

Lekcija 6

Koračni motori

Prof.dr.sc. Jasmin Velagić

Elektrotehnički fakultet Sarajevo

Kolegij: Aktuatori

6.1. 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 pretvornika.
- Od takvih motora se zahtijevaju diskretni, odnosno koračni mehanički pomaci, odakle i potječe naziv koračni motori (eng. stepper motors).
- Koračni motori su elektromehanički pretvornici energije, koji pulsnu, odnosno koračnu električku pobudu pretvaraju u koračni mehanički pomak.
- Izrađuju se u rotacijskoj i translacijskoj izvedbi (preovladava rotacijska).
- 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 oscilira ovisno o položaju.
- 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 ovisno o konstrukciji, kod komercijalnih motora se kreće od 10^2 do 10^4 koraka u sekundi [k/s].
- Koračni motor je električki motor bez komutatora.
- Svi namoti su smješteni na statoru, a rotor je permanentni magnet, ili, u slučaju varijabilnoreluktancijskog motora, predstavlja blok zupčanika od mekog magnetskog materijala.

Osnove koračnih motora

- Komunikacijom se upravlja izvana sa kontrolerom, pri čemu su motori i kontroleri dizajnirani na način da motor može doći u bilo koju fiksnu poziciju kada rotira na jedan ili drugi način.
- Većina koračnih motora može koračati na audio frekvencijama, i primjenom odgovarajućeg kontrolera mogu se startati i zaustavljati “on a dime” na upravljanim orijentacijama.

Prednosti koračnih motora

- Niska cijena.
- Male dimenzije i masa.
- Velike funkcijske mogućnosti.
- Često se isporučuju integrirano s 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 zakretu).
- Ugao rotacije motora je proporcionalan ulaznom impulsu.
- Odziv rotora na digitalne impulse omogućuje upravljanje u otvorenoj petlji (upravljanje položajem radne osovine bez povratne veze → jednostavno je realizirati sistem upravljanja većim brojem motora (roboti, pisači)).
- Ne akumulira pogrešku položaja.

Prednosti koračnih motora

- Jednostavne su konstrukcije i ne zahtijevaju održavanje.
- Motor ima puni moment u zastoju (ako su namoti napajani).
- Precizno pozicioniranje i ponovljivost pokreta, budući da dobri koračni motori imaju pogrešku od 3-5% posto od ukupnog koraka.
- Odličan odziv na zalet, zaustavljanje i promjenu smjera.
- Veoma pouzdani jer nemaju kontaktnih četkica u motoru. Osim toga, životni vijek motora jednostavno ovisi o životnom vijeku ležajeva.
- Moguće je postići veoma sporu sinhronu brzinu rotacije kada je osovina direktno opterećena (teret na osovini).
- Može se realizirati široko područje raspoloživih brzina jer je brzina proporcionalna frekvenciji ulaznih impulsa.

Nedostaci koračnih motora

- Fiksni korak.
- Razmjerno mala efikasnost, veliko nadvišenje i oscilatornost u odzivu od jednog koraka.
- Ograničene mogućnosti pokretanja tereta s velikim momentom inercije.
- Moment trenja i aktivni teret mogu povećati pogrešku položaja (moguć je gubitak koraka – posljedica je akumulirana pogreška položaja).
- Mogućnost pojave rezonancije ako nije adekvatno upravljanje.
- Rad neprikladan i teško ih je upravljati na velikim brzinama.

Svojstva koračnih motora

- Rezolucija.
- Odziv jednog koraka.
- Tačnost.
- Statički moment.
- Dinamički moment.
- Start stopni moment.

Rezolucija

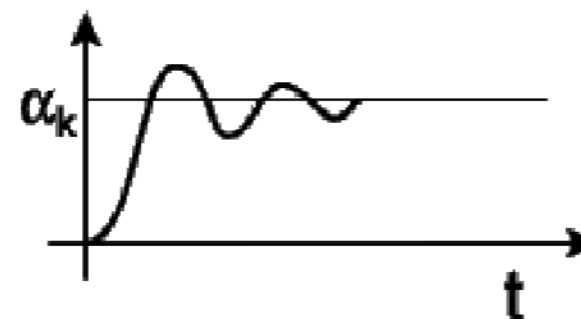
- Rotacijski koračni motor
 - N_k [kor/okr] - broj koraka po okretaju,
 - $k = 360^\circ / N_k$ [°] - iznos koraka u stupnjevima.
- Linearni koračni motor
 - x_k [mm] - iznos koraka.

Svojstva koračnih motora

- Mogućnost mikrokoračanja
 - upravljanje iznosom struja faza,
 - različiti položaji vektora polja,
 - dijeljenje koraka.

Odziv jednog koraka

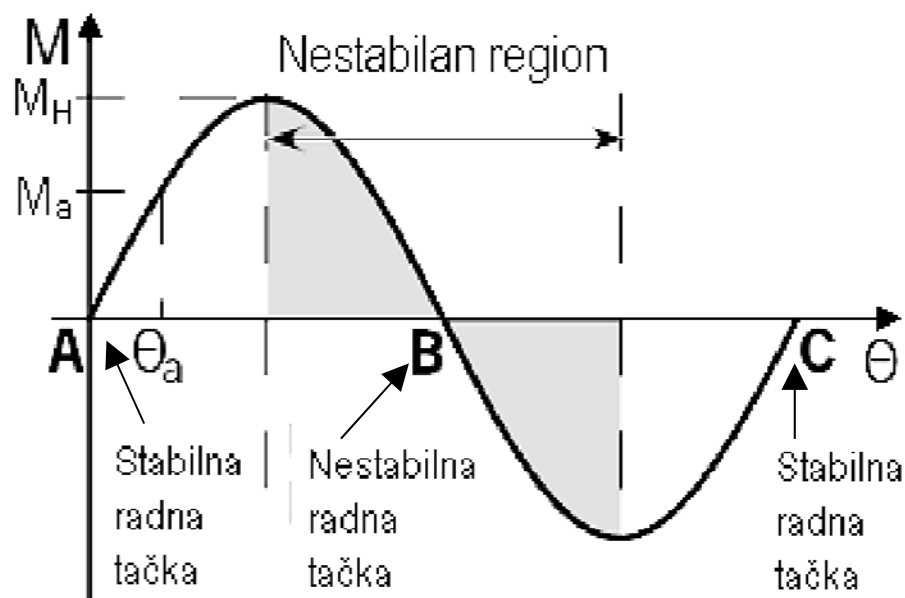
- 1. faza uključena (ostale faze isključene)
- 1. faza se isključi i 2. faza se uključi
 - pomak rotora za 1 korak
 - ✓ oscilatornost zbog inercije
- Iz odziva jednog koraka vidljive su sljedeće karakteristike motora:
 - brzina odziva,
 - oscilatornost,
 - tačnost
 - ✓ pogreška pozicije zbog konstrukcije $\Delta\theta_m = 1$ do 5%.



Svojstva koračnih motora

Statički moment motora (moment držanja, holding torque)

- Ovisnost uspostavljenog momenta (statički moment) u motoru o pomaku rotora $M=f(\theta)$.
- Krutost koračnog motora može se povećati povećanjem statičkog momenta M_H .



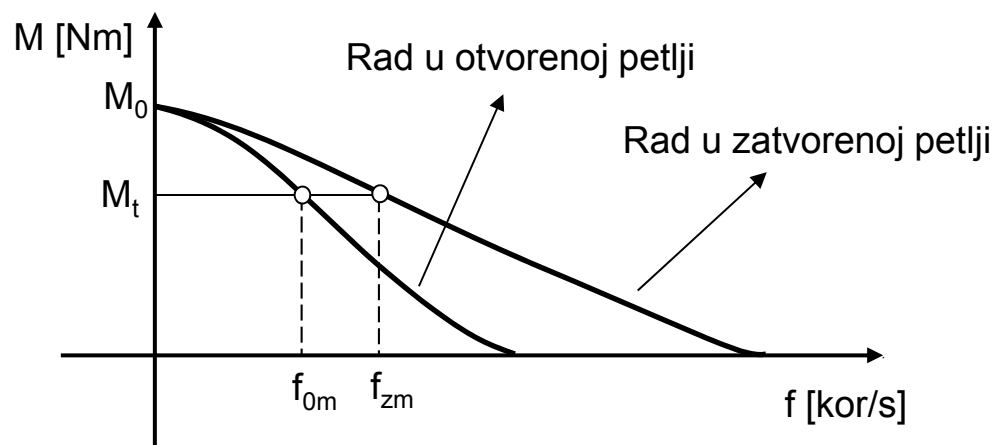
Stabilna radna tačka (A,C)
poravnavanje polova rotora i statora.

Nestabilna radna tačka (B)
pol rotora tačno na sredini između dva pola statora.

Svojstva koračnih motora

Dinamički moment motora (pull out torque)

- Ovisnost srednje vrijednosti momenta unutar koraka o brzini vrtnje (frekvenciji) $M=f(f \text{ [kor/s]})$.
- **Maksimalna vrijednost momenta trenja (moment kojim se motor smije opteretiti) kojim se u stacionarnom stanju smije opteretiti koračni motor na određenoj brzini, a da rotor ne ispadne iz sinhronizma (izgubi korak) s upravljačkim impulsima i motor se ne zaustavi (motor se ne zalijeće pod tim teretom).**



M_0 – maksimalan moment u mirovanju.

Upravljanje u otvorenoj petlji:

- zaliha momenta (50-100)%,
- maksimalna brzina vrtnje f_{om} nije velika.

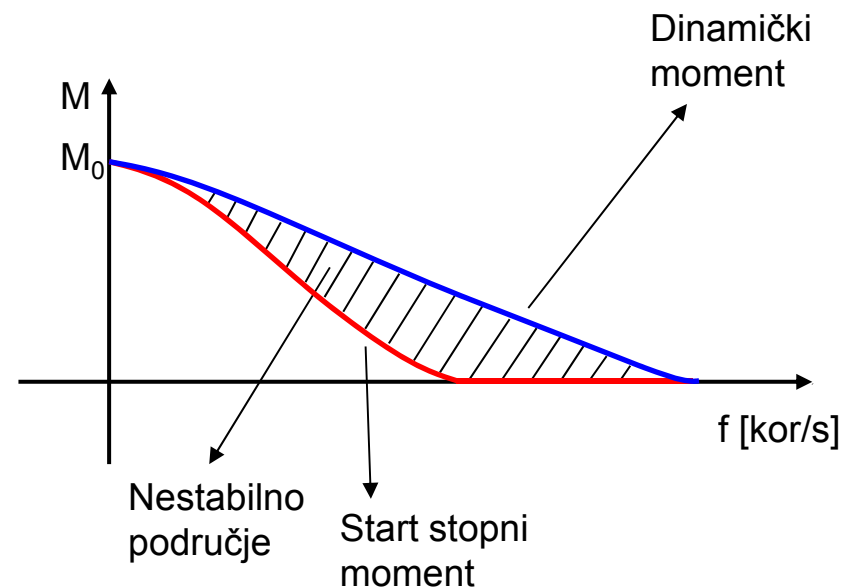
Upravljanje u zatvorenoj petlji:

- postiže se veći moment i brzina vrtnje $f_{zm} > f_{om}$,
- M_t raste $\rightarrow f_z$ pada (pouzdan rad pogona).

