
$$2 \cdot p$$

$$M_m = \frac{p}{a} \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Phi \cdot I_a$$

$$M_m = k_m \cdot \Phi \cdot I_a$$

- $k_m$  – konstanta motora

# Brzina okretanja DC motora



- Ako se u KZN za DC motor suprostavljena ems izrazi svojom jednačinom:

$$E = U - R_a \cdot I_a = \frac{p}{a} \cdot N \cdot \frac{n}{60} \cdot \Phi$$

- brzina okretanja se može izračunati kao:

$$n = \frac{U - R_a \cdot I_a}{\frac{p}{a} \cdot \frac{N}{60} \cdot \Phi}$$

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

## DC motori – osnovni tipovi

Postoji četiri osnovna tipa DC motora, u zavisnosti od tipa pobude:

posebna pobuda

paralelna (otočna) pobuda

redna pobuda

složena pobuda

Različiti tipovi pobude proizvode različite momenat-brzina karakteristike DC motora

U zavisnosti od momenat-brzina karakteristike bираmo odgovarajući tip motora.

Momenat-brzina karakteristika može da bude određena (npr. pumpe) ili veoma promenljiva (npr. dizalice, vozila).

Dok su u prošlosti momenat-brzina karakteristike sa visokim stepenom efikasnosti bile prednost DC motora nad AC motorima, trenutno, napredak u energetskej elektronici uklanja tu prednost

## STATIČKI MODEL EMP SA MJS

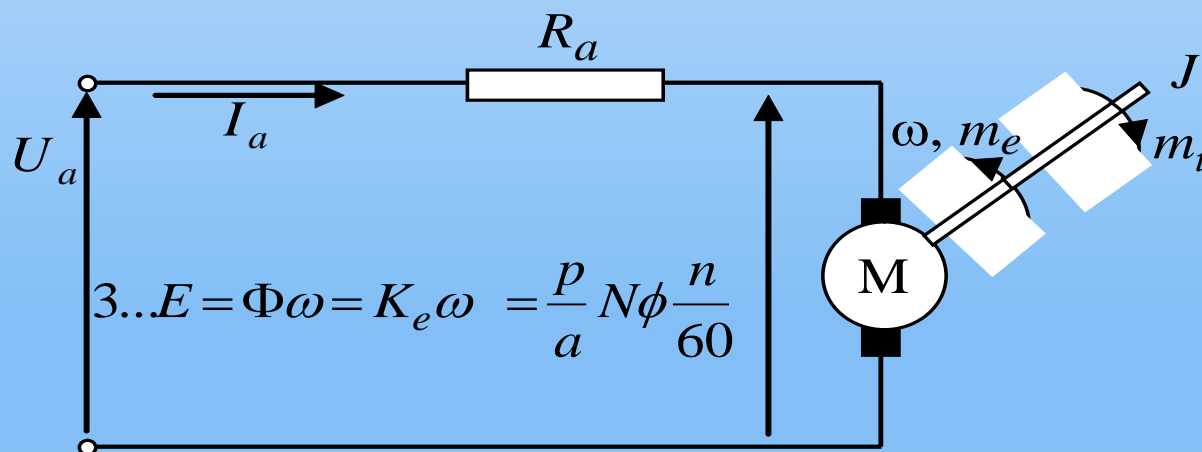
- Statički model važi kad su i napajanje i opterećenje konstantni dovoljno dugo, tako da su svi elektromagnetni i elektromehanički prelazni procesi završeni.
- EMP sa MJS se predstavlja sledećim jednačinama:

$$1...U_a = R_a I_a + \Phi \omega$$

$$4...M_m - M_t = J \frac{d\omega}{dt} = 0$$

$$2...U_p = R_p i_p$$

$$5...M_m = K_m I_a = \Phi i_a$$



Gubici u magnetnom kolu i mehanički gubici nisu obuhvaćeni ovim matematičkim modelom, niti ekvivalentnom šemom.

# DINAMIČKI MODEL EMP SA MJS

## Jednačine ravnoteže napona:

$$1 \dots u_a = R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + \omega L_{ap} i_p$$

$$2 \dots u_p = R_p i_p + L_p \frac{di_p}{dt}$$

$$3 \dots e = \Phi \omega = k_e \omega, \Phi = L_{ap} i_p$$

$$E = \frac{p}{a} N \phi \frac{n}{60}$$

$$K_m = \Phi = L_{ap} i_p - \text{kons.mot. (fluks)}$$

$$4 \dots m_m - m_t = J \frac{d\omega}{dt}$$

$$5 \dots m_m = \Phi i_a = k_m i_a \quad M_m = K_m I_a = \frac{p}{2\pi a} N \Phi I_a$$

Gde indeks  $a$  označava armaturu (namotaj rotora) dok indeks  $p$  označava pobudni namotaj (statora).