

Maglev - najbrža željeznica na svijetu

Đurin, Valentina

Master's thesis / Diplomski rad

2018

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:041623>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-27**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

Valentina Đurin

MAGLEV- NAJBRŽA ŽELJEZNICA NA
SVIJETU

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

FIZIČKI ODSJEK

INTEGRIRANI PREDDIPLOMSKI I DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ

FIZIKA I TEHNIKA; SMJER: NASTAVNIČKI

Valentina Đurin

Diplomski rad

Maglev- najbrža željeznica na svijetu

Voditelj diplomskog rada: doc. dr. sc. Željko Skoko

Ocjena diplomskog rada: _____

Povjerenstvo: 1. _____

2. _____

3. _____

Datum polaganja: _____

Zagreb, 2018.

Kao prvo, zahvaljujem se svome mentoru doc. dr. sc. Željku Skoki na predloženoj temi, ukazanom strpljenju i svojoj pomoći koju mi je pružio ne samo pri pisanju ovog diplomskog rada već i tijekom čitavog školovanja na PMF-u.

Zahvaljujem se svojoj obitelji, ponajprije svojim roditeljima Anki i Zlatku, bili ste mi neizmjerne podrška u svemu, tješili kada je bilo teško, veselili se kada bih savladala još jednu stepenicu te omogućili da „izguram“ ovo do kraja. Ostatku obitelji zahvaljujem na svim riječima podrške i „držanju figa“.

Zahvaljujem se svome Stipi, što je istrpio sva moja raspoloženja, uvijek me motivirao da idem naprijed i učinio život ljepšim. Hvala ti i za pomoć pri praktičnom dijelu diplomskog rada, bez tebe ne bih uspjela.

Zahvaljujem se svim svojim prijateljima i prijateljicama što ste uvijek bili uz mene. Hvala za sva druženja, nadam se da će ih biti još puno.

Na kraju, zahvaljujem se svojim kolegama tehničarima (znati će na koje se odnosi) na svim skriptama, bilješkama, objašnjenjima, porukama, mailovima, razgovorima, smijehu, odlascima u menzu, kavama iz aparata bez kojih studiranje ne bi bilo isto.

Sažetak

Pojam levitacije (lebdjenja) odnosi se na tehnologiju koja koristi magnete za pokretanje vozila rađe nego kotače, osovine i ležajeve. Magnetska levitacija omogućuje vozilu da levitira na kratkoj udaljenosti od tračnica koristeći magnete koji stvaraju podizanje i potisak. Zbog toga se Maglev vlakovi gibaju lakše i tiše nego tranzitni sustavi na kotačima koji se koriste po čitavom svijetu. Iako se danas velik broj konvencionalnih vlakova giba velikim brzinama, Maglev ih nadilazi i time drži rekord za najbrži željeznički prijevoz.

Ključne riječi: Maglev, levitacija, suspenzija, elektromagnet, supravodljivost

Maglev- the fastest train in the world

Abstract

The term levitation refers to technologies that use magnets to propel vehicles rather than with wheels, axles and bearings. With magnetic levitation, a vehicle is levitated a short distance away from a guideway using magnets to create both lift and thrust. Maglev trains move more smoothly and more quietly than wheeled transit systems that are used all around the world. Although today conventional wheeled transportation can move at high speed, Maglev allows use of even higher top speeds and this type holds the speed record for rail transportation.

Keywords: Maglev, suspension, levitation, electromagnet, superconductivity

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Povijest Magleva	2
2.1. Prvi začeci	2
2.2. Razvojni uspon	3
3. Karakteristike i kvalifikacije Maglev vlakova	5
3.1. EMS sustav	5
3.2. EDS sustav	6
4. Maglev tračnice	9
5. Linearni motori	11
5.1. Kratki statorski linearni inducirani motor- LIM	12
5.1.1. Osnovna struktura LIM-a	12
5.1.2. Prednosti LIM-a	13
5.1.3. Nedostaci LIM-a	13
5.2. Dugi statorski linearni sinkroni motor- LSM	14
5.2.1. Osnovna struktura LSM-a	14
5.2.2. Prednosti LSM-a	15
5.2.3. Nedostaci LSM-a	15
6. Usporedba Maglev vlakova s konvencionalnim vlakovima	16
7. Elektromagnetizam	18
7.1. Magnetizam	18
7.2. Maxwellove jednadžbe	21
7.3. Svojstva magneta	22
7.3.1. Dijamagnetizam	24
7.3.2. Paramagnetizam	26
7.3.3. Feromagnetizam	27
7.4. Magnetizam u Maglevu	30
8. Metodički dio	31
8.1. Nastavna priprema	32
9. Literatura	43

1. Uvod

Pojam magnetske levitacije (maglev) još uvijek je velika enigma među današnjom populacijom no predstavlja naprednu tehnologiju koja polako počinje „vladati“ svijetom. Levitacija (lat. levitas: lakoća) označava proces u kojem se fizikalnim poljem, zračenjem, ultrazvukom, strujanjem plina i dr. postiže da neki predmet lebdi. [21]

Koristi se u različite svrhe kao što su obnovljivi izvori energije (vjetrene turbine), građevinski objekti, prijevozni sustavi (magnetsko levitacijski vlak, osobni brzi prijevoz (PRT)...), oružja (pištolji, rakete), nuklearno inženjstvo (centrifuga i nuklearni reaktor), civilno inženjstvo (dizalo), reklamiranje, igračke, pisaći pribor itd. Glavna svrha primjene ovakve tehnologije je smanjeni kontakt koji dovodi do manjeg trošenja i trenja. To povećava djelotvornost, reducira cijenu održavanja te povećava radni vijek sustava.

Magnetska levitacija stekla je svoju popularnost upotrebom kod magnetsko levitacijskih vlakova. Magnetsko levitacijski vlakovi trenutno su najnaprednija željeznička vozila i u tom području predstavljaju prvu bitnu inovaciju od kad postoji željeznički prijevoz.

Stalni napredak u elektronici i tehnologiji senzora otvara nove primjene elektromagnetske levitacije koja pruža lagane sustave i visoko preciznu kontrolu gibanja. Daljnji razvoj magnetskih materijala i elektroničkih uređaja na principu magnetske levitacije mogao bi ponuditi više nego ikad prije, uključujući ne samo primjene u željeznici, već i u automatizaciji, zrakoplovstvu i raznim oblicima zabavnih sadržaja.

Levitacijska tehnologija, koja je nekad bila glavna tema znanstvenih filmova i romana, postat će prijelomna tehnologija u bliskoj budućnosti.

Glavni cilj ovog diplomskog rada je što više približiti ovu vrlo zanimljivu i još uvijek nepotpuno istraženu temu, kako nastavnicima tako i učenicima/studentima te pokazati kako ju na zabavan način iskoristiti u nastavi.

2. Povijest Magleva

2.1. Prvi začetci

Razvoj magnetsko levitirajućeg vlaka (eng. Magnetic Levitation, Maglev) kreće još od 19. stoljeća. Zahvaljujući velikom broju izumitelja diljem svijeta razvio se ovaj brzi način prijevoza za koji se mnogi nadaju da će zamijeniti uobičajeni željeznički prijevoz. 1842. godine matematičar Samuel Earnshaw postavlja teorem, koji vrijedi za klasičnu fiziku, a govori o tome da se pomoću statičkih magnetskih polja i električnih naboja ne može postići statičko lebdjenje. Prva ideja vlaka pokrenutog linearnim motorom javlja se 1902. godine. Začetnik ove ideje bio je Alfred Zehden, njemački inženjer i izumitelj. No trebalo je proći nekoliko godina kako bi došlo do njenog razvoja. Iako je velik broj njemačkih znanstvenika, izumitelja i naučnika pokušavao ostvariti ovakvu ideju jedino je Zehden u tome bio uspješan.

Gotovo 40 godina je bilo potrebno kako bi model ovog motora postao stvarnost. 1940. godine Ericu Laithwaiteu pripisana je izgradnja prvog radnog modela linearnog motora u punoj veličini. Otprilike u isto vrijeme, 1941. godine, Hermann Kemper predlaže i razvija koncept prijevoza te dostupnost tehnologije Magleva.

Sve do 1969. nije bilo značajnijeg pomaka u razvoju Maglev tehnologije. Tada je njemačka kompanija Krauss-Maffei razvila prvi laboratorijski model (TR01) u svijetu, zamijenivši kratki stator linearnog motora dugačkim statorom sinhronog vučnog motora. U ranijim 1970-ima njemačka vlada je počela provoditi razvojni plan Maglev brzih vlakova te su na principu modela TR01 napravljeni modeli TR02 i TR04. 1974. godine japanska aviokompanija JAL kupuje patent modela TR04 te ga koristi kao bazu za izgradnju testnih modela Magleva malih brzina nazvanih HSST. Zadnji model HSST-05 često je korišten u kasnijim projektima izgradnje Maglev vlakova diljem svijeta.

Zbog zakrčenih cesta i porasta zrakoplovnog prometa dolazi do velike potražnje za novim ekonomičnijim, udobnijim i bržim načinima prijevoza stoga zemlje poput Kine, Japana, Njemačke, Velike Britanije i SAD-a traže načine kako riješiti ovaj problem. Dolazi do značajnijih promjena u izgradnji Maglev vlakova i nakon dugog niza godina Maglev postaje dio urbanog načina života.



Slika 1. Krauss-Maffei transurbani Maglev

2.2. Razvojni uspon

Početak 1970-ih razvio se koncept kontinuiranih vodljivih tračnica te dolazi do proučavanja elektrodinamičkih levitirajućih sustava uz pomoć supravodljivih magneta. 1972. godine eksperimentalni test supravodljivog Maglev vozila LSM200 doživljava uspjeh u levitiranju kao i ML100. Nekoliko godina nakon toga 1977. u Myazakiju (Japan) otvorena je testna pruga duga 7 kilometara. Iste godine započeo je pokusni rad ML-500 upravo na toj pruzi. U siječnju 1979. godine testirali su rad simulacijskog tunela, a u svibnju vožnju sa spremnikom helija u vlaku. Naknadno je postignuta brzina od čak 517 km/h. Otprilike u isto vrijeme u Hamburgu je otvorena 908 metara duga pruga za prvu međunarodnu izložbu prijevoza.

1980. započinju testiranja na U-tračnicama magleva MLU001. Prvi komercijalni automatizirani sustav na svijetu bio je Maglev male brzine koji je vozio od terminala zračne luke Birmingham International Airport (UK) do obližnjeg željezničkog kolodvora Birmingham International od 1984. do 1995. godine. U vrijeme tih godina postizane su brzine od 352 km/h, 400 km/h i 405 km/h.

1990-ih godina dolazi do većih gradnji Maglev sustava. Započinje prva faza izgradnje Yamanashi testne linije. 1991. dolazi i do prve veće nesreće u kojoj se MLU002 zapalio zbog prevelikog trenja izazvanog zbog kvara na kotaču. Između Berlina i Hamburga gradi se 1992. 300 km dug super brzi Maglev sustav. Sljedećih godina pokušavaju se postići što veće brzine Maglev sustava. Uspješno je postignuta brzina od čak 550 km/h. Nakon 2000. godine Maglev postaje sve popularniji. Cjelokupna putna

udaljenost postignuta ovim načinom prijevoza premašuje 200 000 km te se broj putnika sve više povećava. 2003. najveći prevaljeni put u jednom danu iznosio je 1219 km što je nakon par mjeseci povećano na 2876 km. Iste godine postignuta je najveća brzina ikad zabilježena, a iznosila je 581 km/h. 2006. zabilježena je još jedna nesreća, ali ovaj put sa kobnim posljedicama. Transrapidni vlak sudario se s vozilom za održavanje na probnom ispitivanju. 23 ljudi je poginulo, a desetak ih je ozlijeđeno.

GODINA	MJESTO	NAZIV	BRZINA
1971.	Zapadna Njemačka	Prinzipfahrzeug	90 km/h
1971.	Zapadna Njemačka	TR-02	164 km/h
1972.	Japan	ML100	60 km/h
1973.	Zapadna Njemačka	TR04	250 km/h
1974.	Zapadna Njemačka	EET-01	230 km/h
1975.	Zapadna Njemačka	Komet	401,3 km/h
1978.	Japan	HSST01	307,1 km/h
1978.	Japan	HSST02	110 km/h
1979.	Japan	ML500	517 km/h
1987.	Zapadna Njemačka	TR06	406 km/h
1987.	Japan	MLU001	400,8 km/h
1988.	Zapadna Njemačka	TR06	412,6 km/h
1989.	Zapadna Njemačka	TR07	436 km/h
1993.	Njemačka	TR07	450 km/h
1994.	Japan	MLU002N	431 km/h
1997.	Japan	MLX01	531 km/h
1997.	Japan	MLX01	550 km/h
1999.	Japan	MLX01	548 km/h
1999.	Japan	MLX01	552 km/h
2003.	Njemačka	TR08	501 km/h
2003.	<i>Japan</i>	<i>MLX01</i>	<i>581 km/h</i>
2015.	<i>Japan</i>	<i>LO</i>	<i>603 km/h</i>

Tablica 1. Povijest zapisa maksimalnih brzina [20]

3. Karakteristike i klasifikacije maglev vlakova

Sustavi maglev vlakova dijele se na dvije skupine: elektromagnetsku suspenziju (ElectroMagnetic Suspension-EMS) te elektrodinamičku suspenziju (ElectroDynamic Suspension-EDS). Postoji još nekoliko varijanti vozila koja su napravljena na temelju ova dva sustava, ali ćemo se u nastavku baviti opisom navedenih. Tri primarne funkcije Maglev tehnologije su levitacija, propulsija i upravljanje, a magnetske sile su te koje izvode sve tri uz pomoć jakih magneta. [1] Za EMS sustave, magneti se nalaze unutar samog vozila, dok su za EDS sustave magneti postavljeni unutar tračnica.