Svojstva koračnih motora

Start stopni moment (Pull-in torque)

- Moment tereta oblika trenja s kojim motor pri zadanoj frekvenciji koračnih impulsa može krenuti (startati), a da ne izgubi korak (u jednom koraku postiže zadanu brzinu).
- Područje između krivulja start stopnog i dinamičkog momenta je nestabilno
 - da bi radio u njemu mora se motor ubrzavati po određenom algoritmu.
- Dinamički moment motora
 - dozvoljeno opterećenje kad se motor već vrti.



Podjela koračnih motora

- Podjela koračnih motora se vrši prema:
 - **vrsti uzbude;**
 - **broju faza;**
 - **broju polova;**
 - **načinu kretanja.**
- Što se tiče **vrste uzbude** tu razlikujemo koračne motore prema:
- **Načinu stvaranja magnetskog polja:**
 - elektromagnetska uzbuda;
 - uzbuda permanentnim magnetima.
- **Smještaju uzbude:**
 - uzbuda na rotoru (aktivni koračni motori);
 - uzbuda na statoru.

Podjela koračnih motora

- **Tipu uzbude:**
 - koračni motori s permanentnim magnetima (rotor magnetiziran radialno);
 - hibridni koračni motori (permanentni magneti na rotoru smješteni aksijalno)
 - **reluktantni** (reaktivni koračni motori) nemaju uzbudu.
- Prema **broju faza:**
 - Najčešće $n_f = 2, 3, 4, 5, 6$;
 - za $n_f = 1$ – satovi;
 - za $n_f \geq 1$ – specijalne primjene.

Podjela koračnih motora

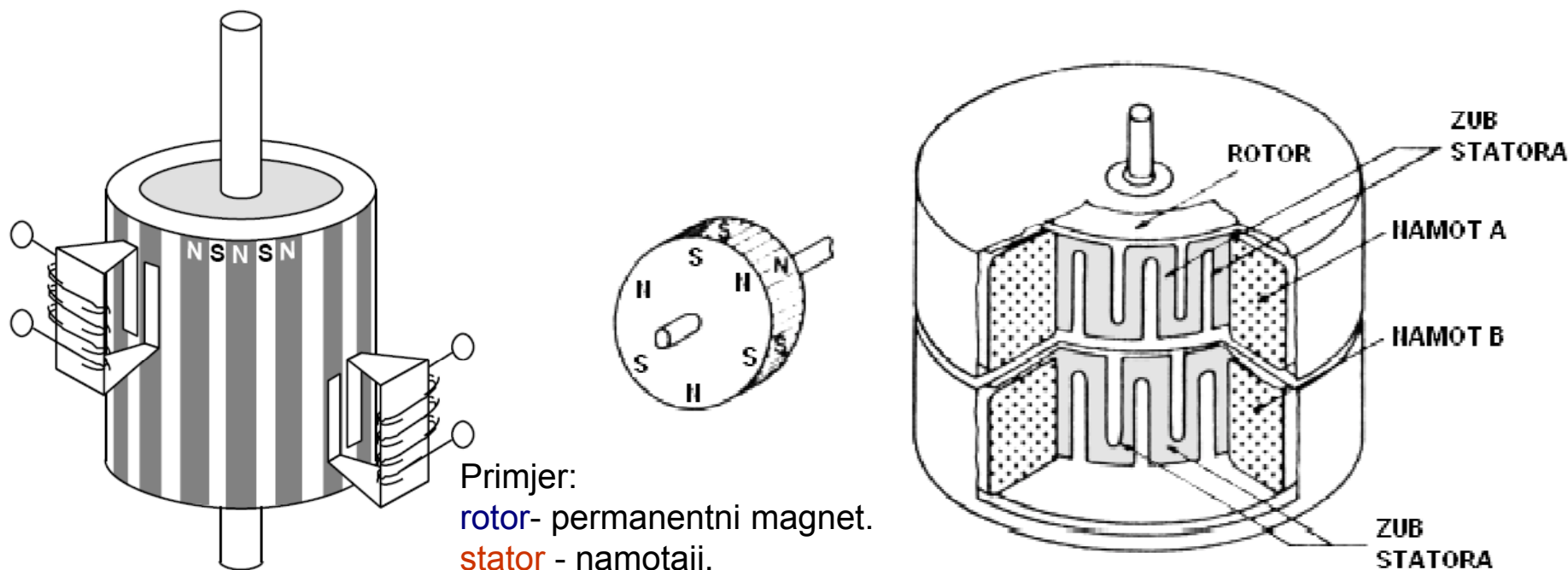
- Prema **broju polova** dijele se na:
 - broj polova serijski proizvedenih koračnih motora $p_r=1$ do 90;
 - koračni motor s permanentnim magnetima na rotoru, $p_r=1$ do 4;
- Po **načinu kretanja**:
 - rotacijski;
 - translacijski.

6.2. Permanentnomagnetski koračni motori

- Permanentnomagnetski koračni motori imaju **radijalni permanentnomagnetski rotor** i **višefazno izvedeni elektromagnetski stator**.
- Dakle, permanentni magneti su na rotoru. Ovo za sobom povlači jednostavniju izvedbu i nižu cijenu.
- Uzastopnim ukapčanjem ili okretanjem smjera struja pojedinih statorskih faza ili njihovih kombinacija po određenom redoslijedu, rezultatno magnetsko polje statora skokovito se okreće u jednom ili drugom smjeru.
- Pri tome se permanentnomagnetski rotor postavlja u smjeru rezultatnog 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

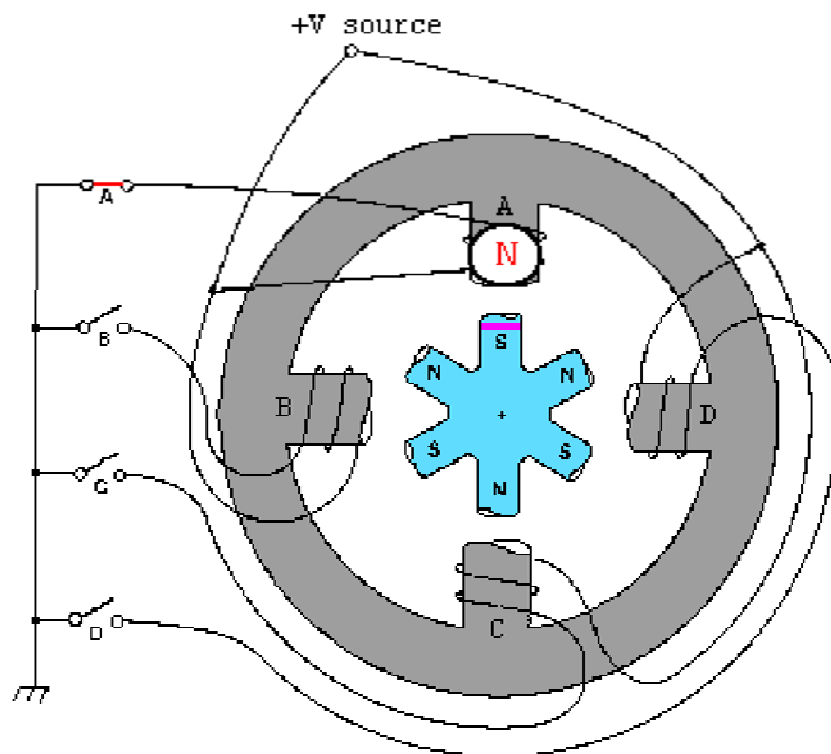
- Ova vrsta koračnih motora ima malu rezoluciju – tipični koračni uglovi između 7.5° i 15° .
- Rotor nema velike zube, ali je magnetiziran s alternativnim S i N polovima.
- Povećana gustoća magnetskog toka omogućuje koračnom motoru s permanentnim magnetima poboljšanje momentnih karakteristika.



- polje statora aksijalno,
- zubi poprimaju onaj pol na kojoj su strani vezani za tijelo statora.

Princip rada

- Zatvaranjem sklopki u navedenom redoslijedu:
 - rotacija rezultantnog vektora magnetskog polja,
 - zakretanje rotora prema vektoru magnetskog polja.
- Kretanje smjerom obrnutim od kazaljke na satu.



Rezolucija:

