

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Magneticky levitované dopravní systémy: zhodnocení a
prognóza**

**vedoucí práce: Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc.
autor: Petr Mikuta**

2012

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2011/2012

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

Jméno a příjmení: Petr MIKUTA
Osobní číslo: E09B0161P
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika
Studijní obor: Komerční elektrotechnika
Název tématu: Magneticky levitované dopravní systémy: zhodnocení a prognóza
Zadávající katedra: Katedra technologií a měření

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

1. Filozofie magneticky levitovaných dopravních systémů.
2. Technický popis dosavadních dopravních levitovaných systémů.
3. Zhodnocení dopravních levitovaných systémů.
4. Prognóza k zavedení levitovaných systémů.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího
Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran
Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická.
Seznam odborné literatury:

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

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Daniel Mayer, DrSc.**
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **17. října 2011**
Termín odevzdání bakalářské práce: **3. června 2012**


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




Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 17. října 2011

Anotace

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení a prognózy magneticky levitovaných dopravních systémů. Popisuje nejběžnější způsoby dosažení levitace pomocí magnetického pole. Podrobněji se zabývá elektromagnetickou levitací a elektrodynamickou levitací. Popisuje princip a technické parametry dopravních systémů Transrapidu a JR-Maglev MLU. Uvádí zjednodušený návrh levitačního elektromagnetu. Zhodnocuje dosavadní dopravní systémy z hlediska ekonomiky, ekologie a efektivnosti a uvádí prognózy těchto dopravních systémů do budoucna.

Klíčová slova

Magnetická levitace, elektromagnetická levitace (EMS), elektrodynamická levitace (EDS), maglev, Halbachova soustava, Transrapid, Maglev MLU, Inductrack, levitační elektromagnet

Abstract

The main objective of the bachelor's thesis is the evaluation and prognosis of the maglev-based transportation systems. It describes the basic ways of achieving levitation using magnetic fields; in particular, it deals with electromagnetic suspension and electrodynamic suspension. It describes the technology and specifications of two particular transportation systems - Transrapid and JR-Maglev MLU. The thesis includes a simplified draft of a levitation electromagnet. It evaluates the used transportation systems from the point of view of economy, ecology and effectivity, and it presents a prognosis of these transportation systems.

Key words

magnetic levitation, electromagnetic suspension (EMS), electrodynamic suspension (EDS), Maglev, Halbach Array, Transrapid, Maglev MLU, Inductrack, levitation electromagnet

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

V Plzni dne 29.5.2012

Jméno příjmení

.....

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Prof. Ing. Danielu Mayerovi, DrSc. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ	9
1 MAGNETICKÁ LEVITACE	10
1.1 LEVITACE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	10
1.1.1 <i>Inductrack</i>	11
1.2 LEVITACE S POUŽITÍM DIAMAGNETIKA.....	12
1.3 LEVITACE TRANSFORMAČNÍ.....	13
1.4 ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE (EMS)	13
1.4.1 <i>Princip</i>	13
1.4.2 <i>Regulace stability levitace</i>	14
1.4.3 <i>Uplatnění EMS</i>	16
1.5 ELEKTRODYNAMICKÁ LEVITACE EDS	16
1.5.1 <i>Princip</i>	16
1.5.2 <i>Uplatnění EDS</i>	17
2 DOPRAVNÍ SYSTÉMY VYUŽÍVAJÍCÍ MAGNETICKÉ LEVITACE	18
2.1 TRANSPRAPID.....	18
2.1.1 <i>Historie a vývoj Transrapidu</i>	18
2.1.2 <i>Technologie a princip Transrapidu</i>	20
2.1.2.1 Elektromagnetický systém a pohon.....	21
2.1.2.2 Ovládání Transrapidu.....	22
2.1.2.3 Drážní těleso.....	24
2.2 JR – MAGLEV MLU.....	25
2.2.1 <i>Historie</i>	25
2.2.2 <i>Technologie a princip JR-Maglev MLX01-901</i>	27
2.2.2.1 Elektrodynamický systém a pohon	27
2.2.2.2 Drážní těleso.....	28
2.2.2.3 Ovládání.....	30
2.3 HSST.....	30
3 NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO LEVITAČNÍHO ELEKTROMAGNETU	32
3.1 VÝPOČET	34
3.2 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	38
4 ZHODNOCENÍ DOPRAVNÍCH LEVITOVANÝCH SYSTÉMŮ	39
4.1 POROVNÁNÍ VOZIDEL MAGLEV	39
4.2 EKONOMIKA.....	39
4.3 EKOLOGIE	41
4.4 BEZPEČNOST A EFEKTIVNOST.....	42
5 PROGNÓZA MAGNETICKY LEVITOVANÝCH DOPRAVNÍCH SYSTÉMŮ	43
5.1 REALIZOVANÉ PROJEKTY EMS A EDS	43
5.2 PLÁNOVANÉ PROJEKTY EMS A EDS	43
5.3 BUDOUCNOST TECHNOLOGIE MAGLEV	46
6 ZÁVĚR	48
POUŽITÁ LITERATURA	49
PŘÍLOHY	1

Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na zhodnocení a prognózy magneticky levitovaných dopravních systémů.

Popisuje nejběžnější způsoby dosažení levitace pomocí magnetického pole. Podrobněji se zabývá elektromagnetickou levitací (EMS) a elektrodynamickou levitací (EDS). Popisuje princip a technické parametry dopravních systémů Transrapidu a JR-Maglev MLU. Dále uvádí zjednodušený návrh stejnosměrného levitačního elektromagnetu, který se využívá u superexpresů typu Transrapid. Zhodnocuje dosavadní dopravní systémy využívající magnetické levitace z hlediska ekonomiky, ekologie a efektivnosti a uvádí prognózy těchto dopravních systémů do budoucna.

Seznam symbolů

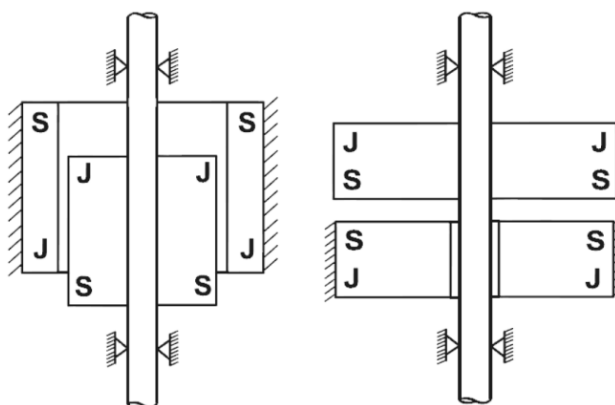
Maglev	Magnetická levitace; vozidlo na principu magnetické levitace
μ_r	Relativní permeabilita
μ_0 [H/m]	Permeabilita vakua
δ [m]	Vzduchová mezera
i_b [A]	Budící proud cívky elektromagnetu
F_g	Gravitační síla
F_m	Síla elektromagnetu
EMS	Elektromagnetická levitace
EDS	Elektrodynamická levitace
LSM	Lineární synchronní motor
SCM	Supravodivá cívka
IPS	Indukční zdroj energie
OTM	Síť s otevřeným přenosem dat
Transrapid	Vysokorychlostní vlak využívající EMS
JR-Maglev MLU	Vysokorychlostní vlak využívající EDS
Inductrack	Vozidlo, které dosahuje levitace za pomoci Halbachovy soustavy permanentních magnetů
HSST	High Speed Surface Transport; Vysokorychlostní pozemní dráha
ICE	Vysokorychlostní vlak Intercity-Express, jezdící např. v Německu
JAL	Japan Airlines; Japonská letecká společnost
JR	Japan Rail; Japonské železnice

1 Magnetická levitace

Každý již jistě slyšel o levitaci, ne ale však všichni vědí, co přesně levitace znamená a jak jí dosáhnout. Levitace znamená vznášení objektů za překonání gravitace. Objekt se při levitaci nachází v rovnovážné poloze, kde součet všech sil působících na objekt je nulový. V případě nesplnění tohoto předpokladu (tj. výsledná síla by nebyla nulová) dojde k jeho zřícení k Zemi. Levitace lze dosáhnout více způsoby. Například akustická levitace založená na principu šíření zvuku. Zvuk je mechanická podélná vlna. Vznikají tzv. vlnoplochy, což je množina bodů prostoru, která kmitá se stejnou fází. Kolem vlnoploch vznikají místa s hustším a řidším vzduchem. Levitující těleso se pak pohybuje na „polštáři“ hustšího vzduchu. Výhodou akustické levitace je, že levitující vzorky nepotřebují mít speciální vlastnosti (elektrický náboj, index lomu,...). Vzorky lze využít pevného i kapalného skupenství. Jediná podmínka pro akustickou levitaci je prostředí, ve kterém se šíří zvuk. Tuto podmínku nám dostatečně splňuje vzduch, který je všude kolem nás. Mezi další způsoby levitace patří např. levitace optická, aerodynamická nebo hybridní. Tato práce ale není zaměřena na rozebírání principů těchto druhů levitace. V této práci se budu zabývat magnetickou levitací, též známou ve zkrácené formě jako maglev. U magnetické levitace hraje hlavní roli magnetické pole, pomocí kterého lze překonat gravitaci. Jedná se tedy o systém, který umožní tělesu stabilní polohy v prostoru bez kontaktu se zemí.[1]

1.1 Levitace s permanentními magnety

Tento druh levitace, vyobrazený na obr. 1.1, nespĺňuje dostatečně podmínky levitace, protože existuje kontakt s pevnou zemí pomocí vodicích ložisek. Vodicí ložiska zde slouží ke stabilizaci levitace.[2][25]



Obr. 1.1 Dva způsoby levitace pomocí permanentních magnetů (převzato z [2])

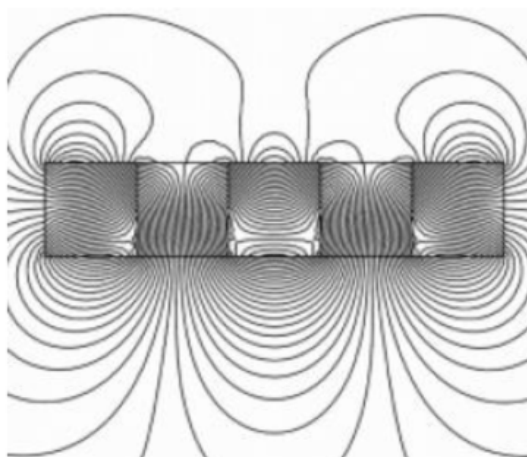
1.1.1 Inductrack

V minulosti se levitace s permanentními magnety zdála nevhodná. V dnešní době je ale znám nový způsob, jak využít permanentních magnetů. Tento způsob je podstatně levnější, bezpečnější a jednodušší než dosavadní principy. Soustavu permanentních magnetů navrhl americký fyzik Klaus Halbach v roce 1985 a nechal si tuto technologii patentovat pro nasazení v dopravě pod názvem Inductrack. Klaus Halbach přišel na to, že když správně uspořádáme do řady permanentní magnety ve tvaru kvádrů, tak dosáhneme vysokého magnetického pole na dolní části soustavy a nízkého na horní části soustavy.

Princip uspořádání Halbachovy soustavy můžete vidět na obr. 1.2 a magnetické pole této soustavy na obr. 1.3. Šipky v obrázku znázorňují směr magnetizace jednotlivých magnetů. Při použití takto uspořádaných permanentních magnetů dosáhneme velmi jednoduchého levitačního systému s výhodnými levitačními vlastnostmi. Permanentní magnety jsou zhotoveny práškovou metalurgií ze vzácných zemin.



Obr. 1.2 Halbachova soustava permanentních magnetů (převzato z [3])



Obr. 1.3 Magnetické pole Halbachovy soustavy (převzato z [3])

V dnešní době je snaha tento druh levitace pomocí permanentních magnetů prosadit v dopravních systémech. Využívá se obdélníkových cívek spojených nakrátko. Cívky jsou navzájem izolované a jsou uloženy vedle sebe. Tyto cívky jsou zabudované do jízdny dráhy. Nad dráhou se bude pohybovat vozidlo, které bude mít vespod zabudovanou Halbachovu

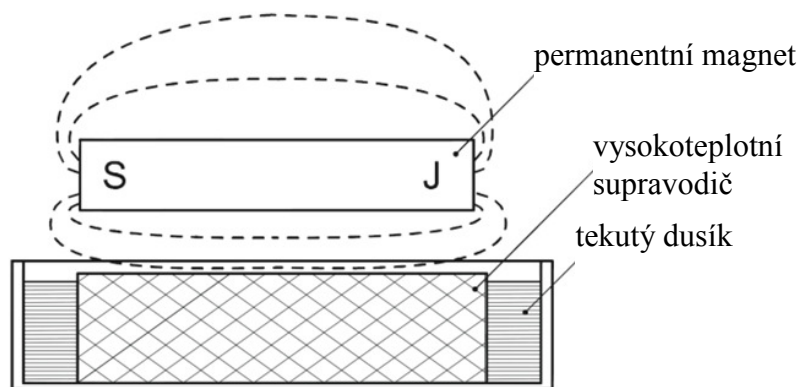
soustavu permanentních magnetů. Princip funkce je jednoduchý. Když se bude vozidlo pohybovat, indukují se v cívkách proudy, které vytvářejí magnetické pole. Začne tedy docházet k vzájemnému působení magnetického pole cívek a permanentních magnetů, které zapříčiní odpuzování, a vozidlo začne levitovat. Znamená to, že se vozidlo musí pohybovat určitou minimální rychlostí, aby dosáhlo levitace. Vozidlo je proto opatřeno pomocnými koly a vybaveno pohonem, aby byl možný rozjezd a dojezd vozidla. Jako pohon lze použít např. lineární synchronní motor s dlouhým statorem. Rychlost k dosažení levitace je poměrně malá. Pohybuje se řádově v metrech za sekundu. [3][25]

1.2 Levitace s použitím diamagnetika

Tento druh levitace závisí na permeabilitě μ_r levitovaného tělesa. Permeabilita materiálu nebo jeho okolí nám říká míru magnetizace v důsledku magnetického pole. Může docházet k zesílení i zeslabení magnetického pole. Když bude permeabilita $\mu_r > 1$, jedná se o látku paramagnetickou nebo feromagnetickou. Tyto látky jsou do magnetického pole vtahovány. My chceme dosáhnout opaku. Potřebujeme těleso, které bude mít permeabilitu $\mu_r < 1$. Jedná se o diamagnetické látky. Ideálním stavem by bylo dosáhnout, co možná nejbližší hodnoty permeability μ_r k 0, abychom dosáhli ideálního diamagnetika. Látky z diamagnetika jsou odpuzovány magnetickým polem. Znamená to tedy, jestliže vložíme diamagnetické těleso do nehomogenního magnetického pole, bude docházet k jeho odpuzování a tedy k jeho levitaci.

Látky běžně se vyskytující v přírodě, jako je třeba uhlík, mají μ_r nepatrně menší než jedna, a proto je levitující síla velmi slabá. Pro silnou levitační sílu musíme využít supravodič. Supravodič se chová jako ideální diamagnetická látka ($\mu_r \rightarrow 0$).

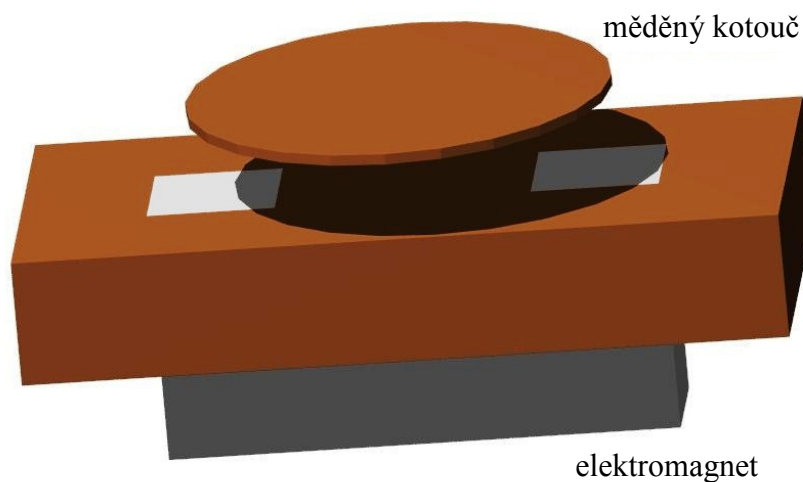
Jsou dva způsoby, jak v praxi využít tuto levitaci. Prvním způsobem je uložit supravodič nad permanentní magnet. Druhým způsobem je uložení permanentního magnetu nad supravodič. Magnet bude levitován. Jedná se o tzv. Meissnerův jev. Tento jev je vyobrazen na obr. 1.4. [2][4][25]



Obr. 1.4 Levitace permanentního magnetu nad supravodičem (tzv. Meissnerův jev) (převzato z [2])

1.3 Levitace transformační

Princip transformační levitace spočívá ve střídavém magnetickém poli. Toto pole je vybuzeo cívkou. Jestliže se do tohoto pole vloží elektricky vodivé těleso, začne se v něm indukovat transformační napětí. Transformační napětí má za následek vyvolání vířivých proudů, které mají své magnetické pole. Magnetické pole vybuzeo cívkou působí proti magnetickému poli vodivého tělesa. Toto působení má za následek levitaci vodivého tělesa. Na obr. 1.5 můžete vidět transformační levitaci měděného kotouče. [2][25]



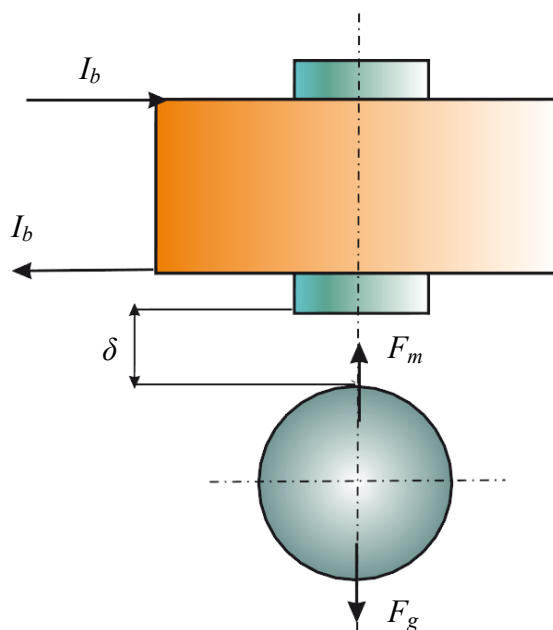
Obr. 1.5 Transformační levitace měděného kotouče [2]

1.4 Elektromagnetická levitace (EMS)

1.4.1 Princip

K provedení této levitace je zapotřebí feromagnetické těleso, které bude přitahováno silou F_m stejnosměrného elektromagnetu. Síla F_m závisí na budícím proudu elektromagnetu i_b a na vzdálenosti vzduchové mezery δ . Kromě přitažlivé síly působí na těleso síla gravitační

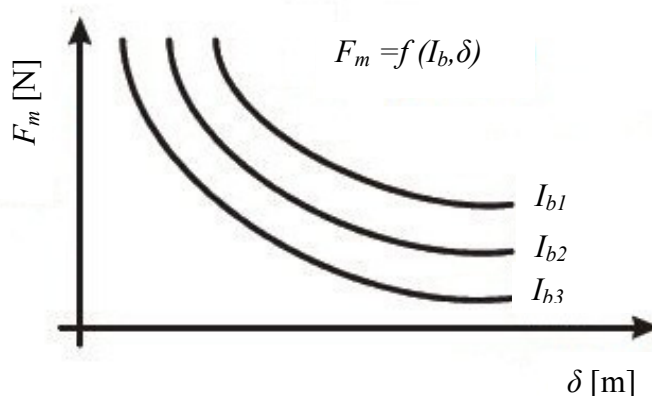
F_g . Důležité je dosáhnout rovnosti těchto sil $F_g = F_m$. Při rovnosti sil dochází k levitaci. Tento druh levitace je znázorněn na obr. 1.6. Jakmile by tato rovnost neplatila, tak mohou nastat dva stavy. První stav by nastal v případě $F_g < F_m$. Došlo by k přitažení feromagnetického jádra k elektromagnetu. Aby nastal druhý stav, což by znamenalo, že feromagnetické jádro bude v klidu, muselo by platit $F_g > F_m$.