3.1. EMS sustav

EMS sustav koristi privlačenje elektronički kontroliranog elektromagneta sa magnetsko vodljivim (najčešće čeličnim) tračnicama. Rad EMS sustava bazirana je na privlačnim magnetskim silama. Suspenzijski elektromagnet u vozilu smješten ispod tračnica proizvodi magnetsko polje i time privlači tračnice. Ta privlačna sila jača je od gravitacijske sile. Vlak lebdi iznad tračnica, a razmak između elektromagneta i elektromagnetskih tračnica iznosi oko 8-10 mm. Suspenzijski razmak iznosi oko 150 mm. Vlak se pokreće pomoću linearnog motora i suspenzijski razmak ostaje stalan uz pomoć kontrole pobudne struje suspenzijskog elektromagneta.

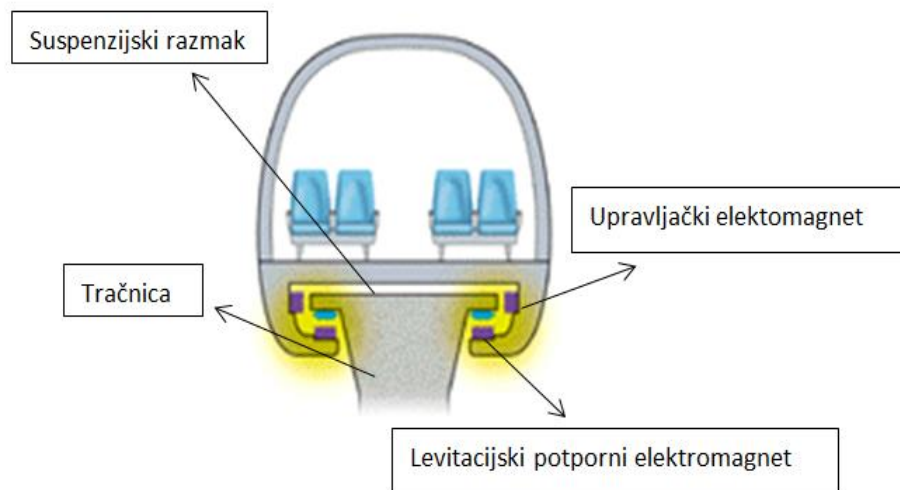
S druge strane, upravljački magneti usmjeravaju vlak tako da bočna strana staze nema kontakta s vlakom, koji bi stvorio trenje i oštećenje vlaka. Upravljački magnet također služi za navođenje tako da vlak može slijediti smjer staze za vožnju.

Intenzitet magnetskog polja unutar putničkog prostora je mali, pa je siguran za putnike s uređajima za kontrolu rada srca (pacemakerima) ili putnicima koji nose uređaje za magnetsku pohranu poput kreditnih kartica ili tvrdog diska. Njegov intenzitet je usporediv s magnetskim poljem Zemlje i daleko niži od intenziteta polja sušila za kosu, električne bušilice ili šivaćeg stroja. U slučaju nestanka struje, EMS Maglev vlak opremljen je akumulatorima tako da i dalje lebdi iznad tračnica.

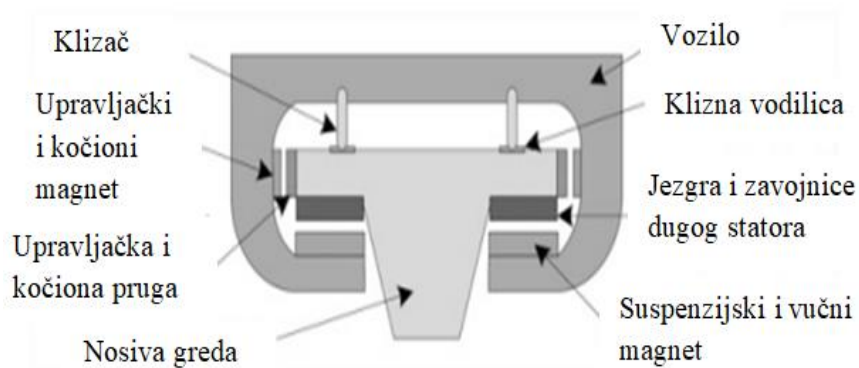
Glavna prednost ovakvih sustava je da funkcioniraju prvi svim brzinama. No, zbog dinamičke nestabilnosti sustava postavljaju se visoki zahtjevi tolerancije kontrole tračnica čime se *de facto* uklanja prednost rada pri svim brzinama. Da bi se konstruirala pruga s

pogodnim tolerancijama, razmak između magneta i tračnica mora se povećati do granice u kojoj će jakost magneta i dalje moći održavati vlak u zraku. U praksi je ovaj problem riješen kroz povećanje performansi povratnih sustava, koji omogućuju sustavu da se pokreće s približnim tolerancijama.

Najuspješniji EMS Maglev vlak zove Transrapid sustav, koji je razvijen i koristi se u Njemačkoj.



Slika 2. Osnovni prikaz EMS-a



Slika 3. Poprečni presjek EMS Maglev sustava

3.1. EDS sustav

EDS sustavi koriste supravodljive elektromagnete ili jake permanentne magnete koji stvaraju magnetsko polje koje inducira struju u obližnjim metalnim zavojnicama kada postoji relativni pomak koji gura i vuče vlak prema osmišljenom levitacijskom položaju na tračnicama. Ovi sustavi koriste odbojnu magnetsku silu za rad. EDS vlak lebdi samo kad

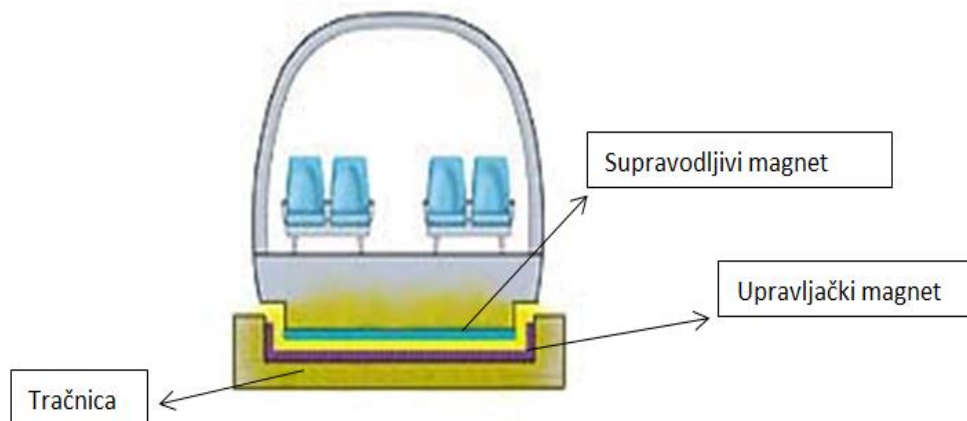
dostigne određenu brzinu (otprilike 100 km/h). Kada se vlak kreće, pomično magnetsko polje magneta pobuđuje induciranu struju u levitacijskim zavojnicama (to su uvijek supravodljive zavojnice s niskim temperaturama ili trajni magneti) ugrađenim u liniju. Pomično polje u interakciji s induciranom strujom stvara silu koja gura vlak prema gore i on levitira iznad tračnica na određenoj visini (100-150 mm).

Vlak se pokreće linearnim motorom. U usporedbi s EMS Maglev vlakom, EDS vlak ne može lebdjeti u stacionarnom stanju ili ispod određene brzine. EDS sustav ima veći suspenzijski razmak, a aktivna kontrola razmaka nije potrebna.

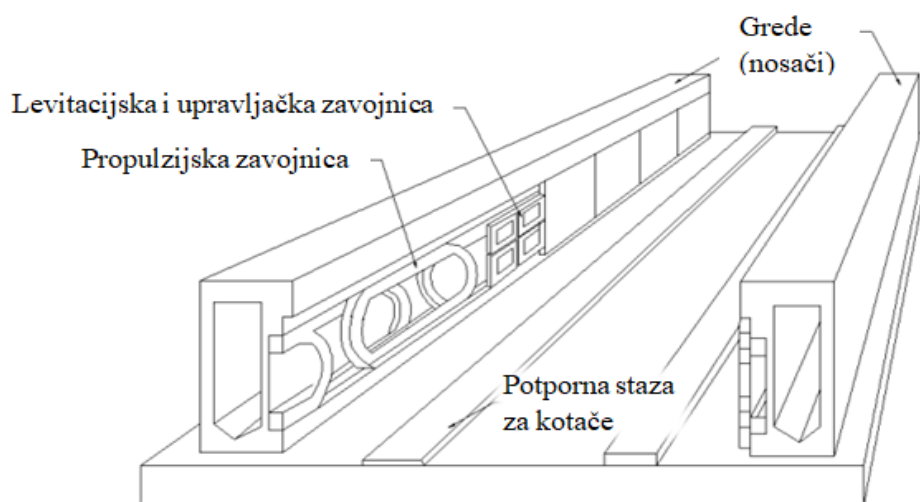
Glavna prednost EDS Maglev sustava je da su oni prirodno stabilni s malim ograničenjima udaljenosti između tračnica i magneta, što stvara jake sile koje odbijaju i vraćaju magnete u njihov izvorni položaj. Lagano povećanje udaljenosti uvelike smanjuje odbojnu silu i vraća vozilo na pogodno odvajanje. Privlačna sila djeluje u suprotnom smjeru i osigurava isti efekt prilagodbe. Nije potrebna kontrola povratnih informacija. Pri malim brzinama rezultatni magnetski tok i inducirana struja u zavojnicama nisu dovoljno velike kako bi podržali težinu Maglev vlakova. Zbog ovog razloga, vlak mora imati kotače ili neki drugi oblik opreme koja podupire vlak dok ne dosegne određenu brzinu koja podnosi levitaciju. Budući da se vlak može zaustaviti bilo gdje, primjerice zbog problema s opremom, cijela staza mora biti napravljena tako da može podržati male i velike brzine. Još jedan nedostatak je to da EDS sustav može proizvesti polje u tračnicama ispred vlaka i iza podiznih magneta, koje djeluje protiv magneta i stvara vučnu silu.

Budući da EDS vlak inducira veliko magnetsko polje, putnički dio vlaka mora biti zaštićen od magnetskog polja. Ukoliko putnički dio nije zaštićen magnetsko polje može djelovati na putnike s uređajima za kontrolu rada srca (pacemakerima) i oštetiti magnetski pohranjene podatke kao što su kreditne kartice i tvrdi disk.

EDS sustavi također se najviše koriste u Njemačkoj, ali i u Japanu gdje je jedan od najpoznatijih Japanski MLX vlak.



Slika 4. Osnovni prikaz EDS-a



Slika 5. Poprečni presjek EDS Maglev sustava

ZEMLJA	SUSTAV	SUSPENZIJA	DJELOVANJE	LEVITACIJA	VOZILO	BRZINA (km/h)	GODINA	
Njemačka	TRI	EMS	Privlačna sila	Pri mirovanju i malim brzinama	TR06	392	1987.	
					TR07	450	1993.	
					TR0 8	TR0	500	1999.
						SMT	502	2003.
					TR09	350	2008.	

Japan	RTRI i JR	EDS	Odbojna sila	Pri brzinama većim od 100 km/h	ML500-R	517	1979.
					MLU001	405	1980./82.
					MLU001	352	1980./82.
					MLU002	394	1987.
					MLX01	550	1997.
					MLX01	552	1999.
					MLX01	581	2003.

Tablica 2. Tehničke karakteristike maglev vlakova [5]

4. Maglev tračnice

Struktura koja služi usmjeravanju Maglev vozila, podupiranju i prijenosu tereta naziva se tračnica i jedan je od glavnih elemenata Maglev sustava. Maglev vlak levitira iznad jednostruke ili dvostruke tračnice. Tračnice se grade na povišenom položaju i najčešće se sastoje od pojedinačnih čeličnih ili betonskih greda radi bolje izdržljivosti. Povišeni položaj omogućava nesmetano kretanje Maglev vozila te garantira vožnju bez bilo kakvih prepreka. Kako bi se stvorila sigurnost u vožnji Maglev vlakova potrebno je napraviti sustav u kojem neće biti raskrižja između tračnica i drugih oblika prometnih pravaca.

