

Elektrotehnički fakultet
Univerzitet u Beogradu

SEMINARSKI RAD

Uporedna analiza linearnog sinhronog i asinhronog motora

Stojadinović Miloš 03/403
Stamenković Dragan 03/126

Sadržaj

1. Linearni asinhroni motor sa kratkim statorom (LIM).....	2
1.1. <i>Osnovna konfiguracija</i>	2
1.2. <i>Prednosti</i>	4
1.3. <i>Nedostaci</i>	5
2. Pogon sa linearnim sinhronim motorom (LSM) sa dugačkim statorom	6
2.1. <i>Osnovna konfiguracija</i>	6
2.2. <i>Prednosti</i>	9
2.3. <i>Nedostaci</i>	9
3. Poredjenje LIM i LSM pogona.....	10
3.1. <i>Fleksibilnost na promenljive i neizvesne zahteve</i>	10
3.2. <i>Operativna pouzdanost</i>	11
3.3. <i>Investicioni troškovi</i>	11
3.4. <i>Operativni troškovi</i>	13
4. Zaključak	15
5. Literatura:	16

1. Linearni asinhroni motor sa kratkim statorom (LIM)

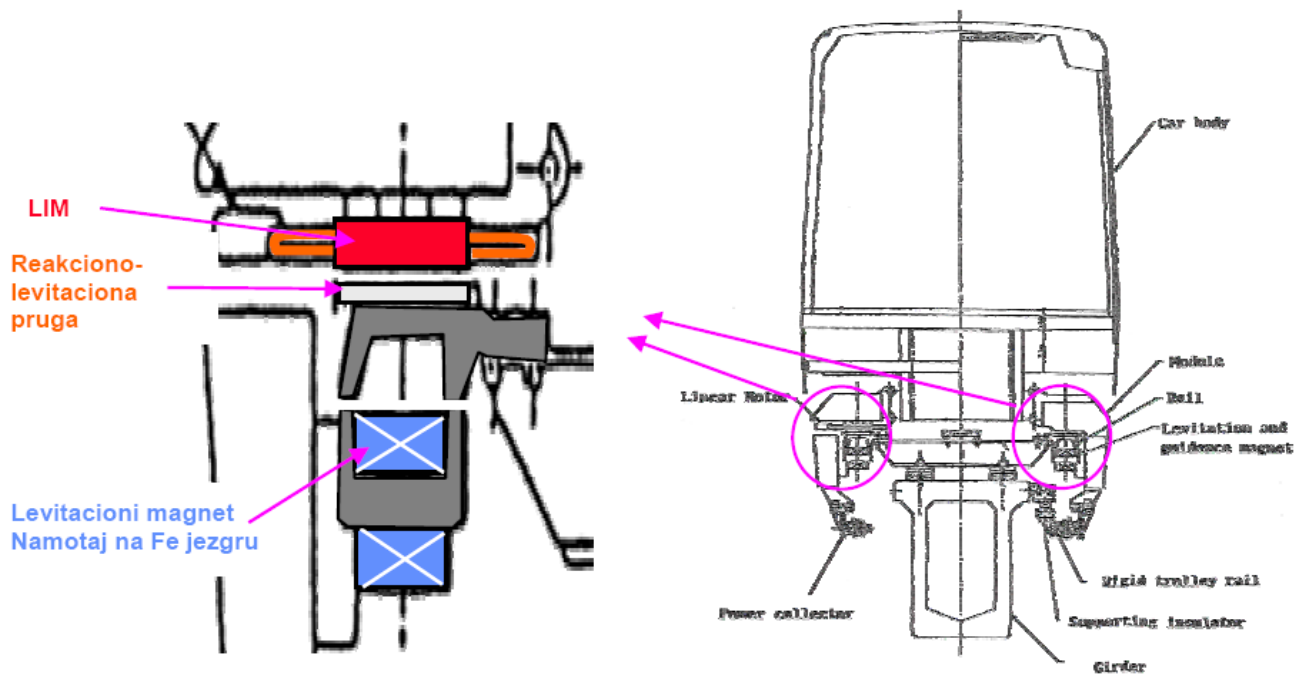
1.1. Osnovna konfiguracija

LIM je razvijen i upotrebljen za Chubu HSST (Maglev) i za Linear Metro (metro koji podržava konvencionalni sistem pruga i točkova) za gradski prevoz u Japanu. Slični sistemi se koriste na Međunarodnom aerodromu JFK u Nju Jorku, u Kuala Lumpuru (Malezija), i na Sky Train Millenium pruzi u Vankuveru, Kanada.

Osnovni konstruktivni sistem LIM-a sa kratkim statorom prikazan je na slikama 1-4. Slika 1 pokazuje Chubu HSST maglev vozila, koja se trenutno instaliraju na Tobu Kyuruo liniji u Nagoji (Japan) kao deo urbane tranzitne rute od 9km. Četiri modula sa pogonom za levitaciju locirana su sa obe strane vozila, koji obuhvataju reakcionu levitacionu prugu. Svaki modul sadrži LIM iznad aluminijske reakcione pruge i četiri levitaciona magneta koja služe da izdignu vozilo do čelične sekcije. Slika 3 prikazuje bočni pogled na poprečni presek LIM-a sa trofaznim primarnim namotajem uglavljenim u jezgro LIM-a na vozilu i sloj aluminijuma i čelika koji formira sekundarno kolo motora.

