

# Koračni motor

---

Sivrić, Andrea

Undergraduate thesis / Završni rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:697552>

Rights / Prava: [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**KORAČNI MOTOR**

Rijeka, rujan 2023.

Andrea Sivrić

0069090337

SVEUČILIŠTE U RIJECI

**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Završni rad

**KORAČNI MOTOR**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Rene Prenc

Rijeka, rujan 2023.

Andrea Sivrić

0069090337

Rijeka, 10. ožujka 2023.

Zavod: **Zavod za elektroenergetiku**  
Predmet: **Električni strojevi**  
Grana: **2.03.02 elektrostrojarstvo**

## ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Pristupnik: **Andrea Sivrić (0069090337)**  
Studij: Sveučilišni prijediplomski studij elektrotehnike

Zadatak: **Koračni motor / Stepper motor**

### Opis zadatka:

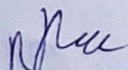
U okviru ovog rada opisat će se princip rada koračnog motora. U sklopu toga prikazat će se način pokretanja i regulacija brzine vrtnje istoga. Zatim će se ukratko definirati različite vrste koračnih motora, uključujući unipolarni, bipolarni, hibridni i linearni koračni motor. Objasniti će se prednosti motora poput predznog pozicioniranja ili brzinskog reguliranja. No, opisat će se i neki od nedostataka koračnog motora kao što su niska brzina, niska snaga, potreba za kontrolom pozicije te vibracije. Konačno, na temelju prednosti i nedostataka prikazat će se područja primjene ove vrste elektromotora, te će se napraviti simulacija u Matlabu za jednu vrstu koračnog motora.

Rad mora biti napisan prema Uputama za pisanje diplomskih / završnih radova koje su objavljene na mrežnim stranicama studija.

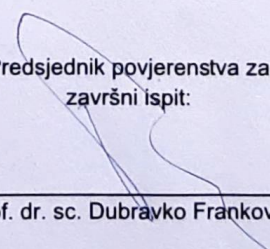
*Andrea Sivrić*

Zadatak uručen pristupniku: 20. ožujka 2023.

Mentor:

  
\_\_\_\_\_  
Doc. dr. sc. Rene Prenc

Predsjednik povjerenstva za  
završni ispit:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. dr. sc. Dubravko Franković

## **IZJAVA**

Izjavljujem da sam završni rad „Koračni motor“ izradila samostalno pod voditeljstvom izv. prof. dr. sc. Rene Prenca te uz znanje stečeno tijekom studiranja i uz korištenje navedene literature.

Rijeka, rujan 2023.

---

Andrea Sivrić

0069090337

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se mentoru izv. prof. dr. sc. Rene Prencu na savjetima i utrošenom vremenu tijekom izrade ovog rada. Zahvaljujem se i svim profesorima na stečenom znanju tijekom studiranja na Tehničkom fakultetu u Rijeci. S najvećim zahvalama želim se obratiti svojoj obitelji i prijateljima koji su me neizmjereno podržavali i strpljivo pratili tijekom mog studijskog putovanja.*

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 1.1 Povijest koračnog motora .....   | 1  |
| 2. OSNOVE KORAČNOG MOTORA TE NJEGOVI PRINCIP RADA .....                          | 3  |
| 2.1. Rad koračnog motora u punom koraku .....                                    | 4  |
| 2.2. Rad koračnog motora u polukoračnom načinu.....                              | 5  |
| 2.3. Rad koračnog motora u mikro-koračnom načinu .....                           | 6  |
| 3. KORAČNI MOTOR S PERMANENTNIM MAGNETOM .....                                   | 7  |
| 3.1. Dvofazni koračni motor s permanentnim magnetom.....                         | 7  |
| 3.2. Trofazni koračni motor s permanentnim magnetom.....                         | 8  |
| 4. KORAČNI MOTOR S VARIJABILNOM RELUKTANCIJOM .....                              | 11 |
| 4.1. Trofazni koračni motor s varijabilnom reluktancijom .....                   | 11 |
| 4.2. Četverofazni koračni motor s varijabilnom reluktancijom.....                | 12 |
| 4.3. Višesekcijski koračni motor s varijabilnom reluktancijom .....              | 13 |
| 5. HIBRIDNI KORAČNI MOTOR.....   | 16 |
| 5.1. Rotacijski hibridni koračni motor .....                                     | 16 |
| 5.2. Translacijski hibridni koračni motor .....                                  | 18 |
| 5.3. Petofazni hibridni koračni motor .....                                      | 20 |
| 6. KORAČNI MOTORI S ROTACIJSKIM MAGNETSKIM POLJEM .....                          | 22 |
| 7. MODEL HIBRIDNOG KORAČNOG MOTORA U MATLABU .....                               | 24 |
| 7.1. Rezultati simulacije.....   | 25 |
| 8. PRIMJENA I UPRAVLJANE KORAČNIH MOTORA,TE NJIHOVE PREDNOSTI I NEDOSTATCI ..... | 31 |
| 8.1. Osnovni čimbenici pri odabiru pogona koračnog motora.....                   | 33 |
| 8.2. Ostali čimbenici pri odabiru koračnog pogona .....                          | 34 |
| 8.3. Prednosti i nedostaci koračnih motora.....                                  | 35 |
| 9. ZAKLJUČAK.....  | 36 |
| LITERATURA.....  | 37 |
| POPIS SLIKA .....  | 39 |
| POPIS TABLICA.....   | 40 |
| SAŽETAK.....   | 41 |
| ABSTRACT .....   | 42 |

# 1. UVOD

Koračni motori su vrsta elektromotora koji se koriste za precizno pozicioniranje i kontrolu brzine u mnogim industrijskim i automatskim aplikacijama. Različiti tipovi koračnih motora imaju različite konstrukcijske karakteristike i primjene. U ovom radu, bit će obrađene osnove koračnog motora, njegova povijest, vrste koračnih motora, prednosti i nedostaci, kao i primjene i upravljanje koračnim motorima.

Povijest koračnih motora seže u prošlost, kada su se prvi put koristili u industrijskoj proizvodnji. Osnovni princip rada koračnih motora temelji se na elektromagnetizmu i rotaciji magnetskog polja. Postoje različite vrste koračnih motora, uključujući koračne motore s permanentnim magnetom, koračne motore s varijabilnom reluktancijom, hibridne koračne motore i koračne motore s rotacijskim magnetskim poljem. Svaki od ovih tipova ima svoje prednosti i nedostatke, ovisno o primjeni.

Permanentnomagnetski koračni motori koriste trajne magnete u svom rotoru, što ih čini vrlo učinkovitim i preciznim. Varijabilnoreluktancijski koračni motori koriste varijabilnu reluktanciju u svom rotoru kako bi se kreirao rotacijski moment. Hibridni koračni motori kombiniraju karakteristike permanentnomagnetskog i varijabilnoreluktancijskog koračnog motora. Koračni motori s rotacijskim magnetskim poljem koriste rotacijsko magnetsko polje kako bi se rotirao rotor.

U ovom radu bit će opisane osnove koračnih motora, kao što su princip rada, konstrukcijske karakteristike i prednosti i nedostaci. Također, bit će opisane primjene i upravljanje koračnim motorima, kao i model hibridnog koračnog motora u MATLAB-u. Koračni motori se koriste u mnogim aplikacijama, uključujući strojeve za obradu, medicinske uređaje, robotiku, tekstilnu industriju, avionsku industriju i mnoge druge.

## 1.1 Povijest koračnog motora

Kao prethodnik koračnog motora, može se smatrati princip "papuče" kao mehanizam za postizanje rotacije korak po korak. Ovaj princip, koji se koristio već od 1850. godine u telegrafiji, uključivao je zavojnicu pod naponom koja bi okretala rotor za određeni kut, nalik na čegrtaljku. [1]

Međutim, prvi oblici koračnih motora nisu odmah prepoznati kao takvi, a originalni izumitelj ostaje nepoznat. Ipak, često se pripisuje Franku W. Woodsu da je patentirao motor s pet statorskih zavojnica, omogućujući kretanje korak po korak.



Prvi evidentirani primjer upotrebe koračnog motora u praktičnim svrhama povezan je s Britanskom kraljevskom mornaricom i predstavljao je značajan poticaj za inovacije tijekom 18., 19. i 20. stoljeća. Ovaj sustav, razvijen tridesetih godina 20. stoljeća, imao je ključnu ulogu u upravljanju topovskim kupolama i oružjem na velikim brodovima. Slični sustavi i dalje su relevantni u suvremenom dobu. Međutim, tijekom 1960-ih, osnovni koračni motor počeo je ustupati mjesto koračnim motorima s permanentnim magnetima velikog kuta, koji se sada češće koriste. Unatoč napretku, ovi motori su se suočavali s različitim izazovima. Točnost pozicioniranja bila je ograničena zbog nedostatka preciznih kontrolera koračnog motora, a problemi rezonancije unutar samih motora često su uzrokovali prekide u radu i potrebu za ponovnim pokretanjem.

Napredak je ostvaren tijekom 1970-ih, a posebno 1980-ih i 1990-ih u razvoju kontrolera koji su prevladavali probleme rezonancije i smanjenja proizvodnih troškova koračnih motora. Konačno, početkom 2000-ih, troškovi su pali, omogućujući koračnim motorima da nađu primjenu u različitim industrijama koje su ranije smatrale ovu tehnologiju preskupom. [2]

## 2. OSNOVE KORAČNOG MOTORA TE NJEGOV PRINCIP RADA

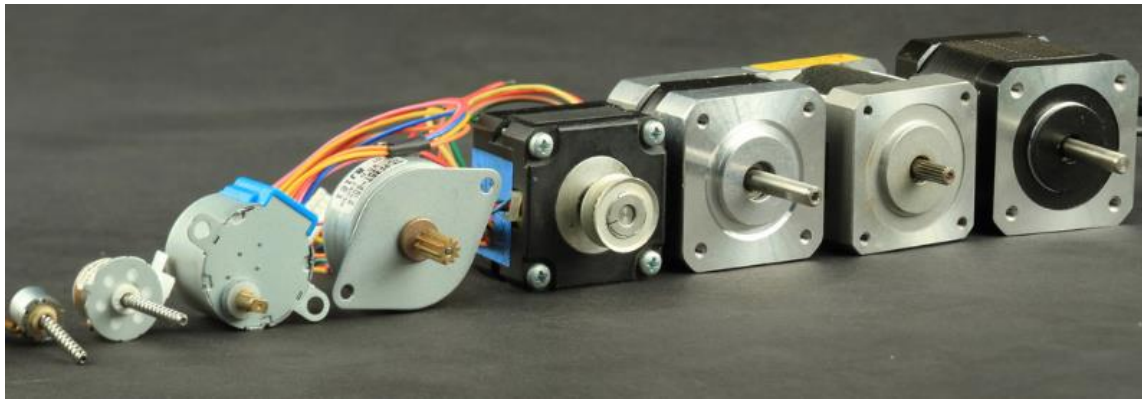
Napredak u digitalnoj tehnologiji potaknuo je razvoj motora koji omogućava neposredno digitalno upravljanje. Omogućuju i da izlazni signal što neposrednije dovedu računalu, bez potrebe za složenim pretvornicima između digitalnih i analognih signala. Ovi motori, poznati kao koračni motori (slika 2.1.), omogućuju precizne diskretne koračne mehaničke pomake.

Koračni motori su elektromehanički uređaji koji transformiraju impulsnu električnu poticajnu energiju u precizno koračno mehaničko pomicanje. Ovi uređaji dolaze u rotacijskim i translacijskim varijantama, pri čemu su rotacijski koračni motori češći u današnjoj primjeni. Na niskim koračnim brzinama rotor se zaustavlja na svakom koračnom položaju. U srednjem rasponu brzine, ne dolazi do zaustavljanja rotora na svakom koračnom položaju, što može uzrokovati oscilacije u kutnoj brzini ovisno o položaju. Pri visokim brzinama, ove oscilacije kutne brzine postaju manje primjetne, a brzina rotacije teži ka stabilnoj vrijednosti. Bitno je napomenuti da se pojam "visoke brzine" razlikuje ovisno o konstrukciji motora. U komercijalnim koračnim motorima, visoka brzina se obično kreće u rasponu od otprilike  $10^2$  do  $10^4$  koraka u sekundi.

Ovi motori se upravljaju putem vanjskog kontrolera, pri čemu su motori i kontroleri dizajnirani tako da motor može precizno doći do bilo koje fiksne pozicije prilikom rotacije. Većina koračnih motora može raditi na audio frekvencijama, i uz odgovarajući kontroler mogu se pokrenuti i zaustaviti te postizati ciljane orijentacije. [4]

Koračne motore možemo podijeliti prema:

- tipu uzbude: koračni motori s permanentnim magnetima (rotor magnetiziran radijalno), s varijabilnom reluktancijom (reaktivni koračni motori) nemaju uzbude, hibridni koračni motori (permanentni magneti na rotoru smješteni aksijalno)
- prema broju faza: najčešće  $n_f$  2,3,4,5,6, za  $n_f = 1$  – satovi, za  $n_f \geq 1$  – specijalne primjene
- 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. [4]



