



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO  
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**PETRI TIKKA**  
**LINEAARIMOOTTORIT JA NIIDEN SOVELLUSKOHTEET**

Kandidaatintyö

Tarkastaja Paavo Rasilo

## TIIVISTELMÄ

**Petri Tikka:** Lineaarimoottorit ja niiden sovelluskohteet

Tampereen teknillinen yliopisto

Kandidaatintyö, 26 sivua, 0 liitesivua

Joulukuu 2017

Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma, sähkötekniikka

Pääaine: Tehoelektroniikka

Tarkastaja Paavo Rasilo

Avainsanat: sähkömoottori, lineaarimoottori, sovelluskohteet

Tässä työssä perehdyttiin lineaarimoottoreihin ja niiden sovelluskohteisiin. Lineaarimoottoreiden teoriapohja on sama kuin tavallisilla pyörivillä sähkömoottoreilla. Erona tavalliseen pyörivään sähkömoottoriin, lineaarimoottorin roottori ja staattori on levitetty tasaiseksi levyksi. Lineaarimoottoreissa magneettikentässä olevan virrallisen johtimen ja magneettikentän välille syntyy lineaarinen työntövoima. Moottorin ensiöpuoli koostuu ajokäämeistä, joihin moottorityypistä riippuen johdetaan tasavirtaa tai vaihtovirtaa. Toisiopuolella induktiomoottorilla on häkkikäämitys, reluktanssimoottorilla uritettu teräslaminointi ja tasavirtamoottorilla sekä tahtimoottorilla sähkömagneetti tai kestopmagneetti.

Linearisessa tasavirtamoottorissa ja tahtimoottorissa voidaan magnetointi tuottaa yksi- tai kaksipuoleisella magneettiradalla tai magneetit voivat olla pyöreässä tangossa. Erityyppisillä magnetointitavoilla pyritään saavuttamaan mahdollisimman voimakas magneettikenttä ajokeloille. Magneettikenttää voidaan parantaa myös käyttämällä rautasydäntä ajokäämien kanssa. Tällä tavoin saadaan magneettikenttä keskittymään paremmin ja moottorista tulee näin häviöttömämpi.

Lineaarimoottoreiden valttina erilaisissa sovelluskohteissa on niiden suuri kiihtyvyys, laaja-alainen liikenopeus sekä selkeä ja yksinkertainen rakenne. Jos tavallisella pyörivällä sähkömoottorilla halutaan saada aikaiseksi lineaarinen liike, vaatii se käyttöön vaihteita, kuularuuveja tai hihnoja. Tällaisissa käytöissä lineaarimoottorilla saavutetaan säästöjä, kun tarvitaan vähemmän osia sekä huoltokulut laskevat, kun on vähemmän kuluvia osia.

Hyvien voima ja nopeus sekä tarkkuus ominaisuuksiensa takia lineaarimoottoreita on käytetty muun muassa Maglev-junissa sekä erilaisissa hissi- ja käärykäytöissä. Lineaarimoottoritekniikka kehittyy edelleen ja mahdollistaa tulevaisuudessa moninaisten uusien lineaarisenliikkeen sovelluskohteiden rakentamisen ja kehittämisen, kuten esimerkiksi huippunopeiden Hyperloop yhteyksien luomisen.

## SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto.....	1
2	Teoria.....	2
3	Lineaarimoottorityypit.....	5
3.1	Lineaarinen DC-moottori.....	5
3.1.1	Magneettirata.....	5
3.1.2	Kommutointi.....	7
3.2	Lineaarinen askelmoottori.....	8
3.3	Lineaarinen induktio-moottori.....	10
3.4	Lineaarinen tahtimoottori.....	11
3.5	Lineaarinen reluktanssimoottori.....	11
4	Nykyiset sovelluskohteet.....	13
4.1	Kuularuuvi- ja hammashihnakäytöt.....	13
4.2	Maglev-junat.....	13
4.3	Raide-jarrujärjestelmä.....	15
4.4	Sähkömagneettinen ilma-alusten laukaisujärjestelmä.....	16
4.5	Hissikäytöt.....	17
4.6	Lentokenttien matkalaukkujen käsittelyjärjestelmä.....	18
5	Tulevaisuuden sovelluskohteet.....	20
5.1	Hyperloop.....	20
5.2	Lineaarimoottorit ja avaruus.....	21
6	Yhteenveto.....	22
	Lähteet.....	23

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

AC	vaihtovirta
DC	tasavirta
Maglev	magnetic levitation transport
EMALS	electromagnetic aircraft launch system
Nasa	Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto

# 1 Johdanto

Lineaarimoottoreista on viime vuosikymmenenä tullut yhä käytetympiä erilaisissa julkisissa ja teollisuuden kohteissa. Käytön lisääntymisen valtteina lineaarimoottoreilla on ollut niiden suuri nopeus, suuri voima, suuri tarkkuus ja suuret liikeradat verrattuna perinteisiin kuularuuvi- tai hammashihnakäyttöihin. Tekniikan yhä kehittyessä ja hintojen laskiessa, luo se tulevaisuudessa lineaarimoottoreista hyvin kiinnostavan tekniikan eri sovelluskohteisiin.

Lineaarimoottorit poikkeavat rakenteeltaan tavallisista sähkömoottoreista. Lineaarimoottoreissa staattori ja roottori on levitetty tasaisiksi levyiksi, jolloin pystytään tuottamaan pyörivän liikkeen sijaan lineaarista voimaa. Rakenteeltaan lineaarimoottorit koostuvat ajokäämeistä sekä moottorityypistä riippuen sähkömagneeteista, kestomagneeteista, häkkikäimityksestä tai reluktanssi uritetusta roottorista.

Sovelluskohteita lineaarimoottoreilla on monenlaisia. Hyvien voima ja nopeus sekä tarkkuus ominaisuuksiensa takia lineaarimoottoreita on käytetty muun muassa Maglev-junissa sekä erilaisissa hissi- ja käärykäytöissä. Työn tarkoituksena on tehdä kirjallisuusselvitys erilaisista lineaarimoottoritekniikoista sekä perehtyä niiden sovelluskohteisiin.

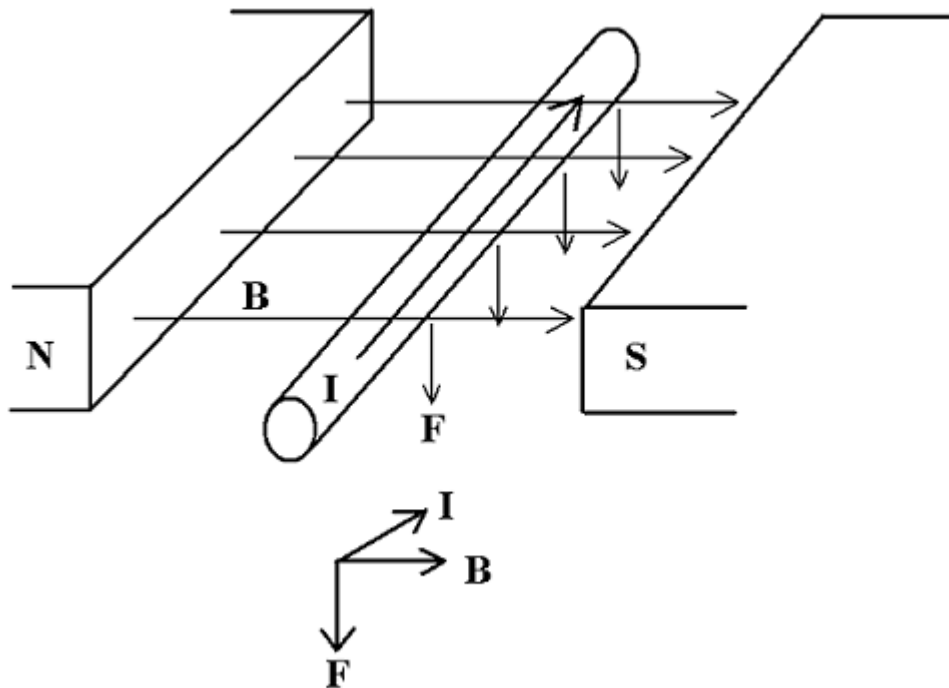
Tässä työssä käydään aluksi läpi sähkömoottoreiden pohjateoriaa ja sen liittymistä lineaarimoottoreihin. Tämän jälkeen perehdymme erityyppisten lineaarimoottoreiden rakenneratkaisuihin ja ominaisuuksiin. Työn lopuksi luodaan katsaus nykypäivän lineaarimoottoreiden sovelluskohteisiin sekä tuleviin rakenteilla tai suunnitteilla oleviin sovelluskohteisiin.

## 2 Teoria

Sähkömoottorin toiminta perustuu magneettikentässä olevan virrallisen johtimen ja magneettikentän väliseen voimavaikutukseen. Kuvassa 1 on piirros johtimesta magneettikentässä. Kun johtimessa kulkee virta  $I$  ja siihen kohdistuu magneettivuontiheys  $B$ , syntyy johtimeen voima  $F$ :

$$F = BIL\sin\alpha, \quad (1)$$

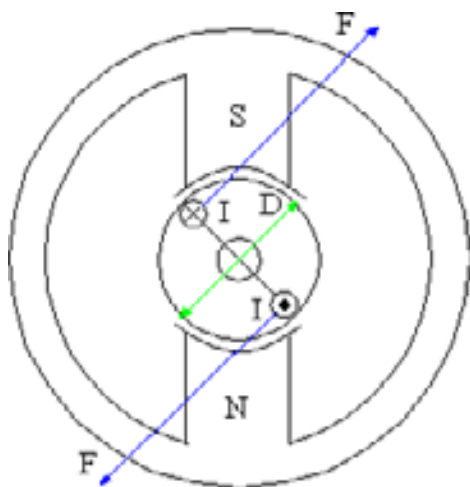
jossa  $L$  on johtimen pituus ja  $\alpha$  johtimen ja magneettikentän välinen kulma.



**Kuva 1.** Magneettikentässä olevaan virralliseen johtimeen kohdistuva voima [1].

Johtimeen vaikuttava voima on kohtisuorassa magneettikenttää vastaan. Voima on suurimmillaan, kun johtimen ja magneettikentän välinen kulma  $\alpha$  on  $90^\circ$  ja nolla, kun johdin ja magneettikenttä ovat samansuuntaisia tai vastakkaisia.