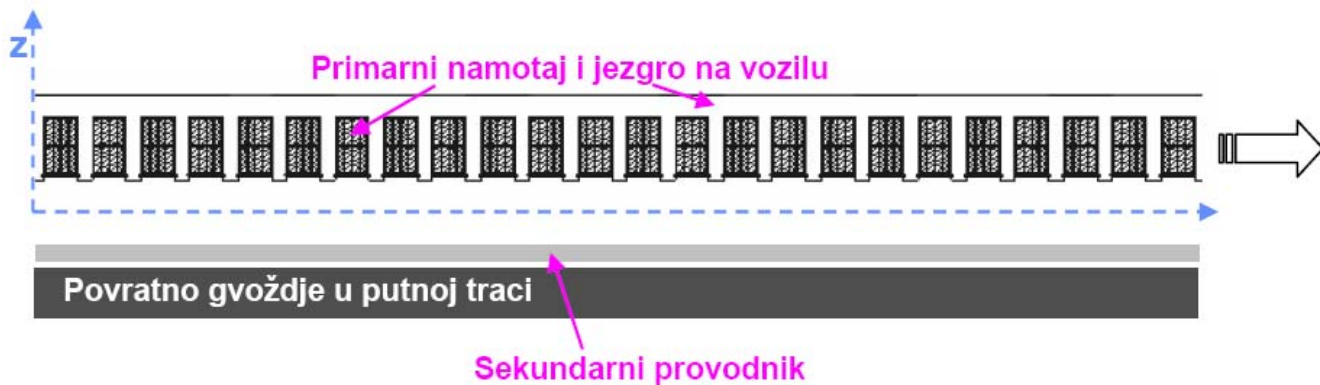


Slika 1: HSST Linimo maglev vozilo za Tobu Kyuryo liniju u Nagoji, Japan

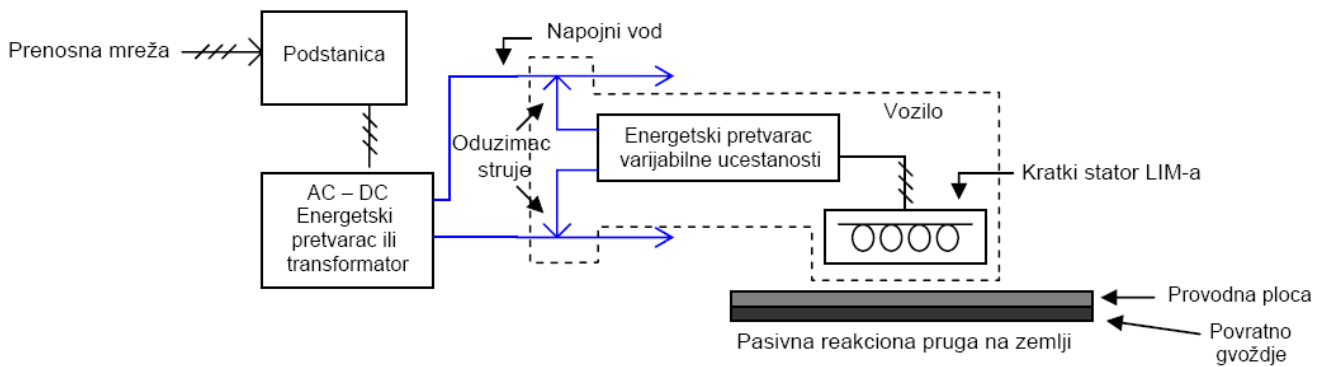


Slika 2: Uvećani pogonsko/levitacioni modul za LIM

(uz desnu sliku, gledano iz gornjeg desnog ugla u smeru kazaljke na časovniku: telo vozila, osnova, sina, magnet za levitaciju i vođenje, kruta napojna sina, noseći izolator, stub nosač, oduzimač struje, linearni motor)



Slika 3: Bočni pogled, poprečni presek jedne strane LIM komponente



Slika 4: Blok dijagram napojnog kola LIM-a

Kontaktni vod prikazan na slici 4 je čvrsta šina koja obezbeđuje jednosmerno napajanje (ili naizmenično monofazno) koje se koristi i u konvencionalnoj železnici. Energetski sakupljači su klizni ili kružni kontakti ka kontaktnom vodu. Klizni kolektori su držani u pogonu do 130 km/h na test stazi u CHSST (Nagoja) iako objekti za testiranje pri većim brzinama postoje na institutu za tehnička istraživanja u železnici (Railway Technical Research Institute) u Kokubunji (Tokio). Kružni kolektori su testirani do 200 km/h u RTRI za vagona sa jednosmernim linearnim motorom.

Energetski pretvarač koji se nalazi u vozilu pretvara jednosmerni ili naizmenični napon na ulazu u određeno više-fazno napajanje promenljivog napona i promenljive učestanosti, potrebno za rad sa LIM-om. Pretvarač sadrži takođe ulazne i izlazne filtre. Ova oprema se u velikoj meri koristi u konvencionalnim i brzim železnicama. LIM, kao što se vidi, je jednostrana struktura koja generiše neravnomernu normalnu silu, bočnu silu, i rotacioni momenat. Efikasnost ovih motora je lošija od običnih rotacionih asinhronih motora zbog velikog vazdušnog zazora između statora na vozilu i pruge što rezultira velikim rasipnim fluksom. Dvostrani LIM sa statorskim namotajima i jezgrima sa obe strane reakcione pruge izgrađen je i testiran, ali je njegova geometrija veoma teška za implementaciju sa malim dozvoljenim zazorom.

Najzad, pasivna reakciona šina na pruzi sastoji se od aluminijumskih ili bakarnih obloga potpomognutih gvoždem. To je strukturno veoma prosto, i može biti integrisano na levitacionu šinu, kao što je to slučaj sa HSST. Performanse i izdržljivost ovih šina potpuno su testirane za razvoj HSST maglev sistema i Linear Metro-a sa čeličnim točkovima, u saradnji sa Ministarstvom transporta Japana.

1.2. Prednosti

Značajna prednost pogona sa LIM-om je u tome što je sistem napajanja i konstrukcija veoma slična onoj koja se koristi u konvencionalnim urbanim i brzim železničkim vozilima. Ovo je bitno sa nekoliko aspekata. Mnoštvo systemske opreme i komponenti za regulaciju napajanja su uobičajene, a i postoji znatno praktično iskustvo i dizajn u saradnji sa proizvođačima i operaterima. Osnovi tehnološkog procesa su dobro ustanovljeni, i tehnički korak za prelazak sa obrtnih asinhronih motora za vozila sa čeličnim točkovima na pogone sa LIM-om nije veliki. Podstrek za prelazak na pogone sa LIM-om leži u mogućnosti savlađivanja oštrijih krivina i strmijih nagiba, i udovoljavanje zahtevima za precizno zaustavljanje pri brzom usporavanju koje nije moguće kod električno pogonjenih vozila sa čeličnim točkovima. Iz ugla potrošača, ova promena pruža poboljšanje usluge i kvaliteta vožnje, i udovoljava njihovim očekivanjima koja se tiču sigurnosti i pouzdanosti prevoznog sistema.

LIM upotrebljava veoma jednostavnu reakcionu prugu, pantograf na vozilu, i pasivnu putnu trasu koja pojednostavljuje skretnice na koloseku. Reakcionu šinu je moguće diskretno instalirati duž koloseka. Vozila različitog dizajna i performansi lako su prilagodljiva na istu putnu trasu unutar definisanih granica opterećenja (električnih i mehaničkih). Putna trasa omogućava mali poluprečnik horizontalnih i vertikalnih krivina, a primenljivo je i savijanje skretnica kao kod jednošinskih pruga. Jednostavna, pasivna putna trasa pokazala se sigurnom i pouzdanom kao konvencionalna pruga.

Tranzitni sistem pogonjen LIM-om ima visok stepen fleksibilnosti da odgovori na promenljive i neizvesne zahteve. Ovo uključuje podešavanje broja i kapaciteta vozila u kraćem i dužem periodu. Kratkoročno, sposobnost dodavanja i pokretanja vozila obezbeđuje brzu reakciju operatera na promenljive zahteve i sanaciju od bilo kakvog nepredviđenog prestanka rada ili odstupanja od reda vožnje. Dugoročno ako je za poboljšanje kvaliteta sistema potrebna dodatna snaga, uticaj na putnu trasu usled dodavanja napojnih kapaciteta i opreme skoro je zanemarljiv. Da bi se udovoljilo operativnim zahtevima, kontrolni blok lako se može regulisati sa malo, ili nimalo, modifikacija na propratnim objektima.

1.3. Nedostaci

Generalno, energetska efikasnost LIM-a je lošija u odnosu na rotacione asinhronne motore i linearne sinhronne motore (LSM). Kod rotacionih asinhronih motora vazdušni zazor između statorskog namotaja i rotora je mnogo manji (nekoliko milimetara), jer dužina zazora ne varira što rezultuje većom efikasnošću. Vazdušni zazor kod LIM-a je reda 10-15mm zbog sigurnosnih zahteva koji se tiču promenljivosti zazora usled vešanja vozila. Primarni namotaj LIM-a koji se nalazi na vozilu obezbeđuje svu potrebnu energiju za generisanje polja zazora i indukovanje struje u reakcionoj šini. Zbog većeg zazora, efikasnost LIM-a je manja i od LSM-a koji koristi permanentne ili elektromagnete umesto namotaja. Težina i veličina opreme koja se nalazi na samom vozilu mora biti veća, kao i veličina sistema za napajanje koji se nalazi pored puta. Ovo uvećanje u težini ograničava, kod pogona sa LIM-om, mogućnosti operativne brzine na 200-250 km/h jer ga težinski penali čine nepraktičnim za veće brzine. Ipak, ovo nije dovoljno da se kaže da je efikasnost LIM-a nepraktična. Za trasu I-70 u Koloradu predviđena srednja i maksimalna brzina su 144 i 160 km/h, respektivno. Za ovu trasu, veće brzine ne pružaju značajne prednosti, ipak maksimalna brzina od približno 225 km/h mogla bi se postići vozilom COL-200 pogonjenim LIM-om. Električno-mehanička efikasnost LIM-a je 70% pri srednjoj brzini i 77% pri maksimalnoj brzini.

