

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**ZÁVĚREČNÁ
PRÁCE**

2017

**TOMÁŠ
HEPTNER**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Heptner** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **434265**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Laboratorní model vlaku s levitací na magnetickém polštáři

Název bakalářské práce anglicky:

Laboratory model of levitating train on magnetic cushion

Pokyny pro vypracování:

- 1) Vypracujte rešerši týkající se aktuálního provedení magneticky levitujících vlaků používaných ve vysokorychlostní dopravě.
- 2) Na základě rešerše vyberte vhodné a snadno realizovatelné provedení vlastního magneticky levitujícího vlaku, které bude možné sestavit v laboratorním měřítku.
- 3) Zkonstruuje Vámi navržené řešení. Ověřte experimentem funkčnost řešení, jestli vlak dokáže levitovat nad magnetickou trati. Předpokládá se, že pohyb vpřed ani vzad není pro tento laboratorní model nutný.
- 4) Na základě provedení experimentu navrhnete další směr vývoje.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Landovskis, A., Rondeau, V.: MAGNETIC LEVITATION TRAINS, online <<http://ninpoppe-physics.comuv.com/maglev/howitworks.php>>, přístup: 15.4.2016
[2] Blesson, B., : MAGNETIC LEVITATION TRAIN, online <<http://www.slideshare.net/blessonbabu11/maglev-ppt-54942157>>, přístup: 15.4.2016

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Zdeněk Novák, U12110.1

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **16.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Podpis vedoucí(ho) práce



Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



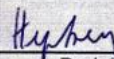
Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

19. 4 2017

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně s tím, že její výsledky mohou být dále použity podle uvážení vedoucího diplomové práce jako jejího spoluautora. Souhlasím také s případnou publikací výsledků diplomové práce nebo její podstatné části, pokud budu uveden jako její spoluautor.

Dne ...

Podpis ...

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu práce, panu Ing. Zdeňku Novákovi, za veškeré připomínky a rady, kterých se mi od něho dostalo.

Mé díky patří i všem ostatním pedagogům FS ČVUT v Praze, kteří se v průběhu posledních tří let pozitivně podepsali na mém současném technickém povědomí a znalostech.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a vyzkoušet model vlaku využívající princip magnetické levitace.

První část tvoří stručný popis v současnosti používaných řešení vysokorychlostních maglevů. V druhé je řešen návrh, výroba a testování vlastního demonstrátoru.

Pro finální model bylo zvoleno řešení využívající odpudivých sil permanentních magnetů pro levitaci a mikropočítačem řízených elektromagnetů pro stabilizaci. Model byl vyroben a testován, přičemž se ukázala nefunkčnost zvolené koncepce.

Druhý přístup byl založen na použití diamagnetických látek. Zkonstruovaný model prokázal schopnost levitace na místě i při pohybu, čímž byl cíl práce úspěšně splněn.

Použité řešení je navíc snadné reprodukovat s použitím běžně dostupných materiálů.

Klíčová slova:

maglev, levitace, EDS, EMS, diamagnetický, model

The aim of the bachelor thesis is to design and construct a maglev laboratory demonstrator. The first part is a review of systems currently used in high speed maglev trains. The actual process of designing, building and testing the model is described in the second part.

The first prototype relies on repulsive forces of permanent magnets for levitation and microcontroller regulated coils for stabilization. Its testing proved the concept to be unsuccessful.

The second approach uses diamagnetic materials. A model was built and proved capable of stable stationary levitation, as well as smooth movement over the track. Thus the aim was fulfilled.

Furthermore, the model is easy to reproduce using only easily accessible materials.

Keywords:

maglev, levitation, EDS, EMS, diamagnetic, model

Obsah

1	Úvod	3
2	Perspektivní způsob dopravy?	3
3	První krůčky	4
4	Základní dělení	6
5	EMS - Transrapid	7
5.1	Vývoj systému	7
5.2	Technické provedení	10
5.3	Další charakteristické vlastnosti Transrapidu (08)	12
6	EDS	14
6.1	SCMaglev.....	14
6.1.1	Vývoj systému	14
6.1.2	Technické provedení	16
6.2	Inductrack.....	18
6.2.1	Halbachova soustava.....	18
6.2.2	Technické provedení	19
7	Shrnutí a porovnání předností i omezení uvedených přístupů	20
8	Laboratorní model	24
8.1	Výběr vhodné metody levitace	24
8.1.1	Zvažovaná řešení	24
8.1.2	Zvolená koncepce.....	28
8.2	Materiály a technologie výroby trati a vagonu	29
8.2.1	Trať	29
8.2.2	Vagon.....	31
8.3	Řídicí systém.....	31
8.4	Senzory	32
8.5	Cívky	32
8.6	Testování aktivních elektromagnetických prvků.....	33
9	Závěr	39
10	Použité zdroje	41
10.1	Tištěná literatura.....	41
10.2	Internetové zdroje.....	41
11	Seznam obrázků	44

Část první

1 Úvod

Magnetismus sehrál roli revolučního prvku v oblasti dopravy hned několikrát. Prvním případem byl kompas, který jednou provždy zbavil cestovatele závislosti na jasné obloze. Námořníkům se otevřela bezpečná možnost vzdálit se na svých cestách z dohledu pobřeží. Spolu s astrolábem a přesnými hodinami pak umožnil evropským mocnostem započít věk velkých zámořských objevů – se všemi pozitivními i negativními důsledky z toho plynoucími.

V první polovině devatenáctého století se objevila další aplikace nabytých znalostí magnetismu, a to v podobě elektromotoru. Nového pohonu se mimo jiných aplikací chopili i tvůrci samohybů všeho druhu. V rodícím se automobilismu elektrický pohon zaznamenal jisté úspěchy, např. v podobě prvenství v překonání rychlosti 100 km/h, v masovém měřítku se však neujal. Pro absenci vhodného zdroje byl vytlačen spalovacími motory. Pokrok v oblasti superkondenzátorů, lehkých akumulátorů a palivových článků jej nicméně v současnosti vrací do hry, a to ve skvělé pozici.

Kde se elektrický pohon ujal a především udržel, byla železnice. Pohyb vozidla po přesně vymezené trati umožnila její relativně snadnou elektrifikaci, ať už v podobě trolejí nebo napájecí kolejnice, přičemž jakmile odpadla nutnost vézt si zásobu akumulované elektrické energie s sebou, elektromotor byl zbaven své největší nevýhody.

Na poli železniční dopravy se také již před 1. světovou válkou začal rýsovat nový, nekonvenční přístup – využití elektromagnetické levitace.

2 Perspektivní způsob dopravy?

Magnetická levitace nabízí řešení hned několika obtíží, jež limitují další rozvoj konvenčních pozemních dopravních prostředků – nejen směrem k vyšším rychlostem. Při pohybu vozidla využívajícího tento princip nedochází k fyzickému kontaktu s tratí, vůz se nad ní vznáší v příslušné výšce na „magnetickém polštáři“. Zcela tak odpadá vliv valivého odporu kola na kolejnici i třením vznikající teplo v ložiscích.

Aerodynamický odpor se svou závislostí na čtverci rychlosti zůstává hlavní překážkou pro její další zvyšování, přičemž přibývá elektromagnetický odpor je, zvláště za vysokých rychlostí, prakticky zanedbatelný [1].

Maglev umožňuje dosahovat nejen vysoké rychlosti, ale také větších zrychlení při rozjezdu a brzdění, což se značně projeví na zvýšení kapacity přepravovaných cestujících na kratších trasách. To spolu s tichostí a emisní čistotou vlastního provozu otevírá zajímavé možnosti v hustě osídlených aglomeracích. Při rychlostech kolem 500 km/h se potom maglev nabízí jako alternativa letecké dopravy na střední vzdálenosti, kdy čas strávený odbavením, osobní prohlídkou a dalšími před- a poletovými procedurami tvoří nezanedbatelnou část celkového času cesty. Oproti letounům mají pozemní dopravní prostředky vážný handicap v podobě vyšší hustoty vzduchu při zemském povrchu. Pro dosažení obdobné rychlosti je tak potřeba většího tahu.

Na rozdíl od konvenčních kolejových vozidel netrpí vzhledem k absenci pohyblivých součástí pohonný systém ani trať mechanickým opotřebením. Nižší energetická náročnost vlastního provozu a vyšší životnost mechanických součástí je vykoupena vysokými náklady na vybudování potřebné infrastruktury. Právě nutnost enormních počátečních investic s dlouhou dobou, za kterou se projekt stane výdělečným, je jednou z příčin dnešního malého rozšíření maglevů i jejich sporadického zavádění.

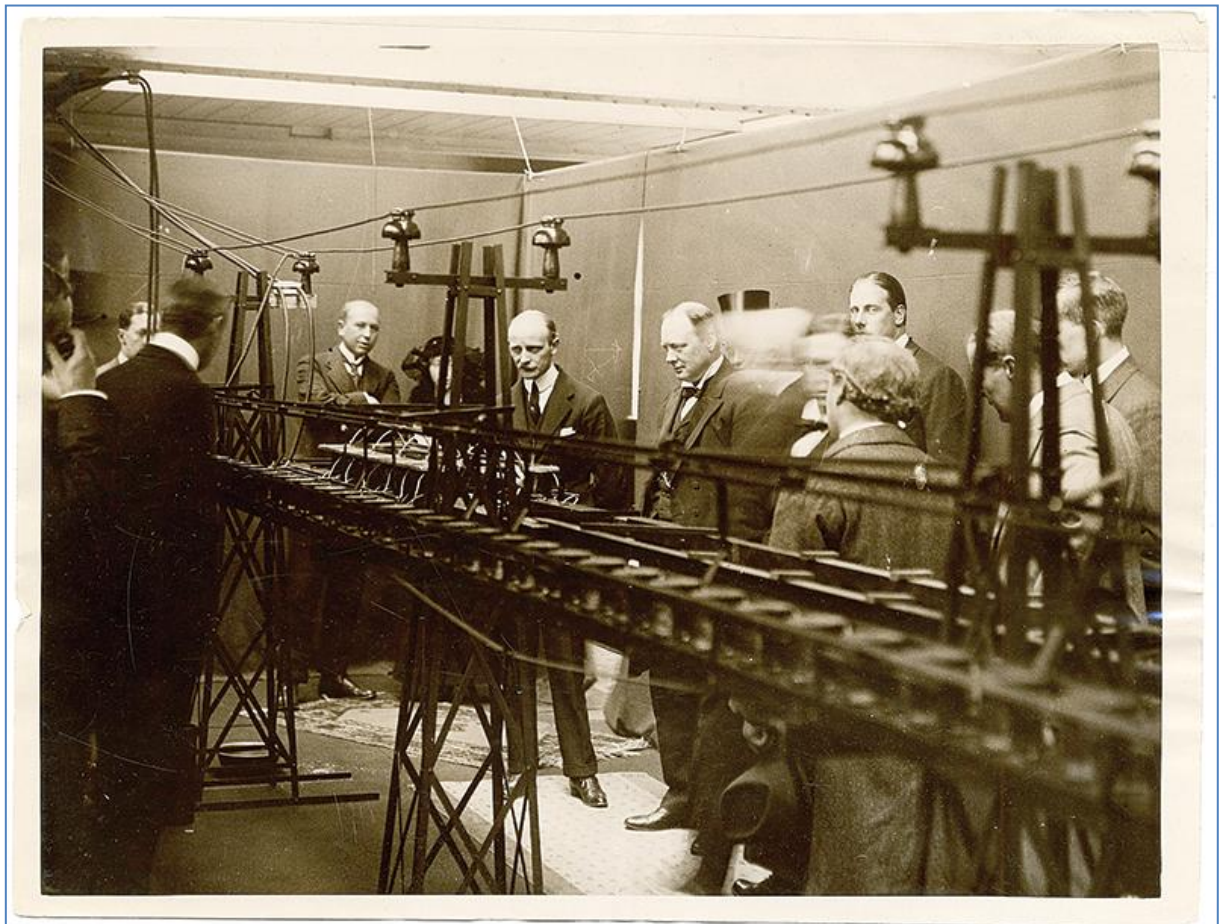
3 První krůčky

Když se hlouběji zanoříme do pozadí odhalení toho či onoho převratného vynálezu, většinou odhalíme řetězec postupných kroků, bez nichž by nikdy nemohl být uskutečněn, a které se táhnou i přes sto let zpět do minulosti. Nejinak je tomu u vlaků využívajících principu magnetické levitace.

Jako v případě proudového motoru, ponorek, kosmických nosičů a nespočtu dalších „zázraků techniky“ stáli na počátku vizionáři s revolučními nápady, ale bez technologií nutných k jejich úspěšné realizaci. První patenty maglevů se datují do prvních let dvacátého století. Jako vděčné objekty senzacechtivých žurnalistů získali někteří jejich autoři, jako Emile Bachelet, vrtkavou pozornost veřejnosti i představitelů vládních kruhů (viz obr. 1). Z praktického hlediska šlo však jen o technické hříčky.

Reálný dopravní systém založený na stejném principu nebyl v tehdejších technických možnostech. Bacheletem používaný systém levitace byl velmi energeticky náročný a nosnost nízká.

Cesta od technické hříčky ke spolehlivému dopravnímu prostředku byla dlouhá a trnitá a na její realizaci si svět musel ještě pár desítek let počkat. [3]



Obr. 1 Rok 1914, Winston Churchill, toho času první lord admirality, si se zájmem prohlíží demonstrátor levitujícího vagonu Emila Bacheleta (1863 - 1946) [3]

4 Základní dělení

Použitá technická řešení současných vysokorychlostních systémů využívajících princip magnetické levitace lze v zásadě rozdělit do dvou hlavních skupin.

- EMS
- EDS

EMS značí „Electromagnetic suspension“. Volně přeloženo jde o elektromagnetické zavěšení. Levitovaný objekt je elektromagnetickou silou přitahován k závěsu. Řídicí systém zajišťuje konstantní vzdálenost pomocí regulace proudu procházejícího cívkou elektromagnetu v závislosti na indikované poloze levitovaného objektu.

