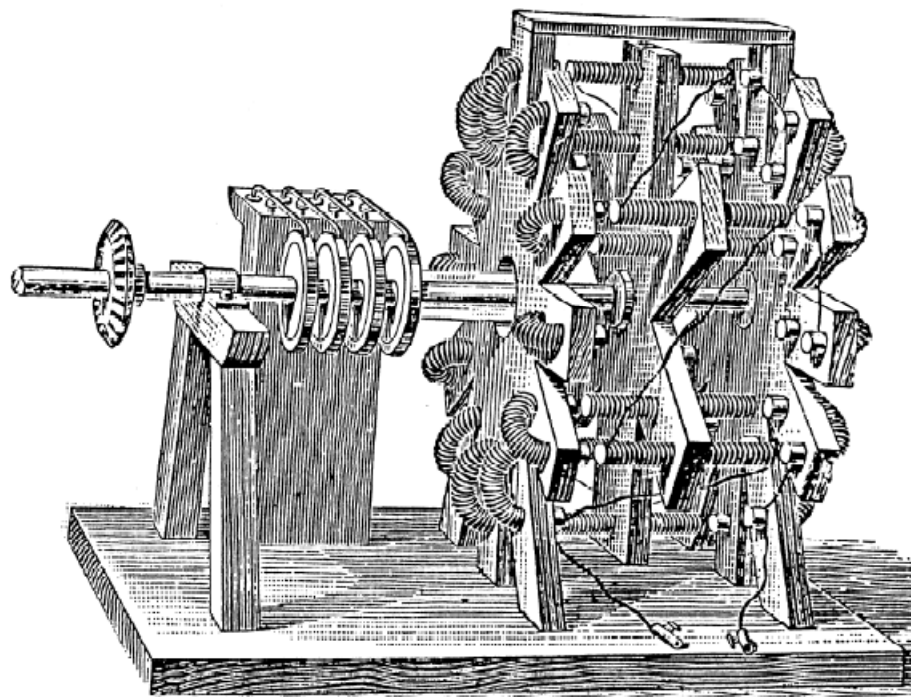


PRIMENJENA AUTOMATIZACIJA U INDUSTRIJI

JEDNOSMERNI POGONI

ISTORIJAT 1

- Prvi realizovani električni pogoni.
- Prvi DC motor konstruisao je Jacobi 1838. godine u Petrogradu, a motor je pokretao čamac s 14 osoba po reci Nevi.
- Namotaji statora i rotora bili su učvršćeni na drvenoj konstrukciji.



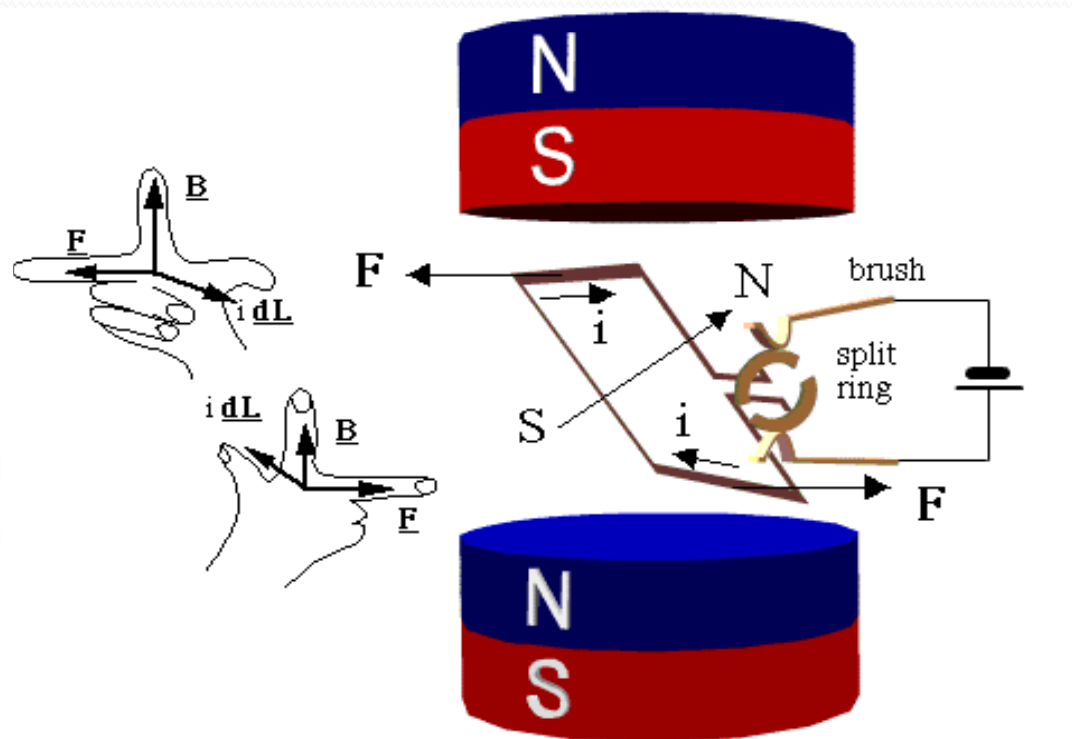
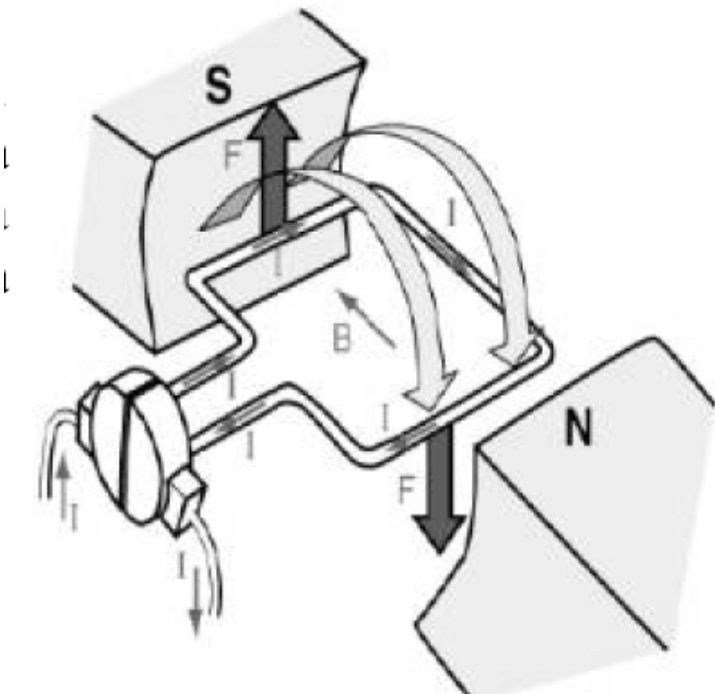
ISTORIJAT 2

- DC motor razvijen početkom XX veka imao je sve bitne delove kao i danas.
- U drugoj polovini XX veka DC motor je **BIO** dominantan u pogonima koji su zahtevali regulaciju brzine obrtanja, pri čemu je poseban značaj imao razvoj upravljivih poluprovodničkih pretvarača.
- Zašto je **BIO**: Loše osobine
 - Veća cena
 - Složenije i skuplje održavanje
 - Manja pouzdanost i kraći vek trajanja



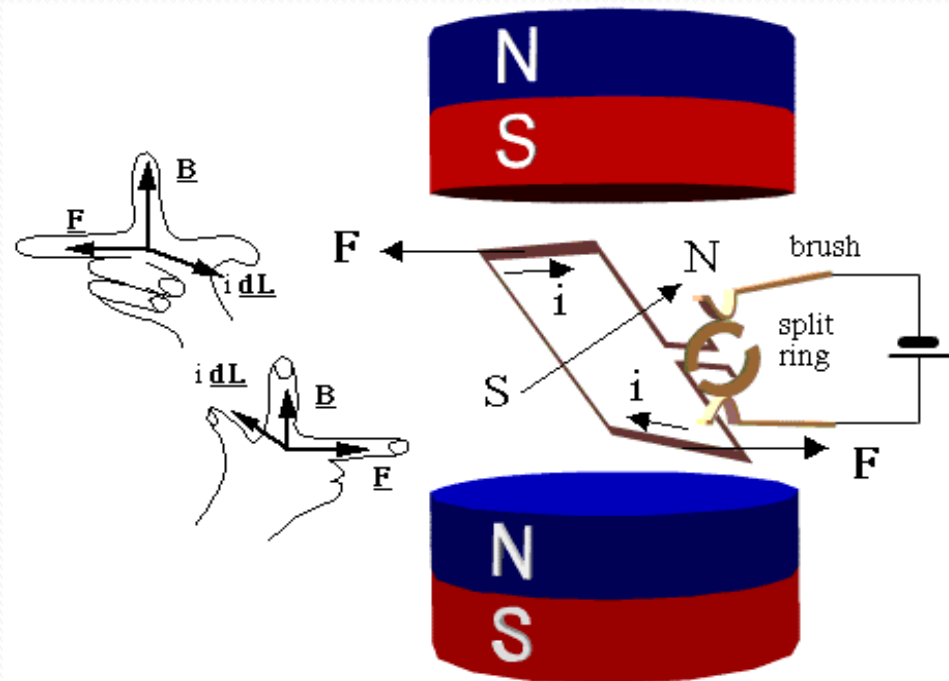
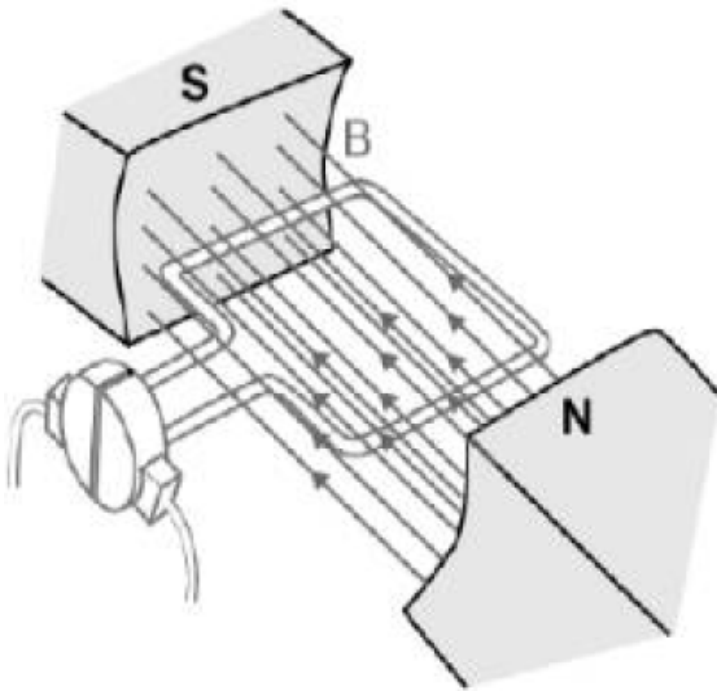
KONCEPT RADA DC MOTORA 1

- Jedan namotaj provodnika dužine **L** u stalnom magnetnom polju jačine **B**.
- Dovođenjem DC napajanja **I** u namotaj preko dve grafitne četkice koje ostvaruju pokretni kontakt s komutatorom.
- Nastaje sila: **$F = B \cdot L \cdot I$** – Lorensova sila, tj. obrtni moment



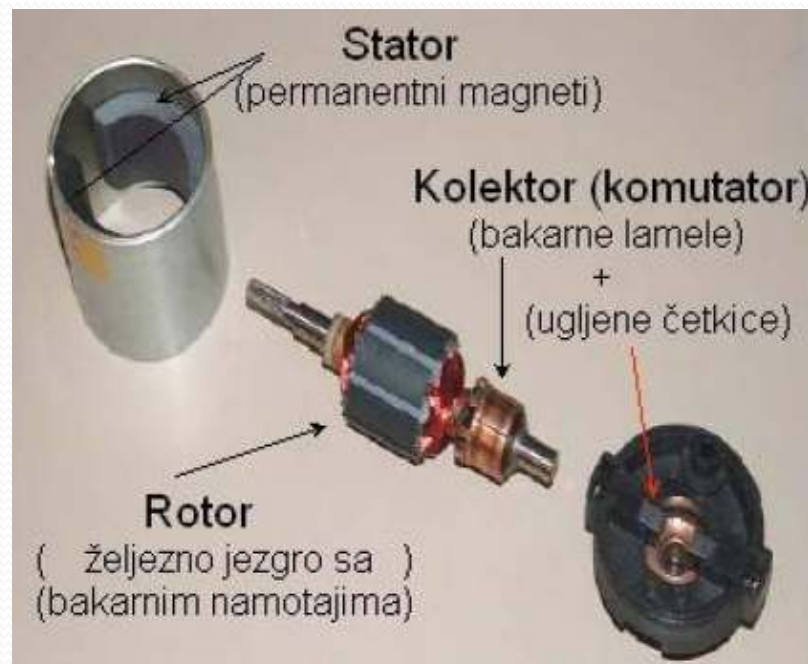
KONCEPT RADA DC MOTORA 2

- Kolektor menja smer struje svakih pola obrtaja kako bi se zadržao isti smer okretanja namotaja usled delovanja momenta.
- Kolektor služi za ispravljanje naizmeničnog napona indukovano u rotoru u jednosmerni napon na stezaljkama motora.
- Magnetno polje ima smer od N ka S-polu. Realizacija sa većim brojem namotaja na rotoru zbog ujednačenijeg obrtnog momenta. Magnetno polje se stvara pomoću elektromagneta ili pomoću stalnih magneta (do 2kW).



OSNOVNE CELINE DC MOTORA

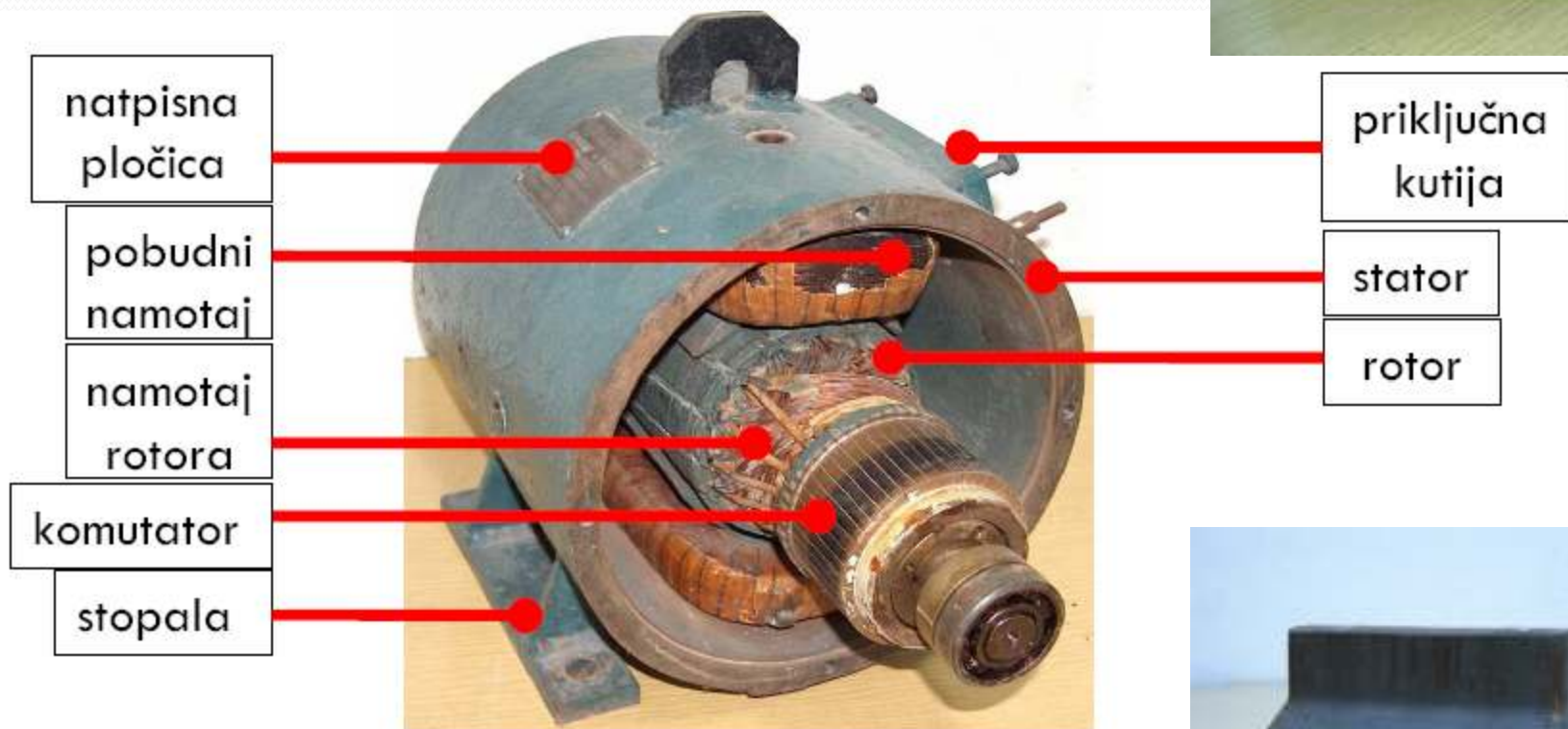
- Osnovne celine DC motora su:
 - **Mehanički delovi** – kućište, vratilo, ležajni štitovi, ležaji, ventilatori;
 - **Električni delovi** – namotaji statora i rotora, kolektor, četkice, priključne stezaljke;
 - **Magnetni delovi** – jaram statora, glavni i pomoćni polovi statora, jaram i zubi rotora, međugvožđe (zazor);





Stator čine kućište i polovi magneta sa pobudnim namotajem. Uloga statora je stvaranje pobudnog fluksa, kojeg stvaraju permanentni (stalni) magneti ili namotaj u kome postoji DC struja (elektromagnet).

