



Visoka škola elektrotehnike i računarstva strukovnih studija
Beograd

Predmet: Elementi automatskih sistema

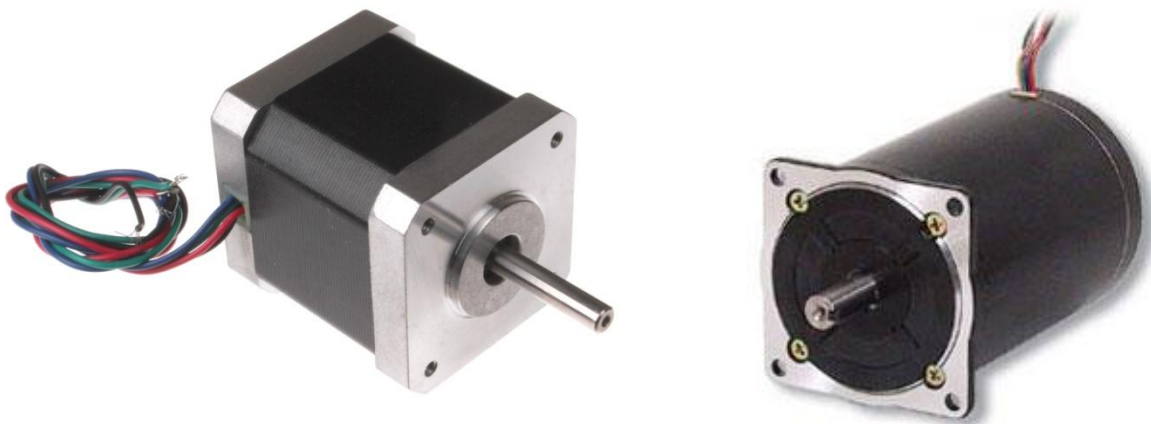
Predavanje: Step (koračni) motori

1. Uvod:

Sa razvitkom računara i digitalne tehnologije javila se i želja za razvojem motora kojima se upravlja neposredno pomoću digitalnog računara. To znači da se digitalni izlazni signali računara mogu koristiti za upravljanje motora bez složenih D/A i A/D konvertora, već samo pomoću prekidačkih kola (digitalni izlazi računara se koriste za aktiviranje elemenata koji uključuju i isključuju napajanje pojedinih namotaja motora).

Kao rezultat, javlja se koračni (step) motor (*eng. Stepper Motor*). Sama reč koračni motor navodi nas na zaključak da se on vrti u koracima, tj u diskretnim inkrementima ugaonog pomeraja. U nekim slučajevima se javljaju i u translatornoj izvedbi, ali je rotaciona daleko zastupljenija u praksi.

Dakle, koračni motori su elektromehanički konvertori energije koji pulsnu odnosno koračnu električnu pobudu pretvaraju u koračni mehanički pomeraj. Na slici 1 prikazani su tipičani izgledi step motora.



Slika 1: Izgled step motora

2. Princip rada step motora

Princip rada step motora se zasniva na činjenici da se različiti magnetni polovi privlače, odnosno na činjenici da feromagnetni materijal teži da bude što bliži magnetnom polu. Na slici 2 vidimo rotor u ovliku pločice koji je namagnetisan i na kome su označeni magnetni polovi i četiri statorska namotaja koji su povezani u parove po 2 (A1-A2 i B1-B2)

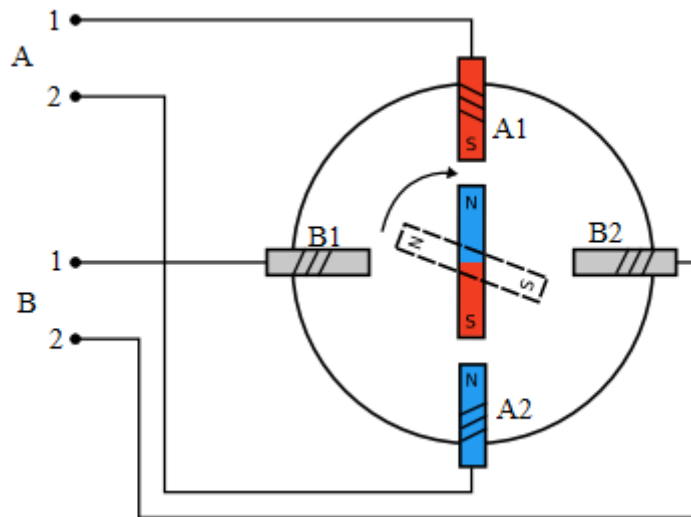
Pretpostavimo da je se u početnom trenutku rotor nalazio na poziciji označenoj isprekidanom linijom, tj da je njegov severni pol bio okrenut namotaju B1 dok je južni bio okrenut ka namotaju B2. Onog trenutka kada struja krene da teče kroz provodnik A u smeru od 1 ka 2, zbog različitosti smera namotaja A1 i A2, stavaraju se različiti magnetni polovi označeni kao na slici.