*Slika 2.1. Koračni motori [14]*

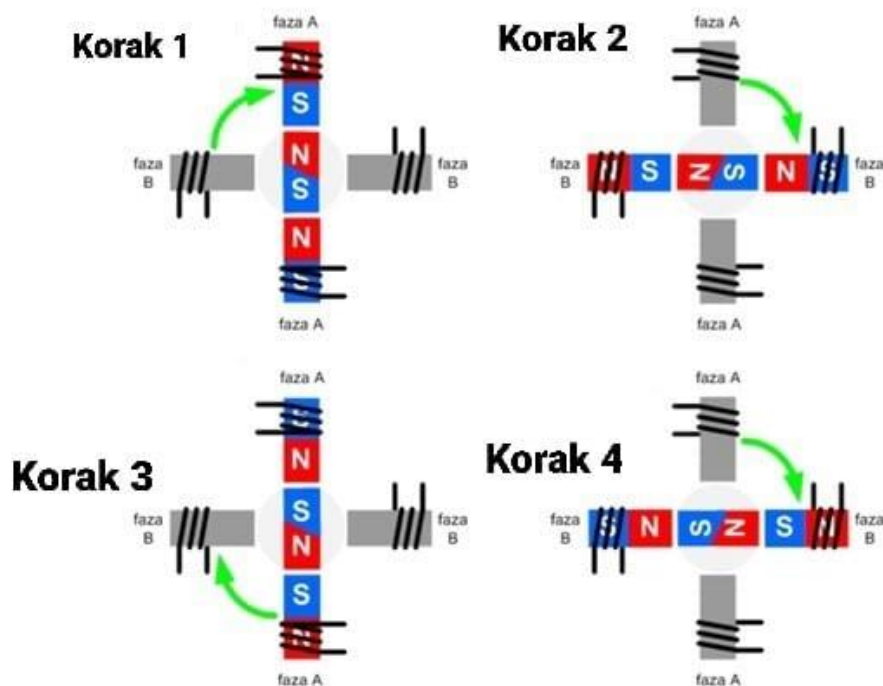
Koračni motor se sastoji od dva glavna dijela: rotora i statora. Stator je fiksni dio motora, dok se rotor okreće na ležajnoj osovine i prati rotirajuće magnetsko polje koje stator generira. Stator, izrađen od metala poput čelika, djeluje kao okvir za skup elektromagneta čije su zavojnice smještene na specifičnim pozicijama oko rotora. Kada struja prolazi kroz zavojnice na statoru, stvara se magnetsko polje oko njih. Ova magnetska polja imaju smjer i snagu koja ovisi o intenzitetu i smjeru struje koja prolazi kroz svaku pojedinačnu zavojnicu. Kada se zavojnice aktiviraju, stvaraju se privremeni elektromagneti koji privlače "zube" ili izbočine na rotoru. To uzrokuje pomak rotora u odnosu na stator za fiksni korak. Rotacija rotora i osovine se događaju za kut u kojem su magnetski tokovi najmanje suprotstavljeni ili se slažu s rezultatnim tokovima. Nakon što se rotor pomakne za određeni korak, aktivira se drugi elektromagnet (koji se sastoji od zavojnica) na statoru. Ovaj elektromagnet generira magnetsko polje koje privlači rotor i premješta ga u novi položaj. Ponavljanjem ovog procesa za uzastopne zavojnice moguće je ostvariti niz koraka unaprijed ili unatrag, što rezultira rotacijom rotora i pripadajuće osovine. Ovakvim izmjenjivanjem aktiviranih zavojnica moguće je postići precizne pomake i rotacije, što ovaj sustav čini korisnim za mnoge primjene gdje je potrebna precizna kontrola pokreta i položaja. [10]

Navedeni opis sugerira koncept koračnog motora kao niza elektromagneta koji privlače magnet rotora radi rotacije. No, u stvarnosti, princip rada koračnog motora je znatno kompleksniji. To je zato što magnet privlači magnetsko polje stvoreno oko skupa elektromagneta. To omogućuje ne samo rad u cijelim koracima, već također omogućuje i rad u pola koraka (poznat kao mikro-koraci) ili čak manjim inkrementima. [10]

### **2.1. Rad koračnog motora u punom koraku**

Osnovni način rada koračnih motora u punom koraku opisan je na slici 2.2. U ovom režimu rada, motor se rotira za unaprijed određeni kut koji proizlazi iz njegove građe, na primjer,  $1,8^\circ$ . Ovaj kut

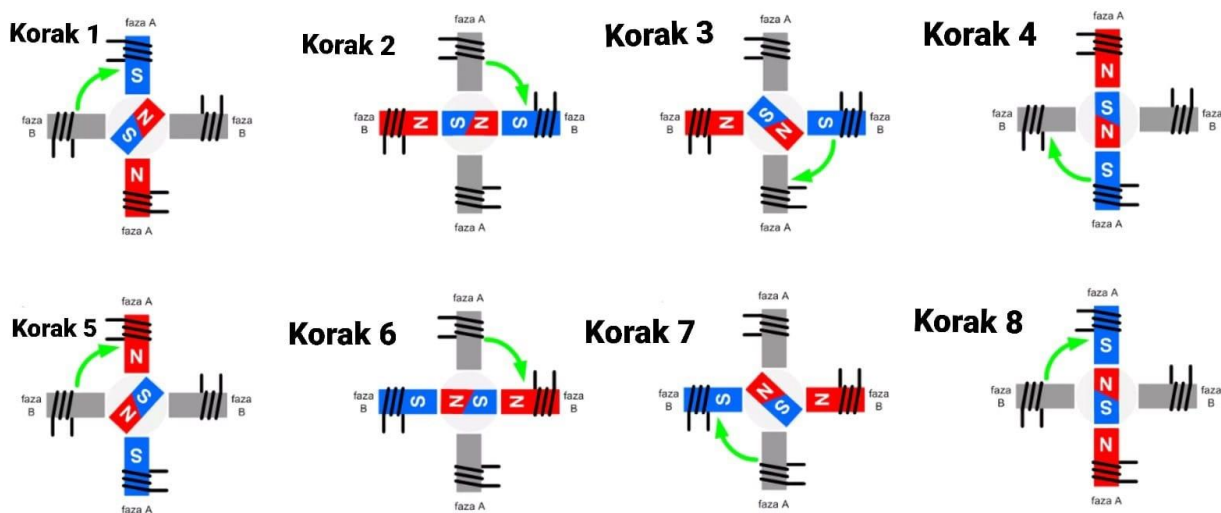
se naziva koračni kut i za cijelu rotaciju motora potrebno je izvršiti 200 koraka ( $200 \times 1,8^\circ = 360^\circ$ ). Hod osovine događa se kada su aktivne jedna ili dvije elektromagnetske zavojnice u motoru. Upotreba samo jedne zavojnice pod naponom zahtijeva minimalnu snagu motora. U dvofaznom načinu rada, gdje su aktivne dvije zavojnice smještene nasuprot jedna drugoj, potrebna je dvostruka snaga struje za napajanje, ali to također rezultira povećanjem brzine i momenta motora.[10]



Slika 2.2. Princip rada motora u punom koraku s 2-faznim napajanjem [10]

## 2.2. Rad koračnog motora u polukoračnom načinu

Načelo rada motora s pola koraka prikazano je na slici 2.3. U ovom specifičnom načinu rada, svaki diskretni korak rotora je podijeljen na dva jednaka dijela, što rezultira okretanjem rotora za polovicu nominalnog kuta u svakom koraku. U kontekstu gornjeg primjera, ako se uzima korak od  $1,8^\circ$  po cijelom koraku, u načinu rada pola koraka rotor će se okretati za  $0,9^\circ$  u svakom koraku. U situaciji kada radimo s koračnim motorom u polukoračnom načinu, primjenjujemo izmjenično napajanje na dvije faze (zavojnice). Ova tehnika rezultira većim okretnim momentom u usporedbi s klasičnim 1-faznim radom. Također, motor radi „glade“ zahvaljujući postupnom prijelazu između koraka. Osim toga, važno je istaknuti da se kutna rezolucija udvostručuje zahvaljujući većem broju koraka po punom okretaju motora. [10]



Slika 2.3. Načelo rada motora u polu-koraku s 2-faznim napajanjem [10]

### 2.3. Rad koračnog motora u mikro-koračnom načinu

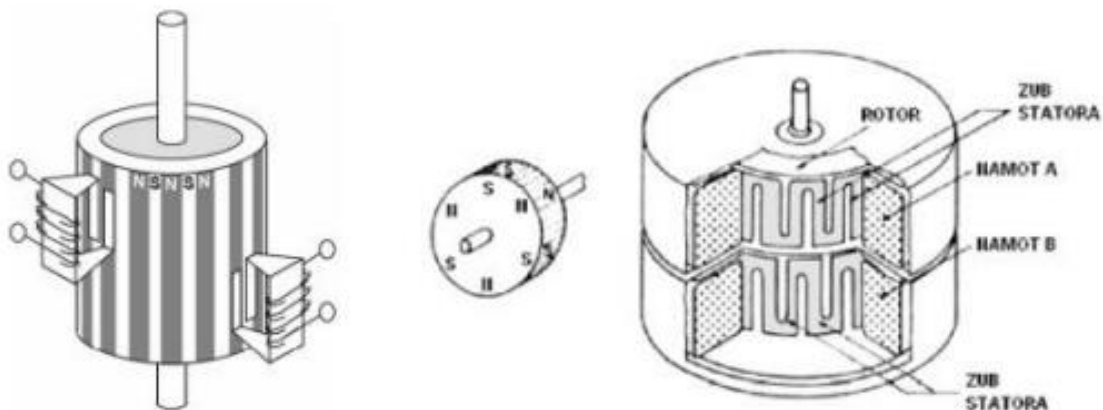
U mikro-koračnom načinu rada, nazivni hod motora je podijeljen na još manje segmente u usporedbi s polukoračnim načinom. Ovdje se postiže najveći faktor podjele od 256. Rotori motora zauzimaju pojedinačne položaje koristeći neto magnetski tok generiran kroz zavojnice, a to se postiže pomoću valnih oblika koji imaju stepenastu formu. Mikro-koračni način rada je iznimno koristan kad je potrebno postići „glatkoću“ u radu motora i/ili visoku preciznost pozicioniranja. Pri korištenju motora u mikro-koračnom načinu rada, bitno je obratiti pažnju na prilagodbu aplikacije u skladu s brzinom vrtnje motora. Kao što je već spomenuto, induktivna reaktancija namota motora raste s povećanjem frekvencije struje kroz namote. Veće brzine vrtnje zahtijevaju češće promjene smjera struje, što povlači veću frekvenciju tih promjena. To rezultira povećanjem impedancije namota, što dalje dovodi do smanjenja prosječne struje kroz namote. Ovo ima značajan utjecaj na rad motora, opadanje struje kroz namote dovodi do smanjenja okretnog momenta. Ovo pak može dovesti do oscilacija, problema sa stabilnošću rotora, pa čak i gubitka koraka motora, što ima negativne posljedice na ukupno funkcioniranje uređaja. Stoga, u mikro-koračnom načinu rada, ključno je temeljito proučiti tehničke karakteristike motora, a posebno grafikone koji prikazuju odnos između okretnog momenta i frekvencije struje kroz namote. [10]

### 3. KORAČNI MOTOR S PERMANENTNIM MAGNETOM

Osnovna karakteristika rotacijskih koračnih motora s permanentnim magnetom (kao što je prikazano na slici 3.1.) leži u njihovom dizajnu koji uključuje rotor s permanentnim magnetima postavljenim radijalno te stator s višefaznim elektromagnetskim komponentama. Kroz određeni redoslijed uključivanja ili promjene smjera struje kroz različite statorske faze, magnetsko polje statora se skokovito okreće u jednom ili drugom smjeru. magnetsko polje statorskog dijela motora postupno se mijenja. Ova promjena magnetskog polja uzrokuje koračne rotacije rotora koji sadrži permanentne magnete.[3]

Koračni motor s permanentnim magnetom se sastoji od 8-12 faza, 1-12 pari polova i 2-4 paketa statora.[5]

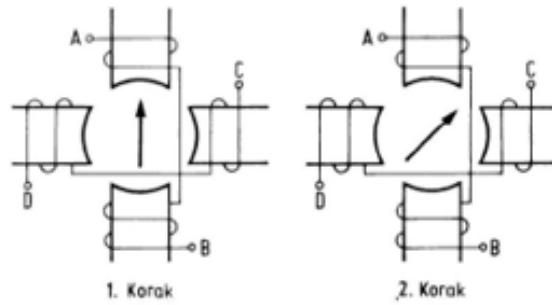
Ova vrsta koračnih motora ima ograničenu rezoluciju, s tipičnim koracima rotacije između  $7,5^\circ$  i  $15^\circ$ . Kako bi se poboljšale momentne karakteristike, koriste se permanentni magneti i postiže veća gustoća magnetskog toka. [4]



Slika 3.1. Presjek KMPM [4]

#### 3.1. Dvofazni koračni motor s permanentnim magnetom

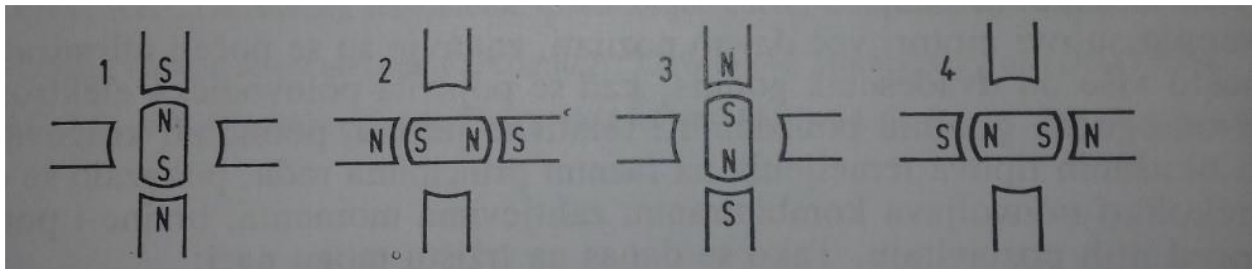
Najjednostavniji primjer motora s opisanim karakteristikama je dvofazni četveropolni motor, koji je prikazan na slici 3.2. Postizanje faze prema redoslijedu iz tablice 3.1. dovodi do postizanja stanja kao što je prikazano na slici 3.3. Ovo se postiže okretanjem u desnom smjeru s koracima od  $\pi/2$  radijana. Ako se faze spoje prema oznakama u zagradama u tablici 3.1., tada će rezultat biti okrenut u suprotnom smjeru.[3]



Slika 3.2. Dvofazno KMPM [3]

Tablica 3.1. Način pobuđivanja faza statora[3]

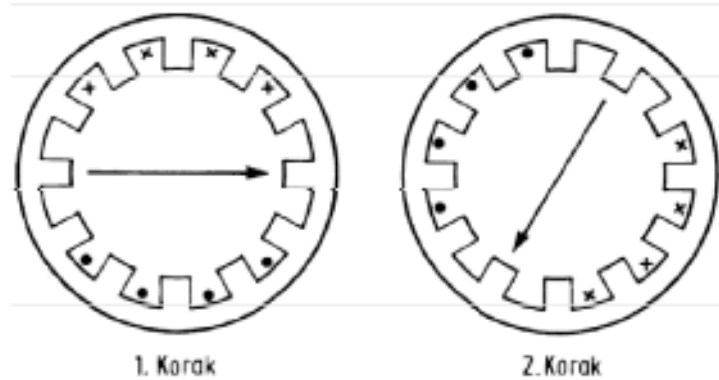
| Korak | FAZA 1 |      | FAZA 2 |      |
|-------|--------|------|--------|------|
|       | A      | B    | C      | D    |
| 1.    | +(+)   | -(-) | 0      | 0    |
| 2.    | +(+)   | -(-) | +(-)   | -(+) |
| 3.    | 0      | 0    | +(-)   | -(+) |
| 4.    | -(-)   | +(+) | +(-)   | -(+) |



