FAKULTA STROJNÍ
ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY
V PLZNI

Studijní program: Strojní inženýrství

Číslo studijního programu: B0715A270013

Studijní specializace: Konstruování strojů a technických zařízení

MAGNETICKÁ LOŽISKA A MAGLEVY

Bakalářská práce

Autor práce: Tomáš Převrátil

Vedoucí práce: Ing. Roman Čermák, Ph.D.

Plzeň 2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	**Tomáš PŘEVRÁTIL**
Osobní číslo:	**S21B0196P**
Studijní program:	**B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace:	**Konstruování strojů a technických zařízení**
Téma práce:	**Magnetická ložiska a MAGLEVy**
Zadávající katedra:	**Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:
Proveďte rešerši aktuálního stavu problematiky v oboru magnetické levitace. Zhodnoťte a porovnejte známé principy. V praktické části práce navrhněte úpravy laboratorního experimentu s magnetickou levitací.
Základní technické údaje:
Tecnické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.
Osnova práce:
1. Rešerše současného stavu poznání.
2. Zhodnocení a porovnání známých principů.
3. Popis laboratorního experimentu.
4. Návrh změn laboratorního experimentu.

Konzultant: Ing.Václav Mašek

Rozsah bakalářské práce: **30-40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle potřeby**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

[1] SCHWEITZER, Gerhard, MASLEN, E.H. (Eds.). Magnetic bearings. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 978-3-642-00497-1
[2] LIU, Zhigang, LONG Zhiqiang, LI, Xiaolong. Maglev Trains – Key Underlying Technologies. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015, ISBN 978-3-662-45673-6
[3] Podkladové materiály, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan

Ing. Zdeněk Chval, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni. Byl/a jsem seznámen/a s tím, že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval/a samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v Seznamu použitých zdrojů, který je součástí této práce a na základě konzultací s vedoucím práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

V Plzni dne:

---

podpis autora

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práce, Ing. Romanu Čermákovi, Ph.D., za řízení práce, pomocí odborných rad, připomínek. Dále bych chtěl poděkovat za poskytnutí podpůrných dat, metodické vedení bakalářské práce a za jeho čas.

Abstrakt

Tato práce se zabývá rešerší magnetických ložisek a MAGLEVů, jako aplikací magnetické levitace. Toho bylo dosaženo pomocí dostupných informací a poskytnuté literatury a podkladů. Ze začátku popisuji základní děje, poznatky, materiály a teorémy, které jsou nutné k pochopení následujících kapitol. Dále popisuji samotné metody, které využívají jak magnetická ložiska, tak i MAGLEVy. Pokračuji s magnetickými ložisky, kde popisuji jejich druhy, to, jak fungují a kde se využívají. Také popisuji jejich hlavní výhody a nevýhody. Od magnetických ložisek se posouvám k MAGLEVům. Opět popisuji jejich funkci, rozdělení, historii. Dále se zaměřuji na MAGLEVy, které jsou v provozu a fungují běžně na denní bázi. Tímto opouštím MAGLEVy, ale ne zcela. Následující kapitola popisuje to, jestli v budoucnu uvidíme magnetickou levitaci častěji než dnes. To znamená, že zde popisuji probíhající projekty, které mají využívat magnetickou levitaci, či čistě jen návrhy. Také se zde zabývám MAGLEVy, které jsou momentálně ve výstavbě. Tím končím teoretickou část mé práce. Praktická část se zabývá popisem a návrhem změn laboratorního experimentu. Jedná se o vlak, který využívá magnetické levitace k nadnášení vlaku nad dráhou. Vlak využívá elektromagnetů k vytvoření magnetického pole a snímačů s řídící jednotkou, které ho v podstatě ovládají. Dále se zabývám simulací onoho magnetického pole, kde využívám softwaru FEMM. Na základě simulací vynáším nasbíraná data do grafů a ty jasně popisují vzniklé závislosti. Posledním krokem bylo vytvoření krytu na popsaný experiment. V této práci jsem popsal principy magnetické levitace. Popsal jsem funkce, vlastnosti, výhody a nevýhody magnetických ložisek a MAGLEVů. A popsal a upravil laboratorní experiment, který se také týkal magnetické levitace.

Klíčová slova

Earnshawův teorém; magnetické ložisko; MAGLEV; supravodivost; elektromagnet; pseudolevitace

Abstract

This thesis deals with the research of magnetic bearings and MAGLEVs as applications of magnetic levitation. This was achieved using available information and provided literature and resources. Initially, I describe the basic processes, concepts, materials, and theories necessary to understand the following chapters. Then, I describe the methods used by both magnetic bearings and MAGLEVs. I continue with magnetic bearings, where I describe their types, how they work, and where they are used. I also describe their main advantages and disadvantages. From magnetic bearings, I move on to MAGLEVs. Again, I describe their function, classification, and history. I then focus on and describe MAGLEVs that are in operation and commonly used on a daily basis. With this, I leave the topic of MAGLEVs, but not entirely. The following chapter discusses whether we will see magnetic levitation more frequently in the future than we do today. This means that I describe ongoing projects that aim to utilize magnetic levitation, or purely proposals. I also cover MAGLEVs that are currently under construction. This concludes the theoretical part of my work. The practical part deals with the description and design of changes to a laboratory experiment. It involves a train that uses magnetic levitation to lift the train above the track. The train uses electromagnets to create a magnetic field and sensors with a control unit that essentially control it. Furthermore, I deal with the simulation of the magnetic field using FEMM software. Based on the simulations, I plot the collected data into graphs that clearly describe the resulting dependencies. The final step was creating a cover for the described experiment. In this thesis, I have described the principles of magnetic levitation. I have described the functions, properties, advantages, and disadvantages of magnetic bearings and MAGLEVs. Additionally, I described and modified a laboratory experiment that also involved magnetic levitation.

Key words

Earnshaw's theorem; magnetic bearing; MAGLEV; superconductivity; electromagnet; pseudolevitation

Obsah

1 Úvod ... 12
2 Magnetická levitace ... 13
2.1 Earnshawův teorém ... 14
2.2 Silové účinky odvozené od energie magnetického pole ... 14
2.2.1 Feromagnetika ... 15
2.2.2 Diamagnetika ... 16
2.2.3 Supravodiče ... 17
2.2.4 Halbachova soustava permanentních magnetů ... 18
2.3 Lorentzova síla a elektromagnet ... 19
2.3.1 Elektromagnetické zavěšení – EMS ... 21
2.3.2 Supravodič jako elektromagnet ... 21
2.3.3 Elektrodynamické zavěšení – EDS ... 22
2.4 Zařízení využívající magnetickou levitaci ... 24
3 Magnetická ložiska ... 25
3.1 Pasivní magnetická ložiska ... 26
3.1.1 Ložiska s permanentními magnety ... 26
3.1.2 Ložiska se supravodičem ... 28
3.1.3 Shrnutí vlastností a aplikace pasivních magnetických ložisek ... 29
3.2 Aktivní magnetická ložiska ... 30
3.2.1 Řídící obvody, snímače a další související systémy ... 32
3.2.2 Shrnutí vlastností a aplikace aktivních magnetických ložisek ... 32
3.3 Hybridní magnetická ložiska ... 34
4 MAGLEVy ... 35
4.1 Transrapid (EMS MAGLEV) ... 35
4.1.1 Historie ... 35
4.1.2 Konstrukce Transrapidu 08 ... 37
4.2 SC MAGLEV (EDS MAGLEV) ... 39
4.2.1 Historie ... 39
4.2.2 Konstrukce L0 MAGLEVu ... 40
4.3 MAGLEVy v provozu ... 43

5 Budoucnost magnetické levitace 44
5.1 MAGLEVy ve výstavbě 45
5.2 Inductrack 46
5.3 Evropa a MAGLEVy 48
6 Popis a návrh změn laboratorního experimentu 49
6.1 Funkce a funkční struktura 50
6.2 Stavební struktura 50
6.3 Detailní pohled na systém 52
6.4 Simulace magnetického pole 53
6.5 Kryt na model vlaku 56
7 Závěr 57

Seznam obrázků

Obr. 1 Klasifikace použití magnetické levitace [4] ... 13
Obr. 2 Levitron [5] ... 16
Obr. 3 Levitující žába nad permanentním magnetem [12] ... 17
Obr. 4 Odklonění a prostup magnetického pole [19] ... 18
Obr. 5 Lineární (vlevo) a válcové (vpravo) řazení Halbachovy soustavy permanentních magnetů [24] ... 19
Obr. 6 Lorentzova síla působící na náboj (vlevo) a na vodič (vpravo) [27] ... 20
Obr. 7 Supravodivý magnet [31] ... 22
Obr. 8 Popis sil v EDS systému [37] ... 23
Obr. 9 Závislost elektromagnetické síly na rychlosti systému pro levitační a brzdící síly [38] ... 23
Obr. 10 SKF magnetické ložisko [42] ... 26
Obr. 11 Permanentní magnetické ložisko zajišťující síly v radiálním směru, pomocí odpudivých sil [43] ... 27
Obr. 12 Magnetické ložisko se stínícím pláštěm [46] ... 28
Obr. 13 Radiální (vlevo) [47] a axiální (vpravo) supravodivá magnetická ložiska [49] ... 29
Obr. 14 Zippeho odstředivka [52] ... 30
Obr. 15 Princip aktivního magnetického ložiska [55] ... 31
Obr. 16 SKF ložisko [58] ... 32
Obr. 17 Schéma setrvačníku [62] ... 33
Obr. 18 Řez hybridním magnetickým ložiskem [65] ... 34
Obr. 19 Transrapid 01 [71] ... 36
Obr. 20 Transrapid 09 [74] ... 37
Obr. 21 Pohled na levitační systém Transrapidu [76] ... 37
Obr. 22 Pole utvářející pohon [77] ... 38
Obr. 23 ML-100 [83] ... 39
Obr. 24 L0 MAGLEV typu SC [84] ... 40
Obr. 25 Jednotka se supravodivým elektromagnetem [85] ... 40
Obr. 26 Princip pohonu SC MAGLEVu [87] ... 41
Obr. 27 Princip levitace SC MAGLEVu [88] ... 41
Obr. 28 Příklad vedení vlaku [85] ... 42
Obr. 29 Šanghajský MAGLEV [92] ... 43
Obr. 30 Fenghuang MAGLEV [98] ... 44

Obr. 31 Země s nejvíce patenty, týkající se magnetické levitace [99] 45
Obr. 32 MAGLEV držící světový rekord [102] 46
Obr. 33 Princip levitace Inductracku [104] 47
Obr. 34 Odpalovací systém navržený společností NASA [36] 47
Obr. 35 Ukázka z testovací jízdy MagRailu od firmy Nevomo [106] 48
Obr. 36 Řetězec pro zpracování signálu 49
Obr. 37 Funkční struktura systému 50
Obr. 38 Stavební struktura systému 51
Obr. 39 Pohled na systém 52
Obr. 40 Detailní řez vlakem 52
Obr. 41 Zjednodušený model elektromagnetu (vlevo) a reálný model elektromagnetu (vpravo) 53
Obr. 42 Rovinný řez modelem v FEMM 53
Obr. 43 Výsledek simulace pro Δy=0,5 mm a I=8 A 54
Obr. 44 Závislost síly na velikosti mezery F-Δy 54
Obr. 45 Závislost síly na velikosti proudu (DC) F-I 55
Obr. 46 Kryt nasazen na modelu vlaku 56

Přehled použitých zkratek a symbolů

AS FST	Akademický senát FST
BOZP a PO	Bezpečnost a ochrana zdraví při práci a Požární ochrana
CIV	Centrum informatizace a výpočetní techniky
ČSN	Česká technická norma
EN	Evropská norma
EU	Evropská unie
FST	Fakulta strojní
HW	Hardware
IS/STAG	Informační systém STAG
KKE	Katedra energetických strojů a zařízení
KKS	Katedra konstruování strojů
ZČU	Západočeská univerzita v Plzni
FEMM	Finite Element Method Magnetics
HTS	High temperature superconductivity
EMS	Electromagnetic suspension
EDS	Electrodynamic suspension
DSP	Digitální signálový procesor
MBB	Messerschmitt-Bolköw-Blohm
KM	Krauss Maffei
SC MAGLEV	Superconducting MAGLEV
JR Central	Central Railway Company
JNR	Japanese National Railways
NASA	National Aeronautics and Space Administration

1 Úvod

Přestože myšlenka využití magnetického pole k levitaci zde byla po mnoho staletí, tak až v 19. století přišel prvotní impuls. Tato technologie se neustále rozvíjela až doposud, kdy jsme schopni magnetickou levitaci realizovat a dokonce uplatnit. Magnetická levitace našla své uplatnění především v magnetických ložiskách a MAGLEVech, přičemž dochází k neustálému výzkumu za cílem využití magnetické levitace v mnoha dalších odvětvích průmyslu. Neustálý výzkum této technologie také naznačuje to, že není zcela probádána a může dojít k jejímu využití, které ještě není zcela známo. Je to technologie, která může mít v blízké budoucnosti více prostoru k uplatnění.

Magnetická ložiska jsou příkladem využití magnetické levitace. Stávají se jasnou volbou pro stroje, kde dochází k vysokým otáčkám hřídele a je potřeba co nejvíce eliminovat tření, mazání a další. Dále můžeme najít magnetická ložiska v prostředí, která nejsou příliš přívětivá a valivá ložiska by je například nemusela zvládnout. Magnetická ložiska patří k prvním součástem, která využívají magnetickou levitaci a jsou využívaná v praxi. Tím, že prošla velmi dlouhým vývojem, tak jsou z technologického hlediska téměř dokončenou kapitolou.

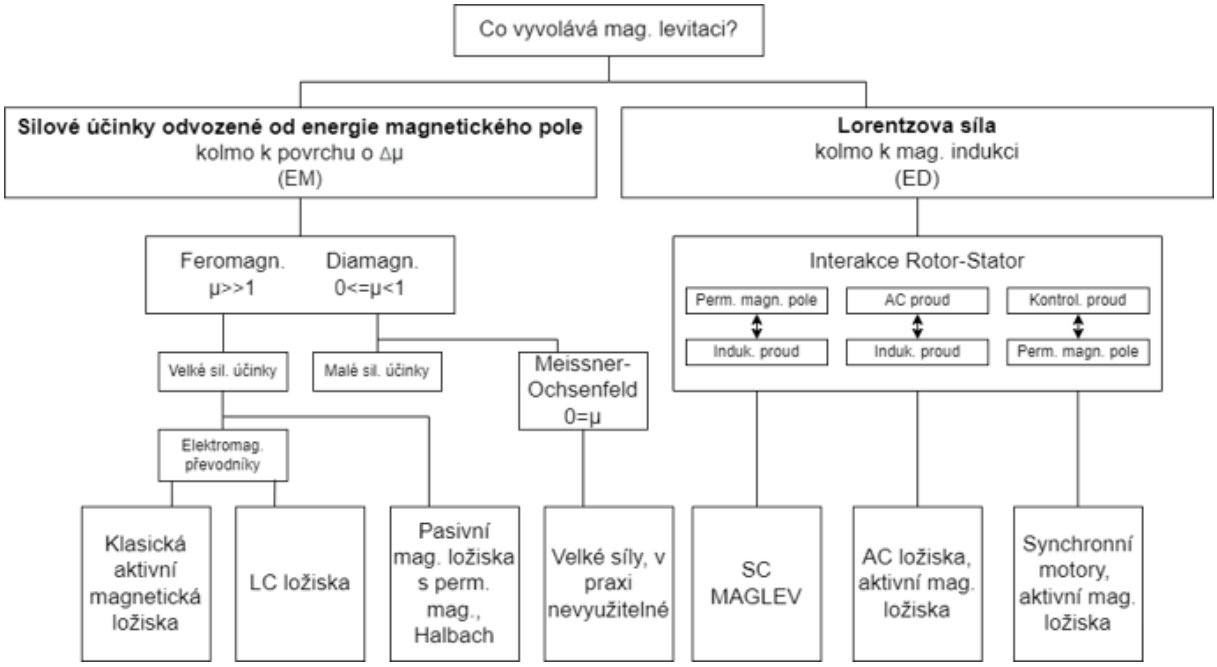
MAGLEVy, neboli vlaky využívající magnetickou levitaci, jsou zařízení, která jsou ve vývoji již téměř sto let. Jeví se jako prostředek, který by mohl nahradit leteckou dopravu, a to především díky své rychlosti. Bohužel jsou velmi finančně náročné, a právě kvůli tomu zatím nedošlo k jejich celosvětovému rozmachu. Přesto se jeví jako možný způsob dopravy v budoucnosti. Součástí práce je popsání vlaku, který využívá magnetickou levitaci a nasimulovat magnetické pole pomocí softwaru FEMM.

2 Magnetická levitace

Magnetická levitace je děj, při kterém dochází k levitaci daného tělesa pouze pomocí působení magnetického pole. Pokud na těleso působí i jiné podpory než magnetické pole, tak můžeme hovořit o tzv. pseudolevitaci. Magnetické síly jsou využity k vyrovnání vnějších zrychlení, která působí na těleso. Tyto magnetické síly musí být velké tak, aby uvedly daný systém do rovnováhy. [1]

Pokud se omezíme na řešení systémů s magnetickou levitací na povrchu naší planety, tak můžeme problém rozdělit do dvou dílčích. Abychom udrželi levitující těleso v rovnováze, musíme nejdříve zaručit jeho zvednutí. To znamená, že je třeba vyvinout zvedací magnetické síly, které budou mít stejnou velikost jako gravitační síly ovlivňující těleso, jen opačně orientované. [2]

Dalším problémem, který je potřeba řešit, je stabilita. Jestliže vytvoříme systém magnetické levitace, který nám zajistí pouze zvednutí tělesa, tak se nejspíše stane, že těleso sklouzne do polohy, ve které na něj nepůsobí zdvihací síly, a těleso spadne. Tedy stabilitou se rozumí utvoření podpůrného systému, který zamezí přestup tělesa do konfigurace, která vyloučí zvedací síly. Stabilitu lze dále rozdělit na statickou a dynamickou. Statická stabilita vypovídá o tom, že pokud levitující těleso vybočíme z rovnovážné polohy, tak to vyvolá výslednou sílu, která se bude snažit vybočené těleso opět vrátit do rovnovážné stále polohy. Dynamickou stabilitu je potřeba řešit, pokud v systému magnetické levitace dochází k vibracím na jednom, či na více členech daného systému. Tyto vibrace mohou být fatální pro levitující těleso, jelikož se může opět dostat do nežádoucí konfigurace a sklouznout. V praxi lze tento problém vyřešit pomocí klasických vnějších tlumení, a to například odporem vzduchu, hydraulickým tlumením nebo přidáním hmoty na konkrétní místo levitujícího tělesa atd. [3]



Obr. 1 Klasifikace použití magnetické levitace [4]

2.1 Earnshawův teorém

Samuel Earnshaw byl matematik, fyzik a kněz narozený v Anglii roku 1805. Je znám především na poli teoretické fyziky, a to zejména díky Earnshawovu teorému. Tento teorém říká: „Soubor bodových nábojů nemůže být udržován v pevně ustálené rovnovážné konfiguraci výhradně prostřednictvím elektrostatické interakce těchto nábojů.“ [5] Toto tvrzení bylo původně použito výhradně pro pole elektrostatické. Ve skutečnosti se toto pravidlo týká magnetického pole. Pro systém magnetické levitace to znamená, že nelze sestavit statický levitující systém, který je pouze složený z paramagnetických a feromagnetických materiálů. Představme si, že máme dva klasické dipólové magnety a položíme je na stůl. Začneme jeden přibližovat stejným pólem k druhému. Zjistíme, že magnet se vychýlí z působení anebo se převrátí. Earnshawův teorém byl dokázán po šesti letech, a to pro prostorově rozlehlá tělesa, pružná tělesa a elektricky vodivá tělesa, mimo diamagnetika. Werner Braunbeck jako první ukázal, že lze využít diamagnetické a supravodivé materiály k podpoře stabilního systému. Braunbeckovo rozšíření Earnshawova teorému popisuje, že magnetické látky s relativní magnetickou permeabilitou $\mu_r > 1$ neumožňují stabilní levitaci, ale látky s relativní magnetickou permeabilitou $\mu_r < 1$, což jsou právě diamagnetické látky, umožňují stabilní levitaci. Diamagnetické látky toto splňují díky tomu, že mají malé odpudivé síly a nikoliv přítažné. Jelikož jsou tyto síly relativně malé a lze díky nim levitovat tělesa pouze o malé hmotnosti, tak se příliš nehodí do technické praxe. Takže u silné většiny systémů magnetické levitace se v praxi setkáme se supravodivými materiály. Tyto materiály mají relativní magnetickou permeabilitu $\mu_r \cong 0$, pokud jsou pod svou kritickou teplotou. Lze využít i elektrické vodiče v časově proměnných magnetických polích. To znamená, že některá uspořádání utvořená z elektromagnetů se střídavým proudem mohou vytvořit stabilní systém. Některé systémy se mohou jevit tak, že porušují Earnshawův teorém. To má však ale své meze. Je nutno dodat, že Earnshawův teorém počítá pouze s nepohyblivými permanentními magnety a popisuje 3D prostor. To znamená, že pokud bychom chtěli sestavit stabilní levitující systém pouze z paramagnetických a feromagnetických materiálů, tak by existoval směr, ve kterém není stabilní. A poslední podmínkou Earnshawova teorému je to, že magnetické materiály v systému musí mít schopnost být odpuzovány, ale i přitahovány. Tedy příklady přesahující tyto meze nám dají možnosti, které lze využít ke stabilní levitaci. Levitron může stabilně levitovat, ale díky tomu, že feromagnetická látka rotuje, tedy se pohybuje. Elektromagnet, měnící svou polaritu, může taktéž sloužit k nadnášení. U příkladu pseudolevitace můžeme vidět, že pomocí mechanické zábrany převádíme levitující problém ze 3D na 2D nebo i 1D, což opět porušuje podmínku Earnshawova teorému. Jednu z podmínek porušuje i diamagnetický materiál, jelikož jeho vlastnost je pouze vypuzovat z magnetického pole. Většinu těchto možných způsobů stabilní magnetické levitace jsme popsali již Braunbeckovo rozšířením Earnshawova teorému. [1] [3] [5] [6] [7]