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

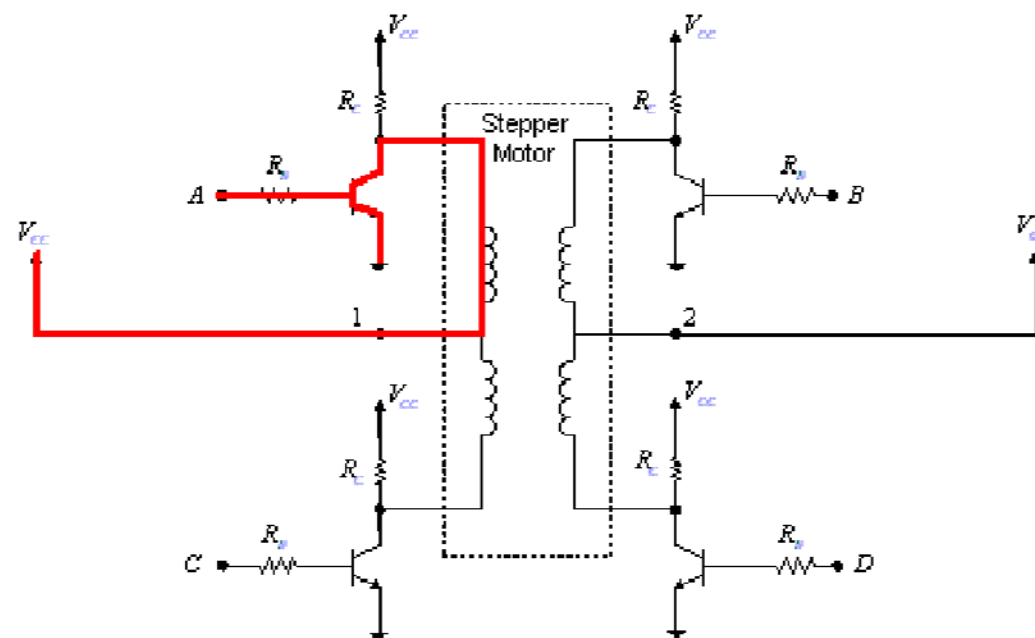
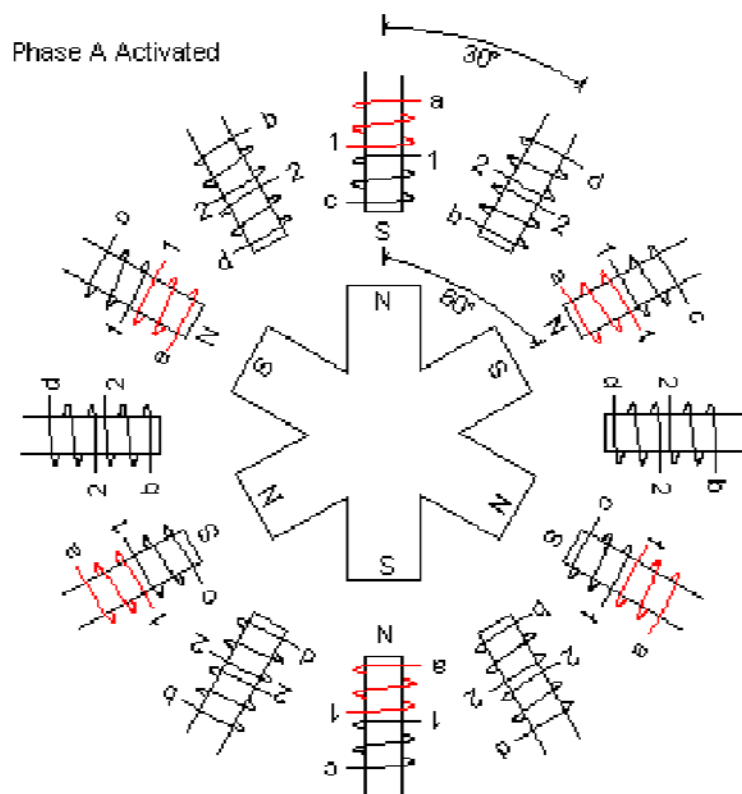
Gdje je:

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

p_r – broj pari polova rotora,

q_s – broj statorskih paketa.

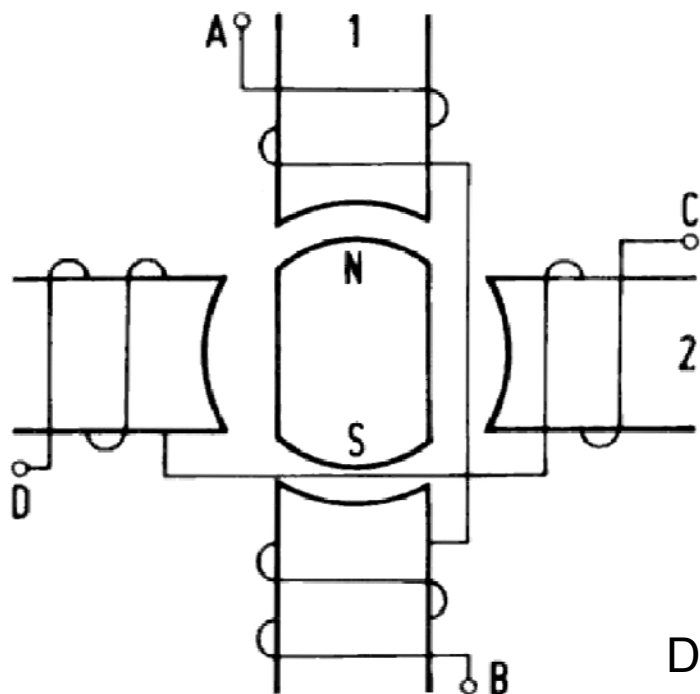
Princip rada



Faze se napajaju tako da motor radi polukoračno.

Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori

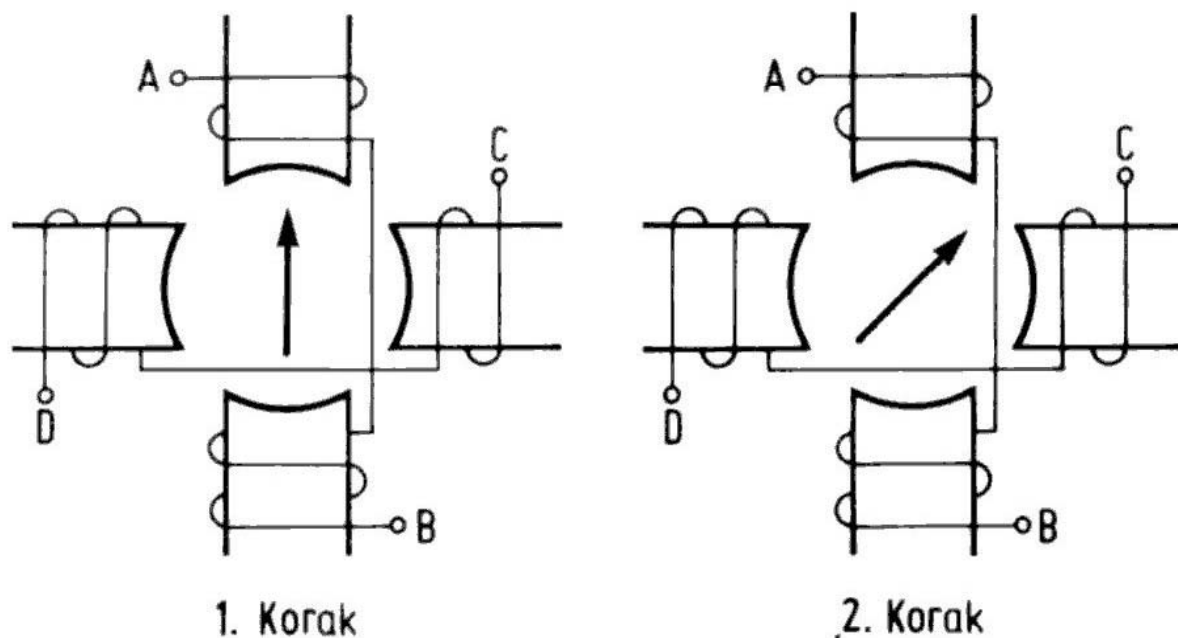
- Najjednostavniji primjer ove vrste motora je dvofazni četveropolni motor.



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 smjer brzine vrtnje)

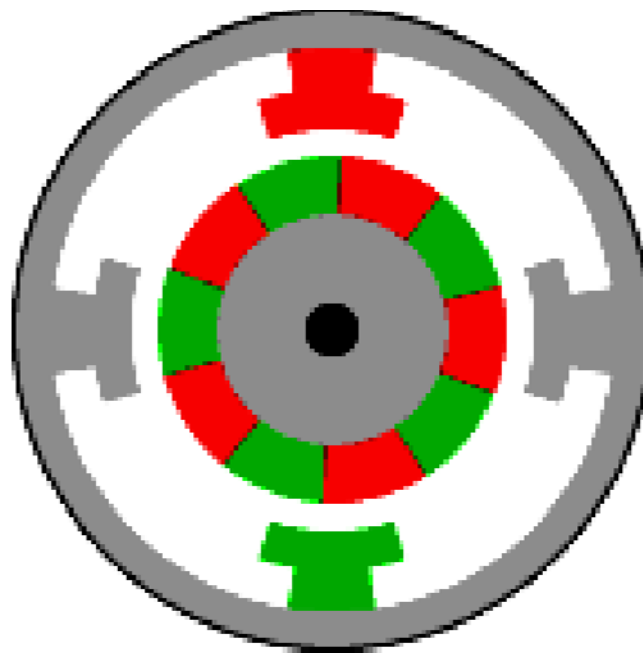
Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori



Dvofazni permanentnomagnetski
koračni motor – *polukoračni hod*

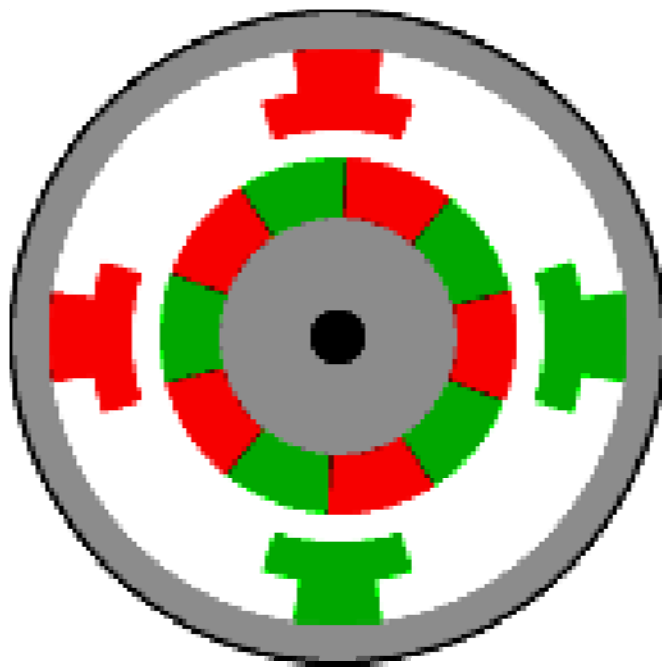
Korak	FAZA 1		FAZA 2	
	A	B	C	D
1.	+(+)	-(-)	0	0
2.	+(+)	-(-)	+(-)	-(+)
3.	0	0	+(-)	-(+)
4.	-(-)	+(+)	+(-)	-(+)

Koračni hod motora



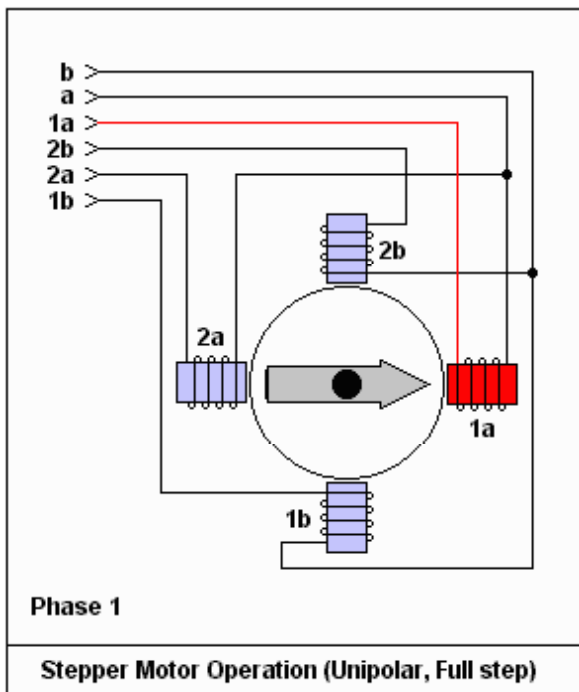
- Ova animacija demonstrira princip punog koračnog hoda (pune komutacije) koračnog motora s permanentnim magnetima.
- Rotor se sastoji od permanentnih magneta i stator ima dva para namota.
- U trenutku kad se rotor poravna sa jednim od statorskih polova, druga faza se napaja.
- Dvije faze se naizmjenično ukapčaju i iskapčaju i tako se mijenja polaritet.
- Postoji četiri koraka. Jedna faza kasni za drugom fazom jedan korak. Ovo je ekvivalentno jednoj četvrtini električkog kruga, tj. 90° .

