

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh magnetického levitátoru

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

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

Jméno a příjmení: **Aleš BUBÍLEK**
Osobní číslo: **E11B0191P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Návrh magnetického levitátoru**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Uveďte jednotlivé principy magnetické levitace a jejich současné uplatnění v praxi. Akcentujte elektromagnetický princip (EMS).
2. Vypracujte návrh magnetického levitátoru na principu EMS včetně řízení optické závory.
3. Na základě návrhu sestrojte demonstrační zařízení.
4. Zhodnoťte váš návrh a technologii magnetické levitace.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Mayer, D.: Elektrodynamika v energetice. 1. vyd., Praha, 2005. ISBN 80-7300-164-0.
2. Mayer, D.: Magnetická levitace a její využití. Elektro. ISSN 1210-0889. Roč. 13, č. 1 (2003), s. 4-12
3. Jedlička, M., Kotlan, V.: Výpočet statických charakteristik silového působení v elektrodynamickém systému levitace. Elektrotechnika a informatika 2004. Část 1., Elektrotechnika. 5. ročník přehlídky doktorských prací. ISBN 80-7043-328-0. Plzeň, Západočeská univerzita, 2004. s. 35-38


Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Polcar, Ph.D.


Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2014

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2015


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce se zabývá magnetickou levitací. V úvodní části popisuje možnosti dosažení magnetické levitace a jejich fyzikální principy. Poté se zaměřuje na elektromagnetickou levitaci s využitím optické závory. Následně je navržen, sestaven a kriticky zhodnocen funkční vzorek magnetického levitátoru na principu elektromagnetické levitace.

Klíčová slova

Magnetický levitátor, optická závora, elektromagnetická levitace.

Abstract

The presented bachelor thesis deals with the magnetic levitation. Methods of magnetic levitation and their physical principles are described. The thesis focuses on electromagnetic levitation with the use of photocell. Functional sample of electromagnetic levitated system with photocell is designed, built and evaluated after.

Key words

Magnetic levitated system, photocell, electromagnetic levitation.

Prohlášení

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

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

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

V Plzni dne 8.6.2015

Jméno příjmení

.....

Obsah

OBSAH	7
ÚVOD	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
1 PRINCIPY MAGNETICKÉ LEVITACE	10
1.1 LEVITACE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	11
1.2 LEVITACE S POUŽITÍM DIAMAGNETIKA	12
1.3 LEVITACE TRANSFORMAČNÍ	14
1.4 ELEKTRODYNAMICKÁ LEVITACE - EDS	15
1.5 ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE - EMS	17
1.6 LEVITACE POMOCÍ HALBACHOVY SOUSTAVY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	19
1.7 VYUŽITÍ V PRAXI	21
1.7.1 Magnetická levitace v dopravě	22
2 NÁVRH MAGNETICKÉHO LEVITÁTORU	26
2.1 BLOKOVÉ SCHÉMA	26
2.2 SCHÉMA ZAPOJENÍ	27
2.3 PLOŠNÝ SPOJ	28
2.4 OPTICKÁ ZÁVORA	31
2.5 ELEKTRONICKÁ ČÁST	31
2.6 NÁVRH ELEKTROMAGNETU	35
3 MECHANICKÁ ČÁST PROJEKTU	38
3.1 ZÁKLADNA	38
3.2 STOJANY	39
3.3 STÍNĚNÍ OPTICKÉ ČÁSTI	39
3.4 ZHODNOCENÍ FUNKČNOSTI, VÝHODY, NEVÝHODY NAVRŽENÉHO LEVITÁTORU	40
4 ZÁVĚR	43
POUŽITÁ LITERATURA	44
PŘÍLOHA A - SEZNAM SOUČÁSTEK	46

Úvod

Tento projekt vznikl za účelem vytvoření funkčního modelu levitátoru tj. vytvořit takové zařízení, které umožní levitaci (bezdotykovou manipulaci) malých, kovových objektů jako např. matice, šroub, či mince. V současnosti se v praxi využívá řada způsobů magnetické levitace, proto je v práci provedena rešerše aktuálního stavu této problematiky. Pro realizaci navrhovaného zařízení byl zvolen elektromagnetický princip (EMS). Pro jeho realizaci je zapotřebí elektromagnet, aby byly kovové předměty přitahovány, a takové zařízení, které dokáže snímat polohu předmětu, předat tuto informaci, vyhodnotit a podle této informace rozhodnout, jestli protékající proud do elektromagnetu zvýšit nebo naopak snížit. Ke stabilizaci polohy předmětu ve vzduchu je potřeba využít zpětnou vazbu pomocí světelného paprsku, jenž snímá polohu předmětu. Zařízení bude navrženo i s ohledem na design a bezpečnost.

Seznam symbolů a zkratek

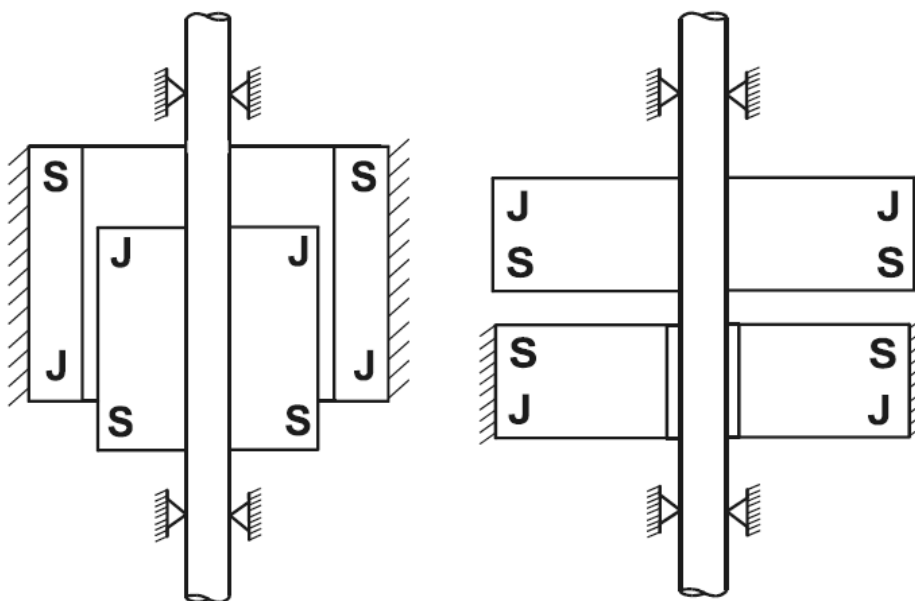
μ_r [-]	Relativní permeabilita
a [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	Akcelerace vlaku
B [T]	Magnetická indukce
C [F]	Elektrická kapacita
$\cos \varphi$ [-]	účinník
d [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	Deakcelerace vlaku
EDS	Elektrodynamická levitace
EMS	Elektromagnetická levitace
F [N]	Síla
f [Hz]	Frekvence
g [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	Tíhové zrychlení
H [$\text{A}\cdot\text{m}^{-1}$]	Magnetická intenzita
i_b [A]	Budící proud
L [H]	Indukčnost cívky
N [-]	Počet závitů buzení
R [Ω]	Elektrický odpor
δ [m]	Vzduchová mezera
Φ [Wb]	Magnetický tok

Principy magnetické levitace

Levitaci můžeme chápat jako vznášení objektu za překonání gravitační síly. Hlavní podmínkou stabilní levitace je dosažení rovnovážné polohy, kde součet všech sil působících na objekt je nulový. V případě nesplnění tohoto předpokladu (tj. výsledná síla není nulová) dojde k jeho zřícení. Je známo několik metod, jak dosáhnout levitace. V praxi se ale především setkáme s magnetickou levitací. U magnetické levitace dosáhneme stabilní polohy tělesa v prostoru bez kontaktu se zemí za pomoci magnetického pole. Magnetické levitace lze dosáhnout více principy a o těchto principech si řekneme v následujících odstavcích. [1, 2]

