

MAGNETNA LEVITACIJA

Rok Bizjak

Univerza v Ljubljani
Fakulteta za matematiko in fiziko

Ljubljana, 29. 5. 2008

Povzetek

Magnetna levitacija je tehnologija, ki nam omogoča nove načine transportacije, pogona, ločevanja zlitin, pomanjšanja izgub in podobno. Njena glavna prednost je, da lahko izdelamo sisteme, ki skoraj nimajo izgub. Pomaga nam prestopiti nekatere omejitve, katerih do sedaj ni bilo mogoče. Seveda nam pomaga tudi pri raziskovanju. Tu mislimo predvsem na raziskovanje lastnosti snovi in njihovo obnašanje v breztežnosti, kakršna je v vesolju. Obstajajo tudi drugi načini uporabe magnetne levitacije za raziskovalne namene.

V tem seminarju se bomo predvsem osredotočili na aplikativno uporabo magnetne levitacije. Našteli bomo njene prednosti in pomankljivosti.

Uvod

Sistemov, ki pripeljejo do magnetne levitacije, je več. Katere od njih uporabimo, je naša odločitev, jih je pa dobro poznati. Pri transportu (hitrih vlakih, znanih tudi kot *maglev*) se uporabljata predvsem dva sistema. Prvi temelji na odbojnosti oziroma privlačnosti dveh magnetov med seboj (včasih tudi na privlaku magneta in feromagneta). Drugi za levitacijo uporablja silo, ki se pojavi, ko postavimo prevodnik, po katerem teče tok, v magnetno polje [1,2].

Tretji sistem, pri katerem lahko opazujemo magnetno levitacijo, uporablja *Meissnerjev efekt*. Ko preide prevodnik v superprevodno stanje, postane popolni diamagnetik in iz sebe izrine vse magnetno polje. To stori tako, da se na njegovi površini pojavijo supertokovi. Ti tvorijo zrcalno sliko magneta, ki ustvarja magnetno polje, in pojavi se odbojna sila [3, 4].

Diamagnetni materiali v gradientu magnetnega polja čutijo odbojno silo. Ta sila je pri poljih reda velikosti 1 T [*trajni magneti* (TM)] premajhna, da bi opazili levitacijo. Če pa te materiale postavimo v polja reda velikosti 10 T, lahko opazujemo lebdenje. Tako lahko v lebdenje spravimo živali, jabolka, les in podobno [5].

Transportni sistemi

Vsi konvencionalni prevozniki sistemi, kot so avtomobili, vlaki in avtobusi, delujejo na podobnem principu. S podlago se stikajo preko koles, ki so pritrjena na mehansko vzmetenje, kar omogoča blaženje ter mehkejšo in predvsem varnejšo vožnjo.

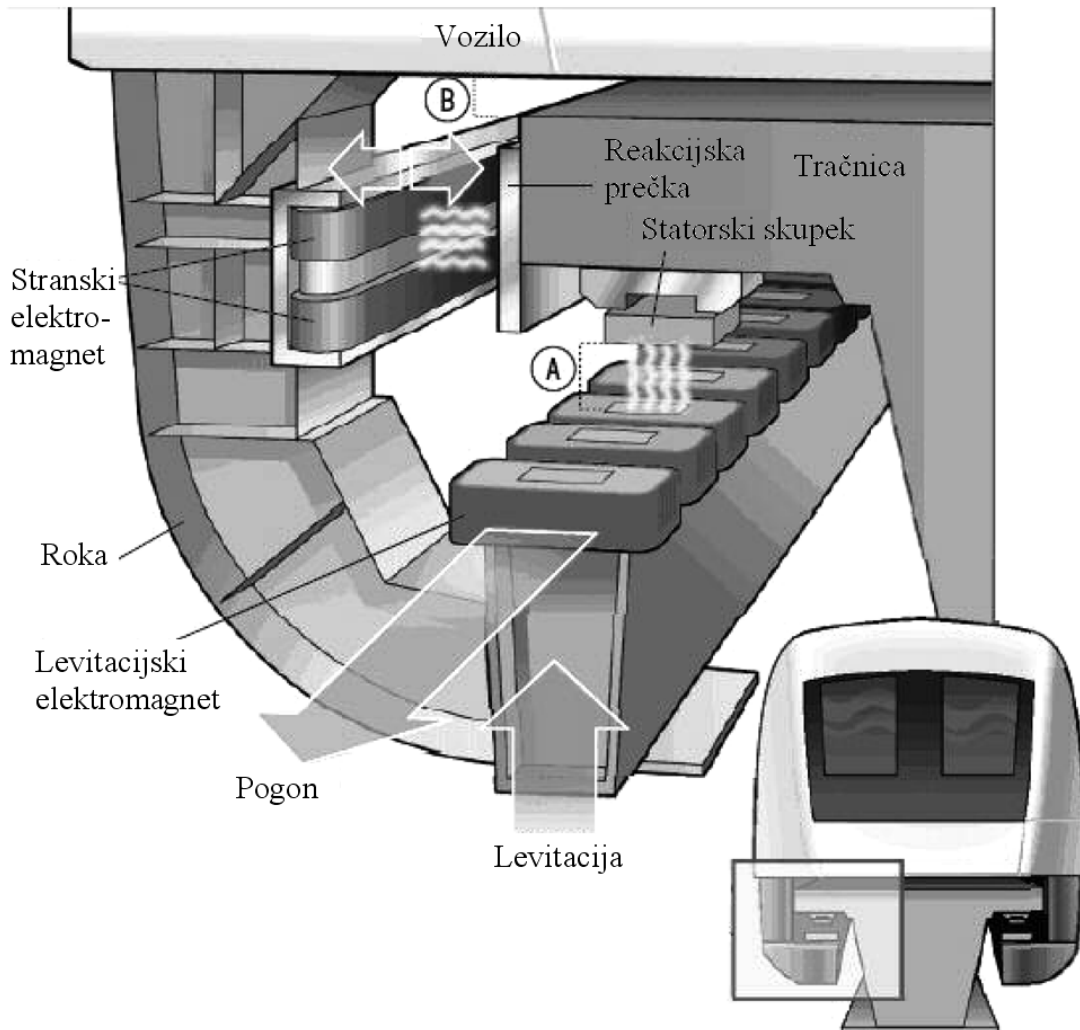
Ob večanju populacije na Zemlji ter s tem čedalje večjih zahtevah po transportu velikega števila ljudi se pojavlja želja po še hitrejših vlakih.

Glavni problem konvencionalnih prevoznih sistemov je zanesljivost pri velikih hitrostih. Z višanjem hitrosti postaja vozilo čedalje manj obvladljivo in tem se manjša njegova varnost. Inženirji so se zato zaradi naštetih razlogov obrnili k ideji magnetnega vzmetenja (magnetna levitacija) in sistemom imenovanim maglev. Prvega je patentiral Nemeec *Herman Kemper* leta 1934 [1]. Skozi nadaljnja desetletja je razvoj maglev sistemov (vlakov) potekal preko pospešene raziskovalne faze (šestdeseta), razvojne faze (sedemdeseta in osemdeseta) in testne faze (devetdeseta) do prve javne uporabe leta 2003 na Kitajskem (Shanghai) [1].

Maglev sistemi imajo svoje prednosti. Z njimi odpravimo obrabo tračnic (zmanjšamo stroške vzdrževanja) ter zmanjšamo hrup in vibracije vozila. Dizajn tračnic in nekontaktni sistem maglev vlaku preprečuje zdrsovanje in iztiritev, mu omogoča večje vzpone, ožje zavoje in ponuja možnost hitrejšega pospeševanja in zaviranja. Za njihovo delovanje niso več potrebni sestavni deli, kot so ležaji, sklopka, prestave itd. Seveda pa imajo maglev sistemi tudi svoje slabosti. Poleg tega, da je pogon in zaviranje potrebno zagotoviti preko elektromagnetne interakcije in ščititi potnike pred magnetnim poljem, je dizajn tračnic takšen, da skorajda onemogoča preklapljanje vlakov na druge tire. Kljub temu je maglev sistem še vedno boljši od klasičnih vlakov [1].

Projekti, ki so namenjeni razvoju maglev sistemov, so nemški **Transrapid**, japonski **MLX**, ameriški **Inductrack** in švicarski **Swissmetro**. Obstajajo tudi drugi projekti, a v splošnem predstavljajo podobne koncepte tehnologije [2].