Polukoračni hod motora



- Komutacijska sekvenca za polukoračne motore ima osam koraka umjesto četiri.
- Glavna razlika u odnosu na prethodnu vrstu koračnog motora je da se druga faza ukapča prije nego što se prva iskapča.
- Znači, obje faze se napajaju istovremeno.
- Tokom polukoračnog hoda rotor se drži između dvije pune koračne pozicije.
- Polukoračni motor ima dvostruku rezoluciju punokoračnog motora.

Koračni i polukoračni hod motora

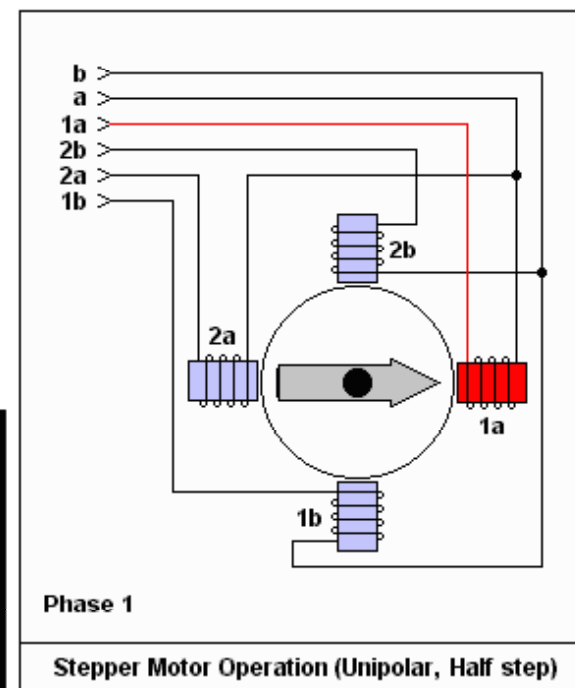


Često korišćen kodirani broj

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	0	1	0	0
3	0	0	1	0
4	0	0	0	1
5	1	0	0	0
6	0	1	0	0
7	0	0	1	0
8	0	0	0	1

Često korišćen kodirani broj

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	0
2	1	1	0	0
3	0	1	0	0
4	0	1	1	0
5	0	0	1	0
6	0	0	1	1
7	0	0	0	1
8	1	0	0	1
9	1	0	0	0
10	1	1	0	0
11	0	1	0	0
12	0	1	1	0
13	0	0	1	0
14	0	0	1	1
15	0	0	0	1
16	1	0	0	1

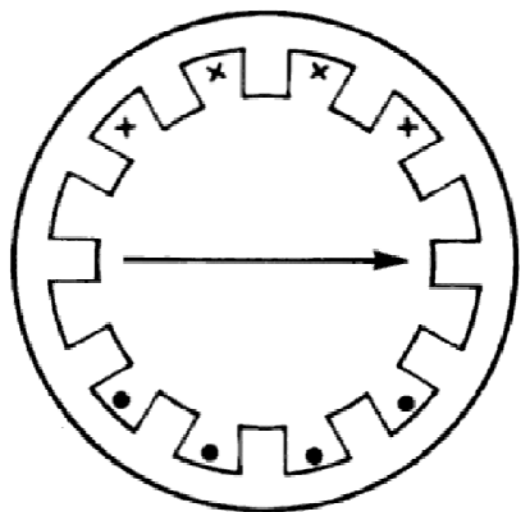


- Puna koračna sekvenca pokazuje kako se binarnim brojevima može upravljati motor.

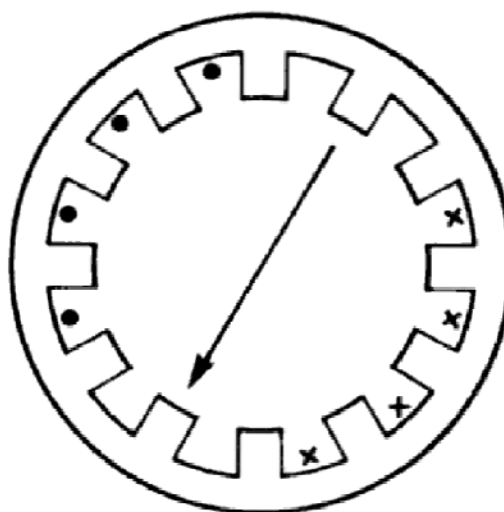
- Polukoračna sekvenca upravljačkih binarnih brojeva.

Trofazni permanentnomagnetski koračni motori

- Složenija konstrukcija trofaznog motora s permanentnomagnetskim rotorom.
- Stator nema **izraženih polova**, nego **utore** u koje su smješteni svici.
- Namot je u osnovi kao trofazni indukcijski motor.
- Pobuđivanjem svake faze pojedinačno (slika ispod), nastaje rotacija od $2\pi/3$ (koračni hod od $2\pi/3$).



1. Korak

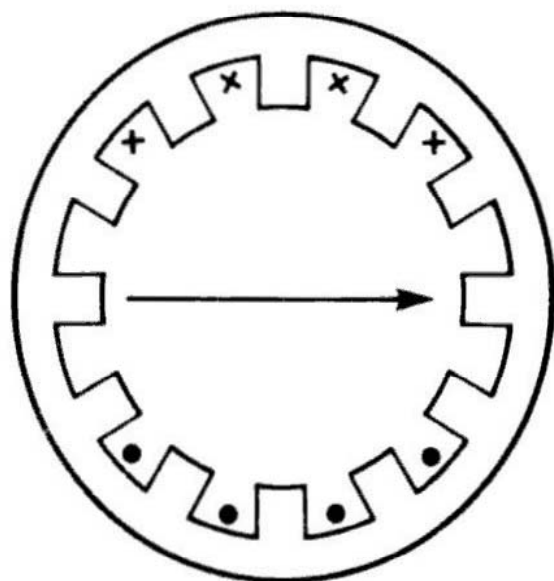


2. Korak

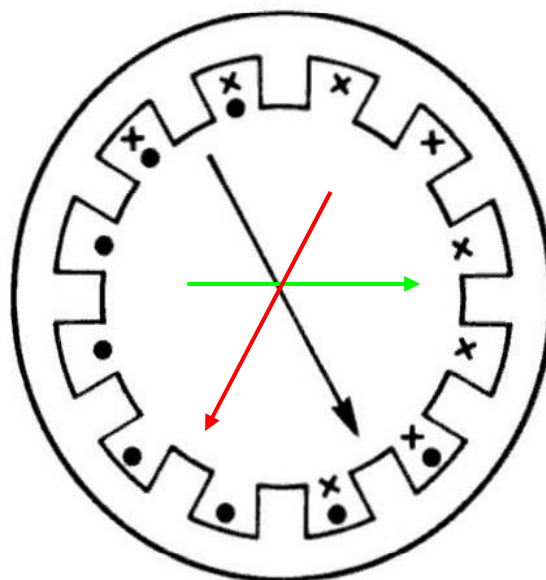
Korak	FAZE		
	I	II	III
1	+	0	0
2	0	+	0
3	0	0	+

Trofazni permanentnomagnetski koračni motori

- Ako se nakon ukapčanja jedne faze zajednički ukapčaju dvije faze (slika ispod), postiže se rotacija s koracima od $\pi/3$.



1. Korak



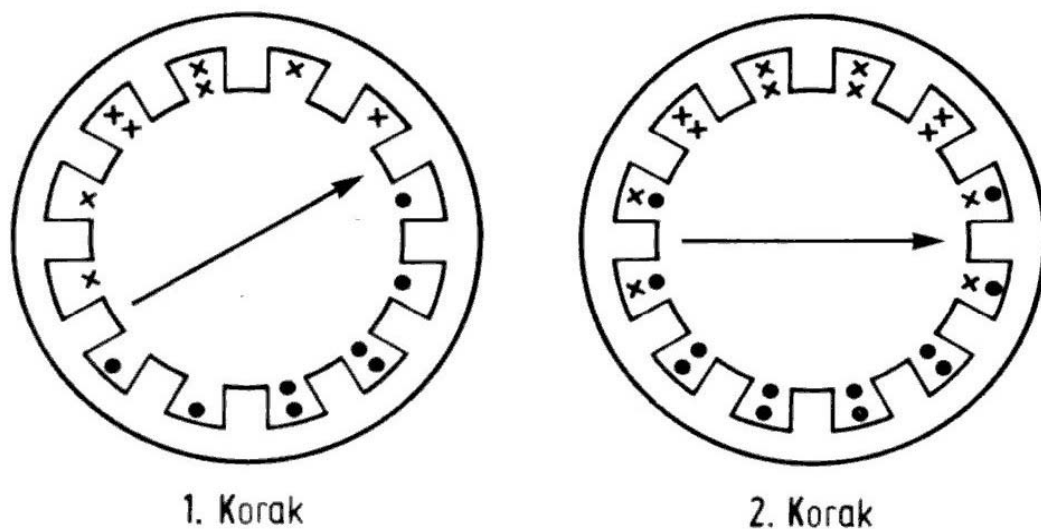
2. Korak

Korak	FAZE		
	I	II	III
1	+	0	0
2	+	+	0
3	0	+	0
4	0	+	+
5	0	0	+
6	+	0	+

Crvena strelica (I faza), Zelena strelica (II faza)

Trofazni permanentnomagnetski koračni motori

- Također je moguća i rotacija s koracima od $\pi/6$.
- To se ostvaruje kad nakon zajedničke pobude dviju faza dolazi zajednička pobuda svih triju faza (slika ispod).



korak	FAZE			korak	FAZE		
	I	II	III		I	II	III
1	+	-	0	7	-	+	0
2	+	-	-	8	-	+	+
3	+	0	-	9	-	0	+
4	+	+	-	10	-	-	+
5	0	+	-	11	0	-	+
6	-	+	-	12	+	-	+

Nakon pobude sa dvije faze slijedi uvijek pobuda sve tri faze

Prednosti PM koračnih motora

- Postoji statički moment i kad nije priključeno napajanje (u nepobuđenom stanju imaju zaporni moment, tj. mogu se opteretiti momentom po vrijednosti jednakim zapornom moment, a da se ne izazove kontinuirani pomak).
- Veliki omjer statičkog momenta i dimenzija.
- Potrebna manja snaga za rad.
- Veće prigušenje odziva (malo nadvišenje i naglašena mala sklonost oscilacijama).
- Mehanička jednostavnost.
- Niska cijena (izrada mnogo dijelova štancanjem)

Nedostaci PM koračnih motora

- Mali omjer zakretnog momenta motora i momenta inercije.
- Prevelika pobuda može izazvati demagnetizaciju rotora, koji inače, u usporedbi s rotorima ostalih koračnih motora, ima veliku inerciju.
- Jakost permanentnog magneta se mijenja.
- Mala maksimalna brzina vrtnje.
- Velika protuelektromotorna sila.
- Nisu pogodni za male korake (koraci su im relativno veliki, a time je i položajno razlučivanje slabo).