Tada severni magnetni pol rotora teži da se približi južnom magnetnom polu statora, a južni magnetni pol rotora teži da se približi severnom magnetnom polu statora.

Na ovaj način se rotor zakreće u desno za određen ugao koji je određen brojem polova rotora i brojem parova namotaja statora. U slučaju da je potrebo okrenuti rotor u suprotnom smeru, potrebna je struja koja se kreće od kraja 2 ka kraju 1 namotaja A. Na ovaj način bi namotaji A1 i A2 imali suprotne magnetne polove nego što je prikazano na slici i rotor bi se iz početnog položaja zaokrenuo na levo za isti ugao.

Dalje kretanje se nastavlja tako što se sukcesivno uključuju namotaji A i B.

Pri malim brzinama motor se zaustavlja pri svakom koraku. Pri nešto većim brzinama nema zaustavljanja ali ugaona brzina nije konstantna već se menja, dok se pri velikim brzinama dobija prilično konstantna brzina rotacije. Ovi zaključci se mogu vrlo jednostavno izvesti. Naime pri malim ugaonim brzinama (mali broj obrtaja u minuti) kada se uključe namotaji koji zaokreću rotor za jedan korak on se za vrlo kratko vreme pomeri na sledeći položaj pa zbog male ukupne brzine rotor je prinuđen da u tom položaju čeka sledeću pobudu. Kod malo većih brzina ovo vreme čekanja je smanjeno i nova pobuda dolazi pre nego što se rotor zaustavi u prethodnom položaju, dok kod znatno većih brzina pobude dolaze toliko često da rotor ne stiže ni da uspori.



Slika 2: Princip rada step motora

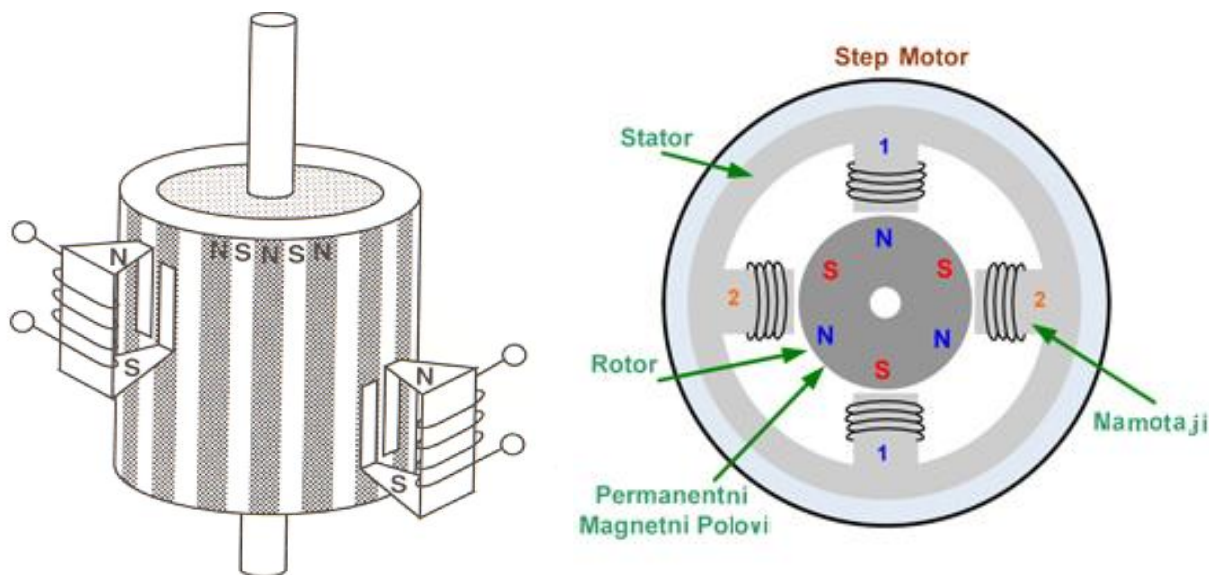
3. Tipovi step motora po principu gradnje rotora

Step motori se po principu gradnje (tipu) dele na:

- Step motore sa stalnim (permanentnim) magnetom
- Step motore sa promenljivom reluktansom
- Hibridne step motore

3.1. Step motori sa permanentnim magnetom

Rotor ovakvog step motora je najčešće radijalni (u obliku prstena) sa stalnim magnetom formiran tako da se magnetni polovi naizmenično menjaju (Slika 3). Uvek se na dijametralno suprotnim stranama nalaze različiti polovi, tj ako je sa jedne strane severni (N), sa druge strane, centralno simetrično, se nalazi južni (S) magnetni pol.



