

# LINEARNI MOTORI

---

**Mačešić, Mirko**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

*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:200:220544>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-09-09**

*Repository / Repozitorij:*

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



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU**

**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I**

**INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni studij**

**LINEARNI MOTORI**

**Završni rad**

**Mirko Mačešić**

**Osijek, 2021.**

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK

Obrazac Z1P - Obrazac za ocjenu završnog rada na preddiplomskom sveučilišnom studiju

Osijek, 17.09.2021.

Odboru za završne i diplomske ispite

**Prijedlog ocjene završnog rada na  
preddiplomskom sveučilišnom studiju**

<b>Ime i prezime studenta:</b>	Mirko Mačešić
<b>Studij, smjer:</b>	Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija
<b>Mat. br. studenta, godina upisa:</b>	4544, 24.07.2018.
<b>OIB studenta:</b>	46388824485
<b>Mentor:</b>	Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil
<b>Sumentor:</b>	
<b>Sumentor iz tvrtke:</b>	
<b>Naslov završnog rada:</b>	Linearni motori
<b>Znanstvena grana rada:</b>	<b>Elektrostrojarstvo (zn. polje elektrotehnika)</b>
<b>Predložena ocjena završnog rada:</b>	Izvrstan (5)
<b>Kratko obrazloženje ocjene prema Kriterijima za ocjenjivanje završnih i diplomskih radova:</b>	Primjena znanja stečenih na fakultetu: 3 bod/boda Postignuti rezultati u odnosu na složenost zadatka: 3 bod/boda Jasnoća pismenog izražavanja: 2 bod/boda Razina samostalnosti: 2 razina
<b>Datum prijedloga ocjene mentora:</b>	17.09.2021.
<b>Datum potvrde ocjene Odbora:</b>	22.09.2021.
<b>Potpis mentora za predaju konačne verzije rada u Studentsku službu pri završetku studija:</b>	Potpis: Datum:

**FERIT**FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA  
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**IZJAVA O ORIGINALNOSTI RADA**

Osijek, 29.09.2021.

**Ime i prezime studenta:**

Mirko Mačešić

**Studij:**

Preddiplomski sveučilišni studij Elektrotehnika i informacijska tehnologija

**Mat. br. studenta, godina upisa:**

4544, 24.07.2018.

**Turnitin podudaranje [%]:**

8%

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Linearni motori**

izrađen pod vodstvom mentora Doc. dr. sc. Vedrana Jerković Štil

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis studenta:

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
1.1 Zadatak završnog rada .....	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME .....	2
3. OSNOVNI FIZIČKI ZAKONI LINEARNIH MOTORA .....	3
3.1. Magnetski krug .....	4
3.2. Magnetski tok, gustoća magnetskog toka i jakost magnetskog polja .....	5
3.3 Magnetska sila .....	6
3.4. Hallov efekt .....	7
4. IZRAVNI POGONI .....	9
5. LINEARNI MOTORI .....	11
5.1. Tipovi linearnih motora .....	12
5.2. Cilindrični linearni motori .....	13
5.3. U-kanalni linearni motori .....	14
5.4. Bez utora, bez željezne jezgre ravni linearni motor .....	15
5.5. Ravni linearni motori bez utora .....	15
5.6. Ravni linearni motori bez željezne jezgre .....	16
5.7. Ravni linearni motori sa željeznom jezgrom .....	17
5.8. Linearni bezkolektorski istosmjerni motori .....	18
5.9. Linearni asinkroni motori .....	19
5.10. Sinkroni linearni motori .....	19
6. UPRAVLJANJE LINEARNIM MOTORIMA .....	21

6.1. Servo upravljanje i kontrola .....	21
6.2. Komutacija linearnih motora .....	23
7. PRIMJENE LINEARNIH MOTORA.....	25
7.1. Primjene linearnih motora u prijevozu .....	25
7.2. Primjene linearnih motora u industriji.....	27
7.3. Primjene linearnih motora u dizalima .....	28
8. ZAKLJUČAK .....	30
LITERATURA.....	31
SAŽETAK.....	32
ABSTRACT .....	33
ŽIVOTOPIS .....	34

# 1.UVOD

U ovom radu detaljno će se opisati linearni motori, njihova konstrukcija te fizikalni zakoni vezani uz njih koji su važni za razumijevanje rada linearnih motora. Problem kod linearnih motora je što nisu toliko rasprostranjeni kao klasični motori te su tek krenuli razvijati 1960.-ih godina u kombinaciji sa energetsom elektronikom koja je zaslužna za upravljanje linearnim motorima. Linearni motori imaju puno podvrsta od kojih svaka ima svoje prednosti i mane te svoje mjesto u primjeni. Važno je raspoznati kada koju verziju linearnog motora treba primijeniti za dobivanje optimalnih rezultata. Prednosti linearnih motora su broje. Neke od njih su ekonomičnost, manjak buke te niska potrošnja energije. Na samom početku rada opisuju se fizikalni zakoni važni za razumijevanje i rad linearnih motora. Nakon toga opisuje se građa linearnoga motora te se nabrajaju sve podvrste linearnih motora. Opisuju se prednosti i mane pojedinih podvrsta linearnih motora. Također se detaljno opisuje proces upravljanja linearnim motorima te proces komutacije linearnog motora. Na kraju rada su opisane primjene linearnih motora u svrhe prijevoza, industrije te dizala sa linearnim motorima.

## 1.1 Zadatak završnog rada

Svrha ovog završnog rada je navesti vrste i izvedbe linearnih motora. Opisati način rada pojedine vrste linearnih motora te njihove prednosti i mane. Dati primjere primjene za svaku vrstu linearnih motora.

## 2. PREGLED PODRUČJA TEME

Završni rad temelji se na opisivanju linearnih motora te njegovih izvedbi. Sa strane primjene promatraju se moderni tehnološki napredci koju omogućavaju širu uporabu svih vrsta linearnih motora. Ti tehnološki napredci odnose se na dodavanje sklopova energetske elektronike, povećavanje učinkovitosti, smanjivanje mase motora itd.

Referenca [1] odnosi se na beskolektorske linearne motore i njihov način rada. Beskolektorski motori koriste permanentne magnete umjesto uzbudnoga namota kako bi se stvorilo potrebno magnetsko polje. Dok klasični istosmjerni motori koriste mehanički komutator beskolektorski imaju elektronički komutator.

Referenca [2] opisuje primjenu levitacije linearnih motora. Levitacija se primarno koristi u svrhe transporta. Odbojnom silom između magneta moguće je ostvariti levitaciju. Ideja korištenja levitacije u svrhe prijevoza postoji još od 1912. ali je odbačena zbog velike energetske zahtjevnosti.

U knjizi [3] razrađuju se linearni sinkroni motori. Magnetsko polje linearnih sinkronih motora generira se elektronički upravljanim napajanjem zavojnica i nizom različitih magnetskih polova. Postoje dvije vrste linearnih sinkronih motora a to su linearni preklopni reluktantni motori i linearni koračni motori.

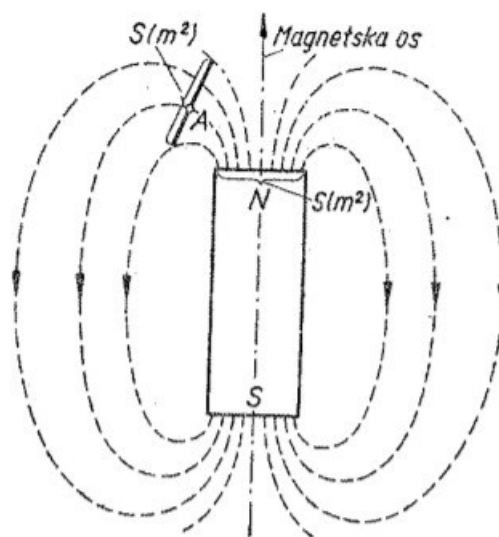
Autori dokumenta [4] objašnjavaju sve vrste i podvrste linearnih motora kao i proces komutacije. Navode se prednosti svih vrsta kao i mane. Linearni motori dolaze u više oblika a to su valjkasti, U-kanalni i ravni. Neke od prednosti su visoka akceleracija, mala potreba za održavanjem te visoka preciznost.

Autor znanstvenog rada [5] razrađuje primjenu pojedinih vrsta linearnih motora u prijevozu. Linearni motori dijele se na istosmjerno napajane te izmjenično napajane. Linearni istosmjerni motori nisu prikladni za uporabu u prijevozu zbog niske energetske učinkovitosti te potrebe za čestim održavanjem. Linearni asinkroni motori najčešće se koriste zbog visoke učinkovitosti te prihvatljive preciznosti.



### 3.OSNOVNI FIZIČKI ZAKONI LINEARNIH MOTORA

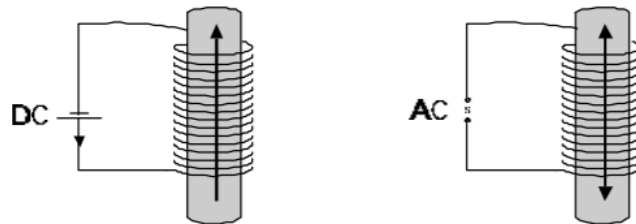
Princip na kojem rade svi motori uključuje privlačnu silu između magneta i željeznog objekta. Elektromagnetizam je pojava magnetskoga polja izazvana promjenom električnoga polja, odnosno tokom električne struje [6]. Električno i magnetsko polje usko su povezani te svaka promjena jednog polja izaziva promjenu drugog, pa se zato shvaćaju kao jedinstveno elektromagnetsko polje. Znamo da magnet utječe na druge magnete u neposrednoj blizini. Linije koje točno pokazuju kako djeluje magnetska sila na pojedinim dijelovima prostora nazivaju se silnicama magnetskoga polja. Jakost sile na svakom mjestu polja pokazuje gustoća magnetskih silnica. Silnice su najgušće na polovima magneta te je samim time i sila tamo najjača. Dva magneta sa magnetskim tokovima  $\Phi_1$  i  $\Phi_2$  svojim magnetskim polovima djeluju jedan na drugog prema pravilu da se istoimeni polovi odbijaju, a raznoimeni privlače.