- Stator se sastoji od kućišta - jarma u obliku šupljeg valjka od masivnog gvožđa, na čijoj su unutrašnjoj periferiji pričvršćena $2p$ istaknuta pola složenih od feromagnetnih limova.
- Na polovima statora je pobudni namotaj, povezan između polova na određeni način i izveden na dva priključna kraja. Kroz pobudni namotaj se propušta DC struja koja stvara statorsku magnetnopobudnu silu i statorski fluks koji je nepomičan.
- Na statoru su i četkice koje kližu po kolektoru rotora, a prisutni su i neki konstrukcijski delovi poput nosača ležaja, te nosača držača četkica.
- DC motori manjih i srednjih snaga imaju i pomoćne polove s pomoćnim namotajem. Kod najvećih motora postoji i kompenzacijski namotaj u žlebovima glavnih polova.



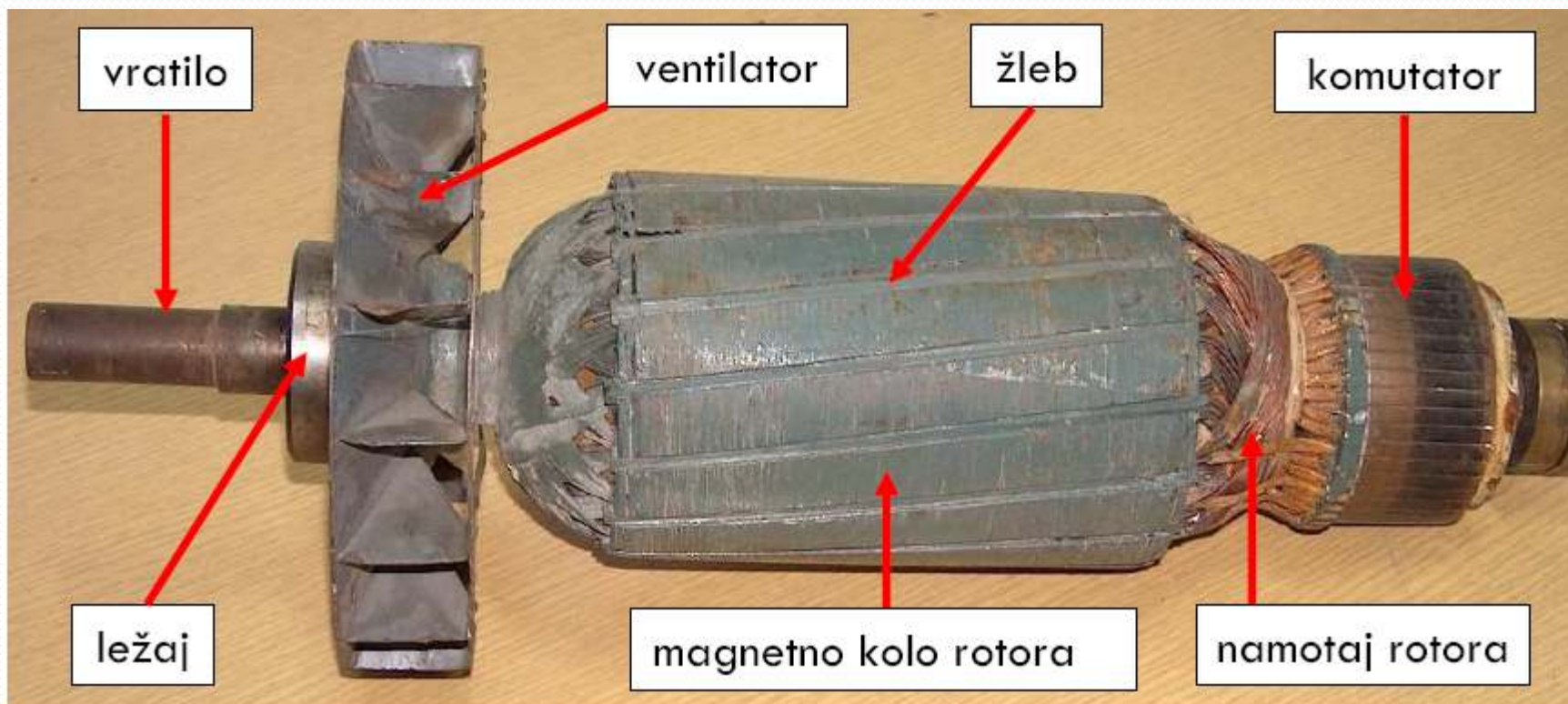
Dvopolna mašina jednosmerne struje





ROTOR

- Rotor je cilindričnog oblika, čine ga rotorski paket sa namotajem i vratilo sa komutatorom + ventilator.
- Rotorski paket je sastavljen od tankih feromagnetnih limova (dinamo-limova) i ravnomerno je ožljebljen po svom obimu. Rotorski paket čvrsto je spojen sa vratilom mašine direktno ili preko glavčine (sa klinom).
- Namotaj na rotoru (indukt, armatura) je raspodeljen po žlebovima rotorskog paketa i direktno priključen na lamele kolektora, koji su izolovani međusobno i u odnosu na masu.
- Komutator (kolektor) je pričvršćen je sa jedne strane rotora i obrće se zajedno sa njim.



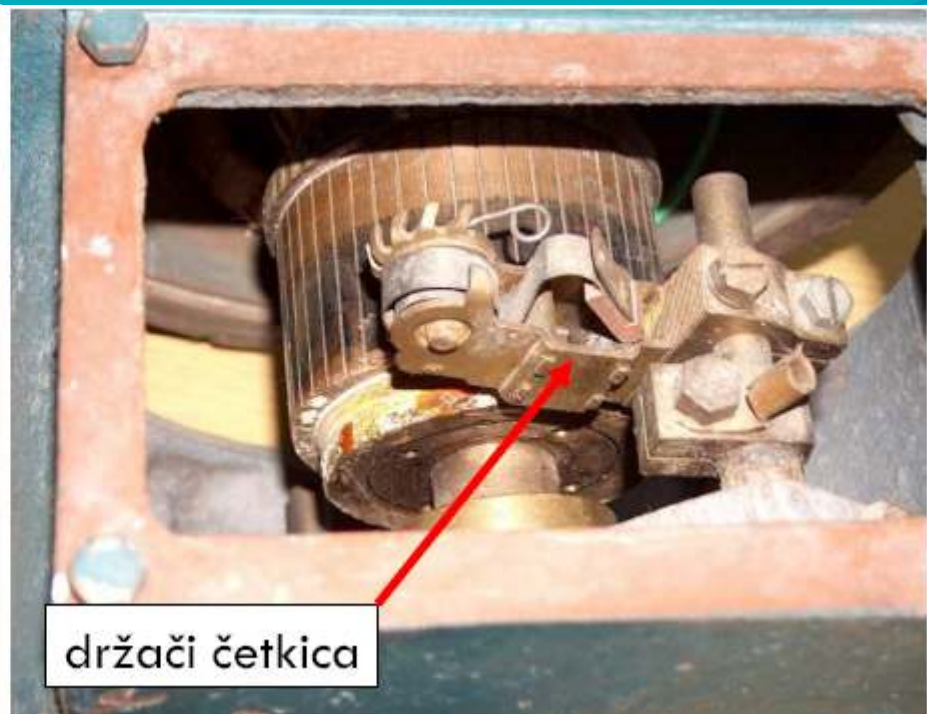
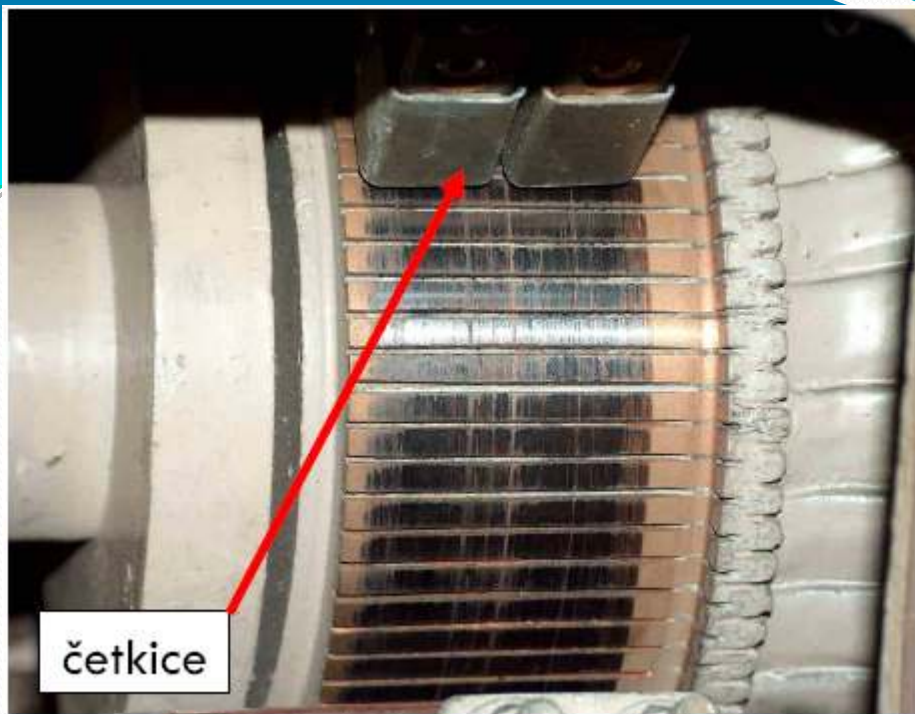
Rotor jednosmerne mašine



KOLEKTOR

Komutator (kolektor) je sastavljen od bakarnih segmenata (lamela, kriški) koji su izolovani međusobno i u odnosu na masu. Uloga komutatora je preusmeravanje smera struje kroz navoje rotora.

- Postavljen je sa jedne strane rotora i obrće se zajedno sa njim.
- Na površinu komutatora naleže izvestan broj dirki (četkica), koje su smeštene na simetrali među polovima, u "neutralnoj zoni" i nepomične (mehanički učvršćene za stator), spojene na dva priključna kraja na statoru.
- Lamele komutatora su u električnoj vezi sa namotajem rotora, svaki segment komutatora spojen je sa istim tolikim brojem tačaka namotaja indukta.

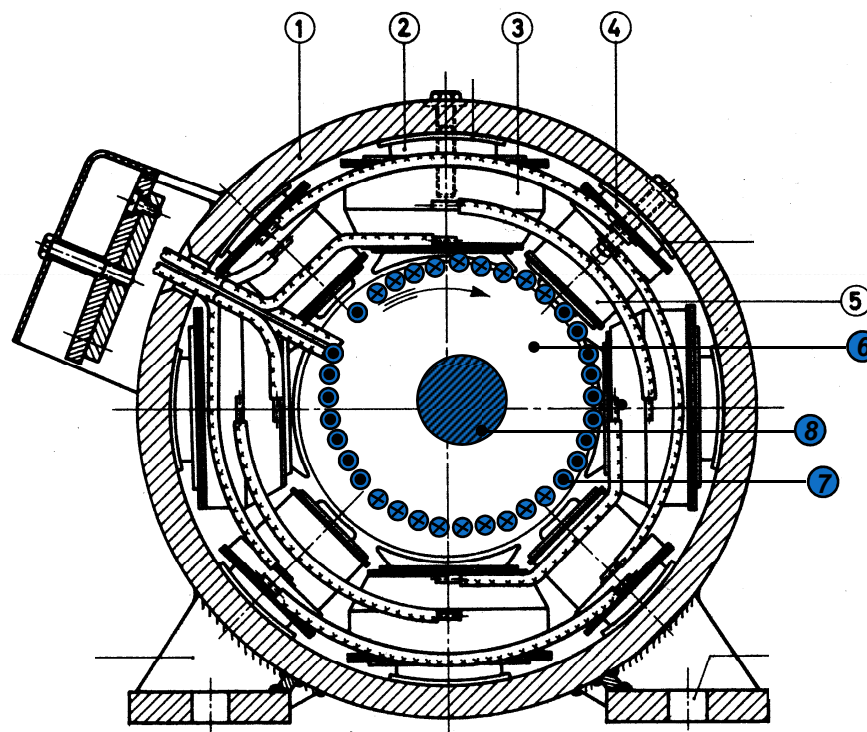


Komutator



KONSTRUKCIJA

- Kućište statora je izrađeno od liva.
- Na unutrašnjoj strani kućišta nalazi se jaram na koji su ugrađeni glavni i pomoćni polovi sa svojim namotajima. Jaram s polovima predstavlja stator.
- Na osovini rotora nalazi se rotorski paket sastavljen od dinamo-limova, a u žlebovima tog paketa ugrađen je armaturni namotaj koji je priključen na lamele kolektora.

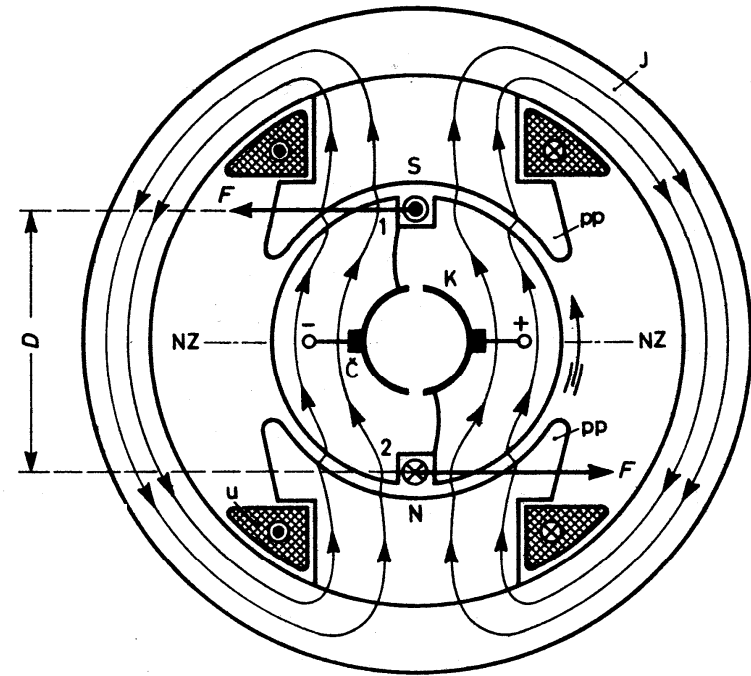


POPREČNI PRESEK:

1) Kućište; 2) Glavni pol; 3) Namotaj glavnog pola; 4) Pomoćni pol; 5) Namotaj pomoćnog pola; 6) Rotorski paket; 7) Armaturni namotaj; 8) Vratilo

REALIZACIJA DC MOTORA

- Princip rada DC motora može se pokazati na pojednostavljenom shematskom prikazu dvopolnog motora s jednim žlebom na rotoru.
- Kada na četkice rotora dođe DC napon, preko kolektora protiče struja kroz dva provodnika u žlebu.
- Provodnici se nalaze u magnetnom polju stvorenom od strane elektromagneta na istaknutim polovima, na svaki provodnik deluje sila $F = B \cdot L \cdot I$, gde je B – magnetna indukcija, I - struja i L - dužina provodnika.



