

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Lineární motory**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

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

Jméno a příjmení: **Markéta KYDLÍČKOVÁ**  
Osobní číslo: **E13B0370P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**  
Název tématu: **Lineární motory**  
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 :

Předmětem bakalářské práce je popis základních druhů lineárních motorů, jejich rozdělení podle principu funkce a jejich použití v praxi. Dále práce bude obsahovat základní popis fyzikální principů jednotlivých druhů magnetických levitací a jejich praktické využití.

1. Provedte literární řešení lineárních motorů.
2. Seznamte se s principy magnetické levitace využívané v průmyslu.
3. Uveďte základní vlastnosti, principy a parametry daných strojů.
4. Zhodnoťte vývoj a využití magnetické levitace v blízké budoucnosti.



A handwritten signature in blue ink, appearing to be 'M. Kydlíčková', written over a faint circular stamp.

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


1. Toliyat, A. H., Kliman, B. G.: Handbook of electric motors, CRC Press, 2004, ISBN: 100-8247-4105-6
2. Boldea, I.: Linear Motion Electromagnetic Devices, Taylor & Francis, 2001, ISBN: 9789056997021
3. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze [www.ieee.org](http://www.ieee.org)

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Pavel Světlík**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Konzultant bakalářské práce: **Ing. Jiří Zíka**  
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky  
Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.

děkan



  
Doc. Ing. Vlastimil Skočil, CSc.

vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je řešerše v oblasti lineárních motorů a jejich použití a dále také jednotlivých druhů magnetické levitace.

## **Klíčová slova**

Lineární motory, elektromagnetická levitace, elektrodynamická levitace, magnetická levitace, Transrapid, JR – Maglev, Inductrack

## **Abstract**

The present thesis is a research in the field of linear motors and their use, and also different types of magnetic levitation.

## **Key words**

Linear motors, electromagnetic levitation, electrodynamic levitation, magnetic levitation  
Transrapid, JR - Maglev, Inductrack

## Prohlášení

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 8.6.2015

Markéta Kydlíčková



# Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>OBSAH.....</b>   | <b>8</b>  |
| <b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....</b>                                | <b>10</b> |
| <b>ÚVOD.....</b>  | <b>11</b> |
| <b>LINEÁRNÍ MOTORY.....</b>   | <b>12</b> |
| <b>1 HISTORIE LINEÁRNÍCH MOTORŮ.....</b>                            | <b>13</b> |
| <b>2 PRINCIP LINEÁRNÍCH MOTORŮ.....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>3 ROZDĚLENÍ LINEÁRNÍCH MOTORŮ.....</b>                           | <b>15</b> |
| 3.1 MECHANICKÉ LINEÁRNÍ MOTORY .....                                | 16        |
| 3.2 HYDRAULICKÉ LINEÁRNÍ POHONY .....                               | 16        |
| 3.3 ELEKTRICKÉ LINEÁRNÍ POHONY .....                                | 16        |
| 3.3.1 Piezoelektrické lineární motory .....                         | 17        |
| 3.3.2 Přímé a nepřímé lineární motory.....                          | 17        |
| 3.3.3 Oscilační lineární motory.....                                | 18        |
| 3.3.4 Planární lineární motory.....                                 | 18        |
| 3.4 PNEUMATICKÉ LINEÁRNÍ POHONY – JEDNOČINNÉ, DVOJČINNÉ VÁLCE ..... | 18        |
| 3.4.1 Jednočinné válce.....   | 18        |
| 3.4.2 Dvojčinné válce.....  | 19        |
| <b>4 ROZDĚLENÍ LINEÁRNÍCH MOTORŮ DLE PRINCIPU FUNKCE.....</b>       | <b>19</b> |
| 4.1 SYNCHRONNÍ LINEÁRNÍ MOTORY .....                                | 19        |
| 4.1.1 Reluktanční lineární motory .....                             | 19        |
| 4.1.2 Synchronní lineární motory s permanentními magnety .....      | 20        |
| 4.2 KROKOVÉ LINEÁRNÍ MOTORY .....                                   | 22        |
| 4.3 ASYNCHRONNÍ LINEÁRNÍ MOTORY LAM .....                           | 23        |
| 4.3.1 Základní vztahy.....  | 23        |
| 4.3.2 Podélný jev LAM.....  | 24        |
| 4.3.3 Důsledky podélného jevu.....                                  | 24        |
| 4.3.4 Příčný jev LAM.....   | 25        |
| 4.3.5 Důsledky příčného jevu .....                                  | 25        |
| 4.4 STEJNOSMĚRNÉ LINEÁRNÍ MOTORY .....                              | 25        |
| 4.5 HYBRIDNÍ LINEÁRNÍ MOTOR.....                                    | 26        |
| <b>5 MAGNETICKÁ LEVITACE.....</b>                                   | <b>27</b> |
| 5.1 HISTORIE MAGNETICKÉ LEVITACE .....                              | 27        |
| 5.1.1 Historie, vývoj a výroba EMS.....                             | 27        |
| 5.1.2 Historie, vývoj a výroba EDS.....                             | 28        |
| 5.2 DRUHY MAGNETICKÉ LEVITACE .....                                 | 29        |
| 5.2.1 Levitace s permanentními magnety .....                        | 29        |
| Halbachova konfigurace PM .....                                     | 29        |
| 5.2.2 Levitace s použitím diamagnetika .....                        | 30        |
| 5.2.3 Transformační levitace.....                                   | 31        |
| 5.2.4 Elektrodynamická levitace EDS.....                            | 31        |
| 5.2.5 Elektromagnetická levitace EMS.....                           | 32        |
| <b>6 MAGNETICKÁ LEVITACE V DOPRAVĚ .....</b>                        | <b>33</b> |
| 6.1 HSST (HIGH SPEED SURFACE TRAIN).....                            | 33        |
| 6.2 HSST – LINIMO .....   | 34        |



|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 6.3      | JR – MAGLEV .....                                     | 35        |
| 6.4      | JR – MAGLEV TOKYO – NAGOYA – ÓSAKA .....              | 36        |
| 6.5      | TRANSRAPID .....                                      | 37        |
| <b>7</b> | <b>BUDOUCNOST MAGNETICKY LEVITOVANÝCH VLAKŮ .....</b> | <b>39</b> |
| 7.1      | USA .....   | 39        |
| 7.2      | EVROPA .....  | 39        |
| 7.2.1    | <i>Východní a střední Evropa</i> .....                | 40        |
| 7.2.2    | <i>Švýcarsko</i> .....                                | 40        |
| 7.2.3    | <i>Velká Británie</i> .....                           | 41        |
|          | <b>ZÁVĚR</b> .....                                    | <b>42</b> |
|          | <b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....  | <b>44</b> |

## Seznam symbolů a zkratk

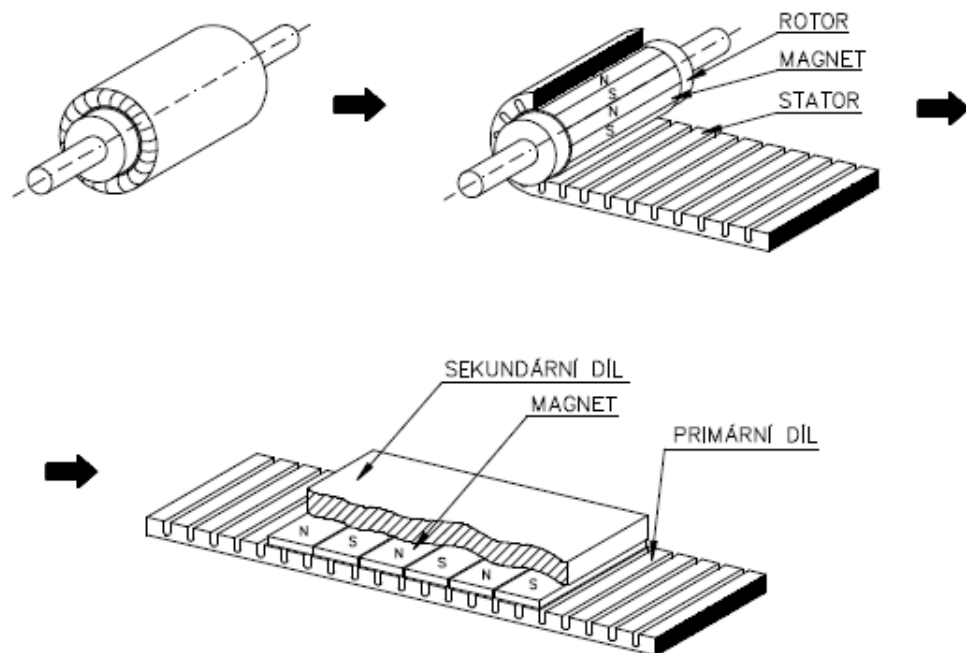
|                    |  |
|--------------------|--|
| MAGLEV .....       | Magnetická levitace                                  |
| $\mu_r$ .....      | relativní permeabilita                               |
| $\mu_0$ .....      | relativní permeabilita vakua                         |
| PM .....           | Permanentní magnet                                   |
| HSST .....         | High Speed Surface Transport                         |
| ICE .....          | Intercity Express                                    |
| SRN .....          | Spolková republika Německo                           |
| MBB .....          | Messerschmitt-Bölkow-Blohm                           |
| LAM .....          | Lineární asynchronní motor                           |
| EDS .....          | Elektrodynamická levitace                            |
| EMS .....          | Elektromagnetická levitace                           |
| $B_r$ .....        | Remanentní indukce                                   |
| $F_g$ .....        | gravitační síla                                      |
| $f_x$ .....        | složka síly x  |
| $f_y$ .....        | složka síly y  |
| $v_s$ .....        | synchronní rychlost                                  |
| $F_{max}$ .....    | maximální síla                                       |
| $s_k$ .....        | kritický skluz                                       |
| $\Delta P_m$ ..... | mechanické ztráty                                    |
| $P_{out}$ .....    | výkon dodávaný zátěži                                |
| $F$ .....          | tahová síla motoru                                   |
| $P_m$ .....        | mechanický výkon                                     |
| $\tau$ .....       | pólová roteč   |
| $P_{elm}$ .....    | elektromagnetický výkon přenášený vzduchovou mezerou |
| JR .....           | Japan Railways                                       |

## Úvod

Tato bakalářská práce se týká lineárních motorů a magnetické levitace. Je rozdělena do dvou částí. V první části je provedena rešerše v oblasti lineárních motorů. Jsou v ní rozebrány jednotlivé druhy lineárních motorů a jejich využití. Druhá část je zaměřena na druhy magnetické levitace a její využití v různých aplikacích, zejména v dopravě.