1.1 Levitace s permanentními magnety

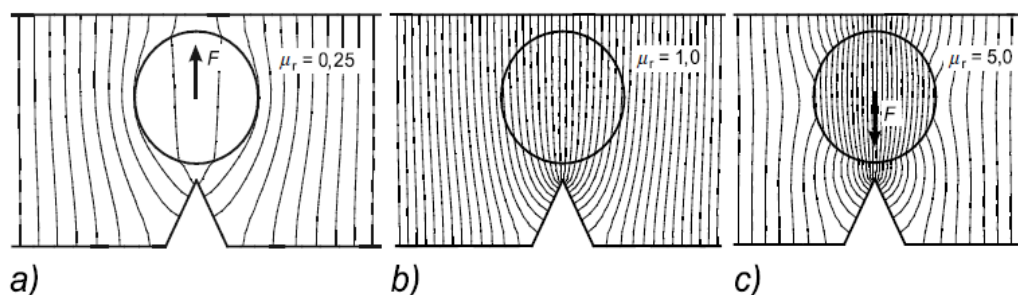
Dva z několika možných způsobů jak využít odpuzivé síly stejnojmenných pólů permanentních magnetů jsou ilustrovány na obrázku 1.1. Takto lze realizovat např. magneticky levitovaná ložiska. Ovšem toto zařízení nespĺňuje přímo definici magnetické levitace: ke stabilní poloze rotoru je nutné zajistit jeho polohu vodícími ložisky. Tím pádem není splněna podmínka neexistence kontaktu s pevnou zemí [1, 2, 9, 11].



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

1.2 Levitace s použitím diamagnetika

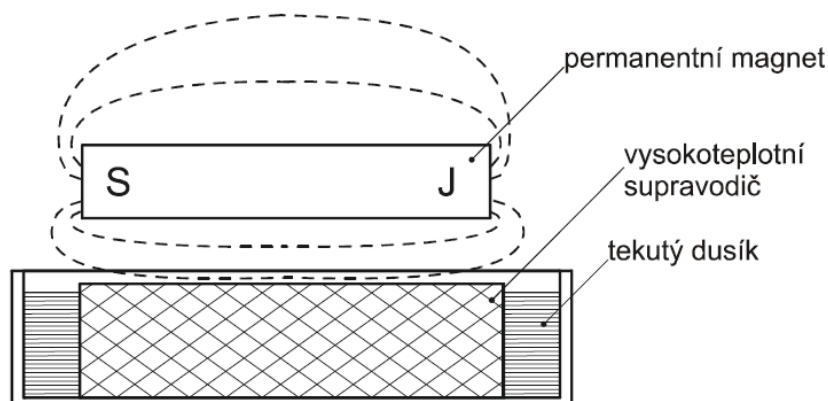
Vložení diamagnetického tělesa do nehomogenního pole bude těleso vypuzováno, zatímco paramagnetické (feromagnetické) těleso je do pole vtahováno, jak je znázorněno na obrázku 1.2.1. Při pozorování diamagnetického tělesa můžeme sledovat, že jestliže hmotnost tělesa a vypuzovací (levitační) magnetická síla jsou v rovnováze, těleso bude ve stabilní poloze. Běžně se vyskytující látky v přírodě jako uhlík nebo bizmut jsou jen slabě diamagnetické (jejich relativní permeabilita μ_r je < 1), levitující síla je tudíž velmi slabá a zdá se, že tento jev lze využít jen stěží v praxi.



Obr.1.2.1 Působení nehomogenního magnetické pole na váleček [převzato z 2]

- a) z diamagnetika ($\mu_r = 0,25$)
- b) z nemagnetické látky ($\mu_r = 1$)
- c) z paramagnetické látky ($\mu_r = 5$)

Mnohem větší levitující síla bude působit na supravodič, který se chová jako ideální diamagnetikum (jeho μ_r se blíží nule). Je-li permanentní magnet zdrojem nehomogenního magnetického pole, působí mezi ním a supravodičem odpudivá síla. Ovšem je-li permanentní magnet volně uložen nad supravodičem, bude levitovat a jedná se o tzv. Meissnerův jev znázorněný na obrázku 1.2.2. [1, 2, 9, 11].



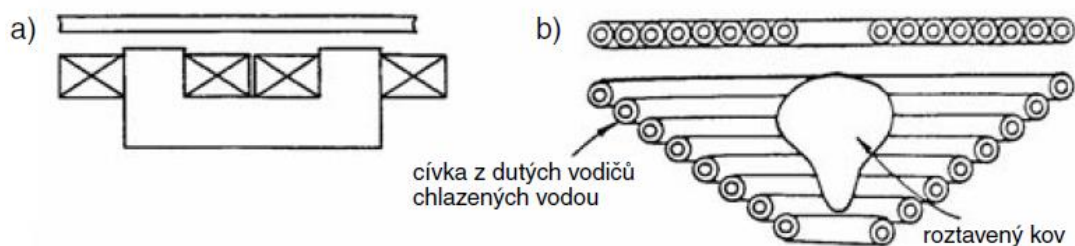
Obr. 1.2.2 Levitace permanentní magnetu nad supravodičem (Meissnerův jev) [převzato z 2]

- **Fyzikální vysvětlení diamagnetismu supravodiče**

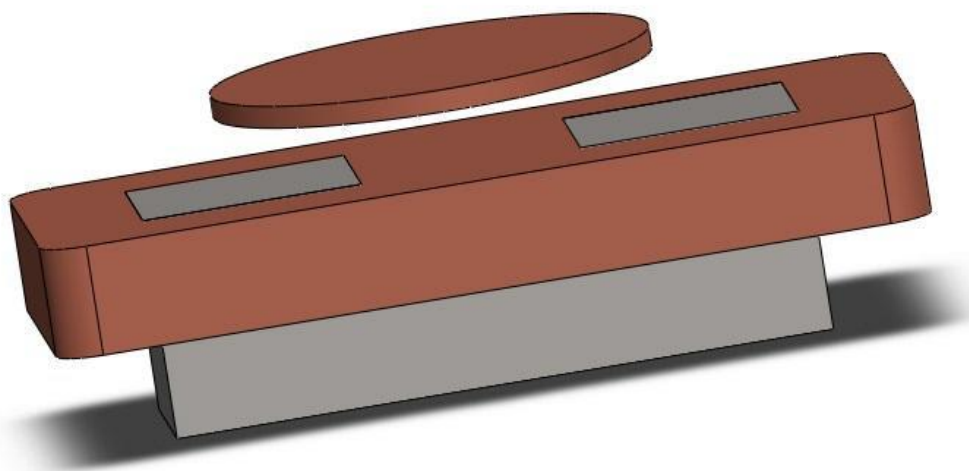
V okamžiku vkládání supravodiče do časově proměnného magnetického pole je do supravodiče se indukují vířivé proudy. Vířivé proudy působí trvale, neutlumí se ani nevymizí, jelikož odpor supravodiče se blíží nule; svým magnetickým polem jsou v interakci s budícím magnetickým polem. Je-li permanentní magnet zdrojem budícího pole, vznikne mezi supravodičem a magnetem odpudivá síla. Magnetické pole vířivých proudů působí proti magnetickému poli budícímu, takže indukce uvnitř supravodiče je $B = \mu H \rightarrow 0$. [1, 2]

1.3 Levitace transformační

Vložením elektricky vodivého tělesa do střídavého magnetického pole vybuzeného cívkou, bude se v něm indukovat transformační napětí, které vyvolá vířivé proudy. Tyto proudy jsou opět v interakci s magnetickým polem budící cívky a levitují svého nositele, tj. vodivé těleso. Princip transformační levitace a její použití k levitaci indukčně roztaveného kovu je znázorněn na obrázku 1.3.1. [1, 2, 9, 11].