Systém EDS, tedy „Electrodynamic suspension“, rovněž využívá, respektive může využívat elektromagnetů, klíčové je ovšem slovo „dynamický“. Tato koncepce totiž pro generování vztlaku využívá odpudivou sílu mající původ v interakci magnetického pole „podvozku“ a proudů vyvolaných v traťových cívkách jeho *pohybem* vůči nim. Zatímco EMS maglevy jsou schopné levitace na místě, EDS vozy potřebují pro vyvolání levitačního efektu překročit hodnotu minimální rychlosti. [1]

5 EMS - Transrapid

5.1 Vývoj systému

Vývoj maglevů v Německu započal ve dvacátých letech minulého století prací Hermanna Kempera (1892 – 1977). V letech třicátých byla jeho některá řešení patentována, ovšem nedostatečná úroveň techniky až do konce šedesátých let brzdila souvislý praktický výzkum v této oblasti. [4]

Po vyhodnocení studie zadané ministerstvem dopravy SRN roku 1969 začaly tamní firmy s finanční podporou státu pracovat na prakticky použitelném maglevu. Mezi léty 1971 a 1978 vzniklo několik funkčních prototypů. Na základě výsledků těchto testů bylo rozhodnuto o vybudování zkušebního 31,5 km dlouhé testovací trati v Emslandu. Úsek dlouhý 20,5 km byl uveden do provozu v roce 1985, kompletně dokončen byl celý stavební projekt o dva roky později. Krom technologie maglevu se zde testovala rovněž nejvhodnější konstrukce vlastní trati. Větší část byla provedena jako železobetonová, menší pak jako čistě ocelová. Většina byla nadzemní, pozemní část měřila zhruba 6 km.

Jako první zde byl testován TR 06, který tu také překonal hranici 400 km/h. Soustavné testování prokázalo technickou vyzrálou vylepšeného TR 07. Další práce se proto zaměřily především na optimalizaci konstrukce pro sériovou výrobu. Výsledkem byl Transrapid 08, který roku 1993 překonal za běžných provozních podmínek rychlost 450 km/h. S touto verzí se počítalo do vozového parku plánované trasy spojující Berlín s Hamburkem. Pro získání dat z reálného provozu byl zaveden systém zážitkových jízd pro zájemce z řad veřejnosti, přičemž jeden vůz soupravy byl vždy vybaven jako měřicí.

Jinak nadmíru úspěšný provoz zkušební trati byl roku 2006 poznamenán vážnou nehodou, kdy při kolizi Transrapidu 08 s dieselovým servisním vozem zahynulo celkem 23 osob.

Z politicko-ekonomických důvodů přišel na přelomu tisíciletí dříve schválený projekt spojení Berlín - Hamburk o státní podporu. Testovací trať v Emslandu byla po vypršení licence roku 2011 uzavřena a roku 2012 bylo schváleno její rozebrání.

Navzdory všem dosaženým úspěchům tedy v současnosti žádná vysokorychlostní, byť zkušební, trať v Německu v provozu není a realizace všech plánovaných projektů je stále v nedohlednu. [1],[4]

Některé vozy měly to štěstí, že se dostaly do opatrování technických muzeí, zatímco jiné potkal osud vskutku smutný (viz obr. 2).



Obr. 2 Chátrající souprava Transrapid 06 [5]



Obr. 3 Transrapid 09 [5]

Nejpozoruhodnější je ale bezpochyby osud TR 09, posledního člena rodiny Transrapid. Po ukončení provozu emslandské zkušební trati potkal soupravu osud černokněžnické lokomotivy z knihy „Pohádky o mašinkách“ (viz obr. 3). Příliš dlouhá na řádné uskladnění v servisní hale čekala, co jí budoucnost přinese. Ta na sebe nakonec vzala podobu uzenářského podniku, který roku 1888 založila rodina již zmíněného průkopníka maglevů Hermanna Kempera. Firma, která je v současnosti stále ve vlastnictví čtvrté generace rodiny, vydražila v aukci soupravu za částku 200 000 €. Po převezení do sídla firmy má být interiér využit jako zasedací prostory. [5]

Konec zkušebního provozu v Německu však neznamenal konec systému Transrapid jako takového. Přes 30 let investic a technického pokroku tak nebylo promarněno.

V roce 2000 započala jednání s Čínou, která se tak nakonec stala první zemí se skutečnou komerční linkou maglevu. Tamní dvoukolejná, 32 km dlouhá trať spojuje šanghajské mezinárodní letiště Pudong s dalším dopravním uzlem, stanicí metra Longyang. Vybudování vlastní infrastruktury trvalo necelé dva roky. Po období intenzivního testování byla roku 2004 trasa uvedena do běžného provozu, přičemž ještě před spuštěním pravidelné dopravy na ní při testovací jízdě jeden vlak dosáhl rekordní rychlosti 501 km/h. Při běžném provozu trvá celá cesta soupravě 8 minut. Maximální dosažená rychlost je 430 km/h. Kapacita každé z provozovaných třívozových souprav (viz obr. 4) činí 574 cestujících. [1], [4], [6]



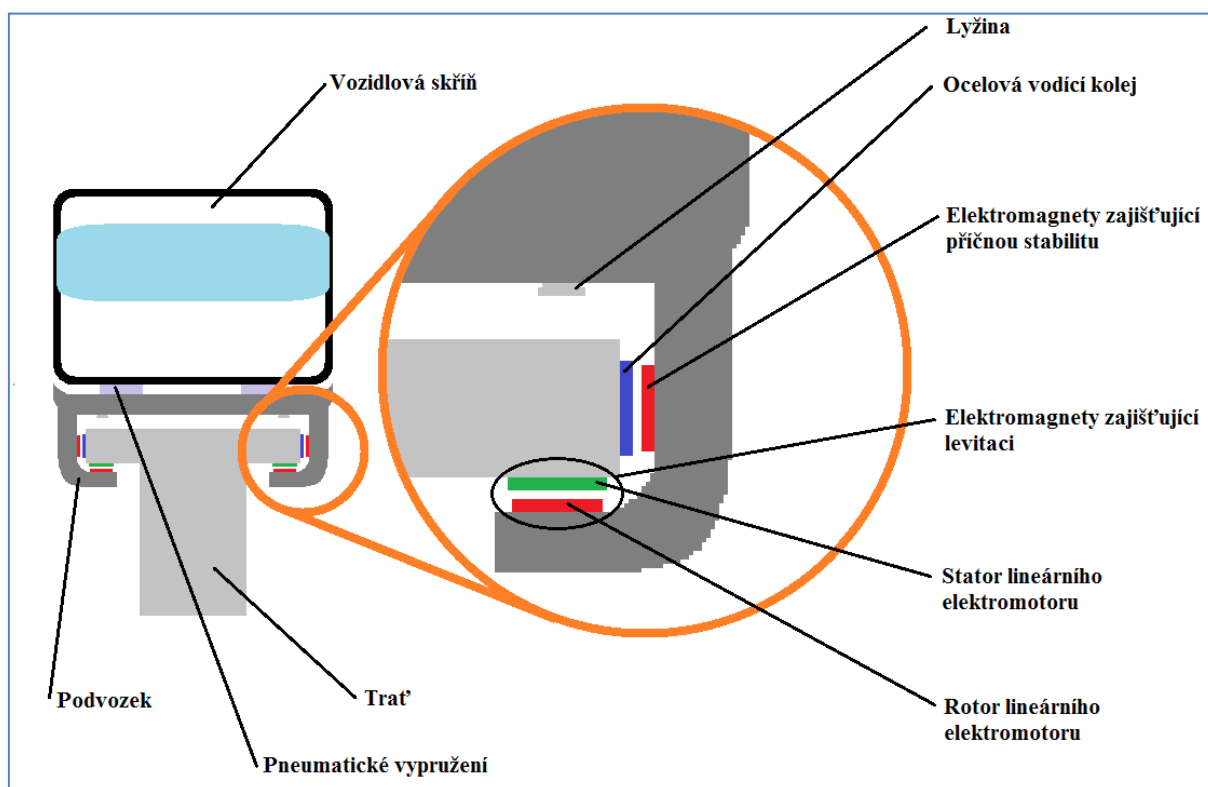
Obr. 4 Souprava šanghajského Transrapidu [7]

5.2 Technické provedení

System Transrapid se sestává z trati ve tvaru písmene „T“ a vagonu, který horní příčku této trati svým podvozkem obemývá (viz obr. 5).

Levitace je zajišťována řadami elektromagnetů na trati i podvozku vozidla, jež dohromady zároveň tvoří lineární elektromotor s dlouhým statorom sloužící k pohonu. Zajištění příčné stability je řešeno samostatnou řadou vodících elektromagnetů na bocích podvozku vozidla. Při výchylce se tyto magnety přitáhnou k ocelové koleji a vůz tak vycentrují.

Každý vůz soupravy je vybaven patnácti nezávislými nosnými a třinácti vodícími elektromagnety. Vzdálenost mezi statorom a rotorem je řídicím systémem udržována na nominální hodnotě 10 mm, reálně pak v rozmezí 8 až 12 mm. Mezera mezi vozem a svrškem trati je zhruba 15 cm, což zaručuje menší citlivost na znečištění a drobné překážky, např. v podobě sněhové pokrývky či spadných větví.



Obr. 5 Schéma uspořádání EMS systému Transrapid

Napájení veškerých palubních systémů je zajišťováno bezkontaktně. Pro případ jakékoli nepředvídané události týkající se dodávky elektrické energie je vůz vybaven záložními akumulátory, které zajistí hladký dojezd a dosednutí soupravy.

Pouze v takovém případě také strojvedoucí vlak skutečně řídí, během normálního provozu je souprava ovládána z řídicího střediska.

Průchodem třífázového proudu statorem (viz obr. 6) vznikne lineárně se posouvající magnetické pole, které s sebou vozidlo unáší. Při brzdění se motor naopak chová jako generátor a dochází k rekuperaci elektrické energie.

Traťové statory jsou elektrifikovány po až 4 km dlouhých úsecích, přičemž pod napětím je vždy jen ten, na kterém se souprava aktuálně nachází. Krom úspory energie znamená toto řešení i snadnější možnost identifikace místa případné poruchy.



Obr. 6 Transrapid – třífázové statorové vinutí [8]

Pro stání v zastávce nebo odstavení je vagon na spodní straně vybaven kluznými ližinami, které brání poškození při kontaktu s tratí.

Za pozornost stojí rovněž vypružení. Moderní konvenční železniční vozy používané k přepravě osob se vyznačují dvoustupňovým vypružením. Primární vypružení tlumí rázy mezi dvojkolím a rámem podvozku, sekundární pak mezi rámem podvozku a skříní. V sekundárním vypružení Transrapidu je použito pneumatických pružin.

Roli primárního vypružení přejímají vzhledem k absenci dvojkolí aktivní levitační elektromagnety, které plní funkci pružiny i tlumiče zároveň. [1], [6]

Nejzajímavějším mechanickým prvkem trati jsou výhybky, jejichž konstrukce musí odrážet skutečnost, že vagon je na trať vlastně navlečen (viz obr. 7).

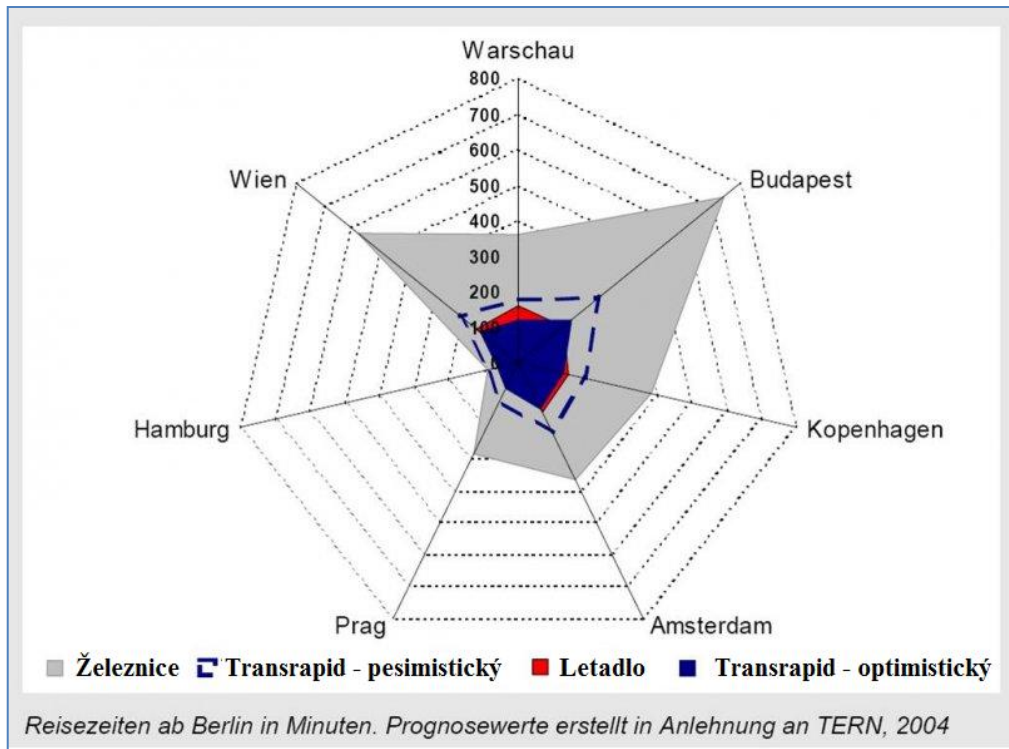


Obr. 7 Výhybka Transrapid [9]

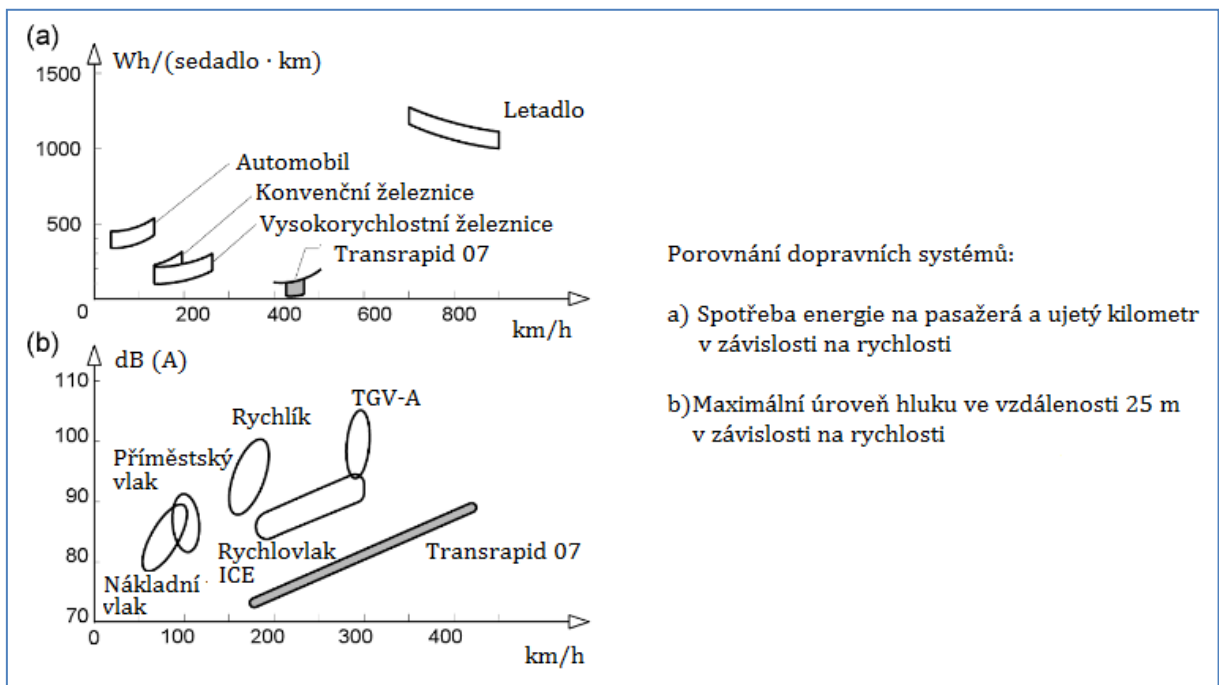
Výhybka se sestává z elastického, na příčných kolejnicích posazeného úseku trati o délce 80 až 150 metrů. Maximální posunutí jeho okraje mezi krajními polohami činí 3,6 metru. [8] Výhybky jsou také jedinými místy, kde teoreticky vyvstává možnost vykolejení, proti němuž je systém jinak vysoce odolný.

