

**ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA
V PRAZE**

Technická fakulta

Magnetická levitace a její využití

bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Gunnar Künzel, CSc.

Autor práce: Radim Veselý

PRAHA 2008

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jsem podklady uvedené v seznamu použité literatury.“

V Praze dne 27.2.2008

.....
podpis

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá využitím magnetické levitace v 21. století. Především se zaměřuje na rozbor a klasifikaci jednotlivých principů magnetické levitace, jejich porovnání a využití s důrazem na dopravu, a také na využití supravodivých materiálů a rozbor možností dalšího vývoje systémů magnetické levitace.

Summary

This thesis deals with the use of magnetic levitations in the 21st century. It primarily focuses on the analysis and classification of particular principles of magnetic levitation, their comparison and use with emphasis on traffic and on the use of superconductive materials and the analysis of possibilities of subsequent development of magnetic levitation systems.

Klíčová slova: supravodivost, maglev, EMS, EDS, ložiska, inductrack, levitace

Key words: superconductivity, maglev, EMS, EDS, bearings, inductrack, suspension

Obsah

Úvod	1
1 Cíl bakalářské práce.....	1
1.1 Metodika práce	1
2 Rešeršní část	2
2.1 Jev magnetické levitace	2
2.1.1 Levitace s permanentními magnety.....	2
2.1.2 Levitace s použitím diamagnetika	2
2.1.3 Levitace transformační	3
2.1.4 Elektromagnetická levitace – EMS	4
2.1.5 Elektrodynamická levitace – EDS.....	6
2.1.6 Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů (Inductrack).....	8
3. Supravodivé materiály a jejich využití	9
3.1 Historie supravodivosti.....	9
3.2 Supravodivost	11
3.2.1 Využití supravodivosti.....	14
3.2.2 Příklady využití supravodivosti	14
3.3 Využití supravodivých materiálů	17
4. Zhodnocení výhod a nevýhod magnetické levitace v dopravě.....	22
4.1 Výhody magnetické levitace v dopravě.....	22
4.2 Nevýhody magnetické levitace v dopravě.....	23
4.3 Efektivita magnetické levitace.....	24
5 Aplikace magnetické levitace	25
5.1 Magnetická ložiska	25
5.1.1 Charakteristické vlastnosti magnetických ložisek.....	25
5.1.2 Pasivní magnetická ložiska.....	26
5.1.3 Aktivní magnetická ložiska	28
5.2 Katapult pro urychlení kosmických těles	30
5.3 Magnetická levitace v dopravě	31
5.3.1 Historie magnetické levitace v dopravě.....	31
5.3.2 Charakteristické vlastnosti magnetických dopravních systémů	31
5.3.3 Magnetické dopravní systémy na principu EMS - Inductrack	32
5.3.4 Historie Inductracku	35
5.3.5 Magnetické dopravní systémy na principu EDS	36
5.3.6 Technické řešení	37
5.3.7 Historie, vývoj, výroba EDS.....	39
5.4 Současný stav dopravních systémů Maglev	40
Závěr	41
Literatura:	42

Úvod

Budeme uvažovat o potlačení gravitace, které by umožnilo vznášení čili levitaci předmětů a lidí v prostoru. Tato představa provází člověka již dlouho. Byla pouze vděčným námětem pro autory žánru sci-fi, kteří ve svých představách rozvíjeli různá fantastická zařízení využívající levitaci. Zkoumáním vlastností elektromagnetického pole se však dospělo k poznatku, že levitaci lze realizovat, a to hned několika způsoby. Budeme se zabývat levitací, u níž hlavní roli hraje magnetické pole. Mám tím na mysli magnetickou levitaci. V angloamerické literatuře se tento technický jev zkráceně označuje slovem *maglev*.

Stále rostoucí požadavky na rychlost přepravy při vysoké provozní spolehlivosti a energetické výhodnosti již nelze splnit zdokonalováním klasické železniční dopravy. V této práci se zaměříme na využití magnetické levitace v dopravních prostředcích, protože transport osob, výrobků a surovin hraje v moderní společnosti jednu z nejdůležitějších rolí.

1 Cíl bakalářské práce

Tuto práci tvořím s cílem vypracovat literární rešerši na principy zařízení, v nichž lze uplatnit silové účinky magnetického pole, vyvozující vznášení – levitaci předmětů. Zaměřím se především na využití levitace v dopravních systémech a zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých typů magnetické levitace včetně využití supravodivých materiálů.

1.1 Metodika práce

Práce je tvořena tak, že nejprve seznamuje čtenáře se samotným jevem magnetické levitace a poté s jednotlivými principy magnetické levitace. Seznamuje ho s využitím systémů magnetické levitace a s používanými supravodivými materiály v současné době. Po seznámení s těmito fakty se snažím o jejich vzájemné porovnání a zhodnocení výhod a nevýhod magnetické levitace z hlediska ekologického, konstrukčního a její energetické náročnosti.

2 Rešeršní část

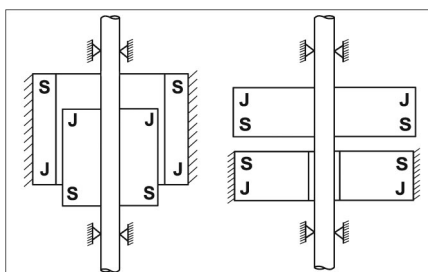
2.1 Jev magnetické levitace

Levitační systémem se nazývá takové zařízení, které umožní stabilně umístit těleso v prostoru, aniž by mělo kontakt s pevnou zemí.

Magnetické levitační systémy jsou založeny na různých fyzikálních principech. Uvedme si ty nejdůležitější.

2.1.1 Levitace s permanentními magnety

Levitace s použitím permanentních magnetů využívá odpudivé síly stejnojmenných pólů těchto magnetů. Tyto způsoby jsou dva, jak je zřejmé z obrázku č.1. Lze tak realizovat například magneticky levitovaná ložiska. Zařízení však přesně nesplňují uvedenou definici levitace. Aby byla poloha rotoru ložiska stabilní, je nutné zajistit jeho polohu vodícími ložisky, čímž není splněna podmínka neexistence kontaktu s pevnou zemí. [1]



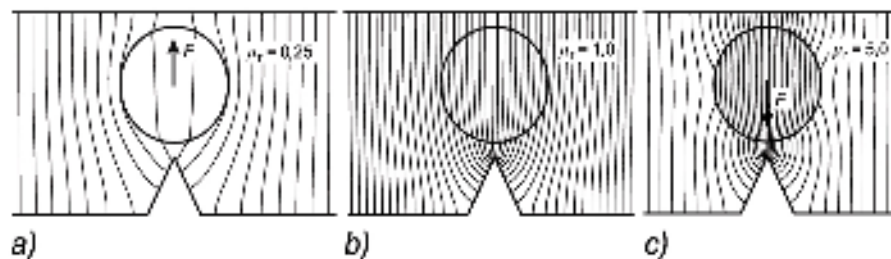
Obr. 1 Dva způsoby levitace pomocí permanentních magnetů

[1]

2.1.2 Levitace s použitím diamagnetika

Vloží-li se do nehomogenního magnetického pole diamagnetické těleso, bude z pole vypuzováno, zatímco paramagnetické nebo feromagnetické těleso je do pole vtahováno, jak je znázorněno na obrázku č.2. Jestliže váha diamagnetického tělesa a vypuzovací (levitační) magnetická síla jsou v rovnováze, zaujme těleso stabilní polohu. Látky, které se vyskytují v přírodě (např. uhlík, vizmut), jsou jen slabě diamagnetické, levitující síla je jen velmi slabá, takže se zdá, že tento jev lze jen stěží uplatnit v praxi.

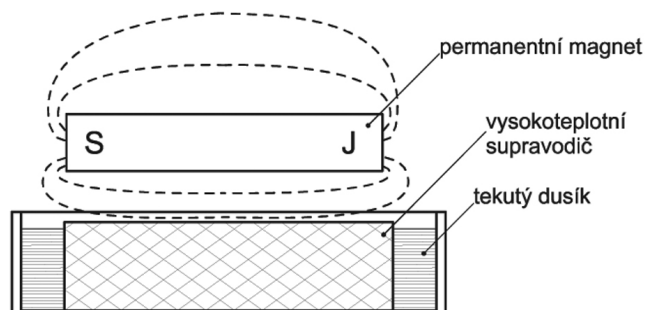
Mnohem větší síla bude působit na supravodič. Ten se totiž chová jako ideální diamagnetikum, tj. jeho relativní permeabilita se blíží nule a jeho elektrický odpor je rovněž téměř nulový. Je-li zdrojem nehomogenního magnetického pole permanentní magnet, působí mezi ním a supravodičem odpudivá síla. Jestliže je permanentní magnet volně uložen nad supravodičem, je levitován – jedná se o tzv. Meissnerův jev zobrazený na obrázku č.3. [1]



Obr. 2 Působení nehomogenního magnetického pole na váleček

- a) z diamagnetika ($\mu_r < 1$)
- b) z nemagnetické látky ($\mu_r = 1$)
- c) z paramagnetika ($\mu_r > 1$)

[1]

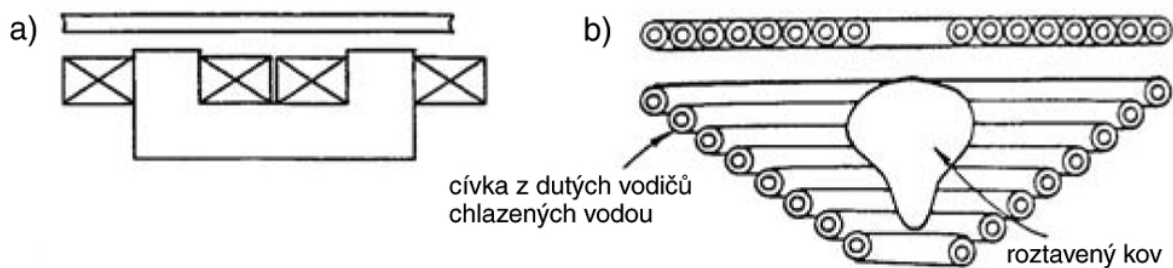


Obr. 3 Levitace permanentního magnetu nad supravodičem (Meissnerův jev)

[1]

2.1.3 Levitace transformační

Vloží-li se do střídavého magnetického pole vybuzeného cívku elektricky vodivé těleso, indukuje se v něm transformační napětí, které vyvolá vířivé proudy. Tyto proudy jsou svým magnetickým polem v interakci s magnetickým polem budící cívky a levitují svého nositele, tj. vodivé těleso. Na obrázku č.4 je naznačen princip transformační levitace a dále její použití k levitaci indukčně roztaveného kovu. [1]



Obr. 4 Levitace transformační

a) levitace měděného kotouče

b) levitace roztaveného kovu v indukční peci

[1]

Fyzikální vysvětlení diamagnetismu supravodiče.

Vloží-li se do magnetického pole supravodič, do supravodiče se indukují vířivé proudy. Proudů nevyhazují, neztlumí se, a působí trvale, protože supravodič má $R \rightarrow 0$; svým magnetickým polem jsou v interakci s budícím magnetickým polem. Je-li zdrojem budícího pole permanentní magnet, vzniká mezi supravodičem a magnetem odpudivá síla. Magnetické pole vířivých proudů působí proti magnetickému poli budícímu, z toho plyne, že uvnitř supravodiče je $B = \mu H \rightarrow 0$. [1]

2.1.4 Elektromagnetická levitace – EMS

Elektromagnetická levitace – EMS (Electro-Magnetic Suspension), jinak také levitace přitahováním, je založena na přitahování feromagnetického tělesa elektromagnetem. Uvažujme stejnosměrný elektromagnet přitahující volně uložené feromagnetické těleso silou F .

Tato levitace je *nestabilní* (obr. č.5a):

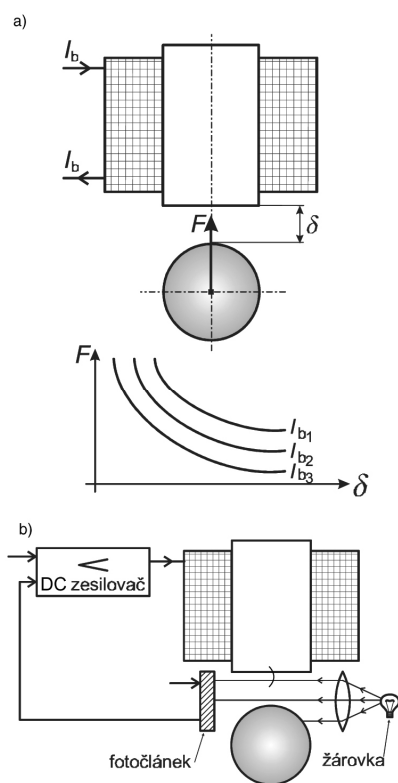
$F < \text{váha tělesa}$ - těleso odpadne

$F > \text{váha tělesa}$ - těleso se přitáhne

Pro dosažení stabilní levitace je nutné zavést zpětnovazební regulaci budícího proudu elektromagnetu. Regulátor nastavuje takový budící proud, aby magnetický tah byl stále v rovnováze s váhou tělesa. Na obrázku č.5b je schéma jednoduchého regulátoru s optickým

čidlem polohy. Osvětlení fotoelektrického článku, a tedy jeho výstupní napětí závisí na poloze tělesa.