Slika 4.3. Stanje dvofaznog KMPM za vrijeme okretanja[3]

### 3.2. Trofazni koračni motor s permanentnim magnetom

Izrada trofaznog koračnog motora s permanentnim magnetima zahtijeva složeniji postupak nego kod dvofaznih koračnih motora. Stator ovog motora nema jasno definirane polove. Umjesto toga, ima utore u koje su smještene zavojnice slično kao kod trofaznih asinkronih motora. Rotacija se postiže pobuđivanjem svake faze pojedinačno prema uputama u tablici 3.2. Kao rezultat toga, motor se okreće u koracima od  $120^\circ$ , što je ilustrirano na slici 4.4. [4]

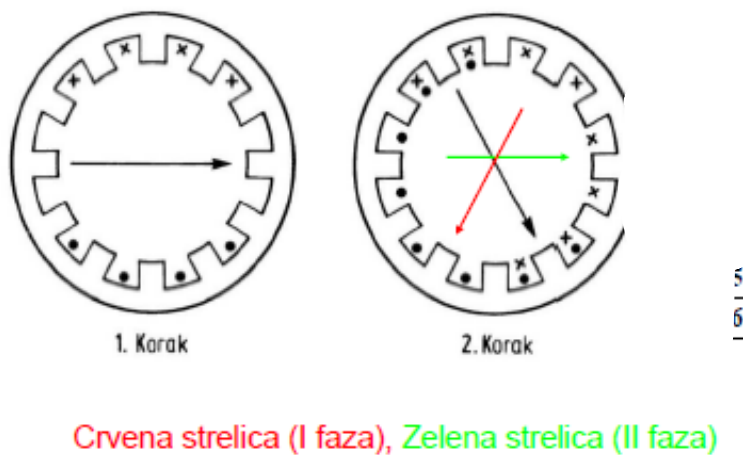


Slika 3.4. Stanje trofaznog KMPM pri okretanju u koracima od 120 stupnjeva.[3]

Tablica 3.2. Način pobude trofaznog KMPM [3]

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

Nakon što se jedna faza spoji, ukapčanjem dviju faza prema uputama u tablici 3.3., postiže se rotacija u koracima od 60°, kako je prikazano na slici 4.5.



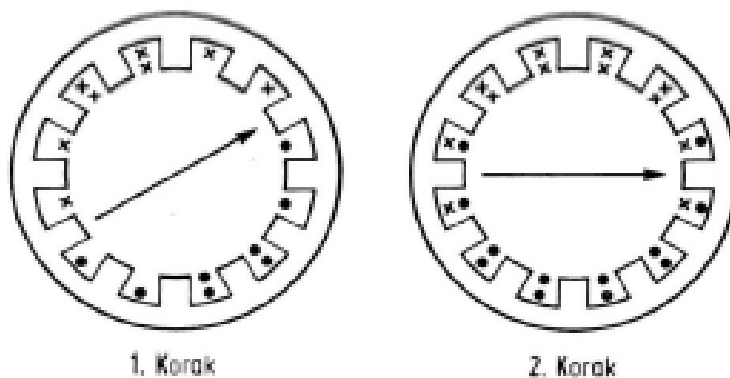
Slika 3.5. Stanje trofaznog KMPM pri okretanju koracima od 60°[4]



Tablica 3.3. Način pobude trofaznog KMPM pri okretanju koracima od 60 [3]

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

Slika 3.6. ilustrira rotaciju za korak od  $\pi/6$  radijana (30 stupnjeva). Ova rotacija se postiže putem promjene redoslijeda aktivacije faze u trofaznom sustavu prema Tablici 3.4.



Slika 3.6. Stanje trofaznog KMPM pri okretanju koracima od 30°[4]

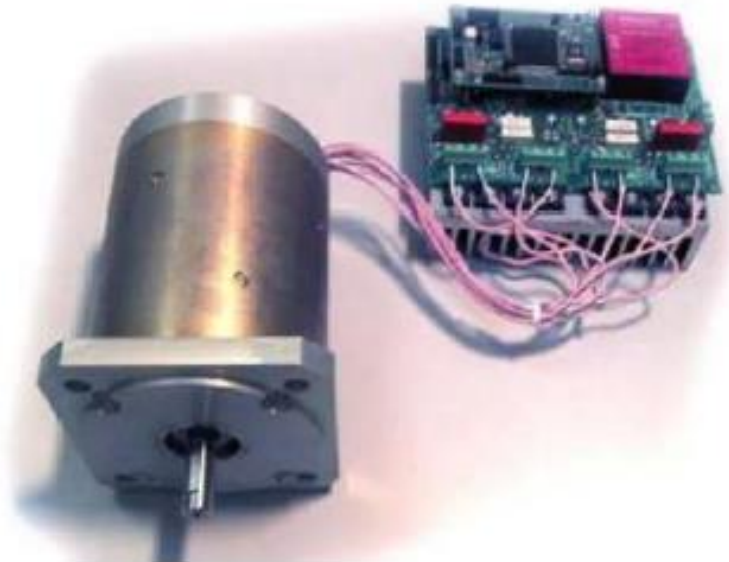
Tablica 3.4. Način pobude KMPM pri okretanju koracima od 30°[3]

| 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    | +    | -  | +   |

## 4. KORAČNI MOTOR S VARIJABILNOM RELUKTANCIJOM

Kod varijabilnoreuktancijskog koračnog motora (slika 4.1.) stator ima više faznih namota, a rotor iz mekog magnetskog materijala više polova odnosno zubi. Koračni kut im varira ovisno o broju zuba na statoru i rotoru, kao i o konfiguraciji namatanja statorskih faza i načinu njihove pobude. Koračni kut im ovisi o broju zuba statora i rotora te o načinu namatanja statorskih faza i načinu njihove pobude. Najčešće se izrađuju u trofaznoj i četverofaznoj verziji. [3]

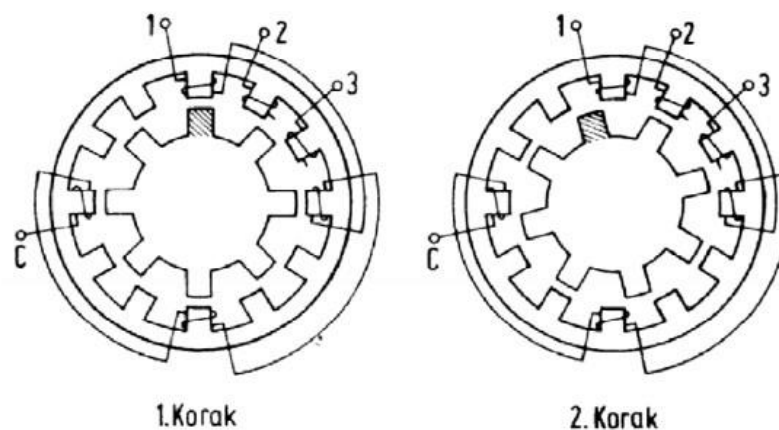
Zbog nazubljene izvedbe rotora, u zračnom se rasporu javljaju različiti magnetski otpori (reluktancija). [6]



Slika 4.1. Koračni motor s varijabilnom reluktancijom [4]

### 4.1. Trofazni koračni motor s varijabilnom reluktancijom

Na slici 4.2. je prikazan koračni motor s varijabilnom reluktancijom koji u većini slučajeva imaju 12 statorskih i 8 rotorskih zuba. Prema tablici 4.1. mogu se dovoditi napajanja na faze te će se rotor okretati koračnim kutom od  $15^\circ$  u smjeru desnog vijka. Na slici je prikazano da se svaka faza napajanja aktivira kako bi se četiri zupca rotora poravnala s četiri zupca statora. Neporavnati zubi rotora se nalaze pod kutem  $15^\circ$  u odnosu na osovine nepovratnih zuba statora 2. i 3. faze. Pobuđivanje I, III, II faza rotacija je u smjeru desnog vijka, a suprotno pobuđivanjem faza I, II, III. pobuđivanjem faze 1 pa zatim faze 2, postiže se polukoračni pomak od  $7,5^\circ$ . [7]



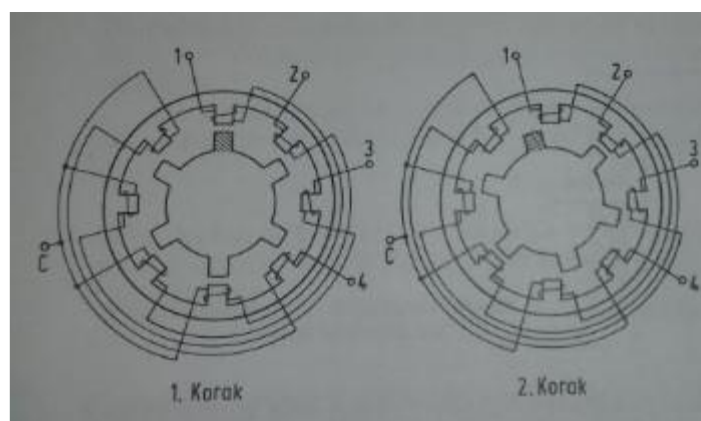
Slika 4.2. Trofazni KMVR u punokoračajnom pokretanju [7]

Tablica 4.1. Pobuđivanje faza trofaznog KMVR [7]

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

#### 4.2. Četverofazni koračni motor s varijabilnom reluktancijom

Na slici 4.3. je prikazana četverofazna verzija ovog motora koja redovito sadrži osam zuba na statoru i šest zuba na rotoru, kako je prikazano na slici 4.3. Kut između susjednih zuba na statoru iznosi  $45^\circ$ , dok je kut između zuba na rotoru  $60^\circ$ .



Slika 4.3. Četverofazni KMVR[3]

Tablica 4.2. Pobuđivanje faza četverofaznog KMVR [3]

| korak | FAZE |      |      |      |
|-------|------|------|------|------|
|       | I    | II   | III  | IV   |
| 1.    | +(+) | 0(0) | 0(0) | 0(0) |
| 2.    | 0(0) | 0(+) | 0(0) | +(0) |
| 3.    | 0(0) | 0(0) | +(+) | 0(0) |
| 4.    | 0(0) | +(0) | 0(0) | 0(+) |

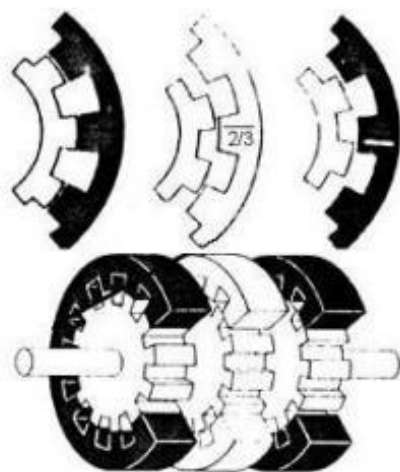
Uz pomoć upravljanja fazama prema tablici 4.2., moguće je inducirati rotaciju rotora u smjeru desne strane koraka za  $15^\circ$ . U slučajevima gdje nisu naznačene zagrade, rotacija će biti u smjeru kazaljke na sat za  $15^\circ$  koraka. Međutim, za faze unutar zagrade, rotacija će biti u suprotnom smjeru. Nakon pobuđivanja faze I prema tablici 4.2., pobudi faza koja II rezultira poravnavanje zuba rotora sa zubima faze II. To znači da će rotacija biti suprotni smjer kazaljke na sat i također će biti za  $15^\circ$  koraka. Ovaj pristup poboljšava prigušenje sustava. Ako se koriste polukoračni koraci, faze će se aktivirati redoslijedom I, I-II, II, II-III, III, III-IV, IV, IV-I. Ovo rezultira rotacijom za  $7,5^\circ$  u smjeru kazaljke na sat, što je polovica punog koraka. [3]

### 4.3. Višesekcijski koračni motor s varijabilnom reluktancijom

Do sad opisanim VR motorima možemo dodati i pridjev jednosekcijski dok postoje još i višesekcijski motori iste vrste. U osnovi, jednosekcijski motori imaju samo jednu sekciju, dok višesekcijski motori uključuju više tih sekcija na istoj osovine. Iako dijele slične principe rada, različite su im izvedbe motora. Višesekcijski motori sastoje se od nekoliko jednosekcijskih motora koji su postavljeni duž iste osovine. Također, bitna razlika leži u broju zuba na statoru i rotoru: jednosekcijski motori imaju različite brojeve zuba na statoru i rotoru, dok su brojevi zuba statora i rotora jednaki kod višesekcijskih motora. U oba tipa motora, rotacija se postiže postavljanjem nemagnetskog željeznog rotora u položaj minimalne reluktancije magnetskog polja statora. Međutim, u suprotnosti s jednosjekcijskim motorima koji se okreću uzastopnim uključivanjem faze, višesekcijski motori se okreću uzastopnim uključivanjem sekcija, što predstavlja ključnu razliku između njih.[3]

Rotor je višepolni i napravljen je od mekog željeza, dok se stator sastoji od slojeva limova koji su lamelirani radi smanjenja gubitaka. Broj faza u motoru jednak je broju sekcija koji su raspoređeni na rotoru i statoru, pri čemu svaka sekcija odgovara jednoj fazi i obično se koristi ili 3 ili 4 faze. Sekcije rotora i statora čvrsto su povezani mehanički, dok su električni i magnetski odvojeni kako bi se

omogućila pravilna funkcionalnost motora. Za inicijalno pokretanje motora potrebno je izazvati pomak u sekcijama rotora ili statora, čime se stvara magnetsko polje koje uzrokuje rotaciju. [4].