5.3 Další charakteristické vlastnosti Transrapidu (08)

- Typické vedení trati na pilířích není z technického hlediska nutné, jde však o žádoucí bezpečnostní prvek.
- Vzhledem k vázání trakce na trať místo vozidlo je vyloučen pohyb dvou souprav na stejném úseku trati v opačném směru, což dále přispívá k bezpečnosti provozu.
- Zrychlení na 300 km/h lze dosáhnout na dráze 5 km.
- Sklon trati může teoreticky dosáhnout až 10%.
- Spotřeba energie při rychlosti 400 km/h činí 60 Wh/(sedadlo·km)
- Aerodynamický odpor při rychlosti 400 km/h činí 33 kN
- Vyšší přepravní rychlost při dosažení nižší energetické spotřeby a hlukových emisí ve srovnání s jinými dopravními prostředky (viz grafy 1 a 2). [1], [4], [6], [9]



Graf 1 Porovnání cestovní doby v minutách mezi Berlínem a metropolemi střední Evropy [4]



Graf 2 Porovnání dopravních systémů z hlediska spotřeby energie a emisí hluku [4]

6 EDS

6.1 SCMaglev

Jak udává název, magnetické pole, jež pro levitaci a vedení využívají SCMaglevy, je generováno pomocí supravodivých elektromagnetů. S těmi je spojena jedna nevýhoda tohoto řešení – vysoké nároky na jejich dostatečné chlazení.

6.1.1 Vývoj systému

Počátek dnešních japonských systémů se datuje do šedesátých let, kdy byla zahájena čilá spolupráce Japonců s americkými vědci. Ti stáli za prvními návrhy maglevů využívajících supravodivých elektromagnetů, avšak jejich vlast nebyla vhodným místem pro širší realizaci těchto myšlenek. Japonsko toho času slavící úspěchy se svými Shinkanseny naopak jevílo o perspektivní technologii rychlovlaků eminentní zájem. Rodící se systém Transrapid byl japonskými inženýry rovněž zvažován, ale byl zavržen z důvodu horší odolnosti vůči seizmické aktivitě, tak charakteristické pro toto souostroví. Od počátku sedmdesátých let byla technologie SCMaglev v Japonsku soustavně rozvíjena.

Roku 1972 bylo na RTRI (Výzkumný technický železniční institut) dosaženo na zkušební dráze stabilní levitace. O tři roky později se s koncem reálného výzkumu v USA stalo Japonsko fakticky jediným centrem dalšího vývoje SCMaglevu. V roce 1977 bylo v Myazaki otevřeno specializované středisko jejich výzkumu. Roku 1979 na tamní trati dosáhl vůz bez posádky ML-500 rychlosti 517 km/h.

Vůz MLU001 s posádkou překonal o osm let později rychlost 400 km/h. Dosažené úspěchy vedly k rozhodnutí postavit rozsáhlejší zkušební trať v prefektuře Yamanashi s tím, že v případě zdárného vývoje bude moci být začleněna do možného spojení Tokio – Nagoya – Ósaka. V současnosti se hovoří o zahájení provozu na této trase do roku 2030.

Stavba zkušebního úseku byla zahájena roku 1990, první jízdy v mezidobí navržených a zkonstruovaných vozidel na ní započaly o sedm let později.

Již první rok provozu tam překonal MLX01 (viz obr. 8), ještě bez lidské osádky, rychlost 550 km/h. Tato verze se ukázala být navýsost zdařilá a s lidmi na palubě si překonání této rychlostní mety zopakovala roku 1999.

Její vylepšená varianta si roku 2003 připsala dosažení rychlosti 581 km/h. [2],[10]



Obr. 8 Úspěšný MLX01 [11]

Konečně 21. dubna 2015 vytvořil SCMaglev pokročilejšího typu L0 (viz obr. 9) dosud platný rychlostní rekord pro vlaky určené k přepravě cestujících, který činí 603 km/h.

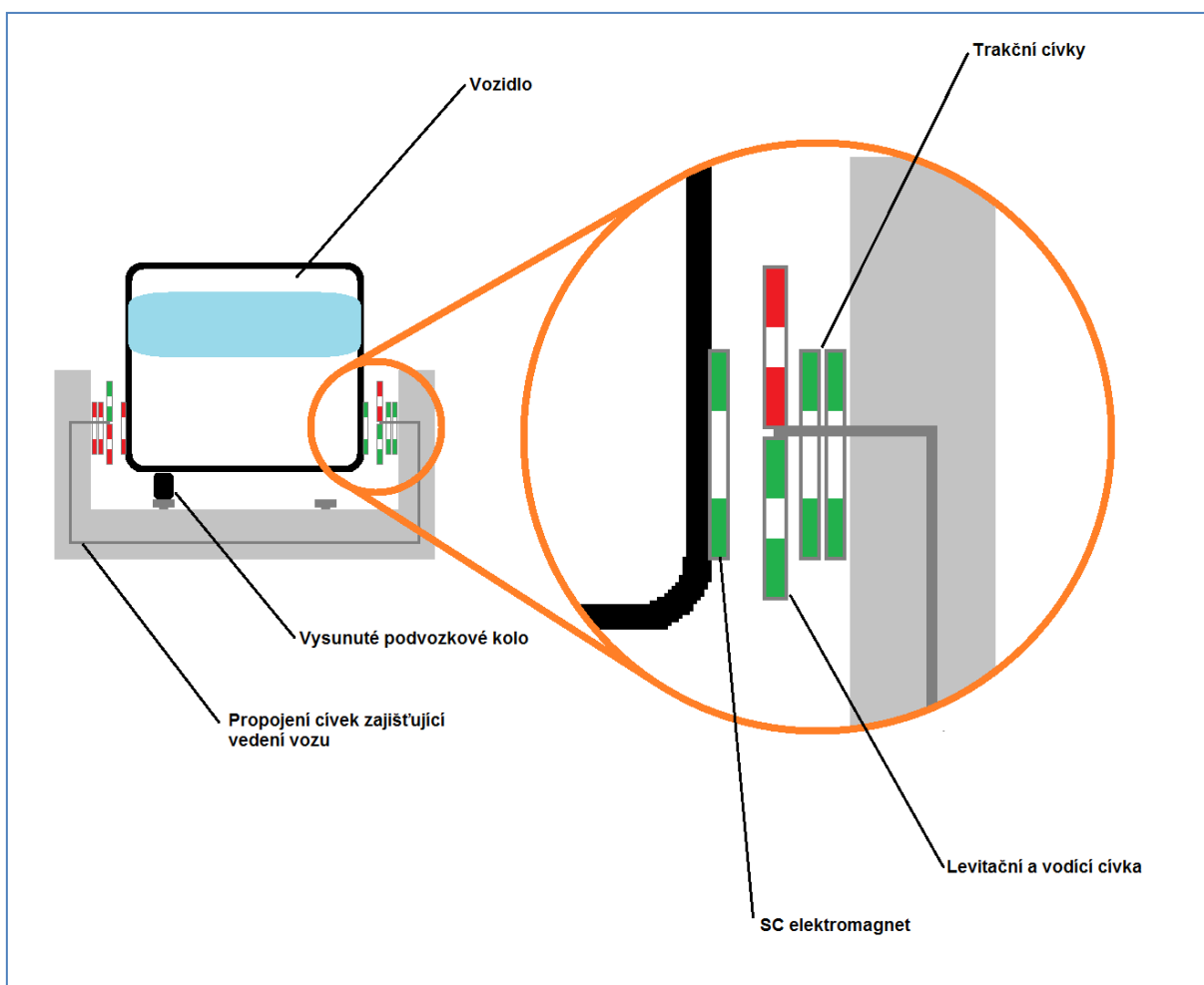
[12]



Obr. 9 Krajní vůz soupravy L0 bez instalovaného podvozku [13]

6.1.2 Technické provedení

Trať SCMaglevu tvoří železobetonová konstrukce tvaru písmene U, v němž se vlastní vlak pohybuje ve výšce 10 cm (viz obr. 10). Existence rychlostní hranice kolem 100 km/h pro levitační efekt s sebou přináší nutnost vybavit EDS vozy pomocným podvozkem pro jízdu rychlostí nižší. Tento podvozek je velice podobný leteckým a jako u aerodynamicky optimalizovaných letounů je řešen jako zatahovací. Menšími vysouvacími koly je řešeno i vedení při nízkých rychlostech. Spolu s konstrukcí kolového podvozku je z oblasti aeronautiky převzata také jedna z použitých metod brzdění. Krom kotoučových brzd a možnosti rekuperace je souprava vybavena vysouvacími aerodynamickými brzdnými štíty, umožňujícími zpomalení z velmi vysokých rychlostí, za kterých je použití kotoučových brzd limitováno enormním vývinem tepla. Vlakové elektromagnety jsou situovány v oddělených rámech, připomínajících svým umístěním konvenční železniční podvozky.



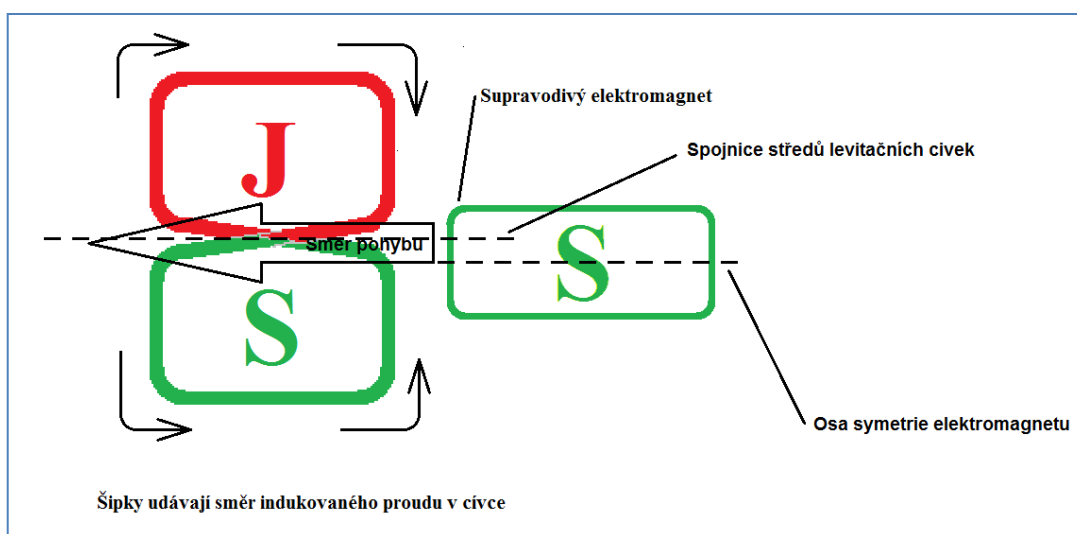
Obr. 10 Schéma uspořádání EDS systému SCMaglev

Jak levitace tak vedení využívá tzv. „Null flux“ efekt. V bočnicích traťového koryta jsou po celé délce instalovány pasivní cívky ve tvaru číslice osm (viz obr. 11).

Podvozkový elektromagnet se standardně většinou své plochy nachází pod překřížením traťové cívky. Při pohybu je elektromagnetickým polem vyvolaným indukovanými proudy odpuzován od dolní a přitahován k horní části „osmičky“. Jak se přemírou vztlaku celý vůz zvedá, vodorovná osa symetrie elektromagnetu se blíží k pomyslné ose vedené středy „osmiček“, indukovaný proud v horní a dolní smyčce cívky se vzájemně čím dál více ruší, magnetické pole slábne a gravitace spolu s přítlačnou aerodynamickou silou vůz tlačí směrem dolů.

Pro zajištění vedení jsou levitační cívky ležící proti sobě vodivě propojeny do obdoby výše popsaných „osmiček“. Podle osové symetrie tímto spojením proud neprotéká, pohybuje-li se vůz uprostřed trati. Pokud tomu tak není, kabelové propojení cívek má za následek zesílení přitažlivých a odpuzivých sil na příslušných stranách podvozků, navracející vůz do středu trati.