Elektromagnetickou levitaci lze též stabilizovat pomocí střídavého elektromagnetu, jehož budicí proud je samočinně regulován laděným obvodem RLC, tj. obvod obsahující součástky jako elektrický odpor, cívka a kondenzátor. Do série z cívkou elektromagnetu je zapojen kondenzátor, jehož kapacita C je určena tak, aby pracovní bod A obvodu RLC byl blízko za rezonancí (obr. č.6). Vzdálí-li se těleso od magnetu, klesne indukčnost L jeho cívky, pracovní bod se přiblíží k rezonanci, budicí proud se zvětší, a tedy i síla na těleso vzroste. Naopak: přiblíží-li se těleso k magnetu, vzroste L jeho cívky, obvod RLC se více rozladí a proud a tedy i přitažlivá síla poklesnou. Výhodnost tohoto levitačního zařízení je jen zdánlivá. Časová konstanta obvodu RLC je poměrně velká, takže silové působení na těleso je slabě tlumeno a při poruše jeho stabilní polohy vznikají oscilace. Nevýhodný je též indukční charakter obvodu pro stabilní polohu tělesa, tedy jeho nízký účinnost. Z těchto důvodů se k trakčním účelům tento způsob levitace nepoužívá. [1]

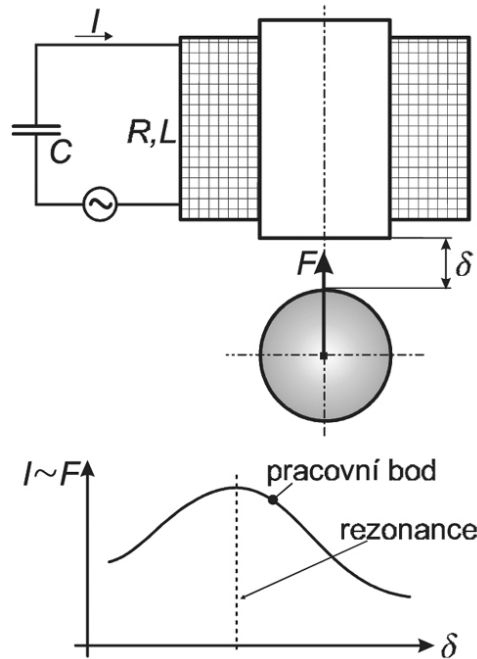


Obr. 5 EMS

a) nestabilní

b) stabilizovaný zpětnovazebním regulátorem budicího proudu

[1]



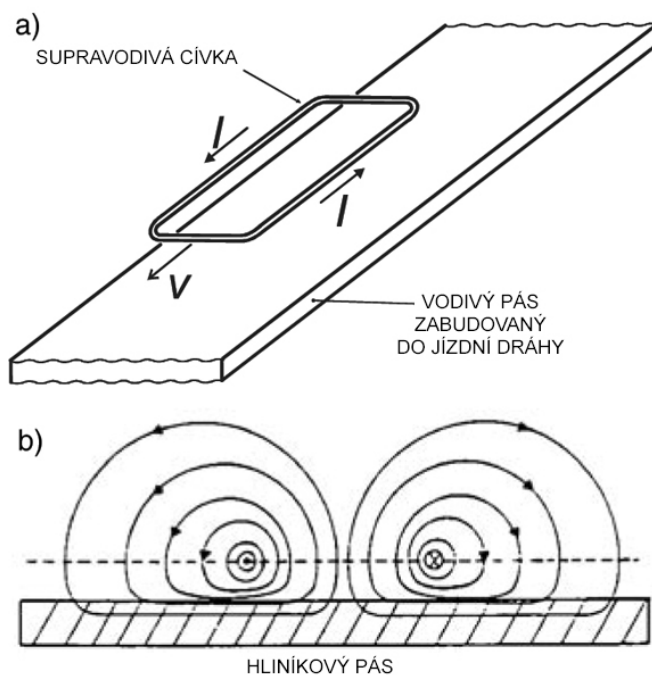
Obr. 6 EMS: stabilizace polohy tělesa obvodem RLC

[1]

2.1.5 Elektrodynamická levitace – EDS

Elektrodynamická levitace – EDS (Electro-Dynamic Suspension), jinak též levitace odpuzováním (čili repulsivní typ levitace), je založena na odpuzování stejnosměrného elektromagnetu od pohybujícího se vodivého pásu (obr. 7a). Uvažujme plochou obdélníkovou cívku spojenou s vozidlem a napájenou stejnosměrným budícím proudem. Cívka je uložena nad vodivým (hliníkovým) pásem. Jestliže se cívka vůči pásu nepohybuje, stejnosměrné magnetické pole cívky proniká do vodivého pásu a mezi cívkou a pásem nepůsobí žádné síly.

Když se cívka vůči pásu pohybuje, indukují se v pásu vířivé proudy, jejichž magnetické pole je v interakci s magnetickým polem budící cívky. Na cívku působí síla, která má dvě složky: jedna složka odpuzuje cívku od pásu a způsobuje její *levitaci* a druhá složka síly *brzdí* pohyb cívky a musí být překonána zařízením, které cívce dodává pohyb, tedy pohonem vozidla, v němž je uložena cívka. Magnetické pole vířivých proudů působí proti magnetickému poli cívky, takže v pásu je magnetické pole velmi slabé (obr. 7b). [1]



Obr. 7 EDS

- a) pohybující se supravodivý magnet nad vodivým pásem
 b) magnetické pole pohybujícího se supravodivého magnetu

[1]

Aby levitační síla byla dostatečná (např. při použití u dopravních systémů levituje vozidlo i s pasažéry), musí cívka indukovat extrémně silné magnetické pole. Toho lze dosáhnout, je-li cívka ze supravodiče a protéká-li jí extrémně velký budicí proud.

Ačkoliv uvedené levitační systémy (tj. levitační systém s diamagnetikem, levitační systém transformační a EDS) jsou fyzikálně odlišné, jejich magnetická pole jsou obdobná: skládají se ze dvou složek – z budicího magnetického pole a z magnetického pole vířivých proudů. Obě složky jsou v silové interakci, což vede k levitaci.

Přestože je využívání magnetické levitace v technické praxi ještě ve stadiu vývoje, již zřetelně se rýsuje několik aplikačních oblastí. Magnetická levitace se uplatňuje zejména v těchto oborech:

- projektování moderních dopravních prostředků, vysokorychlostních železnic, tzv. magnetických superexpresů, i pro městskou dopravu,
- různá speciální zařízení a přístroje, u nich se používají *bezkontaktní vysokorychlostní ložiska*,

- hutnictví, metalurgie, zejména rafinace kovů – využití bezkontaktního indukčního tavení,
- oblast počínaje vybavovacími mechanismy rychlovypínačů a konče elektromagnetickými děly a katapulty pro starty raketoplánů – perspektivní použití *pulsních elektromechanických měničů*, které nepracují se *stabilní*, ale s *rázovou* magnetickou levitací. [1]

2.1.6 Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů

(Inductrack)

Před několika lety byl popsán nový způsob magnetické levitace, jenž využívá permanentní magnety a oproti dosavadním typům je podstatně jednodušší, levnější a bezpečnější. Nyní je předmětem výzkumů; dosažené výsledky jsou pozoruhodné.

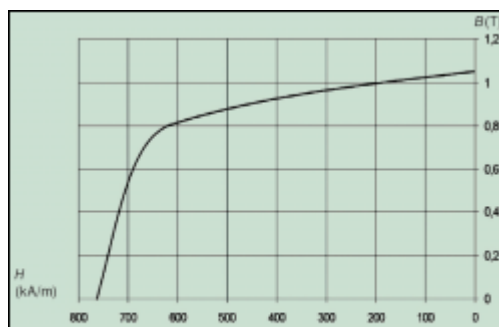
Klaus Halbach - fyzik, který navrhl uspořádání permanentních magnetů ve tvaru kvádrů, jak je naznačeno na (Obr. 8) (šipkami jsou vyznačeny směry jejich magnetizace). Permanentní magnety byly zhotoveny práškovou metalurgií ze vzácných zemin, se slitinou neodýmium-železo-bor (NdFeB), s remanentní indukcí kolem 1,2 T. Magnetická pole jednotlivých magnetů se skládají a výsledek je překvapující: v oblasti při dolní části této soustavy je magnetické pole velmi silné - dosahuje hodnoty až kolem 1 T, kdežto v oblasti při horní části soustavy je magnetické pole velmi slabé.

Permanentní magnety Halbachovy soustavy měly tvar kvádrů o rozměrech podstavy 100×100 mm. Byly zhotoveny z materiálu RECOMA 25 (magneticky tvrdý materiál na bázi velmi jemných prášků ze sloučenin kobaltu se vzácnými zeminami). Demagnetizační část jejich hysterezní smyčky (Obr. 9) má remanentní indukci $B_r = 1,0$ T a koercitivní intenzitu magnetického pole $H_r = 800$ kA/m.



Obr. 8 Halbachovo uspořádání permanentních magnetů ve tvaru kvádrů

[2]



Obr. 9 Demagnetizační část hysterezní křivky materiálu RECOMA 25

[2]

Rozložení magnetického pole v Halbachově soustavě magnetů a jejím okolí bylo znázorněno různými zobrazovacími způsoby: plošným zobrazením oblastí magnetické indukce, siločarami magnetického pole a soustavou vektorů magnetické indukce, jež jsou tečnami magnetických siločar. Je zřejmé, že při horním okraji Halbachovy soustavy magnetů je magnetické pole celkem slabé, kdežto při dolním okraji dosahuje hodnot kolem 1 T. [2]

3. Supravodivé materiály a jejich využití

3.1 Historie supravodivosti

Historie supravodivosti

V 19. století již bylo známo, že elektrický odpor kovů se snižující se teplotou taktéž klesá. Kvůli neexistenci dostačující kryogenní techniky ovšem vznikaly dohady o tom, jak to bude s odporem vypadat při teplotách blízkých absolutní nule. Fyzikové zastávali v podstatě dvě rozdílná stanoviska. Teoretici souhlasící s názory Jamese Dewara, byli přesvědčeni, že odpor kovů bude stále klesat a jeho hodnota bude nulová při teplotě 0 K. Skupina fyziků sdružená kolem lorda Kelvina tvrdila, že odpor kovů bude klesat, až při určité teplotě dosáhne hodnoty R_0 , dál pak bude se snižující se teplotou znovu pozvolna narůstat.

1908 - Holanďan Heikem Kammerlingh Onnes na podkladě prací Wroblewského a Dewara poprvé zkapalnil helium při teplotě 4,2 K a běžném atmosférickém tlaku. Postupným ochlazováním platiny a zlata zjistil, že tyto kovy se chovají přesně podle Dewarovy teorie.

1911 - Onnes zopakoval své pokusy se rtuť, při teplotě 4,27 K zjistil, že její elektrický odpor klesá, až při teplotě 4,22 K vymizí úplně.

1912 – Onnes přebírá Nobelovu cenu a nazývá ve své přednášce zcela nový stav rtuť jevem supravodivým.

1933 – Za supravodiče považovány jen látky s nulovým elektrickým odporem. Tohoto roku však Walter Meissner a Robert Ochsenfeld objevili jejich další velice důležitou vlastnost - ideální diamagnetismus. Když umístili supravodič do magnetického pole a ochladili ho pod kritickou teplotu, zjistili, že supravodič dokonale vytěsnil magnetické pole ze svého objemu. Vysvětlení tzv. perfektního diamagnetismu, se též nazývá na počest jednoho ze svých objevitelů Meissnerův jev.

1957 - John Bardeen, John Schrieffer a Leon Cooper objasnili fyzikální podstatu supravodivosti. Podle začátku jejich příjmení se teorie nazývá BSC. Roku 1972 byli za tuto teorii odměněni Nobelovou cenou.

1962 - postgraduální student na Cambridžské univerzitě Brian Josephson vložil mezi dva supravodiče izolant a ačkoli se to zdá neuvěřitelné, izolantem protékal proud. Za tento objev, nazvaný na jeho počest Josephsonovým přechodem, a jeho teoretické vysvětlení obdržel roku 1973 Nobelovu cenu. Ačkoli už byl jev supravodivosti dávno objasněn, vědci stále ještě nenašli žádný z tzv. vysokoteplotních supravodičů.

1986 – Vědcům, pracujícím pro curyšskou firmu IBM se podařilo připravit první z řady keramických supravodičů. Jimi připravená látka měla kritickou teplotu $T_c = 35$ K. Následně se jim dařilo vyrábět další podobné materiály se stále vyšší a vyšší kritickou teplotou, až rok nato objevili látku s $T_c = 90$ K, což byl velmi důležitý objev, protože tento materiál už nemuseli chladit drahým kapalným heliem. Stačil k tomu levnější a také dostupnější tekutý dusík.