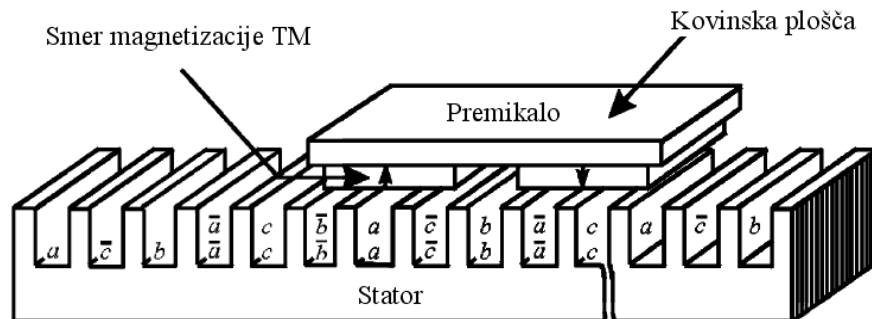
Transrapid uporablja *elektromagnetni princip vzmetenja*. Levitacijo zagotavlja privlačna sila med tračnico in elektromagneti na roki [slika 1 (A)]. Ker je ta sistem nestabilen, potrebujemo za vzdrževanje konstantnega razmaka med vozilom in tračnico precizen kontrolni sistem. Stransko vodenje omogoča sila med stranskimi elektromagneti in reakcijsko polščo. Ta princip vzmetenja omogoča hitrosti do 500 km/h ter 10 mm razmaka med vozilom in tračnico [slika 1 (B)] [1,2].



Slika 1. Transrapid Internacional za levitacijo uporablja privlačno silo med levitacijskimi magneti, pritrjenimi na roko, in magneti pritrjenimi na spodnjem delu tračnice (statorski skupek). Stranski magneti ob robu, mu omogočajo upravljanje pri zavojih. Pogonja ga linearni sinhroni motor [6].

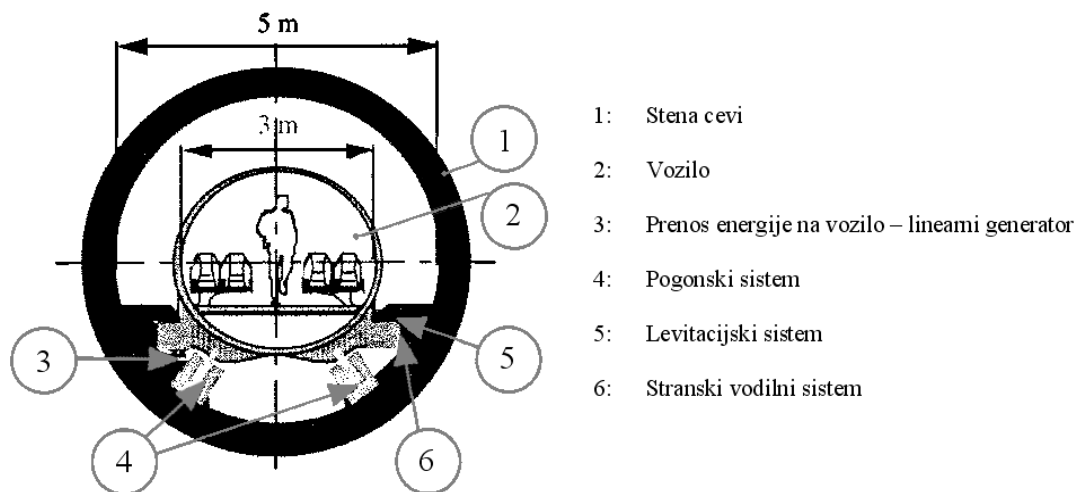
Pogon Transrapidu zagotavlja *linearni sinhroni motor* (slika 2). Ta je zgrajen iz satorja, pritrjenega na tračnico, in premikala, ki je vgrajen v vozilo. Interakcija med izmeničnim tokom, ki teče po satorju, in magneti pritrjenimi na vozilo zagotavlja pogonsko silo. Hitrost reguliramo s frekvenco toka [1,2].

Trasrapid se z rokami oprijema tračnice, ki je v obliki črke V. Ta mu nudi stabilnost, podporo in varnost [1,2].



Slika 2. Shematični prikaz linearnega sinhronega motorja. Premikalo, ki ima podobno vlogo kot rotor v klasičnih elektromotorjih, sestoji iz trajnih magnetov in kovinske plošče. Interakcija med premikalom in statorjem, po katerem teče izmenični električni tok, pripelje do sile, ki povzroči premikanje. Črke a, b in c označujejo različne vrednosti toka [1].

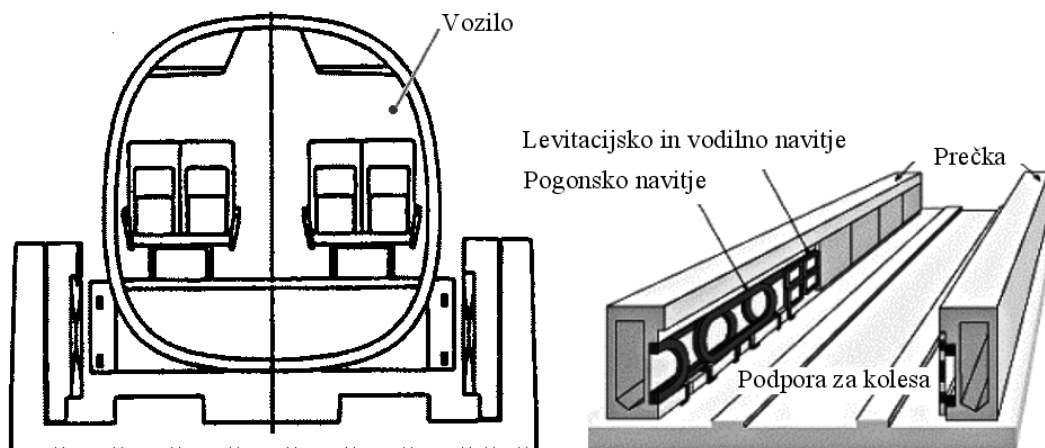
Swissmetro podobno kot Trasrapid za levitacijo uporablja elektromagnetni princip vzmetenja in linearni sinhroni motor za pogon. Posebnost, zaradi katere je vreden omembe, je njegov dizajn. Konstruiran je za delovanje v cevi premera 5 m (slika 3). Dobra stran uporabe cevi je boljša zaščita pred zunanjimi vplivi, slaba je povečanje upora. Zato je za obratovanje cev potrebno delno vakuimirati [1,2].



Slika 3. Swissmetro je maglev sistem, ki je skonstruiran za delovanje v cevi, ki je delno vakuimirana. Kot levitacijski sistem mu služi elektromagnetno vzmetenje (privlak magnetov), ki se nahaja na vsaki nogi vozila. Prav tako se na nogah vozila nahaja vodilni sistem. Vozilo poganja linearni sinhroni motor, katerega sestavljata stator (vgrajen v cev) in premikalo (pritrjeno na vozilo). Vozilo energijo pridobiva preko linearnega generatorja vgrajenega vanj [2].