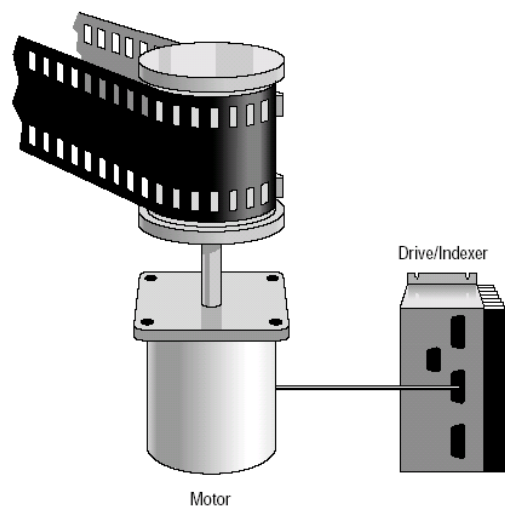
Primjer koračnog motora

Iz Sherline CNC stroja za glodanje:

- Koračni ugao: 1.8° .
 - Napon: 3.2 V.
 - Moment držanja: 0.97 Nm.
 - Inercija rotora: $250 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$.
 - Težina: 1.32 lb (0.6 Kg.).
 - Duljina: 2.13" (54 mm).
 - Izlazna snaga = 3W.
-
- Preciznost koračnog motora: $0.02^\circ/\text{koraku}$, 1 obrtaj u minuti, 3W.



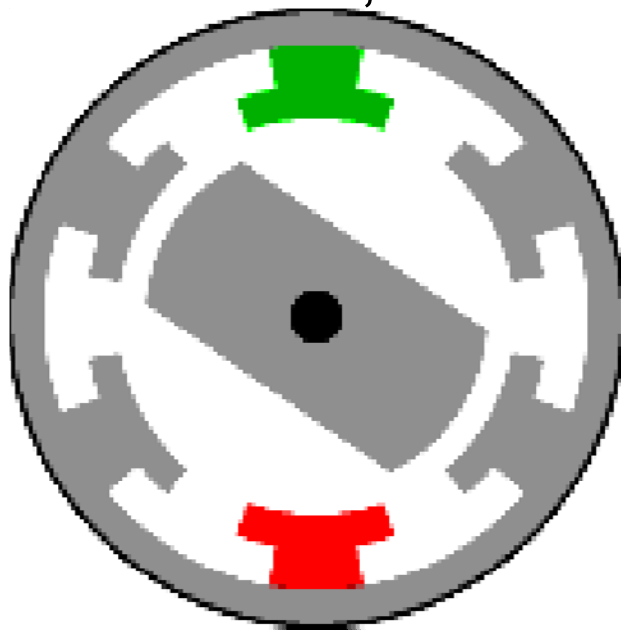
Aplikacije PM koračnih motora



- Film Drive
- Optički skener
- Printeri
- ATM strojevi
- I. V. pumpa
- Analizator krvi
- FAX strojevi
- Termostat

6.3. Reluktantni koračni motori

- Imaju nazubljeni višefazno namotani *stator* (lameliran) i nazubljeni *rotor* od mekog željeza (više polni rotor).
- *Ugao koračanja* im ovisi o broju zuba statora i rotora, o načinu namatanja statorskih faza te načinu njihove pobude.
- Trofazna verzija, na primjeru (slajd br. 35) ima dvanaest statorskih i osam rotorskih zuba, pa *zubni ugao* među statorskim zubima iznosi 30° , a među rotorskim 45° .

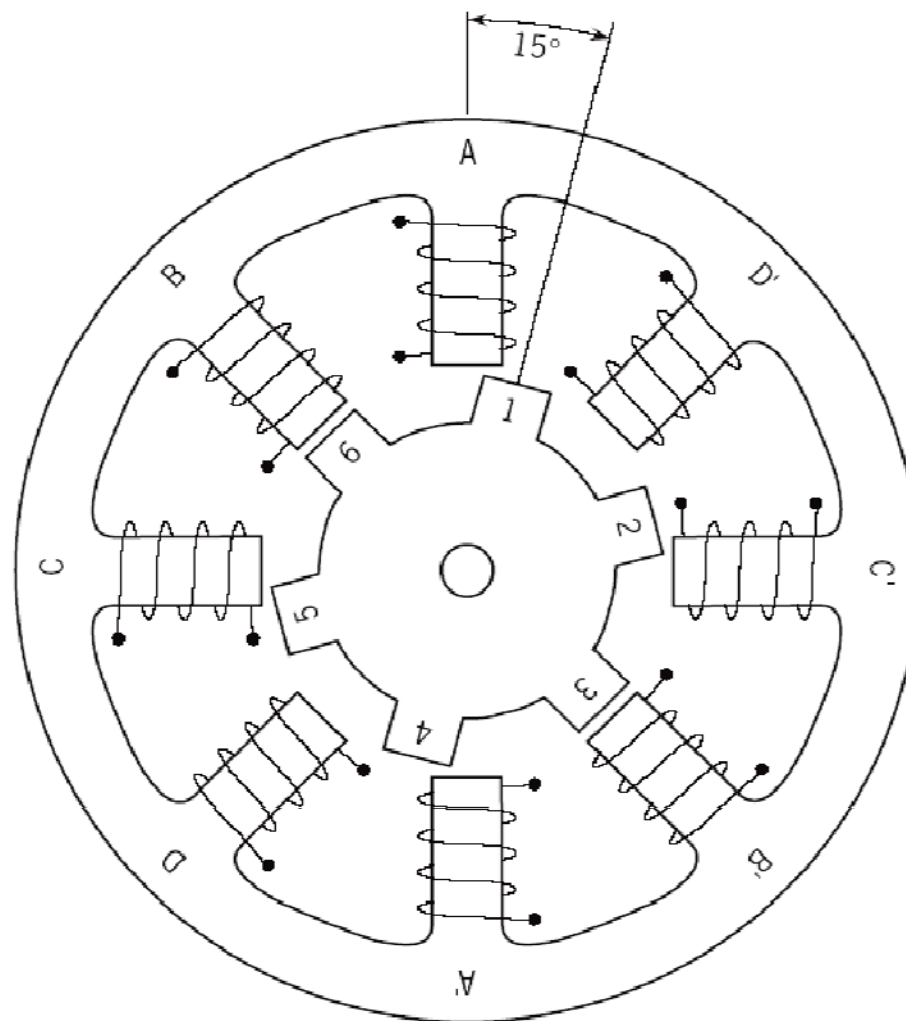


Podjela reluktatntnih koračnih motora

- **Prema broju paketa namota**
 - jednopaketni,
 - višepaketni.
- **Prema načinu kretanja**
 - rotacijski,
 - translacijski.
- **Prema vrsti zračnog raspورا**
 - s radijalnim zračnim raspором,
 - s aksijalnim zračnim raspором.

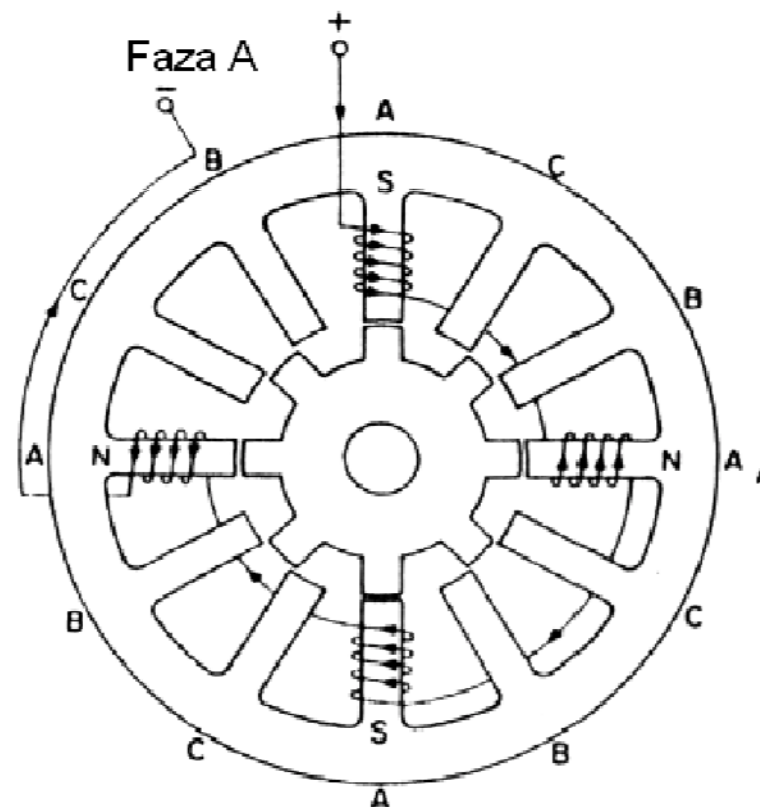
Reluktantni motor s jednopaketnim statorom

- Broj zubi statora i rotora je različit.
- Okretanje se postiže postavljanjem nemagnetskog željeznog rotora (meko željezo) u položaj minimalne reluktancije statorskog magnetskog polja.
- Jednopaketni koračni motori se okreću uzastopnim ukapčanjem faza.



Djelovanje motora s jednopaketnim statorom

- $U_a = U$
 - zubi rotora poravnaju se sa zubima statora faze A.
- $U_a = 0, U_b = U$
 - zubi rotora poravnaju se sa zubima statora faze B - korak u smjeru kazaljke na satu.
- Nakon $U_a = U, \rightarrow U_a = 0, U_c = U$
 - zubi rotora poravnaju se sa zubima statora faze C \rightarrow korak u smjeru obrnutom od kazaljke na satu.



Rezolucija motora s jednopaketnim statorom

- Odnos broja zubi statora i rotora:

$$N_s = N_r \pm z_s,$$

gdje su: N_r – broj zubi rotora,

N_s – broj zubi statora,

z_s – broj zubi statora po fazi.