## Lineární motory

Lineární pohony jsou takové motory, které konají lineární pohyb. Tyto stroje transformují elektrickou energii přímo na mechanickou energii posuvu. Jejich konstrukce je známá stejně tak dlouho jako konstrukce rotačních strojů. Lineární motor můžeme získat z rotačního motoru tím, že na obvodu uděláme řez vinutím motoru a rozvineme jej do roviny, což je znázorněno na obr 1. Je-li vinutí napájeno, pohybují se magnetické póly v rovině jedním směrem, např. zleva doprava. Namísto točivého pole tedy vznikne pole posuvné. Dnes se jeví využití lineárních motorů jako velmi perspektivní jak u obráběcích strojů, tak i v dopravě. U obráběcích strojů dosáhneme využitím lineárního motoru vysoké dynamiky, minimálního opotřebení mechanismu, což prodlužuje jeho životnost. Dále dojde ke zvýšení přesnosti oproti rotačnímu pohybu. V dopravě se tyto motory používají zejména u magneticky levitovaných vlaků. [1], [15]



Obr. 1 Vznik lineárního motoru z rotačního[18]

## 1 Historie lineárních motorů

Prvním vynálezcem principu indukčního lineárního motoru byl Angličan Charles Wheatstone v roce 1841. Jeho návrh, ale nebylo možné ještě zkonstruovat pro velké množství nepřesností a chyb. S prvním reálným lineárním motorem, který byl provozu schopný, přišel německý vědec Alfred Zelen roku 1905, který si jej nechal zároveň i patentovat. První skutečně plně funkční lineární motor byl vyvinut v roce 1935 německým fyzikem Hermannem Kemperem a byl následně využitý v leteckých katapultech na válečných lodích během druhé světové války. Další rozmach ve využití lineárních motorů byl zejména v průmyslových aplikacích, avšak ten pravý zřetelný počátek a rozvoj lineárních motorů byl v posledních 70. až 80. letech minulého století. Dalším významným datem v historii lineárních motorů je rok 1980. V tomto roce anglický inženýr Hugh Peter Kelly přišel s návrhem lineárního motoru s permanentními magnety. V dnešní době dosáhl tento typ pohonů významného postavení v mnoha odvětvích průmyslu. [3]



Obr. 2 Sir Charles Wheatstone

## 2 Princip lineárních motorů

Lineární motor pracuje na indukčním principu. Můžeme si jej představit jako běžný rotační motor rozvinutý do roviny. Téměř každý rotační motor existuje i v lineární podobě. Státorem je u lineárního motoru označována primární část, kterou ve většině tvoří svazek složený s feromagnetických plechů a vinutí, jenž je uložené v jeho drážkách. Rotor je část sekundární. Jeho konstrukce se liší pro různé typy motorů. U synchronního motoru se rotor skládá z permanentních magnetů, které jsou vyrobeny ze vzácných zemin. Vyrábějí se zejména z Nd-Fe-B, které se nalepují na podložku z tvrdého materiálu, např. oceli. V případě asynchronního motoru je rotorem klec nakrátko, která se může ukládat do drážek feromagnetického svazku z plechů, nebo je připevňována na ocelovou podložku. Pokud je do primární části přivedený proud vznikne mezi oběma částmi magnetické pole a tímto jevem dochází k pohybu jezdece. Podle přivedené velikosti proudu ovlivňujeme rychlost, kterou se bude motor pohybovat.

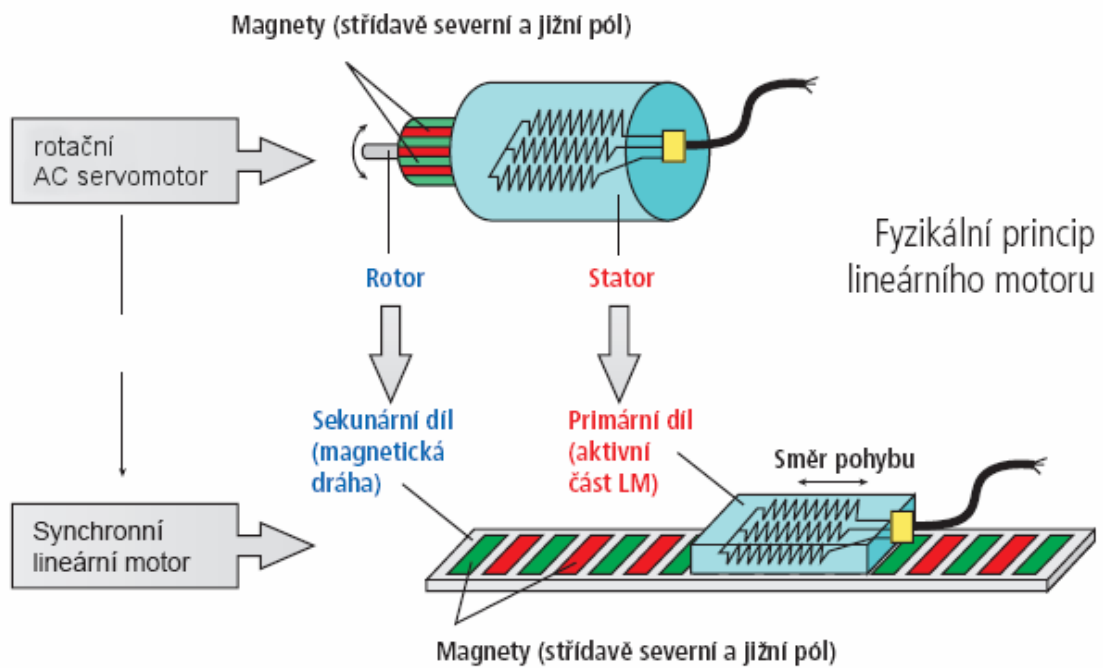
Z konstrukčního uspořádání stroje poznáme, která část motoru se bude pohybovat. Ve většině případů se ale pohybuje primární část, nebo-li jezdec po dráze, která je tvořena sekundární částí. Problémem tohoto zapojení je nutnost pohyblivého napájení, snímačů polohy, nebo i přívod chladicí tekutiny. Konstrukce rozlišuje několik druhů motorů.[8], [7], [14]. Rozdělením se zabývám v další kapitole.

Nedílnou součástí motoru musí být také odměřovací systém polohy, na který jsou kladeny větší požadavky než u elektronicky komutovaných rotačních motorů. Inkrementální odměřovací systém pracuje buď na fotoelektrickém, nebo magnetickém principu. Pro první případ je použitý systém vypálených rysek (optické mřížky s roztečí obvykle  $5\mu\text{m}$ ), který při pohybu primární části přerušuje světelný (laserový) paprsek. Přerušovaný paprsek je následně převeden na elektrický signál, dále je ještě upravovaný elektronickým tvarovacím obvodem.

Odměřovací systém může pracovat buď na odraz, nebo může reagovat na průchod světelného paprsku. V druhém případě u magnetického principu je tomu obdobně. Použita je však nosná páska s tenkou záznamovou vrstvou. Namagnetovaná „mřížka“ má rozteč obvykle několik  $\mu\text{m}$  (2, 5, 10). Snímací hlava odměřovacího systému převádí záznam opět na elektrické pulzy, jejichž počet podává informaci o docílené poloze.

Výstupní signály novějších konstrukcí odměřovacích systémů mívají tvar sinusový, kosinusový a jejich opačných funkcí. Navíc mohou být ještě interpolovány (zjemňovány až 1024 krát), čímž se docílí až  $10^5$  inkrementů na 1 mm posuvu. Signál snímače polohy je využíván nejen k určení polohy primárního dílu, ale rovněž k vyhodnocení rychlosti,

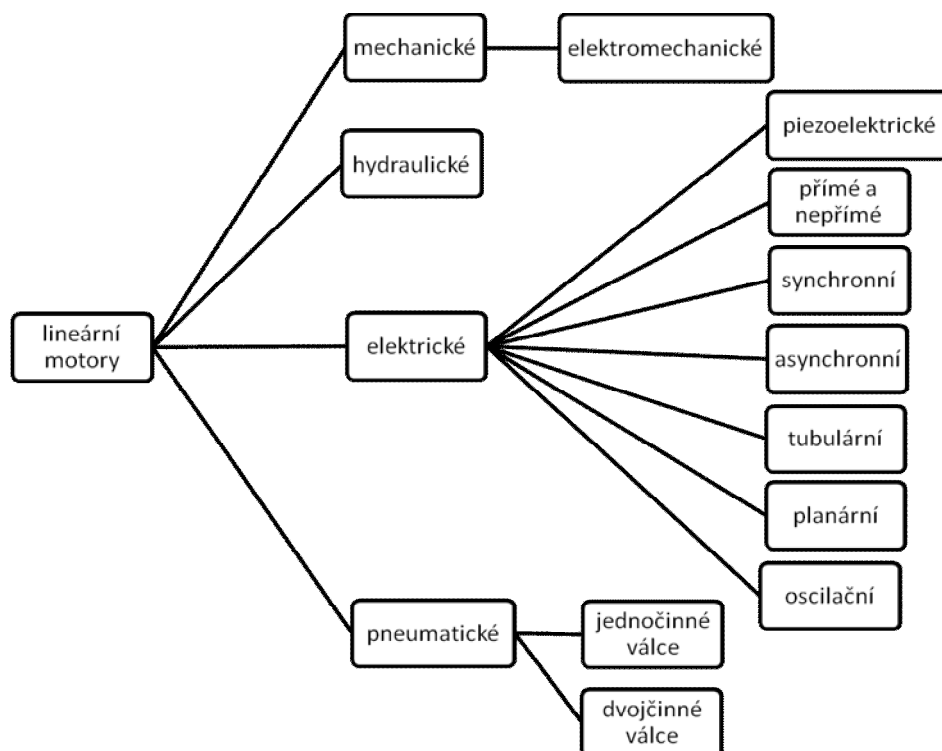
zrychlení a pro řízení střídače. [5]



Obr. 3 Fyzikální princip lineárního motoru [18]

### 3 Rozdělení lineárních motorů

Rozdělení lineárních motorů je znázorněno na následujícím grafu



### 3.1 Mechanické lineární motory

Mechanické lineární pohony přeměňují točivý pohyb na posuvný. K této přeměně využívají některý z jednodušších mechanismů

- šrouby a matice
- kolo a osa
- vačka

První mechanismus je pomocí šroubů a matic. Při otáčení matice se posouvá šroub, tomuto mechanismu se také říká šroubový mechanismus. Druhý mechanismus je kolo a osa. Když se otáčí kolo (kladka) řetěz (lano, pás...) se postupně navíjí, nebo odvíjí. Třetím mechanismem je vačkový pohon. Tyto pohony ovšem poskytují dosti omezený rozsah pohybu. Vačka se otáčí a její excentrický tvar tlačí na další součást. Některé z mechanických lineárních motorů působí pouze tahem např. řetězový nebo pásový pohon. Jiné zase působí pouze tlakem, to jsou vačkové pohony. Pneumatické a hydraulické válce nebo šroubové pohony mohou být navrženy tak, aby působily tlakem i tahem najednou.[11]

### 3.2 Hydraulické lineární pohony

Hydraulické pohony jsou obvykle realizovány jako dutý válec s vloženým pístem. Tlak působící na píst vyvozuje sílu, která může pohybovat nějakým tělesem. Vzhledem k tomu, že kapaliny jsou téměř nestlačitelné, může hydraulický pohon dosahovat poměrně přesného posunutí pístu. Znáмым příkladem ručně ovládaného hydraulického pohonu je hydraulický zvedák. Většinou se však termín hydraulický pohon vztahuje na zařízení ovládané hydraulickým čerpadlem.[6]

### 3.3 Elektrické lineární pohony

Mezi lineární elektrické pohony patří:

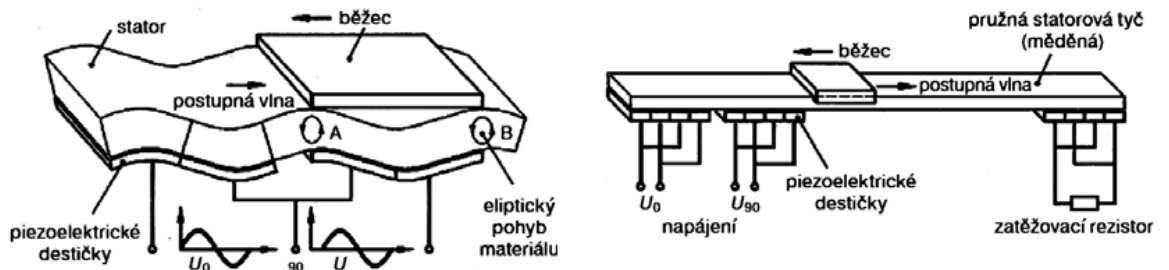
- piezoelektrické lineární motory
- přímé a nepřímé lineární motory
- synchronní lineární motory
- asynchronní lineární motory
- tubulární lineární motory
- planární lineární motory
- oscilační lineární motory



V této kapitole se zmíním jen o vybraných pohonech z tohoto seznamu, protože o některých se budu detailněji zabývat v následující kapitole 4 Rozdělení lineárních motorů dle principu funkce.