Tavallisissa pyörivissä sähkömoottoreissa paikallaan olevaa ulko-osaa nimitetään staattoriksi ja sisempää pyörivää osaa sanotaan roottoriksi. Kuvassa 2 on esitetty kaksinapainen moottori, jossa on roottorissa käämityksenä yksi vyyhti, jossa on yksi johdinkierros. Kumpaankin vyyhden vastakkaiseen johtimeen kohdistuu kaavan 1 mukaisesti voima  $F$ . Johtimiin kohdistuvat voimat ovat saman suuruisia.



**Kuva 2.** Magneettikentässä olevaan virralliseen roottorivyyhteen vaikuttava voima [2].

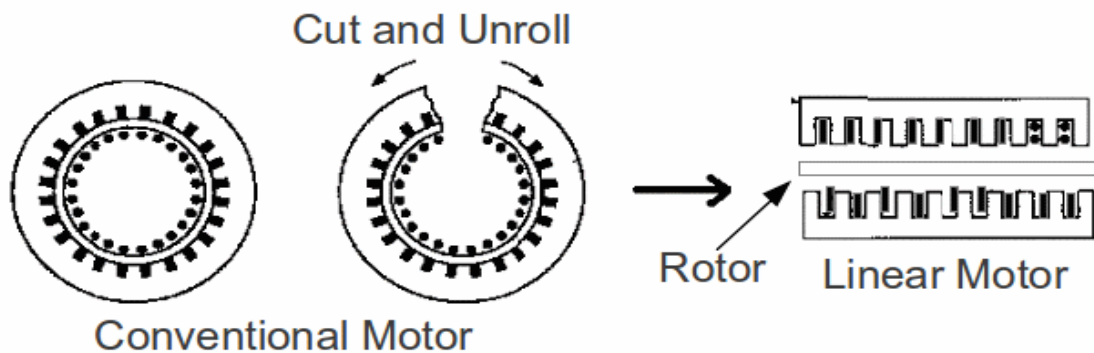
Kuvan 2 tilanteessa johtimet ovat kiinni roottorissa, jolloin roottoriin vaikuttaa vääntömomentti  $T$ :

$$T = BILD \sin \alpha , \quad (2)$$

jossa  $D$  on roottorin halkaisija ja  $\alpha$  vyyhden kiertymäkulma.

Vääntömomentti vaihtelee roottorin asennon mukaan ollen vaakatasossa 0. Sähkömoottoreissa on yleensä koko roottorin kehä varustettu vyyhdeillä, jolloin roottoriin vaikuttaa jatkuva momentti, joka saa moottorin pyörimään.

Lineaarimoottoreiden toimintaperiaatteen perusta on sama kuin pyörivien sähkömoottoreiden. Erona tavalliseen pyörivään sähkömoottoriin, lineaarimoottorin roottori ja staattori on levitetty tasaiseksi levyksi kuvan 3 tapaan. Lineaarimoottoreissa magneettikentässä olevan virrallisen johtimen ja magneettikentän välille syntyy vääntömomentin sijaan lineaarinen työntövoima. Magneettikenttä luodaan roottorissa yleensä joko sähkömagneetilla tai kestopagneetilla ja staattori osassa virallisen johtimen virkaa ajaa käämitys.



**Kuva 3.** Pyörivän ja lineaarisen moottorin vastaavuudet [3].

Tässä työssä pyritään käyttämään liikkuvasta osasta pyörivän moottorin tavoin nimitystä roottori ja paikallaan olevasta staattoria. Lineaarimoottoreissa ajokäämitykset voivat sijaita staattorin sijasta myös roottorissa, minkä takia työssä käytetään myös nimikkeitä ensiö ja toisiö. Ensiö-osalla tarkoitetaan tällöin käämityksen sisältävää osaa.



## 3 Lineaarimoottorityypit

Toimintaperiaatteen perusteella lineaarimoottorit voidaan jakaa AC-, DC-, ja askelmoottoreihin. Muita eroja lineaarimoottoreissa tuottaa toisiopuolen rakenne, joka moottorityypistä riippuen koostuu sähkömagneeteista, kestromagneeteista, häkkikäämyksestä tai reluktanssi uritetusta levystä. Seuraavaksi käsitellään kaikki yleisimmät lineaarimoottorityypit.

### 3.1 Lineaarinen DC-moottori

Lineaariset DC-moottorit koostuvat ajokäämillisestä osasta sekä magneetteja sisältävästä magneettiradasta. Kelat voivat sijaita staattorissa tai roottorissa. Koska keloihin syötetään tasavirtaa, tarvitsee ne kommutoinnin eli ajovirtojen vaihtosuuntauksen toimiakseen. Kommutointi voidaan saada aikaiseksi kommutaattorilla harjojen avulla tai ilman harjoja elektronisesti. Myös kommutoimattomat erikoiskäytöt ovat mahdollisia.

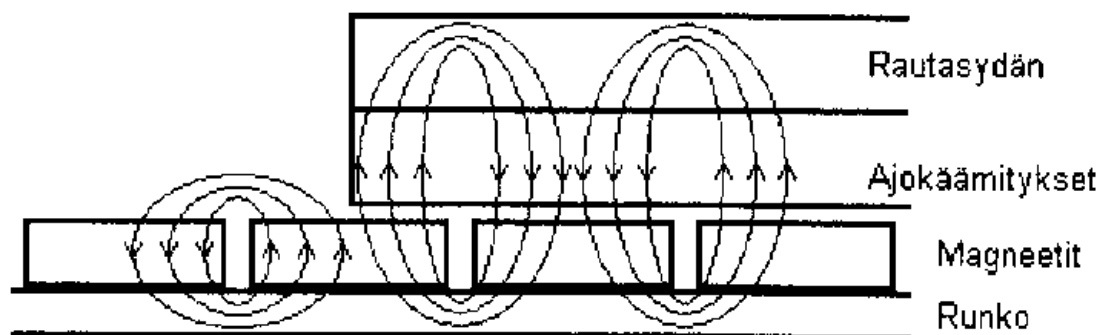
#### 3.1.1 Magneettirata

Rakenteeltaan lineaarisen DC-moottorin magneetit voivat olla yksi- tai kaksipuoleisella magneettiradalla tai magneetit voivat olla pyöreässä tangossa. Erityyppisillä magnetointi tavoilla pyritään saavuttamaan mahdollisimman voimakas magneettikenttä ajokeloille. Magneettikenttä heikkenee nopeasti ilmassa, joten pyrkimyksenä on tuottaa magneettikentälle mahdollisimman suljettu tie, missä ainoat ilmavälit olisivat ajokäämien liikkumiseen vaativat tilat.

Yksipuoleisella magneettiradalla varustetussa lineaarisessa DC-moottorissa magneettirata koostuu lattatyypisistä magneeteista, jotka aseteltu peräkkäin roottorin liikesuunnan mukaisesti. Perättäiset magneetit ovat napaisuuksiltaan vastakkaisia, mikä luo radan pituussuunnassa suuntaansa muuttavan magneettikentän magneettiradan yläpuolelle. Tyypillisesti roottorin ja magneettiradan väli on noin 0,3–1 mm. [4, s. 1–15]

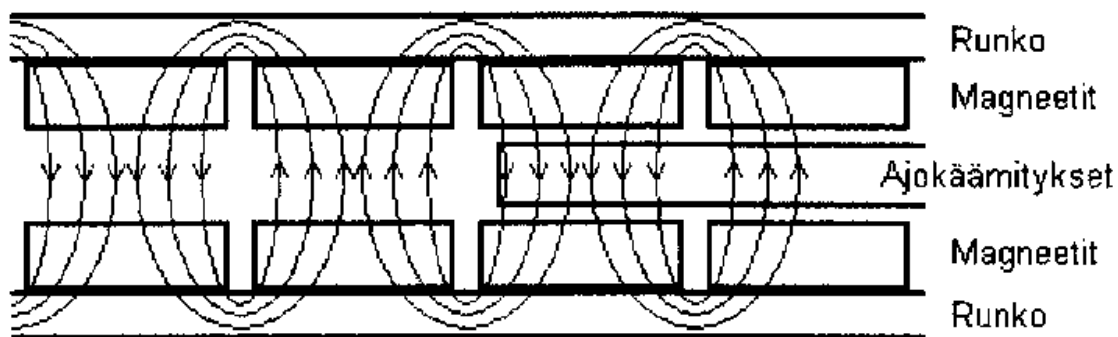
Etuina yksipuoleisella magneettiradalla on helpommin järjestettävissä oleva jäähdytys, joten käyttö on yleisintä suuria tehoja vaativissa sovelluksissa. Huonona puolena yksipuoleisessa radassa on epäoptimaalinen magneettikentän hyödyntäminen. Magneettikenttä heikkenee nopeasti ilmassa, mikä luo yksipuoleisen magneettiradan käytössä heikon magneettikentän. Magneettikenttää voidaan parantaa kuvan 4 mukaisesti hyödyntämällä rautasydäntä. Rautasydämisessä lineaarimoottorissa käämykset on tehty rautaisten hampaiden ympärille. Tällä tavoin saadaan magneettikenttä keskittymään

paremmin ja moottorista tulee näin häviöttömämpi. Rautasydän helpottaa myös jäähtytystä. Ongelmia rautasydämen käytössä tuottaa rautasydämen ja magneettien välille syntyvä magneettinen vetovoima, mikä tekee liikkeestä askelmaista. Tämä häiritsee tarkkaa paikoitusta varsinkin hitaassa liikkeessä. Ongelmaa voidaan poistaa kääntämällä kestmagneetit viistoon asentoon roottoriin nähden sekä myös kahden roottorin käytöllä. [4, s. 14–16, 5, s. 160–161]