Obr. 1. 6 Princip elektromagnetické levitace (EMS) [5]

1.4.2 Regulace stability levitace

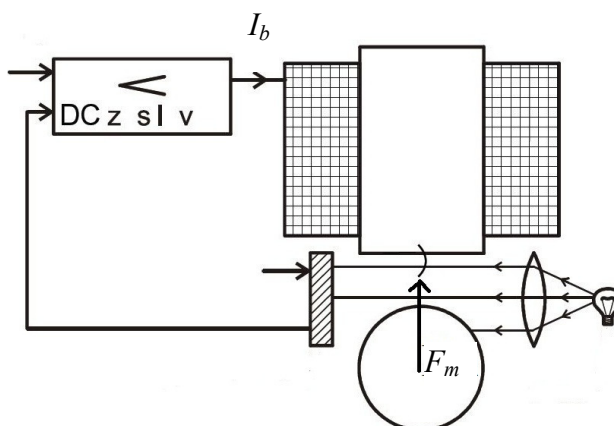
Elektromagnetická levitace není stabilní, jelikož při změně budicího proudu nebo vzdálenosti se těleso přitáhne k elektromagnetu nebo odpadne. My potřebujeme stabilní levitaci, jelikož nestabilita levitace by přinesla mnoho problémů, a to zejména v dopravních systémech z hlediska bezpečnosti. Při regulaci musí vždy platit $F_g = F_m$, aby docházelo ke stabilní levitaci. Dosáhnout stabilní levitace můžeme zpětnovazebnou regulací budicího proudu a sledováním vzdálenosti δ optickým čidlem polohy. Regulátor budicího proudu musí vždy dosáhnout rovnováhy magnetického tahu a hmotnosti tělesa. Hmotnost tělesa se může v dopravních systémech stále měnit a to v důsledku nástupu a výstupu pasažérů z vozidla. Zapříčiní to změnu vzdálenosti δ . Jestliže se vzdálenost zmenšuje (tzn. síla elektromagnetu je větší než síla gravitační), tak se zmenší budicí proud. Vzdálenost se zvětšuje (tzn. síla elektromagnetu je menší než gravitační síla), a proto se zvětší budicí proud. Tento fakt je vyobrazen na obr. 1.7. Z těchto charakteristik se vychází při navrhování regulačního systému pro stabilní levitaci.



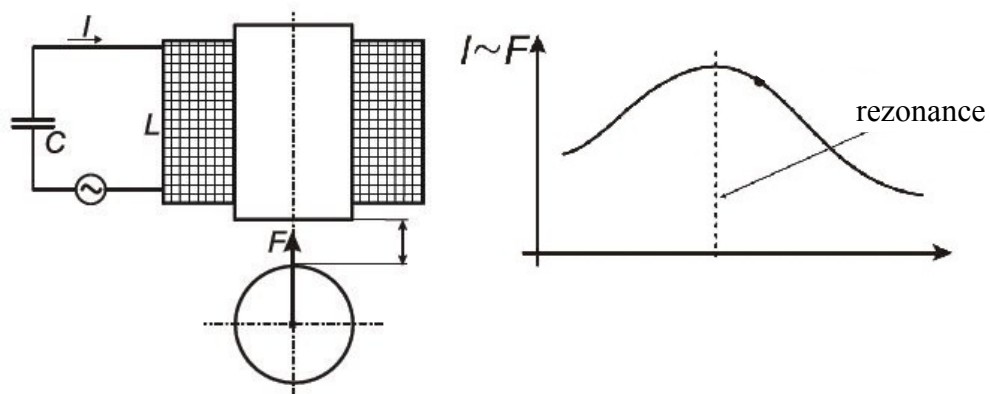
Obr. 1.7 Závislost síly elektromagnetu na vzduchové mezeře při různých budících proudech [2]

Nejdůležitější částí regulace pomocí optického čidla je fotoelektrický článek. Výstupní napětí článku závisí na poloze tělesa. Toto výstupní napětí nám pak mění budící proud. Tato regulace je vyobrazena na obr. 1.8.

Další možností je stabilizace pomocí střídavého elektromagnetu. Budící proud elektromagnetu je samovolně regulován pomocí laděného obvodu RLC. Znamená to, že zapojíme do série cívku elektromagnetu (RL) a kondenzátor s kapacitou C. Kapacita kondenzátoru je taková, aby pracovní bod RLC obvodu byl těsně za bodem rezonance. Schéma této regulace vidíte na obr. 1.9. Z grafu na obr. 1.9 lze vyčíst, že při oddálení tělesa od elektromagnetu, klesne indukčnost cívky. Pracovní bod RLC obvodu se přiblíží k rezonanci. Způsobí to tedy zesílení budícího proudu a to má samozřejmě za následek zvýšení působící síly na těleso. V opačném případě, když se těleso přiblíží k elektromagnetu, vzroste indukčnost cívky. RLC obvodu se více rozladí, tudíž budící proud a síla elektromagnetu klesne. Tento způsob stabilizace levitace není v trakčních účelech využíván. [2][5][25]



Obr. 1.8 Regulace pomocí fotoelektrického článku (převzato z [2])



Obr. 1.9 Regulace levitace pomocí obvodu RLC (převzato z [2])

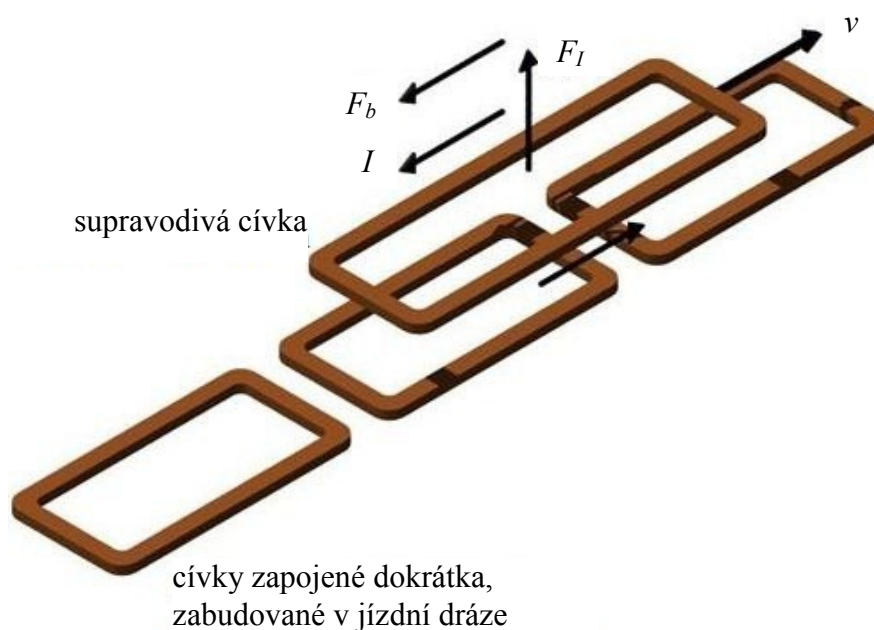
1.4.3 Uplatnění EMS

Elektromagnetická levitace se uchytila u magneticky levitovaných dopravních systémů, a to zejména u německých magneticky levitovaných vozidel Transrapid. O této problematice se více zmíním v následujících kapitolách.

1.5 Elektrodynamická levitace EDS

1.5.1 Princip

Elektrodynamická levitace, jinak též známá jako levitace odpuzováním nebo repulzní levitace, stojí na principu vyobrazeném na obr. 1.10.



Obr. 1.10 Princip elektrodynamické levitace (EDS) [6]

Levitační systém EDS se skládá ze dvou důležitých částí. První částí je elektromagnet. Chápejme ho jako supravodivou cívku napájenou stejnosměrným budícím proudem. Supravodivá cívka (SCM) se využívá proto, aby mohl v cívce téct vysoký budicí proud (stovky kiloampér), který nám zajistí vysoké magnetické pole. Vysoké magnetické pole je zapotřebí zejména u dopravních systémů, kde musí být levitace stabilní i při vysokém zatížení (hmotnost vlaku a cestujících). Supravodivá cívka je uložena v kryostatu (přístroj, v němž se udržuje nízká konstantní teplota), kde se udržuje teplota pro supravodivý stav. Aby se ze supravodivé cívky stal elektromagnet, musíme cívku vystavit magnetickému poli (např. permanentním magnetem), aby v okolí supravodivé cívky došlo ke změně magnetického pole. Platí tedy: $\frac{d\phi}{dt} \neq 0$. V SCM se indukují napětí, a protože má skoro nulový odpor, bude cívku protékat vysoký budicí proud. Tento elektromagnet je uložen zespod na vozidle. Druhou částí jsou cívky zapojené dokrátka. Tyto cívky jsou zabudované v jízdni dráze. Pohybující se elektromagnet vytváří magnetické pole. Při jeho pohybu se mění magnetický tok spřažený s cívkami zabudovanými v jízdni dráze a indukují v nich proudy. Tyto proudy vytvářejí magnetické pole, které je v interakci s elektromagnetem. Na elektromagnet působí síla, která má dvě složky (obr. 1.10). První složka je levitační síla F_l , která elektromagnet odpuzuje. Druhou složkou je síla brzdící F_b a působí proti rychlosti pohybu elektromagnetu v .

1.5.2 Uplatnění EDS

Tento druh levitace je pro dopravní systémy využíván hlavně v Japonsku u jejich vlaků MLU. [2] [6]

2 Dopravní systémy využívající magnetické levitace

Dnešní svět je uspěchaný. Každý pořád někam pospíchá. Tento trend se samozřejmě projevil i v dopravě. Mezi hlavní kritéria dnešní dopravy patří doba přepravy osob a zboží. Snaha o minimalizaci doby přepravy ale narazila na problém omezených možností stávajících dopravních systémů. Někteří výrobci vidí budoucnost v dopravních systémech na principu magnetické levitace. Dopravní systémy postavené na magnetické levitaci se nejvíce rozšířily u drážní dopravy. Snaha je o uplatnění i v jiném odvětví dopravy, ale doposud není tato metoda dopravy na takové úrovni, aby byla výhodnější než stávající. Možnosti postavení vlaků, které budou plout na vzduchovém polštáři nad tratí, se nejvíce chytili konstruktéři v Německu a Japonsku. Každá z těchto zemí se obrátila na jiný typ levitace. Německo začalo využívat elektromagnetické levitace. Jejich vlaky nosí jméno Transrapid a dnes jezdí např. v Číně. V Japonsku dali přednost elektrodynamické levitaci a své vlaky označují jako JR-Maglev MLU.

2.1 Transrapid

Transrapid je železniční systém využívající elektromagnetické levitace EMS. Jak již bylo řečeno, za jeho konstrukcí stojí němečtí inženýři. První zmínky o využívání magnetického pole pro levitaci v dopravních systémech jsou již z počátku 20. století. Tento dopravní prostředek je velmi komfortní. Vozidlo na principu EMS je vzhledem k zemi bezdotykové, a díky tomu nevzniká takový hluk, jako u běžného vlaku. Vlak disponuje provozní rychlostí až $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, a tak s přehledem překonává běžné vlaky.

2.1.1 Historie a vývoj Transrapidu

- | | |
|-----------|---|
| 1902 | Albert A. Albertson získal patent na využití magnetismu v železniční dopravě. Nesestavil však funkční model. Byl omezen tehdejší technickou vyspělostí. Sestavil pouze vagon, který se zespod přitahoval ke kolejnici za pomoci stejnosměrných elektromagnetů. Docházelo tehdy jen k nadlehčování, nikoliv však k levitaci. |
| 1922-1934 | Za průkopníka elektromagnetické levitace je považován německý inženýr Hermann Kemper. Tento objev si nechal patentovat na využívání v železniční dopravě. |

- 1935 Hermann Kemper předvedl první funkční model vozidla maglev o nosnosti 210 kg.
- 1968 Rozjíždí se vývoj maglev na podnět spolkového ministra dopavy. Výroby se ujala firma MBB (Messerschmitt-Bölkow-Blohm).
- 1971 MBB předvedli první prototyp vysokorychlostního vlaku na principu EMS označovaného jako Transrapid 02 (obr. 2.1). Pohonem vlaku byl asynchronní lineární motor s krátkým statorem. Maximální rychlost byla pouhých $90 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1972 Firmy AEG, BBC a SIEMENS začínají vývoj na principu elektrodynamické levitace. V Erlangenu nedaleko Norimberku byla vybudována 900 m dlouhá oválná dráha. Zkušební vozidlo EET 01 zde dosáhlo maximální rychlosti $401,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1973 Předveden nový model vozidla, který nesl název Transrapid 04.
- 1974 Vyroben prototyp KOMETA MBB. Vozidlo bylo bez cestujících a dosahovalo maximální rychlosti $401,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1977 Vláša SRN rozhodla, že další vývoj bude zaměřen jen na EMS.
- 1978 Vývojové středisko (TVE) v Emslandu.
- 1979 Na mezinárodním veletrhu v Hamburku byl předveden Transrapid 05. Vozidlo mělo 68 míst k sezení a pohybovalo se rychlostí $75 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1980 Stavba testovací tratě v Emslandu pro Transrapid 06.
- 1983 Testování vozidla Transrapid 06, které je složeno ze dvou částí a má 198 míst k sezení. Vozidlo je schopno dosáhnout rychlosti $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1988 Na mezinárodním veletrhu dopavy v Hamburku je představen Transrapid 07, který disponuje maximální rychlostí $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1994 Vláša SRN rozhodla o vybudování maglev v Německu mezi Berlínem a Hamburkem.

- 1998 Firmy Siemens AG a Thyssen-Krupp založily společnost Transrapid International (TRI). Tato společnost se zabývá vývojem a výrobou Transrapidů.
- 1999 Transrapid 08 mohl přepravovat 311 cestujících a to maximální rychlostí až $500 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 2001 Zahájena výstavba trati Šanghaj - Pudong Transrapidu 08 v Číně. O dva roky později byl na této trati zahájen pravidelný provoz.
- 2001- dosud Německo plánovalo ještě jednu trať pro Transrapid, a to v Mnichově. Tato trať měla spojit mezinárodní letiště a hlavní nádraží. Od obou německých projektů se z finančních a politických důvodů odstoupilo. Přednost dostaly vysokorychlostní vlaky ICE společnosti Siemens. V roce 2009 se předvedl nejmodernější vůz maglev, a to Transrapid 09 (obr. 2.2). Spolupráce firem Siemens AG a Thyssen-Grupp skončila. Firma Siemens AG od vývoje a výroby Transrapidů odstoupila.

Zdroj: [2][5][7][8] [10][25]



Obr. 2.1 Transrapid 02 (převzato z [7])

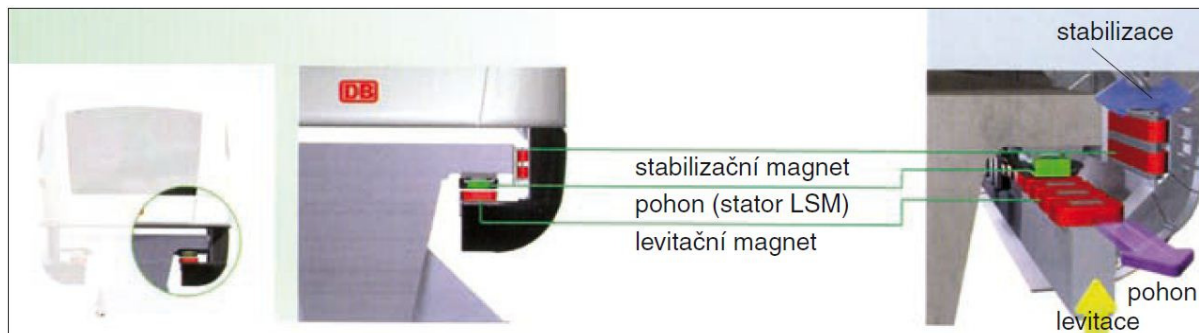


Obrázek 2.2 Transrapid 09 (převzato z [7])

2.1.2 Technologie a princip Transrapidu

Transrapid je první zásadní inovací v oblasti železniční techniky od výstavy první železnice. Velkou výhodou Transrapidu je, že nemá kola. Využívá bezkontaktní elektromagnetické levitace, a tudíž nedochází k mechanickému opotřebení. Jako první vlak využívající EMS pro komerční účely byl Transrapid 08. Transrapid 08 se vyráběl od roku

1999. V roce 2007 byl nahrazen novějším modelem Transrapid 09. Vlak se skládá ze dvou koncových vozů a 1–8 vložených vozů. Koncové vozy jsou určeny pro strojvedoucího a vložené vozy pro cestující nebo přepravovaný náklad. Průměrný počet míst jednoho vozu při přepravě cestujících je 90. Délka celého vlaku je však omezena délkou nástupiště. Tělo vlaku je tlakotěsné a je vyrobeno převážně z hliníku. Na obr. 2.3 můžete vidět levitační, stabilizační a pohonný systém Transrapidu. [7][11][25]

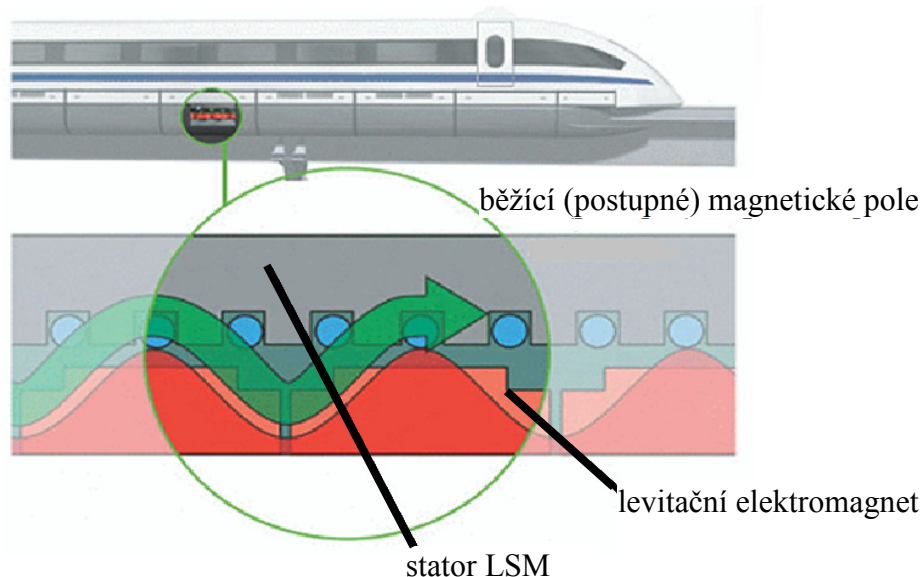


Obr. 2.3 Levitační, stabilizační a pohonný systém Transrapidu (převzato z [5])

2.1.2.1 Elektromagnetický systém a pohon

Po celé délce vozidla v podvozku jsou nainstalovány elektronicky řízené levitační elektromagnety, které slouží k levitaci vozidla a k jeho pohonu. Ve spodní části drážního tělesa jsou zabudovány pakety plechů. Elektromagnety se přitahují k paketům. Proud, kterým jsou napájeny plechy, je regulován, aby docházelo vždy ke konstantní vzduchové mezeře, a tím ke stabilní levitaci. Vzduchová mezera je nepřetržitě sledována čidly a je přibližně 10 až 12 mm. V dnešní době technické prostředky umožňují přesnější stavbu drážních těles, a proto můžeme dosáhnout mezery kolem 8 mm. Čím menší mezery dosáhneme, tím menší bude potřebný budicí proud. Můžeme tedy snížit náklady na provoz.

Pakety plechů v drážním tělese jsou zároveň statorem lineárního motoru a slouží k pohonu vozidla. Jsou vyrobeny především z dynamoplechů pro jejich lepší magnetické vlastnosti (menší vířivé ztráty). Pakety mají drážky, a v nich je uloženo třífázové vinutí. Toto vinutí indukuje postupné (běžící) magnetické pole (obr. 2.4) a pomocí levitačních elektromagnetů unáší vozidlo.



