

ELEKTRIČNI MOTORI ZA POSEBNE NAMJENE

Kukić, Danijel

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:060743>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-04-02**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH
TEHNOLOGIJA OSIJEK

Sveučilišni studij

ELEKTRIČNI MOTORI ZA POSEBNE NAMJENE

Završni rad

Danijel Kukić

Osijek, 2019.

SADRŽAJ

1. UVOD	3
1.1. Naziv zadatka.....	4
2. PODJELA ELEKTRIČNIH MOTORA	5
2.1 Podjela izmjeničnih motora	5
2.1.1 Asinkroni motori	5
2.1.2 Sinkroni motor	7
2.2 Podjela istosmjernih motora	9
3. ELEKTRIČNI STROJEVI POSEBNE NAMJENE.....	11
3.1 Tahogeneratori	11
3.1.1 Tahogenerator istosmjerne struje	12
3.1.2. Tahogenerator izmjenične struje	13
3.2. Selsini – davači položaja	14
3.4. Linearni motori	16
4. KORAČNI MOTORI	19
4.1. Podjela i vrste koračnih motora	19
4.2. Permanentnomagnetski koračni motori	20
4.2.1. Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori.....	22
4.2.2. Trofazni permanentnomagnetski koračni motori	24
4.3. Varijabilnoreluktancijski koračni motori.....	26
4.4. Hibridni koračni motori	30
4.4.1. Rotacijski hibridni koračni motor	31
4.4.2. Translacijski hibridni koračni motor.....	33
5. NAČINI POBUĐIVANJA KORAČNIH MOTORA.....	36
5.1. Jednosmjerna pobuda.....	36

5.2 Dvosmjerna pobuda	37
5.3. Pobuda bifilarno namotanih faza	38
5.4. Pentagonska pobuda	39
5.5. Zvezdasta pobuda	40
6. PRIMJENE KORAČNIH MOTORA I UPRAVLJANJE POMOĆU ARDUINO PLATFORME	41
6.1. Opće primjene koračnih motora	41
6.2. Upravljanje koračnim motorom pomoću arduino platforme	42
6.2.1 Arduino platforma.....	42
6.2.2. Pokretanje motora uz pomoć "drivera"	44
6.2.3. Primjer upravljanja koračnih motora	45
7. ZAKLJUČAK	46
POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA	47
POPIS KORIŠTENE LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA	48
ŽIVOTOPIS	50
SAŽETAK/ABSTRACT	51

1. UVOD

U ovom završnom radu biti će riječi o motorima za posebne namjene. Takvi motori danas se koriste svakodnevno u našem okruženju. Primjerice u kućanskim aparatima nalazimo razne motore kojima je zadaća nešto pokrenuti, ostvariti no nisu svi takvi motori posebne namjene. Primjeri takvih motora i njihovi principi rada dani su u 3. poglavlju ovog završnog rada. Tako se nalaze tahogeneratori, linearni motori, selsini, koračni motori i drugi. U samom uvodu u problematiku, iznijeti su osnovni motori izmjenične i istosmjerne struje. Temelj električnih strojeva upravo su takvi osnovni motori, a to su primjerice asinkroni motori, sinkroni motori, istosmjerni motori i drugi primjeri. Ovdje su i oni navedeni jer znanje njihovog rada i njihove konstrukcije potrebno je za savladanje svih ostalih motora pa tako i motora za posebne namjene.

Najviše će biti riječi o jednom od najbitnijih, glavnih predstavnika motora za posebne namjene a to su koračni motori. Kao što i sama riječ kaže „koračni“ znači da se kreće u koracima odnosno diskontinuirano. Većini motora danas se rotor okreće kontinuiranom brzinom, jer upravo prvi osmišljeni motor vrtio kontinuirano. Ne toliko davno odnosno prije nekih dvadesetak godina počeo se afirmirati koračni motor zbog razvitka energetske elektronike. Koračni motor ne pokreće se na standardni način odnosno direktnim priključenjem na izvor stalnog napona, nego između napajanja i koračnog motora dolazi sklop energetske elektronike za njegovo pobuđivanje. U petom poglavlju izneseno je nekoliko vrsta pobuda koje pokreću razne vrste koračnih motora.

Koračni motori danas imaju široku primjenu, dok će u budućnosti sve više i više takvi motori imati značaja. Danas se oni koriste svugdje gdje je potrebno pomicanje u koracima. Od obavljanja operacija po točno određenom programu do pogona s fino upravljivim brzinama i pomacima. Primjer takvih uređaja u kojima su koračni motori našli svoju primjenu su primjerice šivači strojevi, mehaničkim pogonima računskih strojeva, u pisačima, regulacijskim uređajima. Od danas i u dronovima, a u budućnosti svoju primjenu mogli bi naći i u robotima. U šestom poglavlju ovog rada iznesen je jedan konkretan primjer upravljanja koračnim motorom. Ovaj završni rad je pregled malih motora posebne namjene i teorijska podloga principa rada koračnih motora, te njihove vrste i primjene. U šestom poglavlju iznesen je samo pregled navedene primjene, a mjerenja i eksperimentalni dio nalazi se u pozvanoj literaturi.

1.1. Naziv zadatka

U završnom radu potrebno je izložiti fizikalne osnove i teoriju rada električnih motora. U dogovoru s mentorom odabrati primjere električnih motora za posebne namjene. Opisati njihove električne i mehaničke karakteristike te područja njihove primjene. Prema mogućnostima za navedene primjere električnih motora za posebne namjene navesti i opisati odgovarajuće ekvivalentne sheme. Izlaganje je potrebno poduprijeti grafičkim prikazima, shemama i prema mogućnosti mjerenjima. Mogućnost unaprijeđenja motora za posebne namjene (uz pomoć energetske elektronike) te moguća upotreba unaprijeđenog u budućnosti.

2. PODJELA ELEKTRIČNIH MOTORA

Električni motor je stroj koji pretvara električnu energiju u mehaničku. Danas je gotovo neizostavni dio svakog postrojenja, kućnih uređaja i industrije. Osim električnih motora postoje i motori s unutarnjim izgaranjem, motori na hidraulični pogon, mlazni motori i broji drugi. Ovdje će biti riječ samo o električnim motorima i to onim za posebne namjene. Kod električnih motora postoji puno podjela, a ovdje će biti rečeno samo osnovne podjele. Pod osnovnim podjelama podrazumijeva se podjela električnih motora prema napajanju, prema struji, prema uzbudi i sl. Prema vrsti napajanja električni motori se dijele na istosmjerne i izmjenične, dalje postoji podjela i svakog od njih. Primjerice izmjenični se dijele još na jednofazne i trofazne, na sinkrone i asinkrone, izmjenične kolektorske i drugi. Kod istosmjernih motora osnovna podjela je prema vrsti uzbude pa tako postoje nezavisno uzbuđeni istosmjerni motori, paralelni, serijski, kompaudni i uzbuda putem permanentnih magneta.

2.1 Podjela izmjeničnih motora

Kao što je gore već navedeno izmjenični motori danas su najkorišteniji, koristi ga gotovo svaka industrija. Relativno je jednostavne konstrukcije a osobito kad se uspoređuje sa istosmjernim, manji su troškovi zbog velike dostupnosti izmjenične struje. Prema broju faza takvi motori mogu biti jednofazni i trofazni, a glavna podjela takvih motora je na sinkrone i asinkrone, gdje se sinkroni manje koriste u odnosu na asinkrone zbog niza prednosti koje ću biti rečene u nastavku.

2.1.1 Asinkroni motori

Asinkroni stroj je rotirajući električni stroj izmjenične struje kojem se brzina rotora n pri određenoj frekvenciji mreže na koju je priključen mijenja u uskom području s promjenom opterećenja. Asinkroni strojevi tipični su predstavnici strojeva izmjenične struje male snage, a s obzirom na široku primjenu, proizvode se serijski. Pretežno se upotrebljavaju kao motori, a rjeđe kao generatori

ili električne kočnice. Asinkroni motori izvode se kao trofazni i kao jednofazni, a dijele se na kliznokultne i kavezne.

Asinkroni motor otkrio je 1883. Nikola Tesla. On je prvi došao do zaključka da se u višefaznom namotu izmjenične struje stvara okretno magnetsko polje, na čemu se zasniva rad asinkronog motora. Poslije tog pronalaska asinkroni motor naglo se razvio i potisnuo iz šire upotrebe do tada vodeći istosmjerni motor [1].

Asinkroni motor kao i svaki stroj sastoji se iz dva osnovna djela rotora na kojemu su smješteni rotorski namoti i stator na kojemu su smješteni statorski namoti koji mogu biti spojeni u spoj zvijezda ili trokut u slučaju trofaznog asinkronog motora.

Princip rada

U ovom odjeljku biti će kratko objašnjen način rada asinkronog motora. Naime dovođenjem napajanja na statorske namote a kao posljedica toga protekne struja u statorskim namotima koja stvara okretno magnetsko polje koje se vrti sinkronom brzinom. Sinkrona brzina izražava se pomoću sljedeće relacije:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (2-1)$$

gdje je: n_s – sinkrona brzina, f – frekvencija, p – broj pari polova.

Vodiči na rotorskog namota sijeku silnice okretnog magnetskog polja i u rotorskom namotu inducira se napon. Ako je strujni krug rotora zatvoren a što je kod kaveznih motora uvijek ispunjeno dolazi do protjecanja struje u rotorskom strujnom krugu. Posljedicom ovoga stvara se sila na rotorske namote i za posljedicu ima stvaranje okretnog momenta i zakretanja rotora. Rotor se u praznom hodu vrti brzinom koja je približna sinkronoj brzini no nikada je ne dostiže. Zato se javlja i pojam klizanja koje se definira kao relativni odnos brzina okretnog magnetskog polja i brzine rotora, a označava se mali slovom s .

$$s\% = \frac{n_s - n}{n_s} \quad (2-2)$$

gdje je: n_s – sinkrona brzina, n – brzina vrtnje rotora.

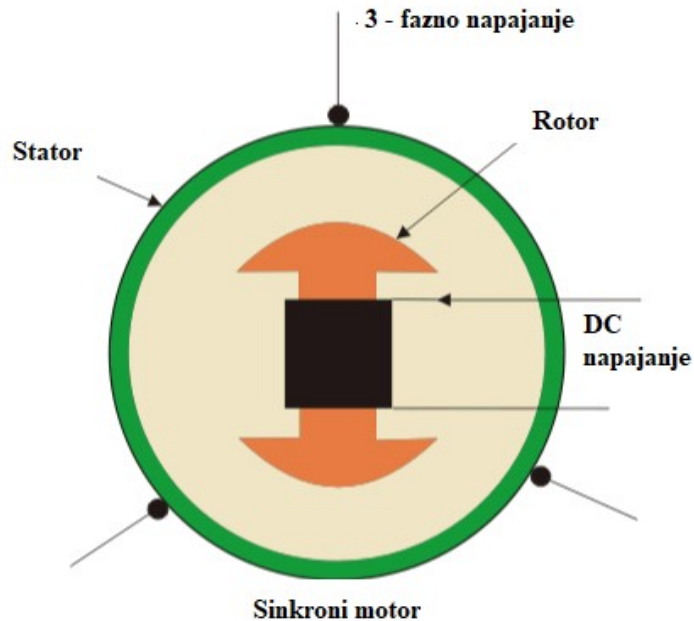
Ovo je ukratko i na najjednostavniji način objašnjen princip rada jednog od danas najkorištenijeg motora u gotovo svakoj industriji. O asinkronim motorima može se jako puno pričati i objašnjavati, a ovo ovdje što je rečeno je tek sami početak pručavanja što u ovom završnom radu nije tema nego samo mali osvrt na asinkroni motor.

2.1.2 Sinkroni motor

Sinkroni motor ne razlikuje se po konstruktivnoj izvedbi od generatora, što znači da svaki sinkroni stroj može raditi i kao motor i kao generator. Priključen u elektroenergetski sustav, sinkroni stroj će raditi kao generator ako u mrežu šalje električnu energiju, a kao motor ako iz mreže uzima električnu energiju.

Rad sinkronog motora isti je kao i kod generatora, ali čitav proces treba razmatrati obrnutim putem. Sinkroni motor rotira sinkronom brzinom a to znači da ga treba sinkronizirati s mrežom na koju se priključuje. Pretpostavimo da je sinkroni stroj sinkroniziran i priključen na mrežu. Ako na osovini stroja ne djeluje nikakav protumoment, on radi u praznom hodu. U statorskom namotu inducira se napon koji drži ravnotežu napona mreže. Ako se rotor sinkronog motora optereti nekim radnim mehanizmom pojaviti će se kut opterećenja β . Da bi svladao protumoment kojim ga je opteretio radni stroj, rotor iz mreže uzima onoliko energije, koliko mu je potrebno za svladanje momenta tereta.

Ako se rotor sinkronog motora optereti toliko da kut opterećenja β prijeđe 90° el, motor više ne može svladati taj protumoment i on će se zaustaviti. Kut β je kut opterećenja i elektromagnetski moment je proporcionalan sa sinusom kuta β . Za $\beta=90^\circ$, $\sin \beta=1$. Motor stvarno radi između $0 < \beta < 90^\circ$ el. Na slici 2.1. vidi se pojednostavljeni prikaz rada sinkronog motora.



Slika 2.1 Pojednostavljeni prikaz principa rada sinkronog motora [2].