MOMENT NA ROTORU

- Moment na 2 provodnika

$$M = B \cdot I \cdot L \cdot D$$

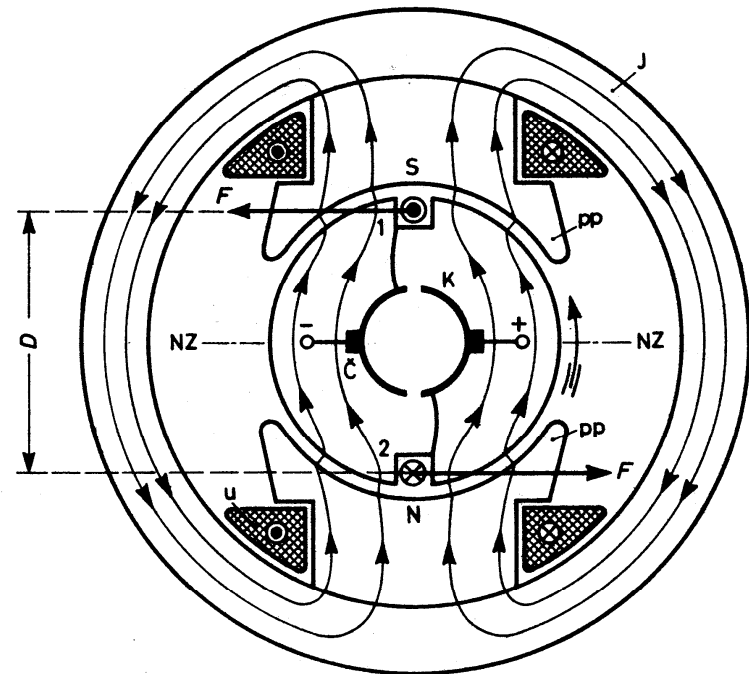
- Stvarni DC motor ima na rotoru namotaj sa p parova polova, z provodnika i a parova paralelnih grana, te razvija moment

$$M = \frac{p z}{2 \pi a} I_a \Phi = k_m I_a \Phi$$

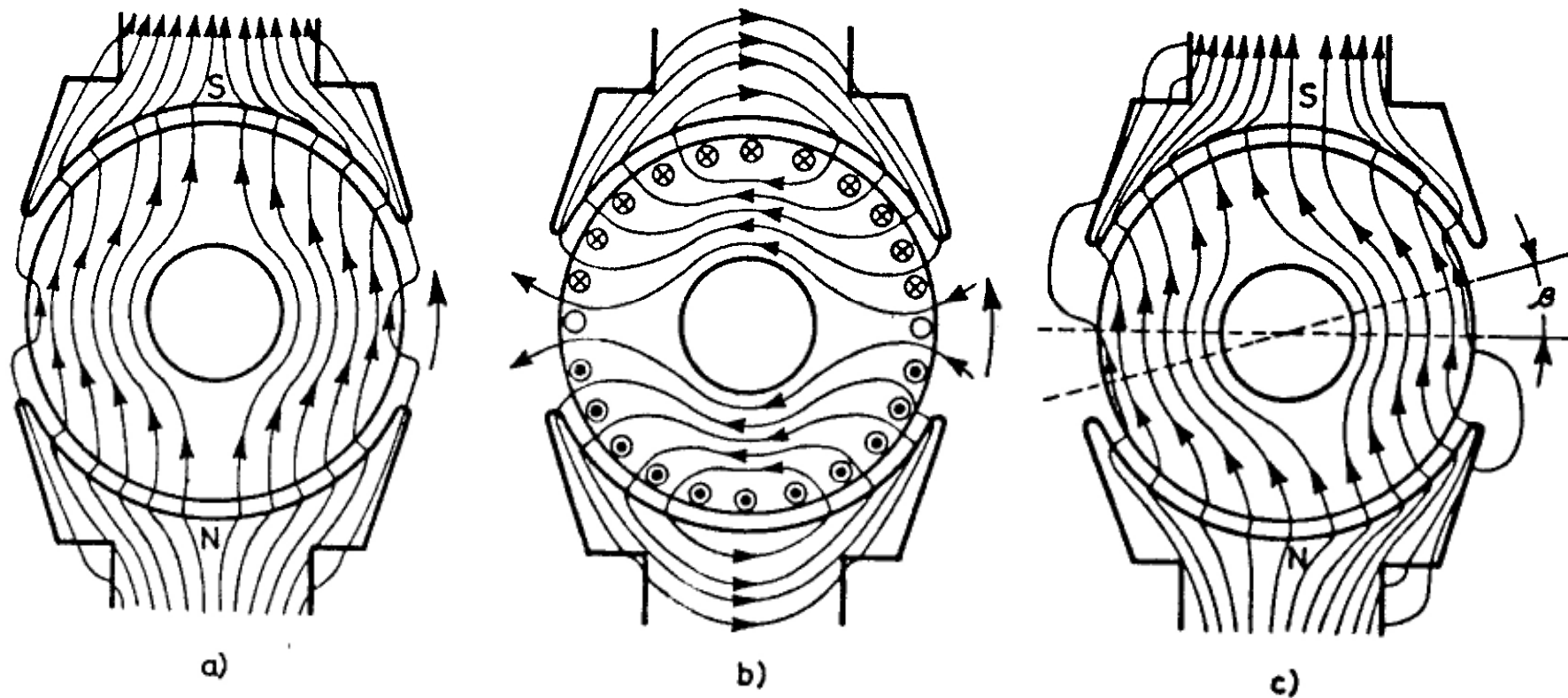
gde je I_a ukupna struja rotora, a Φ magnetni fluks pod jednim polom

$$\Phi = B_{sr} \cdot \tau_p \cdot I$$

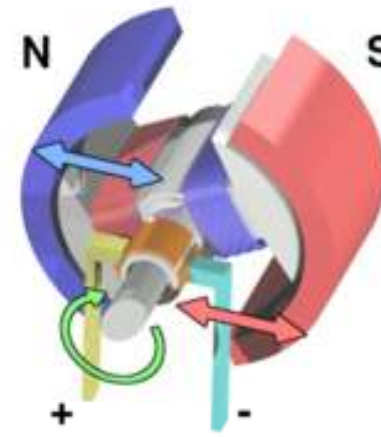
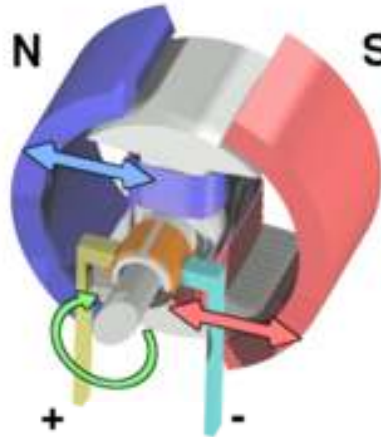
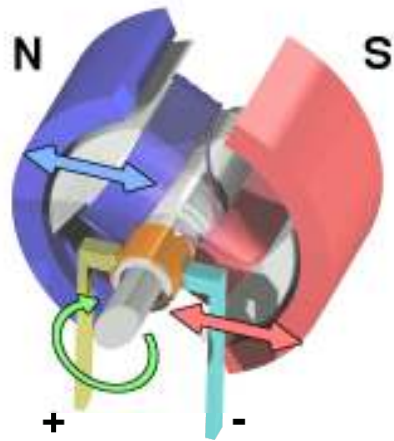
gde je korak polova: $\tau_p = D\pi/2p$, a B_{sr} – srednja vrednost indukcije pod polom.



MAGNETNO POLJE DC MOTORA



KRETANJE ROTORA



- 1) Dovođenje napajanja na namotaj rotora -> magnetno polje oko rotora. Leva strana armature je odgurnuta od levog magneta -> rotacija
- 2) Nastavak rotacije
- 3) Komutator menja smer struje i obrtanje se nastavlja
- 4) Unutrašnjost DC motora

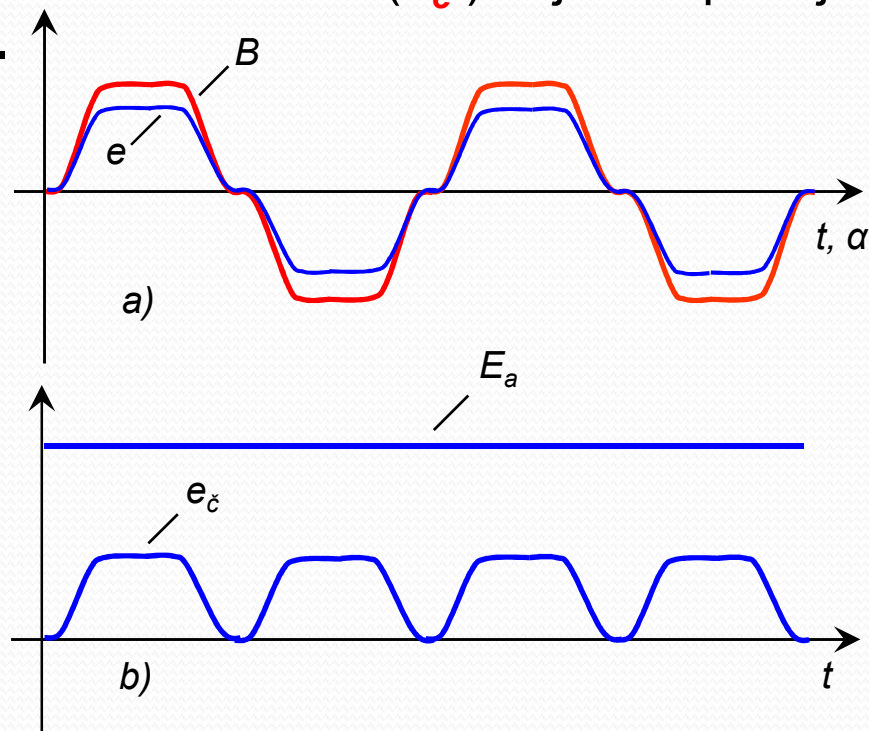


ELEKTROMOTORNA SILA - EMS

- Pri obrtanju u svakom provodniku rotorskog namotaja indukuje se EMS: $e = B \cdot l \cdot v$, gde je B – indukcija u provodniku, l – dužina provodnika u magnetnom polju i v – brzina obrtanja provodnika.
- Talasni oblik indukcije po obodu rotora (B) i indukovani napon u jednom namotu ili svitku (e) uz konstantnu brzinu obrtanja prikazan je na slici a)
- Na slici b) prikazan je napon svitka na četkicama (e_c) koji se ispravlja pomoću sistema četkica-kolektor.
- Stvarni DC motor ima na rotoru namotaj sa p parova polova, z provodnika i a parova paralelnih grana, pa je ukupni indukovani napon namotaja na rotoru:

$$E_a = \frac{p z}{2 \pi a} \Phi \omega = k_e \Phi \omega$$

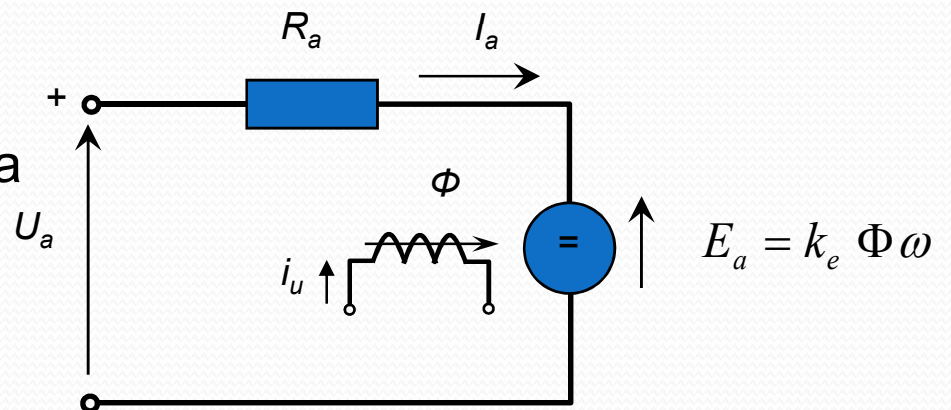
ω - ugaona brzina (rad/s),
 Φ_{gl} magnetni fluks pod jednim polom.



NAPON U KOLU ROTORA

- Šema rotorskog kola za stacionarna stanja data je na slici
- Rotorskom naponu (U_a) ravnotežu drži elektromotorna sila (E_a).
- Naponska jednačina u kolu rotora za stacionarna stanja glasi

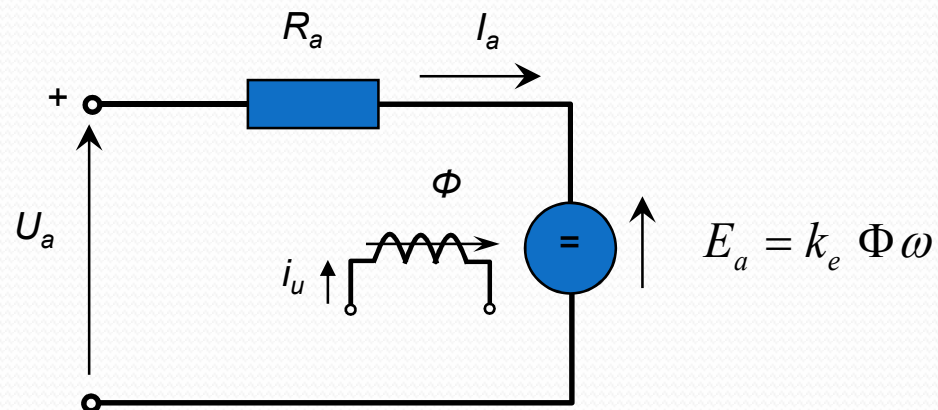
$$U_a = I_a R_a + E_a$$



NAPON U KOLU ROTORA

- Na četkicama motora javlja se pad napona koji je zavisi od struje, ali nije linearan.
- Taj se pad napona može uzeti u obzir povećanjem otpora armature (R_a) ili se u naponskoj jednačini dodaje pad napona na četkicama ($\Delta U_{\check{c}}$) za koji se obično uzima konstantna vrednost od 2 V.
- Tada naponska jednačina glasi

$$U_a = I_a R_a + E_a + \Delta U_{\check{c}}$$

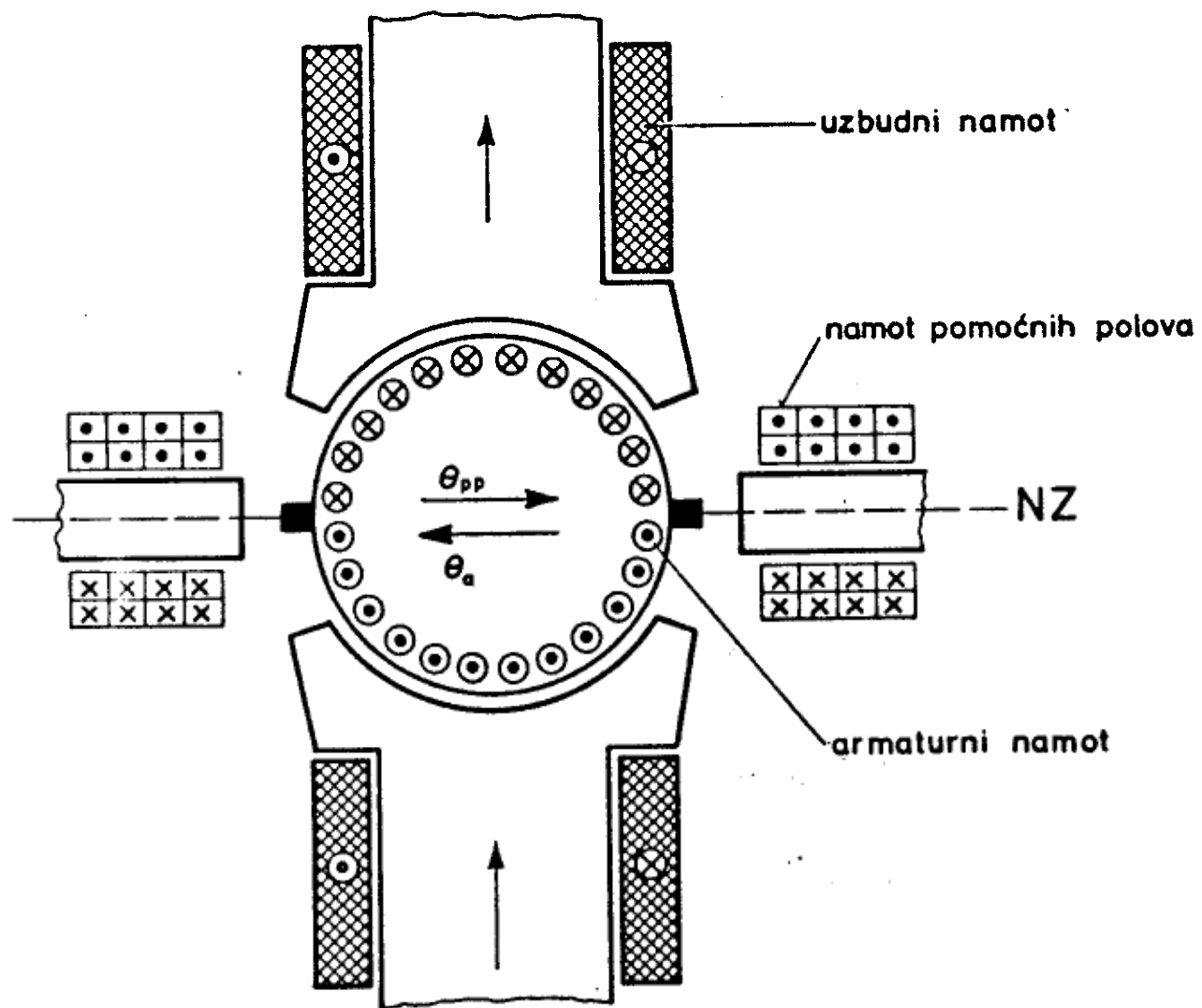




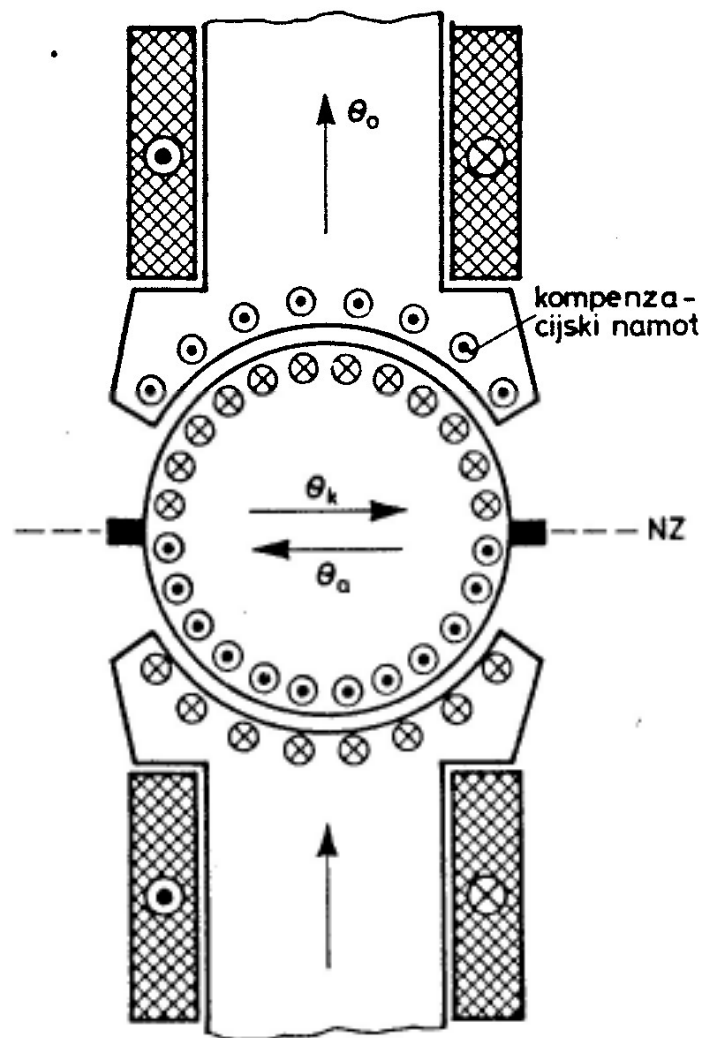
OSTALI NAMOTAJI DC MOTORA

- Osim pobudnog namotaja na statoru i armaturnog namotaja na rotoru, DC motori često imaju i sledeće namotaje:
- **Pomoćni polovi** ugrađuju se između glavnih polova (u tzv. “neutralnu” zonu), a osnovni zadatak im je rešavanje problema komutacije. Namotaj pomoćnih polova ima mali broj navojaka, a kroz njega teče struja rotora.
- **Kompenzacioni namotaj** ugrađuje se u polne papuče glavnih polova, kroz njega teče struja rotora, a osnovni zadatak mu je kompenzacija reakcije rotora.
- **Kompaudni namotaj** ugrađuje se na glavne polove, ima mali broj navojaka, kroz njega teče struja rotora koja stvara magnetno polje istog smera kao i pobudni namotaj. Zadatak mu je kompenzacija gubitka indukovanog napona usled reakcije rotora. Pravilnim dimenzionisanjem ovog namotaja mogu se postići različite karakteristike kompaudnih motora.