Kod pogona sa LIM-om postoje i trodimenzionalne sile koje mogu da utiču na kvalitet vožnje. Ovo je zbog sprege između vučne i privlačno/odbojne sile između primara statora i reakcione šine (često se ova sila naziva i normalna sila), i sprege između ovih sila i bočne sile vodjenja/rascentrisanja koja je poprečna na obe ove sile. Zbog vihornih struja koje se javljaju u sekundaru, ove sile nisu jednolike duž LIM-a u pravcu kretanja vozila. Ove sile ne sprečavaju iskorišćenje LIM-a za pogonjenje, ali ipak, moraju se uzeti u obzir pri dizajnu sistema za navođenje i levitaciju. Pitanje harmonika normalnih sila i intenziteta normalnih i bočnih sila pri većem potisku mora se uzeti u obzir kao i promene u ovim silama usled dozvoljenog zazora između primara – sekundara. Ako je smanjena dužina vazdušnog zazora između primarne i reakcione šine, normalna sila između njih postaje veća što može da poremeti učinak levitacionog sistema. Mora se uočiti da se pogoni sa LIM-om uspešno održavaju u radu na brzini od 100km/h, a dizajnirani su za rad pri 200km/h što umanjuje gornje nedostatke. Ove sprege među silama postoje i kod LSM-a, ali su sile uniformne duž trase usled laminirane strukture aktivne pruge. U dizajnu kao što je Transrapidov Maglev sistem, levitacije i vučne

sile primenjene su na pogonsko-levitaciono podvožje vagona na vozilu, umanjujući zahteve za kontrolu levitacionog sistema kako bi se prilagodile smetnjama u sili.

2. Pogon sa linearnim sinhronim motorom (LSM) sa dugačkim statorom

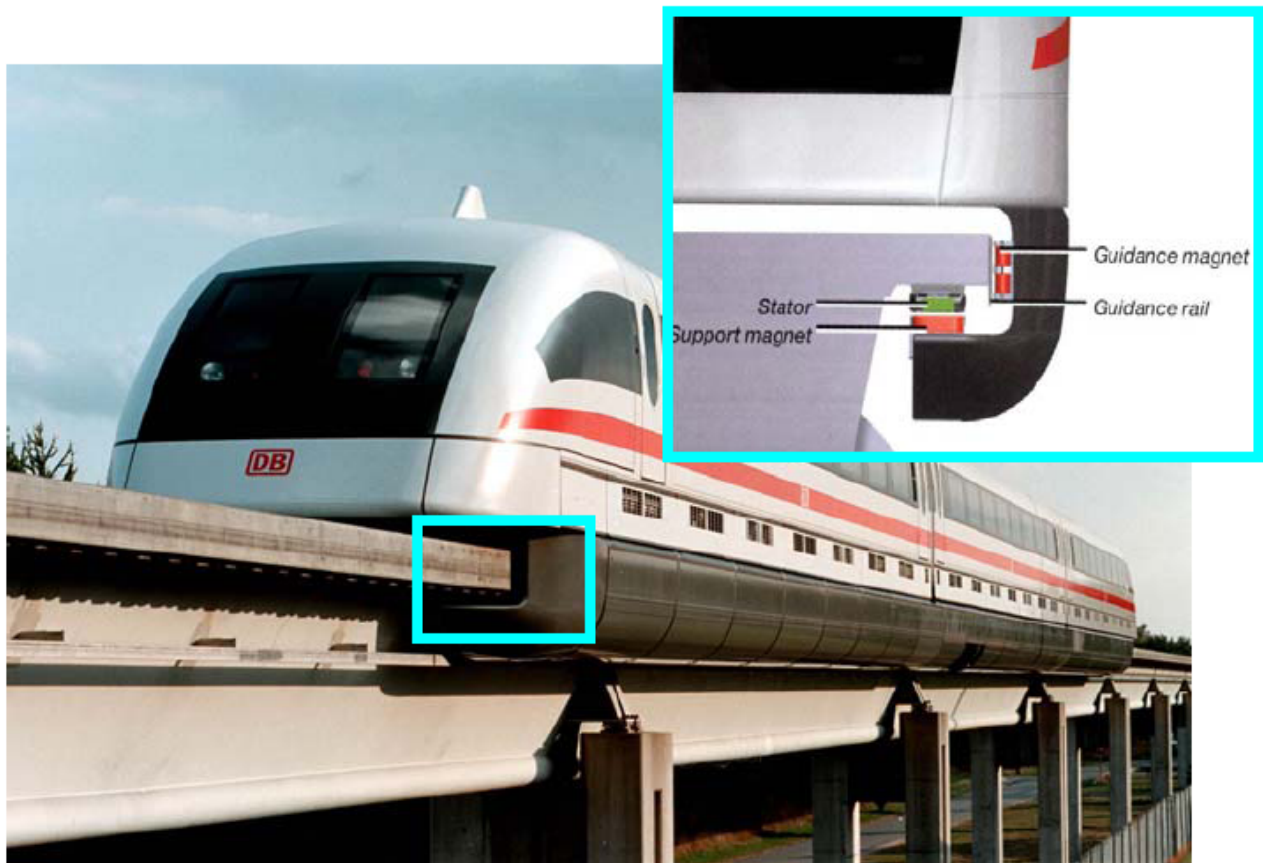
2.1. Osnovna konfiguracija

LSM pogoni sa elektromagnetima su razvijeni i korišćeni u nemačkom Transrapid Maglev (od magnetic levitation) sistemu za transport pri velikim brzinama. Ovaj sistem se testira u Emsland-u, Nemačka, a danas je primenjen i na 30 km dugoj trasi: Pudong aerodrom, Šangaj – centar grada. Sistem malih brzina za aplikacije u gradovima, nemački M-Bahn, je pušten u rad za nekoliko godina počev od 1988, kao demonstrativna pruga.