**Kuva 4.** Yksipuoleinen magneettirata [4, s. 15].

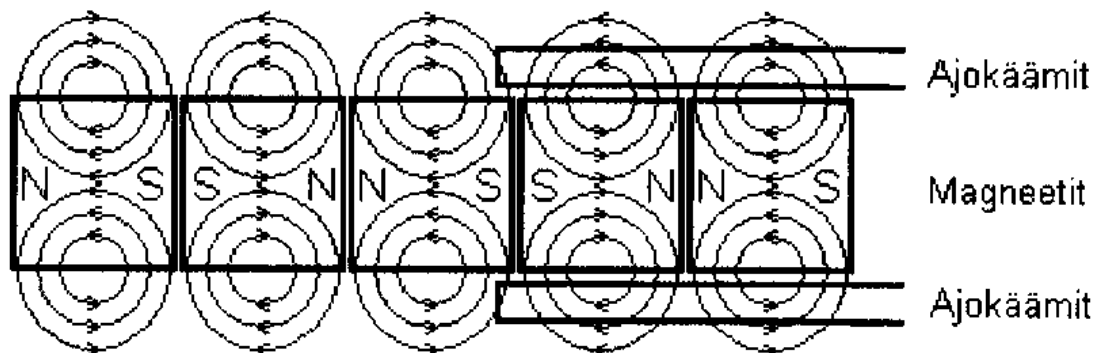
Kaksipuoleinen magneettirata rakentuu kuvan 5 mukaisesti vastakkain sijoitetuista magneettipareista, joiden välissä roottori ajokäämeineen liikkuu. Vastakkain sijoitettujen magneettien napaisuus on saman suuntainen, vierekkäisten vastakkaissuuntainen. Käämisilmukoissa kiertää 120 asteen vaihesiirrossa kulkeva virta. Käämisilmukat ovat magneettipareihin nähden siten, että saman suuntaisen magneettikentän alueella virrat ovat saman suuntaiset. [4, s. 13]



**Kuva 5.** Kaksipuoleinen magneettirata [4, s. 13].

Kaksipuoleinen magneettirata mahdollistaa voimakkaan magneettikentän synnyttämisen, jolloin päästään tarkkaan ohjaukseen. Haittapuolena on tehokkaan jäähtytyksen saaminen roottoriin sekä useamman liikeakselin sovelluksissa magneettiradan suuri massa metriä kohden. [4, s. 14]

Tankomallisessa lineaarisessa DC-moottorissa magneetit sijaitsevat pyöreässä tangossa, joka on päistään ankkuroitu. Magneetit on sijoitettu tankoon navat vastakkain kuvan 6 mukaisesti, jolloin tangon ulkopuolelle syntyy tangon pituussuunnassa muuttuva magneettikenttä. Roottori osa ajokäämeineen sijaitsee tangon ympärillä. [4]



**Kuva 6.** Tankomalli [4, s.16.]

Tankomalli on ominaisuuksiltaan kahden edellisen magneettiradan kompromissi. Rakenteella pystytään hyödyntämään magneettikenttä melko hyvin, joten ei synny tarvetta käyttää rautasydäntä. Rakenne mahdollistaa myös hyvän jäähdytyksen roottorille. Haittana tankomallisissa on rajoitettu liikematka ja se ettei niitä voida liittää peräkkäin, koska magneettitanko on päistään kiinni. [4, s. 16–17]

### 3.1.2 Kommutointi

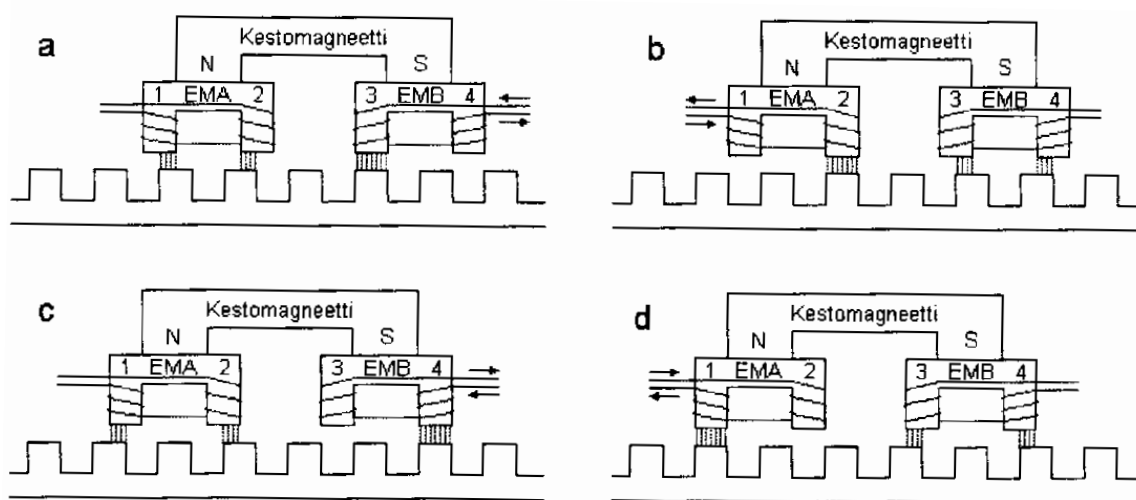
Jotta DC-lineaarimoottorissa saadaan aikaiseksi lineaarinen liike, on kelojen virta saatava muuttuvaksi. Harjallisessa lineaarisessa tasavirtamoottorissa kelojen virtojen ohjaaminen tapahtuu mekaanisten harjojen tai hiilien sekä lineaarisen kommutaattorin avulla. Harjallisella käytöllä saavutetaan yleensä hyvä ja yksinkertainen ohjattavuus sekä nopea vasteaika. Haittana käytölle ovat kuluvat osat harjoissa ja kommutaattorissa sekä kipinöinnin mahdollisuus. [4, s.12]

Harjattomassa käytössä roottorin kelat on korvattu kestopagneeteilla ja kommutointi tapahtuu elektronisesti. Elektronisessa kommutoinnissa ohjausta varten järjestelmän pitää olla selvillä ajokäämien ja kestopagneettien keskinäisestä asemasta. Tämä tekee ohjausjärjestelmästä monimutkaisemman ja vaatii anturoinnin staattorin aseman selvittämiseen. Koska moottori ei tarvitse hiiliä ja harjoja, ei siinä ole kuluvia osia. Harjattomien lineaarimoottoreiden eduksi onkin laskettava yksinkertaisesta rakenteesta johtuva luotettavuus ja vähäinen huollon tarve, mikä tekeekin moottorityypistä kaupallisesti yleisen. [4, s. 12, 6, s. 188–189]

Lineaarista DC-moottoria voidaan käyttää kommutoimattomana, kun magneettikenttä on ajokäämeihin nähden koko liikematkan samansuuntainen. Kyseessä on erikoissovellus, jota voidaan käyttää vain pienissä sovelluksissa ja lyhyissä liikkeissä (max 50 mm), esimerkiksi tietokoneen kovalevyn lukupäässä. Kommutoimattomat moottorit ovat rakenteeltaan ja ohjaukseltaan yksinkertaisia ja niillä pystytään saavuttamaan tarkkuutta vaativissa tehtävissä suuria nopeuksia. [4, s. 10–11, 7, s. 237–238]

### 3.2 Lineaarinen askelmoottori

Lineaarinen askelmoottori rakentuu hammastetusta staattorista sekä kestopagneetista ja sähkömagneeteista (EMA ja EBA) koostuvasta roottorista. Kuva 7 havainnollistaa lineaarisen askelmoottorin toimintaa.



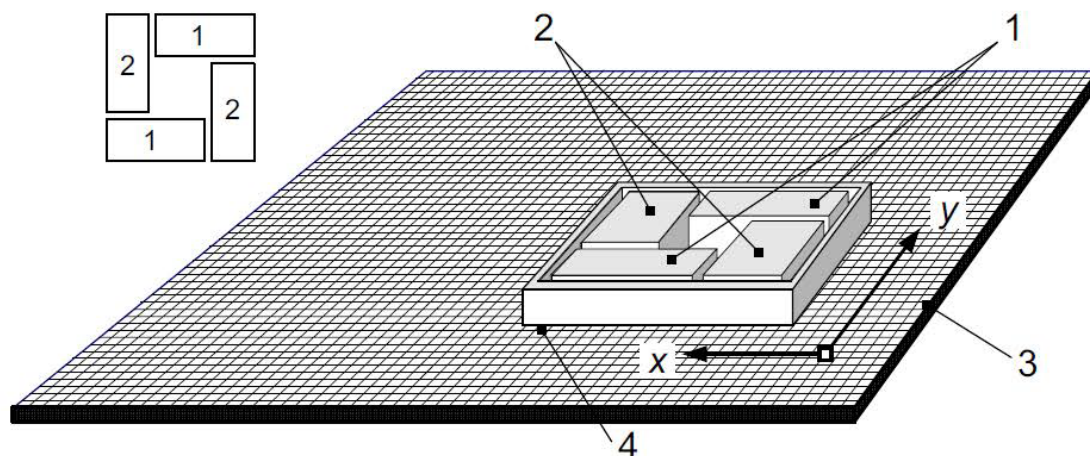
**Kuva 7.** Lineaarisen askelmoottorin toimintaperiaate [4, s. 5].

Kun virtaa syötetään kohdassa a sähkömagneettiin EMB nuolen osoittaman suunnan mukaisesti, kumoaa se navassa 4 olevan kestopagneetin aiheuttaman magneettikentän. Samalla navan 3 magneettikenttä kaksinkertaistuu. Kestomagneettiin EMA ei syötetä virtaa, joten kestopagneetin magneettikenttä jakautuu tasan napojen 1 ja 2 välille. Roottori asennoituu tällöin kohdan a mukaisesti, siten että napa 3 asettuu staattorin hampaan kohdalle.

Virtaa syötettäessä kohdan b mukaisesti sähkömagneettiin EMA, kumoutuu magneettikenttä navassa 1 ja kaksinkertaistuu navassa 2. Koska sähkömagneetti EMB on virraton, asettuu napa 2 staattorin hampaan kohdalle. Johtamalla virrat sähkömagneetteihin kohtiin c ja d mukaisesti saadaan roottori ohjattua kuvaajien mukaisiin kohtiin.

Lineaarisisilla askelmoottoreilla on mahdollista saavuttaa parempaa paikoitustarkkuutta käyttämällä puoli- ja mikroaskellusta tai useammista sähkö- ja kestopagneeteista koostuvaa yksikköä. Jos moottorilla halutaan tasaista liikettä, voidaan se saada aikaiseksi syöttämällä sähkömagneetteihin sini muotoista toisiinsa nähden  $\pi/2$  vaihesiirtoista virtaa. Tämä saa roottorin liikkuu tasaisella virran taajuudesta riippuvalla nopeudella. [8, s. 18–21]

Askelmoottoreissa ei yleensä käytetä takaisinkytkentää, mikä yksinkertaistaa järjestelmän ohjausta. Tästä voi myös aiheutua myös ongelmia, jos moottoria ylikuormitetaan, jolloin asematieto voi hukkua. Ongelmasta on mahdollisuus päästä eroon käyttämällä takaisinkytkettyä järjestelmää. Voimiltaan ja huippunopeuksiltaan askelmoottorit ovat tyypillisesti muita lineaarimoottoreita heikompia, jonka takia sen käyttökohteita ovat yleensä pieniä voimia vaativat sovellutukset, kuten piirturit, tulostimet ja kopiokoneet. [4, s. 5–7]



**Kuva 8.** Lineaarinen x-y askelmoottori, 1: x-suunnan moottori, 2: y-suunnan moottori, 3: Hammasmatriisi, 4: Ilmaväli [8, s. 20].