Slika 4.4. Primjer izvedbe trofaznog KMVR s tri sekcije [3]

Na slici 4.4 je prikazan shema trosekcijalnog motora s aksijalnim presjekom. Svaka od sekcija predstavlja magnetski izoliranu jedinicu koja se može neovisno pobuđivati. Ova se jedinica sastoji od nazubljenog elektromagnetskog statora i jednako nazubljenog željeznog nemagnetskog rotora, sva tri rotora su postavljena na istoj osovini. U ovom motoru, svaki pol ima po dva zuba, što rezultira ukupno osam zuba na svakom statoru. Na slici 4.5. su shematski prikazani poprečni presjeci sve tri sekcije, s naglaskom na sekciju A koja je trenutno pobuđena. Primjetno je da su statori organizirani tako da motor ima četiri pola, svaki s po dva zuba. Ova konfiguracija dovodi do toga da svaki stator ima ukupno osam zuba. U skladu s prethodno navedenim karakteristikama motora s više sekcija, gdje je broj zuba na rotorima jednak broju zuba na statorima. Međutim, iako su zubi svih sekcija rotora poravnati uzdužno, zubi susjednih sekcija statora pomaknuti su međusobno pod kutom (4.1):

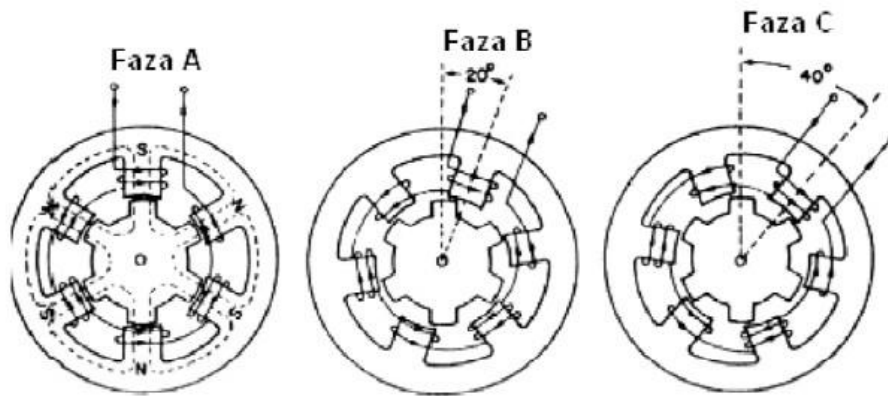
$$\beta = T/S \quad (4.1)$$

gdje je:

T – zubni kut

S – broj sekcija

Na slici 4.5. vidljiv je pomak rotora višesekcijalnog motora, gdje se zubi rotora faze A poravnavaju sa zubima statora. Ova konfiguracija rezultira minimalnom reluktancijom, te se postiže stabilna radna točka motora.



Slika 4.5. Pomak rotora višesekcijskog KMVR[4]

Kut rotacije rotora u višesekcijskim KMVR određuje se pomoću izraza (4.2):

$$\alpha_k = \frac{360^\circ}{N_k} = \frac{360^\circ}{zn_f} \left[ \frac{^\circ}{\text{korak}} \right]. \quad (4.2)$$

gdje je:

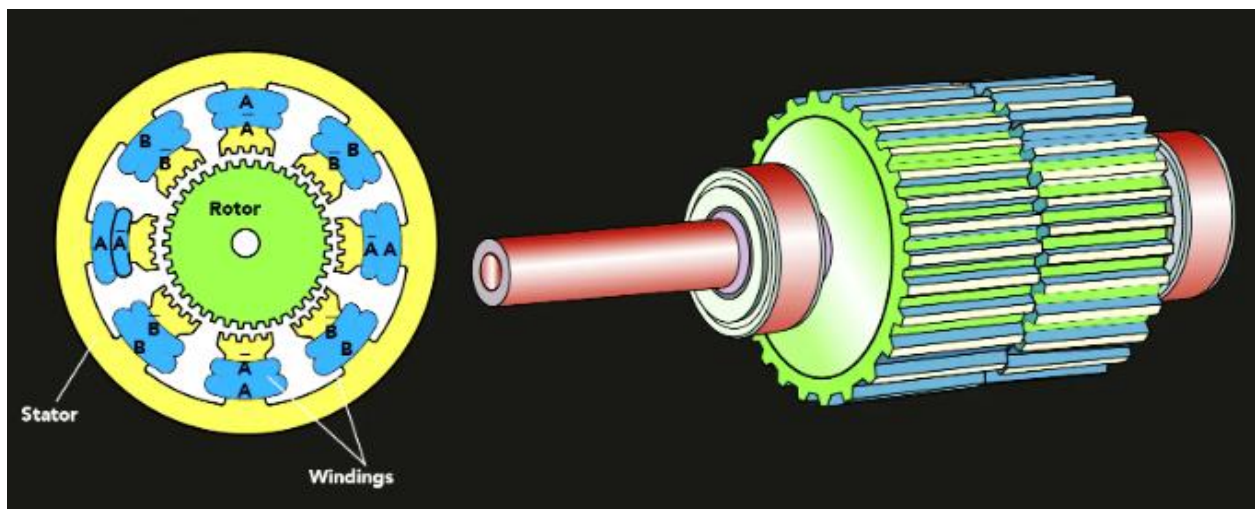
$z$  – broj zubi po fazi,

$n_f$ - broj faza. [7]

## 5. HIBRIDNI KORAČNI MOTOR

Na slici 5.1. prikazan je hibridni koračni motor koji je kombinacija svojstava koračnih motora s permanentnim magnetom (PM) i koračnih motora s promjenjivom reluktancijom (VR).

Sličnost s PM motorima je u tome jer oba sadrže trajni magnet u zubima rotora te im se jedan prsten sastoji od južnih, a drugi od sjevernih polova. Zajednička im je karakteristika s VR motorima da imaju polove statora, koje u hibridnim motorima nazivamo zubima. [8]



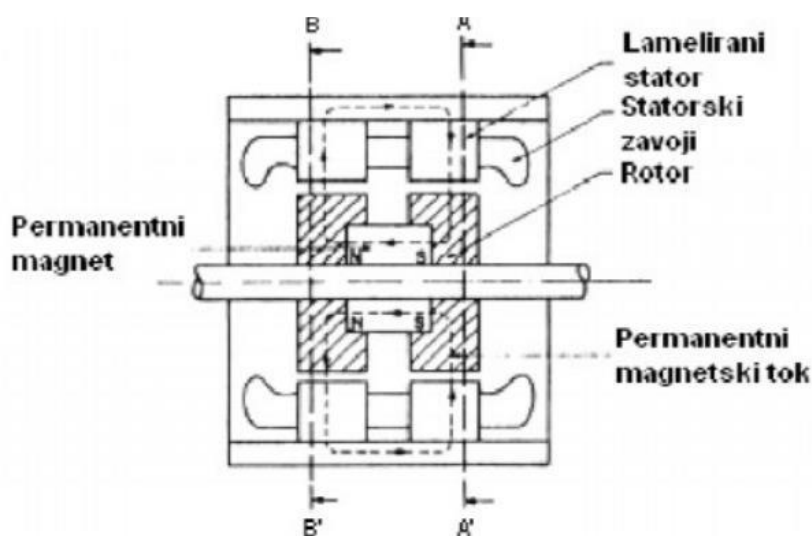
Slika 5.1. Stator i rotor hibridnog koračnog motora [8]

### 5.1. Rotacijski hibridni koračni motor

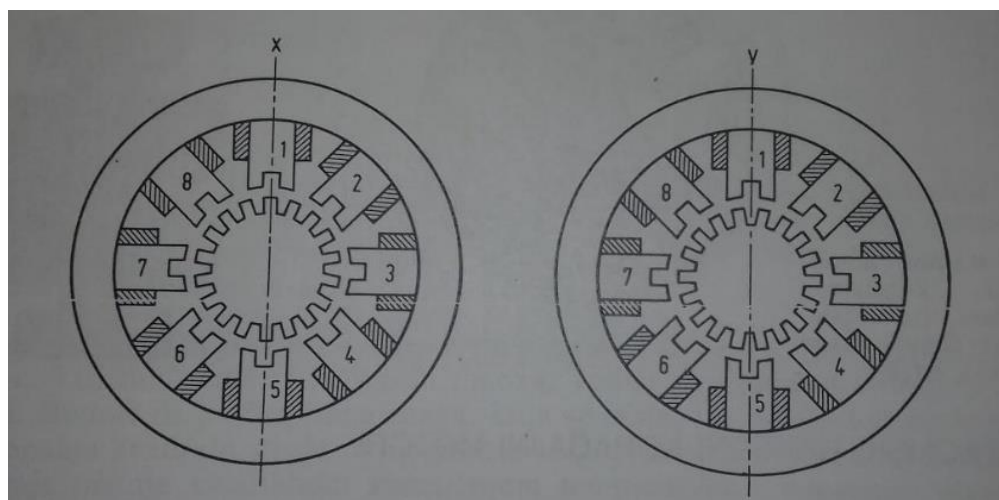
Rotacijski hibridni koračni motori predstavljaju čest tip hibridnih koračnih motora, pri čemu se rotor sastoji od cilindričnog permanentnog magneta smještenog aksijalno duž osi rotora. Na krajevima ovog cilindričnog magneta, s obje strane, nalaze se nazubljeni polni nastavci izrađeni od mekog željeza. Nazubljeni nastavci pomaknuti su za jedan zubni kut, što ih pozicionira između zuba statorskog dijela motora. Statorski dio motora je nepomični dio koji generira elektromagnetska polja.

Razmotrit ćemo načina rada osmopolnog dvofaznog motora. U ovom motoru koristi se magnetski tok iz permanentnog magneta koji izlazi iz jednog magnetskog pola i ulazi u drugi. Ovaj tok prolazi kroz polni nastavak, prelazi zračni raspor, teče kroz elektromagnetski pol, nastavlja kroz željezni vijenac, drugi elektromagnetski pol, drugi zračni raspor, drugi nastavak i

zatvara se u suprotnom magnetskom polu permanentnog magneta, što je prikazano na slici 5.2. Ovaj se mehanizam koristi kako bi se generirao rotacijski pokret motora. Magnetni tok prolazi kroz navedeni sustav stvarajući petlju, pri čemu se na svakom dijelu te petlje susreće s različitim stupnjem reluktancije. Stator elektromagneta je namotan dvofazno i bifilarno. Kao rezultat toga, prema "slici 5.3.", polovi 1, 3, 5 i 7 čine fazu A, dok polovi 2, 4, 6 i 8 čine fazu B. Namotaji polova jedne faze konstruirani su tako da svaki sljedeći pol generira elektromagnetsko polje suprotnog smjera u odnosu na prethodni, te prema tome elektromagnetski tok pola 1 usmjeren je prema osovini, a tok pola 3 usmjeren je suprotno, tako isto s polovima 5 i 7. Zahvaljujući bifilarnom namotavanju svitaka u suprotnom smjeru, elektromagnetski tokovi dobivaju suprotne smjerove. [3,7]



Slika 5.2. Uzdužni presjek hibridnog motora [3]



Slika 5.3. Poprečni presjek osmopolnog hibridnog koračnog motora [3]



Broj zuba na statoru utječe na broj zuba na polnim nastavcima rotora. U osmopolnom motoru s dva zuba na svakom polu statora ukupno ima 16 zuba. Polni nastavci rotora imaju 18 zuba. Za ovu vrstu motora, zubni kut rotora iznosi (5.1):

$$T_R = \frac{360}{Z_R} = \frac{360}{18} = 20^\circ \quad (5.1)$$

gdje je:

$Z_R$  – broj zuba rotora

A koračajni kut ovisi o broju faza statora i broju polova rotora. Jedan zubni kut rotor prevali za onoliko koraka koliki je dvostruki broj faza, pa će koračajni kut biti (5.2):

$$\alpha = \frac{360}{2nZ_R} = \frac{T_R}{2n} = \frac{20}{4} = 5^\circ \quad (5.2)$$

gdje je:

$Z_R$  – broj zuba rotora,

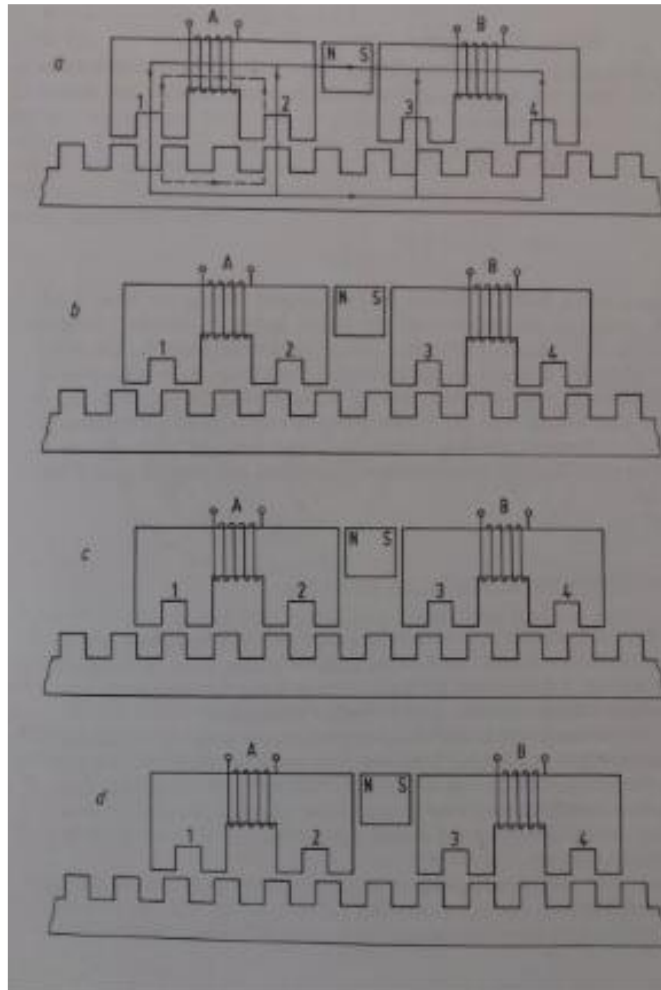
$n$  - broj faza

$T_R$  – zubni kut rotora

## 5.2. Translacijski hibridni koračni motor

Motor se sastoji od dvaju osnovnih dijelova: statora, što je četvrtasta čelična greda s nepomičnim ulogom te magnetne elektro permanentne kombinacije nazvane translator, koja omogućuje translacijski pomak duž statora. Stator pruža stabilnost, djeluje kao statički element, dok translator koristi elektro permanentne magnete kako bi se kretao duž statora.[3]

Na čeličnoj gredi postavljeni su kvadratični zupci u ravnomjernom rasporedu, a greda je smještena na debeloj čeličnoj podlozi. Na toj podlozi giba se translator, koji se sastoji od dva elektromagneta i jednog snažnog permanentnog magneta, kao što je prikazano na slici 5.4. Svaki elektromagnet na translatoru ima četiri nazubljena pola, a permanentni magnet je pozicioniran između ta dva elektromagneta.[3]



Slika 5.4. Jedan ciklus pomaka translacijskog hibridnog koračnog motora [3]

#### Princip rada:

Permanentni magnet uzrokuje magnetski tok koji se ravnomjerno raspoređuje kroz zračni prostor, uključujući elektromagnete i stator, pri čemu se zanemaruje reluktancija elektromagnetskih jezgara. Zahvaljujući ovom ravnomjernom raspoređivanju magnetskog polja, nema nikakve tangencijalne sile između statora i translatora, što rezultira nepomičnošću translatora. Pobuđivanjem jednog od elektromagneta, na primjer, povezivanjem faze A, pokrećemo prvi elektromagnet. Magnetni tok permanentnog magneta i elektromagneta se preklapaju u polu 1, dok se poništavaju u polu 2. To uzrokuje asimetričnost i generira tangencijalnu silu koja nastoji smanjiti reluktanciju u zračnom rasponu. Kao posljedica toga, dolazi do pomicanja translatora udesno, čime se zubi pola 1 poravnavaju s dva najbliža zuba statora. U idućem koraku, isključivanjem faze A i aktiviranjem faze B, pobuđuje se drugi elektromagnet. Nakon toga, u polu 3 magnetski tokovi permanentnog magneta i elektromagneta se poništavaju, dok se u polu 4 međusobno nadopunjuju. Kao rezultat navedenog postupka, zubi u polu 4 se usklađuju s najbližim zubima statora. Ovaj postupak uzrokuje pomicanje translatora za još jedan korak udesno.

Ponovnim prebacivanjem s faze B na fazu A, ali ovaj put suprotnog polariteta, rezultirat će poništavanjem struja na polu 1, dok će se na polu 2 pojačati. Ovo će dovesti do poravnanja zubaca na polu 2 s najbližim desnim zupcima statora. U ovom koraku, translator će se pomaknuti za jedan korak udesno. Daljnjim prebacivanjem s faze A natrag na fazu B, ali ovog puta s jednakim polaritetom kao i prije, translator će se ponovno pomaknuti za jedan korak udesno. Na taj će se način završiti jedan ciklus gibanja. [3]

Na slici 5.4. možemo primijetiti da se motor za jedan ciklus sastoji od 4 koraka, što je rezultat četveropolnog prevoditelja motora. U tablici 5.1. vidljive su kombinacije faza koje se koriste za ostvarivanje desno usmjerene kretnje translatora, kao i kombinacije za lijevo usmjerenu kretnju.

Tablica 5.1. Redoslijed ukapčanja faza za lijevo i desno gibanje translatora [3]

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

### 5.3. Petofazni hibridni koračni motor

Istraživanjem tehnoloških karakteristika utvrđeno je da se najbolji rezultati postižu kombinacijom permanentnih magneta i varijabilne reluktancije u koračnim motorima. Među različitim konfiguracijama, istaknuta je desetopolna petofazna varijanta motora. U ovom tipu motora, stator je opremljen s 10 glavnih elektromagnetskih polova koji su jednolično raspoređeni duž oboda. Svaki pol zbog toga zauzima polni kut veličine (5.3):

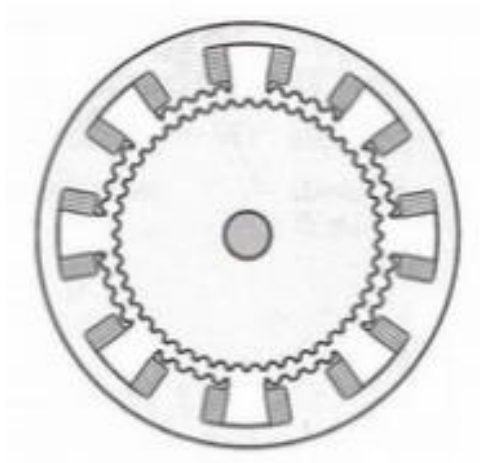
$$\tau_p = \frac{2\pi}{p} = \frac{360^\circ}{10} = 36^\circ \quad (5.3)$$

gdje je:

$p$  - broj glavnih polova

Dva svitka namotaja, smještena na suprotnim polovicama, zajedno stvaraju jednu fazu u petofaznom motoru. Ovaj tip motora naziva se petofazni zbog svoje sposobnosti da koristi pet faza na deset glavnih polova kako bi generirao pokretačko magnetsko polje. [3]

Jedna polovica rotora pomaknuta je tangencijalno prema zubima druge polovice za pola zubnog koraka. Magnetizirani fazni namoti statora imaju nazubljene polove s jednakim ili minimalno različitim korakom u odnosu na rotorske polove (slika 5.5.). Ovaj pristup omogućuje hibridnim motorima ostvarivanje manjih koraka rotacije u usporedbi s drugim tipovima motora.[6]

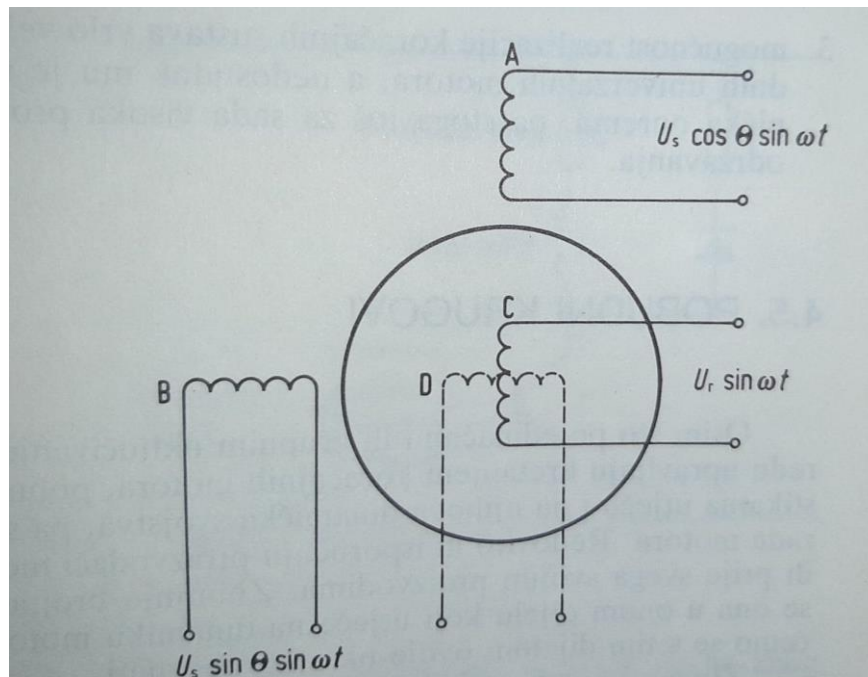


*Slika 5.5. Desetpolni petofazni koračni motor[6]*

## 6. KORAČNI MOTORI S ROTACIJSKIM MAGNETSKIM POLJEM

Prethodno opisani koračni motori su nazubljeni te pokretani istosmjernom strujom. No, 1974. godine, M. Nakano i njegovi suradnici objavili su rad o novoj vrsti motora. Međutim, 1978. godine, Nakano je osobno razradio inovativni pristup ovoj tehnologiji stvaranjem nove vrste koračnih motora. Štoviše, ova nova varijanta motora se razlikuje od prethodnih jer ne posjeduje nazubljenje te je umjesto toga pokrenuta izmjeničnom strujom.

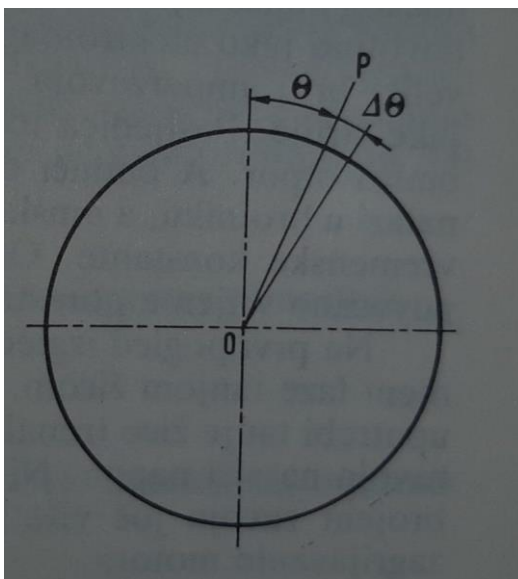
Osnovna ideja iza Nakanova motora je izuzetno jednostavna. Umjesto klasičnog pristupa gdje se koristi istosmjerni napon kako bi se generirala magnetska polja na statorskom i rotorskom dijelu motora, ovdje se primjenjuje izmjenični napon. Korištenjem diskretnih promjena u fazi izmjeničnih polja na statoru i rotoru, postiže se precizni korak-po-korak pomicanje rotora. [3]



Slika 6.1. Dvofazni indukcijski motor [3]

Na slici 6.1. je prikazana ideja putem sheme dvofaznog i dvopolnog indukcijskog motora. Kad se na svitku A statora primijeni napon  $U_s \cos \theta \sin \omega t$ , a na svitku B napon  $U_s \sin \theta \sin \omega t$ , rezultira rotirajućim magnetskim poljem statora u smjeru OP (kako je prikazano na slici 6.2). Kada se istovremeno na svitak C rotora primijeni napon  $U_r \sin \omega t$ , koji također stvara rotirajuće magnetsko polje, dolazi do međusobne interakcije između magnetskih polja rotora i statora. Ova interakcija generira moment koji potiče svitak C da se pomakne. Pomaknut će se sve dok i njegovo magnetsko

polje ne bude usklađeno sa smjerom OP, nakon čega će rotor biti magnetski zakočen u tom položaju.



Slika 6.2. Smjer magnetskog polja Nakanova motora za kuteve  $\theta$  i  $\theta + \Delta\theta$  [3]

Usljed promjene kuta  $\theta$  u  $\theta + \Delta\theta$ , odnosno promjene napona iz  $U_s \cos \theta \sin \omega t$  i  $U_s \sin \theta \sin \omega t$  u  $U_s \cos(\theta + \Delta\theta) \sin \omega t$  i  $U_s \sin(\theta + \Delta\theta) \sin \omega t$  magnetsko će se polje statora pomaknuti za kut  $\Delta\theta$  (slika 6.2.). Zbog magnetske veze s namotajem  $C_s$  s magnetskim poljem statora, ovaj pomak će rezultirati sličnim pomakom rotora za isti kut  $\Delta\theta$ . Na ovaj način postiže se korak po korak okretanje dvofaznog, te slično i trofaznog standardnog indukcijskog motora.

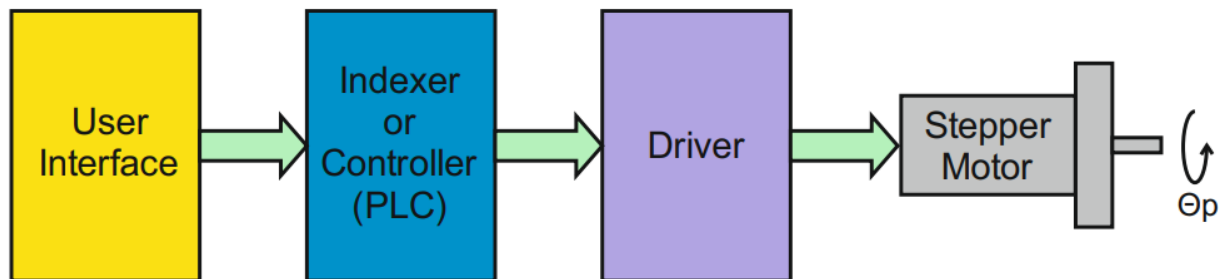
Ovaj motor ima nekoliko prednosti koje treba istaknuti:

- širok raspon promjene koračnog kuta,
- minimalni gubitci zbog zagrijavanja,
- mogućnost realizacije koračnih sustava vrlo velike snage, primjenom standardnih univerzalnih motora

Nedostatak leži u relativno složenoj elektroničkoj opremi, što trenutno rezultira visokim troškovima proizvodnje i održavanja. [3]

## 7. MODEL HIBRIDNOG KORAČNOG MOTORA U MATLABU

Na slici 7.1. prikazan je simulacijskog modela koračnog motora konstruiran od osnovnih blokova: upravljača, pogona i koračnog motora. [13]

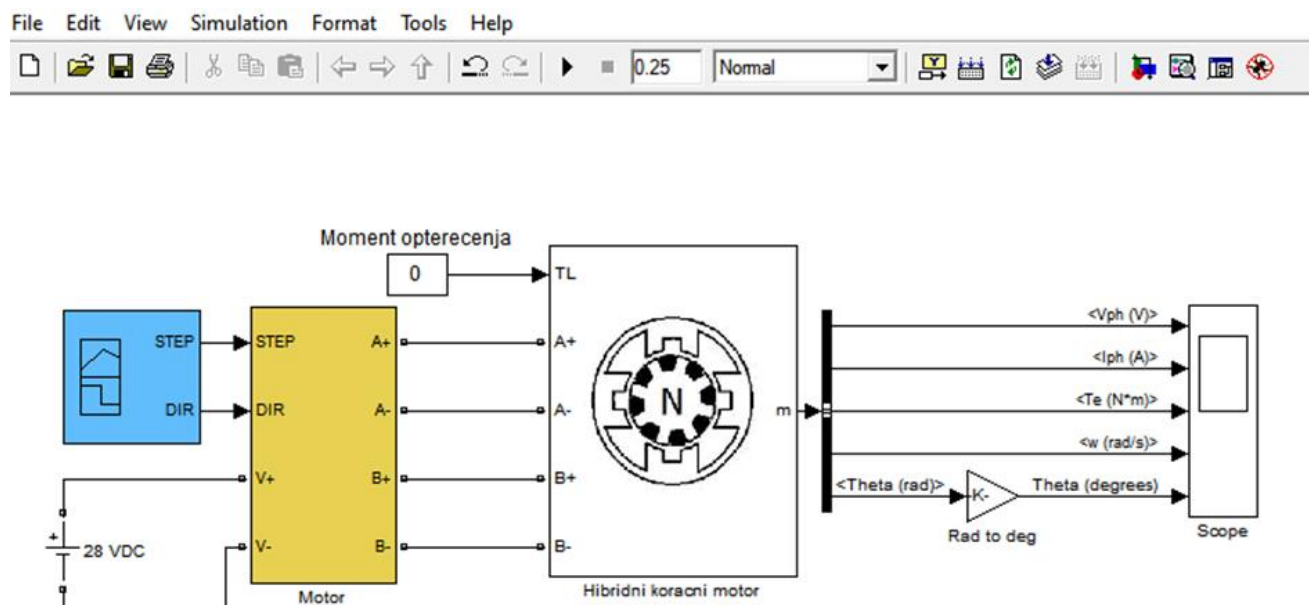


Slika 7.1. Blok prikaz koračnog motora [13]

Simulink model je predstavljen na slici 7.2. koji se sastoji od dva dijela: električnog i mehaničkog dijela. Električni dio je predstavljen ekvivalentnim krugom čija konfiguracija ovisi o tipu motora. Ekvivalentni krug izgrađen je uz pretpostavku da je magnetski krug linearan (bez zasićenja) i da je međusobni induktivitet između faza zanemariv. Mehanički presjek je predstavljen modelom prostora stanja koji se temelji na momentu tromosti i koeficijentu viskoznog trenja. Prema modelu Simulink ulazni parametri motora su: napon po fazi  $-V_{ph}$  [V] ( $A_+$ ,  $A$ ,  $B_+$ ,  $B$ ) i moment mehaničkog opterećenja  $T$  [Nm]. Izlazni parametri iz modela motora su: struja po fazi  $I_{ph}$  [A], elektromagnetski moment  $T$  [Nm], brzina rotora [rad/s] i položaj rotora - theta [stupnjevi]. Simulink model upravljačkog kruga prikazan je na slici 7.3.

Električni dio ili upravljački krug motora sastoji se od tri funkcijske cjeline: upravljački blok, komparator histereze i MOSFET PWM pretvarač. Faze motora napajaju dva H-mosna MOSFET PWM pretvarača spojena na 28 V DC izvor napona. Fazne struje motora neovisno kontroliraju dva regulatora temeljena na histerezi koji generiraju MOSFET pogonske signale uspoređujući izmjerene struje s njihovim referencama. Reference pravokutnog vala struje generiraju se korištenjem amplitude struje i parametara frekvencije koraka navedenih u dijaloškom prozoru. Kretanje motora kontroliraju dva signala: STEP i DIR koji su izlazni signali iz bloka Signal Builder. Pozitivna vrijednost (vrijednost "1") signala STEP omogućuje rotaciju motora dok vrijednost "0" zaustavlja rotaciju. DIR signal kontrolira smjer vrtnje motora. Pozitivna vrijednost

(vrijednost "1") omogućuje rotaciju u jednom smjeru dok vrijednost "0" obrće smjer rotacije. Pretvarački mostovi "A" i "B" su H mostovi koji se sastoje od četiri MOSFET tranzistora. Mostovi se napajaju s 28 V DC, a njihovi izlazi opskrbljuju namote motora uzbudnom strujom i omogućuju kretanje motora. Izlazni signali iz bloka za izgradnju signala prikazani su na slici 7.4. [9, 13]

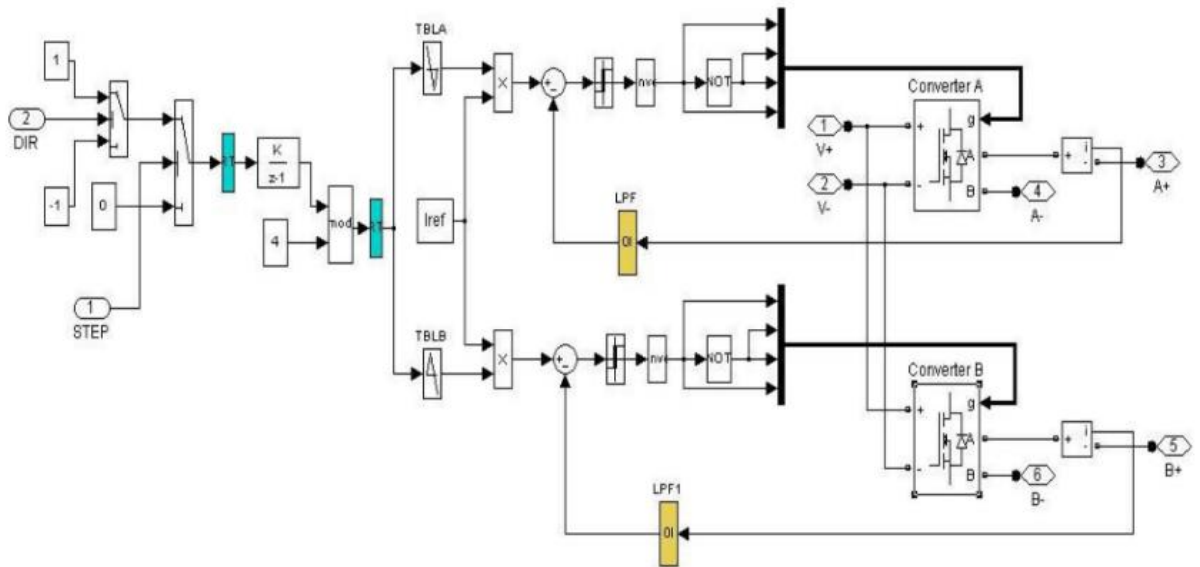


Slika 7.2. Simulink model hibridnog koračnog motora u MATLABu

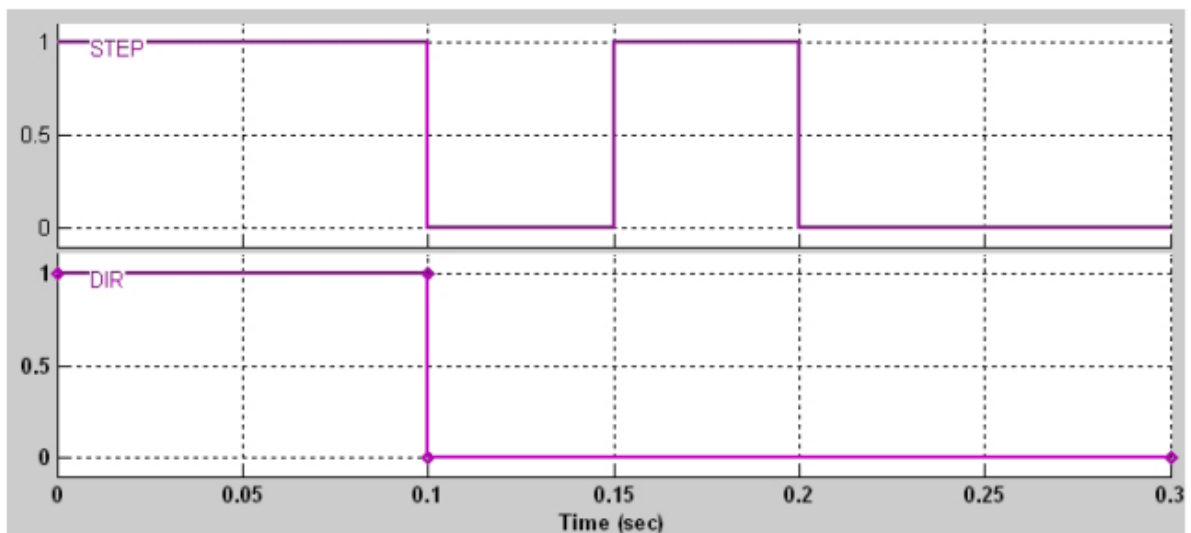
## 7.1. Rezultati simulacije

Nakon što su svi parametri hibridnog koračnog motora uneseni u model hibridnog koračnog motora, pokreće se simulacija. Vrijeme za izvođenje simulacije definirano je na 0,3 sekunde prema signalima iz bloka Signal Builder i postavljenom vremenu u Simulink modelu. Prva simulacija se izvodi u praznom hodu ili koračni motor radi bez opterećenja. Iz rezultata simulacije prikazanih na slici 7.5. može se zaključiti da se koračni motor kreće u jednom smjeru 0,1 sekundu (STEP=1 i DIR=1), zaustavlja se u razdoblju od  $t = 0,1$  do  $t = 0,15$  sekundi (STEP=0, DIR=0), 0,05 sekundi se okreće u suprotnom smjeru (STEP=1, DIR=0) i ponovno se zaustavlja na 0,1 sekundu (STEP=0, DIR=0). Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora prikazane su na slici 7.5. za rad bez opterećenja. [13]





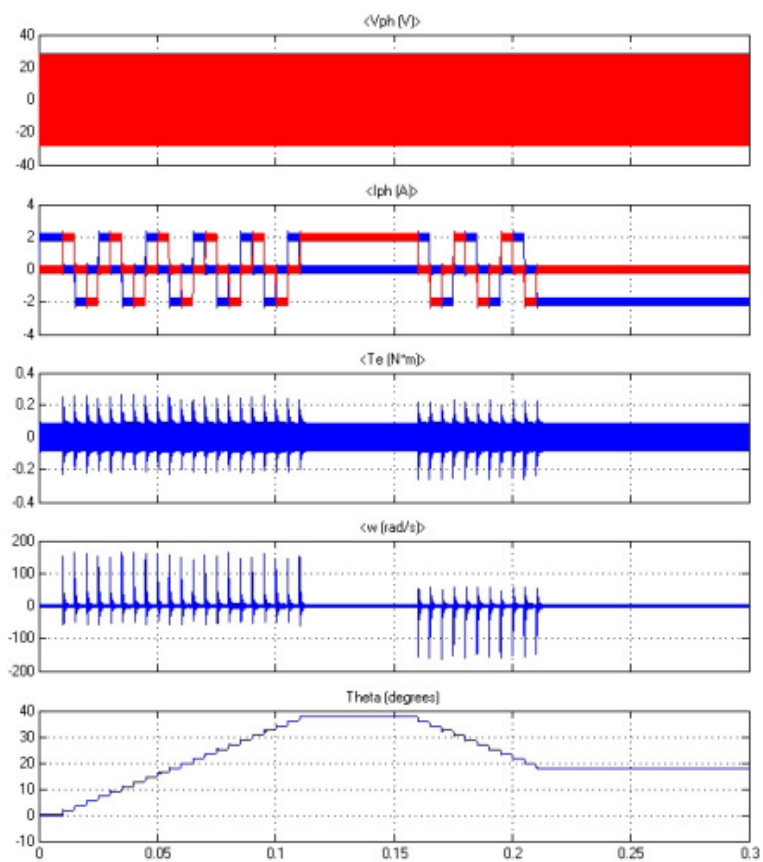
Slika 7.3. Simulink model upravljačkog kruga[13]



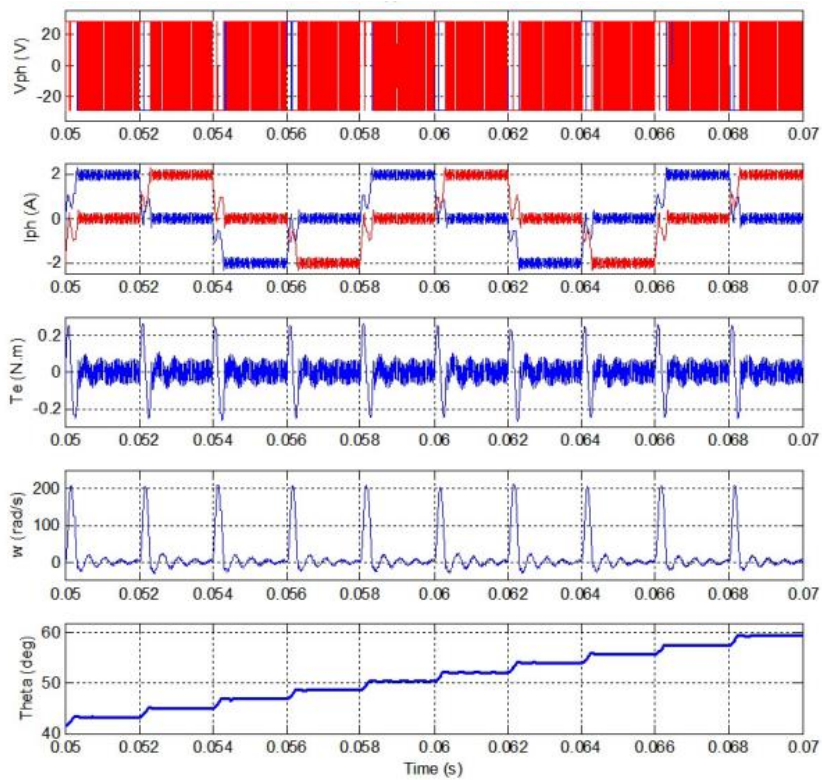
Slika 7.4. Izlazni signali iz bloka Signal Builder

Detaljni valni oblici prikazani su na slici 7.6. Uz odgovarajuće zumiranje prikazanih rezultata na slici 7.5. može se primijetiti da je motor postigao brzinu od 200 [rad/s] i pomaknuo se s položaja  $0^\circ$  na 38 stupnjeva. Ostaje u tom položaju 0,05 sekundi prije nego što se počne kretati u suprotnom smjeru za vrijeme od 0,155 i zaustavi se za vrijeme od 0,205 sekundi na položaju  $18^\circ$ . Za slučaj da se zakretni moment poveća na vrijednost od 0,1 Nm prijelazne karakteristike koračnog motora prikazane su na slici 7.7. Za slučaj da se opterećenje dodatno poveća na 0,4 Nm, rezultati

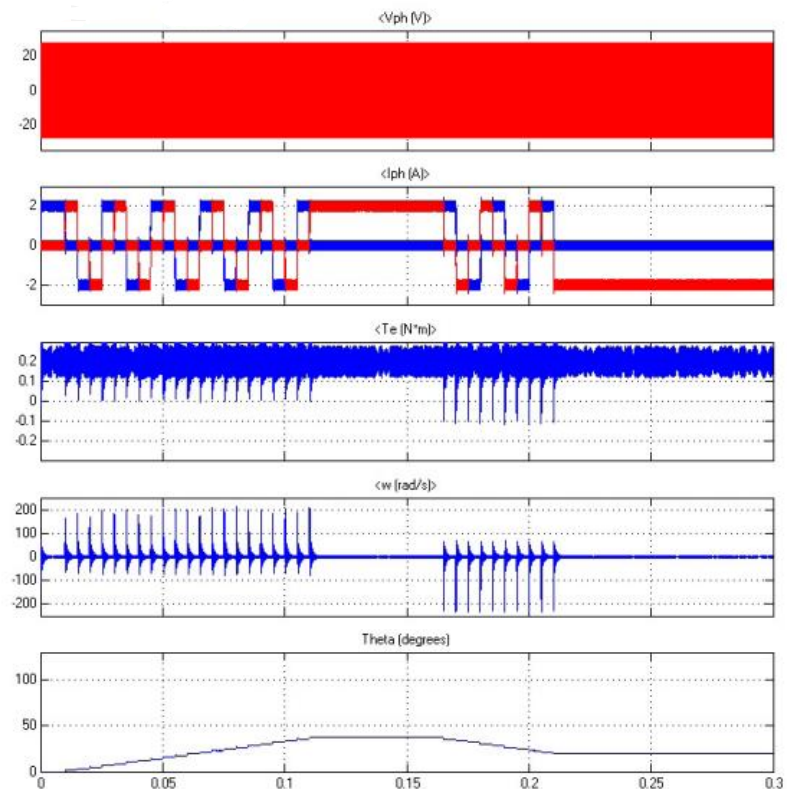
simulacije prikazani su na slici 7.8. Prijelazne karakteristike motora za 150 koraka/sekundi prikazane su na slici 7.9.



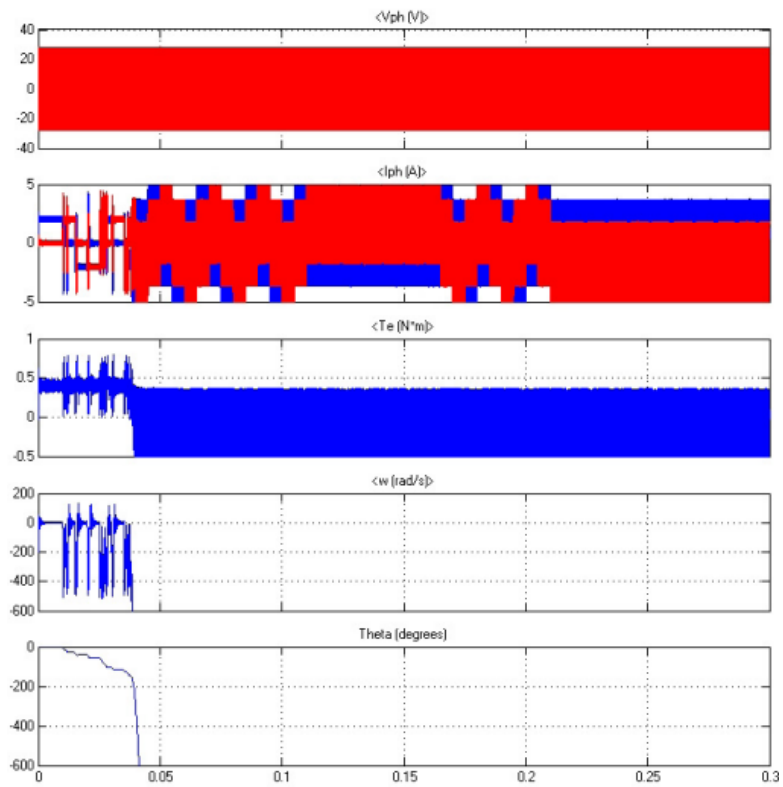
Slika 7.5. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora bez opterećenja



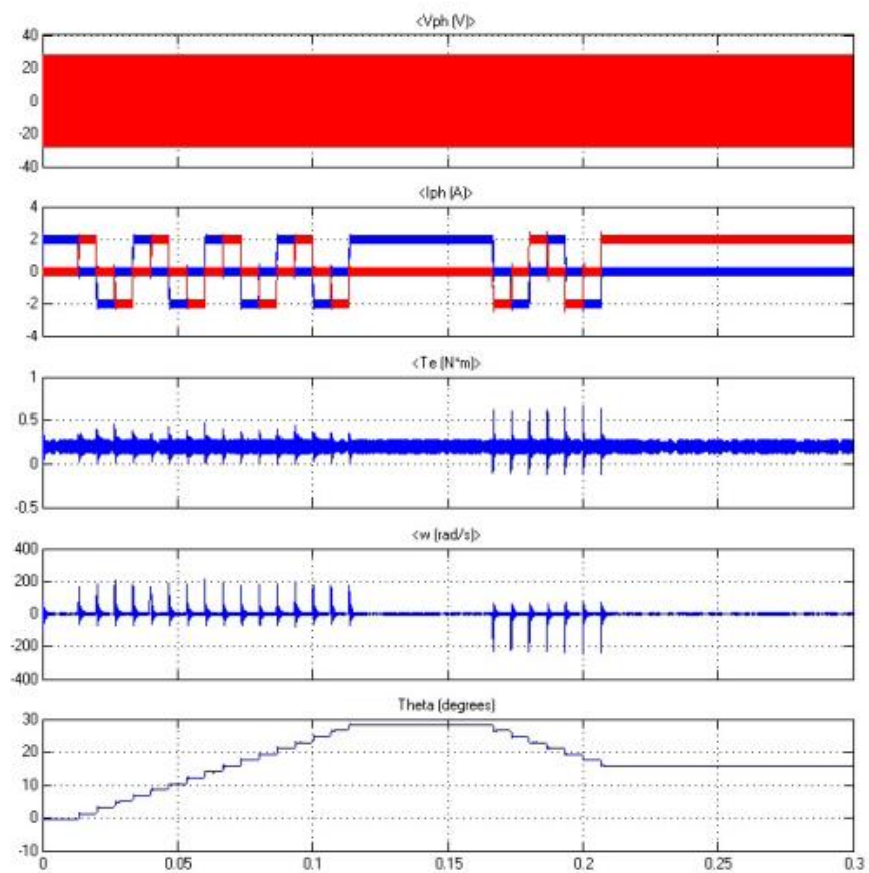
Slika 7.6. Detaljni valni oblici



Slika 7.7. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora za opterećenje 0,1 Nm



Slika 7.8. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora za opterećenje od 0,4 Nm



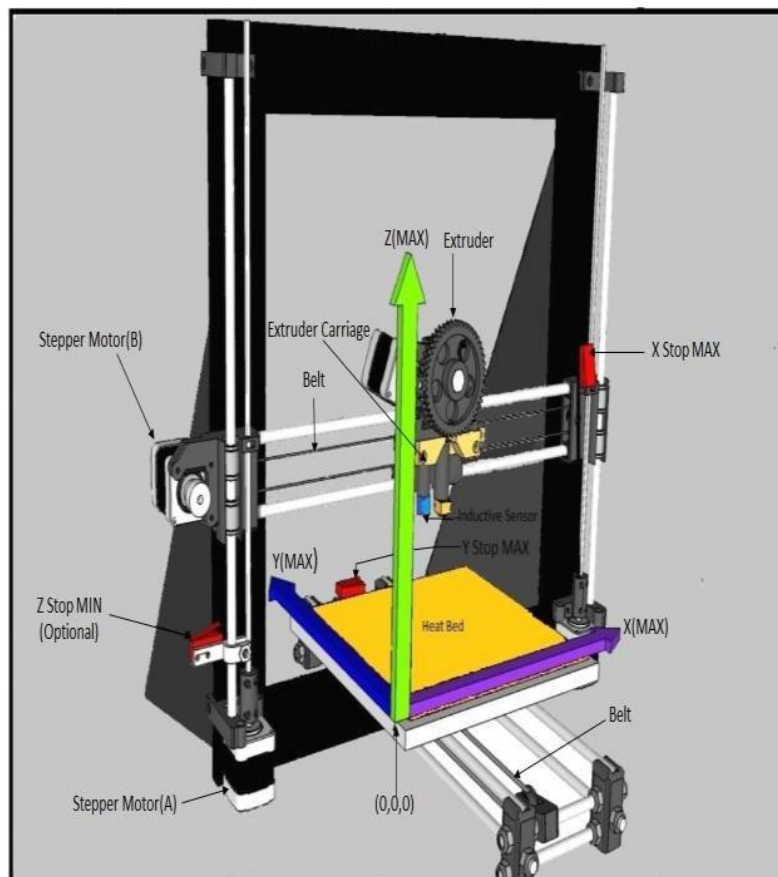
Slika 7.9. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora za 150 koraka/sekundi

Različiti simulacijski programski paketi tijekom posljednjih godina pokazali su se kao koristan alat u analizama elektrotehničkih problema. Simulink sa svojim opsežnim bibliotekama blokova omogućuje široke mogućnosti simulacije električnih strojeva. U ovom radu analizirana je simulacija prijelaznih karakteristika hibridnog koračnog motora u različitim režimima rada: bez opterećenja, nazivnog opterećenja i preopterećenja. Rezultati simulacije su pokazali da koračni motor radi u smjeru naprijed i nazad prema primijenjenim signalima iz PWM pretvarača na pobudne namote i samo u slučaju kada je primijenjeno opterećenje manje od elektromagnetskog momenta motora. U slučaju kada je vanjsko opterećenje veće od elektromagnetskog momenta koračnog motora, ne postiže se kretanje rotora i brzina koračnog motora brzo ide na nulu vrlo kratko nakon pokretanja motora. [13]

Primjena simulacijskih paketa znatno je poboljšala analizu električnih strojeva zamijenivši skupu laboratorijsku opremu i omogućivši izvođenje različitih eksperimenata jednostavno i bez troškova. [13]

## 8. PRIMJENA I UPRAVLJANE KORAČNIH MOTORA, TE NJIHOVE PREDNOSTI I NEDOSTATCI

Koračni motori današnjice imaju široku primjenu u različitim uređajima koji zahtijevaju izuzetno preciznu kontrolu pokreta i visoko precizno pozicioniranje. Ovi motori su posebno pogodni za aplikacije koje zahtijevaju visoku razinu kontrole kretanja, kao što su uređaji za precizno pozicioniranje. Zbog mogućnosti jednostavne integracije s računalima i kontrolerima, lako je stvoriti odgovarajuće uređaje i prateći softver za upravljanje njima. Osim toga, koračni motori su ključni u području biomedicinske opreme, naprednih računalnih diskova, pisača, skenera, inteligentne rasvjete te za kontrolu položaja ljeta u kamerama. Oni također imaju važnu ulogu u postavljanju položaja unutar motora s unutarnjim izgaranjem, robotima, skenerima i 3D printerima, kao i u uređajima kao što su XY ploteri i CNC strojevi. Interesantno je kako su koračni motori pronašli svoje mjesto u širokom spektru uređaja, uključujući i moderne inovacije poput 3D printera koji su revolucionarizirali tradicionalne koncepte ispisa. [10]



Slika 8.1. Primjer koračnih motora u 3D printeru [12]

Osnovna metoda upravljanja koračnim motorom je uključivanje i isključivanje zavojnica koje okružuju zupčanik pravilnim redoslijedom. Promjena redoslijeda i vremena aktivacije zavojnice je način na koji inženjeri prilagođavaju rad koračnog motora potrebama svojih aplikacija.

Promjene u protoku struje do koračnog motora mogu proizvesti izuzetno suptilne i precizne razlike u pozicioniranju. Preciznost koračnog motora ovisi o njegovom broju koraka to jest, broju različitih položaja koje zauzima tijekom punog ciklusa rotacije. Koračni motor s više koraka moći će stvoriti preciznije razlike u pozicioniranju. Razina preciznosti koju koračni motor može postići poznata je kao rezolucija motora.

Glavni načini upravljanja koračnim motorom su:

- Wave Drive/Single Phase: Jedna zavojnica se aktivira u nizu. Ovo je najosnovniji način rada koračnog motora i daje najnižu razlučivost.
- Potpuni korak: Dvije zavojnice se aktiviraju istovremeno u nizu, tako da su polarni položaji rotora zapravo između svake zavojnice. Ovaj način je koristan za poboljšanje momenta i brzine motora, ali ne povećava rezoluciju motora jer će i dalje imati isti broj koraka.
- Pola koraka: Aktivira se jedna zavojnica, a zatim se u sljedećem koraku istovremeno aktiviraju dvije zavojnice. Stoga se rotor pomiče pola koraka odjednom, od izravno poravnatog položaja kada je jedna zavojnica aktivna do podijeljenog poravnanja kada su aktivna dva zavojnica. Ovaj način zapravo dodaje dodatne korake rotaciji motora, tako da značajno povećava razlučivost.
- Mikrokorak: Zavojnice se aktiviraju pomoću niza sinusnih impulsa koji pokreću rotor u iznimno malim koracima. Ova metoda proizvodi najvišu rezoluciju od svih ovdje navedenih, zahvaljujući svojoj sposobnosti da dodatno podijeli ciklus rotora od punih koraka u do 256 koraka. Mikrokorak također pomiče rotor vrlo glatko i dosljedno, što pomaže u smanjenju vibracija, buke i habanja komponenti motora. Zbog ovih prednosti, mikrokorak je najčešći način aktivacije za koračne motore u današnjim primjenama. [11]

Također je moguće povećati rezoluciju koračnog motora povećanjem broja zavojnica i polova. Većina koračnih motora koje koriste profesionalni inženjeri ima veliki broj zavojnica koje daju oko 200 koraka prije mikrokoraka. Zajedno, ove opcije daju inženjerima koji koriste koračne motore mnogo različitih opcija za povećanje preciznosti rezolucije motora.

Svakim koračnim motorom upravlja se putem pogonskog kruga, koji prenosi struju na zavojnice kako bi ih aktivirao. Budući da cijeli mehanizam koji upravlja pokretima koračnog motora počinje s kontrolerom motora, od vitalne je važnosti da se kontrole koračnog motora dizajniraju pažljivo i

u skladu s najboljom praksom. U sljedećim odjeljcima, obrazložiti će se osnove koje se moraju znati pri dizajniranju pogonskog kruga za koračni motor.[11]



*Slika 8.2. Rotor zubčanika okružen magnetskim zavojnicama/ Koračni motor [12]*

### **8.1. Osnovni čimbenici pri odabiru pogona koračnog motora**

Pogonski krug koračnog motora obično je spojen na mikrokontroler koji operateru motora omogućuje kontrolu nad naponskim impulsima poslanim zavojnicama. Dostupne su mnoge različite opcije za krugove koračnog pogona, uključujući neke modele dizajnirane za upotrebu izvan kutije kao koračni kontroler. Drugi koriste mikrokontrolere koji se mogu programirati kao što je Arduino Uno, koji se može programirati korištenjem njegove open-source stepper kontrolne biblioteke .

Pri odabiru pogonskog kruga koračnog motora počnite s četiri osnovna čimbenika:

1. Napon: pokretač bi trebao biti ocijenjen za različite razine napona
2. Struja: pokretač bi trebao biti ocijenjen za najmanje 1,4 puta veću od nazivne maksimalne struje koračnog motora.
3. Microstepping: upravljački program trebao bi imati više opcija razlučivosti koraka tako da se može eksperimentirati s različitim postavkama mikrokoraka.



4. Maksimalni impuls koraka: pokretač treba biti ocijenjen za dovoljnu količinu impulsa koraka za okretanje rotora brzinom koju zahtijeva vaša aplikacija. [11]

## 8.2. Ostali čimbenici pri odabiru koračnog pogona

Unatoč relativno jednostavnom dizajnu koračnih motora, određivanje pravog koračnog motora i projektiranje odgovarajućeg upravljačkog sustava mogu biti izazovni zadaci. Na osnovna četiri čimbenika može utjecati niz drugih čimbenika.