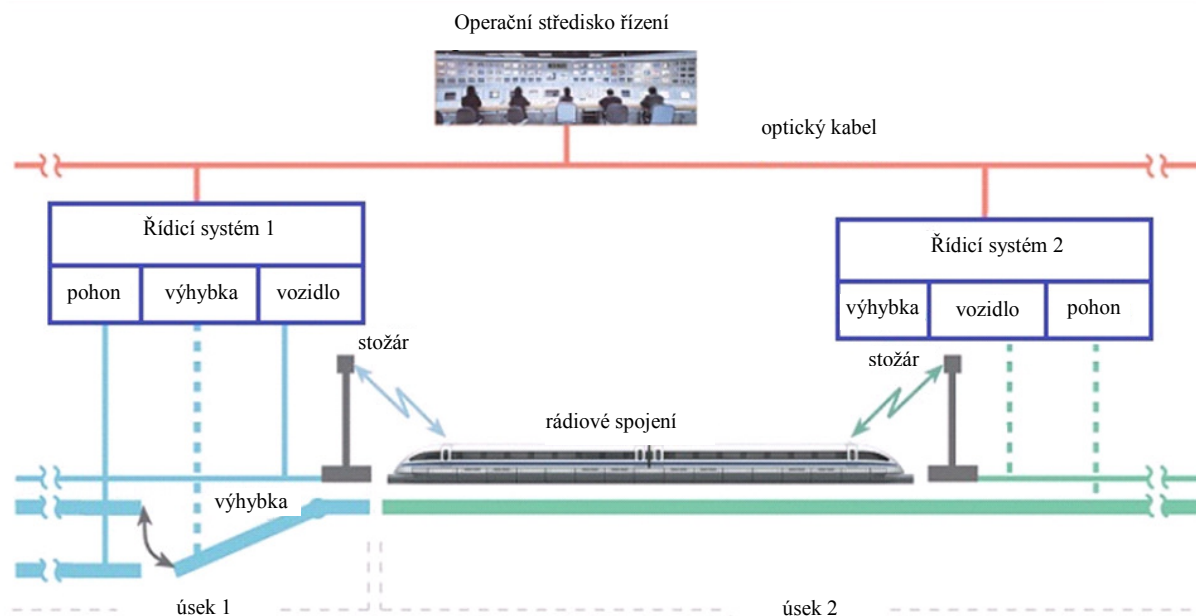
Obr. 2.4 Běžící (postupné) magnetické pole (převzato z [7])

Na vozidlo během jízdy působí boční síly (např. vítr, síly působící při průjezdu zatáčkou), a proto je zapotřebí zajistit boční stabilitu. Slouží nám k tomu stabilizační elektromagnety zabudované do podvozku vozidla.

Jelikož Transrapid využívá principu EMS, tak může levitovat i v klidové poloze vozidla. Vozidlo, které je v klidu nebo se pohybuje malou rychlostí, využívá k dodávce energie palubní akumulátorové baterie. Tato energie pokrývá energii levitačních a stabilizačních magnetů a vlastní spotřebu vozidla, jakožto klimatizaci, osvětlení, atd. Vozidlo dokáže levitovat za pomoci akumulátorového zdroje asi hodinu. Dřívější modely Transrapidu využívaly namísto baterií troleje. Dnes jsou modely Transrapidu vzhledem k pevné zemi zcela bezdotykové. Při rychlostech pohybujících se okolo $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ začne dodávat energii indukční zdroj (IPS). Tento zdroj je vlastně lineární generátor zabudovaný do levitačních magnetů. Z vyrobené energie hradí svoji vlastní spotřebu a zároveň dobíjí akumulátorový zdroj vozidla. V případě výpadku generátoru bude nadále vozidlo levitovat ze zdroje baterie až do určeného odstavného prostoru. Vozidlo je opatřeno i skluznicemi, které slouží k zajištění bezpečného dosednutí vozidla na dráhu, v případě selhání levitace. Skluznice jsou vyrobeny z prvků keramiky, jelikož při kontaktu skluznice a dráhy dochází vlivem tření k vysokým teplotám vyšším než 1000°C . [7][11][25]

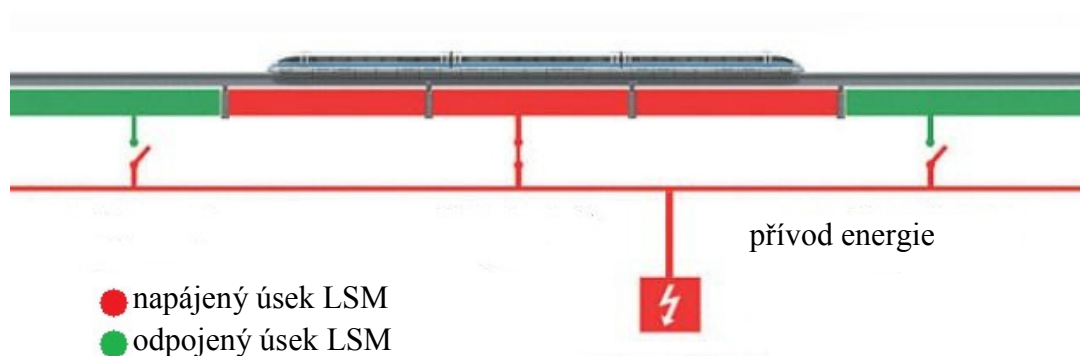
2.1.2.2 Ovládání Transrapidu

Transrapid je ovládán z operačního střediska a je řízen automaticky. Strojvedoucí je ve vozidle pouze jako záloha v případě selhání systému. Schéma řízení je na obr. 2.5.



Obr. 2.5 Schéma řízení Transrapidu [7]

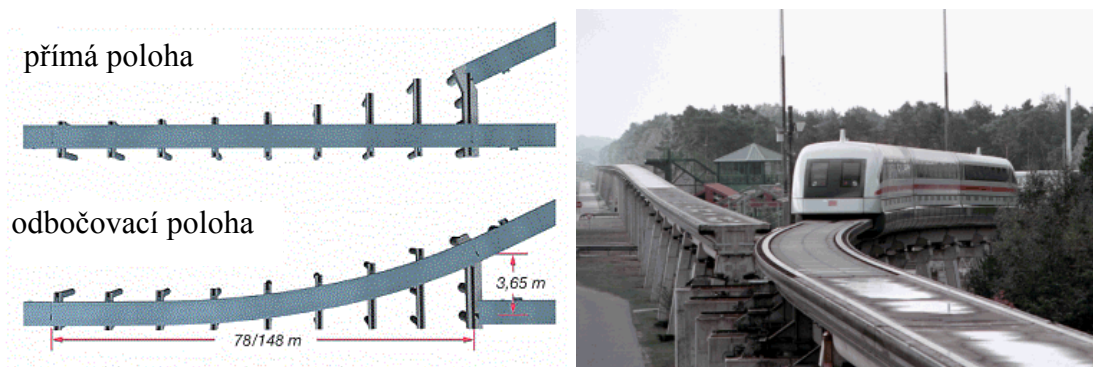
K řízení vozidla se využívá digitální přenos dat OTN (sít' s otevřeným přenosem dat) s přenosem 38 GHz. Rychlost běžícího magnetického pole, a tedy i rychlost Transrapidu se reguluje pomocí frekvence třífázového proudu „dlouhého statoru“ lineárního motoru. Možnosti regulace jsou v těchto mezích: napětí 0 až 7800V, proud 0 až 1200 A, frekvence 0 až 125 Hz. V případě brzdění vozidla, pomocí přepólování, se motor stává generátorem. Vzniklá energie se rekuperuje zpět do sítě. Pro případ selhání je zde instalovaná ještě vířivá brzda. Stator lineárního motoru je rozdělen do úseků nepatrně větších, než je délka soupravy. Napájí se vždy jen ten úsek, na kterém se souprava pohybuje (obr. 2.6). Docílí se tím menších ztrát elektrické energie. Radiový systém zjišťující polohu vozidla dává signál k napájení úseku. Signálem jsou ovládány měniče tranzistorů IGB, které napájejí příslušný úsek dráhy. K napájecí stanici je elektrickým vedením přivedeno napětí 110 kV. Z napájecí stanice je dodávána energie do daných úseků za pomoci kabelového vedení. [7][11][25]



Obr. 2.6 Napájení LSM [7]

2.1.2.3 Drážní těleso

Drážní těleso, nad kterým vozidlo levituje, může být jednokolejové nebo dvoukolejné. Lze postavit jak pozemní dráhu, tak nadzemní dráhu. Nadzemní dráha je umístěna na štíhlých sloupových pilířích a skládá se z nosníků. Délka nosníků může dosahovat až 61 metrů. Pro jejich výrobu se nejčastěji využívá kombinace oceli a betonu, lze ale využít tyto suroviny i zvlášť. Výhodou nadzemní dráhy je, že je možné zemědělsky využívat půdu pod dráhou. V příloze můžete na obr. A. 1 vidět pozemní a nadzemní jízdní dráhu. Ve většině případů se dráha umístí vedle již zbudované plochy, jako jsou dálnice nebo železnice. Jak již bylo zmíněno výše, je v drážním tělesu zabudovaný dlouhý stator lineárního motoru pro pohon vozidla.



Obr. 2.7 Výhybka na trati Transrapidu [11]

Jako u běžných vlaků lze i zde využívat výhybek (obr. 2.7). Ke změně směru dráhy se využívají ohebné ocelové výhybky. Výhybka je v podstatě 78 až 148 metrů dlouhý ocelový nosník, který se pomocí elektromechanického servopohonu ohýbá v daný směr. Při průjezdu přes úsek s výhybkou musí vlak dodržovat rychlostní omezení. Je tomu tak z bezpečnostních důvodů. Jestliže bude výhybka v přímém směru, může vozidlo projet bez omezení rychlosti. V případě, že bude výhybka v odbočovací poloze, může vlak projet rychlostí $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ nebo rychlostí $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ v případě rychlovýhybky.

Pohonný systém vozidla zabudovaný v jízdní dráze vylučuje možnost srážky s jiným vlakem. Vozidlo může jet jedním směrem. Pro provoz v obou směrech jsou zapotřebí dvě dráhy. Vozidlo nemůže ani vykolejit. Je tomu tak díky podvozku vozidla, který objímá jízdní dráhu. [7][11][25]

2.2 JR – Maglev MLU

Převážná část japonských železničních tratí byla po 2. světové válce zničena. Mělo to za následek budování modernějších železničních koridorů, než tomu bylo třeba v Evropě. Již r. 1964 začal provoz rychlovlaku Šinkansen. Síť železnic pro Šinkansen je v Japonsku velmi bohatá. Tento vlak využívá principů jako každý jiný vlak. Motory jsou instalovány ve vozidle. Elektrickou energii odebírá z trolejí nad vlakem a jezdí po kolejkách. Tímto způsobem nelze dosáhnout extrémních rychlostí, které dnes Japonci vyžadují, a proto se rozhodli pro vývoj vozidel maglev.

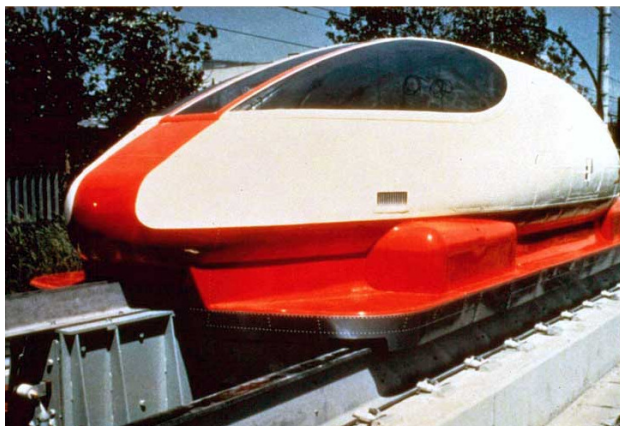
Na rozdíl od elektromagneticky levitovaných vlaků Transrapid, se japonští konstruktéři vydali převážně cestou elektrodynamické levitace. Objevují se zde však i vlaky na principu HSST (High Speed Surface Train), které zde slouží jako alternativa metra a řadíme je mezi nízkorychlostní vlaky. Na vývoji vlaků využívajících principu HSST, který je velmi podobný EMS, pracují japonské aerolinie JAL (Japan Air Lines). Vysokorychlostní vlaky na principu EDS jsou označovány JR – Maglev MLU a jejich vývojem se zabývají japonské železnice JNR (Japan National Railways) spolu s firmami Mitsubishi, Toshiba a Hitachi. Název vozidla vznikl ze spojení několika zkratk. JR znamená Japonská železniční společnost a MLU magneticky levitovaná jednotka. Vlaky na principu elektrodynamické levitace se zatím nepoužívají pro komerční využití. Stále probíhá testování a zjišťování technologií, které by snížily náklady na tento maglev. Zatím dostávají přednost stále rychlovlaky Šinkansen. [12][15][16][17][25]

2.2.1 Historie

- | | |
|------|---|
| 1962 | Francouz Emile Bachelet získal patent na levitující vozidlo, které se svým principem blížilo k elektrodynamické levitaci. V jízdni dráze byly zabudované cívky, které se budily střídavým proudem. Cívky indukovaly v podvozku vozidla vířivé proudy. Jejich magnetické pole a pole cívky na sebe vzájemně působila. Docházelo k nadlehčování vozidla. V tomto roce byl sestrojen i malý model. |
| 1963 | J. R. Powell navrhl levitaci, při které se odpuzovaly dvě supravodivé cívky. |
| 1969 | J. R. Powell a G. D. Danby pracovali na projektu superexpresu využívajícího EDS. |

- 1972 Společnost JNR (Japonské národní dráhy) zahájila vývoj superexpresu s nízkoteplotními supravodivými magnety chlazenými kapalným héliem. Sestaven prototyp ML 100 (obr. 2.8). ML 100 využíval lineární indukční motor (LIM). Dále bylo zkoušeno vozidlo LSM 200, které využívalo lineárního synchronního motoru (LSM).
- 1975 Zkušební vozidlo ML 100A využívající LSM pohon a experimentální supravodivé magnety úspěšně absolvovalo levitační test.
- 1977 Nově otevřeno testovací centrum v Miyazaki. Probíhal zde zkušební provoz vozidla ML 500 na drážním tělese ve tvaru T.
- 1979 Vozidlo ML 500R dosáhlo rychlosti $517 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 1980 Vozidlo MLU 001 bylo testováno na drážním tělese ve tvaru U na testovací dráze v Miyazaki.
- 1986 - 1995 Třísekční vozidlo dosáhlo rychlosti $352,4 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Dvousekční vozidlo dosáhlo rychlosti $405,3 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bez posádky a $400,8 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ s posádkou. Začíná zkušební provoz vozidla MLU 002. Výzkum je přesunut do nového střediska z JNR do RTRI (Railroad Technology Research Institut). Testovaná aerodynamická brzda u MLU 001. Testováno nové vozidlo MLU 002N.
- 1996 - 2002 Otevření testovací dráhy Yamanashi. Trať je dlouhá 42,8 km. Testoval se zde vlak MLX01. Délka vlaku byla 72,2 m a přepravní kapacita byla 176 míst. Zkušební jízdy byly určeny i pro veřejnost a byly bezplatné. MLX01 dosáhlo rychlosti $552 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ s posádkou a $548 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bez posádky. Začal test nového vlaku MLX01-901 (obr. 2.9).
- 2003 Při zkušební jízdě vlaku MLX01 v třísekčním provedení bylo dosaženo rychlosti $581 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.
- 2004 - současnost Přejít na vysokoteplotní supravodivé magnety. Vývoj nových konstrukcí a technologií pro snížení pořizovacích nákladů.

Zdroj: [2] [6][12][25]



Obr. 2.8 Vozidlo využívající EDS:
ML001 (převzato z [12])



Obr. 2.9 Vozidlo využívající EDS: MLX01 – 901
(převzato z [12])

2.2.2 Technologie a princip JR-Maglev MLX01-901

Projektanti z celého světa, a zejména pak z Japonska, se zabývají magnetickými superexpresy, které využívají elektrodynamické levitace. Vozidlo JR-Maglev MLX01-901 je poslední model testovaného vlaku. Vozidlo se skládá z maximálně pěti částí. Přední části vozidla jsou navrženy tak, aby bylo dosaženo co možná nejmenšího aerodynamického odporu. Konstrukci tohoto vlaku můžete vidět na obr. 2.9. Můžete si všimnout protáhlé přední části vozu. Délka dosahuje 28 m. Další části jsou dlouhé 24,3 m. Šířka celé soustavy je 2,9 m a výška 3,32 m. Počet míst k sezení v průběžném voze je 68. Vůz je schopen dosáhnout rychlosti až $581 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. [12]

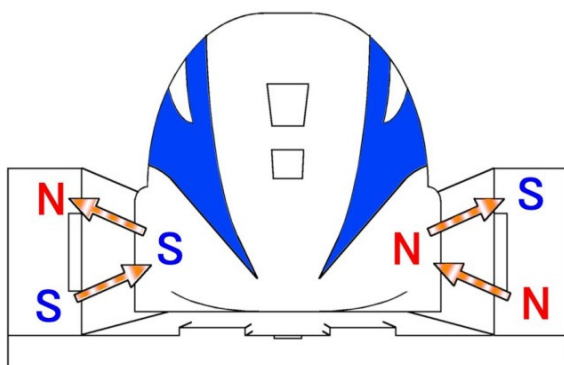
2.2.2.1 Elektrodynamický systém a pohon

Hlavním prvkem pro dosažení levitace jsou elektromagnety, které jsou buzené supravodivými cívkami (SCM). Cívky jsou vyrobeny ze slitiny niob – titan a jsou umístěny v kryostatu, kde jsou chlazeny kapalným héliem na teplotu -269°C . Je tomu tak kvůli supravodivým účinkům. SCM je spolu s kryostatem umístěno v boku podvozku vozidla. Ve vozidle je těchto cívek uloženo osm. Na každé straně vozidla jsou dvě dvojice cívek.

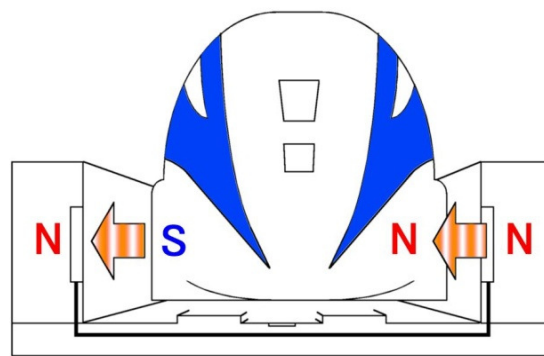
SCM není využíváno jen k levitaci, ale i k pohonu. Slouží jako rotor lineárního synchronního motoru (LSM). Třífázové vinutí LSM je umístěno v drážním tělese, jako je tomu u Transrapidu. V drážním tělese jsou také umístěny levitační cívky, které plní i účel stabilizace. Supravodivé cívky jsou vůči cívkám v dráze umístěny o něco níže pod středem horní a dolní levitační cívky.

Pro dosažení elektrodynamické levitace musíme uvést vozidlo do pohybu. Jestliže vozidlo stojí, tak se do cívek neindukují žádné proudy. Nedochozí tudíž k levitaci. Vůz je

na svém podvozku vybaven koly, která se pohybují po kolejnicích. K rozjezdu se využívá způsobu, jako je tomu u běžného vlaku. Jestliže se zvýší frekvence proudu ve statoru LSM, vozidlo se začne rozjíždět a po dosažení rychlosti přibližně $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, kdy v cívkách statoru bude procházet dostatečný proud pro silné magnetické pole, dojde k levitaci. Princip pohonu pomocí LSM, podvozek a panel se supravodivými cívkami můžete vidět v příloze B na obr. B.1 a B.2. V okamžiku přivedení vozidla do pohybu se do dolních cívek indukují proudy větší než do horních cívek. Zapojení horní a dolní levitační cívky je znázorněno v příloze B na obr. B.3. Tímto zapojením nám vzniká severní a jižní pól. Je tomu tak díky opačné polaritě proudu v horní a dolní cívce. Podvozek bude tedy horní cívkou přitahován a dolní cívkou odpuzován, a proto když se vozidlo bude pohybovat rychlostí přibližně $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, tak dojde k levitaci. Na obr. 2.10 je vyobrazen princip levitace a stabilizace. Vzduchová mezera je na rozdíl od Transrapidu větší. Pohybuje se od 100 - 150 mm, ale většinou je 110 mm. Jak již bylo řečeno, tak levitační cívky slouží i k boční stabilizaci vozidla. Cívky na protilehlých stranách drážního tělesa jsou spolu propojeny pod drahou (viz. obr. 2.11). Jakmile se vozidlo vychýlí na stranu, tak na straně s menší boční mezerou vzrostou v cívkách proudy a na druhé straně zase poklesnou. Odpudivá síla tedy v místě menší vzduchové mezery klesne a vozidlo se tak navrátí do středové polohy. [2] [6][12]



Obr. 2.10 Princip levitace EDS (převzato z [14])



Obr. 2.11 Princip stabilizace EDS (převzato z [14])

2.2.2.2 Drážní těleso

V jízdni dráze je uložen masivní hliníkový pás. Lze také použít pás s obdélníkovými otvory nebo cívky spojené dokrátka. V dráze jsou zabudované levitační cívky a trojfázové vinutí statoru LSM. Jsou známy tři metody, jak udělat drážní těleso.