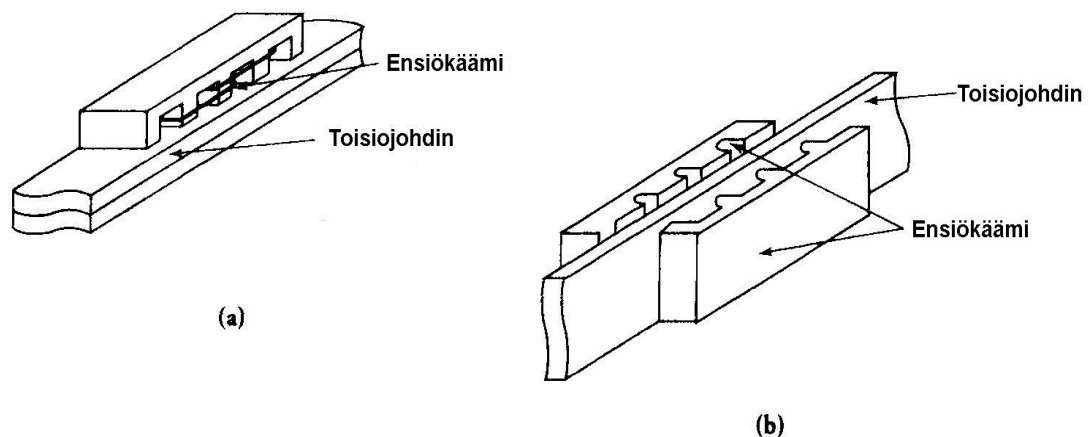
Lineaarisisista askelmoottoreista voidaan tehdä kuvan 8 kaltainen x-y moottori, jossa hammastus on kaksiulotteinen. Luistin osa koostuu yleensä 4 askelmoottorista, joista 2 saa aikaiseksi x-suunnan liikkeen ja toiset kaksi y-suunnan liikkeen. Koska käytössä on kaksi askelmoottoria suuntaansa, ei luistin lähde kiertymään. Luistin osa on hammasmatriisin päällä, jossa on käytetty väleissä heikosti magneettikenttää johtavaa ainetta. Näin matriisista on saatu tasainen, jolloin pystytään käyttämään luistimessa ilmalaakerointia. [4, s. 7, 8, s. 20]

Linearisessa x-y moottorissa roottorin ja staattorin välille syntyy voimakas magneettikenttä, mikä mahdollistaa moottorin sijoittamisen jopa ylösalaisin. Suuri

vetovoima mahdollistaa myös keveiden kuormien ripustamisen roottoriin ilman erillistä tukirakenteita. Moottorin paikoitus tarkkuus on tyypillisesti noin  $5\ \mu\text{m}$ , mitä voidaan parantaa tavallisen askelmoottorin tavoin lisäämällä antureilla takaisinkytkentä. [4, s. 7–8]

### 3.3 Lineaarinen induktiomoottori

Lineaarisen induktiomoottorin toimintaperiaate on lähes sama kuin pyörivän oikosulkumoottorin. Staattorikäimitykseen syötetty vaihtovirta luo koneen ilmaväliin liikkuvan magneettivuon, joka indusoi roottoriin virran. Kun tähän roottorin virralliseen johtimeen kohdistuu staattorin liikkuvaa magneettivuota, syntyy roottoriin lineaarinen voima. Jotta roottoriin syntyy pyörrevirtoja, on magneettikentän oltava liikkeessä roottorin suhteen. Tästä syystä roottorin liike ja magneettikentän täytyy olla epätahdissa, jonka takia moottorista voidaan käyttää myös nimitystä epätahtimoottori. Linearisessa induktiomoottorissa käämit eivät aina sijaitse staattorissa, joten on yleistä käyttää ensiö ja toisio termejä kuvattaessa lineaarisen induktiomoottorin rakennetta. Kuvassa 9 on esitetty lineaarisen induktiomoottorin rakenne. [9, s. 278–682]



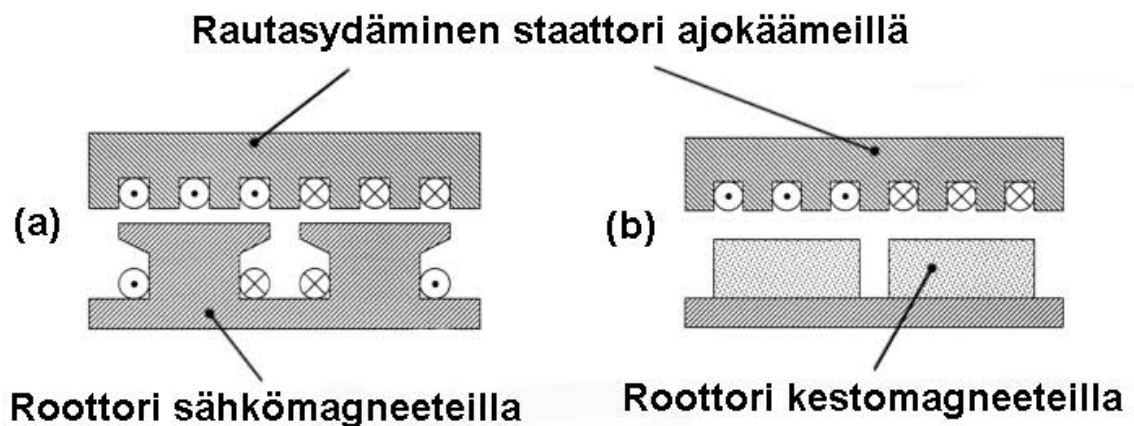
**Kuva 9.** a) yksipuoleisen b) kaksipuoleisen ensiökäämityksen omaavan lineaarisen induktiomoottorin rakenne, muokattu [9, s. 679].

Linearisessa induktiomoottorissa roottori pyritään yleensä pitämään yksinkertaisena, jolloin kelat sijoitetaan staattoriin, mikä tekee siitä suurempikokoisen. Tämä luo rajoitteen sen käytölle kokoonpanolaitteissa ja kevyessä automatiikassa. Moottori voidaan tehdä kuvan 9 mukaisesti yksi tai kaksipuoleisella ensiökäämityksellä. Lineaarisen induktiomoottorin käytön etuina on mahdollisuus tuottaa suuria voimia sekä

korkea huippunopeus, mutta moottorin suuret magneettiset voimat ensiön ja toision välillä rajoittavat sen käyttömahdollisuuksia hitaissa ja tarkkuutta vaativissa sovellutuksissa. [4 s. 8]

### 3.4 Lineaarinen tahtimoottori

Lineaarinen kestmagneettiatahtimoottori on rakenteeltaan hyvin samanlainen kuin harjaton tasavirtamoottori. Staattorin käämeihin johdettu vaihtosähkö yhdessä roottorissa olevien kestmagneettien tai sähkömagneettien magneettikentän kanssa saa aikaiseksi lineaarisen voiman. Kuvassa 10 on esitetty rautasydämisen lineaarisen tahtimoottorin rakenne sähkömagneetilla ja kestmagneetilla varustetulla roottorilla.



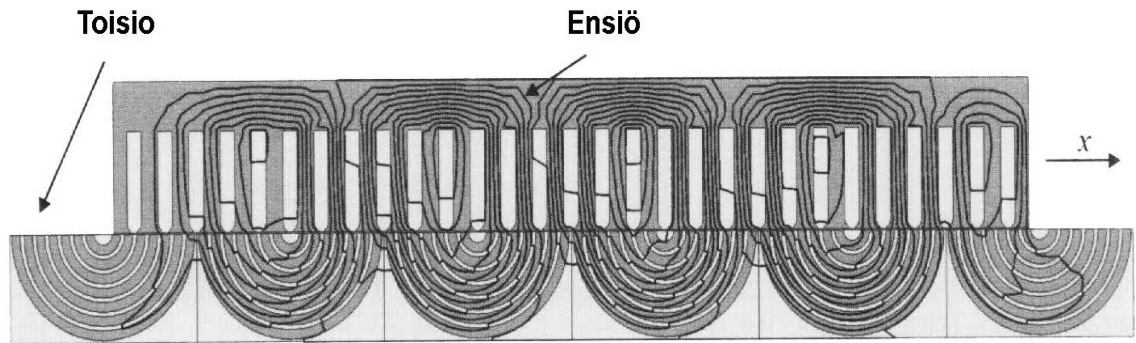
**Kuva 10.** Lineaarisen tahtimoottorin rakenne varustettuna a) sähkömagneetilla b) kestmagneetilla, muokattu [10].

Lineaarisen tasavirtamoottorin tavoin myös lineaarisessa tahtimoottorissa voidaan parantaa ajokäämeihin vaikuttavan magneettikentän voimakkuutta käyttämällä ajokäämitysten kanssa rautasydäntä. Myös yksi- tai kaksipuoleisen magneettiradan käyttö on mahdollista. Lineaarinen tahtimoottori omaa hyvän paikoitustarkkuuden ja kiihtyvyyden sekä pystyy korkeisiin nopeuksiin. [11]

### 3.5 Lineaarinen reluktanssimoottori

Lineaarisen reluktanssimoottorin toiminta perustuu reluktanssieroihin. Ajokäämitykset voivat sijaitsevat staattorissa tai roottorissa. Toisioon on tehty vuopolkuja, jotka ovat magneettisesti hyvin johtavia. Ensiöön syötettäessä vaihtovirtaa, syntyy magneettikenttä, jota toisio pyrkii seuraamaan. Magneettivuo pyrkii löytämään magneettiselle

johtavuudelle helpoimman mahdollisen kulkureitin, joten pienimmän reluktanssin omaava reitti siirtyy vuon kohtaan, mikä luo roottoriin liikuttavan lineaarisen voiman. Kuvassa 11 on esitetty lineaarisen reluktanssimoottorin rakenne tapauksessa jossa ajokäämitykset sijaitsevat roottorissa. Kuvassa on esitetty myös magneettikentän jakautuminen.[12]



**Kuva 11.** Lineaarisen reluktanssimoottorin rakenne ja magneettikentän jakautuminen liikuttaessa x-suuntaan, muokattu [12].