Najteži dio svakog sinkronog motora i jedan dio zbog čega se rijede koristi je svakako njegovo pokretanje. Priključenjem na mrežu mirujući sinkroni stroj neće se pokrenuti. Nego se koristi načini za njegvo pokretanje a to su:

- a) tako da je motor sinkroniziran,
- b) tako da je u asinkronom stanju.
- c) da se koristi „sinkroni zalet“

Najčešće se koristi drugi i treći način dok je prvi način u praksi odbačen jer je potrebna prethodna sinkronizacija mreže što je složen i dugotrajan posao.

Sinkroni motor najčešće se upotrebljuje tamo gdje je potrebna stalna brzina bez obzira na promjenu opterećenja u nazivnim granicama npr. za pogon kompresora i ventilatora. Sinkroni motor ima odliku popraviti faktor snage mreže pa se u tu svrhu i upotrebljava.

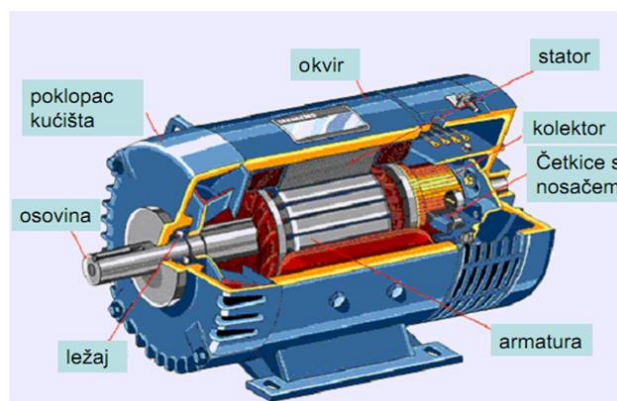
2.2 Podjela istosmjernih motora

Istosmjerni strojevi dijele se na generatore i motore. Istosmjerni motor je stroj koji istosmjernu električnu energiju pretvara u mehaničku. Konstruktivno su istosmjerni generatori i motori jednako građeni, pa svaki istosmjerni stroj može biti generator ili motor, no iz praktičnih razloga redovito se neki istosmjerni stroj upotrebljava samo kao generator ili samo kao motor. Primjena istosmjernih motora u novije vrijeme raste i na drugim područjima. U posljednjih tridesetak godina mnogo se primjenjuju u automatiziranim pogonima i svugdje gdje je potrebno ekonomično mijenjati broj okreta u širokom području.

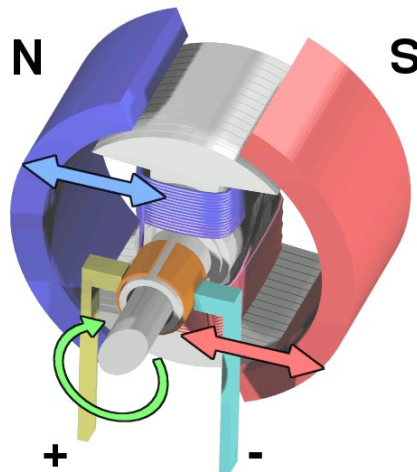
Budućnost će pokazati hoće li se istosmjerni motor održati u pogonima promjenjivog broja okreta ili će ga iz tih pogona istisnuti znatno jeftiniji kavezni asinkroni motor napajan iz elektroničkih energetske pretvarača frekvencije i napona. Na slici 2.2 prikazani su dijelovi istosmjernog motora.

Princip rada

Kao i kod svakog stroja istosmjerni motor sastoji se od dva osnovna djela rotora (armatura) i statora (uzbuda). Prilikom priključenja motora na istosmjernu mrežu, potekne struja preko sustava četkica – kolektor u armaturni namot. Struja se već preko spomenutog sustava četkica – kolektor pretvara u izmjeničnu i to vrtnjom rotora. Do zakretanja i vrtnje rotora dolazi uslijed protjecanja struje kroz armaturni namot koji se nalazi u magnetskom polju prouzrokovanom uzbudnom strujom koja protječe kroz uzbudni ili statorski namot, time se javlja sila na vodiče rotora a time i zakretni moment. Na slici 2.3 vidi se pojednostavljeni prikaz principa rada istosmjernog motora.



Slika 2.2 Dijelovi istosmjernog motora [3].



Slika 2.3 Pojednostavljeni prikaz istosmjernog motora [2].

Prema različitim vrstama uzbuđene istosmjerni motori dijele se na:

- a) nezavisno uzbuđene istosmjerne motore
- b) serijski uzbuđene istosmjerne motore
- c) paralelno uzbuđene istosmjerne motore
- d) složeno uzbuđene ili kompaundne motore
- e) uzbuđene pomoću permanentnih magneta

3. ELEKTRIČNI STROJEVI POSEBNE NAMJENE

U prethodnom odjeljku pokazane su osnovne vrste motora i osnovni principi rada, a što je potrebno za razumjevanje električnih strojeva posebne namjene što je i tema ovog završnog rada. Pod motorima za posebne namjene podrazumjevaju se motori koji svoj rad temelje na poznatim principima, ali su konstruktivno prilagođeni potrebama koje proizlaze iz raznih pogonskih zahtjeva sustava gdje se primjenjuju.

U ovom poglavlju navest će se osnovne podjele motora za posebne namjene, kao i njihov način rada i primjena. Motori za posebne namjene su tzv. tahogeneratori, selsini odnosno davači položaja, linearni motori i koračni motori. Posebnu važnost imati će koračni motori koji će biti objašnjeni u sljedećem poglavlju.

3.1 Tahogeneratori

Tahogeneratori su rotacijski električni strojevi koji imaju zadatak inducirati napon koji je proporcionalan brzini vrtnje n . Tahogenerator omogućuje točno mjerenje brzine vrtnje i uključivanje brzine vrtnje kao električne veličine u procese mjerenja i regulacije [1]. Primjer jednog tahogeneraatora prikazan je slikom 3.1.



Slika 3.1 Primjer jednog tahogeneraotora perilice rublja [4].

3.1.1 Tahogenerator istosmjerne struje

Tahogenerator istosmjerne struje je istosmjerni generator s konstantnim tokom. Konstantni magnetski tok postiže se permanentnim magnetima ili kontroliranom nezavisnom uzбудom.

Kod takvog stroja inducirani napon proporcionalan je brzini vrtnje:

$$E = K \cdot n \quad (3-1)$$

Gdje je K konstanta tahogeneratorsa, a govori kolika je brzina vrtnje pri induciranom naponu od 1 V.

Nadomjesna shema prikazana je na sl. 3.2, a princip rada takvog generatora jednak je principu rada istosmjernih generatora sa jedinom razlikom da se ovdje radi o konstantnom magnetskom toku uzbude stroja.

Elektro motorna sila odnosno inducirani napon je proporcionalan magnetskom toku i brzini vrtnje:

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot n \quad (3-2)$$

Gdje je: k_e – konstanta, Φ - magnetski tok, n - brzina vrtnje.

Naponska jednadžba glasi:

$$E = k_e \cdot \Phi \cdot n = u + \Delta u + R_a \times I_a \quad [6] \quad (3-3)$$

Gdje je: k_e – konstanta,

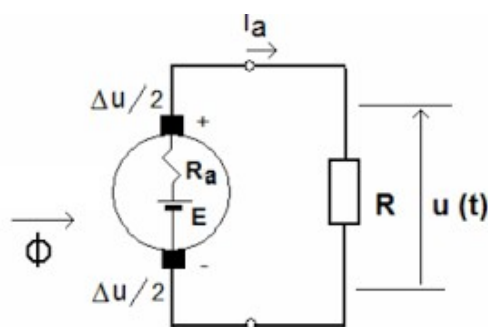
- Φ – magnetski tok,

- n – broj okretaja,

- Δu – pad napona na četkicama,

- R_a – otpor armature,

- I_a – struja armature



Slika 3.2. Nadomjesna shema istosmjernog generatora [5].

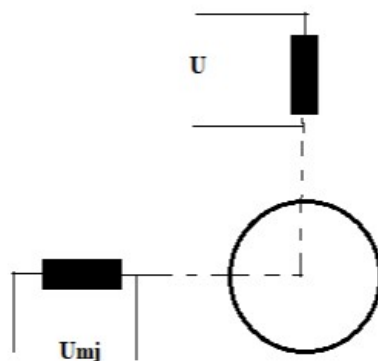
3.1.2. Tahogenerator izmjenične struje

Izmjenični tahogenerator je mali električki stroj koji radi na izmjeničnom napon. Amplituda mu je proporcionalna brzini vrtnje. Postoje dvije skupine izmjeničnih tahogeneratora, a to su sinkroni i asinkroni. Sinkronima je amplituda izmjeničnog signala proporcionalna brzini vrtnje, a asinkronima je amplituda i frekvencija izmjeničnog signala proporcionalan brzini vrtnje [6].

Tahogenerator izmjenične struje gradi se bez kolektora, s rotorom od permanentnog magneta i namotom na statoru.

Točnost ovog tahogeneratora kod precizne izvedbe dostiže do 0,1% [1].

Najčešće se izvodi dvofazni tahogenerator izmjenične struje. Dvofazni se zove jer je stator namotan dvofazno, s kutem od 90° između osi namota obje faze. Namot jedne faze se priključuje na konstantan izmjeničan napon, a na drugoj fazi se mjeri napon U_{mj} . Na slici 3.3 prikazana je shema dvofazanog tahogeneratora.



Slika 3.3. Shema dvofaznog tahogeneratora [1]

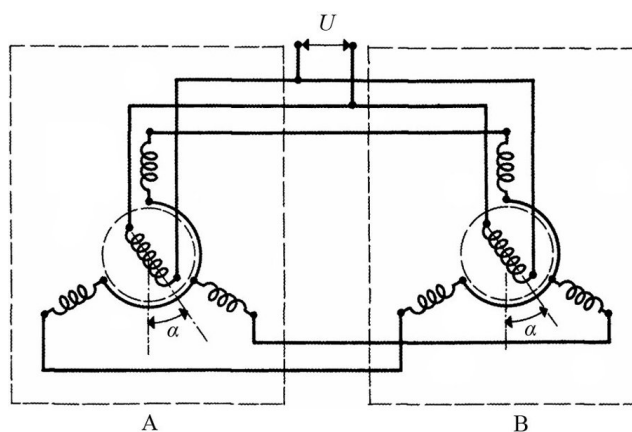
3.2. Selsini – davači položaja

Selsini su mali električni strojevi posebne namjene, a koji su po konstrukciji slični sinkronom stroju s okruglim rotorom. Upotrebljava se u sustavima daljinskog upravljanja i u mjernim sustavima odnosno tamo gdje je potrebno praćenje položaja rotora jer položaj rotora sadrži neku informaciju, a za prijenos te informacije upotrebljava se selsin.

Kao što je u prethodnom odlomku rečeno da mu je konstrukcija slična sinkronom stroju, stoga se potrebno prisjetiti principa rada sinkronog stroja. Kao što je poznato sinkroni stroj sastoji se od rotora i statora. Kod selsina rotor i stator izvedeni su od dinamo – limova, stator se najčešće sastoji od trofaznog namota, ali može biti i jednofazan i dvofazan. Rotor po obodu ima ugrađen namot raspoređen na taj način, da magnetska indukcija u rasporu ima približno sinusoidalnu raspodjelu.

Kod sinkronih strojeva poznato je da je uzbuda istosmjerna i smještena je na rotoru, pa vrtnjom rotora dolazi do induciranja napona na statoru odnosno armaturi stroja. Selsini imaju zadatak da u rotoru stvore magnetski tok, koji će u statoru izazvati odgovarajuće indukcije u stanju rotacije i u stanju mirovanja. Stoga uzbuda kod selsina je izmjenična, a frekvencija uzbudne struje ima raspon od 50 do 1000 Hz (najčešće 50,60,400 ili 500 Hz) [1].

Taj mali motor ugrađen u nekom od navedenih sustava polaožajem svog rotora u odnosu na stator u stvari sadrži neku informaciju. Tu informaciju potrebno je prenijeti na drugo mjesto gdje se daljnje ta informacija obrađuje ili registrira [1].



Slika 3.4 Shema selsina, A – predajni selsin, B – prijamni selsin,
U – priključeni napon [7].

Na sl. 3.4 vidi se shema selsina davača i selsina prijavnika. Inducirani naponi selsina davača prenosimo prema selsinu prijavniku gdje će se kod selsina prijavnika inducirati na analogan način kao i kod selsina davača izmjenično pulzirajuće magnetsko polje. Položaj polja prijavnika prema osi statorskog namota davača određen je kutem α . Za taj isti kut α zakrenut će se rotor prijavnika i na taj način imamo prijenos informacije o položaju rotora. Detaljna analiza principa rada ovdje nije obrađena nego su dane kratke informacije o specijalnom motoru selsinu. Na slici 3.5. prikazan je primjer jednog selsina u praksi.

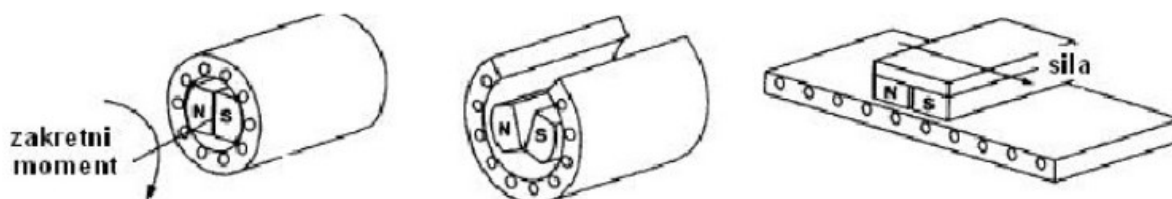


Slika 3.5. Primjer jednog selsina u praksi [8].