Slika 3.1. Magnetske silnice permanentnog magneta [6]

Linearni motor moment dobiva od sličnih magnetskih potisaka. Permanentni magneti su magneti su feromagnetične tvari koje imaju svojstvo remanentnog magnetizma. Ako ih se dovede u magnetsko polje i zatim djelovanje polja ukloni, njihova magnetiziranost ne iščezne. Osim permanentnih magneta također postoje i elektromagneti. U elektromagnetima varijacija magnetskih polova je moguća korištenjem promjenjive struje kako bi se omogućilo mijenjanje jakosti polja ili promjena orijentacije magnetskog polja. Poznato je da se žice namotane oko jezgre ponašaju kao magneti dok provode struju. Stvorena magnetska sila ovisi o: jakosti struje,

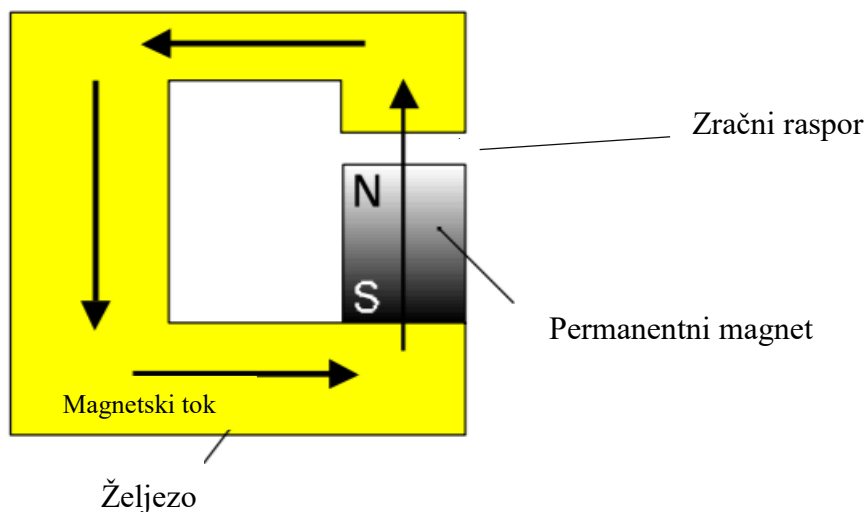
broju namota, tipu materijala jezgre. Obično se radi o željeznoj jezgri pošto ima dobra svojstva za provođenje magnetskih silnica te se sama jezgra može smatrati magnetom. U slučaju djelovanja istosmjerne struje jezgra se ponaša kao permanentni magnet dok kod izmjenične struje dolazi do promjene magnetskih polova te samim time se stvara promjenjivo magnetsko polje.



Slika 3.2. Prikaz konstantnog (DC) i promjenjivog (AC) magnetskog polja [7]

### 3.1. Magnetski krug

Sa fizikalnog stajališta magnetski krug je vrlo sličan električnom. Ovdje je prikazan primjer jednostavnog magnetskog kruga. Sastoji se od željezne jezgre, zračnog raspora te permanentnog magneta [1].



Slika 3.3. Elementarni magnetski krug [7]

Što se fizikalnih svojstava tiče magnetski tok je identičan električnoj struji u ovoj usporedbi gdje se gustoća magnetskog polja može gledati isto kao gustoća struje . U promatranom krugu željezo u jezgri ima vrlo mali otpor i može se gledati kao magnetski vodič. Za razliku od električnih bakrenih vodiča željezo pokazuje svojstvo zasićenja. Zasićenje se pojavljuje na određenoj vrijednosti gustoće magnetskog toka. Nakon što se ta vrijednost dosegne magnetski otpor željeza ubrzano raste.

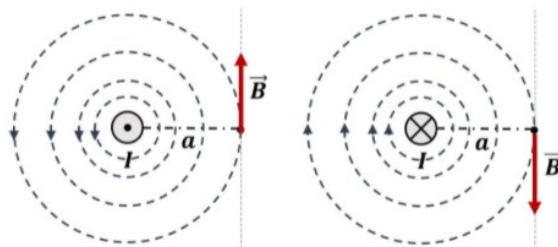
### 3.2. Magnetski tok, gustoća magnetskog toka i jakost magnetskog polja

Skup linija polja koje prolaze kroz neku plohu naziva se općenito tok polja kroz tu plohu, pa se tako i u magnetskom polju ukupni broj silnica kroz zadanu plohu zove magnetski tok. Simbol magnetskog toka je  $\Phi$  sa mjernom jedinicom u weberima , koji je ekvivalentan volt-sekundama [6]. Jedan nedostatak korištenja linija za prikaz magnetskog toka je da nam govori da magnetsko polje postoji samo tamo gdje se javljaju silnice. Ali postoje i brojne druge nedefinirane linije. Bolja metoda bila bi da shvatimo da stvarno polje nije ograničeno linijama nego su rasprostranjene kroz cijeli prostor. Magnetsko polje se općenito opisuje gustoćom magnetskog toka čija je mjerna jedinica tesla. Važno je imati na umu da je gustoća magnetskog toka vektorska veličina jer ima i smjer i iznos. Posljednja veličina magnetskog polja je jakost magnetskog polja čija je mjerna jedinica amper po metru .

$$H = \frac{1}{\mu} * B \quad (3.1.)$$

Magnetska permeabilnost je fizikalna veličina koja opisuje magnetsku propusnost tvari. Većina materijala ima permeabilnost otprilike jednaku onoj slobodnog prostora (zraka). Međutim, neki materijali, poput željeza i spojeva na bazi željeza, imaju puno veću permeabilnost nego zrak. Relativna permeabilnost je bezdimenzionalni broj koji samo pokazuje koliko će se puta uz iste prilike povećati tok  $\Phi$  ako se umjesto u vakuumu magnetski tok stvara u promatranom materijalu [6]. Vrijednost relativne permeabilnosti dobivamo kao količnik magnetske permeabilnosti i magnetske permeabilnosti vakuuma .

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (3.2.)$$



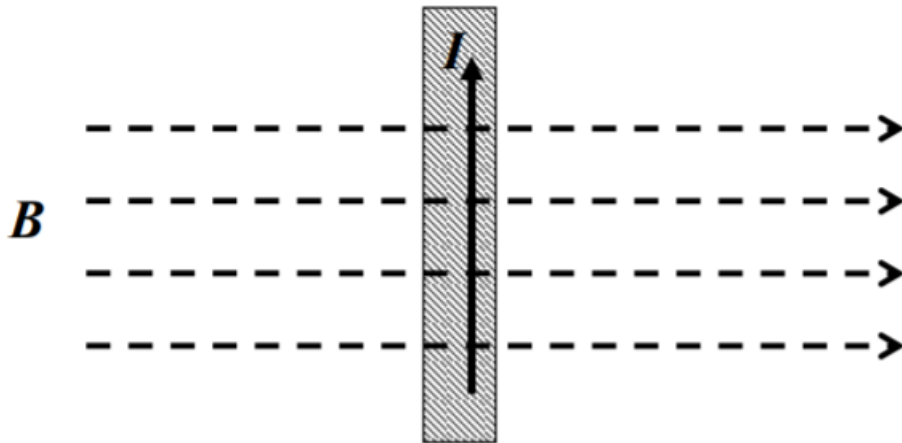
Slika 3.4. Magnetsko polje ravnog vodiča [7]

### 3.3 Magnetska sila

Stvaranje sile međusobnim djelovanjem dviju struja naziva se elektrodinamičko djelovanje, a smjer tako stvorene sile može se saznati bilo pomoću pravila lijeve ruke, bilo korištenjem vektorske jednadžbe za određivanje vektora  $F$  [6]. Magnetska sila je opisana Lorentzovim zakonom o silama. Promotrimo ravnu žicu koja provodi struju. Ako je žica smještena u jednoliko magnetsko polje žica će biti podvrgnuta magnetskoj sili koja je jednaka :

$$\vec{F}_d = I * (\vec{L} \times \vec{B}) \quad (3.3.)$$

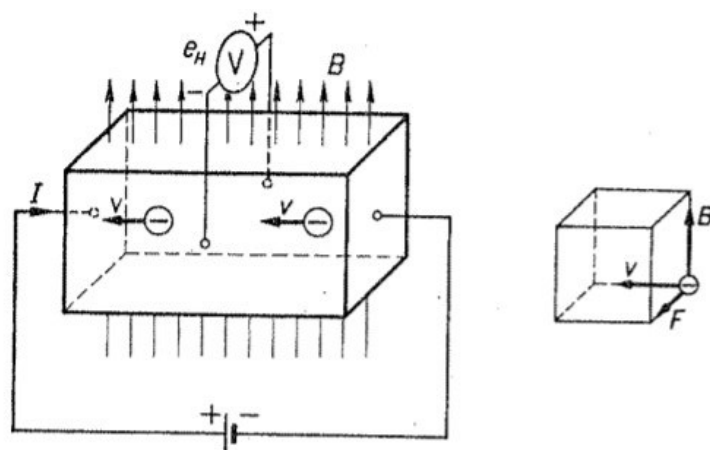
Jednadžba govori da je razvijena sila maksimalna kada je kut između vektora duljine žice i vektora magnetskog polja 90 stupnjeva a sila je jednaka nuli kada su magnetsko polje i vodič međusobno paralelni.



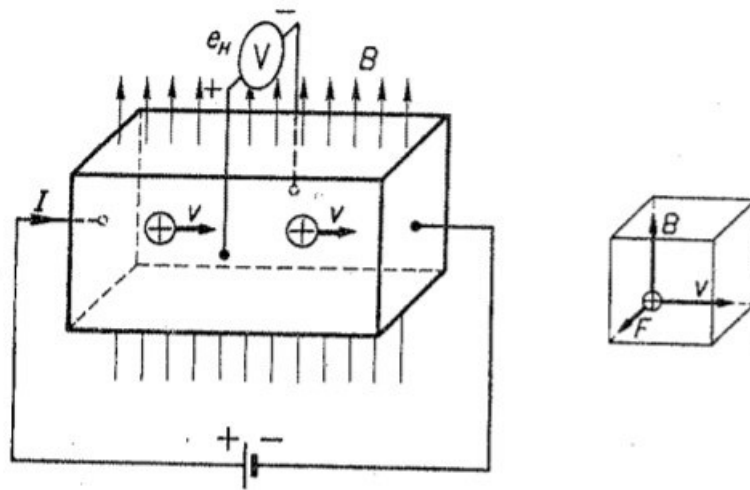
Slika 3.5. Vodič protjecan strujom u magnetskom polju [6]

### 3.4. Hallov efekt

Stavimo li pločicu izrađenu od poluvodiča ili vodiča protjecanu strujom u magnetsko polje pojavit će se na ploči napon koji djeluje okomito na ravninu što je čini smjer struje i magnetskog polja. Ova pojava naziva se Hallov efekt, a stvoreni napon Hallov napon [8]. Pojava Hallova napona objašnjava se stvaranjem sila na električne naboje koji se pomiču u magnetskom polju, smo je ovdje to gibanje naboja ostvareno električnom strujom iz nekog vanjskog izvora. Struja pri tome može nastati gibanjem pozitivnih ili negativnih električnih naboja.