2.2 Silové účinky odvozené od energie magnetického pole

Jedním ze způsobů, jak utvořit levitující systém, je pomocí silových účinků, které jsou odvozené od energie magnetického pole. Zdrojem tohoto magnetického pole jsou některé tzv. permanentní magnety. To jsou magnety, které nepotřebují žádné vnější vlivy k tomu, aby utvořily magnetické pole. Tento typ magnetů můžeme běžně najít v některých horninách, lze ale také vyrobit. Jsou to běžné magnetické materiály, se kterými se běžně setkáváme, jako železo, uhlík, voda. Samotná magnetická síla odvozená od magnetického pole permanentního magnetu je dána vztahem:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \tag{1}$$

kde:

F je síla $[N]$

S je průřez magnetu $[m^2]$

B je magnetická indukce $[T]$, popisuje silové účinky magnetického pole

μ_0 je permeabilita vakua $[H \cdot m^{-1}]$, fyzikální konstanta, která charakterizuje magnetické pole

Samozřejmě, tato síla může být přítlačná nebo přítažná v závislosti na charakteru magnetického pole. Pokud bychom se omezili na zvednutí hmotného bodu ve vertikálním směru pomocí permanentního magnet o průřezu S, magnetické indukci B, tak maximální hmotnost m hmotného bodu by byla:

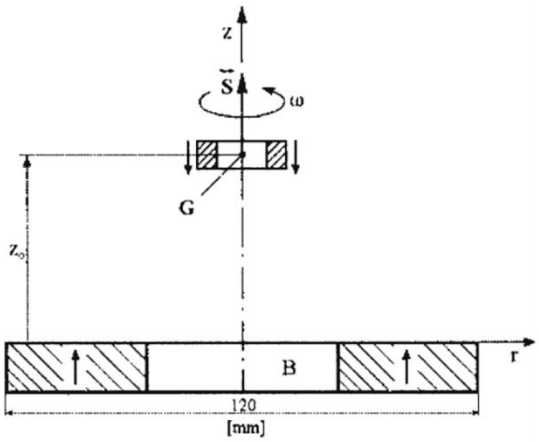
$$m = \frac{B^2 S}{2\mu_0 g}, \tag{2}$$

kde:

g je tíhové zrychlení $[m \cdot s^{-2}]$ [8]

2.2.1 Feromagnetika

Feromagnety jsou nejhojněji používaným typem permanentních magnetů s relativní permeabilitou $\mu_r \gg 1$. Již několikrát zmíněná relativní permeabilita je bezrozměrná veličina, popisující magnetické vlastnosti materiálu. Feromagnetické látky mají schopnost vyvíjet velmi silná magnetická pole. Můžeme se s nimi setkat běžně v každodenním životě, a to od magnetek na ledničce, po senzory v mobilních zařízení a další. Feromagnetické látky jsou např. ocel, nikl, železo atd. Nicméně, podle Earnshawova teorému nelze sestavit stabilně levitující systém za pomoci čistě těchto látek, což znamená, že je zapotřebí dalších podpůrných metod pro stabilní levitaci. Tedy využití feromagnetik při magnetické levitace je realizovatelné, ale jen částečně. Jedním příkladem používaným v praxi je aktivní magnetické ložisko, které bude později popsáno podrobně. Další aplikace, která využívá feromagnety k magnetické levitaci je hračka nazvaná levitron. Levitron se v podstatě skládá ze dvou feromagnetů. Jeden magnet se položí na podložku a druhý nad něj. Magnetická pole se uspořádají tak, aby se magnety odpuzovaly. Tím začne druhý magnet levitovat. Aby se levitující magnet dokázal stabilně nadnášet, je potřeba, aby se otáčel určitou úhlovou rychlostí ω, tím dostane moment hybnosti, který začne tvořit tzv. gyroskopický efekt a ten zabrání tomu, aby magnet nespadl nebo se nepřetočil a nepřitáhl k prvnímu. Tímto způsobem feromagnet stabilně levituje nad druhým magnetem. [9] [5] [10]



Obr. 2 Levitron [5]

2.2.2 Diamagnetika

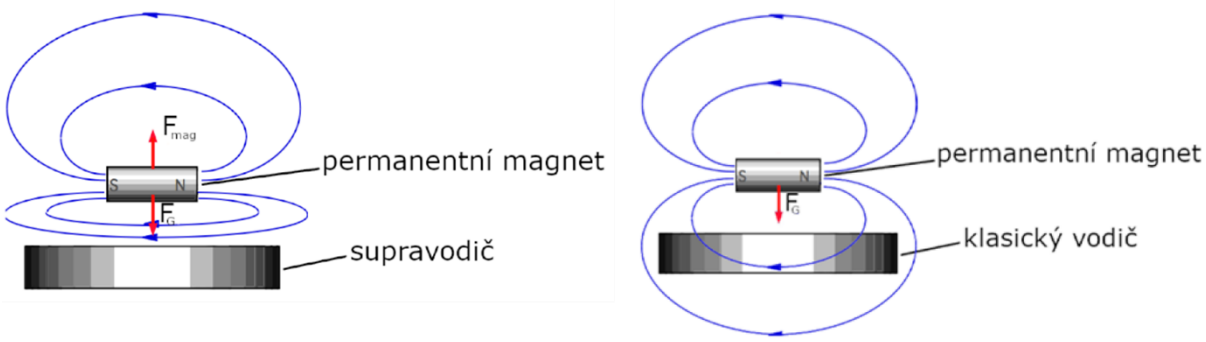
Diamagnetická látka je taková látka, která se jeví magneticky pouze, pokud je uvnitř jiného vnějšího magnetického pole. Pokud vložíme diamagnetikum do vnějšího magnetického pole, tak se začne odpuzovat. Má tedy pouze odpudivé schopnosti. Diamagnetické látky jsou složené z atomů, které mají výsledný magnetický moment nulový (nejeví mag. vlastnosti). Pokud ale tuto látku vložíme do vnějšího magnetického pole, tak se změní uspořádání elektronů těchto atomů. Z těchto částic se stanou magnetické dipóly, a to orientované tak, že působí odpudivě proti vnějšímu magnetickému poli, které je vyvolalo. Do diamagnetických látek se řadí např. voda, zlato, měď, uhlík atd. Pomocí těchto látek lze utvořit stabilně levitující systém. Tyto látky mají takovou schopnost díky své relativní magnetické permeabilitě $\mu_r < 1$. To znamená, že s určitým uspořádáním diamagnetik a permanentních magnetů lze utvořit levitující systém, který se jeví stabilně. Jelikož je voda diamagnetická látka a je obsažená i v prstech naší ruky, tak by měla mít schopnost stabilizovat permanentní magnet. Jak bylo řečeno, diamagnetických látek je velké množství a jsou více běžné, než se na první pohled může zdát. Jedinou velkou nevýhodou diamagnetik je, že jejich magnetické působení se jeví obvykle velmi slabě. Pokud je v blízkosti silnější paramagnetický nebo feromagnetický magnet, tak magnetické pole od diamagnetika bude jednoduše překryté. Díky tomu, že je uhlík a voda diamagnetickou látkou, tak lze princip magnetické levitace použít na kapky vody nebo na žijící zvířata jako např. myši, žáby. Při takovýchto experimentech je potřeba silného permanentního magnetu, nad kterým bude zvíře levitovat. Dalším zajímavým jevem je zakřivení hladiny. Pokud silný magnet polijeme slabou vrstvičkou vody, tak ji začne značně odpuzovat. To dokážeme vypozorovat tak, že se na hladině začne utvářet důlek. V praxi jsou diamagnetické materiály využívané minimálně, a to zejména kvůli jejich velmi slabému magnetickému působení. [11] [12] [13]

Obr. 3 Levitující žába nad permanentním magnetem [12]

2.2.3 Supravodiče

Supravodivost je vlastnost látky, kterou když ochladíme pod určitou kritickou teplotu T_C, tak vede elektrický proud bez odporu. Takže při vedení proudu vodičem se z něj neztrácí energie v podobě Jouleova tepla. Supravodivost objevil nizozemský fyzik Heike Kamerlingh-Onnes v roce 1911. Tomuto objevu předcházel úspěšný experiment, vedený také H. Kamerlingh-Onnesem, o zkapalnění helia. Díky zkapalněnému heliu se naskytla možnost ochladit látku až na teplotu 4,2 K při atmosférickém tlaku. Při postupném ochlazování rtuti byl na určité teplotě zjištěn propad elektrického odporu na nulu. Tato schopnost neboli supravodivost, byla zjištěna dále u dalších látek jako je olovo a cín. Teplota, při kterém se látka s nenulovým odporem dostává do supravodivého stavu, se nazývá kritická teplota T_C. Látka vyjde ze supravodivého stavu, pokud se zahřeje nad kritickou teplotu nebo působením silného magnetického pole. Důvod, proč se tak děje, objevili Walther Meissner a Robert Ochsenfeld roku 1933. Zjistili, že supravodiče vytlačují magnetické pole ze svého objemu, a tak se chovají jako ideální diamagnetikum (supravodič I. Typu) s $\mu_r \cong 0$. Také objevili fakt, že látka v supravodivém stavu z něj vyjde, pokud se nachází v magnetickém poli s magnetickou indukcí B_C nebo vyšší. Existence látky se supravodivými vlastnostmi tedy závisí na teplotě T a indukci vnějšího magnetického pole B. Supravodiče I. typu jsou kovy a jejich slitiny. Jejich kritická teplota je velmi často blízko absolutní nule. Dostat těleso na tak nízkou teplotu je možné díky kapalnému heliu. Supravodiče II. typu jsou látky různých slitin kovů a kompozitní materiály. Roku 2003 dostal Alexej Alexejevič Abrikosov Nobelovu cenu za práci, ve které popsal supravodiče II. typu. Tyto látky vykazují supravodivé vlastnosti i v oblasti působení velmi silných magnetických polí. V současné době se snaží vědci najít látku s nejvyšší kritickou teplotou. Zatím nejvyšší kritickou teplotou je 212 K. Materiály s vysokou kritickou teplotou jsou označovány jako HTS. Supravodivost materiálů je téma, které není zcela objasněné a pracuje na něm mnoho vědců po celém světě. Tím se dostáváme k využití supravodičů k magnetické levitaci. Pokud vložíme jakýkoliv vodivý materiál do působení vnějšího magnetického pole, tak se do tohoto materiálu začnou indukovat elektrické proudy, tzv. vířivé proudy. Tyto vířivé proudy se snaží odstínit od vnějšího magnetického pole, které je vyvolalo. Čím větší bude mít vodič elektrický odpor, tím více začne vznikat teplo ve vodiči. Tím, že se vytváří teplo, tak se vířivé proudy tlumí a vodič přestává odcloňovat vnější magnetické pole.

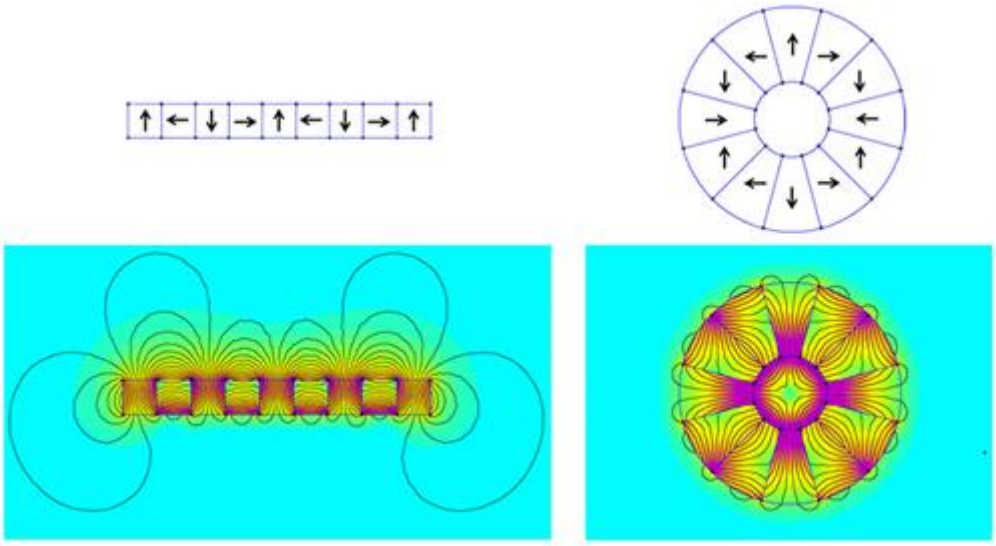
To znamená, že magnetické pole prochází objemem vodiče. Jak bylo řečeno, supravodiče mají elektrický odpor nulový při určitých podmínkách. Tím pádem vířivé proudy nevytváří teplo a dokonale odrážejí vnější pole (4). Supravodiče mají dokonce takovou schopnost, se adaptovat na změnu vnějšího magnetického pole. Jestliže zvýším, snížím nebo změním orientaci pole, tak supravodič se přizpůsobí a bude udržovat magnet stále ve stejné poloze. Supravodivé magnety dokážou na rozdíl od diamagnetik unést diametrálně větší zátěže. Tím, že se supravodiče vyhýbají Earnshawovu teorému a mají výše popsané vlastnosti, tak to z nich dělá určitým způsobem ideální cestu, jak realizovat magnetickou levitaci. Samozřejmě tyto materiály je potřeba udržet v podmínkách, které je dělají supravodivými, což je $T < T_C$ a magnetická indukce vnějšího pole $B < B_C$. [14] [15] [16] [17] [18]



Obr. 4 Odklonění a prostup magnetického pole [19]

2.2.4 Halbachova soustava permanentních magnetů

Halbachova soustava magnetů je takové uspořádání permanentních magnetů, které tvoří z jedné strany soustavy silné magnetické pole a z druhé strany téměř vyrušené magnetické pole. Tuto úpravu sestavy magnetů zkoumalo nezávisle na sobě několik fyziků. První, kdo tento princip objevil, byl James M. Winey v roce 1970. Dále tento systém rozpracoval německý fyzik Klaus Halbach. Jeho snahou bylo vytvořit urychlovač částic na základě popisované soustavy permanentních magnetů. Permanentní magnety, které tvoří soustavu jsou vyrobeny z krychlí. Tyto krychle jsou zhotoveny z bóru, železa a dalších slitin pomocí práškové metalurgie. Jednotlivé magnety jsou dohromady poskládané tak, že směr jejich magnetizace je pootočený o 90° vůči vedlejším krychlím. Tímto způsobem získáme soustavu magnetů, která vytváří z jedné strany silné magnetické pole a z druhé strany téměř nulové magnetické pole. Výše uvedené uspořádání je tzv. lineární řazení. Pokud vložíme cívku pod toto řazení permanentních magnetů, tak aby strana se silným magnetickým pole byla směrem k cívce, začne se v ní indukovat proud, který vytvoří vlastní magnetické pole cívky. Magnetická pole cívky a Halbachovy soustavy začnou spolu interagovat a permanentní magenty začnou levitovat. K indukci proudu na cívce dojde pouze, pokud je zajištěn relativní pohyb mezi cívkou a soustavou magnetů. Tohoto systému je využíváno v zařízení Inductrack, které bude popsáno v pozdějších kapitolách. Lineární řazení Halbachovy soustavy permanentních magnetů je dále využíváno v elektronových laserech, elektromotorech, kosmickém průmyslu a již zmíněných urychlovačích částic. Kromě lineárního řazení je ještě využíváno válcové řazení, které je využívané v podobných odvětví jako lineární. Přestože je tento typ magnetické levitace převážně na teoretické úrovni, v určitých oborech pomalu stoupá jeho uplatnění. [20] [21] [22] [23]



Obr. 5 Lineární (vlevo) a válcové (vpravo) řazení Halbachovy soustavy permanentních magnetů [24]

2.3 Lorentzova síla a elektromagnet

Lorentzova síla je druhým možným silovým účinkem, díky kterému je možné realizovat magnetickou levitaci. Je to tedy síla, která působí na částici s nábojem, která se nachází uvnitř elektromagnetického pole. Je obecně definována jako:

$$\mathbf{F} = \mathrm{q}(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}), \tag{3}$$

kde:

$\mathbf{F}$ je síla $[\mathrm{N}]$

q je elektrický náboj $[\mathrm{C}]$

$\mathbf{E}$ je intenzita elektrického náboje $[\mathrm{N} \cdot \mathrm{C}^{-1}]$

$\mathbf{v}$ je rychlost náboje $[\mathrm{m} \cdot \mathrm{s}^{-1}]$

$\mathbf{B}$ je magnetická indukce $[\mathrm{T}]$

Z rovnice je jasné, že síla má dvě různé složky, a to magnetickou a elektrickou. Velmi často se Lorentzova síla označuje pouze jako část s magnetickou silou. [25]

Při působení magnetického pole na nabitou částici, která se pohybuje, se začne měnit směr vektoru rychlosti částice. Velikost vektoru ale zůstane neměnná. Pokud rozepíšeme magnetickou část Lorentzovy síly, tak odstaneme:

$$\mathrm{F} = |\mathrm{q}|\mathrm{vB}\sin\alpha, \tag{4}$$

kde:

α je úhel mezi vektorem rychlosti a vektorem magnetické indukce $[°]$

Z příkladu (6) je zřejmé, že $\alpha = 90°$, tedy Lorentzova síla je:

$$F = |q|vB \tag{5}$$

Směr této síle se určuje podle pravidla pravé ruky. Z palce, ukazováčku a prostředníčku pravé ruky pomyslně utvoříme osy x, y, z. Palec dáme ve směru vektoru rychlosti částice. Ukazováček dáme ve směru magnetické indukce. Prostředníček nám poté ukáže směr Lorentzovy síly.

Lorenztova síla působí samozřejmě také na vodič, kterým prochází elektrický proud. Po úpravě obecného vztahu dostáváme Lorentzovu sílu, působící na vodič, kterým prochází elektrický proud a je uvnitř magnetického pole:

$$F = IlB \sin \beta, \tag{6}$$

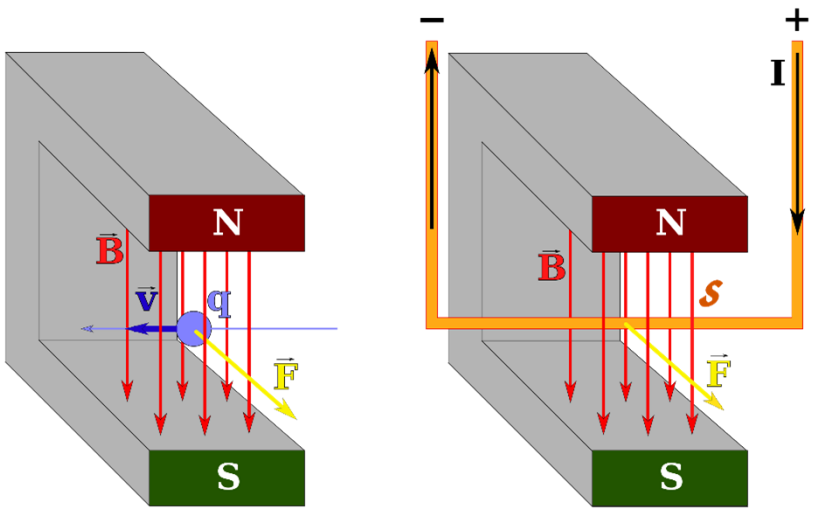
kde:

I je elektrický proud $[A]$, procházející vodičem

l je délka vodiče uvnitř mag. pole $[m]$

β je úhel mezi vodičem a indukčními čarami mag. pole $[°]$

Opět z (6) je zřejmé, jak bude vypadat Lorentzova síla pro uvedený příklad. Je dobré si povšimnout, pokud bychom chtěli zvětšit sílu působící na vodič, tak nejjednodušším způsobem je zvětšit délku vodiče, jelikož síla je přímo úměrná dané délce. Pro určení směru síly se opět používá pravidlo pravé ruky, které je podobné jako u nabité částice. [26]



Obr. 6 Lorentzova síla působící na náboj (vlevo) a na vodič (vpravo) [27]

Další běžným způsobem vytvoření magnetické síly za využití elektrického proudu je pomocí elektromagnetu. Elektromagnet je vodivý drát navinutý, v podobě cívky, na jádro. To je nejčastěji z feromagnetu. Magnetické pole vzniká průchodem elektrického proudu cívkou. Parametry vzniklého magnetického pole závisí přímo na počtu závitů cívky a elektrickém proudu. Důležitou roli hraje také jádro elektromagnetu, které svými vlastnostmi silně ovlivňuje to, jak bude vzniklé magnetické pole vypadat. Elektromagnety jsou v dnešní době běžnou součástí používanou v hutním průmyslu, automobilovém průmyslu, obráběcích strojích atd. Energie a síla magnetického pole je:

$$\mathrm{E_{mag}} = \frac{\mathrm{BH}}{2} \tag{7}$$

$$\mathrm{F} = \frac{\mathrm{BH}}{2\mathrm{l}} \tag{8}$$

kde:

B je magnetická indukce jádra $[\mathrm{T}]$

H je intenzita magnetického pole $[\mathrm{A} \cdot \mathrm{m}^{-1}]$, která popisuje míru silových účinků mag. pole

l je délka vinutí $[\mathrm{m}]$ [28]