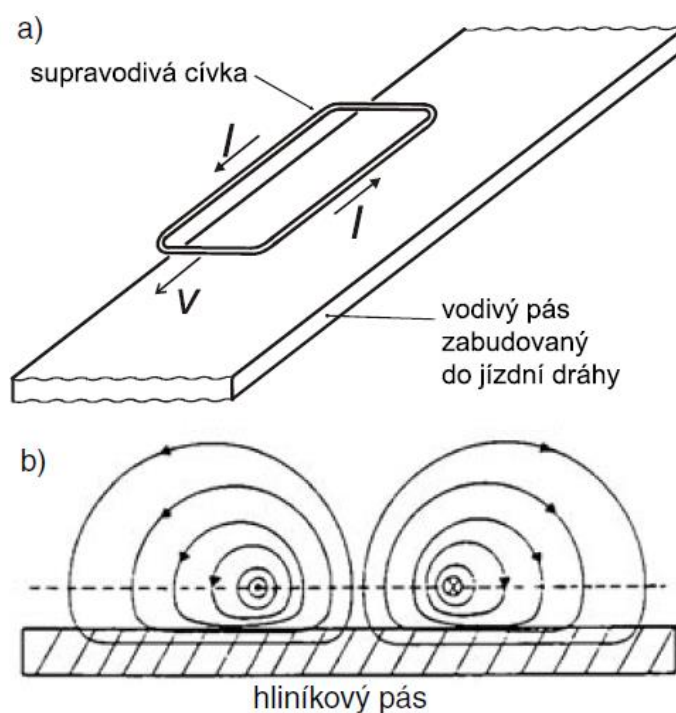
Obr. 1.3.1 Dva způsoby levitace pomocí permanentních magnetů [převzato z 2]



Obr. 1.3.2 Transformační levitace měděného kotouče [převzato z 11]

1.4 Elektrodynamická levitace - EDS

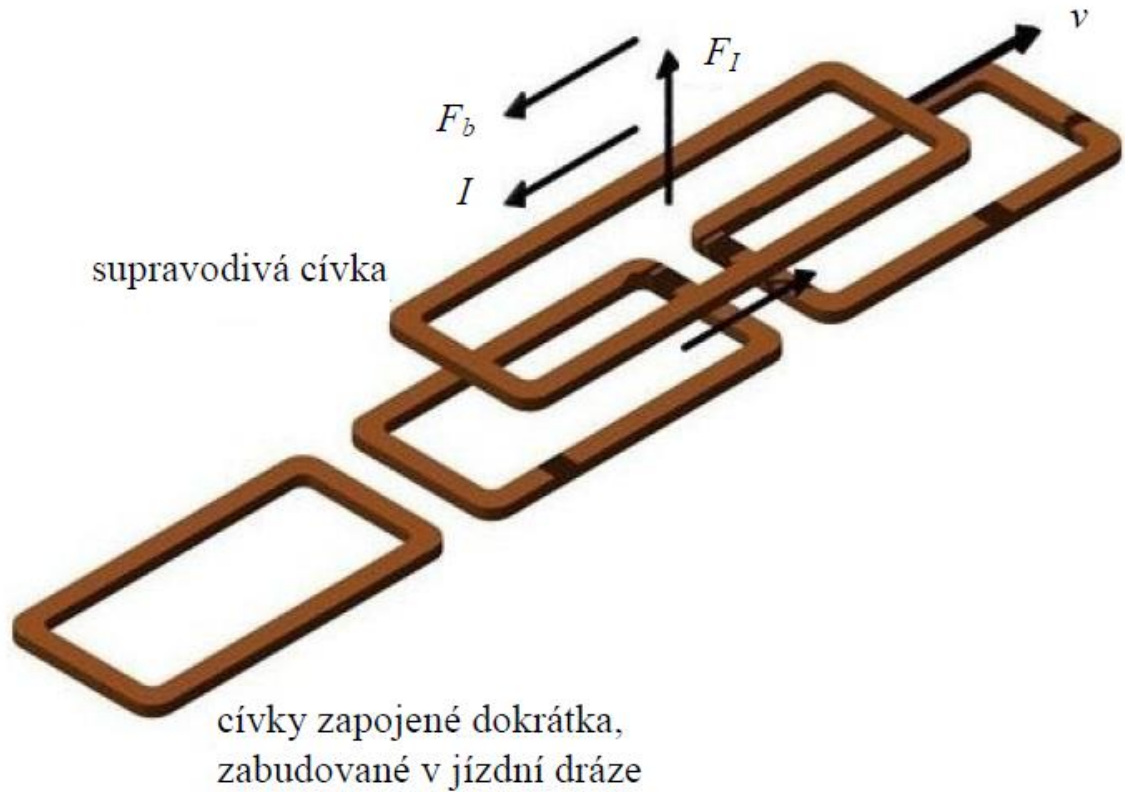
Elektrodynamická levitace – EDS (Electro-Dynamic Suspension), neboli levitace odpuzováním (čili repulsivní typ levitace), je založen na odpuzování stejnosměrného elektromagnetu od pohybujícího se vodivého pásu, jak je znázorněno na obrázku 1.4a. Plochá obdélníková cívka je spojena s vozidlem a napájena stejnosměrným budícím proudem. Cívka je uložena nad vodivým (hliníkovým) pásem. Nepohybuje-li se cívka vůči pásu, stejnosměrné magnetické pole cívky proniká do vodivého pásu, což má za následek nulové síly mezi pásem a cívkou. Naopak pohybuje-li se cívka vůči pásu, v pásu se indukují vířivé proudy, jejichž magnetické pole je v interakci s magnetickým polem budící cívky. Na cívku působí síla o dvou složkách: jedna odpuzuje cívku od pásu a způsobuje její levitaci, zatímco druhá složka síly brzdí pohyb cívky a musí být překonána zařízením, které cívce dodává pohyb. V tomto případě pohonem vozidla, v němž je uložena cívka. Magnetické pole vířivých proudů působí proti magnetickému poli cívky, což znamená, že v pásu je magnetické pole velmi slabé, znázorněno obrázkem 1.4b.



Obr. 1.4.1 EDS [převzato z 2]

- a) Pohybující se supravodivý magnet nad vodivým pásem
- b) Magnetické pole pohybujícího se supravodivého magnetu

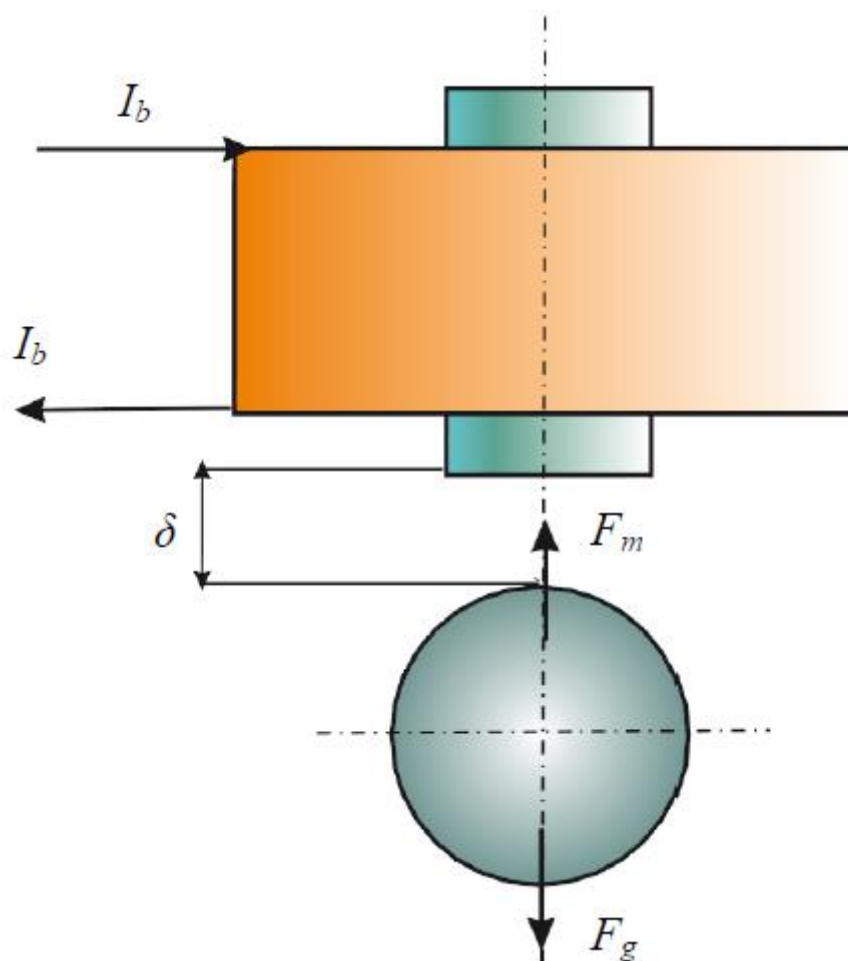
Aby byla levitační síla dostatečně velká (např. při použití u dopravních systémů s pasažéry), musí cívka indukovat extrémně silné magnetické pole. Toho dosáhneme za podmínek, že je cívka ze supravodiče a protéká jí extrémně velký budící proud. [1, 2, 9, 11].