3.4. Linearni motori

Linearni motori su električni strojevi posebne namjene koji omogućavaju obavljanje radnog procesa gibanjem djela stroja linearno te se na taj način električna energija pretvara u mehaničku izravno bez upotrebe složenih mehaničkih naprava.

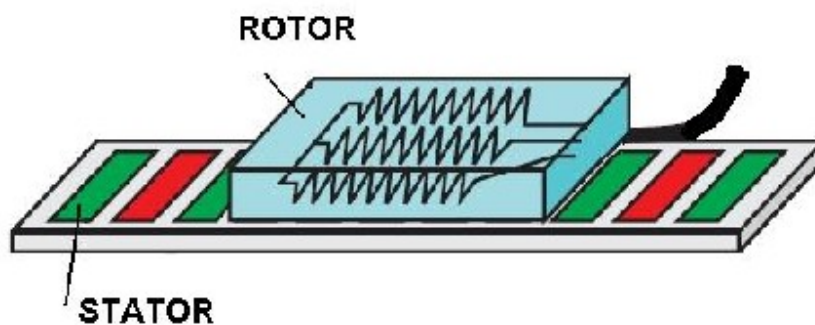
Kao svaki stroj pa tako i linearni motor sastoji se od rotora i statora s višefaznim namotima i magnetskim polovima. Linearni motor se najlakše može predočiti kao rotacijski koji je preseječen duž osi rotacije te zatim razvijen u ravnu plohu [9]. Koncept takvog motora prikazan je slikom 3.6.



Slika 3.6. Koncept linearnog motora [9].

Na ovaj način moguće je transformaciju rotacijskog gibanja u linearno gibanje primjeniti kod svih stojeva. Najčešće korišteni linearni motor je motor za progresivno gibanje asinkronog principa rada. Pa kako i sam naziv kaže motor radi po principu kaveznog asinkronog motora. Kod linearnih motora neće se govoriti stator nego se upotrebljava jedan drugi pojam, a to je primar, analogno tome rotor takovog stroja imat će naziv sekundar.

Kod linearnog motora, okretno magnetsko polje primara postalo je uzdužno i na svom putu presijeca vodiće sekundara u linearnom stanju. U sekundaru se javlja moment zakretanja, koji pokreće sekundar uzdužno (linearno gibanje). Ako je sekundar učvršćen (fiksne tračnice, slika 3.7.) onda će se na principu akcije reakcije pokrenuti primar [1]. Ovdje je dan kratak princip rada linearnih motora, takvi linearni motori se rijetko koriste, njihova najčešća primjena je kod željezničkih vozila, a kao blizak takav primjer je upotreba u tzv. magnetno – levitacijskim vlakovima. Na slici 3.8. prikazan je jedan primjer linearnog servomotora iz prakse.



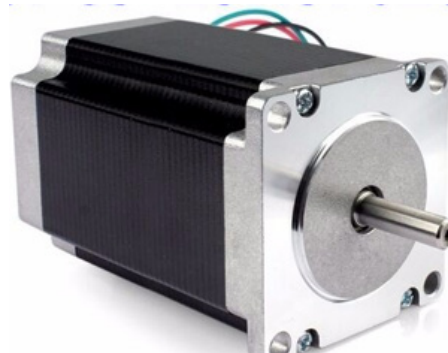
Slika 3.7. Princip linearnog motora [10].



Slika 3.8. Izgled linearnog servomotora [11].

4. KORAČNI MOTORI

Koračni motori su mali električni strojevi posebne namjene koji pulsnu odnosno koračajnu električnu pobudu pretvaraju u koračajni mehanički pomak. Sastoje se od statora i rotora koji su magnetizirani tako, da imaju stalni magnetski tok. Naziv koračni dobili su po tome što nemaju kontinuirano zakretanje rotora, nego se zakretanje vrši po koracima a napajaju se u određenom ritmu – programu, impulsima istosmjerne struje. Specifično je to da na malim koračajnim brzinama rotor se zaustavlja na svakom koračajnom položaju. Na srednjim brzinama nema zaustavljanja rotora na svakom koračajnom položaju, ali kutna brzina oscilira ovisno o položaju. Što se koračajna brzina više povećava, oscilacije kutne brzine se smanjuju odnosno na velikim koračajnim brzinama kutna brzina teži konstantnoj vrijednosti [12]. Prikaz jednog koračnog motora u praksi prikazan je slikom 4.1.



Slika 4.1 Primjer jednog koračnog motora [13].

4.1. Podjela i vrste koračnih motora

Koračni motori mogu se podijeliti prema vrsti uzbude, broju polova, broju faza i prema načinu gibanja.

Prema vrsti uzbude koračni motori dijele se na:

- ✓ motore sa elektromagnetskom uzbuđom
- ✓ motore sa uzbuđom trajnim – permanentnim magnetom.

Prema broju polova koračni motori dijele se na:

- ✓ serijski proizvedeni koračni motori
- ✓ stalni magneti na rotoru.

Prema broju faza najčešći motori su sa 2,3,4,5,6 faza.

Prema načinu gibanja koračni motori dijele se na:

- ✓ rotacijske
- ✓ translacijske

Koračni motori pripadaju vrsti sinkronih motora, jer rotor koračnog motora sinkrono prati kretanje statorskog polja zbog sila nastalih međudjelovanjem s poljem rotorskih magneta ili reluktantnih sila[14]. Statorsko polje stvaraju strujni impulsi u određenom ritmu i rasporedu pa se prema tome rotor koračnog motora zakreće, odnosno prati korake sinkrono statorskom polju.

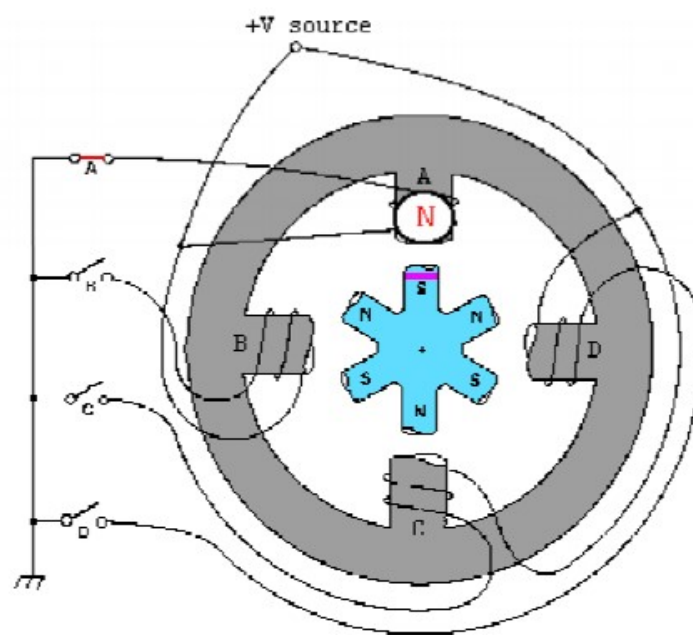
Glavna podjela koračnih motora je na motore sa stalnim magnetom – permanentnomagnetski (PM), s promjenjivom reluktancijom odnosno varijabilnoreluktancijski motori te hibridni koračni motori.

4.2. Permanentnomagnetski koračni motori

Rotor takvog koračnog motora magnetiziran je stalnim odnosno permanentnim magnetima, a stator je magnetiziran električnom strujom odnosno strujnim impulsima, te je izveden sa više faza, a ovdje biti će objašnjen princip rada sa dvofazno i trofazno izvedenim statorom. Dovođenjem strujnih impulsa prema određenom rasporedu i u određenom ritmu na statorske namote, rezultatno magnetsko polje statora mijenja se skokovito, a rotor koračnog motora postavlja se u smjeru rezultatnog statorskog polja te se rotor zakreće u koracima. Slika 4.2. prikazuje pojednostavljeni izgled rotora i statora koračnog motora uzbuđenog permanentnim magnetima, također slika zorno prikazuje princip rada takvog motora. Na stator je dovedeno napajanje, a najjednostavniji način za

dobivanje strujnih impulsa je pomoću sklopki, tako da se sklopke prema sljedećoj slici pale i gase naizmjenično i tako protjecanjem struje kroz namote zubom statora stvara se magnetsko polje.

Rotor je namagnetiziran trajnim magnetom, te će djelovati magnetska sila prouzročena jednim zubom statora na rotor, time će se rotor zakrenuti prema magnetiziranom zubu statora i na taj način stvara se diskontinuirano odnosno koračajno zakretanje rotora.



Slika 4.2. Pojednostavljeni prikaz principa rada koračnog motora sa permanentnom uzбудom[15].

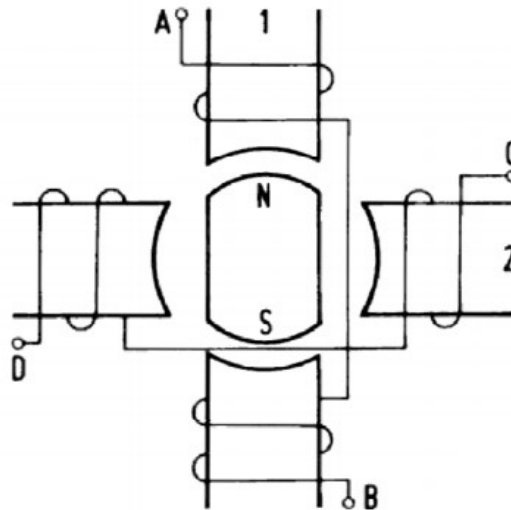
Kut zakreta rotora može se odrediti poznavajući ukupan broj zubi svih statorskih paketa, broj pari polova rotora i broj statorskih paketa, a sve to povezuje sljedeća relacija:

$$\alpha_k = \frac{360}{N_{su}} = \frac{360}{2 \cdot p_r \cdot q_s} \quad (4-1)$$

Gdje je: N_{su} - ukupan broj zubi svih statorskih paketa, p_r – broj pari polova rotora, q_s – broj statorskih paketa

4.2.1. Dvofazni permanentnomagnetski koračni motori

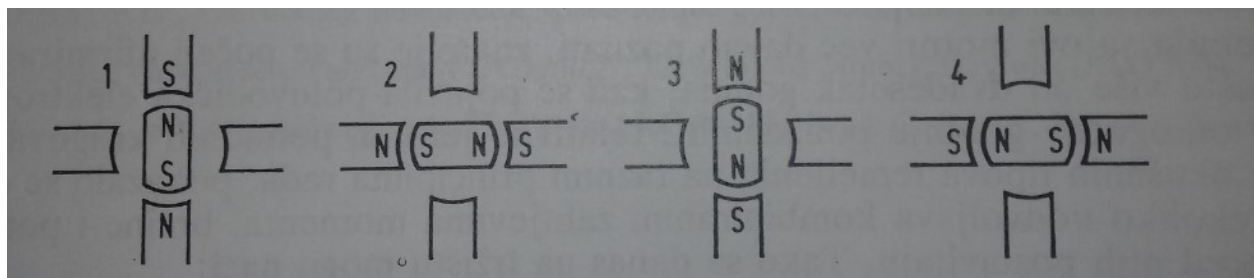
Najjednostavniji primjer ove vrste motora je dvofazni četveropolni motor koji je prikazan na slici 4.3. S obzirom na to da je riječ o četveropolnom dvofaznom motoru, kut zakreta rotora je 90° odnosno $\pi/2$ radijana. Princip rada je sljedeći: Motor se uzbuđuje prema tablici 4.1, a stanje rotora koračnog motora prikazano je prema slici 4.4. U prvom koraku, dovodenjem + pola izvora na fazu 1 priključak A, stvara se magnetsko polje, smjer takvog polja određuje se pravilom desne ruke, stoga po pravilu desne ruke južni pol nalazi se kod priključka A, a rotor se zakrene tako da sjeverni pol rotora bude ispod južnog pola statora. Svi ostali koraci kod ovog motora određuju se analogno. Sve je prikazano slikom i tablicom ispod.



Slika 4.3. Dvofazni permanentnomagnetski koračni motor[12].

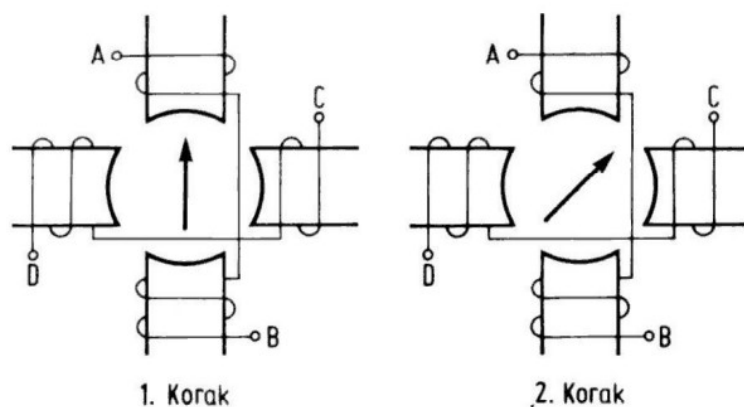
Tablica 4.1. Način pobuđivanja faza statora[12].