### 3.3.1 Piezoelektrické lineární motory

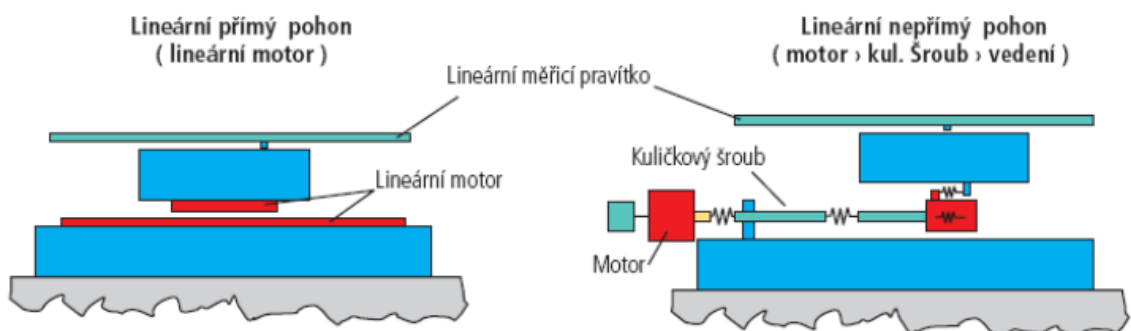
Princip piezomotoru objevil Pierre Curie v roce 1880. Piezoelektrický jev je vlastnost některých materiálů, která spočívá v tom, že materiál pod elektrickým napětím mění rozměry. Velmi vysoká napětí odpovídají malým změnám rozměrů, pomocí piezoelektrického pohonu je tedy možné dosáhnout velmi přesného polohování, ale také jen velmi krátkého rozsahu pohybu. Kromě toho piezoelektrické materiály vykazují hysterezi, což znamená, že je obtížné dosáhnout přesnosti, je-li třeba pohyb opakovat. Piezoelektrické motory se používají především pro malé pohony. Mezi jejich výhody patří velká hustota výkonu (W/kg), dále jejich kompaktnost a tvarová adaptibilita. Nevýhodou je jejich velká teplotní závislost. [11]



Obr. 4 Princip lineárního piezomotoru [11]

### 3.3.2 Přímé a nepřímé lineární motory

Přímý lineární motor je takový, který umožňuje se pohybovat přímočaře bez zprostředkujícího převodu. Nepřímý lineární motor je v podstatě elektrický motor, protože vykonává pouze rotační pohyb, který musíme převádět na pohyb lineární pomocí kuličkového šroubu. Kuličkový šroub má však mechanická omezení např. je to délka pohybu a také mechanické opotřebování šroubu. [9], [12]



Obr. 5 porovnání přímého a nepřímého lineárního motoru [12]

### 3.3.3 Oscilační lineární motory

Oscilační lineární motory jsou speciální pohony. Skládají se z lineárního oscilátoru, který nese permanentní magnety. Tyto magnety jsou uloženy ve statoru, který je opatřen i elektromagnety. Elektromagnet je napájen a ve spolupráci s magnety permanentními vytváří elektrickou sílu, která pohybuje oscilátorem v lineárním směru.[9]

### 3.3.4 Planární lineární motory

Tento motor je jedním z krokových motorů. Má integrovaný vnitřní systém odměřování polohy jezdce. V tomto motoru nedochází ke styku jezdce a mechanické dráhy, jezdec se pohybuje ve vzduchovém polštáři. Tyto motory se používají zejména při výrobě čipových karet, plošných spojů a u kamerových systémů. V aplikacích se většinou montují vzhůru nohama.[9]

## 3.4 Pneumatické lineární pohony – jednočinné, dvojčinné válce

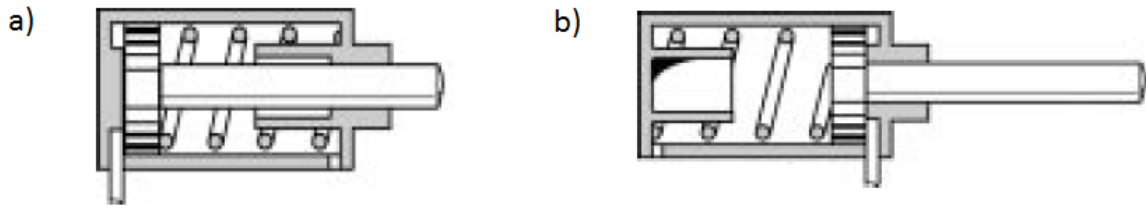
Základem pneumatických lineárních pohonů jsou pneumatické válce. Různé konstrukce pneumatických válců vycházejí z dvou základních principů, kterými jsou jednočinné válce a dvojčinné válce.

### 3.4.1 Jednočinné válce

Jednočinné válce se charakterizují tím, že stlačený vzduch je přiváděn jen z jedné strany tudíž síla, která je vyvinuta tlakem vzduchu, působí na plochu pístu pouze v jednom směru. Vytvořenou sílu můžeme využít buď jako tlačnou nebo jako tažnou, podle toho jak je pneumatický válec zkonstruován.

Tlačnou sílu využívá konstrukce jednočinného válce se zasunutou pístnicí v klidové poloze naopak tažnou sílu využívá konstrukce jednočinného válce s vysunutou pístnicí v klidové poloze. V obou případech provedení, je využita k návratu pístnice pružina.

Nevýhodou jednočinných válců je skutečnost, že proti síle vytvořené tlakem vzduchu působí síla opačná, která je vytvořena pružinou. Využitelná síla je tedy menší než síla vytvořená stlačeným vzduchem. [10]



Obr. 6 jednočinný pneumatický válec a) se zasunutou pístnicí b) s vysunutou pístnicí

### 3.4.2 Dvojčinné válce

Oproti jednočinným válcům je stlačený vzduch do dvojčinného válce přiváděn z obou stran. Vytvořená síla působí v obou směrech pohybu pístu podle toho, z jaké strany je vzduch přiváděn. Tato konstrukce umožňuje dvojčinnému válci, aby konal práci v přímém i zpětném běhu.

Výhodou dvojčinných válců je skutečnost, že nepotřebují zpětnou pružinu, která by vrátila pístnici do výchozí polohy. [10]



Obr. 7 Dvojčinný pneumatický válec

## 4 Rozdělení lineárních motorů dle principu funkce

V následující části 4 jsou rozebrány jednotlivé motory podle jejich principu funkce.

### 4.1 Synchronní lineární motory

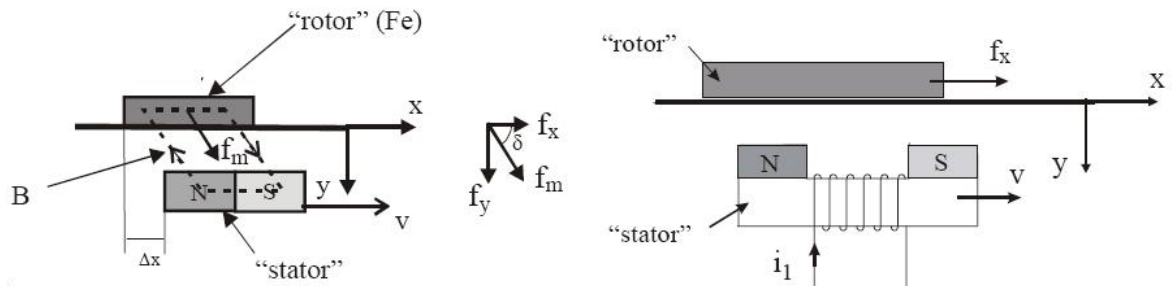
Podle principu funkce můžeme synchronní lineární motory rozdělit na reluktanční lineární motory a synchronní lineární motory s permanentními magnety.

#### 4.1.1 Reluktanční lineární motory

Reluktanční lineární motory se skládají z primární a sekundární části. Primární částí se rozumí zdroj magnetického pole, které se pohybuje. Někdy bývá tato část označována jako stator. Sekundární část je tvořena z feromagnetického materiálu a někdy se označuje jako rotor.

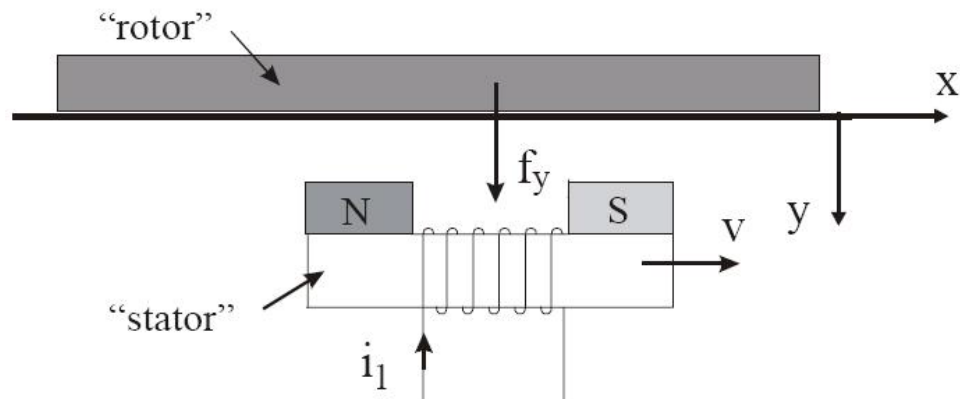
Princip funkce motoru spočívá v tom, že sekundární část je přitahována magnetickým

polem, které je buzeno primární částí. Pokud zdroj tohoto magnetického pole stojí, sekundární část se srovná do pozice nad primární část tak, aby na sekundární část působila pouze složka síly  $f_y$ . Začne-li se primární část a tudíž i její magnetické pole pohybovat ve směru osy  $x$ , objeví se i složka síly  $f_x$ , která také působí na sekundární část. Po vektorovém součtu vznikne výslednice sil  $f_m$ , která způsobuje pohyb sekundární části ve stejném směru pohybu magnetického pole. Tímto způsobem vlastně sekundární část sleduje pohyb primární části. Tento princip je naznačen na obr.8 [7],



Obr. 8 Princip funkce lineárního reluktančního motoru [7]

Aby motor fungoval tímto způsobem, nesmí být sekundární část příliš dlouhá. V tomto případě by došlo k vyrušení sil ve směru osy  $x$ . Na sekundární část by působila pouze složka síly  $f_y$ . Sekundární část by tedy stála a nesledovala by pohybující se magnetické pole, princip je naznačen na obr. 9



Obr. 9 Reluktanční motor s dlouhou sekundární částí [7]

#### 4.1.2 Synchronní lineární motory s permanentními magnety

Tento typ motorů pracuje na principu synchronního stroje s hladkým rotorem. Primární část je tvořena vinutím a sekundární část je tvořena buď permanentními magnety, nebo elektromagnety. Prochází-li proud vinutím primární části motoru, vznikne magnetické pole a dochází k silovému působení mezi primární a sekundární částí.

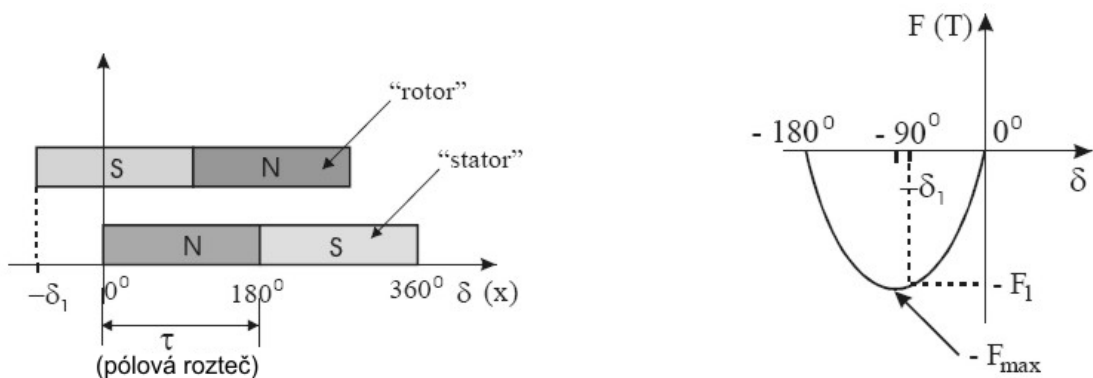
V dnešní době se jako permanentní magnety sekundární části používají převážně neohmové magnety, které jsou směsí tří prvků a to neodymu, železa a boru. Tyto magnety mají vynikající vlastnosti ve srovnání s cenou.

Synchronní lineární motory s neohmovými permanentními magnety se používají především v oblasti různých přesných polohovacích zařízení, například u obráběcích strojů. Dále tyto motory našly svoje uplatnění v mechanismech pro horizontální i vertikální transport.