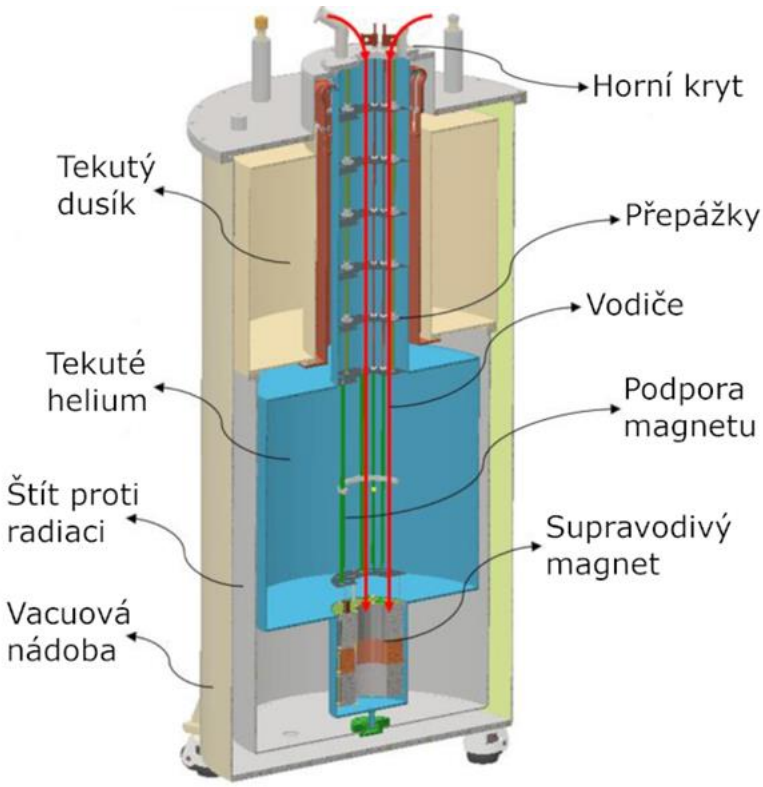
2.3.1 Elektromagnetické zavěšení – EMS

EMS (electromagnetic suspension) je typ magnetické levitace, která využívá kolísání síly magnetického pole, které je zprostředkováno pomocí elektromagnetu. Toto kolísání je zajištěno pomocí smyčky, která zasílá magnetu zpětnou vazbu. Aby byla udržena stabilita, neustále se mění proud, který prochází cívkou a tím se mění síla magnetického pole. Tím se obchází Earnshawovo pravidlo a systém může stabilně levitovat. Realizuje se to pomocí smyčky, která ovládá a mění proudy, procházející elektromagnety tak, aby měly proměnné magnetické pole a zároveň udržely levitující objekt v rovnováze. Podrobnější vysvětlení této metody bude popsáno v následujících kapitolách. [29] [30]

2.3.2 Supravodič jako elektromagnet

V zásadě se supravodivé magnety používají jakožto elektromagnetické systémy (7). Tyto systémy fungují na již uvedených vlastnostech supravodicých materiálů. Hlavním článkem je cívka utvořená ze supravodivého materiálu. Za splněných podmínek supravodivosti povede elektrický proud bez odporu. To znamená, že jsme schopni vést cívkou vysoký elektrický proud, který vyvine velmi silné magnetické pole a to za nulových ztrát. Tedy bez ohřátí vodiče díky nulovému elektrickému odporu. Samozřejmě je třeba splnit podmínky, při kterých je materiál cívky supravodivý. To znamená, že je zapotřebí chladit cívku pod kritickou teplotu $\mathrm{T_C}$. Toho se dosahuje pomocí tekutého helia, které má bod varu 4.2 K, což je pod většinou kritických teplot supravodivých materiálů. Aby se zabránilo vypařování tekutého helia, je zde vkonstruována nádoba s tekutým dusíkem. Je snahou utvořit, co nejvíce tepelně izolovaný systém, kvůli velkému rozdílu teplot mezi vnějším prostředím a prostředím uvnitř nádoby a to do takové míry, že je třeba vytvořit okolo systému štít proti radiaci, který zabrání ohřátí vlivem letících částic. Na materiál cívky se nejvíce využívají supravodiče typu II a to díky možnosti snést pole o větší magnetické indukci $\mathrm{B_C}$ a díky vyšší krtitické teplotě $\mathrm{T_C}$. Mezi nejpoužívanější materiál se řadí slitina niobu a titanu.

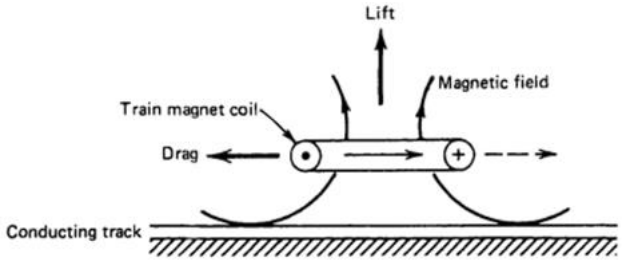
Tato slitina má kritickou teplotu 10 K a dokáže vytvořit magnetické pole o magnetické indukci až 15 T. Další variantou je slitina niobu a cínu. Má schopnost udělat pole o magnetické indukci přes 18 T a to pokud je pod teplotou pod 18 K. Ovšem, tato slitina cínu a niobu je značně finančně náročnější, než první zmíněný materiál. Celkově jsou tyto systémy z finančních důvodů mnohdy nedostupné a to zejména kvůli tekutému heliu a supravodivému materiálu. [31] [32] [33] [34]



Obr. 7 Supravodivý magnet [31]

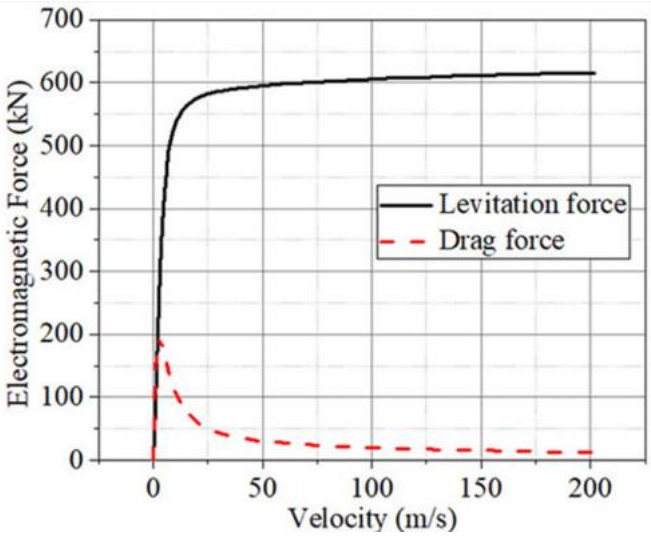
2.3.3 Elektrodynamické zavěšení – EDS

EDS (electrodynamic suspension) systémy využívají vodiče, které jsou ovlivněny působením časově proměnného magnetického pole. Toto časově proměnné pole indukuje ve vodičích vířivé proudy, které vytvářejí magnetické pole, které má tendenci se odpuzovat od budícího magnetického pole. Časově proměnné pole může být realizováno pomocí vzájemného pohybu dvou těles. V praxi se využívá systém, kde je jeden magnet s permanentním magnetickým polem, a to buďto permanentní magnet nebo supravodivý magnet, nabitý stejnosměrným proudem. Další magnetické pole je indukované pomocí vzájemného pohybu daného tělesa a např. supravodiče. Z výše uvedeného vyplývá, že pokud nedochází k pohybu mezi supravodičem a vodičem, tak systém nebude levitovat.



Obr. 8 Popis sil v EDS systému [37]

Na (8) lze vidět levitační sílu, která působí proti magnetickému poli, které bylo vytvořeno pomocí vířivých proudů indukovaných v dráze. Toto nově vzniklé magnetické pole ale také působí proti pohybu cívky vůči trati. Což je nežádoucí, jelikož potřebujeme udržet pohyb, aby systém levitoval. Vířivé proudy mají tedy také negativní brzdné účinky. K zaručení pohybu cívky jsou k dispozici další systémy, které působí proti brzdným účinkům a udávají systém do pohybu. Na (9) lze vidět průběh brzdící síly a levitační síly v závislosti na rychlosti systému. Z grafu vyplývá, že systém stabilně levituje, pokud dosáhne rychlosti okolo $75\ \mathrm{ms}^{-1}$. [35] [36]



Obr. 9 Závislost elektromagnetické síly na rychlosti systému pro levitační a brzdící síly [38]

2.4 Zařízení využívající magnetickou levitaci

Nejvíce využívaná zařízení s magnetickou levitací jsou magnetická ložiska a MAGLEVy. Tyto zařízení budou popsána v dalších kapitolách. Magnetickou levitaci dále využívají tyto obory: [36]

- Jaderné inženýrství (centrifuga)
- Biomedicína (srdeční pumpa)
- Elektrické inženýrství (ložiska, magnety)
- Automotive (vozidla)
- Zbrojní průmysl (zbraně, rakety)
- Energetika (setrvačníky, větrné elektrárny)
- Kosmický průmysl (startovací systém)

3 Magnetická ložiska

Magnetická ložiska jsou typem ložisek, která umožňují zavazbení rotační součásti do pevného rámu. Volná rotace rotační části je zajištěna magnetickou levitací, zprostředkovanou ložiskem. Uskutečnění magnetické levitace v ložiskách může být zajištěno pomocí již zmíněných silových účinků, odvozených od energie magnetického pole, Lorentzovy síly nebo jejich kombinací. Jelikož mezi ložiskem a rotační částí je neustále vzduchová mezera, tak to znamená, že zde nedochází k téměř žádnému tření. Magnetická ložiska se dají na základě fungování rozdělit na aktivní a pasivní. Aktivní magnetická ložiska potřebují v zásadě přísun elektrické energie pro svojí funkci, kdežto pasivní magnetická ložiska nikoliv. Dále lze magnetická ložiska rozdělit podle toho, jaké síly zachycují, tedy na radiální a axiální.

Vývoj magnetických ložisek začal během druhé světové války. Okolo roku 1941 se americký fyzik Jesse Beams snažil přijít na způsob, jakým obohatit izotopy prvků, které byly zásadní pro Projekt Manhattan. Beams si nechal patentovat několik řešení, která se týkala odstředivky. V té době bohužel nebyly oblasti řídící elektrotechniky a polovodičové elektroniky na dostatečně vysoké úrovni, aby toto řešení bylo realizovatelné. Se vzestupem elektrotechniky vzrůstal i vědecký zájem o magnetická ložiska. První funkční prototypy ložisek byly využívaný v turbínách a kompresorech. Francouzská firma S2M uvedla po roce 1976 první aktivní magnetické ložisko na trh. Samotné pasivní magnetické ložisko bylo patentováno R. G. Gilbertem v roce 1955. Poté docházelo k neustálému zdokonalování ložisek, od zmenšování systému, po zvyšování účinnosti. [39]

Jelikož u magnetických ložisek nedochází k dotyku mezi ložiskem a rotační částí, tak tím odpadá hlučnost a mechanické opotřebení. Díky minimalizaci tření, jsou magnetická ložiska vhodná v aplikacích, kde jsou vysoké otáčky hřídele. Další výhodou, která vychází z absence tření je nepotřebnost mazání, stejně jako minimální tepelné ztráty během provozu. Všechny tyto vlastnosti magnetických ložisek zvyšují životnost a umožňují vyšší úhlové rychlosti hřídele. Mezi hlavní nevýhody patří rozhodně pořizovací cena ložisek. Při dynamickém namáhání jsou magnetická ložiska méně doporučována, a to zejména kvůli tuhosti a únosnosti. Další nevýhodou je potřeba neustálého přísunu elektrické energie, u některých ložisek. To zvyšuje nároky na provoz. Tím, že některá magnetická ložiska potřebují řídící systémy, nebo jsou samotná ložiska komplikované konstrukce, mohou nabývat větších rozměrů, případně vyšších hmotnostní než klasická ložiska. [40] [41]

Výhody:	Nevýhody:
+ přesnost uložení	- vysoká cena
+ tlumení rázů do určité míry	- vyšší hmotnost
+ není potřeba mazání	- nároky na prostor
+ nízké ztráty	- generace tepla vlivem vířivých proudů
+ vysoká životnost	- nižší únosnost při dynamickém namáhání
+ možnost vysokých otáček hřídele	- potřeba přísunu energie během provozu (u některých)

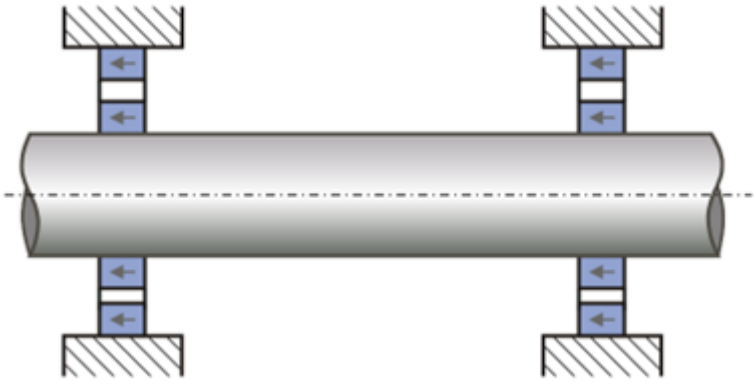
Obr. 10 SKF magnetické ložisko [42]

3.1 Pasivní magnetická ložiska

Jedním ze dvou typů magnetických ložisek jsou pasivní magnetická ložiska. Tyto ložiska charakterizuje to, že nepotřebují zdroj energie pro svou funkci, na rozdíl od aktivních. Tím odpadá i potřeba pro řídící a snímací obvody, které jsou nutné u aktivních ložisek. Silové účinky, které udržují levitující těleso jsou síly, odvozené od energie magnetického pole daných magnetů. To znamená, že lze pasivní magnetická ložiska teoreticky vytvořit z feromagnetik, diamagnetik nebo pomocí supravodivých magnetů. Ovšem, magnetická ložiska s využitím diamagnetik nejsou zcela prozkoumána, jelikož diamagnetika mají slabé magnetické působení a jejich vlastnosti se liší materiál od materiálu. Proto se většinou konstruují, buďto z permanentních magnetů nebo pomocí supravodivých magnetů. Jelikož jsou magnetická ložiska systémy s magnetickou levitací, tak pro zajištění stability je potřeba obejít Earnshawův teorém. Právě kvůli udržení stability mívají pasivní magnetická ložiska složitou a masivnější konstrukci. Obecně pasivní magnetická ložiska mají nižší únosnost a téměř nulové tlumení rázů. Proto nenašla v praxi široká uplatnění. [43]

3.1.1 Ložiska s permanentními magnety

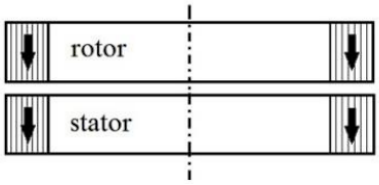
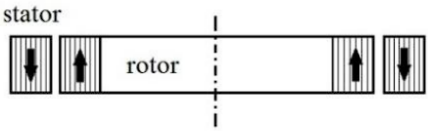
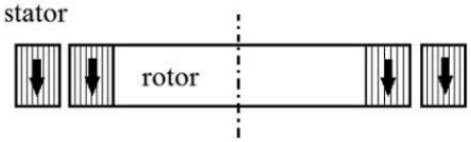
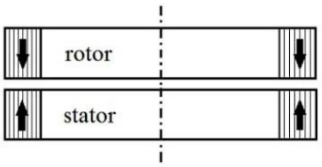
Je to druh pasivních magnetických ložisek, která bývají nejčastěji zhotovena pomocí feromagnetických materiálů. V dnešní době dochází k vývoji lepších a vhodnějších feromagnetických materiálu, které mají ideálnější vlastnosti. Příkladem těchto materiálů mohou být slitiny na bázi vzácných zemin. Jak již popisuje Earnshawův teorém, neexistuje systém magnetické levitace, který by stabilně levitoval pouze pomocí permanentních magnetů. To znamená, že pasivní ložiska s permanentními magnety v podstatě neumožňují stabilní levitaci. Tedy, tyto ložiska neodebírají rotujícímu tělesu všechny stupně volnosti. Existuje několik uspořádání, která stabilizují rotující hřídel, buďto v radiálním nebo axiálním směru. Ten směr, ve kterém se těleso jeví nestabilně, je potřeba zajistit jiným způsobem. Na obr. 11 je uvedený jednoduchý příklad pasivního magnetického ložiska s permanentními magnety, které zajišťuje radiální směr. Jeden pár permanentních magnetů je pevně spojen s rámem a druhý pár je pevně spojen s hřídelí. Šipky na magnetech ukazují směr magnetizace. V tomto příkladu jsou magnety postaveny tak, že mají tendenci se odpuzovat a tím udržují stálou pozici v radiálním směru. [44]



Obr. 11 Permanentní magnetické ložisko zajišťující síly v radiálním směru, pomocí odpudivých sil [43]

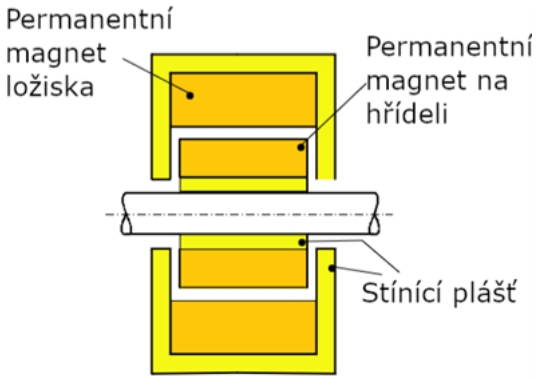
Axiální směr je tedy nestabilní a je potřeba ho zajistit jiným způsobem. Zajištění radiálního nebo axiálního směru může být realizováno také pomocí přitažlivých sil. Poté se uspořádání mění následujícím způsobem podle tab. 1.

Tab. 1 Axiální a radiální ložiska podle charakteru sil [45]

	Radiální ložisko	Axiální ložisko
Přítažné síly		
Odpudivé síly		

Tímto způsobem ložiska zajišťují pouze jeden směr a druhý nechávají nestabilní. Existují ovšem konstrukce magnetických ložisek s permanentními magnety, která zachycují radiální i axiální síly. Příkladem těchto ložisek jsou kónická kuželová ložiska. Podle Earnshawova teorému jsou tyto systémy nestabilní, což je pravda, ale v těchto případech jsou síly, vytvářející nestabilitu, tak malé, oproti stabilizačním silám, že je lze zanedbat. Dalším možným způsobem konstrukce těchto ložisek je pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů.

Přestože jsou pasivní magnetická ložiska s permanentními magnety cenově dostupná a jednoduchá, tak mají i svá negativa. Nevýhodou, která značně ovlivňuje využití ložisek tohoto typu je fakt, že mají téměř nulovou schopnost tlumení rázů. Kvůli této vlastnosti je potřeba ložiska doplnit o jiné tlumící prvky, jako například elektrodynamické tlumiče. Ložiska s permanentními magnety mají malé tuhosti, dané vlivem geometrie ložiska a vlastnostmi materiálu. Proto aby se zvýšila nosnost magnetického ložiska, tak se využívá zvýšení magnetické indukce ve vzduchové mezeře, mezi hřídelí a ložiskem. Toho se dosahuje pomocí stínícího pláště, který je vytvořen z měkkého feromagnetického materiálu, který má vysokou permeabilitu. [46]



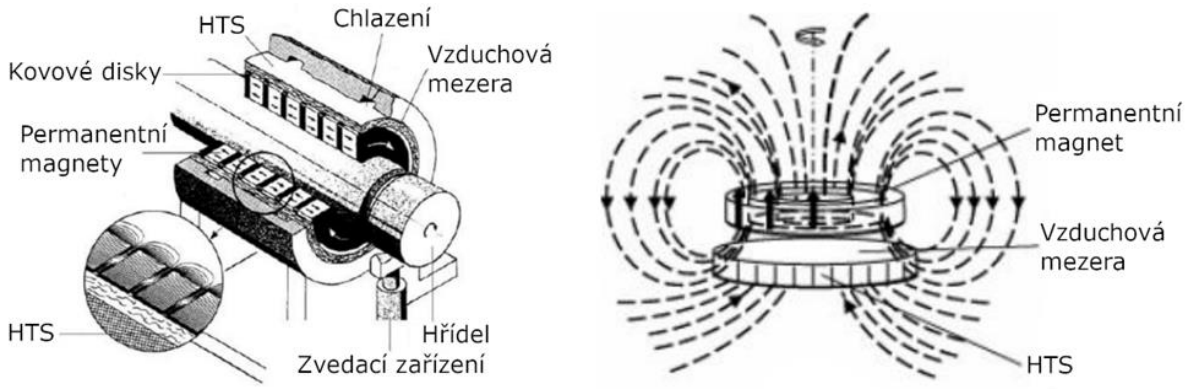
Obr. 12 Magnetické ložisko se stínícím pláštěm [46]

3.1.2 Ložiska se supravodičem

Typ těchto pasivních magnetických ložisek je založen na levitaci mezi permanentním magnetem a vysokoteplotním supravodičem HTS. Nejčastěji bývá supravodič spojen s nehybnou částí a permanentní magnet s hřídelí. Jsou možné i konstrukce s opačným uspořádáním. Díky tomu, že je součástí levitačního systému supravodič, tak lze docílit stabilní levitace. Aby ložisko mohlo fungovat, tak je zapotřebí udržet HTS magnet pod svojí kritickou teplotou. To znamená, že v ložisku je vkonstruované chlazení, které bývá nejčastěji zprostředkováno tekutým dusíkem. Mezi HTS a permanentním magnetem vznikají odpudivé síly, které způsobují levitaci hřídele. Na permanentní magnety se používají materiály ze vzácných zemin a na vysokoteplotní supravodiče se využívá $YBa_2Cu_3O_7$. Mezi výhody supravodivých ložisek patří možnost vysokých otáček, nízká spotřeba energie a nízké nároky na údržbu. Zároveň má tento typ ložisek vyšší únosnost než ložiska s permanentními magnety. Pro zvýšení nosnosti je možnost použití vícero permanentních magnetů, které jsou vůči sobě pootočeny. Mezi hlavní nevýhody patří vysoká pořizovací cena, zejména kvůli HTS materiálu a magnetu ze vzácných zemin. Dále potřeba chlazení zvyšuje náročnost konstrukce a cenu. Z hlediska uspořádání lze ložiska se supravodiči opět rozdělit na radiální a axiální. [47] [48]