Slika 3.6. Stvaranje Hallovog napona pri protjecanju negativnih električnih naboja [8]



Slika 3.7. Stvaranje Hallovo napona pri protjecanju negativnih električnih naboja [8]

## 4. IZRAVNI POGONI

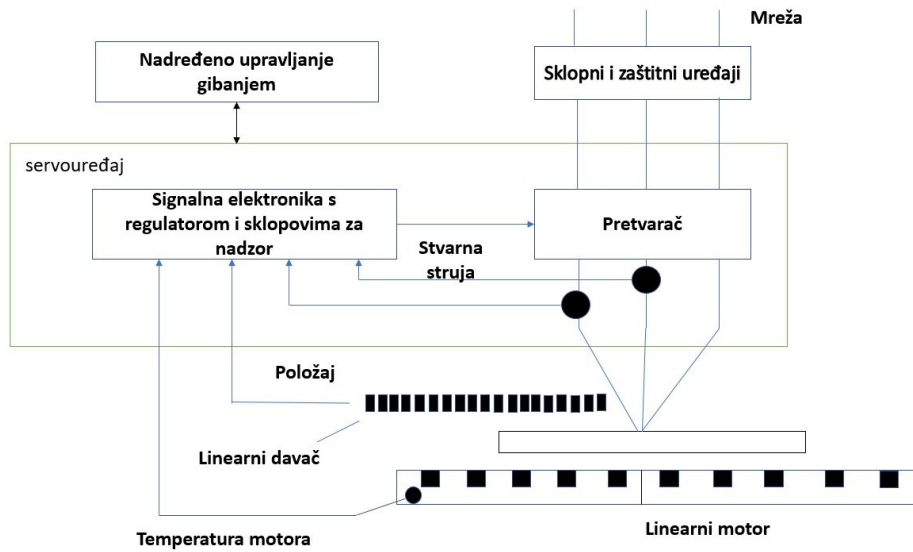
Veliki broj električnih pogona ima prijenosnik. Prijenosnik može imati dvije različite funkcije. Prva je da se njime prilagođava brzina vrtnje i okretni moment motora prema potrebama pogona dok je druga da se mijenja rotacijsko gibanje motora u linearno gibanje. Na slici 4.1. nalazi se planetarni prijenosnik koji odlikuje malim dimenzijama te velikim prijenosnim omjerom. Planetarni prijenos je vrsta zupčaničkog prijenosa gdje se mehanički prijenos ostvaruje tako da barem jedan planetarni član se osim vlastite osi, rotira oko još jedne osi [9]. Proces transformacije u prijenosniku nije idealan. Ograničena krutost uzrokovana zazorom između zupčanika sprječava idealnu transformaciju veličina gibanja. Primjeri prijenosnika su pužni prijenos te ekscentar.



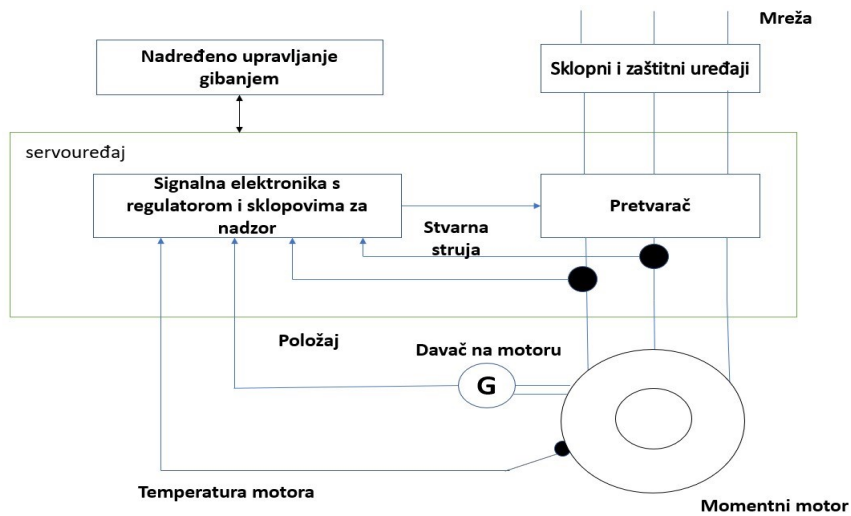
Slika 4.1. Prijenosnik za servo motor [10]

U novije doba izbjegava se uporaba prijenosnika te se motorima izravno daju zahtijevane veličine gibanja. Takva vrsta pogona se naziva “izravnim pogonima“. Postoje dvije glavne vrste izravnih pogona [11]. Prvi su pogoni sa linearnim motorima. Oni bez posrednika proizvode linearno gibanje to jest nemaju pretvornik koji rotacijsko gibanje pretvara u linearno. Drugi su pogoni sa momentnim motorima. Kod njih je specifično što pri malim brzinama vrtnje daju veliki okretni moment. Prijenosnik se može izostaviti jer se velika brzina vrtnje

konvencionalnih motora može reducirati na manju brzinu vrtnje. Izravni pogoni su relativno skupi te je njihova primjena ograničena samo na pogone u kojima su prednosti stvarno potrebne.



4.2. Struktura servopogona s linearnim motorom [11]

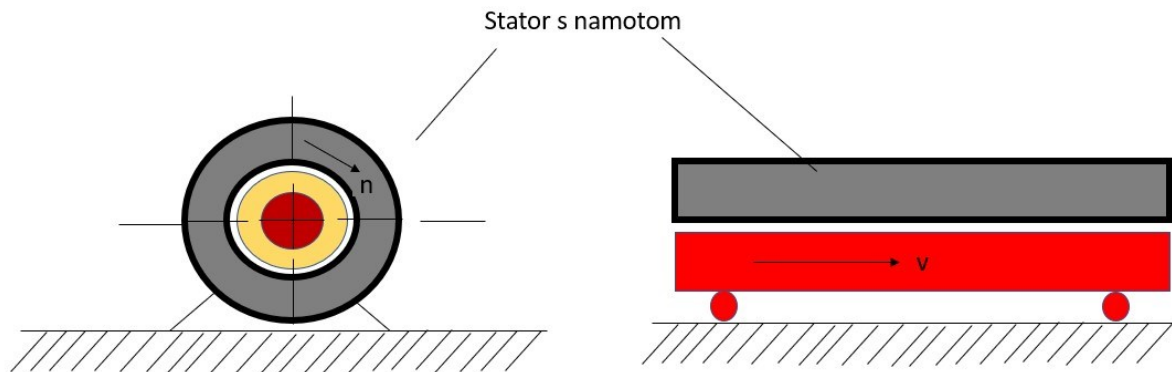


Slika 4.3. Struktura servopogona s momentnim motorom [11]



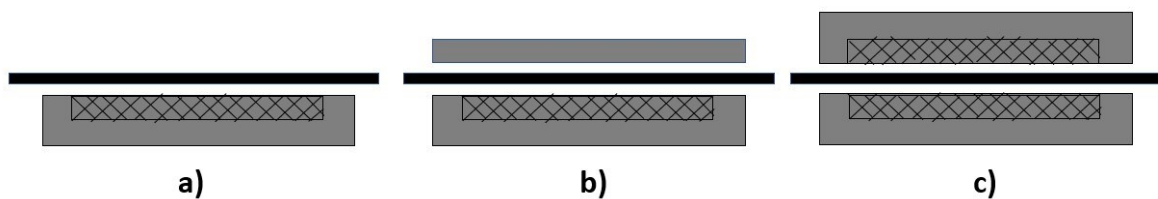
## 5. LINEARNI MOTORI

U mnogim pogonima potrebno pravocrtno gibanje postiže se primjenom rotacijskih motora pomoću prijenosnika. Linearni motor ostvaruje pravocrtno gibanje bez ikakvih dodataka. Prednosti linearnih motora su manji gubici, niža cijena održavanja te manjak buke.



Slika 5.1. Prikaz nastanka linearnog motora iz asinkronog [10]

Linearni motori pretvaraju energiju po istim načelima kao i odgovarajući rotacijski strojevi. Razlikuju se primarni i sekundarni dio te svaki od njih može biti pomičan. U namotima primara proizvodi se potrebna energija. Zamisli li se stator i rotor uzdužno presječen i razvijen u ravninu, gibanje rotora prema statoru pretvara se u pravocrtno gibanje te tako nastaje linearni motor. Linearni motor koji radi na asinkronom principu ima u primarnom dijelu namot s polnim korakom  $\tau_p$ , a sekundarni dio je električki vodljiv [11]. Najčešće je riječ o aluminijskoj ili bakrenoj tračnici. Na slici 5.2. (b) moguće je na drugoj strani sekundara staviti feromagnetski jaram za zatvaranje magnetskog kruga.