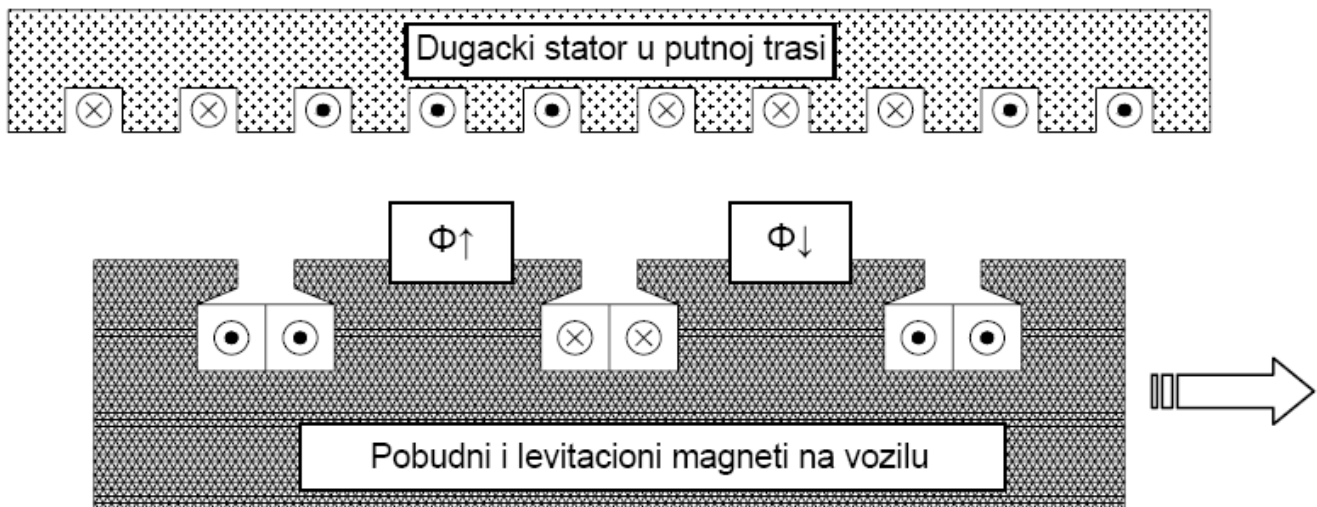
Osnovna konstrukcija LSM-a sa dugačkim statorom je prikazana na slikama 5-7. Slika 5 pokazuje Transrapid TR08 maglev vozilo, isti tip vozila koji instaliran na trasi Šangajski aerodrom - centar grada. Kao i kod LIM pogona, moduli za pokretanje i levitaciju koji obavijaju putnu traku se nalaze sa svake strane vozila. Svaki modul sadrži pobudne magnetne LSM-a, koji služe i kao magneti za levitaciju, i podižu vozilo do statorskih paketa magnetna prikačenih na putnu traku. Slika 6 pokazuje bočni pogled preseka LSM-a sa trofaznim namotajem primara uglavljenog u jezgro statora na trasi i magnet za levitaciju vozila.

Dugačak stator LSM-a koji se nalazi u samoj putnoj traci formira aktivni put. Reaktivne sile propulzije (pokretanja) i levitacije vozila deluju na jezgro statora. Od njegove noseće konstrukcije se zahteva da bude dovoljno čvrsta da podnese stalno uspostavljanje ove sile, i da jezgro statora bude izolovano od zemlje. Dimenzije statora se određuju tako da zadovolje zahteve za najviše performanse sistema.

U cilju smanjenja pogonskih troškova i zbog stabilnosti sistema za napajanje, dugački stator LSM-a se deli na sekcije koje kontrolišu sekcioni prekidači. Minimalna razdaljina između dva sekciona prekidača zavisi od željenog ubrzanja i dužine voza. Radna učestanost ovih prekidača postaje visoka ako veliki broj vozova funkcioniše na stazi svakog dana.



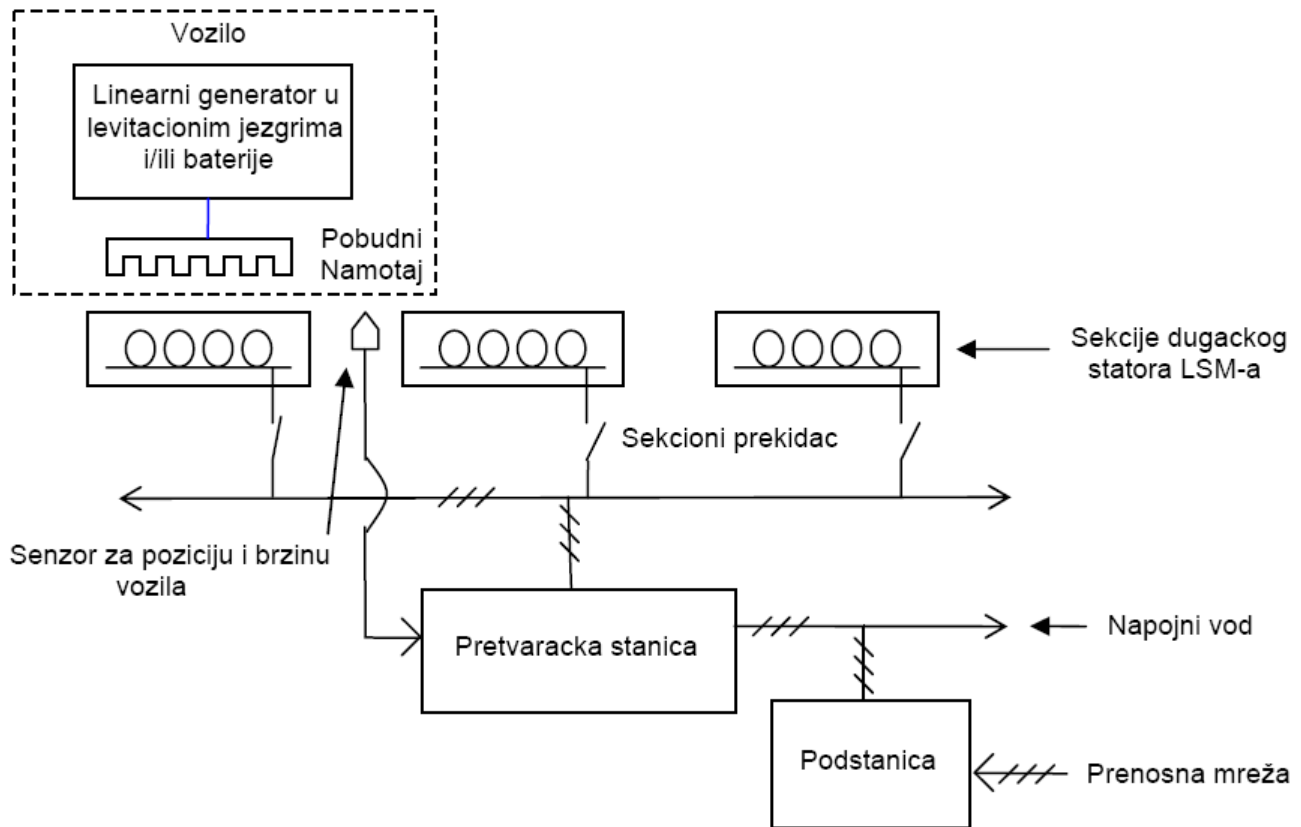
Slika 5: Transrapidovo TR08 vozilo i uvećani pogled na pogonsko/levitacioni modul LSM-a sa pobudnim magnetima na samom vozilu (na detalju sa slike: magnet za vođenje, šina za vođenje, stator, noseći magnet)



Slika 6: Poprečni presek dela LSM-a. Fluks, Φ , sa pobudnog magneta interaguje na putujućim magnetnim talas od statora stvarajući vučnu silu koja pokreće vozilo

Struje u statorskim namotajima moraju biti sinhronizovane sa pozicijom i brzinom voza. Pravilna kontrola voza se jedino može postići slanjem podataka do podstanice, korišćenjem senzora i sistema za prenos signala. Kako je sinhronizacija od ključnog značaja za LSM, senzorski i sistem za prenos signala moraju biti visokih performansi i pouzdanosti.