1994 – Vědci z Národního institutu životní úrovně a technologie v Coloradu našli v únoru tohoto roku vysokoteplotní supravodič u něhož nynější nejvyšší teplota dosahuje 138 K. [19]

3.2 Supravodivost

Jednou z nejslibnějších a nejatraktivnějších oblastí dnešní fyziky je nesporně supravodivost. Přestože byla tato podivná vlastnost pevných látek objevena již na začátku dvacátého století, trvalo mnoho desítek let, než ji bylo možné využít v praxi. Dnes se již ročně vyrábí desítky tisíc tun supravodivého materiálu, ale skutečný den D pro supravodivost je teprve před námi. Materiály, které se v praxi používají, jsou totiž vesměs tzv. nízkoteplotní supravodiče, jejichž provoz je značně nákladný. V mnoha ohledech výhodnější jsou tzv. vysokoteplotní supravodiče, jejichž výzkum začal teprve nedávno.

Začněme však od začátku. Co to je supravodivost a jak se projevuje? Každý dobře ví, že kovové materiály jsou většinou dobré elektrické vodiče, to znamená, že na rozdíl od izolantů dobře vedou elektrický proud. Je také všeobecně známo, že průchodem proudu vodičem vzniká teplo. Toto teplo je tím větší, čím vyšší je procházející proud a čím vyšší je tzv. měrný odpor vodiče. Některé slitiny kovů mají vysoký měrný odpor (např. kanthal, nichrom apod.) a jsou proto vhodné do různých topných zařízení, jiné vodiče (např. měď, stříbro, zlato, hliník aj.) mají nízký měrný odpor a používají se proto pro rozvod elektrické energie. Přestože je jejich měrný odpor nízký, stačí k tomu, aby se na něm ztratila ve formě tepla až třetina procházející elektrické energie. To je velmi nepříjemné. Bylo by výhodné najít materiál, který by měl měrný odpor nepatrný nebo nulový. Takovým materiálem je právě **supravodič**.

Doposud známé materiály vykazující supravodivé vlastnosti se do supravodivého stavu dostávají jen v nízkých teplotách, hluboko pod teplotou pokojovou. Teplotu, při níž se daná látka stává supravodivou, nazýváme **kritickou teplotou** a ta je charakteristická pro daný materiál. Když daný materiál ochlazujeme, jeho měrný odpor postupně klesá a při kritické teplotě najednou prudce, skokem, spadne na nulu. Pod kritickou teplotou je už materiál supravodivý a neklade průchodu proudu žádný odpor. Můžeme proto do cívky z takového materiálu zapnout proud, poté zdroj proudu odpojit a zavedený proud teče cívkou po velmi dlouhou dobu (i několik let) beze změny. Protože proud budí v okolí vodiče magnetické pole, je supravodivá cívka zdrojem magnetického pole. To je princip **supravodivého magnetu**, který se využívá všude tam, kde potřebujeme vysoké magnetické pole a máme k dispozici potřebné chladicí médium.

Prvek	T _c [K]	B _{c0} [10 ⁻⁴ T]	E _{g0} [meV]
Al	1,175	104	0,34
Be	0,26		
Cd	0,517	28	0,15
Ga	1,07		
Hf	0,35		
Hg - α	4,154	411	1,65
Hg - β	3,949	339	
In	3,4035	281,5	1,05
Ir	0,1125	16	
Mo	0,915	96	0,27
Nb	9,25	2060	3,05
Pb	7,196	803	2,73
Sn	3,722	305	1,15
Ta	4,47	829	1,4
Tc	7,8	1410	
Ti	0,4	56	
V	5,4	1408	1,6
W	0,0154	1,15	
Zn	7,86		
Zr	0,7		

Tab.1 Vybrané supravodiče I. typu

[20]

Supravodiče I. typu - Do skupiny supravodičů I. typu patří kovy a polokovy, které jsou vodivé za normální teploty. Vyžadují ochlazení na velmi nízkou teplotu, aby se utlumily molekulární vibrace na úroveň umožňující nepřerušované proudění elektronů. [8]

Prvek	T _c [K]	B _{c2} [T]
Sloučeniny		
Nb ₃ Sn	18 - 18,3	22,5 - 23,5
Nb ₃ Al	18,7	29,5
Nb ₃ Ge	23,2	
Nb _{0,68} Ga _{0,32}	20,2	33,6
Nb _{0,16} Al _{0,64} Ge _{0,2}	20,7	41
Nb ₃ Al _{0,75} Ge _{0,25}	18,5	42

V ₃ Ga	14 - 14,8	19,6 - 21,5
V ₃ Si	16,9	22,8
La ₃ In	10,4	
Slitiny		
Nb-Ti	8 - 10	9 - 12
Nb-Zr	9 - 11	6 - 9
Nb-Zr-Ti	8 - 11	8 - 11

Tab. 2 Vybrané supravodiče II. typu

[20]

Supravodiče II. typu -Mezi supravodiče II. typu patří kovy, intermetalické sloučeniny, slitiny, ale i keramika na bázi perovskitů. Perovskity jsou krystalické keramiky, jejichž jména se odvozují od minerálu známého jako perovskit. Jsou to nejvíce se vyskytující minerály na světě, jejichž poměr kovu ke kyslíku je přibližně 2 ku 3. Supravodiče na bázi oxidů mědi jsou tedy nazývány perovskity. Samotné jméno perovskit vzniklo z jména ruského mineraloga Leva Aleksejeviče von Perovského. Tyto materiály (označované rovněž jako tvrdé supravodiče) mají vyšší kritické teploty a dosahují podstatně vyšších kritických magnetických polí.

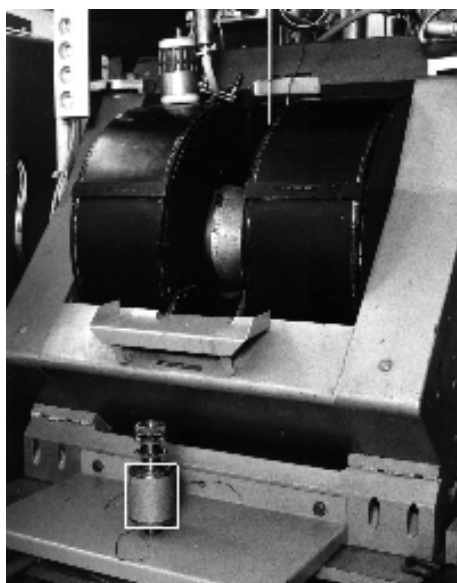
Prvek	T [K]
La _{2-x} Ba _x CuO ₄ (x=0,15)	35
La _{2-x} Sr _x CuO ₄	40
(La _{0,9} Ba _{0,1}) ₂ CuO _{4-y} (p=1,68 GPa)	52
(Y _{1-x} Ba _x) ₂ CuO _{4-y} (x=0,4)	93
GdBa ₂ Cu ₃ O _{7-y}	asi 90
YBa ₂ Cu ₃ F ₂ O _y	155

Tab. 3 Vybrané vysokoteplotní supravodiče

[20]

Zásadní výhodou supravodivých magnetů je to, že díky nulovému měrnému odporu supravodivého materiálu je možné pro bezpečný průchod relativně vysokého proudu použít mnohem tenčí vodič než by byl potřeba u klasické cívky. Můžeme proto do relativně malého průřezu cívky vtěsnat velké množství závitů.

Protože magnetické pole cívky je úměrné počtu tzv. ampérvávitů, tj. násobku proudu a počtu závitů cívky, umožňuje obrovský počet supravodivých závitů podstatně snížit potřebný proud oproti klasickým magnetům. Je tak možné s proudy několika desítek ampérů vytvořit magnetické pole řádu několik Tesla, které by při využití klasických postupů vyžadovalo malou elektrárnu. Na obrázku č.10 je vidět rozdíl v rozměrech klasické a supravodivé cívky, které vytvářejí při stejném proudu 100 A srovnatelné magnetické pole. Malý supravodivý magnet dokonce vytváří pole více než dvakrát vyšší, přitom experimentální prostor je v obou případech podobný, několik desítek krychlových centimetrů. [10]



Obr. 10 Porovnání konvenčního elektromagnetu (černé velké cívky nahoře) se supravodivým magnetem (vlevo dole v bílém rámečku). Při stejném proudu 100 A dává elektromagnet pole 2T, zatímco supravodivý magnet dává ve srovnatelném objemu pole 5 T.

[10]

3.2.1 Využití supravodivosti

- Vedení elektrické energie bez tepelných ztrát.
- Obrovská magnetická pole umožňující vlakům levitovat.
- Elektronické a mikrovlnné součástky.
- Očekávané aplikace supravodičů mohou vést k obdobné technické revoluci jako například v elektronice objev tranzistoru.

3.2.2 Příklady využití supravodivosti

- **Přesné měření velmi malých magnetických polí.** Pomocí obvodu ze supravodivého materiálu, tzv. **SQUID** (Superconducting Quantum Interference Device) (Obr. 11). Používá se především ve výzkumu nebo v lékařství např. v magnetoencefalografii.
- **Přenos elektřiny beze ztrát.** Supravodivé kabely s vnitřní trubicí naplněnou kapalným dusíkem se již pokusně používají na přenos energie na kilometrové vzdálenosti. Supravodivé pásy pro přenos velkých proudů (Obr. 12).
- **Uchování elektrické energie.** Pomocí cívek ze supravodivého drátu. Do takové cívky můžeme zapnout proud, poté zdroj proudu odpojit a zavedený proud teče cívkou prakticky nekonečně dlouhou dobu beze změny. V supravodivé cívce lze tak beze ztrát uchovávat elektrický proud a velmi rychle jej dodat do sítě či odebrat a tím vyrovnávat fluktuace.
- **Supravodivé magnety.** Protože proud budí v okolí vodiče magnetické pole, je supravodivá cívka popsaná v předešlém odstavci také zdrojem magnetického pole. To je princip supravodivého magnetu, který umožňuje vytvořit silná a stabilní magnetická pole s využitím v tomografii, urychlovačích atd.
- **Omezovač proudu.** Supravodiče ztrácejí své supravodivé vlastnosti nejen při překročení kritické teploty, ale rovněž při překročení kritického proudu. Této vlastnosti využívají supravodivé pojistky, což je supravodivá součástka s patřičně nastaveným kritickým proudem.
- **Katapult pro urychlení kosmických těles – kapitola 5.2**
- **Magnetická ložiska bez tření**
- **Levitující vlak – maglev na principu EDS – kapitola 5.3.3**



Obr. 11 SQUID - Superconducting Quantum Interference Device - k měření magnetických vlastností supravodičů a jiných materiálů

[10]



Obr. 12 Supravodivé pásy pro přenos velkých proudů

[10]

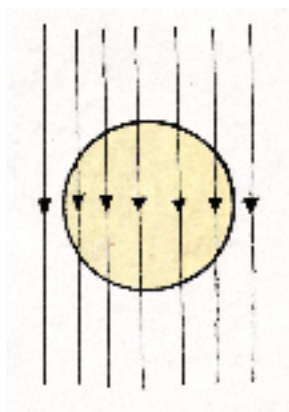
3.3 Využití supravodivých materiálů

Supravodivé magnety se dnes používají např. v urychlovačích elementárních částic, v laboratořích pro výzkum magnetických vlastností materiálů, ale i v lékařství, např. v magnetickém rezonančním tomografu, jednom z nejšetrnějších vyšetřovacích zařízení dnešní doby. V průmyslu se používají např. pro magnetickou úpravu vody a další magnetické separační procesy.

Začali jsme však u výhod nulového měrného odporu pro rozvod elektrické energie. Tato výhoda tu nesporně je, ale vzhledem k nákladům na nutné chlazení supravodivého kabelu není zatím její využití ekonomické. Velké naděje se v tomto směru vkládají do tzv. vysokoteplotních supravodičů. Zatímco klasické, **nízkoteplotní**, supravodiče jsou čisté kovy a jejich slitiny (jsou supravodivé při teplotách pod 23 K a musejí se proto chladit kapalným heliem, bod varu 4.23 K), tzv. **vysokoteplotní** supravodiče mají kritické teploty v průměru okolo 90 K, některé až 136 K, tedy nad teplotou kapalného dusíku (bod varu 78 K). Kapalný dusík je navíc relativně levná chladicí kapalina. Příroda nám však nedá nic zadarmo: jak už bylo řečeno, klasické supravodiče jsou kovy, jako takové jsou dobře mechanicky tvárné a výroba vodičů z nich není problém. Vysokoteplotní supravodiče jsou vesměs velmi křehké keramické materiály a technologie výroby vodičů z nich je velmi náročná. V současné době se prosazují dvě cesty, jak obejít křehkost těchto materiálů, a to jednak válcováním polykrystalického materiálu ve stříbrné matrici (kapiláře), jednak napařováním nebo chemickým nanášením tenkých monokrystalických vrstev supravodičů na ohebné podložky ve formě dlouhého pásku. Dnešní technologie umožňuje vyrobit supravodivé pásy až do maximální délky asi 1,5 km. Přestože se už laboratorně testují první cívky vyrobené z takovýchto vodičů, cesta k ekonomickému využití v běžné praxi je ještě dlouhá.