Kod Maglev tračnica, suprotno tradicionalnim željezničkim prugama, nema potrebe za balastiranjem (pošljunčavanjem), izgradnjom praga, šipki i dodatnih željezničkih pričvršćenja za dodatno stabiliziranje razmaka među tračnicama. Tračnica se sastoji od nosača (grede) i dvije vodilice. Tračnice mogu biti različitih oblika. Najčešći oblici su poput slova U, slova I, slova T, u obliku kutije, rešetke...

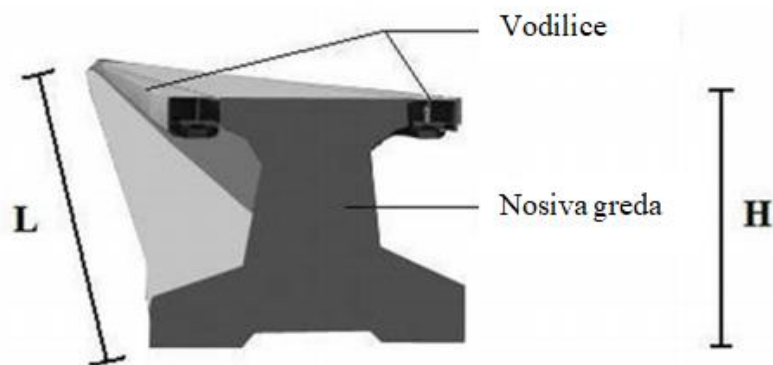
Većina poprečnih presjeka upravljačkih nosača također su u obliku slova U. Pružni kolosijek i razmaci između nosača su najčešće 2,8 i 24,8 m. Hibridni nosač u Shangaiu oblika slova I, dug je 24,8 m, širok 2,8 m i visok 2,2 m, a pojačan armiranom betonskom gredom.

Ovisno o visini tračnice postoje: tračnice s vodicom u razini zemlje $1.45 \text{ m} \leq h \leq 3.50 \text{ m}$ i tračnice s povišenom vodicom $h > 3.50 \text{ m}$.

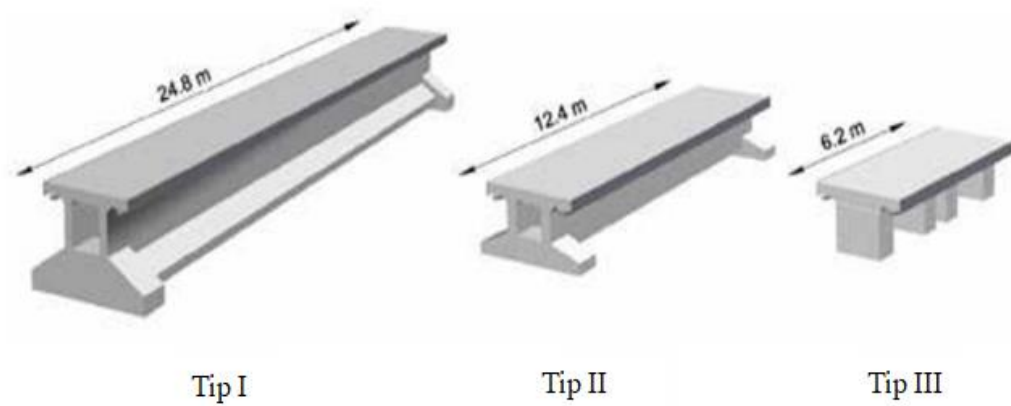
Standardni tipovi tračnica su:

- 1) Tip I: $L = 24,768$ i $H \leq 2,50$
- 2) Tip II: $L = 12,384$ i $H \leq 1,60$
- 3) Tip III: $L = 6,192$ i konstrukcija ploče, visina konstrukcije $\leq 0,40$

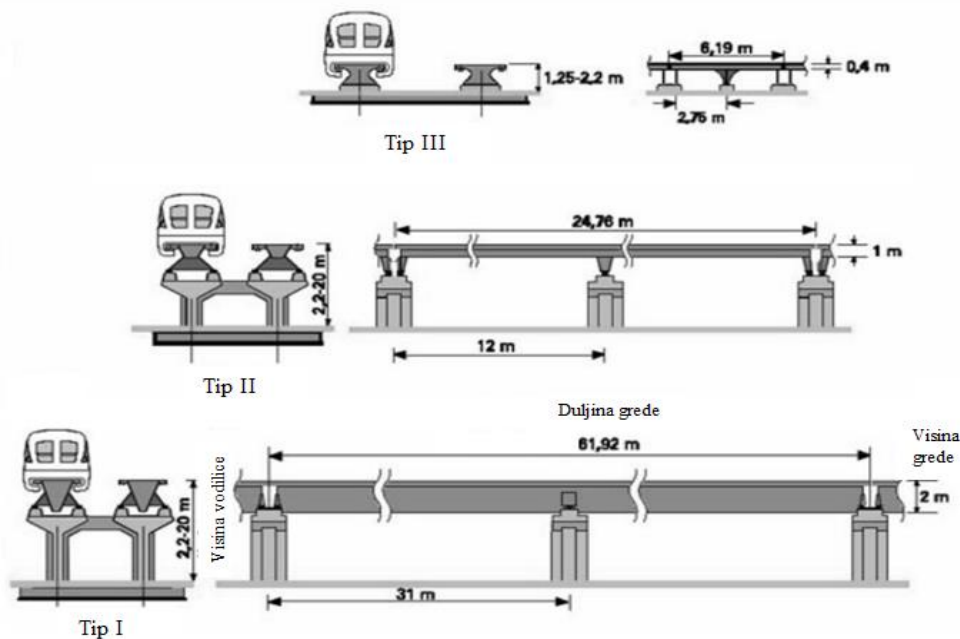
gdje je L duljina razmaka između nosivih stupova u metrima, a H visina nosača također u metrima.



Slika 6. Glavni dijelovi tračnica Maglev sustava: nosač i vodilice



Slika 7. Standardni tipovi nosača Maglev sustava



Slika 8. Standardne vrste tračnica

5. Linearni motori

Magnetska levitacija uzrokovana je magnetskim silama koje se prenose na vodilice kod Maglev vozila i upravo zbog njihovog međudjelovanja vozilo može lebdjeti iznad tračnica. Jednom kad je sustav levitiran pokreću ga linearni motori.

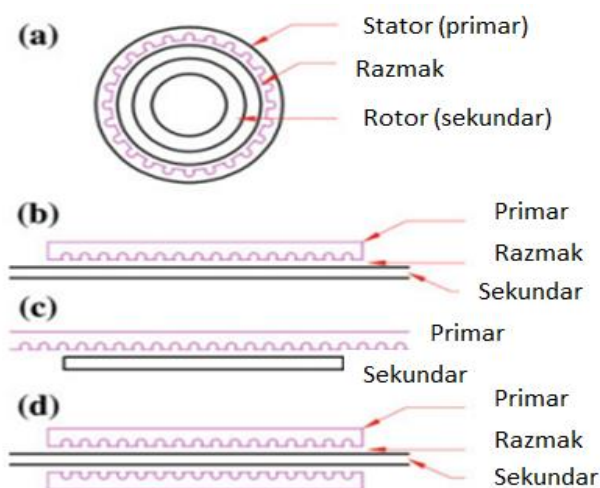
Postoji nekoliko različitih dostupnih vrsta, no najprikladniji su: LIM (kratki statorski linearni indukcijski motor) i LSM (dugi statorski linearni sinkroni motor). Linearni motori mogu se konceptualno opisati kao odmotane verzije poznatih rotirajućih strojeva. To znači da su konstrukcijski i operacijski elementi linearnih motora isti kao i kod rotacijskih motora. LIM koristi namatanje kotve u vodilici stvarajući putujući elektromagnetski val i kratko međusobno djelovanje tračnice i vozila. Ova tehnika je najčešće korištena za vožnju u tvorničkim transportnim sustavima no njegova izvedba kao sustav javnog prijevoza zaostaje u odnosu na LSM slične strukture. LSM pokreće se namatanjem kotve u vozilu koja stvara putujući val i određeno područje namotaja raspoređenih duž vodilice za koju je komplicirano dobiti podudaranje s profilom prijevoznog sustava i samim time je ekonomski teško isplativa.

5.1. Kratki statorski linearno inducirani motor - LIM

5.1.1. Osnovna struktura LIM-a

LIM je prvotno razvijen za Chubu HSST i linearni metro urbanog prijevoza u Japanu. Kasnije se počinje koristiti i u mnogim drugim zemljama poput SAD-a, Kanade, Njemačke, Velike Britanije koji razvijaju slične sustave za različite primjene.

Postoje tri različite strukture LIM-A koje se koriste u bilo kojem Maglev sustavu. To su: jednostrani linearni kratkog statora, jednostrani linearni dugog statora i dvostrani linearni sa dva kratka statora. Stator (primar) ili rotor (sekundar/sporedni) mogu biti instalirani na vozilo ili učvršćeni na vodilicu i obrnuto.



Slika 9. Transformacija rotirajućeg induksijskog motora u linearne verzije: (a) rotirajući motor; (b) jednostrani linearni kratkog statora; (c) jednostrani linearni dugog statora; (d) dvostrani linearni sa dva kratka statora

Interakcija između putujućeg magnetskog polja trofaznog namotaja na vozilu i polja vrtložnih struja u aluminijskoj ploči na vodilici inducirano putujućim magnetskim poljem, pruža potisak ubrzanom vozilu. Jakost potiska može se kontrolirati promjenom struje i frekvencije u trofaznom namotaju (primaru). Reaktivna moć LIM-a uobičajeno je visoka te se povećava sa povećanjem razmaka između statora i rotora, smanjujući tako faktor snage. Stoga je LIM prikladan za sustave čiji je razmak 15-20 mm.

5.1.2. Prednosti LIM-a

Sustav napajanja i konstrukcija je vrlo slična onoj koja se koristi u konvencionalnim gradskim i brzim električnim vozilima te zbog zajedničkih komponenti i stečenog praktičnog iskustva nisu potrebna nova znanja za korištenje ovog sustava.

Tehnologija LIM-a dobro savladava oštre zavoje i strme nagibe u svim vremenskim uvjetima, a ujedno i zadovoljava precizne zahtjeve kod zaustavljanja što nije moguće kod čeličnih kotača uobičajenih konvencionalnih željezničkih vozila.

Prijevoz vozilima s LIM sustavom pruža poboljšanje usluge i kvalitete vožnje te zadovoljava očekivanu sigurnost i pouzdanost tranzitnih sustava. Vozila s različitim parametrima dizajna i izvedbom se lako mogu prilagoditi bez mijenjanja unutrašnjih električnih i mehaničkih komponenti.

Upravljački tranzitni sustav LIM-a vrlo je fleksibilan u odgovaranju na promjenjive ili nejasne zahtjeve. To uključuje podešavanje broja i veličine vozila na kratkoročnoj ili dugoročnoj bazi. Kratkoročno, mogućnost dodavanja i pomicanja vozila pruža brzu sposobnost odgovora operatera na promijenjiv zahtjev i oporavak od bilo kakvog abnormalnog isključivanja ili odstupanja rasporeda. Dugoročno, ako je potrebna dodatna snaga za prilagodbu nadogradnje kapaciteta sustava, utjecaj na vodilicu se zanemaruje zbog dodatnih načina elektrifikacije snage i uređaja za napajanje.

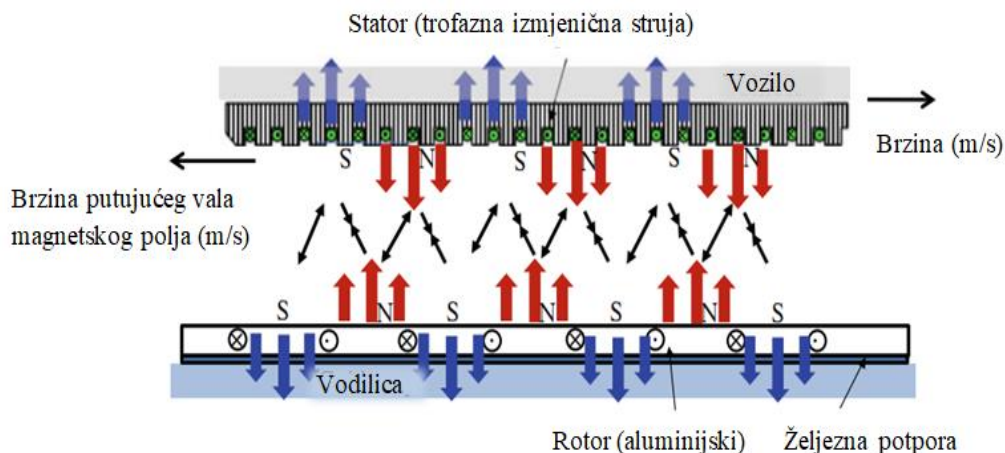
5.1.3. Nedostaci LIM-a

Energetska učinkovitost LIM-a manja je nego kod rotacijskog indukcijskog motora i LSM-a. Kod rotacijskog indukcijskog motora razmak između statora i rotora je puno manji što rezultira većom učinkovitosti.

Težina i veličina opreme sustava za napajanje na vozilu veća je od one u LMS-u, kao i veličina dodatnih sustava za napajanje. Povećanje težine tako ograničava operativnu brzinu sustava s LIM-om na 200-250 km/h, a prekoračenje težine nepraktično je za vrlo velike brzine.