Korak	FAZA1		FAZA2	
	A	B	A	B
1.	+(+)	-(-)	0(0)	0(0)
2.	0(0)	0(0)	+(-)	-(+)
3.	-(-)	+(+)	0(0)	0(0)
4.	0(0)	0(0)	-(+)	+(-)



Slika 4.4. Stanje dvofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora za vrijeme okretanja[12].

S istim motorom, samo s redoslijedom pobuđivanja prema tablici 4.2. postiže se tzv. polukoračni rad s koračnim kutom od $\pi/4$ radijana [12].



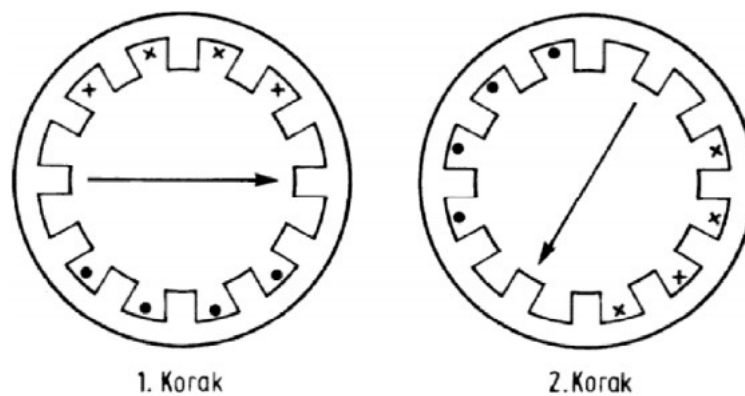
Slika 4.5. Polukoračni rad dvofaznog permanentnomagnetskog motora[15].

Tablica 4.2. Tablica pobuđivanja za polukoračni rad koračnog motora[15].

Korak	FAZA1		FAZA2	
	A	B	A	B
1.	+(+)	-(-)	0	0
2.	+(+)	-(-)	+(-)	-(+)
3.	0	0	+(-)	-(+)
4.	-(-)	+(+)	+(-)	-(+)

4.2.2. Trofazni permanentomagnetski koračni motori

Konstrukcija trofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora je složenija nego kod dvofaznog koračnog motora. Stator nema izraženih polova, nego utore u koje su smješteni svici, namotan je slično kao trofazni asinkroni motor.

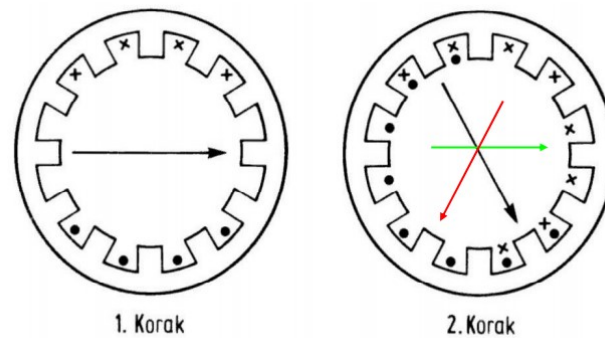


Slika 4.6. Stanje trofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora pri okretanju koracima od 120° [15].

Tablica 4.3. Način pobude trofaznog PM koračnog motora [15].

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

Pobuđivanjem svake faze zasebno prema tablici 4.3, nastaje rotacija s korcima od 120° (slika 4.6.) odnosno $2\pi/3$ radijana. U slučaju priključenja 2 faze istodobno nastaje rotacija s korcima od 60° (slika 4.7.), a u slučaju priključenja sve tri faze istodobno nastat će rotacija s korcima od 30° .



Slika 4.7. Stanje trofaznog PM koračnog motora pri okretanju koracima od 60° [15].

Tablica 4.4. Način pobude trofaznog PM koračnog motora, s priključenjem dvije faze istodobno[15].

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

Prednosti PM koračnih motora

Takvi koračni motori imaju statički moment i kad nije priključeno napajanje, tj. u nepobuđenom stanju imaju zaporni moment odnosno mogu se opteretiti momentom po vrijednosti jednakim zapornom momentu, a da se ne izazove kontinuirani pomak. Potrebna im je manja snaga za rad, veće je prigušenje odziva i mehanička jednostavnost [15].

Nedostatci PM koračnih motora

Mali je omjer zakretnog momenta motora i momenta inercije, prevelika pobuda može izazvati demagnetizaciju rotora, koji inače u usporedbi s ostalim koračnim motorima, imaju veliku inerciju, maksimalna brzina vrtnje nije velika i nisu pogodni za male korake [15].

4.3. Varijabilnoreluktancijski koračni motori

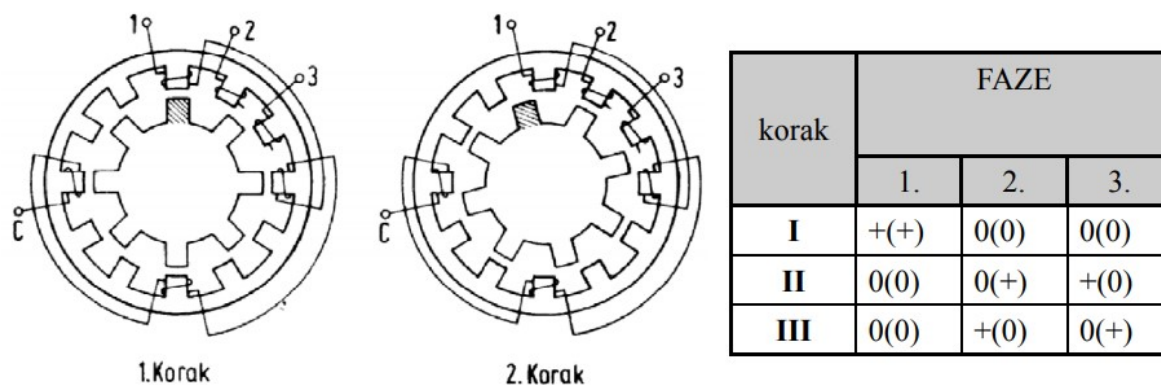
Reluktantni koračni motori su najjednostavniji i najjeftiniji koračni motori, svoj rad zasnivaju na pojmu reluktancije odnosno magnetskog otpora. Postoji više vrsta reluktantnih koračnih motora. Mogu se podijeliti prema broju paketa namota na jednopaketne i višepaketne, prema načinu kretanja na rotacijske i translacijske te prema vrsti zračnog rasporeda na motore s radijalnim zračnim rasporedom i na motore sa aksijalnim zračnim rasporedom. Ovdje pod naslovom podpoglavlja stoji naziv varijabilnoreluktancijski koračni motori jer se takvim motorima rotor zakreće prema mjestu najmanje reluktancije i time se želi reći o promjenjivosti reluktancije unutar motora, stoga i stoji u nazivu varijabilno što znači promjenjivo. Prema vrsti reluktantnog motora ovdje će biti riječ o rotacijskom u trofaznoj i četverofaznoj verziji. Kao što se iz prethodne rečenice vidi trofazni i četverofazni odmah se nameće i to da su takvi motori namotani na statoru multifazno. Stator i rotor su nazubljeni, te je rotor izrađen od mekog željeza.

Magnetski otpor magnetskog kruga sastoji se od željeza i zračnog rasporeda te se mijenja u ovisnosti o kutnom položaju rotora. Kad se strujom zavojnice pobudi statorsko polje, na rotor djeluje moment tražeći položaj najmanje reluktancije. Nalazi ga kada je kut magnetskih osi statora i rotora jednak nuli. Tada moment postaje jednak nuli i rotor stoji u ravnotežnom položaju. Tom položaju s najmanjom reluktancijom pripada i minimum pohranjene energije u sustavu [14].

Trofazni varijabilreluktancijski koračni motori

Trofazni varijabilreluktancijski trofazni motor prikazan je na slici 4.8., takvi motori obično imaju 12 statorskih i 8 rotorskih zuba. Dovođenjem napajanja na faze prema slici 4.8, rotor će se zakretati u smjeru desnog vijka koračnim kutom od 15° . Na slici se vidi da se ukapčanjem svake pojedine faze poravnaju 4 zuba rotora s četiri zuba statora. Ostali se neporavnati zubi rotora nalaze pod kutom od 15° prema osovinama neporavnatih zuba statora druge i treće faze. Prema slici vidljivo je da će pobuđivanjem faza I, III, II izazvati rotaciju u smjeru desnog vijka, a pobuđivanjem faza I, II, III rotacija će se odvijati u suprotnom smjeru [12].

Polukoračajni pomak od $7,5^\circ$ postiže se pobuđivanjem 1 pa zatim 2 faze, što bi u prijevodu značilo, nakon što se pobudi faza I, a zatim zajednički se pobude faze I i II dolazi do navedenog polukoračajnog pomaka.



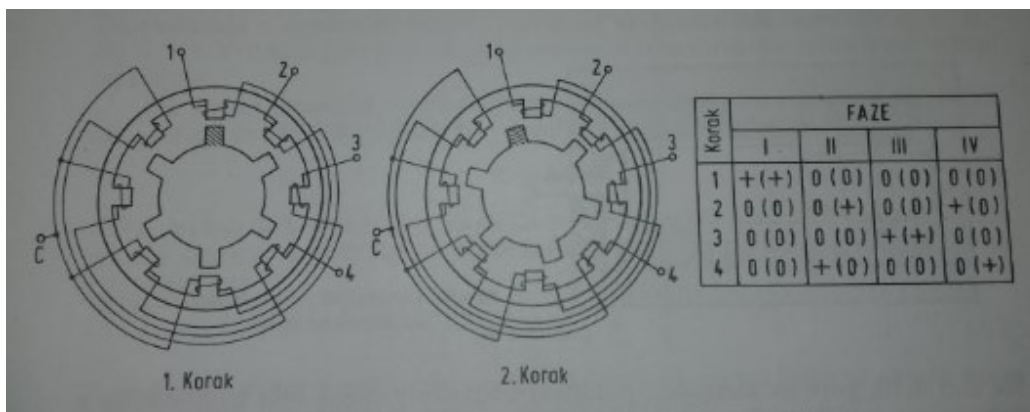
Slika 4.8. Trofazni varijabilreluktancijski koračni motor u punokoračajnom okretanju[12]

Četverofazni varijabilnoreluktancijski koračni motor

Takav motor obično ima osam statorskih i šest rotorskih zuba, stoga i zubni kut statora iznosi 45° , a zubni kut rotora 60° .

Pobuđivanjem faza prema slici 4.9, rotor će se zakretati u smjeru desnog vijka koračnog kuta u iznosu od 15° . Ovo vrijedi samo za oznake izvan zagrade, a za oznake unutar zagrade okretanje rotora biti će u suprotnom smjeru. Ako se prema slici nakon pobuđivanja faze I, pobudi faza II, poravnat će se zubi rotora sa zubima faze II, a to je pomak u smjeru lijevog vijka također za 15° .

Polukoračajni pomak događa se ukapčanjem faza redoslijedom I, I-II, II, II-III, III, III – IV, IV, IV-I, odnosno okretanje s kutom koji je polovicu manji od punokoračajnog pomaka i iznosi $7,5^\circ$.

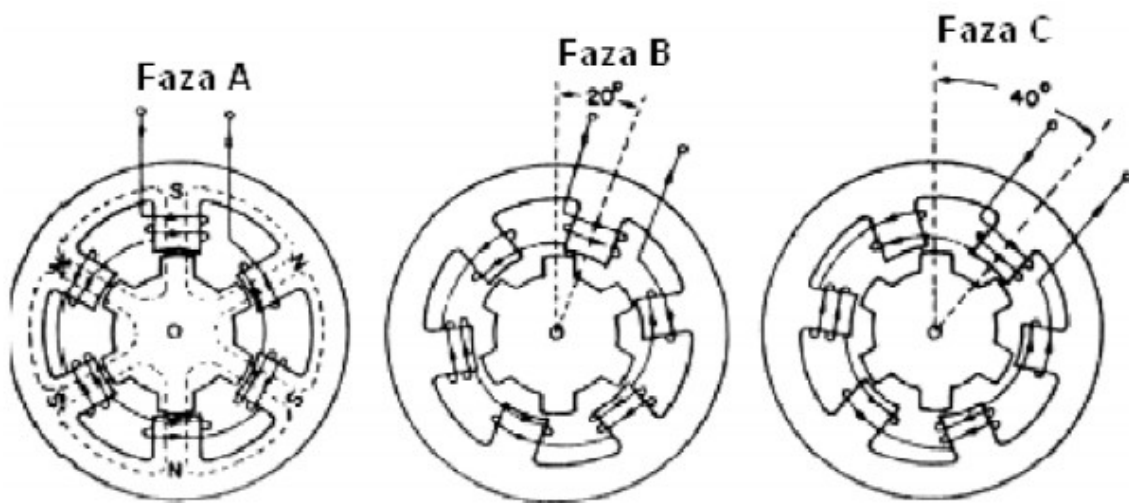


Slika 4.9. Četverofazni varijabilreluktancijski koračni motor [12]

Višepaketni varijabilreluktancijski koračni motor

Rotor takvog motora je višepolni od mekog željeza, stator je izveden od lameliranih limova. Broj faza ovih motora jednak je broju paketa što u prijevodu znači jedan paket jedna faza. Paketi rotora i statora su mehanički učvršćeni a magnetski i električni nezavisni [15].

Na slici 4.10 se vidi pomak rotora višepaketnog motora, odnosno zubi rotora faze A poravnavaju se sa zubima statora. Tu je i minimalna reluktancija, a radna točka je stabilna.