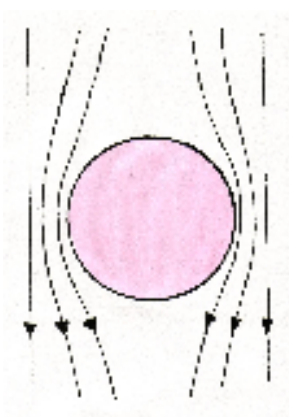
Jiným příkladem aplikace supravodičů může být tzv. **supravodivá levitace**. Je to něco podobného, jako když vezmeme dva permanentní magnety a umístíme je shodnými póly nad sebe. Ten horní se v důsledku odpuzivých sil vznáší nad tím spodním. Pravda, jen nepatrný okamžik, protože při nejbližší příležitosti se otočí k tomu spodnímu opačným pólem a je k němu přitážen. Taková poloha je totiž nestabilní a levitace magnetu by byla možná jen při zajištění vzájemné polohy magnetů nějakým vnějším zásahem, například umístěním do trubice, která by zabránila jejich otočení.

U supravodivé levitace se využívá elektromagnetické indukce a nulového měrného odporu supravodiče. V každém materiálu, který vložíme do magnetického pole, se indukují vířivé stínící proudy, které se snaží odstínit vnější magnetické pole z objemu materiálu. Čím má materiál vyšší měrný odpor, tím větší teplo vířivé proudy v jednotkovém objemu produkují. V důsledku tepelných ztrát jsou pak tyto proudy utlumeny a magnetické pole pronikne do objemu materiálu. Konečný stav je vidět na obrázku 13. Supravodič má nulový měrný odpor, tepelné ztráty jsou v něm nulové a vložíme-li ho do magnetického pole, indukované stínící proudy na jeho povrchu se netlumí a vnější magnetické pole je uvnitř supravodiče dokonale odstíněno. Vnější pole se v důsledku povrchových proudů zdeformuje, jak je znázorněno na obrázku 14. [10]



Obr. 13 Nesupravodivý materiál vložený do magnetického pole. Pole jím volně proniká.

[10]



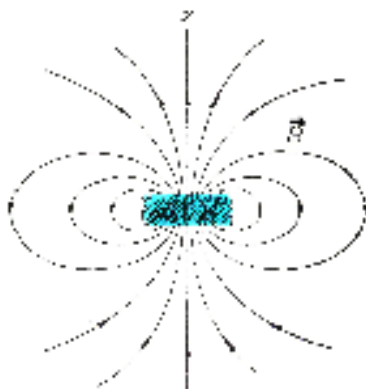
Obr. 14 Supravodivý materiál vložený do magnetického pole se snaží zachovat ve svém objemu původní stav (bez pole) a proto vnější pole ze svého objemu vypuzuje.

[10]

Jak to souvisí s levitací? Podívejme se na další dvojici obrázků. Na obr. 15 je vidět průřez permanentním magnetem a siločáry magnetického pole v jeho okolí. Když do pole tohoto magnetu vložíme “supravodič”, jehož teplota je vyšší než teplota kritická (a je proto v nesupravodivém stavu), elektromagnetickou indukcí se na jeho povrchu vybudí stínící proudy, které se však v důsledku konečného měrného odporu rychle utlumí a magnetické pole pronikne do objemu materiálu (obr. 16). Když pak “supravodič” ochladíme pod kritickou teplotu, stane se supravodivým. Při přechodu přes kritickou teplotu nedochází ke změně magnetického pole v oblasti supravodiče, stínící proudy na jeho povrchu se proto nevybudí a magnetické pole v supravodiči “zamrzne” ve stavu, jaký byl před ochlazením.

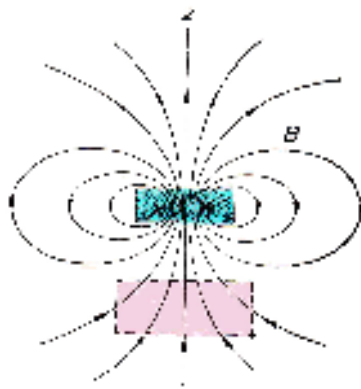
Ve skutečnosti magnetický tok neprochází přímo supravodivým materiálem, ale mikroskopickými kanály, které zůstávají v nesupravodivém stavu. Tyto kanály nazýváme vortexy nebo “česky” supravodivé víry. Na jejich obvodu tečou stínící proudy, které supravodivý materiál stíní od magnetického toku v jádru vortexu. Každý supravodivý vír nese jednu nebo více elementárních jednotek, tzv. kvant magnetického toku.

Při jakékoliv změně vnějšího magnetického pole, tedy nejen zvýšení, ale i snížení a dokonce i při změně orientace nebo rozložení, dojde k vybudění stínících proudů na povrchu supravodiče, jejichž účinkem se supravodič snaží vykompenzovat danou změnu.



Obr. 15 Permanentní magnet a magnetické pole v jeho okolí.

[10]



Obr. 16 Supravodič nad kritickou teplotou vložený do pole permanentního magnetu.

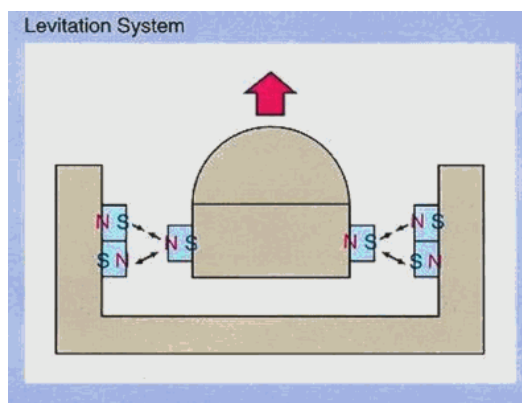
[10]

V důsledku toho, ať pohneme permanentním magnetem jakýmkoliv směrem, je magnet tažen zpět do své původní polohy. Visí tedy v jakési magnetické kapse, ze které není snadné uniknout. Je to pravý opak situace s dvěma permanentními magnety. Nejenže se může magnet vznášet nad supravodičem, ale stejně může i viset pod ním. Dokud je supravodič chlazen, je tento stav stálý. Vzájemná poloha magnetu a supravodiče je do té míry stabilní, že magnet unese i značnou zátěž. Pokud umístíme podobné zařízení do vakua, kde odpadá tření o vzduch, a použijeme magnet rotačně dokonale symetrický (nejen svými rozměry, ale i tvarem magnetického pole), pak při roztočení magnetu získáme **bezeztrátové ložisko** nebo, chcete-li, **setrvačnick**. Stejného principu se využívá v supravodivém **motoru**. Setrvačnický tohoto typu se dnes vyvíjejí pro stabilizaci polohy družic. Teplota ve vesmíru je totiž příhodně nízká, takže odpadá starost o chlazení supravodiče. Ke stabilizaci polohy dochází v důsledku sil, které vznikají při odchýlení osy otáčení setrvačnicku z původního směru.

Setrvačnický obřích rozměrů s velkou hmotností jsou pak potencionálním zásobníkem kinetické energie, kterou je možné ve vhodný okamžik převést na energii elektrickou a zásobovat tak např. vesmírnou stanicí.

Trochu jinak se supravodivosti využívá u magneticky levitujícího vlaku, nazývaného **MagLev** (obrázek 18). Ten má na bocích svých vagónů supravodivé cívky vytvářející vysoké magnetické pole (obrázek 17). Toto pole indukuje při pohybu vlaku elektrické proudy v měděných cívkách na bocích “kolejiště”. Magnetické pole, které tyto proudy vytvářejí, interaguje s magnetickým polem supravodivých cívek tak, že se vlak vznáší dostatečně vysoko nad zemí. Takovýto vlak jezdí rychlostmi okolo 500 km za hodinu – současný rekord

je 563 km/hod. Supravodivé cívky jsou vyrobeny z klasických supravodičů, musejí se chladit kapalným heliem a provoz je proto velmi drahý. V budoucnosti se počítá s nahrazením supravodivých cívek permanentními magnety z vysokoteplotních supravodičů, které jsou pro tento účel intenzívně vyvíjeny. [10]



Obr. 17 Průřez vagónem MagLevu a kolejištěm ve tvaru písmene U. Na bocích vagónu jsou znázorněny supravodivé cívky interagující s cívkami na kolejišti.

[10]



Obr. 18 MagLev při jízdě na testovací trati Yamanashi při rychlosti asi 200 km/hod.

[10]

4. Zhodnocení výhod a nevýhod magnetické levitace v dopravě

4.1 Výhody magnetické levitace v dopravě

- Zatímco rychlost klasické železnice (s koly na kolejnicích) je omezena adhezivní (přilnavou) silou mezi kolem a kolejnicí a je limitována hodnotou asi 300 km/h, je rychlost magneticky levitovaných vozidel omezena pouze aerodynamickými odpory a dosahuje hodnot až 550 km/h.
- Hlavní konstrukční části magneticky levitovaného vozidla jsou nepohyblivé, mají tedy delší životnost, lepší provozní spolehlivost, bezpečnost a nevyžadují častou údržbu. Odpadá hluk ze vzájemného styku mechanických částí a provoz je tichý. Při rychlostech nad 200 km/h se projevuje aerodynamický hluk, jehož hladina je v porovnání s hladinou hluku ostatních dopravních prostředků nízká, přepravované osoby nejsou vystaveny vibracím a je jim poskytnut vysoký cestovní komfort. Bezpečnost cesty je výrazně vyšší než u ostatních dopravních prostředků.
- Ve srovnání s kolejovým železničním vysokorychlostním systémem, např. francouzským TGV, německým ICE nebo italským Eurostar Italia, je spotřeba energie vozidla Maglev stejná nebo o něco nižší (odpadají mechanické ztráty třením), spotřeba v letecké dopravě je až pětikrát vyšší než u Maglevu.
- Provoz dopravního systému magneticky levitovaných vlaků je ekologický a jeho zavedení umožní zlepšit čistotu ovzduší, neboť nahradí automobilovou a leteckou dopravu produkující velké množství škodlivých emisí. Trať je v porovnání s ostatními druhy pozemní dopravy prostorově nejméně náročná, lze využít i půdu pod tratí. Akcelerace vozidla může být větší než u klasické železnice (tedy doba rozjezdu je kratší), je omezena jen přípustným působením na cestující, což činí 0,15g (g je tíhové zrychlení v m/s^2).

- Systém řízení provozu vlaků Maglev lze charakterizovat centrálním automatickým řízením provozu podle naprogramovaného harmonogramu jízd s decentralizovaným monitorováním a zabezpečením všech tras a pohybů vozidla. Klasickým úkolem strojvedoucího je plnit úlohu jakéhosi průvodce vlaku, který v případě mimořádné události komunikuje s dispečinkem. Všechny normální jízdni a brzděné operace zcela provádí systém řízení provozu. Zařízení pro zabezpečení provozu je umístěno ve vozidle a stacionárních objektech. Výměnu dat mezi oběma těmito částmi systému zajišťuje vysoce spolehlivý systém rádiového přenosu, fungující na přímou viditelnost. Konkrétní uspořádání rádiových stožárů na trase zajišťuje, aby dvě redundantní antény na vozidle mohly v každém okamžiku přijímat signály ze dvou nezávislých rádiových stožárů.
- Vozidla se dají bezpečně lokalizovat pomocí digitálně zakódovaných indikátorů umístěných na vodící dráze. Neustále se také kontroluje, zda vozidlo dodržuje rychlostní limit. V případě jeho překročení nastane automatické odstavení hnacího výkonu a aktivace brzd vozidla, pracujících na principu vířivých proudů. Jsou to prvořadě bezpečnostní funkce systému řízení provozu. Kromě toho systém řízení provozu kontroluje vzdálenost mezi po sobě jedoucími vozidly na trase, řídí činnost přesouvačů vodící dráhy, zajišťuje bezpečnost cestujících ve stanicích a plní mnoho jiných funkcí, resp. ovládá či zabezpečuje mnohé jiné procesy. Vyloučením lidského faktoru z odpovědnosti za bezpečnost za provozu a zavedením vysokého bezpečnostního standardu v oblasti signalizačních technologií a zařízení se podařilo zajistit vysokou úroveň bezpečnosti celého systému. Mezi dalšími úkoly systému řízení provozu stojí za zmínku dokumentace provozu vozidel a zajišťování aktuálních informací pro bezpečnost zaměstnanců i cestujících.

4.2 Nevýhody magnetické levitace v dopravě

- Nutnost vybudovat nové tratě a stanice, což znamená náročné stavební úpravy
- vyšší finanční náklady
- Japonský vlak na principu EDS potřebuje pro svůj provoz kriogenní chlazení kvůli supravodivým cívkám.

4.3 Efektivita magnetické levitace

Hlavní hlediska pro každý maglev je jeho efektivita nadnášejícího systému a provozní náklady. Největší efektivitu má systém Inductrack, oproti japonskému a německému maglevu nepotřebuje ke vznášení elektrickou energii.