Slika 3: Izgled rotora i statora step motora sa permanentnim magnetima

Višefazno izvedeni elektromagnetni stator se sastoji od više namotaja raspoređenih uniformno po unutrašnjoj strani statora.

Uzastopnim uključivanjem ili okretanjem smeru struja pojedinih statorskih faza ili njihovih kombinacija po određenom redosledu, rezultatno magnetno polje statora skokovito se kreće u jednom ili drugom smeru.

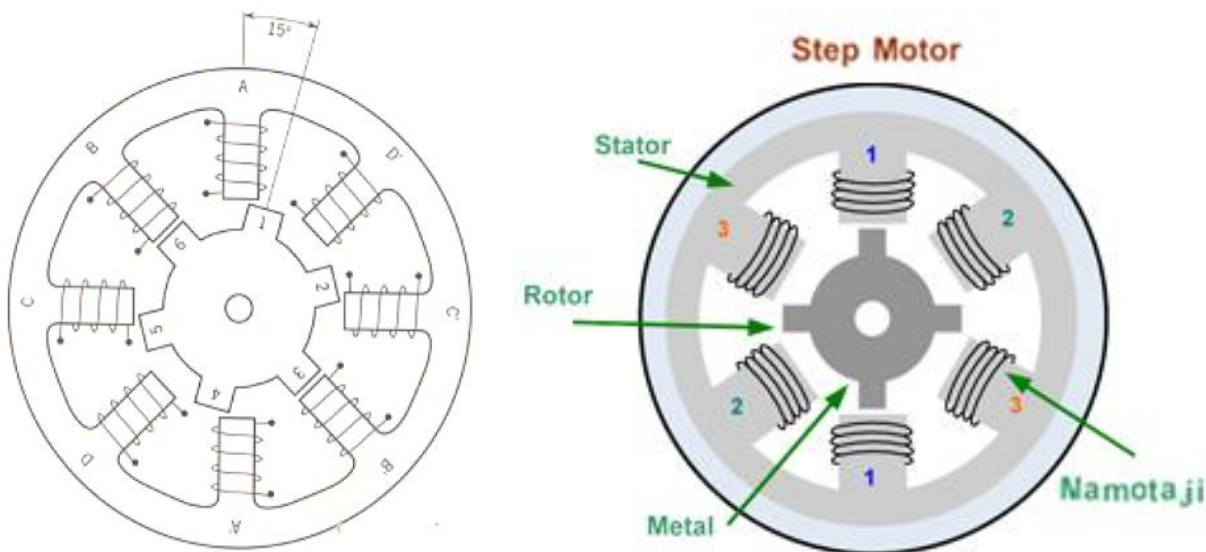
Rotor sa permanentnim magnetom se postavlja u smeru rezultatnog statorskog polja i na taj način se obavlja koračna rotacija.

Ova vrsta step motora ima malu rezoluciju zbog nemogućnosti formiranja gusto raspoređenih magnetnih polova na statoru. Tipični koračni uglovi su između 7.5° i 15° . Veoma su laki za konstrukciju i odlikuje ih visok moment držanja.

Kod ovakvih motora, čak i kada se prekine napajanje, postoji neki moment držanja koji je posledica rotora izgrađenog od stalnog magneta.

3.2. Step motori sa promenljivom reluktansom

Za razliku od motora sa permanentnim magnetom, step motori sa promenljivom reluktansom nemaju rezidualni moment držanja koji drži osovinu u jednom položaju nakon prekida napajanja. Uzrok nepostojanju zaostalog momenta je taj što rotor nije napravljen od stalnih magneta već od nazubljenog feromagnetskog materijala. Motor radi na principu minimizacije reluktanse na putanji elektromagnetnog polja.



Slika 4: Izgled rotora i statora step motora sa promenljivom reluktansom

Rotor ovakvog step motora je napravljen od nazubljenog cilindričnog feromagnetskog materijala, dok je stator takodje nazubljen višefazno namotan (Slika 4), kao što je slučaj i kod motora sa permanentnim magnetom.

Uzastopnim uključivanjem ili okretanjem smeru struja pojedinih statorskih faza ili njihovih kombinacija po određenom redosledu, rezultatno magnetno polje statora skokovito se kreće u jednom ili drugom smeru. Kako se magnetno polje statora menja tako se i položaj rotora menja pošto nazubljeni delovi rotora teže da budu što bliže aktivnim namotajima statora i na taj način minimizuju reluktansu.