Vznik tahové síly závisí podobně jako vznik momentu u rotačního synchronního motoru na posuvu mezi magnetickým polem primární části a magnetickým polem sekundární části motoru. Tahovou sílu vyjadřuje následující vztah:

$$F = F_{MAX} \cdot \sin(\delta) = F_{MAX} \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot x}{\tau}\right) \quad (4.1)$$

Princip tohoto motoru je naznačen na obr.



Obr. 10 Princip funkce lineárního synchronního motoru [7]

Synchronní rychlost motoru je dána vztahem

$$v_s = \frac{2 \cdot \tau}{T} = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (4.2)$$

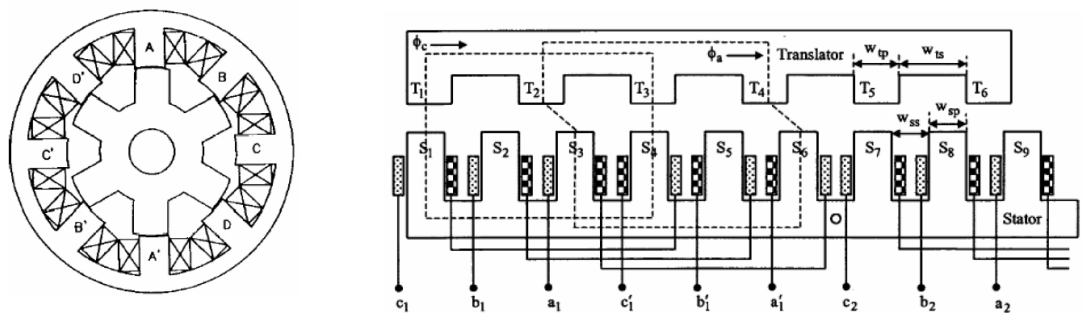
Z uvedeného vztahu vyplývá, že synchronní rychlost motoru je dána pólovou roztečí  $\tau$ , napájecí frekvencí motoru  $f$  a není závislá na počtu pólů motoru.

U synchronních lineárních motorů s permanentními magnety, které mají akční část feromagnetikum, vznikají okrajové jevy. Tyto jevy jsou způsobené hranami permanentních

magnetů reakční části a zubů akční části. Důsledkem těchto jevů jsou parazitní přídržné síly, které mají za následek kolísání tažné síly lineárního motoru. Tyto jevy rovněž způsobují problémy při přesném polohování.[7],[6],[8]

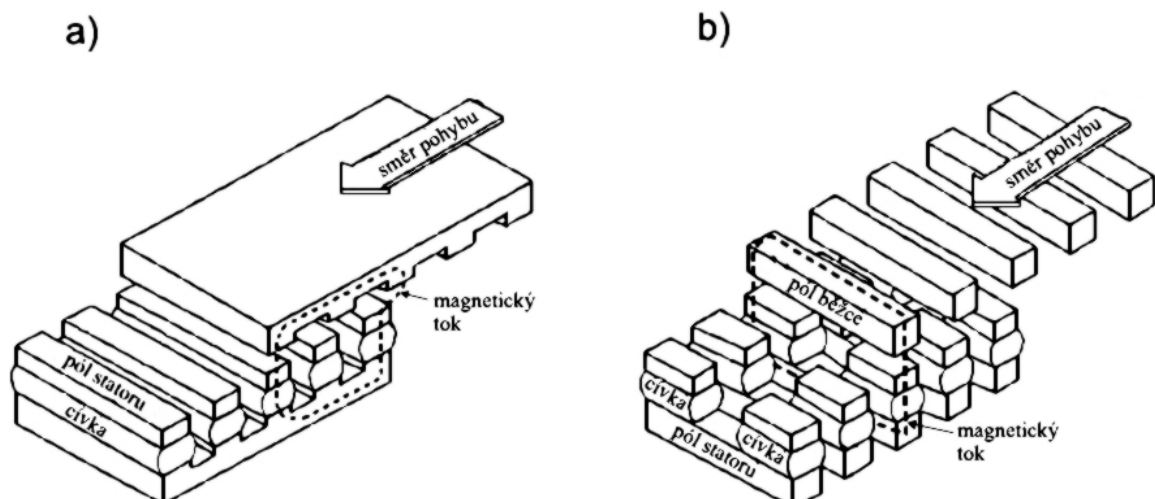
## 4.2 Krokové lineární motory

Krokové lineární motory jsou reluktančními krokovými motory. Pracují na stejném principu jako rotační motory, kdy se sekundární část přesune vždy tak, aby byl minimální magnetický odpor mezi póly sekundární části a póly primární části, které přísluší sepnuté fázi. Pólová rozteč primární části není stejná s pólovou roztečí sekundární části.



Obr. 11 Porovnání rotačního a lineárního krokového motoru [7]

Reluktanční motory můžeme také rozdělit na motory s příčným a podélným magnetickým tokem. Na obrázku 16 je znázorněno, jak se uzavírá magnetický tok v případě podélného magnetického toku i v případě příčného magnetického toku.



Obr. 12 Rozdělení krokových motorů dle cesty magnetického toku [7]

- a) motor s podélným magnetickým tokem
- b) motor s příčným magnetickým tokem

### 4.3 Asynchronní lineární motory LAM

Asynchronní motor je tvořen dvěma částmi. První částí motoru je primární část, ve které se nachází vinutí. Druhá je sekundární část. Ta je tvořena ocelovou kostrou a klecí (tu lze nahradit kusem, který není feromagnetický např. hliník nebo měď), ve které se indukují proud a tímto jevem dochází k silovému působení mezi sekundární a primární částí. Existuje také oboustranné provedení motoru, díky tomuto uspořádání se dají eliminovat přitažné síly mezi primární a sekundární částí motoru, což je velkou výhodou tohoto zapojení.

LAM je možné dále rozdělit na motory s podélným magnetickým tokem nebo příčným magnetickým tokem.

#### 4.3.1 Základní vztahy

Synchronní rychlost LAM je dána pólovou roztečí  $\tau$  a napájecí frekvencí motoru  $f$ . V tomto vztahu nezávisí na počtu pólů motoru.

$$v_s = \frac{2 \cdot \tau}{T} = 2 \cdot \tau \cdot f \quad (4.3)$$

Sekundární část motoru se bude pohybovat rychlostí  $v < v_s$ . Následujícím vztahem je definovaný skluz motoru.

$$s = \frac{v_s - v}{v_s} \quad (4.4)$$

Elektromagnetický výkon přenášený vzduchovou mezerou, kde  $P_m$  je mechanický výkon,  $\Delta P_2$  jsou ztráty v sekundární části a  $F$  je tahová síla motoru.

$$P_{elm} = P_m + \Delta P_2 = F \cdot v_s \quad (4.5)$$

Mechanický výkon motoru, kde  $P_{out}$  je výkon dodaný zátěži a  $\Delta P_m$  jsou mechanické ztráty.

$$P_m = P_{out} + \Delta P_m = F \cdot v = \frac{v}{v_s} P_{elm} = (1-s) \cdot P_{elm} \quad (4.6)$$

Potom Klossův vztah je pro LAM:

$$F = \frac{2 \cdot F_{max}}{\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s}} \quad (4.7)$$

$F_{max}$  je maximální síla, kterou je motor schopen vyvinout, odpovídá momentu zvratu u rotačního motoru

$s_k$  je kritický skluz. Kritický skluz je skluz, při kterém motor vyvine svou maximální sílu. [7],[5]

### 4.3.2 Podélný jev LAM

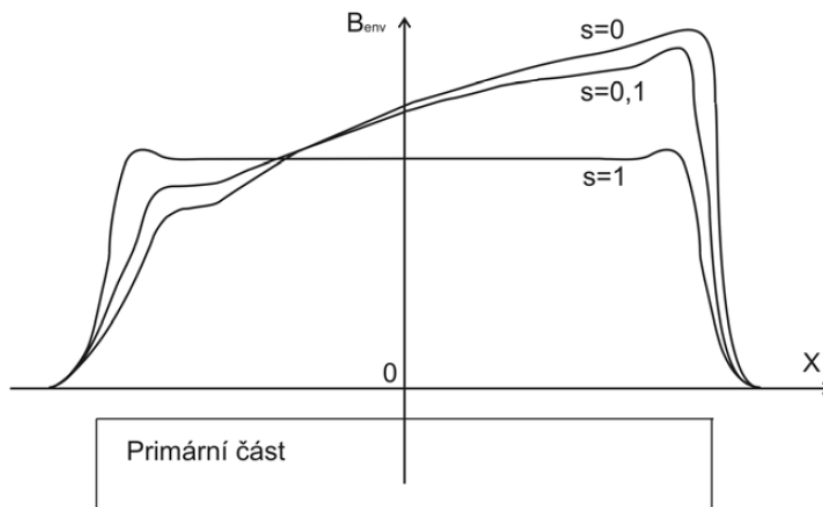
Motory s podélným magnetickým tokem jsou vyrobeny tak, že siločáry magnetického toku jsou v rovině rovnoběžné ke směru pohybujícímu se magnetického pole, tj. ke směru tažné síly. U strojů rotačních, které mají uzavřený magnetický obvod ve směru pohybu magnetického pole, nedochází k podélnému jevu z důvodu jeho nekonečné délky. U lineárních strojů, které mají danou délku, je tomu naopak. Z tohoto důvodu u nich dochází k tzv. podélnému jevu, který je nežádoucí.

Budeme-li mít nepohyblivou primární část motoru a pohybující se sekundární část motoru, magnetické pole v primární části působí na sekundární část motoru díky vzájemné interakci. Ta mezi nimi vyvolá vířivé proudy, kterými vznikne magnetické pole v sekundární části. Tímto dojde k nerovnoměrnému rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře. Tento jev je závislý na rychlosti pohybu motoru a rostoucí rychlostí se více uplatňuje.[16]

### 4.3.3 Důsledky podélného jevu

- nestejnorodé rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře
- nesouměrné rozložení vířivých proudů v sekundární části v závislosti na rychlosti
- nesouměrný odběr fázových proudů
- parazitní brzděné síly





Obr. 13 Rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře v důsledku podélného jevu[7]

#### 4.3.4 Příčný jev LAM

U motorů s příčným magnetickým tokem jsou siločáry magnetického toku kolmé ke směru pohybujícího se magnetického pole. Jednostranný motor s příčným magnetickým tokem umožňuje navíc elektrodynamickou levitaci. Příčný jev se vyskytuje pouze u plochých variant motorů, protože tubulární motory mají uzavřený magnetický obvod. Tento jev vzniká v důsledku konečné šířky primární a sekundární části motoru, kdy na koncích těchto částí dochází k prudkému nárůstu magnetického odporu a také působením indukovaných proudů v sekundární části. Tyto motory mají v porovnání s motory s podélným magnetizačním tokem nižší magnetizační proud, a to díky kratší dráze magnetického toku. Nevýhodou těchto motorů je nižší tahová síla. [7], [12]

#### 4.3.5 Důsledky příčného jevu

- nesouměrné rozložení magnetické indukce ve směru šířky motoru (kolmo na směr pohybu)
- Vznik síly působící kolmo ke směru pohybu motoru za předpokladu, že osy primární a sekundární části jsou rovnoběžné se směrem pohybu a jsou vzájemně posunuty

### 4.4 Stejnoseměrné lineární motory

Princip stejnosměrných kartáčových lineárních motorů je stejný jako u rotačních motorů. Motor obsahuje vinutí kotvy a budící vinutí, nebo může být případně buzen

permanentními magnety. Vinutí kotvy je připojeno na lamely komutátoru. V okamžiku připojení napájení, dochází k silovému působení mezi vinutými buzení a kotvy. Vzniklé silové působení je při pohybu motoru udržováno komutací proudu na jiné lamely komutátoru.