Aby se vůz vznášel, musí se samozřejmě pohybovat a k tomu je potřeba překonat hned několik odporových sil. Je to síla aerodynamická, setrvačná při rozjezdu, síla odporová v důsledku sklonu tratě (do kopce), a nakonec jsou to ztráty samotné indukce v trati. Odporové síly jsou přímo úměrné odporovým silám vznikajícím při pohybu po kolejích u klasického vlaku. Oproti klasickému vlaku jsou tyto síly při typických rychlostech maglevu 250 - 500 km/h velmi nízké. Samozřejmě rostou stejně jako síla aerodynamického odporu úměrně s rychlostí. V leteckém průmyslu se konstruktéři uchylují ke kompromisu mezi silou čelní odporovou a silou vztlakovou, tedy zvažují vhodnost toho či jiného tvaru křídla. Většinou se u podzvukových rychlostech dosahuje poměru síly vztlaku ku odporu 25:1. Tento poměr, označovaný jako L/D (Lift/Drag) se příliš s rychlostí nemění. U Indutracku je to podobné, jen se tu porovnává síla vznášení se silou magnetického odporu, způsobenou neideálním tvarem hysterezní smyčky a odporem cívek.

Vědci z Lawrence spočítali, že poměr L/D u Indutracku úzce koresponduje s rychlostí pohybu Hallbachovy řady nad tratí. Když vlak stojí je poměr rovný nule, neboť nadnášecí síla pochopitelně nevzniká. Jak se začíná pohybovat, nadnášecí síla rychle roste a polovinu své maximální hodnoty dosahuje už při rychlosti 5 - 10 km/h. Jde o tranzitní rychlost. Při dvojnásobné tranzitní rychlosti už dosahuje 80% své maximální hodnoty a L/D je roven 5. To znamená, že systém Indutrack je vysoce efektivní už při velmi nízkých rychlostech. Pokud by byly vozy vybaveny koly pro počáteční rychlosti nacházející se pod tranzitní rychlostí, mohly by být nasazené do provozu. Efektivita však ještě roste. Když vůz zvyšuje svoji rychlost, poměr L/D může dosáhnout i hodnoty 200 při maximální rychlosti 500 km/h. Pokud dojde k náhlému výpadku energie, nic se neděje. Vlak má stále rychlost a taktéž i nadnášecí síla stále existuje. Vůz tedy jednoduše snižuje svoji rychlost až po poklesu pod tranzitní rychlost dosedne na koleje a zastaví. Vůz vážící 50 tun a pohybující se rychlostí 500 km/h, potřebuje asi 300 -600 kW výkonu.

5 Aplikace magnetické levitace

5.1 Magnetická ložiska

5.1.1 Charakteristické vlastnosti magnetických ložisek

Vývoj magneticky levitovaných ložisek započal v polovině 20. stol. Dnes se magnetická ložiska již běžně vyrábějí v širokém sortimentu. Pevná a rotující část ložiska jsou v prostoru udržovány magnetickým polem ve stálé poloze, aniž by se navzájem dotýkaly (u klasických kluzných ložisek vzniká mezi pánví a hřídelí olejový film – je možné hovořit o *hydrodynamické levitaci*). Podle toho, zda ke své funkci nepotřebují (popř. potřebují) dodávat elektrickou energii, se rozlišují *magnetická ložiska pasivní a aktivní*.

Magnetická ložiska mají ve srovnání s klasickými (tj. valivými nebo kluznými) výhodné vlastnosti:

- Minimální odpor.
- Při jejich provozu nevzniká hluk.
- Nedochozí ke ztrátám třením a k následnému oteplení.
- Mají dlouhou životnost, neboť se neopotřebovávají.
- Mohou pracovat při mimořádně vysokých rychlostech (přes 100 000 až do 200 000 min⁻¹).
- Mohou být použita při vysokých i nízkých teplotách (v rozmezí od –250 do 500°C) v chemicky agresivním prostředí, v páře i ve vakuu či v tlakovém prostředí a také tam, kde je nepřípustná kontaminace mazacími oleji.
- Uvedená ložiska poskytují dobrou tepelnou izolaci a umožňují hermeticky oddělit rotor od statoru.

Magnetická ložiska mají ve srovnání s klasickými i jisté nevýhody: menší měrnou nosnost a dynamickou tuhost. Aktivní magnetická ložiska jsou složitější, mají vyšší spotřebu energie a potřebují elektronické řízení, což snižuje jejich spolehlivost. Zabírají více prostoru a jejich cena je podstatně vyšší.

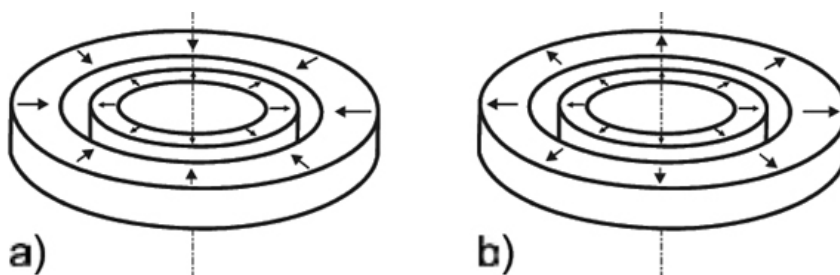
Magnetická ložiska mají široké uplatnění: od mikropřístrojů až po zařízení vyžadující velkou nosnost (u aktivních ložisek až několik tun). Používají se pro speciální účely, např.

pro turbokompresory, pro vakuová čerpadla, pro gyroskopy, pro rotační akumulátory mechanické energie a rovněž v kosmickém inženýrství. [1]

5.1.2 Pasivní magnetická ložiska

a) Magnetické ložisko s permanentními magnety

Existují dva typy axiálních magnetických ložisek s permanentními magnety, které jsou založeny na odpuzování stejnojmenných a přitahování opačných pólů magnetů. Na obr. 19a, b, je radiální a axiální ložisko se dvěma prstencovými permanentními magnety, obě ložiska se od sebe liší způsobem zmagnetování vnějšího prstence. Nedostatkem ložisek s permanentními magnety je jejich nestabilita. Radikální ložisko není axiálně stabilní a axiální ložisko není radiálně stabilní. Nestabilitu lze odstranit přidáním opěrných mechanických ložisek nebo vhodnou konstrukcí celého zařízení. Magnetická ložiska s permanentními magnety jsou poměrně levná, jednoduchá, a tedy spolehlivá.



Obr. 19 Prstencové magnetické ložisko

a) radiální, b) axiální

[1]

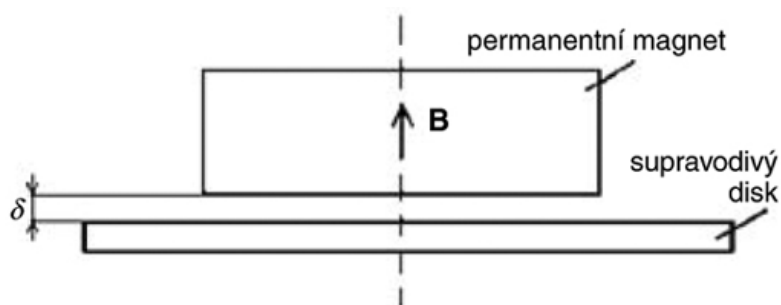
b) Magnetické ložisko s permanentním magnetem a supravodičem

Toto ložisko je založeno na Meissnerově jevu. Supravodič se chová jako ideální diamagnetikum ($\mu_r = 0$) a mezi ním a permanentním magnetem vzniká odpuzivá síla. Pro tento typ magnetického ložiska lze dosáhnout stabilní levitace – na rozdíl od magnetických ložisek, která mají pouze permanentní magnety a vyžadují vodící (mechanická) ložiska. Základní uspořádání axiálního magnetického ložiska tvoří permanentní magnet ve tvaru válečku, který je souose umístěn nad kotoučkem ze supravodiče (obr. 20).

Ukazuje se, že nosnost a tuhost axiálního ložiska se výrazně zvýší, není-li permanentní magnet masivní, ale je složen z n částí: z válečku a $n - 1$ prstenců, které jsou na válečku navlečeny. Váleček a prstence jsou zmagnetovány tak, aby vzniklo n pólů, které se střídají, tj.

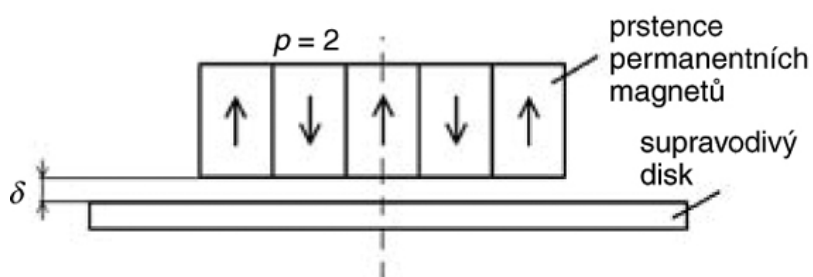
aby jejich vektor \mathbf{B} byl pootočen o 180 stupňů. Na obr. 21 je permanentní magnet, jenž je složen ze tří částí: z válečku a ze dvou prstenců. Nosnost ložiska se zvýší ještě výrazněji, je-li permanentní magnet složen z n částí, jejichž směr magnetizace je pootočen o 90 stupňů (obr. 22)

[1]



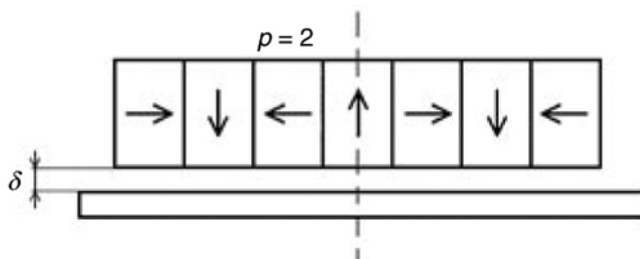
Obr. 20 Axiální magnetické ložisko

[1]



Obr. 21 Axiální magnetické ložisko. Jehož permanentní magnet je složen ze tří částí, jejichž magnetizace je pootočena o 180°

[1]



Obr. 22 Axiální magnetické ložisko. Jehož permanentní magnet je složen ze tří částí, jejichž magnetizace je pootočena o 90°

[1]

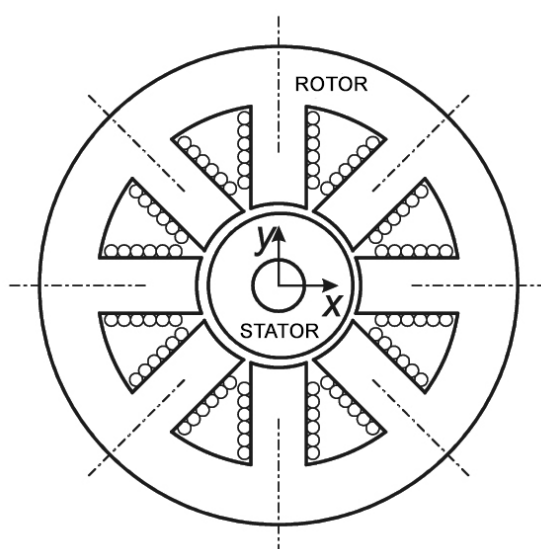
5.1.3 Aktivní magnetická ložiska

Základem různých konstrukcí je zpravidla soustava elektromagnetů pracujících na principu EMS. Aby byl tento levitační systém stabilní, je nutné zpětnovazebně regulovat budicí proud elektromagnetů. Některá aktivní ložiska obsahují též supravodivé části nebo permanentní magnety.