Obr. 1.4.2 Jiné znázornění cívek v systému EDS [převzato z 11]

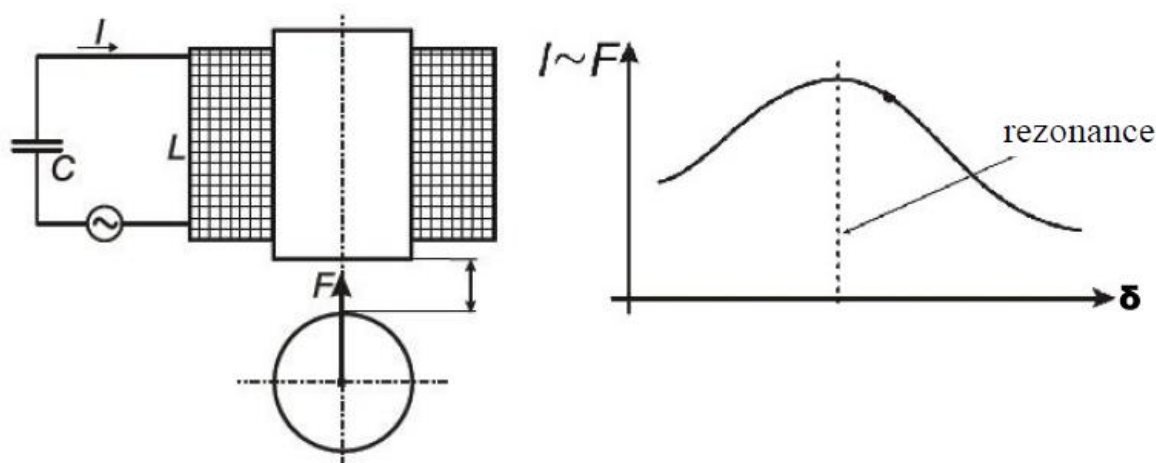
1.5 Elektromagnetická levitace - EMS

Elektromagnetická levitace – EMS (Electro-Magnetic Suspension), neboli levitace přitahováním (atraktivní typ levitace), je založena na přitahování feromagnetického tělesa elektromagnetem. Síla F_m závisí na budícím proudu elektromagnetu i_b a na vzdálenosti vzduchové mezery δ . Kromě přitažlivé síly působí na těleso síla gravitační F_g . Důležité je dosažení rovnosti sil $F_g = F_m$, při které dochází k levitaci. Tato levitace je znázorněna na obrázku 1.5.1.



Obr. 1.5.1 Znáornění principu EMS [převzato z 11]

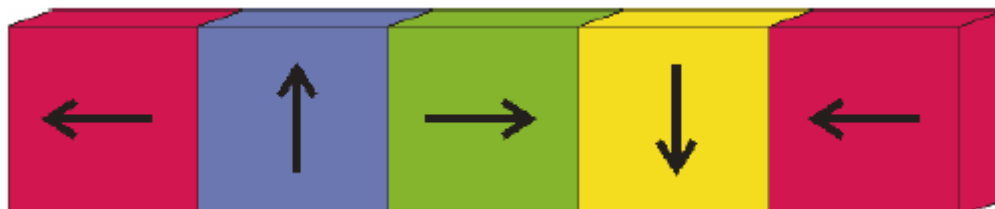
EMS lze stabilizovat také pomocí střídavého elektromagnetu, jehož budící proud je samočinně regulován laděným obvodem RLC. Do série s cívkou elektromagnetu (RL) je zapojen kondenzátor, jehož kapacita je určena tak, aby pracovní bod A obvodu RLC byl blízko rezonanci, znázorněno obrázkem 1.5.2. Zvětší-li se vzdálenost levitujícího tělesa od elektromagnetu, klesne indukčnost L jeho cívky, pracovní bod se přiblíží rezonanci a budící proud se opět zvýší, což má za následek zvětšení síly působící na těleso. Stejně to funguje i v opačném případě. Přiblíží-li se těleso k elektromagnetu, vzroste indukčnost a obvod RLC se rozladí, což vede ke snížení proudu a síly působící na těleso. Výhodnost tohoto levitačního zařízení je jen zdánlivá. Časová konstanta obvodu RLC je poměrně velká, což má za následek tlumení silového působení na těleso a při poruše stabilní polohy vznikají v obvodu oscilace, které mohou divergovat. Nevýhodný je indukční charakter obvodu, konkrétně jeho nízký účinník. Z těchto důvodů se tento způsob levitace nepoužívá k trakčním účelům.[1, 2, 8, 9, 11].



Obr. 1.5.2 Stabilizace polohy tělesa obvodem RLC [převzato z 11]

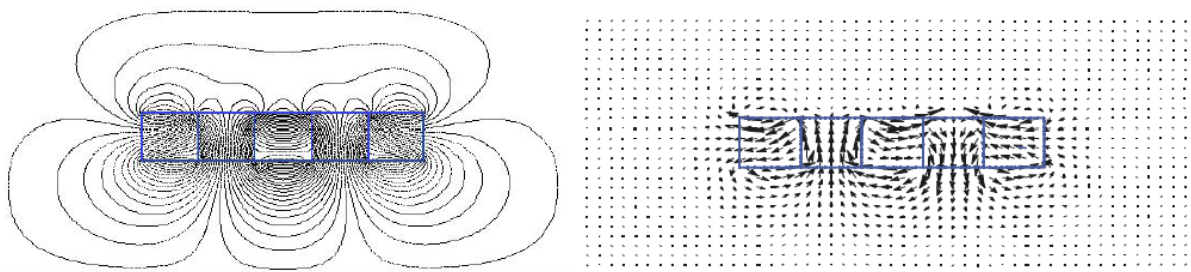
1.6 Levitace pomocí Halbachovy soustavy permanentních magnetů

Klaus Halbach, pracovník Lawrence Berkeley National Laboratory v Kalifornii uspořádal permanentní magnety ve tvaru kvádrů podle obrázku 1.6.1; šipkami je vyznačen směr jejich magnetizace. Permanentní magnety zhotovené práškovou metalurgií, ze vzácných zemin se slitinou neodýmium-železo-bór, dosahovaly remanentní indukce kolem 1.2 T.



