



Senzori i aktuatori

Koračni motori



Sadržaj predavanja

- 1) Osnove koračnih motora
- 2) Prednosti koračnih motora
- 3) Nedostaci koračnih motora
- 4) Osobine koračnih motora
- 5) Podela koračnih motora
- 6) Permanentnomagnetski koračni motori
- 7) Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori
- 8) Trofazni permanentnomagnetski koračni motori
- 9) Prednosti PM koračnih motora
- 10) Nedostaci PM koračnih motora
- 11) Hibridni koračni motori
- 12) Matematički model hibridnog koračnog motora



Osnove koračnih motora

- **Motivacija:** proizvesti motor koji bi se mogao neposredno upravljati pomoću digitalnog računara i čiji bi se izlazni signal neposredno dovodio računaru bez složenih A/D i D/A konvertora.
- Od takvih motora se zahtevaju diskretni, odnosno koračni mehanički pomaci, odakle i potiče naziv koračni motori (eng. stepper motors).
- Koračni motori su elektromehanički konvertori energije, koji impulsnu, odnosno koračnu električku pobudu pretvaraju u koračni mehanički pomerak.
- Izrađuju se u rotacionoj i translacionoj realizaciji (preovladava rotacionoj).
- Na malim koračnim brzinama rotor se zaustavlja na svakom koračnom položaju.



Osnove koračnih motora

- Na srednjim brzinama nema zaustavljanja rotora na svakom koračnom položaju, ali ugaona brzina osciluje zavisno od položaja.
- Što se koračna brzina više povećava, oscilacije ugaone brzine postaju sve manje, tako da na velikim koračnim brzinama ugaona brzina teži konstantnoj brzini.
- Pojam “**velika koračna brzina**” je relativan, a zavisno od konstrukcije, kod komercijalnih motora se kreće od 10^2 do 10^4 koraka u sekundi [k/s].
- Koračni motor je električki motor bez komutatora.
- Svi namotaji su smešteni na statoru, a rotor je permanentni magnet



Osnove koračnih motora

- Komunikacijom se upravlja od spolja kontrolerom, pri čemu su motori i kontroleri dizajnirani na način da motor može doći u bilo koju fiksnu poziciju.
- Većina koračnih motora može koračati na audio frekvencijama, i primenom odgovarajućeg kontrolera mogu se startovati i zaustavljati “on a dime” na upravljanim orijentacijama.



Prednosti koračnih motora

- Niska cena
- Male dimenzije i masa
- Velike funkcijske mogućnosti
- Često se isporučuju integrisano sa radnim mehanizmom
- Pretvara digitalne ulazne impulse u analogno kretanje:
 - uključenje napona naredne faze - pomak za 1 korak,
 - broj koraka = broj upravljačkih impulsa (jedan korak odgovara određenom fiksnom uglu zakreta).
- Ugao rotacije motora je proporcionalan ulaznom impulsu



Prednosti koračnih motora

- Odziv rotora na digitalne impulse omogućava upravljanje u otvorenoj petlji (upravljanje položajem radne osovine bez povratne veze → jednostavno je realizovati sistem upravljanja većim brojem motora (roboti, pisači)).
- Ne akumulira grešku položaja
- Jednostavne su konstrukcije i ne zahtevaju održavanje
- Motor ima puni moment u zastoju (ako su namotaji napajani).



Prednosti koračnih motora

- Precizno pozicioniranje i ponovljivost pokreta, budući da dobri koračni motori imaju grešku od 3-5% od ukupnog broja koraka
- Odličan odziv na zalet, zaustavljanje i promenu smera
- Veoma pouzdani jer nemaju kontaktne četkice u motoru. Osim toga, životni vek motora jednostavno zavisi od životnom veku ležajeva.
- Moguće je postići veoma sporu sinhronu brzinu rotacije kada je osovina direktno opterećena (teret na osovini).
- Može realizovati široko područje raspoloživih brzina jer je brzina proporcionalna frekvenciji ulaznih impulsa.



Prednosti koračnih motora

- Rezolucija
- Odziv jednog koraka
- Tačnost
- Statički moment
- Dinamički moment
- Start stopni moment.
- Rotacioni koračni motor
 - N_k [kor/okr] - broj koraka po okretaju,
 - $k=360^\circ/N_k$ [°] - iznos koraka u stepenima
- Linearni koračni motor
 - x_k [mm] - iznos koraka

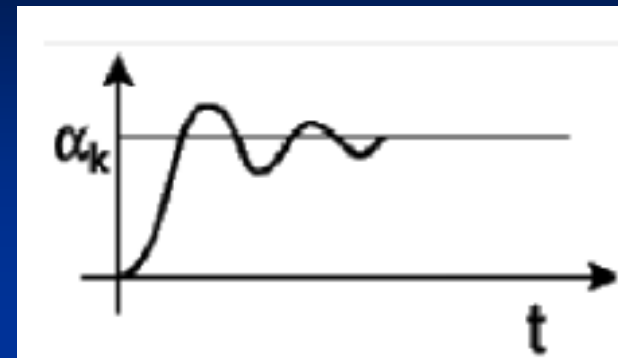


Nedostaci koračnih motora

- Fiksni korak
- Razmerno mala efikasnost
- Ograničene mogućnosti pokretanja tereta sa velikim momentom inercije.
- Moment trenja i aktivni teret mogu povećati grešku položaja (moguć je gubitak koraka - posledica je akumulirana greška položaja).
- Mogućnost pojave rezonance ako nije adekvatno upravljanje
- Teško ih je upravljati na velikim brzinama.

Osobine koračnih motora

- Mogućnost mikrokoračanja
 - upravljanje iznosom struja faza
 - različiti položaji vektora polja
 - deljenje koraka



Odziv jednog koraka

- 1. faza uključena (ostale faze isključene)
- 1. faza se isključi i 2. faza se uključi
 - pomak rotora za 1 korak
- Iz odziva jednog koraka vidljive su sledeće karakteristike motora:
 - brzina odziva,
 - oscilatornost,
 - tačnost



Podela koračnih motora

- Podela koračnih motora se vrši prema:
 - vrsti pobude;
 - broju faza;
 - broju polova;
 - načinu kretanja.
- Što se tiče vrste pobude koračni motori se razlikuju prema:
- Načinu stvaranja magnetnog polja:
 - elektromagnetna pobuda
 - pobuda permanentnim magnetima.
- Načinu pobude:
 - pobuda na rotoru (aktivni koračni motori),
 - pobuda na statoru.



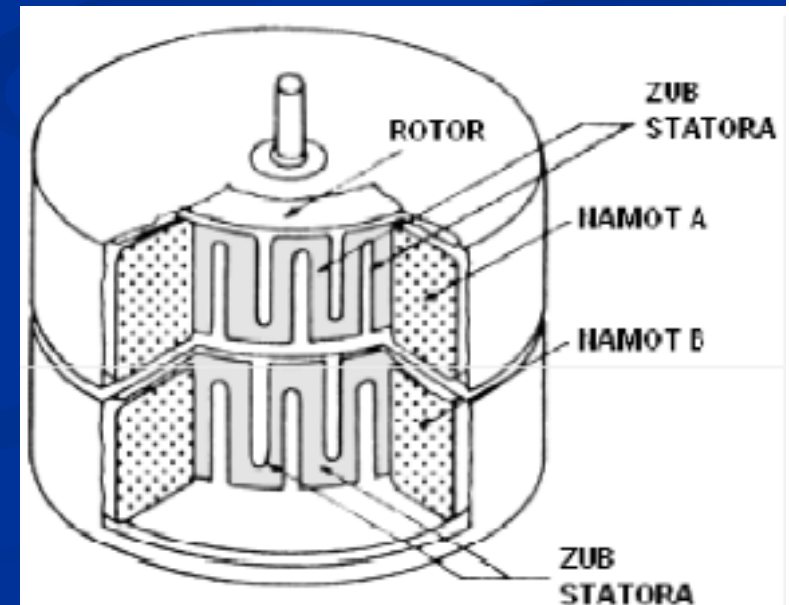
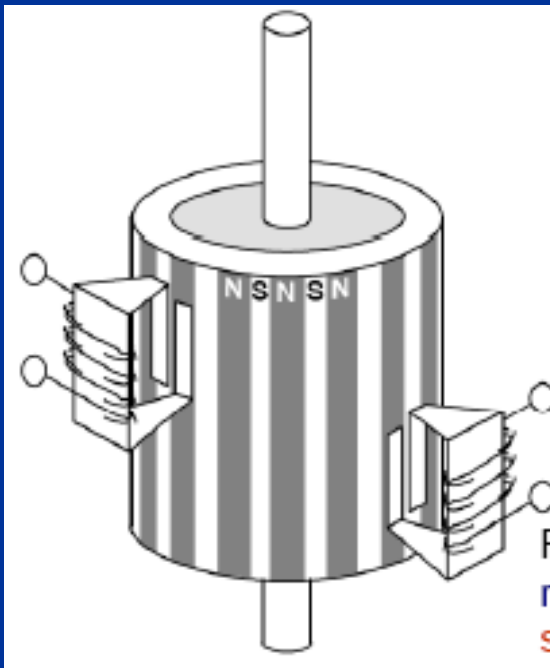
Permanentnomagnetski koračni motori

- Permanentno-magnetni koračni motori imaju radijalni permanentno-magnetni rotor i višefazno izvedeni elektromagnetni stator.
- Permanentni magneti su na rotoru. Jednostavni su za realizaciju i imaju nižu cenu.
- Permanentnomagnetski rotor se postavlja u smeru resultantnog statorskog polja i na taj način se obavlja koračna rotacija.
- Broj faza: od 8-12, broj pari polova: 1-12, broj paketa statora 2-4.



Permanentnomagnetski koračni motori

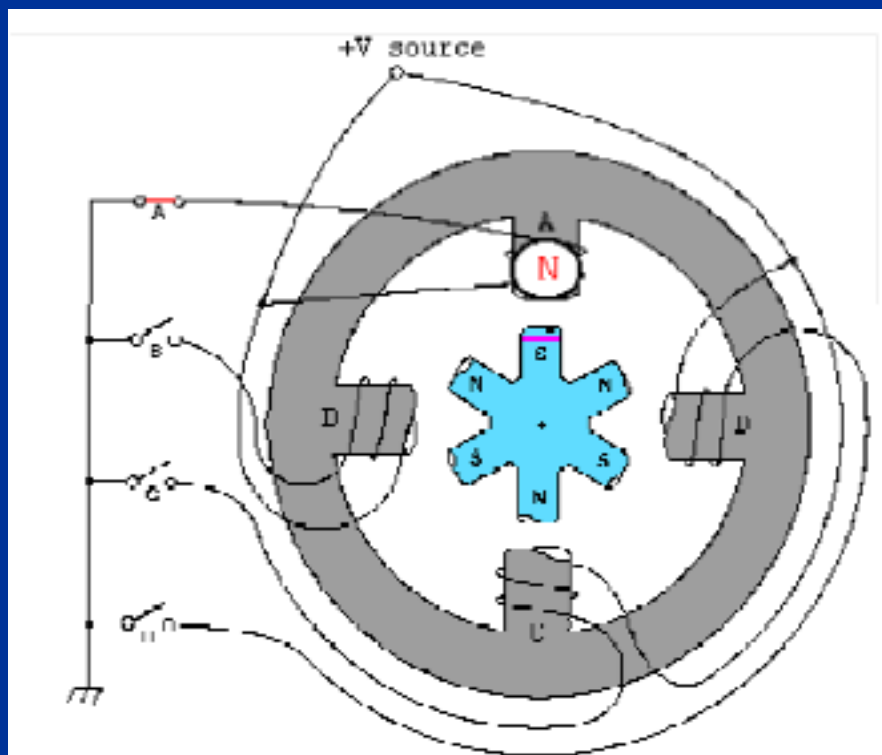
- Ova vrsta koračnih motora ima malu rezoluciju - tipični koračni uglovi između 7.5° i 15° .
- Rotor je magnetiziran sa alternativnim S i N polovima.
- Povećana gustina magnetnog fliksa omogućuje poboljšanje momentnih karakteristika.





Princip rada

- Zatvaranjem prekidača u navedenom redosledu:
 - rotacija rezultantnog vektora magnetskog polja,
 - zakretanje rotora prema vektoru magnetskog polja.
- Kretanje smerom obrnutim od kazaljke na satu.



Rezolucija:

$$\alpha_k = \frac{360}{N_{su}} = \frac{360}{2p_r q_s},$$

gde su:

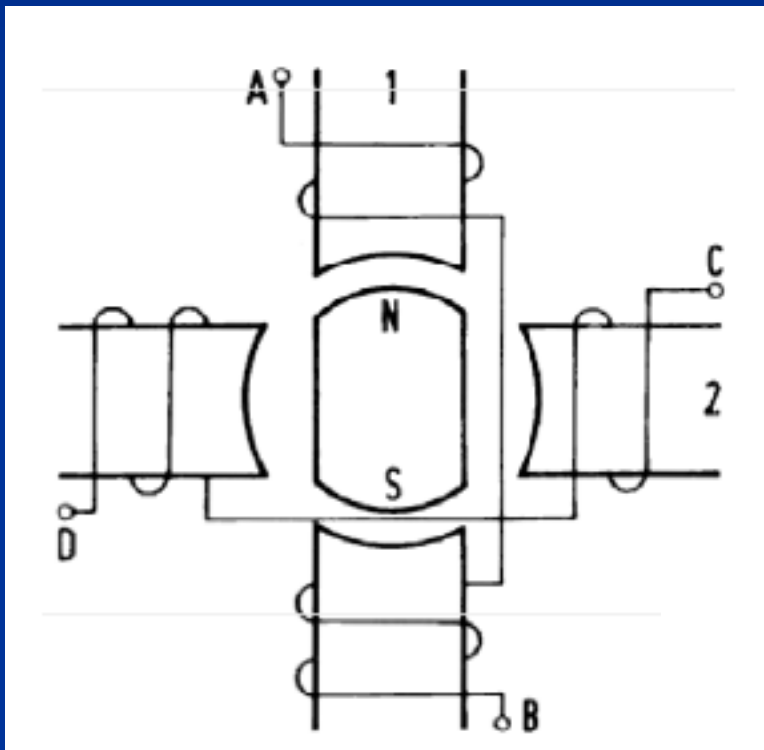
N_{su} – ukupan broj zubi svih statorskih paketa,

p_r – broj pari polova rotora,

q_s – broj statorskih paketa¹⁵

Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori

- Najjednostavniji primer ove vrste motora je dvofazni četvoropolni motor.



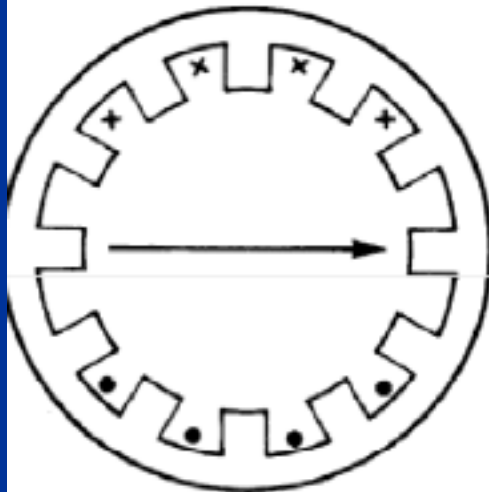
Korak	FAZA 1		FAZA 2	
	A	B	C	D
1.	+(+)	-(-)	0(0)	0(0)
2.	0(0)	0(0)	+(-)	-(+)
3.	-(-)	+(+)	0(0)	0(0)
4.	0(0)	0(0)	-(+)	+(-)

Dvofazni permanentnomagnetski koračni motor - koračni hod.
(oznake u zagradama → drugi smer brzine okretanja)

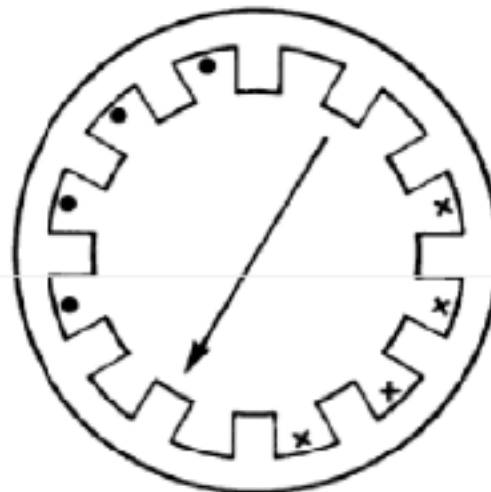


Trofazni permanentnomagnetski koračni motori

- Složenija konstrukcija trofaznog motora sa permanentnomagnetnim rotorom.
- Stator nema izražene polove
- Namotaj je u osnovi kao trofazni indukcijski motor.
- Pobuđivanjem svake faze pojedinačno, nastaje rotacija od $2\pi/3$ (koračni hod od $2\pi/3$).



1. Korak



2. Korak

Korak	FAZE		
	I	II	III
1	+	0	0
2	0	+	0
3	0	0	+



Prednosti PM koračnih motora

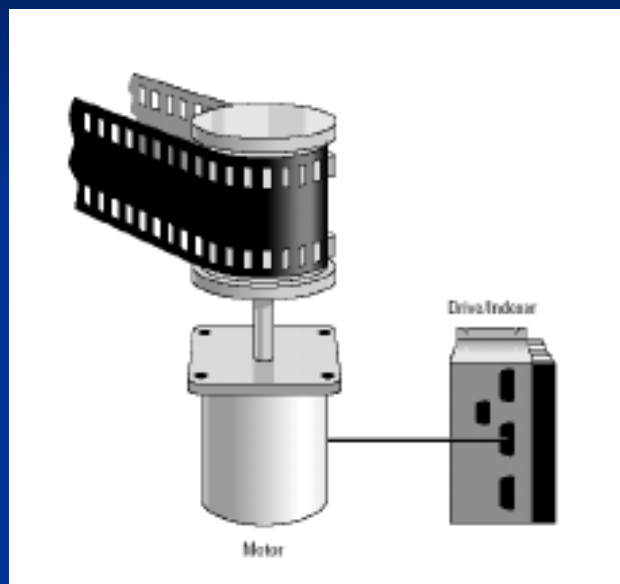
- Postoji statički moment i kad nije priključeno napajanje (u nepobuđenom stanju imaju otporni moment, tj. mogu se opteretiti momentom po vrednosti otprotnog momenta, a da se ne izazove kontinuirani pomak).
- Veliki odnos statičkog momenta i dimenzija.
- Potrebna manja snaga za rad.
- Veće prigušenje odziva
- Mehanička jednostavnost.
- Niska cena



Nedostaci PM koračnih motora

- Mali odnos obrtnog momenta motora i momenta inercije.
- Prevelika pobuda može izazvati demagnetizaciju rotora, koji u poređenju sa rotorima ostalih koračnih motora, imaju veliku inerciju.
- Snaga permanentnog magneta se menja.
- Mala maksimalna brzina okretanja.
- Velika kontra elektromotorna sila.
- Nisu pogodni za male korake

Aplikacije PM koračnih motora

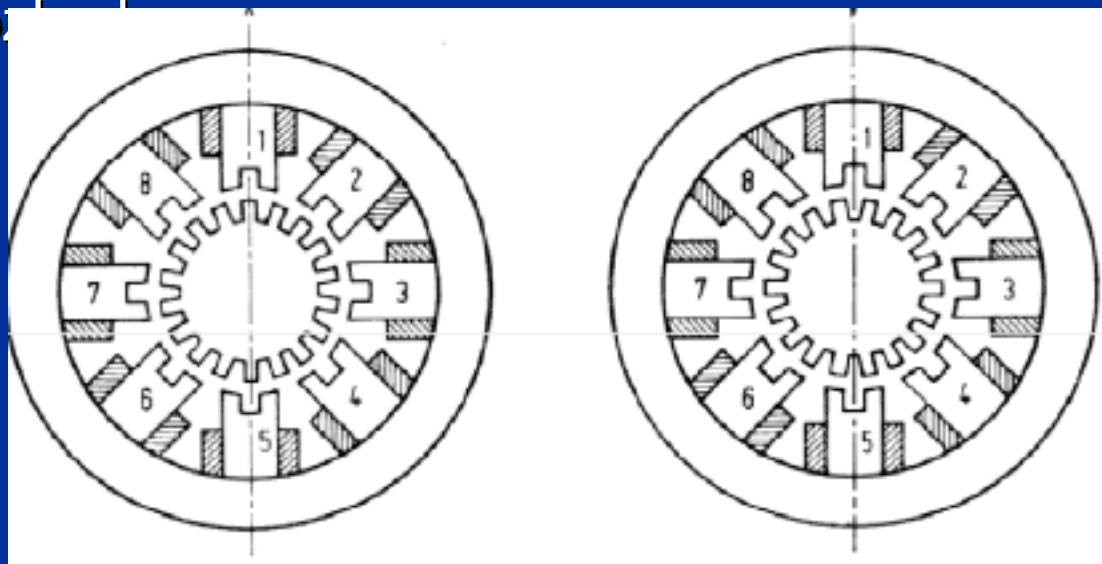


- Film Drive
- Optički skener
- Printeri
- ATM strojevi

- I. V. pumpa
- Analizator krvi
- FAX strojevi
- Termostat

Hibridni koračni motori

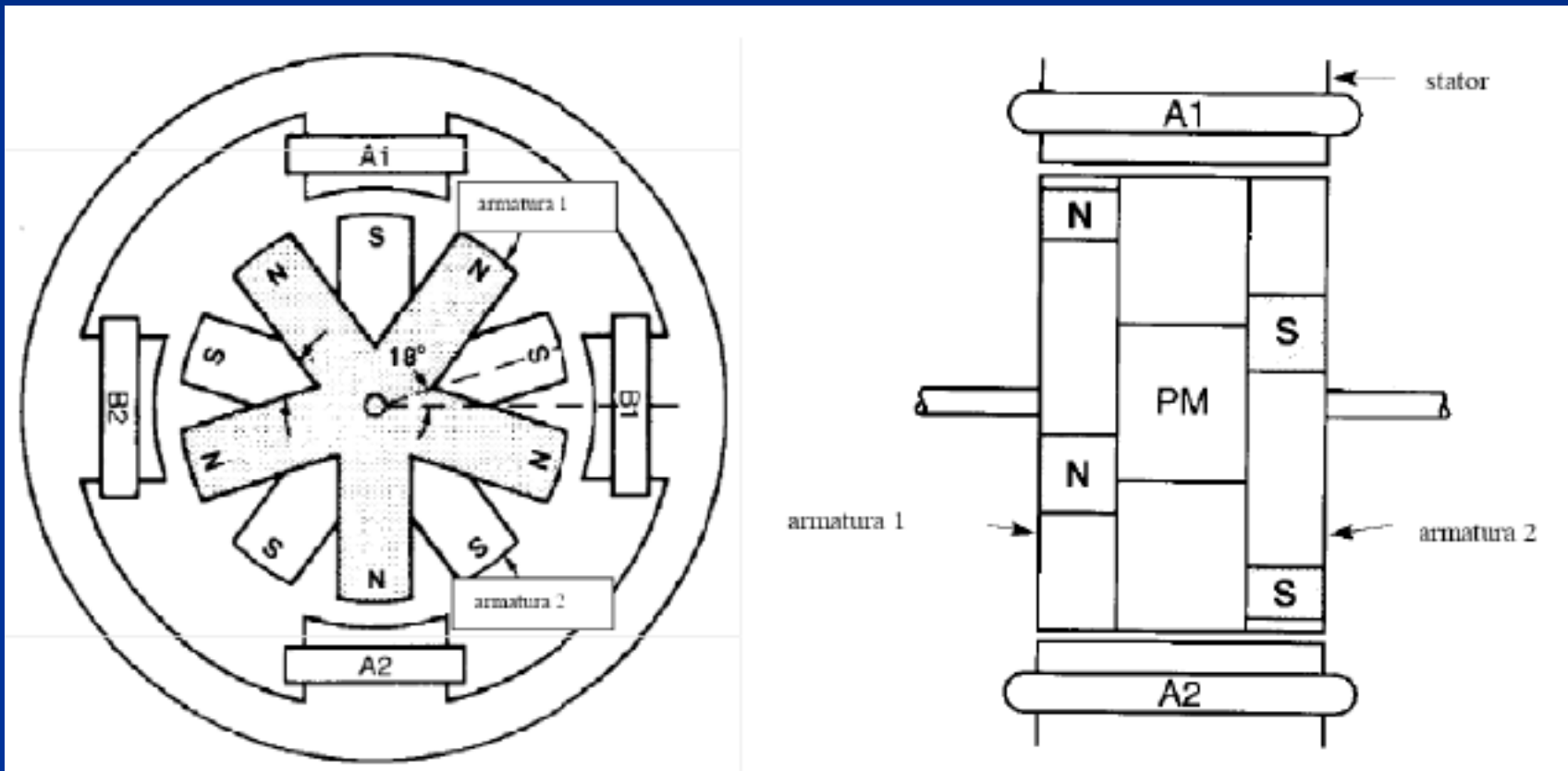
- Kombinacija načela na kojima se zasniva rad permanentnomagnetnih i motora sa promenljivom **reluktansom (mera otpora materijala pri uspostavljanju magnetskog polja)**
- Sa nazubljenim statorom na kojem se nalaze elektromagnetni polovi i nazubljenim rotorom postižu se dobra svojstva promenljive reluktanse i permanentnog magnetskog polja.
- Zubi su najčešće istoimeni permanentni magneti ali ponekad mogu biti i bez polova



Poprečni presek osmopolnoga hibridnog motora, dva susedna položaja

Hibridni koračni motori

Prikaz hibridnog motora i njegov presek





Matematički model hibridnog koračnog motora

- Koračni motor - nelinearni diskretni element
- **Matematički model**
 - opis rotacije samo bitnih pojava koje utiču na ponašanje,
 - opis dvofaznih koračnih motora,
 - višefazni koračni motori svode se kod modeliranja na dvofazne.
- **Pojednostavljeni matematički opis uz pretpostavke:**
 - magnetski materijal nije u zasićenju,
 - međuinuktivnosti faza jednake su nuli,
 - radni otpori i induktivnosti faza su jednaki,
 - raspodela magnetnog fliksa u vazdušnom prostoru i talasni oblik momenta motora su sinusoidalni.



Matematički model hibridnog koračnog motora

■ Jednačine pobudnih namotaja faza:

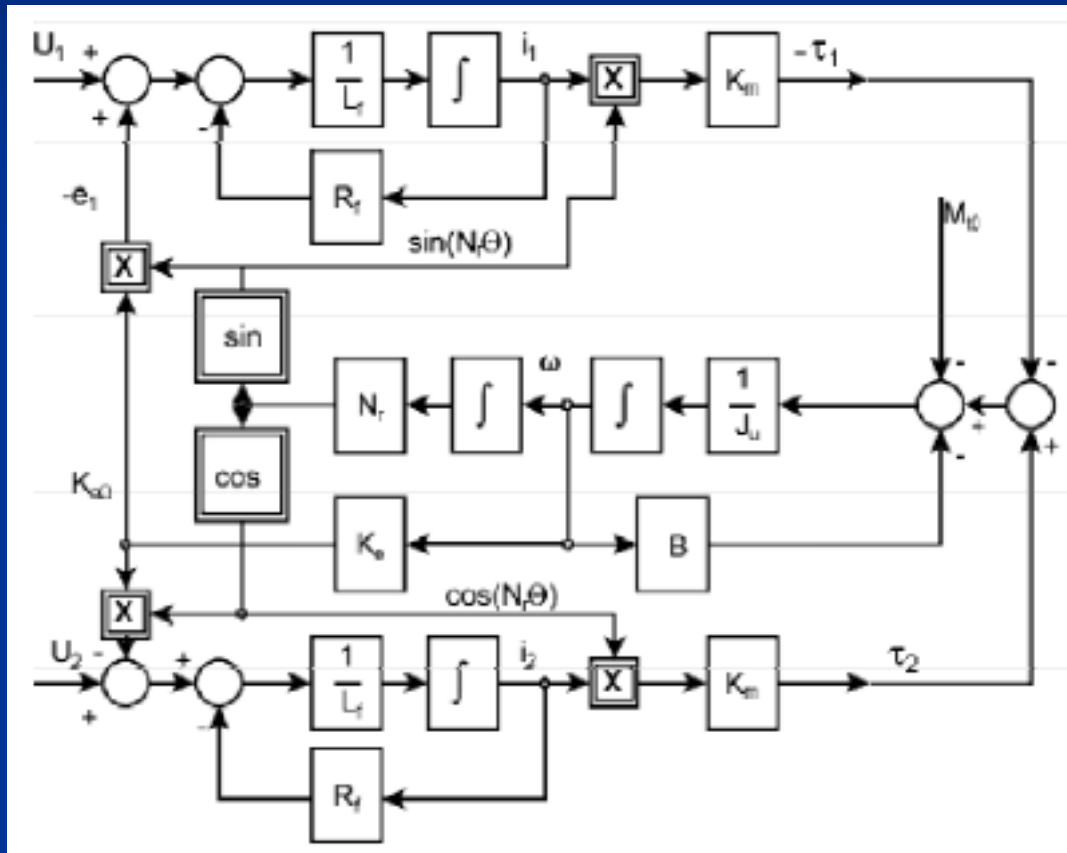
$$\begin{aligned}u_a &= R_f i_a + \frac{d\psi_a}{dt}, \\u_b &= R_f i_b + \frac{d\psi_b}{dt}, \\ \psi_a &= L_f i_a + \psi_{af}, \\ \psi_b &= L_f i_b + \psi_{bf}, \\ \psi_{af} &= K_e \cos \theta_e, \\ \psi_{bf} &= K_e \cos\left(\theta_e - \frac{\pi}{2}\right), \\ \theta_e &= N_r \theta.\end{aligned}$$

gde su

- u_a, u_b - naponi faza A i B, [V],
- i_a, i_b - struje faza A i B, [A],
- R_f - otpor namotaja faze, [Ω],
- L_f - induktivnost namotaja faze, [H],
- ψ_a, ψ_b - ukupni B
- ψ_a, ψ_b - magnetni fluks faze A i B, [Wb],
- ψ_{af}, ψ_{bf} - magnetni fluks faze A i B izazvan permanentnim magnetima na rotoru, [Wb],
- K_e - konstanta motora, [Wb],
- N_r - broj zuba rotora,
- θ - mehanički ugao zaokreta rotora, [rad],
- θ_e - električni ugao zaokreta rotora, [rad].

Matematički model hibridnog koračnog motora

■ Nelinearna blok šema



$$\tau = \tau_a + \tau_b,$$

$$\tau_a = -K_m i_a \sin(N_r \theta),$$

$$\tau_b = -K_m i_b \sin\left(N_r \theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ = K_m i_b \cos(N_r \theta),$$

$$\tau = \tau_t + B\omega + J_u \frac{d\omega}{dt}.$$

$$u_a = R_f i_a + L_f \frac{di_a}{dt} + e_a,$$

$$u_b = R_f i_b + L_f \frac{di_b}{dt} + e_b,$$

$$e_a = \frac{d\psi_{af}}{dt} = -K_e N_r \omega \sin N_r \theta,$$

$$e_b = \frac{d\psi_{bf}}{dt} = -K_e N_r \omega \sin\left(N_r \theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ = K_e N_r \omega \cos(N_r \theta),$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt}.$$



Koračni motori

- Spoljna karakteristika koračnog motora