Radiální magnetické ložisko podle obr. 23, které se též nazývá *heteropolární*, má tyto části:

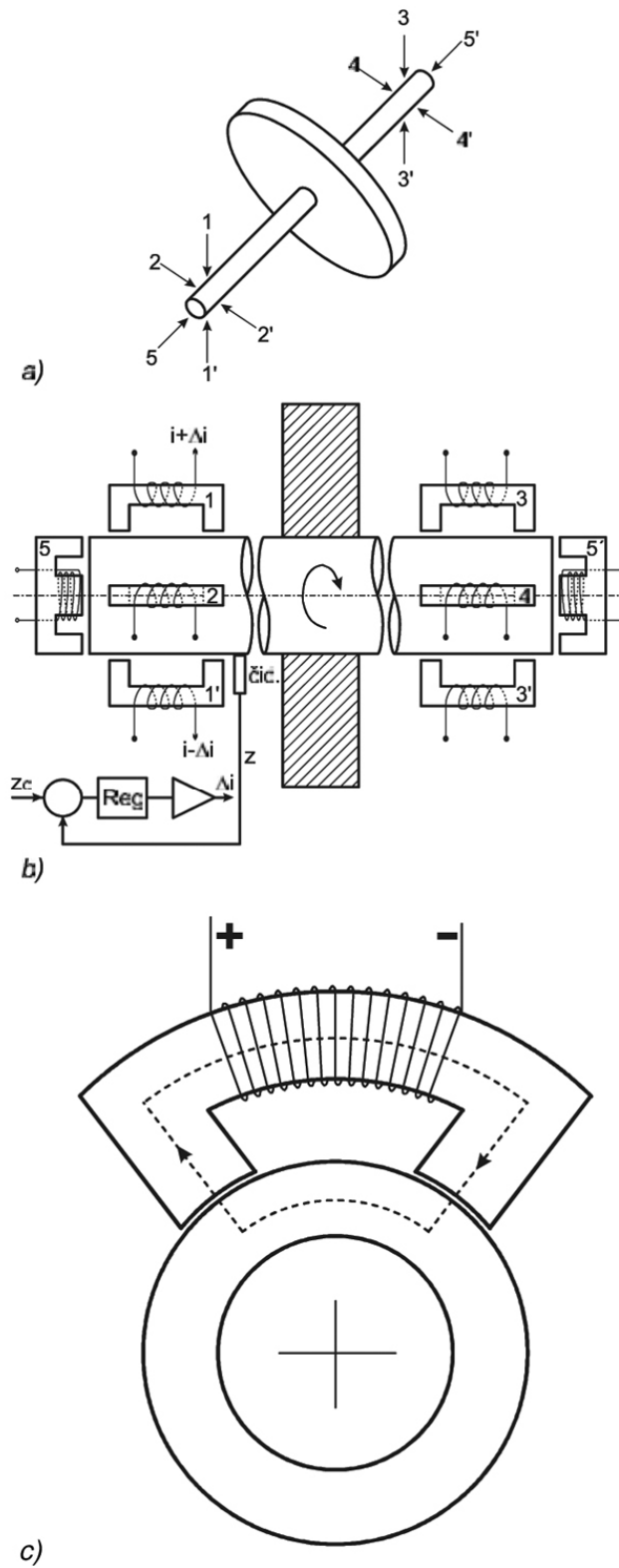
- **stator** se soustavou (zpravidla osmi až dvanácti) elektromagnetů, jejichž polarita se po obvodu střídá,
- **rotor** z feromagnetika (k omezení ztrát vířivými proudy je složen u plechů), jež přitahují elektromagnety statoru,
- **čidlo** (senzor) polohy rotoru, jehož signál zpracovává,
- **regulátor**, který prostřednictvím zesilovače zpětnovazebně řídí budicí proud elektromagnetů statoru a tím i jejich přitažlivou sílu.

Hřídel má pět stupňů volnosti (obr. 24a) a ve stabilní poloze je udržována zpětnovazební regulací budicích proudů (obr. 24b). Pro každý stupeň volnosti je čidlem sledována poloha hřídele. Každá dvojice elektromagnetů 1-1', 2-2', 3-3', 4-4', 5-5' má svou vlastní zpětnovazební smyčku (na obr. 24 je vyznačena jen pro elektromagnety 1-1') a čidlo polohy. Signálem, který řídí budicí proudy, je rozdíl mezi změřenou polohou hřídele a jeho požadovanou polohou. [1]



Obr. 23 Magnetický obvod radiálního magnetického ložiska

[1]



Obr. 24 Hřídel, a) pět stupňů volnosti hřídele magnetického ložiska, b) stabilizace polohy rotoru radiálního ložiska, c) tvar jednoho z elektromagnetů

[1]

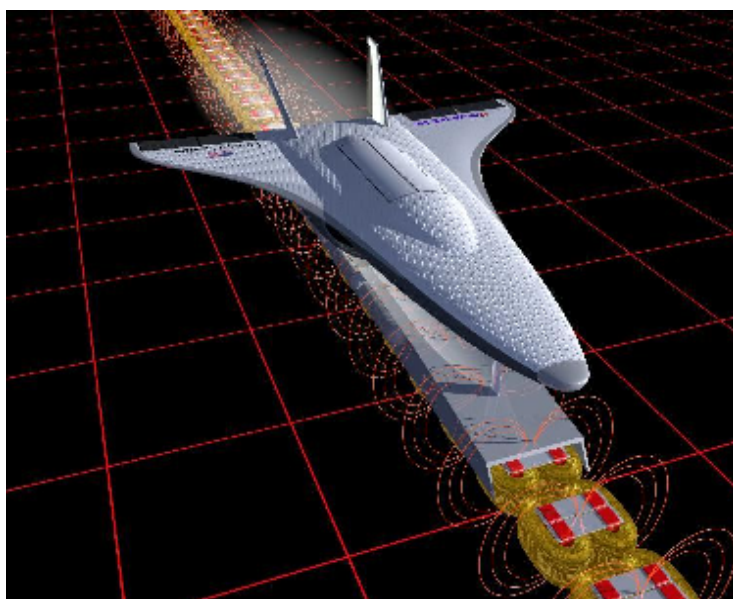
5.2 Katapult pro urychlení kosmických těles

Podle názoru pracovníků Marshallova střediska kosmických letů NASA, kteří se zabývají programem pokročilé kosmické dopravy, by technologie využívající magnetické levitace mohly v příštím století podstatně snížit náklady na kosmické lety.

Nejnákladnější částí každé kosmické mise je prvních několik vteřin, kdy je třeba kosmické těleso uvést do pohybu. Kosmické těleso (Obr. 25), levitující v magnetickém poli by bylo možné urychlit elektromagnetickým katapultem až na 965 km/h a potom by došlo k zážehu raketového motoru. Tím by bylo možné ušetřit na pohonném systému prvního stupně, neboť urychlovací systém MagLev na bázi magnetické levitace zůstává na Zemi a lze jej principiálně využívat řadu let. V Marshallově středisku se experimentuje v nové laboratoři s urychlovací dráhou asi 12 m dlouhou.

Ověřují se dvě koncepce, první využívá systému permanentních magnetů s novým lineárním motorem bez supravodivých magnetů podél urychlovací dráhy. Druhá koncepce předpokládá umístění supravodivých magnetů a lineárního motoru na podvozku, nesoucím kosmickou loď.

Model dopravního prostředku o hmotnosti 5 kg je na dráze 7 m během 0,25 sekund urychlován na asi 90 km/h. Poté je model na zbývajících 7 m experimentální dráhy zbrzděn. [17]



Obr. 25 Kosmické těleso levitující v magnetickém poli

[17]

5.3 Magnetická levitace v dopravě

5.3.1 Historie magnetické levitace v dopravě

1962 - vynalezen lineární motor.

1970 - počátek studie magnetické levitace za použití supravodivých magnetů.

1972 - experimentální spuštění stroje s lineárním indukčním motorem. V Japonsku, vozidlo označeno jako ML100, dosažena rychlost 60 km/h.

1975 - vozidlo ML100 bylo zdokonaleno (ML100A), došlo k perfektnímu bezkontaktnímu provozu.

1977 - otevření centra Miyazaki pro výzkum vysokorychlostního maglevu. Ve městě Hyuga (Japonsko), trať dlouhá 7 km. Elektrická stanice s měniči na bázi tyristorů GTO. Nový typ vozidla; označené jako ML500, maximální rychlost 517 km/h.

1980 - nové vozidlo MLU001

1982 - testování naloženého dvou-vozového vlaku.

1986 - tří-vozový vlak, rychlost 352,4 km/h.

1987 - prázdný dvou-vozový vlak dosáhl maximální rychlosti 405,3 km/h, naložený dosáhl rychlosti 400,3 km/h. Nové vozidlo s označením MLU002

1989 - testování systému aerodynamických brzd.

1990 - započata stavba testovacího centra „Yamanashi Maglev Test Line“.

1991 - vozidlo MLU002 během testování vzplálo.

1993 - modernizace na MLU002N - zdokonalení aerodynamických brzd.

1996 - otevření testovacího centra „Yamanashi Maglev Test Line“

Nový vůz MLX01, k testování na „Yamanashi Maglev Test Line“.

1997 - rychlost nenaložené soupravy MLX01 – 550 km/h, naložené 531 km/h.

2003 - MLX01 (3 vozy) s 12ti pasažéry na palubě dosáhl rychlosti 581 km/h.

5.3.2 Charakteristické vlastnosti magnetických dopravních systémů

Transport osob, výrobků a surovin hraje v moderní společnosti jednu z nejdůležitějších rolí. Stále rostoucí požadavky na rychlost přepravy při vysoké provozní spolehlivosti a energetické výhodnosti již nelze splnit zdokonalováním klasické železniční dopravy. Vznikají projekty nové generace vysokorychlostních železnic, založené na magnetické

levitaci – **magnetické superexpresy**, v angloamerické literatuře jsou označovány zkratkou HSGT (High Speed Ground Transportation). Projektovány jsou i magnetické vlaky pro městskou a regionální dopravu, jež jsou označovány HSST (High Speed Surface Train).

S úvahami o využití levitace se lze setkat již na přelomu 19. a 20. století. První projekty byly navrhovány tak, že vozidlo bylo uloženo na „polštáři“ vytvořeném stlačeným vzduchem. Stlačený vzduch též zajišťoval pohon vozidla. Pokroky ve vývoji polovodičových technologií, automatické regulace, kryotechniky (techniky hlubokých teplot) a vysokoteplotních supravodivých materiálů jednoznačně zvýhodnily magnetickou levitaci oproti levitaci pneumatické, vozidlo je magnetickým polem nejen *levitováno*, ale pomocí lineárního motoru též poháněno. Výzkumy v této oblasti byly zahájeny po roce 1960.

Magnetický superexpres může být dobře integrován do stávající automobilové, železniční i letecké přepravy. Zhodnocení různých druhů moderních dopravních prostředků z hlediska doby přepravy je vyznačeno na obr. 8. doprava automobilem je výhodná jen na vzdálenosti kolem 120 km, např. ke stanici magnetického superexpresu. Zde se počítá i se stanicemi prostředků hromadné dopravy, např. regionálních rychlíků, metra nebo tramvaje. Magnetický superexpres úspěšně konkuruje letecké dopravě až do vzdálenosti 1 000 až 1 200 km. Na velmi vytížených linkách (např. spojení centra města s letištěm) se počítá s využitím magnetických vlaků i pro městskou dopravu.

Při návrhu magnetického systému se zatím uplatňují dva způsoby: systém s elektromagnetickou levitací (EMS) či systém s elektrodynamickou levitací (EDS). EMS se využívá k levitaci vozidla ve výšce do zhruba 10 mm a EDS k levitaci ve výšce do přibližně 100 až 150 mm. Kromě toho je takto ještě zajištěna stabilita vozidla při působení bočních sil. Pohon vozidla je založen na principu lineárního synchronního motoru (LMS) nebo lineárního indukčního motoru (LIM).

5.3.3 Magnetické dopravní systémy na principu EMS - Inductrack

Až doposud převládalo přesvědčení, že permanentní magnety nejsou vhodné k levitaci dopravních systémů pro svou velkou hmotnost ve srovnání s levitační silou. U dopravního systému Inductrack, využívajícího Halbachovu soustavu magnetů, tomu tak

není. Ukazuje se, že poměr hmotnosti magnetů Halbachovy soustavy k jejich levitační síle je asi 1 : 50.

Fyzikální podstata Inductracku je velmi jednoduchá, je znázorněna na (obr. 26). Kromě Halbachovy soustavy permanentních magnetů se používá soustava obdélníkových, tzv. levitačních cívek spojených nakrátko. Navzájem jsou izolovány a jsou uloženy těsně vedle sebe. Levitační cívky jsou svou jednou stranou umístěny v oblasti těsně pod dolní částí Halbachovy soustavy a jsou zabudovány do jízdni dráhy. Naproti tomu Halbachova soustava magnetů je spojena s vozidlem.

Jestliže se vozidlo pohybuje, indukují se v levitačních cívkách proudy, jejichž magnetické pole je v interakci s magnetickým polem permanentních magnetů a odpuzuje je. Na vozidlo působí dvě síly: jednak levitační síla, která vozidlo zvedá několik centimetrů nad jízdni dráhu, a dále brzdicí síla, která brání vozidlu v pohybu. Uvádí se, že levitační síla je mnohem větší než síla brzdicí. Při rychlosti 500 km/h je poměr levitace k brzdění asi 200:1.

Z uvedeného tedy plyne, že se v levitačních cívkách indukují proudy jen tehdy, když se vozidlo (spolu s Halbachovou soustavou magnetů) pohybuje. Aby levitující síla dosáhla velikosti potřebné k dosažení levitace vozidla, musí rychlost vozidla překročit jistou kritickou hodnotu. Ukazuje se, že tato kritická rychlost je poměrně malá, řádově jsou to metry za sekundu. Vozidlo tedy musí být opatřeno pomocnými koly pro rozjezd a doběh, podobně jako je tomu u japonského typu soudobých vozidel maglev. Levitační síla s rychlostí vozidla roste, až dosáhne jisté mezní hodnoty. Ta je poměrně značná, asi 40 tun/m² aktivního povrchu Halbachovy soustavy magnetů, jejichž hmotnost je jen asi 800 kg/m², tedy padesátina levitované hmotnosti.

System Inductrack má oproti dosavadním levitačním dopravním systémům významné výhody. Ve srovnání s německým Transrapidem odpadá náročné elektronické zařízení, které reguluje budicí proud magnetů a tím zajišťuje stabilní polohu levitovaného vozidla.

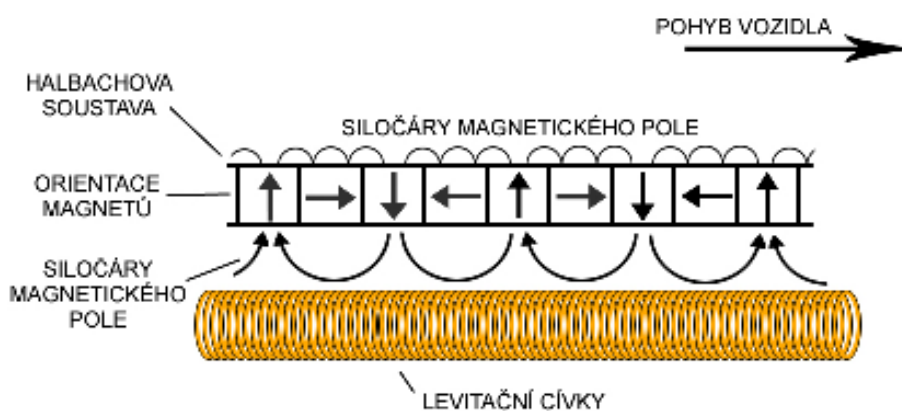
Ve srovnání s japonským MLU není potřebné kryotechnické zařízení pro supravodivé magnety. Stejně jako tato japonská vozidla vyžaduje systém Inductrack pomocná kola pro rozběh, avšak kritická rychlost, při níž nastává levitace, je u systému Inductrack podstatně nižší.

Stejně jako u stávajících dopravních systémů maglev je třeba vozidlo systému Inductrack vybavit pohonem. Lze opět použít „lineární synchronní motor s dlouhým statorem“, přičemž běžící magnetické pole v jízdni dráze zabírá s Halbachovými magnety. Uvažuje se i o neelektrickém (např. pneumatickém) pohonu, což by znamenalo další významné zjednodušení, neboť by odpadla veškerá soustava napájení elektrickou energií.

Na (Obr. 27) je znázorněno použití systému Inductrack u magneticky levitovaného vozidla. Na každé straně vozidla se používají dvě Halbachovy soustavy magnetů. Dvojice větších soustav Halbachových magnetů jsou umístěny nad delšími stranami obdélníkových cívek, dvojice menších soustav Halbachových magnetů jsou natočeny o 90° a umístěny nad kratšími stranami levitačních cívek. Větší Halbachovy soustavy zajišťují levitaci vozidla, menší zajišťují boční stabilitu jedoucího vozu.

Při porovnání levitovaného vozidla s Halbachovými soustavami magnetů s klasickou železnicí větší Halbachovy soustavy odpovídají kolům a menší Halbachovy soustavy mají funkci okolku kola běžícího po kolejnici. Na (Obr. 27) nejsou zakreslena pomocná kola vozidla pro rozběh a doběh a ani pohon vozidla není uveden. V uvažovaném uspořádání je využito výhodné rozložení magnetického pole Halbachovy soustavy magnetů, kdy silné magnetické pole na dolní části soustavy se využívá k levitaci vozidla, kdežto při horní části soustavy je magnetické pole slabé, a tedy nezasahuje do prostoru vozidla s cestujícími.

Energie potřebná k provozu systému a náklady na údržbu jsou nižší než u dosavadní železnice. [2, 9]



Obr. 26 Inductrack – principiální uspořádání [2, 9]



Obr. 27 Inductrack – projekt magneticky levitovaného vozidla

[2, 9]

5.3.4 Historie Inductracku

V roce 1985 navrhl fyzik Klaus Halbach (Lawrence Berkeley National Laboratory, California) uspořádání permanentních magnetů, jímž docílil mimořádně silného magnetického pole.

Toto uspořádání - později bylo pro něj zavedeno označení Halbachova soustava magnetů (anglicky Halbach Array) - chtěl použít pro konstrukci urychlovače částic.

V polovině 90. let minulého století použil Halbachovu soustavu permanentních magnetů profesor kalifornské univerzity Richard F. Post (Lawrence Livermore National Laboratory) při návrhu vysokootáčkového generátoru. Přibližně v téže době byla sestrojena první pasivní magnetická ložiska s Halbachovou soustavou permanentních magnetů.

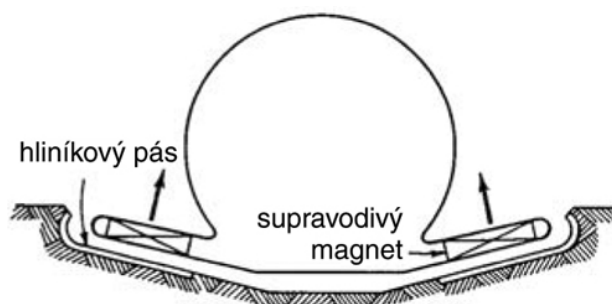
Asi před třemi roky navrhl R. F. Post magneticky levitovaný dopravní systém s Halbachovou soustavou magnetů. Tento systém byl patentován v USA pod označením Inductrack. V porovnání s dosavadními dopravními systémy maglev je uvedený systém velmi jednoduchý a vykazuje až překvapivě výhodné levitační vlastnosti.

V současné době se konají zkoušky na malých modelech magneticky levitovaných vozidel. Tento vývoj podporuje též NASA, přičemž cílem je využít Inductrack jako katapult pro start kosmických raket a raketoplánů.

5.3.5 Magnetické dopravní systémy na principu EDS

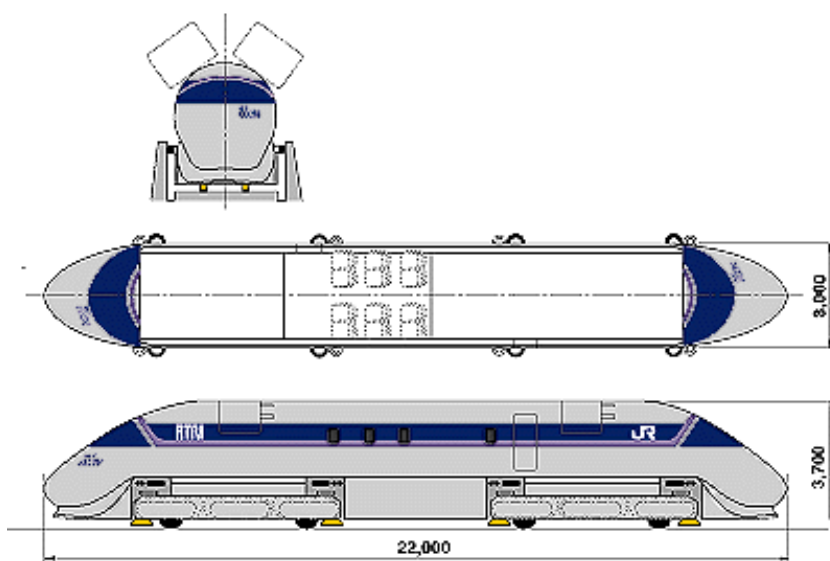
Dopravní systém fungující na principu EDS je na obr. 28. Je zde vyznačen jen levitační systém, pohonný systém není zakreslen.

Projektováním magnetických superexpresů na principu EDS se zabývaly různé firmy v USA, Německu, Kanadě a zejména v Japonsku, kde bylo dosaženo pozoruhodných výsledků. Vývoj zde probíhá ve dvou směrech: japonské železnice JNR (Japanese National Railways) spolu s firmami Mitsubishi, Toshiba a Hitachi vyvíjejí vozidla MLU (Magnetic Levitation Unit) na principu EDS (obr. 29), naproti tomu japonské aerolinie JAL (Japanese Air Lines) vyvíjejí systém HSST (High Speed Surface Train) na principu EMS, podobném německému Transrapidu.



Obr. 28 Způsob využití EDS – řez vozidlem a jízdni dráhou; starší provedení

[1]



Obr. 29 Japonský superexpress MLU 002N, rychlost 550km/h

[13]

5.3.6 Technické řešení

Systém EDS má elektromagnety buzené supravodivými cívkami, které jsou zhotoveny ze slitiny niob-titan a jsou chlazeny kapalným heliem na teplotu $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spolu s kryostatem jsou umístěny ve vozidle. V tělesu jízdní dráhy je uložen masivní hliníkový pás (obr. 7a). Kromě něj se též používá pás s obdélníkovými otvory anebo cívky spojené nakrátko.

Pohonem vozidla je lineární synchronní motor. Pro zmenšení ztrát v trojfázovém vinutí se postupně napájejí jednotlivé úseky jízdní dráhy, jež jsou jen o málo delší než délka soupravy. Signál k zapnutí úseku dává rádiový polohový detekční systém. Ovládají se jím měniče tranzistorů IGB, které napájejí příslušné sekce statorového vinutí.

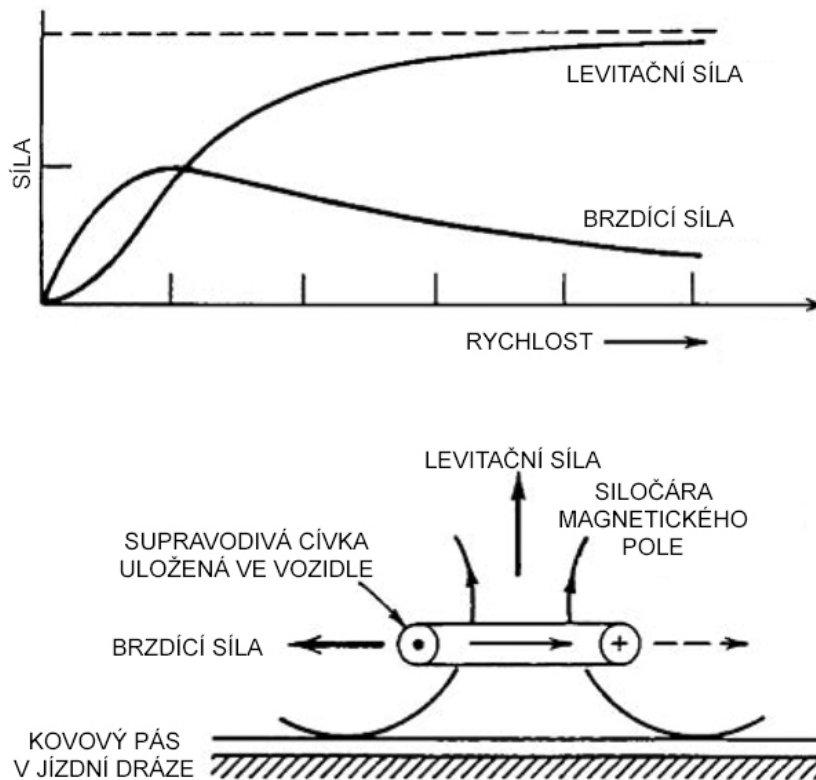
Jestliže se vozidlo nepohybuje, nemůže nastat jeho levitace. Vozidlo je tedy nutné uvést do pohybu klasickým způsobem, tj. kola, která jsou zabudována v jeho podvozku, se pohybují na kolejnicích, popř. lze použít kola opatřená pneumatikami. Postupně se zvyšuje frekvence napáječe statorového vinutí a tak se vozidlo rozjíždí. Dosáhne-li rychlost asi 80 km/h , v pásu, popř. v cívkách zabudovaných do jízdní dráhy se indukují dostatečně velké proudy, které svým magnetickým polem *levitují* vozidlo. Zdvih vozidla činí $100\text{ až }150\text{ mm}$. Kromě toho tyto proudy svým magnetickým polem *brzdí* pohyb vozidla a tato brzdící síla musí být překonána *pohonem* superexpresu. Používá se (stejně jako u rychlovlaků EMS) lineární synchronní motor s dlouhým státorem. Závislost levitační a brzdící síly na rychlosti pohybu vozidla je ukázána na obr. 30.

Superexpresy (MLU 002, MLU 002N, MLX 01) nové koncepce mají levitační cívky umístěny v bočních stěnách kolejiště (obr. 31). Základní jednotku tvoří dvakrát dvě dvojice cívek, zabudované v obou bočních stěnách, tedy celkem osm cívek. Je-li podvozek v klidu, spočívá na kolech a v levitujících cívkách se neindukují proudy. Supravodivé cívky na podvozku jsou vůči levitačním cívkám umístěny asymetricky: o něco níže pod středem horní a dolní levitační cívky. Při rozjezdu se do dolních cívek indukují proudy větší než do horních cívek. Cívky jsou spolu propojeny tak, že proud protékající „horní“ cívkou protéká „dolní“ cívkou v opačném smyslu. Podvozek je tedy „horní“ cívkou přitahován a „dolní“ odpuzován. Při vyšší rychlosti dosáhnou proudy (a tedy i magnetická pole) dostatečně vysokých hodnot a dojde k levitaci podvozku.

Levitační cívky v bočních stěnách zároveň zajišťují boční stabilitu. Na protilehlých stěnách kolejiště jsou cívky spolu (pod jízdni dráhou) propojeny tak, že při odchylce vozidla se zvětší proudy s menší boční vzduchovou mezerou a naopak. Tím vzroste odpudivá síla v cívce s větší vzduchovou mezerou (klesne v cívce s menší vzduchovou mezerou) a vozidlo je vytlačeno do střední polohy. [1]

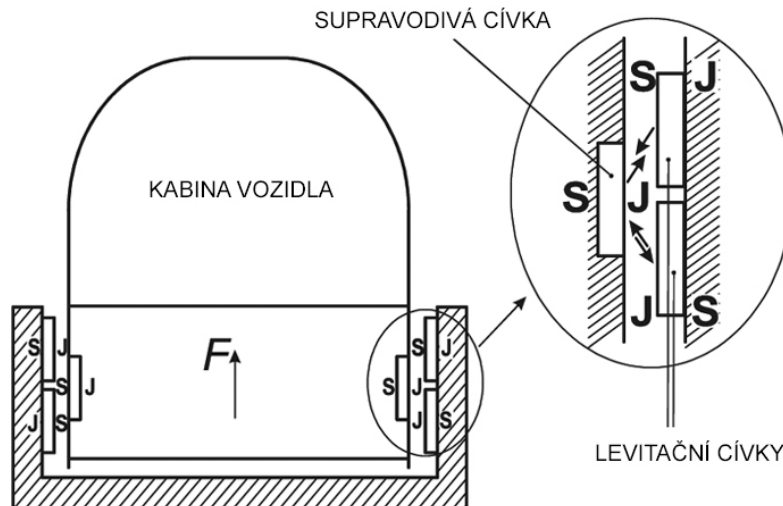
Brzdňý systém tvoří tři nezávislé brzdy:

- elektrodynamická rekuperační,
- třecí,
- aerodynamická (padák).



Obr. 30 Levitační a brzdící síla v závislosti na rychlosti pohybu supravodivého magnetu

[1]



Obr. 31 Na protilehlých stranách jízdní dráhy jsou levitující a zároveň bočně stabilizující cívky, na podvozku je supravodivá cívka.

[1]

5.3.7 Historie, vývoj, výroba EDS

1963 - J. R. Powell a G. D. Danby (z USA) projektují superexpres na základě EDS.

1964 - počátek výzkumu v Japonsku.

1976 - firma Siemens sestrojila pokusné vozidlo EET-01, hmotnost 16 t, rychlost 200 km/h.

1972 - 1977 - vývoj v USA, Německu, Kanadě a Japonsku.

1977 - vybudována zkušební trať délky 7 km u města Miyazaki (ostrov Kjúšú, Japonsko).

1977 - firma Hitachi sestrojila pokusné vozidlo ML 500, rychlost 517 km/h.

1981 - 1987 - souprava MLU 001 (rychlost 400 km/h); nedostatek: silné magnetické pole v prostoru pro cestující.

1987 - 1991 - souprava MLU 002, rychlost 394 km/h (zničena požárem od brzdového systému).

1994 - souprava MLU 002N, rychlost 431 km/h (stejná koncepce jako MLU 002).

1995 - 1999 - souprava MLX 01, pět sekcí (rychlost 552 km/h).

1997 - v Japonsku vybudována zkušební trať délky 42,8 km (v prefektuře Yamanashi).

2000 - 2005 - testování JR-Maglev, zkoušky s přepravou osob na testovací dráze v Yamanasahi.

[1]

5.4 Současný stav dopravních systémů Maglev

Po více než třicetiletém vývoji magneticky levitovaných vlaků je tento problém technicky vyřešen a přistupuje se k jeho realizaci. Předmětem analýz jsou otázky ekonomického začlenění těchto dopravních systémů do stávajících lokálních, regionálních a mezinárodních dopravních systémů. Některé trasy jsou předávány do zkušebního provozu (např. německý Transrapid, japonský MLU). Jsou zkoumány i další otázky, např. působení klimatických vlivů (odstraňování sněhu, námrazy, vliv bočního větru na stabilitu apod.), odolnost tratě vůči zemětřesení, magnetické stínění prostoru pro cestující apod. Některé projektované tratě a podíl jednotlivých států je patrný z tab. 4.

Na přípravných pracích pro městskou dopravu s využitím maglevu se též podílí Korea (na principu EMS) a Brazílie (na principu EDS). [1]

Projekt / trasa	Délka (km)	Systém / princip	Současný stav
<i>Německo</i>			
Berlín - Hamburk	300	Transrapid / EMS	ukončení r.2003, provoz r. 2005
Mnichov centrum - letiště	37	Transrapid / EMS	
Rhein - Ruhr	79	Transrapid / EMS	
<i>Japonsko</i>			
Nagoya East - Hill side	9	ML / EDS	
Tokio - Osaka	350	ML / EDS	v provozu od r. 2005
<i>USA</i>			
Baltimore - Washington		EDS s perm. magn.	projektuje se
Pittsburgh - Greensburgh		EDS s perm. magn.	projektuje se
<i>Čína (výroba Německo)</i>			
Šanghaj centrum - letiště	30	Transrapid / EMS	dokončení r. 2003
<i>Švýcarsko</i>			
Basilej - Curych		Swissmetro, Eurometro / EMS	projektuje se, provoz v r. 2020

Tab. 4 Projektované tratě magneticky levitovaných vlaků v jednotlivých zemích

[1]

Závěr

V práci jsem se především snažil rešeršně zpracovat informace o nejnovějších technologiích a systémech pracujících na principu magnetické levitace. Zaměřil jsem se také na možný budoucí vývoj novodobých dopravních prostředků včetně magneticky levitovaných vlaků. Informace o tomto rozsáhlém tématu jsem čerpal ze všech dostupných publikací, jak tištěných, tak v elektronické podobě pomocí internetu.

Z práce vyplývá, že princip magnetické levitace může v budoucnu najít široké uplatnění nejen v dopravních systémech, ale i v medicíně a strojních součástech. Zde v závěru práce se pokusím nastínit a zaměřit se na jednu z možných alternativ, jak by budoucnost levitujících vlaků mohla vypadat.

V nejbližší budoucnosti budou levitující vlaky stále spíše výjimečným dopravním prostředkem vyspělých zemí. Vývoj systému Maglev se bude ubírat cestou Inductracku, který je pozoruhodný svou jednoduchostí a tím i vysokou spolehlivostí. Analýza levitačních systémů Inductrack ukazuje, že největší síly vznikají při co nejvýraznějším indukčním charakteru levitačních cívek. Toho lze dosáhnout feromagnetickým jádrem. Kromě levitačních cívek lze využít ekonomicky levnější alternativu, u níž jsou levitační cívky nahrazeny hliníkovými plechy obdélníkového tvaru.

Tímto systémem se však zabývá i NASA pro starty raketoplánů a kosmických raket. Jestliže by tento levitační systém s Halbachovými magnety byl využit při startu rakety a raketa by byla uvedena na rychlost odpovídající Machovu číslu $M = 0,8$ (tj. 950 km/h), pak by úspory na palivu mohly dosahovat 30 až 40%.

O tom, zda zmíněné systémy ovlivní další vývoj dopravních zařízení s magnetickou levitací, bude možné rozhodnout až po provedení zevrubného teoretického a zejména experimentálního výzkumu.

Literatura:

Tištěné publikace:

1. MAYER, D. Časopis Elektro, 2003/01, *Magnetická levitace a její využití*, str. 4 - 12
2. MAYER, D. Časopis Elektro, 2003/12, *Nové možnosti magnetické levitace v dopravě?*
3. URBAN, M. Časopis Siemens Spektrum, 2003/03, *Jak se vznáší Transrapid*, str. 20
4. TÝFA, L. učební texty ČVUT - vysokorychlostní železniční trať, 2005, první vydání
5. NOVONTÝ, M.: Časopis 21. století, 2004/3, *MAGLEV*
6. Stránky internetového vyhledávače Google [online]. Dostupné z: <http://www.google.cz>
7. Stránky internetového vyhledávače Seznam [online]. Dostupné z: <http://www.seznam.cz>
8. SaS. *Supravodiče a supravodivost* [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.supravodice.zcu.cz>
9. MAYER, D.: ELEKTRO. č. 12/2003 [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/2003/el120304.htm>
10. Fyzikální ústav AV ČR, v. v. i. [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.fzu.cz>
11. Inductrack Passive Magnetic Levitation [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.skytran.net>
12. Projekt Pennsylvania – Pittsburgh [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.maglevpa.com>
13. Railway Technical Research Institute, Tokyo Japan [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.rtri.or.jp>
14. Transrapid International [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.transrapid.de>
15. ThyssenKrupp Transrapid [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.thyssenkrupp-transrapid.de>
16. Elektronický katalog součástek [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://www.datasheetcatalog.com>
17. Fyzikální kosmické pohony. *Nová koncepce letů do blízkého kosmu* [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/fyzpoh.htm>
18. BŘEŇ, D. Aldebaran Bulletin, *Levitující femtokapičky* [online]. 18.4.2008. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_39_lev.html
19. Studentský server KDAIZ, FJFI ČVUT v Praze [online]. 18.4.2008. Dostupné z: <http://linux.fjfi.cvut.cz/~sunie/akce/tcn/2003/sbornik/pdf/supravodivost/supravodivost.pdf>

20. BUREŠ, J. CONVERTER [online]. 18.4.2008. Dostupné z:

<http://www.converter.cz/tabulky/supravodice.htm>

Seznam zkratk:

EDS - Electro-Dynamic Suspension

EMS – Electro-Magnetic Suspension

HSGT - High Speed Ground Transportation

HSST - High Speed Surface Train

ICE – Inter City Express

JAL - japanese Air Lines

JNR - Japanese National Railways

L/D - Lift/Drag

LIM - lineární indukční motor

LMS - lineární synchronní motor

MLU - Magnetic Levitation Unit

NASA - National Aeronautics and Space Administration

SQUID - Superconducting Quantum Interference Device

TGV - Train à Grande Vitesse

Seznam obrázků:

Obr. 1 Dva způsoby levitace pomocí permanentních magnetů

Obr. 2 Působení nehomogenního magnetického pole na váleček

Obr. 3 Levitace permanentního magnetu nad supravodičem (Meissnerův jev)

Obr. 4 Levitace transformační

Obr. 5 EMS

Obr. 6 EMS: stabilizace polohy tělesa obvodem RLC

Obr. 7 EDS

Obr. 8 Halbachovo uspořádání permanentních magnetů ve tvaru kvádrů

Obr. 9 Demagnetizační část hysterezní křivky materiálu RECOMA 25

Obr. 10 Porovnání konvenčního elektromagnetu

Obr. 11 SQUID - Superconducting Quantum Interference Device

Obr. 12 Supravodivé pásy pro přenos velkých proudů

Obr. 13 Nesupravodivý materiál vložený do magnetického pole. Pole jím volně proniká.

Obr. 14 Supravodivý materiál vložený do magnetického pole se snaží zachovat ve svém objemu původní stav (bez pole) a proto vnější pole ze svého objemu vypuzuje.

Obr. 15 Permanentní magnet a magnetické pole v jeho okolí.

Obr. 16 Supravodič nad kritickou teplotou vložený do pole permanentního magnetu.

Obr. 17 Průřez vagónem MagLevu a kolejištěm ve tvaru písmene U.

Obr. 18 MagLev při jízdě na testovací trati Yamanashi při rychlosti asi 200 km/hod.

Obr. 19 Prstencové magnetické ložisko

Obr. 20 Axiální magnetické ložisko

Obr. 21 Axiální magnetické ložisko. Jehož permanentní magnet je složen ze tří částí, jejichž magnetizace je pootočena o 180°

Obr. 22 Axiální magnetické ložisko. Jehož permanentní magnet je složen ze tří částí, jejichž magnetizace je pootočena o 90°

Obr. 23 Magnetický obvod radiálního magnetického ložiska

Obr. 24 Hřídél

Obr. 25 Kosmické těleso levitující v magnetickém poli

Obr. 26 Inductrack – principiální uspořádání

Obr. 27 Inductrack – projekt magneticky levitovaného vozidla

Obr. 28 Způsob využití EDS – řez vozidlem a jízdni dráhou; starší provedení

Obr. 29 Japonský superexpress MLU 002, rychlost 550km/h

Obr. 30 Levitační a brzdící síla v závislosti na rychlosti pohybu supravodivého magnetu

Obr. 31 Na protilehlých stranách jízdni dráhy jsou levitující a zároveň bočně stabilizující cívky, na podvozku je supravodivá cívka.

Seznam tabulek:

Tab. 1 Vybrané supravodiče I. typu

Tab. 2 Vybrané supravodiče II. typu

Tab. 3 Vybrané vysokoteplotní supravodiče

Tab. 4 Projektované tratě magneticky levitovaných vlaků v jednotlivých zemích

Seznam použitých symbolů:

A - ampér

A/m - ampérmetr

B - magnetická indukce

B_r - remanentní indukce

C - kapacita

F - síla

H - intenzita magnetického pole

H_r - koercitivní intenzita magnetického pole

K - kelvin

L - indukčnost

M - Machovo číslo

R - elektrický odpor

T - tesla

μ - absolutní permeabilita

μ_r - relativní permeabilita