Železnička podstanica, prikazana na slici 7, je povezana na prenosnu mrežu pa izbor za njenu lokaciju može biti ograničen. U nekim slučajevima prednost je da operator sistema poseduje prenosni vod električne mreže. Podstanica napaja promenljivim naponom sekcije dugačkog statora preko prenosnih vodova i kontroliše njegovu frekvenciju ili fazu prema zahtevima pozicije i brzine voza. Ovo znači da broj podstanica mora biti jednak maksimalnom broju vozova koji se mogu naći na celoj trasi. Povećan broj podstanica je potreban blizu železničkih terminala i međustanica. Operacioni napon pretvaračke stanice je ograničen maksimalnim dozvoljenim naponom prenosnih kablova, sekcionih prekidača i namotaja statora a u cilju sprečavanja varničenja i električnih kvarova.



Slika 7: Blok dijagram električnog kola LSM-a

2.2.

Prednosti

Napajanje vozila se vrši preko dugačkog statora tj. namotaja pričvršćenog na putnu trasu. Zbog toga što je namotaj statora i oprema za regulisanje napajanja locirana na drugom mestu, vozilo bi u principu trebalo da bude lakše. Ovo dopušta rad pri velikim brzinama (postignuto je do 500km/h) zato što vozilo ne nosi težinu energetskih komponenti velike snage potrebne za postizanje ovih brzina, niti je potrebno da se električna energija prenese na vozilo preko fizičkih kontakata. Nominalne snage motora se mogu “skrojiti” prema zahtevima određene sekcije trase kao što su regioni sa velikim usponom, ili u stanici za veliko ubrzanje.

Transrapid i drugi predstavljeni LSM sistemi takodje koriste elektromagnete ili permanentne magnete za levitaciju koji su smešteni na vozilu kao deo izvora polja za pokretanje LSM-a. Ovo rezultuje visoko integrisanom izgledu vagona koji umanjuje težinu vozila, i pomaže u smanjenju zahteva za levitacioni kontrolni sistem da ublaži uticaje poprečnih sila na kvalitet vožnje. Postavljanje glavnih energetskih komponenti pored trase i redukcijom težine omogućujemo veliko ubrzanje i usporenje. S druge strane ubrzanje se ograničava zbog udobnije vožnje, radnih stanja sigurnosnih pojaseva i bezbednosnih razloga. U okviru ovih ograničenja i sa gledišta FTA gradskog maglev programa, i LIM i LSM ispunjavaju zahteve po pitanju ubrzanja i nijedan od njih posebno ne prednjači u pogledu prethodna tri faktora.

Stepen iskorišćenja LSM-a je visok na priključcima pogonskog motora, ali impedansa aktivnog bloka motora umanjuje tu vrednost. TR-07 sa aktivnom dužinom vozila od 45 metara i relativno kratkom LSM sekcijom dužine 300m ima iskoristivost, mereno na priključcima direktno ispod vozila, 98% za brzinu voza od 200km/h u režimu sa maksimalnom vučnom silom. Iskoristivost na priključcima sekcije LSM-a je 85%, a na izlazu iz pretvarača pada na 62% pod istim uslovima rada. Maksimalna iskoristivost na izlazu iz pretvarača za ovaj LSM, koji je dizajniran za veće brzine, je 87% pri brzini od 480km/h. Ipak treba napomenuti da ako je blok sekcija duža efikasnost opada.

2.3. Nedostaci

Jedan nedostatak LSM pogona je to što je potrebno poznavanje tačne pozicije magnetna na vozilu kako bi se osigurala sinhronizacija voza sa putujućim talasom generisanim statorskim namotajima na putnoj trasi. Neophodan je veoma precizan i pouzdan poziciono-brzinski senzorski sistem. Podaci se moraju preneti do pretvaračke stanice koja zatim generiše putujuće magnetno polje odgovarajućeg intenziteta i učestanosti.

U odnosu na jednostavnu reakcionu prugu LIM-a, struktura aktivne trake LSM-a je vrlo komplikovana. Potrebna je neprekidna instalacija statorskih namotaja na putnoj traci i veliki broj pretvarača koji će napajati svaki blok trake. Ovo uslovljava održavanje velikog broja komponenti kako bi se osigurala sigurnost sistema. Posebno je važno održavanje vazdušnog zazora između trake i levitaciono-pobudnih magnetna. Odstupanje od regularnog zazora od 1 cm može značajno povećati uzgonsku silu pa može doći do “lepljenja” vozila za traku ili sudar magnetna na vozilu sa statorom na putnoj traci. Potrebne su česte inspekcije i održavanje namotaja kao i statorskih jezgara kako bi se osiguralo prikladno poravnanje.

Postoji nekoliko operacionih zahteva koji se odnose na vozila na traci. Svaki blok sekcije putne trake može da pogoni jedno vozilo i ta sekcija mora da ima svoj pretvarač. Gustina saobraćaja na određenoj ruti određuje broj pretvaračkih stanica iz čega sledi da je potreban veliki broj pretvarača za kratke trase. Ovo je od izuzetnog značaja u blizini terminala gde sistem napajanja postaje komplikovan

pa je potrebno mnogo pretvarača zbog sporog kretanja vozila, njihove brzine i skretnice. U slučaju kvara na statoru udobnost vožnje se znatno pogoršava.

Performanse transportnog sistema su određene stanjem aktivne putne trake, a sam sistem nije adaptivan na promene putnih zahteva. Vozila se ne mogu lako dodavati radi udovoljenja promena originalnog dizajna (ali se lako sklanjaju). LSM se mora konfigurisati tako da zadovolji najviše zahteve procenjene u toku životnog veka sistema. Za efikasnu primenu investicionih troškova potrebna je vrlo precizna procena potražnje.

3. Poređenje LIM i LSM pogona

3.1. Fleksibilnost na promenljive i neizvesne zahteve

Kao što je gore rečeno, tranzitni sistem pogonjen LIM-om ima visok stepen fleksibilnosti koji odgovara na promenljive ili neizvesne zahteve, regulisanjem broja i veličine vozila na kratkoročnoj i dugoročnoj bazi. Sposobnost dodavanja i pokretanja vozila obezbeđuje brzu reakciju operatera na promenljive zahteve i sanacije od bilo kakvog nepredviđenog prestanka rada ili odstupanja od reda vožnje. Ako je za poboljšanje kvaliteta sistema potrebna dodatna energija, uticaj na putnu trasu usled dodavanja napojnih kapaciteta i opreme skoro je zanemarljiv. Da bi se udovoljilo operativnim zahtevima, kontrola voza se lako može regulisati sa malo, ili nimalo, modifikacija na propratnim objektima.

LSM-u nedostaje fleksibilnost za promenu performansi sistema. Zamena osnovnih objekata je neophodna za promenu kapaciteta sistema ili njegovog operativnog načina rada, što je vrlo slično izgradnji potpuno novog sistema. Njegova aktivna šina i instalacije napajanja moraju biti dizajnirani i instalirani za najviše zahteve i kapacitete sistema posmatranog u toku faze dizajniranja. Ovo može značajno da skрати korisni vek sistema ili uveća troškove u periodu eksploatacije, ako stvarni zahtevi odstupaju od planirane primene.