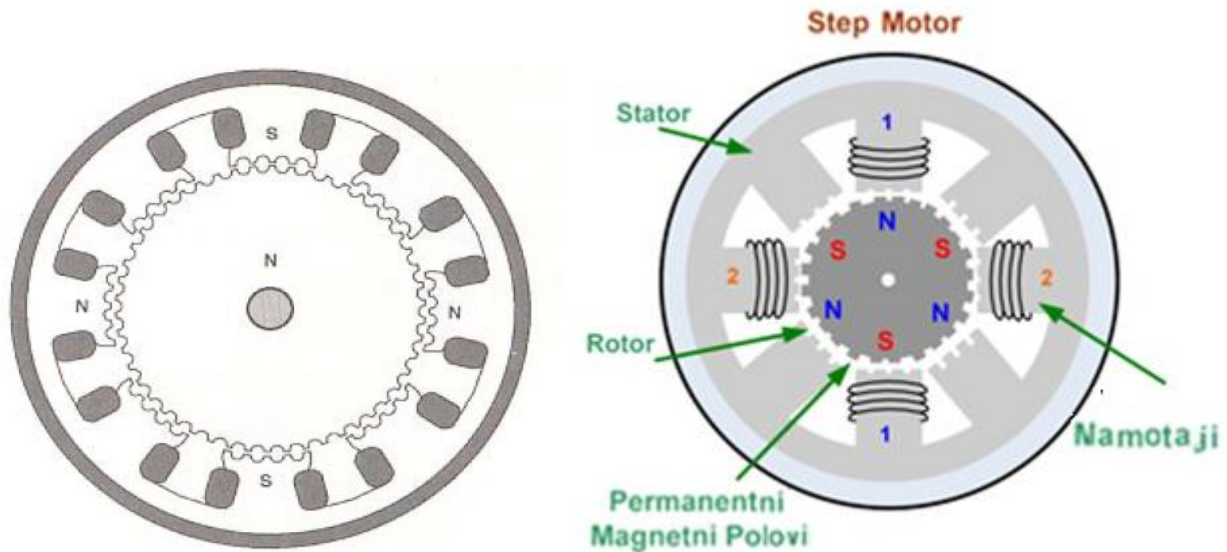
Ako pogledamo primer na slici (Slika 4, levo), možemo zaključiti da je trenutno pobudjen namotaj B. Ako se sada isključi namotaj B, a uključi namotaj C, nazubljeni delovi rotora najbliži namotaju C (2 i 5) će težiti da mu se što više približe da bi minimizovali reluktansu i na taj način će se rotor pomeriti za jedan korak udesno.

Pitanje: Šta će se desiti ako se nakon početnog položaja pobudi namotaj A?

Ovakvi step motori su već dugo na tržištu, a odlikuje ih veoma laka i jeftina gradnja. Takodje, imaju dosta bolju rezoluciju nego step motori sa permanentnim magnetom, ali i manji moment.

3.3. Hibridni step motori

Hibridni koračni motori se zasnivaju na kombinaciji načela na kojima se zasniva rad step motora sa permanentnim magnetom i promenljivom reluktansom. Oni kombinuju najbolje osobine i jednih i drugih step motora.



Slika 5: Izgled rotora i statora hibridnih step motora

Rotor ovakvih motora je od stalnog magneta, ali je nazubljen, ili je u nekim slučajevima cilindričan ali presvučen nazubljenim feromagnetskim materijalom. Takođe, stator je nazubljen i na njemu se nalaze ravnomerno raspoređeni namotaji. Na ovaj način se kombinuju dobra svojstva promenljive reluktanse i permanentnog magnetnog polja.

Tipično za ove motore je visok obrtni momenat, velika rezolucija (sitan korak), ali i relativno visoka cena. Zbog toga se u praksi najčešće pokušava rešiti problem sa prvim ili drugim tipom step motora, pa u slučaju da oni ne zadovolje koriste se hibridni.

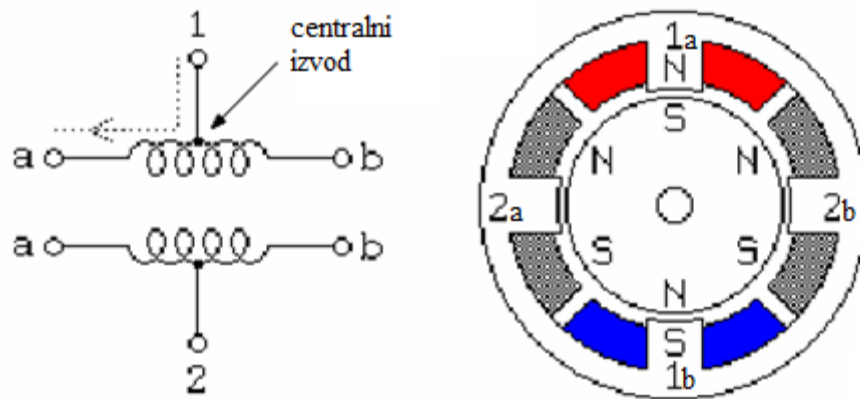
4. Tipovi step motora po izvedbi statorskih namotaja

Prema izvedbi statorskog namotaja razlikujemo dve vrste:

- unipolarni step motori (struja u faznom namotaju može teći **samo u jednom smeru**)
- bipolarni step motori (struja u faznom namotaju može teći **u oba smeru**)

4.1. Unipolarni step motori

Unipolarni step motori obično imaju 5 ili 6 izlaznih žica kao što je to prikazano na slici (Slika 6). U slučaju da ima 5 žica, izvodi 1 i 2 su kratko spojeni. Obično se ovi izvodi vode na zajedničko napajanje dok se krajevi **a** i **b** naizmenično uzemljuju. Na ovaj način se magnetno polje skokovito rotira, pa rotor prati njegove rotacije.