Slika 5.2 Različiti rasporedi primara i sekundara linearnog motora [12]

Struje kroz primarne svitke napajane međusobno fazno pomaknutim izmjeničnim naponima stvaraju linearno putujuće magnetsko polje koje tijekom jedne pune periode izmjeničnog napona prijeđe put  $x$  dvostrukog polnog korak ( $x=2\tau_p$ ) pa je kod frekvencije  $f$  brzina pravocrtno gibajućeg polja:

$$V_s = 2t f_s [m/sek] \quad (5.1.)$$

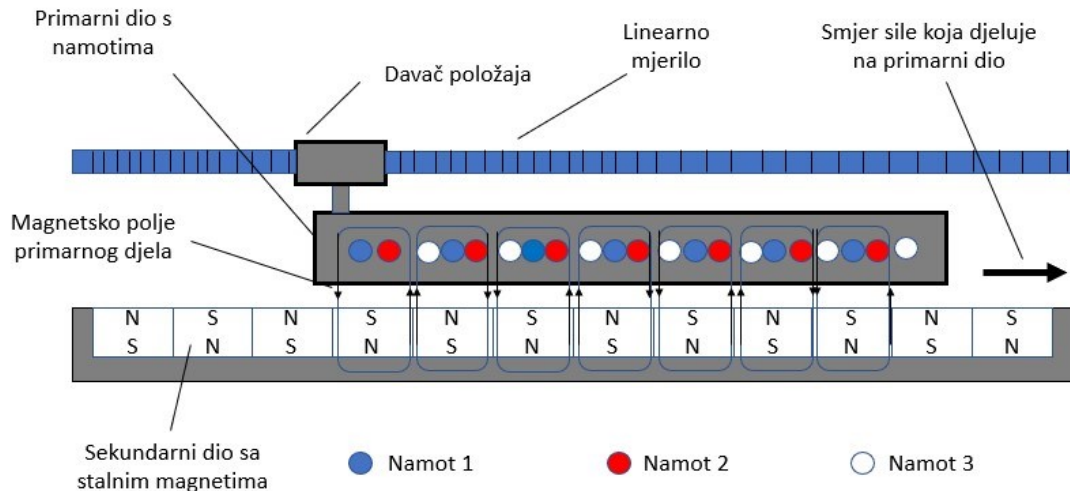
Putujuće magnetsko polje pobudi u vodljivom sekundaru vrtložne struje, a na njih po Lenzovom zakonu djeluje sila u smjeru putujućeg polja. Klizanje je jednako relativnoj razlici sinkrone brzine polja  $V_s$  i stvarne brzine  $V$  sekundara prema primaru i veća je nego kod rotacijskih motora.

$$s = \frac{V_s - V}{V_s} \quad (5.2.)$$

## 5.1. Tipovi linearnih motora

Postoji puno vrsta linearnih motora. Svaka vrste ima svoje jedinstvene prednosti za krajnjeg korisnika. Najčešće vrste su cilindrični, U-kanalni te ravni linearni motori. Svaka vrsta motora se može nabaviti u obliku kompletnih motora ili u obliku pojedinačnih komponenti. U-kanalni i ravni linearni motori će zahtijevati integrirani sustav dok će se kod cilindričnog tipa moći birati te mijenjati komponente. Komponente mogu biti zavojnice motora, magnetske tračnice, podnožja, pokretači itd. Za skup zavojnica se koristi naziv pokretač ili rjeđe primarni element dok se magnetska staza naziva sekundarnim elementom. Pokretač se najčešće sastoji od zavojnica motora te ploče za pričvršćivanje ili montažne šipke. Ovisno o vrsti linearnih motora magnetska traka može biti jednostrana ili dvostrana gdje dvostrana nudi uravnoteženu raspodjelu privlačne snage. Cjelokupni linearni motorni sustav se uobičajeno sastoji od komponenata motora, podnožja, ležajeva te kabela [11]. Odabirom linearnih komponenata korisnik ima opciju ekonomičnog rješenja te fleksibilnost s obzirom na integraciju u stroj. Taj način zahtijeva visok stupanj razumijevanja i specifičnog znanja od strane proizvođača stroja u koji će komponenta linearnog motora biti ugrađena. Inženjer koji projektira stroj mora razumjeti karakteristike motora, metode hlađenja, rad servo pojačala te kontrole sustava. Odabirom cjelokupnih ili integriranih linearnih sustava inženjer dobiva unaprijed projektiran sustav. To uklanja probleme oko projektiranja, usklađivanja ležajeva, davača topline, kabela

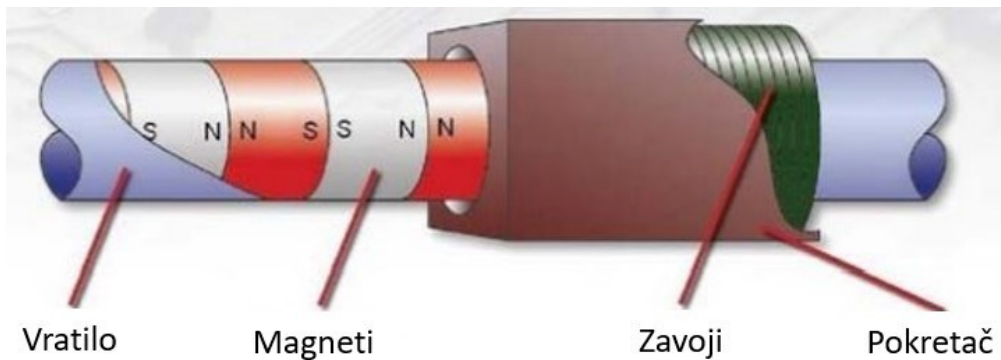
itd. Pojačivači linearnih sustava se mogu podijeliti u dvije skupine: pulsno kodno modulirani te linearni. Oba zahtijevaju komutaciju kako bi dopremili struju do motora. Pulsno kodni pojačivač koristi visoko frekvencijske sklopke da bi prisilio struju u motor dok linearni pojačivači koriste jednostavniji dinamični analogni upravljač.



Slika 5.3. Konstrukcija linearnog motora [12]

## 5.2. Cilindrični linearni motori

Kod cilindričnih linearnih motora pokretač je cilindričnog oblika te se pomiče prema gore te prema dolje po cilindričnom vratilu unutar kojega se nalaze magneti. Ovi motori su jedni od prvih koji su došli u široku uporabu ali nisu prostorno ekonomični kao ravni i U-kanalni modeli [12]. Magnetski krug pomičnog cilindričnog magneta je sličan onome od pomičnog magnetskog aktuatora. Razlika je u tome što ima više zavoja koji služe za povećanje hoda. Pokretač je cilindričan i pomiče se gore-dolje po magnetskom vratilu. Magnetsko vratilo nije primjereno za magnetske krugove u kojima dolazi do “curenja magnetskog polja“. Velika mana kod cilindričnih motora je vidljiva kada se poveća duljina hoda. Zbog toga što je motor potpuno okrugao, jedino mjesto potpore se nalazi na krajevima. To znači da će uvijek postojati maksimalna duljina prije nego li otklon vratila uzrokuje dodir magneta sa pokretačem.



Slika 5.4. Cilindrični linearni motor s kružnim magnetima na vratilu [12]

### 5.3. U-kanalni linearni motori

U-kanalni linearni motor sadrži dvije paralelne magnetske trake okrenute jedna prema drugoj sa pokretačem između njih. Polaritet dviju magnetskih traka okrenutih jedna prema drugoj je suprotan te su magneti u istom redu posloženi tako da imaju također suprotni polaritet [13]. Pokretač je u magnetskoj traci oslonjen na ležajeve. Pokretači nemaju magnetsku jezgru te samim time ne postoji privlačna sila između pokretača i magnetske trake dok se magnetska sila paralelnih ploča koje djeluju na pokretač međusobno poništavaju. Izostanak željezne jezgre znači da će ukupna masa biti manja a to će omogućiti veću akceleraciju sustava. Izostanak željeza također dodatno smanjuje privlačne sile. Primjenom “zračne jezgre” možemo dobiti bolje performanse. Za razliku od cilindričnog modela U- model je puno bolji sa stajališta “curenja magnetskoga polja” zbog toga što su magneti okrenuti jedan prema drugom te su položeni u kanal. Kanal kao što ime kaže ima oblik slova U. Takav raspored također smanjuje šansu za ozljeđivanje prstiju prilikom rada sa motorom. Zbog oblika magnetske trake jednostavno se može produljiti duljina hoda spajanjem jednog kanala na drugi.



Slika 5.5. U-kanalni linearni motor [13]

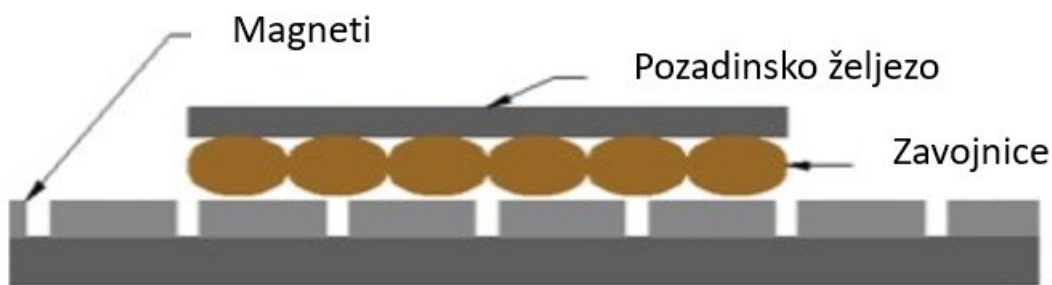
#### **5.4. Bez utora, bez željezne jezgre ravni linearni motor**

Ovakav tip motora konstruiran je u obliku serije zavoja namotanih na aluminijsku bazu. Zbog izostanka željezne jezgre u pokretaču na motor ne djeluju nikakve privlačne sile isto kao i sa U-kanalnim motorom. Glavna prednost kod ovih motora je preciznost u usporedbi sa ostalim linearnim motorima [13]. Razlog velike preciznosti je izostanak privlačne sile. Pokretači se montiraju iznad ili sa strana ovisno o namjeni motora. Od svih ravnih linearnih motora ova vrsta stvara najmanju silu.

#### **5.5. Ravni linearni motori bez utora**

Ravni linearni motor bez utora ima sličnu konstrukciju kao bez utorni, bez željezni ravni linearni motor sa jedinom razlikom što su zavojnice montirane na željeznu laminaciju te onda na aluminijsku bazu. Željezna laminacija se koristi kako bi se usmjerilo magnetsko polje te samim time povećala sila [13]. Zbog prisutnosti željezne laminacije u pokretaču sada postoji privlačna sila između pokretača i trake po kojoj se kreće koja je proporcionalna sili proizvedenoj od strane motora. Zavojnice se nalaze ispod "stražnjeg željeza". U motorima bez utora pokretač nema željeznih nazubljenih pločica. Ovaj tip se može smatrati hibridom između motora sa željeznom jezgrom i bez željezne jezgre. Također treba paziti kod spajanja pokretača sa magnetskom trakom jer će se međusobno privlačiti. Ta međusobna privlačna sila može rezultirati ozljedom ako se pristupi sa manjkom opreza. Također ova vrsta ravnih linearnih

motora proizvodi veću silu nego verzija bez utora, bez željezne jezgre. Neke od prednosti ove vrste ravnih linearnih motora su: jedan red magneta, niža cijena (u usporedbi sa verzijom bez željeza), bolje odvođenje topline (u usporedbi sa verzijom bez željeza), veća proizvodnja sile (u usporedbi sa verzijom bez željeza), manja težina (u usporedbi sa verzijom sa željezom), manje privlačne sile (u usporedbi sa verzijom sa željezom) što produljuje vijek trajanja ležajeva, manje zupčanika (u usporedbi sa verzijom sa željezom). Nedostatci su : postojanje privlačnih sila, vrlo mali zračni otvor što rezultira većim stvaranjem topline te manja učinkovitost radi stvaranja topline u usporedbi sa ostalim vrstama.