Na kvalitetu vožnje utječu 3-dimenzionalne sile, kombinacija potisne i privlačno odbojne sile između statora i tračnica (normalna sila) te spoj tih sila sa lateralnom silom

koja usmjerava vozilo. Zbog pojave vrtložnih struja u rotoru, sve ove sile se mijenjaju čitavom dužinom u smjeru gibanja vozila. Problemi se mogu javiti kod oscilacija normalne sile i magnituda normalne i lateralnih sila pri velikim potiscima, kao i promjene tih istih sila sa promjenom razmaka između statora i rotora. Smanjenjem razmaka, normalna sila se poveća što dovodi do poremećaja sustava za levitaciju.



Slika 10. Načelo rada LIM-a korištenog u gradskim Maglev vozilima

5.2. Dugi statorski linearno sinkroni motor - LSM

5.2.1. Osnovna struktura LSM-a

LSM je prvotno razvijen s elektomagnetima i korišten za njemački transrapidni Maglev sustav, a kasnije se razvija i u Kini radi povezivanja zračne luke sa centrom Shangaia.

LSM se sastoji od višefaznih željeznih ili zračnih namotaja i trajnih ili elektromagneta. Trofazno namotavanje pokreće vozilo koje putuje sinkrono s elektromagnetskim valom. Razlika brine magnetskog toka i rotora je nula, ali postoji fazni kut (slika 10) koji označava položaj vozila s obzirom na putujući val, pri čemu je potisak maksimalan kada je $\theta = 90^\circ$. Kontroliranjem struje i frekvencije primarne pobude, kao funkcije faznog kuta, može se dobiti željena brzina/ubrzanje. Upravo su konfiguracija namatanja primara (kotve) i sekundara (zavojnice), kao i valna duljina te period ključni elementi ovog sustava čija se učinkovitost procjenjuje na oko 85 %.

Iako se najčešće koristi kod sustava sa velikim razmakom između statora i rotora, također se može koristiti i kod sustava kod kojih je razmak manji od 25 mm.

Dugi statori LSM-a koji se nalaze na vodilici čine aktivnu stazu. Reaktivne sile propulzije i levitacije vozila djeluju na jezgrama statora, a potporna struktura mora biti dovoljno snažna za rukovanje stalnim opterećenjem ove sile.

Kako bi se smanjili operativni gubici i kako bi sustav napajanja bio stabilan, dugi stator LSM-a je podijeljen na niz odjeljaka kontroliranih prekidačima. Minimalna udaljenost između odjeljaka ovisi o potrebnom ubrzanju i ukupnoj duljini vlaka. Operativna frekvencija prekidača odjeljaka povećava se s povećanjem broja vlakova na pruzi.

Struje u zavojnicama statora moraju biti sinkrone sa položajem i brzinom vlaka. Pravilno upravljanje vlakom postiže se slanjem podataka pretvaračkim postajama energije uz pomoću senzorske opreme i sustava prijenosa signala. Budući da je sinkronizacija neophodna za LSM, senzorski i signalni prijenosni sustavi moraju biti iznimno precizni i pouzdani.

5.2.2. Prednosti LSM-a

Budući da se namotaji statora i oprema sustava za napajanje nalaze uz tračnice, vozilo bi trebalo biti lakše. To omogućava vozilu kretanje pri vrlo velikim brzinama (do 500 km/h) iz razloga što vozilo ne nosi težinu primarnih komponenti propulzije potrebnih za postizanje velikih brzina.

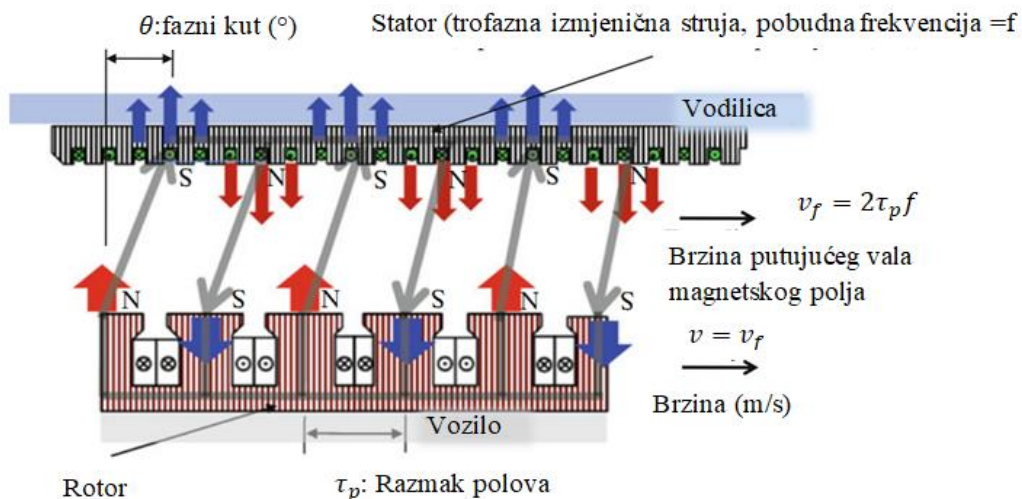
Postavljanjem glavnih komponenti sustava za napajanje van vozila i smanjenjem težine vozila rezultira visokom sposobnošću ubrzavanja i usporavanja. Iako postizanje velikih brzina ima velike koristi u javnom prijevozu te omogućuje brz dolazak od početne do krajnje točke, ograničeno je udobnošću tijekom vožnje, uvjetima rada sigurnosnih pojaseva i sigurnosnim zahtjevima.

5.2.3. Nedostaci LSM-a

Jedan nedostatak pogona LSM je u tome što zahtjeva podatke za točnu poziciju magneta na vozilu kako bi se osiguralo da je vozilo sinkrono s putujućim valom. Stoga je potreban vrlo pouzdan i precizan položaj vozila i magneta te senzor brzine sustava.

Struktura tračnica LSM-a je mnogo kompliciranija nego kod LIM-a. Potrebna je stalna montaža statorskih zavojnica u vodilici i pretvarača kako bi se održao dugoročan rad sustava. Problem stvara održavanje pravilnog položaja zavojnica u statoru jer i s malim pomakom može doći do zakočenja vozila na vodilici. Kako bi se spriječili ovakvi problemi potrebni su stalni pregledi i održavanja.

Svaki blok odjeljka vodilice može pokretati samo po jedno vozilo u isto vrijeme, a taj odjeljak zahtijeva svoj vlastiti pretvarač energije. Koncentracija vlakova na trasi određuje broj pretvaračkih postaja pa sustavi za napajanje postaju kompliciraniji na kolodvorima i stanicama gdje vozila usporavaju, bliža su jedna drugima i mijenjaju smjerove gibanja (rute).



Slika 11. Načelo rada LSM-a korištenog u gradskim Maglev vozilima

6. Usporedba Magleva s konvencionalnim vlakovima

Maglev vlakovi omogućuju brz dolazak od početne do krajnje točke i zbog toga se sviđaju sve većoj publici. U vrijeme kada je avionski prijevoz postao jedan od sigurnijih načina prijevoza, mnogi i dalje biraju željeznicu. Iako Maglev nije toliko raširen po svijetu, zemlje koje ga koriste smanjile su gužve prouzrokovane automobilima i zagađenost te doprinijele sigurnijoj, bržoj i kvalitetnijoj vožnji.

Za razliku od konvencionalnih vlakova, Maglev vlakovi nemaju mehaničkih komponenti koje uzrokuju veliko trošenje tračnica tijekom kontinuiranih putovanja pri maksimalnim brzinama. Kod tradicionalnih vlakova s vremenom dolazi do znatnog

trošenja tračnica zbog trenja između čeličnih kotača i čeličnih tračnica. To zahtjeva stalnu provjeru te zamjenu tračnica i kotača, što dovodi do novčanih troškova.

Maglev vlakovi su brži što omogućuje kraće vrijeme vožnje nego kod konvencionalnih vlakova čak i na velikim udaljenostima.

Iako se kreće vrlo velikom brzinom, Maglev vlak je vrlo stabilan, udoban i omogućuje nesmetanu vožnju. Komponente sustava koji su zaslužni za stabilnost, udobnost, sigurnost i rad Magleva vrlo su skupi što predstavlja problem manje razvijenim zemljama. Stoga se one odlučuju za konvencionalne vlakove čija izgradnja i održavanje ne predstavlja veliki financijski problem.

S tehnologijom koja ne zahtjeva kontakt, Maglev vlakovi troše manje energije. Pošto ne koriste kotače, osovine i još neke dijelove koje imaju konvencionalni vlakovi težina vozila je puno manja. Maglev troši 20-30 % manje energije po putniku nego uobičajena željeznička pruga.



Slika 12. Usporedba različitih tipova vlakova: gore lijevo- vlak s parnom lokomotivom brzine do 40 km/h; gore desno- vlak s električnom lokomotivom brzine do 100 km/h; dolje lijevo- niskopodni vlak s elektromotornom lokomotivom brzine do 160 km/h; dolje desno- Maglev vlak brzine do 600 km/h

7. Elektromagnetizam

Sve pojave koje su prisutne u Maglev vlakovima ne bi bile moguće bez jednog od fundamentalnih područja fizike- elektromagnetizmom. Iako su dugo vremena elektricitet i magnetizam smatrani kao neovisne pojave danas ih ne možemo zamisliti odvojene.

Elektricitet je svojstvo tvari koje potječe od viška pozitivno ili negativno električki nabijenih čestica. Magnetizam je skup pojava povezanih s magnetskim poljem i ponašanjem tvari u magnetskom polju. Elektromagnetizam povezuje električne i magnetske pojave.

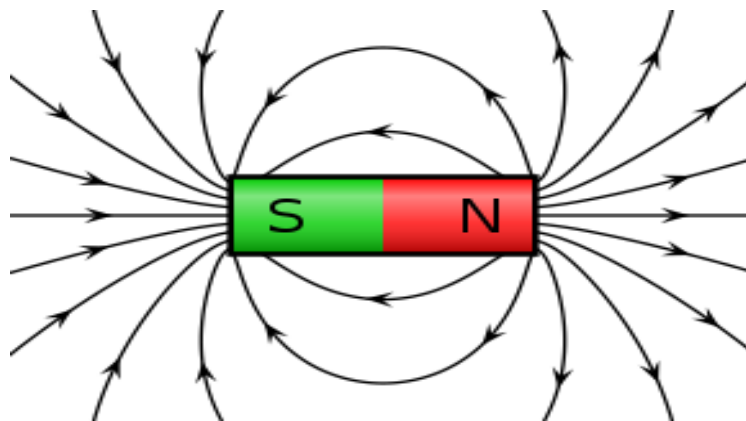
Razvoj elektromagnetizma potaknut je još u 19.st. kada je Hans Christian Ørsted svojim pokusima pokazao kako se magnetna igla zakreće u blizini električnoga vodiča kojim teče električna struja i time objasnio postojanje magnetskog polja. Kasnije se Ørstedu pridružuju i ostali fizičari poput André Marie Ampèrea, Michaela Faradaya, Jamesa Clerka Maxwella, Hendrika Antoona Lorentza koji svojim otkrićima, pokusima i zakonitostima otvaraju vrata nekim novim pojmovima i pojavama koje se i danas uče.

Da bismo mogli razumjeti kako funkcionira Maglev vlak najprije moramo razjasniti neke važne činjenice elektromagnetizma koje su dovele do njegovog razvoja.

7.1. Magnetizam

Magnetske pojave prvi put su uočene prije otprilike 2500 godina na komadićima magnetizirane željezne rude pronađene u drevnom gradu Magnesia u Turskoj. Pronađeni komadići međudjelovali su međusobno što je objašnjeno postojanjem sile između njih. Kasnije je utvrđeno da su ti komadići prvi primjerci onoga što danas nazivamo trajni ili permanentni magneti.

Magneti su predmeti koji stvaraju magnetsko polje oko sebe te zbog njega privlače određene materijale. Svaki magnet sastoji se od dva pola: sjevernog i južnog, te ne postoji magnet koji ima samo jedan pol. Raznoimeni polovi privlače jedan drugog dok se istoimeni polovi odbijaju. Linije koje izlaze iz sjevernog pola magneta i završavaju na južnom zovu se linije magnetskog polja i pokazuju smjer kretanja polja.



Slika 13. Magnetsko polje magneta



Slika 14. Interakcije između magnetskih polova

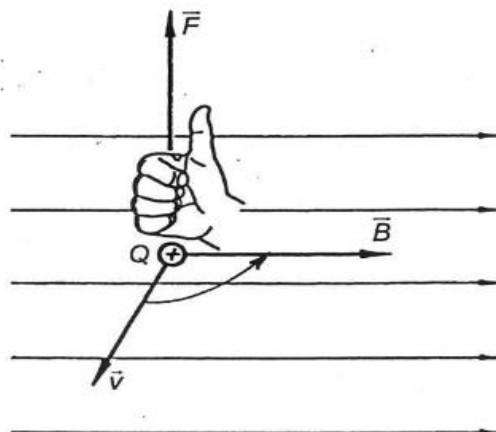
Iako na prvi pogled ovakvo međudjelovanje podsjeća na ono elektrostatske prirode gdje se dva istoimena naboja privlače odnosno dva raznoimena odbijaju, znamo da to nije tako jednostavno. U prirodi postoje izolirani pozitivni i negativni naboji no ne postoje odvojeni polovi magneta. To znači da kada bismo prepolovili magnet na pola, opet bi dobili magnet koji bi imao i sjeverni i južni pol.