Slika 6: Šema veze statorskih namotaja i poprečni presek unipolarnog step motora

U primeru sa slike (Slika 6), namotaj 1 je ravnomerno raspoređen između gornjeg i donjeg dela statora dok je namotaj 2 ravnomerno raspoređen između levog i desnog dela statora i izvučeni su njihovi srednji izvodi. Ako sada te izvode povežemo na zajedničko napajanje i krenemo redom naizmenično da spajamo krajeve 1a – 2a – 1b – 2b, dobićemo kretanje rotora u desno.

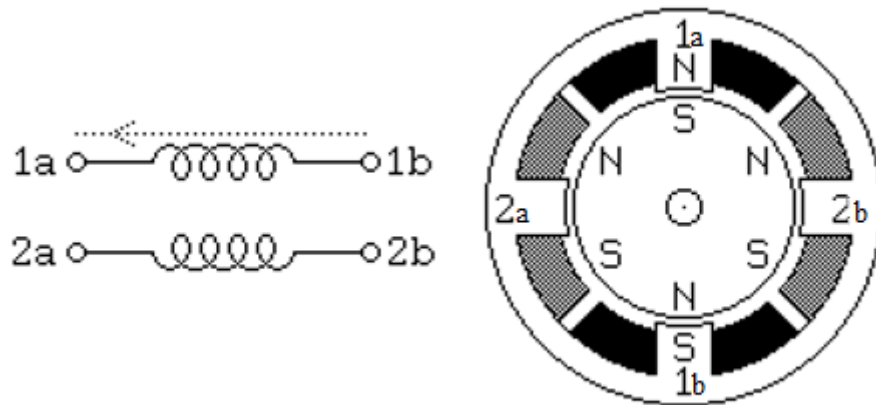
Upravljanje na ovaj nači je veoma jednostavno pošto se sve svodi na uključivanje i isključivanje namotaja bez bilo kakve promene smera ili intenziteta struje. Mane ovakvog načina upravljanja su što je moment dosta mali pošto u jednom trenutku je aktivan samo jedan namotaj. Ovaj moment se može povećati ako se u isto vreme aktiviraju dva susedna namotaja. Tada se pol statora pozicionira na sredinu između ovih namotaja. Ipak iako ovaj način pojačava moment (oko 70%), utrošak energije je duplo veći. Primeri uključivanja ovih namotaja su prikazani dole:

```
Namotaj 1a 1000100010001000100010001
Namotaj 1b 0010001000100010001000100
Namotaj 2a 0100010001000100010001000
Namotaj 2b 0001000100010001000100010
vreme --->
```

```
Namotaj 1a 1100110011001100110011001
Namotaj 1b 0011001100110011001100110
Namotaj 2a 0110011001100110011001100
Namotaj 2b 1001100110011001100110011
vreme --->
```


4.2. Bipolarni step motori

Kod bipolarnih step motora obično imamo 4 izlazne žice i nemamo srednji izvod. U tom slučaju, da bi promenili smer elektromagnetnog polja, struja mora naizmenično proticati u oba smera kroz namotaje statora.



Slika 7: Šema veze statorskih namotaja i poprečni presek unipolarnog step motora

U primeru sa slike (Slika 7), vidimo stator sa četiri namotaja koji su spojeni u parove (gornji i dolji, i levi i desni). U početnom trenutku kraj **1a** je povezan na uzemljenje a kraj **1b** na napajanje i u tom slučaju struja teče od kraja **1b** ka kraju **1a** i na gornjem namotaju formira severni a na donje južni magnetni pol. U sledećem trenutku se ovi krajevi odvajaju od napajanja i mase, a krajevi **2b** i **2a** se vezuju, respektivno. Na ovaj način se na desnom namotaju statora stvara južni a na levom severni magnetni pol i rotor se zaokreće za jedan korak u desno. Dalje, ovi kontakti se odvajaju pa se kontakti 1a i 1b ponovo uključuju ali sada 1a ide na napajanje a 1b na uzemljenje, da bi na gorenjm namotaju dobili južni a na donje severni magnetni pol, i da bi rotor nastavio dalje okretanje u desno.