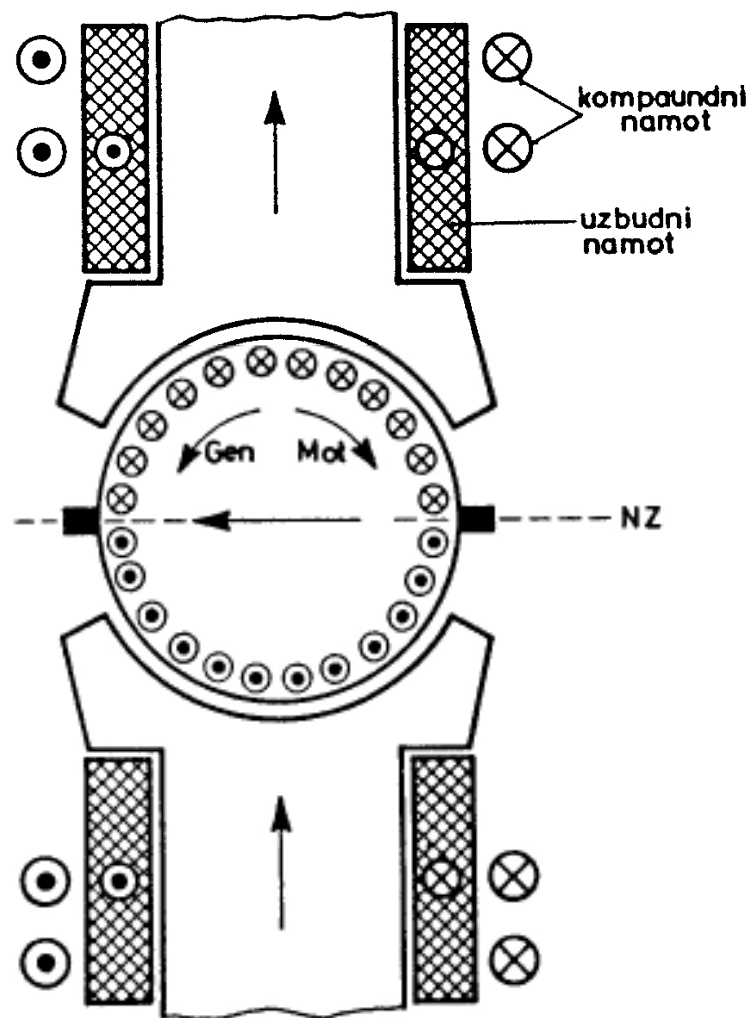
POMOĆNI POLOVI



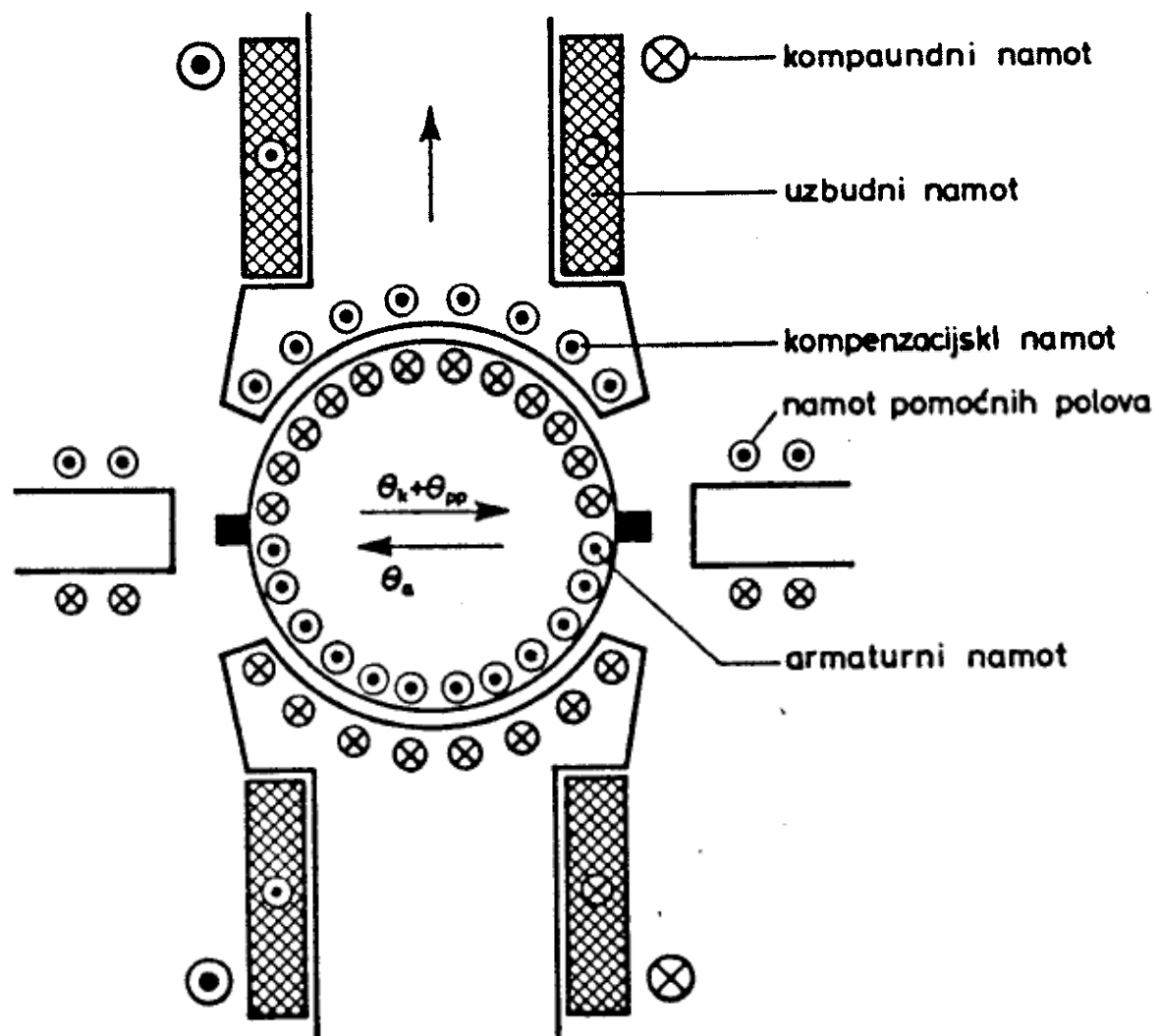
KOMPENZACIONI NAMOTAJ



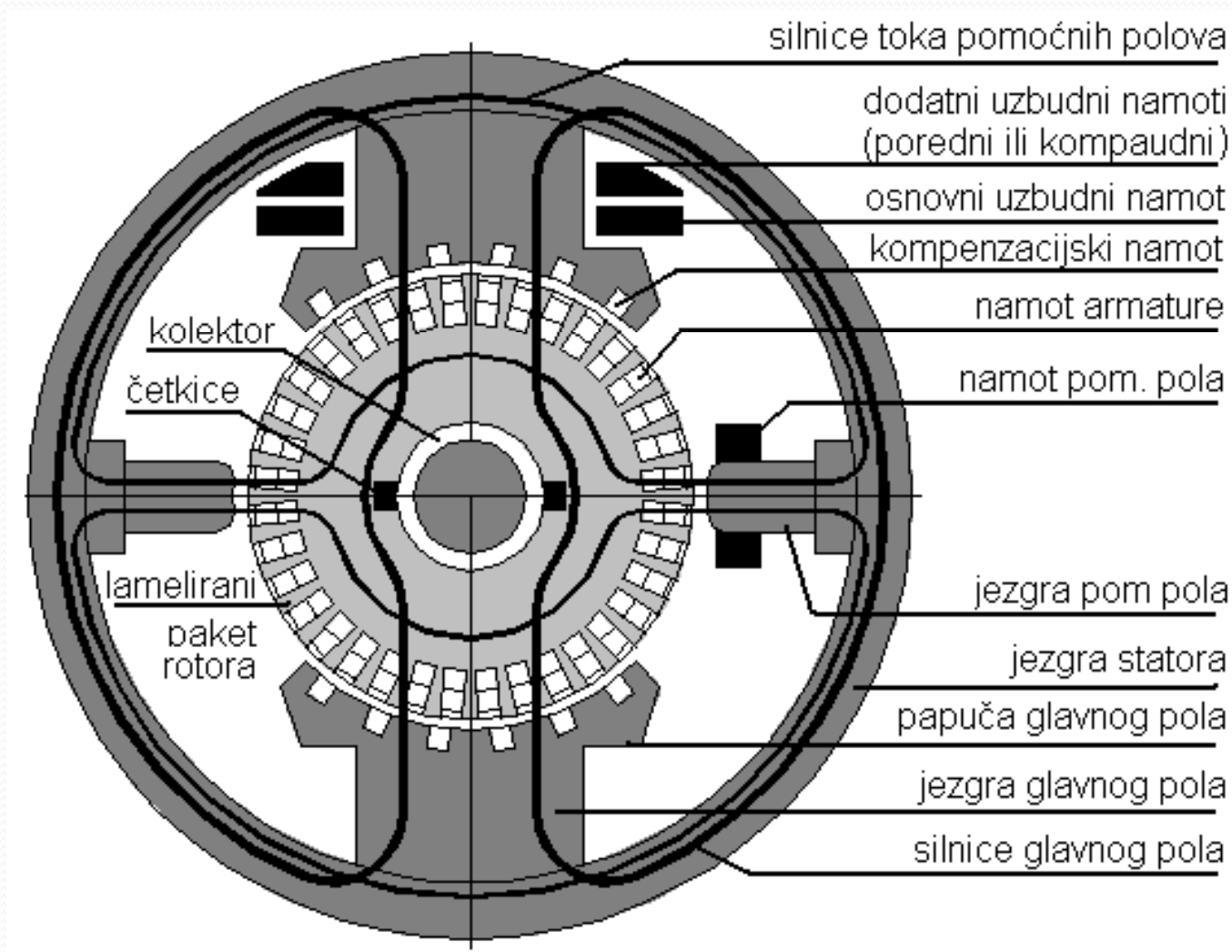
KOMPAUNDNI NAMOTAJ



ŠEMATSKI PRIKAZ SVIH NAMOTAJA



ŠEMATSKI PRIKAZ SVIH NAMOTAJA

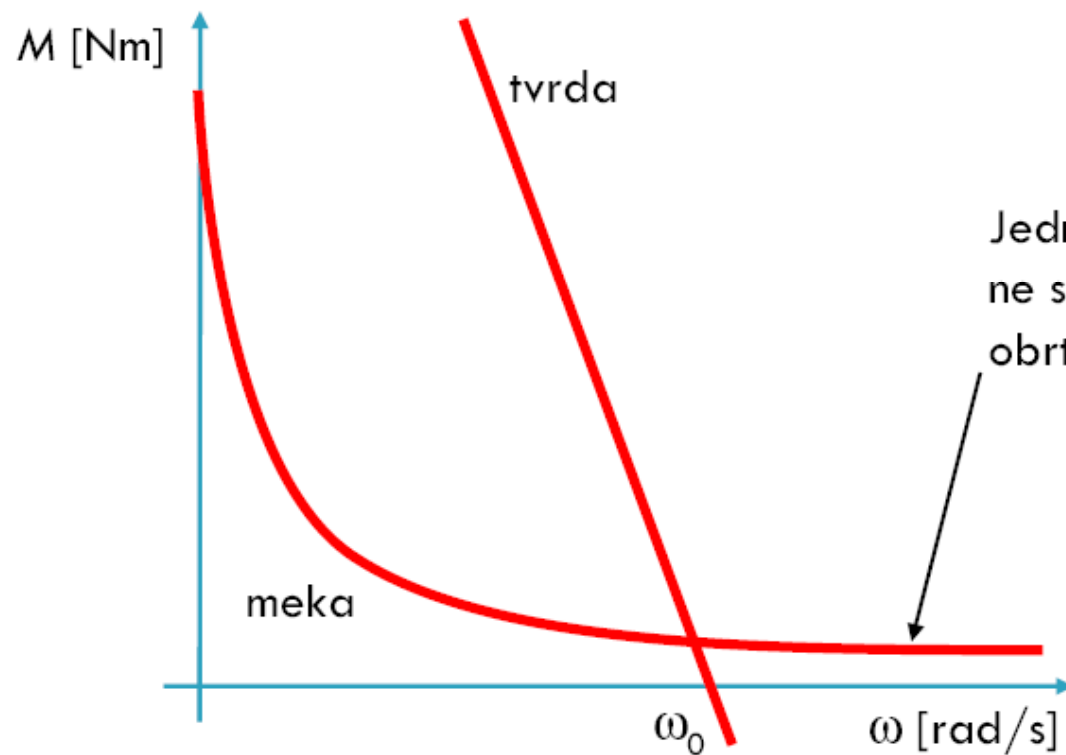




MOMENTNA KARAKTERISTIKA

- Pri konstantnom naponu napajanja rotorskog namotaja i pobudnog (statorskog) namotaja, brzina obrtanja rotora zavisi od razvijenog elektromagnetnog momenta.
- Veza koja postoji između brzine obrtanja i momenta u stacionarnom stanju se zove momentna (mehanička) karakteristika: $M=f(n)$. Ona prvenstveno zavisi od sistema pobude i može biti:
 - 1. "tvrda", kod koje se brzina obrtanja vrlo malo menja sa promenom momenta opterećenja (nezavisna i paralelna pobuda),
 - 2. "meka", kod koje se značajno menja brzina obrtanja sa promenom momenta opterećenja (redna pobuda).

MOMENTNA KARAKTERISTIKA



Jednosmerni motor sa rednom pobudom ne sme da radi neopterećen jer je tada brzina obrtanja velika (razletanje motora).

ω_0 - brzina neopterećenog motora (prazan hod)



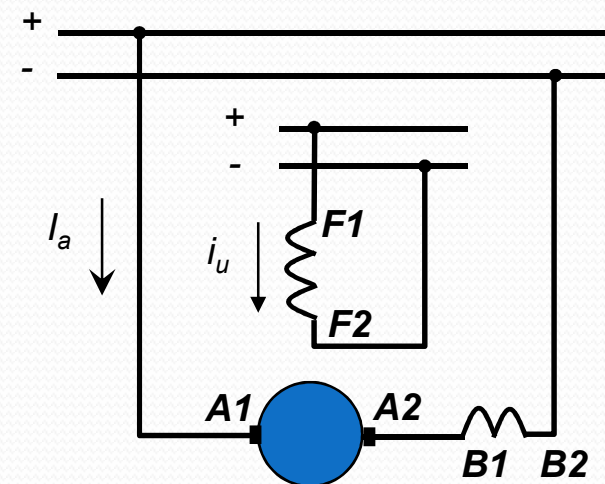
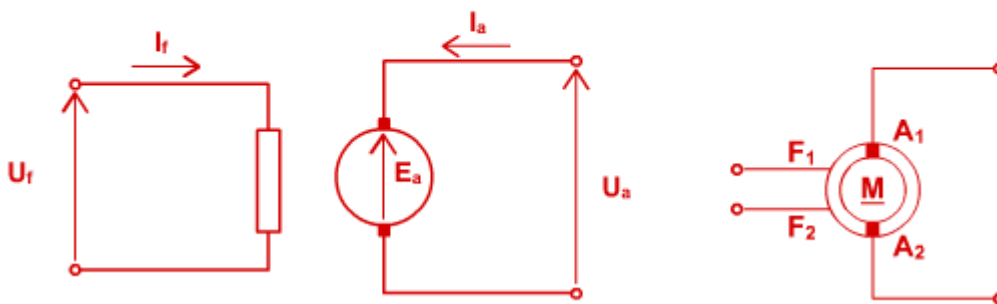
VRSTE KOMUTATORSKIH DC MOTORA

- U praksi se koristi veliki broj navojaka namotaja rotora, a magnetno polje se proizvodi elektromagnetom (namotaj pobude), te je srednja vrednost elektromagnetnog momenta motora približno konstantna.
- Prema načinu spajanja namotaja pobude i namotaja rotora, razlikujemo sledeće osnovne vrste komutatorskih DC motora:
 1. **Nezavisna pobuda**, namotaj pobude je spojen na poseban spoljni izvor napona, koji je potpuno nezavisan od prilika u mašini. Namotaj rotora se napaja iz drugog izvora jednosmernog napona. Jednosmerni naponi se dobijaju iz naizmenične trofazne mreže, preko ispravljača.
 2. **Paralelna pobuda**, pobudni namotaj je spojen paralelno na namotaj rotora i priključeni su na izvor jednosmernog napona.
 3. **Redna (serijska) pobuda**, pobudni namotaj je spojen na red sa namotajem rotora i priključeni su na izvor jednosmernog napona.
 4. **Kompaund (složena) pobuda**, ima nezavisnu (ređe paralelnu) + serijsku pobudu, uzima dobre osobine oba tipa
 5. **DC motori sa permanentnim magnetima**, za minijaturene motore i male snage

1. NEZAVISNA POBUDA

- DC motor sa nezavisnom pobudom ima nezavisni pobudni namotaj na koji se dovodi jednosmerni napon iz posebnog izvora.
- Najčešće korišćen tip pobude kod elektromotornih pogona.
- Kroz pobudni namotaj teče struja koja stvara fluks motora Φ_{gl} koji u okolini radne tačke nema linearnu karakteristiku u odnosu na struju pobude zbog zasićenja.