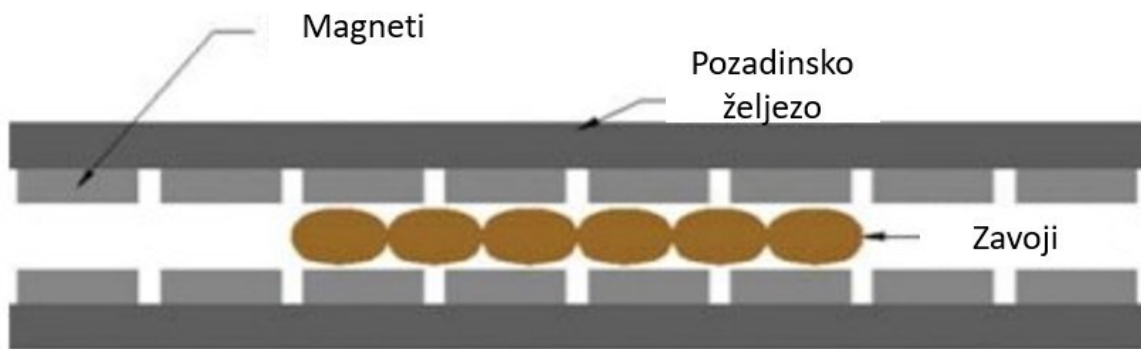


Slika 5.6. Ravni linearni motor bez utora [13]

## 5.6. Ravni linearni motori bez željezne jezgre

Motori bez željeza poznati su pod nazivom “ motori sa zračnom jezgrom“. Specifičnost ovog tipa ravnog linearnog motora je to što koristi dvostruki red magneta. U zračnom razmaku između dva reda magneta nalaze se bakreni namoti. Budući da su motori bez željeza između njih nema privlačnih sila. Dizajn bez željeza nema zupčanika a zbog manjka privlačne sile produljuje se vijek ležajeva. Pošto pokretač nema zavoje u željeznom sloju samim time ima manju masu. Rezultat toga je motor koji ima iznimno veliko ubrzanje i visoke dinamičke performanse [13]. Zbog manjka zupčanika smanjena je njegova toplinska učinkovitost u usporedbi sa verzijom koja ima željeznu jezgru. Mala kontaktna površina i dug toplinski put od baze namota do rashladne ploče umanjuju snagu ovih motora pri visokim opterećenjima. Osim toga, dvostruki red magneta povećava troškove motora. Prednosti motora bez željezne jezgre su: manjak privlačne sile (uravnoteženost između staza), vrhunska glatkoća zbog manjka zupčanika, pokretač ima malu masu ( veće ubrzanje i bolja mehanička svojstva) i jednostavno

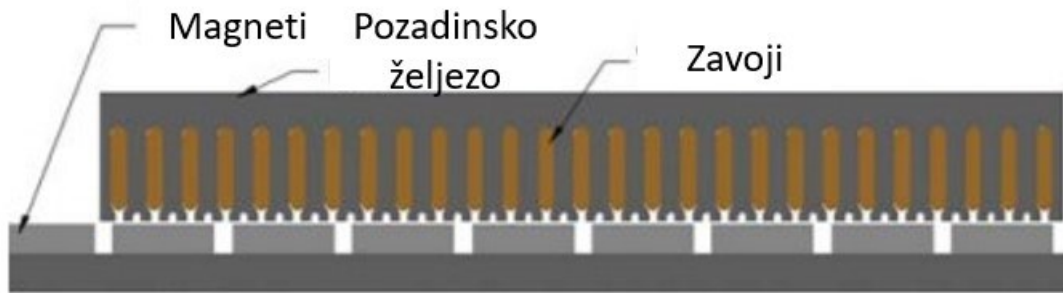
instaliranje. Nedostatci motora bez željezne jezgre: veći toplinski otpor, niža snaga u usporedbi sa verzijom koja ima željeznu jezgru te veći trošak zbog dvostrukog reda magneta.



Slika 5.7. Ravni linearni motor bez željezne jezgre [13]

### 5.7. Ravni linearni motori sa željeznom jezgrom

U ovoj izvedbi linearnih motora namoti su umetnuti u čelično kućište kako bi se stvorio skup jezgri međusobno poredanih jedna do druge. Željezna jezgra znatno povećava silu koju motor može generirati zbog koncentracije magnetskog polja stvorenog od strane zavoja. Stražnje željezo osigurava učinkovit put za magnetski tok i odvod topline između motora i magnetske tračnice. Postoji jaka privlačna sila između željezne jezgre i magnetske trake što se može iskoristiti kao pred naprezanje za zračni sustav. Verzija sa željeznom jezgrom omogućava stvaranje iznimno velike sile te učinkovitije hlađenje od ostalih verzija. Privlačna sila može biti 3 do 9 puta veća od korisne sile to jest sile linearnog smjera [13]. Ta sila mora biti poduprta izdržljivim ležajem motora te je zbog nje instalacija izazovnija nego kod ostalih vrsta linearnih motora. Zbog vrlo jake sile potrebno je koristiti sustav navođenja koji je vrlo precizan da bi održao potrebnu udaljenost između pokretnih dijelova i magneta. Ta udaljenost treba iznositi između 1.3 milimetra i 1.7 milimetara ovisno o proizvođaču motora. Ove sile mogu skratiti životni vijek motora. Još jedan nedostatak verzije sa željeznom jezgrom je prisutnost zupčanika. Prisutnost zupčanika ograničava glatkoću sustava kretanja jer proizvedenu silu motora mora mijenjati sa trenutnim položajem da bi se sila održavala konstantnom. Ovi motori su snažni i kompaktni ekonomski privlačni zbog toga što koriste samo jedan red magneta.



Slika 5.8. Ravni linearni motor sa željeznom jezgro [13]

## 5.8. Linearni bezkolektorski istosmjerni motori

Za razliku od konvencionalnih istosmjernih motora gdje je magnetski tok stvoren protjecanjem struje kroz uzbudne namote, što omogućuje mehanički komutator, beskolektorski motori koriste permanentne magnete kako bi se stvorilo potrebno magnetsko polje. Nedostatak mehaničkog komutatora je potreba za njegovu održavanje što uzrokuju potrošni materijali odnosno četkice motora. Rad motora uzrokuje mehaničko habanje četkica koje klize po kolektorskim pločicama te ih je vremenom potrebno zamijeniti [1]. Prednost istosmjernog motora je napajanje istosmjernom strujom, a za razliku od klasičnog istosmjernog motora umjesto mehaničkog koristi se elektronički komutator. Uz to preuzima i prednosti izmjeničnih motora poput jednostavne građe. Iako je motor napajan istosmjernom strujom, elektronički komutator stvara izmjenične signale kroz armaturne namote kako bi se stvorilo promjenjivo magnetsko polje. Elektronički komutator koristi Hallove senzore kako bi se omogućilo pravilno upravljanje armaturnim namotima. Hallovi senzori ovisno o položaju rotora detektiraju magnetsko polje te njegov polaritet te se prema tome određuje kroz koje će se namote propustiti struja tako da uzrokuje promjenjivo magnetsko polje potrebno za pokretanje rotora.



## 5.9. Linearni asinkroni motori

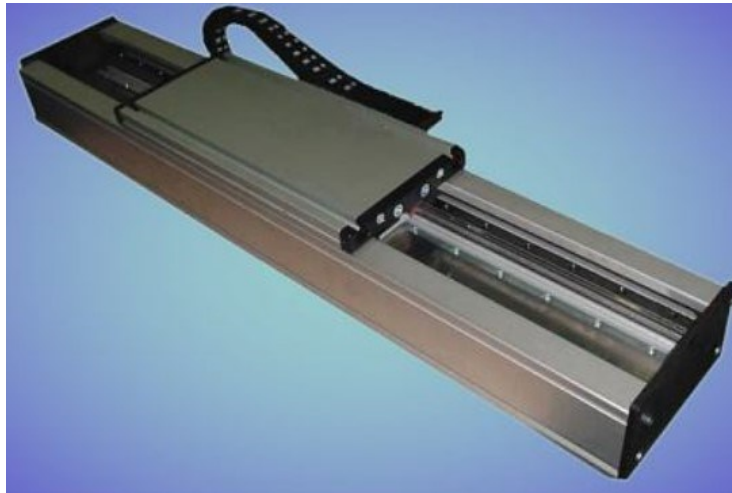
Linearni asinkroni motori imaju sličnu konstrukciju kao trofazni asinkroni motori ali nemaju isti izgled. Linearni asinkroni motori imaju konačnu duljinu primara ili sekundara, dok je kod konvencionalnih asinkronih motora stvorena petlja. Kada linearni asinkroni motor krenemo napajati, magnetsko polje krene putovati primarom. Ako je primar fiksiran a sekundar slobodan sila će povući sekundar prema sebi te će to rezultirati pravocrtnim gibanjem [8]. Osim pravocrtnog gibanja neki linearni asinkroni motori se koriste za stvaranje rotacijskog gibanja kod sustava velikih promjera gdje bi kontinuirani primar bio skup.