Kuvassa toisio muodostuu kaarevista teräslaminoinneista. Liikkeen ollessa suuntaan x, jakaantuu magneettikenttä teräslaminoinneissa kuvan 11 mukaisesti. Toision yksinkertainen rakenne tekee moottorista halvan valmistaa sekä ylläpitää. Yhdistettynä tähän varsin korkea hyötysuhde, on lineaarisesta reluktanssimoottorista ruvennut tulemaan kiinnostava vaihtoehto tulevaisuuden moottorijärjestelmiin. [13]



## 4 Nykyiset sovelluskohteet

Lineaarimoottoreiden monipuoliset ominaisuudet mahdollistavat niiden käytön erilaisissa sovelluskohteissa. Tässä luvussa käsitellään erilaisia käytössä olevia lineaarimoottoreiden sovelluskohteita.

### 4.1 Kuularuuvi- ja hammashihnakäytöt

Lineaarimoottoreilla voidaan korvata teollisuudessa ja julkisissa kohteissa kuularuuvi- ja hammashihnakäyttöjä. Lineaarimoottorilla pystytään tällaisissa käytöissä parantamaan tarkkuutta, kun ei ole välyksiä, eikä joustavia osia. Myös luottavuus ja käyttövarmuus paranevat, kun kuluvien osien määrä laskee. Hyödyiksi voidaan laskea myös suuri kiihtyvyys, laaja-alainen liikenopeus sekä selkeä ja yksinkertainen rakenne.

Esteenä lineaarimoottoreiden laajempaan käyttöönottoon on niiden korkea hinta, mikä johtuu kestopagneettimateriaalien kalleudesta. Myös moottorin jäähtytyksen luomat haasteet sekä pidemmällä matkoilla ongelmaksi tuleva staattoriosan raskaus hidastavat yleistymistä. [4, s. 22–23]

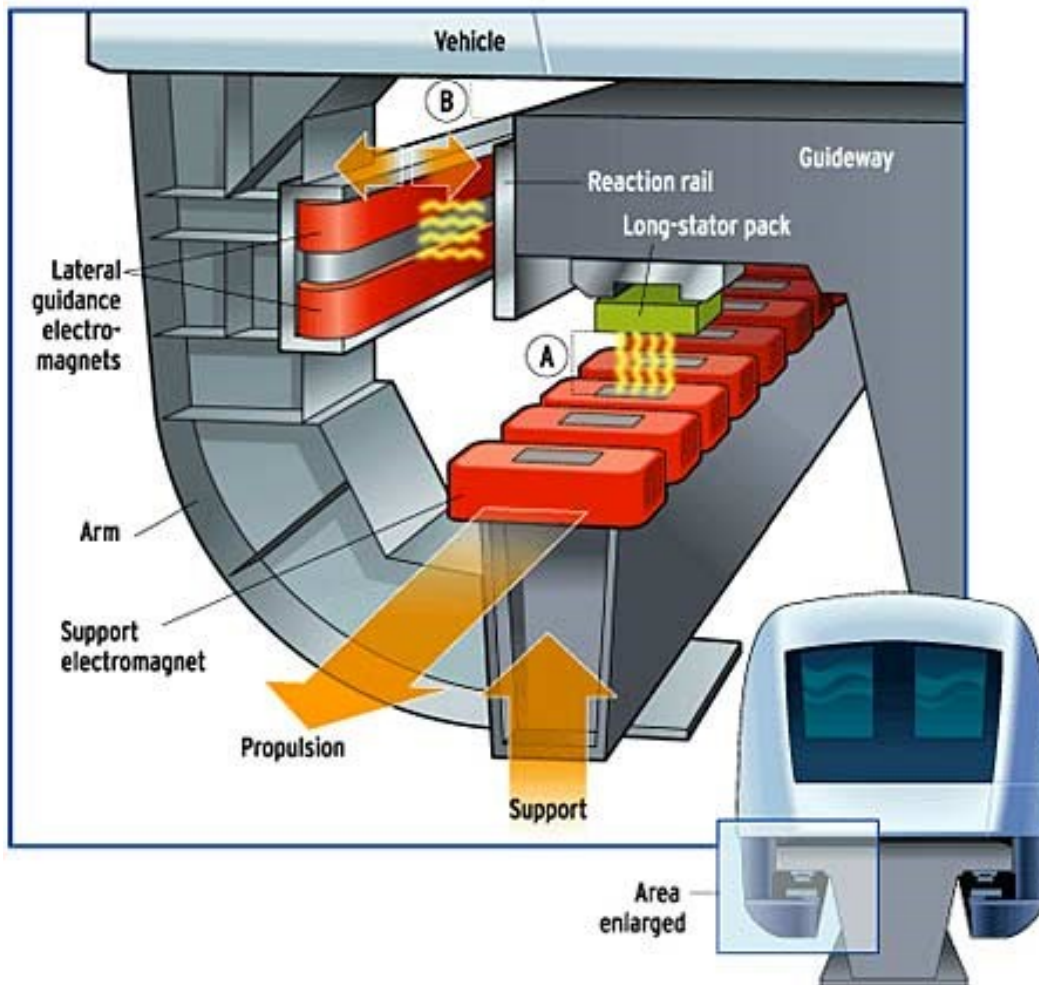
Esimerkiksi hissinovien aukaisujärjestelmässä voidaan käyttää lineaarimoottoria. Lineaarista induktimoottoria, tahtimoottoria tai reluktanssimoottoria hyödyntämällä päästään eroon pyörivän moottorin kanssa tarvittavista vaihteista, kammista ja ketjuista. Näin saavutetaan tarkempi ja nopeampi ovenavaus, kun ei ole enää välyksiä ja joustavia osia. Samalla päästään myös halvempiin ylläpitokuluihin, kun kuluvien osien määrä laskee. [14]

### 4.2 Maglev-junat

Maglev-junilla eli magnetic levitation transport -junilla tarkoitetaan junaan joka hyödyntää lineaarimoottoreiden teknologiaa junan liikuttamiseen. Lineaarimoottorin staattori on sijoitettu rautatiehen ja roottori osa itse junaan. Näin saadaan juna levitoimaan rautatien yläpuolella, mikä vähentää kitkaa, parantaa ohjattavuutta ja kiihtyvyyttä sekä mahdollistaa kovemmat mutkanopeudet kuin perinteisillä pyörillä kulkevilla suurnopeusjunilla.

Mailman ensimmäistä kaupalliseen käyttöön tarkoitettua levitaatiojunayhteyttä alettiin rakentaa 2011 Kiinaan ja se avattiin 2014. Junayhteys toimii Kiinan Shanghaissa metropolin keskustan ja lentokentän välillä. Junan kaupallisessa käytössä

huippunopeudeksi saavutettiin 2014 431 km/h, joka oli samalla kaupallisessa käytössä olevan junan maailmanennätysnopeus. Testikäytössä junalla on pystytty saavuttamaan 501 km/h huippunopeus. Kuvassa 12 on esitetty Shanghai maglev-junan lineaarimoottorin rakenne.[15]



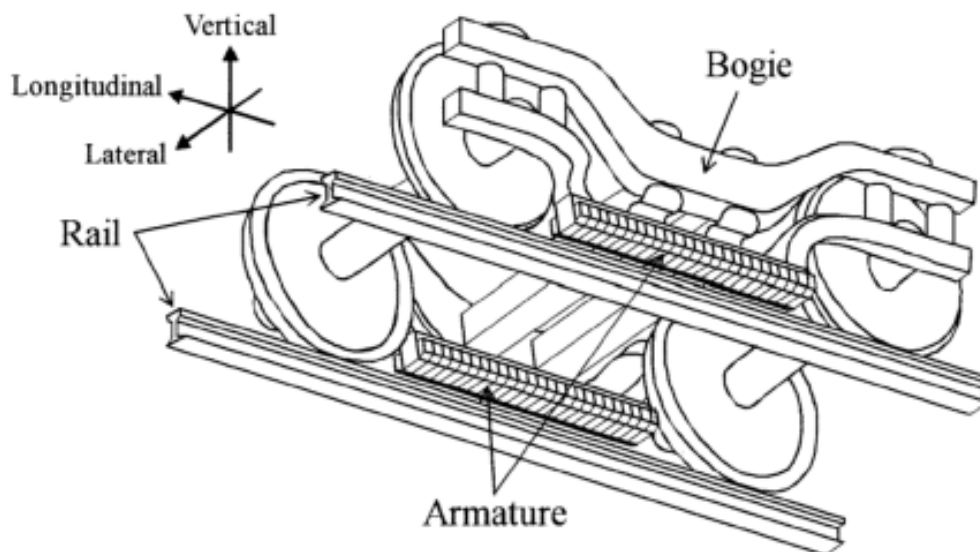
**Kuva 12.** Shanghai Maglev-junan lineaarimoottorin rakenne [16].

Shanghai Maglev-junassa moottorointi on toteutettu lineaarisella tahtimoottorilla. Ajokäämitykset ovat staattorissa, mikä sijaitsee raiteen pohjassa. Yhdessä junan tukivarressa pystysuunnassa olevien sähkömagneettien kanssa, aiheuttavat ne junaan eteenpäin liikuttavan lineaarisen voiman. Pystysuunnan sähkömagneeteilla saadaan aikaiseksi myös junaa leijuttava voima sekä jousitus. Junan ja raiteen väliin jää 15 cm:n rako. Raon ylläpito vaatii tarkkaa ohjausta ja tätä varten raon väliä mitataan 100 000 kertaa minuutissa. Vaakasunnassa olevien sähkömagneettien tehtävä on ohjata junaa pysymään sivuttaissuunnassa sopivalla etäisyydellä raiteesta. [16]

Maailman nopeimman junan ennätys on tällä hetkellä hallussa japanilaisella Japan Raillwayn maglev-junalla. Juna saavutti testi käytössä vuonna 2015 yli 600 km/h olevan nopeuden. Moottorina siinä on käytetty lineaarista tahtimoottoria, mutta toisinkuin Shanghai- maglev junassa, junan liikuttava lineaarinen voima on tuotettu raiteen sivussa olevilla ajokäämityksillä. Japan Raillwayn maglev-junan on suunniteltu tulevan kaupalliseen käyttöön 2027. [17, 18]

### 4.3 Raide-jarrujärjestelmä

Junien nopeuksien kasvaessa jarrujärjestelmien merkitys korostuu. Tavallisten jarrutusjärjestelmien ongelmaksi muodostuu suurista nopeuksista jarruttaessa suuri lämmöntuotanto. Kuvan 13 kaltaisella lineaarista induktimoottoria hyödyntävällä järjestelmällä päästään huomattavasti vähäisempään lämmöntuotantoon jarruttaessa. [19]