K pohonu slouží dvě rady vzájemně posunutých trakčních cívek. Jejich proměnlivá magnetická polarita působí tak, že podvozkové elektromagnety jsou odpuzovány od cívky, jejíž střed tím svým právě minuly a přitahovány k cívce následující. Stálým opakováním tohoto procesu je vlak poháněn vpřed. U dřívějších vývojových verzí bývalo použito pouze jedné řady trakčních cívek, vznik nežádoucích harmonických kmitů byl časem úspěšně vyřešen právě jejich zdvojením. Současným trendem je naopak sdružení trakčních a levitačních cívek do jedné. Podobně jako v případě Transrapidu je zdrojem energie třífázový střídavý proud, přičemž je napájen jen ten úsek trati, ve kterém se souprava aktuálně nachází. [1], [2], [10]



Obr. 11 Boční pohled na levitační traťovou cívku

6.2 Inductrack

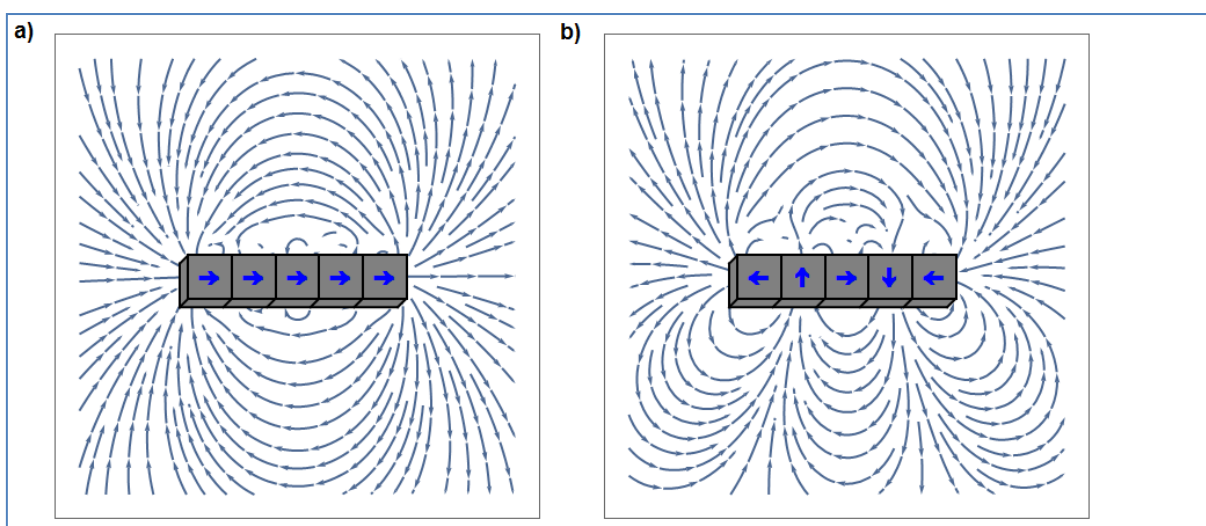
Eliminaci nutnosti chlazení vyplívající z použití supravodivých elektromagnetů nabízí systém nesoucí název Inductrack. Princip levitace Inductracku se principiálně neliší od „konvenčních“ EDS systémů, místo elektromagnetů ovšem využívá silné permanentní magnety ze vzácných zemin.

6.2.1 Halbachova soustava

Aby bylo jejich magnetické pole využito maximálně, je usměrněno uspořádáním těchto magnetů do tzv. Halbachovy soustavy.

Ta nese jméno německého fyzika Klause Halbacha (1925 - 2000), který se během 80. let řazením permanentních magnetů zabýval při americké Národní laboratoři Lawrence Berkeleyho v souvislosti s prací na lineárních urychlovačích částic.

Uspořádání permanentních magnetů nesoucí jeho jméno má za následek zesílení intenzity magnetického pole po jedné straně soustavy, přičemž na protilehlé straně je jeho intenzita minimální (viz obr. 12). Pozitivem tohoto efektu je při použití v dopravní technice, krom zesílení vztlakové síly, také omezení expozice instalované elektroniky a přepravovaných osob magnetickému poli. [1], [14]



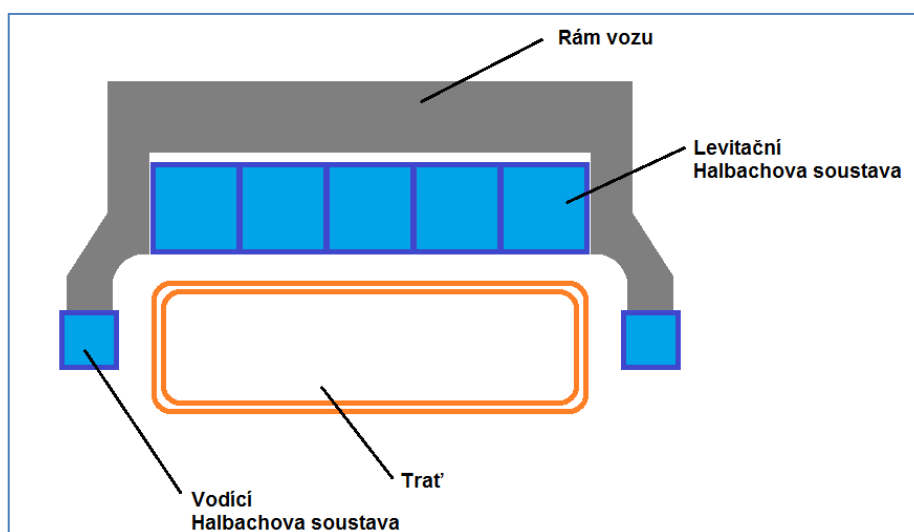
Obr. 12 Průběh magnetických siločar: a) segmentovaného tyčového magnetu

b) Halbachovy soustavy [15]

6.2.2 Technické provedení

Levitace i vedení je zajišťováno výše popsanými Halbachovými soustavami. Dopředná rychlost nutná pro levitaci je obecně nižší, než u SCMaglevů.

Žádná obdoba německých či Japonských zkušebních tratí pro vysokorychlostní maglev zatím fyzicky neexistuje, navíc těžiště aktuálního vývoje leží spíše v systémech připadajících v úvahu jen pro městskou dopravu. [1], [14]



Obr. 13 Schéma jednoduchého provedení systému Inductracku

Bez použití aktivních prvků při vedení a levitaci by byla kontrola nad oběma funkcemi omezená. (Autoři některých návrhů jako by si nepřipouštěli existenci bočního větru, který by mohl snadno způsobit výchylku, se níž geometrie trati a podvozku „nepočítá“.)

7 Shrnutí a porovnání předností i omezení uvedených přístupů

Transrapid

Přednosti: V provozu léty prověřený systém nevyžadující dodatečné investice do vývoje, připravený k realizaci v současné podobě.

Všestrannost využití – díky schopnosti levitace nezávislé na velikosti dopředné rychlosti může být použit v rozličných aplikacích počínajících hromadnou dopravou ve městech, po rychlá spojení mezi velkoměsty v konfiguraci s pěti či více vozy. V Číně již projevila životaschopnost jako spolehlivý prostředek pro přímá rychlá spojení s vysokým objemem přepravovaných osob mezi dopravními uzly – „Airport Express“.

SCMaglev

Pozitiva: Rovněž prověřený systém nutně nevyžadující dodatečné investice do vývoje, připravený k realizaci.

Omezení: Má smysl pouze pro vysokorychlostní spojení minimálně na střední vzdálenosti. Krom zmenšení vlastní množiny potenciálních aplikací jako takové to rovněž znamená, že zákazník musí předem počítat s vybudováním poměrně dlouhé trati s výraznějšími důsledky v případě nenaplnění ekonomických předpokladů, což je nepochybně další odrazující faktor.

Inductrack

Přednosti: Různé formy uspořádání levitačních magnetů slibují možnost uplatnění v podobně širokém spektru jako Transrapid, navíc s reálnou možností využití i v nákladní přepravě. Z hlediska konstrukční složitosti jde o velmi jednoduché řešení.

Omezení: Systém dobře zvládnutý pouze teoreticky, absence praktických zkušeností z provozu v reálných podmínkách.

Zatímco magnetické pole ostatních systémů je ovladatelné, závislé na řídicím systému, permanentní magnety současných prototypů nelze vypnout.

Na žádném dostupném snímku nebyly pozorovány obdoby ovládání magnetických brzdových či upínacích systémů. To by v reálném provozu znamenalo obtížné odstraňování drobných ocelových předmětů, špon, či prachu, tedy materiálu, jehož jsou nejen depa kolejových vozidel zpravidla plná. Rovněž práce s běžným ručním náradím a veškerými ocelovými součástmi v blízkosti podvozků by byla vyloučena.

Koncepce rychlovlaků maglev jako taková:

Přednosti:

Nižší energetická spotřeba na pasažéra a nižší hlučnost oproti ostatním dopravním prostředkům. Nižší náklady na údržbu (úspora 30-50% [7]) a delší životnost díky menšímu počtu mechanicky opotřebovávaných součástí vozidla i trati. Možnost dosažení vyšších rychlostí oproti jiným pozemním dopravním prostředkům.

Výhradní využití elektrické energie znamená teoreticky úplnou nezávislost na fosilních palivech.

Využití lineárních elektromotorů umožňuje oproti konvenční železnici dosahovat vyšších zrychlení, což vede ke zvýšení plynulosti dopravy.

Omezení:

Oproti konvenčním rychlovlakům je infrastruktura nekompatibilní s jakýmikoli jiným dopravním systémem a je nutné vybudovat ji od základu novou. Náklady na vybudování stejného úseku vysokorychlostního železničního koridoru vedeného stejným terénem od píky přitom nejsou nijak nižší, než by tomu bylo u trati maglevu. Ten může těžit ze své schopnosti překonávat větší převýšení, což by si vyžádalo méně terénních úprav, spolu s možností volit pro trať přímější trasu. Reálné nové vysokorychlostní trati ovšem zase bývají budovány na bázi již existujících tras, což nezanedbatelnou část nákladů ušetří.

Největším handicapem maglevu není nic jiného, než že byl zrozen do světa, který už měl své dopravní prostředky pro všechny účely k dispozici. Maglev může být rychlejší, tišší i úspornější, ale ve většině vyspělých zemí existuje hustá, dostatečně kvalitní síť hromadné dopravy, konvenční železnice, rychlostních silničních komunikací a letišť. Poptávka po mobilitě je zatím uspokojována tradičními dopravními prostředky, které se stále zdokonalují. Paralelní budování nového dopravního systému proto asi není, minimálně v Evropě, na pořadu dne. Samo za sebe hovoří, že Transrapid se neujal v Německu, kde vznikl, ale v bouřlivě se rozvíjející Číně.

Část druhá

8 Laboratorní model

8.1 Výběr vhodné metody levitace

Realizace laboratorního modelu s použitím znalostí aktuálních technologií používaných u vysokorychlostních vlaků na magnetickém polštáři naráží na dva zásadní problémy.

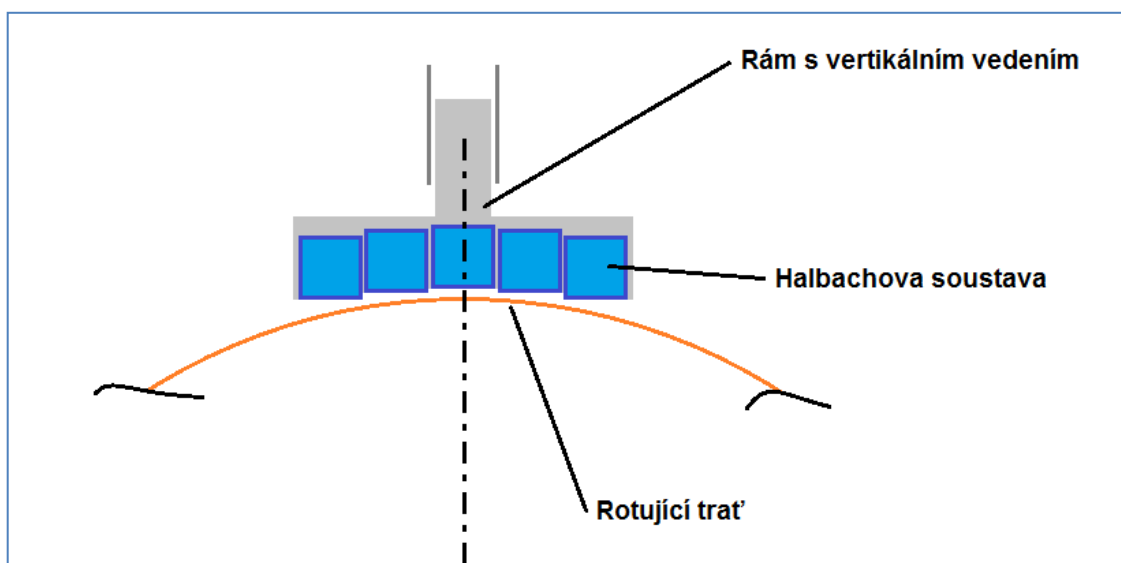
Prvním je skutečnost, že laboratorní kolejiště stolních rozměru nemůže být řešeno jako vysokorychlostní. Druhým, neméně závažným problémem, je otázka rozměrů. Systém, který funguje v „životním měřítku“ nelze prostě zmenšit při poměrném zachování jeho funkčních vlastností.

Rozhodování, jakou technologii levitace pro model nakonec zvolit, bylo proto krom teoretické části této práce založeno i na studiu použitých řešení u tematicky obdobných projektů i komerčních modelů charakteru sofistikovaných „hraček“.

8.1.1 Zvažovaná řešení

Pro svou přirozenou stabilitu a konstrukční jednoduchost byl jako první zvažován systém Inductrack. Dohledaná funkční laboratorní provedení této koncepce jsou zpravidla řešena s využitím relativity rychlosti vůči vztažné soustavě.

Trať kružnicového tvaru v nich vykonává rotační pohyb, zatímco rám s magnety je stacionární, s jedním stupněm volnosti ve směru normálovém, respektive radiálním (viz obr. 14).



Obr. 14 Schéma konstrukce laboratorního levitátoru systému Inductrack

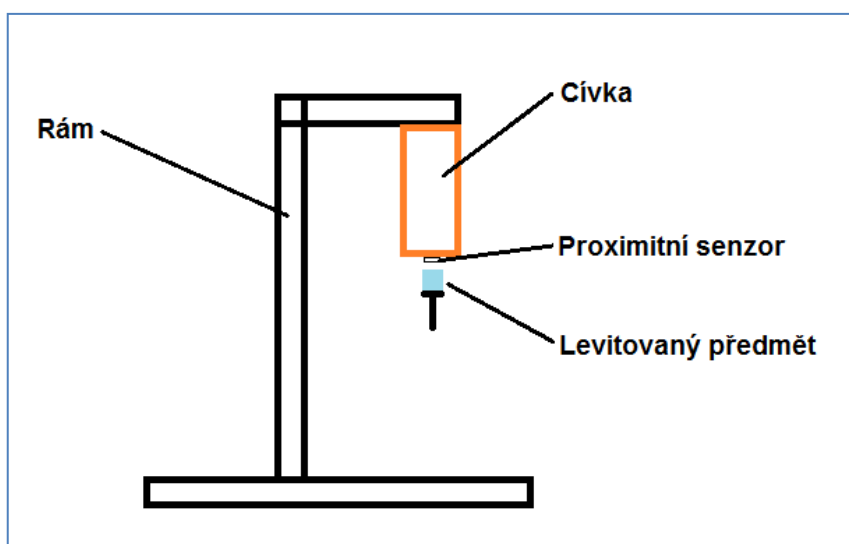
Kritická rychlost, při které soustava tvořená neodymovými magnety vyvine dostatečný vztlak pro levitaci sebe sama nad tratí z vinutého měděného drátu, se u nich pohybuje kolem 10 m/s. Při nutnosti nést navíc hmotnost konstrukce vagonu, případně další 2 stabilizační Halbachovy soustavy, které by se na vyvíjení vztlaku nepodílely, by tato hodnota byla nutně ještě o něco vyšší.