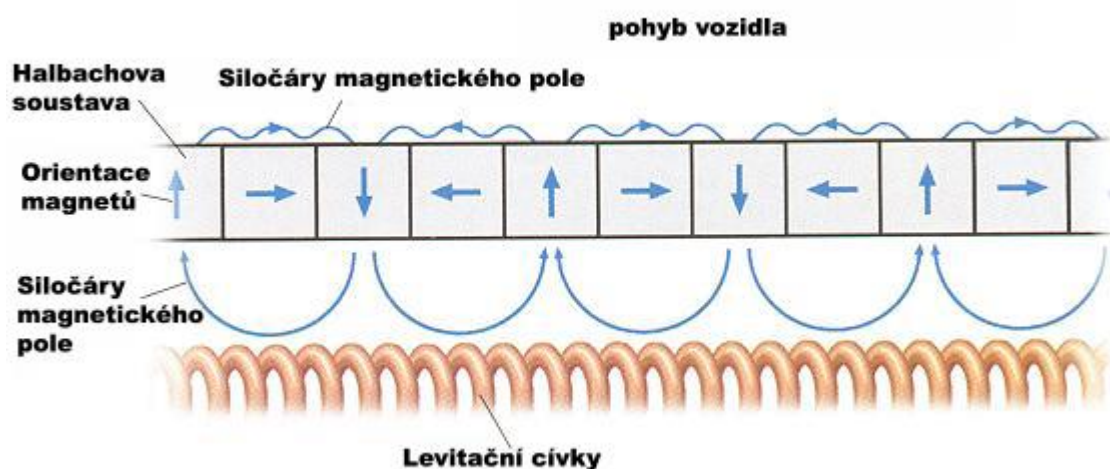
Obr. 1.6.1 Halbachova soustava permanentních magnetů – základní sestava [převzato z 3]

Magnetická pole jednotlivých magnetů se skládají a výsledek je překvapující: v oblasti spodní hrany této soustavy je magnetické pole velmi silné (dosahovalo hodnoty až kolem 1 T), kdežto v oblasti horní hrany soustavy je magnetické pole velmi slabé. Rozložení magnetických siločar je na obrázku 1.6.2. Pětice kvádrů podle obrázku tvoří základní konfiguraci *Halbachovy soustavy magnetů*; v aplikacích lze tyto pětice řadit za sebou.

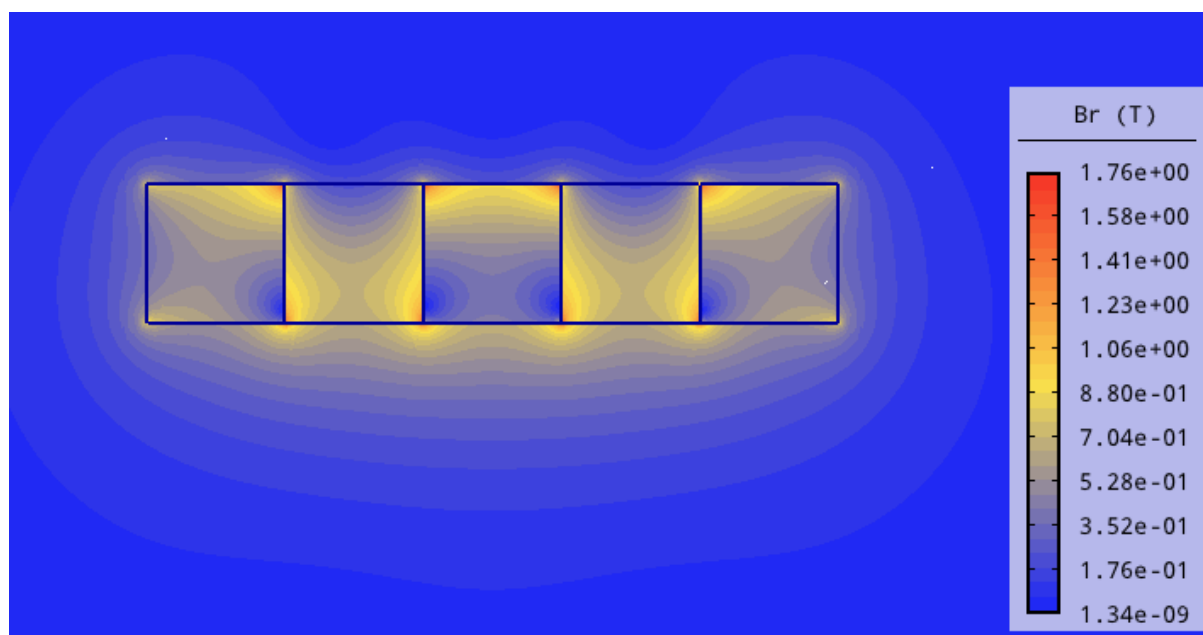


Obr. 1.6.2 Magnetické pole Halbachovy soustavy permanentních magnetů – rozložení siločar [převzato z 3]

Pod Halbachovou soustavou permanentních magnetů je uložena soustava obdélníkových cívek, spojených dokrátka. Nazveme je *levitačními cívkami*. Navzájem jsou izolovány a uloženy těsně vedle sebe, znázorněno obrázkem 1.6.3. Jestliže se soustava magnetů pohybuje, indukují se v levitačních cívkách proudy, jejich magnetické pole je v interakci s magnetickým polem permanentních magnetů. Na Halbachovu soustavu magnetů pak působí levitační síla a dále brzdící síla, jež brání magnetům v pohybu. V levitačních cívkách se ovšem indukují proudy jen, když se Halbachova soustava magnetů pohybuje. [1, 2, 3, 9, 10, 11].



Obr. 1.6.3 Halbachova soustava permanentních magnetů nad cívkami



Obr. 1.6.4 Magnetické pole Halbachovy soustavy nasimulované v Agrosu [převzato z 10]

1.7 Využití v praxi

Využití magnetické levitace v technické praxi je již poměrně hojně využito. Zejména se využívá při [1, 2]:

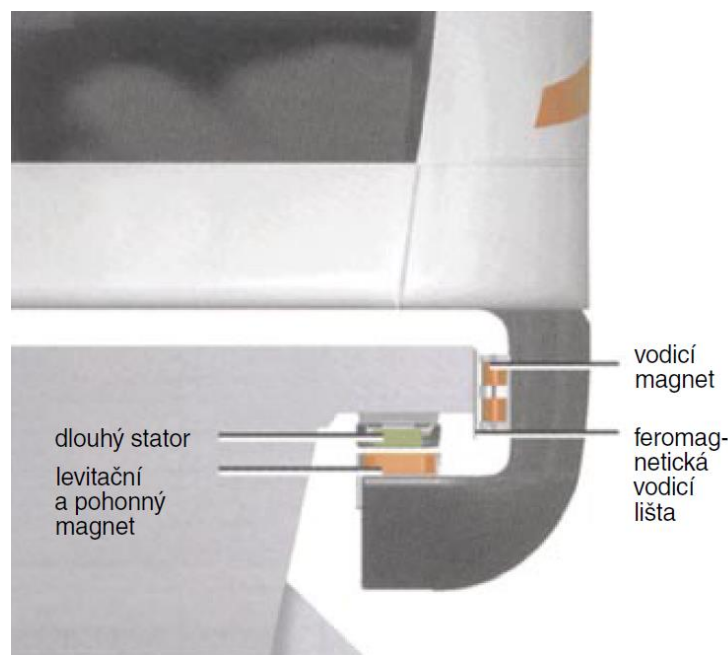
- Projektování moderních dopravních prostředků, jednak vysokorychlostních železnic, tzv. *Magnetických superexpresů*, jednak prostředků pro městskou hromadnou dopravu;
- Při projektování různých speciálních zařízení a přístrojů, u nichž se používají bezkontaktní vysokorychlostní ložiska;
- V hutnictví, metalurgii a zejména při rafinaci kovů, kde se využívá bezkontaktní indukční tavení
- U různých zařízení, která nepracují se stabilní, ale s rázovou magnetickou levitací; používají se pulzní elektromechanické měniče, které mají široké využití, počínaje vybavovacími mechanismy rychlovypínačů a konče elektromagnetickými děly a katapulty pro starty raketoplánů

1.7.1 Magnetická levitace v dopravě

Magneticky levitované dopravní systémy jsou nejvýraznější inovací drážní techniky od zavedení železnice.