Slika 4.10. Pomak rotora višepaketnog koračnog motora [15]

Kut zakreta rotora kod višepaketnih varijabilreluktancijskih koračnih motora određuje se prema izrazu (4-2):

$$\alpha_k = \frac{360^\circ}{N_k} = \frac{360^\circ}{zn_f} \quad \left[\frac{^\circ}{\text{korak}} \right]. \quad (4-2)$$

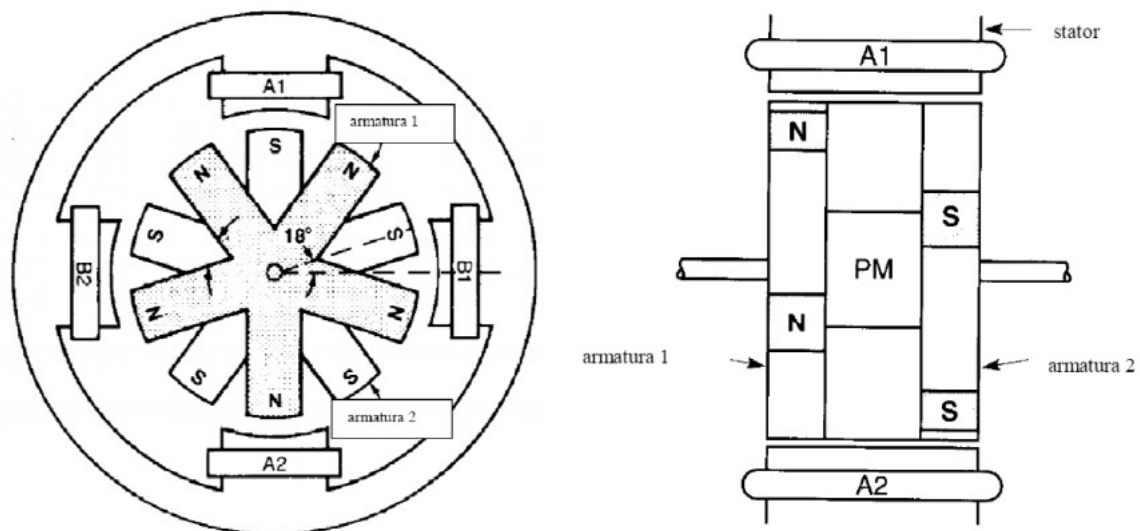
Gdje je: z – broj zubi po fazi, n_f - broj faza.

Primjene reluktantnih koračnih motora

Takvi motori primjenjuju se najčešće u motorima skutera i drugih električnih hibridnih vozila, u industrijskim ventilatorima, pumpama, kompresorima, mikserima, centrifugama u aparatima za domaćinstvo i brojne druge primjene [15].

4.4. Hibridni koračni motori

Nešto kompleksnija vrsta koračnih motora su hibridni koračni motori. Naziv hibridni dolazi zbog samog principa rada takvih motora, naime rad se zasniva na kombinaciji permanentnomagnetskih i varijabilreluktancijskih motora. Stator i rotor takvih motora su nazubljeni, odnosno na nazubljenom statoru nalazi se elektromagnetski svici, a na nazubljenom rotoru ugrađen je permanentni magnet. Na taj način postižu se dobra svojstva varijabilne reluktancije i permanentnog magnetskog polja. Na slici 4.11 prikazan je hibridni motor i njegov presjek.



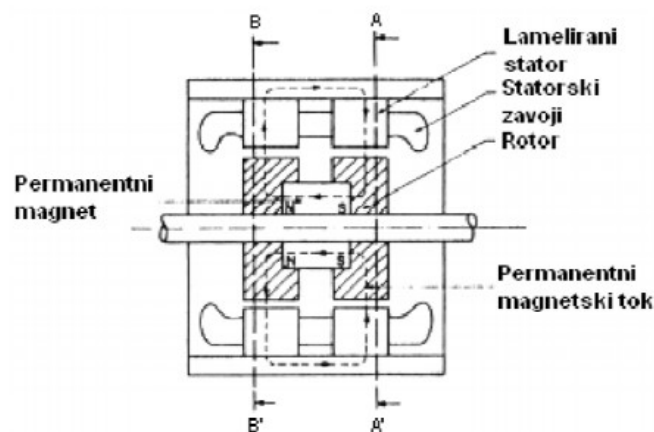
Slika 4.11. Prikaz koračnog motora i njegovog presjeka [15]

Postoje rotacijski, translacijski i petofazni hibridni koračni motori. U nastavku biti će razmotren rad rotacijskih i translacijskih motora, o petofaznima motorima biti će samo kratki osvrt, jer je njegov rad prilično kompleksan.

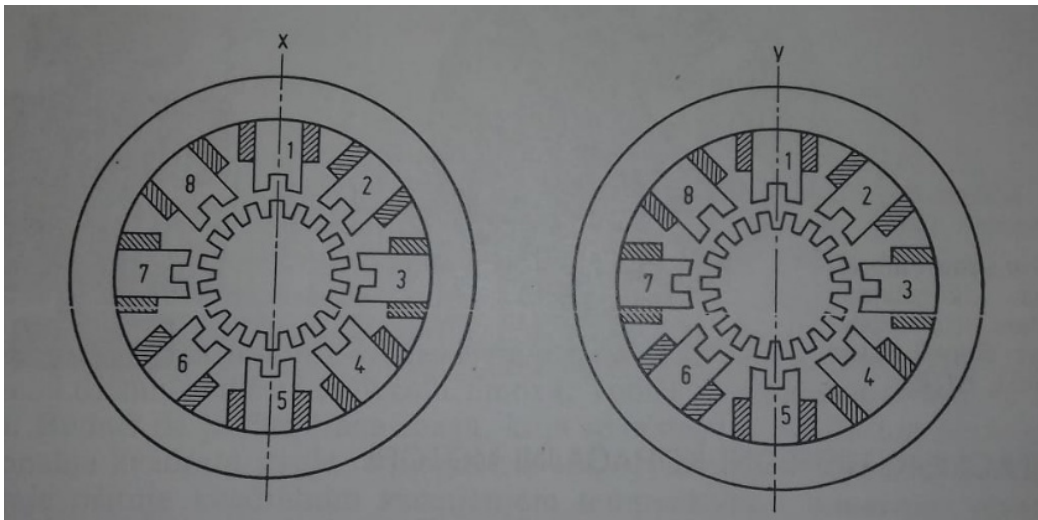
4.4.1. Rotacijski hibridni koračni motor

Kao što je gore rečeno, permanentni magnet smješten je na rotoru hibridnog koračnog motora te je izrađen u obliku cilindra, a ugrađen u rotor je aksijalno. U aksijalnim produžecima cilindričnog magneta i s jedne i s druge strane smješteni su nazubljeni polni nastavci od mekog željeza.

Magnetski tok permanentnog magneta izlazi iz magnetskog pola, prolazi kroz polni nastavak, a zatim kroz zračni raspor i elektromagnetski pol, pa kroz željezni vijenac, drugi elektromagnetski pol, zračni raspor, drugi nastavak i zatvara se u drugom polu permanentnog magneta, kao što se vidi na slici 4.12. Magnetski tok prolazeći kroz sve navedeno čini petlju i na svakom djelu te petlje postoji reluktancija i to različita, elektromagnetski polovi statora su namotani dvofazno i bifilarno. Stoga prema slici 4.13 polovi 1,3,5 i 7 tvore fazu A, a polovi 2,4,6 i 8 tvore fazu B, polovi jedne faze namotani su tako da svaki idući pol ima suprotno usmjereno elektromagnetsko polje, te prema tome elektromagnetski tok pola 1 usmjeren je prema osovini, a tok pola 3 usmjeren je suprotno, tako isto sa polovima 5 i 7, a budući da su svi polovi namotani bifilarno, ukapčanjem suprotno namotanih svitaka, elektromagnetski tokovi poprimaju suprotne smjerove, Na taj način dolazi do pojave magnetskih sila, te nastaje okretni moment koji zakrene rotor hibridnog koračnog motora [14 str. 141, 142].



Slika 4.12. Aksijalni presjek osmopolnog hibridnog motora [15]



Slika 4.13. Poprečni presjek osmopolnog hibridnog motora [12]

Prema broju zuba, razmak odnosno broj zubi statora je različit od razmaka odnosno broja zubi rotora. Kut zakreta rotora određuje se prema relaciji (4-3):

$$\alpha_k = \frac{360}{N_k} \left[\frac{\circ}{\text{korak}} \right]. \quad (4-3)$$

Na slici 4.13. se vidi osmopolni hibridni koračni motor, na svakom polu ima po 2 zuba što ukupno čini 16 zuba na statoru, a polni nastavci rotora ima 18 zuba, te prema tome je zubni kut rotora takva motora [12]:

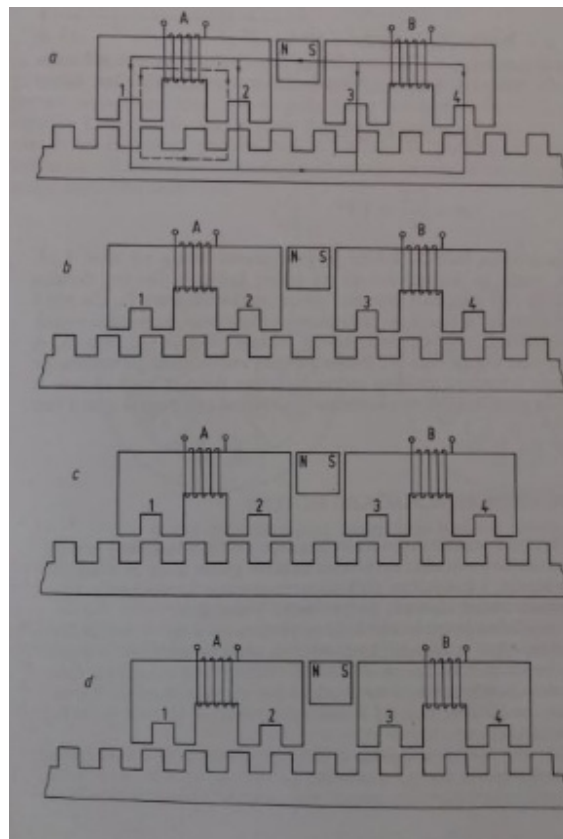
$$T_R = 360/Z_R = 360/18 = 20^\circ$$

Koračni kut ovisi o broju faza statora i broju polova rotora, jedan zubni kut rotor prevali za onoliko koraka koliki je dvostruki broj faza, te je stoga koračni kut [12]:

$$A = 360/2n \quad Z_R = T_R/2n = 20/4 = 5^\circ \quad (4-4)$$

4.4.2. Translacijski hibridni koračni motor

Motori koji u svom radu koriste rotacijska gibanja zovu se rotacijski motori, kao što je i u prethodnom poglavlju kod posebnih vrsta motora, posebno je istaknut linerani motor koji u svom radu za razliku od većine motora koristi translacijsko gibanje. Upravo i ovakav translacijski hibridni koračni motor proizvodi traslatorno gibanje. Kao što se i svaki motor sastoji od rotora i statora, tako se i translacijski koračni motor sastoji od 2 glavna djela. Stator je četvrtasta čelična greda i taj dio miruje, a dio koji se giba naziva se translator koji se sastoji od magnetne elektropermanentne kombinacije. Na čeličnoj gredi nalaze se jednolično poredani kvadratični zubi na debeloj čeličnoj podlozi po koji se giba translator. Translator se sastoji od dva elektromagneta i jednog snažnog permanentnog magneta, a što se može vidjeti na slici 4.14., na istoj slici vidi se kako svaki elektromagnet na translatoru ima 4 nazubljena pola, a između tih elektromagneta nalazi se permanentni magnet.



Slika 4.14. Jedan ciklus pomaka translacijskog hibridnog koračnog motora [12]

Princip rada

Magnetski tok koji je prouzrokovan permanentnim magnetom jednoliko se raspoređuje kroz zračne raspore, oba elektromagneta i stator. Jednolik je zbog zanemarive reluktancije elektromagnetskih jezgri. U takvim uvjetima jednolikog magnetskog polja nema nikakve tangencijalne sile između statora i translatora i translator miruje. Pobuđivanjem jednog od elektromagneta, primjerice ukapčanjem faze A, pobudimo prvi elektromagnet. Magnetski tok permanentnog magneta i elektromagneta superponiraju se u polu 1, a poništavaju se u polu 2, te se pojavljuju nesimetričnosti, nastaje tangencijalna sila koja nastoji smanjiti reluktanciju u zračnom rasporu, posljedica toga je pomak translatora udesno, kojim se zubi pola 1 poravnavaju s 2 najbliža zuba statora. Zatim u sljedećem koraku iskapačanjem faze A i ukapčanjem faze B, pobuduje se drugi elektromagnet, te se magnetski tokovi permanentnog magneta i elektromagneta poništavaju u polu 3, a u polu 4 se superponiraju, te se kako je gore navedeno zubi pola 4 poravnavaju s najbližim zubima statora. Tako se translator opet pomaknuo za jedan korak udesno. Ponovnim prekapčanjem s faze B na fazu A, ali sada suprotnog polariteta, tokovi će se poništavati na polu 1, a superponirati na polu 2, te se poravnavaju zubi pola 2 i najbliži desni zubi statora. Translator se i u ovom koraku pomaknuo za jedan korak udesno, te ponovnim prekapčanjem s faze A na fazu B jednako polariziranu, translator će se ponovno pomaknuti za jedan korak udesno i time završava jedan ciklus gibanja [12]. Sve ovdje rečeno potkrijepljeno je slikom 4.14. , motor za jedan ciklus napravi 4 koraka zbog četveropolnog translatora motora. Prema tablici 4.5. vidi se za desno gibanje translatora kombinaciju ukapčanja faza, a isto i za lijevo gibanje translatora.