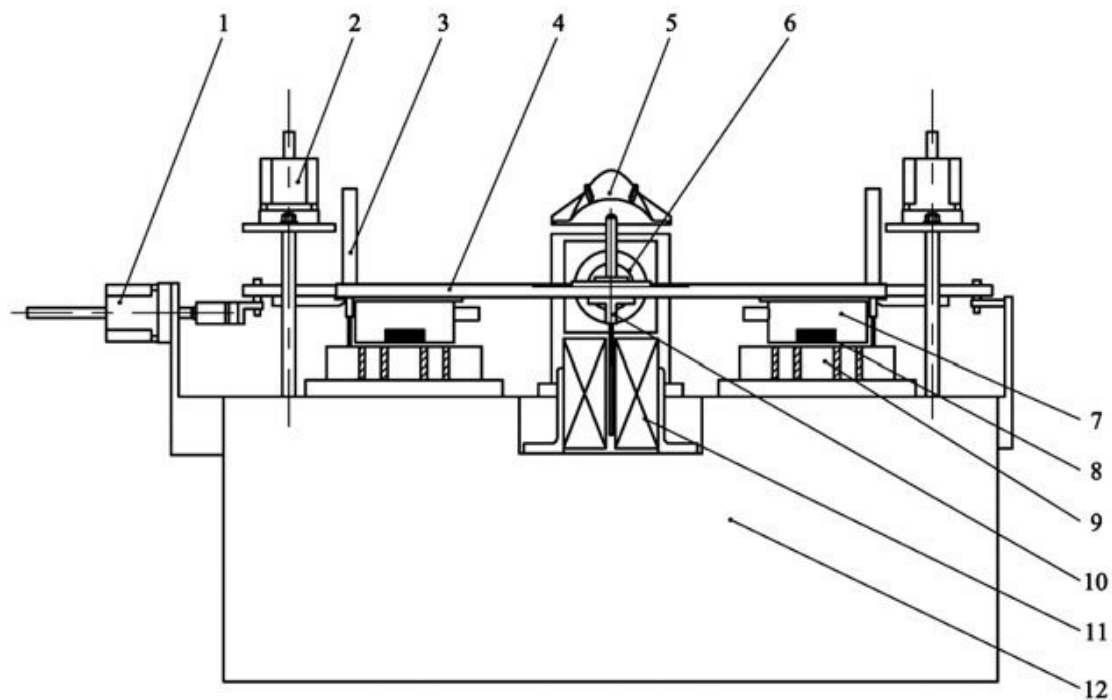
Pri sistemu **MLX** se za levitacijo uporablja *elektrodinamičen princip vzmetenja*. Levitacija temelji na odbojni sili. Ko se superprevodni magneti, ki so pritrjeni na vozilo, premikajo po indukcijskih tuljavah ali prevodnih ploščah (vgrajenih v tirnice), po teh tuljavah (ploščah) tečejo inducirani tokovi in proizvajajo magnetno polje. Odbojna sila med magnetnim poljem in superprevodnimi magneti privede do levitacije. Elektrodinamični princip ne potrebuje nikakršnega kontrolnega sistema za vzdrževanje razmaka med vozilom in tirnicami (v povprečju razmak znaša okoli 100 mm), vendar pa potrebuje velike hitrosti, da se inducira dovolj tokov za levitacijo. Tako ta sistem potrebuje konvencionalna kolesa za hitrosti pod 100 km/h, ko magnetna sila ni dovolj velika [1,2].

MLX poganja linearen sinhroni motor. Vozilo se nahaja v tirnici, ki ima obliko črke U (slika 4) in mu nudi večjo zaščito pred vetrovi in potresi. V stranskih stenah tirnice se nahajajo magneti, ki ob odbojni interakciji s stanskimi magneti na vozilu letemu zagotavljajo vodenje. MLX sistemu pripada trenutni hitrostni rekord 581 km/h [1,2].



Slika 4. MLX sistem (v celoti prikazan na levi sliki) ima združeno levitacijsko in vodilno navitje (prikazano na desni sliki). Levitacijo mu zagotavlja odbojna sila med superprevodnim magnetom na vozilu in magnetnim poljem, ki je posledica induciranegega toka v indukcijski tuljavi (vgrajena v tračnico). Ker je za levitacijo potrebno inducirati veliko toka (za kar je potrebna velika hitrost), vozilu pri hitrostih, manjših od 100 km/h, podporo nudijo klasična kolesa. Za pogon MLX uporablja linearen sinhroni motor. Stator motorja je vgrajen v prečke na obeh straneh tračnice, premikalo pa se nahaja na vozilu in sestoji iz superprevodnega magneta [2].

Vzrok za velike stroške poletov v vesolje je predvsem enkratna uporaba pogonskih raket. Zato so inženirji v devetdesetih predlagali podporni sistem *Maglifter* (slika 5), ki bi zmanjšal cene poletov na varen in zanesljiv način. Maglifter bi plovilo pomagal pri vzletu tako, da bi mu nudil podporo in ga pospešil do hitrosti 1000 km/h. To bi izredno zmanjšalo porabo pogonskega goriva in s tem konstrukcijsko težo plovila [7].

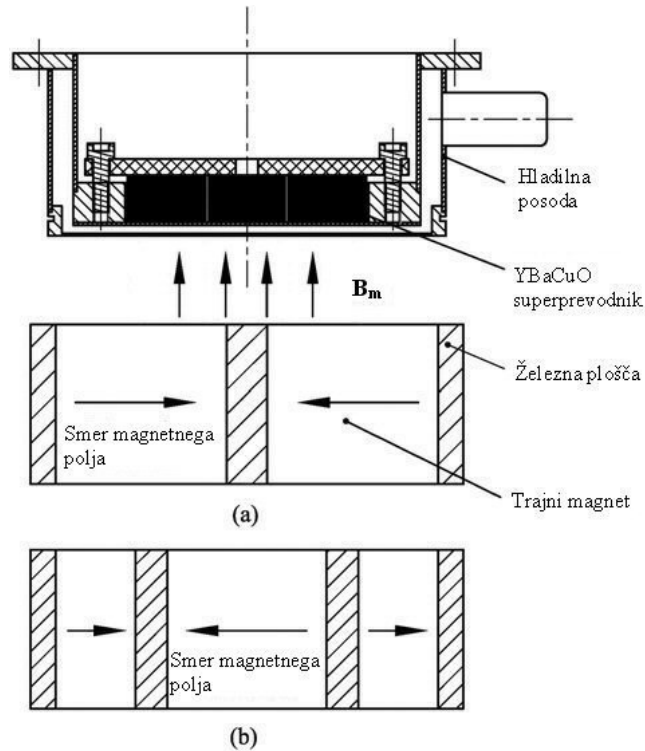


Slika 5. Predstavitvena skica testnega TM-VTS levitacijskega sistema maglifter: (1) sistem za merjenje vodilne sile; (2) dvižni sistem; (3) senzorji premika; (4) telo testnega vozila; (5) model vesoljskega plovila; (6) zavorni sistem; (7) hladilna posoda; (8) VTS; (9) tračnice iz TM; (10) rotor motorja; (11) dvostransko trofazno navitje; (12) ogrodje. Vesoljsko plovilo je pritrjeno na telo testnega vozila, katerega dvižni sistem dvigne nad tračnico. Hladilni sistem v hladilni posodi nato ohladi superprevodnik v superprevodno stanje. Ko je superprevodno stanje doseženo, dvižni sistem spusti telo testnega vozila na tračnico. Vozilo zaradi odbojnosti med VTS in TM levitira. Dvižni sistem se odklopi od testnega vozila, katerega nato pogonski mehanizem (10 in 11) pospeši do želene hitrosti. Vesoljsko plovilo odklopi in vzleti, testno vozilo pa se z zavornim sistemom ustavi [7].

Maglev sistem maglifter lahko naredimo na osnovi različnih mehanizmov, kot so *elektromagnetna* (EM), *elektrodinamična* (ED) in večja *visokotemperaturna superprevodna* (VTS) vzmetenja. Med temi imajo VTS vzmetenja prednost v samostabilnosti zaradi ujetja magnetnega polja v superprevodnikih druge vrste. Za magnetna polja lahko uporabimo trajne magnetne (TM) ali DC tuljave. Izgradnja vzletne steze s TM je veliko lažja od izgradnje z DC tuljavami, a je zelo draga. Po drugi strani DC tuljave omogočajo poceni samonadzorno metodo s pomočjo toka. Njihova slaba stran so šibka magnetna polja. Ker je za zadostno vzletno hitrost potrebna končna steza dolžine nekaj kilometrov, se jo da za razumno ceno zgraditi iz TM. S tem ima TM-VTS levitacijski sistem prednost pred ostalimi [7].

Lastnosti TM-VTS sistema so preiskali na *Pekingški univerzi za aeronavtilo in astronavtilo* tako, da so naredili testni sistem ter ga preizkušali v različnih kombinacijah superprevodnikov in magnetov [7]. V tem sistemu, ki je prikazan na sliki 6(a), so VTS trdno pritrčili v hladilno posodo s tankim dnom. Posodo so nato postavili na tirnico iz TM, ki so jo sestavili tako, da so med nasprotujočima si magnetnima polja postavili

železno ploščo. Ta poskrbi, da se magnetne silnice skoncentrirajo, kar privede do večjega magnetnega polja v točki nad ploščo [7].