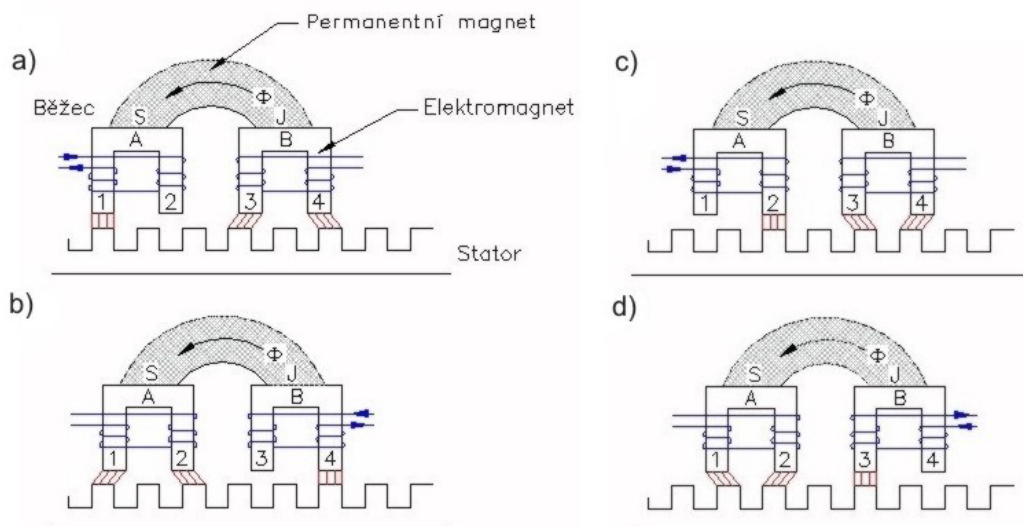
#### 4.5 Hybridní lineární motor

Jedná se především o hybridní krokové motory, u kterých je běžec tvořen permanentním magnetem a dvěma elektromagnety. Elektromagnety se označují A a B. Jejich rozměr je navržen tak, aby se vždy překrýval pouze jeden zub běžce se zubem statoru.

Při tomto uspořádání magnetický tok, vyvolaný cívkou prochází z permanentního magnetu a elektromagnetu A přes vzduchovou mezeru do statoru. Následně se tento magnetický tok vrací ze statoru přes vzduchovou mezeru a elektromagnet B zpět do permanentního magnetu. Pokud je cívka protékána proudem, magnetický tok prochází pouze jedním zubem daného elektromagnetu.

To způsobí posunutí běžce do takové polohy, aby se zub elektromagnetu, kterým prochází magnetický tok, překrýval se zubem statoru. Pokud naopak cívkou proud neteče, uzavírá se magnetický tok oběma zuby příslušného elektromagnetu. Podle směru budícího proudu cívkou, můžeme volit, zda-li bude magnetický tok procházet levým nebo pravým zubem příslušného elektromagnetu. Velikost jednoho kroku se rovná jedné čtvrtině zubové rozteče.

Princip posunu běžce je zobrazen na obr.15 [7],[13]



Obr. 14 Rozdělení cesty magnetického toku [7]

## 5 Magnetická levitace

Pojem magnetická levitace může představovat hned několik pojmů v různých odvětvích. Běžnému člověku se většinou jako první vybaví velký kouzelnický trik, kdy iluzionista nechá vznášet se různé předměty či dokonce své půvabné asistentky bez kontaktu s pevným povrchem. Této levitaci se říká paranormální levitace. Informační zdroje říkají, že levitace představuje vznášení se určitého objektu, které se nedá vysvětlit známými přírodními zákony. A levitace v odvětví fyziky znamená vznášení se hmotných objektů za překonání gravitační síly. Tohoto se dá například docílit působením silného magnetického pole vlivem supravodivosti. Magnetická levitace znamená, že je při levitování využito magnetického pole a touto levitací se budu zabývat v následující části.

### 5.1 Historie magnetické levitace

V této kapitole se budu zabývat vývojem hlavních dvou druhů magnetické levitace, jimiž jsou levitace EMS a levitace EDS.

#### 5.1.1 Historie, vývoj a výroba EMS

- 1934 – Hermann Kemper patentoval princip EMS, o rok později byl zhotoven prototyp o nosnosti 210 kg.
- 1969 – byl dán podnět ministerstva dopravy SRN k zahájení vývojových prací
- 1971 – firma MBB vyrobila vůz Magnetmobil TR-02 pro 4osoby. Jeho rychlost byla 90km/h, fungoval na principu EMS.
- 1971 - 1977 vývoj a zkoušky různých levitačních a pohonných systémů. Zhotoveny prototypy Kometa MBB, která dosahovala rychlosti 400km/h bez cestujících a Transrapid TR-01 až TR-04. Tyto vlaky byly poháněné synchronním motorem s dlouhým rotorem.
- 1977 – vláda SRN rozhodla, že další vývoj bude pokračovat na základě principu EMS
- 1979 – na mezinárodní výstavě v Hamburku byl předvedený TR-05 pro 63 osob na trati dlouhé 908 m s rychlostí 75km/h. Této ukázkové jízdy se zúčastnilo přes 50 000 osob.
- 1980-1984 – stavba zkušební tratě, která měla délku 31,5 km v Emslandu. Na této trati jezdil TR-06, který byl určený pro 192 osob a mohl jet rychlostí až 392km/h
- 1988-1989 – byl vyvinut TR-07 s rychlostí 436 km/h
- 1994 – vláda SRN rozhodla o vystavení trati Berlín – Hamburk o celkové vzdálenosti 300km

- 1998 – firma Siemens a firma Thyssen – Krupp společně založily Transrapid International
- 1999 – TR-08 dosahoval rychlosti 500 km/h a byl určený pro celkem 311 cestujících
- 2000 – uzavření dohody s Čínou o zřízení TR-08 na trati Šanghaj-Pudong mezinárodní letiště, celková vzdálenost 30 km
- 2000 – zahájení projektu Metrorapid na tratích Mnichov-mezinárodní letiště (37 km) a také Dortmund-Essen-Düsseldorf (80 km)
- 2001 – zahájení výstavby TR-08 v Číně
- 2002 – první dodávka vozů TR-08 do Číny [29]

### 5.1.2 Historie, vývoj a výroba EDS

- 1963 – J. R. Powell a G. D. Danby projektují superexpres na základě EDS
- 1964 – začátek výzkumu v Japonsku
- 1976 – firma Siemens sestrojila pokusné vozidlo EET-01, jeho hmotnost byla 16 tun a rychlost 200 km/h
- 1972 – 1977 – vývoj v USA, Německu, Kanadě prováděny experimenty se supravodivými magnety
- 1977 – vybudována zkušební trať dlouhá 7 km u města Miyazaki v Japonsku
- 1977 – firma Hitachi sestrojila pokusné vozidlo ML 500, jeho rychlost dosáhla 517 km/h
- 1981-1987 – souprava MLU 01 měla nedostatek, kdy v kabinách bylo silné magnetické pole působící na cestující
- 1987-1991 – souprava MLU 02 byla zničena požárem, který vznikl od brzdného systému
- 1994 – vybudovaná souprava MLU 02N, která měla stejnou koncepci jako MLU 02
- 1995-1999 – souprava MLX 01 dosáhla rychlosti 552 km/h
- 1997 – byla vybudována zkušební trať v prefektuře Yamanashi v Japonsku, její délka byla 42,8 km
- 1998-2000 - testování JR – Maglev s přepravou osob na dráze v Yamanashi
- 2000-2005 – testování životnosti a spolehlivosti
- 2002 – vyvinut nový typ vozu MLX01-901 [29]

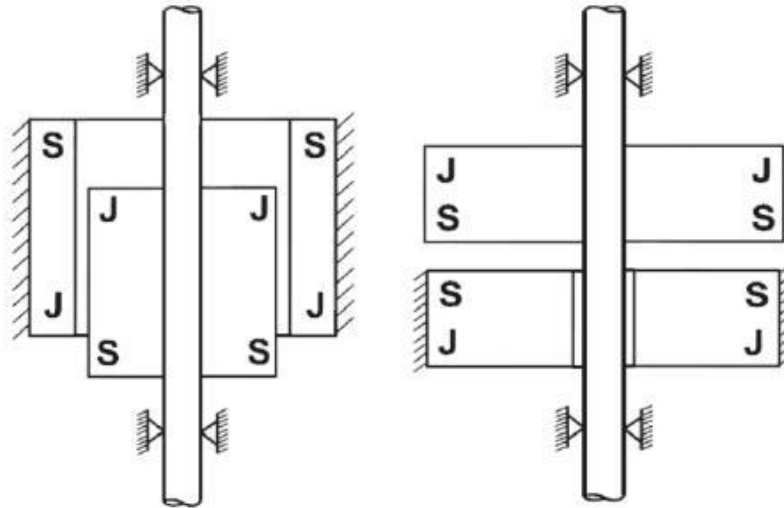
## 5.2 Druhy magnetické levitace

Existuje hned několik druhů magnetické levitace. Druhy magnetické levitace se od sebe liší v použití různých fyzikálních principů. K nejdůležitějším patří:

- Levitace s permanentními magnety
- Levitace s použitím diamagnetika
- Transformační levitace
- Elektrodynamická levitace
- Elektromagnetická levitace

### 5.2.1 Levitace s permanentními magnety

Na obr. jsou uvedeny dva způsoby, které využívají odpudivé síly stejnosměrných pólů permanentních magnetů. Tímto způsobem lze např. realizovat magneticky levitovaná ložiska. Tato zařízení však, ale nespĺňuje definici levitace. Protože vodící ložiska sloužící k zajištění stability motoru jsou spojena s pevnou zemí. Čímž není splněna podmínka neexistujícího kontaktu s pevnou zemí. Tento způsob levitace byl tedy nevhodný, proto se hledal jiný způsob, se kterým přišel americký fyzik Klaus Halbach v roce 1985.[29]

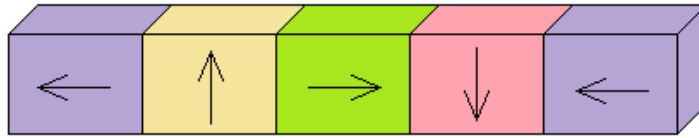


Obr. 15 Dva způsoby levitace pomocí PM [23]

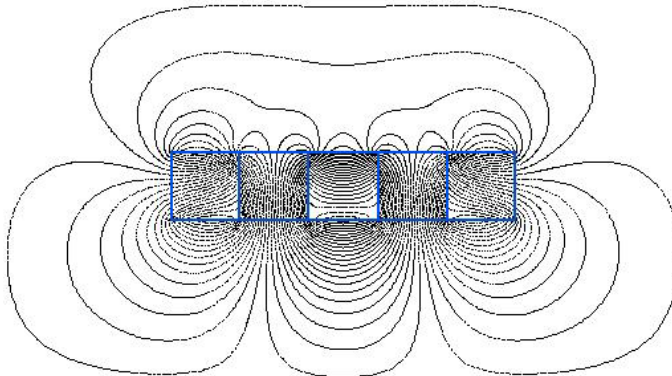
### Halbachova konfigurace PM

Klaus Halbach přišel na speciální uspořádání pěti permanentních magnetů ve tvaru kvádry, znázorněno na obr. 17. Šipky na permanentních magnetech znázorňují směr jejich zmagnetování. Halbachovy permanentní magnety jsou zhotoveny práškovou metalurgií ze

směsi vzácných zemin se slitinou Nd-Fe-B. Jejich remanentní indukce  $B_r$  je přibližně 1,2 T. Tato soustava magnetů má speciální rozložení magnetického pole. U spodní části soustavy je magnetické pole velmi silné indukce  $B_r$  je přibližně 1 T a u horní části soustavy je naopak indukce velmi malá  $B_r \sim 0,2$  T. Na obr.18 je znázorněné rozložení magnetického pole.[33]



Obr. 16 Uspořádání PM Halbachovy soustavy překresleno z [33]



Obr. 17 Rozložení magnetického pole Halbachovy soustavy[33]

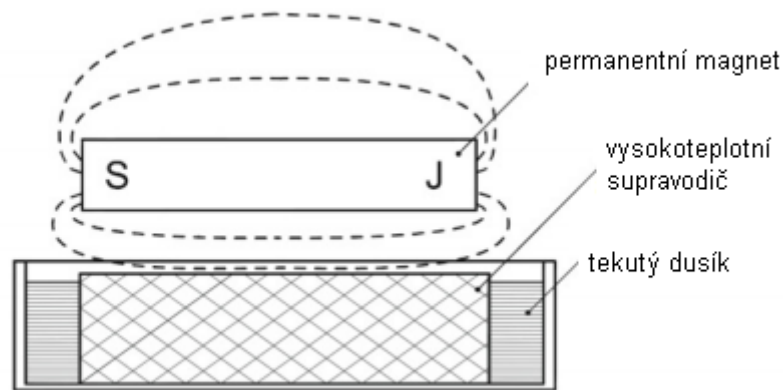
## 5.2.2 Levitace s použitím diamagnetika

Tento druh magnetické levitace úzce souvisí z permeabilitou  $\mu$  levitovaného tělesa. Permeabilita materiálu nám říká míru magnetizace v důsledku magnetického pole. Může docházet buď k zesílení, nebo zeslabení magnetického pole. Pro permeabilitu  $\mu > 1$ , se jedná o látku paramagnetickou nebo feromagnetickou. Tyto látky se do magnetického pole vtahují. My potřebujeme ale dosáhnout opačného jevu. Tudíž potřebujeme těleso, které bude mít permeabilitu  $\mu < 1$ . V tomto případě jde o diamagnetické látky.