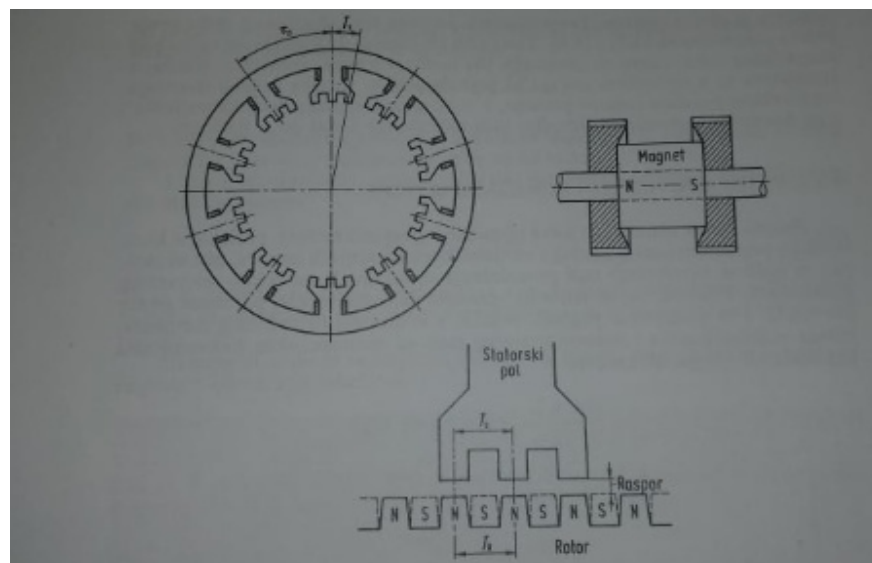
Tablica 4.5. Kombinacija ukapčanja faza za lijevo i desno gibanje translatora [12]

GIBANJE	UKAPČANJE FAZA
Udesno	$A^+ B^+ A^- B^-$
Ulijevo	$A^+ B^- A^- B^+$

Petofazni hibridni koračni motor

Tehničkim istraživanjem, najbolja tehnička svojstva proizlaze iz kombinacije permanentnomagnetskih i varijabilreluktancijskih koračnih motora. Najbolje rezultate dao je desetopolni petofazni motor. Stator ovog motora sastoji se od 10 glavnih elektromagnetskih polova, a koji su jednolično raspoređeni po obodnici. Dva polna svitka na suprotno smještenim polovima čine jednu fazu, zato se i ovaj motor zove petofazni, jer ima pet faza na deset glavnih polova.

Na slici 4.15. vidimo stator i rotor ovog motora, također na istoj slici prikazano je i koračajno pomicanje. Lijevo na slici vidi se stator motora, a na desnoj rotor motora, koji se sastoji od cilindričnog aksijalno magnetiziranog permanentnog mageta i nazubljenih polnih nastavaka od mekog željeza. Za punokoračajno pomicanje rotor priđe jedan zubni kut u deset koraka, a osim punokoračajnog pomicanja ovaj motor može se gibati i polukorakom. Princip rada ovih motora prilično je kompleksan i objašnjava se uz matematičke modele i vektorske prikaze, a ovdje neće biti govora o tome jer je to cijelina koja se zasebno obrađuje a nije ni tema ovog završnog rada.



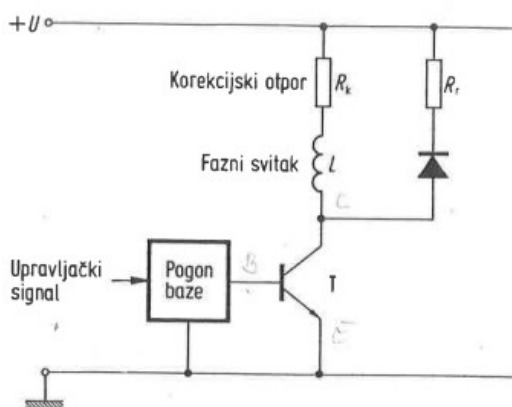
Slika 4.15. Desetopolni petofazni koračni motor [12]

5. NAČINI POBUĐIVANJA KORAČNIH MOTORA

U prethodnom poglavlju obrađen je koračni motor. Najvažnije vrste koračnih motora objašnjene su konstrukcijski i obrađen je princip rada, a sve je potrijepljeno slikama i shemama. Upravo razumjevanje principa rada raznih vrsta koračnih motora potrebna je za priključak takvog motora na mrežu. Priključak ostalih motora na mrežu je prilično jednostavno i ne zahtjeva neko veliko predznanje, tako primjerice priključkom asinkronih ili istosmjernih motora na izmjenične odnosno istosmjerne mreže odmah dolazi do njihova pokretanja. No kod koračnih motora situacija nije takva, pa klasično priključivanje na njegove izvode konstantnim izvorom napajanja neće dovesti do pokretanja koračnih motora nego nastat će veliki Jouelovi gubici, zagrijavanje njegovih namota i u kranjem slučaju uništenje motora. Za priključak koračnog motora na mrežu, potrebno je između mreže i koračnog motora ugraditi sklop energetske elektronike koji ne samo da će pokrenuti takav motor nego će određivati i njegova dinamička svojstva. Različiti principi rada različitih koračnih motora zahtjeva različite pobudne krugove. Ovdje će biti obrađeno pet različitih pobudnih krugova, to su redom: jednosmjerna pobuda, dvosmjerna pobuda, pobuda bifilarno namotanih faza, pentagonska pobuda i zvjezdasta pobuda, a postoji još i pobudni sklop Nakanova motora. Koračni motori s ugrađenim permanentnim magnetima, a tu se ubrajaju permanentnomagnetski i hibridni motori pobuđuju se dvosmjerno. Kao što je prethodno spomenuto, pobudni krugovi utječu i na korekciju dinamičnog ponašanja motora. Kako bi se proizvela dovoljno jaka elektromagnetska polja, svici trebaju imati velik broj amperzavoja, što uz niske napone poluvodičkih krugova zahtjeva jake struje. Pošto su potrebne jake struje, potrebni su i veći presjeci namota, a to povećava induktivitet s obzirom na omski otpor. Posljedicom velikog induktiviteta dolazi do povećanja vremenskih konstanti L/R , a velike vremenske konstante su nepoželjne jer povećava vrijeme porasta strujnog pulsa, a time smanjuje koračnu brzinu [12 str.158]. Kako bi se smanjila vremenska konstanta jedino prihvatljivo rješenje je povećanje omskog otpora u nazivniku. Tako da se onda svitku motora u seriju ugrađuje korekcijski otpor, pa je i korekcijski otpor onda i sastavni dio pobudnog kruga.

5.1. Jednosmjerna pobuda

Za pobudu svake pojedine faze varijabilreluktancijskog motora prikazana je shema spoja na slici 5.1, na toj shemi spoja nalazi se i korekcijski otpor R_k za korekciju vremenske konstante .

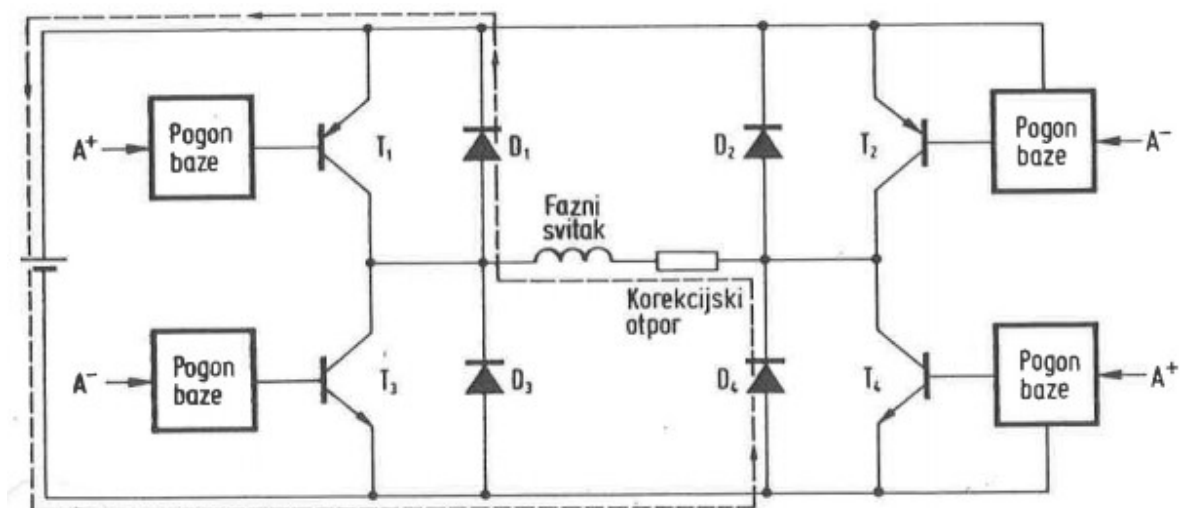


Slika 5.1. Krug za jednosmjernu pobudu svake pojedine faze varijabilreluktancijskog motora [12]

Zbog induktivnosti faznog svitka, onemogućuje se trenutni prekid fazne struje jer bi to dovelo do velikih prenapona koji bi uništili koračni motor i sami pobudni sklop, a isto bi se dogodilo naglim uklanjanjem upravljačkog signala s baze tranzistora. Kako bi se to izbjeglo u paralelu korekcijskom otporu dodaje se serijski spoj ispravljачke diode i otpornika R_r .

5.2 Dvosmjerna pobuda

Principijelna shema spoja kruga za dvosmjernu pobudu prikazana je na slici 5.2. Kao što je rečeno u uvodu, dvosmjerna pobuda koristi se kod motora s ugrađenim permanentnim magnetom.

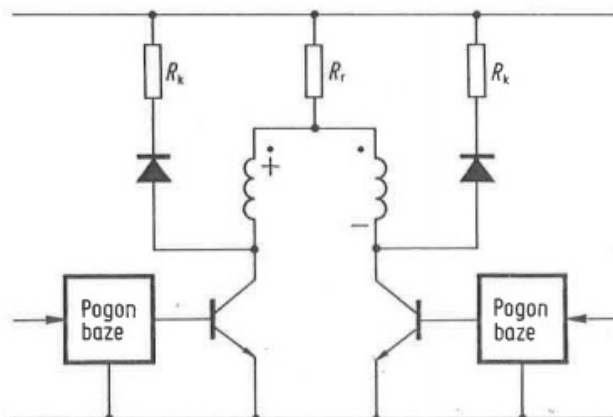


Slika 5.2. Krug za dvosmjernu pobudu svake pojedine faze motora s ugrađenim permanentnim magnetom [12]

Prema slici 5.2. vidi se da u ovisnosti o zahtjevanom polaritetu vodi po jedan par tranzistora. Za pozitivni polaritet baze vodi par tranzistora T_1 i T_4 , a za negativni polaritet baze vode tranzistori T_2 i T_3 . Kod pozitivnog polariteta baze, prema shemi, vidi se kako struja teče kroz tranzistor T_1 , a zatim kroz fazni svitak i korekcijski otpor pa kroz tranzistor T_4 do negativnog pola. Kod negativnog polariteta, situacija je obrnuta i struja teče suprotnim smjerom kroz fazni svitak i korekcijski otpor. Ispravljačke diode koje su spojene paralelno tranzistorima omogućuju razgradnju magnetskog polja faznog svitka izvan tranzistorske petlje. Za razliku od jednosmjerne pobude sva se energija za razgradnju magnetskog polja potrošila na optoru R_r , a kod dvosmjerne pobude dio te energije se vraća natrag u izvor. Tako se postiže ušteda pa se zbog te uštede krugovi za dvosmjernu pobudu često koriste i kod varijabilreluktancijskih motora snage veće od 1 kW. Vremenska konstanta kod krugova za dvosmjernu pobudu znatno je manja, jer se otpor za razgradnju magnetskog polja izostavlja. Pobudni krugovi trofaznih varijabilreluktancijskih motora zahtjevaju 3 tranzistora i 3 diode, a dvofazni hibridni motori 8 tranzistora i 8 dioda. To sve utječe na poskupljenje kruga za dvosmjernu pobudu.