Radiální ložisko se skládá z prstenců permanentních magnetů, které jsou pevně navlečeny na hřídel. Směr magnetizace těchto magnetů se střídá. Kovové vložky jsou nasunuty mezi permanentními magnety pro to, aby se zvýšila magnetická indukce. Na pevnou část ložiska jsou připevněné HTS supravodiče v podobě několika pelet. Ty jsou pokryty měděným válcem, pro jeho vysokou vodivost, přes který probíhá chlazení pomocí kapalného dusíku. [48]

U axiálního ložiska je HTS supravodič vytvořen z několika pelet, nebo z jednoho celku, do tvaru kotouče, který je opět potřeba chladit pod svojí kritickou teplotu. Permanentní magnety součástí hřídele mohou být také jako jeden celek anebo jako několik prstenců, které jsou uspořádané tak, aby tvořily Halbachovu soustavu permanentních magnetů. Při využití druhého způsobu uspořádání se zvedne nosnost ložiska. [48]



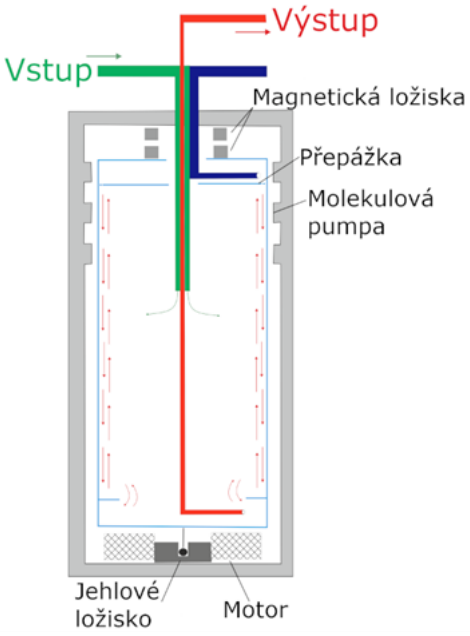
Obr. 13 Radiální (vlevo) [47] a axiální (vpravo) supravodivá magnetická ložiska [49]

3.1.3 Shrnutí vlastností a aplikace pasivních magnetických ložisek

Jednou z hlavních výhod pasivních magnetických ložisek je fakt, že nepotřebují přísun elektrické energie pro svou funkci. Jelikož je zde využito silových účinků, odvozených od energie magnetického pole permanentních magnetů. Dále pasivní magnetická ložiska nepotřebují pro své fungování řídící a snímací obvody, což značně pozitivně ovlivňuje konstrukci a cenu. Nevýhodou těchto ložisek je fakt, že mají nízkou tuhost a únosnost, přestože se dají tyto vlastnosti zlepšit popsanými metodami výše. U ložisek s HTS magnety nastává problém s chlazením, které zvyšuje provozní cenu a složitost konstrukce. [40]

Výhody:	Nevýhody:
+ není potřeba el. energie	- nízká tuhost
+ jednoduchost konstrukce	- nízká únosnost
+ nižší pořizovací cena	- téměř žádné tlumící účinky
+ stálost v náročných prostředí	- nutnost chlazení (u HTS)

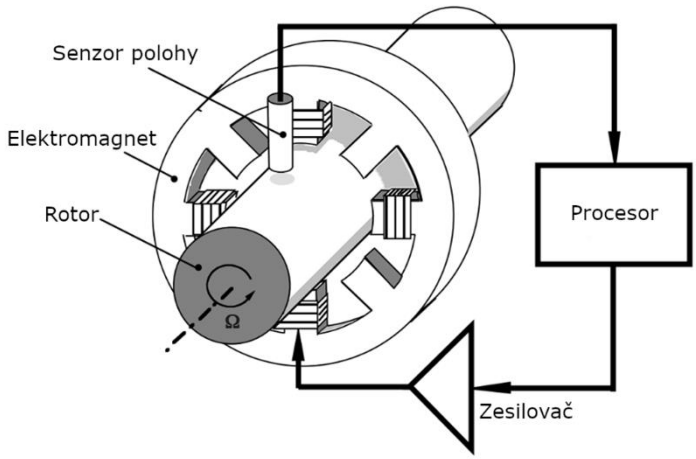
Pasivní magnetická ložiska jsou využívaná zejména v aplikacích, kde není požadována vysoká únosnost a tuhost ložisek. Tím, že tyto ložiska velmi dobře zvládají vysoké otáčky, tak se nejčastěji používají v setrvačnících, pro úschovu energie. Dále se s pasivními magnetickými ložisky můžeme setkat v čerpadlech, kompresorech anebo odstředivkách. Příkladem využití je Zippeho odstředivka, což je stroj, který se využívá v energetice, a to k obohacování uranu. Na dně je motor, který uvádí svislý válec do rotace. Válec je zespodu zajištěn mechanicky pomocí jehlového ložiska a nahoře pomocí magnetického ložiska. Do válce vstupuje směs izotopů uranu. Díky velké rychlosti válce ve vakuu se těžší izotop uranu usazuje do vnější vrstvy válce. Tímto způsobem se izotopy uranu rozdělí. Zippeho odstředivku můžeme vidět na obrázku (14). [50] [51]



Obr. 14 Zippeho odstředivka [52]

3.2 Aktivní magnetická ložiska

Aktivní magnetická ložiska využívají přitažlivých sil, které působí mezi elektromagnety a feromagnetickým rotujícím tělesem. Tedy hlavním rozdílem mezi pasivním a aktivním ložiskem je to, že aktivní magnetická ložiska potřebují neustálý přísun elektrické energie. Pro zajištění stabilní polohy hřídele je potřeba snímače polohy a zpětnovazební smyčky. Na ložiska mohou působit dva typy zatížení, a to statické a dynamické. Mezi statické prvky zatížení patří například samotná hmotnost hřídele. Do dynamického zatížení spadají veškeré vibrace atd. Právě kvůli dynamickému zatížení je potřeba zpětnovazební smyčky. Elektromagnety ložiska jsou vždy v páru proti sobě a zvětšováním nebo snižováním proudu v páru elektromagnetů se udržuje stabilita. Aktivní magnetická ložiska udržují vzduchovou mezeru mezi samotným ložiskem a hřídelí v rozmezí od 0,5 mm do 2 mm. [53] [54]



Obr. 15 Princip aktivního magnetického ložiska [55]

Na obr. 15 je znázorněn princip aktivního magnetického ložiska. Skládá se z hřídele, která musí být z feromagnetického materiálu. Rotor je dále obklopen páry elektromagnetů. Ložisko je dále opatřeno senzory polohy a řídícími systémy. Během provozu je neustále udržována stejná vzduchová mezera mezi ložiskem a hřídelí. Pokud se hřídel vybočí ze své rovnovážné polohy, tak snímač odešle signál do řídící jednotky, která vypočítá potřebný budící proud, který je třeba poslat do elektromagnetů. Tím se přitažlivá síla od elektromagnetů zvýší nebo sníží a hřídel se díky tomu uvede do rovnovážné polohy. Pro zajištění ideální funkce ložiska, je potřeba, aby zpětná vazba, od snímače polohy po změnu proudu, probíhala co nejrychleji, vzhledem k udržení konstantní vzduchové mezery. Aktivní magnetická ložiska lze opět rozdělit na radiální a axiální.

Radiální aktivní magnetické ložisko je v podstatě popsané na obr. 15. Skládá se z několika elektromagnetů, v tomto případě čtyř, které udržují hřídel v rovnovážné poloze. Toto uspořádání se nazývá čtyřpólové, jsou možná i osmipólové a více. Rotor musí být z feromagnetického materiálu, jak již bylo popsáno. Elektromagnety jsou realizovány pomocí cívek natočených na jednotlivých pólech. Součástí ložiska jsou samozřejmě snímací a řídící systémy.

Axiální aktivní magnetické ložisko je realizováno pomocí přitažlivých sil mezi feromagnetickým kotoučem a prstenci statoru. Feromagnetický kotouč je pevně spojený s hřídelí. Prstence statoru jsou uloženy po obou stranách kotouče. Mají v sobě vinutí, které opět vytváří přitažlivé síly mezi kotoučem a statorem. Snímací a řídící systémy jsou opět částí tohoto ložiska.

Na obr. 16 je zobrazeno radiální ložisko vlevo a axiální vpravo. Pro úplné zajištění hřídele je potřebná určitá kombinace radiálních a axiálních ložisek. Při sestavování systémů s magnetickými ložisky je častá kombinace jejich typů. To znamená, že pasivní magnetická ložiska jsou v systému uvedena pro unesení hřídele, kdežto aktivní magnetická ložiska doplňují systému o stabilitu a tlumení dynamických účinků, které pasivní magnetické ložisko nedokáže absorbovat. [55] [56] [57]

Obr. 16 SKF ložisko [58]

3.2.1 Řídící obvody, snímače a další související systémy

Systém, který ovládá polohu hřídele a udržuje její stabilitu se skládá ze snímačů, ovládací jednotky a řídící jednotky s algoritmem. Snímače zjišťují polohu hřídele a tuto informaci, v podobě signálu, odesílají řídící jednotce. Snímače musí splňovat podmínky jako vysoká tepelná odolnost, schopnost pracovat ve vakuu a dalších náročných prostředí. Samozřejmostí je, že snímače musí být bezkontaktní.

Rozpoložení snímačů bývá nejčastěji v pěti osách, a to ve čtyřech radiálních a jedné axiální. Nejvíce se používají snímače indukční, dále se můžeme setkat se snímači optickými, magnetickými a kapacitními.

Řídící jednotka sleduje a ovládá velikosti elektrických proudů, které tečou do samotných elektromagnetů, díky čemuž se ovládá poloha hřídele. Dříve se používaly analogové řídící jednotky. V dnešní době jsou běžné digitální řídící jednotky, jejichž součástí jsou procesory digitálního systému (DSP), zesilovače a napájecí zdroje. Algoritmus uvnitř DSP zjišťuje polohu hřídele a upravuje proudy, které jdou na elektromagnety. Pro udržení hřídele ve stabilní poloze je třeba, co nejmenší odezvy, proto řídící jednotka dokáže vyhodnocovat polohu a regulovat proud do cívek až 10 000x za sekundu. [41]

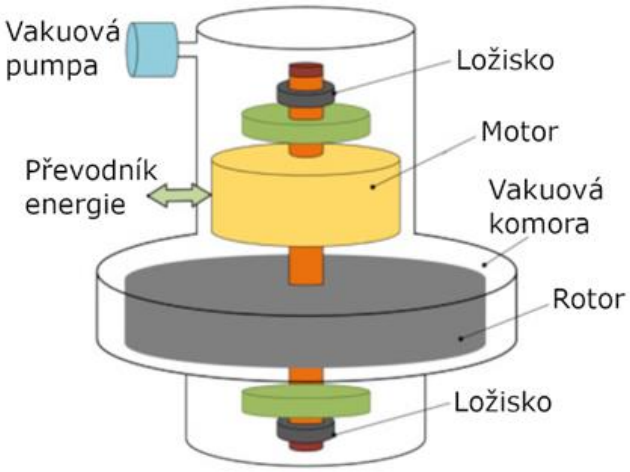
3.2.2 Shrnutí vlastností a aplikace aktivních magnetických ložisek

Aktivní magnetická ložiska fungují na základě přitažlivých sil mezi elektromagnety a feromagnetickým rotorem. Pro funkci ložisek je potřeba neustálého přísunu elektrické energie. To způsobuje vyšší provozní nároky než u pasivních magnetických ložisek. Ale oproti pasivním ložiskám, aktivní mají schopnost tlumit dynamické účinky, a to zejména díky kontrolovaně proměnlivému magnetickému poli, které tvoří přitažlivé síly. Další výhodou, kterou aktivní ložiska předcházejí pasivní, je únosnost. Právě díky vyšší únosnosti a schopnosti tlumit rázy bývají aktivní magnetická ložiska často preferovány před pasivními. Velmi často také bývají aktivní ložiska sestavována v kombinaci s pasivními, pro vzájemné doplnění vlastností. Tím vznikají hybridní systémy magnetických ložisek. [41] [59]

Výhody:	Nevýhody:
+ tlumení dynamických účinků	- potřeba el. Energie
+ schopnost řízení polohy hřídele	- vysoká cena
+ stálost v náročných prostředí	- složitost systému ložiska
+ relativně vysoká únosnost	- zahřívání ložiska

Aktivní magnetická ložiska jsou v praxi využívaná častěji než pasivní. Proto je lze najít téměř ve všech aplikacích, kde se uplatňují magnetická ložiska. Těmito aplikacemi jsou například v energetickém průmyslu setrvačníky, kompresory a turbíny. Dále se využívají v srdečních pumpách jako součást hybridního magnetického ložiska, generátorech a dalších. [60]

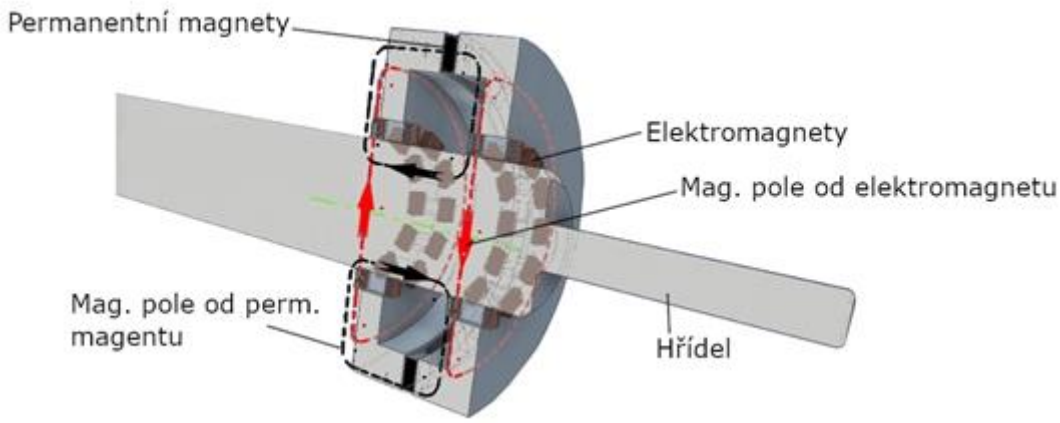
Již zmíněnou aplikací jsou setrvačníky. Ty mají za úkol uschovat energii, podobně jako baterie. Setrvačník ovšem funguje tak, že přísunem energie do setrvačníku se rotor začne otáčet. Pokud chceme energii opět odebrat, tak vybijeme setrvačník zpomalením rotoru. Jelikož setrvačníky rotují vysokou rychlostí, je potřeba zajistit, co nejnižších ztrát energie. To bývá zajištěno magnetickými ložisky, která mají téměř nulová tření mezi rotorem a statorem. Dále bývají setrvačníky uloženy ve vakuu, pro minimalizaci ztrát. Rotující část setrvačníku je vertikálně uložena v komoře pomocí pěti aktivních magnetických ložisek, které jí odebírají pět stupňů volnosti. To znamená, že se rotor může točit pouze kolem své osy. Mezi hlavní parametry setrvačníku patří hmotnost rotoru, průměr rotoru, úhlová rychlost a velikost energie, kterou je setrvačník schopen uschovat. S nynějším nástupem a vývojem baterií jsou setrvačníky na ústupu z praktického využití. [61] [62]



Obr. 17 Schéma setrvačníku [62]

3.3 Hybridní magnetická ložiska

Hybridní magnetická ložiska jsou opět ložiska, která udržují hřídel v prostoru bez kontaktu se samotným ložiskem, což eliminuje tření, mazání a další. Hybridní magnetická ložiska využívají a kombinují výhody, které mají aktivní a pasivní magnetická ložiska. Proto mezi hlavní prvky hybridních magnetických ložisek patří permanentní magnety a elektromagnety. Permanentní magnety jsou využívány k utvoření magnetického pole, toto magnetické pole nelze kontrolovat. Elektromagnety jsou součástí ložiska, protože dokáží kontrolovat své magnetické pole. Tím se dokáže udržet dynamická stabilita hřídele. Kombinací permanentního magnetu a elektromagnetu získáme menší potřebu elektrické energie, díky permanentnímu magnetu bude zároveň ložisko lehčí a méně prostorné, právě díky zakomponování elektromagnetu. [63] [64]



Obr. 18 Řez hybridním magnetickým ložiskem [65]

Magnetické pole od elektromagnetů, které je kontrolovatelné, udržuje hřídel ve stabilní poloze. Díky možnosti kontrolovat toto pole, lze tlumit například dynamické účinky působící na hřídel. Permanentní magnety kolem hřídele vytvářejí magnetické pole, které nelze kontrolovat a působí přítažnými silami na feromagnetickou hřídel. Tím permanentní magnety dodávají ložisku potřebnou únosnost. Hybridní magnetická ložiska jsou často využívaná v setrvačnících, zdravotnictví a energetice, podobně jako jiná magnetická ložiska. [63] [64]

4 MAGLEVy

MAGLEVy jsou vlaky využívající systému magnetické levitace. Tyto systémy bývají využívány, jak k samotné stabilní levitaci vlaku, tak k translačnímu pohybu vlaku nad dráhou. Díky eliminaci tření mezi koly a kolejnicemi, MAGLEVy mohou dosahovat velmi vysokých rychlostí a dochází ke snížení hluku při provozu vlaku. Přestože je doprava pomocí MAGLEVů nejrychlejší z kolejových doprav, tak je i finančně nejnáročnější. A to z velké části kvůli drahé výrobě a výstavbě nové dráhové infrastruktury. Současné typy MAGLEVů totiž nejsou schopny fungovat na již postavené kolejové síti. Dráhy pro MAGLEVy musí být navíc z hlediska bezpečnosti postaveny na mostech nebo v tunelech. Vývoj vlaků na principu magnetické levitace je podpořen čím dál větším řešením uhlíkových emisí a užívání spalovacích motorů. Doprava pomocí MAGLEVů vykrystalizovala jako jedno z budoucích možných dopravních systémů na větší vzdálenost. A to zejména díky velmi vysoké rychlosti, vysoké časové přesnosti a ekologické přijatelnosti. Vývoj levitujících vlaků probíhá přes více než sto let. První známky využití magnetické levitace v kolejové dopravě jsou začátkem 20. století. Okolo roku 1902 došlo k prvním pokusům využití magnetické levitace k odlehčení samotného vlaku, který byl konvenční konstrukce s koly. [66] [67] [68]

K vývoji technologie MAGLEVů historicky nejvíce přispívalo Německo a Japonsko. Obě poznamenané země vytvořili vlastní metodu realizace magneticky levitujících vlaků. Proto můžeme dělit MAGLEVy podle metody, díky které dokáží levitovat. Německo začalo s vývojem vlaků na principu elektromagnetického zavěšení (EMS), kdežto Japonsko dalo přednost metodě elektrodynamického zavěšení (EDS). Samotné typy vlaků dále popíšu, stejně jako jejich historický vývoj a MAGLEVy, které jsou zrealizované a fungují jako běžné linky. [67]

4.1 Transrapid (EMS MAGLEV)

Transrapid je název projektu, který se zabýval železniční dopravou s využití magnetické levitace. Je příkladem vlaku využívajícího elektromagnetického odpružení. Vývoj Transrapidu byl zahájen roku 1969. Projekt byl po úspěšných testovacích jízdách ukončen. A to zřejmě kvůli nedostatku financí a nehodě, která se stala na dráze. [69]

4.1.1 Historie

Projekt byl započat roku 1969. Byl svěřen dvěma firmám, které se podílely na vývoji a vedly mezi sebou konkurenční boj, Messerschmitt-Bolköw-Blohm (MBB) a Krauss Maffei (KM). Následující rok byl vytvořen první levitující vlak firmou KM, který měl pojmenování Transrapid 01 a byl testován na trati dlouhé 600 m. Roku 1971 firma MBB odpověděla svým levitujícím vozidlem, které bylo schopné dosáhnout rychlosti 100 km/h s váhou okolo 5,8 tun. MAGLEV s názvem Transrapid 02 byl vyroben roku 1971 opět firmou KM. Ten dokázal jet rychlostí 164 km/h a byl testován na dráze dlouhé 930 m. Samotná dráha již obsahovala jednu zatáčku, kterou Transrapid 02 zvládl projet.