První metoda (obr. 2.12) spočívá v tom, že se speciálně tvarované betonové nosníky vyrobí v továrně. Do nosníků se poté nainstalují levitační cívky a LSM. Poté se připevní kryt

proti nepříznivým vlivům. Takto upravený nosník se dopraví na stavbu, kde z něj sestaví dráhu.

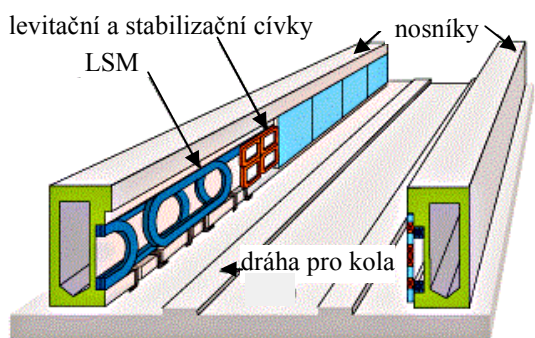
Druhá metoda (obr. 2.13.), panelová, musí mít již připravenou vnější konstrukci do písmena U. Poté se zevnitř na boční stěny připevní betonové panely osazené levitačními cívkami a LSM.

Poslední metoda (obr. 2. 14) se nazývá „přímé připevnění.“ Drážní těleso se přímo instaluje do potřebného krajinného profilu a poté se jen osadí cívkami a LSM. Tato metoda je nejekonomičtější.

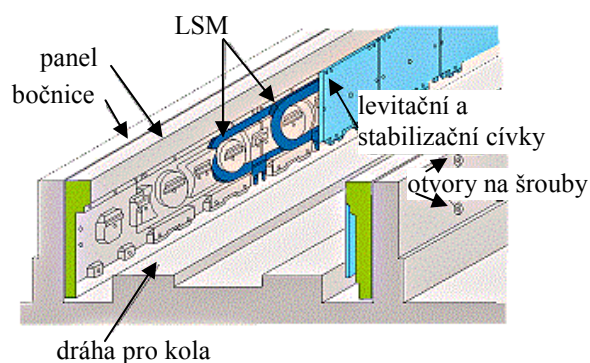
Jako tomu bylo u Transrapidu, tak i zde je možná změna směru pomocí výhybek. Podle rychlosti vlaku dělíme výhybky na dva druhy: pro vysoké rychlosti a pro nízké rychlosti.

Vysokorychlostní výhybka je založena na principu pohyblivého nosníku. Pohyblivý nosník je pomocí přenosného vozíku na kolejnicích přenesen do daného směru. Vlak přes tuto výhybku může přejet vysokou rychlostí.

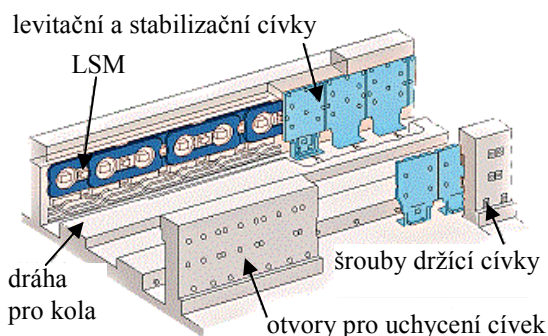
Nízkorychlostní výhybka je složena za tři části: přední, střední a zadní. Přední a zadní část posouvá bočnice dráhy příčně a střední část zase svisle. Přizpůsobí se tak dráha k projetí vlaku v daném směru. Tyto typy výhybek lze shlédnout v příloze C na obr. C. 1 a na obr. C.2. [2][6][12][25]



Obr. 2.12 Drážní těleso: metoda nosníků [12]



Obr. 2.13 Drážní těleso: metoda panelů [12]



Obr. 2.14 Drážní těleso: metoda přímá[12]

2.2.2.3 Ovládání

Jak už víme, tak pohonem vozidla je lineární synchronní motor, jehož stator je instalován v drážním tělese. Třífázový zdroj energie, jež napájí stator, je regulovatelný a může dodat napětí 5800V, proud 900A a to při rozpětí frekvence od 0 do 28 Hz. Jako je tomu u Transrapidu, tak i zde se napájí jen úseky nepatrně delší, než jsou rozměry soupravy. Snižují se tím ztráty v třífázovém vinutí. Signál k zapnutí úseku dává radiový polohový detekční systém. Tento systém ovládá měniče tranzistorů IGB, které napájí příslušný úsek statorového vinutí.

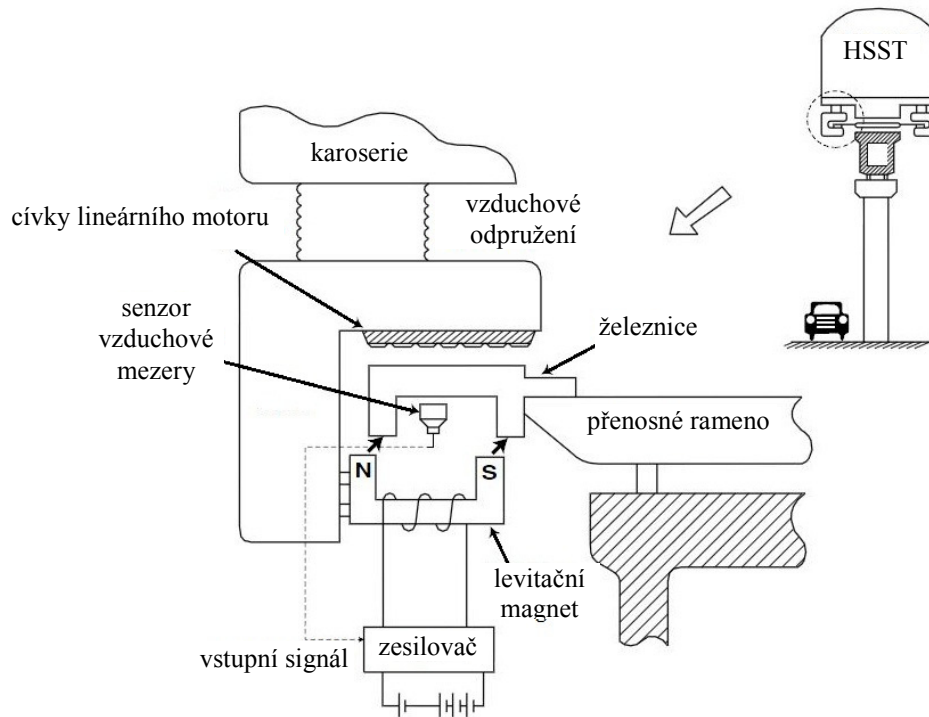
Brzdění vozidla je zajištěno třemi na sobě nezávislými systémy. Prvním je aerodynamická brzda. Tato brzda je vyobrazena na obr. 2.15. Tato brzda se vysouvá z těla vozu při brzdění a zvyšuje odpor vzduchu, a tím i brzdí. Dalším brzdícím systémem je brzda třecí, která je součástí podvozku. Poslední brzdou je rekuperační elektrodynamická. [2] [6][12]



Obr. 2.15 aerodynamická brzda (převzato z [12])

2.3 HSST

Tento druh levitace vznikl v Japonsku. Na jeho vývoji pracovali japonské aerolinie JAL (Japan Airlines). Chtěli co možná nejrychlejší způsob, jak přepravit cestující z centra města na letiště. Tento druh levitace je velmi podobný elektromagnetické levitaci. Princip je stejný a jako je tomu u Transrapidu, tak i zde jsou nejdůležitější částí levitační magnety a lineární synchronní motor. Rozdíl je v tom, že HSST nemá LSM uložený v drážním tělese. Cívky lineárního motoru jsou zabudované v podvozku vozidla. Levitační magnet je taktéž v podvozku vozidla. Kolejnice drážního tělesa je umístěna mezi cívky lineárního motoru a levitační magnet. Senzor kontroluje mezeru mezi kolejnicí a levitačním magnetem a v případě výchyly se pomocí proudu stabilizuje poloha. Princip této levitace je znázorněn na obr. 2.16. HSST se dnes využívá v Japonsku jako nízkorychlostní vlak s velkým počtem zastávek pro městskou dopravu, anebo jako mimoměstský vlak pohybující se rychlostí přes $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. [17][18]



Obr. 2.16 Princip HSST (převzato z [18])

3 Návrh stejnosměrného levitačního elektromagnetu

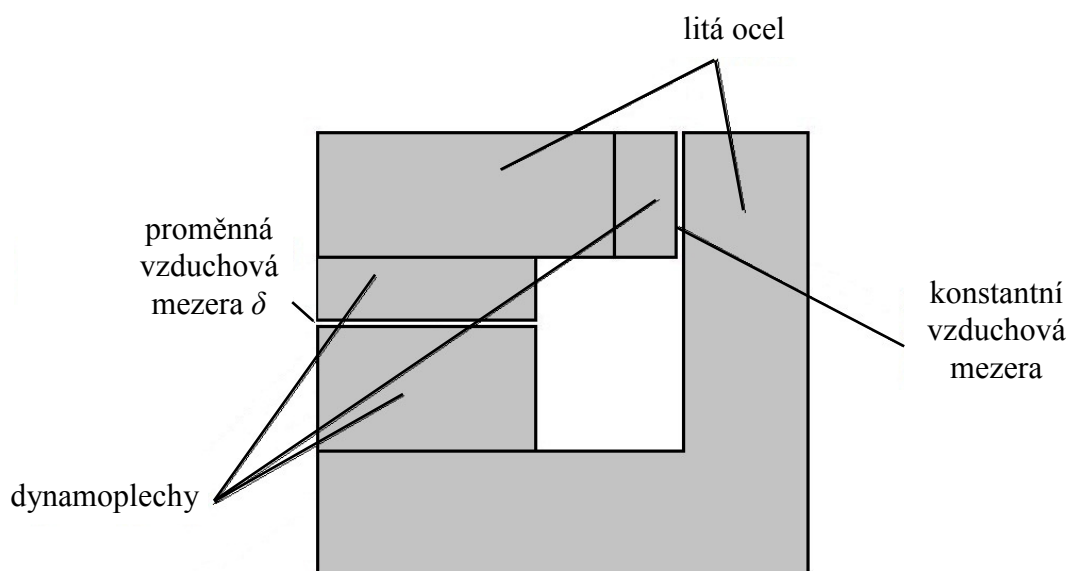
Nejdůležitějším prvkem magneticky levitovaných vozidel je systém, který umožňuje vozidlu levitovat. Vozidla Transrapid využívají k levitaci stejnosměrný levitační elektromagnet. V této části je proveden orientační výpočet tohoto elektromagnetu. Vozidlo může levitovat, jestliže se splní podmínka $F_g = F_m$. Vycházelo se z předpokladů, že hmotnost tří sekcí vozidla Transrapid váží 169,6 t a v každé sekci vozidla je umístěno 12 elektromagnetů (po 6 elektromagnetech na každé straně). Vypočtená hodnota gravitační síly, podle vzorce (1), je rovna síle jednoho elektromagnetu.

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \quad (1)$$

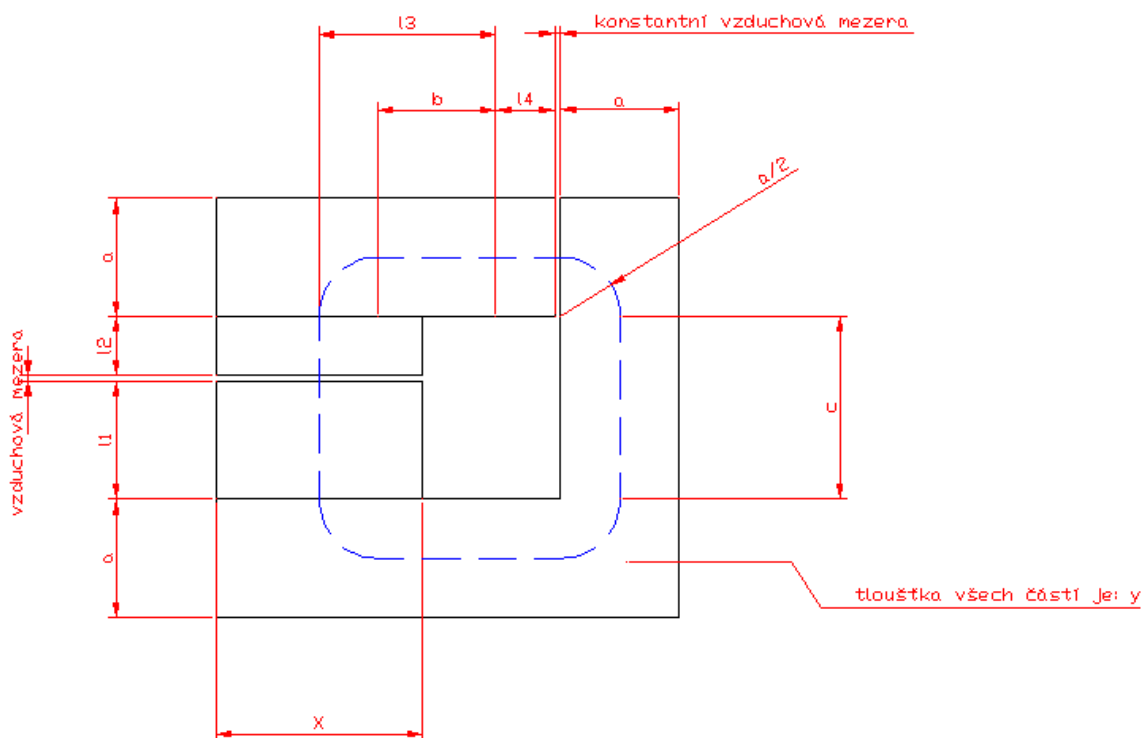
Vezme-li se v úvahu, že se hmotnost vozidla bude měnit, podle počtu cestujících se musí počítat s jistou rezervou pro případnou regulaci levitace. Zvolena byla 30-ti % rezerva. Na obr. 2.3 můžete vidět, jak vypadá elektromagnet a magnetický obvod vozidla. Výpočet je proveden pro magnetický obvod, který je vyobrazen na obr. 3.2. Počítá se zde s jednou proměnnou vzduchovou mezerou. Pro zjednodušení se uvažuje vzduchová mezera u stabilizačních elektromagnetů jako konstantní. Její hodnota byla zvolena 10 mm. Dále musí být znám rozměr elektromagnetu, aby se mohla vypočítat magnetická indukce ve vzduchové mezeře. Rozměry magnetického obvodu byly zvoleny podle obr. 3.3. Šířka elektromagnetu je značena x a je rovna 0,35 m. Tloušťka všech částí je značena y a je rovna 0,5 m. Z těchto rozměrů je dopočten průřez proměnné vzduchové mezery S_δ , z kterého byla získána hodnota magnetické indukce v mezeře pomocí vzorce pro sílu (2).

$$F = \frac{B^2 \cdot S_\delta}{\mu_0} \quad (2)$$

Průřezy, magnetické indukce a intenzity daných částí magnetického obvodu jsou označeny stejným číslem jako jejich střední délky vyznačené na obr. 3.3.



Obr. 3.2 Magnetický obvod



Obr. 3.3 Rozměry magnetického obvodu

Z magnetizačních křivek se odečetly hodnoty magnetických intenzit jádra. Podle vzorce (3) se vypočetly hodnoty pro magnetickou intenzitu vzduchových mezer.

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} \quad (3)$$

Velikosti středních délek byly zvoleny. Dále následoval výpočet pro různé vzduchové mezery. Z podílu magnetické indukce a intenzity byly zjištěny příslušné permeability (4), aby se mohla vypočíst reluktance (5) příslušných částí.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (5)$$

Součtem reluktancí se získal celkový magnetický odpor obvodu (6) pro danou vzduchovou mezeru.

$$R_{mcelk.} = \sum_{i=1}^n R_{mi} \quad (6)$$

Byl zvolen průměr vodiče, který bude ovinut kolem jádra. U vodiče se dopočetl průřez. Budící proud (7), potřebný k vybuzení elektromagnetu, byl zjištěn z průřezu vodiče a z předem stanovených hodnot proudové hustoty.

$$I = J \cdot S \quad (6)$$

Počet závitů je uvažován konstantní, jelikož není možné, aby se při regulaci levitace měnil počet závitů. Na závěr byly vypočteny síly pro různé proudové hustoty v závislosti na vzduchové mezeře (2) a výsledné křivky se vynesly do grafu.

3.1 Výpočet

hmotnost vozidla o třech sekcích $m_{3 \text{ sekce}} = 169600 \text{ kg}$

hmotnost vozidla o jedné sekci $m_{1 \text{ sekce}} = \frac{m_{3 \text{ sekce}}}{3} = \frac{169600,000}{3} = 56533,333 \text{ kg}$

hmotnost na jeden elektromagnet $m_{1 \text{ elekt.}} = \frac{m_{1 \text{ sekce}}}{12} = \frac{56533,333}{12} = 4711,111 \text{ kg}$

gravitační síla $F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$ (1), kde:

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$; gravitační konstanta

$m_1 = 5,974 \cdot 10^{24} \text{ kg}$; hmotnost Země

$m_2 = m_{1 \text{ elekt.}}$

$r = 6378000 \text{ m}$; poloměr Země

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} = \frac{5,974 \cdot 10^{24} \cdot 4711,111}{6378000^2} = 46144,112 \text{ N}$$

$1,3 \cdot F_g = F_m = 1,3 \cdot 46144,112 = 59987,345 \text{ N}$ (zahrnuta rezerva 30 %)

$x = 0,35 \text{ m}$; šířka elektromagnetu

$y = 0,5 \text{ m}$; tloušťka elektromagnetu

průřez ve vzduchové mezeře $S_\delta = x \cdot y = 0,35 \cdot 0,5 = 0,175 \text{ m}^2$

Průřez S_δ odpovídá průřezům S_1 a S_2

síla elektromagnetu $F = \frac{B^2 \cdot S_\delta}{\mu_0}$ (2), kde

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

Z toho vzorce po odvození získáme magnetickou indukci vzduchové mezery:

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F \cdot \mu_0}{S_\delta}} = \sqrt{\frac{59987,345 \cdot 1,256 \cdot 10^{-6}}{0,175}} = 0,656 \text{ T}$$

Víme, že:

$$B_\delta = B_1 = B_2$$

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad (6)$$

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,656}{1,256 \cdot 10^{-6}} = 522282,969 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Z magnetizačních křivek pro dynamoplechy a litou ocel (příloha F a G) jsem si odečetl potřebné hodnoty magnetických intenzit.

dynamoplechy:

$$H_1 = H_2 = H_4 = 350 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

litá ocel:

$$H_3 = 190 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

V části 5 jsem vycházel z předpokladu magnetické indukce $B_5 = 0,5 \text{ T}$, které pro daný materiál odpovídá mag. intenzita $H_5 = 150 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$.