SEPARATE EXCITATION



Oznake stezaljki:

A1-A2 – armaturni namotaj

F1-F2 – pobudni namotaj

B1-B2 – namotaj pomoćnih polova

1. NEZAVISNA POBUDA

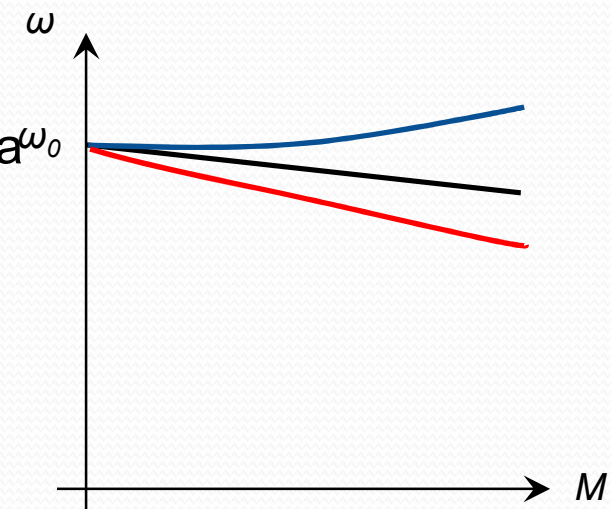
- Uzimajući u obzir tri osnovne jednačine

- elektromagnetnog momenta
- indukovanog napona
- naponsku jednadžbu armaturnog kruga,

karakteristika DC motora s nezavisnom pobudom:

$$\omega = \frac{U_a}{k_e \Phi} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi^2} M = \omega_0 - k M$$

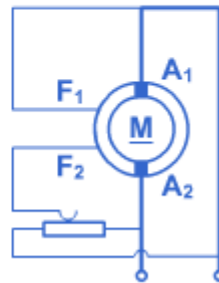
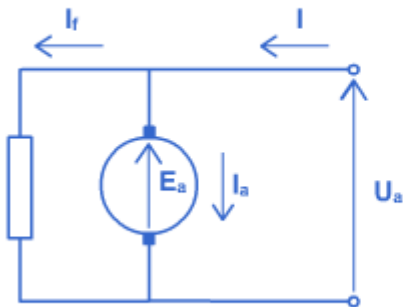
- Povećanjem momenta tereta brzina motora opada približno linearno, samo zbog neznatnih padova napona.
- $I_a = I$.
- Treba ga prvo pobuditi punom vrednošću fluksa Φ_{gl} pa tek onda priključiti strujno kolo indukta da ne bi došlo do pobega



2. PARALELNA POBUDA

- DC motor sa paralelnom pobudom ima ponašanje kao i motor sa nezavisnom pobudom, ista momentna karakteristika (malo “mekša”).
- Ima samopobuđivanje, pod uslovom da je od prethodnog rada ostao remanentni magnetizam.
- Služi za pogon dizalica, alatnih i štamparskih mašina, u valjaonicama, za kompresore, pokretne trake, dobra regulacija brzine obrtanja.
- $I_a + I_f = I$.

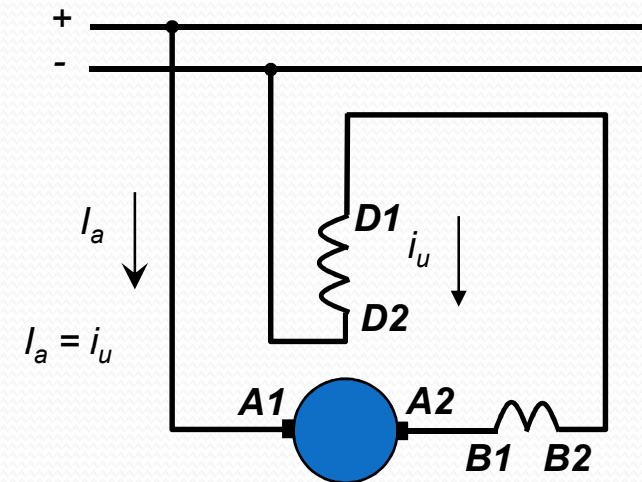
SHUNT EXCITATION



3. SERIJSKA POBUDA

- Pobudni i armaturni namotaj serijskog motora spojeni su u seriju, pa je struja armature ujedno i struja pobude ($I_a = I_u = I$).
- Fluks je proporcionalan struji armature, pa je moment serijskog motora

$$M = k' I^2$$



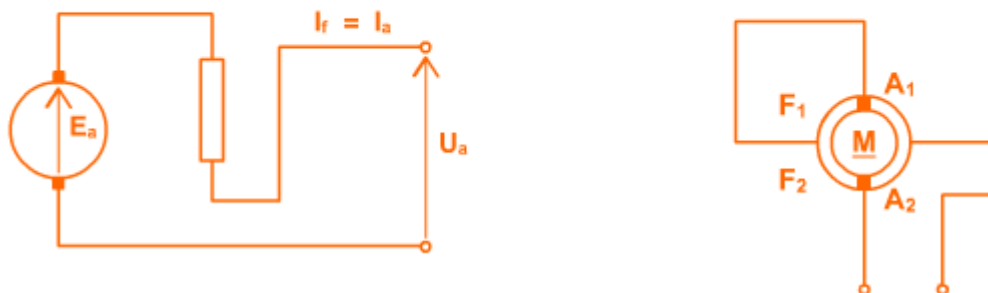
Oznake stezaljki:

A1-A2 – armaturni namotaj

D1-D2 – serijski pob. namotaj

B1-B2 – namotaj pomoćnih polova

SERIES EXCITATION



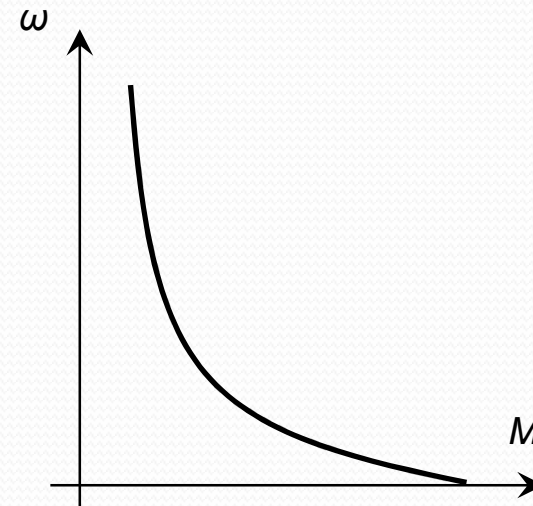
3. SERIJSKA POBUDA

- Uzimajući u obzir vezu između brzine i indukovano napona

$$\omega = \frac{E_a}{k_e \Phi_{gl}}$$

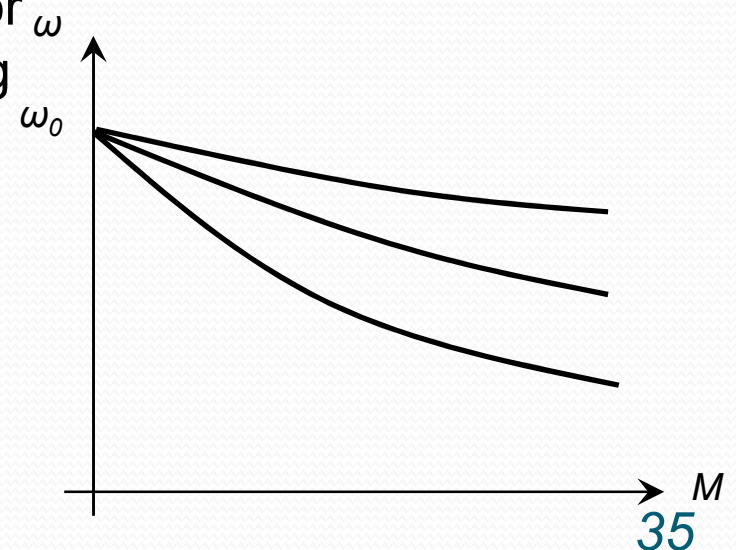
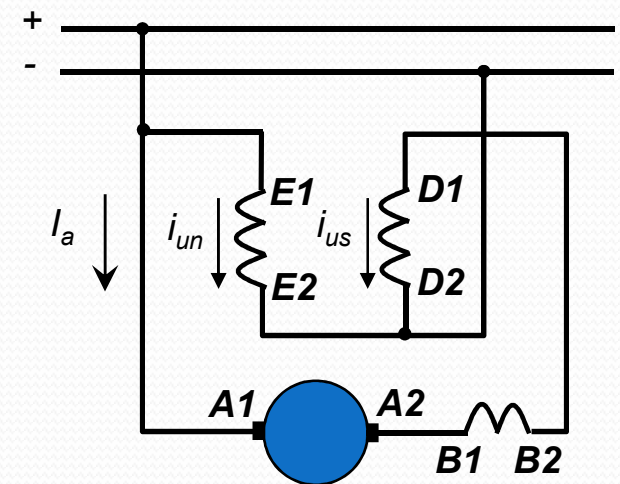
sledi približni izraz za brzinu obrtanja: $\omega = k_s \frac{U_a}{\sqrt{M}}$

- Zbog karakteristike konstantne snage ($P=M \cdot \omega$), serijski motor se najviše koristi u vuči (lokomotiva, tramvaj).
- Ne sme da radi neopterećen jer $\omega \rightarrow \infty$.
- Primer - preopterećenje 30%
 - Paralelna pobuda:
 - Do 30% veća struja od nazivne
 - Do 69% veće zagrevanje
 - Serijska pobuda
 - Do 14% veća struja od nazivne
 - Do 30% veće zagrevanje

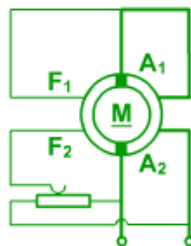
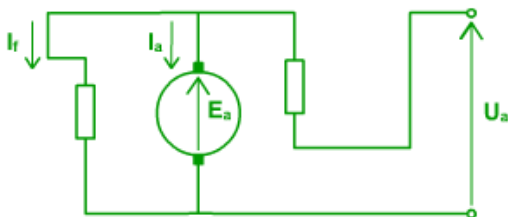


4. KOMPAUND POBUDA

- Motor sa kompaund pobudom ima nezavisnu (ili paralelnu) i serijsku pobudu. Za velika opt.
- Delovanje serijske pobude (i_{us}) gotovo uvek potpomaže nezavisnu pobudu (i_{un}).
- U zavisnosti od udela pojedinih pobuda kompaund motor ima tvrđu ili mekšu momentnu karakteristiku.
- Za razliku od serijskog motora kompaund motor može raditi neopterećen, jer je brzina praznog hoda određena nezavisnom pobudom.

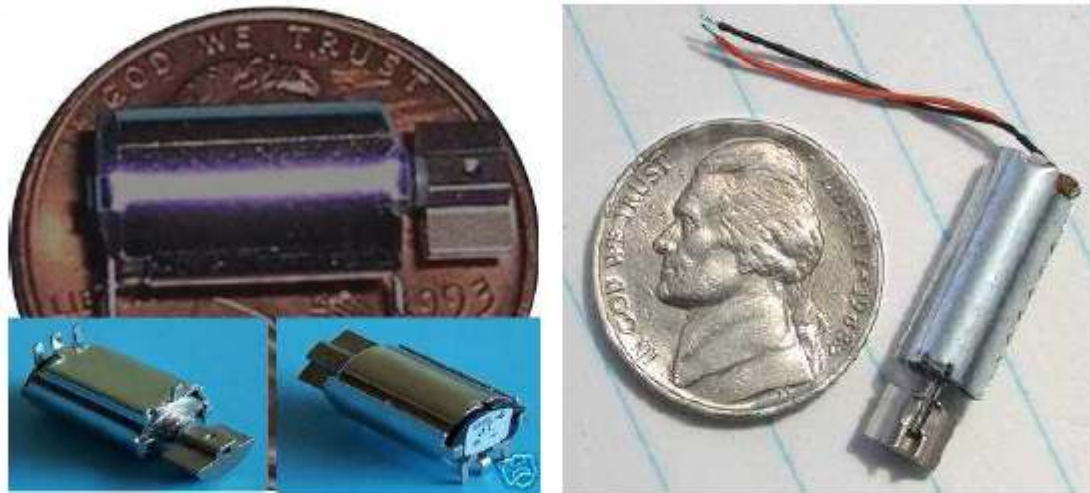


COMPOUND EXCITATION



5. STALNI MAGNETI NA STATORU

- DC motor sa stalnim magnetima na statoru: ova konstrukcija se koristi za manje snage (tahogeneratori, motori za pogon bočnih stakala i brisača na automobilima, anlaser za SUS motore manjih snaga, pogon osa totalne stanice).



Mali jednosmerni motor 1,3V, 70mA koji se koristi za stvaranja vibracija u mobilnim telefonima

MOTORI SA STALNIM MAGNETIMA NA ROTORU

- Povećana primena motora sa stalnim magnetima na rotoru, korišćenjem magneta s visokom koncentracijom magnetne energije po jedinici zapremine (magneti na bazi retkih zemalja), te ubrzan razvoj mikroproc. upravljanih pretvarača energetske elektronike.
- Moguće je da u bliskoj budućnosti zamene DC i AC motore u velikom broju aplikacija, naročito u servopogonima (snaga do 10 kW).
- Osnovna područja primene očekuju se u: robotici, alatnim mašinama, uređajima za pozicioniranje, fleksibilnim linijama, itd.
- **U odnosu na DC motore osnovna prednost ovih motora je nepostojanje četkica i kolektora.**
- **U odnosu na AC motore prednosti pogona s PM motorima su**
 - 1) Veća korisnost zbog zanemarljivih rotorskih gubitaka (na rotoru PM motora nema gubitaka u namotajima kao kod AC motora).
 - 2) Manji moment inercije, pa se uz isti razvijeni moment postiže bolja dinamika što je posebno važno kod servo pogona.
 - 3) Manji gabariti i težina kod iste snage.



MOTORI SA STALNIM MAGNETIMA NA ROTORU

- 4) S obzirom da magnetno polje stvaraju stalni magneti nije potrebna jalova snaga iz mreže pa je $\cos\theta \approx 1$ (veća korisnost).
- 5) Upravljanje PM motorima je jednostavnije u odnosu na vektorski upravljane asinhronne motore.
- 6) Konstantna pobuda PM daje bolje karakteristike kočenja.
- **Nedostaci PM motora u odnosu na asinhronne motore**
 - 1) Relativno skupi kvalitetni magneti + složenost ugradnje 4-6 puta skuplji od asinhronih motora.
 - 2) Moguće razmagnetisanje magneta kod PM motora pri visokim strujama.
 - 3) S obzirom da pri povećanim temperaturama opada jačina polja PM (zavisi od vrste magneta), kod PM motora je jače izražen uticaj promene temperature na karakteristike pogona.



BRUSHLESS DC MOTORI

- To su DC motori sa elektronskom komutacijom, bez četkica.

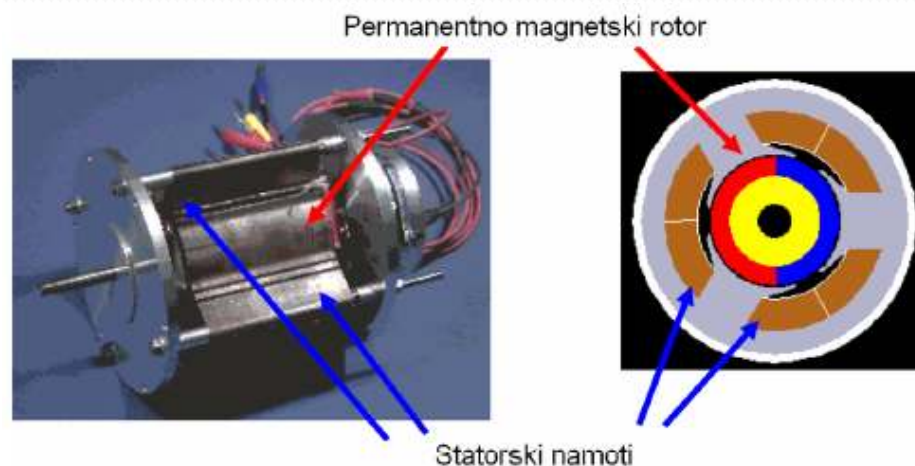
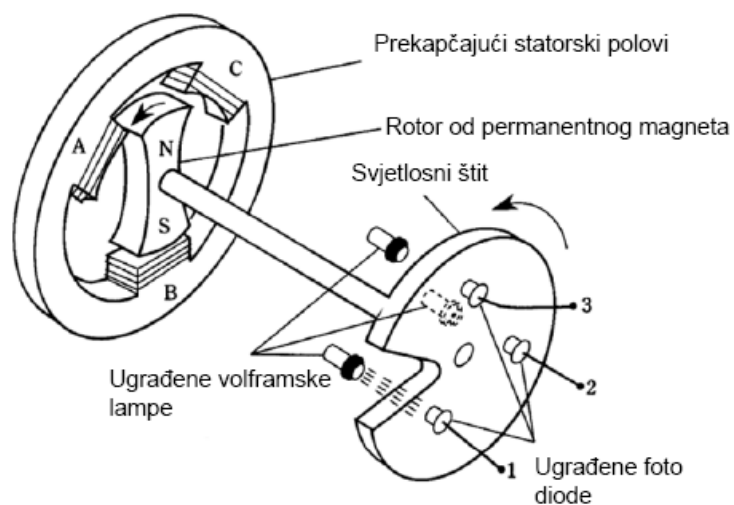
Ograničenja motora s četkicama

- Klasična električna veza između rotora i izvora jednosmerne struje se ostvaruje tako da se izvor jednosmerne struje spoji na grafitne četkice koje kližu po komutatoru.
- Prilikom prelaska četkice s jedne na drugu lamelu komutatora postoji trenutak kada se izvor nalazi u kratkom spoju usled čega dolazi do iskrenja četkica.
- Iskrenje četkica dovodi do postepenog uništavanja grafitnih četkica, ali i do oksidacije i trošenja komutatora, pa je to glavni nedostatak ove vrste motora.
- Iskrenje se pojačava se uvećanjem: broja obrtaja motora (pri velikim brzinama teško je održavanje kontakta četkica s komutatorom), napon, opterećenje, odnosno struja kao posledica povećanja napona ili opterećenja.
- Iskrenje sem uništavanja komutatora i četkica stvara čujni i električni šum.
- Kod velikih motora komutator je skup i zahteva mnogo mehanike.