- Rezolucija:

$$N_k = \frac{N_s N_r}{|N_s - N_r|}, \quad \left[\frac{\text{koraka}}{\text{okretaj}} \right],$$

$$\alpha_k = \frac{360}{N_k}, \quad \left[\frac{\circ}{\text{korak}} \right].$$

Rezolucija motora s jednopaketnim statorom

- Za minimalne vrijednosti:

$$z_{\text{smin}} = 2 - \text{broj zubi po fazi,}$$
$$n_{\text{fmin}} = 3 - \text{broj faza.}$$

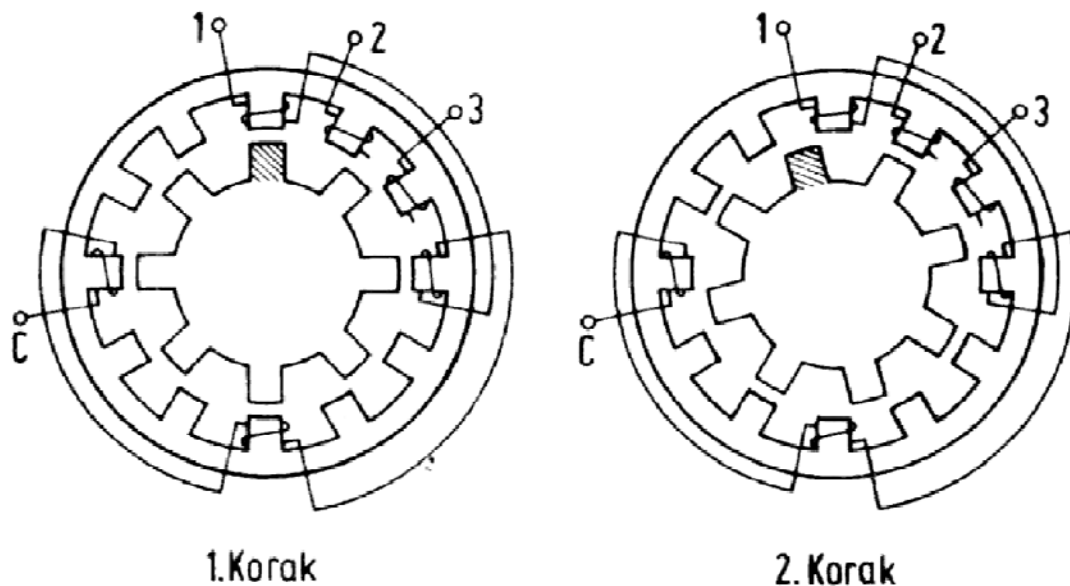
- Dobiva se:

$$N_{\text{smin}} = z_{\text{smin}} * n_{\text{fmin}} = 6,$$
$$N_{\text{rmin}} = N_{\text{smin}} - z_{\text{smin}} = 4,$$
$$N_{\text{kmin}} = 12 \text{ kor / okr.}$$

- Iz gornjeg izraza se dobiva vrijednost maksimalnog iznosa koraka:

$$\alpha_{\text{kmax}} = 30^\circ / \text{okr.}$$

Primjer: trofazni reluktantni koračni motori



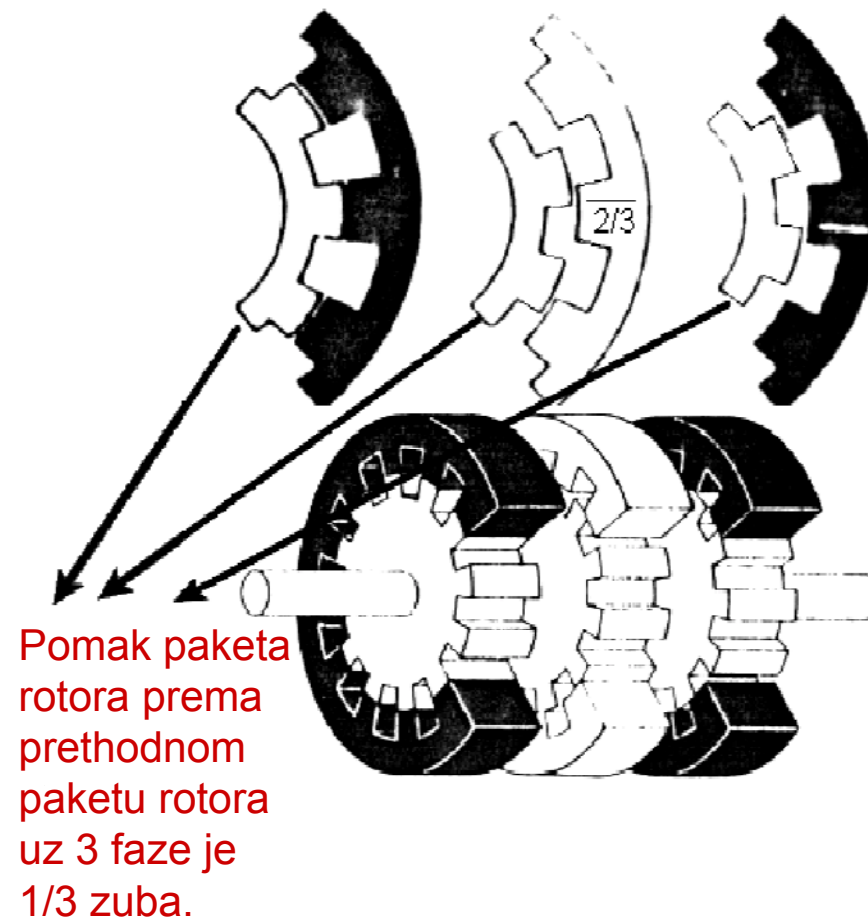
korak	FAZE		
	1.	2.	3.
I	+(+)	0(0)	0(0)
II	0(0)	0(+)	+(0)
III	0(0)	+(0)	0(+)

Trofazni koračni motor s promjenjivom reluktancijom.

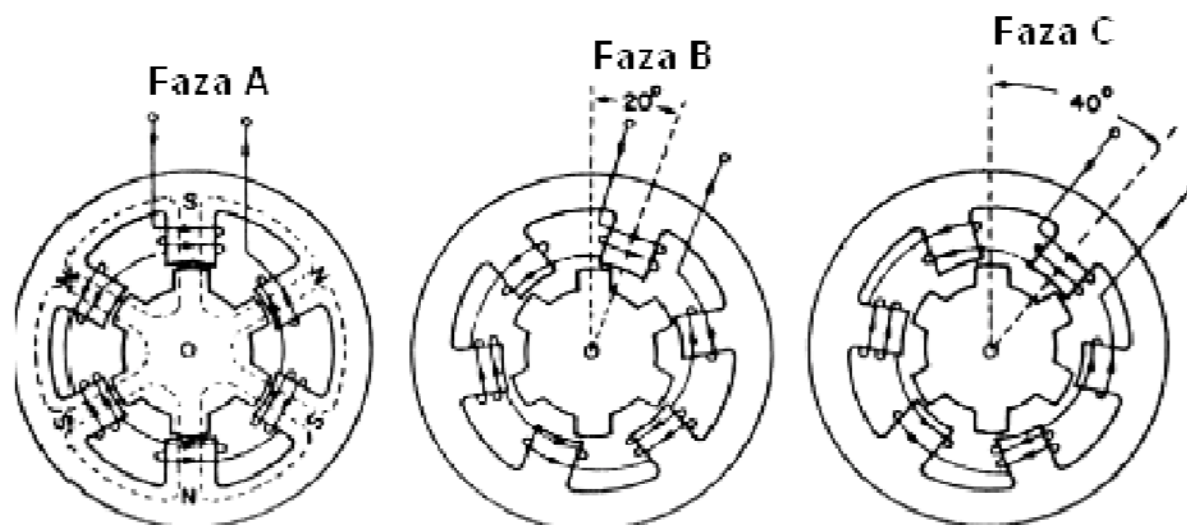
- Pobuđivanjem faza prema slici, rotor se zakreće za 15° ($45^\circ - 30^\circ$) u smjeru suprotnom od redoslijeda ukapčanja faza (u lijevu stranu).
- *Naizmjeničnim pobuđivanjem jedne pa dvije faze*, npr. kad se poslije faze 1. zajednički pobude faze 1. i 2., postiže se *polukoračni pomak od 7.5°* u lijevom smjeru

Reluktantni motor s više paketa statora

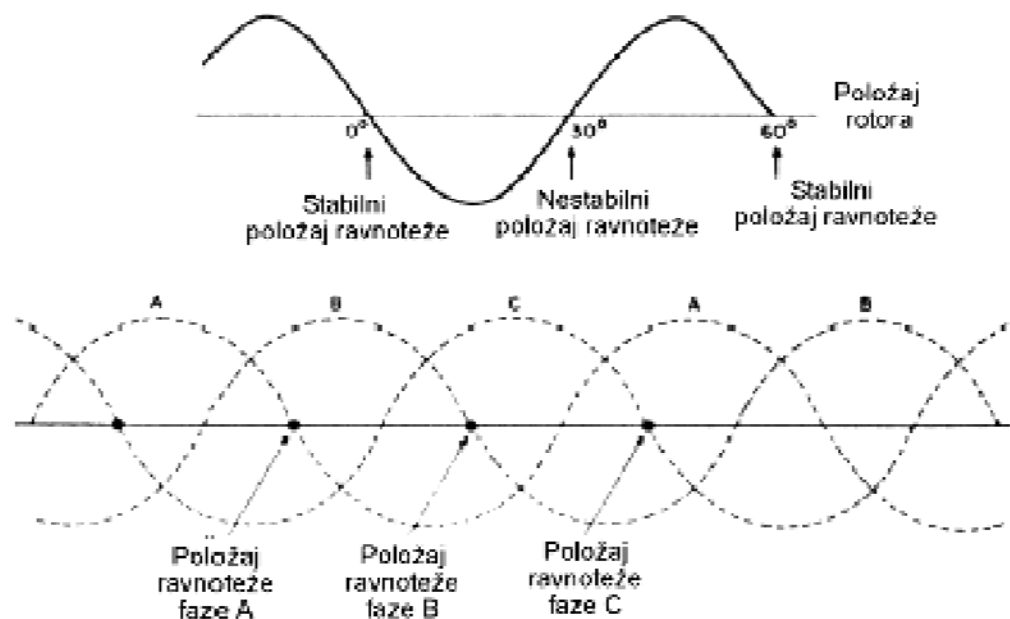
- Rotor
 - višepolni od mekog željeza.
- Stator
 - lamelirani limovi.
- Broj faza
 - jednak broju paketa (svaki paket jedna faza),
 - broj faza 3 ili 4.
- Paketi rotora i statora
 - mehanički učvršćeni,
 - električki i magnetski nezavisni.
- Za kretanje motora moraju biti pomaknuti
 - paketi rotora ili
 - paketi statora.



Reluktantni motor s više paketa statora



Trofazni višepaketni koračni motor



Oblik krivulje statičkog momenta:

- nije sinusoidalan,
- ovisi o parametrima motora
 - obliku zubiju,
 - veličini zračnog raspora,
 - iznosu uzbude.

Djelovanje motora s više paketa statora

- $U_a=U$
 - zubi rotora faze A poravnavaju se sa zubima statora (minimalna reluktancija → stabilna radna tačka),
 - djelovanje vanjskog momenta M_t – dolazi do pomaka osovine θ :
 - ✓ moment motora $M=f(\theta)$ djeluje vraćanju u stabilnu ravnotežnu tačku,
 - ✓ nestabilna radna tačka $M=0$ → zubi rotora tačno između zubiju statora.
- $U_a=0, U_b=U$
 - zubi rotora faze B poravnavaju se sa zubima statora → korak u smjeru kazaljke na satu.
- Nakon $U_a=U, \rightarrow U_a=0, U_c=U$
 - zubi rotora faze C poravnavaju se sa zubima statora → korak u smjeru suprotnom od kazaljke na satu.

Rezolucija višepaketnog koračnog motora

- Rezolucija višepaketnog koračnog motora:

$$N_k = zn_f, \quad \left[\frac{\text{koraka}}{\text{okretaj}} \right],$$

$$\alpha_k = \frac{360^\circ}{N_k} = \frac{360^\circ}{zn_f}, \quad \left[\frac{^\circ}{\text{korak}} \right].$$

gdje su: z – broj zubi po fazi,

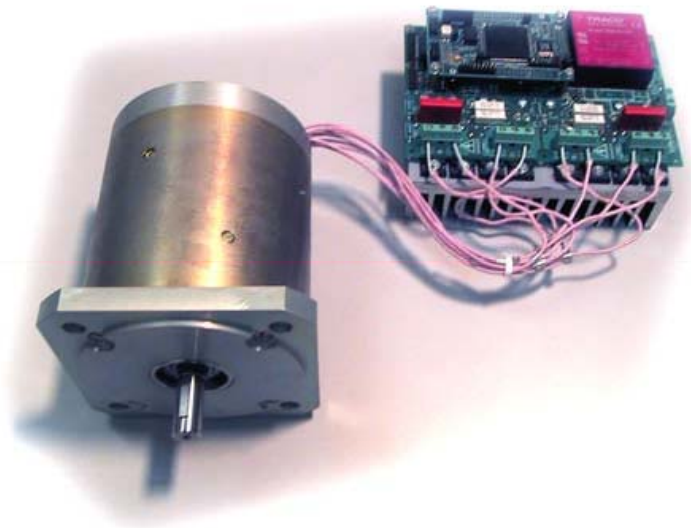
n_f – broj faza.

- Primjer: za ranije prikazani trofazni višepaketni koračni motor slijedi:

$$N_k = 3 * 6 = 18 [\text{kor} / \text{okr}],$$

$$\alpha_k = 360 / 18 = 20 [^\circ / \text{okr}].$$

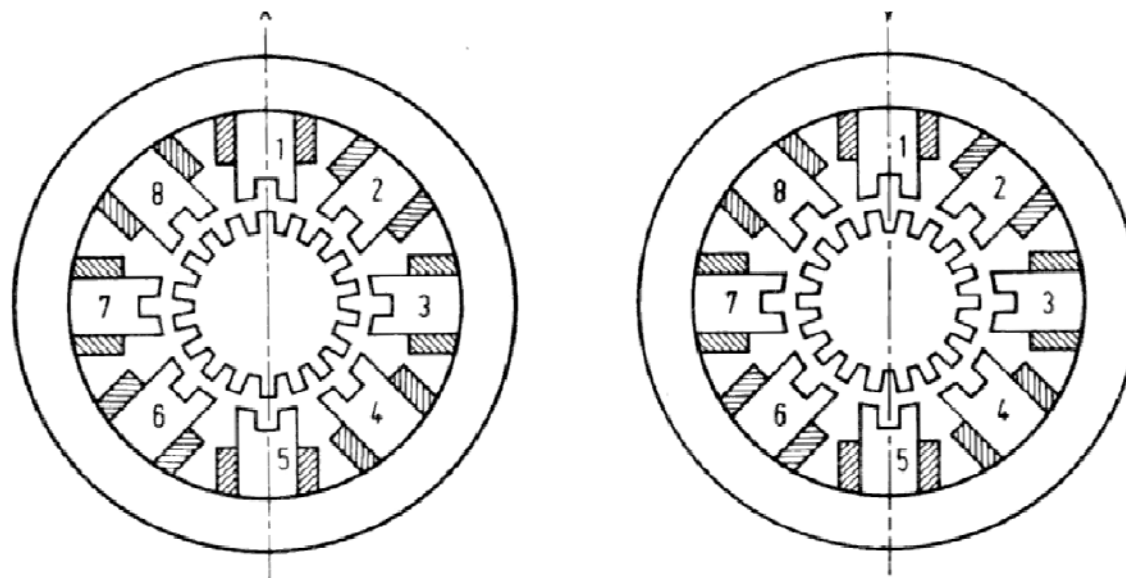
Aplikacije reluktantnih koračnih motora



- Motor skutera i drugih električkih i hibridnih vozila.
- Industrijski ventilatori, kompresori, pumpe, mikseri, centrifuge, mašinske alati.
- Aparati za domaćinstvo.

6.4. Hibridni koračni motori

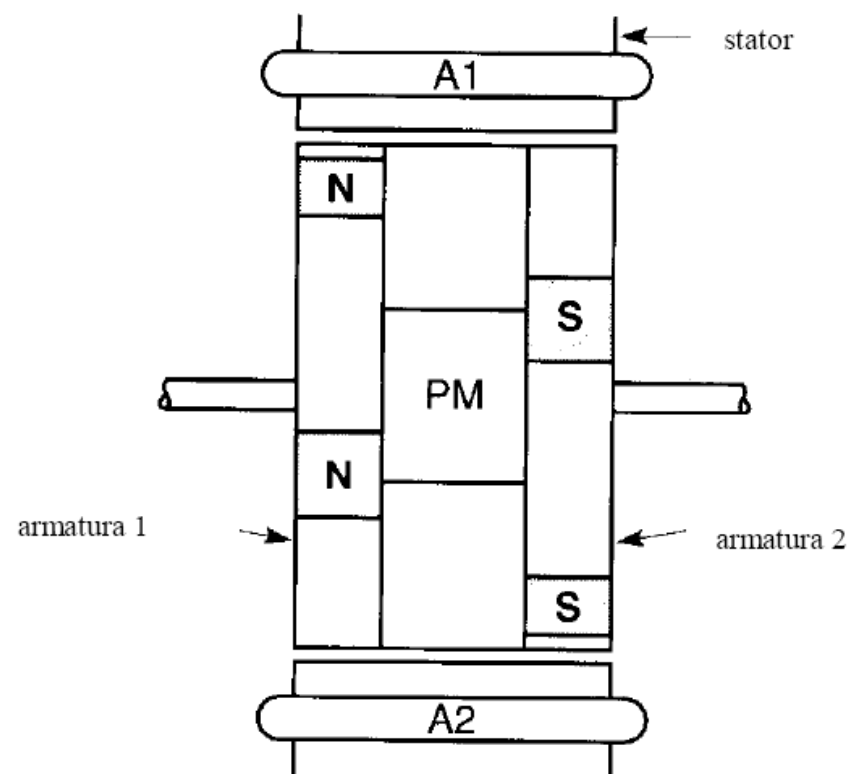
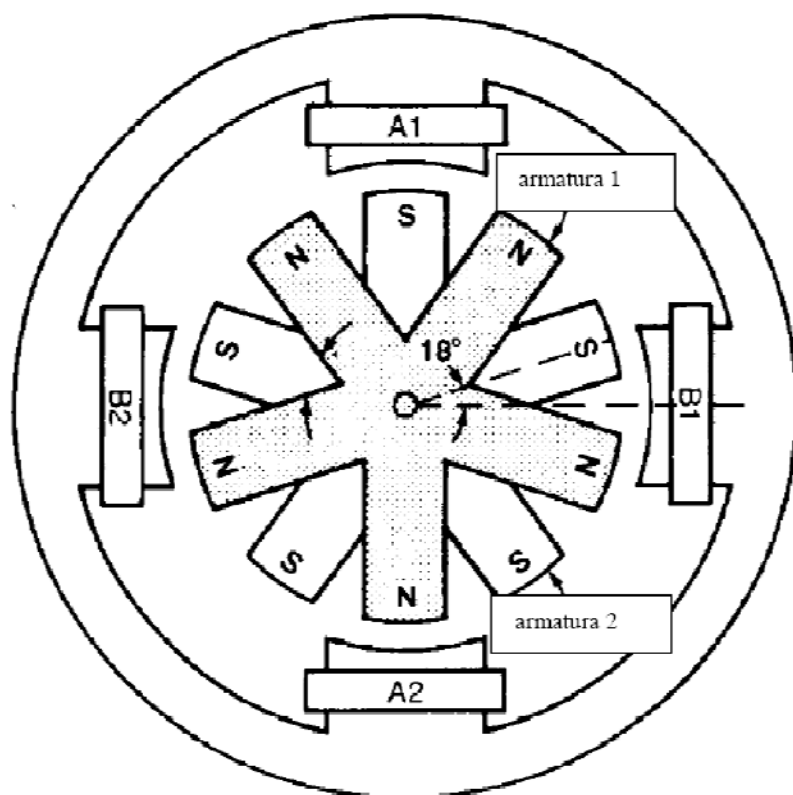
- Kombinacija načela na kojima se zasniva rad *permanentnomagnetskih* i motora *s promjenljivom reluktancijom*.
- S *nazubljenim statorom* na kojem se nalaze elektromagnetski svici i *nazubljenim rotorom* postižu se dobra svojstva *promjenljive reluktancije* i *permanentnoga magnetskog polja*.
- Zubi su najčešće *istoimeni permanentni magneti* ali ponekad mogu biti i *bez uzbuđene*



Poprečni presjek osampolnoga hibridnog motora, dva susjedna položaja

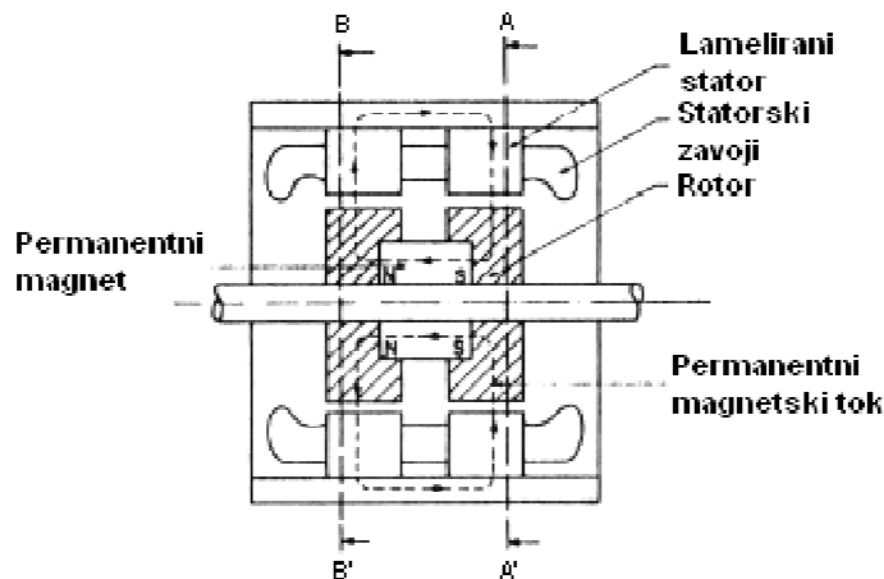
Hibridni koračni motori

Prikaz hibridnog motora i njegov presjek



Hibridni koračni motori

Aksijalni presjek osmopolnoga hibridnog motora



Rezolucija:

$$N_k = \frac{N_s N_r}{|N_s - N_r|}, \left[\frac{\text{koraka}}{\text{okretaj}} \right],$$

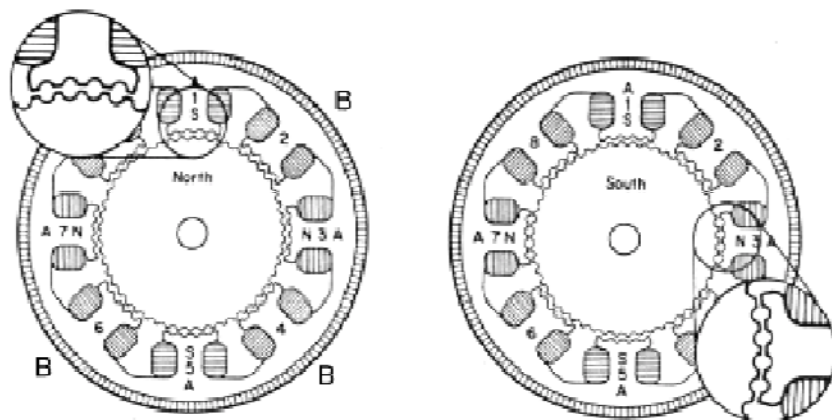
$$\alpha_k = \frac{360}{N_k}, \left[\frac{\circ}{\text{korak}} \right].$$

Svojstva:

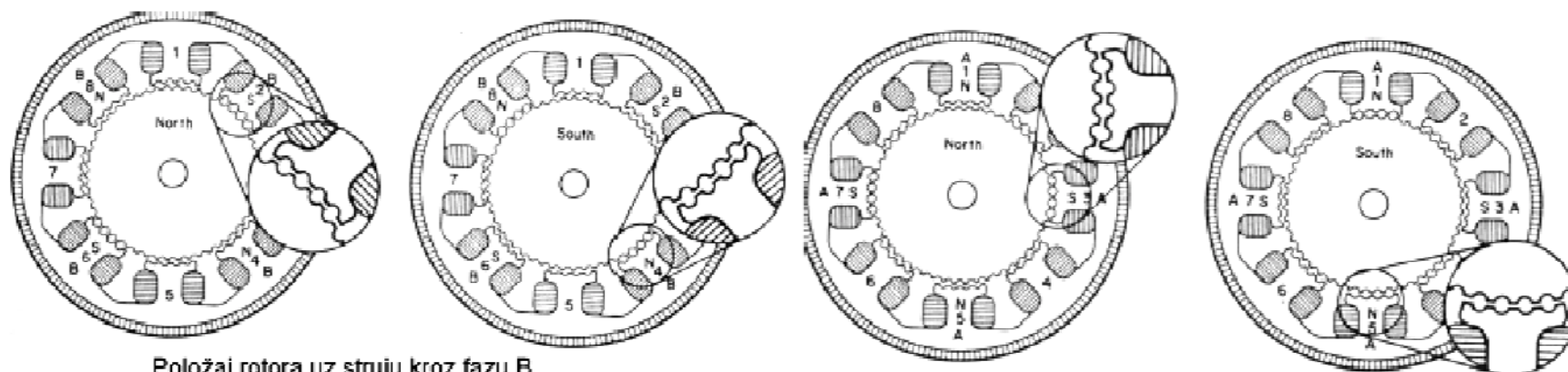
- Rade na principu koračnih motora s permanentnim magnetima na rotoru i reluktantnih koračnih motora.
- Permanentni magneti na rotoru
 - aksijalni smještaj,
 - dva polarizirana paketa rotora pomaknuta za 1/2 koraka zuba,
 - razmak (broj) zubiju statora je različit od razmaka (broja) zubiju rotora.

Hibridni koračni motori

Položaji rotora uz struju pojedinih faza



Položaj rotora uz struju kroz fazu A



Položaj rotora uz struju kroz fazu B

Položaj rotora uz negativnu struju kroz fazu A

Matematički model hibridnog koračnog motora

- Koračni motor - nelinearni diskretni element.
- **Matematički model**
 - opis samo bitnih pojava koje utječu 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,
 - međuinuktiviteti faza jednaki su nuli,
 - radni otpori i induktiviteti faza su jednaki,
 - raspodjela magnetskog toka u zračnom rasporu i valni oblik momenta motora su sinusoidalni.

Matematički model hibridnog koračnog motora

- Jednadžbe uzбудnih namota faza:

$$u_a = R_f i_a + \frac{d\psi_a}{dt},$$

$$u_b = R_f i_b + \frac{d\psi_b}{dt},$$

$$\psi_a = L_f i_a + \psi_{af},$$

$$\psi_b = L_f i_b + \psi_{bf},$$

$$\psi_{af} = K_e \cos \theta_e,$$

$$\psi_{bf} = K_e \cos \left(\theta_e - \frac{\pi}{2} \right),$$

$$\theta_e = N_r \theta.$$

gdje je:

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

Matematički model hibridnog koračnog motora

- Jednadžbe uzбудnih namota faza:

$$u_a = R_f i_e + \frac{d\psi_a}{dt},$$

$$u_b = R_f i_b + \frac{d\psi_b}{dt},$$

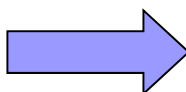
$$\psi_a = L_f i_a + \psi_{af},$$

$$\psi_b = L_f i_b + \psi_{bf},$$

$$\psi_{af} = K_e \cos \theta_e,$$

$$\psi_{bf} = K_e \cos \left(\theta_e - \frac{\pi}{2} \right),$$

$$\theta_e = N_r \theta.$$



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

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

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

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

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

Matematički model hibridnog koračnog motora

- Jednadžbe momenata:

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

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

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

$$= K_m i_b \cos(N_r \theta),$$

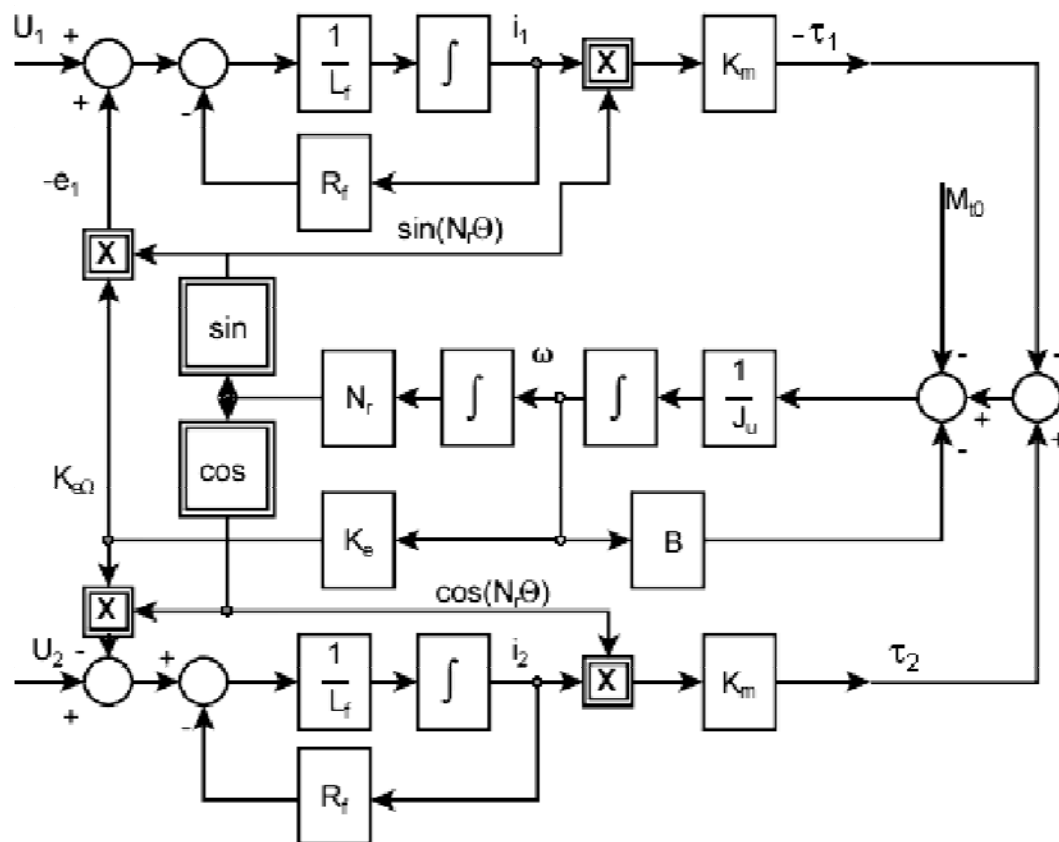
$$\tau = \tau_t + B\omega + J_u \frac{d\omega}{dt}.$$

gdje je:

- τ - moment motora, [Nm],
- τ_t - moment tereta, [Nm],
- B - koeficijent viskoznog trenja, [Nms],
- J_u - moment inercije, [kgm²],
- ω - brzina vrtnje, [s⁻¹],
- $K_m = M_0/I_n$ - konstanta motora, [Nm/A],
- M_0 - maksimalni moment motora, [Nm],
- I_n - nominalna struja, [A].

Matematički model hibridnog koračnog motora

- Nelinearna blokovska shema



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

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

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

$$= K_m i_b \cos(N_r \theta),$$

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

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

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

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

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

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

Koračni motori

- Vanjska karakteristika koračnog motora