Slika 5.9. Linearni asinkroni motor [2]

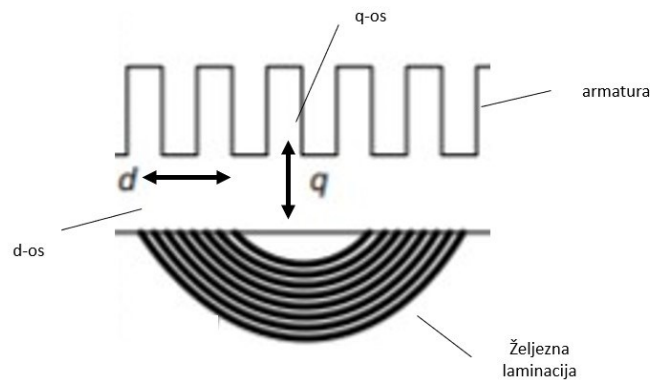
## 5.10. Sinkroni linearni motori

Sinkroni linearni motori su podvrsta linearnih motora u kojima je mehanička brzina jednaka brzini putujućeg magnetskoga polja. Magnetsko polje se generira elektronički upravljanim napajanjem zavojnicama i nizom različitih magnetskih polova N, S, N itd. Kod reluktantnih motora se koriste promjenjive feromagnetske tračnice umjesto magneta [3]. Dio motora koji proizvodi putujuće magnetsko polje se naziva pokretač dok se dio u kojem se nalazi magnetski tok naziva reakcijska tračnica. Na rad linearnog sinkronog motora ne utječe koji od ta dva dijela je pokretan a koji stacionaran. Linearni sinkroni motori sa elektronički upravljanim napajanjem zavojnica se dizajniraju kao linearni koračni motori ili linearni preklopni reluktantni motori.



Slika 5.10. Linearni sinkroni motor [3]

Linearni koračni motori imaju koncentrirano namotane armaturne namote na istaknutim polovima i magnetsku tračnicu sa promjenjivim magnetima. Koračni motori nemaju povratnu informaciju o položaju. Topologija linearnih preklopnih reluktantnih motora je slična onoj od linearnih koračnih motora ali su dodatno opremljeni sensorima pozicije. Linearni preklopnih reluktantni motori omogućavaju preciznu kontrolu brzine i pozicije čak i pri niskim brzinama te nisu dizajnerski ograničeni. Dizajnersko ograničenje linearnoga motora odnosi se na minimalnu brzinu koju motor može imati a svejedno zadržati preciznost. Linearni sinkroni motori mogu se izvesti kao: ravni ili ovalni, sa utorom ili bez utora, sa željeznom jezgrom ili sa zračnom jezgrom, sa transverzalnim ili longitudinalnim magnetskim tokom. Linearni reluktantni motor sadrži željeznu laminaciju kako bi se poboljšala njegova učinkovitost. Kako bi se postigla visoka propusnost na d-osi a niska propusnost na q-osi, željezna laminacija treba biti orijantirana tako da stvori visoku propusnost za d-osni magnetski tok.



Slika 5.11. Linearni reluktantni motor sa željeznom laminacijom[3]

## 6. UPRAVLJANJE LINEARNIM MOTORIMA

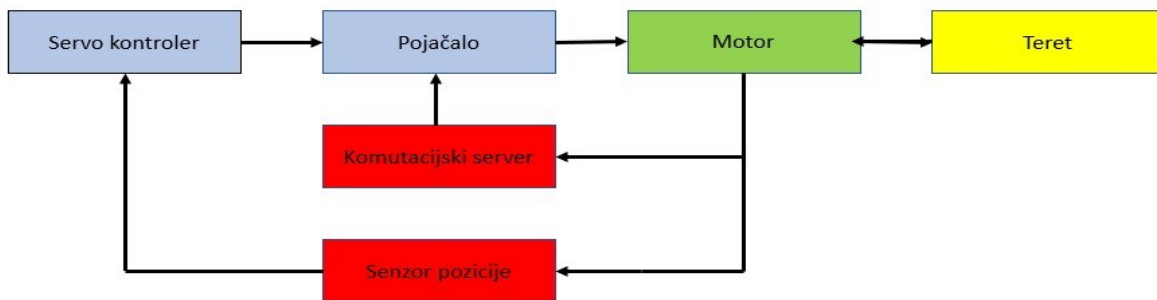
Bez obzira što linearni motorni sustav nema rotirajućih dijelova i dalje mu mora biti osigurana nekakva vrsta vodiča ili ležaja. Uobičajeno, linearni ležajevi moraju imati dugi životni vijek, niske troškove održavanja, krutost, nisku razinu buke te sposobnost podrške velike brzine i ubrzanja. Neki od tih ležajeva su: klizni ležajevi ( rad na suhom), hidrostatički ležajevi (rad u vlažnim prostorima), aerostatički ležajevi (zračni ležajevi), magnetski ležajevi. U praksi se najčešće koriste klizni, valjni i zračni ležajevi. Zračni ležajevi imaju najbolje performanse sa gotovo neograničenom maksimalnom brzinom i ubrzanjem te se primjenjuju u slučajevima kada je preciznost ekstremno bitna.



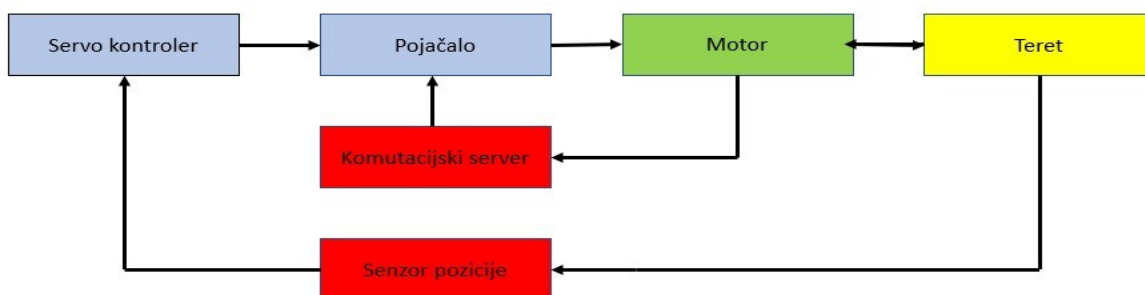
Slika 6.1. Sustav za pozicioniranje linearnog motora bez utora [14]

### 6.1. Servo upravljanje i kontrola

Iako linearni motori mogu ponuditi vrhunsku preciznost, ukupne performanse sustava će ovisiti o drugim komponentama. Jedna od tih komponenta je servo upravljač. Slika 6.2. prikazuje uobičajeni sustav za upravljanje servo motorima. Ta se struktura može primijeniti za linearne motore. Kvaliteta signala ( razlučivost i točnost ) te performanse servo kontrolera ( vrijeme uzrokovanja i upravljački algoritmi) od najveće su važnosti za određivanje stupnja pozicijske točnosti. Slika 6.3. prikazuje upravljanje servo motorom gdje se senzor pozicije nalazi kod tereta. Zbog blizine senzora teretu poboljšava se preciznost sustava. Jedan nedostatak je manjak prijenosnika pa je samim time utjecaj vanjskih sila puno veći.



Slika 6.2. Upravljanje servo motorom (senzor pozicije se nalazi kod motora) [14]

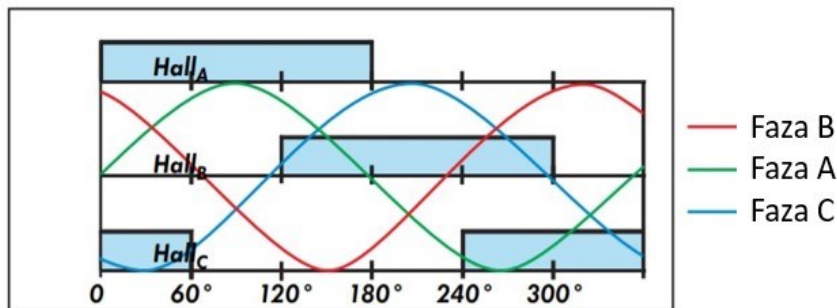


Slika 6.3. Upravljanje servo motorom (senzor pozicije se nalazi kod tereta) [14]

Postoje različite metode za dobivanje linearne pozicijske povratne informacije od kontrolera. Postoje analogni i zupčasti pretvarači te pozicijski potenciometri. Većina pretvarača šalje niz impulsa koji odbrojavaju pokrete dok koder čita kretanje po linearnoj skali. Svaka od tih vrsta ima određenu razinu točnosti ali najpopularniji uređaj povratne informacije za linearne sustave je linearni koder. Postoje dvije najpopularnije vrste linearnih kodera a to su optički i magnetski. Optički koderi skeniraju reflektiranu svjetlost za dobivanje povratne informacije dok magnetski koriste induktivno skeniranje. Kada god kontroler izgubi informaciju potrebno je ponovno uspostaviti početni položaj, ali da bi se to izbjeglo neki proizvođači uvode apsolutnu povratnu informaciju gdje je stvarni položaj motora odmah poznat i navođenje nije potrebno. Linearni koderi koji koriste apsolutnu povratnu vezu podatke prenose preko sinkronog serijskog sučelja.

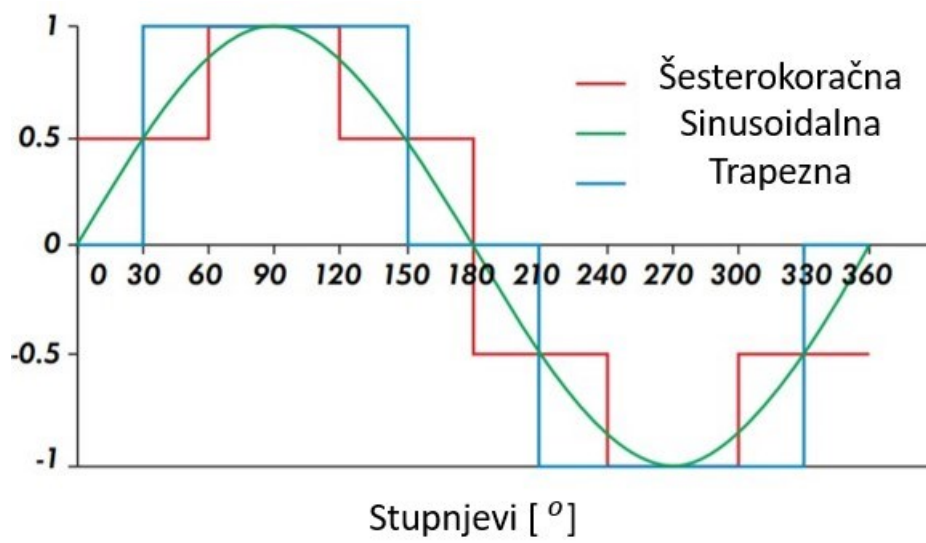
## 6.2. Komutacija linearnih motora

Komutacija je proces u kojem dolazi do promjene napona po fazama kako bi se generirao pomak. Većina linearnih motora danas koriste trofazni dizajn bez četkica. Motori bez četkica nemaju pokretnih kontaktnih dijelova pa su samim time pouzdaniji iako je elektronika za kontroliranje napona malo kompliciranija [4]. Metoda komutacije ovisi o primjeni motora ali je važno za razumjeti da pojedine vrste komutacija imaju svoje mane. U motorima bez četkica prvo što kontroler mora utvrditi je koja faza mora trenutno biti najpozitivnija.