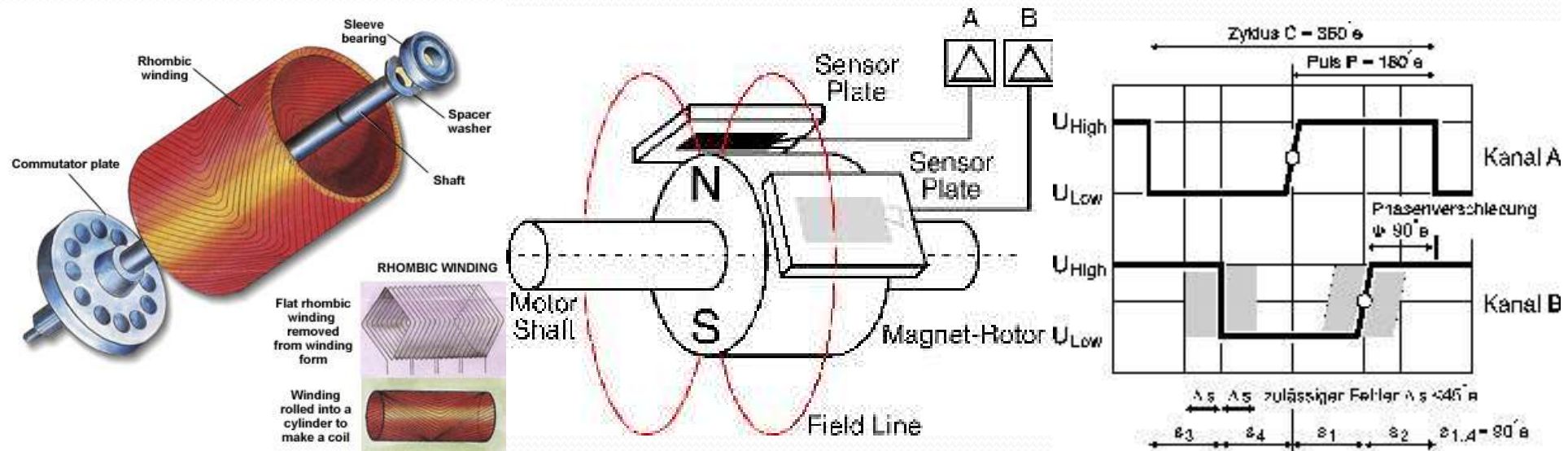
BRUSHLESS DC MOTORI

Osnovne karakteristike brushless motora

- Na rotoru su permanentni magneti, a na statoru su namotaji
 - predstavlja oblik AC motora s električnom komutacijom
- Ovi motori nemaju četkice ili komutator
 - mnogo efikasniji, manje trenje
 - rad sa većim brzinama bez rizika oštećenja četkica
- Kroz statorske namotaje se propušta struja koja dovodi do zakretanja rotora, statorskom strujom se upravlja pomoću elektronskog komutatora



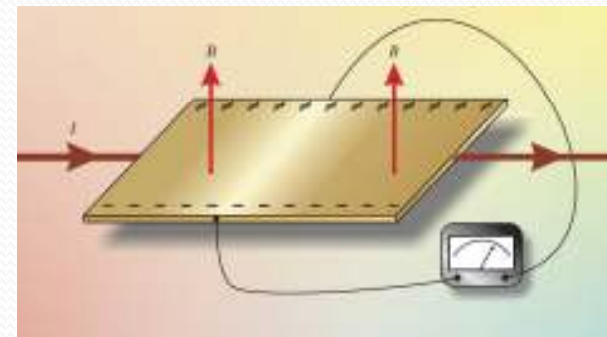
BRUSHLESS DC MOTORI



- Stalni magneti na rotoru, romboidni namotaj na statoru koji povećava značajno obrtni moment, višestepeni planetni reduktor (i do 1:2548 prenosni odnos)
- Glavna karakteristika: proces komutacije se vrši elektronski, efikasniji, mala EMI, duže traje, nema trošenja četkica, nema problema sa hlađenjem.
- Dva senzora bazirana na Halovom efektu, služe da kontrolišu položaj rotora i daju upravljački signal za elektronsku komutaciju, može i bez senzora merenjem EMS u namotaju statora.
- Upravljanje impulsno PWM, pobudnom strujam u statoru

BRUSHLESS DC MOTORI

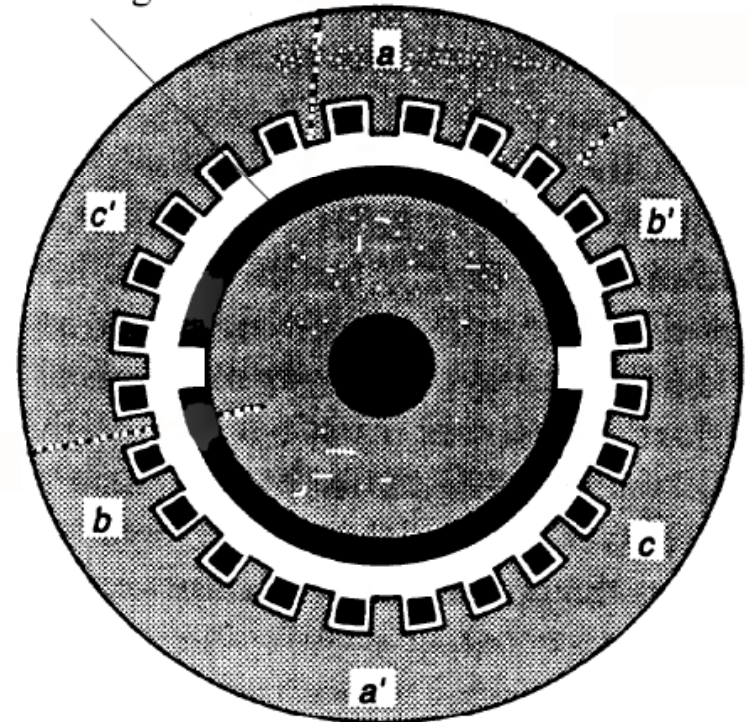
- Tačno definisanje kroz koji namotaj će elektronski komutator poslati struju i to kojeg smera, se ostvaruje senzorom položaja rotora na osnovu čega se upravlja radom samog komutatora (dodatna elektronika i senzori položaja).
- Ovaj senzor koristi Hall-ov efekat
Ukoliko se poluprovodnik nalazi u električnom polju, ono će izazvati tok struje gustine J . Ako normalno na smer tog polja deluje magnetno polje indukcije B , javlja se, transversalno na oba polja, novo električno polje jačine: $E = R_H J B$ gde je R_H Hallova konstanta.
- Brza promena broja obrtaja
- Stepennost DC motora bez četkica je 85-90%, dok je kod DC motora sa četkicama 75-80%.
- Dodatni energetske prekidači u pojačalu zahtevaju znatne troškove.
- Koriste se za aplikacije gde se zahtevaju velika područja promene brzine.



BRUSHLESS DC MOTORI

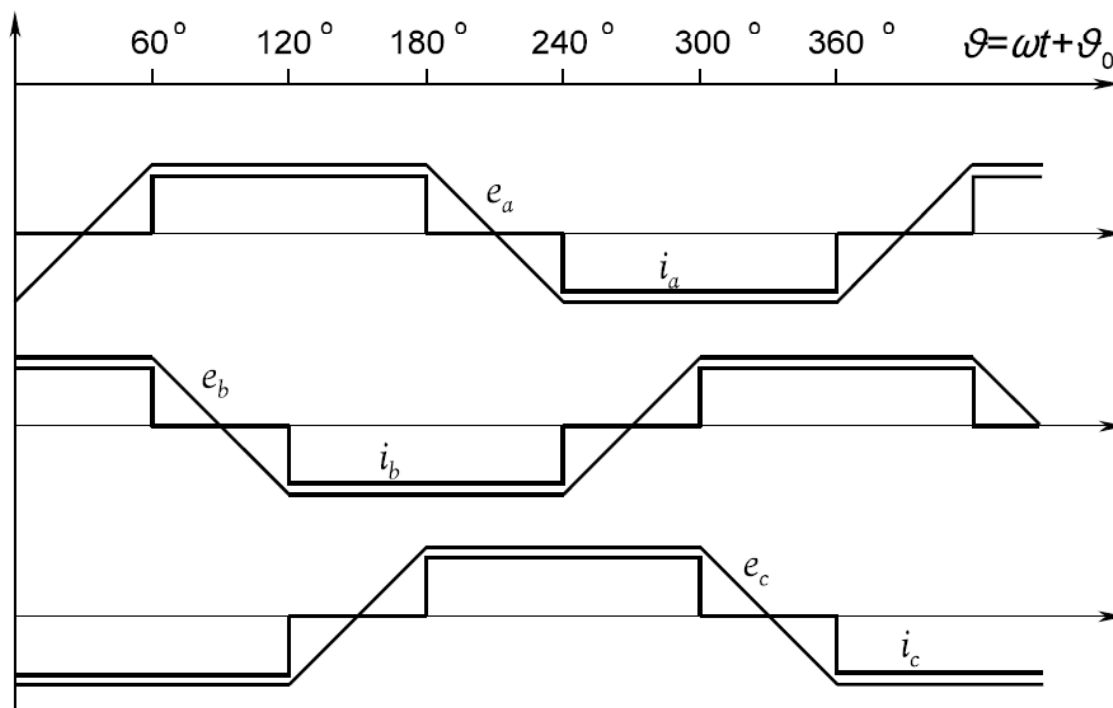
- Hardverska realizacija brushless motora
 - Na statoru je trofazni simetrični namotaj (slično kao kod asinhronog motora) najčešće spojen u zvezdu, a na rotoru su permanentni magneti.
 - Konfiguracija magneta zahteva najkvalitetnije materijale (SmCo, NdFeB) da bi se ostvarila zadovoljavajuća vrednost magnetne indukcije u međugvožđu.
 - Raspored namotaja na statoru, te izvedba i položaj magneta na rotoru obezbeđuju da se pri $v = \text{const.}$ u namotaju statora indukuju fazne EMS trapeznog oblika sa trajanjem ravnog dela trapeza od 120° .

Permanentni magneti



BRUSHLESS DC MOTORI

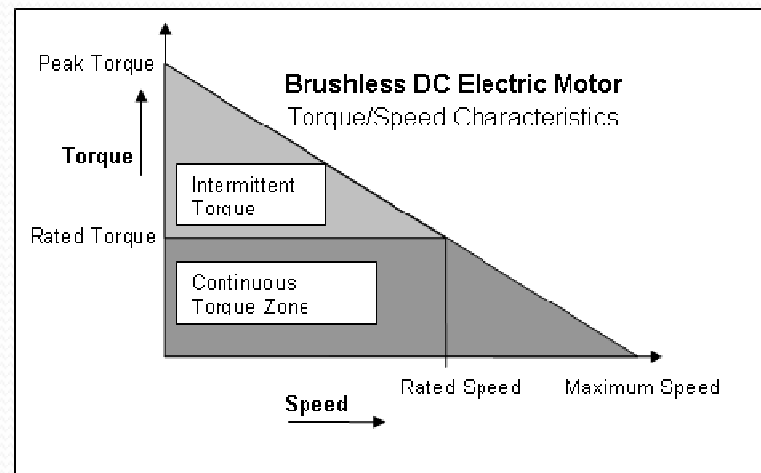
- Idealni oblici EMS-a i faznih struja pomoću kojih se ostvaruje konstantan moment motora. Moment se može definisati kao odnos snage u međugvožđu i ugaone brzine rotora. Veličine e_a , e_b , e_c su fazne EMS indukovane PM poljem, i_a , i_b , i_c su fazne struje, a ω je ugaona brzina rotora.



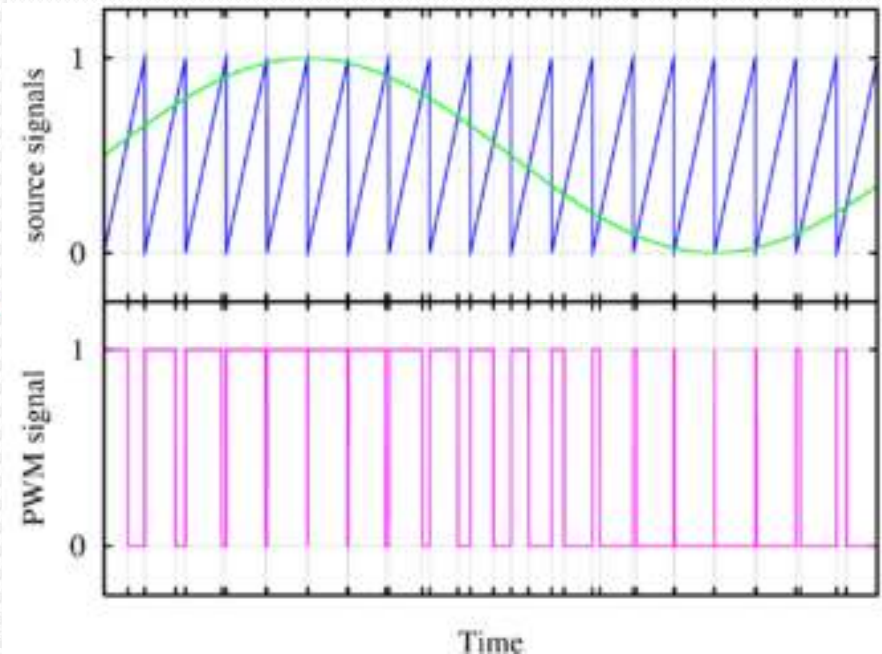
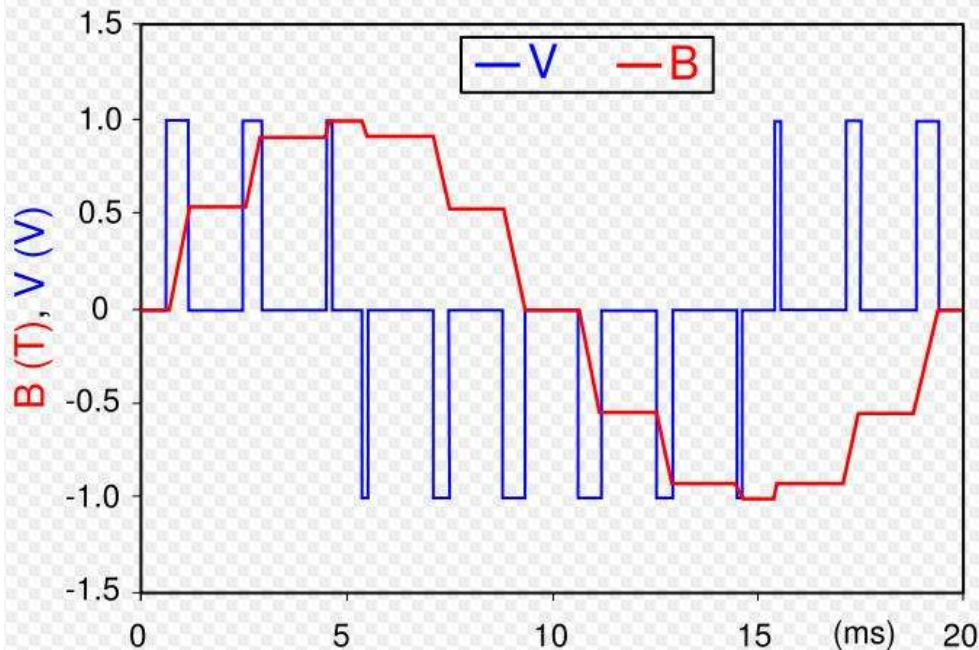
$$m_e = \frac{P_o}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}$$

BRUSHLESS DC MOTORI

- Da bi se ostvario konstantan moment, u međugvožđu struje moraju imati oblik pravougaonih impulsa koji se po širini, fazi i predznaku poklapaju s intervalom u kojem je EMS te faze konstantna.
- Postoji 6 intervala u ciklusu u kojima struja teče kroz 2 faze, a u 3. je nula
- U svakoj šestini periode motor se ponaša kao DC motor, s tim da se pobuda nalazi na rotoru a armatura na statoru.
- Svaku šestinu periode vrši se komutacija struje s faze na fazu pomoću elektronskog pretvarača.