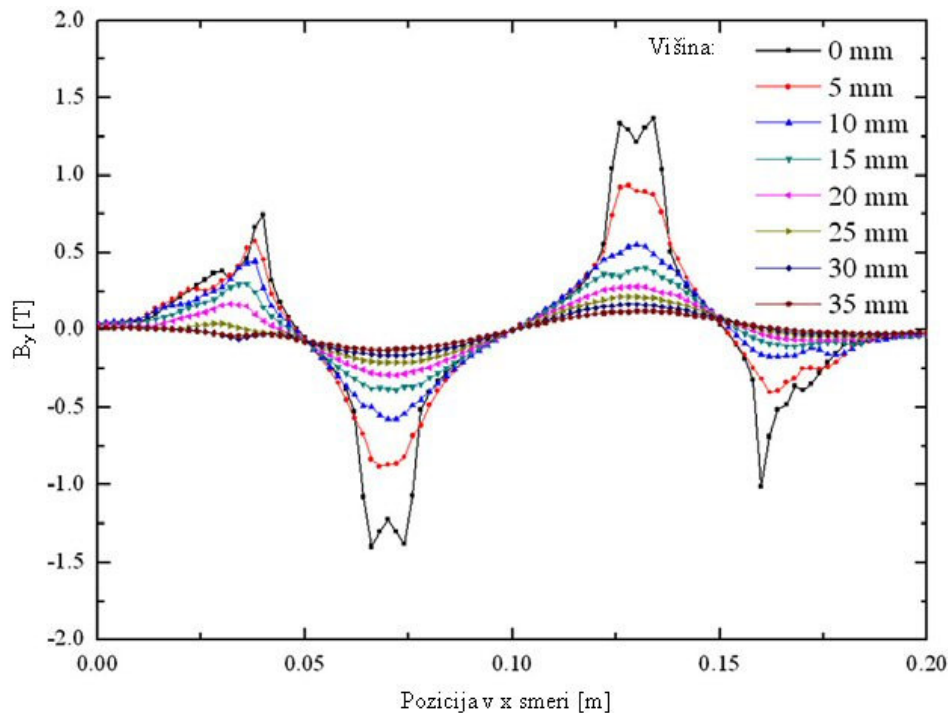


Slika 6. Skica TM-VTS vzmetenja. Zgornji del slike (a) prikazuje hladilno posodo, v katero pritrđimo superprevodnik. Pod posodo si lahko ogledamo dve možni razporeditvi TM in železnih plošč v stezi. V prvem primeru uporabimo dva trajna magneti (njihovi polji obrnemo v smeri puščic) in med njiju postavimo železno ploščo. Drugi primer (b) je bolj zapleten, a konstrukcijska ideja ostane enaka [7].

Za osnovni sistem (eden TM in eden VTS) je sila med TM in VTS sorazmerna gradientu magnetnega polja. Teh ugotovitev pa ne moremo enostavno prenesti na velike sisteme, kjer so magneti zelo blizu skupaj (prihaja do motenj) [8]. V praksi se za večje sisteme uporablja *razvrstitev magnetov*. K. Nagashima [9] je tako preučeval različne vrste, vse od enopolnih do štiripolnih razvrstitev magnetov. Prišel je do zaključka, da kovinske plošče navidezno podaljšajo magnet, kar neposredno vpliva na velikost sile [9]. Število polov vpliva na togost sistema TM-VTS. Čim večje je, tem bolj bo sistem odporen na zunanji (stranski) vpliv [10]. Po drugi strani se z večanjem števila polov zmanjšuje levitacijska sila [11]. Tako je potrebno za vsak levitacijski sistem poiskati primerno razvrstitev magnetov.

Maglifter bi prenašal več 100 ton težka bremena, zato potrebuje veliko stransko stabilnost in predvsem veliko levitacijsko silo. Na sliki 6(a) je prikazana poenostavljena kombinacija magnetnih polj in železnih plošč za poenostavljen prikaz. Da povečamo stabilnost, uporabimo večpolno kombinacijo TM, kot je prikazano na sliki 6(b). Potek magnetnega polja ravnokar omenjene kombinacije predstavlja slika 7. Kakor je razvidno

iz slike, se najvišja polja pojavijo nad sredinskima ploščama, kjer vrednosti polja segajo do $-1,5$ T do $+1,5$ T [7].

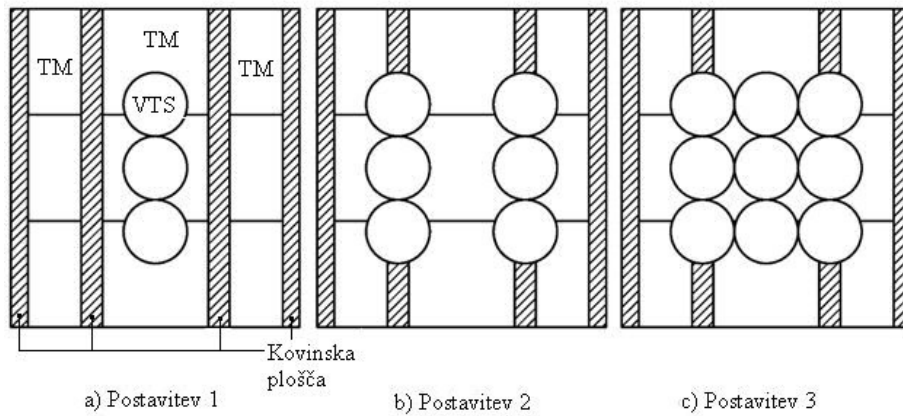


Slika 7. Porazdelitev magnetnega polja nad tirnico s slike 2(b) pri različnih višinah. Merilec magnetnega polja premikamo od leve proti desni strani (pozicija v smeri x). Meritev ponovimo večkrat pri različnih oddaljenostih od magnetne tirnice ter tako dobimo profil navpičnega magnetnega polja [7].

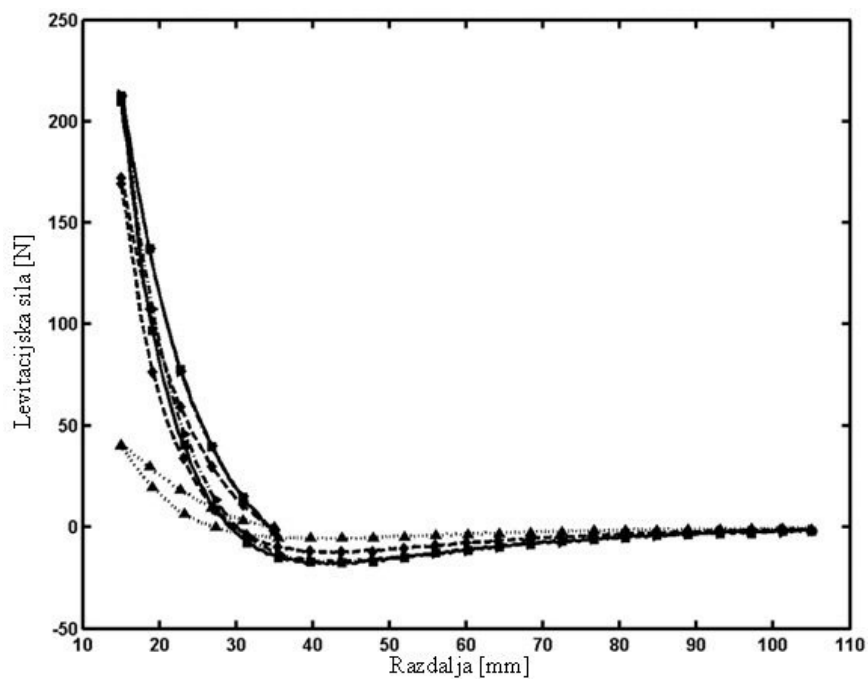
Magnetno polje na sliki 7 je nehomogeno v navpični in vodoravni smeri. V vodoravni smeri je opazen velik gradient magnetnega polja, ki bo omogočal stransko stabilnost. S pravilno postavitvijo superprevodnikov lahko na takem tračnem sistemu dobimo veliko levitacijsko silo in stransko stabilnost [7].

Superprevodnik ima tri lepe lastnosti, ki nam bodo zelo koristile. Prva je izrivanje magnetnega polja iz notranjosti superprevodnika. To superprevodnik stori tako, da na svoji površini inducira supertokove, ki ustvarjajo zrcalno sliko zunanjega magnetnega polja, kar privede do odbojne sile. Druga je dejanska lastnost vseh snovi. Ob prisotnosti magnetnega polja se snov začne magnetizirati. Ko odstranimo magnetno polje, se magnetizacija v snoveh, razen v feromagnetih, povrne v prvotno stanje. Ob znižanju temperature, pa se magnetizacija lahko ohrani tudi po odstranitvi magnetnega polja. Če superprevodnik postavimo v magnetno polje in ga nato ohladimo v superprevodno stanje, se magnetizacija, ki je posledica zunanjega magnetnega polja, ujame v superprevodnik. Superprevodnik bo nasprotoval vsakršni spremembi magnetnega polja. Tretja lastnost pa so *vrtilčne linije*. To so tanka, nehomogena območja, ki se pojavijo v superprevodnikih druge vrste. Na teh območjih začne magnetno polje magnetna prodirati v visokotemperaturni superprevodnik, kar takorekoč pritrudi magnet nanj [3].