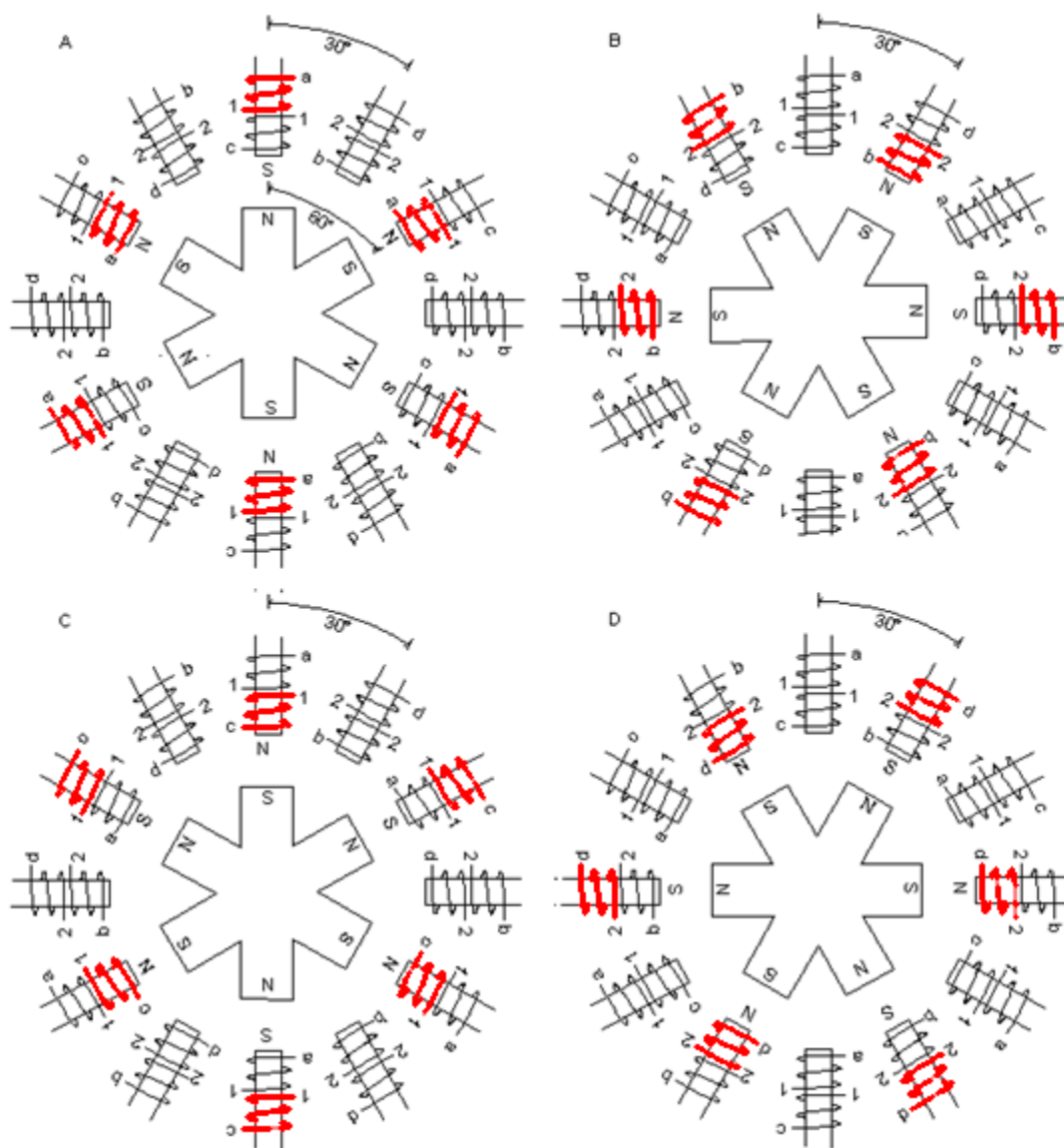
Sama gradnja ovakvoh statora je ista kao i kod unipolarnih motora, samo što sada nema srednjeg izvoda i samim tim znatno je lakši za formiranje namotaja. Takođe velika prednost ovakvog motora je ta što u jednom trenutku su aktivna 2 namotaja, pa je samim ti i moment veći. Međutim elektronika potreba za upravljanje ovakvim motorom je znatno kompleksnija nekog kod unipolarnih pošto nam je za svaki namotaj potreban po jedan H most koji nam dozvoljva da struju kroz njih uključujemo u oba smera.

5. Režimi rada step motora

5.1. Koračni režim rada

Kod koračnog režima rada, kao što je prikazano na slici (Slika 8), u jednom trenutku se pobuđuju samo jedni namotaji i na taj način se realizuje pomeraj rotora za jedan korak. Dakle u jednom trenutku se menjaju dva upravljačka signala, tj jedan se isključuje a drugi se uključuje.