- **Magnetické dopravní systémy na principu EMS**

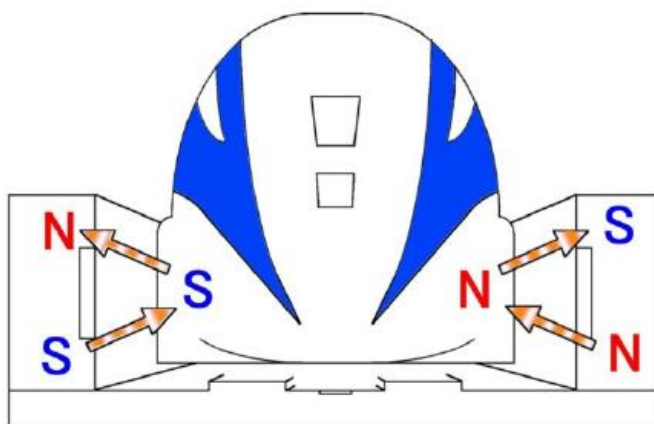
Na principu EMS se využívají především vlaky pod označením *Transrapid*. Výsledkem tohoto systému je rychlost až 500 km.h^{-1} . Vlastní tíha vozidla je kompenzována stejně velkou elektromagneticky odpudivou silou, která udržuje vozidlo ve stavu levitace. Vzduchová mezera je u tohoto systému v rozmezí 10-15 mm, tím spíše jsou vedeny velké nároky na konstrukci. Správnou velikost vzduchové mezery hlídají senzory, které jsou schopny odhalit byť jen setinu rozdílu polohy. Podobně je realizováno stranové vedení vozidla. Vozidlo obepíná nosník, na němž je na spodní straně umístěné trojfázové vinutí tvořící stator elektromagnetického pohonu. Na podvozku vlaku se nachází magnety, které fungují jako rotor. Po vpuštění trojfázového proudu do vinutí jsou tyto magnety přitahovány elektromagnetickou silou, tudíž se vozidlo nadzvedne a je přitahováno a pohybuje se ve zvoleném směru. Pohon je uskutečněn lineárním elektromotorem. Jízdní dráha Transrapidu ve tvaru T zabírá nejméně plochy ze všech dopravních systémů a je nejvíce šetrná k okolní krajině. [1, 2, 9, 11].



Obr. 1.7.1 – Detail systému EMS Transrapid 08: levitační, pohonný a vodící systém [převzato z 11]

- **Magnetické dopravní systémy na principu EDS**

Systém EDS má elektromagnety buzené supravodivými cívkami, které jsou chlazeny kapalným heliem na teplotu $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jsou umístěny ve vozidle. Soustava se pohybuje uvnitř dráhy na magnetickém polštáři. Soustava začne levitovat až po určité rychlosti, musí být tedy vybavena koly. Po dosažení přibližně $80\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ se začnou indukovat dostatečně velké proudy, které způsobí levitaci. Vlaková souprava se pohybuje v daleko větší výšce, než systém EMS a to se vzduchovou mezerou 100-150 mm. Stejně je řešeno statorové vinutí v jízdni dráze, ale základní jednotku tvoří dvakrát dvě dvojice cívek, zabudované v bočních stěnách vlaku. Po dosažení potřebné rychlosti se v dolních cívkách indukují větší proudy, než do horních cívek. Podvozek tedy bude horní cívkou přitahován a dolní cívkou odpuzován. Boční cívky slouží i ke stabilizaci. Superexpresy na tomto principu jsou využívány především v Japonsku, ale zatím slouží pouze k experimentálním účelům. Maximální rychlost a nový světový rekord byl stanoven superexpresem MLX01-901, kdy bylo dosaženo rychlost $603\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. [1, 2, 5, 6, 7, 9, 11]



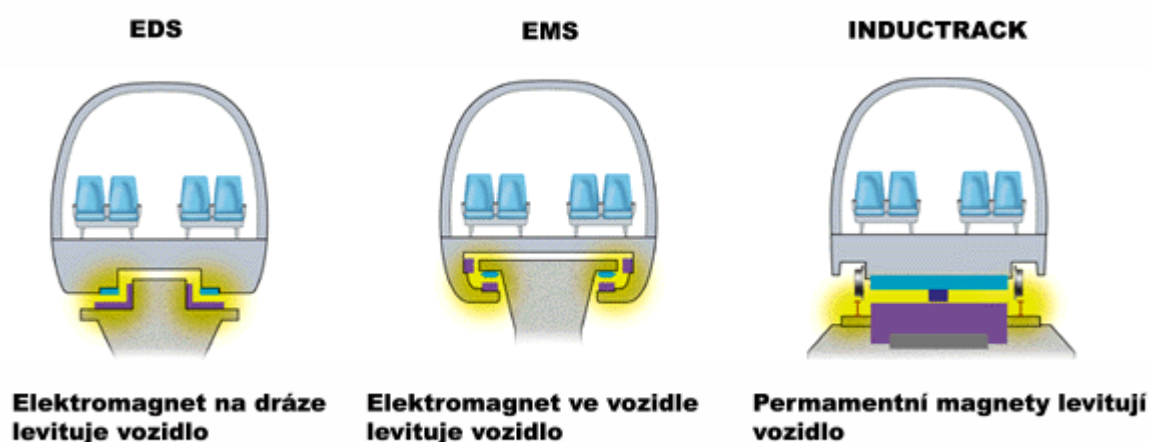
Obr. 1.7.2 – Princip levitace EDS [převzato z 11]



Obr. 1.7.3 – Aerodynamický superexpres MLX01-901 [převzato z 5]

- **Magnetické dopravní systémy pomocí Halbachovy soustavy cívek**

V minulosti byla myšlenka levitace s permanentními magnety nevhodná, ale dnešní době je znám nový způsob jejich využití. Systém s využitím Halbachovy soustavy cívek je znám jako *Inductrack*. Využívá se obdélníkových cívek spojených nakrátko. Cívky jsou vzájemně izolované a uloženy vedle sebe. Pohybující se vozidlo má v sobě zabudovanou Halbachovu soustavu cívek. Pokud se bude vozidlo pohybovat, v cívkách se budou indukovat proudy, které vytvoří magnetické pole. Budou tedy na sebe působit magnetické pole cívek a permanentních magnetů, které se budou vzájemně odpuzovat, což zapříčiní levitace vlaku. Je zapotřebí kol pro rozjezd a dosažení minimální levitační rychlosti, stejně jako u EDS. Ovšem odpadá nutnost chlazení a oproti EMS není třeba náročného elektrického zařízení regulující budící proud magnetů. Minimální levitační rychlost je o řád menší, než u EDS. Touto technologií se začala významně zabývat NASA, která ji chce využít pro start raketoplánů. [1, 2, 3, 9, 10, 11]



Obr. 1.7.4 – Velmi stručné porovnání levitačních systémů užitých v dopravě

Porovnání systémů EMS a EDS

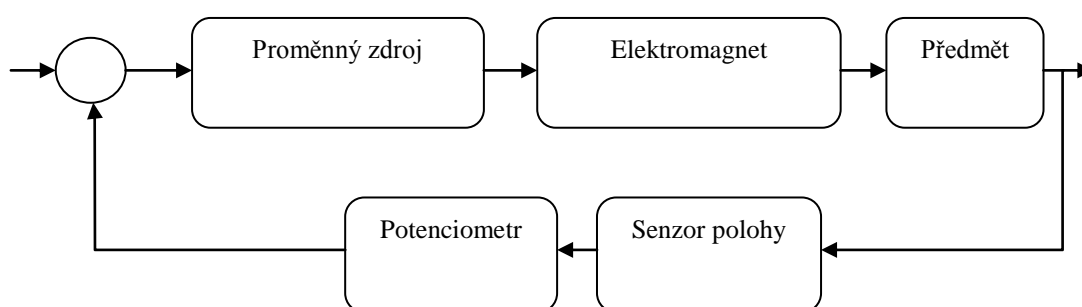
Výhodou EMS je možnost levitace vozidla v klidovém stavu, tj. vozidlo není nutno vybavovat koly pro rozjezd. Také je důležité, že nepracuje se supravodiči a z toho důvodu není nutné náročné kryotechnické zařízení, což má za následek úspornější provoz. Očekává se, že rozvojem vysokoteplotních supravodičů bude možno přejít na chlazení tekutým dusíkem, což by systém na principu EDS zjednodušilo. U vozidel na principu EMS je magnetické pole v kabině pro cestující nepatrné, cca $100 \mu\text{T}$. Naopak nevýhodou je, že systém potřebuje složitou elektronickou regulaci budícího proudu v levitačních magnetech. Jelikož mají superexpresy na principu EMS větší hmotnost, systém pracuje s menší vzduchovou mezerou, která má za následek větší nároky na konstrukci vozidla i vozové dráhy, což vede k vyšším nákladům. V Japonsku má vzduchová mezera u technologie EDS také bezpečnostní důvody, neboť tam jsou častá zemětřesení.