Obr. 19 Transrapid 01 [71]

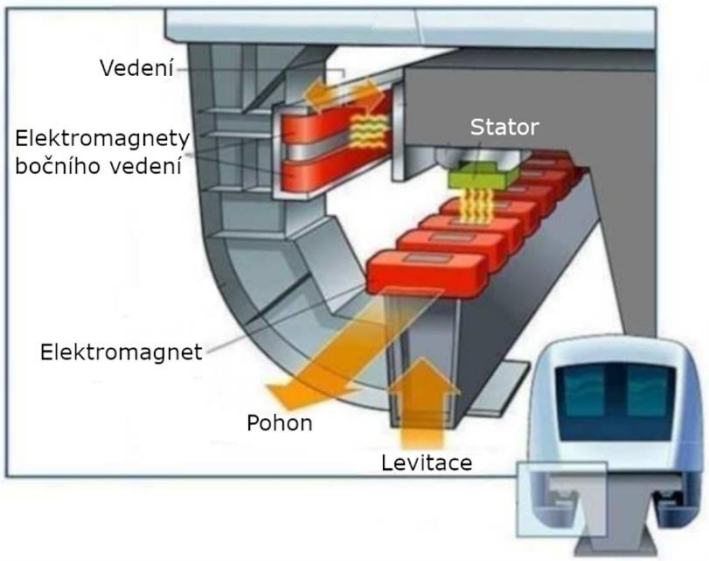
V roce 1972 vyšla firma KM s návrhem nového vlaku Transrapid 03. Vozidlo mělo využívat vzduchového polštáře místo magnetické levitace. Přestože testování proběhlo úspěšně, tato technologie se jevila jako krok zpět. A to zejména kvůli vysoké spotřebě a přílišnému hluku. Firma KM se vrátila k vlakům využívající magnetickou levitaci a zkonstruovala Transrapid 04. Ten už zvládl unést 20 osob a byl schopen levitovat rychlostí 253,2 km/h na dráze o délce 2,4 km. Roku 1974 přišla firma Siemens ve spolupráci s ostatními s návrhem MAGLEVu, který využíval metody EDS. Vlak nesl označení EET a dokázal jet rychlostí pouze 200 km/h. V roce 1979 proběhla Mezinárodní výstava dopravy v Hamburku, kde byl představen nový model, Transrapid 05. Na výstavě byl sestaven s dráhou dlouhou 908 m a byl přístupný exhibičním jízdám. Během akce jízdu v Transrapidu 05 absolvovalo okolo 55 000 lidí. Maximální rychlost vlaku byla na výstavišti 75 km/h. Firma KM představila roku 1983 nadcházející model Transrapid 06. Ten se již pohyboval na nově vystavěné dráze v Lathenu. Vozidlo bylo dlouhé 54 m a vážilo 122 tun. Vlak byl schopen převést 196 cestujících. Roku 1988 dokázal Transrapid 06 jet rychlostí 412,6 km/h. Německo téhož roku plánovalo vybudování stálé linky mezi Hanoverem a Hamburgem. Už po roce 1987 začal vývoj novějšího modelu, který měl dosahovat rychlosti 500 km/h. Hotový Transrapid 07 byl představen v Hamburgu opět na Mezinárodní dopravní výstavě roku 1989. Byl sestaven ze dvou souprav, které dohromady činily délku 100 m. Vozidlo mělo kapacitu 200 cestujících. Roku 1993 dosáhl rychlosti 450 km/h. V průlomu MAGLEVů stál Transrapid 08. Byl vyroben roku 1999. Jeho maximální rychlost činila 500 km/h. Své předchůdce ale předčil svou akcelerací, tichostí a energetickou účinností. Projekt vypadal tak slibně, že byl v roce 2000 podepsán kontrakt na vybudování první komerční tratě, na které by jezdil Transrapid. [70] [71]

Bohužel, roku 2006 se stala nehoda na již zmíněné zkušební trati v Lathenu. 22. září probíhala ukázka na testovací trati, kde měl vlak jet rychlostí 450 km/h se 34člennou posádkou. Ale lidskou chybou zůstal údržbový vůz na dráze. Přestože byla spuštěna nouzová brzda, tak vlak do vozu narazil v rychlosti 162 km/h. Během této nehody zemřelo 23 lidí a 11 se zranilo, z toho 10 vážně. Transrapid 09 byl poslední MAGLEV ze série Transrapid a byl pouze lehce zdokonalenou verzí Transrapidu 08. Po nehodě bylo testovací středisko uzavřeno a celý projekt zkrachoval kvůli financím. Proto byl Transrapid 09 dán na trh a roku 2016 odkoupen firmou Kemper za €200,001. Nyní stojí jako součást výstavy o historii Transrapidu. [72] [73]

Obr. 20 Transrapid 09 [74]

4.1.2 Konstrukce Transrapidu 08

Levitační systém Transrapidu funguje na základě metody EMS. Vlak pohání lineární synchronní motor s dlouhým statorem, který se vine po celé délce tratě. Ten se skládá z paketů plechů. Ty mají v sobě drážky, do kterých jsou navinuty dráty trojfázového vinutí. Proti statoru jsou upevněny na vlaku stejnosměrné elektromagnety.



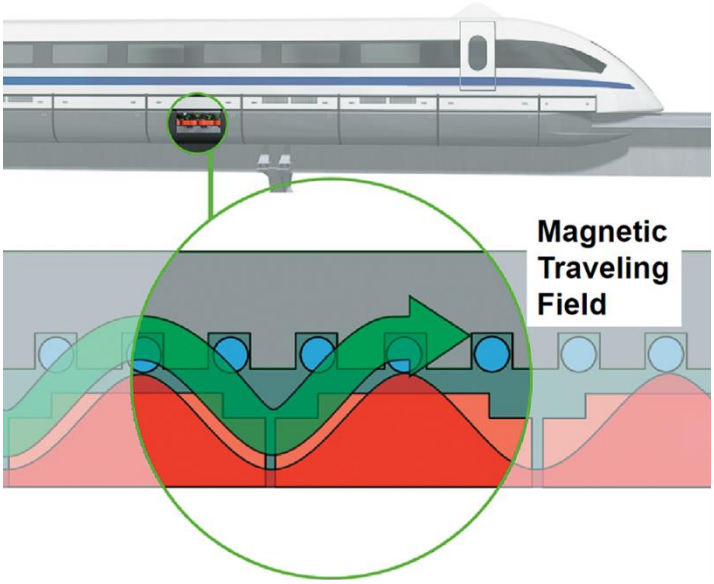
Obr. 21 Pohled na levitační systém Transrapidu [76]

Postupným řazením elektromagnetů ve statorové části vznikne lineární magnetické pole, které v interakci se stejnosměrnými elektromagnety vlaku uvede vozidlo do pohybu. Rychlost vlaku se ovlivňuje frekvencí napájení statoru, jelikož rychlost postupného magnetického pole přímo ovlivňuje rychlost vlaku. Tímto způsobem se uvede vlak do pohybu.

Pro zajištění levitace je zde využito přitažlivé síly mezi stejnosměrným magnetem a plechovým paketem. Levitační síla vyrovnává gravitační sílu takovým způsobem, aby mezi vlakem a tratí byla neustále vzduchová mezera minimálně 10 mm. To se koriguje budícím proudem, který teče do elektromagnetů.

Po stranách rámu jsou vbudovány vodící elektromagnety, které udržují stabilitu vozidla. Vyrovnávají síly, například náporu větru, při průjezdu zatáčkou nebo při jakémkoliv jiném vychýlení.

Elektromagnety jsou při nízkých rychlostech napájeny pomocí baterií, které udrží vlak levitovat i hodinu na místě. Baterie napájejí v rozmezí od 0 do 80 km/h. Při vyšších rychlostech MAGLEVu jsou využívány lineární generátory, které jsou vkonstruováno do elektromagnetů, které způsobují levitaci. Navíc se během provozu napájí jen určitá část trati, na které zrovna projíždí vlak. Tím se ušetří velká část energie. Brždění probíhá pomocí generátorů, kdy se energie z brzdícího vlaku přeměňuje na energie, která putuje zpět do sítě. To probíhá za pomoci již známých rekuperačních systémů. Trať se skládá z betonové konstrukce ve tvaru "T" a může dosahovat výšky až 20 m. [75] [76]



Obr. 22 Pole utvářející pohon [77]

Mezi hlavní výhody EMS MAGLEVů patří fakt, že mohou levitovat neustále i při malých rychlostech, což u EDS MAGLEVů není možné. Na druhou stranu, trať pro EMS vlaky musí splňovat určité tolerance, díky kterým je zaručena vzduchová mezera i při působení dynamických účinků. To zvyšuje náklady na výstavbu. Další výhodou EMS systému je fakt, že není potřeba stínění magnetického pole, jelikož bývá o nízké magnetické indukci v řádech stovek μT. Nevýhodou těchto systémů je jejich nižší stabilita a vyšší hmotnost než u EDS MAGLEVů. [78] [79]

4.2 SC MAGLEV (EDS MAGLEV)

SC MAGLEV je pojmenování pro typ MAGLEVů, které využívají metody EDS pro samotnou levitaci, pohyb a vedení v dráze. Historicky se na vývoji tohoto typu vlaků nejvíce podílelo Japonsko. Na vývoji SC MAGLEVu pracuje firma Central Railway Company (JR Central), která i vlastní patent technologie, ve spolupráci s Technickým výzkumným institutem železniční dopravy. SC MAGLEV donedávna držel rychlostní rekord a to 603 km/h. [80]

4.2.1 Historie

Roku 1962 započal výzkum levitujícího vlaku, který by fungoval za pomoci metody EDS. Japonské národní železnice (JNR), které se angažovaly ve výzkumu, si kladly za cíl vytvořit pravidelnou linku mezi Tokyem a Osakou. A požadavek byl, aby tato cesta trvala pod hodinu. Roku 1969 americká laboratoř přišla na využití supravodivých magnetů k magnetické levitaci. Následně JNR oznámily začátek vývoje vlastní technologie založené na supravodivých magnetech. První funkční MAGLEV typu SC vznikl v roce 1972. JNR ho pojmenovaly ML-100. Po velmi úspěšných testech bylo Japonsko připraveno prodávat licence jejich zvládnuté technologie. JNR pokračovalo s vývojem a roku 1975 došly k modelu ML-100A, který byl poháněn lineárním synchronním motorem.

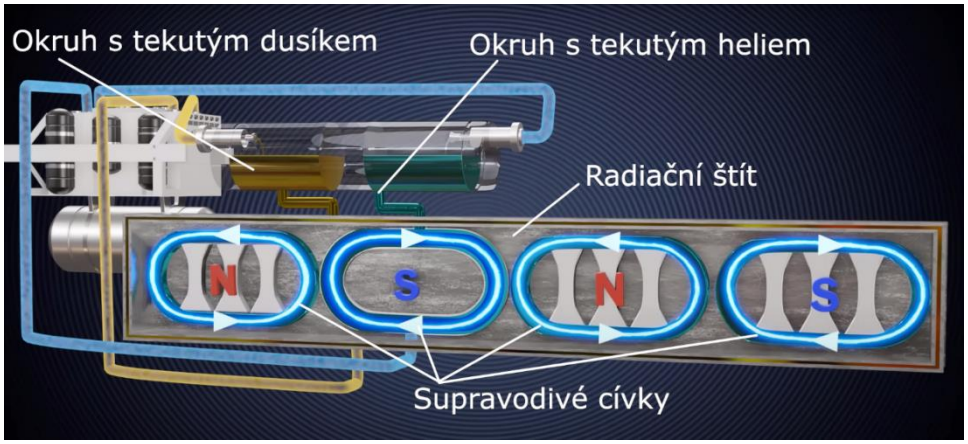
Obr. 23 ML-100 [83]

V roce 1977 vzniklo testovací středisko v městě Hyūga. Testovací dráha byla dlouhá celkem 7 km. První vozidlo, které zde bylo testováno byl MAGLEV ML-500. Ten dosahoval rychlosti 517 km/h. Vážil přibližně 10 tun a měl délku 13,5 m. Následovaly testovací modely MLU001 a MLU002. Ty v 90. letech 20. století dosahovaly rychlostí okolo 400 km/h. Po roce 1990 začalo budování nové testovací trati, která byla dlouhá 18,4 km. Nacházela se ve městě Tsuru. Právě na této trati začaly po roce 1998 testovací jízdy s cestujícími. Roku 2002 byl zkonstruován model MLX01, který v následujícím roce jel rychlostí 581 km/h a tím držel světový rychlostní rekord. Testovací zařízení v městě Tsuru bylo pozastaveno, z důvodu prodloužení dráhy na 42,8 km. Na této dráze opět SC MAGLEV, s názvem L0, překonal světový rychlostní rekord. Roku 2015 pokořil rychlost 590 km/h. Za necelý týden sám L0 MAGLEV navýšil pomyslnou laťku a dosáhl rychlosti 603 km/h. Pro nabytí této rychlosti, L0 vlak potřeboval pouze 4 minuty. L0 jezdí se dvěma soupravami. Každá z nich pojme až 388 cestujících. Model tohoto MAGLEVu je vzhledově výrazný svými prodlouženými konci, které zlepšují aerodynamičnost a snižují hluk. Roku 2011 dostala firma JR central povolení k výstavbě linky mezi Tokyem a Nagoyou. Stavba by měla trvat do roku 2027. Je v plánu prodloužení trati do Osaky, které by mělo být zrealizované do roku 2037. [81] [82]

Obr. 24 L0 MAGLEV typu SC [84]

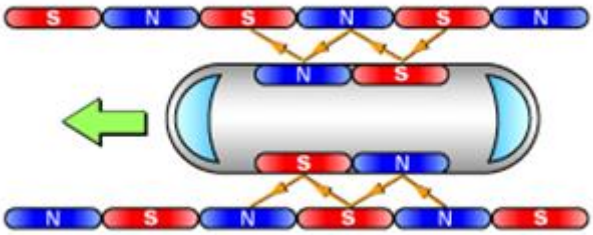
4.2.2 Konstrukce L0 MAGLEVu

SC MAGLEVy využívají metody EDS popsané v kapitole 1.3.3. Tento druh levitujících vlaků využívá místo konvenčních elektromagnetů supravodivé elektromagnety. Ty mají schopnost vytvářet větší a silnější magnetická pole, na rozdíl od klasických elektromagnetů. Ty mají totiž své limity kvůli ohřívání při průchodu většího proudu. Vodič, ze supravodivého materiálu, je ochlazen pod kritickou teplotu T_C. Tím získá již dříve popsané supravodivé vlastnosti, jako nulový elektrický odpor. Supravodivé cívky jsou nabity stejnosměrným proudem pouze jednou, jelikož zde není elektrický odpor. Supravodivý elektromagnet je nabit proudem okolo 700 kA, což vytváří velmi velké a silné magnetické pole. Tohoto by konvenční elektromagnet nebyl schopen, z důvodu ohřívání. Supravodivé cívky v SC MAGLEVech jsou vytvořené ze slitiny niobu a titanu. Tato slitina má kritickou teplotu 9,2 K. Pro udržení cívky pod tuto hodnotu, je zde využíváno tekutého hélia, které teče okolo vodiče a má teplotu 4,5 K. Tím, že tekuté helium přebírá teplo od cívky, tak zvedá svou vlastní teplotu a odpařuje se. Proto je zde vbudována chladící jednotka na principu Gifford-McMahonova chladícího cyklu, která opět zkapalní helium. Dále je potřeba zabránit přístupu tepla ve formě radiace. Kvůli tomu je supravodivá cívka uzavřená v radiačním štítu. Samotný radiační štít je chlazen jednotkou s tekutým dusíkem.



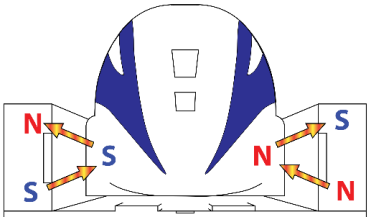
Obr. 25 Jednotka se supravodivým elektromagnetem [85]

Uvnitř komory s cívkou je udržováno vakuum, pro zajištění minimálního přestupu tepla na vodič. Dovnitř komory je ve skutečnosti vloženo několik supravodivých cívek, s opačným směrem stejnosměrného proudu než vedlejší. Tím vytvářejí magnetická pole o střídajících polaritách. Tato popsaná jednotka se supravodivým elektromagnetem je umístěna několikrát po obou bocích vlaku. Po bocích dráhy jsou vkonstruované cívky se střídající se polaritou. Magnetická pole supravodivých elektromagnetů a cívek, které jsou v dráze, začnou interagovat takovým způsobem, že supravodivé magnety se budou přitahovat k opačným pólům a odpuzovat od stejných. Jakmile se supravodivé cívky dostanou do limitní pozice, tak cívky uvnitř trati přepnou polaritu svého magnetického pole a supravodivé jednotky jsou dále posouvány přitažlivými a odpudivými silami. To znamená, že čím rychleji se bude přepínat polarita pevných cívek v trati, tak rychleji pojede samotný MAGLEV. Pro úsporu energie jsou cívky v trati zapnuté pouze nad MAGLEVem a v krátké blízkosti před ním. Tímto způsobem je zajištěn pohon SC MAGLEVu. Výše popsaný způsob je znázorněn na následujícím obrázku. [85] [86]



Obr. 26 Princip pohonu SC MAGLEVu [87]

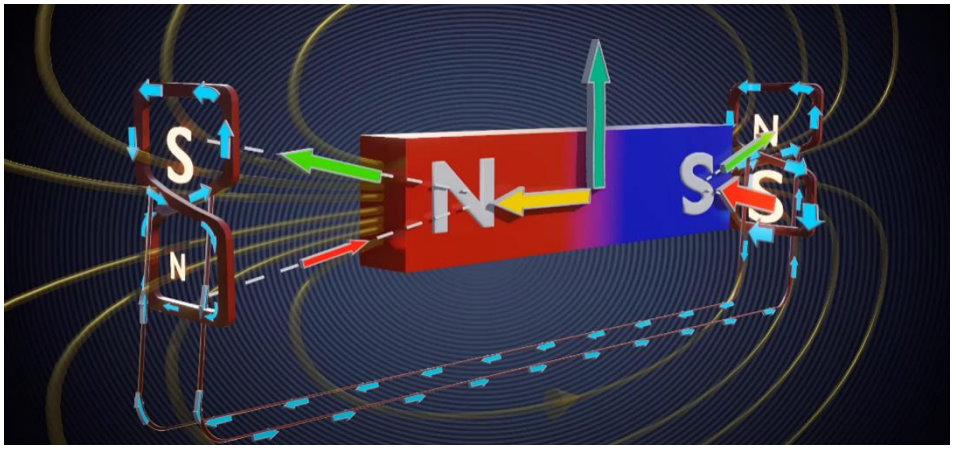
Pro zajištění levitace vlaku, cívky ve tvaru “8“ jsou nainstalovány do tratě před pohonné cívky. Tyto cívky ovšem nejsou napájené, na rozdíl od pohonných. Supravodivé jednotky na obou bocích vlaku vytvářejí společné magnetické pole. Při relativním pohybu mezi supravodivými magnety a tratí se začne indukovat proud do levitačních cívek tvaru “8“. K indukci nemůže dojít při pohybu supravodivým magnetem, ve výšce středu levitační cívky. Jelikož se indukované proudy ve smyčkách rovnají a spolu vynulují. Proto musí být supravodivé jednotky pod středem levitující cívky. Tím se indukuje větší část proudu na spodní smyčce v jednom směru a cívkou teče proud. Na cívce se vytvoří dva póly tak, že spodní pól působí odpudivou sil na supravodivý magnet a horní pól přitažlivou. Tím na MAGLEV působí výtlačná síla, která působí proti tíhové. Pokud je tato magnetická síla větší než tíhová, tak se vlak zvedne. Tím se ale supravodivá jednotka také dostane do vyšší polohy a tím sníží hodnotu indukovaného proudu v levitační cívce. To znamená, že se výtlačná magnetická síla sníží. Nakonec se vlak usadí v poloze, kde magnetická síla se vyrovná tíhové. Díky této technologii, je dosaženo vzduchové mezery mezi vlakem a tratí. Vlak levituje okolo 10 cm, což je více než u jiných vlaků mimo Japonsko. Důvodem je vysoká rizikovost geologické aktivity.



Obr. 27 Princip levitace SC MAGLEVu [88]

V kapitole 1.3.3 je uveden důvod, proč je vlak schopen levitovat jen od určité rychlosti. To je také důvod, proč jsou SC MAGLEVy vybaveny navíc klasickými koly. [85] [86]

SC levitující vlaky se pohybují ve speciálních tratích tvaru "U". Z pochopitelných důvodů, je snaha udržet vlak uprostřed dráhy. Toho je docíleno opět pomocí levitačních cívek tvaru "8". Totiž všechny levitační cívky na jedné straně trati jsou spojeny pomocí vodičů s levitačními cívkami na druhé straně trati. Pokud se vlak nachází uprostřed tratě, tak se na obou stranách tratě indukují stejné proudu, a proto spojovacími vodiči neteče žádný proud. Při vychýlení vlaku na jednu stranu se začnou indukovat rozdílné proudy a spojovacími vodiči začne téct proud. Ten silně ovlivní protékající proud v cívkách a sílu magnetických polí ve spodních smyčkách. Na obr. 27 je uveden příklad. Velký tyčový magnet zde nahrazuje dvojici supravodivých jednotek. V tomto příkladě vlak tedy vybočil vpravo. V obou levitačních cívkách se začaly indukovat rozdílné proudy. Tím začal procházet proud spojovacími vodiči a ten zvýšil proud protékající spodní smyčkou pravé cívky. Ta tím pádem působí větší magnetickou silou než horní smyčka cívky. Na druhé straně se stane podobné, jen opačné. Všimněme si, že obě zvětšené síly mají stejný směr a to takový, aby uvedly vlak opět do stabilní polohy. Jakmile vlak této polohy dosáhne, tak na obou cívkách se začnou indukovat stejné proudy a spojovacími vodiči neprotýká proud. Tímto způsobem je řešeno vedení vlaku v trati. [85]



Obr. 28 Příklad vedení vlaku [85]

Aby všechny systémy fungovaly, je potřeba velké množství elektrické energie. Ta není získávána z baterií, ale je přenesena z trati na vlak, a to pomocí indukce. Ve trati jsou umístěny další napájené cívky, které předávají svou energii sběrným cívkám uvnitř vlaku. Dalším důležitým prvkem SC MAGLEVů jsou magnetické štíty. Tím, že supravodivé magnety vytvářejí velké a silné magnetické pole, uvádějí tím cestující do nebezpečí. Proto jsou do vlaků vkonstruované magnetické štíty, které odkloňují magnetické pole od prostorů s cestujícími. Mezi nejpoužívanější materiály na magnetické štíty patří slitina permalloy a mu-metal. [85] [89]

Mezi hlavní výhody EDS MAGLEVů patří fakt, že jsou mnohem stabilnější než jejich EMS protějšek. Hlavní nevýhodou je rozjezd vlaku. Potřeba kol odrazuje skutečnost, že při nízkých rychlostech, EDS MAGLEVy nemají dostatečně velkou levitační sílu pro zdvih vozidla a zároveň zde nastává již zmíněný brzdící efekt. Japonsko se nejspíše vydalo cestou EDS MAGLEVů, z důvodů velké vzduchové mezery a velké stability, která je žádoucí při velké geologické aktivitě. [90]

4.3 MAGLEVy v provozu

Momentálně je v provozu sedm linek, které fungují na běžné komerční bázi. Z toho, 4 se nachází v Číně, 2 v Jižní Koreji a jeden v Japonsku. A pouze jeden spoj funguje jako vysokorychlostní. MAGLEVy na ostatních linkách dosahují výrazně nižších rychlostí.