Střední délky částí magnetického obvodu jsem si zvolil:

$$l_1 = 0,2 \text{ m}$$

$$l_2 = 0,1 \text{ m}$$

$$l_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} + b, \text{ kde}$$

$a = 0,2 \text{ m}$; šířka magnetického obvodu (mimo části 1, 2 a δ)

$b = 0,2 \text{ m}$; část délky úseku 3 (viz. obr. 24.)

$$l_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} + b = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,2}{4} + 0,2 = 0,514 \text{ m}$$

$$l_4 = 0,1 \text{ m}$$

$$\delta_{konst.} = 0,01 \text{ m}$$

velikost střední délky l_5 se mění. Je tomu tak, díky zvětšující se nebo zmenšující se vzduchové mezeře.

$$l_5 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{a}{2}}{4} + l_4 + \delta_{konst.} + b + c; \text{ kde}$$

$$c = l_1 + l_2 + \delta$$

Ukázkový výpočet celkové reluktance pro hodnotu vzduchové mezerky $\delta = 0,01$ m:

$$l_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} + b = \frac{2 \cdot \pi \cdot 0,2}{4} + 0,2 = 0,514 \text{ m}$$

$$c = l_1 + l_2 + \delta = 0,2 + 0,1 + 0,01 = 0,31 \text{ m}$$

$$l_5 = 3 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{a}{2}}{4} + l_4 + \delta_{konst.} + b + c = 3 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,2}{2}}{4} + 0,1 + 0,01 + 0,2 + 0,31 = 1,091 \text{ m}$$

Pro výpočet reluktance, potřebné k výpočtu síly, bylo nutné vypočítat permeabilitu v daných částech.

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4)$$

$$\mu_1 = \mu_2 = \mu_4$$

$$\mu_1 = \frac{B_1}{H_1} = \frac{0,656}{350} = 1,875 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\mu_3 = \frac{B_3}{H_3} = \frac{0,656}{190} = 3,454 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$\mu_5 = \frac{B_3}{H_3} = \frac{0,5}{150} = 3,333 \cdot 10^{-3} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (5)$$

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 \cdot S_1} = \frac{0,2}{1,875 \cdot 10^{-3} \cdot 0,175} = 606,459 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 \cdot S_2} = \frac{0,1}{1,875 \cdot 10^{-3} \cdot 0,175} = 304,729 \text{ H}^{-1}$$

Další potřebné průřezy jádra:

$$S_3 = S_4 = S_5 = S_{\delta konst.}$$

$$S_3 = a \cdot y = 0,2 \cdot 0,5 = 0,1$$

$$S_3 = 0,1 \text{ m}^2$$

$$R_{m3} = \frac{l_3}{\mu_3 \cdot S_3} = \frac{0,514}{13,454 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} = 1488,454 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m4} = \frac{l_4}{\mu_4 \cdot S_4} = \frac{0,1}{1,875 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} = 533,276 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m5} = \frac{l_5}{\mu_5 \cdot S_5} = \frac{1,091}{3,333 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1} = 3273,717 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m\delta konst.} = \frac{\delta_{konst.}}{\mu_0 \cdot S_{\delta konst.}} = \frac{0,01}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,1} = 79577,472 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S_{\delta}} = \frac{0,01}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,175} = 45472,841 \text{ H}^{-1}$$

Součtem těchto reluktancí získáme celkovou reluktanci, kterou využijeme u výpočtu síly.

$$R_{mcelk.} = \sum_{i=1}^n R_{mi} \quad (6)$$

$$R_{mcelk.} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4} + R_{m5} + R_{m\delta konst.} + R_{m\delta}$$

$$R_{mcelk.} = 606,459 + 304,729 + 1488,454 + 533,276 + 3273,717 + 79577,472 + 45472,841 = 131256,948 \text{ H}^{-1}$$

Hodnoty síly elektromagnetu jsem získával pro více proudových hustot. Průřez vodiče a počet závitů jsem zvolil u všech výpočtů konstantní.

Počet závitů jsem volil $N = 250$

Průřez vodiče jsem vypočetl:

$$S = \left(\pi \cdot \frac{d}{2}\right)^2, \text{ kde}$$

$d = 0,005 \text{ m}$; průřez vodiče

$$S = \left(\pi \cdot \frac{0,005}{2}\right)^2 = 1,964 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

Ukázkový výpočet síly pro proudovou hustotu $J = 3000000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$

$$I = J \cdot S \quad (7)$$

budící proud tedy je:

$$I_b = J \cdot S = 3000000 \cdot 1,964 \cdot 10^{-5} = 58,905 \text{ A}$$

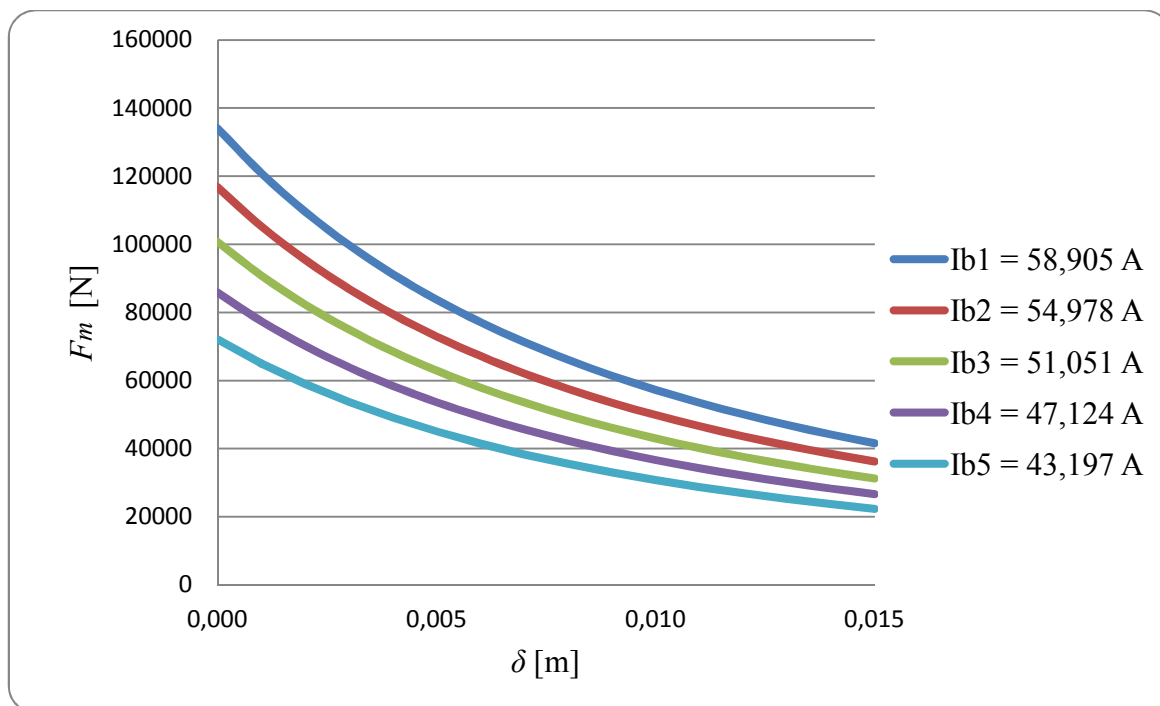
Pro výpočet síly jsem vycházel ze vzorce (2)

Tento vzorec jsem upravil, aby vyhovoval podmínce, že počet závitů a budící proud budou po celou dobu konstantní.

$$F = \frac{B^2 \cdot S_\delta}{\mu_0} = \frac{\frac{\phi^2}{S_\delta^2} \cdot S_\delta}{\mu_0} = \frac{\frac{U_m^2}{R_{mcelk.}^2}}{\mu_0 \cdot S_\delta} = \frac{N^2 \cdot I_b^2}{R_{mcelk.}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta}$$

$$F = \frac{N^2 \cdot I_b^2}{R_{mcelk.}^2 \cdot \mu_0 \cdot S_\delta} = \frac{250^2 \cdot 58,905^2}{131256,948 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,175} = 57236,088 \text{ N}$$

Stejným postupem jsem analyzoval chování síly daných proudových hustot pro proměnnou vzduchovou mezeru. Po vynesení výsledných hodnot do grafu vznikl soubor závislostí síl elektromagnetu na vzduchové mezeře a budícím proudem (graf 3.1). Podrobnější výpočty můžete shlédnout v příloze G, která je přiložena na CD. Všechny zde uvedené vzorce jsem čerpal ze zdroje [24].



Graf 3.1 Soubor závislostí sil elektromagnetu pro různé budící proudy při proměnné vzduchové mezeře

3.2 Vyhodnocení výsledků

S výslednými křivkami by se mohlo dále pracovat. Jsou základem pro návrh příslušného regulačního systému pro stabilní levitace. Výpočet byl však zjednodušený a dá se říci spíše orientační. V případě realizace levitačních systémů se musí brát v potaz další parametry. Do výpočtů se musí zahrnout výchylky vzduchové mezery u stabilizačních elektromagnetů. Rozměry magnetického obvodu musí být navrženy tak, aby nedoházelo k zbytečnému přesycení jádra nebo naopak. Z tohoto výpočtu můžeme potvrdit fakt, že při zvětšení (zmenšení) vzduchové mezery se síla elektromagnetu sníží (zvýší), a tudíž musíme zvýšit (snížit) budící proud, aby levitace byla stabilní. Dále pak regulační systém musí být navržen s vhodným tlumením, aby levitace byla opravdu stabilní.

4 Zhodnocení dopravních levitovaných systémů

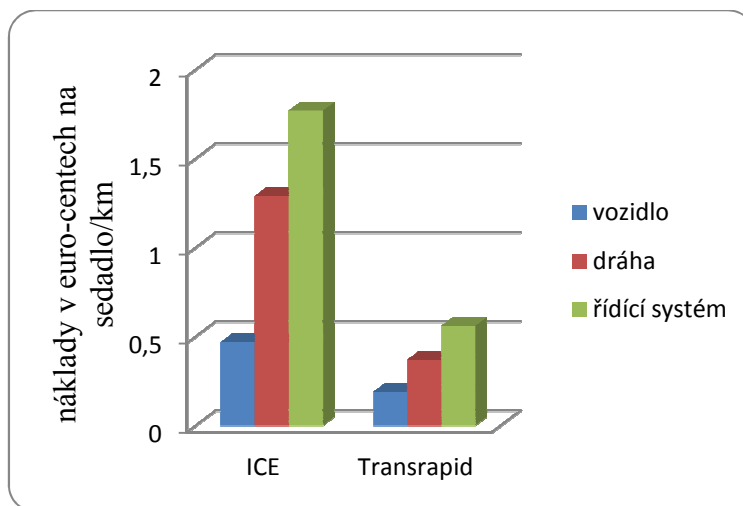
Počátky dopravních levitačních systémů se objevují již začátkem 20. století. Od té doby se tyto dopravní prostředky dostaly na vynikající úroveň. Tato technologie je dostatečně prozkoumaná, aby se již mohla nasadit do komerčního využití. Proč tomu tedy tak není? Všude se píše jen samá chvála na tuto technologii, ale skoro nikde se jí nevyužívá. Podíváme se tedy proč tomu tak je. Zaměřil jsem se, jak na tom dnes jsou dopravní levitační systémy z hlediska ekonomiky, ekologie, bezpečnosti, atd..

4.1 Porovnání vozidel maglev

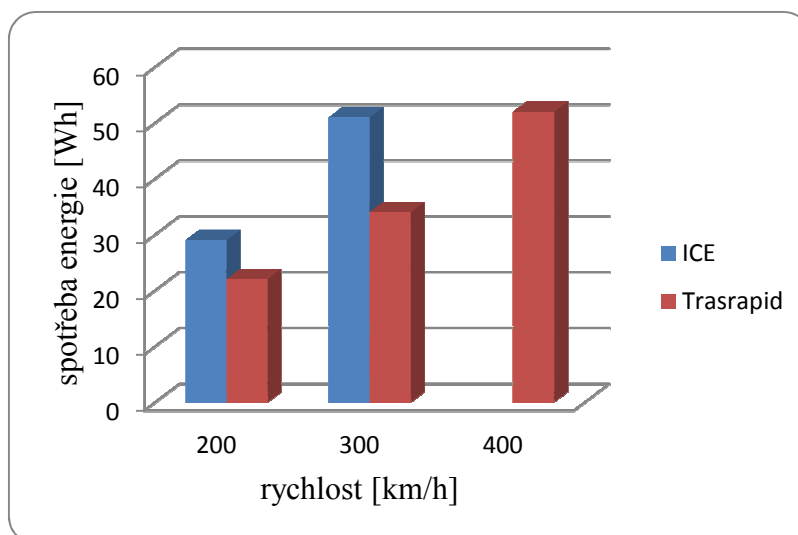
Všechny technologie využívají stejný základ, ale každé vozidlo má své určité specifikace. Mohou být výhodou, ale zároveň i nevýhodou. Německý Transrapid na rozdíl od ostatních vozidel maglev nepotřebuje pomocná kola pro rozjezd, jelikož dokáže levitovat i v klidové poloze. Potřebuje však složité elektronické zařízení, které reguluje budící proud levitačních elektromagnetů a tím zajišťuje stabilní polohu levitovaného vozidla. JR – Maglev MLU potřebuje zase kryotechnické zařízení pro supravodivé magnety. Systém Inductrack má oproti dosavadním levitačním dopravním systémům významnou výhodu. Touto výhodou je jednoduchost a tím i vysoká spolehlivost, a proto by se budoucí vozidla maglev mohla ubírat právě touto cestou. [3]

4.2 Ekonomika

Ekonomická stránka všech projektů je tím nejdůležitějším. Vždy musí být budoucí produkt navržen tak, aby výrobci nebo poskytovatelé dané služby měli z této činnosti zisk. Jak je všeobecně známo: „Peníze jsou vždy až na prvním místě“, a není tomu jinak ani zde. Technologie maglev přináší mnoho výhod a jednu zásadní nevýhodu v této stránce věci. Velkou výhodou jsou nízké náklady na údržbu. Víme, že Transrapid využívá zcela bezdotykové technologie, a proto zde dochází k minimálnímu opotřebení techniky. Vlaky JR – Maglev MLU používají pro svůj rozjezd a dojezd kola, a proto zde oproti Transrapidu jsou větší náklady na údržbu, ale vzhledem k běžnému vlaku jsou to náklady zanedbatelné. Jak můžete vidět v grafu 4.1, tak technologie maglev je vzhledem k údržbě vozidla, dráhy a řídicího systému vždy levnější, než je tomu např. u vysokorychlostního vlaku ICE.



Graf 4.1 Náklady na údržbu Transrapidu a vysokorychlostního vlaku ICE [21]



Graf 4.2 Spotřeba energie vzhledem k rychlosti vozidla vztažená na kilometr/sedadlo [21]

Ke snížení nákladů, které by mohly nastat při porušení trati, napomáhá speciální údržbové vozidlo. Vozidlo je vybaveno měřicími přístroji a zjišťuje změnu stavu jednotlivých částí dráhy (statorové vinutí, kabelové vinutí,...atd.) a pracuje s optickým systémem pro kontrolu povrchu dráhy (kontrola koroze, atd.). Technici také pracují s daty, které získá pomocí senzorů samotné vozidlo při běžném provozu.

Druhou výhodou jsou nízké náklady vynaložené na spotřebu energie (graf 4.2). Z grafu lze vyčíst, že spotřeba elektrické energie je závislá na rychlosti vozidla. Transrapid má téměř totožnou spotřebu energie s ICE v případě, že Transrapid se bude pohybovat rychlostí $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a ICE jen $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Rozdíl o $100 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ je na velké vzdálenosti podstatný. Transrapid je schopný dopravit cestující do cíle určené rychleji a levněji. To jsou hned dvě výhody, pro cestující i pro provozovatele.

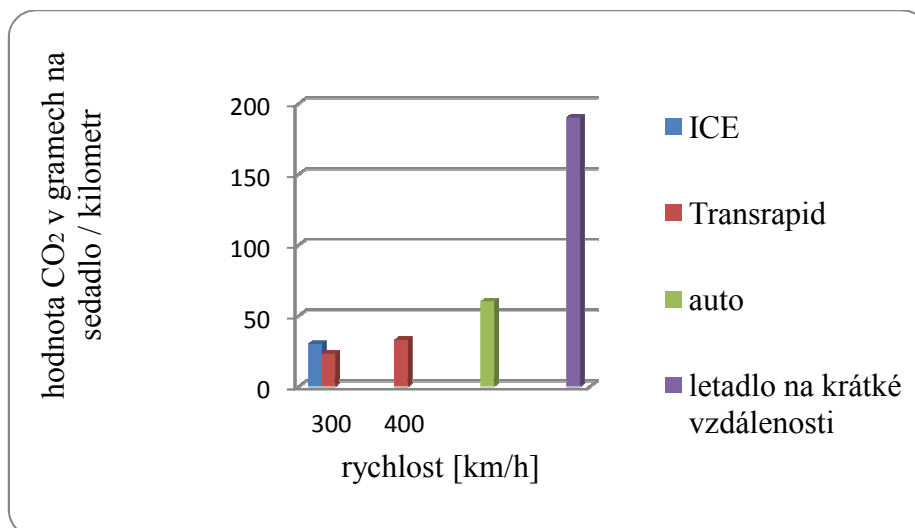
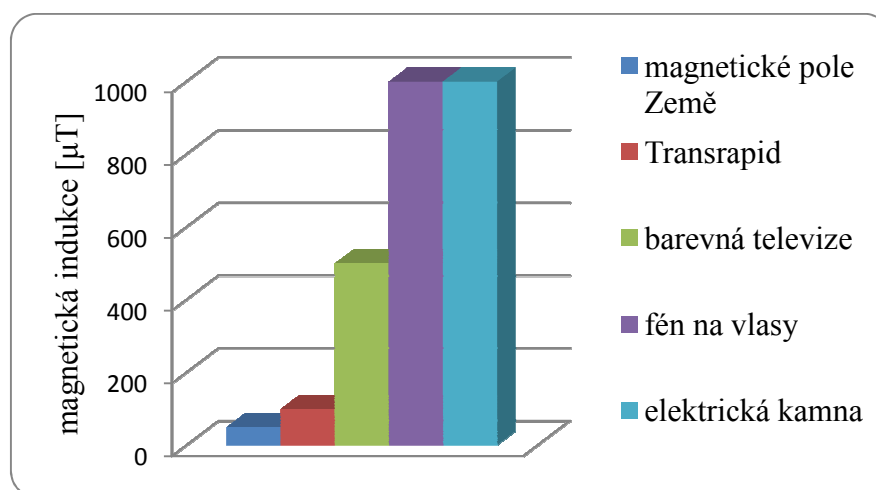
Zatím to vypadá, že systém maglev nemá žádné zápory. Jenomže velkým pasivem jsou náklady na vybudování dráhy. Problém by nebyl v případě, když bereme v úvahu poměr nákladů na vybudování tratě pro vysokorychlostní vlak a pro maglev. V tomto případě jsou náklady téměř stejné. (viz. příloha D graf D. 1 a graf D. 2) Ve většině případů se ale při zavádění vysokorychlostních vlaků jen přizpůsobují dosavadní železnice. Náklady se tedy podstatně sníží. Vlaky maglev, jelikož využívají zcela jiné technologie, musí budovat nové dráhy. Vzhledem k finanční nestabilitě světové ekonomiky investoři ve většině případů volí levnější variantu, a to přestavbu dosavadních železnic na vysokorychlostní. Cena výstavby nové tratě se může projevit v ceně jízdenky. Cena by mohla být podstatně vyšší než u vysokorychlostních vlaků. Záleželo by pak, kolik lidí by bylo ochotno zaplatit více za rychlejší a komfortnější jízdu vozidel maglev.[11][19][20][21]

4.3 Ekologie

Technologie maglev je na okolní ekosystém velmi šetrná. Instaluje se převážně nadzemní jízdní dráha. Nadzemní dráha pro Transrapid je umístěna na úzkých pilířích, a proto lze dále hospodářsky využívat půdu pod dráhou. Dráha také nebrání v přirozené migraci zvířete. V případě pozemní dráhy je zastavěný pozemek stále menší než je tomu třeba u ICE (viz. příloha D graf D. 3).

Velkou výhodou maglev je bezkontaktní technologie. Díky této technologii nemůže docházet prokluzu kol na kolejnici při vysokém stoupání, jak tomu může být u běžných vlaků, a proto není třeba v mnoha případech budovat drahé a ekosystém narušující tunely. Stoupací úhel u Transrapidu může být až 10° , oproti tomu u běžného vlaku jen 4° . Poloměr zatáček je také poměrně menší než u běžné železnice. Lze tedy snáze provést stavbu dráhy u již zastavěných prostor, jako je dálnice nebo železnice.