Levitace na principu EDS je stabilní, ale z dynamické analýzy můžeme zjistit, že tlumení ve vertikálním směru je nízké. U vozidel pracujících tímto principem musí být kabiny pro cestující magneticky stíněny. [1, 2, 10]

2 Návrh magnetického levitátoru

Při návrhu zařízení bylo postupováno dle teoretických poznatků zmíněných v kapitole 1.5, ze kterých nejlépe vychází pro tento projekt princip EMS – Elektromagnetická levitace. Tedy atraktivní typ levitace založen na přitahování elektromagnetem.

2.1 Blokové schéma



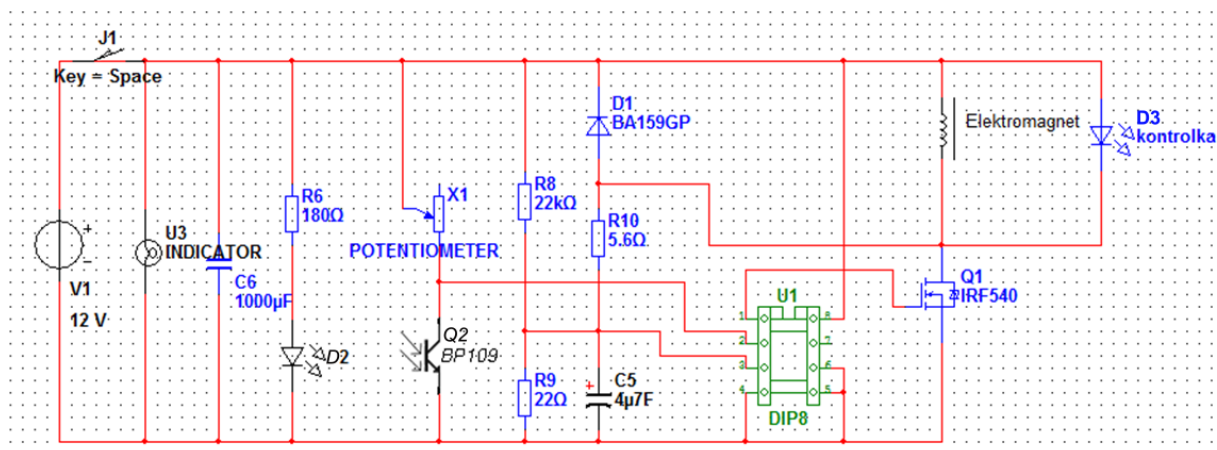
Obr. 2.1 – Blokové schéma levitátoru

Dle vysvětlení principů elektromagnetické levitace v kapitole 1 bylo vytvořeno toto blokové schéma. Navrhované zařízení bude vytvořeno na základě tohoto schématu.

Zpětná vazba bude realizována pomocí optické závory a potenciometru. Potenciometr má funkci ladění, kdy díky němu ovládáme proud tekoucí do elektromagnetu a tím pádem i velikost síly generované magnetickým polem. Optická závora složená z vysílací IR diody a přijímacího fototranzistoru snímá polohu předmětu. Kdyby nebyla použita zpětná vazba, předmět by nelevitoval, ale pouze by přiskočil k elektromagnetu a držel by se na něm.

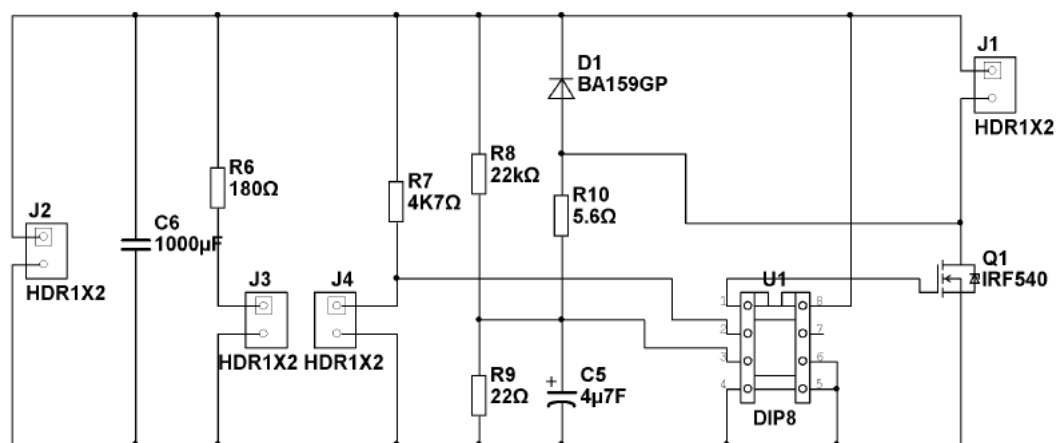
Jako zdroj bude zvolen vhodný transformátor, elektromagnet bude realizován solenoidní cívkou s feromagnetickým jádrem. K regulaci obvodu bude sloužit operační zesilovač.

2.2 Schéma zapojení



Obr. 2.2.1 Schéma zapojení

Schéma bylo vytvořeno v programu NI Multisim 11.1, upravené pro Ultiboard – místo zdroje, infradiod a elektromagnetu jsou vývody pro zapojení do sítě.

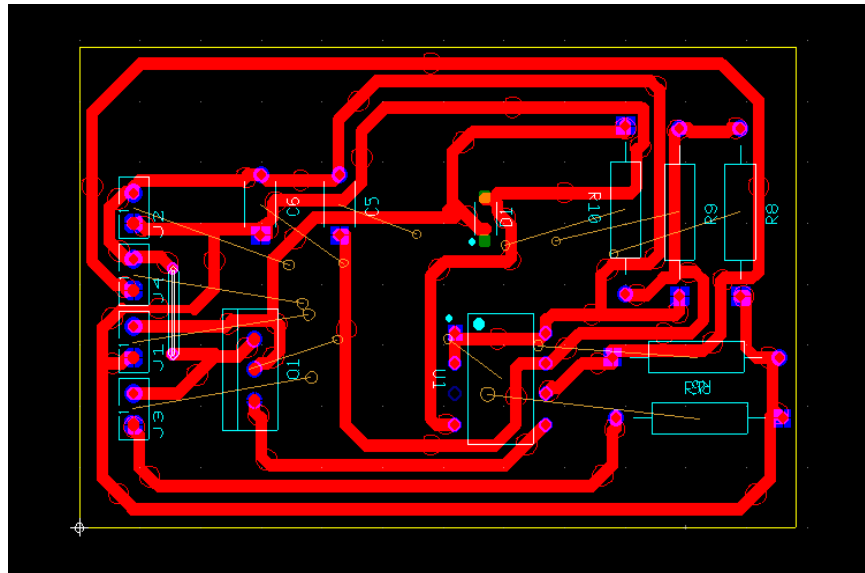


Obr. 2.2.2 – schéma s vývody

- J1-Vývody pro elektromagnet
- J2-Vývody pro zdroj
- J3-Vývody pro vysílací infradiodu
- J4-Vývody pro fototranzistor