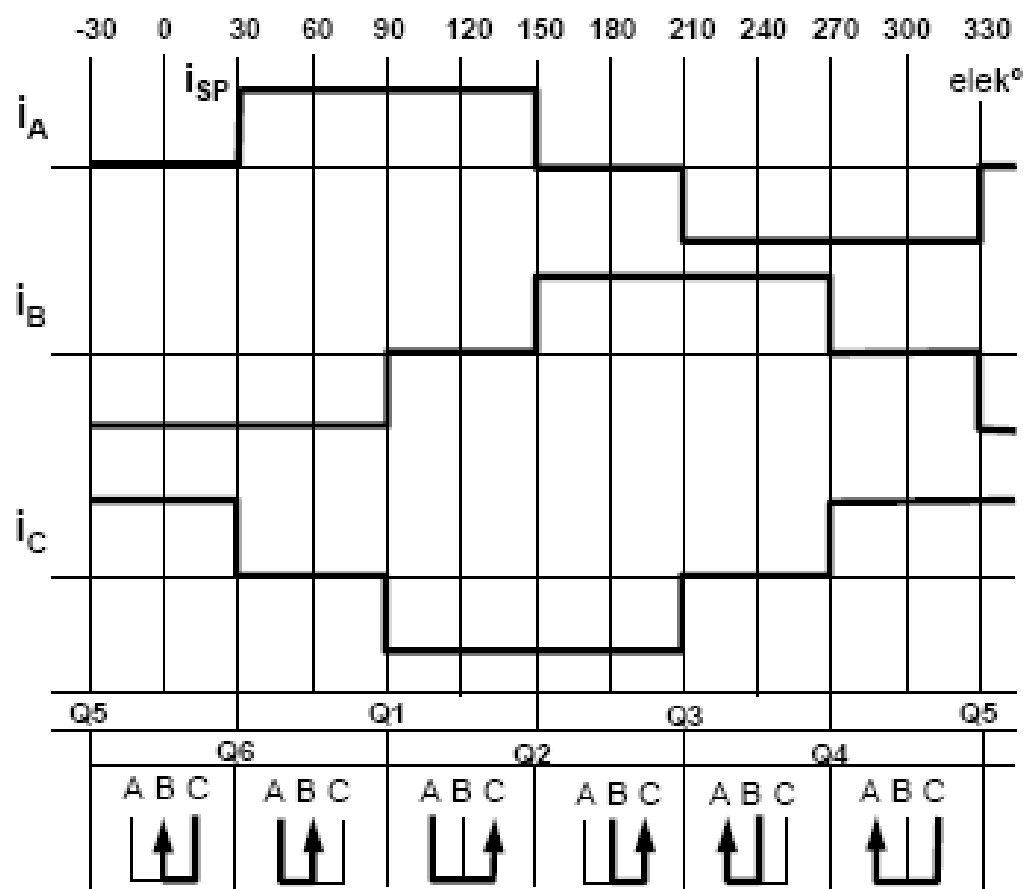
PRINCIP PWM



- Koristi se pravougaoni signal, promenom vremena trajanja signala (signal width) i frekvencije impulsa postiže se zaobljeniji izgled finalne krive
- Upravljanje impulsno PWM, promenom jačine struje
- Poređenjem signala “testere” (modulacijski signal) sa sinusnom funkcijom (referentni signal) dobija se PWM signal, 1 se dobija kada je referentni signal veći od modulacijskog i obrnuto.

BRUSHLESS DC MOTORI

- Oblici faznih struja u zavisnosti od položaja rotora (pobudnog toka).

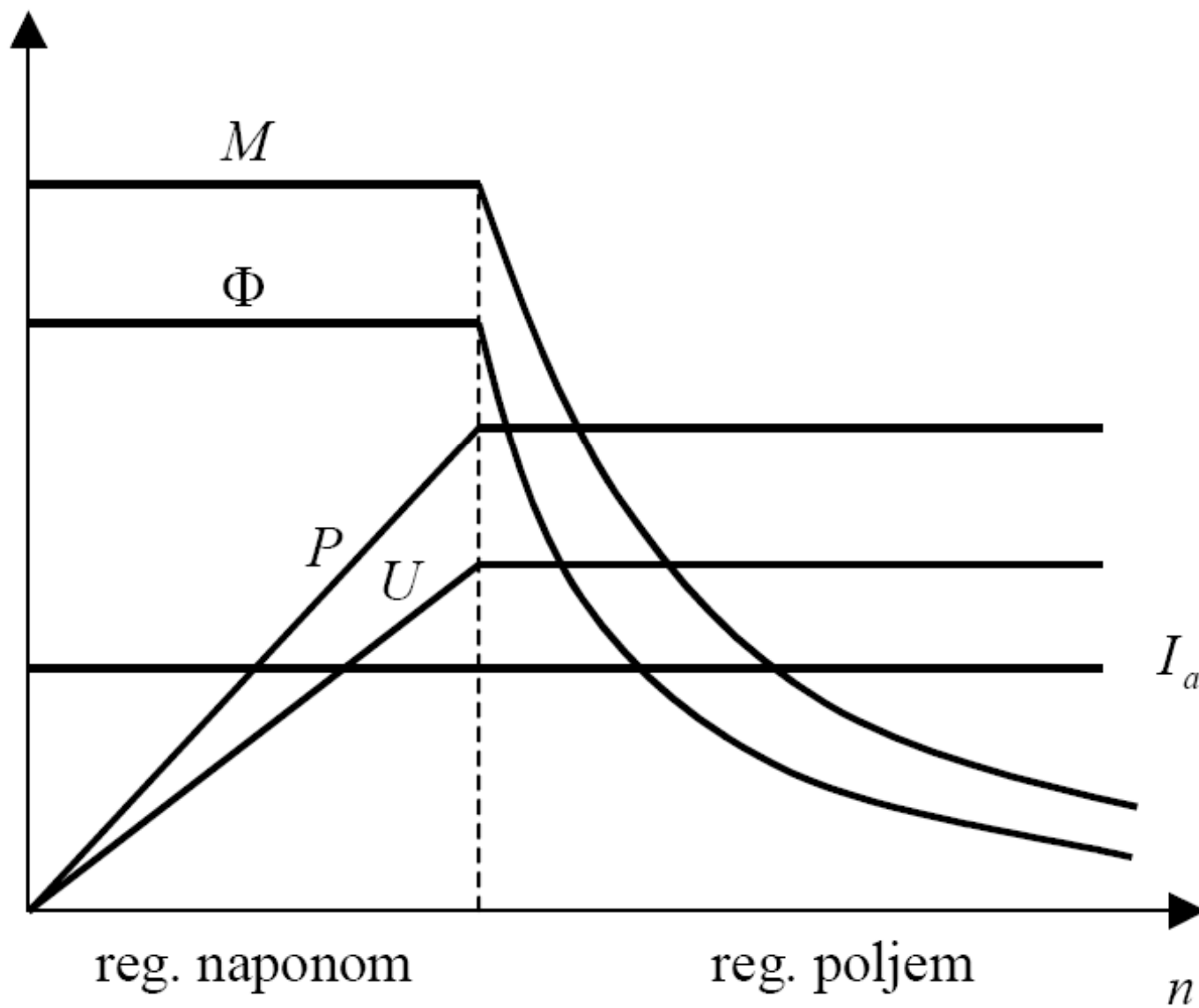


UPRAVLJANJE BRZINOM OBRTANJA

- Brzina obrtanja motora sa nezavisnom pobudom

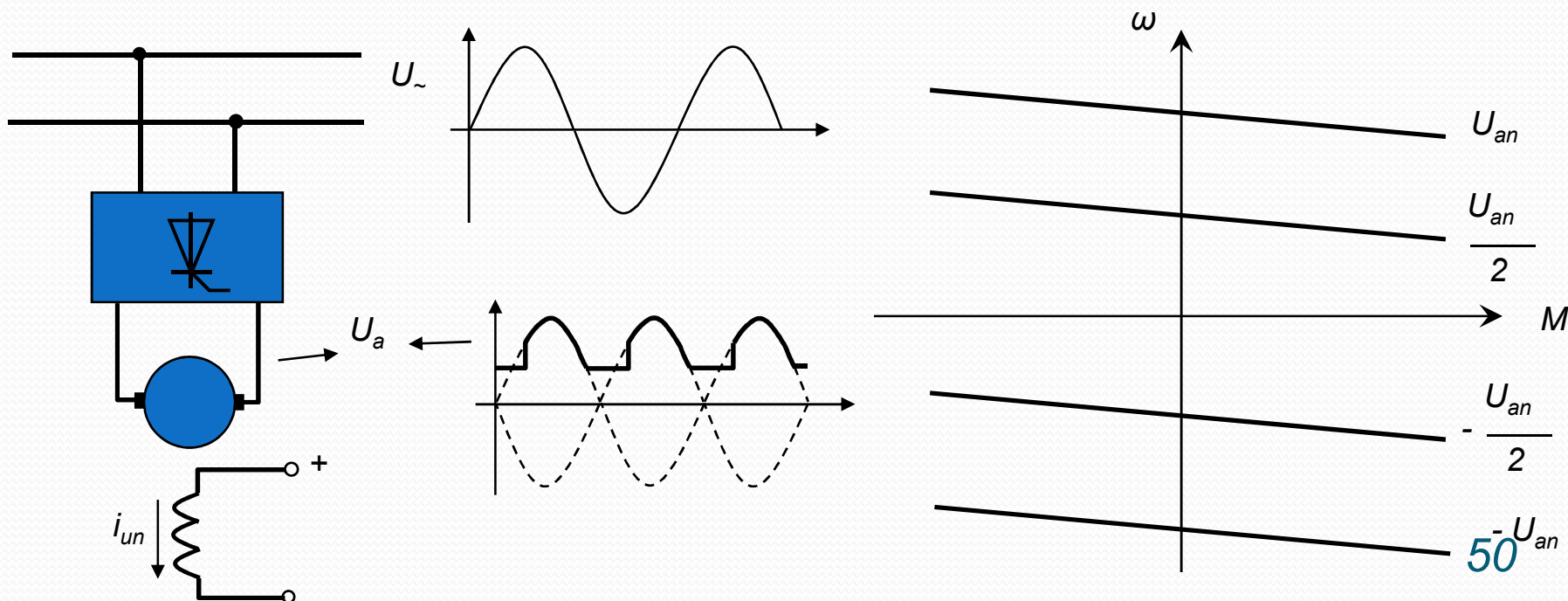
$$\omega = \frac{U_a}{k_e \Phi} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi^2} M$$

- Budući su konstante k_e i k_m određene konstrukcijom motora, iz izraza se zaključuje da se brzinom obrtanja može upravljati na dva načina:
 - promenom napona armature (U_a): od **0** do **v_{nazivno}** uz **$i_u = \text{const.}$**
 - promenom struje pobude **i_u** , tj. fluksa (Φ): do **$2v_{\text{nazivno}}$** uz **$U_a = \text{const.}$**
- Ukoliko se u armaturni krug postavi spoljni otpor, taj otpor, sa stanovišta karakteristike $\omega = f(M)$, ima isti uticaj kao i otpor armature (R_a).
- To znači da se i dodavanjem otpora u armaturni krug može upravljati brzinom. Iako se takav način koristio u starim elektromotornim pogonima, u novim pogonima se ne koristi zbog slabog stepena iskorišćenja pri upravljanju otporom i velikih gubitaka na dodatnom otporu.



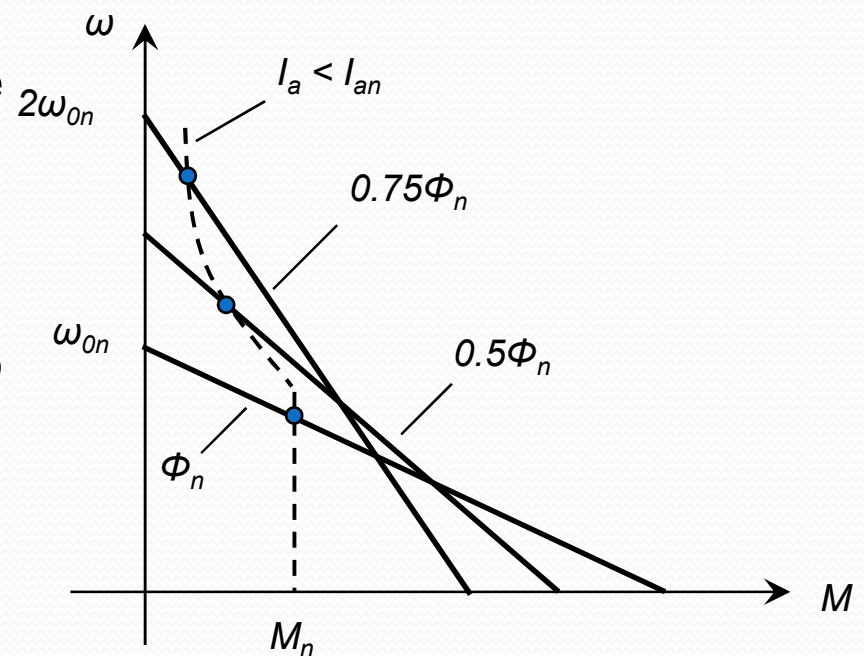
1. PROMENA NAPONA ARMATURE

- Promenom U_a upravlja se brzinom DC motora do njegove nazivne brzine.
- Napon armature se menja: tiristorski konvertor – AC/DC ispravljač (nekad Vard-Leonardova grupa) ili tranzistorski čoper – DC/DC konvertor, pomoću kojeg je brzinu moguće i reverzirati.
- Slika: principijelna šema upravljanja s jednofaznim tiristorskim konvertorom, oblici naizmeničnog i regulisanog jednosmernog napona, te momentne karakteristike za različite napone armature (**Konstantan moment**).



2. PROMENA FLUKSA

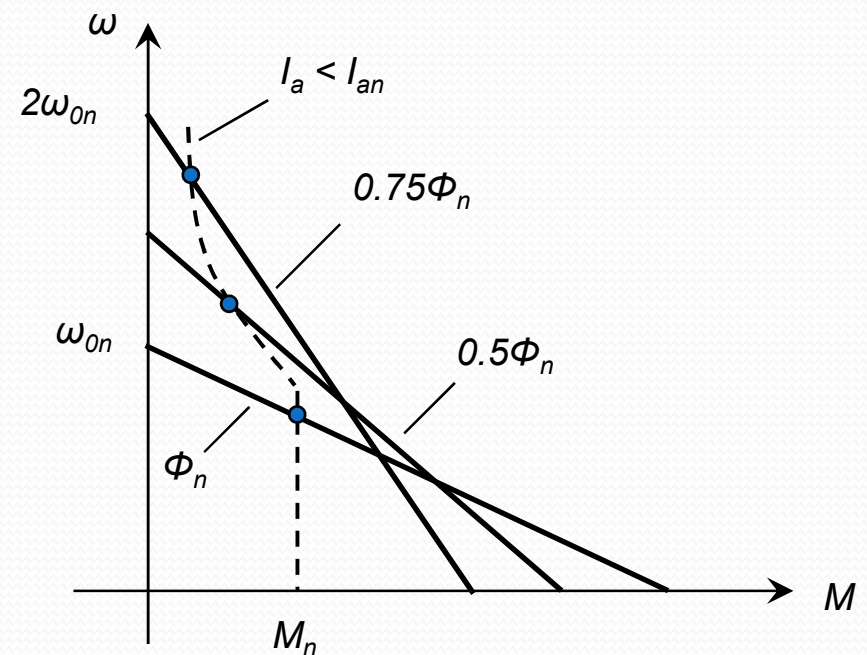
- Uz konstantan napon armature (U_a), promenom struje pobude menja se fluks (Φ) i upravlja brzinom iznad njene nominalne vrednosti.
- **Konstantna snaga.**
- Zbog problema zasićenja gvožđa promena fluksa može se ostvariti samo tako da se on smanjuje ($\Phi < \Phi_n$).
- Smanjivanjem fluksa povećava se brzina praznog hoda, a karakteristike postaju sve strmije.