V laboratorním „stolním“ měřítku byla proto realizace kolejiště s pohybujícím se vozidlem systému Inductrack shledána prakticky neproveditelnou.

Použití obdoby japonského systému SCMaglev nebylo ze zřejmých důvod vůbec zvažováno.

Funkční EMS demonstrátory stolního měřítka mají též víceméně jednotné provedení. Cívka elektromagnetu je umístěna v horní části nosného rámu. Použitý proximální senzor potom určuje, co může být vlastním levitovaným předmětem. V případě použití Hallovy sondy je to zpravidla neodymový magnet s přídatnou stabilizační zátěží, posouvající jeho těžiště co nejnižší. U optických senzorů potom i jakýkoli předmět vhodné hmotnosti, vyrobený z oceli.

Nejjednodušší provedení ani nepoužívají žádného počítačového řídicího systému, ovládání elektromagnetu zajišťuje obvod s tranzistorem v roli spínače pracujícího s výstupním napětím Hallovy sondy.



Obr. 15 Schéma konstrukce stolního levitátoru systému EMS

Nastavení parametrů programu nebo vlastnosti použitého řídicího obvodu potom určují, jakou hmotnost je sestava schopna stabilně levitovat, i velikost výškového intervalu, ve kterém je tato levitace stabilní. Stabilita systému se odvíjí především od nominální hodnoty vzdálenosti mezi cívkou a levitovaným objektem. Čím menší její hodnota je, tím větší změnu působící síly vyvolá jakákoli fluktuace a tím kratší musí být reakční doba systému regulace elektromagnetu.

Intuitivně se nabízí možnost postavení několika rámců s cívkami za sebe, čímž by mohla být teoreticky vytvořena trať neomezené délky. Vzhledem k omezené možnosti použití počítačových simulací by jediným způsobem jak takový systém ověřit bylo vybudování úseku o minimálně třech cívkách. To by vyžadovalo množství času i lakovaného vodiče na výrobu vlastních cívek, přičemž funkčnost by byla nejistá. Odladění řídicího programu, ovládajícího elektromagnety by bylo komplikováno značným množstvím proměnných. Snímání polohy při statické levitaci je nesrovnatelně jednodušší, než by tomu bylo při přechodech mezi poli jednotlivých traťových cívek. Z těchto důvodů byl tento přístup zavržen.

Pro předmět této práce je nejpodstatnější malá stabilně levitovatelná hmotnost při modelových rozměrech, materiálech, součástkách a zdrojích napětí.

Kolejiště reflektující řešení systému Transrapid by totiž vyžadovalo doslova postavení obvyklé koncepce laboratorních EDS levitátorů na hlavu. Cívky v tomto uspořádání by musely být schopny unést minimálně sebe samy a konstrukci vagonu s řídicí elektronikou. Zatímco při obvyklé laboratorní konstrukci není velikost ani hmotnost cívky limitujícím faktorem, zde by tomu tak nebylo.

Síla, kterou je cívka schopna působit na feromagnetický předmět je přímo úměrná druhé mocnině procházejícího proudu a počtu závitů, první mocnině plochy, nepřímo pak druhé mocnině tloušťky vzduchové mezery mezi ní a předmětem. Interakci s permanentním magnetem lze popsat podobně, ale pro představu o problémech stačí i jednodušší předpis. Pokud budeme chtít cívku odlehčit použitím tenčího vodiče, zvětšíme tím její odpor, čímž při použití tvrdého zdroje s konstantním napětím poklesne hodnota protékajícího proudu.

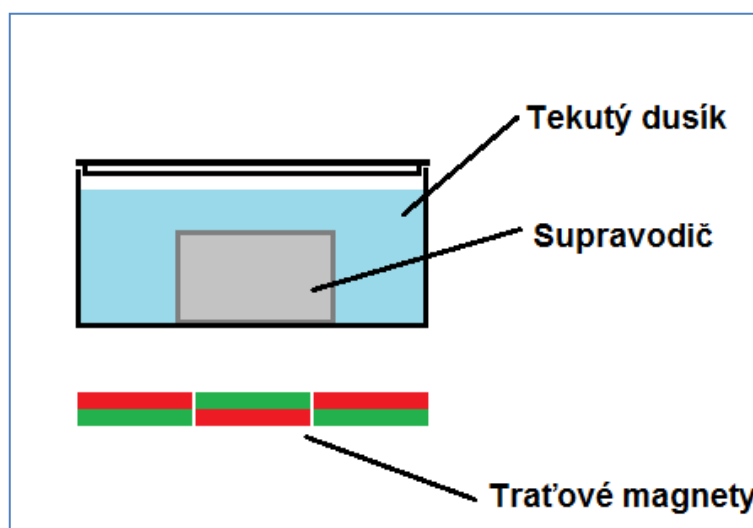
Navíc se při jeho průchodu začne cívka výrazněji ohřívat, což učiní intenzitu elektromagnetické síly výrazně časově závislou.

Dostatečně lehký a přitom výkonný zdroj napětí, který by umožnil úplnou autonomii vozidla, představuje další problém.

Jediný dohledaný funkční demonstrátor vlaku využívajícího magnetické levitace s bezkontaktním vedením na trati v měřítku odpovídajícím stolnímu kolejišti využívá tzv. Meissnerova jevu. Tato koncepce se nazývá SML – supravodivá magnetická levitace. Z projektů reálných maglevů stojí za zmínku italský systém UAQ4. [16] Podchlazený supravodič vytěsňuje ze svého objemu magnetické pole trati a dokáže se nad ní díky tomu stabilně vznášet, ne nepodobně lehkému míčku nad svislou trubicí, z níž proudí vzduch. Vhodné uspořádání traťových magnetů zajistí i spolehlivé vedení při dopředném pohybu.

Veškerá potřebná energie pro samotnou levitaci se spotřebovává na chlazení nosných supravodičových prvků.

Vlastní vagon je u jednoduchého modelového provedení řešen jako nádrž na kapalný dusík (viz obr 17). To umožňuje delší funkci takového demonstrátoru. Po ohřátí supravodiče nad kritickou teplotu levitace ustává. Nosnost je nicméně po dobu jednotek minut dostatečná i pro instalaci nějaké formy pohonu.



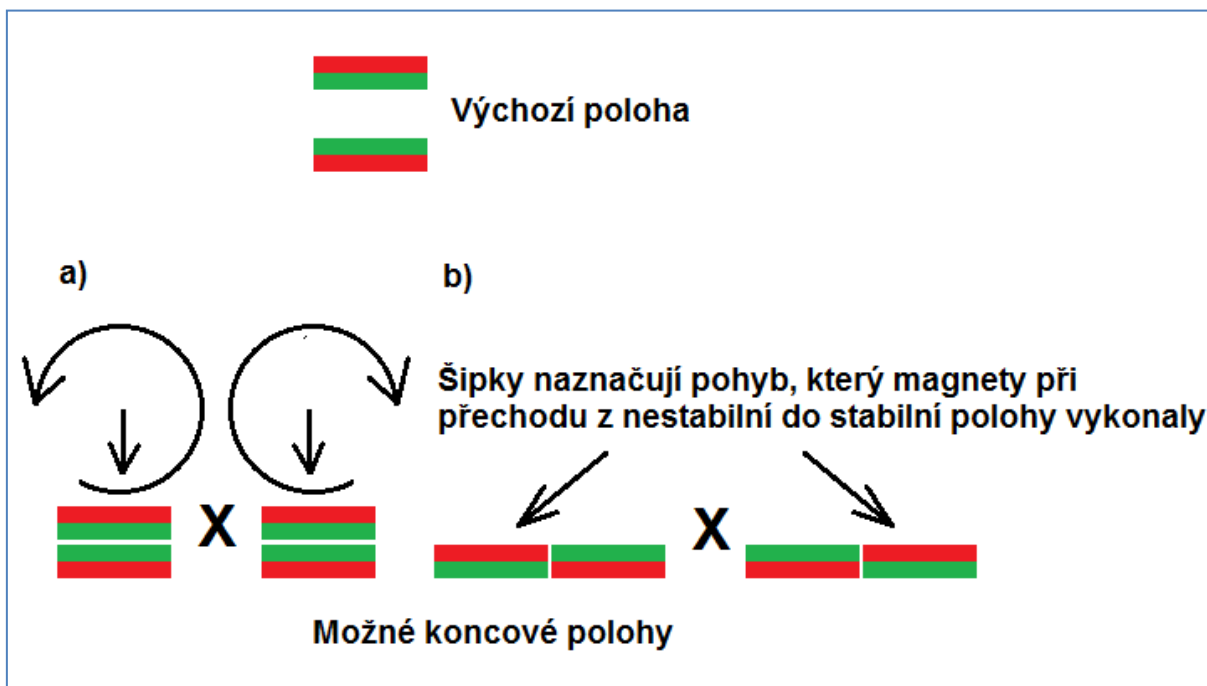
Obr. 16 Schéma možného uspořádání modelu maglevu využívajícího Meissnerův jev

System sám je principiálně jednoduchý a funkční, při dodržení pravidel bezpečnosti práce jde o pravděpodobně o nejlepší způsob realizace modelového kolejiště s vozem levitujícím na magnetickém polštáři.

Problémem tohoto řešení je krom dostupnosti samotného supravodiče nutnost mít pro provoz kolejiště k dispozici zdroj kapalného dusíku.

8.1.2 Zvolená koncepce

Na základě uvedených úvah vznikla finální idea laboratorního modelu. Vztlak je zajišťován odpudivou silou permanentních magnetů. To s sebou přináší problémy se stabilitou.

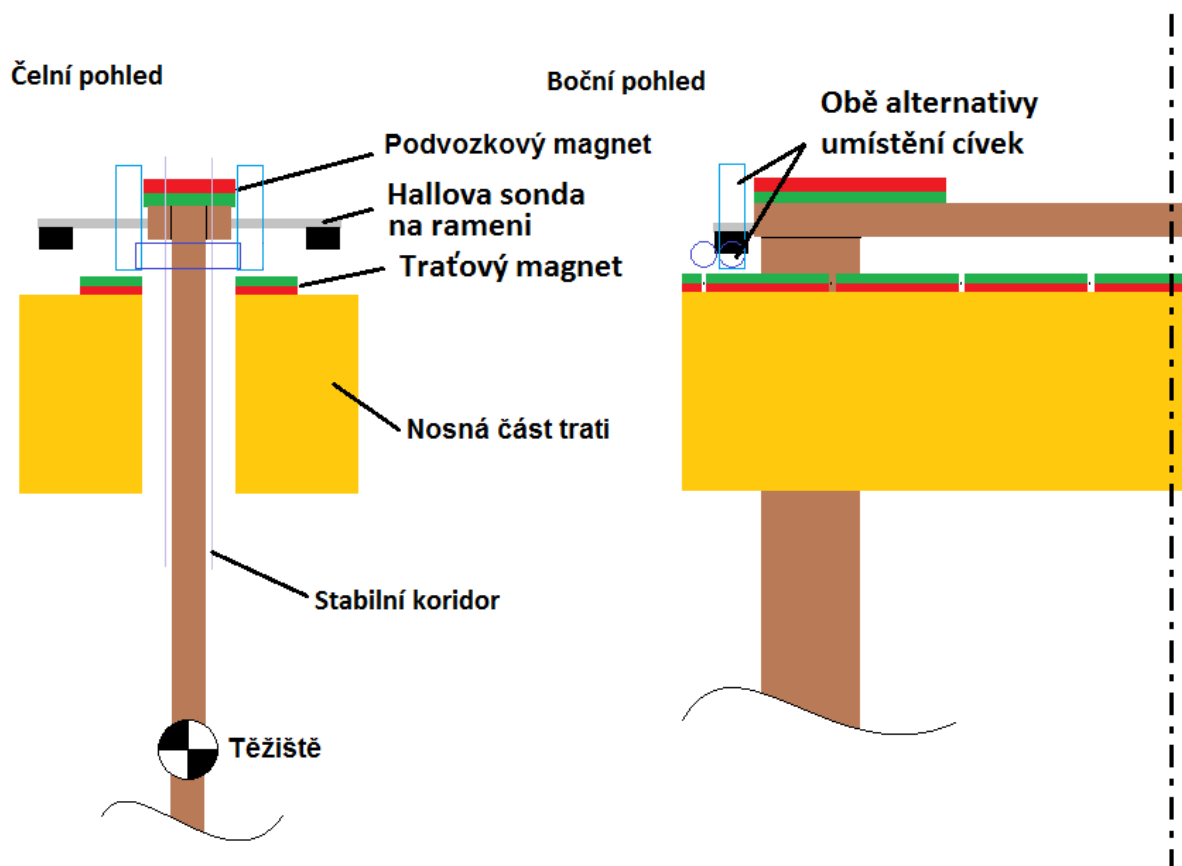


Obr. 17 Chování dvojice odpuzujících se permanentních magnetů

Aby bylo zamezeno tendenci levitujícího magnetu natočit a přitáhnout se k traťovému magnetu a zároveň aby nemohlo dojít k posunutí a přitáhnutí k traťovému magnetu z boku (viz obr. 17), je trať řešena jako dvoukolejná, s maximem hmoty vagonu umístěným co nejnižší (viz obr. 18).

Předtím, než dojde k některému z výše popsaných dějů, se stojina spojující podvozek, (respektive „nadvozek“) s vlastním vagonem opře o trať a úplnému přitáhnutí magnetů zabrání.

Na obou koncích vagonu budou instalovány dva proximální senzory a dvojice aktivních elektromagnetů. Pokud se bude vůz nacházet v pomyslném stabilním koridoru uprostřed trati, aktivní prvky nebudou zasahovat. Jakmile dojde k příčné výchylce mimo tento koridor, senzor ji detekuje a řídicí systém vpustí do příslušných cívek proud. Po navrácení do vymezeného koridoru systém cívku opět odpojí. Pro regulaci tohoto proudu se počítá s použitím pulzní modulace.