První frekventovaně používanou pravidelnou linkou, která byla otevřena je MAGLEV v Šanghaji. Tento systém je navíc speciální tím, že je založen na principu německého Transrapidu, tedy EMS MAGLEVu. Tuto technologii dodala Číně firma Siemens. Zkušební jízdy této linky započaly roku 2002. Po opravení několika technických problému byl spoj oficiálně otevřen roku 2004. Dráha Šanghajského MAGLEVu je dlouhá 30 km a vlak jí zdolá za 8 minut. Průměrná rychlost vozidla přitom činí okolo 220 km/h. Vlak se nejdříve urychluje po dobu 210 sekund. Poté dosáhne rychlosti 430 km/h. Touto rychlostí jede 50 sekund a poté začne zpomalovat po dobu opět 210 sekund. Jedná se o jediný pravidelný vysokorychlostní spoj, který využívá magnetické levitace na světě. [91]

Obr. 29 Šanghajský MAGLEV [92]

Další komerčně využívanou linkou je Linimo. Ta se nachází v blízkosti japonského města Nagoya. Tato dráha byla ve skutečnosti vybudována za účelem exhibice na Expu 2005. Po skončení výstavy, tato linka začala fungovat jako pravidelný spoj. Vlak jezdí po dráze dlouhé 8,9 km a staví na devíti zastávkách. Nejvyšší rychlost tohoto vozidla je 100 km/h. Tato linka je především známá tím, že je prvním komerčním MAGLEV spojem, který je řízen bez osádky. Celkově se jedná o druhou komerční MAGLEV linku, po Šanghajském MAGLEVu. [93]

V Jižní Koreji, firma Hyundai započala výzkum vlastního EMS MAGLEVu. Po 14 letech vývoje došlo na výstavbu první pravidelné linky. V roce 2008 byl vlak připraven k provozu. Linka je dlouhá pouze jeden kilometr a spojuje místní park s národním muzeem v Daejeonu. [94]

V roce 2016 byla nově otevřená linka, fungující na letišti v Incheonu, v Jižní Koreji. Vlak jezdící po této trati je novější model vlaku, který jezdí po trati v Daejeonu. Tato verze vozidla je mnohem lehčí, tím se snížily výrobní náklady na polovinu. Systém opět využívá EMS levitační metody. Trať je dlouhá celkem 6,1 km a má 6 stanic. MAGLEV se pohybuje průměrnou rychlostí 80 km/h. Linka nenaplnila očekávání z pohledu počtu cestujících. V roce 2022 byl spoj dočasně uzavřen z důvodu oprav a údržby. Během roku 2023 nebyla budoucnost tratě jasná. Nakonec byly nařízeny pokyny k přestavbě v roce 2024. [94]

V roce 2014 byla zahájena výstavba trati mezi Čchang-šavským letištěm a železniční stanicí. Stavba byla dokončena v roce 2015. Po testovacích jízdách byl zahájen plnohodnotný provoz v roce 2016. Délka trati činí okolo 19 km a průměrně jí navštíví okolo 8 000 cestujících za den. Maximální dosahovaná rychlost byla 100 km/h. V roce 2021 byl nasazen nový model vlaku, který dosahoval maximální rychlosti 140 km/h. Tím se snížil čas přesunu mezi stanicemi o tři minuty. [95]

Další linka využívající technologii magnetické levitace, kterou postavila Čína, je linka S1 Pekingského metra. Ta je v provozu od roku 2017. Linka je dlouhá 10 km. Z toho se většina dráhy nachází nad zemí. Pod zemí MAGLEV jede pouze po části trati dlouhé okolo 300 m. Maximální dosahovaná rychlost na této lince je 100 km/h. [96]

Poslední a nejnovějším spojem je MAGLEV ve Fenghuangu. Jedná se o další nízkorychlostní MAGLEV v Číně. Linka je veřejnosti přístupná od roku 2022 a spojuje dvě vysokorychlostní železnice. MAGLEV se po trati pohybuje opět maximální rychlostí 100 km/h. Na dráze je naplánováno 6 stanic, z toho jsou 2 stále ve výstavbě. [97]

Obr. 30 Fenghuang MAGLEV [98]

5 Budoucnost magnetické levitace

S technologií magnetické levitace se budeme v budoucnosti nejspíše setkávat častěji než nyní, a to nejen ve veřejné dopravě, ale také v průmyslové výrobě, či zdravotnictví. Magnetická levitace umožňuje vozidlům, zařízením, a dokonce i lidským tělům pohybovat se bez dotyku s povrchem, což otevírá dveře k novým úrovním efektivity a rychlosti.

Ve veřejné dopravě, magnetická levitace umožní vytvoření rychlejších a pohodlnějších způsobů přepravy. Vysokorychlostní vlaky, které plují nad kolejnicemi pomocí magnetického pole, budou nabízet cestujícím revoluční zážitek, přičemž dosáhnou rychlostí, které představují dosud nepředstavitelnou možnost. To nejenže zkrátí dobu cestování mezi městy, ale také zmenší zátěž na životní prostředí, sníží dopravní zácpy a zlepší propojenost regionů.

V průmyslové výrobě bude magnetická levitace znamenat úplně nový přístup k manipulaci s těžkými a křehkými objekty. Zařízení poháněná magnetickou levitací budou schopna manipulovat s materiály bez fyzického kontaktu, což minimalizuje riziko poškození a zvyšuje přesnost výrobních procesů.

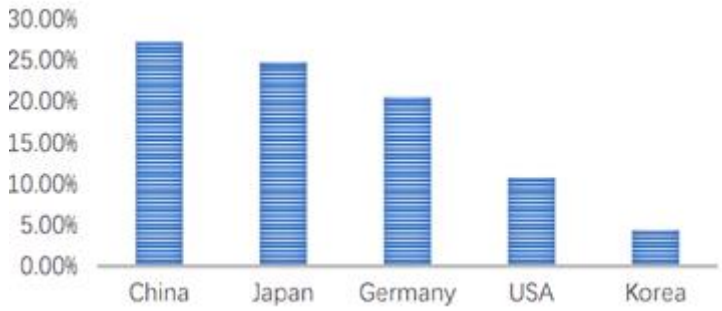
To povede k výraznému zlepšení v oblasti výroby elektroniky, lékařských zařízení a dalších precizních výrobků.

Ve zdravotnictví může magnetická levitace otevřít cestu k novým metodám diagnostiky a léčby. Magnetické levitace umožní lékařům přesně cílit terapeutické látky na určená místa v těle bez nutnosti invazivních chirurgických zákroků. To by mohlo vést k pokročilejší léčbě nádorových onemocnění, neurologických poruch a dalších zdravotních stavů, zvyšující účinnost a minimalizující vedlejší účinky.

Celkově lze říct, že magnetická levitace představuje revoluční technologii, která má potenciál změnit způsob, jakým interagujeme s fyzickým světem, a otevřít cestu k novým možnostem a inovacím ve spoustě odvětví. [36]

5.1 MAGLEVy ve výstavbě

Mezi hlavní průkopníky ve vývoji MAGLEVů je Čína. Tomu napovídá i obr. 30, který popisuje země s nejvíce patenty, které se týkají magnetické levitace. Momentálně jsou ve výstavbě dvě linky, využívající technologii magnetické levitace. Jedna se nachází v Japonsku a druhá právě v Číně.



Obr. 31 Země s nejvíce patenty, týkající se magnetické levitace [99]

Chuo Shinkansen má být první vysokorychlostní MAGLEV postavený v Japonsku. Stavba spoje začala v roce 2014 a měla skončit v roce 2027. Ovšem s komplikacemi, které nastaly, se očekává konec výstavby v roce 2037. Chuo Shinkansen má spojovat tři velká města, a to Tokyo, Osaku a Nagoyu. Při dokončení projektu dojde ke zkrácení času cesty o více než polovinu, ve srovnání s nejrychlejším konvenčním vysokorychlostním vlakem. Právě tento MAGLEV, který má jezdit po této trati, nastavil v roce 2015 rychlostní světový rekord s rychlostí 603 km/h. Provozní rychlost vlaku má být 505 km/h. [100]

Dalším MAGLEVem, který je ve výstavbě je tzv. Qingyuan MAGLEV. Je budován v Číně a jedná se o další nízkorychlostní vlak. Linka měla být dokončena v roce 2020, nicméně stále pokračuje. Momentálně je v plánu výstavba trasy, která je dlouhá 8,1 km, ale celá plánovaná dráha má být dlouhá 38,5 km. Provozní rychlost tohoto vlaku má být 100 km/h. [101]

Na podzim roku 2023 čínská firma předčila rychlostní rekord z roku 2015 (603 km/h) a pomyslnou laťku posunula na 623 km/h. Tímto milníkem ovšem nemají chuť končit. Protože již proběhly testovací jízdy v tunelech, částečně zbavených vzduchu. Cíl, který mají inženýři v hledáčku je 1000 km/h. A chtějí ho docílit s maximální redukcí odporu vzduchu. Tedy jízdou v tunelu, ve kterém bude téměř vakuum. Tím by vlak dosáhl vyšší rychlosti, než kterou létají soukromá proudová letadla. [102]

Obr. 32 MAGLEV držící světový rekord [102]

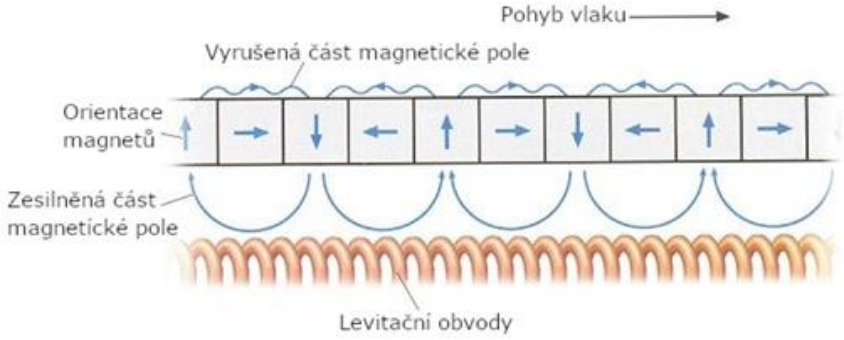
5.2 Inductrack

Inductrack je další možností aplikace magnetické levitace v dopravních prostředcích. Jedná se o tzv. pasivní systém, což tedy znamená, že nevyužívá přímo elektrické energie pro svou funkci. Inductrack je založen na EDS metodě, která byla již popsána v předešlých kapitolách.

Ve vlaku jsou vkonstruovány permanentní magnety, které jsou uspořádané do Halbachovy soustavy. Tím se pod těmito permanentními magnety vytvoří silné periodické sinusoidní pole, kdežto na druhé straně se téměř vyruší. Dalším potřebným prvkem jsou elektrické obvody, které jsou umístěny do tratě. Jsou velmi hustě umístěny a zároveň nimi neteče elektrický proud. Když se začne vlak pohybovat po trati, tak se v obvodech tratě začne indukovat elektrický proud a tím se vytvoří protější magnetické pole, které odporuje magnetickému poli od permanentních magnetů Halbachovy soustavy. Při využití neodymových (NdFeB) magnetů lze dosáhnout levitační síly, která dokáže zvednout $40\ \mathrm{t}$ na $1\ \mathrm{m}^2$, kde levitující magnet zabírá pouze 2 % z této váhy. Opět je potřeba konvenčních kol, pro uvedení vlaku do pohybu a zároveň z hlediska bezpečnosti, kdyby nastala chyba systému.

Na přelomu 20. a 21. století tým vědců z Kalifornie, vedený Richardem F. Postem, přišel na využití Halbachovy soustavy k levitaci vlaku. Od svého vzniku byl Inductrack aktivně zkoumán a vyvíjen.

Dvě hlavní složky působí proti pohybu Inductracku a to odpor vzduchu a magnetický odpor. Tyto složky působí proti uvedení vlaku do pohybu a zpomalují ho při jeho provozu. Při malé konstantní rychlosti je potřeba energie k přetlačení těchto odporů. Při urychlování vlaku se zvyšuje také magnetický odpor, ale pouze do určité hranice. Ve vyšších rychlostech začne magnetický odpor klesat. Při testovací jízdě bylo dosaženo levitace při rychlosti 35 km/h. [103]



Obr. 33 Princip levitace Inductracku [104]

NASA v současnosti podniká kroky k využití technologie Inductracku k urychlování vesmírných raket. V Huntsville, ve výzkumném středisku NASA, je postavena testovací dráha, která je určená právě pro tuto aplikaci. Uvedený systém s magnetickou levitací by měl být schopen urychlit raketu na takovou rychlost, aby se odtrhla od působení gravitačního pole Země. Raketa v dráze by měla být schopna dosáhnout rychlosti okolo 1 000 km/h. Tímto způsobem by se snížily náklady na vypouštění raket do vesmíru. Raketa by měla nižší váhu, kvůli absenci paliva a pohonným dílčím raketám. NASA zvažuje několik různých řešení, které využívají magnetickou levitaci. [36]

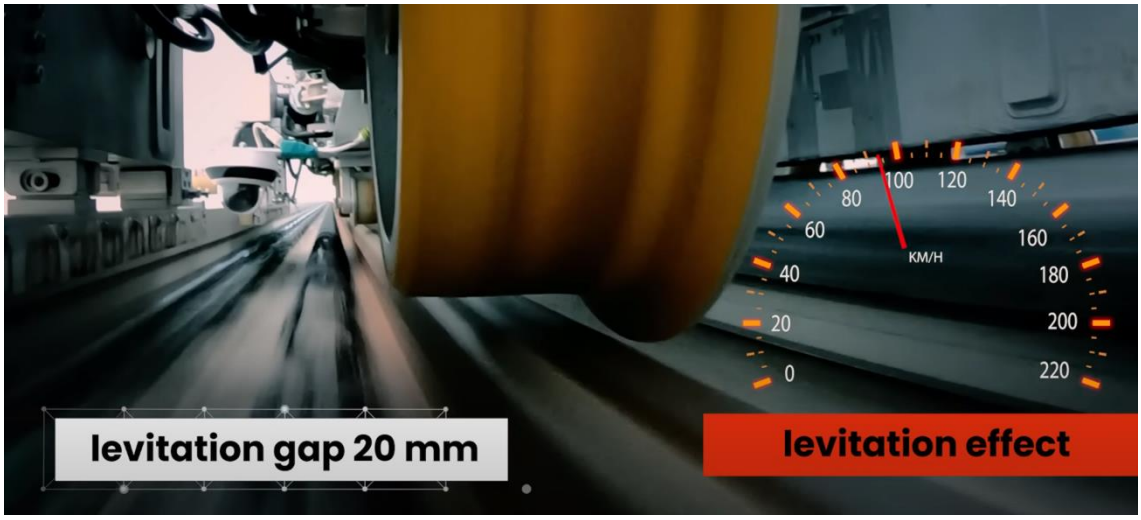
Obr. 34 Odpalovací systém navržený společností NASA [36]

Hyperloop je další inovativní dopravní koncept navržený společností SpaceX a Tesla, který by mohl revolučně změnit způsob, jakým lidé a náklady cestují. Tento systém by fungoval pomocí vzduchového tlaku a magnetické levitace na bázi Inductracku, což by umožnilo vysokorychlostní pohyb kapslí nebo vlaků v trubkovitém systému. Díky své rychlosti a efektivitě by Hyperloop mohl zkrátit cestovní časy mezi městy a regiony, což by mohlo mít pozitivní dopad na mobilitu a ekonomiku. Navzdory svému potenciálu, Hyperloop stále čelí technickým, bezpečnostním a regulačním výzvám, které je třeba překonat předtím, než se stane běžnou součástí dopravy. [36]

5.3 Evropa a MAGLEVy

Přestože se může zdát, že se vývoj vlaků s magnetickou levitací v Evropě pozastavil od nehody Transrapidu v Lathenu, tak tomu tak úplně není. Velká část prostředků z Evropské komise putuje právě do firem, které se zabývají vývojem MAGLEVů. Příkladem je start-up firma Nevomo. Jedná se o polskou firmu, která se zajímá o vývoj MAGLEVů, s využitím technologie Hyperloopu. Společnost Nevomo byla založena roku 2017 a již během prvního roku si nechala zapsat 8 patentů, týkajících se magnetické levitace. Počátkem roku 2020 se začalo s testováním na zkušebních tratích. V roce 2022 byla dokončena výstavba nejdelší zkušební trati, která je dlouhá 700 m.

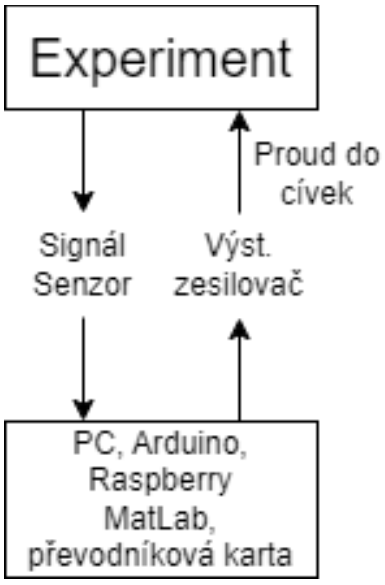
V posledních dvou letech došlo k pokročilým úspěšným testovacím jízdám. Nevomo si pokládá za cíl vybudování 3 odlišných konceptů, které mají využívat jimi nazvanou pasivní levitaci. Tato technologie má fungovat na běžných konvenčních kolejnicích, což by jednoznačně snížilo náklady, právě díky využití již postavené infrastruktury. Jeden z konceptů je MagRail Booster. Ten má dovybavit již stávající železniční vozy a zautomatizovat provoz. Dalším projektem je Levitating MagRail. Tento projekt se týká postavení MAGLEVu, který má levitovat na konvenčních kolejnicích a má se pohybovat rychlostí od 300–500 km/h. Tento systém si již prošel několika úspěšnými testovacími jízdami. Posledním projektem, kterým se firma Nevomo zabývá, je samotný Hyperloop. Hyperloop je systém pro přepravu osob v prostorách, které jsou zbavené vzduchu. Plánovaná přepravní rychlost má činit až 1200 km/h. Zatím se jedná pouze o koncepční návrh. [105]



Obr. 35 Ukázka z testovací jízdy MagRailu od firmy Nevomo [106]

6 Popis a návrh změn laboratorního experimentu

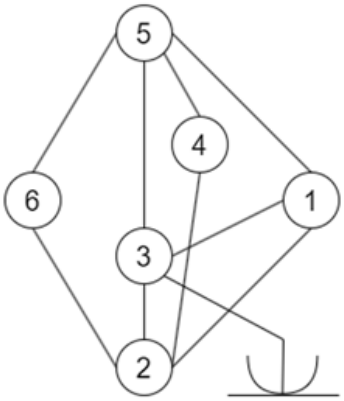
Součástí práce je popsání, již z části vytvořeného, experimentu a návrh změn pro správnou funkčnost a ucelenost experimentu. Jedná se o vlak, který levituje nad dráhou pomocí magnetické levitace. Je potřeba upřesnit, že pomocí magnetické levitace je realizováno samotné nadzvednutí vlaku. Právě kvůli tomu, že zajištění dalších stupňů volnosti, či pohonu, pomocí magnetické levitace, by bylo příliš složité a náročné. Proto bude popisovaný systém zajišťovat pouze nadnášení modelu vlaku. V následujících kapitolách budu popisovat orgánovou strukturu technického systému, stejně jako popis jednotlivých komponent, která jsou v zařízení použita. Dále uvedu simulace experimentu, které jsem provedl pomocí softwaru, který pracuje s metodou konečných prvků pro problémy, které se týkají magnetismu. Na základě těchto simulací uvedu závislosti, které blíže upřesňují a popisují funkci popisovaného magnetického systému.



Obr. 36 Řetězec pro zpracování signálu

6.1 Funkce a funkční struktura

Nadnášení vlaku je realizováno pomocí přitažlivého vztahu mezi elektromagnetem a dráhou. Tyto elektromagnety jsou dva a jsou pevně ukotveny v modelu vlaku. Elektromagnety vytvářejí silné magnetické pole. Tím, že je magnetické pole vyvoláno elektromagnetem, tak nám dává schopnost kontrolovat jeho vlastnosti. Jádro elektromagnetu je tvořeno z feromagnetického materiálu a je tvaru "E". Tím elektromagnet vytvoří dvě smyčky magnetického toku, což bude dále vidět v simulaci. Jádro výrazně zesílí účinky magnetického pole. Využití elektromagnetu znamená, že jsme schopni ovládat sílu, kterou se elektromagnety přitahují k pevně dané dráze. Dále jsou součástí systému snímače polohy. Ty jsou také uloženy v modelu a zjišťují polohu vlaku vůči dráze. Snímače dále posílají tuto informaci do řídící jednotky, která vyhodnotí, zda jsou snímače příliš blízko, daleko anebo v ideální poloze vůči dráze a na základě toho, odešle elektrický proud do elektromagnetů, které dále ovlivní danou polohu modelu vlaku vůči dráze. Rám modelu udržuje pevnou polohu snímačů, elektromagnetů. Dále rám udržuje vedení v dráze tak, aby model ze dráhy nesklouzl do polohy, ve které by byly levitační síly od elektromagnetů vyrušené. Součástí dráhy je feromagnetický plech z oceli, díky kterému se mají elektromagnety tendenci přitáhnout k dráze. Na tomto ocelovém plechu je další vrstva plechu z hliníku. Ten má za úkol odclonit magnetické pole tak, aby snímače nebyly polem ovlivněny a aby nedávaly nesprávné informace o poloze modelu. Dráha je přidělána na dřevěné příčky, které jí udržují ve stálé výšce.



	Funkce
1	Vedení modelu v dráze, zajištění polohy snímačů a EM v modelu
2	Vytvoření magnetického pole
3	Umožnit přitažení EM
4	Odstínění mag. pole od snímačů
5	Zachytit polohu snímače od dráhy a poslat do řídící jednotky
6	Vyhodnotit polohu a řídit elektrické proudy tekoucí do EM

Obr. 37 Funkční struktura systému

6.2 Stavební struktura

Celý systém je sestaven z několika vyrobených komponent a také nakupovaných. Samotný rám modelu je složený z několika plechů z hliníku, které jsou spojeny pomocí šroubů a matic. Rám umožňuje vložení jádra elektromagnetu a jeho zajištění. Zároveň zajišťuje polohu vinutí cívky na jádře. Ve vrchní části rámu jsou díry pro snímače polohy. Šířka modelu je určena takovým způsobem, aby byl vlak veden po dráze. Na rámu je dále připevněna svorkovnice, která rozvádí proudy do cívek. Připevnění je opět uskutečněno pomocí šroubového spoje.