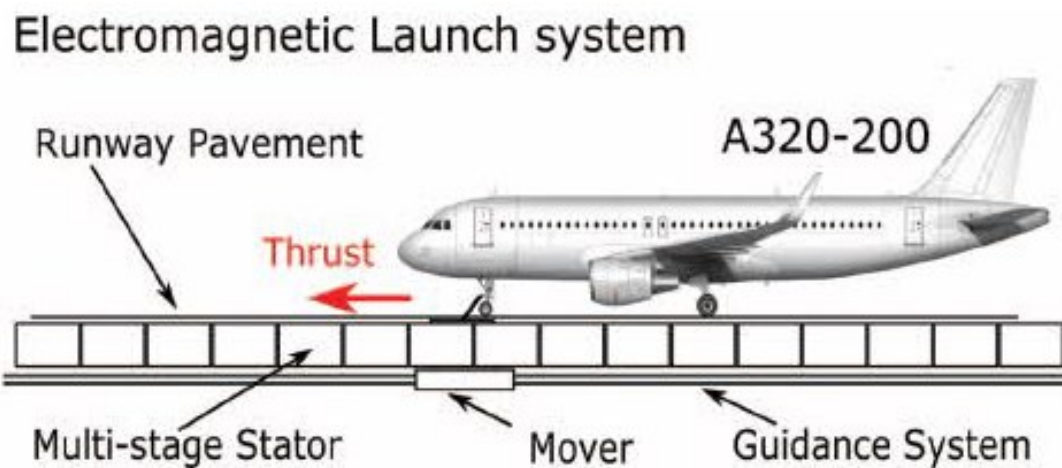
**Kuva 13.** Lineaarinen induktimoottori jarrujärjestelmä raide käyttöön [19].

Jarrutus tapahtuu lineaarista induktimoottoria hyödyntäen. Ension käämit sijaitsevat junan akselien välillä ja toisiopuolena toimii ratakisko. Jarrutuksen käynnistyminen vaatii vain pienen sähkövoiman, jonka jälkeen moottorin toimiessa liikesuuntaa vasten syntyy käämeihin jatkuvasti virtaa. Näin jarruttamisesta saadaan tavallisia jarrujärjestelmiä turvallisempia, koska jarrut toimivat myös ilman pääenergia lähdettä. [20]

#### 4.4 Sähkömagneettinen ilma-alusten laukaisujärjestelmä

EMALS eli electromagnetic aircraft launch system on järjestelmä missä lentokoneita laukaistaan lineaarimoottorilla kiihdyttäen. Järjestelmä on suunniteltu Yhdysvalloissa korvaamaan lentotukialusten kaasukäyttöiset katapulttijärjestelmät. Järjestelmän lineaarimoottorina voidaan käyttää induktiomoottoria, kestopagneetti- tai superkondensaattori- tai reluktanssimoottoria. [21]

Lineaarimoottorin etuina suhteessa kaasukäyttöiseen katapulttiin, on sen suuri tehonanto, pienempi koko, alempi hinta, vähäisempi huollontarve, parempi luotettavuus sekä säädettävyyttä. Parempi säädettävyyttä luo mahdollisuuden laukaista eri ilma-aluksia eri tehoilla sekä tehdä kiihdytyksistä vähemmän nykäiseviä, jolloin ilma-alusten etupyörästä rasittuu vähemmän. Lineaarimoottorin käyttö myös yksinkertaistaa kokonaisjärjestelmää, koska lineaarimoottorilla voidaan toteuttaa laukaisukelkan kiihdytys, jarrutus ja aloitusasentoon palautus ilman ylimääräisiä järjestelmiä. [22, 23]

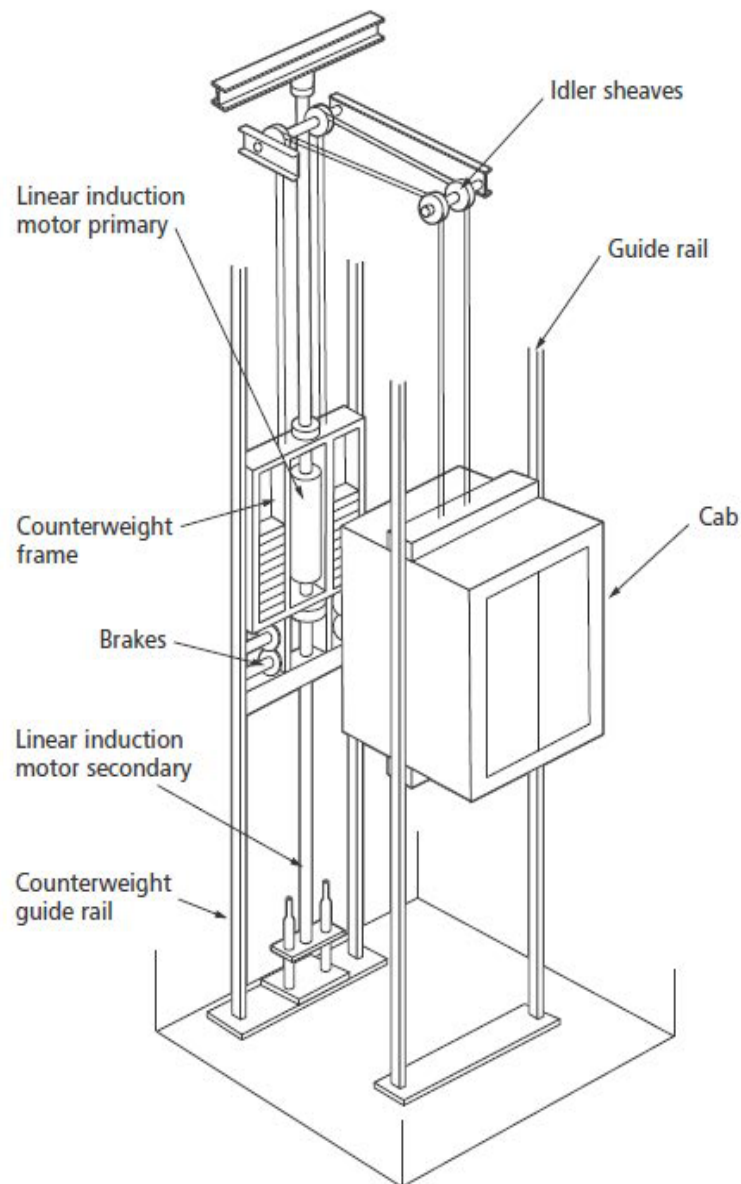


**Kuva 14.** Siviililentokoneen laukaisujärjestelmä [24].

Myös siviili-ilmailun puolella on tutkittu mahdollisuutta käyttää sähkömagneettista laukaisujärjestelmää. Jos lentokoneet laukaistaisiin kuvan 14 kaltaisella laukaisujärjestelmällä, päästäisiin alhaisempiin polttoaine kulutuksiin, vähäisempiin päästöihin sekä lentokoneitten moottorivaatimukset pienenisivät. Järjestelmällä saavutettaisiin lentokoneelle myös huomattavasti nopeampi kiihdytys kuin mitä nykyisten lentokoneiden moottorit pystyvät, mikä mahdollistaisi lentokenttien kiitoratojen lyhentämisen. [25]

## 4.5 Hissikäytöt

Lineaarimoottorilla voidaan korvata hissikäytössä tavallinen sähkömoottori vetopyöräkoneistossa. Tavallisin tapa on sijoittaa lineaarisen induktiomoottorin ensiö vastapainoon kuvan 15 mukaisesti. Toisiö sijoitetaan tällöin pystyyn koko hissimatkan korkuiseksi. Toisiö on kiinnitetty yläosastaan ja alaosa vain vakauttaa toisiota. Näin saadaan säästetty tilaa, kun koko hissikoneisto saadaan mahtumaan hissikuiluun. Lineaarimoottorilla pystytään hissikäytöissä tuottamaan tasaisempi ja energiatehokkaampi liike hissikopille, mutta lineaarimoottoreiden korkea hinta suhteessa pyöriviin sähkömoottoreihin on jarruttanut niiden yleistymistä [26, 27]