Obr. 18 Schéma trati a vagonu

8.2 Materiály a technologie výroby trati a vagonu

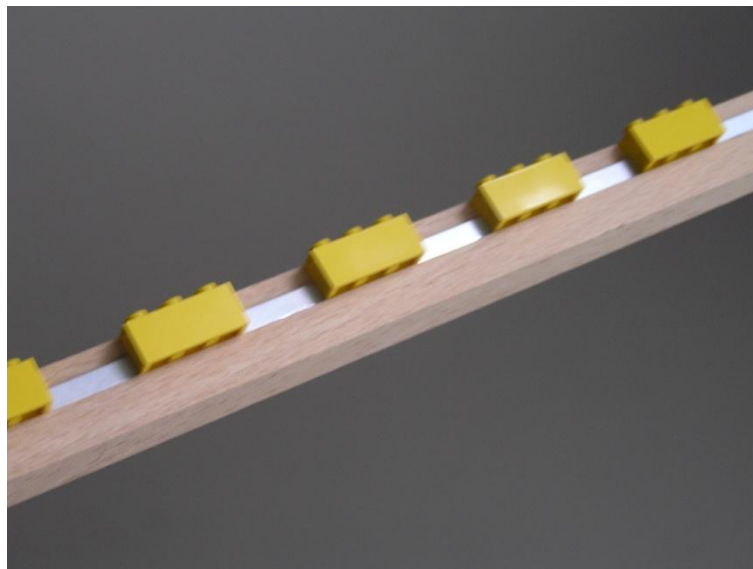
Pro zhotovení modelu byla k dispozici možnost 3D tisku součástí z plastu, nicméně po dokončení návrhu finálního řešení bylo rozhodnuto ji nevyužít. Metoda 3D tisku umožňuje efektivně vytvářet i velmi komplikované díly. V případě tohoto modelu mají potřebné součásti jednoduché tvary a její použití nemá v tedy v tomto případě žádné opodstatnění. Model byl zhotoven běžnými modelářskými postupy. V případě dalšího vývoje zvolené koncepce se nabízí využití technologie 3-d tisku pro výrobu obloukových úseků trati.

8.2.1 Trať

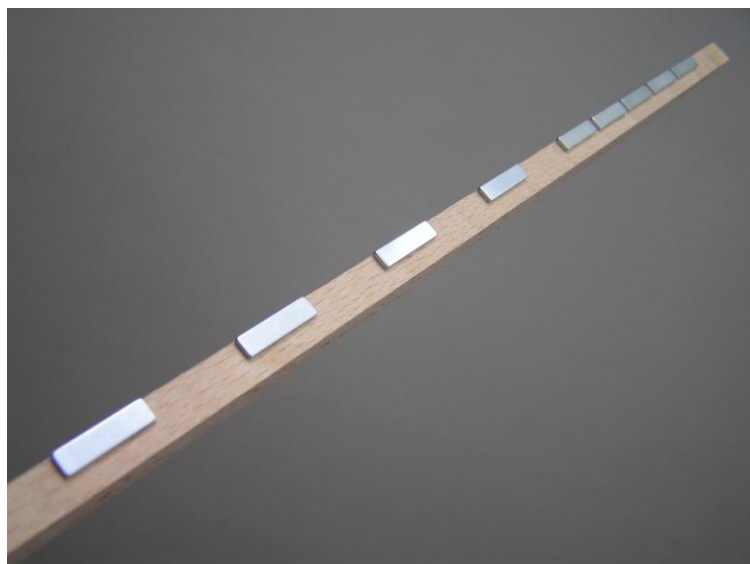
U modelu jsou jako zdroj vztlakové síly použity neodymové magnety. Ty jsou na trhu k dispozici v široké škále rozměrů i povrchových úprav. Vzhledem k potenciálnímu vývoji za hranice zadání této práce směrem k poháněnému modelu a delší demonstrační koleji byly jako traťové zvoleny jedny z nejméně nákladných neodymových magnetů s povrchovou úpravou prostým pozinkováním.

To je sice méně odolné vůči mechanickému poškození, než obvykle používané niklování, nicméně vzhledem k faktu, že při správné funkci není vůz s tratí v kontaktu, zde tato jindy podstatná nevýhoda nehraje roli. Podélníky jsou tvořeny bukovými latěmi o rozměrech 10 x 15 mm. Magnety 20 x 5 x 1,5 mm jsou k lati přilepeny univerzálním rychleschnoucím modelářským lepidlem. Hrubší povrch pozinkovaných magnetů je přitom z hlediska lepení naopak výhodou. Vzhledem k několikaminutové prodlevě do zatuhnutí lepidla vyvstává otázka fixace magnetů po tuto dobu. Vzhledem k shodné orientaci se sousední magnety odpuzují, což na první pohled lepení ještě více komplikuje. Podle očekávání se dobře osvědčil následující postup lepení ob magnet: nalepení magnetu č. 1, vložení distančního šablony na místo č. 2, vlepení magnetu č. 3 – atd. Po vytvrdnutí lepidla následovalo odstranění šablon a vlepení sudých magnetů.

Silový účinek sousedů na každý sudý magnet se přitom vyruší, díky čemuž při této metodě dostačuje prosté přidržení každého čerstvě instalovaného magnetu prsty po dobu cca 10 s. Po uplynutí této doby spoj již drží dostatečně. Jako šablony se osvědčily kostky stavebnice Lego System 3x1 – poslouží ale jakékoli nemagnetické předměty vhodných, unifikovaných rozměrů, jež jsou k dispozici v dostatečném množství.



Obr. 19 Část trati s instalovanou polovinou magnetů a distančními šablonami



Obr. 20 Tatáž část po odstranění šablon a započetí instalace druhé poloviny magnetů

8.2.2 Vagon

Požadavek co nejnižší hmotnosti vagonu při zachování dostatečné pevnosti vede k použití materiálu osvědčeného v leteckém modelářství – balsového dřeva. To se vyznačuje nejen nízkou hmotností (hustota běžně prodávané balsy je v intervalu 0,1-0,4 g/cm³). Při práci s ním je nutné respektovat anizotropii tohoto přírodního materiálu. Nosníky a jiné prvky, u kterých je žádoucí tuhost, je nutno z prkénka řezat po směru let. Pro vlastní dělení materiálu je nejvhodnější ostrý zalamovací nůž či skalpel a ocelové pravítko, případně přípravek známý jako „balsoříz“, který umožňuje snadné a přesné oddělování obdélníkových průřezů z prkének.

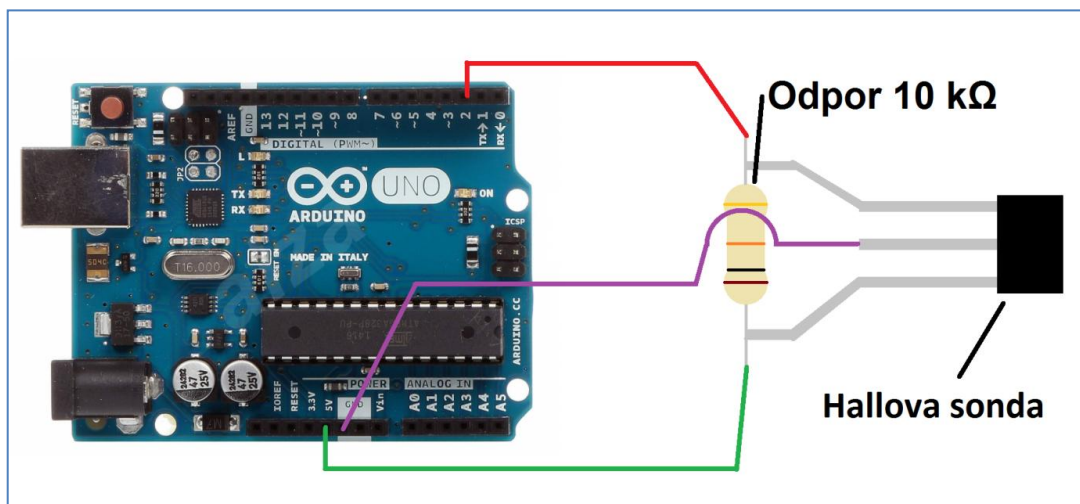
Pro zachování rozebiratelnosti a zamezení poškození niklovaných magnetů je jejich spojení s balsovou konstrukcí řešeno nařezanými pruhy lepicí pásky.

8.3 Řídicí systém

Pro zajištění řízení a možnosti pružného nastavení jeho parametrů byl k dispozici mikropočítač Arduino Uno.

8.4 Senzory

Klíčovou roli u zvolené koncepce hrají proximity senzory. Vzhledem k použití neodymových magnetů se nabízí použití Hallových sond, které detekují magnetické pole (zapojení viz obr. 21).



Obr. 21 Schéma jednoduchého zapojení Hallové sondy

Experimentálně byla ověřena schopnost takto zapojené Hallové sondy spolehlivě detekovat traťový magnet do vzdálenosti 4 mm.

8.5 Cívky

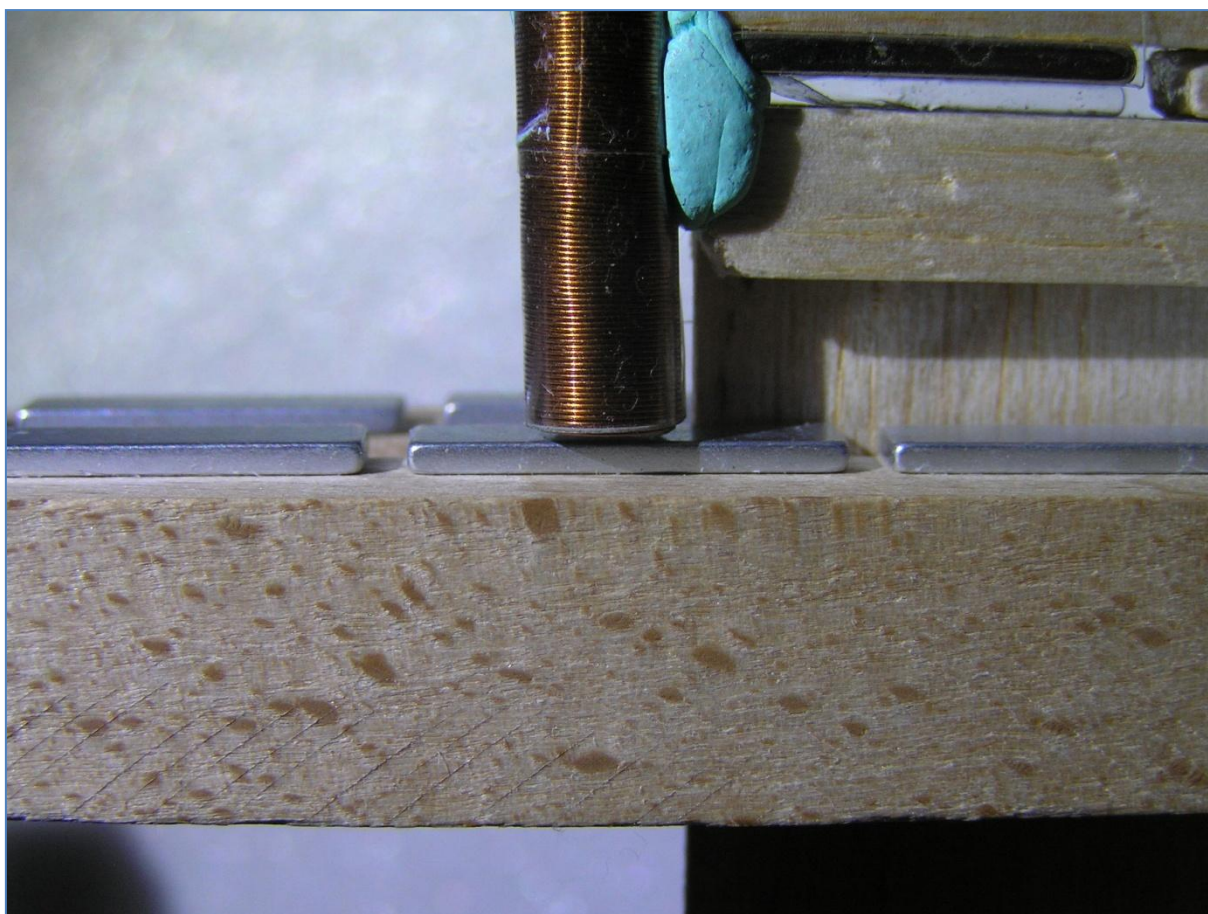
Cívky byly od počátku myšleny jako bezjádrové. Feromagnetické jádro sice dokáže násobně zesílit elektromagnetické pole, při interakci se silnými neodymovými permanentními magnety je však na krátkou vzdálenost zmagnetizováno jejich vlastním polem, které slabší pole cívky neutralizuje.

Přitažlivé síly mezi jádrem elektromagnetu a permanentním magnetem převládnu, což použití pro odpuzování od silného neodymového magnetu vylučuje.

První pokusná cívka byla navinuta z lakovaného měděného vodiče o průměru 0,5 mm. S ní byla ověřena schopnost max. 12V zdroje, původně určeného pro ovládání kolejiště velikosti TT, dodávat do cívky stejnosměrný proud.