Látky z diamagnetika jsou odpuzovány magnetickým polem. Z toho tedy vyplývá, že po vložení diamagnetického tělesa do nehomogenního magnetického pole, bude tedy docházet k odpuzování a tím dojde k jeho levitaci. Látky, které jsou běžně dostupné, např. uhlík, mají  $\mu$  pouze nepatrně menší než jedna, a proto je vzniklá levitující síla velice slabá. Pro silnou levitační sílu musíme využít tedy něco jiného a tím je supravodič.

Supravodič se chová jako ideální diamagnetická látka ( $\mu \rightarrow 0$ ). Nabízejí se dva způsoby, jak můžeme v praxi využít tuto levitaci. Prvním způsobem je uložit supravodič nad permanentním magnetem. Druhým způsobem je uložení permanentního magnetu nad supravodič. Magnet bude levitován a tomuto jevu se říká Meissnerův jev, který je zobrazen na

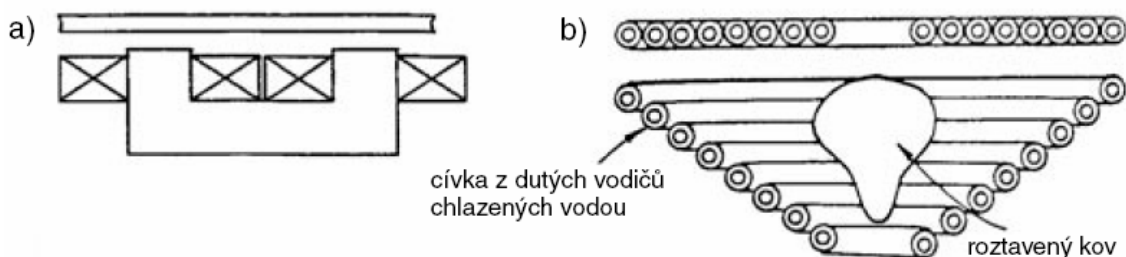
obr 19. [29],[23]



Obr. 18 Meissnerův jev[23]

### 5.2.3 Transformační levitace

Princip transformační levitace spočívá ve střídavém magnetickém poli. Toto pole je vybuzeáno 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 vybuzeáno cívkou působí proti magnetickému poli vodivého tělesa. Toto působení má za následek levitaci vodivého tělesa. Transformační levitace se využívá k levitaci roztaveného kovu v indukční peci. Princip je znázorněn na obr. 20

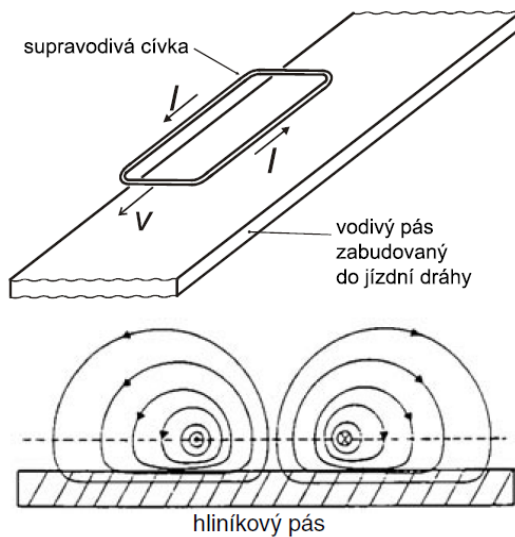


Obr. 19 Transformační levitace a) měděného kotouče b) levitace roztaveného kovu v indukční peci[23]

### 5.2.4 Elektrodynamická levitace EDS

Tomuto druhu magnetické levitace se také říká levitace odpuzováním. Její princip je založen na chování dvou na sebe navzájem působících těles. Permanentní magnet nebo elektromagnet se odpuzuje od pohyblivého vodivého pásu. Uvažujeme permanentní magnet s dostatečnou intenzitou magnetického pole pohybující se nad hliníkovým pásem. Pohyb magnetického pole takového magnetu indukuje do vodivého pásu vířivé proudy, které

vyvolají magnetické pole opačné polarity než-li je pole, které tyto proudy vyvolalo. Interakcí mezi magnetickým polem magnetu a magnetickým polem vířivých proudů vzniká vznášivá síla působící na magnet. Zároveň však vzniká vznášivá síla, která brzdí pohyb permanentního magnetu vpřed. Tato síla se musí překonat, aby nedošlo k zastavení permanentního magnetu. Z principu je zřejmé, že k levitaci nemůže dojít, pokud bude těleso oproti podkladu v klidu.[29],[31]

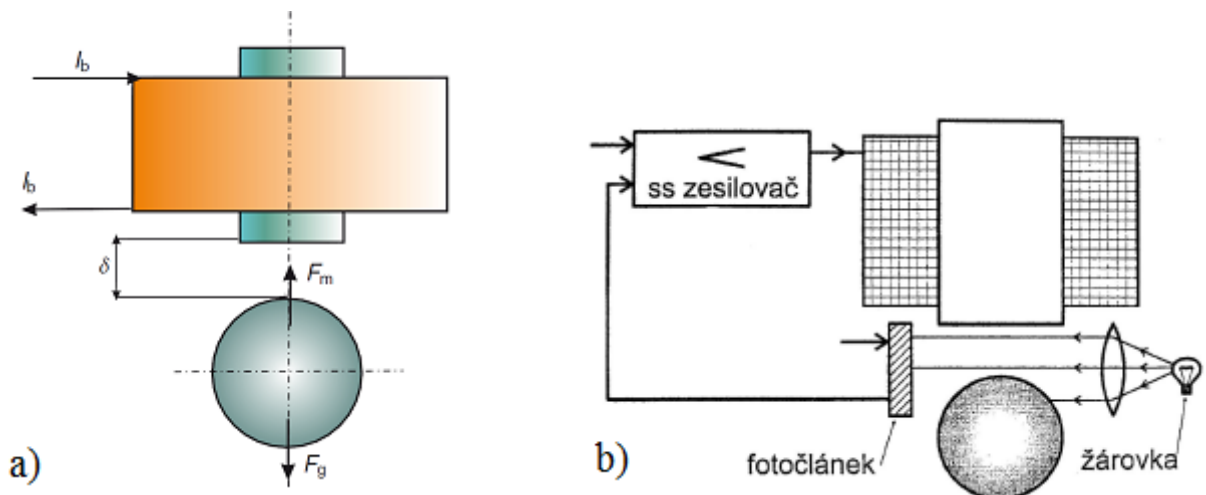


Obr. 20 Princip EDS levitace [23]

### 5.2.5 Elektromagnetická levitace EMS

Elektromagnetická levitace je založená na principu přitahování feromagnetického tělesa elektromagnetem. Uvažujme elektromagnet vybuzený stejnosměrným proudem. Magnet se přitahuje k pevně uloženému feromagnetickému tělesu silou  $F$ , jejíž velikost je závislá na vzdálenosti tělesa od jádra elektromagnetu. Tato levitované těleso není však stabilní. Pokud bychom nepoužili vhodnou regulaci, síla na těleso by působila stále, až dokud by nedošlo k úplnému dosednutí tělesa a k minimalizování energie ve vzduchové mezeře. Proto zavádíme zpětnovazební regulaci budícího proudu elektromagnetu. Regulátor pak samočinně nastavuje takový budící proud, který zaručuje, aby magnetická síla byla neustále v rovnováze s tíhou tělesa. Vzájemná poloha se dá kontrolovat například pomocí fotočlánku. Tento způsob regulování je zobrazen na obr.22b). Tento princip levitace je využíván například v německém systému s názvem Transrapid. [19],[29],[31]





Obr. 21 a) princip EMS levitace [30]  
b) regulace EMS pomocí fotočláneku [23]

## 6 Magnetická levitace v dopravě

Magnetická levitace se ukazuje jako jedním z možných nástupců pro rozvoj železniční dopravy. Klasický vztah kolo-kolejnice má své fyzikální limity a v dnešní době, kdy se požadavky na rychlost stále zvyšují, nemůže tento způsob nabídnout důstojnou konkurenci zejména pro leteckou dopravu na střední vzdálenosti. Po druhé světové válce začaly laboratoře zkoumat možnosti jízdy vlaků nikoliv po kolejnici, ale na magnetickém polštáři. Pokusy se prováděly po celém světě, ovšem nejdále došly ve dvou zemích – v Německu (se systémem TRANSRAPID) a v Japonsku. V Japonsku vyvíjí dokonce dva nezávislé týmy svoje systémy vlaků využívající princip magnetické levitace. Které využívají EMS i EDS levitaci.

### 6.1 HSST (High Speed Surface Train)

Tento projekt založila společnost Japan Airlines, která na počátku 70. let řešila problém, jak nejrychleji dostat cestující z center měst na letiště, co možná v nejkratším čase. Projekt byl založen v roce 1972 a v roce 1975 byl poprvé úspěšně testován na 200m dlouhé trati. V roce 1985 je představen na EXPO85, kde za půl roku dokázal svézt přes 600 tisíc návštěvníků. V dalších letech vznikají další prototypy, s nimiž jsou objížďeny různé výstavy, ale reálné využití technologií je stále odkládáno. Během dvacetiletého vývoje bylo vyrobeno celkem pět různě velkých pokusných exemplářů, z nichž byly na počátku 90. let odvozeny dvě ideové větve systémů: HSST-100, která je určena pro městské spojení, velkou frekvenci zastávek, nízkou rychlost a velký obrát cestujících. Tento systém po mnoha odkladech nakonec v roce 2001 začala stavět prefektura Aichi v Japonsku jako ukázkovou trať ke

světové výstavě v roce 2005 pod názvem Linimo. Naproti tomu meziměstská varianta HSST-200, které jsou od počátku proklamovány rychlosti nad 200 km/h není prozatím rozvíjena.[35],[38],[23],[19]



Obr. 22 magneticky levitovaný vlak HSST, výstava Expo88 [38]

## 6.2 HSST – LINIMO

V roce 2005 se v prefektuře Aichi uskutečnila světová výstava a při její příležitosti byla na okraji města Nagoya postavena 8,9 kilometrů dlouhá s celkem 9 stanicemi. Maximální rychlost je 100 km/h, minimální poloměr oblouku 75 metrů a stoupání je do 6%. Celkové náklady na výstavbu trati dosáhly 575 milionů dolarů a vozidla stála dalších 380 milionů dolarů. Celkové náklady lze tedy uvažovat v řádu 100 milionů dolarů na kilometr. Výstavba začala na podzim roku 2001 tak, aby byla trať dokončena před začátkem výstavy. V březnu 2005. Vzhledem k tomu, že se jednalo o první komerčně provozovaný systém tohoto typu, byl provoz zpočátku omezen mnoha poruchami, což pochopitelně nepřineslo dobrý mediální dojem. Taktéž udávaná kapacita 4000 osob za hodinu v jednom směru nebyla dostačující, dokonce během prvního měsíce provozu vlak dvakrát dosáhnul své kapacity 244 osob a již se nedokázal vznést. Dalším důvodem omezení provozu byl silný vítr, neboť systém nedovoluje provoz při vyšší rychlosti větru, než je 25 m/s. Takovéto větry bohužel nejsou v oblasti výjimečné. I po skončení výstavy zůstala linka v provozu a slouží místní dopravě. Dopravu

zajišťuje celkem 9 třívozových průchozích jednotek, které jsou řízeny dálkově automaticky. V každé jednotce je i pult pro nouzové ovládání.[19],[35],[31]