Slika 6.4. Napon po fazama linearnog motora [4]

Najjednostavniji način da se to utvrdi je korištenjem Hall-ovog efekta. Postoje tri uređaja gdje je svaki namijenjen za jednu fazu. Skeniranjem magnetskog polja mogu odrediti koji dio treba trenutno biti najpozitivniji. Postoje tri vrste komutacije: trapezna, šesterokoračna i sinusoidalna. Trapezna komutacija je najjednostavnija jer zahtjeva od digitalnih Hall-ovih uređaja da budu razmaknuti za 30 stupnjeva. Kada god Hall-ov signal pređe tih 30 stupnjeva počinje nova sekvenca te komutacija motora kreće. Ova vrsta komutacije je najjeftinija. Šesterokoračna je vrlo slična trapezoidnoj jer su Hall-ovi uređaji opet razmaknuti ali u ovoj verziji za jednu poluperiodu se koriste dva senzora što mu daje oblik bliži sinusnom. Ova metoda je skuplja te će obje metode uzrokovati stvaranje poremećajnih sila. Najbolja opcija je sinusoidalna komutacija. Ova komutacija zahtjeva korištenje enkodera. Kada se promjena otkrije na digitalnim Hall-ovim uređajima, enkoder digitalno odredi gdje se komutacijski ciklus trenutno nalazi. Komutacija se radi generiranjem A faze koja iznosi  $\sin(0^\circ)$  i faze B koja iznosi  $\sin(0^\circ + 120^\circ)$  te množenjem njih sa zahtijevanom strujom. Ova metoda nudi najbolje rezultate jer se istim procesom kontrolira struja i pozicija te stvara manje topline.



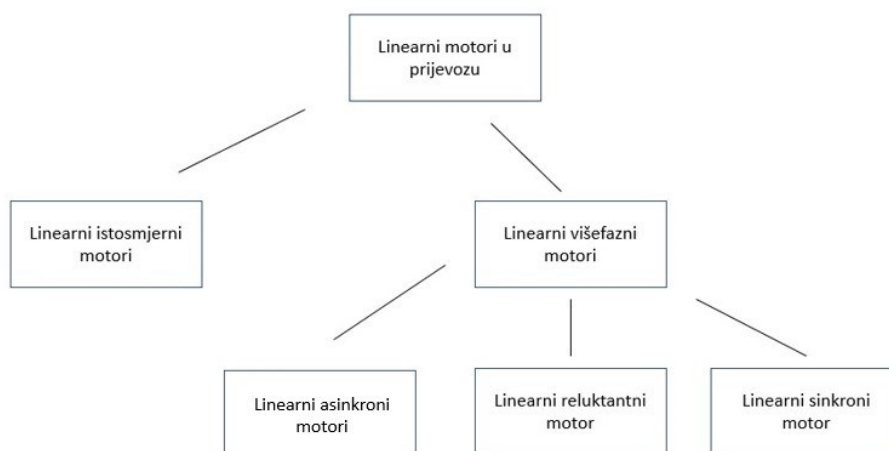
Slika 6.5. Grafički prikaz vrsta komutacije [4]

## 7. PRIMJENE LINEARNIH MOTORA

Kao i sa svom tehnologijom, uvijek postoje ograničenja pri uporabi. Iako je cijena nekad bila ograničenje linearnih motora, veći opseg proizvodnje im je spustio cijenu u rangu sa klasičnim motorima. Ako cijenu održavanja uzmemo u obzir, tijekom vremena linearni motor će se pokazati kao znatno jeftinija opcija. Linearni motori mogu se okarakterizirati sljedećim aspektima: niski troškovi, visoka pouzdanost, niska potrošnja energije pogona bez kontakta (lakša vozila). Ovaj rad pokušava prikazati suvremeni napredak u razvoju linearnih motora za specifične industrijske primjene. Tipične industrijske primjene linearnih motora su : Magnetski levitirana vozila (MAGLEV), kormila za plovila, hladnjaci s linearnim oscilacijskim permanentnim magnetom, motori u digitalnim fotoaparatom, linearni električni generator, elektromagnetski prekidači, mikrofoni i zvučnici u laptopima i mobitelima. Međutim, kako bi nadmašili rotacijske pogone linearnim motorima upravlja se sklopovima energetske elektronike visokih performansi.

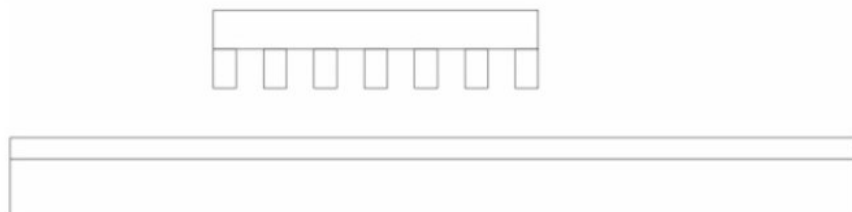
### 7.1. Primjene linearnih motora u prijevozu

Linearni motori naširoko se koriste u transportnim aplikacijama. Za različite transportne potrebe (velike udaljenosti, kratke udaljenosti, velike mase, male mase, itd.) primjenjuju se različiti tipovi linearnih motora s različitim performansama (ubrzanje, učinkovitost itd.).

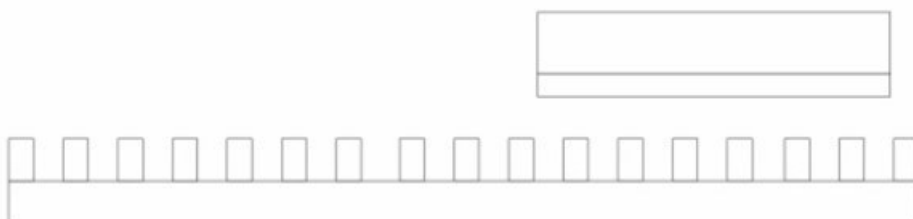


Slika 7.1. Primjena linearnih motora u prijevozu

Upravljanje linearnim istosmjernim motorom u transportu je puno lakše nego u izmjeničnim verzijama. Ali četkice između aktivnih i pasivnih dijelova uvijek induciraju električni luk zbog promjena polariteta na aktivnom dijelu. To uzrokuje trošenje kolektora što povećava cijenu održavanja. Linearni istosmjerni motori imaju nisku energetska učinkovitost i nisu prikladni za uporabu u svrhe transporta [5]. Linearni asinkroni motori su najzastupljeniji u prijevozu. Međutim učinkovitost linearnih asinkronih motora je niska zbog klizanja. Kompenzacijski namot korišten je za poboljšavanje učinkovitosti. Na temelju te ideje tvrtka FUJII je predložila dva tipa kompenzatora. Prvi kompenzator u obliku magnetskog rotora a drugi jednofazna zavojnica protjecana izmjeničnom strujom. Te dvije kompenzacije znatno su poboljšale učinkovitost za gradski prijevoz. Nakon toga dodan je kompenzator u obliku magnetskog rotora ispred linearnog indukcijskog motora sa 10 metara dugom armaturom te je učinkovitost skočila na 85% pri brzini od 40 km/h i otprilike 90% pri 360 km/h. Nakon njih dolaze linearni sinkroni motori koji mogu biti podjeljeni u dvije skupine. Aktivni linearni sinkroni motor je sa dugim statorom dok je kod pasivnog linearnog sinkronog motora stator kratak. Prednost motora sa kratkim statorom je u relativno niskoj cijeni iako verzije sa kratkim statorom nisu prikladne za transport zbog velike mase. Za verziju sa dugim statorom koriste se sustav upravljivih permanentnih magneta da bi se podržala težina vozila.



Slika 7.2. Linearni motor sa kratkim statorom[5]



Slika 7.3. Linearni motor sa dugim statorom[5]



Posljedni su linearni reluktantni motori. Pri niskim brzinama preciznost im je iznimno loša. Unatoč tome linearni reluktantni motor može nadvladati taj problem sa vrlo preciznom pozicijskom kontrolom. Uz to ima brojne prednosti kao visoka učinkovitost i visoka brzina koja može doseći vrijednosti do 574,8 km/h kao u AVG Italo vlaku, slika 7.4. Linearni reluktantni motor se sve više primjenjuje u svrhe transporta.