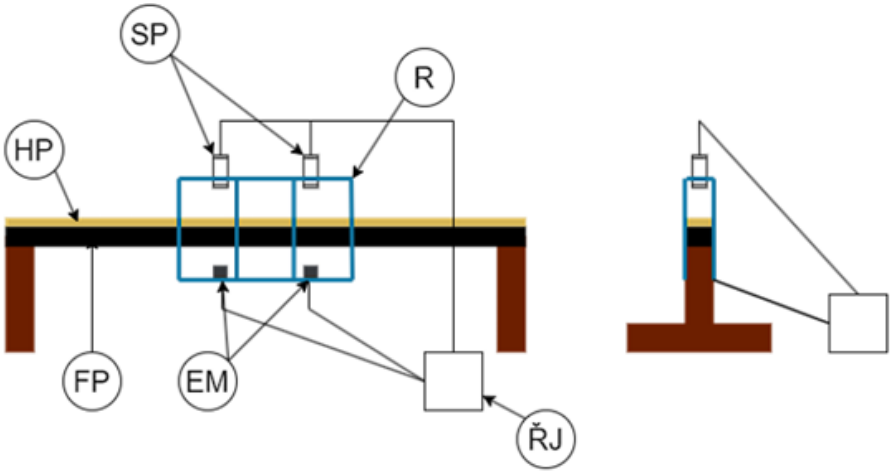
Součástí elektromagnetu je jeho jádro. To slouží k zesílení magnetických účinků, které vytváří cívka. Využití správného jádra může až tisíckrát zvýšit působení magnetického pole cívky. Proud procházející drátem vytváří magnetické pole, které zmagnetizuje jádro, a to vyvolá svoje magnetické pole, které zesílí magnetické pole cívky. Zesílení magnetického pole závisí na permeabilitě samotného jádra.

Materiál jádra je vrstvená ocel. Vrstvená ocel je ocel, která je slisována z několika tenkých vrstev plechů, mezi kterými je bariéra z izolační vrstvy. Díky tomuto uspořádání lze redukovat ztráty elektrické energie. Relativní permeabilita našeho jádra je přibližně $\mu_r = 7400$. Jádro je tvaru písmene "E", což vytvoří dvě smyčky magnetického toku. To bude lépe vidět v následujících kapitolách.

Cívka je tvořena měděným drátem, který má průřez přibližně $0.75\ \mathrm{mm}^2$. Je celkem čtyřicetkrát ovinut okolo jádra. Tedy cívka má 40 závitů a prochází jí proud v rozmezí od $0\ \mathrm{A}$ do $8\ \mathrm{A}$.

Dráha systému je sestavena z plechu feromagnetické oceli, plechu hliníku a dřevěných hranolů. Plech je z feromagnetické oceli z podobného důvodu, jako je použití feromagnetické oceli na hřídel, při využití magnetického ložiska. Tedy právě kvůli tomu, že feromagnetické materiály jsou silně přitahovány magnetickým polem. Hliníkový plech je položen na feromagnetický z toho důvodu, aby odstínil magnetické pole a tím zabránil, aby snímače odesílaly zkreslené informace. Plechy jsou umístěny na dřevěných hranolech. Ocelový plech a hliníkový plech je spojen s hranoly opět pomocí šroubového spoje.

Snímače jsou důležitou komponentou celého systému. Mají za úkol snímat svoji polohu od dráhy. Tedy zjišťovat tloušťku vzduchové mezery a tuto informaci dále zasílat řídící jednotce. Jsou zde využity indukční snímače polohy. Ty fungují na takovém principu, že vytvoří vlastní magnetické pole, které případně indukuje proudy ve vodivých materiálech. Tím dochází ke změnám magnetického pole a na základě těchto změn snímač pracuje. Důležitou podmínkou je, že objekt, vůči kterému bude měřena poloha je elektricky vodivý, což hliník splňuje. Použité snímače, BAW M12MG2-UAC20B-BP00,2-GS04,pracují s detekční zónou do $2\ \mathrm{mm}$. Samotnou polohu snímačů v rámu lze nastavit pomocí dvou matic a závitu na snímačích.

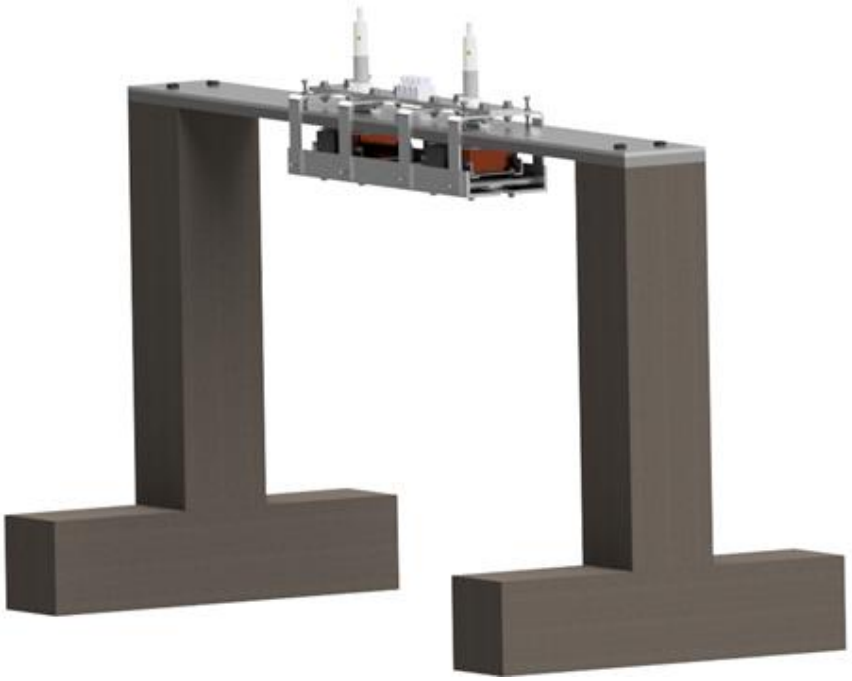


Prvky			
HP	Hliníkový plech	SP	Snímače polohy
FP	Feromagnetický plech	R	Rám
EM	Elektromagnety	ŘJ	Řídící jednotka

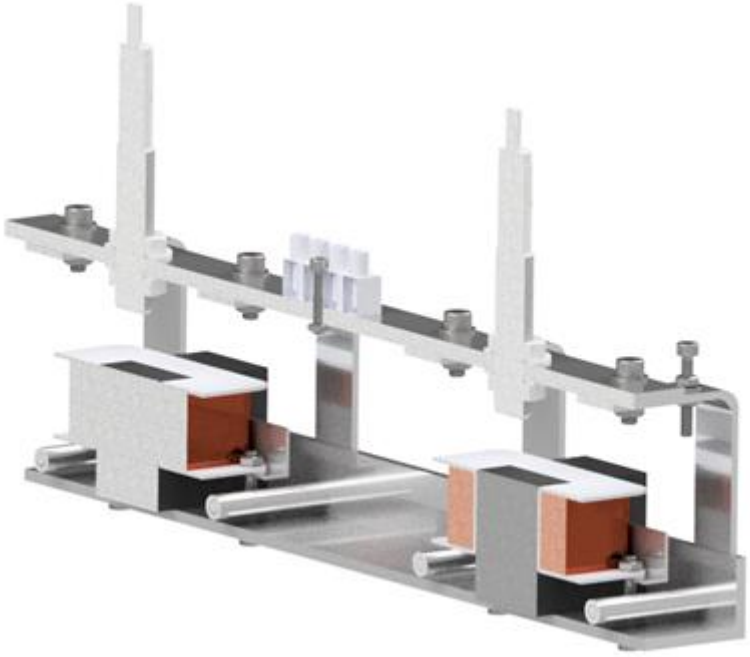
Obr. 38 Stavební struktura systému

6.3 Detailní pohled na systém

Na základě skutečného systému byl vytvořen CAD model.



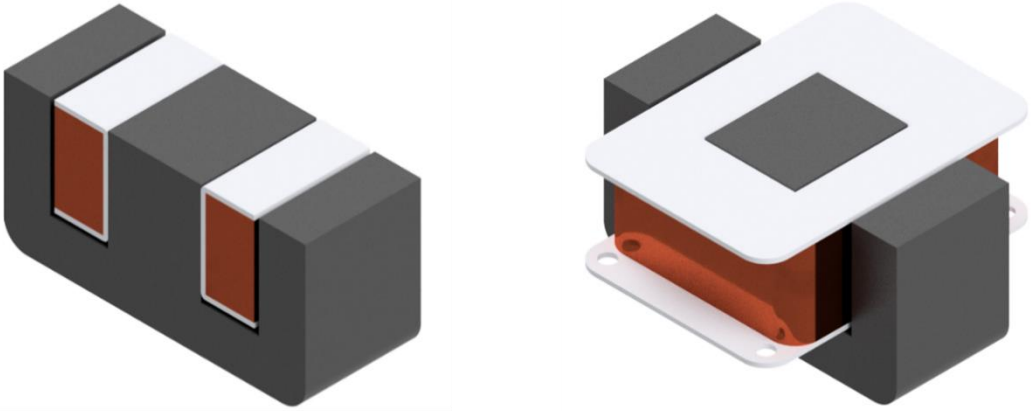
Obr. 39 Pohled na systém



Obr. 40 Detailní řez vlakem

6.4 Simulace magnetického pole

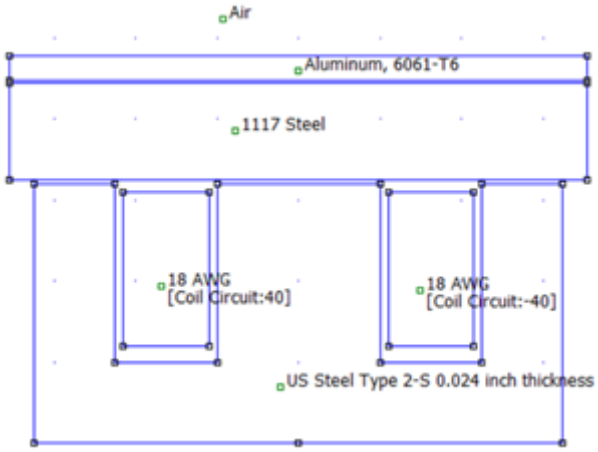
Simulaci magnetického pole systému jsem vytvořil v programu FEMM, verze 4.2. Tento program využívá metody konečných prvků, pro řešení magnetických problémů a dalších. Začal jsem tím, že jsem vytvořil nový magnetický problém a nadefinoval ho. To znamená, že jsem uvedl problém jako rovinný. Dále jsem uvedl délkové jednotky, ve kterých budu vytvářet model, tedy mm. Součástí toho je také uvedení tloušťky, do které se roztáhne rovinný nákres. Zde došlo k drobnému zjednodušení. Není totiž možné nasimulování celého elektromagnetu. Zjednodušeně řečeno, nelze uvažovat strany cívky, které jsou již mimo jádra elektromagnetu.



Obr. 41 Zjednodušený model elektromagnetu (vlevo) a reálný model elektromagnetu (vpravo)

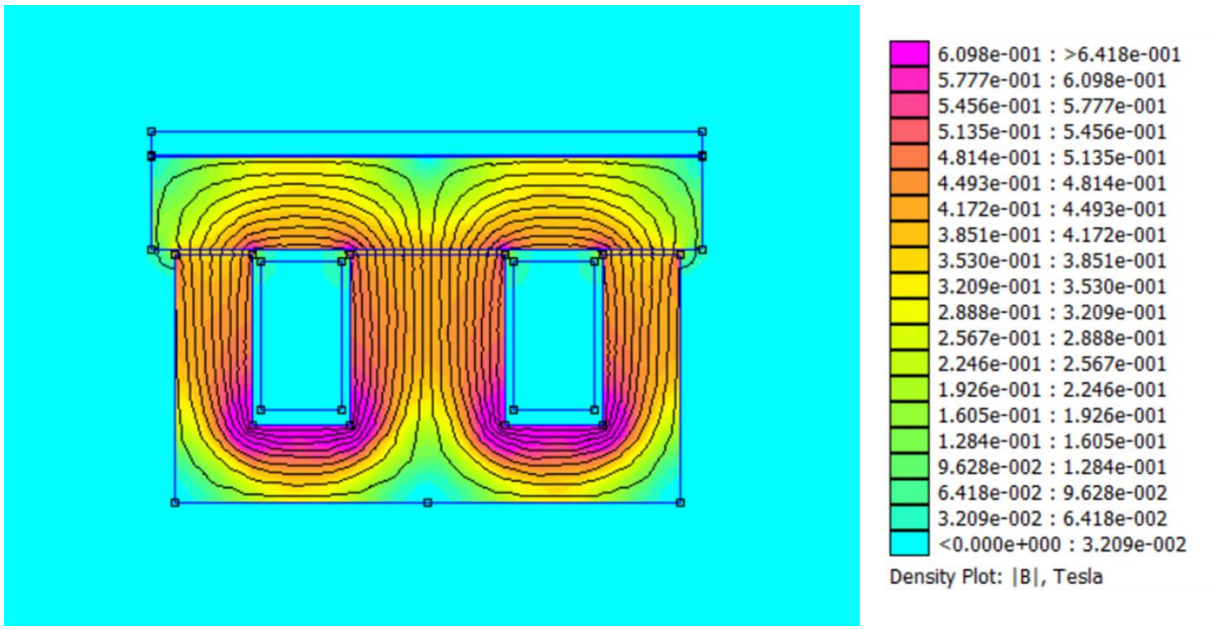
Jelikož je v systému elektrický obvod, tak jsem nastavil i frekvenci proudu, která je nulová. Jelikož cívky využívají stejnosměrnný proud, z jasného důvodu.

Dále jsem začal modelovat rovinný řez a definovat prostředí. Body a úsečky jsem umisťoval na základě vyměřování z CAD modelu. Pak jsem nastavil okolní prostředí jako vzduch. Materiál jádra elektromagnetu jsem vybral slisované plechy oceli. Tento materiál má relativní permeabilitu $\mu_r = 7400$. Dále jsem upravil materiál cívky na měděný drát 18 AWG. Ten odpovídá průřezu $0.75\ \mathrm{mm}^2$. Materiál dráhy je ocel 1.1170, což je feromagnetická ocel a nad ní je plech z hliníku EN AW-6061. Cívku jsem nadefinoval se 40 závity a nechal jsem jí protékat proud.



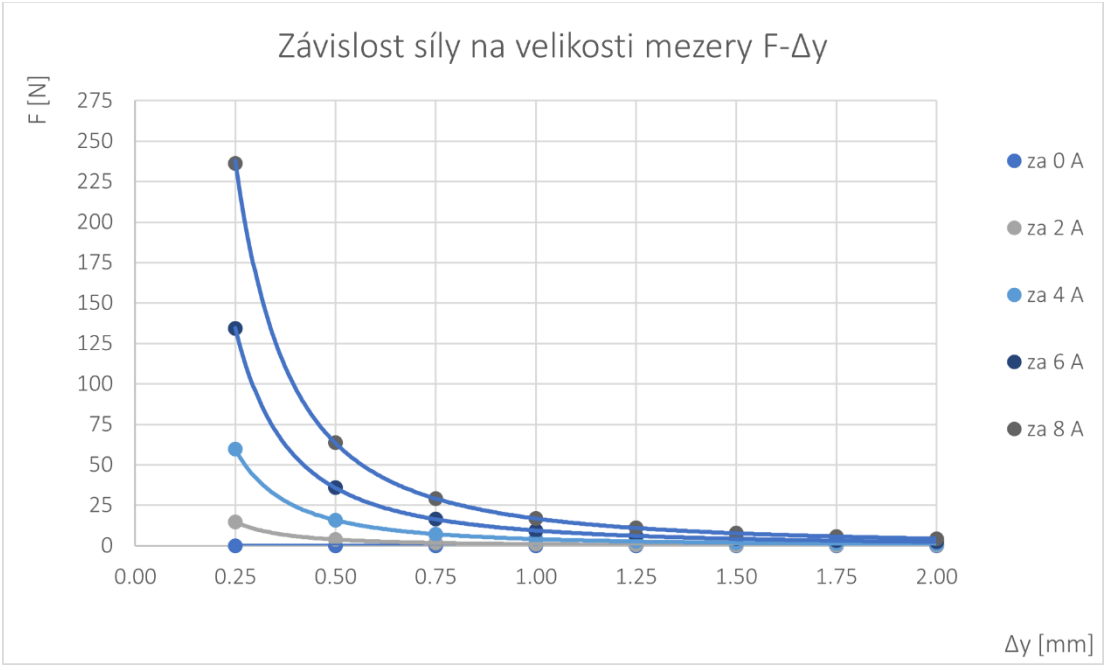
Obr. 42 Rovinný řez modelem v FEMM

Výsledek simulace, s velikostí vzduchové mezery 0,5 mm a proudem 8 A, je vidět na obrázku níže.



Obr. 43 Výsledek simulace pro Δy=0,5 mm a I=8 A

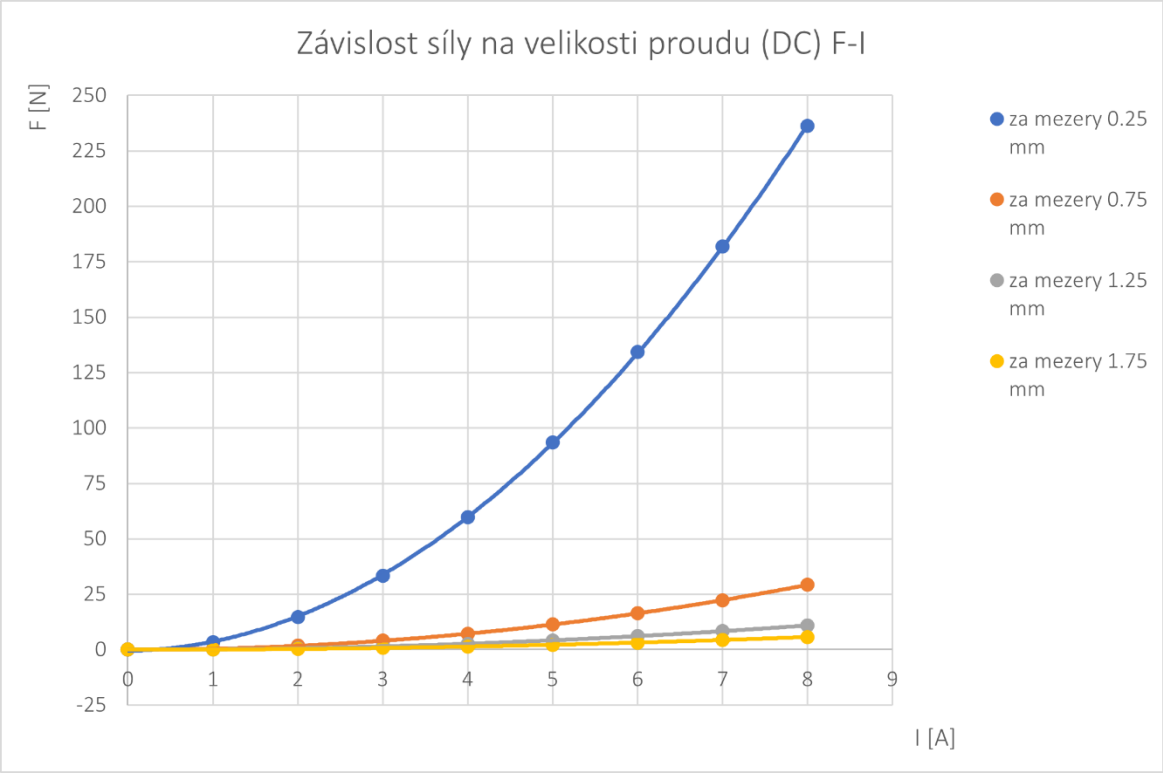
Proud, který protéká cívkou jsem postupně měnil a zapisoval si hodnoty síly, která se měnila v závislosti na velikosti proudu. Toto jsem provedl pro několik různých vzduchových mezer mezi elektromagnetem a dráhou. Dále jsem podobným způsobem zjišťoval přítažnou sílu v závislosti na vzduchové mezeře Δy. To jsem udělal pro několik různých proudů, které protékají cívkou. Výsledné hodnoty jsem zapisoval do tabulky. Z toho jsem vytvořil bodové grafy, které popisují závislost $F - \Delta y$ a $F - I$.



Obr. 44 Závislost síly na velikosti mezery F-Δy

Tab. 2 Vybrané hodnoty z grafu F-Δy

za 2 A		za 6 A	
Δy [mm]	F [N]	Δy [mm]	F [N]
0.25	14.633	0.25	134.305
0.5	3.860	0.5	35.818
0.75	1.770	0.75	16.397
1	1.021	1	9.433
1.25	0.665	1.25	6.138
1.5	0.469	1.5	4.326
1.75	0.350	1.75	3.224
2	0.272	2	2.499



Obr. 45 Závislost síly na velikosti proudu (DC) F-I

Tab. 3 Vybrané hodnoty z grafu F-I

za mezery 0.5 mm		za mezery 1 mm	
I [A]	F [N]	I [A]	F [N]
0	0.000	0	0.000
1	0.930	1	0.248
2	3.860	2	1.021
3	8.817	3	2.324
4	15.800	4	4.161
5	24.804	5	6.530
6	35.818	6	9.433
7	48.830	7	12.869
8	63.828	8	16.838

Z grafu závislosti $F - \Delta y$ je zřejmé, že závislost bude nejspíše nepřímá úměrnost. Kdežto u grafu $F - I$ bude závislost kvadratická.

6.5 Kryt na model vlaku

Součástí praktické části práce bylo navržení funkčního krytu na model vlaku. Kryt měl být vhodný 3D tisk. Skládá se ze dvou částí. Jednou je hlavní kryt, který pokrývá boky a spodek vlaku. Druhá část funguje jako krytka svrchní části. Ta má v sobě díry pro snímače a svorkovnici.