Pri poskusu so uporabili YBaCuO keramiko v obliki diskov. Več diskov so postavili nad tračnice v treh različnih postavitvah, ki jih prikazuje slika 8. Zanje so z merilno napravo izmerili sile v odvisnosti od razmika med TM in VTS (slika 9) [7].



Slika 8. Tri možne postavitve VTS diskov v hladilni posodi, ki so jih preučili in izmerili na Pekinški univerzi za aeronavtiko in astronavtiko. Prva (a) postavitev ima največjo stabilnost v prečni smeri, druga (b) postavitev ima večji vzgon, a manjšo prečno stabilnost, tretja (c) pa je kombinacija prejšnjih dveh [7].



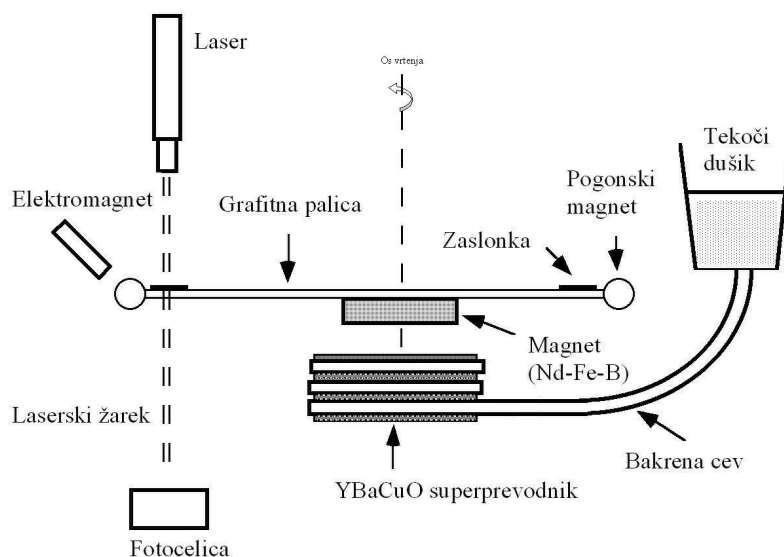
Slika 9. Graf prikazuje odvisnost levitacijske sile TM-VTS sistema od oddaljenosti trajnega magneta od superprevodnika. Meritev so opravili za več različnih postavitvev superprevodnikov nad izbrano magnetno tirnico v Pekinški univerzi za aeronavtiko in astronavtiko [7].

Pogon

Na *Oddelku za fiziko malezijske Univerze Kebangasaan* je skupina raziskovalcev skonstruirala domiselni model magnetnega motorja. Naredili so ga predvsem za predstavitvene namene. Ob nadaljnjih izboljšavah bi tak model lahko ponujal nove možnosti pogona [12].

Pri poizkusu so uporabili visokotemperaturni superprevodnik YBaCuO debeline 6 mm in premera 25 mm. Superprevodnik v kombinaciji z Nd-Fe-B magnetom (4,8 mm debeline in 19 mm premera) je tvoril ležajno komponento motorja (slika 5). Grafitno palico dolžine 150 mm so pritrdili simetrično na magnet. Na konca grafitne palice so pritrdili dva pogonska magnetna (debeline 2 mm in premera 5,5 mm) s primerno usmerjenima magnetnima poloma. Na grafitno palico so pritrdili še dve zaslonki, kot je prikazano na sliki 10. Superprevodnik so ovili z bakreno cevjo, po kateri je tekla tekoči dušik, kar je skrbelo za hlajenje. Za premikanje pogonskih magnetov so uporabili elektromagnet z železnim jedrom, ki je manjše pogonske magnetne odbijal, kar je privedlo do vrtenja [12].

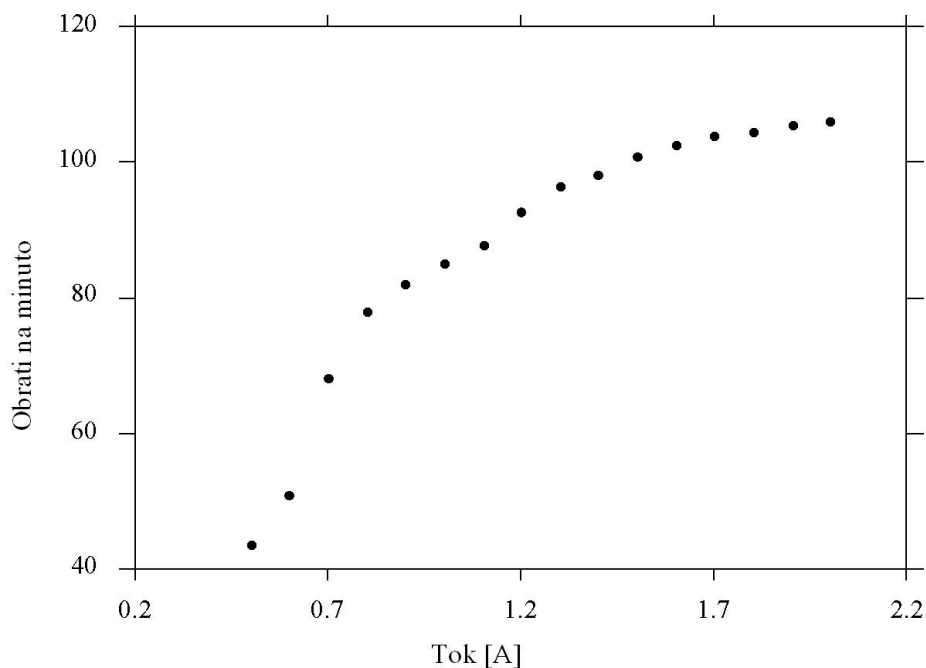
Velikost odbojne sile, ki jo magnet čutita med sabo, je obratnosorazmerna z razdaljo. Za doseganje večje velikosti sile, moramo magnet torej čim bolj zblížati. Da so raziskovalci na Univerzi Kebangasaan zadostili gornjemu pogoju ter omogočili sistemu vrtenje, so elektromagnet postavili rahlo pod kotom glede na pravokotnico na grafitno palico. S tem se je poleg navora pojavila tudi sila. Ta je na sistem delovala tako, da ga je poskušala izmakniti iz osi vrtenja. Razlog, da se to ni zgodilo, so vrtilne linije. Te so sili, ki se je pojavila zaradi nepravokotnosti, nasprotovale z enako veliko silo [12].



Slika 10. Shematični diagram visokotemperaturnega superprevodnega levitirajočega motorja z laserskim komutatorjem. Superprevodnik, ki ga hladi tekoči dušik, poskrbi za levitacijo magnetov, kar uporabljamo kot ležaj. Grafitna palica nudi podporo pogonskima magnetoma ter zaslonkama in nam služi kot omejevalec prostostnih stopenj gibanja pogonskih magnetov. Elektromagnet poganjamo z zunanjim tokom, ki steče po navitju elektromagneta v trenutku, ko zaslonka prekrije laserski žarek (zaznava fotocelica). Elektromagnet deluje z odbojno silo na magnet, kar privede do vrtenja sistema [12].

Fotocelica deluje kot detektor laserske svetlobe, ki pada nanjo. Zaslونka aktivira elektromagnet, ko preseka laserski žarek. Optično stikalo aktivira elektromagnet v trenutku, ko gre mimo njega manjši magnet, kar poganja motor. Slika 11 prikazuje za zgoraj omenjen sistem odvisnost števila obratov na minuto v odvisnosti od toka, ki teče skozi elektromagnet [12].