Prvi dokaz koji je ipak povezo magnet i naboj dogodio se 1820. godine kada je Hans Christian Ørsted (1777. - 1851.) uočio da se magnetska igla otklanja u blizini žice kojom teče struja. [8] Time je po prvi puta magnetsko polje povezano sa nabojima u gibanju. Sila koja djeluje na magnetsku iglu naziva se magnetska sila i ona djeluje samo na nabijenu česticu koja se giba:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

gdje q predstavlja iznos naboja čestice, \vec{v} vektor brzine gibanja, a \vec{B} vektor magnetskog polja.

Smjer magnetske sile određujemo pravilom desne ruke: dlan pokazuje u smjeru brzine, prsti zakreću od brzine prema smjeru magnetskog polja, a palac pokazuje smjer sile. Matematički izraz i pravilo desne ruke otkrio je André Marie Ampère (1775. - 1836.).



Slika 15. Prikaz određivanja magnetske sile (pravilo desne ruke)

Osim što je utvrdio da se kružni tok električne struje ponaša kao magnet, primjetio je da se dva paralelna vodiča međusobno privlače kada kroz njih teče struja istog smjera, a odbijaju kad su struje suprotnih smjerova. Njemu u čast jedinica za jakost struje nazvana je amper (A).

Nizozemski matematičar i fizičar Hendrik Antoon Lorentz (1853. - 1928.) postigao je niz otkrića na području elektromagnetizma. Vrlo je značajan pojam koji se prema njemu naziva Lorentzova sila, a koju je opisao kao djelovanje magnetskog i električnog polja na naboj u gibanju. Slovo q predstavlja iznos naboja čestice, \vec{E} vektor električnog polja, \vec{v} vektor brzine, a \vec{B} vektor magnetskog polja.

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2)$$

Jedno od glavnih pitanja koje se javilo nakon Ørstedovog otkrića bilo je: Ako pomoću struje možemo proizvesti magnetsko polje, možemo li uz pomoć magnetskog polja proizvesti električnu struju? Odgovor na to pitanje dao je Michael Faraday otkrićem elektromagnetske indukcije. Ako vodič pomičemo u homogenom magnetskom polju, tada se na krajevima vodiča inducira napon.

Elektromagnetska indukcija ovisi o veličini koja predstavlja protjecanje magnetskog polja kroz neku površinu (zatvorena petlja vodiča). Tu veličinu nazivamo magnetski tok. Magnetski tok Φ kroz površinu S jednak je umnošku iznosa magnetskog polja \vec{B} i vektora površine \vec{S} .

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cos\theta \quad (3)$$

Do indukcije napona (U) u zatvorenoj petlji dolazi kada postoji vremenska promjena magnetskog toka kroz površinu koju okružuje petlja vodiča.

$$U_{ind} = \frac{-\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (4)$$

Ako je petlja u kojoj se inducira napon zatvorena i vodljiva, njome će poteći inducirana struja. Inducirana struja stvorit će oko sebe magnetsko polje koje će se svojim tokom suprotstaviti promjeni magnetskog toka koja je izazvala indukciju. Ovo pravilo za smjer inducirane struje zove se Lenzovo pravilo.

7.2. Maxwellove jednadžbe

James Clerk Maxwell objedinio je cijeli elektromagnetizam, u četiri jednadžbe, poznatije kao Maxwellove jednadžbe. Ove jednadžbe opisuju načine postanka i svojstva električnog i magnetskog polja.

Prva jednadžba povezuje električne naboje i električno polje, a poznatija je kao Gaussov zakon. Govori o tome da su električni naboji izvori ili ponori električnog polja. Druga interpretacija nam kaže da je električni tok kroz neku zatvorenu površinu jednak ukupnom električnom naboju koji se nalazi unutar površine.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (5)$$

Druga govori o tome da ne postoje magnetski monopoli tj. da nema izvora ili ponora magnetskog polja. To povlači da je ukupan tok kroz neku zatvorenu plohu jednak nuli.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

Slijedeća jednadžba naziva se Faradayev zakon indukcije i kaže da vremenski promjenjivo magnetsko polje uzrokuje (stvara) električno polje. Također možemo reći da je integral vektora električnog polja po zatvorenoj krivulji jednak negativnoj promjeni magnetskog toka po vremenu obuhvaćenog tom krivuljom.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

Zadnja, ali jednako bitna ispočetka nije izgledala kao što ju danas poznamo već ju je Maxwell proširio. Magnetsko polje stvara vodič kojim teče struja ili vremenski promjenjivo električno polje. Drugi opis kaže: integral vektora magnetskog polja po zatvorenoj krivulji jednak je zbroju struje i vremenske promjene električnog toka obuhvaćenih tom krivuljom.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (8)$$

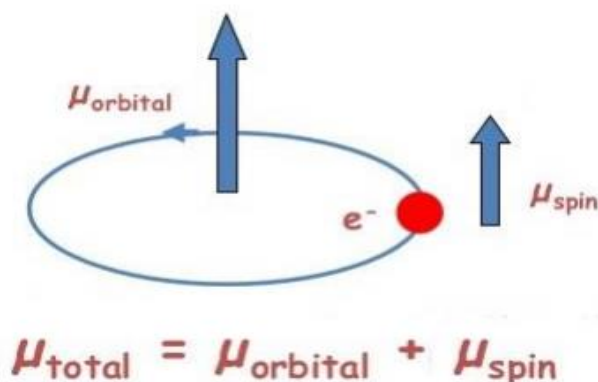
7.3. Svojstva magneta

Otkriće magneta i njegovih međudjelovanja potaknulo je na daljnje istraživanje o njegovim svojstvima. Magnetska svojstva tvari posljedica su doprinosa magnetskih momenata; spinskog magnetskog momenta $\vec{\mu}_s$ i orbitalnog magnetskog momenta $\vec{\mu}_L$:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{s} \quad (9)$$

$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m} \vec{L} \quad (10)$$

gdje e označava elementarni naboj elektrona, m masu elektrona, \vec{s} spin elektrona, \vec{L} angularni moment.



Slika 16. Smjer i dopinos spinskog (μ_s) i orbitalnog (μ_L) magnetskog momenta

U većini atoma periodnog sustava elemenata magnetski moment elektrona se poništava zbog Paulijevog principa isključenja, koji nam govori da dva elektrona ne mogu zauzimati isto kvantno stanje istovremeno, odnosno moraju imati suprotan spin.

Magnetsko svojstvo nekog materijala se iskazuje vektorom magnetizacije koji je jednak ukupnom magnetskom dipolnom momentu po jedinici volumena.

$$\vec{M} = \frac{\vec{\mu}_{total}}{V} \quad (11)$$

Kada se neki uzorak materijala nađe u vanjskom magnetskom polju \vec{B}_0 , ukupno magnetsko polje \vec{B} u nekoj toči uzorka ovisit će o vanjskom magnetskom polju \vec{B}_0 i magnetizaciji \vec{M} :

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) = \mu_0 (\vec{H} + \chi_m \vec{H}) \quad (12)$$

Iz toga slijedi da je magnetizacija jednaka:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (13)$$

Konstanta χ_m ovisi o vrsti materijala i drugačija je za svaki materijal, a zove se magnetska susceptibilnost. Slovo \vec{H} označava jakost vanjskog magnetskog polja. Ukupno magnetsko polje unutar materijala dano je izrazom:

$$\vec{B} = \mu_m \vec{H} \quad (14)$$

$$\mu_m = \mu_0 (1 + \chi_m) = \mu_0 \mu_r \quad (15)$$

Konstanta μ_m naziva se magnetska permeabilnost, a jednaka je umnošku magnetske permeabilnosti vakuuma μ_0 i relativne magnetske permeabilnosti μ_r . μ_0 je konstanta koja iznosi: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m.

S obzirom na utjecaj magnetskog polja u tvarima (materijalima) možemo ih podijeliti na: dijamagnete, paramagnete i feromagnete.

7.3.1. Dijamagnetizam

Dijamagnetizam je jako slab oblik magnetizma koji se može uočiti samo uz prisustvo vanjskog magnetskog polja. Vanjsko magnetsko polje utječe na gibanje elektrona oko jezgre. Promjena gibanja elektrona uzrokuje promjenu magnetskih momenata.

Dijamagnetizam pokazuju tvari čiji atomi imaju sparene elektronske spinove. [9] To znači da je ukupan magnetski dipolni moment određen samo orbitalnim magnetskim momentom jer je spinski magnetski moment jednak nuli. Elementi poput bizmuta, olova, bakra, srebra, vodika, natrijevog klorida, plemenitih plinova i većine organskih spojeva pokazuju ovo svojstvo. Ukoliko određen materijal ima izražena druga svojstva, dijamagnetizam postane neprimjetan.

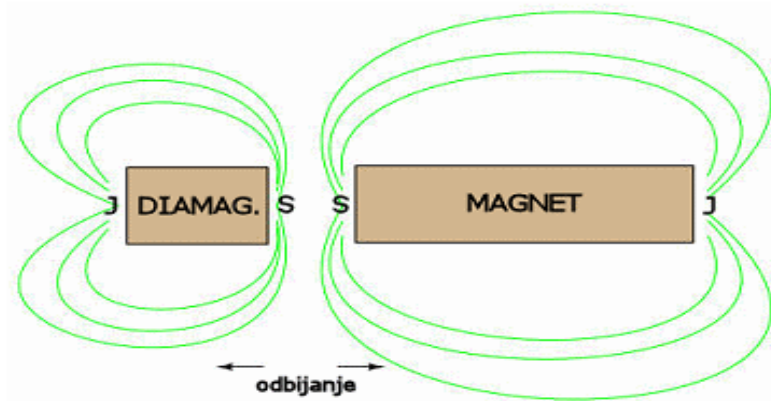
Unošenjem takvih materijala u magnetsko polje inducira se struja. Ta struja inducira i magnetski dipolni moment koji se orijentira suprotno vanjskom magnetskom polju po Lenzovom pravilu. Inducirano magnetsko polje u tvari predstavlja ukupan doprinos svih magnetskih dipola. Inducirana struja nastala zbog promjene magnetskog toka, stvara magnetsko polje koje djeluje suprotno promjeni magnetskog toka. Inducirana struja nastoji umanjiti tu promjenu. Stoga se i dipolni momenti orijentiraju suprotno. Na taj način se smanjuje jakost magnetskog polja unutar tvari.

Kod dijamagneta vektor magnetizacije M je proporcionalan jakosti magnetskog polja H (8), dok je magnetska susceptibilnost uvijek manja od nule.

$$\chi_m(\text{dijamagnet}) < 0 \quad (16)$$

Relativna magnetska permeabilnost dijamagneta manja je od jedan:

$$\mu_r = (1 + \chi_m) < 1 \quad (17)$$



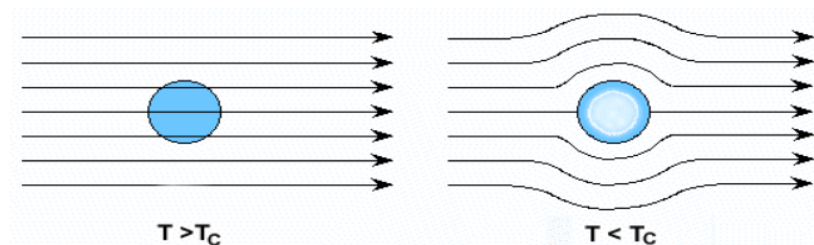
Slika 17. Dijamagnetizam

Dijamagnetski efekt je u nekim materijalima toliko jak da poništava djelovanje vanjskog magnetskog polja pa oni postaju idealni dijamagneti. Takve materijale nazivamo supravodiči, a pojava koja se kod njih javlja zove se supravodljivost.

Supravodljivost je sposobnost pojedinih materijala da pri određenim niskim temperaturama vode električnu struju bez ikakvog otpora. Temperaturu pri kojoj materijal postaje supravodljiv nazivamo kritičnom temperaturom i označavamo ju s T_C .