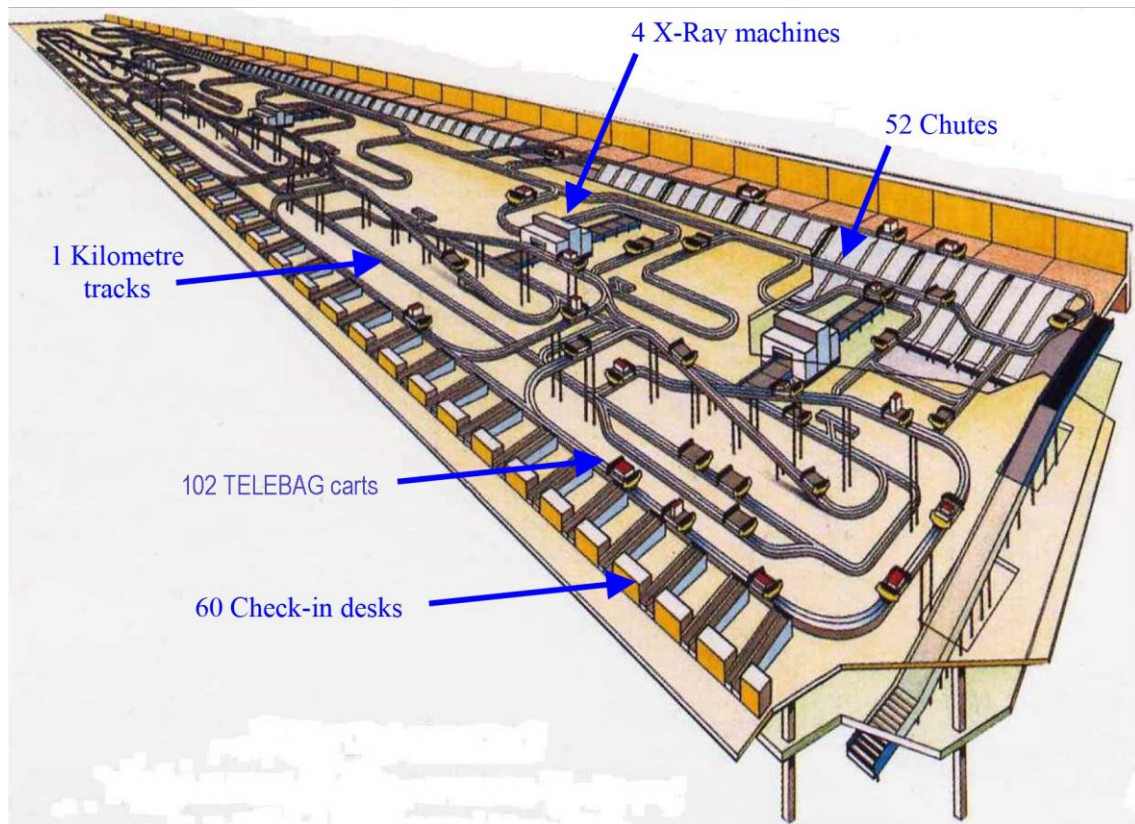


**Kuva 15.** Hissi lineaarisella induktiomoottorikäytöllä [26].

Kehitteillä on myös hissijärjestelmiä, missä lineaarimoottori on asennettu suoraan hissikoppiin. Rakennuksissa hissikuilut vievät valtaisesti tilaa, kun kuilussa pystytään ajamaan köysien takia vain yhtä hissikoppia. Järjestelmissä joissa lineaarimoottori on asennettu suoraan hissikoppiin, ei tarvita nousemiseen köysiä. Näin voidaankin samassa hissikuilussa käyttää useampaa hissikoppia. Moottorina tällaisessa ratkaisussa käytetään yleensä joko lineaarista reluktanssimoottoria tai lineaarista kestopagneettitahtimoottoria. Köysien puuttuminen mahdollistaa tulevaisuudessa myös hyvinkin monimutkaisten hissijärjestelmien kehittämisen, kun pystyliikkeen lisäksi hissikoppi pystyy liikkumaan myös sivuttaissuunnassa. Haasteita tämän tyyppisille hisseille tuo ohjauksen monimutkaistuminen, turvajärjestelmien uudelleensuunnittelu sekä tavallisia hissejä korkeammat hinnat. [28]

#### **4.6 Lentokenttien matkalaukkujen käsittelyjärjestelmä**

Lentokenttien matkalaukkujen käsittelyjärjestelmissä on perinteisesti käytetty hihnäkäyttöjä. Hihnäkäytöt voidaan korvata lineaarisella induktiomootorilla hyödyntämällä järjestelmää missä laukkuja kuljetetaan vaunuilla. Vaunu sisältää ensiön ja ohjausjärjestelmän. Vaunut pystyvät näin hallitsemaan omaa nopeuttaan, etäisyyksiä toisistaan sekä suorittamaan lastaus ja purku toimintoja tavallisten hihnapöytien luona. Virran syöttö vaunuihin on toteutettu harjoilla kiskoista. [29] Kuvassa 16 on kuvattu Luttonin lentokentän matkalaukkujen käsittelyjärjestelmä.



**Kuva 16.** Luttunen lentokentän matkatavaroiden käsittelyjärjestelmä [29].

Luttunen lentokentällä on käytössä lineaarisilla induktiomootoreilla toimiva vaunujärjestelmä. Käytössä on 102 kääry ja ne käsittelevät päivittäin 11 000 laukku. Koska jokaisessa kääryssä on oma moottori, voidaan kääryt huoltaa yksittäin, jolloin järjestelmä pystyy olemaan jatkuvassa käytössä. [29]

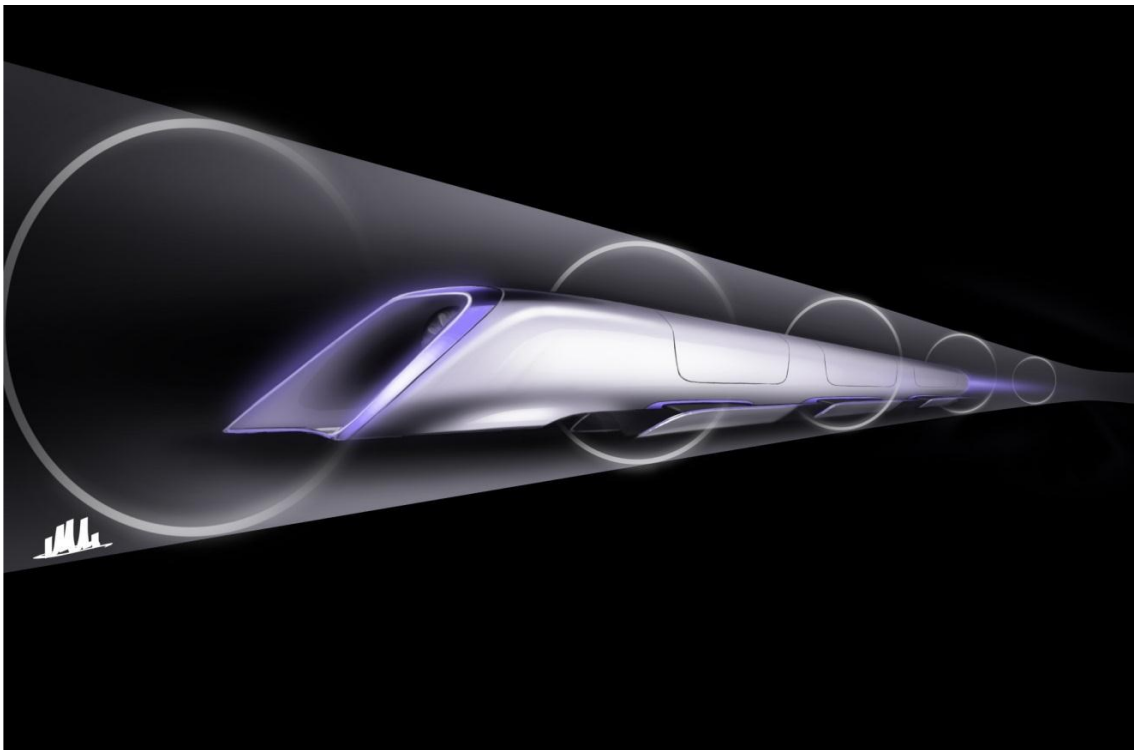


## 5 Tulevaisuuden sovelluskohteet

Lineaarimoottoreista on olemassa myös monia suunnitteilla olevia sovelluskohteita ja tulevaisuuden konsepteja. Tässä luvussa tutustumme niihin.

### 5.1 Hyperloop

Hyperloopissa idea on putkessa hyvin nopeasti liikkuvasta kuljetuskapselista. Putken on tarkoitus olla alipaineistettu, jolloin kapseliin kohdistuva ilmanvastus olisi minimaalinen. Kapselia ajettaisiin lineaarimoottorilla, jolloin ilmanvastuksettomassa tilassa päästäisiin jopa 1 000 km/h nopeuksiin asti.



**Kuva 17.** Hyperloop matkustajaliikenne kapselin konseptikuva [30].

Elon Musk esitteli Yhdysvalloissa kuvan 17 mukaisen Hyperloop-konseptin vuonna 2013 [31]. Radan tarkoituksena olisi päästä Los Angelesista San Franciscoon puolessa tunnissa. Suunnitelmassa lineaarimoottorina toimii lineaarinen induktiomoottori, jonka takia roottori osana toimivasta kapselista saadaan yksinkertainen ja halpa moottorin kannalta. Staattori osa käämeineen sijaitsee putkessa ja tällä pystyttäisiin kiihdyttämään



ja jarruttamaan putki 480–1 220 km/h nopeuksiin. Järjestelmän kaipaama energia olisi tarkoitus saada Hyperloopin putken päälle sijoitettavista aurinkopaneeleista. [30]

Sittemmin Hyperloop suunnitelmia on julkaistu muuallakin maailmassa. Vuonna 2016 Dupaissa julkaistiin Hyperloop one suunnitelma, missä tarkoituksena on rakentaa Jebel Alin satamaan Hyperloop kuljettamaan rahtia. Suunnitelman mukaan Hyperlooppi pitäisi olla käytössä 2020- luvun alkupuolella. [32] Myös Denveriin on suunnitteilla Hyperloop ratkaisu, jossa käytössä olisi kelkkoja, joihin voisi ajaa auton, matkustajasukkulan tai rahtikontin. Poiketen Elon Munskin Hyperloop ratkaisusta, Denverissä ei putkea alipaineistettaisi. Huippunopeus jäisi tämän takia vain hiukan päälle 300 km/h. [33]

## 5.2 Lineaarimoottorit ja avaruus

Jotta avaruuteen pystytään lähettämään kalustoa ja väkeä, täytyy alusten päästä irti maapallon gravitaatio kentästä. Nykyisellään alukset laukaistaan rakettimoottorilla, mikä vie valtaisia määriä polttoainetta. Nasa onkin tehnyt 1990 luvulta asti tutkimusta rakettimoottoreiden korvaamiseen sähkömagneettisen laukaisujärjestelmän avulla. Laukaisussa hyödynnettäisiin lineaarista induktiomootoria, jonka käyttöä puoltaa sen tosi puolen keveys ja magneettittomuus. Hyötyinä lineaarimoottorin käytöstä tavalliseen laukaisuratkaisuun verrattuna olisi vähäisemmät riskit räjähtävien polttoaineiden kanssa, pienemmät pakokaasut, laukaisu tiheyden nousu, vähäisempi huollon tarve sekä parempi skaalautuvuus eri lasteille. [34]

Toisena vaihtoehtona avaruuteen pääsyyn on tutkittu avaruushissiä. Avaruushissi perustuu hyvin lujaan vaijeriin, jonka toinen pää olisi ankkuroitu päiväntasaajan lähelle. Toinen pää leijuisi avaruudessa maanvetovoiman ulkopuolella vastapainon pitämänä. Moottorina käytettäisiin lineaarimoottoria. Suurimpana haasteena järjestelmän rakentamisessa on riittävän kovan vaijerimateriaalin saaminen. Vaijerin materiaaliksi on esitetty hiilinanoputkea, mutta niiden valmistaminen nykyteknologialla on liian hidasta ja kallista. Valmistus teknologian uskotaan kuitenkin kehittyvän ja Japanilainen yritys Obayashi aikookin yrittää rakentaa hissien avaruuteen ennen vuotta 2050. [35, 36]

## 6 Yhteenveto

Tässä työssä perehdyttiin lineaarimoottoreihin ja niiden sovelluskohteisiin. Lineaarimoottoreiden teoriapohja on sama kuin tavallisilla pyörivillä sähkömoottoreilla. Erona tavalliseen pyörivään sähkömoottoriin, lineaarimoottorin roottori ja staattori on levitetty tasaiseksi levyksi. Moottorin ensiöpuoli koostu ajokäämeistä, joihin moottorityypistä riippuen johdetaan tasavirtaa tai vaihtovirtaa. Toisiopuolella induktimoottorilla on häkkikäänitys, reluktanssimoottorilla uritettu teräslaminointi ja tasavirtamoottorilla sekä tahtimoottorilla sähkömagneetti tai kestopagneetti.