Dispečeri mogu iskusiti nepredviđena kašnjenja, prekide, ili isključenja iz razloga koji nisu pod njihovom kontrolom ili zbog otkazivanja opreme. Brzo ponovno uspostavljanje redovnih operacija ključna je za održavanje reda vožnje. Sposobnost pogona sa LIM-om da pokreće vozilo po etapama duž trase uz pomoć pokretnog kontrolnog bloka pruža visok nivo fleksibilnosti za brzu obnovu usluge. Ovo uključuje praćenje konfiguracije vozila u kratkim terminima, operativnost visokog kapaciteta za trenutno prilagođenje visokim zahtevima rezultujući malim odstupanjima od normalnog reda vožnje. LSM zahteva pojedinačno vozilo po sekciji trase, i ne može da se prilagodi povećanim zahtevima uslužnog protoka, osim ako je sistem prethodno predimenzionisan. Zahtev za kretanje pojedinačnog vozila po fiksiranoj sekciji trase u velikoj meri ograničava fleksibilnost za pripremu vozila koje treba da odgovori na nepredviđene zahteve ili incidente. U slučaju kvara pogonskog motora, brzina oporavka uslužnih funkcija veoma je bitna. U slučaju LIM pogona, vozilo se jednostavno ukloni i zameni. Ovo se može postići uz pomoć drugog tranzitnog vozila ili uz pomoć specijalnog servisnog vozila. Ako je vozilo napajano LSM-om, verovatnije je da će biti potrebna brza popravka koloseka ili zamena sekcije statorskog namotaja. Tokom ovih popravki i ponovnog proveravanja ispravnosti, kompletan kolosek će biti van upotrebe. Servisna vozila pri takvim incidentima zahtevaće nezavisno napajanje, i možda neće biti u sposobnosti da efikasno iskoriste strukturu.

3.2. Operativna pouzdanost

Operativna pouzdanost LSM-a u velikoj meri zavisi od detekcije i sistema za prenos signala pozicije i brzine vozila kako bi se osiguralo da je magnetni talas generisan u namotaju statora u sinhronizmu sa kretanjem pobudnih magneta na vozilu. Pouzdanost LIM-a pri radu sa velikom koncentracijom vozila u transportnom sistemu zasniva se na postojećim konvencionalnim tehnologijama u železnici, i vrlo dobro je ustanovljen, na primer, kod Linear Metro sistema u Tokiju, Japan.

Iako mnoštvo budućih transportnih sistema razmišlja o radu bez vozača, ljudski faktori su jako dobro ustanovljeni za potrebe pogona sa LIM-om. Dispečeri u konvencionalnoj železnici lako se mogu prilagoditi na novi LIM sistem koristeći se prethodnim iskustvom.

Pouzdanost električnih i mehaničkih komponenti kod linearnih pogona moraju biti procenjeni, i veoma je važno nabaviti podatke testa izdržljivosti za datu trasu kako bi se u potpunosti procenila pouzdanost pogona. Ova informacija se zatim upoređuje sa odgovarajućim podacima iz prethodne instalacije i testiranja trase kako bi se utvrdio uticaj dizajna, proizvodnje, ili modifikacije instalacionog procesa.

Što je veća baza podataka prethodnih aplikacija i vremensko trajanje testiranja tehnologije, veća je pouzdanost u planiranju pouzdanosti sistema. Primena LIM pogona u tranzitnom sistemu sa čeličnim točkovima i iskustvo u primeni slične opreme za napajanje u konvencionalnim, železničkim sistemima sa rotacionim mašinama pruža znatnu iskustvenu osnovu za pouzdan projekat dizajna LIM-a u budućim primenama magnetne levitacije.

Iako je LSM znatno ocenjen na trasama za testiranje, pouzdanost aktivnih šina i sekcijских skretnica mora se utvrditi trajnim testovima zavisno od prihoda usluživanja. Prikupljanje ovih podataka je još uvek u toku, i neće biti završeno još nekoliko godina.

3.3. Investicioni troškovi

Osnovna investicija za maglev sistem je pretežno određena troškovima pratećih objekata uključujući i troškove putne trase, i većina tih objekata zavisi od tovara, uključujući i težinu vozila. Da bi se dobilo precizno poređenje u ceni između pogona sa LIM-om i LSM-om, mora se sprovesti detaljna analiza za datu trasu i zahteva reda vožnje. Ipak, postoje osobine oba pogonska sistema koja se mogu poistovetiti, a koja imaju značajne razlike u troškovima elemenata.

Težina vozila sa LSM pogonom očekivano je manja od pogona sa LIM-om pošto je oprema za napajanje koja se nalazi na vozilu sa LSM-om lakša od one sa LIM-om. Ovo bi, u principu, trebalo da umanji troškove putne trase. Međutim, iz iskustva pri dizajniranju Kolorado Urban Maglev projekta, težina tovara je zanemarljiva u odnosu na nepokretnu težinu samih objekata, a težina vozila ne utiče mnogo na troškove putne trase. Interesantno je uočiti da vozilo COL-200 sa LIM pogonom dužine 24.3 m koje prevozi 103 putnika teži 44 tona, dok Transrapidov LSM pogon dug 24.8 m koji prevozi 126 putnika ima prosečnu težinu od 60 tona. Dok Transrapidovo vozilo može da postigne veće brzine njegova težina ne opada za brzine do 200 km/h, za koje je dizajnirano vozilo COL-200.

Struktura reakcione šine na putnoj trasi za vozilo pogonjeno LIM-om veoma je pojednostavljena provodnom pločom pričvršćenom za čelik koja služi kao povratno gvožđe za motor. Aktivna putna trasa LSM pogona uključuje laminirano statorsko jezgro, statorske namotaje, sekcione skretnice, kontakti vod, i sistem signalizacije za sinhronizaciju operacija koje su dosta skuplje. Statorski namotaji i komponente jezgra moraju biti hrapave kako bi trpele stalno kruženje mehaničkih

sila bez propadanja izolacije, održanje u pogonu godinama, nezavisno od vremenskih prilika, i nisku cenu.

Kako je složenost reakcione šine i distribucija energije znatno manja za LIM pogon nego za LSM sistem, vreme potrebno za konstrukciju i operativne testove je takođe značajno kraće. Ovo rezultira smanjenjem ukupnih troškova investicije.

Broj energetskih pretvarača po jedinici trase je sličan za oba slučaja uzimajući u obzir isti broj i tip vozila na datom delu trase. Pogon sa LIM-om zahteva samo sistem ispravljača pokraj trase za napajanje vozila konstantnim jednosmernim naponom na pojedinačnoj ili duploj elektrifikovanoj šini iz podstanice. Ipak, svako vozilo sa LIM pogonom ima inverter promenljivog napona i frekvencije. Napajanje svakog statora LSM-a na putnoj trasi takođe je uslovljen preko ispravljača do jednosmernog međukola, a zatim ispravljen u trofazno naizmenično napajanje promenljivog napona i frekvencije i jednim inverterom koji napaja statorsku sekciju uzimajući u obzir da svaka sekcija napaja jedno vozilo. Međutim, čak iako trasa LSM-a nije upotrebljena u potpunosti, svi invertori i distributivna mreža su zahtevani u početnom investicionom planu i svi se koriste kad vozilo prelazi svaku statorsku sekciju ponaosob.

Iako pogon sa LIM-om ima manju energetsku efikasnost, faktor snage, i napon napojnog voda, ovo ne uvećava znatno troškove investicija kad se uporedi sa LSM pogonom. Ovo je iz razloga što LSM zahteva komplikovaniju pretvaračku stanicu, niskonaponske namotaje, i trofazno napajanje statora.

Zbog složenosti aktivne putne trase LSM-a i sinhronizovanog rada LSM voza, struktura sistema u blizini završnih terminala zahteva više fizičkog prostora što dodatno uvećava troškove investicija u poređenju sa LIM pogonom. Mehaničke skretnice od trase do trase su veće i zahtevaju više fizičkog prostora za prebacivanje LSM vozila sa trase na trasu. Kako svaka sekcija LSM trase zahteva pretvarač, prenos više vozila sa sporim napredovanjem pri malim brzinama zahteva više energetskih pretvarača u ovim oblastima, koji moraju biti instalirani u vreme prvobitne izgradnje.