Slika 7.4. AVG Italo vlak [5]

## 7.2. Primjene linearnih motora u industriji

Više od pola linearnih motora koristi se za montažu i proizvodnju poluvodičkih komponenti i elektronike. Razlog tome je preciznost linearnih motora. Imaju sposobnost neograničene poteze praviti sa odstupanjem od  $\pm$  jedan mikrometar na deset centimetara. Zbog preciznosti često se koriste u medicinske svrhe. Ovisno o vrsti linearnog motora brzina im se kreće od nekoliko cm/s do tisuću cm/s. Linearni koračni strojevi imaju brzine od 150 cm/s te se koriste za strojeve gdje je potrebno brzo djelovanje. Osim toga koriste se za prijenos dijelova. Neki proizvođači sa njima prodaju dvostruke linearne stepenice da bi motor mogao raditi u X-Y prostoru (koordinatnom prostoru). Linearni asinkroni motori koji rade brzinama do 5000 cm/s se koriste za kretanje ljudi u motornim vozilima te "roller coasterima". Cilindrični linearni motori imaju čelične šipke napunjene magnetima pa se koriste tamo gdje su potrebni brzi i točni potezi. Linearni motori sa željeznom jezgrom generiraju do 3500 N i brzine veće od 550 cm/s. To čini ovaj podtip motora savršenim za primjenu u pogonima za letenje, laserskim rezačima i rezačima mlazom vode. Linearni sinkroni strojevi mogu proizvesti silu preko 7000 N. Neki od njih

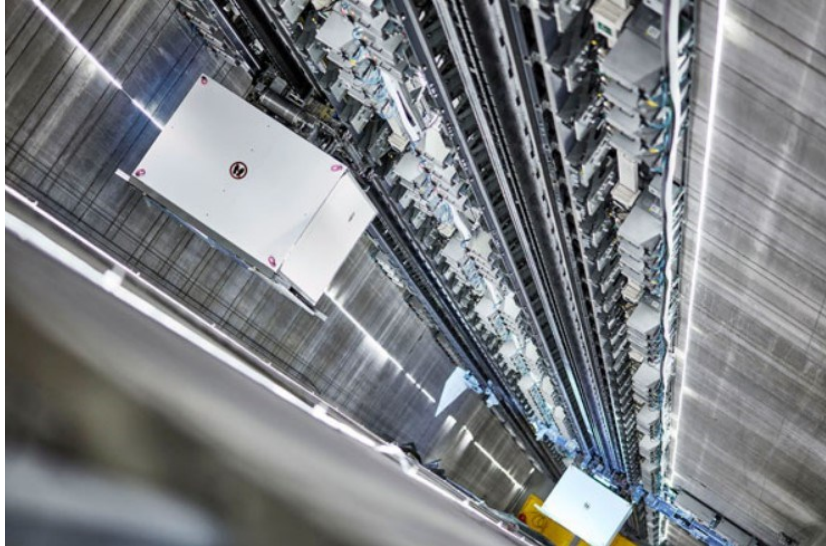
koriste vodeno hlađenje kako bi povećali dopuštenu snagu.. Prikladni su za primjene u alatnim strojevima i robotici. Tvrtna KUKA Systems North America je nedavno krenula sa prodajom transportnih traka automobilskih karoserija. Koriste linearne motore za pomicanje dijelova karoserije kroz robotske stanice na montažnoj traci. Druga Sjeverno Američka firma MultiSan koristi linearne motore za pakiranje sireva, slika 7.5. [15].



Slika 7.5. Linearni pogon za pakiranje sire u firmi Multisan [15]

### 7.3. Primjene linearnih motora u dizalima

Linearni motori zbog nedostatka sile trenja mogu učinkovito raditi u bilo kojem smjeru što ih čini idealnim za primjenu u dizalima. Prednosti su iste kao i u ostalim primjenama, poput visoke učinkovitosti, brzine i akceleracije sustava. Najveća specifična prednost kod dizala je što se veličina dizala može smanjiti za oko 20% korištenjem linearnih motora. S obzirom da nemaju uže, sigurniji su te dugoročniji lako nadmašuju tradicionalna dizala [15]. Na slici 7.6. prikazano da dizalo sa linearnim motorom MULTI. Zbog manjka teških kablova potrebnih za podizanje dizala, maknuto je visinsko ograničenje zgrada te se sada mogu graditi do bilo koje visine. Linearni motori nalaze se na poleđini svake kabine i napajani su od strane elektromagnetskih zavojnica koje se nalaze unutar zida oko dizala. Sva dizala rade unutar istog prostora ali sigurnosni algoritam sprječava njihovo sudaranje [16]. Prvo dizalo sa linearnim motorom instalirano je 1990. godine u Tokyu. Dizalo je imalo nosivost 600 kilograma te brzinu od 105 metara po minuti.



Slika 7.6. Dizalo MULTI sa linearnim motorom [16]

## 8. ZAKLJUČAK

Za razliku od drugih motora linearni motori imaju prednost jer umjesto rotacijskog gibanja proizvode pravocrtno. Sastavne komponente linearnih motornih sustava uobičajeno su motor, podnožja, ležajevi te kabeli. Odabirom pojedinačnih komponenata krajnji korisnik smanjuje troškove nabave te održavanja motora. Zbog različitih potreba gdje se primjenjuju linearni motori postoje mnoge podvrste sa različitim svojstvima. Od podvrsta najvažnije su nam one sa željeznom jezgrom i bez željezne jezgre. Željezna jezgra znatno povećava silu koju motor može generirati što negativno rezultira na povećanje ukupne mase motora. Osim toga izvedbe linearnih motora sa željeznom jezgrom imaju bolju toplinsku učinkovitost. Ovisno o obliku kućišta linearne motore dijelimo na cilindrične, U-kanalne te ravne. Najjednostavniju građu imaju linearni asinkroni motori te samim time najveću primjenu. Glavna primjena im je u transportu gdje se najčešće ugrađuju u željeznička transportna sredstva. Jedina istosmjerna izvedba linearnog motora je beskolektorski istosmjerni linearni motor. Za razliku od drugih vrsta istosmjernih motora koji koriste mehanički komutator kako bi stvorili magnetsko polje na rotoru beskolektorski istosmjerni linearni motor koristi permanentne magnete na rotoru te se preko elektroničkog komutatora napajaju armaturni namoti statora. Linearni motori su upravljani na dva načina a to su servo upravljanje te upravljanje komutacijom. Servo upravljanje odlikuje kvaliteta signala te performanse servo kontrolera. Upravljanje komutacijom omogućava istodobno kontroliranje i struje i pozicije što rezultira manjim stvaranjem topline. U praksi linearni motori najčešće se upotrijebljavaju za potrebe transporta. Tehnološki napredak omogućio je povećanje učinkovitosti linearnih motora na 90%. Još jedna bitna primjena linearnih motora je u industriji gdje se koriste radi preciznosti te manjka buke. Prednosti linearnih motora su brojne ali je potrebno prema njegovim specifikacijama odrediti koja izvedba će donijeti najbolje rezultate.

## LITERATURA

- [1] [https://www.researchgate.net/profile/Hossein-Nezamabadi-Pour/publication/242681019\\_A\\_PSO-based\\_optimum\\_design\\_of\\_PID\\_controller\\_for\\_a\\_linear\\_brushless\\_DC\\_motor/links/0a85e537f5c36264f1000000/A-PSO-based-optimum-design-of-PID-controller-for-a-linear-brushless-DC-motor.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Hossein-Nezamabadi-Pour/publication/242681019_A_PSO-based_optimum_design_of_PID_controller_for_a_linear_brushless_DC_motor/links/0a85e537f5c36264f1000000/A-PSO-based-optimum-design-of-PID-controller-for-a-linear-brushless-DC-motor.pdf)
- [2] [https://www.researchgate.net/publication/322040360\\_What\\_are\\_linear\\_motors](https://www.researchgate.net/publication/322040360_What_are_linear_motors)
- [3] [https://www.researchgate.net/publication/244989185\\_Linear\\_Synchronous\\_Motors/link/00b4951d4c7802b606000000/download](https://www.researchgate.net/publication/244989185_Linear_Synchronous_Motors/link/00b4951d4c7802b606000000/download)
- [4] <https://www.aerotech.com/wp-content/uploads/2020/12/linear-motors-application-en.pdf>
- [5] <https://ieeexplore.ieee.org/document/8433682>
- [6] <https://www.scribd.com/doc/33950384/Osnove-Elektrotehnike-Knjiga-Prva>
- [7] <https://www.usna.edu/EE/ee301/supplements/Linear%20Motors%20Supplement.pdf>
- [8] <https://electronicspani.com/hall-effect-hall-effect-derivation/>
- [9] [https://hr.wikipedia.org/wiki/Planetarni\\_prijenos](https://hr.wikipedia.org/wiki/Planetarni_prijenos)
- [10] <http://hr.jiangsu-zhengming1.com/gearboxes/planetary-gearboxes/>
- [11] J. Weidauer, Električna pogonska tehnika, Graphis, Zagreb, 2013.
- [12] B. Skalicki, J. Grilec, Električni strojevi i pogoni, Zagreb, 2005.
- [13] <https://www.coherent.com.au/products/motion-control/motors/aerotech-blmh-series-linear-motor-1360.html>
- [14] <https://www.exoticautomation.com/wp-content/uploads/2017/01/Parker-Trilogy-Linear-Motor-Linear-Motor-Positioners.pdf>
- [15] <https://www.linearmotiontips.com/linear-motor-application-examples/>
- [16] <https://canada.constructconnect.com/dcn/news/technology/2018/09/revolutionary-multi-elevator-system-headed-canada>

## SAŽETAK

U ovom završenom radu opisani su principi rada linearnih motora. Prvo su opisani fizikalni zakoni važni za bolje razumijevanje linearnih motora. Uz pomoć tih zakona opisuje se rad linearnih motora kao i njegovih brojnih vrsta. Neke od tih vrsta su: cilindrični linearni motor, U-kanalni linearni motor te ravni linearni motor. Uz građu pojedinih vrsta linearnih motora opisuju se i njihove razlike. Zatim se objašnjava upravljanje linearnim motorima te njegova komutacija. Za kraj se navodi primjena linearnih motora od kojih je najvažnija primjena u transportu.

Ključne riječi: linearni motor, magnetizam, cilindrični linearni motor, U-kanalni linearni motor, ravni linearni motor

## **ABSTRACT**

In this undergraduate thesis the working principles of the linear motors are explained. First the physical laws are explained. With the help of the physical laws the working principles of the linear motor are explained. After that the many sub-classes of the linear motor are also explained in detail. Some of those sub-classes are: Cylindric, U-channel and flat linear motors. Motor constructions and some differences between models are explained. After that the process of controlling a motor is explained. In the end the practical uses of a linear motor are listed with the most important one being transport.

Key words: linear motors, magnetism, cylindrical linear motor, U-channel linear motor, flat linear motor

## **ŽIVOTOPIS**

Mirko Mačešić rođen je 8. rujna 1999. godine u Vinkovcima. Osnovnu školu je pohađao u “Osnovna škola Stjepana Antolovića, Privlaka“ gdje je sve razrede završio sa savršenim uspjehom od 5.0. Zbog ljubavi prema fizici i elektronici upisuje srednju školu “Tehnička škola Ruđera Boškovića, Vinkovci“ gdje sve razrede završava sa odličnim uspjehom. Od natjecanja osvaja druga mjesta na županijskim natjecanjima iz fizike tri puta, geografije jednom, povijesti jednom te šaha jednom. Nakon završene srednje škole upisuje prediplomski studij elektroenergetike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek.