

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ
ELEKTRONIKY**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Magnetická levitace a její využití

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Pavel ČAVAJDA**
Osobní číslo: **E15B0262P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Magnetická levitace a její využití**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Zmapujte oblasti využití magnetické levitace v průmyslu a dopravě.
2. Popište podrobně Vámi vybrané aplikace a diskutujte jejich potenciál v budoucnu.
3. Zhodnoťte přínosy a negativa těchto technologií v porovnání se standardními řešeními.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: 10. října 2017

Termín odevzdání bakalářské práce: 7. června 2018

Doc. Ing. Jirí Hammerbauer, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je objasnit existující magnetické levitace obecně a v praxi. Ze začátku práce jsou vysvětleny principy a vlastnosti jednotlivých magnetických levitací. Z velké části se práce zaměřuje na funkci magnetických ložisek, které jsou založeny na obecných principech zmíněných na začátku práce. Jsou zde zkoumány typy magnetických ložisek, jak aktivních tak i pasivních. U aktivních ložisek je dodána problematika řízení rotoru ložiska. Další část je věnována dopravním systémům založených na elektromagnetické a elektrodynamické levitaci. Jsou popsána z hlediska historie, principu a konstrukce. Poté jsou popsány levitační systémy, které byly již vyrobeny. Je na nich reprezentováno uplatnění v oblastech, v kterých z největší pravděpodobností se budou dál objevovat a vyvíjet. Konec práce se zabývá porovnáním levitačních systémů s klasickými řešeními vypsáním jejich výhod či nevýhod.

Klíčová slova

magnetická levitace, elektromagnetická levitace (EMS), elektrodynamická levitace (EDS), aktivní magnetická ložiska (AMB), pasivní magnetická ložiska (PMB), Transrapid, SC Maglev, levitační systém

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to clarify the existing magnetic levitation in general and in practice. At the beginning of the thesis, the principles and properties of individual magnetic levitation are explained. Most of the work focuses on the function of magnetic bearings, which are based on the general principles mentioned at the beginning of the work. The types of magnetic bearings, both active and passive, are investigated. For active bearings, the issue of rotor bearing control is provided. The next part is devoted to transport systems based on electromagnetic and electrodynamic levitation. They are described from the point of view of history, principle and construction. Then the levitation systems that have already been produced are described. It explains their application in the areas where they will appear and evolve the most. The end compares the levitation systems with classical solutions and their advantages and disadvantages.

Key words

magnetic levitation, electromagnetic suspension (EMS), electrodynamic suspension (EDS), active magnetic bearings (AMB), passive magnetic bearings (PMB), Transrapid, SC Maglev, levitation system

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 6.6.2018

Pavel Čavajda

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Vladimírovi Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	9
ÚVOD	11
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	12
1 MAGNETICKÁ LEVITACE	13
1.1 OBECNĚ.....	13
1.1.1 Earnshawovo pravidlo.....	13
1.2 PRINCIPY MAGNETICKÉ LEVITACE.....	14
1.2.1 Levitace s permanentními magnety.....	14
1.2.2 Levitace s využitím diamagnetismu.....	14
1.2.2.1 Pomocí supravodiče.....	15
1.2.3 Levitace transformační.....	16
1.2.4 Elektromagnetická levitace - EMS.....	16
1.2.4.1 Stabilizace levitačního systému.....	17
1.2.5 Elektrodynamická levitace - EDS.....	18
1.2.6 Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů.....	20
2 MAGNETICKÁ LEVITACE V PRŮMYSLU A DOPRAVĚ	22
2.1 MAGNETICKÁ LOŽISKA.....	22
2.1.1 Aktivní magnetická ložiska (AMB).....	22
2.1.1.1 Snímače polohy.....	23
2.1.1.1.1 Snímač na principu vířivých proudů.....	24
2.1.1.1.2 Induktivní snímač.....	24
2.1.2 Pasivní magnetická ložiska (PMB).....	26
2.1.2.1 Magnetické ložisko s permanentními magnety.....	26
2.1.2.2 Supravodivá ložiska.....	28
2.1.2.2.1 Radiální ložisko.....	28
2.1.2.2.2 Axiální ložisko.....	29
2.1.2.3 Elektrodynamické ložiska (EDB).....	29
2.1.3 Typické uspořádání magnetického ložiskového systému.....	30
2.2 DOPRAVNÍ SYSTÉMY.....	31
2.2.1 Transrapid.....	31
2.2.1.1 Transrapid-05.....	32
2.2.1.2 Transrapid-06.....	32
2.2.1.3 Transrapid-07.....	32
2.2.1.4 Transrapid-08.....	33
2.2.1.5 Princip a konstrukce Transrapidu-08.....	33
2.2.2 SC Maglev.....	36
2.2.2.1 Princip a konstrukce.....	37
2.2.3 Porovnání vlaků na principu EMS a EDS.....	39
3 POTENCIÁL APLIKACÍ V BUDOUCNU	40
3.1 MAGNETICKÁ LOŽISKA.....	40
3.1.1 Kompresor.....	40
3.1.2 Parní turbína.....	41
3.1.3 Setrvačnick.....	41

3.1.4	<i>Ventilátor</i>	42
3.2	DOPRAVNÍ SYSTÉMY	42
3.2.1	<i>Chuo Shinkansen</i>	42
3.2.2	<i>Shanghai Transrapid</i>	43
3.2.3	<i>Incheon</i>	43
3.2.4	<i>Linimo</i>	44
3.2.5	<i>SkyTran</i>	44
4	POROVNÁNÍ LEVITAČNÍCH SYSTÉMŮ SE STANDARDNÍMI ŘEŠENÍMI	46
4.1	MAGNETICKÁ LOŽISKA	46
4.2	DOPRAVNÍ SYSTÉMY	47
4.2.1	<i>Vlak na magnetickou levitaci v porovnání s železničním vlakem</i>	47
4.2.2	<i>Porovnání městské dopravy SkyTran s městskou tramvají</i>	48
	ZÁVĚR	51
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	52

Úvod

Má bakalářská práce pojednává o magnetické levitaci v komplexním měřítku. Jsou zde přiblíženy konkrétní magnetické levitace a vysvětleny jejich principy. Dále je práce více zaměřená na magnetická ložiska a dopravní systémy využívající magnetickou levitaci. U magnetických ložisek jsou v první řadě vysvětleny druhy, které existují. Také je nastíněno, jak funguje řízení rotoru u aktivních magnetických ložisek. V části práce o dopravních systémech je zahrnuta stručná historie levitačních dopravních systémů od jejich vzniku až po současnost. Jsou zde vysvětleny jejich principy a konstrukce. Práce ukazuje reálné příklady firem vyrábějící systémy na magnetickou levitaci a jejich uplatnění v technických oblastech, ve kterých by se mohly využívat i v budoucnu. Také jsou popsány výhody a nevýhody zmíněných levitačních systémů ve srovnání se standardními řešeními.

Práce byla vybrána kvůli zajímavé, nevšední problematice a kvůli uplatňování magnetické levitace v průmyslu.

Seznam symbolů a zkratek

B	Magnetická indukce [T]
μ	permeabilita [H/m]
H	Intenzita magnetického pole [A/m]
T	Teplota [K]
T _c	Kritická teplota [K]
F _g	Gravitační síla [N]
F _m	Magnetická síla [N]
EMS	Elektromagnetická levitace
EDS	Elektrodynamická levitace
δ	Vzduchová mezera
SC	Supravodivý
SCM	Supravodivý magnet
AMB	Aktivní magnetická ložiska
PMB	Pasivní magnetická ložiska
HTS	Vysokoteplotní supravodič
AMD	Aktivní magnetický tlumič
KM	Krauss Maffei
MBB	Messerschmitt-Bolköw-Blohm
LIM	Lineární indukční motor
LSM	Lineární synchronní motor
JNR	Japonské národní železnice

1 MAGNETICKÁ LEVITACE

1.1 OBECNĚ

Magnetická levitace je fyzikální děj, který zapříčiní vznášení se objektu nad zemí v určitém prostředí. Objekt je vznášen pouze silou magnetického pole, která musí překonat gravitační sílu. Tedy součet všech sil působících na objekt musí být roven nule. Jestliže tomu tak není, tak se vznášející těleso sesune z magnetického polštáře, na kterém bylo posazeno, a spadne vlivem gravitační síly k zemi. Z toho nám vyplývá, že dalším důležitým bodem je stabilita levitačního systému. V této bakalářské práci bude levitačním systémem nazývané každé zařízení, které bude fungovat na magnetické levitaci a bude stabilně levitovat v prostoru bez dotyku a podpěry jiných předmětů. [1]

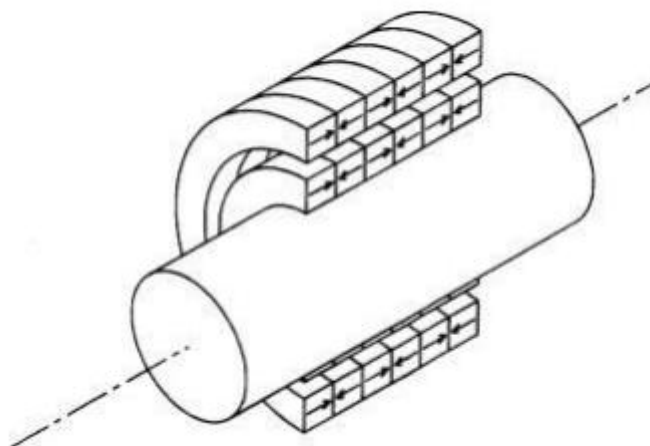
1.1.1 Earnshawovo pravidlo

V 19. století britský kněz a matematik Samuel Earnshaw zkoumal a uvedl základní větu známou jako Earnshawovo pravidlo, které nám často znemožňuje magnetickou levitaci. Podstata této věty je, že skupina bodových nábojů nemůže být udržována ve stabilní rovnováze, pouze vzájemně působícími elektrostatickými silami. Věta přirozeně platí pro síly, jejichž velikost klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Tedy pravidlo nám například říká, že položíme-li magnety se stejnými póly proti sobě, tak nebudou stabilně levitovat. Magnet, bychom mohli udržet ve stabilní poloze jedine přidanou mechanickou podporou, tím by nešlo už o levitaci, ale o pseudolevitaci a Earnshawovo pravidlo by bylo porušeno. Jeden z prvních lidí na zemi, který ukázal, že diamagnetické nebo supravodivé materiály by mohly podporovat stabilní levitaci, byl německý fyzik Werner Braunbeck. Braunbeckovo rozšíření říká, že materiály s magnetickou permeabilitou $\mu < 1$, tedy diamagnetické látky, umožňují stabilní levitaci. Jsou totiž z nehomogenního magnetického pole pouze vypuzovány, a nikoliv přitahovány. Tím tedy byla vyloučena možnost, že by se diamagnetické látky shodovaly s Earnshawovo pravidlem. Existují další okolnosti, za kterých se mohou magnetické systémy vyhnout Earnshawovo větě, například časově proměnná pole, aktivní zpětná vazba nebo ferrofluidy. [10] [16]

1.2 Principy magnetické levitace

1.2.1 Levitace s permanentními magnety

Princip této levitace je založen na odpuzování stejnojmenných pólů magnetů. Nevýhodou je, že stacionární magnetické pole nedokáže udržet levitující permanentní magnet ve stabilní poloze. Tento typ známe z běžného života, když k sobě přiložíme póly magnetů tak, aby se odpuzovaly. Když jeden magnet budeme držet v ruce a druhý pustíme, tak se nám levitující magnet obrátí a přitáhne k prvnímu. Tímto způsobem je možné zrealizovat magnetické ložisko (obr. 1), které bude později podrobněji popsáno. Magnetické ložisko ale nelze doslova považovat za levitační systém, protože hřídel je spojena s mechanickými ložisky, která jsou pevně spojena se zemí. Tudíž není splněna podmínka levitačního systému. [1] [2]



Obr. 1. Ložisko s permanentními magnety na rotoru i statoru (převzato z [8])

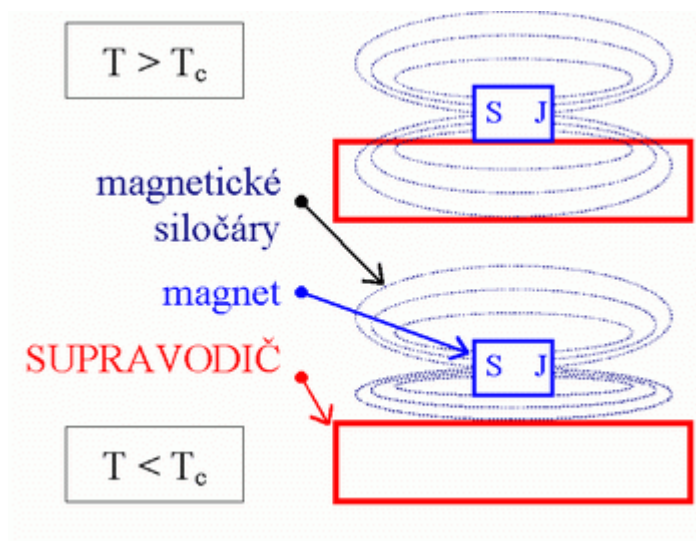
1.2.2 Levitace s využitím diamagnetismu

Diamagnetikum bez přítomnosti vnějšího magnetického pole, vykazuje nulový magnetický moment. Jestliže ale dojde k vložení diamagnetického materiálu do magnetického pole, dojde k indukovaní magnetických dipólů v částicích látky. Směr magnetického pole pak mají dipóly opačný, než je směr magnetického pole, do kterého byly vloženy. A na tomto principu je založena levitace s použitím diamagnetika. Mezi diamagnetika například patří uhlík, měď, voda nebo zlato. Látky, vyskytující se volně v přírodě, mají permeabilitu blízkou se k číslu jedna, což je nevýhoda, protože vykazují

pouze malou nadnášející sílu. Pro levitační systém by bylo daleko výhodnější, kdyby se permeabilita blížila k číslu nula. K tomu by nám měl pomoci supravodič, který se chová jako ideální diamagnetikum. [1] [7]

1.2.2.1 Pomocí supravodiče

Supravodiče mají dvě skvělé vlastnosti. První vlastnost říká, že kovy při teplotách hluboko pod bodem mrazu, dokážou snížit svůj elektrický odpor na nulovou hodnotu, což je skvělá vlastnost při vedení elektrického proudu. V prvopočátku bylo zjištěno, že čistá rtuť dokáže přejít do supravodivého stavu při kritické teplotě 4,2 K. Tento jev, byl objeven fyzikem, který se jmenoval Heike Kammerlingh Onnes. Byla objevena řada materiálů, ale s kritickou teplotou jen pod 23 K, které bylo zapotřebí chladit kapalným héliem s teplotou 4,23 K. Těmto látkám se říká nízkoteplotní supravodiče nebo supravodiče prvního druhu. Jejich materiály jsou čisté kovy a jejich slitiny. S odstupem času byla snaha docílit kritické teploty supravodiče při vyšší teplotě, jelikož chladit kapalným héliem bylo hodně cenově nevýhodné. A tak byly zkoumány nové látky, se kterými se zvyšovala kritická teplota, při které látka přechází do supravodivého stavu. S látkou, která měla kritickou teplotu 90 K, se vše změnilo, a bylo lze možné chladit kapalným dusíkem, jelikož má teplotu 77 K. Tedy obecně supravodičům s kritickou teplotou okolo 90 K, které jsou chlazeny kapalným dusíkem, se říká vysokoteplotní supravodiče nebo supravodiče druhého druhu. Jejich materiály jsou sloučeniny kovů, slitiny, a některé keramiky. Některé dnešní supravodiče dosahují až 136 K, a jsou tedy chlazeny kapalným dusíkem, jehož cena je daleko příznivější. Druhou vlastností a daleko důležitější pro levitaci je, že supravodiče dokážou dokonale vytlačovat magnetické pole z celého svého objemu. Z obr. 2 vidíme, že pokud vložíme supravodič do nehomogenního magnetického pole, vytvářeného permanentním magnetem, začnou se na povrchu supravodiče indukovat vířivé proudy, které nejsou tlumeny žádným elektrickým odporem. Tyto proudy vytvoří stejně velké magnetické pole jako je vnější magnetické pole, ale s opačnou orientací, tedy mezi supravodičem a permanentním magnetem působí odpudivá síla. Skutečnost, že v ideálním případě v supravodiči je nulové magnetické pole, vidíme ze vztahu $B = \mu H$, když dosadíme relativní permeabilitu do vztahu, vyjde nám magnetická indukce nulová. Pokud je teplota supravodiče větší než teplota kritická, chová se jako obyčejný vodič. Pak jsou stínící proudy tlumeny odporem a nedokážou odstínit vnější magnetické pole. [1] [5] [6]



Obr. 2. Vytěsňování magnetického pole ze supravodiče (převzato z [5])

1.2.3 Levitace transformační

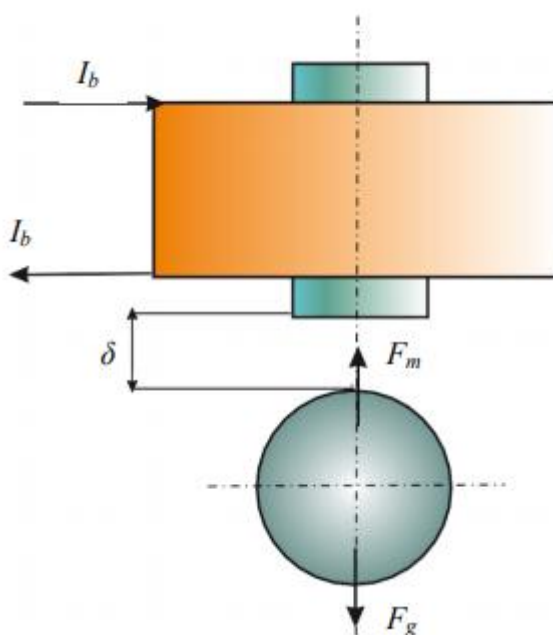
Transformační levitace spočívá ve vložení vodivé vsázky do magnetického pole cívky. Ve vodivém materiálu se začnou indukovat vířivé proudy, které vybudí svoje magnetické pole, které s vnějším magnetickým polem zapříčiní, že vsázka začne levitovat. Tento princip se uplatňuje například v hutnictví, kde dochází k bezkontaktnímu tavení kovů. [1] [2]

1.2.4 Elektromagnetická levitace - EMS

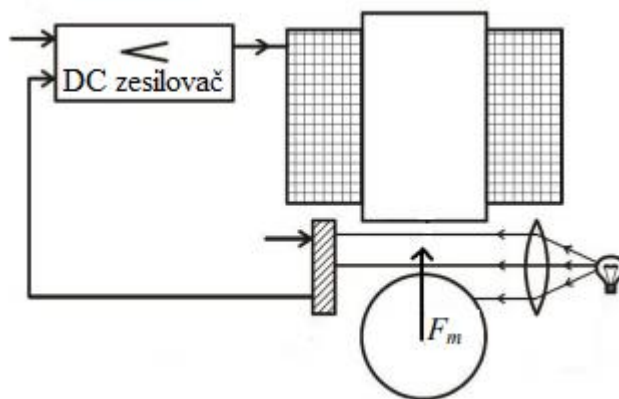
Princip EMS levitace je založen na důležité podmínce, která musí být splněna. Gravitační síla feromagnetického tělesa F_g , které chceme levitovat, se musí rovnat magnetické síle elektromagnetu F_m . Jestliže nebude splněna podmínka a bude například síla F_g větší než síla F_m , levitované feromagnetické těleso odpadne. V opačném případě, kdy síla F_g bude menší než síla F_m , se těleso přitáhne k elektromagnetu. Výhoda tohoto systému je, že levitace je zachována i při nulových rychlostech, na rozdíl od systému EDS, zmíněnou v odstavci 1.2.5. Nevýhodou je nestabilita systému. Například u vlaku, který využívá systém EMS, se při vysokých rychlostech obtížně udržuje vzduchová mezera mezi vlakem a dráhou. Z tohoto důvodu je zapotřebí zavést zpětnovazební regulaci, která nám zařídí, že bude zachována podmínka $F_g = F_m$. [1] [2] [3] [4] [9]

1.2.4.1 Stabilizace levitačního systému

Na obr. 3b je regulátor s optickým čidlem polohy, který nám nastaví takový budící proud elektromagnetu, aby bylo těleso zachované v levitaci. Regulátor využívá fotočlánek, na který dopadá světlo přes levitované těleso. Pohne-li se těleso, tak se změní i množství světla dopadající na fotočlánek, který nám převede světlo na elektrický signál, pokračující přes zesilovač do elektromagnetu. Na obr. 3a vidíme vzduchovou mezeru δ , mezi elektromagnetem a tělesem. Změnu mezery, by například zapříčinilo vystupování a nastupování lidí z vlaku. Jestliže vystoupí z vlaku na zastávce moc lidí, síla elektromagnetu bude větší než gravitační síla vlaku, a zdvih vozidla δ by se zmenšil. K tomu nemůže dojít, protože mezi vlakem a elektromagnetem bývá vzdálenost např. 10 milimetrů, a snažíme se ji zachovat po celou dobu jízdy konstantní. Tedy regulátor nám ve chvíli nadlehčení vozidla zařídí, že se elektromagnet lehce odbudí. Tím klesne magnetická síla tak, že se vyrovnají síly $F_g = F_m$, a vzdálenost δ bude zachována. [1] [2] [3]

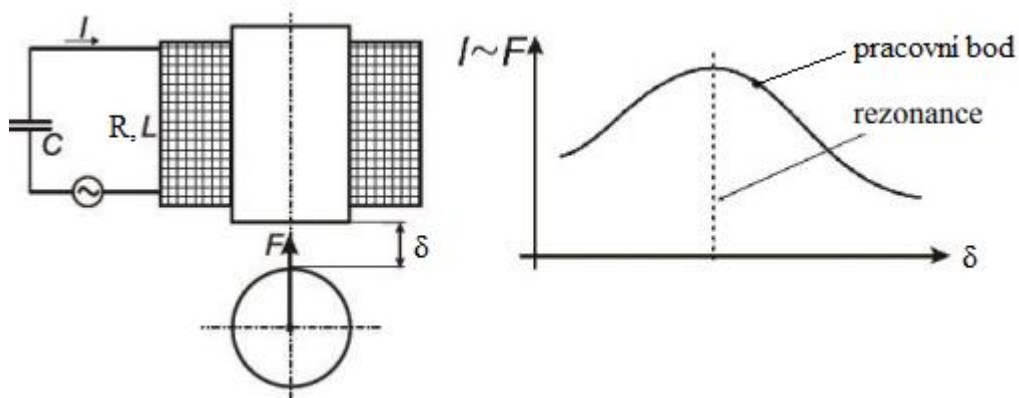


Obr. 3a. Levitační princip EMS (převzato z [3])



Obr. 3b. Regulátor s optickým čidlem polohy (převzato z [2])

Elektromagnetickou levitaci, lze také stabilizovat pomocí střídavého zdroje a RLC obvodem zapojeném v sérii (obr. 4). Pracovní bod je nastavený prvkem C , tak aby byl za rezonancí. Jestliže levitační těleso se přiblíží k elektromagnetu, zvýší se indukčnost cívky a pracovní bod se bude oddalovat od rezonance. Tím pádem nám poklesne proud a vlivem toho i magnetická síla elektromagnetu. [1] [2] [3]

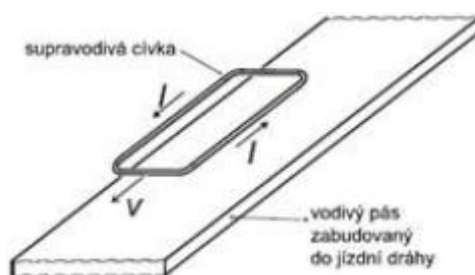


Obr. 4. Stabilizace levitujícího tělesa obvodem RLC (převzato z [2])

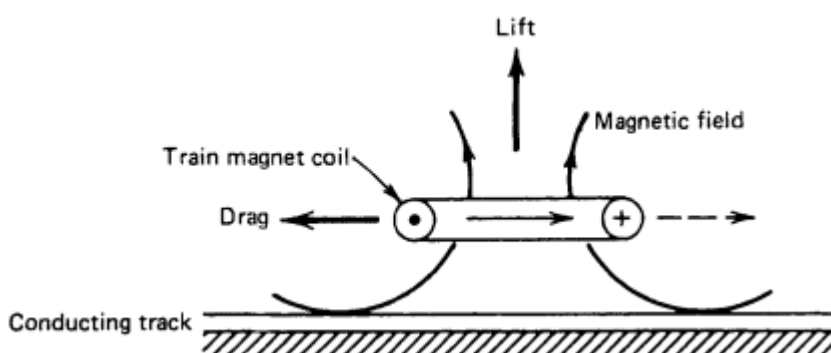
1.2.5 Elektrodynamická levitace - EDS

Systém EDS využívá stejnosměrných elektromagnetů, které jsou buzeny supravodivými cívkami. Tím dosáhneme daleko intenzivnějšího magnetického pole, jelikož supravodivou cívkou s nulovým elektrickým odporem protéká extrémní budící proud, který například u Japonského vlaku SC Maglev dosahuje až 700 kA. Druhou důležitou součástí systému je masivní vodivý pás, který je zhotoven například z hliníku.

Místo vodivého pásu mohou být využity cívky zapojené nakrátko nebo pás s obdélníkovými otvory. Výhody této levitace je stabilita, která je zachována s ohledem na vlak, i při vysokých rychlostech s velkým nákladem. Na obr. 5a vidíme supravodivou cívku, která je napájena stejnosměrným proudem a vytváří pouze stacionární magnetické pole, jehož magnetická indukce a magnetický tok, se s časem nemění. Z toho vyplývá, že při nulových rychlostech cívky proti pásu, nedochází k levitaci. K tomu, aby se v pásu začaly indukovat vířivé proudy, se musí cívka vůči vodivému pásu pohybovat. Na obr. 5b je řez levitačním systémem, kde vidíme dvě síly. Levitační síla vzniká působením magnetického pole cívky proti poli, které bylo vytvořeno vířivými proudy. Jenže vířivé proudy svým magnetickým polem také brzdí. Tedy k tomu, aby se cívka pohybovala, se musí překonat brzdící síla, která působí proti ní, jiným pohonem. Tento systém je mnohem složitější a nákladnější, než systém EMS. [1] [2] [9]

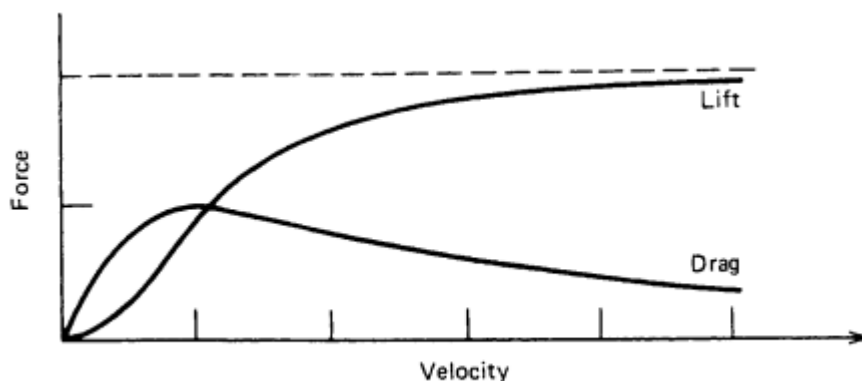


Obr. 5a. Pohybující se supravodivý magnet nad vodivým pásem (převzato z [1])



Obr. 5b. Řez levitačním systémem EDS (převzato z [10])

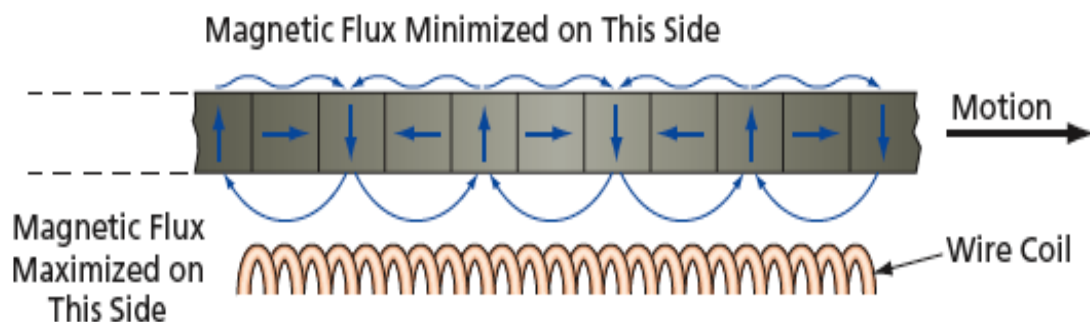
Na obr. 5c je průběh brzdící a levitační síly, kde vidíme, že levitační systém začne stabilně levitovat, až od určité rychlosti. Magnetické levitační dopravní systémy začínají levitovat, dosáhne-li rychlost vozidla přibližně 80 km/h. [2] [10]



Obr. 5c. Průběh levitační a brzdící síly v závislosti na rychlosti (převzato z [10])

1.2.6 Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů

Uspořádání soustavy permanentních magnetů objevil v roce 1985 německý fyzik Klaus Halbach (1925-2000), když chtěl najít způsob pro urychlování částic. Soustava permanentních magnetů je složena z několika malých kvádrů, které jsou zhotoveny práškovou metalurgií ze vzácných zemin (slitina neodymu, železa a bóru). Kvádry jsou řazeny za sebou tak, aby směr jejich magnetizace byl střídavě pootočený o 90 stupňů. Uspořádáním kvádrů získáme nad soustavou velmi slabé magnetické pole, a pod soustavou velmi zesílené magnetické pole. Celý levitační systém využívá soustavy izolovaných levitačních cívek, uložených pod soustavou permanentních magnetů, a silného magnetického pole strany permanentních magnetů. Na obr. 6 vidíme, že pokud se uvede soustava magnetů do pohybu, začnou se v levitačních cívkách indukovat proudy a cívky vytvoří svoje magnetické pole, které bude s polem permanentních magnetů v interakci. Tím dojde k levitaci soustavy nad cívkami. [1] [12]



Obr. 6. Halbachova soustava permanentních magnetů nad soustavou levitačních cívek (převzato z [11])

Tento druh levitace našel zatím bohužel jen teoretické uplatnění v levitačních dopravních systémech, nazývané Inductrack. Také NASA se zabývá využití levitačního systému, a to při vypouštění vesmírných letadel a kosmických raket do vesmíru. Dále se Halbachova soustava permanentních magnetů využívá v magnetických obvodech generátorů, motorů a magnetických ložisek. [1] [12]

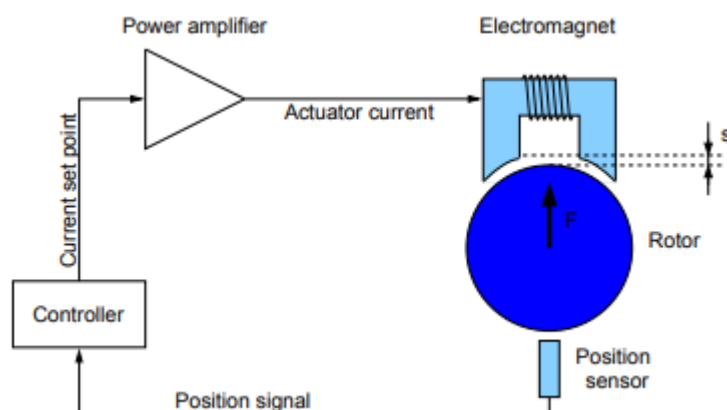
2 Magnetická levitace v průmyslu a dopravě

2.1 Magnetická ložiska

Magnetická ložiska jsou alternativou k mechanickým ložiskům. Využívají se v mnoha průmyslových aplikacích, včetně výroby elektrické energie, rafinace ropy, manipulace se zemním plynem, akumulace kinetické energie v setrvačniku apod. Na rozdíl od konvenčního typu ložiska, jsou ceněné pro jejich činnost bez tření a tedy i schopnosti chodu bez mazání. Jsou schopny, vlivem elektromagnetického pole, stabilně levitovat rotační část ložiska. Na základě jejich činnosti je lze rozdělit na aktivní a pasivní magnetická ložiska. [17]

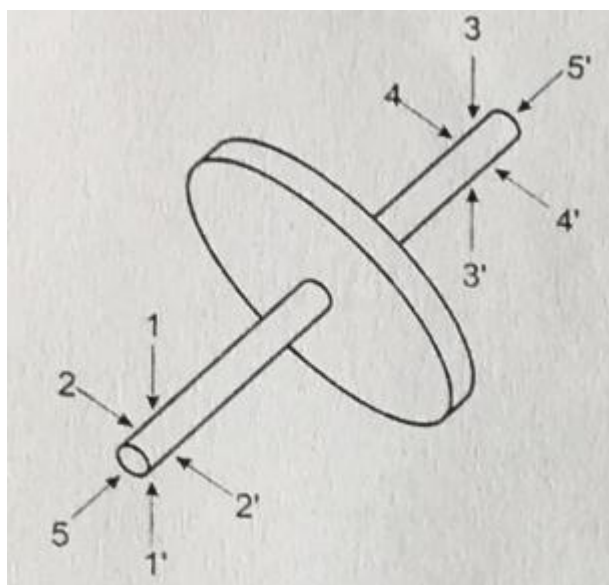
2.1.1 Aktivní magnetická ložiska (AMB)

Aktivní magnetické ložisko pracuje na principu přitažlivých sil mezi elektromagnetem a feromagnetickým tělesem (princip levitace EMS). V obr. 7, je rotor zavěšen pomocí elektromagnetu. Na rozdíl od pasivního magnetického ložiska (zmiňovaného v dalším odstavci), dokáže AMB aktivně řídit polohu rotoru snímačem polohy. Signál polohy je poté zpracován pomocí regulátoru, který nastaví aktuální žádanou hodnotu. Tento signál je pak zesílený v zesilovači, abychom získali potřebný budicí proud cívky elektromagnetu. Tímto způsobem je realizovaná zpětnovazební regulace a systém může být stabilizovaný. Na obr. 7 je pro pochopení vidět pouze jeden elektromagnet, který by zajistil levitaci pouze v jedné ose a v jednom směru.



Obr. 7. Princip aktivního magnetického ložiska (převzato z [13])

V obr. 8 vidíme hřídel s pěti stupni volnosti, kde čísla označují vždy dvojici elektromagnetů. Stejně budící cívky elektromagnetu, jsou konstruovány v jedné ose naproti sobě, a mají vždy svojí vlastní zpětnovazební regulaci, aby mohly nastavovat magnetickou sílu ve všech směrech (směry sil působících na hřídel jsou označeny šipkami). Jestliže jsou cívky buzené stejným proudem, pak elektromagnety přitahují rotor stejnou silou a rotor stabilně levituje. Při sebe menším vychýlení rotoru, zaznamená snímač polohy změnu velikosti vzduchové mezery, a jeho výstupní signál se porovná s žádanou vstupní hodnotou v podobě referenčního signálu. Rozdíl těchto signálů se převede regulátorem a zesilovačem na budící proud, který se na jedné straně přičte k proudu v cívce. Ve stejné ose na druhé straně hřídele se rozdílový budící proud naopak odečte a k cívce, která vyvolá větší magnetickou sílu, se hřídel přitáhne. Tím se rotor vrátí zpět do rovnovážné polohy. Vzduchová mezera se pohybuje mezi 0,5-1 mm. [1] [13] [14] [15]



Obr. 8. Pět stupňů volnosti hřídele magnetického ložiska (převzato z [2])

2.1.1.1 Snímače polohy

Na světě je široká nabídka dostupné technologie pro snímání polohy rotoru ložiska. Jelikož rotor je rotační část magnetického ložiska, je zapotřebí použít bezdotykové snímače. Nejvíce využívané snímače jsou elektrické, které získaly nejširší uplatnění s ohledem na jejich velikost, snadnost použití, odolnost proti prachu a jiným nečistotám. Tyto elektrické snímače lze dělit na elektromagnetické, kapacitní, optické, nebo odporové. Elektromagnetické snímače spadají do dvou kategorií: induktivní, a snímače na principu

vířivých proudů. U magnetických ložisek můžeme použít oba tyto snímače, jak pro axiální tak i pro radiální posun rotoru.

2.1.1.1.1 Snímač na principu vířivých proudů

Princip činnosti snímače na principu vířivých proudů se podobá induktivnímu snímači. Snímač je napájen střídavým napětím se signálovou frekvencí v rozsahu 500 kHz - 2 MHz. Cívka generuje střídavý magnetický tok, který indukuje v rotační části ložiska vířivé proudy. Tyto proudy působí proti magnetickému poli, které jej vyvolalo, a dochází k potlačení a zmenšení intenzity původního pole. Tím indukčnost cívky klesne.

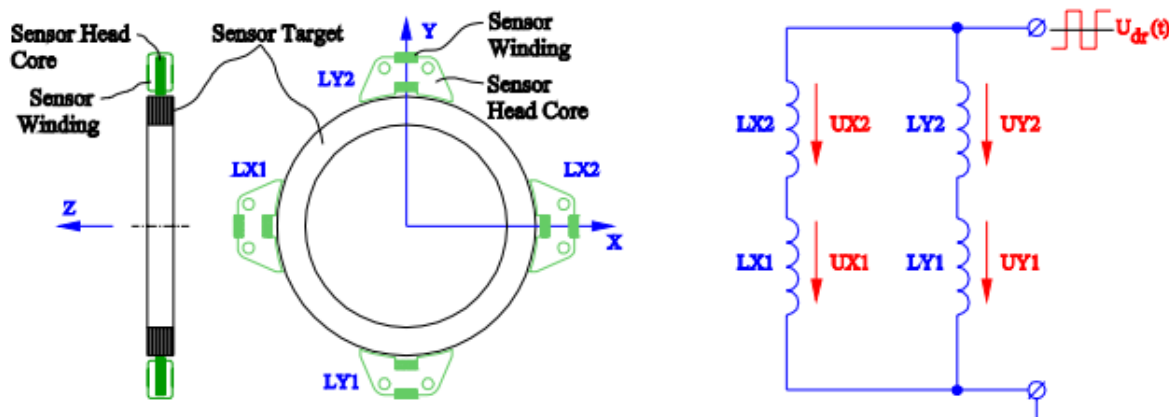
Při změně vzduchové mezery, se mění i impedance cívky. V tomto případě je rotor z vysoce vodivého a nemagnetického materiálu. Elektronika pro zpracování signálu o vyšší frekvenci bývá komplikovanější a dražší než elektronika pro induktivní snímače.

2.1.1.1.2 Induktivní snímač

Induktivní snímač využívá uzavřený (může být i otevřený) magnetický obvod zhotovený z měkkého elektricky nevodivého feritového materiálu a cílového snímače, který je v tomto případě hřídel ložiska. Měření polohy rotoru je založeno na změně indukčnosti cívek snímače, které jsou navinuty na jádru. Jakmile dojde k vychýlení hřídele od snímače, zvětší se vzduchová mezera spolu s magnetickou reluktancí a indukčnost cívky se zmenší. Cívky snímače jsou napájeny střídavým napětím, zapojené buď ve střídavém můstku, nebo v oscilačním obvodu, kde se vychýlením rotoru oscilační obvod rozladí. Použití těchto snímačů je snadnější, na rozdíl od snímačů na principu vířivých proudů, ale jejich funkce může být ovlivněna rozptylovým magnetickým tokem od budících cívek AMB. Tento problém, lze zmírnit u radiálních snímačů zapojením dvou snímačů, naproti sobě. Induktivní snímače pracují se vstupní frekvencí 1 kHz - 100 kHz.

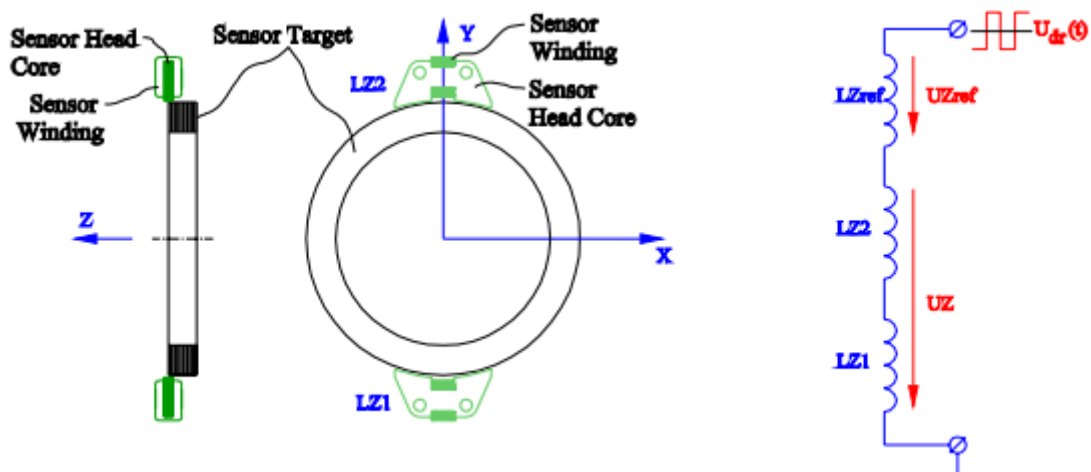
V obr. 9 je znázorněné typické zapojení induktivního snímače, který měří radiální posuny hřídele v osách x a y. Po stranách rotoru vidíme dvojici snímačů, které jsou umístěny v jedné ose naproti sobě. Například induktivní snímače (označeny LX1 a LX2) měří posuny levitované hřídele v ose x. Snímače LY1 a LY2 naopak v ose y. V obrázku také vidíme schéma zapojení cívek, kde v jedné ose jsou spojeny vždy sériově a tvoří dělič napětí. Pokud dojde k vychýlení hřídele ke snímači LX2, tak se indukčnost cívky tohoto

snímače zvětší. A naopak indukčnost cívky snímače LX1 zmenší. Tím bude větší i úbytek napětí UX2 na cívce snímače LX2 oproti úbytku UX1 na druhé cívce. Tyto změny budou následně vyhodnocovány.



Obr. 9. Induktivní snímač pro měření radiálních posunutí hřídele (převzato z [18])

V obr. 10 je znázorněné zapojení induktivního snímače, který měří axiální posuny hřídele v ose z. V tomto měření jsou snímače na okrajích hřídele (označeny LZ1 a LZ2). Jestliže dojde k axiálnímu posunu hřídele, tak se změní plocha překrytí snímače a hřídele a dojde ke změně indukčnosti cívky. Indukčnost těchto snímačů se nemění jen s axiálními posuny, ale i s radiálními. Jestliže se hřídel posune v radiálním směru, tak na jedné straně se indukčnost snímače zvýší, ale na druhé zas sníží. V konečném důsledku ale axiálními snímačům radiální posuny nevadí, protože v lineární aproximaci součet indukčností snímače LZ1 a LZ2 se nezmění. Dále v obrázku vidíme zapojení cívek snímačů a referenční indukčnost. Místo LZref lze zapojit další dvojici snímačů na protilehlé straně, tím bychom dostali větší lineární závislost získaného signálu na vzduchové mezeře. Toto řešení by zabíralo více místa, a také by se odrazilo v ceně. [1] [18] [19]



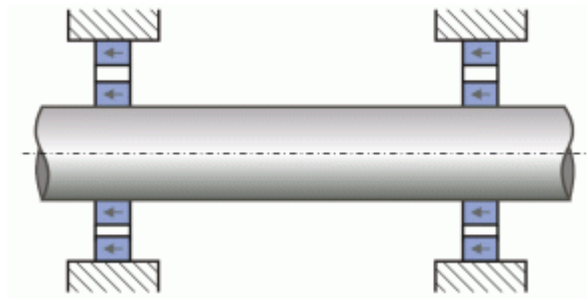
Obr. 10. Induktivní snímač pro měření axiálních posunutí hřídele (převzato z [18])

2.1.2 Pasivní magnetická ložiska (PMB)

Pasivní ložiska na rozdíl od aktivních, nepotřebují dodávat žádnou elektrickou energii k tomu, abychom dosáhly levitace. Tím pádem nám odpadá i starost se snímači či s řídicími obvody. Mohou být konstruovány s využitím permanentních magnetů, diamagnetických materiálů, supravodičů, elektrodynamických účinků nebo ferrofluidů. [23]

2.1.2.1 Magnetické ložisko s permanentními magnety

Z Earnshawovy věty víme, že nemůžeme docílit stabilní levitace ve všech stupních volnosti pouze permanentními magnety. Avšak ložiska založenými na tomto principu můžeme docílit stability, alespoň v několika stupních volnosti. Například na obr. 11 lze zajistit stabilitu v radiálním směru. V tomto uspořádání vidíme dva magnetické prstence připevněné na statoru, a dva připevněné na rotoru. Šipky, které znázorňují směr magnetizace, jsou na statoru i rotoru ve shodném směru. Tím je zajištěna levitace na základě odpuzujících síl permanentních magnetů. Tento princip by platil, i kdyby směry magnetizací rotoru i statoru byly namířené proti sobě. Je možné mít různé uspořádání permanentních magnetů. Kromě zmíněného radiálního ložiska využívajícího odpuzující síly, můžeme vidět na obr. 12 další možnosti. V pravém sloupci tabulky jsou znázorněny pasivní magnetická ložiska v axiálním provedení, která vykazují stabilitu v axiálním směru. [20] [21] [22]

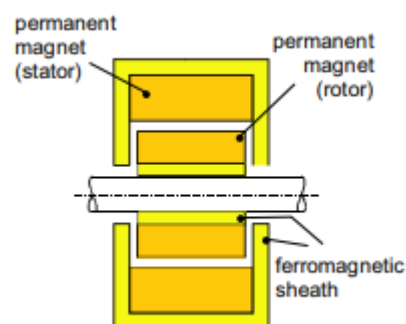


Obr. 11. PMB v radiálním uspořádání, využívající odpudivých sil. (převzato z [21])

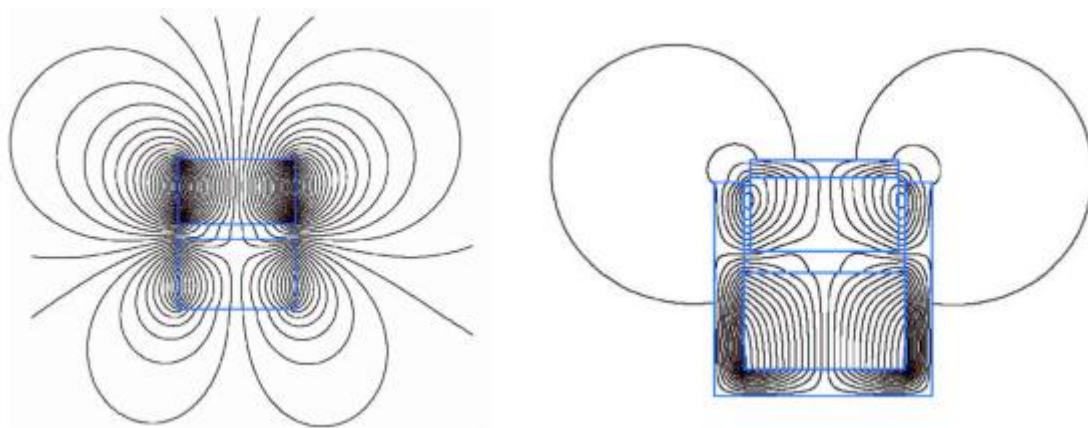
	radial bearing	thrust bearing
attracting		
repelling		

Obr. 12. Další možnosti uspořádání PMB s permanentními magnety. (převzato z [22])

Jelikož nosnost magnetického ložiska oproti konvenčnímu není tak velká, můžeme ji zvýšit zvýšením magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Zvýšení získáme díky stínění z měkkého feromagnetického materiálu s vysokou permeabilitou (obr. 13). Na obr. 14 je vidět rozložení magnetického pole před a po stínění ložiska. [24]



Obr. 13. Radiální magnetické ložisko se stínícím pláštěm. (převzato z [24])



Obr. 14. Rozložení magnetického pole před a po stínění. (převzato z [24])

2.1.2.2 Supravodivá ložiska

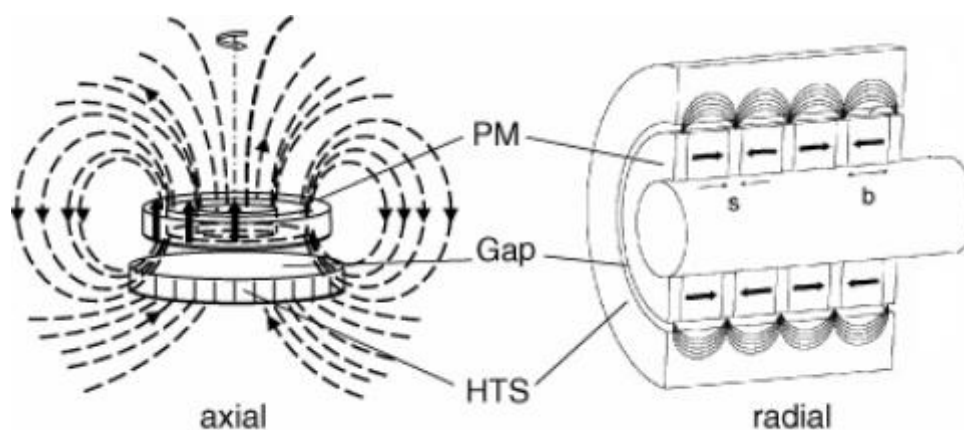
Ložiska pracují na principu levitace mezi vysokoteplotním supravodičem HTS (stator) a permanentním magnetem (rotor). Je možné najít supravodivá ložiska, která využívají jako stator permanentní magnety a jako rotor HTS. Na rozdíl od ložisek pouze s permanentními magnety lze docílit stabilní levitace. Dalšími výhodami jsou velmi vysoké otáčky, nízké nároky na údržbu a nízkou spotřebu energie. Jako rotor se využívá magnetů ze vzácných zemin, jako je například neodymový magnet (NdFeB - slitina železa neodymu a boru), který dokáže unést víc jak tisícinásobek své váhy. Jako vysokoteplotní supravodič se nejčastěji využívá $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ (oxid yttria baria a mědi). I tyto ložiska lze provozovat z hlediska uspořádání na radiální a axiální.

2.1.2.2.1 Radiální ložisko

Rotor ložiska je složen z nemagnetické hřídele, na které jsou navlečeny prstence z permanentních magnetů (obr. 15). Směr magnetizace prstenců se střídá v axiálním směru. Pro zvýšení hustoty magnetického toku je mezi každým prstencem kovová podložka. Supravodivý stator také ve tvaru prstence je tvořen několika supravodivými peletami. Stator bývá pokryt měděným válcem, přes který jsou chlazeny pelety supravodiče kapalným dusíkem, až za kritickou teplotu. Válec je vytvořen z mědi z důvodu velké tepelné vodivosti ($\lambda = 386 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

2.1.2.2 Axiální ložisko

U tohoto typu uspořádání se využívá supravodivého disku, který je tvořen buď jednou větší peletou, nebo několika malými peletami uspořádanými do tvaru kotouče (obr. 15). Rotor může být konstruovaný jako jeden mohutný celek, nebo sadou permanentních magnetů, které mohou být uspořádány tak, aby směr jejich magnetizace tvořil Halbachovu soustavu permanentních magnetů. Druhý způsob je výhodnější, protože dojde ke zvýšení nosnosti a tuhosti ložiska. [1] [25] [27]



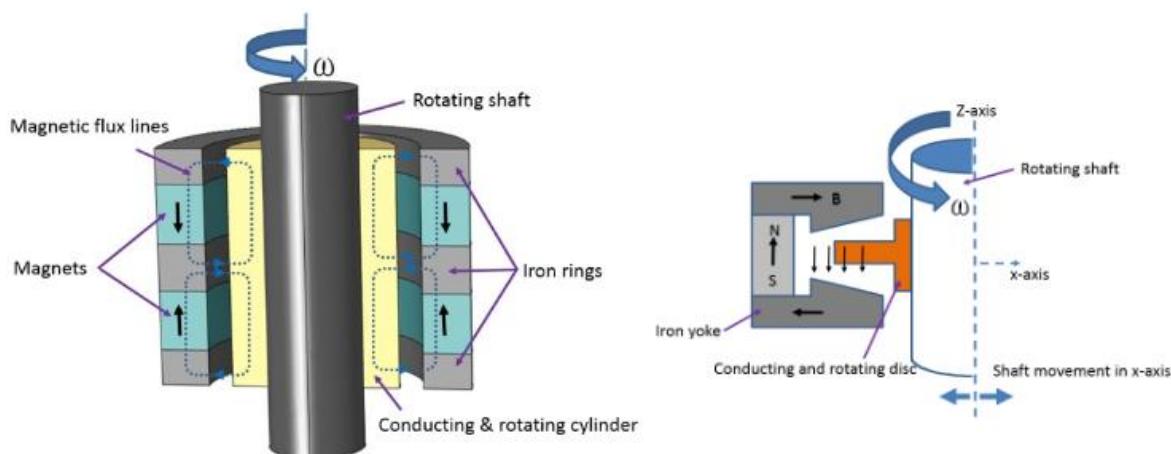
Obr. 15. Axiální a radiální supravodivé ložisko. (převzato z [26])

2.1.2.3 Elektrodynamická ložiska (EDB)

Elektrodynamická ložiska využívají síly působící na rotor vlivem interakce mezi magnetickým polem vířivých proudů a permanentních magnetů. Tento typ ložisek se navrhuje tak, aby se proudy indukovaly do vodivého rotoru pouze tehdy, když je rotor vychýlený ze své polohy. A to z důvodu ztrát, které by byly zapříčiněny zbytečným indukovaním vířivých proudů v rotoru, ve vycentrované poloze. Tedy jakmile je rotor v rovnovážné poloze, nenastává žádná změna magnetického toku, proto se nevytvoří zbytečné vířivé proudy. Tomuto principu ložisek se říká elektrodynamická ložiska s nulovým tokem. EDB systémy poskytují levitaci pouze tehdy, je-li rychlost otáčení rotoru nad určitou prahovou hodnotou. Tento systém je velmi obtížné navrhnout, jelikož síly, které udržují levitaci, jsou závislé na rychlosti rotoru. Mimo to rotor vykazuje velmi špatné chování stability. Pro vyřešení tohoto problému, byly navrhovány různé typy tlumičů, které lze zavést do systému, aby byl zajištěn stabilní provoz v pracovním rozsahu

rychlostí. Například bylo navrženo hybridní řešení, kde je využívána kombinace elektrodynamického ložiska s aktivním magnetickým tlumičem (AMD). Celý levitační systém je poté nazýván EBD - AMD systém. Pod pojmem aktivní magnetický tlumič se neskrývá nic jiného, než nám známé aktivní magnetické ložisko (AMB). Jeho hlavní výhodou je jeho dobré řízení, proto ho lze použít jako řízený netočivý tlumič pro nestabilitu jiných magnetických ložisek. Elektrodynamická ložiska se také dále dělí na radiální a axiální (obr. 16). Toto rozdělení lze poznat podle toho, zda je magnetický tok kolmý nebo rovnoběžný s osou rotoru. Radiální ložisko se skládá z vodivého válce, který je upevněn na rotující hřídeli, a z permanentních magnetů, které jsou uloženy mezi železnými kroužky. U axiálního ložiska můžeme vidět vodivý kotouč, který je připevněn na rotoru, a magnetický obvod k vedení magnetického toku z permanentního magnetu.

[14] [28] [29]



Obr. 16. Radiální a axiální elektrodynamické ložisko. (převzato z [14])

2.1.3 Typické uspořádání magnetického ložiskového systému

Rotor má vždy několik stupňů volnosti, jak jsme se již dozvěděli z předešlých informací o aktivních a pasivních ložiskách. Jestliže se tedy v levitačním ložiskovém systému nevyužijí mechanická ložiska, je potřeba zajistit stabilitu ve všech stupních volnosti jen magnetickými ložisky. Ta bude zajištěna kombinací několika uspořádáními ložisek, jak axiálními tak i radiálními. Lze samozřejmě v sestavě využít jak pasivní tak i aktivní ložiska. [1]

2.2 Dopravní systémy

V dnešní době se čím dál více zhušťuje automobilová doprava. To má velmi nepříznivý dopad na cestování, a to hlavně na různých vytížených linkách. Tento problém může řešit letecká doprava, která je ale přece jen preferována na delší vzdálenosti. Například cesta z města na letiště není většinou nikterak dlouhá, ale přesto nám zabere dost času, kvůli vznikajícím dopravním kongescím. Proto z důvodu požadavku na rychlost cestování, vznikají návrhy projektů vysokorychlostních železnic, které využívají magnetickou levitaci. Tyto vlaky jsou často označovány jako maglev, a dokážou konkurovat letecké dopravě až do vzdálenosti 1000 až 1200 kilometrů. Jejich výstavba je však velmi finančně náročná, a to také hlavně z důvodu bezpečnosti, jelikož tratě by měli být vedeny tunely nebo na mostech. Od 70. let probíhají pokusy testování těchto vlaků hlavně v Německu a Japonsku. Každý stát se vydal jinou cestou, zatímco Německo začalo vyvíjet vlaky na principu elektromagnetické levitace EMS, tak v Japonsku dali přednost elektrodynamicke levitaci EDS. Železniční systém vyvinutý v Německu je nazýván Transrapid, v Japonsku zas nese název SC Maglev, který byl dříve nazýván jako MLU (zkratka SC Maglev odvozena z názvu Superconducting magnetic levitation). [30] [31]

2.2.1 Transrapid

Vývoj Transrapidu započal roku 1969, kdy dvě firmy (Krauss Maffei - KM a Messerschmitt-Bolkow-Blohm - MBB) začaly vyvíjet a navzájem si konkurovat ve výstavbě magneticky levitovaných dopravních systémů. V roce 1969 bylo postaveno první vozidlo firmou KM, které bylo poháněno lineárním indukčním motorem s krátkým statorom (LIM). Ovšem první testovací vozidlo pro přepravu osob bylo postaveno roku 1971 konkurenční firmou MMB. Vozidlo dosahovalo rychlosti 100 km/h na testovací dráze dlouhé 700 metrů, a vážilo 5,8 tun. V tentýž rok byl postaven vůz jménem Transrapid-02. Toto vozidlo, vážící 10,7 tun, dosahovalo rychlosti 164 km/h na dráze, která byla dlouhá 930 metrů. V roce 1972 vyrobila firma KM model, který nebyl založený na magnetické levitaci, ale na principu vzduchového polštáře. Kvůli vysokému hluku a vyšší spotřebě energie, byl považován za horší model než Transrapid-02, který využíval elektromagnetickou levitaci. Další model Transrapidu-04 (obr. 17) přišel o rok později a byl zkonstruován a testován firmou KM na dráze o délce 2,4 kilometru, a dokázal nést 20 cestujících rychlostí 253,2 km/h. Roku 1974 se objevila nová firma, která zkonstruovala vozidlo jménem EET, ale na principu elektrodynamicke levitace. Jejich vozidlo se

dokázalo vyšplhat na rychlost 200 km/h, ale rychlost Transrapidu-04 nebyla pokořena.



Obr. 17. Model Transrapidu-04. (převzato z [37])

2.2.1.1 Transrapid-05

Dne 17. května roku 1979 byl předveden Transrapid-05 na mezinárodní výstavě dopravy v Hamburku, kde jízdu absolvovalo 50 000 lidí na vyvýšené dráze dlouhé 908 metrů. Tento prototyp dokázal jet rychlostí 75 km/h a byl to první systém Transrapid, který byl poháněn lineárním synchronním motorem s dlouhým statorem (LSM).

2.2.1.2 Transrapid-06

Dne 13. března roku 1983 byl představen firmou KM nový typ vozidla, které vážilo 122 tun a bylo dlouhé 54 metrů. Transrapid-06 se už testoval na nově vybudované dráze (výstavba 1980-1987) v Lahten okrese Emsland, kde 12. ledna 1988 jel rychlostí 412,6 km/h. Kapacita vozidla byla 196 cestujících.

2.2.1.3 Transrapid-07

Na rozsáhlou sérii modelů navázal další prototyp vozu jménem Transrapid-07, který byl poprvé představen na výstavbě v Hamburku v červnu roku 1989. Byl složen ze dvou stejných souprav o parametrech délka, šířka, výška – 50; 3,7; 3,9 metrů. Kapacita vozu činila 200 cestujících.

2.2.1.4 Transrapid-08

Roku 1999 byl vyroben Transrapid-08 (obr. 18), který je využíván od roku 2004, pro převoz lidí v Číně, na trati mezi mezinárodním letištem Shanghai Pudong a nádražím Longyang Road (Pudong), kde je cestujícím umožněno přestoupit z Maglev na metro. Dráha je dlouhá 32 kilometrů a cesta trvá okolo 7 minut. Vlak dosahuje rychlosti až 431 km/h a nese název SMT.

V roce 2006 došlo k tragické nehodě na zkušební trati v Lahten, kde Transrapid narazil do údržbového vozu. Zemřelo 23 lidí. V letech 2007 byl vynalezen Transrapid-09, byl zkonstruován pro plánovanou trasu v Mnichově, z hlavního nádraží na letiště. Roku 2008 z projektu sešlo z hlediska financí. Roku 2011 vypršela licence pro provoz dráhy v Lahten a byla uzavřena. O rok později byla schválena její demolice. [34] [37] [38] [39] [40] [41] [51] [52] [53]

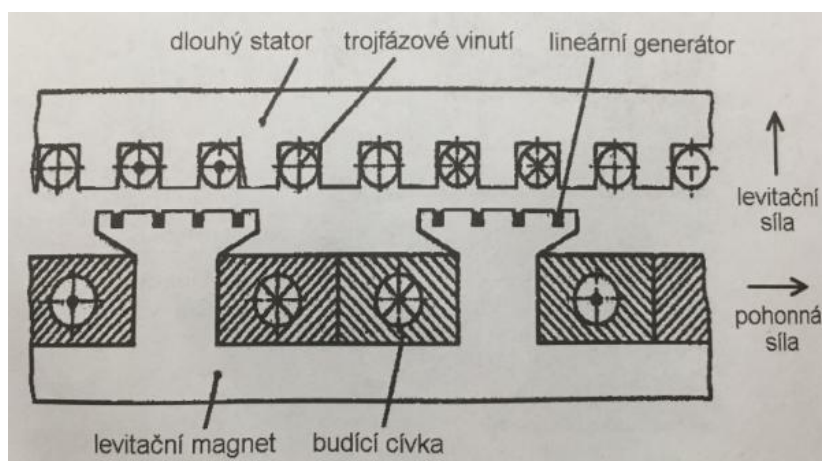


Obr. 18. Model Transrapidu-08. (převzato z [36])

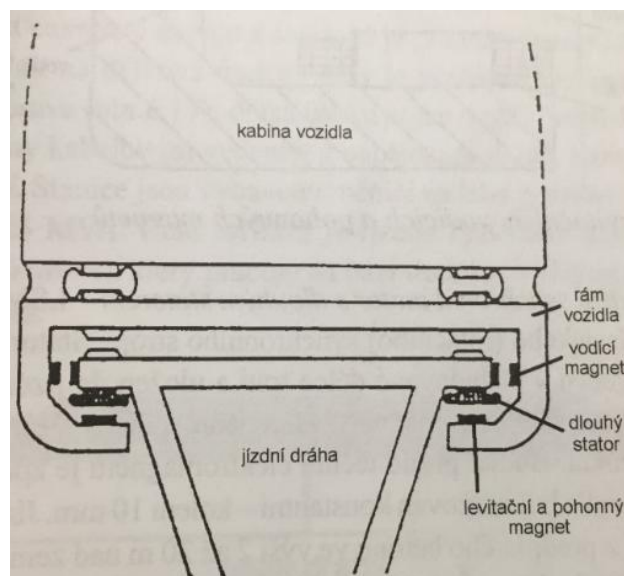
2.2.1.5 Princip a konstrukce Transrapidu-08

Celý levitační systém je poháněn lineárním synchronním motorem s dlouhým statorem, jehož uspořádání je znázorněno v obr. 19. Dlouhý stator je složen z paketů plechů, které jsou rozvinuty zespoda dráhy do celé její délky, která má tvar písmene „T“. Pakety mají drážky, v nichž je uloženo trojfázové vinutí. Za rotor jsou považovány

stejnosemné elektromagnety, které jsou připevněny zevnitř rámu vozidla. Jízdní dráha je na betonové konstrukci ve výšce až 20 metrů. Dále v obr. 20 vidíme vodící elektromagnety umístěné po stranách vnitřku rámu, které zajišťují boční stabilitu vozidla a odolávají silám například při průjezdu zatáčkou nebo působením větru apod. U rotačních synchronních motorů víme, že při napájení statoru nám vznikne točivé magnetické pole. U tohoto pohonného systému jelikož je lineární, vznikne postupné magnetické pole, které dokáže společně s nabuzenými stejnosměrnými elektromagnety rozpohybovat vlak. Z logiky věci se tedy rychlost postupného magnetického pole rovná rychlosti vlaku. Jestliže tedy chceme, aby vlak jel vyšší rychlostí, musí se zvýšit frekvence napájení statoru. Tímto způsobem je zrealizovaná pohonná síla vlaku Transrapid. Druhou sílu, a to levitační, realizuje stejnosměrný elektromagnet, který je přitahován k paketu plechů statoru. Cílem je udržení vzduchové mezery přibližně 10 milimetrů, kterou udržujeme budícím proudem do elektromagnetů. Jinak řečeno, musíme zařídit, aby se gravitační síla celého vlaku rovnala levitační síle.

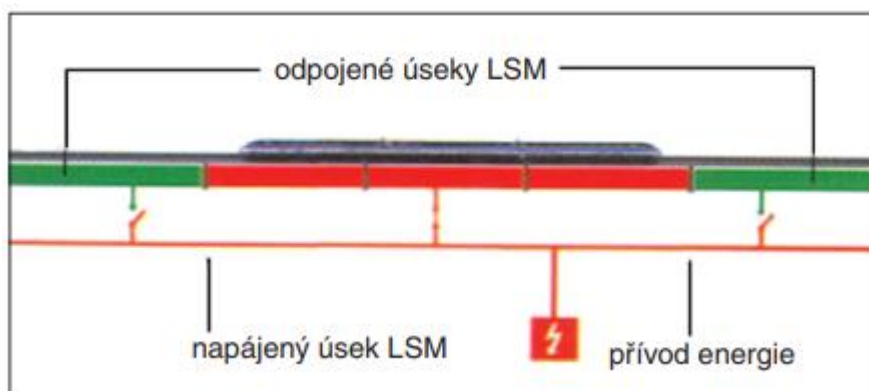


Obr. 19. Lineární synchronní motor s dlouhým statorem. (převzato z [1])



Obr. 20. Průřez jízdní dráhou a vozidlem. (převzato z [1])

Elektromagnety a vlastní spotřeba jsou kryta bateriemi, které dokážou levitovat vozidlo při nulových rychlostech i klidně hodinu. Tato spotřeba je kryta v rozsahu od 0 až 80 km/h. Při vyšších rychlostech jsou baterie nahrazeny a dobíjeny lineárním generátorem, který je zabudovaný v levitačním elektromagnetu. Obr. 21 znázorňuje jedoucí vlak po dráze, která je v důsledku omezení ztrát napájena jen úsekově. Napájen je vždy ten úsek, kde projíždí Transrapid. Brzdění se provádí generátoricky, kdy se energie získaná z jedoucího vlaku rekuperuje zpět do napájecí sítě. [1] [3]



Obr. 21. Napájení části dlouhého statoru LSM. (převzato z [3])

2.2.2 SC Maglev

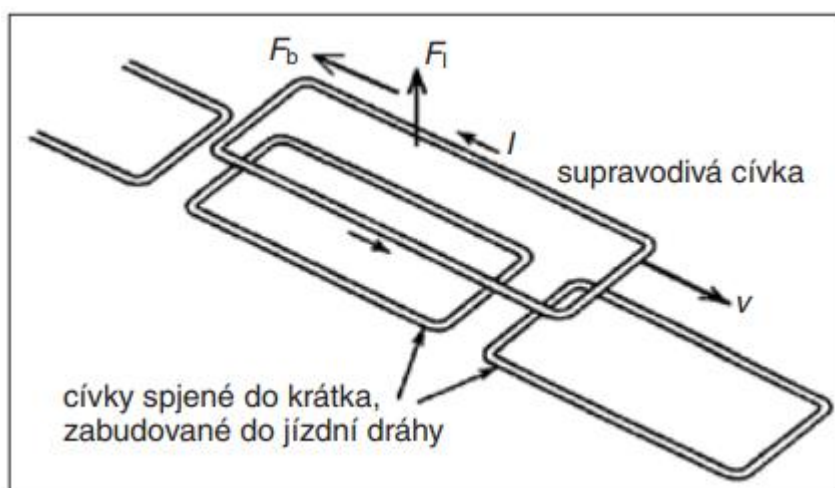
Japonci věnovali spoustu času a úsilí k vyvinutí EDS systému, který využívá supravodivé magnety. Vývoj systému EDS, byl zahájen už v 60. letech japonskými národními železnicemi (JNR), které v roce 1972 představily první model supravodivého magneticky levitovaného vozidla, který se jmenoval ML-100. Po příznivých výsledcích, kterých se s vozidlem dosáhlo, bylo v roce 1975 testováno vozidlo ML-100A s pohonem LSM (lineární synchronní motor). V dubnu 1977 bylo v Miyazaki na ostrově Kjúšú, otevřeno testovací zařízení a první testování začalo na vozidle ML-500 na vzdálenosti 3,1 kilometrů, kde celková dráha měřila 7 kilometrů. Model ML-500 dosahoval rychlosti 517 km/h, byl dlouhý 13,5 metrů a vážil 10 tun. Dále byla testována známá vozidla MLU001 (1980) a MLU002 (1987-1991). ML001 dosáhlo v únoru roku 1987 rychlosti 400,8 km/h, a ML002 v listopadu roku 1989 rychlosti 394,3 km/h. V letech 1998-2000 začaly zkoušky s přepravou osob na zkušební trati v prefektuře Yamanashi. V roce 2002 byl vyvinut vůz MLX01, který v roce 2003 dosáhl rychlosti 581 km/h. Rekord zvýšil vlak, nesoucí označení LO (obr. 22), na rychlost 590 km/h, který je už dlouho testován společností JR Central. Necelý týden na to, dne 21.4.2015, svůj světový rekord navýšil na 603 km/h, když na tuto rychlost potřeboval rozjezd jen 4 minuty. K testování modelu LO využívá společnost dvě soupravy, kde se do jedné soupravy vejde 388 lidí. Dále má každá souprava dva koncové vozy (mezi nimi 5 vložených), které mají protažený „nos“ 15 metrů, z hlediska snížení hluku a zlepšení aerodynamiky. [1] [33] [34]



Obr. 22. SC Maglev typu LO. (převzato z [32])

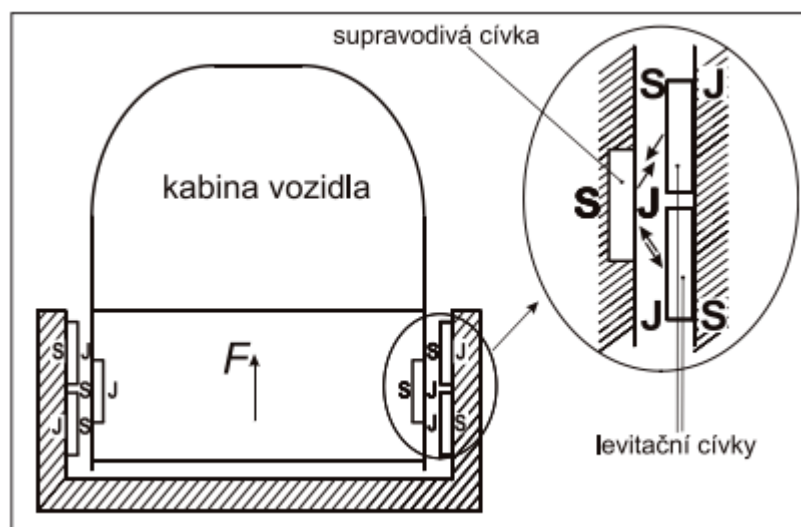
2.2.2.1 Princip a konstrukce

Vlak SC Maglev je postaven na principu EDS, který byl podrobněji popsán v bodě 1.2.5. Na obr. 23 je vidět starší koncepce vlaků SC Maglev. SCM elektromagnety buzené supravodivými cívkami (Niob-Titan), které jsou napájeny stejnosměrným proudem, jsou uloženy s kryostatem v podvozku vozidla. V kryostatu je umístěné kapalné hélium, které dostává cívky do supravodivého stavu. SCM nefungují pouze jako prostředek pro levitaci, ale i jako rotor v pohonu, který se nazývá LSM (lineární synchronní motor). Jako stator tohoto pohonu jsou trojfázové cívky spojené dokrátka a jsou rozloženy v celé dráze. Vzhledem ke ztrátám je trojfázové vinutí napájeno vždy jen pod vlakem a částečně před ním. Jelikož vlak začne levitovat až při určité rychlosti, tak se musí rozjet klasickým způsobem. Tedy vlak musí být při rozjezdu a dojezdu vybaven koly dosedající na koleje nebo pneumatiky, které by se v určité rychlosti zvedly do výšky 100-150 milimetrů vlivem zapojení levitační síly. [1] [4]



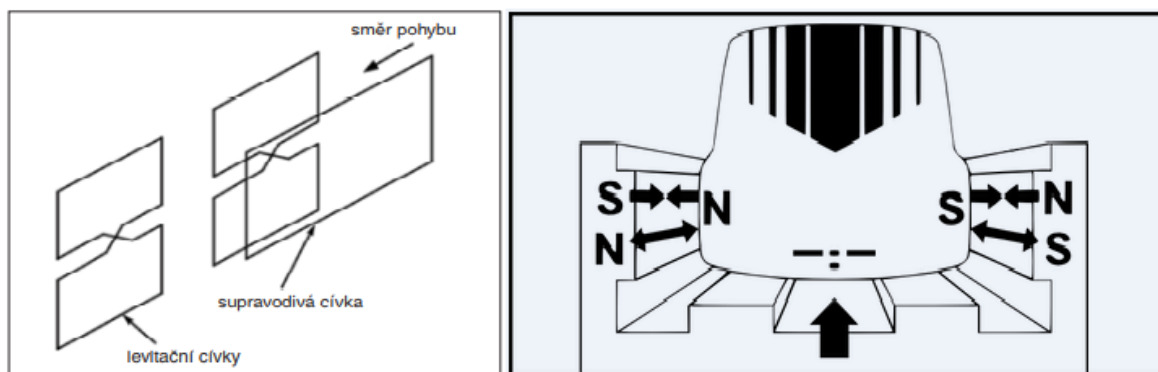
Obr. 23. Starší koncepce vlaku na principu EDS. (převzato z [4])

Pro novější typy SC Maglev byla využita technologie (obr. 24) levitačních cívek s nulovým tokem, které jsou zabudovány včetně trojfázového vinutí v bočních stěnách dráhy. Dráha je konstruována z železobetonu ve tvaru písmenu „U“, která obklopuje vlak a zabraňuje jeho vykolejení. Levitační cívky jsou uloženy v uspořádání 2x2 na každé straně, a jsou k sobě zapojeny, aby proud dolní cívkou protékal v opačném směru než horní cívkou. SCM je umístěn naproti mezeře mezi levitačními cívkami.



Obr. 24. Průřez jízdni dráhou a vozidlem. (převzato z [4])

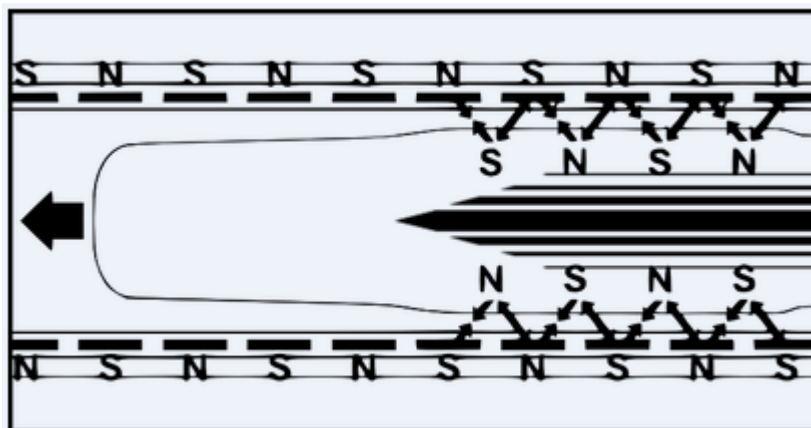
Jakmile se začne vlak pohybovat, začnou se v levitačních cívkách indukovat proudy a z hlediska směrů proudů se horní cívka spolu s SCM budou přitahovat, a naopak dolní s SCM odpuzovat. Tím se bude vlak zvedat nahoru a začne levitovat (obr. 25). Cívky nejen že plní tuto levitační funkci, ale také plní funkci stabilizační. Jsou totiž spojeny pod dráhou s cívkami na druhé straně, a zajišťují setrvání vlaku v ose dráhy.



Obr. 25. Zapojení levitačních cívek a supravodivé cívky. (převzato z [4] a [35])

Dále je na obr. 26 vidět, čím je zapříčiněný pohonný systém vlaku. Trojfázové vedení je napájeno střídavým proudem, tím se vytvoří magnetické síly se střídajícími póly. Supravodivý magnet je vždy s následující cívkou ve směru pohybu přitahován. A s cívkou, kterou minul odpuzován. Samozřejmě se vlak musí pohybovat také určitou rychlostí, jako u předchozí starší koncepce, aby se v levitačních cívkách indukovaly dostatečně velké

proudy. Dále se také zapíná jen ta část trojfázového vinutí, kde vlak projíždí. Pro brzdění je vlak vybaven jak brzdou rekuperační, tak i třecí a aerodynamickou. [1] [4] [35]



Obr. 26. Pohonný systém. (převzato z [35])

2.2.3 Porovnání vlaků na principu EMS a EDS

Hlavní rozdíl mezi systémy je samozřejmě už zmíněná vlastnost, že levitační systém EMS dokáže levitovat při nulových rychlostech na rozdíl od systému EDS. Dále u systému EDS je zapotřebí kabinu cestujících stínit, kvůli pronikajícímu vysokému magnetickému poli, což u systému EMS není potřeba kvůli nízké magnetické indukci $100 \mu\text{T}$. Další nevýhodou EDS systému je jeho kryotechnické zařízení, které je zapotřebí ke chlazení supravodivých cívek. Nevýhodou EMS systému jsou složité regulace budícího proudu a menší vzduchová mezera mezi vozidlem a jízdni dráhou, které vedou k nárůstu nákladů na realizaci. Další nevýhodou oproti EDS systému je vyšší hmotnost a nižší stabilita. [1]

3 Potenciál aplikací v budoucnu

V této kapitole je popsáno, v jakých oblastech dochází k využití magnetických ložisek na projektech, které se uskutečnily v nedávné minulosti. Předpokládá se, že v těchto zmíněných oblastech bude využíváno magnetických ložisek v budoucnu na základě popsanych skutečností. Dále je ukázáno, kde ve světě došlo nebo dojde k realizaci vlaků Transrapid, SC Maglev a dalších systémů.

3.1 Magnetická ložiska

3.1.1 Kompresor

Magnetická ložiska našla svoje uplatnění při těžbě plynu v kompresorech. Kompresor dodává plynu požadovaný tlak, aby byl potrubím tlačěn spotřebiteli. V potrubí plyn ztrácí tlak, a tak se musí po určitých kilometrech znovu stlačit. Proto firma Waukesha bearing dodala 4 aktivní magnetická ložiska (AMB) pro potrubní kompresor společnosti Gazprom. Společnost měla za cíl odstranit olej v hydrodynamických ložiskách, zajistit požární bezpečnost a spolehlivost. Po 10 000 hodinách provozu byla zjištěna 95% spolehlivost, a na základě tohoto úspěchu schválila společnost Gazprom firmě Waukesha bearings dodávku dalších AMB pro budoucí projekty. [42]

Další významnou firmou pro výrobu mnoha typů ložisek je společnost SKF, která vyrábí magnetická ložiska přes 40 let. Vyrobita více než 130 000 magnetických ložisek a vysokootáčkových elektromotorů. Zajímavé je, že má už přes 1000 instalací v těžkém průmyslu při těžbě ropy a plynu. Například v roce 2013 dodala firmě MAN Diesel & Turbo aktivní magnetická ložiska do podmořského kompresoru. Většinou se komprese plynu provádí na plošinách nebo na pevnině, což je velmi daleko od vrtu. Proto se ropná společnost Statoil (dnes Equinor ASA) rozhodla, jako první na světě, umístit kompresor na dno moře (Severní moře, hloubka 300 metrů), co nejbližší k vrtu, kvůli ušetření místa a maximalizaci těžby. S tímto systémem se zvýšily otáčky, omezila údržba a lze je ovládat dálkově. Navíc podmořský kompresor s AMB výrazně sníží unikání plynů. [43] [44] [45] [46]

3.1.2 Parní turbína

Další využití aktivních magnetických ložisek přišlo v roce 2015. Firma Siemens dodala parní turbínu s magnetickými ložisky do Jänschwaldské elektrárny u Berlína. Turbína zde slouží pro pohon čerpadel. Elektrárna využívá dalších 11 turbín, ale zatím jen s klasickými ložisky, které potřebují k provozu stovky litrů oleje. Zatímco u levitačního systému turbíny je zapotřebí méně jak 10 litrů, pro řídicí ventily k regulaci páry. Turbína běží spolehlivě rychlostí až 5 700 ot/min. Siemens uvedl, že aktivní magnetická ložiska lze aplikovat do jakékoli parní turbíny s hmotností do 10 tun s výkonem od 45 kW do 40 MW. [63] [64]

3.1.3 Setrvačnick

Magnetická ložiska také našla uplatnění ve vesmíru. Jelikož klasické ložiskové systémy využívají maziva, která musí vydržet dlouhou dobu ve vakuu a potřebují pro svoje zachování složité technologické postupy a speciální vlastnosti. Ve vesmíru totiž dochází k daleko rychlejšímu vypařování maziv, a při ztrátě oleje by došlo k zadření mechanismu. Navíc systémy musí vydržet i teploty v rozmezí -250 °C až 250 °C, protože při vysokých teplotách se olej tepelně rozkládá, a naopak při nízkých teplotách se stává moc viskózním, a jiné další specifické vlastnosti pro vesmír. Proto NASA sestrojila setrvačnick s využitím magnetických ložisek (obr. 27). Setrvačnick slouží pro ukládání elektrické energie do kinetické energie. Jeho hlavní části jsou tedy setrvačnick, který je uložený v magnetických ložiskách a je spojen s motorem respektive s generátorem. Celý systém pak funguje tak, že fotovoltaické panely vyrobí elektrickou energii, která se v motoru přemění na mechanickou a setrvačnick se roztočí. Při odebírání kinetické energie se generátorem vyrábí elektrická energie a rychlost setrvačnicku klesá. Rychlost takového setrvačnicku se pohybuje od 20 000 až 60 000 ot/min a jeho kapacita je 525 Wh. Setrvačnick nebo-li gyroskop, lze také použít pro zachování stability, například u fotovoltaických panelů Mezinárodní vesmírné stanice (ISS). [47] [48] [49] [50]



Obr. 27. Setrvačnick NASA G2. (převzato z [48])

3.1.4 Ventilátor

Magnetická ložiska také lze objevit ve ventilátorech v počítačích od firmy Corsair. Většinou obyčejné ventilátory při zvýšení otáček, pro vyšší chladicí účinnost, souvisí s velkým hlukem. Tento problém řeší ložisko na magnetickou levitaci, které zvýší rychlost o 20 procent oproti klasickému ložisku. Jejich rychlosti dosahují na 2400 ot/min, čímž napomáhají k lepšímu proudění vzduchu, navíc bez přítomnosti hluku. [77]

3.2 Dopravní systémy

3.2.1 Chuo Shinkansen

Chuo Shinkansen je japonská navržená linka, kde bude jezdit vlak SC Maglev. Dráha bude spojovat stanici Shinagawa v Tokyu se stanicí Nagoya v prefektuře Aichi. V obr. 28 je také vidět trať vysokorychlostního železničního vlaku Tokaido Shinkansen. Za provoz dráhy, která bude dlouhá 285,6 kilometru, bude zodpovědná už zmíněná společnost JR Central. Vlak bude jezdit rychlostí kolem 500 km/h na trase, která bude mít minimální poloměr křivky dráhy 8000 metrů (u Tokaida 2500 metrů). Tím na vlak budou působit daleko menší boční síly. Dráha je momentálně ve výstavbě a měla by být dokončena roku 2027 s tím, že pokud vše dopadne dobře, dojde do roku 2037 (původní plán do 2045) k rozšíření trasy do města jménem Osaka. První plánovanou část by měl vlak urazit za 40 minut. Po rozšíření za 67 minut. Dráha bude spojovat nám již známou zkušební dráhu v prefektuře Yamanashi a bude 246,6 kilometrů vedeno v tunelech, jelikož v oblastech

výstavby jsou hory. Celková výstavba bude stát 9 bilionů jenů, což je v přepočtu 1,82 bilionu Kč. [58] [59]



Obr. 28. Mapa japonských linek Shinkansenů Chuo a Tokaido. (převzato z [58])

3.2.2 Shanghai Transrapid

Shanghai Transrapid je vlaková linka vybudovaná v Číně pro vlak Transrapid 08 popsáný v bodě 2.2.1. Dříve se uvažovalo o prodloužení dráhy až do města Hangzhou, ale plány byly pozastaveny. Také se přemýšlelo o využití levitačního systému z města Shanghai do Peking, ale přednost dostaly vlaky, které využívají vysokorychlostní železnice, s ohledem na fakt, že by výstavba dráhy pro levitující vlak byla dvakrát dražší. [51] [57]

3.2.3 Incheon

V Jižní Koreji byla v roce 2016 otevřena městská dráha, která spojuje letiště Incheon (největší letiště v Jižní Koreji) a nádraží Yongyu. Vlak byl vyroben v Jižní Koreji a funguje na principu EMS a jeho pohonem je lineární indukční motor (LIM). Dráha je dlouhá 6,1 kilometru a vlak jezdí rychlostí 110 km/h. Zajímavostí je, že tato linka je provozována zdarma. [56]

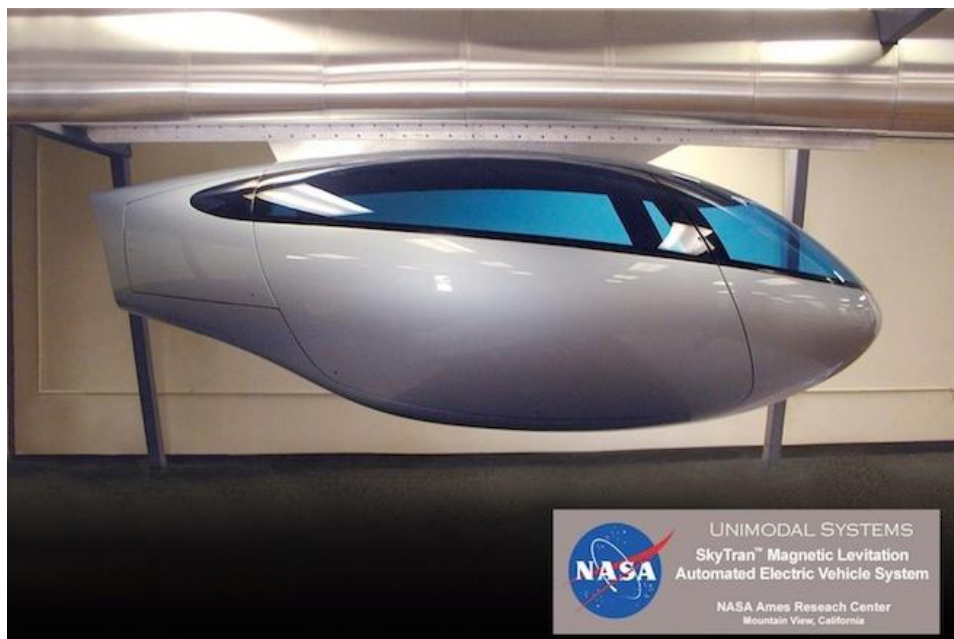
3.2.4 Linimo

Dále je také magnetická levitace využívána u městského vlaku Linimo s technologií, která je podobná EMS. Linka má na dráze dlouhé 8,9 kilometru 9 stanic. Rychlost tohoto vlaku je 100 km/h. Vlak zažil už jisté technické potíže, když při překročení kapacity lidí nebyl schopný levitovat. Nevýhodou je, že vlak při překročení rychlosti větru 25 m/s, musí být vypnut s ohledem na bezpečnost. [54] [55]

Naplánovaných projektů je mnoho (například v USA), ale většinou ani není jisté, jestli se projekt zrealizuje. V hodně případech totiž dochází k jejich zamítnutí.

3.2.5 SkyTran

SkyTran je nový návrh vozidel, který by se mohl uplatnit v budoucnu v konceptu inteligentního města (Smart city). Vozidla by měly zefektivnit dopravu ve městech s hustým silničním provozem. Poprvé byl navržen roku 1990 vynálezcem, který se jmenoval Douglas Malewicki. Původně měl využívat pasivní levitační systém Inductrack. S využitím tohoto systému by byl zapotřebí lineární motor, aby systém začal levitovat. Po problémech se systémem Inductrack se od tohoto záměru opustilo, a byl vynalézán jiný druh pasivní levitace, o kterém se z počátku nesmělo mluvit. Dodnes se konkrétně neví, jak celý levitační pohon funguje. Vozidlo je ve tvaru lusku a využívá jednu vodící dráhu pro magnetické zavěšení. Roku 2009 podepsala NASA se společností Unimodal smlouvu o spolupráci, za účelem testování vozidla, které je vidět na obr. 29. NASA poskytovala k testování inteligentní řídicí systém, který měl pomoci při vývoji vozu a jeho řízení. Roku 2014 došlo k dohodě mezi Unimodal a Izraelským leteckým průmyslem, o postavení zkušební dráhy dlouhé 400 až 500 metrů. Poté bylo v plánu zasíťovat celé město Tel Aviv, které je druhé nejlidnatější město po Jeruzalému. Systém by ve městě řešil dopravní situaci, kde často dochází k dopravním kongescím. Plánovaná dostavba zkušební trati měla být do roku 2015, ale nestalo se tak. Nyní webová stránka projektu SkyTran není v provozu a společnost vynalézající SkyTran na sociální síti tvrdí, že omezuje svoje informace veřejnosti, aby se mohli plně věnovat svému projektu. Tento druh dopravy by mohl být jednou velice rozšířený a nemusí to být zrovna SkyTran. [65] [66] [74] [75] [76]



Obr. 29. Vyrobené vozidlo s částí dráhy. (převzato z [71])

4 Porovnání levitačních systémů se standardními řešeními

4.1 Magnetická ložiska

Největší výhodou magnetických ložisek oproti klasickým ložiskům je pochopitelně jejich funkce bez tření. Z toho logicky plyne, že není zapotřebí žádných maziv a lze je použít tam, kde by maziva z klasických ložisek narušovala výrobní procesy. Je možné je tedy použít v oblastech citlivých na hygienické podmínky, například v potravinářském průmyslu nebo v lékařství. Ekologická šetrnost je dalším z několika výhod, takže je lze použít na chráněných oblastech, kde je nepřipustný únik látek z maziv. Jsou také o hodně tišší, což zvedá jejich reputaci s ohledem na využití v některých místech. Bez prakticky nulového tření nevzniká teplo a tím lze ušetřit na různých chladicích zařízeních. Nemusí být přítomna žádná čerpadla pro proudění maziv a jiné další zařízení s tím spojené. Mezi jejich další výhody patří životnost, bezúdržbovou a ovládání (AMB) ze vzdálených míst a kontroly chování rotoru. Z toho vyplývá, že je lze použít tam, kde je špatný přístup pro údržby a opravy. Ovladatelnost znamená, že řídicí systém reguluje proud 10 000 krát za sekundu, a tím lze i aktivně tlumit vibrace rotoru. Také je možnost využití v různých prostředích, jako jsou vysoké nebo nízké teploty, vakuum, v agresivních prostředích apod. Samozřejmě dosahují oproti klasickým ložiskům extrémních rychlostí až 200 000 ot/min (většinou laboratorní podmínky). Ve vyvinutých motorech dokážou ložiska zvládnout 10 000 až 30 000 ot/min. Objevují se názory, že magnetická ložiska mají sice několikanásobnou pořizovací cenu, ale v konečném důsledku, při odpadnutí údržbových nákladů, jsou levnější. [1] [15] [60] [61]

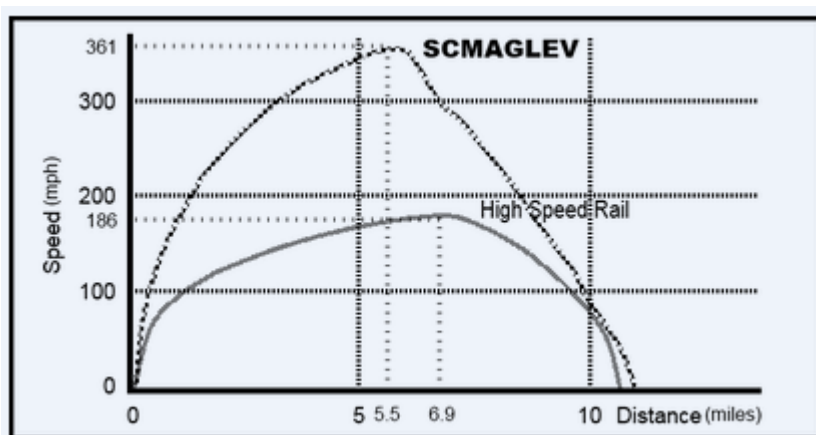
Nevýhodou AMB oproti klasickým ložiskům je jejich několikanásobně větší hmotnost, délka, šířka a také pořizovací cena. Mají daleko menší dynamickou tuhost a nosnost (u AMB několik tun). Typické zatížení u magnetických ložisek je 40 N/cm², naopak například u hydrodynamických ložisek zatížení přesahuje hodnotu 300 N/cm². Další velkou nevýhodou oproti klasickým ložiskům je, že při výpadku napájení nebo řídicího systému, musí být zajištěno dobré tlumení nebo jeho zálohování. Nevýhodou by také bylo dodání klasického ložiska, jelikož by se změnila dynamická vlastnosti AMB. Dále se také musí počítat s oteplením vlivem ztrát vířivých proudů ve statoru a Jouleovo ztrát ve vodičích, což u klasických ložisek odpadá. Objevují se také názory, že mnoho strojů, které byly vyvinuty s aktivním magnetickým ložiskem, byly staženy. [1] [62]

4.2 Dopravní systémy

4.2.1 Vlak na magnetickou levitaci v porovnání s železničním vlakem

Dopravní levitační systémy nejsou založené na adhezy, jako je tomu u jiných dopravních pozemních prostředků. Tím, že levitují, tak dosahují daleko většího zrychlení, brzdění a především větších rychlostí. To samozřejmě zvyšuje komfort pro cestující. V obr. 30 je závislost dráhy na rychlosti vysokorychlostního železničního vlaku a rychlovlaku SC Maglev. Nyní zkusíme porovnat železniční vlak TGV (Francie) a SC Maglev v Japonsku. Vlak TGV v roce 2007 vytvořil stále trvajícím železničním rekord s rychlostí 574,8 km/h, a levitační vlak LO rekord 603 km/h. První zmiňovaný vlak potřeboval na tuto rychlost ujet vzdálenost 72 kilometru, zatímco LO jen 22 kilometru. Z toho je jasně vidět o kolik má vlak SC Maglev větší zrychlení. Mezi další výhody levitačního vlaku oproti klasickému je jeho téměř tichý provoz. S tím i odpadá mnoho diskuzí o nepříjemném hluku a stavění protihlukových bariér. Všechno je bezkontaktní, takže není zapotřebí instalovat trolejové vedení, z toho vyplývá i vyšší životnost. Kromě tichého provozu nejsou přítomny vibrace a jeho spotřeba je stejná nebo dokonce i menší. Při dnešním světovém trendu hybridních automobilů a při tlaceni EU na automobilové výrobce z hlediska snížení emisí, jsou levitační vlaky tím vhodným. Bezpečnost je také vyšší než u klasického vlaku, jelikož dráhy jsou vedeny tunely nebo na vysokých mostech. Nehrozí tedy srážka na přejezdech s automobily nebo s lidmi. Pokaždé to nebudou zákony zakazovat, tak lze pod tunely vést i silniční dopravu. [1] [33] [35]

Lze s jistotou říci, že mezi hlavní nevýhody oproti klasickému řešení patří investiční náklady na výstavbu. Tyto náklady mohou vyšplhat, až do řádu bilionu Kč. Další nevýhodou je také doba, kdy systém vznikl. Jelikož v dnešní době se už každý dostane tam, kam potřebuje v pohodlí svého auta. Dále k tomu, aby došlo k plnému využití systému, je zapotřebí vybudovat dosti hustou síť drah, které naopak klasická železnice má. A to potrvá možná i pár stovek let.



Obr. 30. Průběhy jízd SC Maglev a vysokorychlostního železničního vlaku. (převzato z [35])

4.2.2 Porovnání městské dopravy SkyTran s městskou tramvají

Systém pro městskou přepravu SkyTran oproti klasické tramvaji využívá kabinky, které jsou zavěšené v úzké vodící dráze na principu pasivní magnetické levitace (obr. 31). Tím tedy odpadá tření a nedochází k opotřebování, a také lze jet daleko většími rychlostmi. Kabinky by mohly dosahovat až 250 km/h, což je ohromný rozdíl například oproti železničním městským tramvajím v USA (Light rail), které dosahují maximálně 106 km/h.



Obr. 31. Výhoda vozidla SkyTran i oproti automobilům. (převzato z [71])

Projekt SkyTran také překvapuje svojí cenou, která je odhadovaná na 10 milionů dolarů na kilometr. U tramvají v USA to je 62 milionů dolarů na kilometr. Jedna kabinka váží něco přes 170 kilogramů, což je oproti hmotnosti klasické tramvaje nesrovnatelně malá hodnota. Dále oproti klasické tramvaji nebudou skoro žádné čekací doby, ale kdykoliv na nástupišti bude připravené nové vozidlo. Uvažuje se také o aplikaci v chytrém telefonu, kterou by se kabina přivolávala. Celý systém by měl převést 14 000 lidí za hodinu. Jelikož je dráha umístěna na sloupech, dochází k úspoře místa oproti tramvaji, která jezdí na širší dráze na zemi. Dráha může být vedena přes ulici, chodníky, může být umístěna na střeších nebo procházet budovy. Lidé by pak nastupovali na nástupišti třeba v objektu své firmy. V obr. 32 vidíme, že nástupiště bude provedené ve výšce, tím lze také ušetřit daleko víc místa, protože nástupiště může být provedené různými způsoby, i například přes silnici nebo mezi domy, a tak se místo vzniklé na zemi může využít pro jízdu autem. Výhodou nástupiště je, že při zastavení vozidla nemusí stát jedoucí vozidla za ním, ale jednoduše ho předjedou.



Obr. 32. Provedení nástupiště. (převzato z [70])

Odpadají troleje a s nimi spojené technické problémy, dochází k nárůstu životnosti. Nemůže dojít k vykolejení vozidla, což je zajištěné vodící dráhou. Vozidlo nebude vykazovat hluk. Dráhy jsou vedeny ve výškách, a tak nemůže dojít k dopravním nehodám s auty a chodci. Tím ne že se předejde zbytečným ztrátám na životech, ale také se zamezí dlouhým odstavením městské dopravy na několik minut, což se u tramvají stává celkem často. Také vzhledem k výšce dráhy nemůže dojít k prostojům vlivem semaforů, které regulují tramvaje. Vozidla bude ovládat inteligentní řídicí systém, takže není zapotřebí proškoleného řidiče, který je u některých tramvají dosud nezbytnou součástí. Ve vozidle by

si každý cestující navolil přes monitor svůj cíl a systém by vyhodnotil nejkratší cestu ke zvolenému místu (obr. 33). [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73]



Obr. 33. Monitor, kde by se volil požadovaný cíl. (převzato z [69])

Nevýhoda systému SkyTran oproti tramvaji je určitě kapacita cestujících. Zatímco do tramvaje se vejde přes 200 osob, tak do jedné kabiny se vejdou 2 osoby. A záleží, jakou intenzitou budou lidé opouštět nástupiště, aby se netvořili fronty, například při umístěném nástupišti v budově firmy. Dále se do kabiny nevtěsní kočárky s dětmi, vozíčkáři, nebo cyklisti. Jelikož u některých nástupišť vozidla SkyTran budou schody, jen těžce se do nich budou dostávat lidé například se zlomenou nohou, nebo starší lidé. Provozovatel by měl zařídit všem osobám jednoduchý přístup, jakož tomu je u tramvaji. Mezi další nevýhody se také řadí složitost inteligentního řídicího systému. S monitorem, ve kterém by se volila trasa, nebudou všichni jen tak lehce umět. Důležitou věcí je taky fakt, že SkyTran, na rozdíl od tramvaje, nemá zažitou důvěru od lidí, kterou si bude muset časem postupně získávat. [65] [66] [67] [68] [69] [70] [71] [72] [73]

U tohoto systému nebyly vydány konečné technické informace a je to záležitost budoucnosti. Je možné, že se mnoho věcí časem změní. Může se také stát, že společnost vyvíjející projekt SkyTran nedokončí.

Závěr

Cílem této práce bylo přehledné popsání problematiky magnetické levitace a jejího využití. V první kapitole byly rozpracovány jednotlivé typy magnetických levitací a popsány jejich principy. Druhá kapitola pojednávala o využití magnetické levitaci v průmyslu a dopravě, kde jsme si podrobněji rozpracovali magnetická ložiska, a poté dopravní systémy na principech elektromagnetické a elektrodynamické levitace. Třetí kapitola byla o potenciálu aplikací v budoucnu, kde byli zmíněné oblasti, ve kterých se aplikace využívají a měli by využívat v budoucnu. Ve čtvrté kapitole byly srovnány magnetická ložiska a levitační dopravní systémy s klasickými řešeními.

Magnetické levitační dopravní systémy mají zatím jen malé uplatnění oproti standardním řešením, protože spousta plánů, kterých je navrženo, je kvůli ohromně vysoké ceně zamítnuto. Ale v budoucnu by se mohla začít více rozrůstat, a to hlavně ve státech, které jsou na tom ekonomicky lépe. Magnetická ložiska jsou na tom podobně, ale existuje už mnoho firem, kde se úspěšně využívají. Vše je možná jen otázkou času a financí, protože levitační systémy jsou dobře připraveny, aby se mohly uplatnit v budoucnu. I když existuje spousta lidí, které jsou názoru, že magnetická ložiska se nikdy nebudou využívat ve velkém měřítku. Je to však jen názor, stejně tak jako, že se využívají budou. Stále však existuje řada výzkumníků, které se zabývají touto problematikou a přináší každý rok pozoruhodných výsledků s ohledem na rychlost, zatížení a dalších parametrů.

V budoucnu by určitě stálo zauvažovat o diplomové práci na simulaci a návrh magnetického ložiska.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, DANIEL. *Elektrodynamika v energetice*. Praha: Ben-technická literatura, 2005. ISBN 80-7300-164-0.
- [2] MAYER, DANIEL. *Magnetická levitace a její využití*. Elektro 1. Odborný časopis pro elektrotechniku. Vyd. 1.1.2003.
- [3] MAYER, DANIEL. *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1)*. Elektro 12. Odborný časopis pro elektrotechniku. Vyd. 12.12.2007.
- [4] MAYER, DANIEL. *Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (2)*. Elektro 1. Odborný časopis pro elektrotechniku. Vyd. 2008.
- [5] Supravodivost a levitace. [online]. [Cit. 24.2.2018]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-a-levitace>
- [6] Supravodivost – naděje pro 21. století. [online]. [Cit. 24.2.2018]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/popularizace/supravodivost-nadeje-pro-21-stoleti>
- [7] Diamagnetismus, paramagnetismus, feromagnetismus. [online]. [Cit. 21.2.2018]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_ekniha-001/pdf/282.pdf
- [8] Design formulas for permanent-magnet bearings. [online]. [Cit. 24.2.2018]. Dostupné z: <http://mechanicaldesign.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?articleid=1447803>
- [9] Maglev: magnetic levitating trains. [online]. [Cit. 1.3.2018]. Dostupné z: <https://sites.tufts.edu/eeseniordesignhandbook/2015/maglev-magnetic-levitating-trains/>
- [10] Francis C, Moon, Pei-Yen Chang. *Superconducting Levitation: Applications to Bearing & Magnetic Transportation*. Wiley VCH, 2004. ISBN-10: 0-471-55925-3.
- [11] Axial Halbach magnetic bearings. [online]. [Cit. 2.3.2018]. Dostupné z: <https://www.techbriefs.com/component/content/article/tb/techbriefs/mechanics-and-machinery/2954>
- [12] Nové možnosti magnetické levitace v dopravě?. [online]. [Cit. 2.3.2018]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave--14291>
- [13] Active magnetic bearing design and characterization for high temperature applications. [online]. [Cit. 9.3.2018]. Dostupné z: https://infoscience.epfl.ch/record/87518/files/EPFL_TH3616.pdf

- [14] How to model magnetic bearings in COMSOL multiphysics. [online].
[Cit. 9.3.2018]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/modeling-magnetic-bearings-in-comsol-multiphysics/>
- [15] Magnetická ložiska SKF – od inovace k osvědčeným řešením. [online].
[Cit. 9.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/magneticka-loziska-skf-od-inovace-k-osvedcenym-resenim--13657>
- [16] Earnshaw's theorem. [online]. [Cit. 15.3.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw%27s_theorem
- [17] Magnetic bearing. [online]. [Cit. 9.3.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Magnetic_bearing
- [18] An axial position sensor for active magnetic bearings. [online]. [Cit. 23.3.2018].
Dostupné z: <https://www.calnetix.com/sites/default/files/6.pdf>
- [19] Snímače polohy 1. [online]. [Cit. 23.3.2018]. Dostupné z:
<http://slideplayer.cz/slide/1969902/>
- [20] Passive magnetic bearings with permanent magnets. [online]. [Cit. 26.3.2018].
Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1060019>
- [21] Passive bearings. [online]. [Cit. 26.3.2018]. Dostupné z:
<http://www.magneticbearings.org/technology-2/technologies/passive-bearings/>
- [22] Magnetic bearings. [online]. [Cit. 26.3.2018]. Dostupné z:
<http://slideplayer.com/slide/4787433/>
- [23] Magnetic bearings information. [online]. [Cit. 26.3.2018]. Dostupné z:
https://www.globalspec.com/learnmore/mechanical_components/bearings_bushings/magnetic_bearings
- [24] Solution of contact-free passive magnetic bearing. [online]. [Cit. 27.3.2018].
Dostupné z: http://iris.elf.stuba.sk/JEEEC/data/pdf/11-12_103-03.pdf
- [25] Návrh a realizace supravodivého ložiska. [online]. [Cit. 2.4.2018]. Dostupné z:
<https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/soutez/sidlo.pdf>
- [26] Operation and design selection of high temperature superconducting magnetic bearings. [online]. [Cit. 2.4.2018]. Dostupné z:
<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0953-2048/17/10/020>
- [27] Analyses and test of HTS bearing for flywheel energy system. [online].
[Cit. 2.4.2018]. Dostupné z:
<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6587749>

- [28] Stabilization of electrodynamic bearings with active magnetic dampers. [online]. [Cit. 7.4.2018]. Dostupné z: https://infoscience.epfl.ch/record/223061/files/EPFL_TH7334.pdf
- [29] Rotordynamic stabilization of rotors on electrodynamic bearings. [online]. [Cit. 7.4.2018]. Dostupné z: <https://www.intechopen.com/books/advances-in-vibration-engineering-and-structural-dynamics/rotordynamic-stabilization-of-rotors-on-electrodynamic-bearings-using-elastic-supports>
- [30] Maglev rychlovlaky. [online]. [Cit. 8.5.2018]. Dostupné z: <https://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/maglev-rychlovlaky/>
- [31] SCMaglev. [online]. [Cit. 8.5.2018]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/SCMaglev#Japan>
- [32] Maglev. [online]. [Cit. 18.5.2018]. Dostupné z: <http://www.skyscrapercity.com/showthread.php?t=168302&page=20>
- [33] Rychlovlak maglev dosáhl rekorních 603 km/h. [online]. [Cit. 18.5.2018]. Dostupné z: <https://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/rychlovlak-maglev-dosahl-rekordnich-603-kmh/>
- [34] Survey of foreign maglev systems. [online]. [Cit. 18.5.2018]. Dostupné z: <https://www.osti.gov/servlets/purl/10134413>
- [35] SC Maglev. [online]. [Cit. 18.5.2018]. Dostupné z: <https://www.scmaglev.com/>
- [36] Wir erinnern uns an das Transrapid-Unglück vor 10 Jahren. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: <https://www.el-news.de/niedersachsen/emsland/lathen/wir-erinnern-uns-an-das-transrapid-unglueck-vor-10-jahren/>
- [37] Transrapid 04. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_04
- [38] Transrapid 05. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_05
- [39] Transrapid 06. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_06
- [40] Transrapid. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transrapid>
- [41] Transrapid 08. [online]. [Cit. 25.5.2018]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_08

- [42] Gazprom exceeding 95% availability in pipeline. [online]. [Cit. 28.5.2018].
Dostupné z: <https://www.waukbearing.com/en/magnetic-bearing-systems/case-studies/gazprom-case-study/>
- [43] Magnetická ložiska a elektromotory s permanentními magnety. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <http://www.skf.com/cz/products/magnetic-systems/index.html>
- [44] Magnetic bearings tough enough for the depths of the sea. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: http://www.skf.com/group/news-and-media/news-search/2016-05-05_magnetic_bearings_tough_enough_for_the_depths_of_the_sea.html
- [45] Equinor. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Equinor>
- [46] Magnetická ložiska SKF byla nainstalována do prvního podmořského systému komprese plynu na světě společnosti Statoil. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: http://www.skf.com/cz/news-and-media/news-search/2015-10-10_SKF_magnetic_bearings_installed_in_worlds_first_subsea_gas_compression_system_operated_by_Statoil.html
- [47] Tribologické problémy mechanismů v kosmu. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-12018/tribologicke-problemy-mechanizmu-v-kosmu.html>
- [48] Flywheel energy storage. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage#NASA_G2_flywheel_for_spacecraft_energy_storage
- [49] Gyroscope. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Gyroscope>
- [50] Gyroskop. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Gyroskop>
- [51] Shanghai maglev train. [online]. [Cit. 28.5.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Shanghai_maglev_train
- [52] Emsland test facility. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Emsland_test_facility
- [53] Transrapid München. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z: https://de.wikipedia.org/wiki/Transrapid_M%C3%BCnchen
- [54] Linimo. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z: <http://www.linimo.jp/en/company/>

- [55] Linimo. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/Linimo>
- [56] Incheon airport maglev. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Incheon_Airport_Maglev
- [57] Beijing-Shanghai high-speed railway. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Beijing%E2%80%93Shanghai_high-speed_railway
- [58] Superconducting maglev technology: Future and development. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
<http://www.japanpolicyforum.jp/archives/economy/pt20150605123457.html>
- [59] Chuo Shinkansen. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Ch%C5%AB%C5%8D_Shinkansen
- [60] Magnetická ložiska. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.mmspektrum.com/clanek/magneticka-loziska.html>
- [61] Bearings that pack a punch. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
<https://www.nytimes.com/2010/01/03/business/03novel.html>
- [62] Why magnetic bearings have problem. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
<https://bentlybearings.com/wp-content/uploads/2017/07/Back-to-Basics-Why-Magnetic-Bearings-Have-Problems.pdf>
- [63] Siemens hands over oil-free steam turbine to Vattenfall. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
[https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2015/power-gas/pr2015060247pgen.htm&content\[\]=PG](https://www.siemens.com/press/en/pressrelease/?press=/en/pressrelease/2015/power-gas/pr2015060247pgen.htm&content[]=PG)
- [64] Facts and figures: Oil-free steam turbine. [online]. [Cit. 29.5.2018]. Dostupné z:
https://www.energy.siemens.com/hq/pool/hq/power-generation/steam-turbines/SST-600/downloads/SST-600_Oil-free-steam-turbine_fact-sheet_EN.pdf
- [65] NASA partners to revolutionize personal transportation. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/topics/nasalife/features/unimodal.html>
- [66] SkyTran. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z:
<https://en.wikipedia.org/wiki/SkyTran>
- [67] Light rail. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z:
https://en.wikipedia.org/wiki/Light_rail
- [68] SkyTran: making history with flying pods of the near future. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <http://plugin-magazine.com/driving/skytran-making-history-with-flying-pods-of-the-near-future/>

- [69] SkyTran's levitating pods, a taxi for the sky?. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <https://edition.cnn.com/2015/02/03/tech/skytran-levitating-pods/index.html>
- [70] SkyTran is coming to Tel-Aviv. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <http://www.maglev.net/skytran>
- [71] SkyTran is magnetic sky pods to be tested in obscure Israeli city. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <https://www.greenprophet.com/2014/06/skytrans-magnetic-sky-pods-to-be-tested-in-obscure-israeli-city/>
- [72] SkyTran to build futuristic maglev hover monofil in Israel. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <https://inhabitat.com/skytran-unveils-futuristic-maglev-hover-monorail-for-israel/>
- [73] The futuristic space pod that could solve Israel's housing crisis. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: <https://www.jpost.com/Business-and-Innovation/Health-and-Science/Lofty-thinking-with-SkyTran-463286>
- [74] What are the news from SkyTran and hyperloop?. [online]. [Cit. 1.6.2018]. Dostupné z: 1rsw-systems.com/news/skyway-skytran-hyperloop-2017?lang=en
- [75] SkyTran NASA on BBC Horizon. [online]. [Cit. 2.6.2018]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=QT1CjKtGFZs>
- [76] PARIS AIR FORUM Keynote Jerry Sanders, Président-directeur general SkyTran inc. [online]. [Cit. 2.6.2018]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=4rSvxeK4P4w>
- [77] Magnetic levitation cooling fans. [online]. [Cit. 2.6.2018]. Dostupné z: https://www.corsair.com/corsairmedia/sys_master/productcontent/mlseries-Content-14.pdf