Ostali čimbenici pri odabiru koračnog pogona :

- Kada primjena zahtijeva određene brzine rotacije i okretni moment, može biti izazovno uskladiti pravi motor i pogon čak i kada su gore navedeni uvjeti uzeti u obzir. Općenito, najtočnija metoda za usklađivanje motora i pogona je korištenje inženjerskog softvera s odgovarajućim krivuljama brzine i momenta. Započinje se s pogonom koji ima željene karakteristike napona i struje, a zatim se uskladi s motorom pomoću odabrane krivulje brzine i momenta.
- Neusklađenost zakretnog momenta čest je problem u konstrukciji pogona koračnog motora koji može uzrokovati zastoje (zbog nedovoljnog zakretnog momenta) ili vibracije i buku (zbog pretjeranog zakretnog momenta). Da bi se dobila prava količina okretnog momenta, počinje se izračunom okretnog momenta opterećenja željenog zadatka koji motor treba obaviti. Nakon što se odrede potrebni okretni moment opterećenja, upotrijebe se tehnike usklađivanja opterećenja i okretnog momenta motora radi sigurnosti da je okretni moment motora na dobroj točki.
- Koračni motor treba punu struju kako bi proizveo okretni moment, što znači da se koračni motor može jako zagrijati ako se drži u položaju dulje vrijeme. To se uzima u obzir prilikom projektiranja rashladnih sustava.
- Bipolarni koračni motori zahtijevaju nešto složenije pogonske krugove nego unipolarni koračni motori jer moraju prenijeti negativnu struju istovremeno na suprotnu zavojnicu.
- Upravljačka jedinica koračnog motora trebala bi biti zaštićena električnim kućištima kako bi bila zaštićena od opasnosti iz okoliša. Ovisno o radnom okruženju motora, ožičenje njegove razvodne kutije može se zaprljati prašinom i krhotinama ili oštetiti prskanjem vode (među mnogim drugim mogućim opasnostima). [11]

### 8.3. Prednosti i nedostaci koračnih motora

Njihova glavna prednost leži u visokoj preciznosti pri radu, olakšanom upravljanju položajem rotora i brzini vrtnje te niskoj potrošnji energije. Ova kombinacija svojstava postiže se zahvaljujući jednostavnoj konstrukciji motora, što također rezultira pristupačnom cijenom finalnog proizvoda. Osim toga, koračani motori ostvaruju snažan okretni moment pri niskim brzinama, čime se osigurava snažno pokretanje. Bitno je napomenuti da ovakvi motori ne koriste četkice, što pozitivno utječe na njihovu mehaničku izdržljivost i pouzdanost. Još jedna ključna prednost je brza reakcija motora na komande: mogućnost brzog pokretanja zbog visokog okretnog momenta, te jednako tako brzo zaustavljanje zahvaljujući tom istom momentu te sposobnosti promjene smjera vrtnje. U mnogim primjenama, fleksibilnost u oblikovanju karakteristika pokretanja i zaustavljanja također igra značajnu ulogu, a korakačni motori se ističu i po tome. [10]

Jedan od bitnijih nedostataka koračnih motora leži u njihovoj energetskej potrošnji. Ovi motori zahtijevaju energiju i tijekom svojih zaustavljanja, pored istih potreba za snagom prilikom pokretanja. Njihov najveći okretni moment postiže se pri relativno niskim brzinama rotacije, dok pada pri većim brzinama. Ovaj aspekt je usko povezan s električnom strujom koja prolazi kroz namotaje motora, pri čemu ta struja ovisi o impedanciji tih namotaja. Impedancija raste sa svim višim frekvencijama preklapanja, što ograničava sposobnost postizanja visoke brzine rotacije uz održavanje adekvatnog okretnog momenta. Tu leži ograničenje za postizanje visoke brzine rotacije uz zadržavanje performansi u nosivosti tereta. Ostali nedostaci uključuju generiranje buke pri visokim brzinama, ograničenja u dostižnim brzinama i potrebu za vanjskom kontrolom pozicioniranja. [10]

## 9. ZAKLJUČAK

U zaključku završnog rada o koračnim motorima, možemo istaknuti nekoliko ključnih zaključaka. Prvo, povijest koračnih motora nam pokazuje kako su se razvijali i unapređivali tijekom vremena, što je dovelo do široke primjene u mnogim industrijama.

Drugo, rad je posvećen razumijevanju osnova koračnih motora, kao i različitih vrsta koračnih motora, uključujući permanentnomagnetske, varijabilnoreluktantske, hibridne i one s rotacijskim magnetskim poljem. Svaka od ovih vrsta ima svoje prednosti i nedostatke, a izbor odgovarajućeg motora treba biti u skladu s potrebama specifičnih aplikacija.

Nadalje, analiziran je model hibridnog koračnog motora pomoću MATLAB-a, što je omogućilo bolje razumijevanje principa rada i karakteristika ovog motora.

U radu je također istaknuta primjena koračnih motora u raznim industrijama, uključujući industriju automatizacije, medicinsku industriju, tekstilnu industriju i mnoge druge. Njihova preciznost, kontrolabilnost i jednostavnost upravljanja čine ih idealnim izborom za brojne zadatke koji zahtijevaju točno pozicioniranje.

Na kraju, pažljivo su razmotrene prednosti i nedostaci koračnih motora. Prednosti uključuju visoku preciznost, nisku potrošnju energije, jednostavno upravljanje i mogućnost koraka po koraka pomjeranja, dok se među nedostacima mogu navesti buka pri radu visokim brzinama, ograničenja brzine i potrebna vanjska kontrola položaja.

U cjelini, koračni motori se pokazuju kao iznimno važan dio električnih pogona, pružajući učinkovito i pouzdano rješenje za precizno pozicioniranje u brojnim aplikacijama. Daljnji razvoj tehnologije koračnih motora sigurno će donijeti novosti i poboljšanja koja će ih učiniti još atraktivnijima za industriju.

## LITERATURA

[1] Learnchannel-TV.com: History of the stepper motor, s interneta:

<https://learnchannel-tv.com/en/drives/stepper-motor/history/> (9.8.2023)

[2] Zikodrive: Stepper Motor Theory, s interneta: <https://zikodrive.com/support/zikouniversity-motor-control-theory-application/stepper-motors-history-theory-principles-operation/> (9.8.2023)

[3] P. Gugić, Električni servomotori, Školska knjiga, Zagreb, 1987.

[4] Koračni motori, Prof.dr.sc. Jasmin Velagić Elektrotehnički fakultet Sarajevo Kolegij: Aktuatori, s interneta: <https://people.etf.unsa.ba/~jvelagic/laras/dok/Lekcija6.pdf>

[5] Slide Player: SENZORI I AKTUATORI, Koračni motori, Robert Kopecký, s interneta: <https://slideplayer.gr/slide/14159757/> (10.8.2023)

[6] ELEKTRIČNI STROJEVI, Prof.dr.sc. Zdravko Valter, ETF Osijek, 2008., <https://dokumen.tips/documents/elektricni-strojevi-55c8047929230.html?page=78> (10.8.2023)

[7] Završni rad, Električni motori za posebne namjene, Danijel Kukić, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Osijek, rujan, 2019., s interneta: <https://repozitorij.etfos.hr/islandora/object/etfos:2267> (11.08.2023.)

[8] Motion Control tips: What are hybrid stepper motors?, Zak Khan, s interneta: <https://www.motioncontroltips.com/faq-what-are-hybrid-stepper-motors/> (11.8.2023.)

[9] Math Works: Stepper Motor Drive, s interneta: <https://www.mathworks.com/help/sps/ug/stepper-motor-drive.html> (12.8.2023.)

[10] Transfer Multistor Elektonik: KORAČNI MOTORI – VRSTE I PRIMJENA KORAČNIH MOTORA, s interneta: <https://www.tme.eu/ba/hr/news/library-articles/page/41861/korachni-motori-vrste-i-primjeri-primjene-korachnih-motora/> (14.08.2023.)

[11] Polycase: How to Control Stepper Motors for More Accurate Robotic Movements, s interneta: <https://www.polycase.com/techtalk/electronics-tips/how-to-control-stepper-motors.html> (14.8.2023.)

[12] Research Gate: Analysis of Implementation Factors of 3D Printer: The Key Enabling Technology for making Prototypes of the Engineering Design and Manufacturing, Jyoti Sekhar Banerjee i Arpita Chakraborty, s interneta:

[https://www.researchgate.net/figure/Fig7-Movement-of-3D-printer-using-stepper-motor-a-coupler-The-Extruder-carriage-move\\_fig2\\_331742953/](https://www.researchgate.net/figure/Fig7-Movement-of-3D-printer-using-stepper-motor-a-coupler-The-Extruder-carriage-move_fig2_331742953/) (15.8.2023)

[13] ScienceDirect: The Modelling and Simulation of Bipolar Hybrid Stepping Motor by Matlab/Simulink, Alexandru Morar, s interneta:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212017315000833> (17.8.2023)

[14] Types of steppers, s interneta:

<https://learn.adafruit.com/all-about-stepper-motors/types-of-steppers> (19.8.2023)

## POPIS SLIKA

|  |    |
|--|----|
| Slika 2.1. Koračni motori [14] .....   | 4  |
| Slika 2.2. Princip rada motora u punom koraku s 2-faznim napajanjem [10] .....                           | 5  |
| Slika 2.3. Načelo rada motora u polu-koraku s 2-faznim napajanjem [10] .....                             | 6  |
| Slika 3.1. Presjek KMPPM [4].....  | 7  |
| Slika 3.2. Dvofazno KMPPM [3] .....  | 8  |
| Slika 4.3. Stanje dvofaznog KMPPM za vrijeme okretanja[3].....   | 8  |
| Slika 3.4. Stanje trofaznog KMPPM pri okretanju u koracima od 120 stupnjeva.[3] .....                    | 9  |
| Slika 3.5. Stanje trofaznog KMPPM pri okretanju koracima od 60°[4].....                                  | 9  |
| Slika 3.6. Stanje trofaznog KMPPM pri okretanju koracima od 30°[4].....                                  | 10 |
| Slika 4.1. Koračni motor s varijabilnom reluktancojom [4] .....  | 11 |
| Slika 4.2. Trofazni KMVR u punokoračajnom pokretanju [7] .....   | 12 |
| Slika 4.3. Četverofazni KMVR[3] .....  | 12 |
| Slika 4.4. Primjer izvedbe trofaznog KMVR s tri sekcije [3] .....  | 14 |
| Slika 4.5. Pomak rotora višesekcijskog KMVR[4] .....   | 15 |
| Slika 5.1. Stator i rotor hibridnog koračnog motora [8] .....  | 16 |
| Slika 5.2. Uzdužni presjek hibridnog motora [3] .....  | 17 |
| Slika 5.3. Poprečni presjek osmopolnog hibridnog koračnog motora [3] .....                               | 17 |
| Slika 5.4. Jedan ciklus pomaka translacijskog hibridnog koračnog motora [3] .....                        | 19 |
| Slika 5.5. Desetopolni petofazni koračni motor[6].....   | 21 |
| Slika 6.1.Dvofazni indukcijski motor [3] .....   | 22 |
| Slika 6.2. Smjer magnetskog polja Nakanova motora za kuteve $\theta$ i $\theta + \Delta\theta$ [3] ..... | 23 |
| Slika 7.1. Blok prikaz koračnog motora [13].....   | 24 |
| Slika 7.2. Simulink model hibridnog koračnog motora u MATLABu.....                                       | 25 |
| Slika 7.3. Simulink model upravljačkog kruga[13].....  | 26 |
| Slika 7.4. Izlazni signali iz bloka Signail Builder.....   | 26 |
| Slika 7.5. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora bez opterećenja.....                      | 27 |
| Slika 7.6. Detaljni valni oblici .....   | 28 |
| Slika 7.7. Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora za opterećenje 0,1 Nm .....               | 28 |
| Slika 7.8. Prijelazne karakteristike hibrifnog koračnog motora za opterećenje od 0,4 Nm .....            | 29 |
| Slika 7.9.Prijelazne karakteristike hibridnog koračnog motora za 150 koraka/sekundi .....                | 29 |
| Slika 8.1. Primjer koračnih motora u 3D printeru [12] .....  | 31 |
| Slika 8.2. Rotor zubčanika okružen magnetskim zavojnicama/ Koračni motor [12] .....                      | 33 |

## POPIS TABLICA

|  |    |
|--|----|
| Tablica 4.1. Način pobuđivanja faza statora[3].....  | 8  |
| Tablica 4.2. Način pobude trofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora [3] .....                              | 9  |
| Tablica 4.3. Način pobude trofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora pri okretanju koracima od 60 [3] ..... | 10 |
| Tablica 4.4. Način pobude trofaznog permanentnomagnetskog koračnog motora pri okretanju koracima od 30°[3].....  | 10 |
| Tablica 5.1. Pobuđivanje faza trofaznog varijabilnoreluktancijskog koračnog motora [7].....                      | 12 |
| Tablica 5.2. Pobuđivanje faza četverofaznog varijabilnoreluktancijskog koračnog [3] .....                        | 13 |
| Tablica 6.1. Redosljed ukapčanja faza za lijevo i desno gibanje translatora [3] .....                            | 20 |

## SAŽETAK

U ovom završnom radu prvo je opisan razvoj koračnog motora kroz povijest. Opisane su različite vrste koračnih motora kao i njihove podvrste. Radi boljeg razumijevanja analizirana je simulacija prijelaznih karakteristika hibridnog koračnog motora u različitim režimima rada: bez opterećenja, nazivnog opterećenja i preopterećenja gdje su detaljno predstavljene njihovi valni oblici.

Nakon toga je predstavljena njegova velika primjena u raznim sverama industrije i aplikacija koje zahtijevaju preciznu kontrolu pomaka. Navedeni su različiti načini upravljanja te je opisan njegov princip rada. Na samom kraju su navedene neke od prednosti i nedostataka koračnog motora.

Ključne riječi:

Koračni motor, permanentnomagnetski, varijabilnoreluktancijski, hibridni, korak, polukorak, mikrokorak, reaktancija, namot, rezolucija, upravljanje



## **ABSTRACT**

In this final paper, the development of the stepper motor through history is first described. Different types of stepper motors and their subtypes are described. For a better understanding, the simulation of the transient characteristics of the hybrid stepper motor was analyzed in different operating modes: no load, nominal load, and overload, where their waveforms are presented in detail.

After that, its large application in various areas of industry and applications that require precise displacement control is presented. Different modes of management are listed and its working principle is described. At the very end, some of the advantages and disadvantages of the stepper motor are listed.

Keywords:

Stepper motor, permanent magnet, variable reluctance, hybrid, step, half step, micro-step, reactance, winding, resolution, control