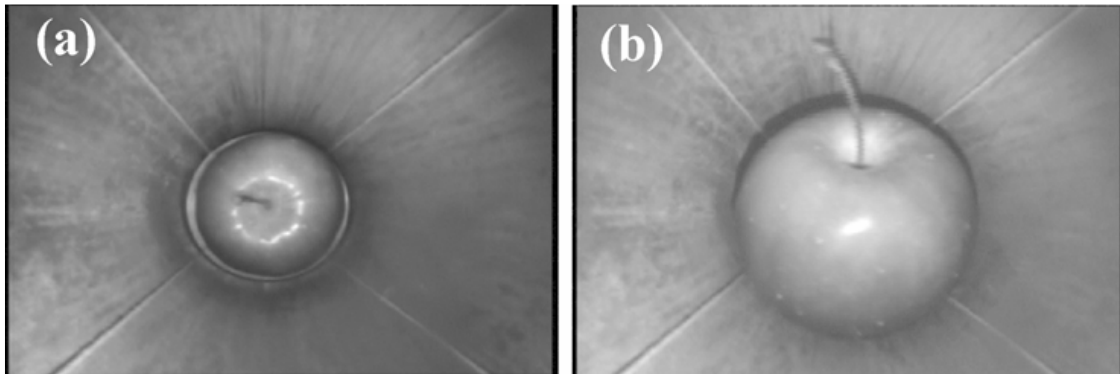
Kot smo omenili v začetku tega poglavja, tak sistem ponuja možnost novih pogonskih motorjev. Da bi dosegel navore ter število obratov na minuto, ki nam jih nudijo klasični elektromotorji, bi ga morali še dodobra izpolniti. To bi morda lahko dosegli s povečanjem števila pogonskih in elektromagnetov ali pa s skrajšanjem/podaljšanjem grafitne palice, ki bi jo seveda nadomestili s čim bolj primernim. Možnosti ostajajo odprte za nadaljnje raziskave.



Slika 11. Graf prikazuje odvisnost števila obratov na minuto od toka, ki teče skozi elektromagnet. Seveda tu govorimo o eksperimentalnem visokotemperaturnem superprevodnem levitirajočem motorju [12].

Levitacija diamagnetov v visokonapetostnem magnetu

Diamagnetni materiali v gradientu magnetnega polja čutijo odbojno silo. Ta sila je premajhna, da bi jo zaznavali pri magnetnih poljih reda 1 T, ki jih proizvajajo konvencionalni elektromagneti ali TM. Če pa diamagnetno snov postavimo v *hibridni magnet*, je lahko magnetna sila nasprotno enaka sili težnosti, kar privede do levitacije (slika 12). Prvi levitacijski eksperiment z različnimi diamagnetnimi snovmi sta izvedla *Beaugnon* in *Tournier* z uporabo hibridnega magneta v *Visokonapetostnem magnetnem laboratoriju* v Grenoblu [5].

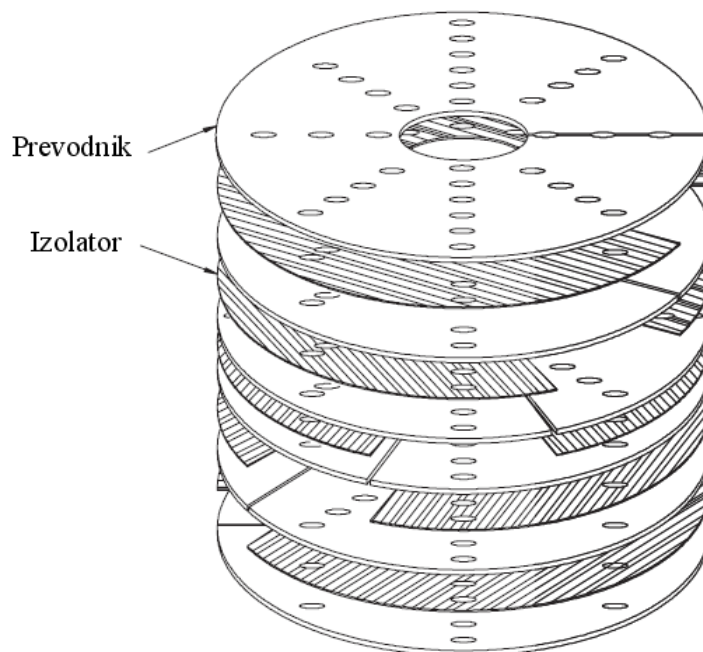


Slika 12. Slika (a) prikazuje jabolko, ki je v posodi, preden zaženemo hibridni magnet. Slika (b) pa prikazuje levitirajoče jabolko [5].

Hibridni magneti (slika 13) so sestavljeni magneti, s katerimi lahko dosegamo visoka magnetna polja. Zunanje navitje magneta sestavlja *superprevodni magnet*, ki skrbi za modulacijo magnetnega polja. Notranje navitje magneta (*uporovni magnet*) pa skrbi za koncentracijo magnetnega polja. Uporovni magnet izdelamo s pomočjo naluknjanih diskov (slika 14), ki imajo v sredini večjo odprtino (namenjeno kroženju magnetnega polja). Več takšnih diskov sestavimo v tuljavo v kombinaciji prevodnika in izolatorja. Po prevodnikih pošiljamo velik električni tok, ki generira magnetno polje. Celotno tuljavo hladimo z vodo, ki teče po luknjicah [13].



Slika 13. Slika prikazuje Teslov hibridni magnet, ki ima sledeče karakteristike: gostoto magnetnega polja 45 tesla, notranjo odprtino 32 mm, težo 31.750 kg, višino 6,7 metrov, obratuje pri temperaturi -271°C , za obratovanje porabi 33 MW moči in stane okoli 10 milijonov evrov [14].



Slika 14. Iz kombinacije prevodnih in izolacijskih naluknjanih diskov lahko sestavimo uporovni magnet. Po manjših luknjicah teče hladilo (voda), v sredinski odprtini pa se inducira magnetno polje 30 T [13].

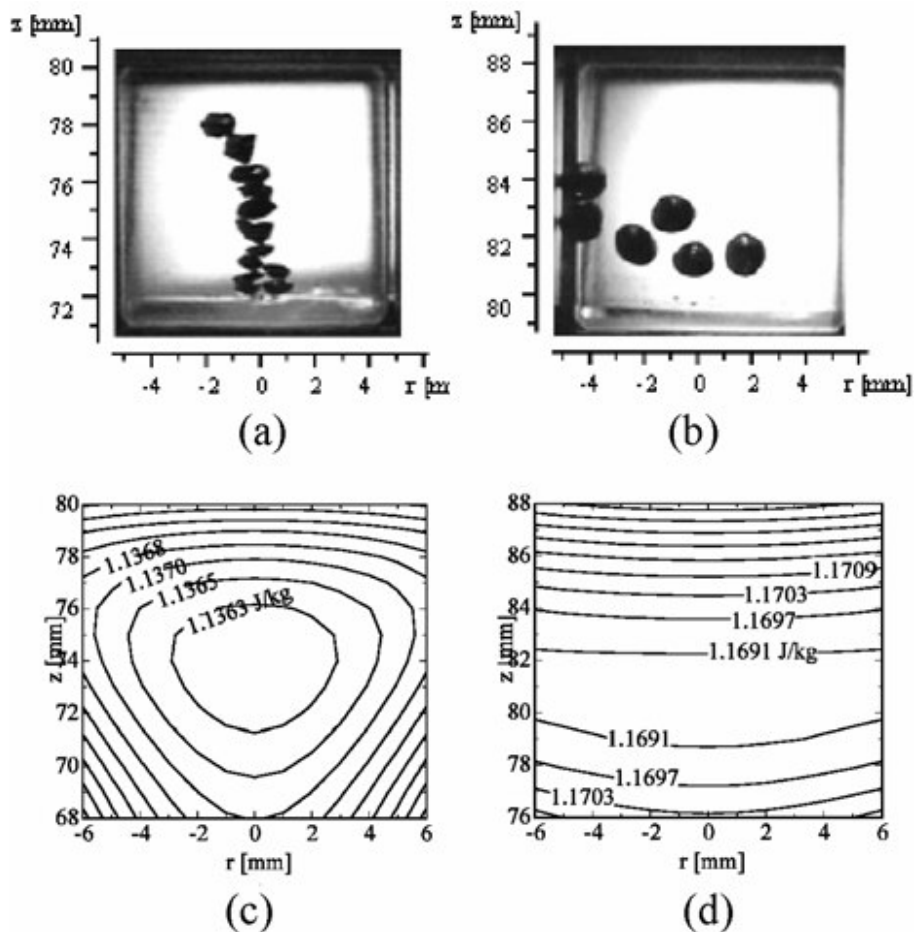
Potencialna energija U in magnetna sila F_{mz} na enoto mase materiala sta podana kot

$$U = -\frac{1}{2}\mu_0\chi_g B^2 + gz + C, \quad (1)$$

$$F_{mz} = \mu_0\chi_g \mathbf{B} \cdot \left| \frac{d\mathbf{B}}{dz} \right|, \quad (2)$$

kjer je χ_g magnetna susceptibilnost, μ_0 induksijska konstanta, \mathbf{B} gostota magnetnega polja in C konstanta. Ker ima diamagnetna snov negativno susceptibilnost, v magnetnem polju magneta čuti vzgonsko silo. Za levitacijo jabolka potrebujemo sile magnetnega polja $\mathbf{B} \cdot |d\mathbf{B}/dz| \approx 1400 \text{ T}^2\text{m}^{-1}$. Magnetna levitacija deluje na posamezno molekulo, ter nam tako nudi navidezne mikrotežnostne pogoje. To omogoča izvajanje podobnih poskusov, kot so v vesoljskem plovilu. Mikrotežnostni pogoji v magnetu niso enaki tistim v vesolju. Medtem ko v vesolju stabilni potencialni minimum ne obstaja, magnetno levitirajoče snovi ležijo v "dolini" potencialne energije. To omogoča kontrolo nad levitirajočimi snovmi (prednost pred levitacijo v vesolju). Za aplikacije v sintezi materialov je zato poznavanje obnašanja snovi pod levitirajočimi pogoji ključnega pomena (slika 15). S tem so omogočene mnoge nove tehnike materialne sinteze, kjer ne

potrebujemo posode (brezposodna obdelava). Takšna tehnika nam nudi čisto, nekontaminirano okolje [5].