5.3. Pobuda bifilarno namotanih faza

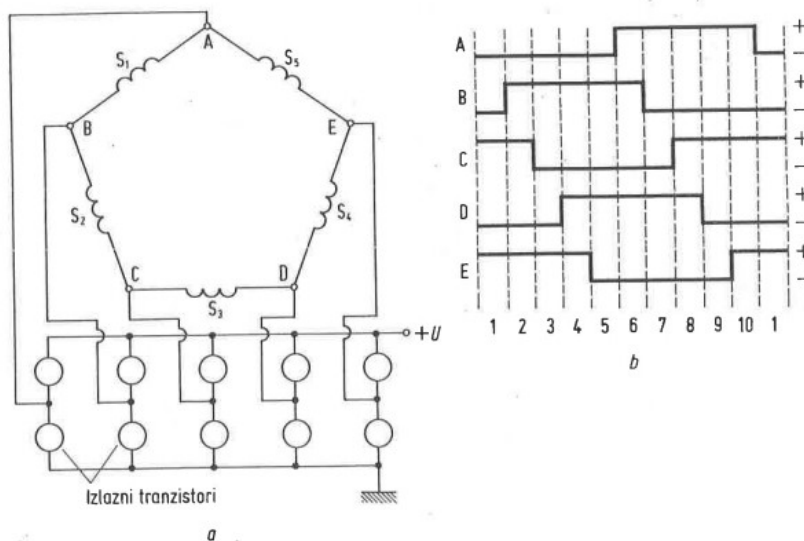
Bifilarnim namatanjem faza kako bi se postiglo zahtjevano magnetsko polje, svaki od svitaka mora imati potrebni broj namotaja i određeni promjer žice. To sve zahtjeva veći obujam za njihov smještaj, a time i povećava proizvodnu cijenu. Ušteda koja se ostvarila bifilarnim namatanjem je izostanak otpornika R_r za zatvaranje struje razgradnje magnetskog polja svitka. Uštede kod bifilarno namotanih faza utječu na ekonomičnost samo u slučaju manjih motora gdje je potrošnja energije u usporedbi s cijenom uređaja relativno mala. Za veće motore, gdje je potrošnja energije velika, bitan utjecaj na ekonomičnost ima ušteda energije koja se postiže krugovima za dvosmjernu pobudu [12]. Na slici 5.3. prikazan je shema kruga za jednosmjernu pobudu bifilarno namotanog motora.



Slika 5.3. Krug za jednosmjernu pobudu bifilarno namotanog motora [12]

5.4. Pentagonska pobuda

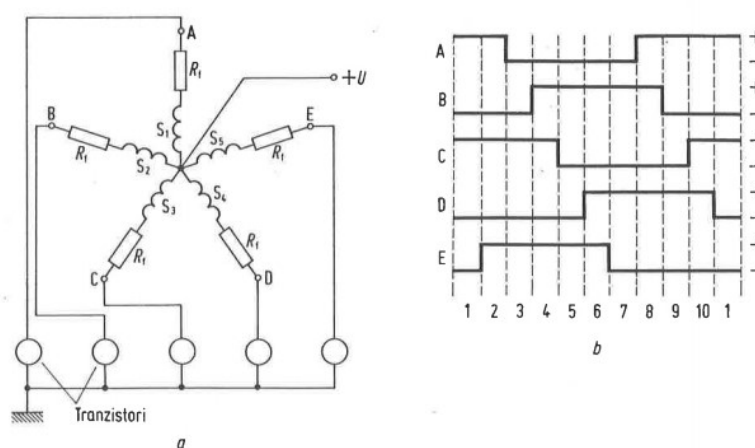
Kombinacija standardnih pobuda za višefazne motore koje imaju određene prednosti, a jedna od tih kombinacije je pentagonska pobuda. Shema takve pobude za petofazni motor dana je slikom 5.4. pod a), a redoslijed pobuđivanja faza dan je slikom 5.4. b. Pentagonska pobuda postiže se korištenjem 10 tranzistora što je za polovicu manje nego što bi ih trebalo za pobudu mosnim sklopom. Iz ovoga proizlazi kako je pentagonska pobuda za male motore ekonomičnija od mosne jer se njome ušteduje velik broj poluvodičkih komponenata. Analizom principa rada takve pobude dolazi se do zaključka kako u svakoj pojedinoj sekvenci jedan je svitak kratko spojen. Primjerice u prvom su koraku točke C i E na pozitivnom, a sve ostalo na negativnom potencijalu, rezultat toga je kratko spojeni svitak S1, što korisno utječe na prigušenje koračnih oscilacija [12].



Slika 5.4. a) Pentagonski pobudni sklop, b) redoslijed pobuđivanja [12]

5.5. Zvezdasta pobuda

Za male motore kojima je cijena energije u usporedbi s cijenom uređaja još manja, koristi se zvjezdasta pobuda. Shema takve pobude zajedno s redoslijedom pobuđivanja faza dana je slikom 5.5. Kod takve pobude koraci se ne postižu promjenom smjera struje u pojedinim faznim svitcima, nego se postiže kombiniranim uzastopnim ukapčanjem dviju, odnosno triju faza s istim polaritetom [12].



Slika 5.5. a) Sklop za zvjezdastu pobudu, b) redoslijed pobuđivanja [12]

6. PRIMJENE KORAČNIH MOTORA I UPRAVLJANJE POMOĆU ARDUINO PLATFORME

6.1. Opće primjene koračnih motora

Koračni motori danas imaju raznoliku upotrebu od pisača, preciznih pozicionera pa sve do primjene u robotici. Zahvaljujući njihovom jednostavnom načinu upravljanja i njihovom lakom prilagođavanju konkretnoj primjeni i konkretnom načinu korištenja [14]. Koračni motori obavljaaju precizne pomake koji mogu biti unaprijed definirani. Koračnim motorima najčešće se upravlja pomoću računala odnosno pisanjem programskog koda koji određuje pomake rotora koračnog motora. Između koračnog motora i računala dolazi elektronički sklop za njegovo pokretanje, rad i zadavanje naredbi koje dolaze sa računala. Takav elektronički sklop se sastoji od sustava za upravljanje (pr. arduino platforma) i pobudnog sklopa (najčešće dolazi IC uz arduino). U prethodnom poglavlju iznešeni su najjednostavniji mogući načini pokretanja koračnih motora bez primjene računala. Takvi načini pokretanja ne omogućuju promjene kute zakreta i broj koraka, nego je to određeno različitim vrstama pobude. Dok primjenom računala moguće je programiranje pomicanja rotora koračnog motora, što se koristi u dronovima, pisačima, robotima i sl.

Neka područja primjene koračnih motora danas:

računala (flopy disk, hard disk, CD/DVD čitači i dr.)

sisajući strojevi, telefaks - aparati i dr.

u automobilima (klima uređaji, podešavanje ogledala i svjetala i dr.)

u medicini (aparati za dijalizu, pumpe za infuziju i dr.)

u robotici (manipulatori, roboti, automati i dr.)

mjerna tehnika (pozicioniranje primjenom senzora)

grijanje, ventilacija i klimatizacija (otvaranje poklopca, ventila i mlaznica i dr.) [14].

6.2. Upravljanje koračnim motorom pomoću arduino platforme

U prethodnim poglavljima dane su vrste malih specijalnih motora, njihova objašnjenja, a najviše pažnje posvećeno je najzastupljenijoj vrsti, koračnim motorima. Objašnjen je princip rada koračnih motora za svaku pojedinu vrstu. Također je objašnjeno zašto se koriste pobudni krugovi te kako s pomoću njih pokrenuti koračni motor. Kod takvog pokretanja koračnih motora dolazi se do različitih ograničenja osobito tamo gdje je potrebno upravljanje primjerice, da rotor napravi nekoliko koraka, da se vrti u obje strane, gdje je potrebna promjena brzine kretanja rotora i niz drugih stvari koje prethodno izneseni načini pokretanja ne omogućuju. Stoga se danas najčešće koriste mikrokontroleri i tzv. "driveri" s pomoću kojih se precizno upravlja koračnim motorom. Mikrokontroler upravlja koračnim motorom na temelju napisanog programskog koda. Tako će koračni motor izvršavati naredbe koje su zadane programskim kodom. Danas je najčešće potrebno upravljanje koračnim motorima, a osobito u robotici, kod otvaranja i zatvaranja nekih ventila, u pisačima i na mnogim drugim područjima. To omogućuje vrlo precizno pomicanje rotora po prethodno zadanom kriteriju u obliku programskog koda. Primjer jednog takvog upravljanja biti će ovdje iznešeno i kratko objašnjeno. Ulogu mikrokontrolera činiti će arduino platforma, a driver će biti neki integrirani krug.

6.2.1 Arduino platforma

Arduino platforma je najjednostavniji mikrokontroler za upravljanje, osobito zbog njegovog jednostavnog korisničkog sučelja. Arduino predstavlja razvojnu platformu koja povezuje sklopovlje i softverske alate koji su jednostavni za korištenje i usmjereni prema izradi prototipova i manjih projekata. Arduino platforma sastoji se od AVR ATmel mikrokontrolera, ulazno/izlaznih pinova, oscilatora, USB priključka, reset tipke i priključak za napajanje vanjskim istosmjernim izvorom. Najzastupljenija verzija arduinoa je arduino uno verzija[16]. Na slici 6.1 prikazana je izvedba arduino platforme. Arduino se programira u vrlo jednostavnom sučelju koji je prikazan slikom 6.2.



Slika 6.1. Prikaz arduino pločice [16]

Neke specifikacije arduino uno mikrokontrolera [17]:

radni napon: 5V

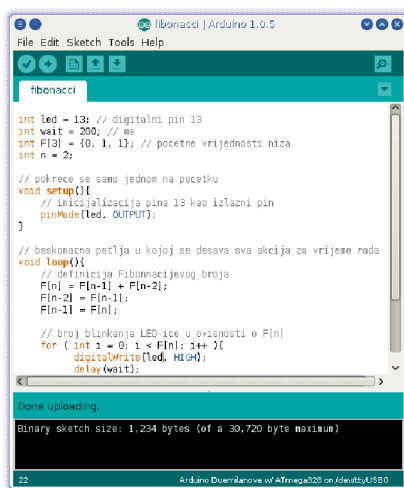
frekvencija procesora: 16Mhz

ulazni napon (ograničeno): 6-20V

ulazni napon (preporučeno): 7-12V

istosmjerna struja za input/output pinove: 40mA

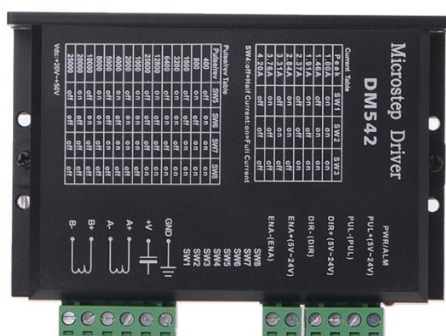
istosmjerna struja za 3,3V pin: 50mA



Slika 6.2. Sučelje za programiranje arduino platforme [16]

6.2.2. Pokretanje motora uz pomoć "drivera"

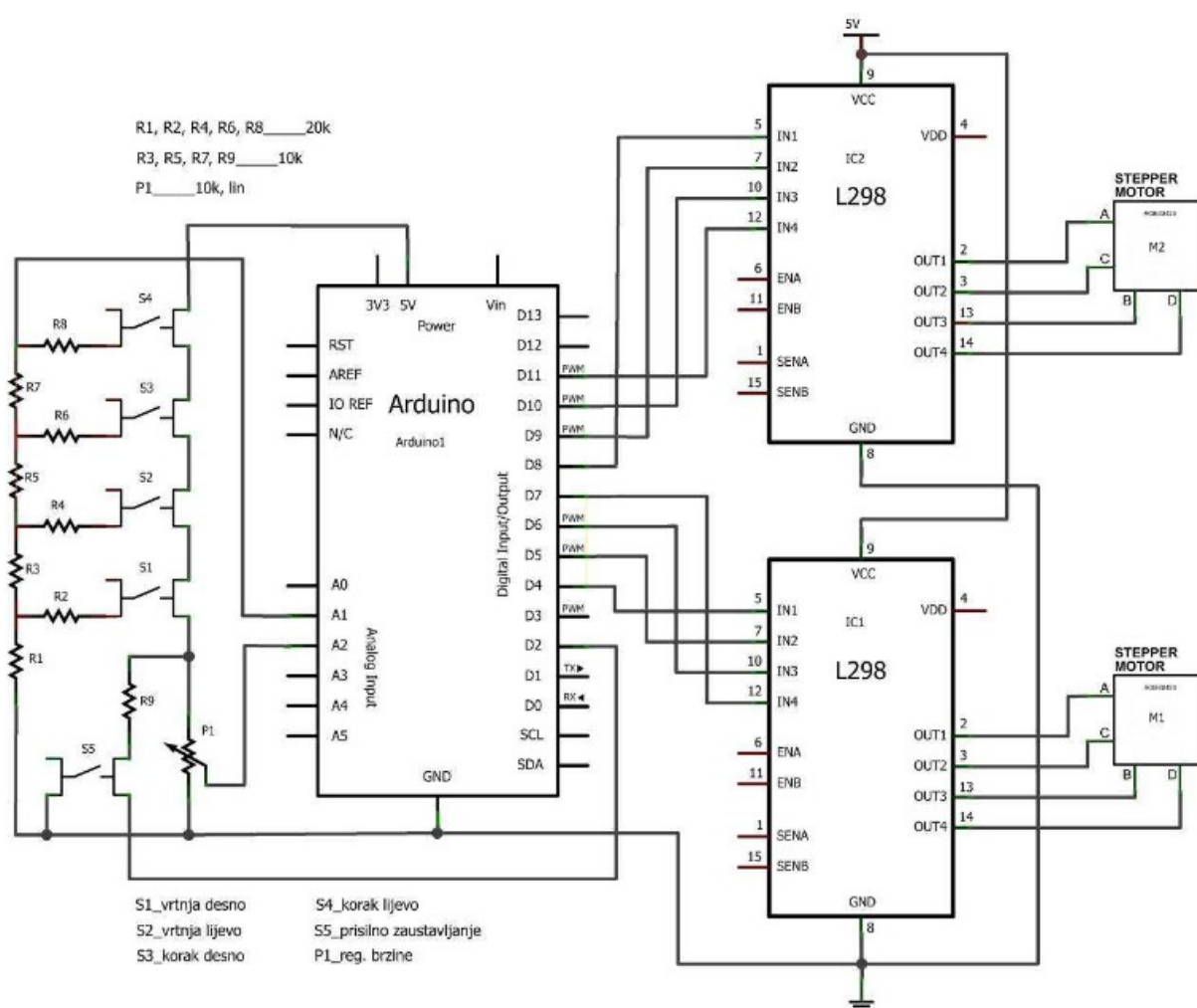
Kako bi se prilagodile strujne i naponske prilike impulsa koji izlaze sa mikrokontrolera potrebno je priključiti određeni "driver" koračnom motoru, u većini slučajeva taj "driver" je integrirani krug i on omogućuje kontrolirano napajanje koračnog motora, odnosno slično djeluje kao prethodno navedeni pobudni krugovi, za razliku od njih ovakvi driveri imaju daleko više mogućnosti u svezi upravljanja. U slučaju potrebe za promjenom smjera vrtnje rotora koračnog motora postiže se uz pomoć H - mosta koji je najčešće integriran na driver [17]. Na slici 6.3. prikazan je primjer jednog drivera za koračni motor.