Druhou výhodou této technologie je téměř bezhlučný provoz. Transrapid i při rychlosti $400 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ bude tišší než nákladní automobil (viz. příloha D graf D. 4). Emise CO_2 u magneticky levitovaných dopravních systémů jsou minimální. V porovnání s letadlem, jak můžete vidět v grafu 4.3, jsou zanedbatelné. Reakce některých lidí, že magnetické pole z vozidel maglev může mít vliv na jejich zdraví, je přehnaná. Síla magnetického pole Transrapidu je např. pětikrát menší než je u barevného televizoru (viz. graf 4.4).[11][19][20][22]

Graf 4.3 Emise CO₂ u dopravních prostředků [20]

Graf 4.4 Síla magnetického pole [20]

4.4 Bezpečnost a efektivnost

Vozidla maglev, ale i vysokorychlostní vlaky jsou dnes již na takové úrovni, že jsou vysoce bezpečná. Bezpečnost zajišťuje vždy několik systémů zároveň. U magneticky levitovaných vozidel musí být vždy vybudována dvoudráha. Znamená to, že se na dráze nemohou srazit dva vlaky. Vykolejení vlaku Transrapid je též nemožné, jelikož podvozek obepíná jízdní dráhu. Vozidla jsou zabezpečena i pro případ selhání levitace.

Efektivnost vozidel maglev je pozoruhodná. Na středních a dlouhých tratích, asi do 800 km, jsou vozidla maglev schopna konkurovat letecké dopravě. V případě letecké dopravy musíte brát v úvahu zdržení při odbavování zavazadel a při cestě na letiště a z letiště. Maglev je schopen velmi rychlého zrychlení. Pro zrychlení z klidu na rychlost $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ potřebuje jen 5 km dráhy. Vysokorychlostní vlaky potřebují nejméně čtyřikrát delší dráhu. Maglev lze používat i pro cestování na krátké úseky (např. HSST). [20]

5 Prognóza magneticky levitovaných dopravních systémů

Převážná většina dopravních prostředků současnosti využívá jako palivo naftu či benzín. Ložiska nafty jsou ale stále menší a menší. Velká část světových automobilek se již zabývá alternativním pohonem, který by nahradil benzín a naftu. Řešení se vidí v elektrické energii. Na silnicích můžeme již vidět první generace elektromobilů nebo hybridních automobilů. Jsou ale většinou dražší než běžná auta. Ne všichni lidé budou mít peněžní prostředky pro získání takového automobilu. Výhodou železniční dopravy je její cenová dostupnost. Doprava by se tedy mohla v budoucnosti orientovat právě na železnice. Tento krok by pomohl nemalému počtu měst, která jsou v dopravní špičce přeplněna automobily. V Číně je železniční doprava tou nejdůležitější a nejlevnější. Čína dnes také buduje nejvíce nových kilometrů dráhy ročně. Její dopravní rozmach je opravdu unikátní. Málokterá země by jí dokázala konkurovat v takové rychlosti výstavby nových drah. Japonská doprava se ve velké části orientuje také na železnici, ale stále převládá doprava silniční. V Německu vévodí silniční doprava. Železnice jsou zde jen v menšině. Mohlo by tedy dojít k tomu, že by se východní státy (Čína, Japonsko, atd.) mohli stát železničními velmocemi. (viz. příloha E graf E. 1 a graf E. 2). [22]

5.1 Realizované projekty EMS a EDS

V dnešní době je jen málo uskutečněných projektů týkajících se magneticky levitovaných dopravních systémů. Vlaky Transrapid jsou komerčně využívány jen v čínském městě Šanghaj, kde trať spojuje město s mezinárodním letištěm Pudong. S vlaky Transrapid se také můžeme setkat na testovací dráze v německém Emslandu. Technologie EDS a s ní spojený vlak JR – Maglev MLU se dnes zatím nevyužívají pro přepravu osob. Experti vyvíjející tyto levitující rychlovlaky však tvrdí, že tato technologie je připravena pro komerční využití. Dnes se s těmito vlaky můžeme setkat jen na testovací dráze Yamanashi a Miyazaki v Japonsku. [7][17]

5.2 Plánované projekty EMS a EDS

V budoucnosti by mohlo uspět několik projektů u obou zmiňovaných technologií. V Číně by se mohli dočkat prodloužení tratě z Šanghaje na letiště Hong Qiao a v další fázi do města Hangzhou (obr. 5.1.)



Obr. 5.1 Plánované prodloužení tratě v Číně (nahore) a plánované tratě v USA (dole) [7]

V USA jsou ve formě jednání čtyři možné projekty Transrapidu. První projekt je spojení Las Vegas – Primm, druhý projekt by propojil mezinárodní letiště v Pittsburghu a Greensburgu, třetím projektem je Baltimore – Washington a posledním Atlanta – Hartsfield, mezinárodní letiště (obr. 5.1).

Dalším adeptem na vlaky Transrapid je Velká Británie. Velká Británie zatím nemá na svém území žádné vysokorychlostní vlaky a dosavadní železnice je plně vytížená. Uvažuje se zde o propojení Glasgow a Londýna (obr. 5.2)

Dalším evropským plánem, za kterým stojí Evropská unie, je PAN-evropský koridor: Berlín - Drážďany - Praha - Vídeň - Bratislava a Budapešť. Studie byly provedeny jak pro vozidla maglev tak i pro „kolejové“ vysokorychlostní vlaky.

Zajímavým projektem je i Swissmetro. Jednalo by se o vozidlo maglev, které by jelo v nízkotlakém tunelu. Jelikož by tam byl nízký odpor vzduchu, vozidlo by mohlo dosahovat rychlostí až $1000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

V Perském zálivu by mohl Transrapid jezdit ve Spojených arabských emirátech, kde by propojil dvě mezinárodní letiště, a to mezi městy Dubaj a Abu Dhabi. Dále by se zde mohlo uskutečnit propojení dvou států, a to Bahrajnu a Kataru (obr. 5.2).



Obr. 5.2 Plánovaná trať ve Velké Británii (nahore) a plánované tratě v Perském zálivu (dole) [7]

Pravděpodobným projektem EDS je spojení japonských měst Tokio a Osaka. Součástí této tratě by měli být i zkušební dráha v Yamanashi. Tento projekt by měl být zrealizovaný do roku 2027.

Nejzajímavějším a nejrozsáhlejší projektem by mohlo být propojení Evropy a Asie. Do roku 2020 by měla spojit Peking a Londýn vysokorychlostní železnice na principu maglev. Jednalo by se o vzdálenost více jak 8000 km, která by se pokořila za dobu dvou dnů a to průměrnou rychlostí $300 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Experti tvrdí, že toto propojení Evropy a Asie je nutností, ať už by se jednalo o klasické vysokorychlostní vlaky nebo vozidla maglev.

Hlavním důvodem by byl přechod z ropy, jejíž množství klesá a během 200 let budou její ložiska zcela vyčerpaná, na elektrickou energii. Dnes je spojení Evropy a Asie uskutečněno pomocí lodní a letecké dopravy využívající právě ropu. V případě zavedení kontinentální železniční dopravy by byl možný přechod na elektrickou trakci. Předběžná trasa projektu je vyobrazena na obr. 5.3. Možností je také rozdělení tratě v Petrohradě do dvou směrů. První úsek by vedl z Petrohradu přes Polsko do Londýna a druhý úsek by směřoval z Petrohradu na Kyjev a dále přes jižní Evropu do Španělska. V případě této rozdvojký by se vysokorychlostní tratě mohla dočkat i Česká republika. Čína je odhodlaná tento projekt uskutečnit. Tomuto faktu nasvědčuje i dosavadní rozmach čínských železnic. Není zatím jisté, jaké technologie by se mělo využívat. Čína preferuje technologii maglev, ale experti si nedovedou představit funkci této technologie v klimaticky a povrchově extrémních podmínkách jako jsou na Sibiři, kudy by měla zmiňovaná trať vést. Takže se nevyklučuje, že by se tímto koridorem nakonec mohly pohybovat klasické vysokorychlostní vlaky. [7][17][23]



Obr. 5.3 Plánovaný projekt Peking – Londýn (převzato z [23])

5.3 Budoucnost technologie maglev

Technologie maglev je v dnešní době spíše vzácností. Investoři odstupují od projektů maglev a obrací se na klasické vysokorychlostní vlaky. Je tomu tak díky vysokým nákladům na výstavbu dráhy. Dnešní světoví inženýři se zabývají tím, jak by se tyto náklady daly minimalizovat. Zkoušejí se nové metody a technologie. Věřím, že se nakonec najde způsob,

jak z technologie maglev udělat efektivní a levný dopravní systém. Lidstvo se potýkalo s takovými problémy již nesčíslněkrát, a vždy dokázalo najít řešení. Vždy je to jen otázka pokroku doby a každým rokem se svět setkává s novými technickými vymoženostmi, o kterých by se mu před několika lety ani nesnilo. Vizí budoucnosti je Magtube. Vlak by se pohyboval ve válcovém tubusu, kde by byl odčerpáný vzduch. Snížil by se tedy odpor vzduchu a vozidla by zde mohla dosahovat rychlostí až $1000 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. V dráze i v podvozku vozidla by byla zabudovaná Halbachova soustava permanentních magnetů, a tudíž by byl dodávaný výkon potřebný na levitaci nulový. K pohonu by se využíval taktéž lineární synchronní motor. Myslím si tedy, že tomu nebude dlouho trvat a tyto vlaky budou brázdit v našem okolí. Je jen otázkou za jak dlouho a jaké technologie budou využívat. [6]

6 Závěr

Bakalářská práce byla zaměřena na zhodnocení a prognózy magneticky levitovaných dopravních systémů.

V první kapitole jsme se seznámili s několika druhy magnetické levitace. Řekli jsme si, které z těchto technologií se již využívají u vozidel maglev, a které budou nebo nebudou hrát významnou roli v budoucnosti.

V druhé kapitole jsme si řekli, jaké možnosti mají tyto technologie u dopravních systémů. Seznámili jsme se s různými druhy superexpresů, a kde se s nimi můžeme setkat. Zjistili jsme, jakých technologií a principů využívají a detailně jsme si je popsali.

V třetí kapitole jsme provedli výpočet stejnosměrného levitačního elektromagnetu, který se využívá k dosažení levitace u superexpresů typu Transrapid. Výpočet je spíše orientační, protože se nevycházelo z přesných parametrů Transrapidu. Pro přesnější výpočet by se muselo počítat i s dalšími parametry. Návrh by se musel vyšetřit i z hlediska nasycení magnetického obvodu. Nicméně se dospělo k souboru závislostí sil elektromagnetu pro různé proudové hustoty s různou vzduchovou mezerou. S tímto výsledkem se může dále pracovat při návrhu regulačního systému pro stabilní regulaci. Křivky by musely být popsány vhodnými diferenciálními rovnicemi, s kterými by regulační systém pracoval. Regulace se musí navrhnout s vhodným tlumením, aby byla levitace opravdu stabilní.

Ve čtvrté kapitole je zhodnocení všech dosavadních dopravních systémů z hlediska technologií, ekonomiky, ekologie, bezpečnosti a efektivnosti. Převážný důraz se klade na superexpresy Transrapid, jelikož tento druh dopravního systému se již využívá v komerční praxi. Setkáváme se zde s daty, která nám porovnávají mezi sebou běžné vlaky, vysokorychlostní vlaky a magneticky levitované superexpresy.

V páté kapitole jsou uvedeny prognózy magneticky levitovaných dopravních systémů. Setkáme se zde s realizovanými projekty i s projekty plánovanými. Jsou zde sepsány subjektivní postoje k této problematice a výhled do budoucnosti maglevu.

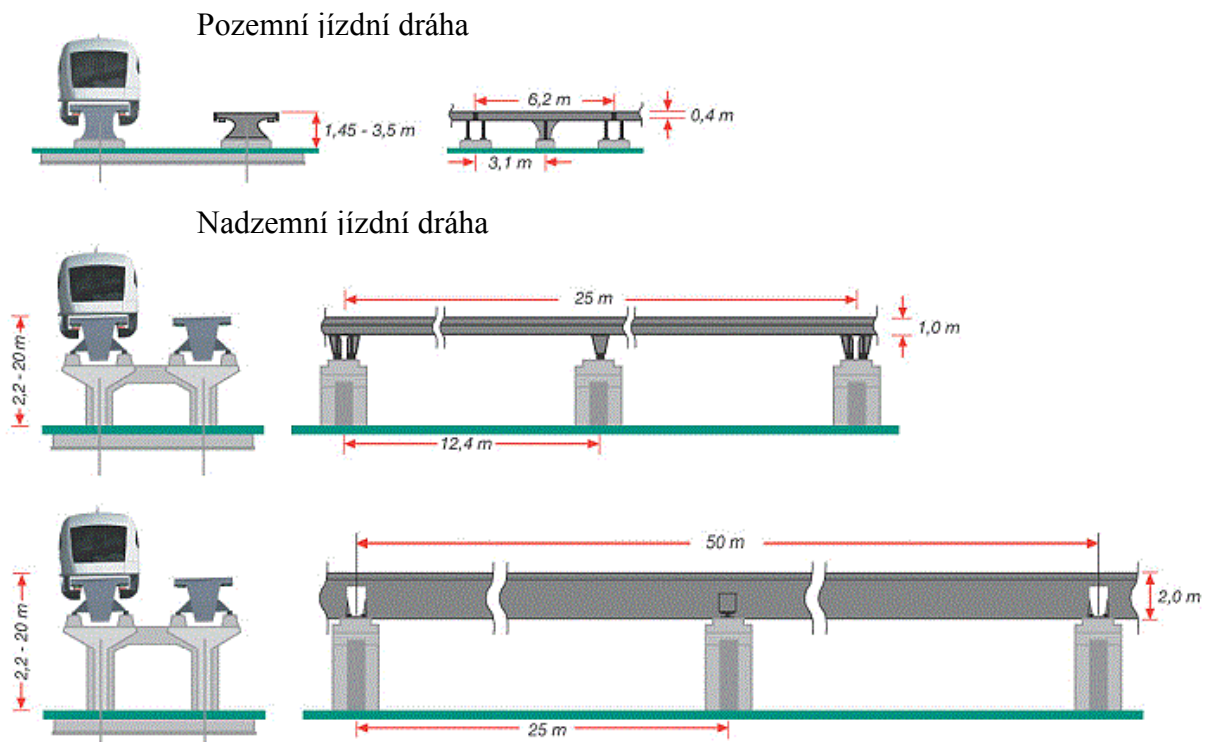
Použitá literatura

- [1] WEISS, J. a J. ROMAN. Magnetická levitace [online]. 2008 [cit. 2012-01-21].
Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2007-2008/Zima07/proc/levitron.pdf>
- [2] MAYER, Daniel. Magnetická levitace a její využití [online]. 2003 [cit. 2011-12-22].
Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf
- [3] MAYER, Daniel. Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? [online]. 2003
[cit. 2012-01-23]. Dostupné z: www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf
- [4] A-Z Encyklopedie [online]. 2003 [cit. 2012-01-23].
Dostupné z: http://www.az-encyklopedie.info/p/32058_Permeabilita/
- [5] MAYER, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1).
[online]. 2007 [cit. 2011-12-22].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36434.pdf>
- [6] MAYER, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (2
dokončení). [online]. 2008 [cit. 2011-12-22].
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36502.pdfdf/36434.pdf>
- [7] Transrapid International [online]. 2006 [cit. 2012-02-02]. Dostupné z:
<http://www.transrapid.de/>
- [8] VYSOKORYCHLOSTNÍ TRATĚ: VRT BERLIN – HAMBURG. 2011. Dostupné z:
http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2010zs/plocek_berlin-hamburg-text.pdf
- [9] Kryostat. Leccos: Kryostat. [online]. 1999 [cit. 2012-01-26]. Dostupné z:
<http://leccos.com/index.php/clanky/kryostat>
- [10] *Ekonom: Magnety na vedlejší koleji* [online]. 2008 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z:
<http://ekonom.ihned.cz/c1-23910120-magnety-na-vedlejsi-kolejiryostat>
- [11] *Dopravní stránky: Transrapid* [online]. 2012 [cit. 2012-02-24]. Dostupné z:
<http://ekonom.ihned.cz/c1-23910120-magnety-na-vedlejsi-kolejiryostat>
- [12] *Maglev* [online]. 2010 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z:
http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/maglev_frame_E.html
- [13] *Yamanashi Prefecture* [online]. 2011 [cit. 2012-02-29]. Dostupné z:
<http://www.pref.yamanashi.jp/linear-kt/linear-fc/linear-history.html>
- [14] JR–Maglev. In: *Wikipedia* [online]. 2011 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z:
<http://en.wikipedia.org/wiki/JR%E2%80%93Maglev>
- [15] Šinkansen. In: *Wikipedia* [online]. 1999 [cit. 2012-03-02]. Dostupné z:
<http://cs.wikipedia.org/wiki/%C5%A0inkansen80%93Maglev>

- [16] *JAPONSKÉ SYSTÉMY MAGLEV* [online]. 2009 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2009zs/novotny-maglev_jap_1-text.pdf
- [17] *Magnetbahnforum* [online]. 1998 [cit. 2012-03-03]. Dostupné z: http://magnetbahnforum.de/index.php?en_photos01009zs/novotny-maglev_jap_1-text.pdf
- [18] *Magnetic Levitation (Maglev) Technologies* [online]. 2000 [cit. 2012-03-05]. Dostupné z: http://www.jrtr.net/jrtr25/pdf/f58_tec1.pdf
- [19] *Die Magnetschwebbahn Transrapidogies* [online]. 2006 [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: http://www.transrapid.de/pdf/tri_d.pdfpdf
- [20] *Maglev System Transrapid* [online]. 2008 [cit. 2012-03-06]. Dostupné z: http://www.thyssenkrupp.com/documents/transrapid/TRI_Flug_Hoehe_e_5_021.pdf
- [21] KÖHLER. THYSSENKRUPP TRANSRAPID GMBH. *Soubor zaslaný e-mailem*. 2010.
- [22] BINDER, A. a O. KÖRNER. INSTITUT FÜR ELEKTRISCHE ENERGIEWANDLUNG. *Was treibt den ICE 3 und den Transrapid*. 2011. Dostupné z: <http://www.ew.tu-darmstadt.de/media/ew/vortrge/ice3.pdf>
- [23] ČESKÁ TELEVIZE. *Milénium: Do roku 2020 spojí Peking a Londýn vysokorychlostní železnice*. 2010. Dostupné z: <http://www.ceskatelevize.cz/porady/10159875412-milenium/210411058030804/video/?page=34>
- [24] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus*. České Budějovice: KOPP, 2012. ISBN 978-80-7232-424-8.
- [25] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. Praha: BEN - technická literatura, 2005. ISBN 80-7300164-0.
- [26] CIGÁNEK, Ladislav a Miroslav BAUER. *Elektrické stroje a přístroje*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1955.