Obr. 46 Kryt nasazen na modelu vlaku

7 Závěr

Cílem mé práce bylo uvedení čtenáře do technologie magnetické levitace a její využití. Popsal jsem známé principy magnetické levitace, základní teorém a materiály, se kterými je potřeba se obeznámit. Popsané metody jsou dále uplatněny při popisování funkce magnetických ložisek a MAGLEVů. Také jsou zde popsána určitá zařízení, která také využívají magnetickou levitaci.

Dále popisuji funkci magnetických ložisek a jejich dělení. To úzce souvisí a navazuje na předešlé kapitoly z magnetické levitace. Při popisu každého druhu ložiska vyjmenuji jejich výhody a nevýhody, spolu s jejich využitím. Také je zde popsán trend hybridních magnetických ložisek, která jsou hojně využívaná.

Následuje kapitola, ve které popisuji MAGLEVy. Zde popisuji dva hlavní typy MAGLEvů, které se liší zejména použitou technologií. U obou druhů popisuji jejich historii, konstrukci a výhody s nevýhodami. Součástí toho je popis již fungujících MAGLEVů, které jsou v provozu.

Další kapitola pojednává o budoucnosti magnetické levitace. Popisuji zde ambiciózní návrhy, které mají využívat magnetickou levitaci. Stejně tak zde uvádím MAGLEVy, které jsou momentálně ve výstavbě. Do této kapitoly jsem také zařadil popis výzkumu firmy Nevomo, která pracuje na pokrokovém využití magnetické levitace ve vlakové dopravě. Tím končí teoretické část, která se zabývá magnetickou levitací, magnetickými ložisky, MAGLEVy a dalšími.

V praktické části se soustředím na popis a úpravu laboratorního experimentu. Popisuji zde jednotlivé části zařízení. To znamená, že pojednávám o jejich funkcích a místě ve stavební struktuře. Tím navazuji na simulaci v softwaru FEMM. V tomto programu jsem vytvořil několik simulací, které popisují fungování systému. Z těchto simulací jsem posbíral data a na jejich základě jsem sestavil grafy, které popisují závislost síly na vzduchové mezeře a síly na proudu, který protéká cívkou. Dále jsem navrhl kryt na uvedený systém.

Reference

[1] SCHARLAU, Bernd; NORDMEIER, Volkhard; SCHLICHTING, H. Joachim. Magnetische Levitation. Deutsche Physikalische Gesellschaft: Didaktik der Physik, Augsburg, Berlin, 2003.

[2] ZBOROWSKI, Maciej, et al. Magnetic pressure as a scalar representation of field effects in magnetic suspensions. In: AIP conference proceedings. American Institute of Physics, 2010. p. 111-117.

[3] CRUSIUS, Kai. Magnetische Levitation und alternative Aspekte des Magnetismus im Physikunterricht: JOHANNES GUTENBERG-UNIVERSITÄT MAINZ, INSTITUT FÜR PHYSIK,Mainz, 2006.

[4] BLEULER, Hannes. A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types. JSME international journal. Ser. 3, Vibration, control engineering, engineering for industry, 1992, 35.3: 335-342. [Z].

[5] BASSANI, Roberto. Earnshaw (1805–1888) and passive magnetic levitation. Meccanica, 2006, 41: 375-389.

[6] SCOTT, William T. Who was Earnshaw?. American Journal of Physics, 1959, 27.6: 418-419.

[7] SIMON, Martin D.; HEFLINGER, Lee O.; RIDGWAY, S. L. Spin stabilized magnetic levitation. American Journal of Physics, 1997, 65.4: 286-292.

[8] LEWIN, Walter. 8.02 Electricity and Magnetism. Spring 2002. Massachusetts Institute of Technology: MIT OpenCourseWare, https://ocw.mit.edu/. License: Creative Commons BY-NC-SA.

[9] ABC MAGNET s.r.o. ABC Magnet. Online. Dostupné z: https://www.abcmagnet.cz/cs/o-magnetech/druhy-magnetu/ferity. [citováno 2023-12-12].

[10] PASKIND. Martin B. "Take care not to shoot yourself in the foot", Albuquerque Journal, 02 2001.

[11] SIMON, M. D.; HEFLINGER, L. O.; GEIM, A. K. Diamagnetically stabilized magnet levitation. American journal of physics, 2001, 69.6: 702-713.

[12] BERRY, Michael V.; GEIM, Andre K. Of flying frogs and levitrons. European Journal of Physics, 1997, 18.4: 307.

[13] LYUKSYUTOV, I. F.; NAUGLE, D. G.; RATHNAYAKA, K. D. D. On-chip manipulation of levitated femtodroplets. Applied physics letters, 2004, 85.10: 1817-1819.

[14] COMBESCOT, Roland. Superconductivity: An Introduction. Cambridge university press, 2022.

[15] FOSSHEIM, Kristian; SUDBØ, Asle. Superconductivity: physics and applications. John Wiley & Sons, 2004.

[16] BERLINCOURT, Ted G. Pulsed-magnetic-field studies of superconducting transition metal alloys at high and low current densities. Atomics International. Div. of North American Aviation, Inc., Canoga Park, Calif., 1962.

[17] BERLINCOURT, T. G. Emergence of Nb-Ti as supermagnet material. Cryogenics, 1987, 27.6: 283-289.

[18] CALLAWAY, David JE. On the remarkable structure of the superconducting intermediate state. Nuclear Physics B, 1990, 344.3: 627-645.

[19] Fyzikální ústav AV ČR. FZU. Online. Dostupné z: https://www.fzu.cz/aktuality/supravodivost-levitace. [citováno 2024-1-8]. [Z].

[20] HALBACH, Klaus. Design of permanent multipole magnets with oriented rare earth cobalt material. Nuclear instruments and methods, 1980, 169.1: 1-10.

[21] HALBACH, Klaus. Application of permanent magnets in accelerators and electron storage rings. Journal of Applied Physics, 1985, 57.8: 3605-3608.

[22] NÍ MHÍOCHÁIN, T. R., et al. Analysis of torque in nested magnetic cylinders. Journal of applied physics, 1999, 86.11: 6412-6424.

[23] HILTON, J. E.; MCMURRY, S. M. An adjustable linear Halbach array. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2012, 324.13: 2051-2056.

[24] Standord Magnets. STANFORD MAGNETS. Online. Dostupné z: https://www.stanfordmagnets.com/everything-you-need-to-know-about-halbach-arrays.html. [citováno 2024-1-23].

[25] HURAY, Paul G. Maxwell's equations. John Wiley & Sons, 2009.

[26] REICHL, J.; Encyklopedie fyziky. Online. Dostupné z: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/293-castice-s-nabojem-v-magnetickem-poli. [citováno 2024-1-28].

[27] HONINA. Lorentzkraft v2. Online. In: commons.wikimedia.org, 24.10.2008. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Lorentzkraft_v2.svg. [citováno 2024-1-30].

[28] The Original. Physics Experiment. Online. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20180708070928/http://www.physicsexperiment.co.uk/content/bil.html. [citováno 2024-2-2].

[29] JAYAWANT, B. V. Electromagnetic suspension and levitation. Reports on Progress in Physics, 1981, 44.4: 411.

[30] SINHA, Pradip K. Electromagnetic suspension dynamics & control. 1987.

[31] KIM, Myung Su, et al. Performance evaluation of current leads for a 5 Tesla electromagnetic properties measurement system. Applied Sciences, 2020, 10.19: 6712. [Z].

[32] GRANT, Paul Michael. The great quantum conundrum. Nature, 2011, 476.7358: 37-39.

[33] GODEKE, A., et al. Limits of NbTi and Nb_2Ti and Development of W&R Bi–2212 High Field Accelerator Magnets. IEEE transactions on applied superconductivity, 2007, 17.2: 1149-1152.

[34] CHARIFOULLINE, Z. Residual resistivity ratio (RRR) measurements of LHC superconducting NbTi cable strands. IEEE transactions on applied superconductivity, 2006, 16.2: 1188-1191.

[35] ROTE, Donald M. Magnetic levitation. 2004.

[36] YAGHOUBI, Hamid. Practical applications of magnetic levitation technology. Iran Maglev Technology (IMT), Iran, 2012, 1-56.

[37] MOON, Francis C. Superconducting levitation: Applications to bearings and magnetic transportation. John Wiley & Sons, 2008.

[38] HAO, Luning, et al. Study on electrodynamic suspension system with high-temperature superconducting magnets for a high-speed maglev train. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, 29.2: 1-5. [Z].

[39] BEAMS, J. W. Production and use of high centrifugal fields. Science, 1954, 120.3121: 619-625.

[40] PESLAR, Jiří. Aerostatická, aerodynamická a magnetická ložiska. Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, 2008.

[41] HARRIS, Tim; WIDBRO, Linda. Magnetic bearings-a new world opens for design engineers. World Pumps, 2003, 446: 21-25.

[42] SKF. SKF Magnetic bearings and systems. Online. Dostupné z: https://www.skf.com/us/products/magnetic-bearings-and-systems. [citováno 2023-2-10].

[43] THE WEB PORTAL ON MAGNETIC BEARING TECHNOLOGY. PASSIVE BEARINGS. Online. Dostupné z: https://www.magneticbearings.org/passive-bearings/. [citováno 2023-2-10].

[44] ENGINEERING CLICKS. Magnetic bearings – The mechanical engineer's guide. Online. Dostupné z: https://www.engineeringclicks.com/magnetic-bearing/. [citováno 2023-2-10].

[45] Slideplayer. Magnetic bearings. Online. Dostupné z: https://slideplayer.com/slide/4787433/. [citováno 2024-2-12].

[46] VESELÝ, Daniel Mayer—Vıt. SOLUTION OF CONTACT–FREE PASSIVE MAGNETIC BEARING. Journal of Electrical Engineering, 2003, 54.11-12: 293-297.

[47] KUMMETH, P., et al. Development of superconducting magnetic bearings. Physica C: Superconductivity, 2002, 372: 1470-1473. [Z].

[48] MATVEEV, V.; NIZHELSKIY, N.; POLUSCHENKO, O. Force and stiffness characteristics of superconducting bearing prototype. Physica C: Superconductivity, 2004, 416.1-2: 17-24. [Z].

[49] WERFEL, F. N., et al. Operation and design selection of high temperature superconducting magnetic bearings. Superconductor Science and Technology, 2004, 17.10: 1192. [Z].

[50] BROAD, William J. Slender and elegant, it fuels the bomb. The New York Times, web edition, March, 2004, 23.

[51] ALBRIGHT, David. Iraq's Aluminum Tubes: Separating Fact from Fiction. 2003.

[52] Dolorpiedo. Gas centrifuge for uranium enrichment. Online. In: commons.wikimedia.org, 29.1.2023. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Gas_centrifuge_for_uranium_enrichment.png. [citováno 2024-2-15].

[53] HARRIS, Tim. Magnetická ložiska SKF–od inovace k osvědčeným řešením. ELEKTRO. [Online][Citace: 12. Červen 2020.] http://www. odbornecasopisy. cz/elektro/casopis/tema/magneticka-loziska-skf-odinovace-k-osvedcenym-resenim--13657, 2005.

[54] HARRIS, Tim; WIDBRO, Linda. Magnetic bearings-a new world opens for design engineers. World Pumps, 2003, 446: 21-25.

[55] SAEED, N. A.; EISSA, M.; EL-GANINI, W. A. Nonlinear oscillations of rotor active magnetic bearings system. Nonlinear Dynamics, 2013, 74: 1-20. [Z].

[56] BLEULER, Hannes; COLE, Matthew. Magnetic bearings: theory, design, and application to rotating machinery. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.

[57] SCHWEITZER, Gerhard. Active magnetic bearings-chances and limitations. In: 6th international conference on rotor dynamics. 2002. p. 1-14.

[58] SKF. SKF Magnetic bearings and systems. Online. Dostupné z: https://www.skf.com/id/products/magnetic-bearings-and-systems/systems-and-support. [citováno 2024-2-20].

[59] ŠAMÁNEK, Otakar; KONSTRUOVÁNÍ, Ústav Konstruování-Počítačová Podpora. Magnetická ložiska.

[60] FILION, Guillaume; RUEL, Jean; DUBOIS, Maxime R. Reduced-friction passive magnetic bearing: innovative design and novel characterization technique. Machines, 2013, 1.3: 98-115.

[61] BASARAN, Sinan; SIVRIOGLU, Selim. Novel repulsive magnetic bearing flywheel system with composite adaptive control. IET Electric Power Applications, 2019, 13.5: 676-685.

[62] ZHANG, J. W., et al. A review of control strategies for flywheel energy storage system and a case study with matrix converter. Energy Reports, 2022, 8: 3948-3963.

[63] DIRUSSO, Eliseo; BROWN, Gerald V. Performance tests of a cryogenic hybrid magnetic bearing for turbopumps. In: International Symposium on Magnetic Bearings. 1992.

[64] JINCHANG, Han; YAN, Li; FENG, Xiong. Modeling and simulation of hybrid magnetic bearing as physical model in Simscape. In: 2022 IEEE 5th International Conference on Electronics Technology (ICET). IEEE, 2022. p. 386-389.

[65] VITNER, Jan; PAVELKA, Jirí; LETTL, Jiri. Experimental verification of the hybrid magnetic bearing operation. In: 2018 International Conference on Applied Electronics (AE). IEEE, 2018. p. 1-5.

[66] KINGSLAND, P. Will Maglev ever become mainstream. Railway Technology, 2018.

[67] YAGHOUBI, Hamid, et al. The most important maglev applications. Journal of Engineering, 2013, 2013.

[68] MEISINGER, Reinhold; SCHIEHLEN, Werner. On the long History of MAGLEV Trains.

[69] UHLENBROCK, Markus; NORDMEIER, Volkhard; SCHLICHTING, H. Joachim. Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment. MNU, 2000, 53.4: 220-226.

[70] ddi.cs.uni-potsdam. Die Geschichte des Transrapids und seine Zukunft. Online. Dostupné z: http://ddi.cs.uni-potsdam.de/HyFISCH/Veranstaltungen/InfoWettbewerb/2000/beitraege/preis2/11/Eisenbahn/RapidGeschichte.html. [citováno 2024-3-1].

[71] maglev.net. TRANSRAPID DESIGN HISTORY. Online. Dostupné z: https://www.maglev.net/transrapid-design-history. [citováno 2024-3-1]. [Z].

[72] BBC. Deadly crash on German monorail. Online. Dostupné z: http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/5370564.stm. [citováno 2024-3-1].

[73] TAIPEITIMES. German maglev train crash leaves at least 23 dead. Online. Dostupné z: https://www.taipeitimes.com/News/world/archives/2006/09/24/2003328984. [citováno 2024-3-2].

[74] Állatka. Transrapid-emsland. Online. In: commons.wikimedia.org, 5.6. 2009. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transrapid-emsland.jpg. [citováno 2024-3-1].

[75] LI, Fengxing, et al. Control methods for levitation system of EMS-type maglev vehicles: an overview. Energies, 2023, 16.7: 2995.

[76] ANGELO, Jacob; NUNO, Monteiro. A new concept of superelevation in magnetic levitation-prodynamic. Инновационные транспортные системы и технологии, 2018, 4.4: 77-111. [Z].

[77] Sabin. Transrapid Maglev System. Online. In: Slideserve 26.9. 2014. Dostupné z: https://www.slideserve.com/sabin/transrapid-maglev-system. [citováno 2024-3-2]. [Z].

[78] TSUCHIYA, Mitsuyoshi; OHSAKI, Hiroyuki. Characteristics of electromagnetic force of EMS-type maglev vehicle using bulk superconductors. IEEE transactions on magnetics, 2000, 36.5: 3683-3685.

[79] GROOM, NELSO. Permanent magnet flux-biased magnetic actuator with flux feedback (Patent). Patent NumberEP 0405325, 1991.

[80] MCCURRY, Justin. Japan's Maglev train breaks world speed record with 600 km/h test run. The Guardian, 2015, 21.

[81] USJMAGLEV. Maglev Origins. Online. In: web.archive.org. 17.7. 2012. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20140728110724/http://usjmaglev.com/usjmaglev/History.html. [citováno 2024-3-7].

[82] OHSAKI, Hiroyuki. Review and update on MAGLEV. In: European Cryogenic Days 2017, Karlsruhe, Germany, 13th-15th September 2017. 2017.

[83] DAJF. ML100 RTRI 20151010. Online. In: commons.wikimedia.org, 10.10. 2015. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ML100_RTRI_20151010.JPG. [citováno 2024-3-10].

[84] KEISUKE, Umeda. L0-series train. Online. In: mainichi.jp, 19.10 2020. Dostupné z: https://mainichi.jp/english/articles/20201021/p2a/00m/0na/030000c. [citováno 2024-3-10]. [Z].

[85] Lesics, 2021, The Fastest train ever built | The complete physics of it, YouTube video. [citováno 2024-3-10]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=XjwF-STGtfE&t=472s.

[86] HE, J. L.; ROTE, D. M.; COFFEY, H. T. Study of Japanese electrodynamic-suspension maglev systems. Argonne National Lab., IL (United States). Energy Systems Div., 1994.

[87] HOSSEINI NAVEH, Iman Mohammad. A Novel Method on Ion Propulsion Using Optimized Fuel Consumption. Online. In: ResearchGate, 2016. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/354339074_A_Novel_Method_on_Ion_Propulsion_Using_Optimized_Fuel_Consumption. [Z].

[88] DIVEKAR, EKBOTE. Design and Analysis of Maglev Trains. Online. In: semanticscholar.org, 2019. Dostupné z: https://www.semanticscholar.org/paper/Design-and-Analysis-of-Maglev-Trains-Divekar-Ekbote/c99f62d60a62c2e5830a03959ba2ec4759a4160b. [Z].

[89] JILES, David. Introduction to magnetism and magnetic materials. CRC press, 2015.

[90] SCOTT, David; FREE, J. Maglev: How They're Getting Trains Off the Ground. Popular Science, 1973, 94-97.

[91] MICHAEL, G. What's the world's fastest passenger train. Stuff. co. nz. Retrieved December, 2014, 24: 2014.

[92] DUFKOVÁ, Marie. Maglev je zážitek. Online. In: 3pol, 19.4. 2017. Dostupné z: https://www.3pol.cz/cz/rubriky/bez-zarazeni/2005-maglev-je-zazitek. [citováno 2024-3-19].

[93] KOUTNÍK, Jan. Design magnetického vlaku. 2012.

[94] DONA, Scott; SINGH, Amarjit. The workings of maglev: a new way to travel. Department of Civil and Environmental Engineering, College of Engineering, University of Hawaii, 2017.

[95] **湖南省政府**门户网站英文版. Changsha Maglev Line Completes Investment over 490 Million Yuan. Online. In: web.archive.org, 21.11.2014. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20141230005522/http://english.rednet.cn/c/2014/11/21/3528574.htm. [citováno 2024-3-15].

[96] **湖南省政府**门户网站英文版. **唐**车造北京S1线磁浮列车开始以100km/h载客运行. Online. In: web.archive.org, 7.11. 2018. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20190616165926/http://heb.chinadaily.com.cn/2018-11/07/content_37218624.htm. [citováno 2024-3-15].

[97] ZHU YOUFANG. Maglev line opens to tourists in Fenghuang. Online. In: web.archive.org, 9.8. 2022. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20221129222925/http://www.chinadaily.com.cn/a/202208/09/WS62f1c36aa310fd2b29e71203.html. [citováno 2024-3-15].

[98] Railway Gazette International. Phoenix-inspired maglev line opens to serve ancient town. Online. In: railwaygazette, 19.8. 2022. Dostupné z: https://www.railwaygazette.com/passenger/phoenix-inspired-maglev-line-opens-to-serve-ancient-town/62390.article. [citováno 2024-3-15].

[99] LI, Shiyi. State of Art and Future Development of Magnetic Levitation Technology. Highlights in Science, Engineering and Technology, 2023, 31: 167-176.

[100] KYODO. JR Tokai begins building maglev stations. Online. In: web.archive.org, 3.1. 2015. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20150103021823/http://www.japantimes.co.jp/news/2014/12/18/business/jr-tokai-begins-building-maglev-train-stations/#.VKdRenbP1qZ. [citováno 2024-4-1].

[101] **清**远新闻. **清**远市磁浮旅游专线正式开工建设，为国内首条中低速磁浮旅游专线. Online. In: web.archive.org, 30.12. 2017. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20190128191411/http://static.nfapp.southcn.com/content/201712/30/c879848.html. [citováno 2024-4-2].

[102] LI, MANN. China successfully tests maglev trains in vacuum tube, eyeing future speeds of 4,000 kph. Online. In: abc.net, 11.4. 2024, Dostupné z: https://www.abc.net.au/news/2024-04-12/china-ultra-high-speed-trains-maglev-how-fast/103644930. [citováno 2024-4-30].

[103] WANG, Ruiyang; YANG, Bingen. Dynamic Modeling and Transient Response of a Rigid-Body Inductrack Maglev System. Journal of Vibration and Acoustics, 2023, 145.1: 011001.

[104] LABIBA. HOW DO MAGLEVS WORK?. Online. In: https://maglevpresentation.weebly.com/, 21.5. 2014. Dostupné z: https://maglevpresentation.weebly.com/blog/step-1-how-do-maglevs-work. [citováno 2024-5-1].

[105] NEVOMO. PASSIVE MAGNETIC LEVITATION TECHNOLOGY DEVELOPED BY NEVOMO SEEN AS A POTENTIAL KEY TO RAPIDLY IMPROVING EUROPE'S LONG-DISTANCE TRANSPORT NETWORK. Online. In: nevomo.tech, 14.3. 2024. Dostupné z: https://www.nevomo.tech/en/passive-magnetic-levitation-technology-developed-by-nevomo-seen-as-a-potential-key-to-rapidly-improving-europes-long-distance-transport-network/. [citováno 2024-5-1].

[106] Nevomo, 2023, World's first levitating train on existing infrastructure! | MagRail by Nevomo, YouTube video. [citováno 2024-5-1]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=CQOEP7_euXQ.