Slika 6.3. Primjer jednog drivera za koračni motor tipa dm542 [18]

6.2.3. Primjer upravljanja koračnih motora

U nastavku naveden je primjer upravljanja koračnim motorom. U primjeru postoje 2 koračna motora kojima je potrebno mijenjati brzinu vrtnje, omogućiti oba smjera okretanja, te omogućiti prisilno zaustavljanje rada motora, omogućiti istovremeno pokretanje oba motora i drugi. Više informacija o samom primjeru moguće je vidjeti u literaturi [17]. Na sljedećoj slici 6.4. prikazana je električna shema spajanja ovog primjera. Ovaj primjer uspješno se može implementirati primjerice u robotiku, industrijske strojeve, pametne kuće i dr.



Slika 6.4. Shema spajanja sustava upravljanja dvaju koračnih motora uz pomoć arduino platforme [17]

7. ZAKLJUČAK

Električni motori za posebne namjene danas su gotovo dio ljudske svakodnevnice. Susreće se ih na različitim mjestima od industrije, preko automatizacije različitih postrojenja uz primjenu motora za posebne namjene pa sve do primjene u samim kućanstvima. Prije nekoliko desetljeća postojali su klasični električni motori odnosno razni izmjenični, istosmjerni, kolektorski i sl. Kasnije razvitkom industrije, početku razvijanja automatizacije javila se potreba za što preciznijim obavljanjem određenih tehnoloških postupaka. Tako su se počeli javljati i motori za posebne namjene, od selsina, tahogeneratora pa sve do danas najzastupljenijeg predstavnika skupine malih motora tzv. koračnih motora. Kao što je u ovom završnom radu rečeno i objašnjeno, koračni motor susrećemo gotovo svugdje od pisača, računala, automobila, automatskih vodovodnih ventila, robota, dronova, helikoptera i mnogih drugih područja primjene. U svrhu automatizacije u kojoj se primjenjuje koračni motor najčešće se primjenjuje arduino platforma kao mikrokontroler. Izlazni napon arduino platforme pa i radni napon je cca 5V na kojem se pokreće i koračni motor, no za potrebe industrije tamo gdje je potrebno nešto veći napon i veći koračni motor najčešće se primjenjuje industrijsko računalo tzv. PLC uređaji na kojemu se programira samo upravljanje koračnim motorom, te na takav način koračni motor sam obavlja unaprijed zadane odnosno isprogramirane operacije. U takvim okolnostima koje se temelje na automatizaciji uz primjenu koračnih motora, koriste se u robotima. Roboti moraju imati precizne pomake i precizno pozicioniranje što sustavi automatskog upravljanja zajedno sa koračnim motorima uvelike ostvaruju. Daljnjim razvitkom robotike u budućnosti dolazi se i do što preciznijeg pozicioniranja koračnih motora. Uz sve dosad izrečene prednosti koračnih motora, kao i svaki drugi stroj, element, imaju i svoje nedostatke pa tako i koračni motor. Neki od tih nedostaka zbog kojih postoji različitih ograničenja u nekim područjima primjene koračnih motora su još uvijek fiksni korak određen konstrukcijom koračnog motora, te ograničena mogućnost pokretanja tereta s velikim momentom inercije, mogućnost pojave rezonancije i teško upravljanje pri velikim brzinama, te još nekoliko ostalih manjih nedostataka. Svi ti nedostaci predstavljaju ograničenje u primjeni.

Tako pri projektiranju takvih sustava treba uzeti kompromis između zahtjeva sustava i nedostataka koračnog motora.

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

Tablica 8.1 Popis korištenih oznaka i simbola prema abecednom redu

Oznaka ili simbol	Naziv	Iznos	Mjerna jedinica
A	koračni kut hibridnog motora		$^{\circ}$
E	inducirani napon		V
f	frekvencija		Hz
Hz	herz		
I_a	struja armature		A
K	konst. tahogeneratora		$V/^{\circ}/min$
k_e	konstanta		
n	brzina vrtnje		
n_f	broj faza		
N_k	broj koraka		
n_s	sinkrona brzina		$^{\circ}/min$
N_{su}	ukupan br.zubi svih statorskih paketa		
p	broj pari polova		
p_r	broj pari polova rotora		
q_s	broj statorskih paketa		
R_a	otpor armature		Ω
R_k	korekcijski otpor		Ω
R_r			
$s_{\%}$	klizanje		$\%$
T_R	zubni kut rotora		$^{\circ}$
u	napon		V
U_{mj}	mjerni napon		V
z	broj zubi		
Z_R	broj zubi rotora		
α_k	koračni kut		$^{\circ}$
β	kut opterećenja		$^{\circ}$
Δu	pad napona na četkicama		V
Φ	magnetski tok		Wb

POPIS KORIŠTENE LITERATURE I DRUGIH IZVORA INFORMACIJA

- [1] Električki stojevi, Josip Jurekovic, Zagreb, 2008.
- [2] Wikipedija, istosmjerni motor, url: https://hr.wikipedia.org/wiki/Istosmjerni_motor (6.6.2019)
- [3] Seminarski rad iz elektronike, DC motor, url: <https://www.seminarski-diplomski.co.rs/ELEKTRONIKA/DC-motor.html> (6.6.2019)
- [4] Euro impex, url: <https://www.euroimpex.rs/artikli/detalji/12006/tahogenerator-za-ves-masinu-beko-372205506-372205505/grupa/razni-delovi-za-ves-masine> (11.6.2019.)
- [5] Specijalne vrste reugulacijskih strojeva posebne namjene, završni rad, Robert Jaroš, Ferit Osijek, 2017, url:<https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:1304/preview> (11.6.2019)
- [6] Doc player, mjerenje u reguliranim elektromotornim pogonima, mjerenje veličina koje se koriste u upravljačkim algoritmima pogona ili za zaštitu, url:<http://docplayer.gr/41472626-Merenje-u-regulisanim-elektromotornim-pogonima-merenjevelicina-koje-se-koriste-u-upravljackim-algoritmima-pogona-ili-za-zastitu.html> (11.6.2019.)
- [7] Leksikografski zavod Miroslav Krleža, web enciklopedija, selsin, url: <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=55309> (12.6.2019.)
- [8] Radar tutorial.eu, url: <http://www.radartutorial.eu/17.bauteile/bt25.ro.html> (12.6.2019.)
- [9] Scribd, linearni motor, url: <https://www.scribd.com/doc/253970291/Linearni-Motor> (12.6.2019.)
- [10] Pavel lasakovi, linerani motor, url: <http://pavel.lasakovi.com/projekty/elektrotechnika/linearni-motor/> (12.6.2019.)
- [11] PLC 8H, industrijska automatizacija, url: <http://www.plc-bh.com/ponuda/omron/gibanje-pogoni/servo-sistemi/linearni-servo-motori/>(12.6.2019.)
- [12] Prof.dr.sc. Petar Gugic, Elektricni servomotori, Školska knjiga, Zagreb 1987.

- [13] Službena web stranica tvrtke :Eltera doo Paljetkova 10,Zagreb, mehatronika, url:
<http://www.elteratronic.com/cnc%20dijelovi/Koracni%20motori.htm> (13.6.2019.)
- [14] Završni rad, upravljanje brzinom vrtnje koračnog motora, Jurica Lojan, Sveučilište Sjever, Varaždin, rujan, 2015, url:
<https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin:95/preview>(15.6.2019.)
- [15] Koračni motori, prof. dr. sc. Jasmin Velagić, Elektrotehnički fakultet Sarajevo, url:
<http://people.etf.unsa.ba/~jvelagic/laras/dok/Lekcija6.pdf> (15.6.2019.)
- [16] Realizacija daljinskog upravljanja roletom korištenjem Arduino razvojnog sustava, završni rad, Sveučilište Sjever Varaždin, Denis Vaštag. Varaždin, 2015, url:
<https://repositorij.unin.hr/islandora/object/unin:76/preview> (27.8.2019.)
- [17] Projektna dokumentacija, Upravljanje koračnim motorima putem arduino platforme, Marin Simičić, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 2013. url:
[https://www.veleri.hr/arhiva/files/datoteke/page_privitak/
UpravljanjeKoracnimMotorimaPutemArduinoPlatforme.pdf](https://www.veleri.hr/arhiva/files/datoteke/page_privitak/UpravljanjeKoracnimMotorimaPutemArduinoPlatforme.pdf) (28.8.2019.)
- [18] Vallder web shop, url:
<https://www.vallder-rs.com/sr/c-sr/kora%C4%8Dni-motori-drajveri> (28.8.2019.)

ŽIVOTOPIS

DANIJEL KUKIĆ

Rođen je u Požegi, 11. srpnja 1997. U rodnom gradu završava Osnovnu školu „Dobriša Cesarić“. Nakon osnovne škole 2012. godine upisuje srednju Tehničku školu u Požegi, smjer elektrotehničar. U srednjoj školi ostvaruje izvrsne rezultate na brojnim natjecanjima, te nakon stečenih znanja i ostvarenog uspjeha te kao najbolji učenik na smjeru ostvaruje nagradu Tehničke škole u obliku pohvalnice i ostvaruje pravo na stručni nagradni seminar u Zagrebu. 2016. godine završava srednju školu s odličnim uspjehom.

2016. godine upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, smjer elektrotehnika i informacijska tehnologija. Na prvoj godini fakulteta zbog izvrsnog uspjeha ostvaruje pravo na stipendiju grada Požege. Na drugoj godini studija bira izborni blok elektroenergetika. Na trećoj godini studija u svrhu stjecanja više praktičnih znanja odlučuje odraditi dobrovoljnu stručnu praksu u Osijeku gdje stječe osnove znanja o automatizaciji postrojenja i dobiva osnovna znanja u radu s PLC sustavima upravljanja.

Nakon završetka preddiplomskog studija namjera mu je upisati diplomski studij na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku.

U Osijeku, 6 rujna 2019.

Danijel Kukić

SAŽETAK

U završnom radu navedena je osnovna podjela električnih motora kao i njihova kratka objašnjenja koja je podloga u razumjevanju električnih motora posebne namjene. Definirani su motori sa posebnom namjenom, navedene su njihove podjele i princip rada svake pojedine vrste motora za posebne namjene. Problematika samog završnog rada temelji se na opisu, vrstama, podjelama i naposljetku primjene koračnih motora te upotreba takvih motora u automatiziranim pogonima i sustavima. Navedene se gotovo sve vrste koračnih motora, detaljna objašnjenja o principu rada navedena su za najčešće primjenjivane koračne motore i to permanentnomagnetske, varijabilreluktancijske i hibridne koračne motore. Nakon definiranja koračnih motora, njihove podjele, teorija principa rada, navedeno je i nekoliko načina pokretanja takvih motora, odnosno navedeni su pobudni krugovi koji potpomažu pokretanju i radu motora. Na kraju je iznešeno nekoliko crtica o primjenama koračnih motora i ukratko objašnjena primjena koračnih motora u automatiziranim sustavima, te naveden primjer upravljanja dvaju koračnih motora pomoću arduino platforme i upotrebu drivera koji omogućuje pokretanje i rad, također i samu zaštitu koračnih motora.

Ključne riječi: armatura, driver, hibridni, IC krug, korekcijski otpor, permanentnomagnetski, pobuda, statorski paket, uzbuda, varijabilreluktancijski

ABSTRACT

The final section outlines the basic division of electric motors as well as their brief explanations, which underlies the understanding of special purpose electric motors. Special purpose motors are defined, their divisions and the principle of operation of each particular type of special purpose motor are specified. The issue of the final work itself is based on the description, types, divisions and ultimately the application of stepper motors and the use of such motors in automated drives and systems. All types of stepper motors are listed, detailed explanations of the operating principle are given for the most commonly used stepper motors, namely permanent magnetic, variable reluctance and hybrid stepper motors. After defining stepper motors, their division, the theory of principles of operation, several ways of starting such motors are indicated, that is, the excitation circuits that assist in starting and running the engine are listed. Finally, a few notes on the use of stepper motors

are presented, and a brief explanation of the use of stepper motors in automated systems, and an example of operating two stepper motors using an "arduino platform" and the use of a driver that allows starting and operating, as well as the protection of stepper motors themselves.

Key words: armature, driver, correction resistance, excitation, hybrid, IC circuit, permanent magnet, stator pack, variables reluctance