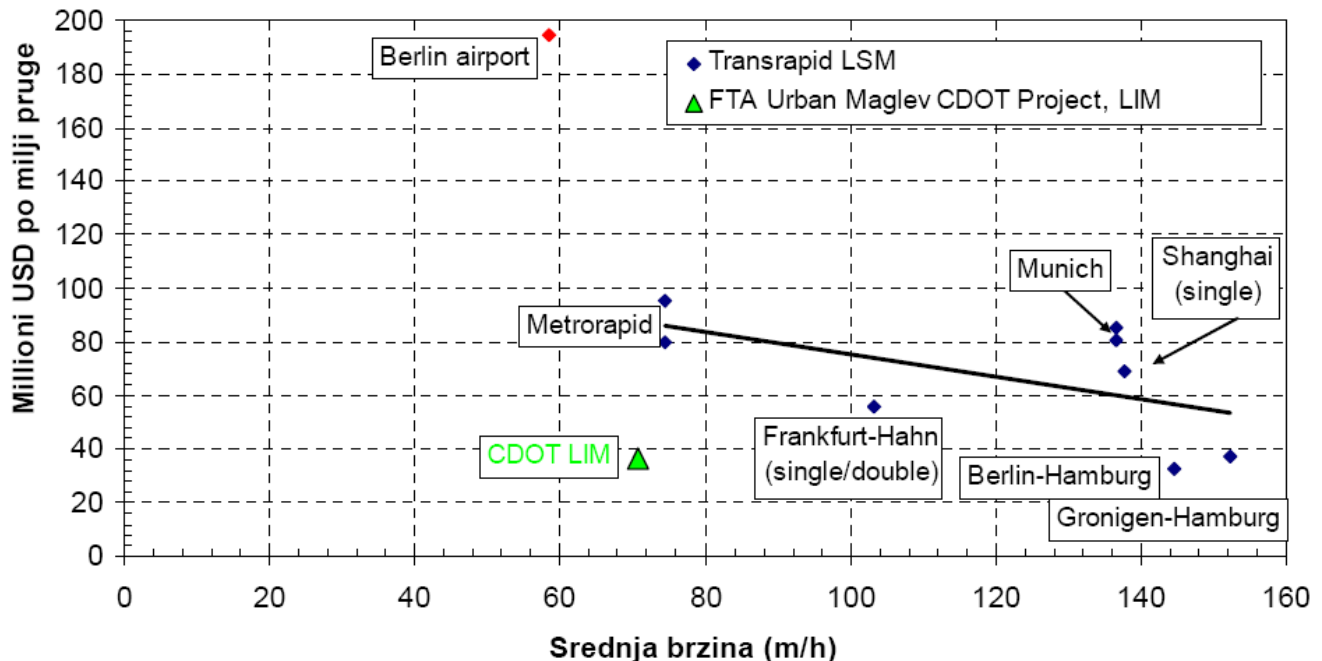
Poređenjem glavnih troškova maglev sistema sa LSM i LIM pogonom, jasno je da su troškovi investicija putne trase LSM sistema znatnije veće od troškova LIM sistema. Nasuprot tome, investicioni troškovi vozila sa LIM sistemom su veći od onih sa LSM pogonom. Dok su investicioni troškovi oba sistema veći od konvencionalnog železničkog sistema, razlika u ceni između sistema sa LIM pogonom i konvencionalnog sistema je svakako manja od razlike između LSM sistema i konvencionalnog.

Zacrtni investicioni troškovi za pojedinačne i duple trake Transrapidovog LSM sistema prikazane su u Tabeli 1. Najreprezentativniji primer je možda poređenje troškova nedavno konstruisane i komercijalno aktivirane trase od 30 km, koja povezuje Šangajski aerodrom i centar grada, sa drugim projektnim planovima. Razlike u ceni trase po jedinici dužine su očekivane zbog različitih operativnih, geografskih, prirodnih okolnosti, i zahteva za eksploatacijom pojedinih trasa. Ipak, u tabeli se vidi da se troškovi trase po jedinici dužine smanjuju sa porastom daljine, kao što je i očekivano.

Troškovi urbanih i ruralnih maglev tipova najpribližnije su procenama za Metrorapid sistem koji ima ukupno 6 stanica i srednje rastojanje između stanica od 16 km. Ovo utiče na cenu sistema i znatno smanjuje srednju brzinu. Grafik podataka u funkciji srednje brzine prikazan je na slici 8 gde je data za podatke o LSM-u (isključujući vrednost Berlinske aerodromske konekcije koja je značajno veći od ostalih projekata zbog tunela i broja stanica). Iako postoje odstupanja u podacima, trend u opadanju cena trase po jedinici dužine pri povećanju brzine je uočljiv. Tačka koja prikazuje cenu FTA Urban Maglev SDOT projekta (256 km, srednje brzine od 114 km/h, duple trake, 36.7 M dolara/mile uključujući i nepredvidjene okolnosti) data je kao poređenje između LSM i LIM sistema. Vidi se je cena LIM sistema znatno niža od LSM-a.

Sistem	Razdaljina km	Srednja brzina km/h	Tip trake	Investicioni troškovi po jedinici dužine putne trake				Referenca	
				MDM/km	M €/km	M\$/km	M\$/mile	Broj	Datum
Berlin Airport	25	94	double	189		121	194	17	2000
Shanghai Airport	30	222	single			43	69	15	2003
Munich Airport	37	220	double	78.3		50	81	17	2000
					42.2	53	85	18	2002
Metrorapid Dusseldorf	78	120	double	93		59	96	17	2000
					39.7	50	80	18	2002
Frankfurt-Hahn Airport	116	166	single/double	54		35	56	17	2000
Berlin-Hamburg	284	233	double	31.4		20	32	16	1994
Gronigen-Hamburg	293	245	double	35.9		23	37	17	2000