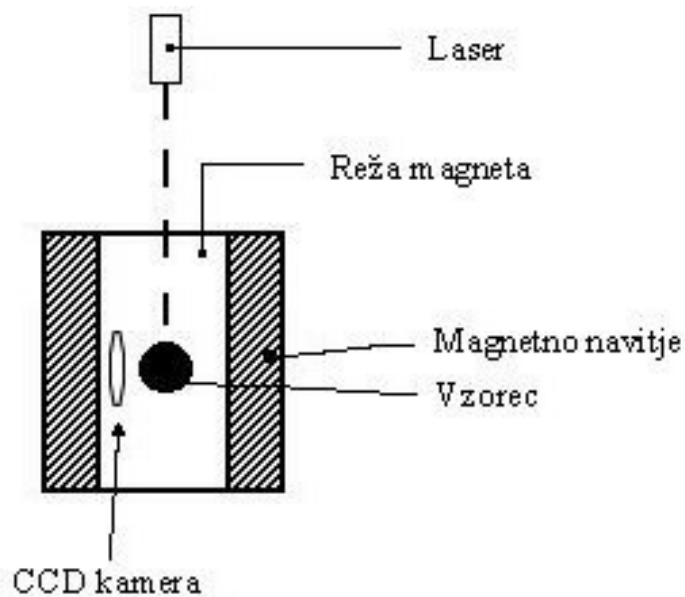


Slika 15. Levitirajoči delci Bi v pri gostotah magnetnega polja (a) $B_c = 11,7$ T in (b) $B_c = 12,2$ T. Na spodnjih dveh grafih pa so prikazane ekvipotencialne ploskve gostote potencialne energije Bi delcev pri gostotah magnetnega polja (c) $B_c = 11,7$ T in (d) $B_c = 12,2$ T [5].

Magnetna levitacijska pečica

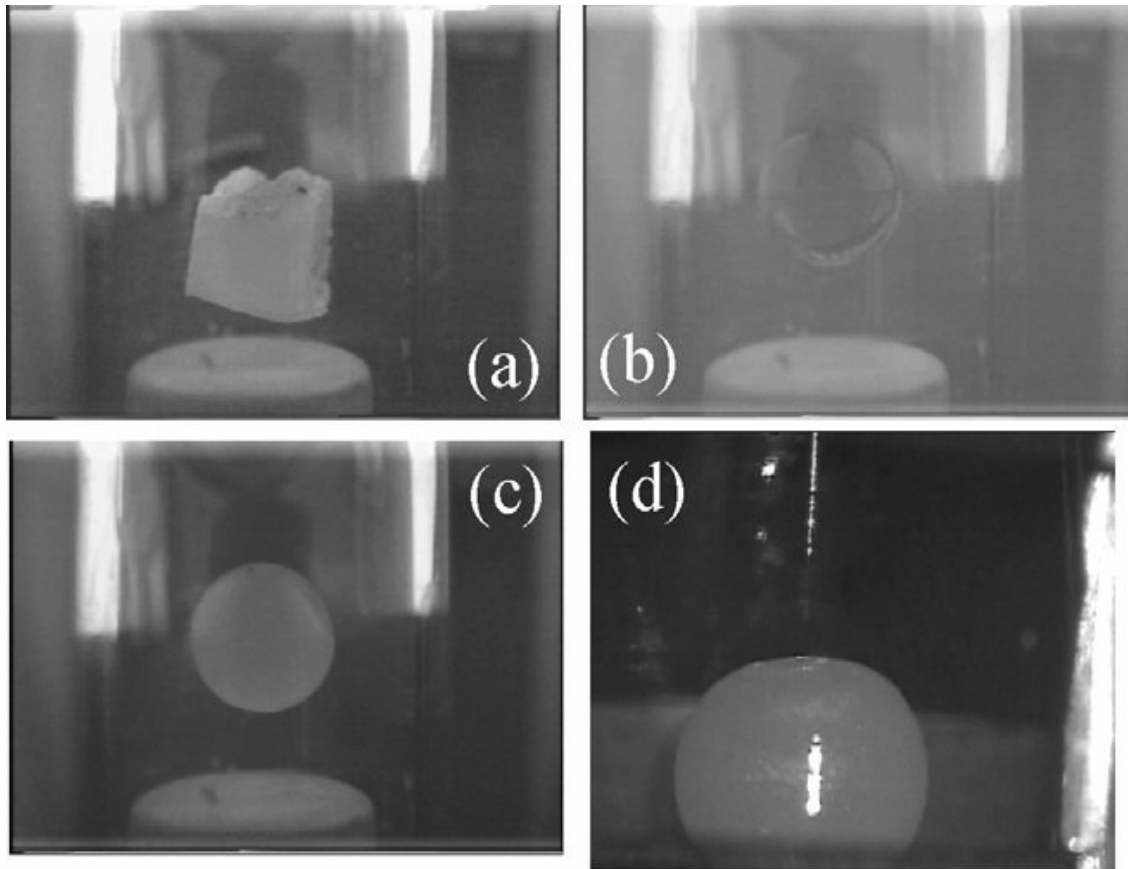
V tem poglavju bomo predvsem govorili o brezposodnem topljenju in strjevanju. Brezposodno topljenje je ena najbolj praktičnih in uporabnih aplikacij magnetne levitacije. Prednosti brezposodnega topljenja so čista obdelava brez onesnaženja obdelan zaradi posode, lažja proizvodnja podhlajene faze zaradi represije heterogene tvorbe jeder in doseganje višjih temperatur od tališča talilne posode [5]. Še več, v primeru magnetne levitacijske pečice (slika 16) visoko magnetno polje povzroči orientacijo materialov z anizotropno magnetno susceptibilnostjo [5].

Dizajn magnetne levitacijske pečice ima svoje specifične zahteve, ki jih pri klasičnih pečicah ni. Prva zahteva je segrevanje vzorcev v velikem magnetnem polju. Druga je namestitev pečice v omejen, ozek prostor v hibridnem magnetu. Tretja pa je opazovanje obnašanja levitirajočega vzorca. Nujno potrebno je preverjati, da objekt med postopki segrevanja in ohlajanja res lebdi. V primeru, da je magnetna susceptibilnost odvisna od temperature, nam lahko predmet odleti iz pečice ali pade na tla. Vzrok temu je, kot smo že omenili, sprememba susceptibilnosti, kar se direktno odraža na magnetni sili, ki jo diamagnetik čuti v magnetnem polju. Če se magnetna susceptibilnost poveča, postane magnetna sila na predmet večja in predmet nam odleti iz magneta. Če se pomanjša, predmet posledično pade [5].



Slika 16. Shema magnetne levitacijske pečice. Diamagnetni vzorec postavimo na dno reže. Po superprevodniku, ki sestavlja magnetno navitje, poženemo tok, ki inducira magnetno polje. To polje povzroči levitacijo predmeta. Vzorec segrevamo z laserskim žarkom, odziv pa spremljamo preko CCD kamere.