Obr. 23 Magneticky levitovaný vlak HSST – Linimo [24]

### 6.3 JR – MAGLEV

Druhým japonským projektem zabývajícím se vlaky typu maglev je JR-maglev. Tato společnost je podporována společností Japan Railways, národním japonským dopravcem, a Railway Technical Research Institute. Vývoj započal v roce 1962 a bylo použito synchronních lineárních motorů. V roce 1977 došlo na první zkušební jízdy na zkušební trati v Miyazaki. Ta byla v roce 1997 nahrazena novou zkušební tratí v Yamanashi, která je 18,4 kilometru dlouhá, ale z toho se 16 kilometrů nachází v tunelu. V tomto prostředí tunelu mohou být prováděny testy důkladněji, než za normálních podmínek. Na této trati bylo dosaženo hned několik světových rekordů, protože rychlost vlaků není teoreticky téměř nijak omezená, rychlostní rekord v roce 2005 byl 581 km/h. V roce 2015 byl rekord hned několikrát navýšen a opět překonán, když vlak v Japonsku dosáhl rychlosti 603 km/h. V praxi je rychlost limitovaná spotřebou energie a aerodynamickým odporem, tento problém se snažil vyřešit projekt Swissmetro tím, že navrhuje provozovat dráhu v tunelech zbavených vzduchu až ke hranici vakua (vactrain). Takové řešení bylo navrženo i pro tzv. transatlantický tunel. Dalším rekordem, který místní trať drží je absolutní rychlost míjení dvou vozidel, kdy dvě

protijedoucí jednotky se mýjely rychlostí 1026 km/h. [21], [22], [37], [25],



Obr. 24 Magneticky levitovaný vlak JR – MAGLEV[24]

#### 6.4 JR – MAGLEV TOKYO – NAGOYA – ÓSAKA

První trať japonských rychlovlaků Shinkansen spojuje od roku 1964 města Tokyo a Ósaka. Jelikož tato trať je velmi vytížena, je zvažována její náhrada trasou rychlovlaku maglev. Jelikož se jedná o zcela odlišné parametry trati, není možné trať rekonstruovat, ale je hledána zcela odlišná trasa. Součástí této trasy se má stát i dnešní výzkumná trať v Yamanashi. Byly navrženy tři možné varianty trasování mezi městy Tokyo a Nagoya. V roce 2009 byla z nich vybrána varianta nejlevnější, která má plánovaný rozpočet 5100 miliard japonských yenů (přibližně 1000 miliard Kč) při celkové délce 286 kilometrů. Trasu by v budoucnu měly rychlovlaky zvládnout za 40 minut při maximální rychlosti 500km/h. Průměrná rychlost tak činí 429 km/h. Trasa vede Japonskými Alpami a bude se tak sestávat z mnoha dlouhých tunelů. Ostatní varianty byly delší a dražší z důvodu snahy připojit i region prefektury Nagano.

V současné době je upřesňována trasa a technické detaily tak, aby na jaře 2010 mohl být projekt definitivně schválen a ještě v roce 2010 začít výstavba. Projekt je financován zcela ze soukromých zdrojů dopravce Japan Railways, které na této trati budou provozovat vlaky. Plánované dokončení je v roce 2025, přičemž již v roce 2026 je plánován zisk před zdaněním ve výši přibližně 70 miliard yenů (14 miliard Kč). Pokračování trati v úseku Nagoya – Ósaka není v současné době definitivně dořešené, plánovaná délka celé trati (Tokyo – Ósaka) je 438

km (oproti současným 515 km) a zkrácení cestovní doby ze 138 na 67 minut. Stavební náklady na celou trať jsou 8440 miliard yenů (cca 1600 miliard korun). [38],[34],[18]

## 6.5 TRANSRAPID

Počátky zkoumání tohoto systému jsou datovány do 70.let. Tento projekt se jmenoval Versuchsanlage Emstand u Lathenu v Emstandu, který se nachází v Dolním Sazku a fungoval na principu EMS levitace. M-bahn, nebo-li Magnet Bahn byla experimentální lokální vlaková trať postavená v 80.letech v Berlíně. Konstrukce M-bahn měla i kola, protože magnetickou levitací bylo nadnášeno pouze 85% vlaku. Trasa M-bah byla dlouhá 1,6 km a měla tři zastávky. Testování probíhalo až do roku 1991, kdy byla v červenci otevřena. Linka byla, ale později zrušena, protože došlo k územním změnám.

Dalším německým projektem Transrapidu bylo vybudování trasy z centra Mnichova na Mnichovské letiště Franze Josefa Strausse. Tato trasa měla být určena jako usnadnění pro cestující na letiště, aby se vyhnuli dopravním zácpám a doba cesty na letiště se rapidně snížila. Délka této trati měla být 38 km a doba přepravy jen 10 minut. Ovšem problém byl v tom, že Transrapid nakonec neuspěl z důvodu ohromného navýšení celkové částky, kdy se cena vyšplhala z odhadované ceny 1,85 mld. euro až na odhadovaných 3,4 mld. euro. Tudíž přednost dostaly vysokorychlostní vlaky ICE společnosti Deutsche Bahn.[27],[28],[19],[26]

Další zemí využívající Transrapid je Čína, kde první velký úspěch zaznamenal Transrapid v roce 2000. Společnost Transrapid International, která vznikla spoluprací mezi společnostmi Siemens a ThyssenKrupp se podílela na projektu realizace spojení mezi šanghajskou stanicí Long Yang Road a mezinárodním letištem Pudong v Šanghaji pomocí magnetických rychlovlaků Transrapid. Zákazníkem byla čínská společnost Shanghai Maglev Transportation Development Co. Ltd. (SMTDC), která byla zodpovědná za vybudování vodící dráhy a stanic.

Komerční provoz na této lince započal v lednu 2004, v dubnu byla provedena závěrečná inspekce a celý systém byl předán zákaznické firmě SMTDC. Vlak urazí vzdálenost mezi centrem města a letištem, která je 30 km během 8 minut a dosáhne maximální rychlosti 431 km/h. Šanghajský Transrapid se tak stal prvním světovým komerčním vysokorychlostním systémem na principu magnetické levitace. Celková výše investice se vyšplhala na 1,2 mld. dolarů. V současné době se vyjednává o rozšíření z letiště v Šanghaji (34 km) o následovanou druhou fázi, ve které by se měla trať prodloužit až do města Hangzhou. To celkem zahrnuje vzdálenost 200 km. Konečnou realizací tohoto projektu

by byl dokončen první projekt magnetických levitačních vlaků na dlouhou vzdálenost na světě, z čehož by plynulo velké množství poznatků a zkušeností pro další mezinárodní aplikace této technologie. Prodloužením trati by se zkrátila přepravní doba mezi Šanghají a Hangzhou na pětinu, z dnešních 2,5 h na 27 minut. V roce 2006 byl sice projekt kompletně schválen, ale neshody o vlastnictví technologie a politické zájmy nadále komplikují pokrok v realizaci tohoto projektu. [39], [19], [26], [33],[29],[36]



Obr. 25 Německý Transrapid využívající EMS [24]



Obr.26 Čínský Transrapid využívající EDS [34]

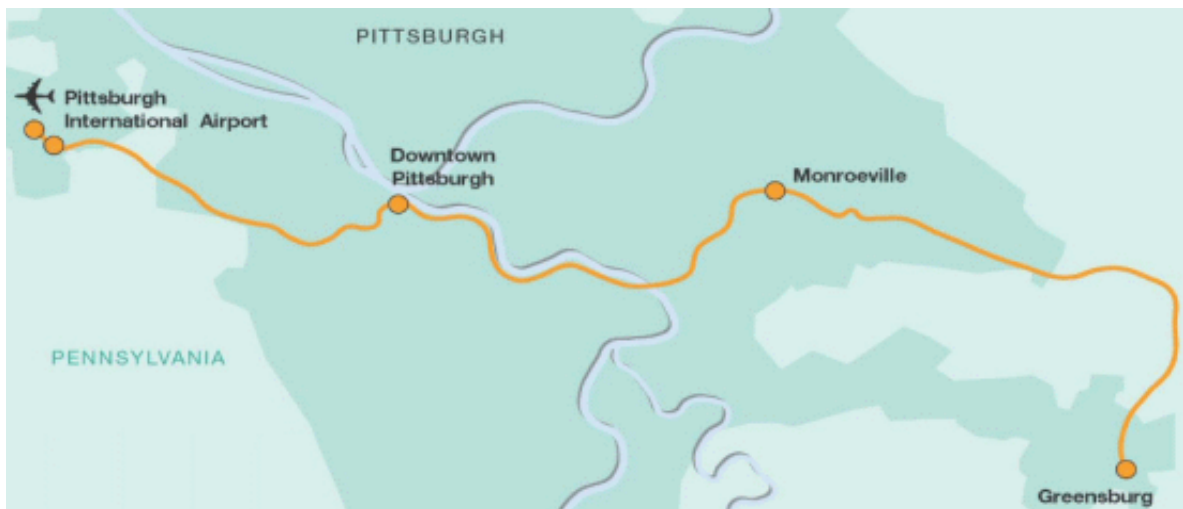
## 7 Budoucnost magneticky levitovaných vlaků

### 7.1 USA

V Americe jsou plánovány dva projekty na výstavbu magnetických tratí pro vlaky typu Transrapid. Tyto projekty budou financovány ze státního rozpočtu. Prvním projektem je spojení Las Vegas - Primm. Tato dráha by měla být 56 km dlouhá. Další projekt se vybere ze tří návrhů. Prvním z projektů je trať, která spojuje mezinárodní letiště v Pittsburghu s městem Greensburg na obr.29 ve vzdálenosti 87 km. Dalším možným projektem je linka z Baltimoru do Washingtonu na obr.28 o vzdálenosti 63 km a poslední možnou trasou je 50 km dlouhé spojení Atlanty s Hartsfieldem. Která z těchto tří variant bude nakonec vybrána rozhodně vláda USA.[26],[19]



Obr. 27 plánovaná trasa Washington – Baltimore[26]



Obr. 28 plánovaná trasa Pittsburgh – Greensburg [26]

### 7.2 Evropa

V Evropě zatím existuje pouze pár návrhů, u kterých zatím není jisté zda dojde k jejich zrealizování.

### 7.2.1 Východní a střední Evropa

V letech 1997 – 2000 společnost Transrapid International zkoumala možnosti spojení Berlín - Drážďany - Praha - Vídeň - Bratislava a Budapešť. Studie byly provedeny pro vozidla maglev i vysokorychlostní kolejové vlaky. Tyto studie byly financovány Evropskou unií. Ovšem o budoucnosti tohoto projektu zatím nebylo rozhodnuto. Evropská unie chce využít a modernizovat především stávající konvenční železniční dopravu. Proto se dá spíše předpokládat, že místo maglev dostanou přednost vysokorychlostní vlaky ICE.[26]



Obr. 29 Předpokládaná trať [26]

### 7.2.2 Švýcarsko

Projekt Swissmetro má mít magnetickou dráhu, která bude uložena pod zemí v tunelech se zředěným vzduchem, tím by bylo možné dosáhnout rychlosti kolem 600 km/h. Výhodou podzemního provozu je zejména vyhnutí se problému v legislativě, protože ve Švýcarsku mají přísné vyhlášky na ochranu před hlukem. Předpokládá se, že intervaly mezi jednotlivými soupravami by měli být v rozmezí 5 – 10 minut. První etapa zrealizování tohoto projektu je naplánovaná na rok 2020. [40]



Obr. 30 Plánovaná trať pro projekt Swissmetro[26]



### 7.2.3 Velká Británie

Společnost Transrapid International spolupracuje se skupinou UK Ultraspeed a připravují projekt na výstavbu vysokorychlostní dráhy Maglev z Glasgow do Londýna. Tato dráha by měla měřit 800 km, Tímto projektem se má zejména ulehčit velmi vytížené britské dopravní infrastruktuře. Spolu se spojením Glasgow a Londýna by získala i další významná britská města (Birmingham, Manchester, Newcastle, Edinburgh) vysokorychlostní spojení s Londýnem.[26]

Obr. 31 Plánovaná trasa Glasgow – Londýn[26]



## Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabývala dvěma tématy. Prvním z nich byly lineární motory. Lineární motory jsou motory, které vykonávají posuvný pohyb namísto rotačního. V podstatě každý rotační motor má svůj lineární ekvivalent. Proto existuje mnoho druhů lineárních motorů. V kapitole Lineární motory jsem začala od úplných začátků, kdy byl princip lineárního motoru patentován Charlesem Wheatstonem až do současnosti, kdy se lineární motory jeví, jako stále více perspektivní možnost využití pohonu v mnoha různých aplikacích. V jednotlivých částech této kapitoly jsou detailně rozebrány jednotlivé druhy motorů.