Ponašanje supravodljivog uzorka u vanjskom magnetskom polju ispitivali su Meissner i Ochsenfeld 1933. godine. Ako se materijal ohladi ispod kritične temperature tako da postane supravodljiv i stavi u magnetsko polje ono neće imati nikakav utjecaj na unutrašnjost materijala. Ukupno magnetsko polje unutar materijala jednako je nuli, a ovakvo ponašanje u supravodljivom materijalu naziva se Meissnerov efekt.

$$\vec{B} = 0 \quad (18)$$



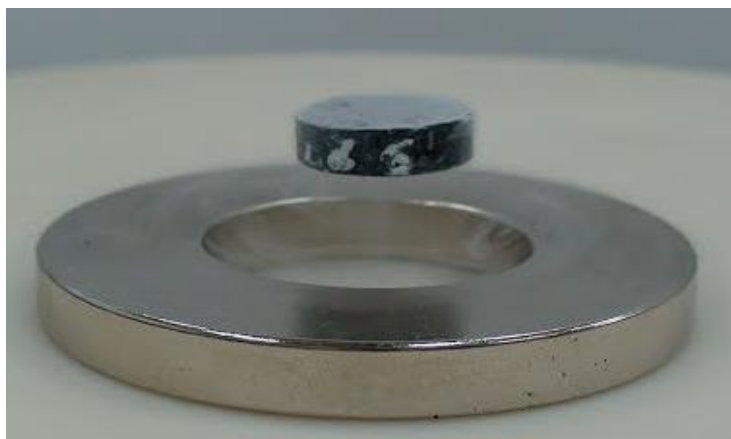
Slika 18. Linije magnetskog polja u supravodiču iznad i ispod kritične temperature T_C

Jednadžba 8 nam govori o čemu ovisi magnetsko polje dijamagneta. Da bi vrijedilo da je magnetsko polje u unutrašnjosti supravodiča jednako nuli, mora vrijediti:

$$\vec{M} = -\vec{H} \quad (19)$$

Magnetizacija u unutrašnjosti uzorka djeluje suprotno od smjera vanjskog polja. Proporcionalnost između vanjskog polja i magnetizacije u supravodiču postoji do određene kritične jakosti magnetskog polja H_C jer tada supravodič prelazi u normalno stanje.

Jedno od važnih svojstava supravodiča je levitacija magneta iznad supravodiča koji je ohlađen ispod svoje kritične temperature. Približavanjem magneta supravodiču dolazi do induciranja struje koja stvara magnetsko polje. Magnetska polja supravodiča i magneta se odbijaju pri čemu magnet levitira (lebdí).



Slika 19. Levitacija magneta iznad supravodiča

7.3.2. Paramagnetizam

Paramagnetične tvari se sastoje od atoma (molekula) kod kojih je ukupan spinski magnetski moment različit od nule. To je moguće kad atomi (molekule) imaju nesparene elektronske spinove.

Kada nema vanjskog magnetskog polja magnetski dipoli su orijentirani nasumično (kaotično). Prisutstvom vanjskog magnetskog polja, magnetski dipoli nastoje se orijentirati u smjeru polja. Inducirano magnetsko polje dobiva pozitivan predznak.

Inducirano magnetsko polje u tvari također ovisi o temperaturi jer termičko gibanje ometa usmjeravanje magnetskih dipola tj. dezorijentira ih. Iznos inducirano magnetskog

polja smanjuje se s povećanjem temperature što je iskazano Curievim zakonom. Nakon isključivanja vanjskog magnetskog polja uspostavljena djelomična orijentacija magnetskih dipola se gubi zbog termičkog gibanja, a time nestaje i inducirano magnetsko polje.

Težnja dipola da se orijentiraju u smjeru vanjskog magnetskog polja opisana je magnetskom susceptibilnošću nešto većom od nule, dok je za razliku od dijamagneta relativna permeabilnost puno veća od 1:

$$\chi_m(\text{paramagnet}) > 0 \quad (20)$$

$$\mu_r = (1 + \chi_m) > 1 \quad (21)$$

Curiev zakon kaže da je magnetska susceptibilnost obrnuto proporcionalna temperaturi. Ovaj zakon prestaje vrijediti u slučaju velikih vrijednosti vanjskog magnetskog polja tj. onda kada su svi magnetski dipoli orijentirani u smjeru polja. Kada su svi dipoli orijentirani jednako daljnjim povećanjem polja ne dolazi do veće magnetizacije.

$$M = C \frac{B}{T} \quad (22)$$

$$\chi_m \sim \frac{1}{T} \quad (23)$$

MATERIJAL	$\chi_m [\times 10^{-5}]$	MAGNETIZAM
Bakar	-1,0	dijamagnetizam
Zlato	-3,6	dijamagnetizam
Voda	-9,0	dijamagnetizam
Aluminij	+2,2	paramagnetizam
Mangan	+98	paramagnetizam
Volfram	+36	paramagnetizam

Tablica 3. Usporedbe magnetske susceptibilnosti različitih materijala [9]

7.3.3. Feromagnetizam

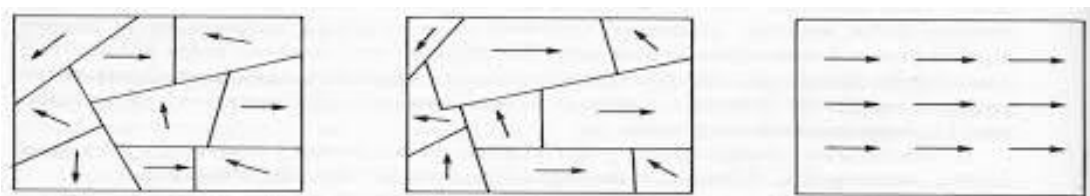
U dijamagnetima i paramagnetima magnetizacija postoji samo u prisutstvu vanjskog magnetskog polja. U feromagnetima postoji spontana magnetizacija i u odsustvu

vanjskog polja ($B=0$). Prijelazni metali poput željeza, kobalta i nikla posjeduju ovo svojstvo zbog posebne interakcije između magnetskih dipolnih momenata.

Feromagnetski materijali posjeduju dugodosežno uređenje što znači da se nespareni elektronski spinovi udružuju u mikroskopska područja zvana domene. Svaka domena je izvor jakog magnetskog polja no spinovi različitih domena su orijentirani nasumično pa materijal kao cjelina nije magnetiziran.

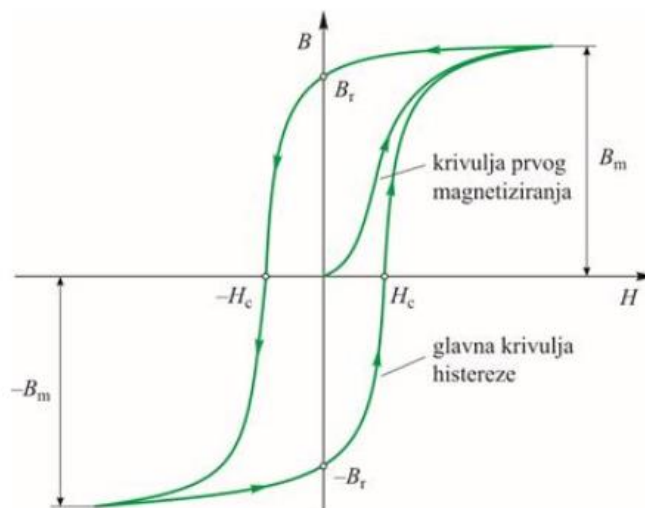
Djelovanjem slabog vanjskog magnetskog polja magnetske domene se počinju međusobno usmjeravati i materijal postaje blago magnetiziran. One domene čiji se magnetski momenti usmjere paralelno magnetskom polju će se povećavati, a one koje se usmjere suprotno će se smanjivati. Uklanjanjem magnetskog polja, domene se ponovno vraćaju u prvobitni položaj, a magnetizacija nestaje.

Uključenjem jakog magnetskog polja cijeli uzorak postaje homogen tj. materijal ima samo jednu domenu. Svi dipolni momenti orijentirani su u smjeru vanjskog polja i magnetizacija tog materijala postaje maksimalna. Posljedica orijentacije domena je pojava induciranog magnetskog polja koje je za nekoliko redova veličine veće nego kod paramagnetskih materijala.



Slika 20. Orijentacija dipolnih momenata domena (s lijeva na desno): bez utjecaja magnetskog polja, uz prisutstvo slabog magnetskog polja, pod utjecajem jakog magnetskog polja (maksimalna magnetizacija)

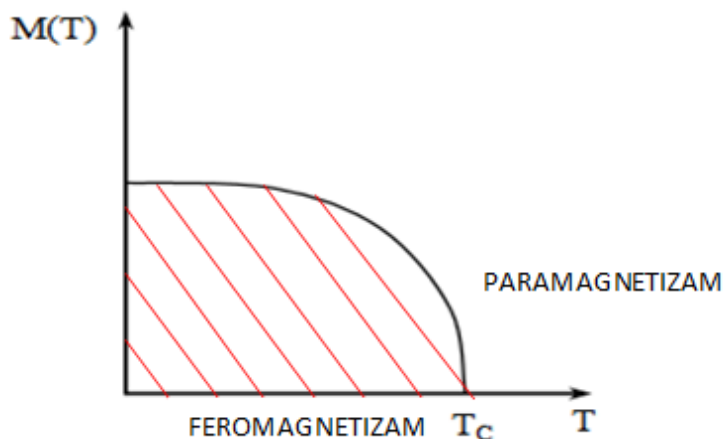
Feromagnetni ostavljeni u jakom magnetskom polju određeno vrijeme teže stalnoj magnetizaciji. Način na koji se to prikazuje naziva se krivulja histereze. Glavni elementi ove krivulje su: indukcija zasićenja B_m - maksimalna indukcija magnetskog polja do koje se materijal može magnetizirati, remanencija B_r - indukcija magnetskog polja zaostala u materijalu i nakon uklanjanja vanjskog polja, koercitivna sila H_c - jakost magnetskog polja potrebna za uklanjanje magnetizacije. Domene u tom slučaju ostaju trajno sinkronizirane i nakon što je uklonjeno vanjsko polje. Dio magnetizacije koja se zadržala nakon uklanjanja polja daje feromagnetskim materijalima svojstvo koje se naziva remanentnost materijala.



Slika 21. Krivulja histereze

Remanentnost materijala je svojstvo materijala da i nakon uklanjanja magnetskog polja, trajno pokazuju magnetska svojstva. Ovo svojstvo glavni je čimbenik za dobivanje permanentnih (trajnih) magneta.

Feromagnetski materijali imaju maksimalnu temperaturu do koje su feromagnetska svojstva prisutna, a naziva se Curieova temperatura. Na višim temperaturama ta svojstva nestaju kao posljedica termalne pobude te se materijal počinje ponašati kao paramagnet.



Slika 22. Ovisnost magnetizacije M o temperaturi T: na temperaturi $T < T_C$ tvar je feromagnet, a na temperaturi $T > T_C$ tvar je paramagnet

MATERIJAL	CURIEVA TEMPERATURA/ K
željezo (Fe)	1043
kobalt (Co)	1388
nikal (Ni)	627
gadolinij (Gd)	293
disprozij (Dy)	85
holmij (Ho)	20
hematit ($\alpha - \text{Fe}_2\text{O}_3$)	956

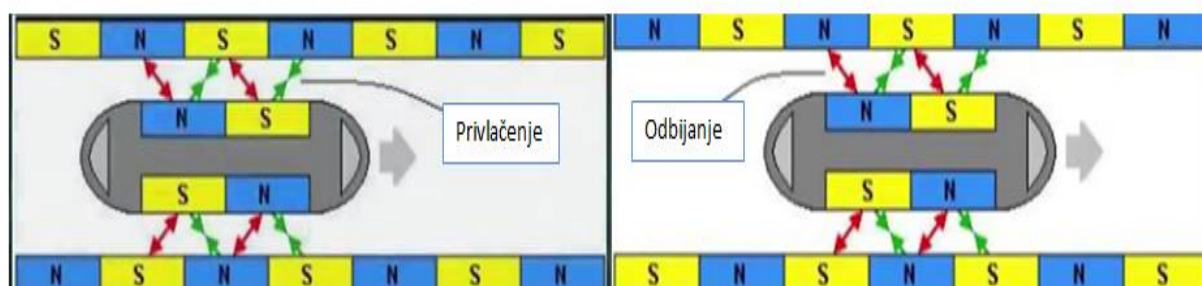
Tablica 4. Iznosi Curieve temperature za različite materijale [12]

7.4. Magnetizam u Maglevu

Ranije je već spomenuto da postoje dvije vrste Maglev sustav: EMS i EDS. Oba sustava temeljena su na suspenziji no postoji mala razlika u njihovom funkcioniranju.

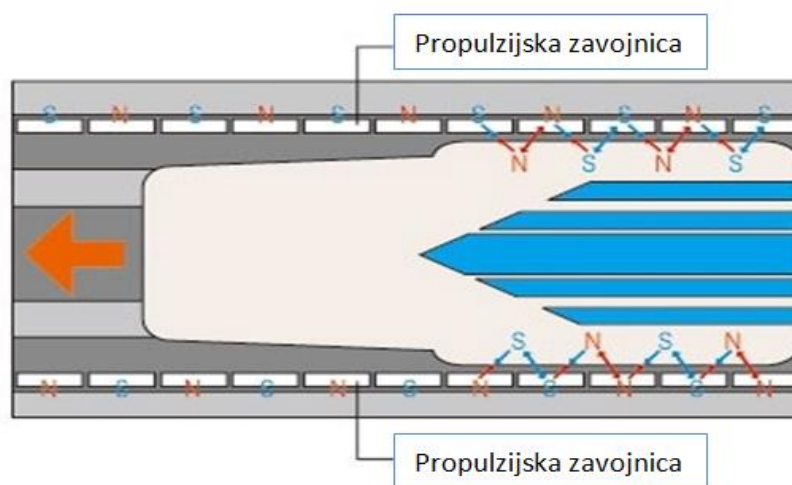
Znamo da EMS sustav funkcionira na načelu privlačenja potpornog elektromagneta i magneta na tračnicama što omogućuje vlaku da levitira. No glavna svrha ovih elektromagneta je kretanje vlaka. Najjednostavniji primjer elektromagneta je obična zavojnica koja pokazuje magnetska svojstva kada kroz nju pustimo električnu struju. Elektromagnet kroz koju je puštena struja stvara magnetsko polje čiji magnetski tok određujemo pravilom desne ruke (prsti u smjeru struje, palac pokazuje smjer magnetskog toka). U EMS sustavu koriste se puno kompliciraniji magneti sa izraženijim magnetskim svojstvima.