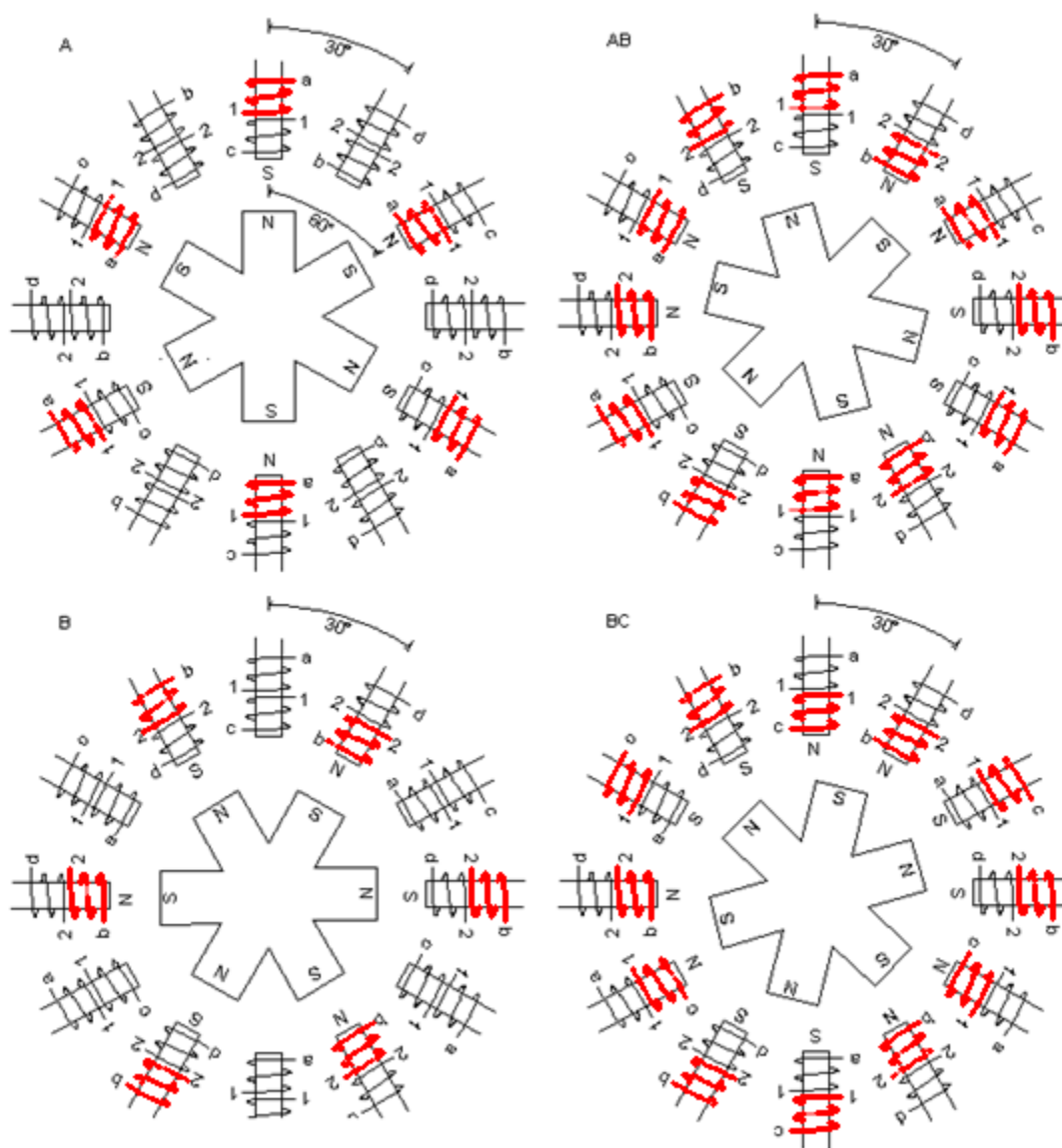
Ovakav režim rada daje veliki moment i lak je za implementaciju, ali je zato rezolucija nešto manja, i prilikom svakog koraka se javljaju sitni preskoci, tj. pri svakom koraku rotor se ne zaustavlja momentalno već ima kratak prelazni režim.



Slika 8: Princip koračnog režima rada step motora

5.2. Polukoračni režim rada

Kod polukoračnog režima rada, kao što je prikazano na slici (Slika 9), u jednom trenutku se pobuđuje jedan namotaj a u sledećem dva itd. I na taj način se realizuje pomeraj rotora za pola koraka. Dakle u jednom trenutku se menja samo jedan upravljački signal, ili se uključuje sledeći ili se gasi prethodni. Na ovaj način dupliramo rezoluciju step motora, ali gubimo moment.