Využitím lineárních motorů u obráběcích strojů dosáhneme vysoké dynamiky pohybu, tak i minimálního opotřebení mechanismu, které se nám příznivě projeví na údržbě a životnosti stroje. U strojů rotačních, které převádí pohyb na posuvný díky šroubu, který vykonává tuto přeměnu, dochází k jeho velkému opotřebení a tím se snižuje přesnost. Především díky tomu snížení přesnosti, se rotační motory nahrazují těmi lineárními.

V dnešní době se již používají lineární motory také v hybridních automobilech, jako generátor v lineárním spalovacím motoru. Lineární motor tam nahrazuje klikovou hřídel, což se příznivě projevuje na účinnosti. Dále nacházejí uplatnění v dopravě u magneticky levitovaných vlaků a existují i výtahy, které využívají lineární motor.

V druhé části této práce jsem se zabývala druhy magnetické levitace. Tím jak fungují a zejména, kde se uplatňují. Nejdůležitějšími druhy magnetické levitace jsou elektrodynamická levitace a levitace elektromagnetická. Tyto dva druhy magnetické levitace se využívají u magneticky levitovaných vlaků.

V další části kapitoly jsem se zabývala rozdělením magnetické levitace v dopravě. Princip EMS využívají vlaky Transrapid v Německu a principu EDS dávají přednost japonské vlaky JR-Maglev a čínské vlaky Transrapid.

I přesto, že je technologie magnetické levitace již dlouho známá, není v dnešní době samozřejmostí, ale spíše raritou. Magnetické vlaky jezdí jen v hrstce zemí, které se dají spočítat na prstech ruky. Ve většině států a jednotlivých zemích se více vyplatí postavit dráhy pro vysokorychlostní vlaky, než pro ty magneticky levitované. Je to především díky ceně a vysokým celkovým nákladům pro výstavbu magnetické trati a zařízení magnetických vlaků.

Dalším problémem je také v celkovém zájmu o železniční dopravu, která čím dál více klesá. Proto by se nákladná investice na vybudování nemusela nikdy vrátit zpět. Otázkou je, jestli by pak lidé nezačali dávat přednost magnetické dopravě před tou silniční. Potom by odpadly

například silniční zácpy. Cestující by měli mnohem větší komfort, snížil by se počet dopravních silničních nehod - zejména těch smrtelných.

Proto mají magneticky levitované vlaky v dnešním uspěchaném světě velkou perspektivu, protože výrazně zkracují přepravní dobu téměř na minimum, a to díky velkým rychlostem, kterými jsou schopné se pohybovat. Proto se vývojáři na celém světě snaží vymyslet, jakým způsobem by se daly náklady snížit, aby se tato technologie dala využívat v čím dál více státech.

V dnešní době existuje po celém světě celá řada navržených projektů, ale zda-li i my v České republice se dočkáme magnetického vlaku, kterým bychom se dostali z Prahy do Brna za neuvěřitelných 40 minut je zatím ve hvězdách.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] VUES BRNO s.r.o. Lineární motory – úvod [online] [cit.9.9.2014] dostupné z: [http://www.vues.cz/file/424/CZ\\_LIN-OBECNE\\_020909.PDF](http://www.vues.cz/file/424/CZ_LIN-OBECNE_020909.PDF)
- [2] Sir Charles Wheatstone převzato [online] [cit.23.10.2014] dostupné z: [http://www.kingscollections.org/media/exh\\_spc/images/006838/A05\\_Wheatstone\\_photo.jpg](http://www.kingscollections.org/media/exh_spc/images/006838/A05_Wheatstone_photo.jpg)
- [3] Charles Wheatstone [online] [cit 23.10.2014] dostupné z: [http://en.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Wheatstone](http://en.wikipedia.org/wiki/Charles_Wheatstone)
- [4] Fyzikální princip lineárního motoru [online] [cit.10.11.2014] dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/806>
- [5] Piskač, Luděk: Elektrické pohony principy a funkce, 2.upravené vydání Plzeň: Západočeská univerzita 2008 ISBN978-80-7043-688-2
- [6] Gieras, Jacek F. a Piech, Zbigniew J. Linear synchronous motors Transportation and Automation Systems, CRC Press LLC 2000, ISBN 0-8493-1859-9
- [7] Pohony s lineárními motory PDF [online] [cit.5.10.2014] dostupné z: <http://www.fe1.vsb.cz/kat430/data/erp2/ERP%20%20Pohony%20s%20linearnimi%20motory.pdf>
- [8] Gieras, J.F. Linear Induction Drives, Oxford University Press, New York 1994, ISBN 0-19-8593-81-3
- [9] Přímý a nepřímý lineární motor převzato [online] [cit. 4.11.2014]dostupné z: [https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/motory/linear/clanek\\_o\\_linearnich\\_motorech\\_-\\_technika\\_a\\_trh.pdf](https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/linear/clanek_o_linearnich_motorech_-_technika_a_trh.pdf)
- [10] HIWIN s.r.o., Lineární pohony [online]. [cit. 5. 12 2014]. Dostupné z: [http://www.hiwin.cz/pdf/clanek\\_o\\_linearnich\\_motorech\\_-\\_technika\\_a\\_trh.pdf](http://www.hiwin.cz/pdf/clanek_o_linearnich_motorech_-_technika_a_trh.pdf)
- [11] časopis Elektro: Autor: Ing. Ota Roubíček, DrSc., Mechatronika Praha 3/2003 Tendence vývoje v oblasti průmyslových elektrických lineárních pohonů dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/tendence-vyvoje-v-oblasti-prumyslovych-elektrickyh-linearnich-pohonu-1--14181>
- [12] Databáze o lineárních motorech [online] [cit.12.12.2014]. Dostupné z: [https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni\\_materialy/motory/linear/](https://www.pslib.cz/pe/skola/studijni_materialy/motory/linear/)
- [13] Danahermotion. Linear Motor Design [online] [cit.12.12.2012] dostupné z: [http://www.danahermotion.com/education/learn\\_about\\_mc/linearmotor\\_design.php](http://www.danahermotion.com/education/learn_about_mc/linearmotor_design.php)

- [14] Hellinger, R.; Mnich, P., "Linear Motor-Powered Transportation: History, Present Status, and Future Outlook," *Proceedings of the IEEE*, vol.97, no.11, pp.1892,1900, Nov. 2009 DOI:10.1109/JPROC.2009.2030249 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5280196&isnumber=5297592>
- [15] *Handbook of electric motors*. Second Edition. New York: Taylor & Francis Group, LLC, 2004. ISBN 978-0-8247-4105-1.)
- [16] Sen, P.C., "On linear synchronous motor (LSM) for high speed propulsion," *Magnetics, IEEE Transactions on*, vol.11, no.5, pp.1484,1486, Sep 1975, doi: 10.1109/TMAG.1975.1058873 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1058873&isnumber=22815>
- [17] Šanghajský vlak maglev [online] [cit. 10.1.2015]. Dostupné z: <http://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
- [18] Lineární motory, magnetická levitace [online] [cit.8.2.2015]. Dostupné z: <http://eluc.cz/verejne/lekce/806>
- [19] Magnet Bahn forum [online] [cit.8.2.2015]. Dostupné z: [http://magnetbahnforum.de/index.php?en\\_what-is-maglev](http://magnetbahnforum.de/index.php?en_what-is-maglev)
- [20] Článek nejrychlejší vlaky světa [online] [cit.16.3.2015] Dostupné z: <http://www.techmagazin.cz/994>
- [21] Článek levitující vlaky [online] [cit.23.4.2015]. Dostupné z: <http://play.iprima.cz/clanky/levitujici-vlaky-jsou-budoucnosti-dopravy-japonci-uz-jeden-testuji>
- [22] Maglev [online] [cit.23.4.2015] Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev>
- [23] Mayer, Daniel: *Vybrané partie ze silnoproudé elektrotechniky*, 1.vydání Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, prosinec 2002 ISBN 80-7082-925-7
- [24] Vysokorychlostní železnice [online] [cit.23.4.2015]. dostupné z: <http://www.vysokorychlostni-zeleznice.cz/maglev-rychlovlak/>
- [25] Rekord JR-Maglev [online][cit.21.4.2015]. Dostupné z: [http://ekonomika.idnes.cz/japonsky-vlak-prekonal-rychlostni-rekord-jel-603-kilometru-v-hodine-1d5-/eko-doprava.aspx?c=A150421\\_121501\\_eko-doprava\\_fih](http://ekonomika.idnes.cz/japonsky-vlak-prekonal-rychlostni-rekord-jel-603-kilometru-v-hodine-1d5-/eko-doprava.aspx?c=A150421_121501_eko-doprava_fih)
- [26] Transrapid International [online] [cit.]. Dostupné z: [http://www.transrapid.de/cgi-tdb/de/basics.prg?session=2e173a13556b8f92\\_723959](http://www.transrapid.de/cgi-tdb/de/basics.prg?session=2e173a13556b8f92_723959)
- [27] Magnetický vlak spojí Mnichov s letištěm [online][cit.25.4.2015]. Dostupné z: <http://ihned.cz/c1-22241270-rychly-magneticky-vlak-spoji-mnichov-s-letistem>

- [28] Magnetická dráha v Berlíně [online][cit.29.4.2015]. Dostupné z:  
[http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická\\_dráha\\_v\\_Berlíně](http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická_dráha_v_Berlíně)
- [29] Mayer, Daniel: Magnetická levitace a její využití [online] [cit.12.2.2015]. Dostupné z:  
[www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf](http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf)
- [30] Mayer, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (1) [online] [cit.3.4.2015]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36434.pdf>
- [31] Mayer, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů (2) [online] [cit.13.3.2015]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/res/pdf/36502.pdf>
- [32] Dopravní stránky: Transrapid [online] [cit.5.5.2014]. Dostupné z:  
<http://ekonom.ihned.cz/c1-23910120-magnety-na-vedlejsi-koleji>
- [33] Mayer, Daniel: Nové možnosti magnetické levitace v dopravě? [online] [cit.10.5.2015]. Dostupné z:  
<http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave--14291>
- [34] Super rychlé vlaky na magnetickém polštáři jezdí v Japonsku a Číně [online] [cit.24.5.2015]. Dostupné z:  
<http://zpravy.e15.cz/byznys/doprava-a-logistika/superrychle-vlakly-na-magnetickem-polstari-jezdi-v-cine-a-japonsku-1042459>
- [35] MAGLEV [online][cit.23.5.2015]. Dostupné z:  
[http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/maglev\\_frame\\_E.html](http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/maglev_frame_E.html)
- [36] Ploczek, Robert: Vysokorychlostní tratě Berlín – Hamburg [online] [cit. 18.3.2015]. Dostupné z:  
[http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2010zs/ploczek\\_berlin-hamburg-text.pdf](http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2010zs/ploczek_berlin-hamburg-text.pdf)
- [37] JR-Maglev In: Wikipedia [online][cit.21.5.2015]. Dostupné z:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/JR%E2%80%93Maglev>
- [38] Šinkansen In: Wikipedia [online][cit.29.5.2015]. Dostupné z:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/%C5%A0inkansen80%93Maglev>
- [39] Transrapid Šanghaj [online][cit.29.5.2015] Dostupné z:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Transrapid#.C5.A0anghaj>
- [40] Swissmetro [online] [cit.29.5.2015]. Dostupné z:  
<http://en.wikipedia.org/wiki/Swissmetro>