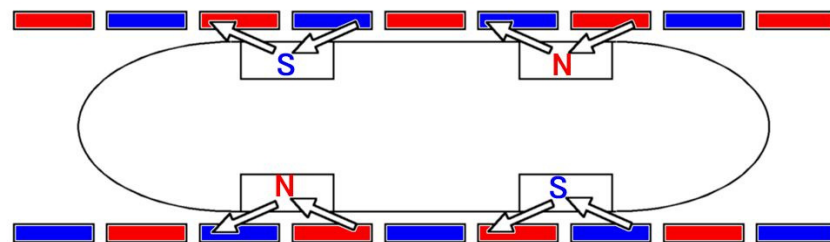
Přílohy

Příloha A – Drážní těleso Transrapidu

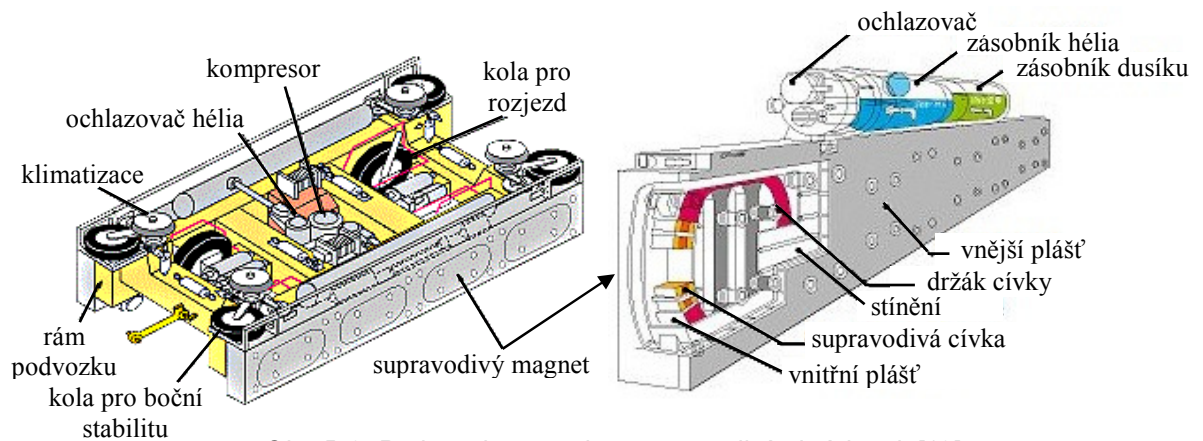


Obr. A.1 Pozemní a nadzemní jízdní dráha Transrapidu [11]

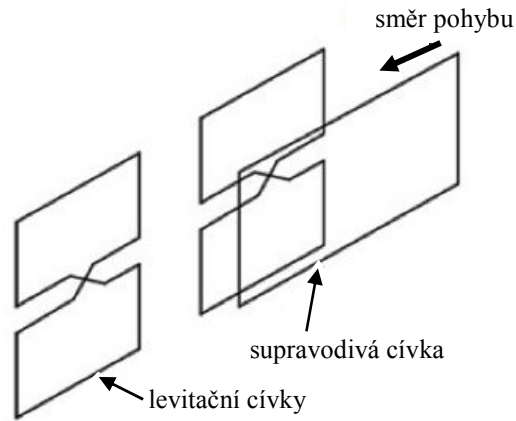
Příloha B – Elektrodynamický systém a pohon JR-Maglev MLX01-901



Obr. B.1 Pohon vozidla za pomoci LSM [14]

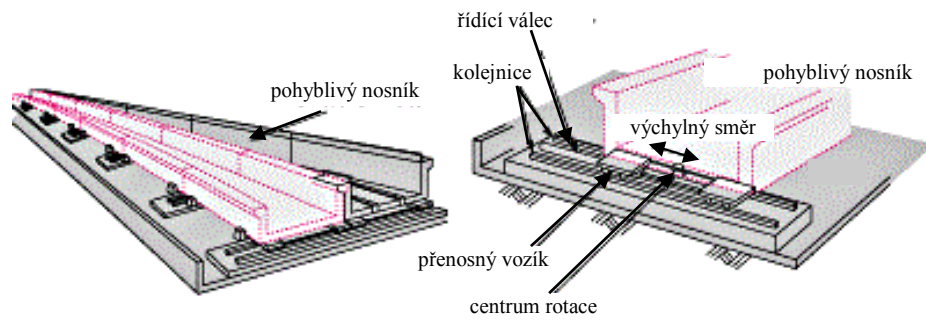


Obr. B.2 Podvozek a panel se supravodivými cívkami [12]

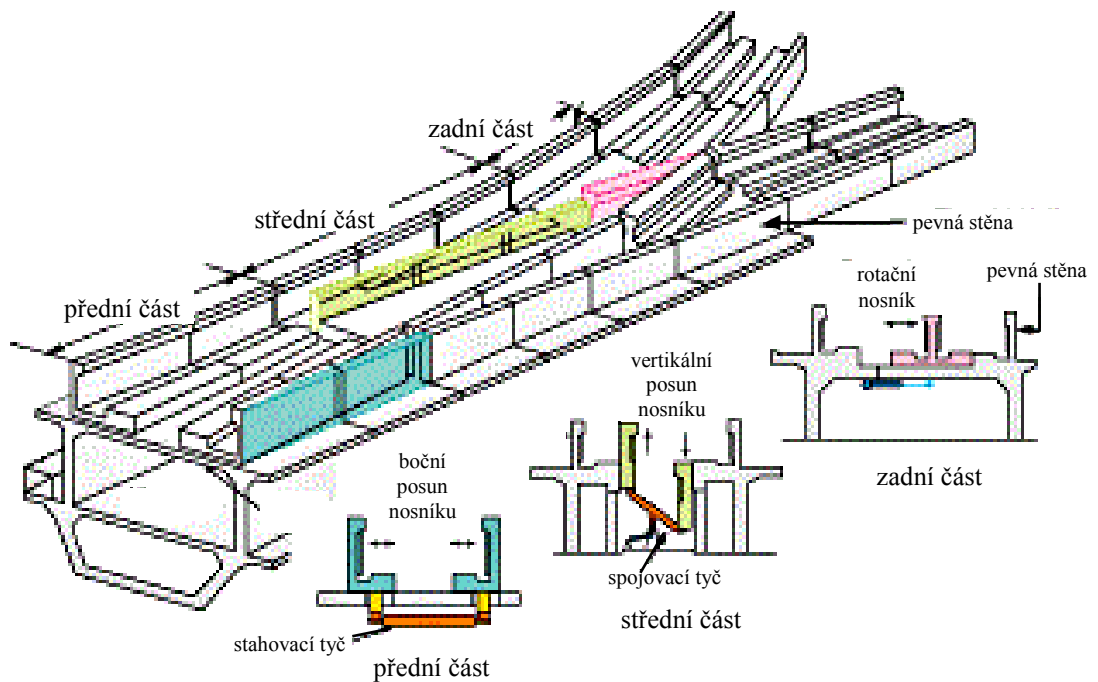


Obr. B.3 Zapojení horní a dolní levitační cívky [6]

Příloha C – Drážní těleso pro JR-Maglev MLX01-901

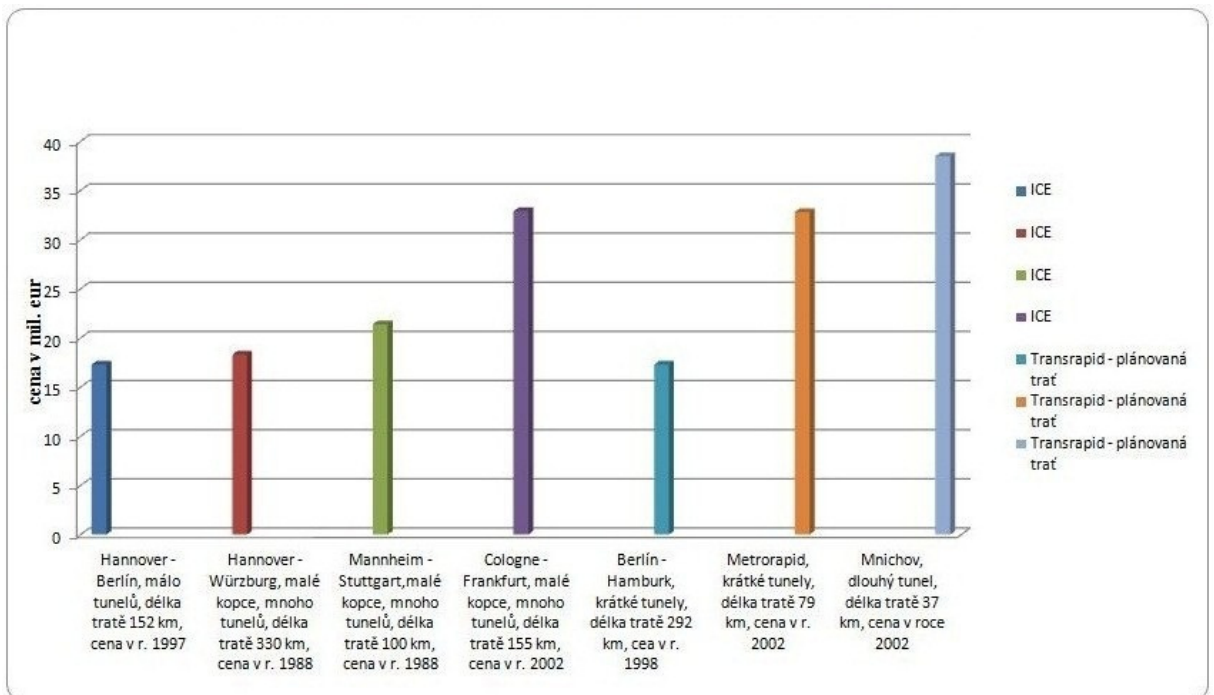


Obr. C.1 Vysokorychlostní výhybka [12]

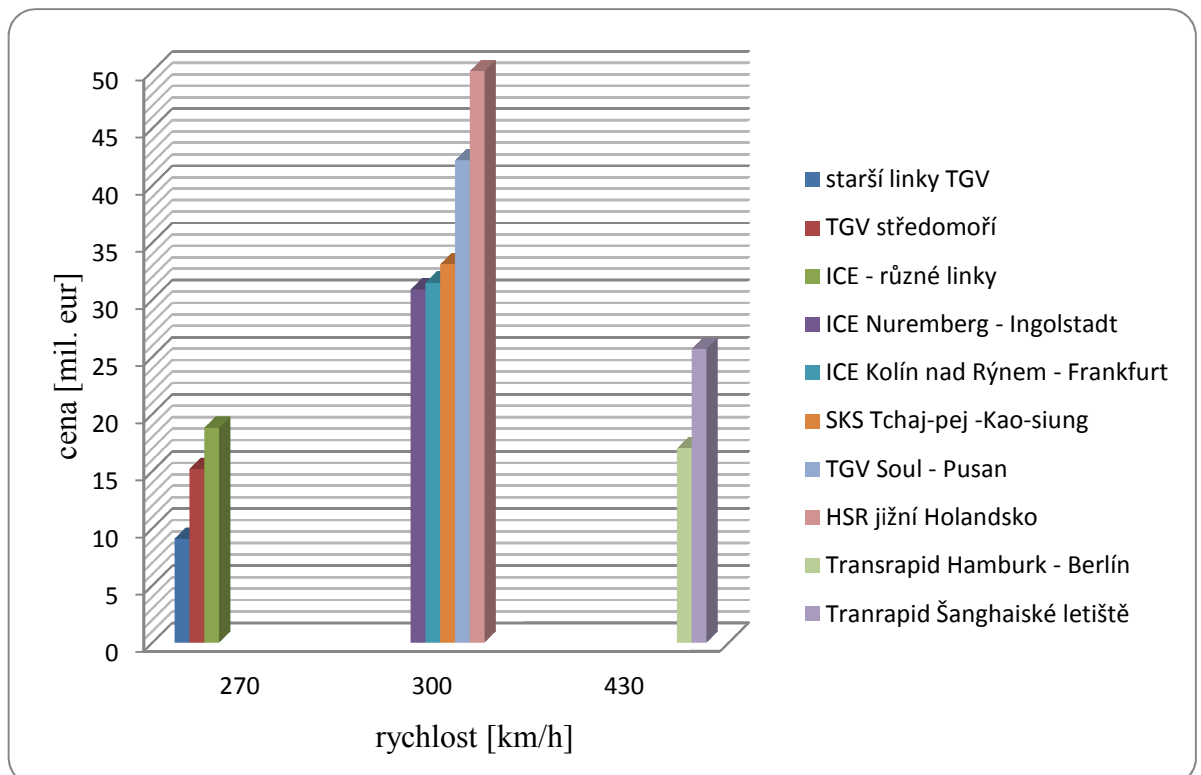


Obr. C.2 Nízkorychlostní výhybka [12]

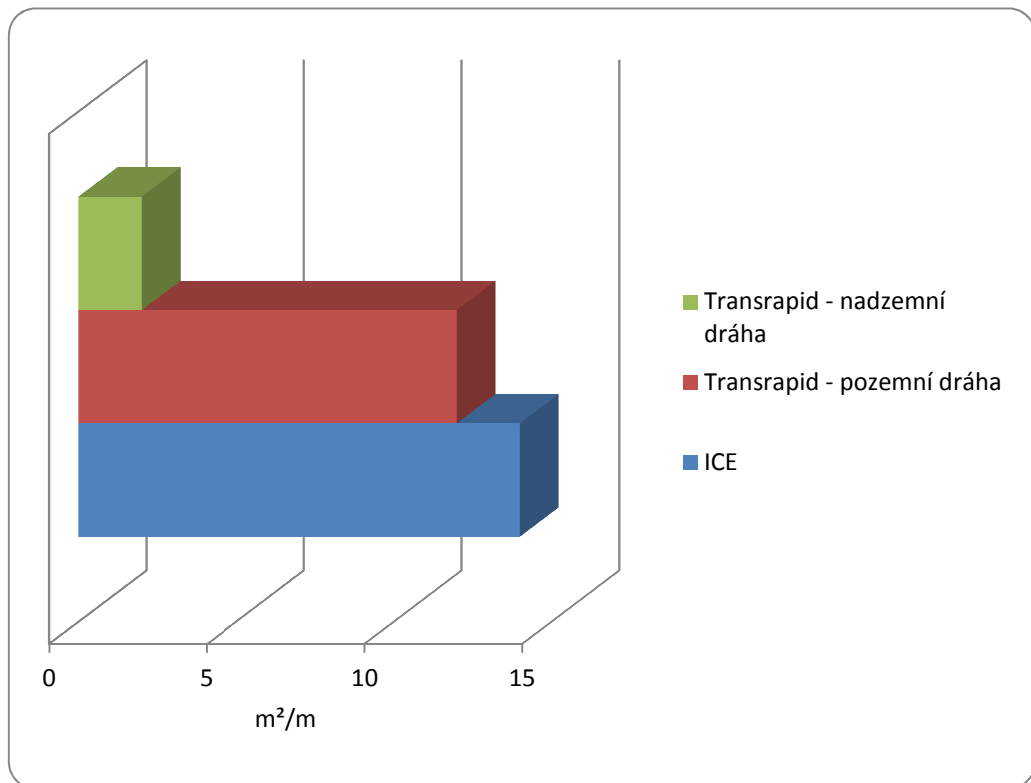
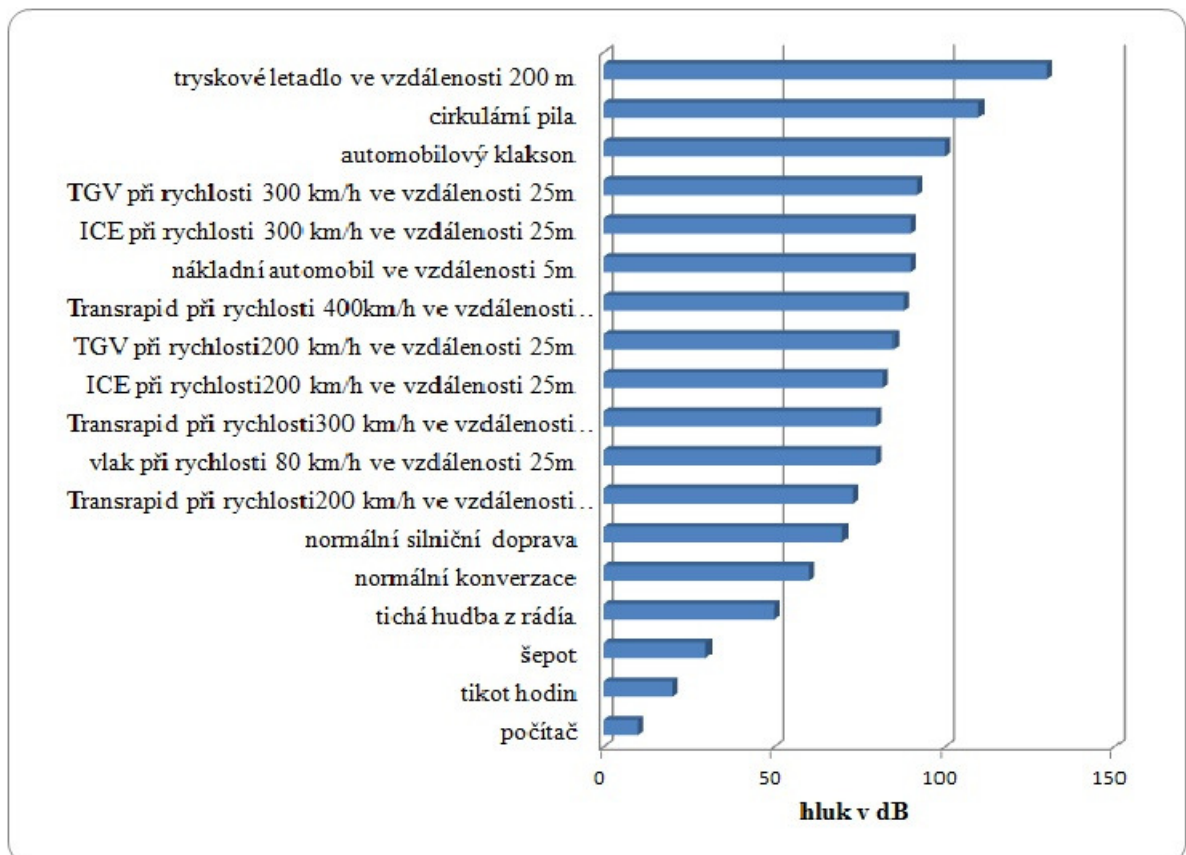
Příloha D – Zhodnocení dopravních levitovaných systémů



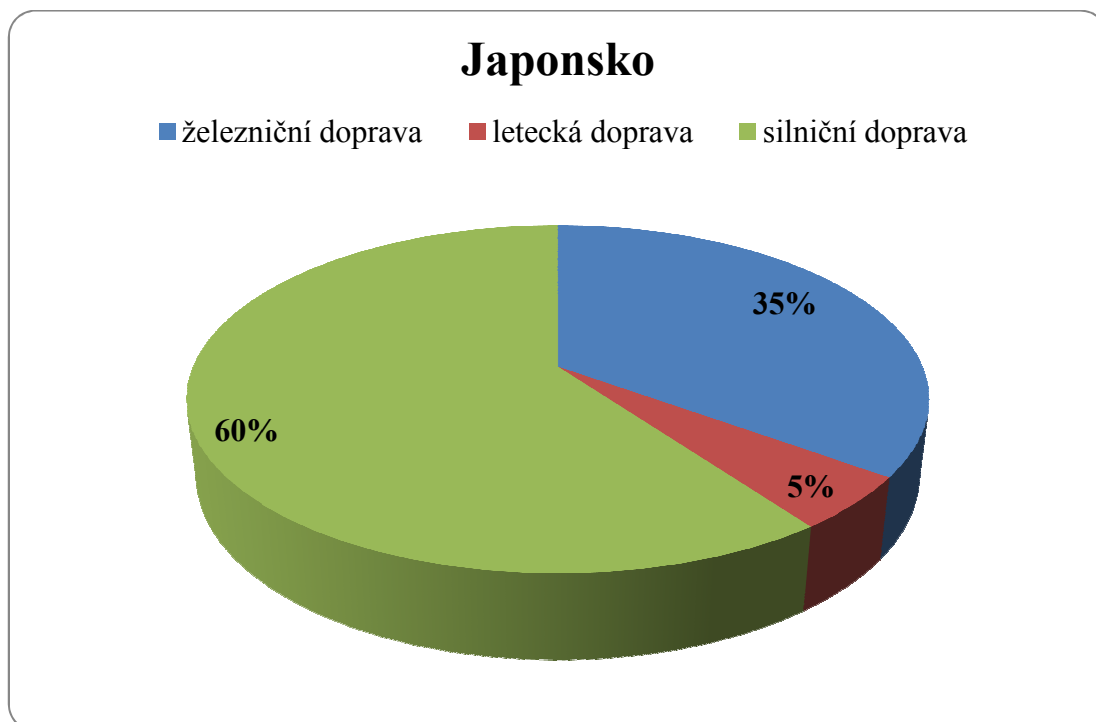
Graf D.1 Porovnání nákladů na výstavbu dvoukolejové dráhy (Transrapid X ICE) [20]



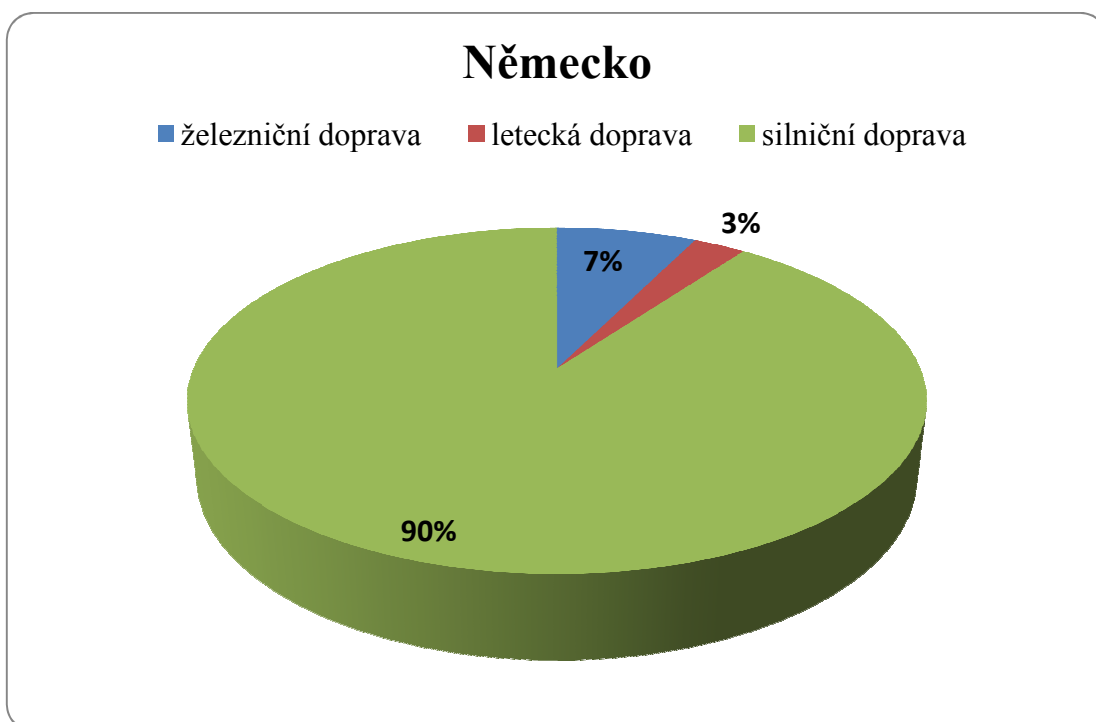
Graf D.2 Cena výstavby km dvoukolejné tratě (realizované i nerealizované) [20]

Graf D.3 Velikost zastavěné plochy v m² na metr dráhy [20]

Graf D.4 Hluk v db [20]

Příloha E – Zhodnocení dopravních levitovaných systémů

Graf E.1 Rozložení dopravy v Japonsku [22]



Graf E.2 Rozložení dopravy v Německu [22]

Příloha F – Výpočet levitačního elektromagnetu**Hodnoty, které jsou zadávané, jsou v zelené buňce****Předpoklady:**

hmotnost vozidla o třech sekcích $m =$ **169600,000 kg**

hmotnost vozidla o jedné sekci $m =$ 56533,333 kg

Předpokládejme, že každá sekce vozidla Transrapid má v podvozku zabudováno 12 elektromagnetů (tj. na každé straně 6)

hmotnost, které připadá na jeden elektromagnet $m_2 =$ 4711,111 kg

Aby došlo k levitaci, musí platit podmínka: $F_g = F_m$

Výpočet gravitační síly F_g :

$$F_g = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2}$$

gravitační konstanta $G =$ $6,670 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$

hmotnost Země $m_1 =$ $5,973 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

poloměr Země $r =$ 6378000,000 m

gravitační síla $F_g =$ 46144,112 N

Jelikož bude třeba elektromagnet regulovat musíme mu přidat nějakou rezervu (v tomto případě přidám rezervu 30 % síly = $1,3 \cdot F_g$)

síla elektromagnetu $F_m =$ 59987,345 N

Určím si velikost vzduchové mezery u stabilizačních elektromagnetů, která bude konstantní

vzduchová mezera $\delta_{konst} =$ **0,010 m**

Musím si zvolit také rozměry elektromagnetu.

Rozměry elektromagnetu:

šířka $x =$ **0,350 m**

tloušťka $y =$ **0,500 m**

průřez $S_1 = S_2 = S_\delta =$ 0,175 m²

další rozměry:

$S_3 = a \cdot y$ $S_3 =$ 0,100 m²

průřez $S_3 = S_4 = S_5 = S_{\delta \text{ konst.}} =$ 0,100 m²

Potřebujeme zjistit magnetickou indukci ve vzduchové mezeře B_δ

$$F_m = \frac{B_\delta^2 \cdot S_\delta}{\mu_0}$$

permeabilita vakua $\mu_0 =$ $1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

magnetická indukce ve vzduchový mezeře B_δ

$$B_\delta = \sqrt{\frac{F_m \cdot \mu_0}{S_\delta}} \quad B_\delta = 0,656 \text{ T}$$

$$B_1 = B_2 = B_\delta$$

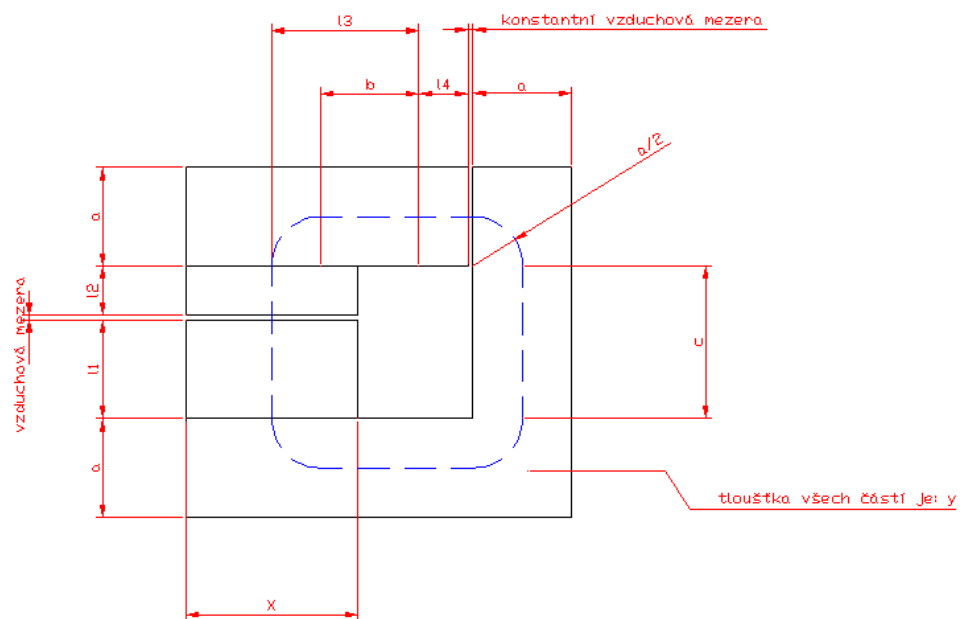
Magnetická intenzita ve vzduchové mezeře H_δ

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \quad H_\delta = 522282,969 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

Z magnetizační křivky (viz. Aplikovaný magnetismus, Mayer, D. str. 270 [24], Elektrické stroje a přístroje, Cigánek, Bauer str. 623 [26])

dynamové plechy		litá ocel	
H [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]	B [T]	H [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]	B [T]
0,000	0,000	100,000	0,200
500,000	1,000	150,000	0,500
800,000	1,200	300,000	1,000
1400,000	1,350	500,000	1,200
4200,000	1,600	1000,000	1,400
14000,000	1,800	7000,000	1,700
31000,000	2,050	20000,000	1,900

$H_1 = 350,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ $B_1 = 0,656 \text{ T}$ $H_3 = 190,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ $B_3 = 0,656 \text{ T}$
 $H_1 = H_2 = H_4$ $H_5 = 150,000 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ $B_5 = 0,500 \text{ T}$



Obr. F.1 Magnetický obvod

Vzduchová mezera, která je mezi levitačním elektromagnetem a statorem, se bude měnit, a proto provedeme výpočet pro více vzduchových mezer.

Střední délka částí jádra a vzduchových mezer

$$l_1 = 0,200 \text{ m}$$

$$l_2 = 0,100 \text{ m}$$

$$l_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} + b$$

$$a = 0,200 \text{ m}$$

$$b = 0,200 \text{ m}$$

$$l_3 = 0,514 \text{ m}$$

$$l_4 = 0,100 \text{ m}$$

$$\delta_{konst.} = 0,010 \text{ m}$$

Vzorce využity při výpočtu:

$$c = l_1 + l_2 + \delta$$

$$l_5 = 3 \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{4} + l_4 + \delta_{konst.} + b + c$$

$$U_m = \sum H \cdot l$$

$$U_m = H_1 \cdot l_1 + H_2 \cdot l_2 + H_3 \cdot l_3 + H_4 \cdot l_4 + H_5 \cdot l_5 + H_\delta \cdot \delta_{konst.} + H_\delta \cdot \delta$$

$$\mu = \frac{B}{H}$$

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S}$$

$$R_{m\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 \cdot S}$$

$$R_{mc} = R_{m1} + R_{m2} + R_{m3} + R_{m4} + R_{m5} + R_{m\delta_{konst.}} + R_{m\delta}$$

Tab. F.2 Pomocné výpočty pro střední délky a střední délky

pomocné výpočty pro střední délku			střední délky						
a [m]	b [m]	c [m]	vzduchová mezera δ [m]	l_1 [m]	l_2 [m]	l_3 [m]	l_4 [m]	δ konst. [m]	l_5 [m]
0,200	0,200	0,300	0,000	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,081
0,200	0,200	0,301	0,001	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,082
0,200	0,200	0,302	0,002	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,083
0,200	0,200	0,303	0,003	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,084
0,200	0,200	0,304	0,004	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,085
0,200	0,200	0,305	0,005	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,086
0,200	0,200	0,306	0,006	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,087
0,200	0,200	0,307	0,007	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,088
0,200	0,200	0,308	0,008	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,089
0,200	0,200	0,309	0,009	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,090
0,200	0,200	0,310	0,010	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,091
0,200	0,200	0,311	0,011	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,092
0,200	0,200	0,312	0,012	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,093
0,200	0,200	0,313	0,013	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,094
0,200	0,200	0,314	0,014	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,095
0,200	0,200	0,315	0,015	0,200	0,100	0,514	0,100	0,010	1,096

Tab. F.3 Permeability

permeability					
μ_1 [H·m ⁻¹]	μ_2 [H·m ⁻¹]	μ_3 [H·m ⁻¹]	μ_4 [H·m ⁻¹]	μ_5 [H·m ⁻¹]	μ_0 [H·m ⁻¹]
$1,875 \cdot 10^{-3}$	$1,875 \cdot 10^{-3}$	$3,454 \cdot 10^{-3}$	$1,875 \cdot 10^{-3}$	$3,333 \cdot 10^{-3}$	$1,257 \cdot 10^{-6}$

Tab. F.4 Průběžné reluktance

průběžná reluktance					
R_{m1} [1/H]	R_{m1} [1/H]	R_{m1} [1/H]	R_{m1} [1/H]	R_{m1} [1/H]	$R_{m\delta konst.}$ [1/H]
609,459	304,729	1488,454	533,276	3243,717	79577,472

Tab F.5 Průběžná reluktance pro vzduchovou mezeru a celková reluktance

vzduchová mezera δ [m]	Průběžná reluktance pro vzduchovou mezeru	Celková reluktance
	$R_{m\delta}$ [1/H]	R_m [1/H]
0,000	0,000	85757,107
0,001	4547,284	90307,391
0,002	9094,568	94857,675
0,003	13641,852	99407,959
0,004	18189,136	103958,243
0,005	22736,420	108508,527
0,006	27283,705	113058,812
0,007	31830,989	117609,096
0,008	36378,273	122159,380
0,009	40925,557	126709,664
0,010	45472,841	131259,948
0,011	50020,125	135810,232
0,012	54567,409	140360,516
0,013	59114,693	144910,800
0,014	63661,977	149461,084
0,015	68209,261	154011,368

$$U_m = N \cdot I_b$$

$$I_b = \frac{U_m}{N}$$

Počet závitů N a průřez vodiče d je pro všechny proudové hustoty konstantní

$$\text{proudová hustota } J = \frac{I_b}{S}$$

S - průřez vodiče bude konstantní

N - počet závitů bude konstantní

$$\text{průměr vodiče } d =$$

0,005 m

$$\text{průřez vodiče } S =$$

$1,963 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$

$$\text{počet závitů } N =$$

250,000

Tab. F.6 Proudové hustoty a budící proudy

proudová hustota J [A/m ²]	proud I_b [A]	
3000000,000	58,905	Ib1
2800000,000	54,978	Ib2
2600000,000	51,051	Ib3
2400000,000	47,124	Ib4
2200000,000	43,197	Ib5

$$F_m = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} = \frac{N^2 \cdot I_b^2}{R_m^2 \cdot S \cdot \mu_0}$$

Tab. F.7 Síla elektromagnetu pro proudovou hustotu $J = 3000000$ A/m²

Proudová hustota $J = 3000000,000$ A/m ²			
vzduchová mezera δ [m]	I_b [A]	N	F_m [N]
0,000	58,905	250,000	134089,308
0,001	58,905	250,000	120917,122
0,002	58,905	250,000	109594,672
0,003	58,905	250,000	99791,161
0,004	58,905	250,000	91246,566
0,005	58,905	250,000	83754,212
0,006	58,905	250,000	77148,158
0,007	58,905	250,000	71293,933
0,008	58,905	250,000	66081,631
0,009	58,905	250,000	61420,722
0,010	58,905	250,000	57236,088
0,011	58,905	250,000	53464,980
0,012	58,905	250,000	50054,656
0,013	58,905	250,000	46960,519
0,014	58,905	250,000	44144,656
0,015	58,905	250,000	41574,672

Tab. F.8 Síla elektromagnetu pro proudovou hustotu $J = 2800000 \text{ A/m}^2$

Proudová hustota $J=2800000,000 \text{ A/m}^2$			
vzduchová mezera δ [m]	I_b [A]	N	F_m [N]
0,000	54,978	250,000	116806,686
0,001	54,978	250,000	105332,249
0,002	54,978	250,000	95469,136
0,003	54,978	250,000	86929,190
0,004	54,978	250,000	79485,898
0,005	54,978	250,000	72959,224
0,006	54,978	250,000	67204,618
0,007	54,978	250,000	62104,937
0,008	54,978	250,000	57564,443
0,009	54,978	250,000	53504,273
0,010	54,978	250,000	49858,992
0,011	54,978	250,000	46573,938
0,012	54,978	250,000	43603,167
0,013	54,978	250,000	40907,830
0,014	54,978	250,000	38454,900
0,015	54,978	250,000	36216,159

Tab. F.9 Síla elektromagnetu pro proudovou hustotu $J = 2600000 \text{ A/m}^2$

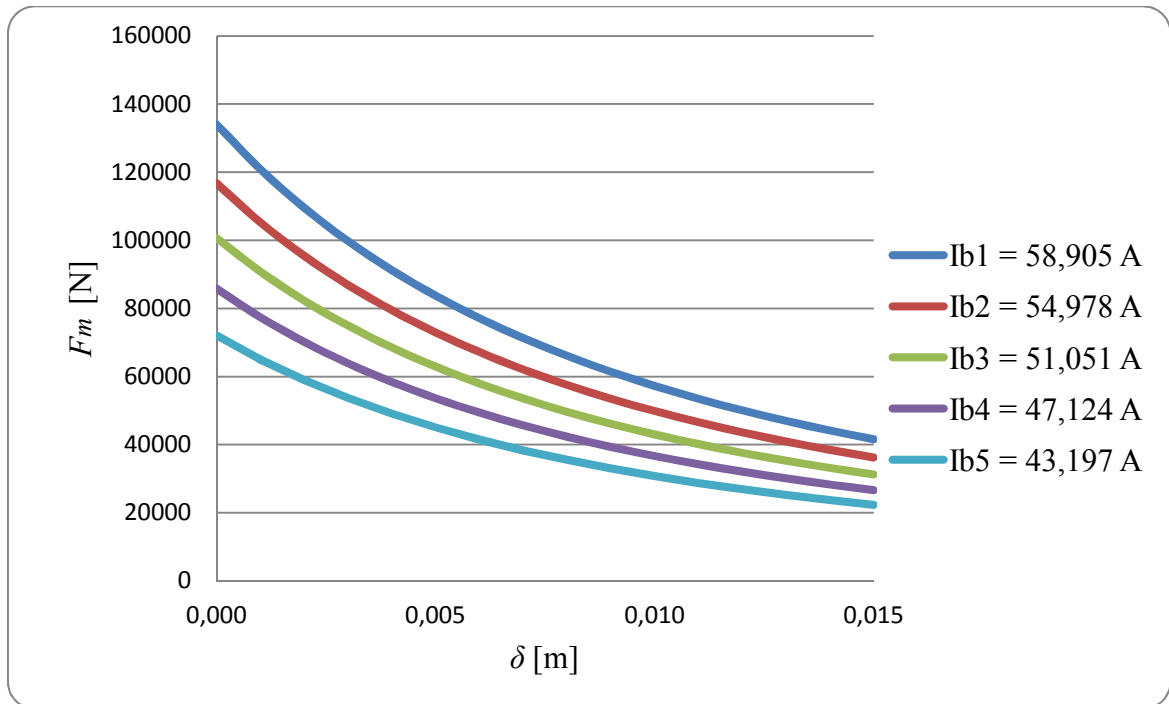
Proudová hustota $J=2600000,000 \text{ A/m}^2$			
vzduchová mezera δ [m]	I_b [A]	N	F_m [N]
0,000	51,051	250,000	100715,969
0,001	51,051	250,000	90822,194
0,002	51,051	250,000	82317,776
0,003	51,051	250,000	74954,250
0,004	51,051	250,000	68536,310
0,005	51,051	250,000	62908,719
0,006	51,051	250,000	57946,839
0,007	51,051	250,000	53549,665
0,008	51,051	250,000	49634,648
0,009	51,051	250,000	46133,787
0,010	51,051	250,000	42990,661
0,011	51,051	250,000	40158,141
0,012	51,051	250,000	37596,608
0,013	51,051	250,000	35272,567
0,014	51,051	250,000	33157,542
0,015	51,051	250,000	31227,198

Tab. F.10 Síla elektromagnetu pro proudovou hustotu $J = 2400000 \text{ A/m}^2$

Proudová hustota $J=2400000,000 \text{ A/m}^2$			
vzduchová mezera δ [m]	I_b [A]	N	F_m [N]
0,000	47,124	250,000	85817,157
0,001	47,124	250,000	77386,958
0,002	47,124	250,000	70140,590
0,003	47,124	250,000	63866,343
0,004	47,124	250,000	58397,802
0,005	47,124	250,000	53602,695
0,006	47,124	250,000	49374,821
0,007	47,124	250,000	45628,117
0,008	47,124	250,000	42292,244
0,009	47,124	250,000	39309,262
0,010	47,124	250,000	36631,096
0,011	47,124	250,000	34217,587
0,012	47,124	250,000	32034,980
0,013	47,124	250,000	30054,732
0,014	47,124	250,000	28252,580
0,015	47,124	250,000	26607,790

Tab. F.11 Síla elektromagnetu pro proudovou hustotu $J = 2200000 \text{ A/m}^2$

Proudová hustota $J=2200000,000 \text{ A/m}^2$			
vzduchová mezera δ [m]	I_b [A]	N	F_m [N]
0,000	43,197	250,000	72110,250
0,001	43,197	250,000	65026,541
0,002	43,197	250,000	58937,579
0,003	43,197	250,000	53665,469
0,004	43,197	250,000	49070,376
0,005	43,197	250,000	45041,154
0,006	43,197	250,000	41488,565
0,007	43,197	250,000	38340,293
0,008	43,197	250,000	35537,233
0,009	43,197	250,000	33030,699
0,010	43,197	250,000	30780,296
0,011	43,197	250,000	28752,278
0,012	43,197	250,000	26918,282
0,013	43,197	250,000	25254,323
0,014	43,197	250,000	23740,015
0,015	43,197	250,000	22357,935



Graf F.1 Soubor závislostí sil elektromagnetu pro různé budící proudy při proměnné vzduchové mezeře

Příloha G – Výpočet levitačního elektromagnetu

Výpočet je přiložen na CD.