Ukoliko se takav elektromagnet napaja izvorom izmjenične struje dolazi do stalne izmjene polova magnetskog polja. Zbog te promjene nastaje međusobno privlačenje (privlačna sila) i odbijanje (odbojna sila) elektromagneta s magnetima na tračnicama. [18] Na taj je način vlak pokrenut i giba se prema naprijed.



Slika 23. Izmjene polova elektromagneta

EDS sustav poznat je po korištenju supravodljivih magneta smještenih na vlaku. Ti supravodljivi magneti interagiraju sa suspenzijskim zavojnicama koje se nalaze u tračnicama iza zavojnica koje omogućuju levitaciju. Magnetsko polje supravodljivih magneta inducirat će struju, a time i magnetsko polje u zavojnicama. Ukoliko je sustav spojen na izvor izmjenične struje u zavojnicama će se pojaviti magnetsko polje sa stalnom izmjenom polova. Time dolazi do međusobnog privlačenja i odbijanja između supravodljivih magneta i zavojnice što omogućuje vlaku da se kreće levitirajući iznad tračnica.



Slika 24. Privlačenje i odbijanje između magneta i zavojnica

8. Metodički dio

Prvo sretanje sa pojmom levitacije u učenicima bi moglo pobuditi znatiželju i motivaciju za otkrivanjem ovog neobičnog fenomena. Ova tema idealna je za spajanje znanja iz tehničke kulture i fizike te se može upotrijebiti kao nastavna jedinica iz bilo kojeg od ova dva predmeta u skladu s nastavnim planom i programom. Ukoliko to nije, može se iskoristiti kao izborna tema, dodatni projekt ili u sklopu neke dodatne školske aktivnosti. U nastavku teksta nalazi se nastavna priprema za jedan nastavni sat tehničke kulture.

8.1. Nastavna priprema

Pripremu izradila/izradio: *Valentina Đurin*

Broj sata:

PRIPREMA

ZA IZVOĐENJE NASTAVE

Škola: _____ Mjesto: _____

Razred: 5.

Predmet – područje nastave: *Tehnička kultura*

Nastavna cjelina *Materijali*
(naziv cjeline)

Metodička jedinica (tema): *Izrada modela*

Rad je izveden dana: _____ 20 _____ u _____
(škola)

A. SADRŽAJNI PLAN

I. Podjela cjeline na teme (operacije):

(Uz svaku temu navesti broj sati; podcrtati temu koja se upravo obrađuje.)

Red. broj	Nazivi tema u cjelini	Broj sati	
		teorija	vježbe
4.1.	<i>Izrada geometrijskih tijela od kartona</i>	1	1
4.2.	<i>Drvo, vrste drva i alati za obradu</i>	1	1
4.3.	<u><i>Izrada modela</i></u>	1	1

Ključni pojmovi	<i>model, maketa, Maglev vlak</i>
------------------------	-----------------------------------

B. PLAN VOĐENJA (ORGANIZACIJE) NASTAVNOGA PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

(sažeto, jednom rečenicom, navesti cilj)

Upoznati postupak izrade jednostavnog modela Maglev vlaka uz poznavanje tehničkog crteža i korištenja potrebnog alata.

Očekivani ishodi učenja:

(Pregledno, pod rednim brojevima, jasno i sažeto, koristeći aktivne glagole, navesti kompetencije – znanja, vještine i pripadajuću samostalnost i odgovornost)

1. Učenici će razlikovati maketu i model.
2. Učenici će prepoznati i samostalno primjeniti materijal te pribor i alate za izradu modela.
3. Učenici će isplanirati tijek izrade modela Maglev vlaka.
4. Učenici će izraditi model Magleva poštujući tijek radnog postupka.

Organizacija sata:

(Pregledno, u obliku tablice iznijeti što se obrađuje – faze i sadržaj rada; kako – metodičko oblikovanje; vrijeme – trajanje svake faze rada.)

<i>Faze rada i sadržaj</i>		<i>Metodičko oblikovanje</i>	<i>Vrijeme</i>
Uvodni dio 1. sata	<i>Priprema radnih jedinica. Ponavljanje prethodnog gradiva vezanog uz jedinicu Drvo, vrste drveta i alati za obradu. Što je drvo? Glavni dijelovi drveta? Svojstva drveta? Što možemo napraviti od drveta? Ostali materijali?</i>	<i>metoda razgovora</i>	7'
Središnji dio 1. sata	<i>Obrada nove nastavne jedinice. Maketa – prikazuje izgled tehničke tvorevine. Model – prikazuje funkcioniranje tehničke tvorevine. Izgled i objašnjenje radioničkog/tehničkog crteža.</i>	<i>metoda usmenog izlaganja i razgovora metoda demonstracije</i>	25'
Završni dio 1. sata	<i>Pitanja za ponavljanje.</i>	<i>metoda razgovora</i>	3'
Uvodni dio 2. sata	<i>Dodatne upute za rad. Redosljed radnog postupka.</i>	<i>metoda razgovora</i>	5'
Središnji/praktični dio 2.sata	<i>Izrada modela Maglev vlaka. List s uputama.</i>	<i>individualni rad</i>	45'

Završni 2. sata dio	<i>Provjera izvršenog zadatka. Vrednovanje rada učenika.</i>	<i>metoda pisanja, metoda razgovora</i>	5'
------------------------------------	--	---	----

Metodički oblici rada:

- *Frontalni rad*
- *Individualni rad*

Nastavne metode:

- *Usmeno izlaganje*
- *Razgovor*
- *Demonstracija*
- *Praktičan rad*

Potrebna nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvjeti rada:

Profilov udžbenik, Profilova kutija s radnim materijalima i radnim listovima, pribor za pisanje i crtanje, škare, ljepilo, karton, magnetne trake, računalo, projektor

Korelacijske veze metodičke jedinice s ostalim predmetima i područjima:

Likovna kultura

Geografija

Fizika

Izvori za pripremu učenika:

1. *Vinković, Labaš, Androlić, Medved, Tehnička kultura 5, Profil, udžbenik za peti razred osnovne škole*
2. *Gulam, Valčić, Tkalec, Šimunović, Labaš, Androlić, Medved, Tehnička kultura 5, Profil, radni listovi it tehničke kulture za peti razred osnovne škole*

Izvori za pripremu nastavnika:

1. *Vinković, Labaš, Androlić, Medved, Tehnička kultura 5, Profil, udžbenik za peti razred osnovne škole*

2. *Gulam, Valčić, Tkalec, Šimunović, Labaš, Androlić, Medved, Tehnička kultura 5, Profil, radni listovi it tehničke kulture za peti razred osnovne škole*
3. *Bartolić, Delić, Gregurić, Koprivnjak, Kovačević, Ptičar, Stanojević, Urbanek, Čudesni svijet tehnike 5, ŠK, udžbenik tehničke kulture u petom razredu osnovne škole*
4. *Bartolić, Delić, Gregurić, Koprivnjak, Kovačević, Ptičar, Stanojević, Urbanek, Čudesni svijet tehnike 5, ŠK, radni listovi za tehničku kulturu u petom razredu osnovne škole*
5. *Nastavni plan i program za osnovnu školu - Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa*
6. <https://www.youtube.com/watch?v=KQH2UhHss6c>

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE

Uvodni dio 1. sata

Priprema radnih jedinica. Stolovi posloženi tako da je radna podloga ispred učenika prazna, s lijeve strane se nalaze udžbenik, bilježnica i radni listovi, s desne pribor i potreban alat. Za početak sata krećemo sa pitanjima uz ponavljanje prethodnog gradiva. Pitanja se nalaze na prezentaciji.

- **Od čega se najvećim djelom sastoje šume?**
 - Od drveća
- **Koji su glavni dijelovi drveta?**
 - Korijen, deblo, krošnja.
- **Kakve sve vrste drveta poznajete?**
 - Bjelogorica- drva kojima lišće pada prije zime: hrast, bukva, grab, lipa, orah...
 - Crnogorica: drva kojima ne opada lišće: jela, bor, smreka...
- **Nabroji neka svojstva drva.**
 - Boja, tekstura, tvrdoća, masa, upijanje vlage, cjepljivost, sjaj...
- **Na koje sve načine možemo obrađivati drvo?**
 - Ručno uz pomoć pile, bušilice, brus papira, sjekire...
 - Strojno uz pomoć motornih pila, glodalica, bušilica...
- **Što sve možemo izraditi od drveta?**
 - Namještaj, alat, instrumente (glazbala), makete...

- **Koje još materijale poznate i što možemo izraditi od njih?**
 - Gumu, plastiku, papir, staklo, metal...
 - Igračke, namještaj, alat, makete...

Ono što ćemo mi danas izraditi je model stoga je naša današnja tema **Izrada modela**. Naslov pišemo na ploču, a učenici ga zapisuju u bilježnicu.

Središnji dio 1. sata

Učenicima pokažemo dvije slike (Slide 2). Prva prikazuje maketu zagrebačke katedrale i okolinu oko nje, a druga prikazuje model aviona. S učenicima raspravljamo o te dvije slike.

- **Što se nalazi na prvoj slici?**
 - Zagrebačka katedrala, možda neki odgovore maketa.
- **Je li to prava zagrebačka katedrala?**
 - Nije.
- **Što nam onda ona pokazuje?**
 - Izgled i oblik katedrale, samo u umanjenom obliku.
- **A što se nalazi na drugoj slici?**
 - Učenici bi mogli odgovoriti da je i to maketa, samo maketa aviona.
- **Prikazuje li ta slika pravi avion?**
 - Ne.
- **Može li taj avion letjeti?**
 - Može.
- **Pokazuje li nam onda taj avion što u stvarnosti radi avion?**
 - Da, avion leti.
- **Je li se onda na drugoj slici nalazi samo prikaz izgleda aviona ili on ima i neku funkciju?**
 - Ima i neku funkciju, može letjeti.
- **Koja je onda razlika između makete i aviona?**
 - Maketa katedrale prikazuje njen oblik i izgled, a avion izgled i njegovu ulogu/funkciju.

Uvodimo pojmove makete i modela. Učenicima napomenemo da te pojmove s prezentacije prepisu u bilježnicu.

Maketa prikazuje izgled nekog objekta ili predmeta, a osnovna namjena je prikazati odnose veličina i izgled.

Model prikazuje izgled i funkcioniranje tehničke tvorevine.

U prezentaciji pokažemo sliku modela vlaka. Učenike upitamo što je to. Očekivani bi odgovor bio da je to vlak, prijevozno sredstvo, igračka vlaka, odnosno potpuniji odgovor model vlaka.

- Jeste li se ikada vozili u vlaku?
- Čemu vlak služi?
 - Od učenika želimo dobiti odgovore poput: služi za prijevoz putnika, robe, tereta, vlak je prijevozno sredstvo...

Vlak je vrsta željezničkog vozila koja se kreće po tračnicama namijenjena prijevozu putnika, tereta ili za potrebe željeznice. (U prezentaciji pokažemo sliku vlaka).

- Kakve sve vrste vlakova postoje s obzirom na pogon koji ih pokreće? (Podsjetimo ih na vlakove koje su vidjeli u medijima, pokažemo im slike par različitih vlakova)
 - vlak na parni pogon, dizelski vlak, električni vlak, plinsko turbinski vlak, Maglev vlak

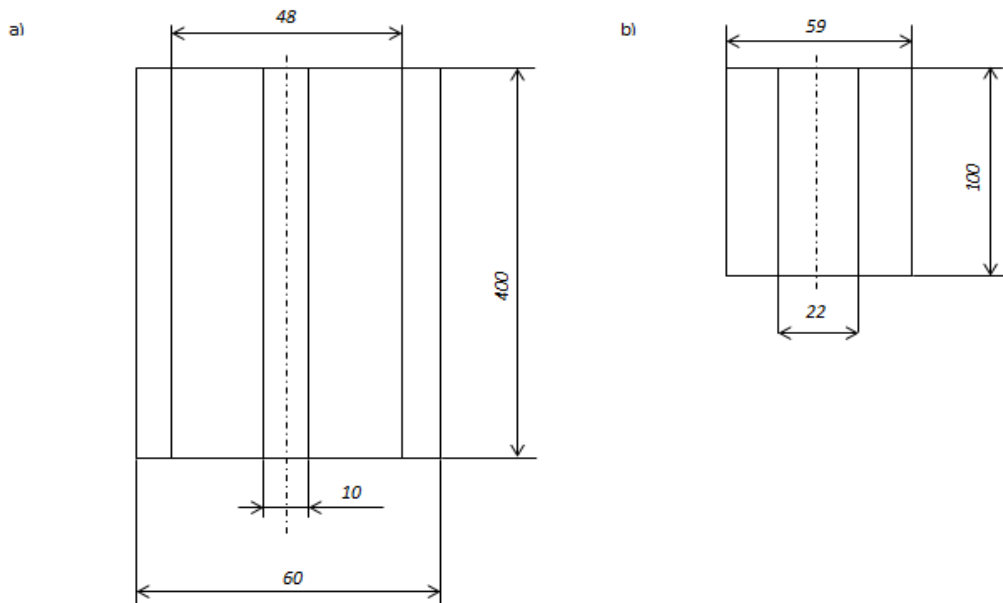
Maglev vlak je posebna, moderna vrsta željezničkog vozila, koja lebdi nad tračnicama i omogućuje brz prijevoz s jednog mjesta na drugo.