Tabela 1: Poređenje investicionih troškova između Transrapidovih aplikacija



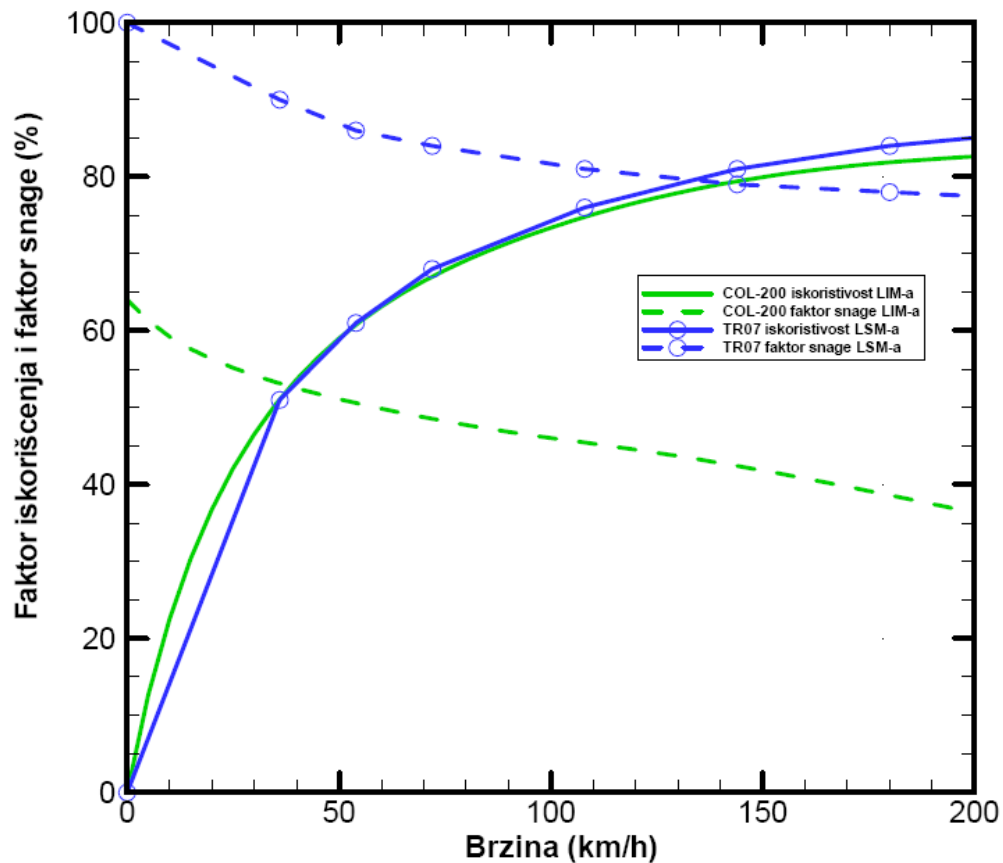
Slika 8. poređenje investicionih troškova između Transrapidovih aplikacija sa LSM pogonom. Putne trase ako nije naznačeno, su duple. Linearna zavisnost Transrapidovih podataka ne važi jedino kod Berlinske aerodromske konekcije. Procena troškova SDOT sistema sa LIM pogonom je sprovedena za FTA Urban Maglev program.

3.4. Operativni troškovi

Operativni troškovi maglev sistema u mnogome doprinose ceni, uključujući energiju i ljudstvo. Ponovo, preciznost poređenja LIM i LSM pogona zahteva detaljnu analizu za datu trasu i potrebe prevoznih usluga. Međutim, postoje osobine oba sistema koje se mogu poistovetiti a koje znatno utiču na cenu ovih elemenata.

Uopšteno, visoka energetska efikasnost LSM pogona umanjuje energetske utrošak u poređenju sa LIM sistemom. Ipak, ovo u mnogome zavisi od dizajna motora i sistema za napajanje. Ako dužina sekcije LSM statora postane velika, efikasnost je smanjena. Za poređenje dva tipa pogona, efikasnost i faktor snage TR07 LSM-a, o kome je bilo reči ranije, i LIM-a koji je predložen za vozilo COL-200, dati su na grafiku 9. Vrednosti LIM-a uzeti su sa ulaznog terminala, a vrednosti LSM-a na ulazu u jednu sekciju bloka. Grafik pokazuje da je efikasnost (odnos mehaničke snage i ulazne stvarne snage)

dva tipa pogona slična, ali je faktor snage (odnos stvarne i prividne snage) LSM-a veći. Posledica niskog faktora snage LIM-a je povećana težina opreme za napajanje koja se nalazi na vozilu, a koja je potrebna za dovođenje veće prividne snage.



Slika 9: Efikasnost i faktor snage na terminalu vozila COL-200 sa LIM-om, i ulaz u 300m dugu blok sekciju vozila TR07 sa LSM-om

Kako se od većine budućih maglev sistema očekuje da rade u pogonu bez vozača, ljudstvo potrebno za vozače se ovde ne uzima u obzir. Značajniji ljudski faktor, je međutim, povezan za održavanje vozila i sistema putne trase. Očekuje se da održavanje vozila bude slično za obe tehnologije uz izuzetak periodičnog održavanja statora LIM-a koji se nalazi na vozilu i njegove opreme za napajanje.

Povećani napor za inspekciju pojedinih delova dalje je minimiziran priključenjem nekoliko senzora koji pružaju indikaciju ispravnosti nadglednim sistemima. Da bi se osigurala sigurnost u radu, putna trasa takođe mora biti nadgledana, a ljudski faktor potreban za ovo nastojanje direktno je povezan sa kompleksnošću sistema putnih trasa. Troškovi inspekcije i održavanja LIM sistema procenjeno su manji od sistema sa LSM pogonom zbog manje kompleksnosti i većeg stepena iskustva sa reakcionom strukturom LIM pogona u uslužnoj delatnosti. Vrlo je verovatno da inspekcija reakcione strukture LIM-a može da se obavlja automatskom opremom.

Razvijanje iskustva sa LSM-om naročito je potrebno u početnoj fazi rada. Pošto je LSM noviji tip sistema planiran za uslužnu delatnost, procenjeni operativni troškovi biće dodatno neizvesni u njegovom slučaju. Trenutno nije jasno da li se inspekcija statora LSM-a na putnoj trasi može potpuno

automatizovati zbog kompleksnosti namotaja statora LSM-a i laminiranog jezgra. Ako je takva automatizacija moguća, oprema za nadgledanje će neizostavno biti komplikovanija od one potrebne za nadgledanje reakcione šine LIM-a.

4. Zaključak

I LIM i LSM pogoni imaju svoje prednosti i nedostatke u okviru maglev propulzije. Iako je putna trasa LSM skuplja, on je jedini prikladan izbor za visoke radne brzine (>200 km/h) jer težina energetske komponente na LIM pogonima postaje nepraktična u ovim režimima. Pri niskim brzinama (<100 km/h) LIM pogon je već pokazao sposobnost da pruži ekonomičnu vožnju u svim vremenskim uslovima na maglev i sistemima sa čeličnim točkovima. Pri brzinama do 200 km/h, visokom potrošnjom i kratkim trasama, pitanje je koja tehnologija je najisplativija s obzirom na životni vek instaliranog dizajna.

Proračuni i nacrti za "Colorado project of the urban maglev program" su pokazali da je modifikovani dizajn testiranih i dokazanih "Chubu HSST" LIM-ova može dostići brzine blizu 200 km/h i rad na velikim usponima. Brzine od oko 230 km/h se mogu dostići na ravnim trasama (uz 90 km/h čeonog vetra) a sa dodatnim malim poboljšanjima ostvarljivo je i 250km/h. LIM tehnologija je vrlo slična pogonima sa obrtnim motorima, čeličnim točkovima i konvencionalnom železničkom industrijom i direktno koristi njena iskustva. Jednostavna struktura reakcione pruge LIM-a i adaptivna kontrola pokretnih blokova pruža veliki stepen fleksibilnosti. Ova jednostavnost dalje rezultuje manjim investicijama u putnu trasu, jeftinije održavanje i veću pouzdanost dok su stepen iskorišćenja i faktor snage, generalno, manji kod LIM-a u odnosu na LSM, efikasnost modela "COL 200" se može porediti sa LSM pogonjenim Transrapid TR07. Sve u svemu, pri izboru pogona treba voditi računa o različitim investiciono-eksploatacionim faktorima i usvojiti onaj sistem koji se pokaže najisplativijim.

5.

Literatura:

1. FTA Urban Maglev Technology Development Program, Colorado Maglev Project report "Final Report," Report FTA-DC-26-7002-2004, April 2004.
2. FTA Urban Maglev Program, CDOT Team report "Final Report Interim," pp. 20, 7Jan04.
3. FTA Urban Maglev Program, CDOT Team report "Task 14, Integration, Propulsion Trade Study, Technical Memo #4," 29oct03.