Linearisessa tasavirtamoottorissa ja tahtimoottorissa voidaan magnetointi tuottaa yksitai kaksipuoleisella magneettiradalla tai magneetit voivat olla pyöreässä tangossa. Erityyppisillä magnetointitavoilla pyritään saavuttamaan mahdollisimman voimakas magneetikenttä ajokeloille. Magneetikenttää voidaan parantaa myös käyttämällä rautasydäntä ajokäämien kanssa. Tällä tavoin saadaan magneetikenttä keskittymään paremmin ja moottorista tulee näin häviöttömämpi.

Lineaarimoottoreiden valttina on niiden suuri kiihtyvyys, laaja-alainen liikenopeus sekä selkeä ja yksinkertainen rakenne. Jos tavallisella pyörivällä sähkömoottorilla halutaan saada aikaiseksi lineaarinen liike, vaatii se käyttöön vaihteita, kuularuuveja tai hihnoja. Tällaisissa käytöissä lineaarimoottorilla saavutetaan säästöjä, kun tarvitaan vähemmän osia sekä huoltokulut laskevat, kun on vähemmän kuluvia osia.

Liikennratkaisuissa lineaarimoottorin etuna on sen suuri liikenopeus sekä korkea kiihtyvyys. Maglev-junilla saavutetaan tavallisiin juniin verrattuna huomattavasti korkeampi liikenopeus, parempi ohjattavuus sekä kitkattomuuden takia alhaisempi liikevastus. Lineaarimoottoritekniikka mahdollistaa myös tulevaisuudessa huippunopeiden Hyperloop yhteyksien kehittämisen.

Lineaarimoottorit mahdollistavat myös aikaisemmin haastavasti toteutettavissa olevia sovellutuksia, kuten hissikäytöissä sivuittaisliikkeen ja useamman hissikopin käytön samassa hissikuilussa. Lineaarimoottori tekniikoiden yhä kehittyessä ja yleistyessä luo se hintojen laskiessa niistä potentiaalisen tulevaisuuden vaihtoehdon moniin lineaarisenliikkeen sovelluksiin.

## Lähteet

- [1] Laplacekracht: kracht op een stroomvoerende geleider, web page. Available (accessed 4.12.2017): <https://ingangsexamen-geneeskunde.be/training-sheet/laplacekracht-kracht-stroomvoerende-geleider-2/>.
- [2] Sähkövoimatekniikkaopus, verkko sivu. Saatavilla (lainattu 4.12.2017): [http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt\\_opus/10sahkokoneet\\_1osa.pdf](http://www.leenakorpinen.fi/archive/svt_opus/10sahkokoneet_1osa.pdf).
- [3] The Linear Induction Motor, web page. Available (accessed 18.11.2017): <https://astarmathsandphysics.com/a-level-physics-notes/electricity/2600-the-linear-induction-motor.html>.
- [4] R. Heikkilä, I. Karjalainen, R. Tuokko, Kevyeen kokoonpanoon soveltuvat lineaarimootorit, Raportti 49, Tampereen teknillinen korkeakoulu, Tampere, 2000, 25 s.
- [5] T. Baldacchini, Three-Dimensional Microfabrication Using Two-Photon Polymerization, William Andrew, US, 2016, 485 p.
- [6] R. Crowder, Electric Drives and Electromechanical Systems, Newnes, 2006, 312 p.
- [7] N. Ida, Sensors, actuators, and their interfaces, IET, SciTech Publ, Edison, NJ, 2014, 784 p.
- [8] J.F. Gieras, B. Tomczuk, Z.J. Piech, Linear synchronous motors: transportation and automation systems, 2nd edition ed. 2011, 520 p.
- [9] B.S. Guru, H.R. Hiziroğlu, Electric machinery and transformers, third edition, 3rd. ed. ed. Oxford University Press, New York, 2001, 720 p.
- [10] R. Hellinger, P. Mních, Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook, Proceedings of the IEEE, Vol. 97, Iss. 11, 2009, pp. 1892-1900. <http://ieeexplore.ieee.org/document/5280196>.
- [11] L. Tong, M. Lin, Study on a high thrust force bi-double-sided permanent magnet linear synchronous motor, Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8, Iss. 3, 2016, pp. 1-10. <http://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/1687814016641291>.
- [12] Anton Hamler, Mladen Trlep, Bozidar Hribernik, Influence of secondary segment shape of linear reluctance motors on forces, Compel, Vol. 19, Iss. 2, 2000, pp. 452-457. <https://search.proquest.com/docview/209895344>.

- [13] A. Lachheb, J. Khediri, L.E. Amraoui, Modeling of a linear switched reluctance actuator, 2016 International Conference on Electrical Sciences and Technologies in Maghreb (CISTEM), IEEE, pp. 1-8.
- [14] Aymen Lachheb, Jalel Khediri, Lilia El Amraoui, Performances Analysis of a Linear Motor for Sliding Door Application, International Journal of Power Electronics and Drive Systems, Vol. 8, Iss. 3, 2017, pp. 1139-1146.  
<https://search.proquest.com/docview/1944848882>.
- [15] J. Larminie, J. Lowry, Electric vehicle technology explained, 2. ed. ed. Wiley, Chichester, 2012, 340 p.
- [16] Faster than a speeding bullet train: China is throttling up a 430-km/h magnetically levitated train to link Shanghai and its airport, IEEE Spectrum, Vol. 40, Iss. 8, 2003, pp. 30-34.
- [17] Autoblog: Japan's maglev train sets speed record of 374 mph, Newstex, web page. Available (accessed 24.11.2017): Chatham,  
<https://search.proquest.com/docview/1687626313>.
- [18] Japan's superconducting Maglev train, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 5, Iss. 1, 2002, pp. 9-15.
- [19] Y. Sakamoto, T. Kashiwagi, M. Tanaka, H. Hasegawa, T. Sasakawa, N. Fujii, Rail brake system using a linear induction motor for dynamic braking, Electrical Engineering in Japan, Vol. 178, Iss. 2, 2012, pp. 29-38.
- [20] Y. Sakamoto, T. Kashiwagi, H. Hasegawa, T. Sasakawa, Y. Karino, Performance of Linear Motor Type Rail Brake Using Roller Rig Test Bench, Quarterly Report of RTRI, Vol. 53, Iss. 1, 2012, pp. 41-45.  
<https://jlc.jst.go.jp/DN/JALC/00388754984?from=SUMMON>.
- [21] S. Mu, J. Chai, X. Sun, S. Wang, A Variable Pole Pitch Linear Induction Motor for Electromagnetic Aircraft Launch System, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 43, Iss. 5, 2015, pp. 1346-1351. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7083729>.
- [22] M.R. Doyle, D.J. Samuel, T. Conway, R.R. Klimowski, Electromagnetic aircraft launch system-EMALS, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 31, Iss. 1, 1995, pp. 528-533. <http://ieeexplore.ieee.org/document/364638>.
- [23] A. Musolino, M. Raugi, R. Rizzo, M. Tucci, Optimal Design of EMALS Based on a Double-Sided Tubular Linear Induction Motor, IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. 43, Iss. 5, 2015, pp. 1326-1331. <http://ieeexplore.ieee.org/document/7072509>.

[24] Superconducting and Conventional Electromagnetic Launch System for Civil Aircraft Assisted Take-off, in: 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-6.

[25] L. Bertola, T. Cox, P. Wheeler, S. Garvey, H. Morvan, Superconducting Electromagnetic Launch System for Civil Aircraft, IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 26, Iss. 8, 2016, pp. 1-11.  
<http://ieeexplore.ieee.org/document/7539345>.

[26] J. Butcher Ken, Types of Transportation Systems, in: Anonymous (ed.), CIBSE Guide D - Transportation Systems in Buildings, 4th Edition ed., CIBSE, 2010, pp. 1-39.

[27] E.H. Abdelhameed, Concurrent speed and position tracking of elevator driven by linear induction motor using cascade PI-PI control system, 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), IEEE, pp. 468-473.

[28] A. Onat, E. Kazan, N. Takahashi, D. Miyagi, Y. Komatsu, S. Markon, Design and Implementation of a Linear Motor for Multicar Elevators, IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, Vol. 15, Iss. 5, 2010, pp. 685-693.

[29] G. Coquery, J. Sebillaud, Airport baggage handling system using U asynchronous linear motors, web page. Available (accessed 24.11.2017):  
<http://www.dynabag.com/telebag/publication.7.pdf>.

[30] Hyperloop Alpha  
 , SpaceX, web page. Available (accessed 24.11.2017):  
[http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop\\_alpha.pdf](http://www.spacex.com/sites/spacex/files/hyperloop_alpha.pdf).

[31] Hyperloop: No pressure, IEEE Spectrum, Vol. 53, Iss. 1, 2016, pp. 51-54.

[32] ValueWalk: Hyperloop One Looking To Dubai For First Cargo Hyperloop - ProQuest, <https://search-proquest-com.libproxy.tut.fi/docview/1828829430?pq-origsite=summon&https://search.proquest.com/abicomplete/advanced>.

[33] D. Cooper Autoblog: Denver will test Hyperloop-inspired transport system - ProQuest, web page. Available (accessed 12.12.2017): <https://search-proquest-com.libproxy.tut.fi/docview/1964715995/citation/E6BBBD3DC5A841BDPQ/1?accountid=27303>.

[34] M. Wright, S. Kuznetsov, K. Kloesel, A Lunar Electromagnetic Launch System for In-Situ Resource Utilization, 15th International Symposium on Electromagnetic Launch Technology, Brussels; Belgium, 17-20 May 2010, NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, United States, paper. 229.

[35] Y. Sadov, A. Nuralieva, Loaded sectioned space elevator, Cosmic Research, Vol. 53, Iss. 3, 2015, pp. 230-236. <https://search.proquest.com/docview/1683026111>.

[36] Japanilaiset aikovat rakentaa hissin avaruuteen vuoteen 2050 mennessä, verkko sivu. Saatavilla (lainattu 12.12.2017):

<https://www.tekniikkatalous.fi/tiede/avaruus/2012-02-27/Japanilaiset-aikovat-rakentaa-hissin-avaruuteen-vuoteen-2050-menness%C3%A4-3307863.html>.