Levitacijska pečica, ki za gretje uporablja CO_2 laser, je ena od metod, ki izpolnjuje vse zgornje zahteve. Magnetno polje na laserski žarek ne vpliva. Laser ima to lastnost, da segreva samo vzorec in ne okolice, kar omogoča postavitev CCD kamere blizu vzorca. Vodoravni laserski žarek CO_2 laserja pošljemo na konkavno ogledalo, ki žarek zbere in usmeri na vrh levitirajočega vzorca. Prvi eksperiment, ki so ga naredili s takšno pečico, je bil brezposodno topljenje stekla BK7. Steklена kocka se je spremenila v popolno kroglo po topljenju in strditvi. Drugačne efekte pa so opazili pri topljenju parafina (slika 17) [5].



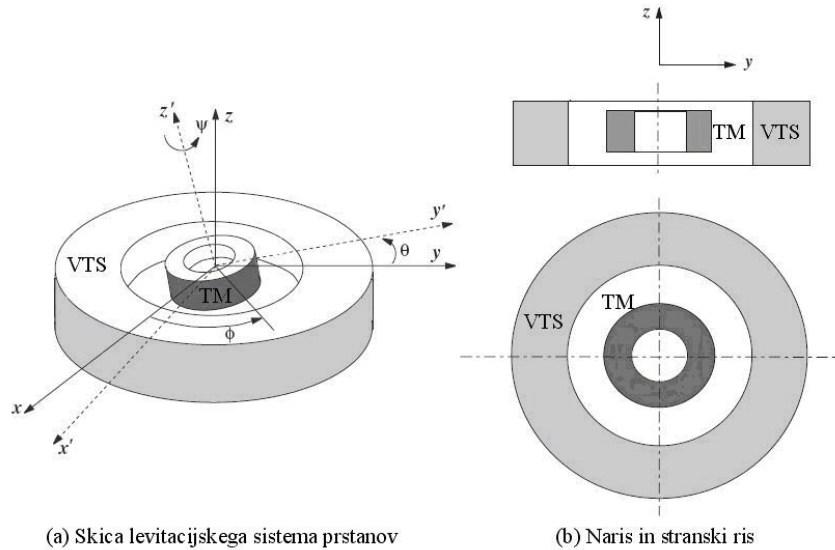
Slika 17. Prikaz brezposodnega topljenja in strditve parafina v magnetni levitacijski pečici: (a) pred topljenjem, (b) stopljena kapljica, (c) strditev v CO₂ laserski pečici in (d) padanje med strditvijo v YAG laserski pečici [5].

Ležaji

Superprevodni magnetni ležaji imajo veliko možnost uspeha zaradi sposobnosti pasivne levitacije. Njihov dizajn ponuja tako radialno kot osno podporo. Potencialna možnost njihove uporabe je v motorjih, generatorjih in vztrajnikih. Ležaji te vrste so sposobni prenašati rotorje teže nekaj sto kilogramov. Tu ne bomo govorili o preprostih levitacijskih konfiguracijah, kot je magnetni disk nad visokotemperaturnim superprevodnikom. Ogledali si bomo *levitacijski sistem prstanov*, ki je podoben krogličnim ležajem, le da je tu med TM in VTS ni kroglic, temveč praznina [15].

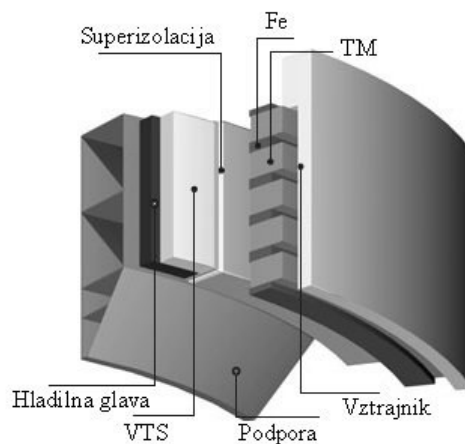
Levitacijski sistem prstanov sestoji iz dveh prstanov: zunanjega, ki je narejen iz visokotemperaturnega superprevodnika, ter notranjega, narejenega iz trajnega magneta. Prstan iz TM postavimo v večji prstan narejen iz VTS, kot kaže slika 18(a). Nato VTS postopoma ohlajamo do superprevodnega stanja. Ko VTS preide v superprevodno stanje, se v sistemu pojavijo tri sile, ki skrbijo, da TM ostane na mestu, kot je na sliki 18(b). Prva mu nudi radialno podporo in je posledica izrivanja magnetnega polja iz superprevodnika. Druga sila TM omejuje v vseh smereh (nudi mu tako radialno kot osno podporo). Je posledica ujemanja magnetizacije v superprevodniku. Najmanjša od vseh treh je sila, ki je

posledica vrtnčnih linij, ki začnejo prodirati v VTS. Vse tri sile skupaj tako zagotavljajo levitacijo in togost sistema [15].



Slika 18. Shematični prikaz TM-VTS sistema (a). Večji prstan (zunanji) je narejen iz VTS, manjši (notranji) pa iz TM. VTS, iz razlogov lažjega hlajenja, pritrdimo na stator, TM pa pritrdimo na rotor. Takšni sistemi lahko prenašajo obremenitve, kot jih povzroča vztrajnik z maso 500 kg [15].

Sistem levitirajočih prstanov ni edini TM-VTS sistem, ki ga lahko uporabljamo. Ravno tako ga lahko v motorjih, vztrajnikih in gredeh nadomesti podolgovat, cilindričen sistem, ki ga prikazuje slika 19 [16].



Slika 19. Prikaz cilindričnega TM-VTS ležajnega sistema. Stator je pritrjen na podporo, ki omogoča dovajanje hladila hladilni glavi za hlajenje VTS. Rotor pa sestavlja vztrajnik, na katerega je pritrjena kombinacija magnetov in Fe ploščic [16].

Ležaji na magnetno silo imajo mnogo prednosti pred klasičnimi. Zagotavljajo nekontaktno delovanje, kar zmanjša vibracije in hrupnost sistemov. Z njimi odpravimo potrebo po podmazovanju, kar omogoča čistejše, neonesnaženo okolje (pomembno v sistemih kot so turbinske vakuumske črpalke). Poglavitna prednost magnetnih ležajnih sistemov je v izgubah, ki so v primerjavi s klasičnimi ležaji zanemarljive.

Zaključek

Magnetna levitacija ima potencial, da postane tehnologija prihodnosti. Opraviti bo potrebno še veliko raziskav lastnosti magnetne levitacije, s katerimi bomo izpopolnili obstoječe sisteme maglev, maglifter, ležaji itd. Glavna težava magnetne levitacije je cena, ki jo moramo plačati, da jo dosežemo. Tu mislimo tako na stroške obratovanja (visoko napetostni magneti) kot ceno izgradnje (maglev, maglifter itd). Vsekakor je to tehnologija, v katero se splača vložiti za boljši jutri.

Literatura

- [1] H. W. Lee, K. C. Kim in J. Lee, IEEE Trans. Magn. **42**, 1917 (2006).
- [2] A. Cassat in M. Jufer, IEE Trans. Appl. Supercond. **12**, 915 (2002).
- [3] J. R. Hull in M. Murakami, Proc. IEEE **92**, 1705 (2004)
- [4] D. H. N. Dias, G. G. Sotelo, R.B. Kasal, R. de Andrade Jr. in A. C. Ferreira, J. Phys. Conf. Ser. **97**, 012216 (2008).
- [5] I. Mogi, K. Takahashi, S. Awaji, K. Watanabe in M. Motokawa, J. Phys. Conf. Ser. **51**, 431 (2006).
- [6] <http://www.transrapid.de>
- [7] W. Yang, M. Qiu, Y. Lui, Z. Wen, Y. Duan in X. Chen, Supercond. Sci. Technol. **20**, 281 (2007).
- [8] J.R. Hull in A. Cansiz, J. Appl. Phys. **86**, 6396 (1999).
- [9] K. Nagashima, T. Otani in M. Murakami, Physica C **328**, 137 (1994).
- [10] I. G. Chen, J. C. Hsu in M. K. Wu, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 1475 (2001).
- [11] M. Zeisberger, T. Habisreuther, D. Litzkendorf, O. Surzhenko, R. Muller in W. Gawalek, IEEE Trans. Appl. Supercond. **11**, 1741 (2001).
- [12] R. A. Shukor in K. H. Lee, Phys. Educ. **33**, 47 (1998).
- [13] M. D. Bird, Supercond. Sci. Technol. **17**, R19 (2004).
- [14] <http://www.magnet.fsu.edu>.
- [15] S. Sivrioglu in Y. Cinar, Supercond. Sci. Technol. **20**, 559 (2007).
- [16] S. O. Siems, W. R. Canders, H. Walter in J. Bock, Supercond. Sci. Technol. **17**, S229 (2004).