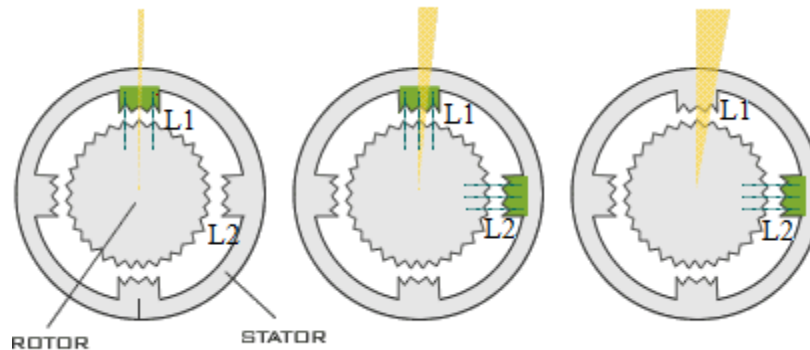


Slika 9: Princip polukoračnog režima rada step motora

5.3. Mikrokorlačni režim rada

Ponekad, kada je potrebna još bolja rezolucija (manj koraci) koristi se mikrokorlačni (microstepping) režim rada. Podešavanjem odnosa struja kroz susedne namotaje L1 i L2 može se podešavati ugao zakretanja rotora tj. deo koraka (Slika 10). Finoća ovakvog podešavanja je obično $1/32$ koraka. Ukoliko se podese jednake struje, rotor će se postaviti na pola koraka.

Na ovaj način dobijamo najbolju rezoluciju i rotiranje bez zaustavljanja čak i pri malim brzinama, ali je upravljanje dosta komplikovanije. Namie, struje namotaja statora konstantno variraju da bi podelile jedan korak u više sitnijih. Obično se kontroler implementiran za mikrokorlačni režim rada može koristiti i za rad sa punim i polu korakom.



Slika 10: Princip mikrokorlačnog režima rada step motora

6. Prednosti i nedostaci step motora.

Prednosti step motora su:

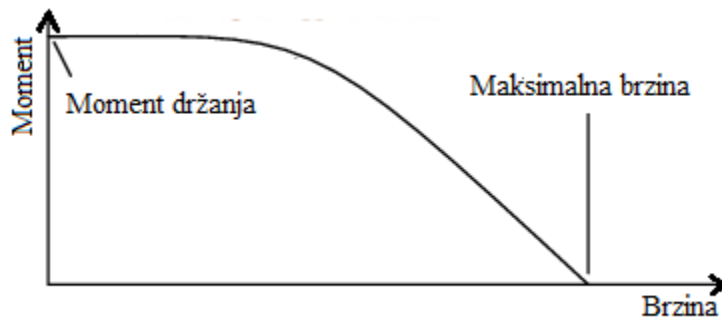
- **Niska cena** - Mehanička konstrukcija rotora i statora je vrlo jednostavna. Kao posledica ove jednostavne konstrukcije i proizvodna cena motora može biti niska. Na rotoru nema namotaja. Time su redukovani gubici na rotoru, što je jako značajno jer nema efikasnog načina za odvođenje toplote sa rotora. Takođe je eliminisana i opasnost od razletanja rotorskog namotaja usled dejstva centrifugalnih sila pri velikim brzinama obrtanja.
- **Male dimenzije**
- **Velike upravljačke mogućnosti**
- **Pamćenje pozicije** – nije potreban enkoder da bi imali informaciju o poziciji pošto je svaki korak deterministički. Međutim, ako se u nekom trenutku pojavi neki moment koji motor ne može da savlada i prođe nekoliko aktivacija namotaja, trajno gubimo informaciju o poziciji
- Moguće je vršiti upravljanje u otvorenoj sprezi
- Otpornost na ispad jedne ili više faza motora.

Elementi automatskih sistema

- Visoka efikasnost motora, čak veća od efikasnosti asinhronog motora.
- Za rad motora nisu potrebne četkice, što vodi povećanju pouzdanosti.
- Postoje topologije kod kojih je eliminisana mogućnost kratkog spoja na jednomernom međukolu.
- Temperaturne varijacije parametara motora su male u poređenju sa motorima sa permanentnim magnetima.

Nedostaci step motora su:

- **Fiksni korak.**
- Mali učinak, veliki preskok i oscilatornost u odzivu od jednog koraka.
- Ograničene mogućnosti za pokretanje tereta s velikim momentom inercij.
- Moment trenja i aktivni teret mogu da povećaju grešku položaja (moguć je **gubitak koraka** – posledica je akumulirana greška položaja).
- Oscilatoran rad i teško je ostvariti upravljanje pri velikim brzinama.
- Ne mogu funkcionisati bez energetskog pretvarača.
- Usled isturenih polova na rotoru i statoru, nivo buke može biti značajan.
- Dodatni veliki problem ovih motora su njegove karakteristike pri velikim brzinama. Naime, moment ovih motora pri porastu brzine opada mnogo brže nego kod klasičnih motora jednosmerne struje. Izgled statičke karakteristike je prikazan na slici (Slika 11).



Slika 11: Statička karakteristika step motora