8.6 Testování aktivních elektromagnetických prvků

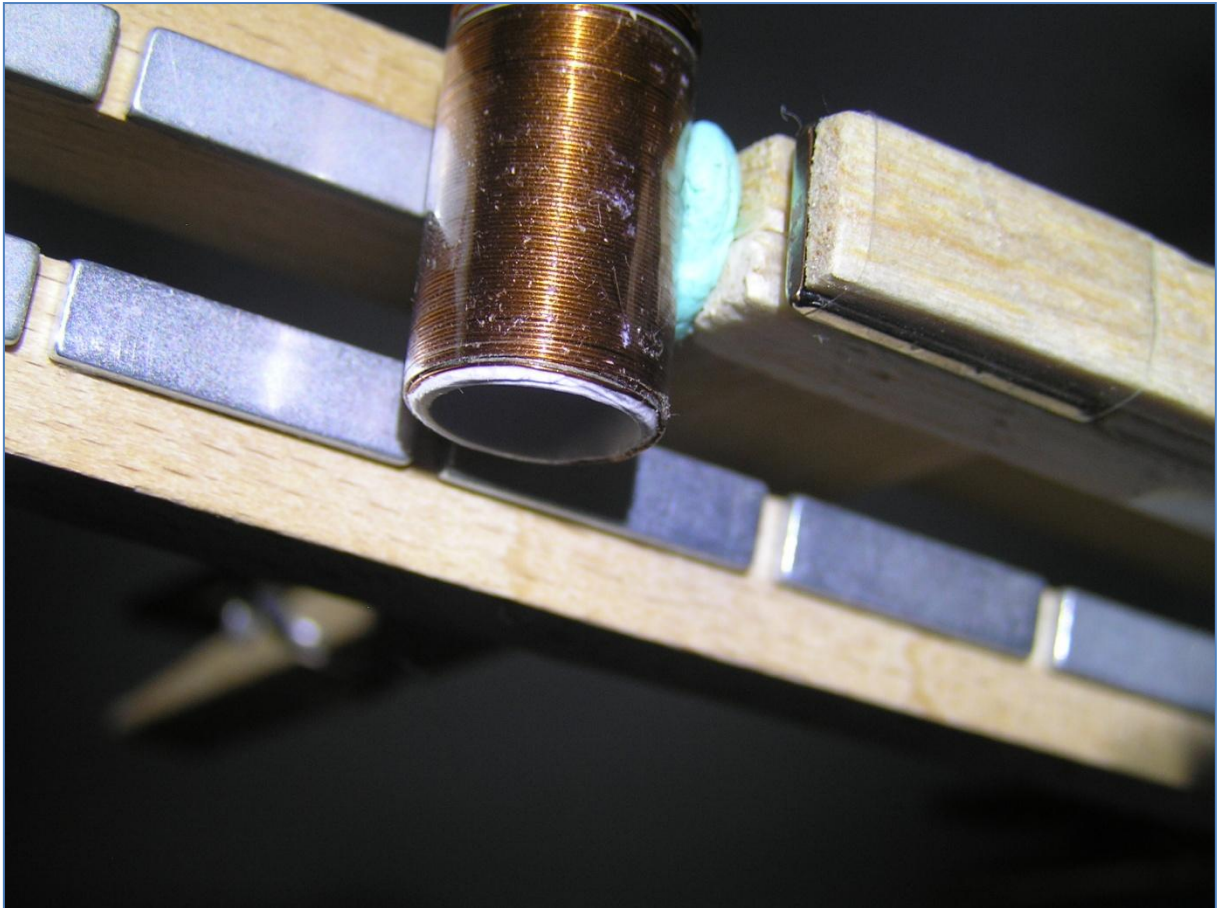
Po instalaci na první prototyp byly reálně odzkoušeny uvažované geometrické konfigurace. Ty vycházely z pokusů prováděných pomocí permanentních magnetů. Testovány byly především dva základní přístupy. První používá silové působení vertikální cívky ke zvýšení vztlaku po jedné straně vagonu, druhý potom příčně umístěnou cívku vyvíjející v magnetickém poli silový účinek do strany a to podle směru protékajícího proudu. Ten byl dodáván pomocí napájecího kabelu.



Obr. 22 Cívka instalovaná v poloze zesilující vztlak na straně, na kterou se vagon vychyluje.

V poloze zachycené na obr. 22 dokázala cívka při napětí 6V přesunout konec vagonu opřený o jednu stranu trati ke druhé. Tento povzbudivý výsledek prokázal elementární funkčnost zvolené koncepce a byl popudem ke stavbě většího prototypu, schopného unést řídicí systém a sensoriku.

U většího prototypu podle očekávání podstatně vzrostla nosnost - úměrně počtu použitých levitačních magnetů. Jejich umístění delší stranou napříč také umožnilo zvětšení rozchodu nosných částí kolejí. Další cívky již byly vinuty z drátu o průměru 0,224 mm, což při zvýšení počtu závitů umožnilo udržet jejich hmotnost na přijatelné úrovni. U většího prototypu se však nepodařilo pomocí vertikální cívky dosáhnout žádoucího překlopení z jedné strany trati na druhou.



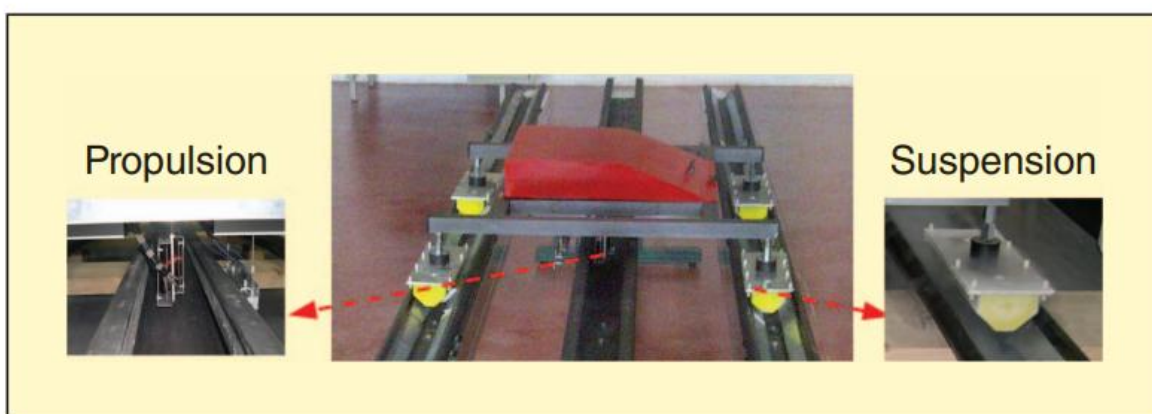
Obr. 23 Příčně instalovaná cívka

Ani použití účinnější horizontální cívky (viz obr. 23), nepřineslo kýžený výsledek. Problémy začalo činit také přehřívání použitých cívek.

Výsledky získané testováním druhého prototypu byly zlomovým bodem. Práce na něm zdaleka neskončila, ale žádným způsobem se nepodařilo toto řešení maglevu zrealizovat ve funkční podobě.

Subjektivně vzato, klíčovým úkolem bakalářské práce bylo vytvořit laboratorní kolejiště demonstrující možnost vznášení a pohybu na magnetickém polštáři. S problémy při rozvíjení zvolené koncepce začalo proto okamžitě paralelní uvažování o alternativních možnostech splnění tohoto praktického cíle. Jedno takové alternativní řešení velmi rychle získalo konkrétní rysy.

Již zmíněný italský projekt UAQ4 využívající HTS (High Temperature Superconductor) využívá pro levitaci i vedení dva žlaby osazené permanentními magnety (viz obr. 22). High temperature v tomto případě znamená, že pro dosažení jejich supravodivosti není nutné použít kapalného helia a dosáhnout teplot až kolem 30 K, ale dostačuje již zmíněný dusík a teploty, pohybující se o 100 stupňů výše.



Obr. 24 Snímky experimentálního modelu systému UAQ4 [16]

Jak bylo zmíněno výše, vzhledem k nutnosti chladit použitý supravodič kapalným dusíkem byl tento přístup zavržen. Nabízí se ale určitá modifikace, která nevyžaduje podchlazení a spolehlivě funguje za pokojové teploty.

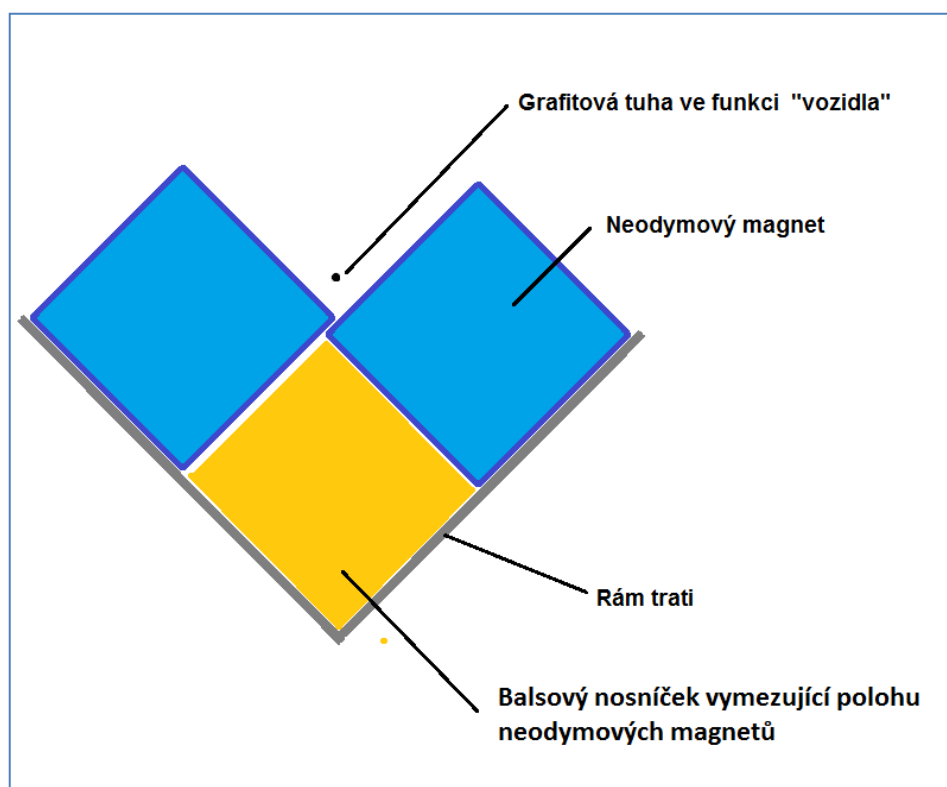
Supravodiče se chovají dokonale diamagneticky, magnetické pole ze svého objemu zcela vytěsňují. Existují materiály, které magnetické pole ve svém objemu zeslabují i za pokojové teploty. Při vystavení vnějšímu magnetickému poli se elektronové obaly jejich atomů natočí tak, že silově působí proti tomuto budícímu magnetickému poli.

Diamagnetický předmět je na tomto principu odpuzován od permanentního magnetu a je-li dostatečně lehký, otevírají se stran levitace zajímavé možnosti. Při umístění do žlabu, podobného tomu použitému u projektu UAQ4, by měl být vhodně tvarovaný a především dostatečně lehký objekt z diamagnetické látky schopen stabilní levitace.

Jedním z materiálů majících žádoucí diamagnetické vlastnosti je pyrolytický uhlík. Oproti jiným diamagnetickým látkám, jako je například bismut, má obrovskou výhodu nízké hustoty. Krom ceny a špatné dostupnosti, minimálně na českém trhu, je jeho nevýhodou křehkost a s ní spojená obtížná obrobitelnost. Oddělení vhodného proužku schopného levitace v neodymovém žlabu malých rozměrů představuje problém. Odkudivé síly v tomto uspořádání jsou velmi malé.

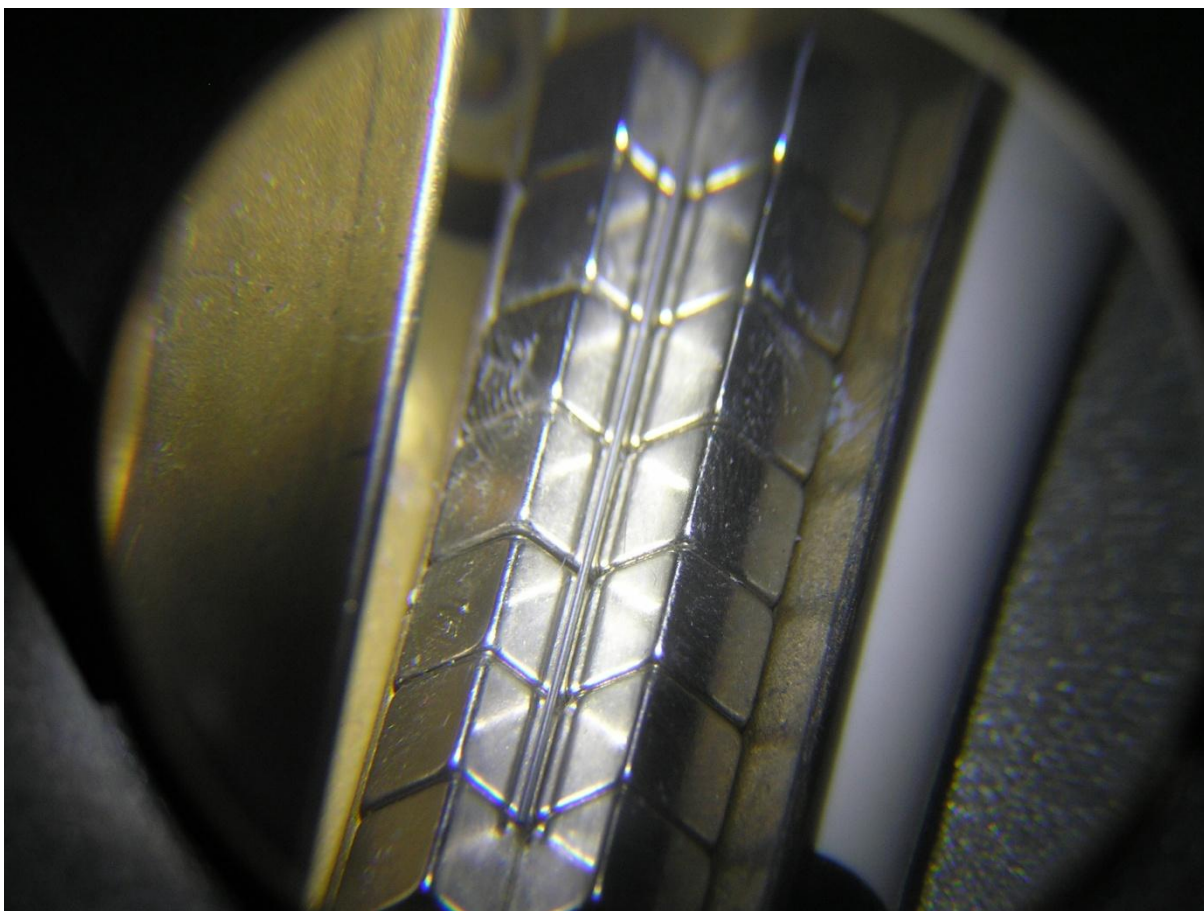
Proto byla zprvu zavrhována možnost sestavit vhodný tvar, schopný stabilní levitace, z komerčně dostupných prvků jejich spojením nosnou balsovou konstrukcí. Špatná dostupnost na českém trhu nakonec učinila těmto úvahám přítrž.

Jednou z běžně dostupných forem uhlíku je grafit. I ten těží z nízké hustoty, ale jeho diamagnetické vlastnosti jsou násobně slabší, než u pyrolytického uhlíku. Ve formě běžně prodávané tuhy, která má mimochodem pro stabilní levitaci optimální tvar, je navíc smíchán s řadou příměsí, z nichž některé jsou jistě feromagnetické. V případě některých vzorků byla tuha k magnetu naopak přitahována. Jiné vzorky však slabou tendenci být odpuzovány projevíly. Za vyzkoušení tak tato možnost stála – už jen proto, že veškerý materiál byl po ruce.