Učenicima napomenemo da je upravo ono što ćemo danas izraditi model Maglev vlaka. Prije nego krenemo u izradu potreban nam je radionički/tehnički crtež.

Radionički/tehnički crtež služi za izradu predmeta, a sastoji se od montažnog crteža i sastavnice

- montažni crtež prikazuje cijeli proizvod ili pojedine sklopove
- sastavnica daje informacije o materijalima, poziciji, mjerilu, autoru...

Montažni crtež Maglev vlaka učenici dobiju na papiru.



Slika 1. Montažni crtež: a) tračnice, b) vozila

Završni dio 1. sata

Prije same izrade s učenicima ponovimo naučeno gradivo.

Što prikazuje maketa?

- Samo izgled objekta ili uporabnog predmeta.

Što prikazuje model?

- Izgled i funkcioniranje tehničkih tvorevina.

Što je Maglev vlak?

- Posebna, moderna vrsta željezničkog vozila, koja lebdi nad tračnicama i omogućuje brz prijevoz s jednog mjesta na drugo.

Uvodni dio 2. sata

S učenicima prolazimo dodatne upute za rad, prolazimo radni postupak koji moraju pratiti pri samoj izradi te pokazujemo postupak izrade uz pomoć slika (1-7) ili videa.

Dodatne upute:

- Pospremi knjigu i bilježnicu i oslobodi radno mjesto
- Potreban alat i pribor (škare, magnetska traka, ljepilo, kartoni, pribor za tehničko crtanje) postavi na slobodno mjesto



Slika 1. Potreban alat i pribor

- Za izradu modela vjetrenjače koristi montažni crtež te slijedi upute za rad
- Prati radni postupak
- Dijelove koji se lijepe napravi prve da se ljepilo stigne osušiti
- Kod ljepljenja i spajanja pomozite jedan drugom
- Pripazi prilikom korištenja škara
- Za dodatnu pomoć nastavnika digni ruku

Radni postupak (prikazan u prezentaciji) :

Radna operacija	Alat i pribor
1. mjerenje i zacrtavanje	a) pribor za tehničko crtanje
2. kontrola	b) pribor za tehničko crtanje
3. rezanje	c) škare
4. kontrola	
5. ljepljenje	d) ljepilo
6. montaža	

Kada prolazimo radni postupak napominjemo što mjerimo i kako, prije svih radnji provjeravamo jesmo li sve dobro napravili, kod rezanja pazimo i za pomoć tražimo nastavnika/kolegu iz klupe, što prije napravimo sve radne operacije kako bi mogli zalijepiti dijelove da se stignu osušiti.

Postupak izrade:

1. Uz pomoć montažnog crteža izmjerimo i ucrtamo sve potrebne mjere na veliki karton. Veliki karton potreban nam je za izradu staze (tračnica). Također mjerimo

manji dio kartona koji će nam služiti kao vozilo (umjesto takvog kartona možemo koristiti bilo koji lagani materijal ili zalijepiti više kartona skupa). Na magnetskoj traci označimo potrebne mjere. Trebat će nam 2 duže trake (400 mm) za tračnice i 2 kraće (100 mm) za vozilo čije su mjere prikazane na montažnom crtežu. Dva dodatna kartona izmjerimo tako da budu otprilike iste duljine kao i tračnice, a oni će nam služiti kao graničnici da vlak ne bi iskakao s tračnica.

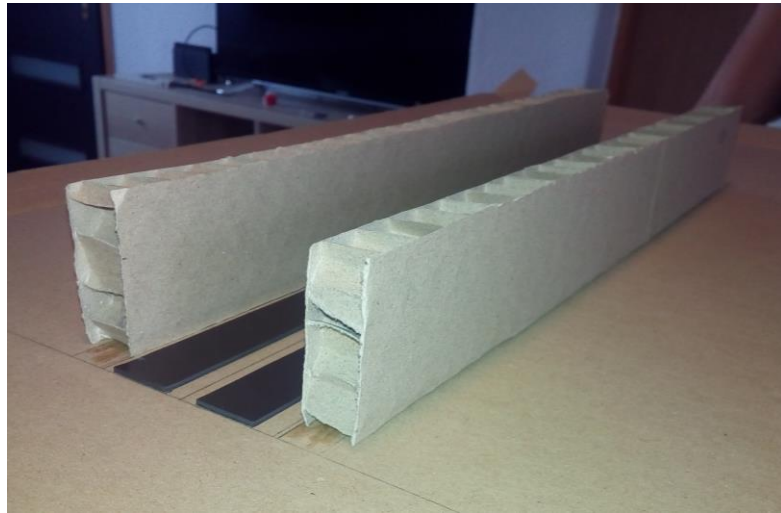
2. Ako smo sve dobro izmjerili, dijelove koji su potrebni režemo. To su magnetske trake, karton za vozilo i kartoni za graničnike.
3. Sve dijelove nakon toga lijepimo kao na slikama. Ukoliko zalijepljeni graničnici neće stajati, izrađujemo dodatne potpornike. Treba napomenuti da će možda biti potrebne korekcije kod ljepljenja graničnika te prije nego ih zalijepimo trebamo provjeriti hoće li vlak (vozilo) levitirati.
4. Postavimo vozilo na tračnice i provjerimo levitira li. Ukoliko levitira pogurnemo ga i vidimo da se vozilo može gibati.



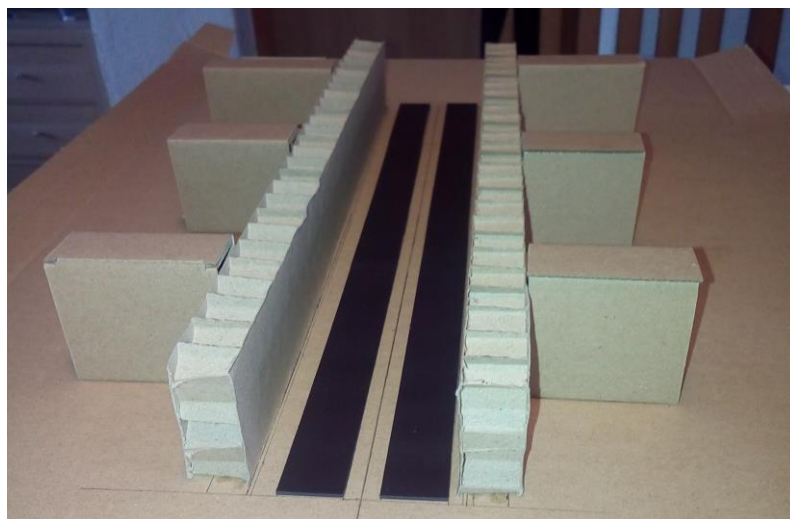
Slika 2. Zalijepljene dugačke magnetske trake (tračnice) na velikom kartonu



Slika 3. Zaljepljene kratke magnetske trake na malom kartonu (vozilo)



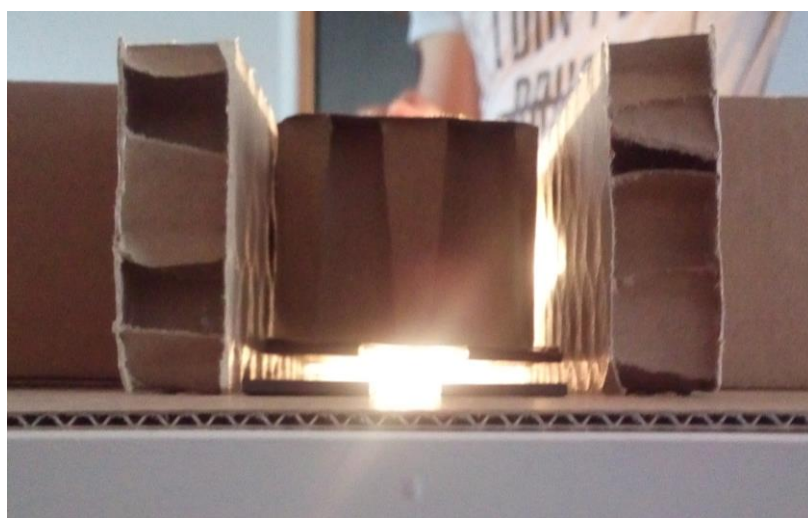
Slika 4. Zaljepljeni graničnici



Slika 5. Graničnici pojačani potpornim kartonima



Slika 6. Vozilo postavljeno na tračnice



Slika 7. Levitacija vozila

Središnji/praktični dio 2. sata

Učenici samostalno izrađuju model Maglev vlaka. Obilazimo cijeli razred i uskočimo u pomoć kome treba. Učenici si mogu i međusobno pomagati.

Završni dio 2. sata

Provjeravamo izvršenost zadatka i vrednujemo rad učenika. Svaki rad pohvaljujemo bez obzira ako netko nije uspio napraviti do kraja. Oni koji nisu uspjeli mogu rad dovršiti kod kuće.

Učenici spremaju i čiste radne jedinice te im se zahvalimo na pažnji.

9. Literatura

- [1] Liu, S.; Long, S.; Li, X. Maglev trains. Key underlying technologies. Berlin: Springer, 2015.
- [2] Yadav, M.; Nivritti, M.; Gupta, A.; Chaudhary, A.; Mahindru, D.V. Review of Magnetic Levitation (MAGLEV): A Technology to Propel Vehicles with Magnets. // Global Journal of Researches in Engineering Mechanical & Mechanics. Vol. 13, 7 (2013), str. 32-33.
- [3] Han, H-S.; Kim D-S.; Magnetic Levitation. Maglev Technology and Applications. Dordrecht: Springer, 2016.
- [4] Kaye, R.J.; Masada, E. Comparison of Linear Synchronous and Induction Motors. Urban Maglev Technology Development Program Colorado Maglev Project. 2004.
- [5] Yaghoubi, H.; Barazi, N.; Aoliaei, M.R. Maglev. Infrastructure Design, Signalling and Security in Railway. Dr. Xavier Perpinya (Ed.). Intech, 2012.
- [6] Toman, M. Ispitivanje svojstava magnetskih materijala istosmjernom strujom. Završni rad. Osijek: Stručni studij elektroenergetike, 2015.
- [7] Griffiths, D. J. Introduction to electrodynamics. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [8] Young, H. D.; Freedman, R. A. Sears and Zemansky's university physics with modern physics. 12th ed. San Francisco: Pearson Addison – Wesley, 2008.
- [9] Radić, D. Odabrana poglavlja fizike čvrstog stanja. Osnove fizike čvrstog stanja. Nastavna skripta. Zagreb: Prirodoslovno- matematički fakultet, 2014.
- [10] Jeličić, M.L. Tehnološke primjene neodimijskih magneta. Završni rad. Zagreb: Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, 2015.
- [11] Babić,; I. Čikeš, T. Alternativne tehnologije propulzije na željeznicu. Seminarski rad. Rijeka: Pomorski fakultet u Rijeci, 2011.
- [12] Godinović, N., Eksperimentalne metode moderne fizike, Magnetska svojstva materijala, marjan.fesb.hr/~ngod/EMMF/6_Magnetska%20%20svojstva%20materijala.ppt, 22.10.2018.

- [13] Supravodljivost, <https://www.pmf.unizg.hr/download/repository/Supravodljivost.pdf>
, 24.10.2018.
- [14] Magnetizam, <https://www.artas.hr/magneti/magnetizam.htm> , 25.10.2108.
- [15] Dananić, V., 6. predavanje, <https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/F2-6-predavanje-beamer.pdf> , 25.10.2018.
- [16] Sambol, M., Vukovinski, M., Supravodljivost, <http://www.tvornica-znanosti.org/blog/supravodljivost> , 24.10.2018.
- [17] Build a floating train, https://www.sciencebuddies.org/science-fair-projects/project-ideas/Phys_p093/physics/maglev-train-weight?from=YouTube , 29.10.2018.
- [18] How the maglev train move forward?, <https://www.quora.com/How-the-maglev-train-move-forward> , 29.10.2018.
- [19] Yaghoubi, H. Practical Applications of Magnetic Levitation Tehnology. Final report. Teheran: IMT, 2012.
- [20] Maglev, <https://en.wikipedia.org/wiki/Maglev> , 15.7.2018.
- [21] Levitacija, <http://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=69511> , 15.7.2018.