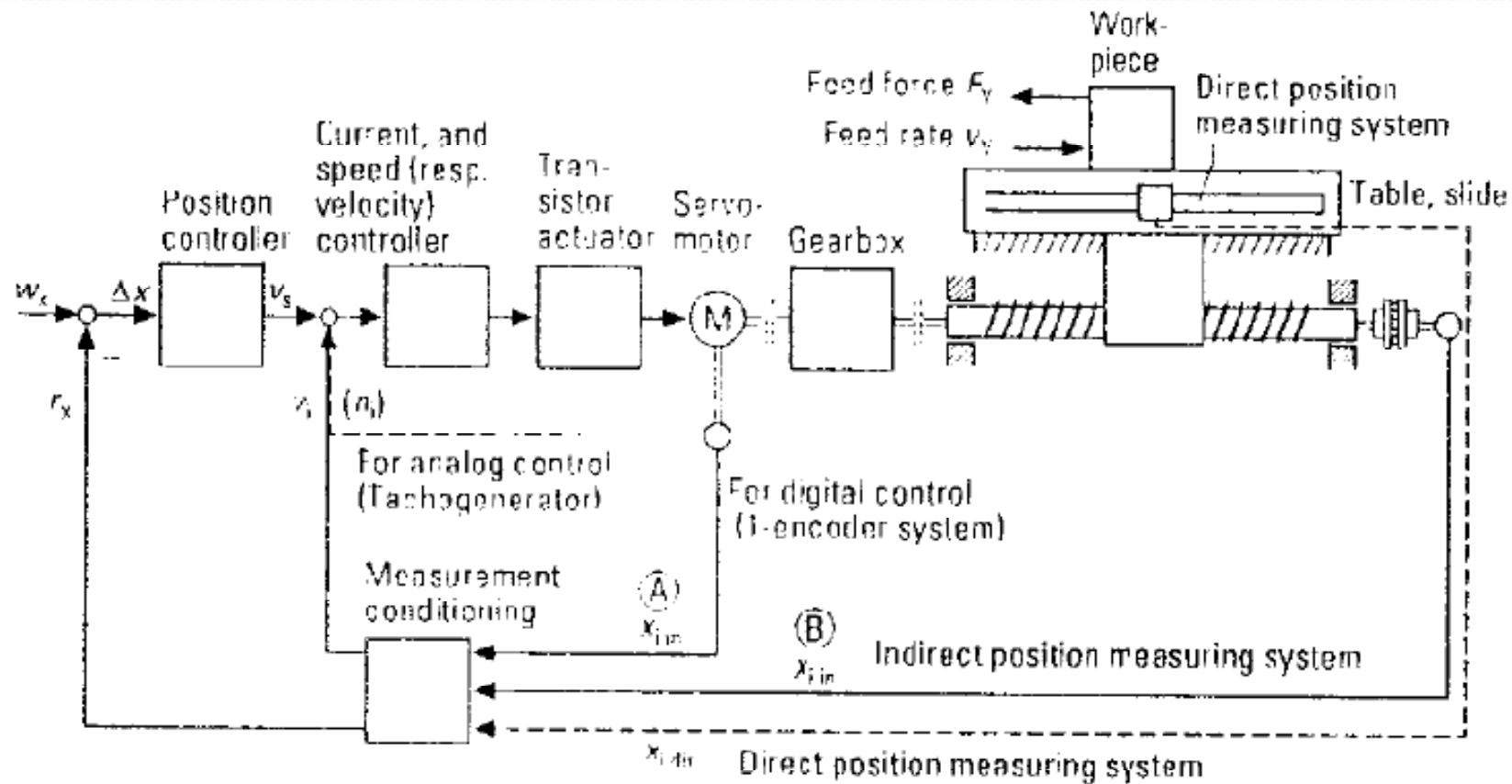
$$\omega = \frac{U_a}{k_e \Phi} - \frac{R_a}{k_e k_m \Phi^2} M$$

2. PROMENA FLUKSA

- Ako bi se pri smanjenom fluksu zadržao konstantan moment ($M = k_m \Phi I_a$) povećala bi se armaturna struja a time i gubici, odnosno zagrevanje motora.
- Zato se smanjuje moment opterećenja tako da struja armature ne premaši nominalnu vrednost, $I_a < I_{an}$.
- Na slici je ograničenje po momentu usled ograničenja struje armature.



Regulacija pozicije i brzine 1



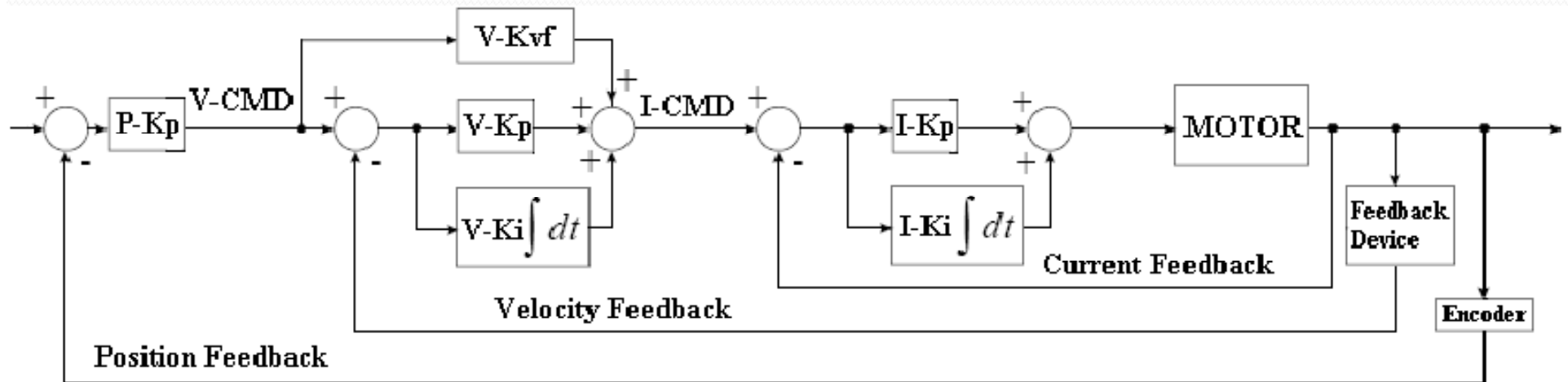
x_{iin} Indirectly measured actual position value

(A) with 1-encoder system at the motor

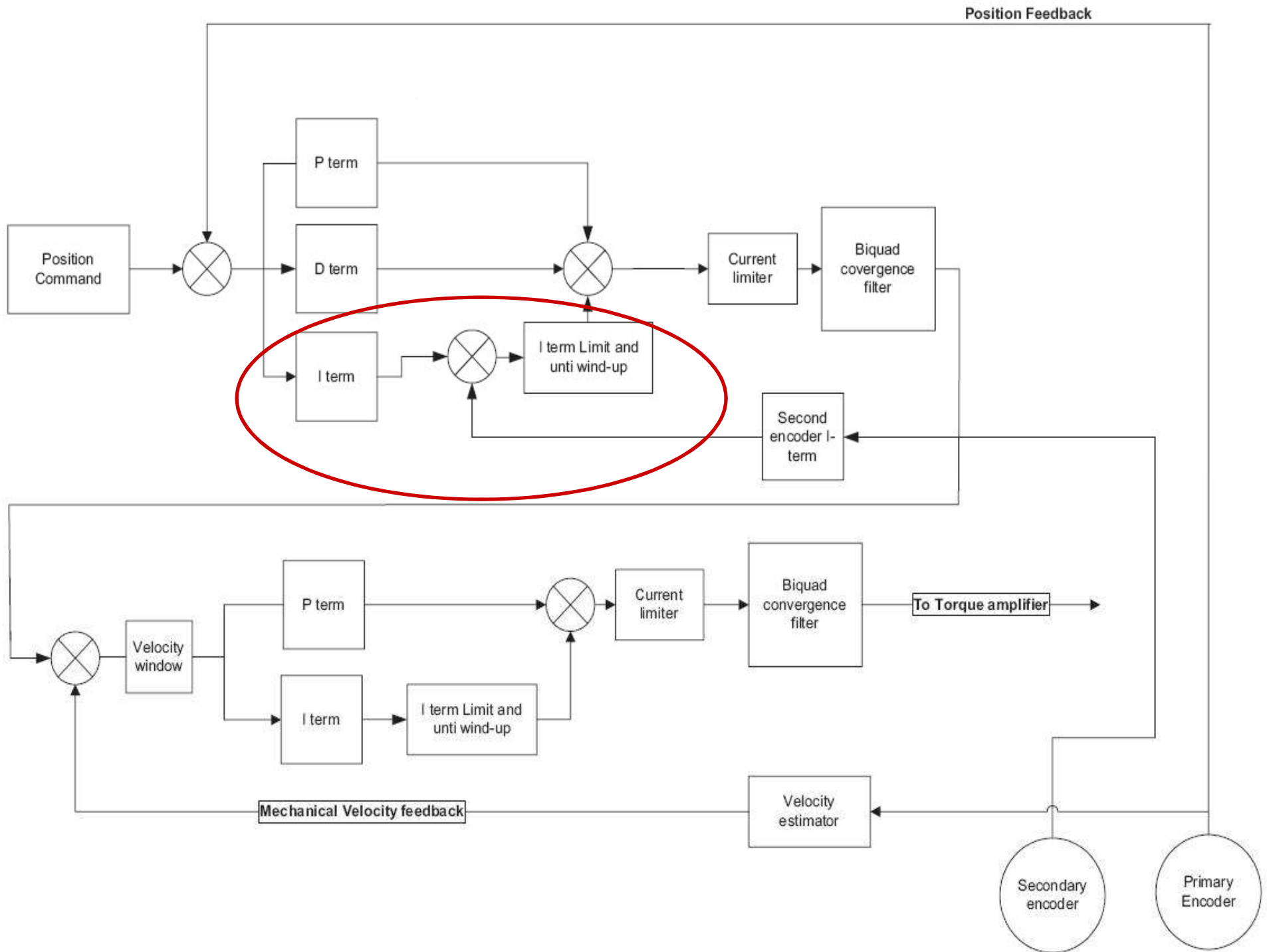
(B) with actual position value encoder at the lead screw or on the gearbox

x_{dir} Directly measured actual position value

Regulacija pozicije i brzine 2



- Tri regulacione petlje: strujna, brzinska i poziciona
- Spoljašnja petlja: Regulacija pozicije, (PID), merenje pozicije enkoderom
- Središnja petlja: Regulacija brzine, PI regulacija, V-Kvf vrednost upravljanja u ustaljenom stanju (bez poremećaja), ako je greška nula da strujni regulator nema ulaz 0, ograničava se vrednost struje, merenje brzine enkoderom ili tahogenerat., prelazni režim struje je završen pre procesa regulacije brzine
- Unutrašnja petlja: Strujni regulator, PI regulacija, dinamika strujnih procesa je mnogo brža nego kod mehaničkih, finija regulacija, povratna sprega merenjem struje, pretvara se naponsko upravljanje u strujno.



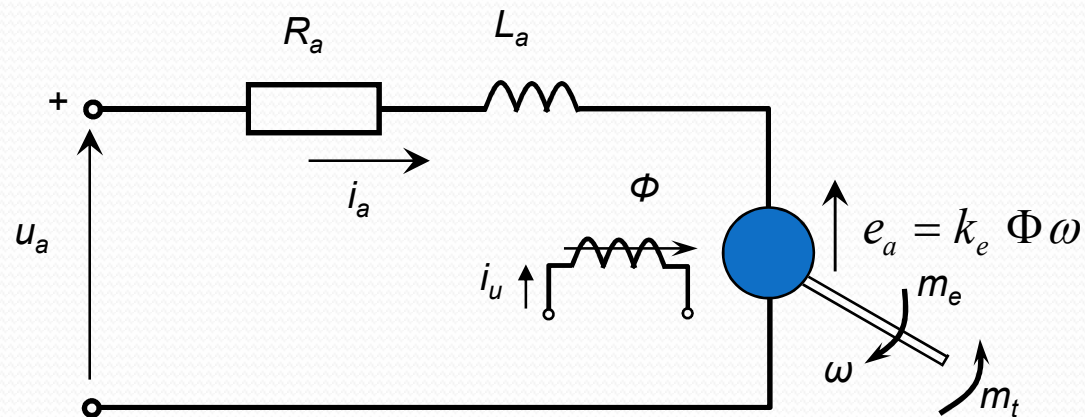


Regulacija pozicije i brzine 3

- “Position Command” - zadana trajektorija kretanja po svakoj osi, sa merenjem stvarne pozicije (direktno ili indirektno) formira grešku koja je ulaz u regulator pozicije
- **Ograničenje struje** na integralnom dejstvu: prilikom integraljenja greške, pri neograničenom procesu, generiše se upravljanje koje je nemoguće da se ostvari (prevelika vrednost struje), efekat koji se zove **windup**
- Sekundarni enkoder ima ulogu integrišućeg dejstva, postavlja se direktno na vratilo motora
- Primarni enkoder (u procesu) meri poziciju za zatvaranje sprege u pozicionoj petlji kao i brzinu (derivativno dejstvo) za zatvaranje sprege u brzinskoj petlji
- Izlaz iz pozicione petlje je ulaz u brzinsku petlju

FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Definirati funkciju prenosa DC motora s nezavisnom (konstantnom) pobudom upravljanoj strujom rotora i_a , kao zavisnost brzine rotora (ω) od napona rotora (u_a).
- Šematski prikaz motora:

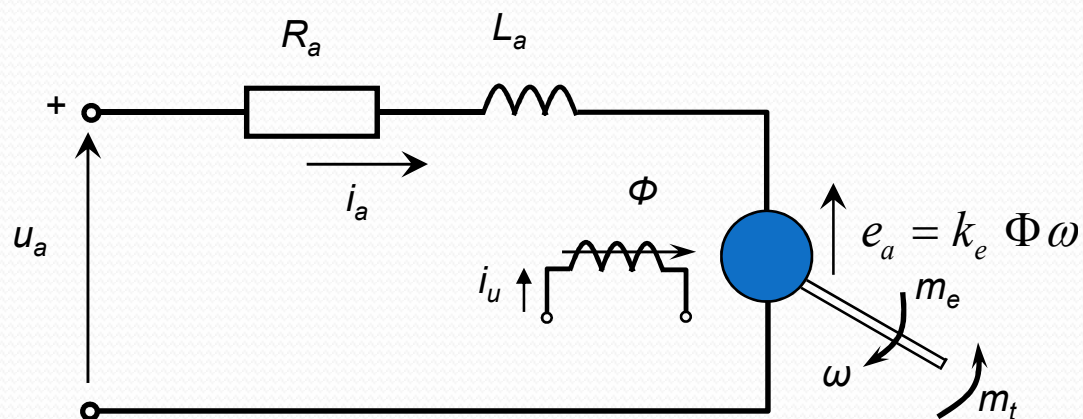


FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Uz konstantnu pobudnu struju i_u , odnosno fluks Φ , naponska jednačina armaturnog kola je:

$$u_a = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} + e_a ,$$

gde je indukovani napon: $e_a = k_e \Phi \omega$



FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Za matematički opis dinamičkog ponašanja DC motora potrebno je napisati i jednačinu kretanja, koja uz zanemareno trenje glasi:

$$J \frac{d\omega}{dt} = m_e - m_t$$

J – moment inercije, **m_t** – moment tereta i **m_e** - elektromagnetni moment motora koji je jednak:

$$m_e = k_m \Phi i_a$$

FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Uz konstantan fluks Φ izrazi za indukovani napon i elektromagnetni moment se pojednostavljaju:

$$e_a = K_e \omega \quad m_e = K_m i_a$$

gde konstante K_e i K_m sadrže i fluks Φ .

- Matematički model DC motora s konstantnom nezavisnom pobudom opisan je s naponskom jednačinom i jednačinom kretanja:

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_a} (u_a - i_a R_a - K_e \omega)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} (K_m i_a - m_t)$$

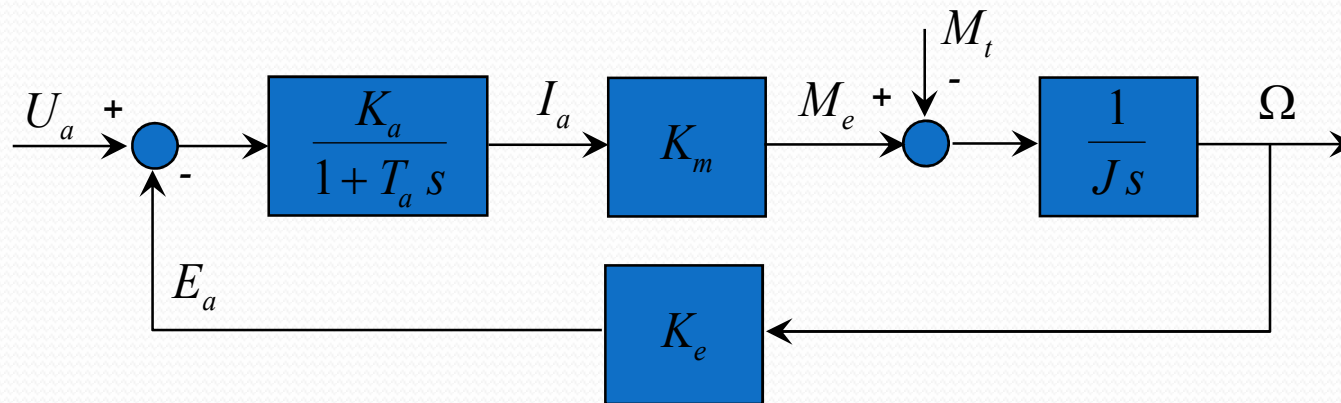
FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Ove DJ se Laplaceovom transformacijom prevode u algebarske jednačine

$$I_a(s) = \frac{K_a}{1 + sT_a} [U_a(s) - K_e \Omega(s)] \quad \Omega(s) = \frac{1}{J_s} [K_m I_a(s) - M_t]$$

gde su: $K_a = 1/R_a$; $T_a = L_a/R_a$.

- Sada se formira blok dijagram koji definiše funkciju prenosa DC motora s konstantnom pobudom:



FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Sa blok dijagrama se mogu izvesti dve funkcije prenosa:

1) Odziv brzine obrtanja na naglu (odskočnu) promenu napona rotora

$$\frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1}{K_e} \frac{1}{1 + sT_m + s^2 T_a T_m}$$

2) Odziv brzine obrtanja na naglu (odskočnu) promenu tereta

$$\frac{\Omega(s)}{M_t(s)} = -\frac{T_m}{J} \frac{1 + sT_a}{1 + sT_m + s^2 T_a T_m}$$

$$T_a = \frac{L_a}{R_a}$$

- električna vremenska konst. armaturnog namotaja

$$T_m = \frac{J}{K_a K_e K_m}$$

– elektromehanička vremenska konstanta

FUNKCIJA PRENOSA DC MOTORA

- Odziv brzine obrtanja DC motora je u funkciji njegovih vremenskih konstanti.
 - Ako je $T_m > 4T_a$ odziv je aperiodičan, $T_m = 4T_a$ odziv je kritično aperiodičan: $(2s+1)^2$
 - Ako je $T_m < 4T_a$ odziv je oscilatoran