Obr. 25 Schéma uspořádání diamagnetického levitátoru

Po nainstalování magnetů do provizorního feromagnetického rámu (viz obr. 25) se dostavil úspěch. Tuha ve žlabu stabilně levitovala (viz obr. 26) a po postrčení se volně pohybovala, brzděna pouze aerodynamickými silami a tvarem magnetického pole na koncích trati. Toto řešení bylo produktem momentální improvizace. Zpětným pátráním bylo (podle očekávání) zjištěno, že nejde o původní nápad. Je s podivem, že vzhledem k jednoduchosti provedení a dostupnosti použitých materiálů nejde (soudě podle vlastní zkušenosti) o notoricky známý středoškolský fyzikální pokus. Hlavním rozdílem oproti dohledaným řešením je použití krychlových magnetů namísto válcových.



Obr. 26 Snímek mikrotužkové tuhy levitující nad soustavou permanentních magnetů

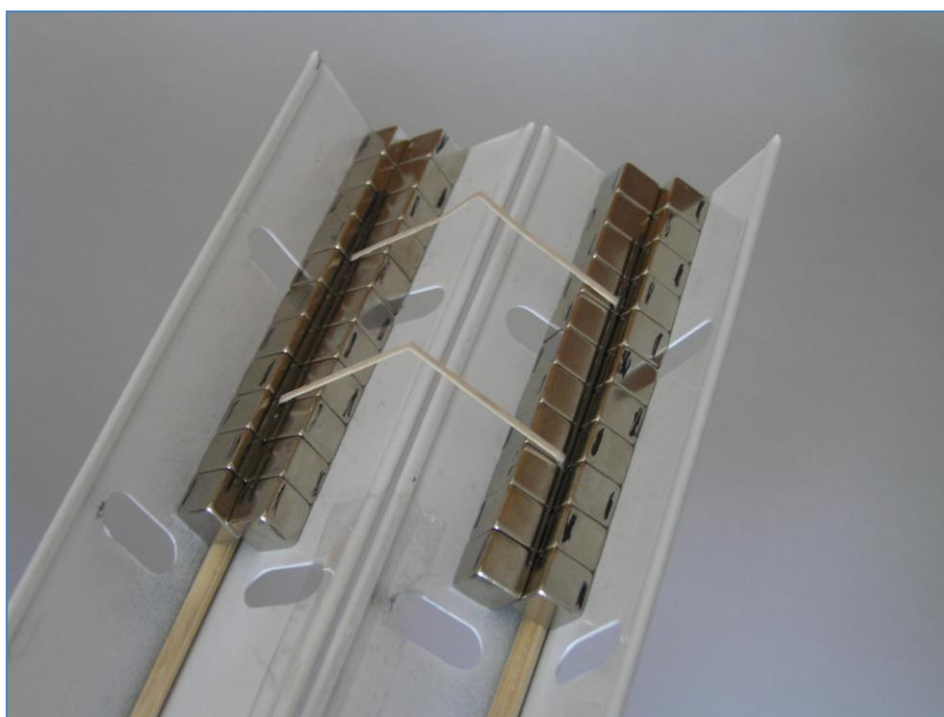
Ač sama tato idea není původní, další kroky již však jsou, tedy alespoň podle pátrání na internetu. První možnost vylepšení spočívá v použití Halbachových sestav namísto střídavě uspořádaných magnetů.

Předpokládejme, že magnetické pole Halbachovy sestavy má dvojnásobnou intenzitu oproti původnímu poli generovanému střídavě uspořádanými magnety.

Při nepřímé úměrnosti vztlakové síly na druhé mocnině vzdálenosti to znamená, že předmět konstantní hmotnosti se bude nad Halbachovou sestavou vznášet ve výšce odpovídající $\sqrt{2}$ násobku výšky původní. Pro zachování stejné výšky bude muset mít předmět dvojnásobnou hmotnost. Ať už je tedy nosnost s původním uspořádáním jakákoli, použití Halbachových soustav teoreticky zvýší užitečné zatížení o hmotnost jedné tuhy. Jediným problémem použití Halbachových soustav je jejich obtížné fixování a vskutku enormní nároky na použité lepidlo, což bylo prakticky ověřeno.

Nosnost nicméně není zanedbatelná ani s původním uspořádáním. Podle vzoru UAQ4 bylo použito dvou rovnoběžných žlabů (viz obr. 27). Tuhy byly spojeny příčkami z tenkých balsových pásků. I bez použití Halbachových soustav je generovaný vztlak dostatečný pro levitaci vzniklého vagonu. Délka trati není omezena ničím jiným, než počtem magnetů, jež jsou k dispozici. Obtížnější, avšak ne nemožné, by bylo zhotovení oblouků. Jejich poloměr by musel reflektovat délku použitých tuh i výšku levitace.

Trať je tvořena krychlovými neodymovými magnety o hraně 7mm. Při maloobchodní ceně 7 Kč/kus vychází cena za magnety na 1 m obdobné trati 4000 Kč. Pravděpodobná množstevní sleva, nákup na e-shopu, výběr magnetů s nejlepším poměrem délka hrany/cena – to vše znamená možnost snížení nákladů.



Obr. 27 Dvoužlabová trať s vozidlem

9 Závěr

Na základě rešerše v současnosti používaných technických řešení a laboratorních modelů demonstrujících magnetickou levitaci vznikla pracovní idea vlaku používajícího k levitaci odpudivou sílu permanentních neodymových magnetů.

Pro vedení, respektive příčnou stabilizaci při levitaci na místě, bylo počítáno s použitím bezjádrových elektromagnetů.

Trať a vagon byly následně z běžně dostupných materiálů a za použití jednoduchých výrobních postupů realizovány. Po prvotním ověření životaschopnosti zvolené koncepce bylo přistoupeno ke stavbě většího modelu s vyšší nosností.

Prvotní povzbudivé výsledky zkoušek řídicích elektromagnetů na prvním prototypu se nepodařilo u druhého prototypu uspokojivě reprodukovat. Větší počet levitačních vagonových magnetů znamenal nutnost dosažení větších sil generovaných aktivními stabilizačními cívkami. S vybavením, které bylo k dispozici, se ukázalo dosažení spolehlivého ovládání prakticky nemožným.

Vlastnosti elektromagnetů vinutých z tenkého lakovaného drátu je činí pro podobné aplikace malých rozměrů nevhodnými.

Citlivost Hallových sond se ukázala být dostatečná i na relativně velkou vzdálenost. Otázkou zůstává, zda by byla dostatečná reakční rychlost, s jakou by byl použitý řídicí systém schopný na indikovanou výchylku reagovat.

Výškově členěná konstrukce s maximem hmoty situovaným pod tratí sice vhodně koriguje momenty vznikající interakcí permanentních magnetů, ale zároveň je náchylná na podélné rozkývání.

Spíše než použití cívek by v budoucnosti za prozkoumání stála možnost zajistit vedení vagonu pomocí neodymových permanentních magnetů. Jejich dosah je mnohem větší než je tomu u malých cívek.

Výchozí ideou je, že by byly instalovány v mikroservy ovládaných rámech, které by svým natáčením zesilovaly, případně zeslabovaly, nosný magneticky polštář na příslušných stranách vagonu.

Při použití válcových magnetů s orientací kolem roviny rovnoběžné s jejich osou by přitom jejich natáčení probíhalo bez jakékoli změny vyvážení vagonu.

Model původní koncepce stabilní levitace nedosáhl, což je v souladu s faktem, že žádný obdobně řešený funkční model nebyl dohledán. S vysokou pravděpodobností žádný takový neexistuje.

Bezprostředně po vynoření se prvních vážných problémů zvolené koncepce bylo preventivně zahájeno paralelní řešení zadaného úkolu jinými prostředky. Když se vyvstalé problémy nepodařilo ani po intenzivní práci překonat, byl díky tomu okamžitě k dispozici solidní základ, na němž se dalo stavět.

Využití diamagnetických levitačních prvků spolu s vhodně tvarovanou tratí zajišťuje stabilní statickou levitaci i vedení při pohybu. První provizorní sestava vznikla bez znalosti obdobných řešení na stejném principu. Faktem nicméně zůstává, že tuha levitující nad neodmými magnety není originálním nápadem. Na internetu bylo ex post dohledáno několik obdobných projektů.

Přínosem této práce je především prokázání a využití schopnosti tuhy nést užitečné zatížení. Té bylo využito při konstrukci originálního dvoukolejného vozidla, které nemá mezi dohledatelnými projekty obdoby.

Použití Halbachových soustav v této aplikaci je také originálním přístupem.

Slibuje další zvýšení schopnosti nést užitečné zatížení – např. nějakou formu pohonu.

Několik výchozích koncepcí již existuje a s jistotou lze prohlásit, že budou rozvíjeny.

A konečně - má-li obyčejná grafitová tuha se střídavě orientovanými řadami magnetů dostatečnou rezervu nosnosti, použití pyrolytického uhlíku v kombinaci s Halbachovými soustavami by umožnilo stavbu konstrukčně mnohem komplikovanějších vozů.

10 Použité zdroje

10.1 Tištěná literatura

- [1] GIERAS, Jacek F.; PIECH, Zbigniew J.; TOMCZUK, Bronislaw Z.
Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems.
Second Edition. Boca Roca: CRC Press Inc, 2011. ISBN 9781439842218

10.2 Internetové zdroje

- [2] HE, J. L.; ROTE, D.M. ; COFFEY, H.T. *Study of Japanese Electrodynamic-Suspension Maglev Systems* [Online]. Technical report ANL/ESD—20 ON: DE94011486. Argonne National Lab., IL (United States). Energy Systems Div. 1. 4. 1994
[1.5. 2017] Dostupné z: <https://www.osti.gov/scitech/servlets/purl/10150166>
- [3] WITSCHGE, Loes. *Train of Thought. Delayed Gratification* [Online]. [29. 3. 2017].
Dostupné z: <http://www.slow-journalism.com/from-the-archive/train-of-thought>
- [4] *The International Maglevboard* [Online]. [17. 4. 2017]. The International Maglevboard. Dostupné z: <http://www.maglevboard.net/en/>
- [5] HECKING, Claus. *Transrapid: Letzte Fahrt nach Nortrup*. Spiegel Online [Online]. [20. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.spiegel.de/wirtschaft/transrapid-was-wurde-aus-der-magnetschwebbahn-im-emsland-a-1145398.html>
- [6] *Shanghai Maglev Official Website* [Online]. Shanghai Transport Development Co., Ltd. [28. 5. 2017]. Dostupné z: <http://www.smtdc.com/en/index.html>
- [7] *Shanghai maglev train*. Flickr.com [Online]. Flickr, 2002. [21.4.2017]
Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/85973635@N00/3053892088/>

- [8] *Transrapid-Versuchsanlage Emsland, Stator*. WIKIMEDIA COMMONS [Online]. Wikimedia, 2004. [22.4.2017]
Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Transrapid-Versuchsanlage__Emsland__Stator__01.jpg
- [9] *Monorail Website* [Online]. The Monorail Society [20. 5. 2017].
Dostupné z: <http://www.monorails.org/tMspages/TPMag.html>
- [10] *USJMAGLEV* [Online]. U.S.-Japan MAGLEV, LLC. [22. 5. 2017].
Dostupné z: <http://usjmaglev.com/usjmaglev/Home.html>
- [11] *JR-Maglev MLX01-1*. WIKIMEDIA COMMONS [Online]. Wikimedia, 2013. [22.5.2017]
Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:JR_MLX01-1__001.jpg
- [12] UPTON, Luke. *603km/h! Rail land-speed record smashed by Japan, once again*. Smartrail World [Online]. [23. 5. 2017]. Dostupné z:
<https://www.smartrailworld.com/375mph-rail-land-speed-record-smashed-by-japan-once-again>
- [13] *JR Tokai takes wraps off new maglev*. The Japan Times [Online]. [23. 5. 2017]
Dostupné z: <http://www.japantimes.co.jp/news/2012/11/23/business/jr-tokai-takes-wraps-off-new-maglev/>
- [14] RENNIE, Gabrielle. *Magnetically Levitated Train Takes Flight*. Science Technology Review [Online]. [24. 5. 2017].
Dostupné z: <https://str.llnl.gov/str/October04/Post.html>
- [15] BLINDER, S. M. *Fields of Magnet Array*. Wolfram Demonstrations Project [Online]. [17. 4. 2017]
Dostupné z: <http://demonstrations.wolfram.com/FieldsOfMagnetArray/>

- [16] LANZARA, Giovanni; D'OVIDIO, Gino; CRISI, Francesco. *UAQ4 Levitating Train*. IEEE Vehicular Technology Magazine [Online].

Dostupné z:

https://www.researchgate.net/publication/273395930_UAQ4_Levitating_Train_Italian_Maglev_Transportation_System

11 Seznam obrázků

Obr. 1 Rok 1914, Winston Churchill, toho času první lord admirality, si se zájmem prohlíží demonstrátor levitujícího vagonu Emila Bacheleta (1863 - 1946) [3]	5
Obr. 2 Chátrající souprava Transrapid 06 [5]	8
Obr. 3 Transrapid 09 [5]	8
Obr. 4 Souprava šanghajského Transrapidu [7].....	9
Obr. 5 Schéma uspořádání EMS systému Transrapid	10
Obr. 6 Transrapid – třífázové satorové vinutí [8].....	11
Obr. 7 Výhybka Transrapid [9].....	12
Obr. 8 Úspěšný MLX01 [11]	15
Obr. 9 Krajní vůz soupravy L0 bez instalovaného podvozku [13].....	15
Obr. 10 Schéma uspořádání EDS systému SCMaglev	16
Obr. 11 Boční pohled na levitační traťovou cívku	17
Obr. 12 Průběh magnetických siločar: a) segmentovaného tyčového magnetu	18
Obr. 13 Schéma jednoduchého provedení systému Inductracku.....	19
Obr. 14 Schéma konstrukce laboratorního levitátoru systému Inductrack	24
Obr. 15 Schéma konstrukce stolního levitátoru systému EMS	25
Obr. 16 Schéma možného uspořádání modelu maglevu využívajícího Meissnerův jev	27
Obr. 17 Chování dvojice odpuzujících se permanentních magnetů	28
Obr. 18 Schéma trati a vagonu	29
Obr. 19 Část trati s instalovanou polovinou magnetů a distančními šablonami	30
Obr. 20 Tatáž část po odstranění šablon a započetí instalace druhé poloviny magnetů	31
Obr. 21 Schéma jednoduchého zapojení Hallovy sondy	32
Obr. 22 Cívka instalovaná v poloze zesilující vztlak na straně, na kterou se vagon vychyluje.....	33
Obr. 23 Příčně instalovaná cívka	34
Obr. 24 Snímky experimentálního modelu systému UAQ4 [16].....	35
Obr. 25 Schéma uspořádání diamagnetického levitátoru.....	36
Obr. 26 Snímek mikrotužkové tuhy levitující nad soustavou permanentních magnetů	37
Obr. 27 Dvoužlabová trať s vozidlem	38