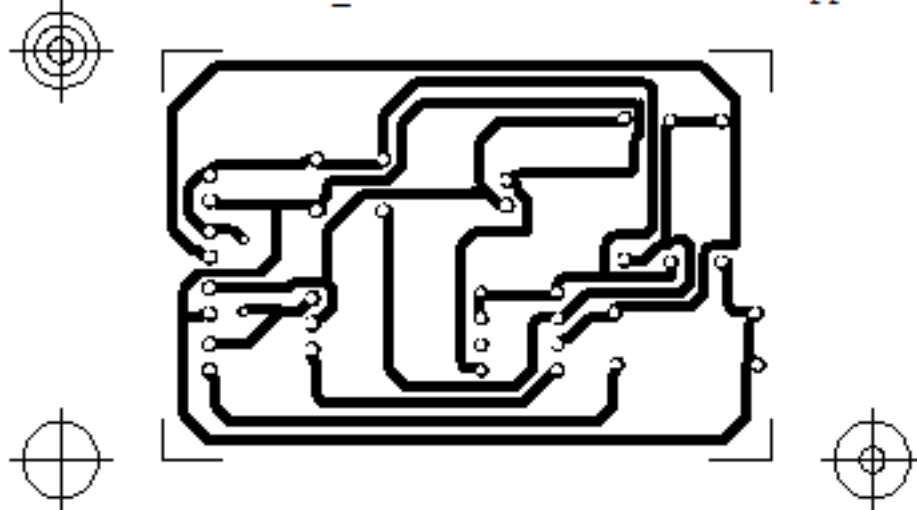
2.3 Plošný spoj

Zprvu jsem si v NI Multisimu nakreslil schéma, které jsem posléze převedl do NI Ultiboardu a osázel plošný spoj. Pomocí měděné desky, vrtačky a chloridu železitého byl vyhotoven spoj na DPS.

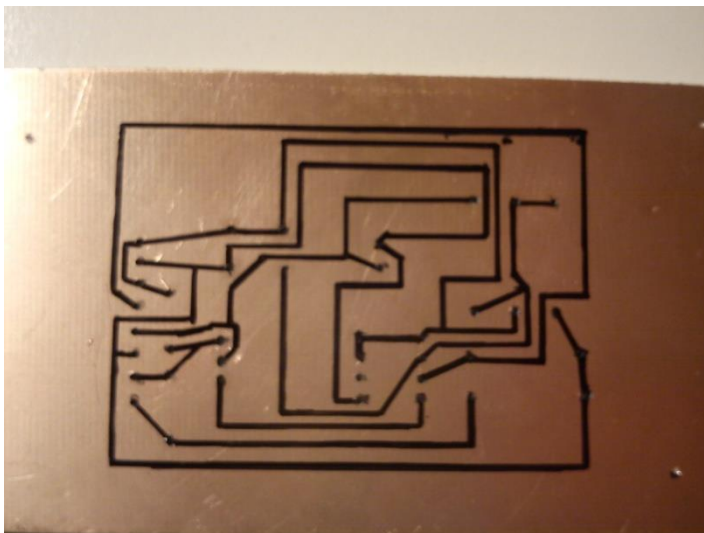


Obr. 2.3.1 – Osázení součástek v programu NI Ultiboard 11.1 v interakci s NI Multisim 11.1.

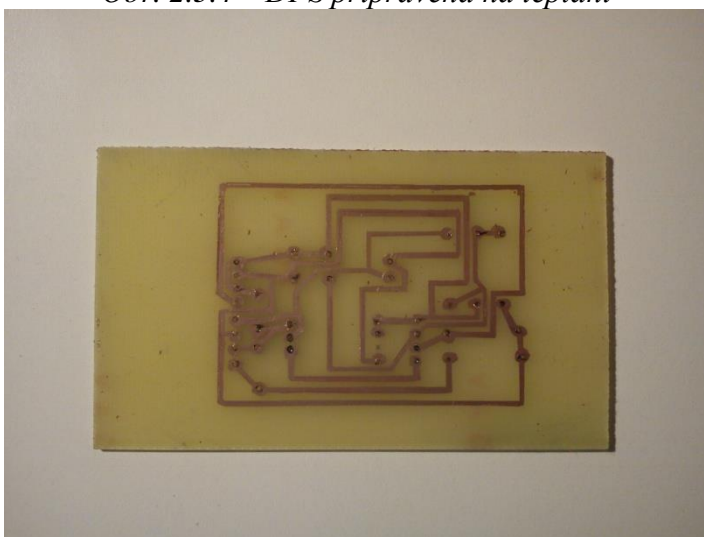
Ultiboard-levitator_2 - 4.4.2011 - 19:29:20 Copper Bottom



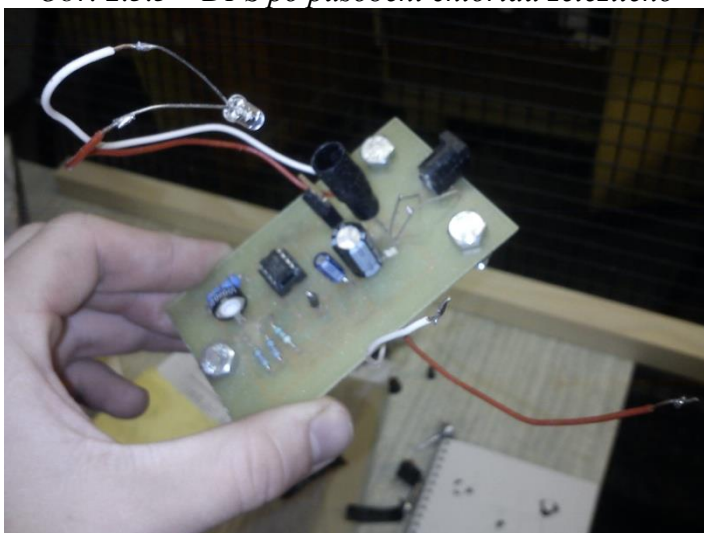
Obr. 2.3.2 – Vytvoření plošného spoje v programu NI Ultiboard 11.1 v interakci s NI Multisim 11.1.



Obr. 2.3.4 – DPS připravena na leptání



Obr. 2.3.5 – DPS po působení chloridu železitého



Obr. 2.3.6 – Již osázená DPS

2.4 Optická závora

Světelná závora je elektronicko-optický prvek, který zajišťuje přerušování světelného paprsku. Skládá se z fototranzistoru a v mém případě IR diody.

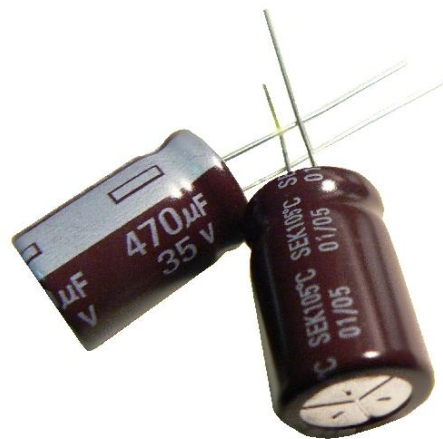
2.5 Elektronická část

V projektu je využito stejnosměrného zdroje 12V realizovaného transformátorem tak, aby bylo možno použít síťové napětí, elektrolytických kondenzátorů, rezistorů, infra LED diody, operačního zesilovače, potenciometru, diody, tranzistoru a fototranzistoru. Součástky byly zvoleny dle katalogových hodnot odpovídajícím výpočtům.

Elektrolytické kondenzátory

Elektrotechnická součástka používaná k dočasnému uchování elektrického náboje. Elektrolytický kondenzátor je odlišný od jiných typů kondenzátorů. Katodu tvoří vodivý elektrolyt, který může být tekutý, polosuchý ale i pevný. Anoda je tvořena čistou hliníkovou fólií, na které je vrstvička Al_2O_3 (oxid hlinitý), tato vrstvička je dielektrikum. Elektrody mají velký povrch, který je tvořen nepravidelně naleptanou strukturou povrchu hliníku. Výhodou je vysoká měrná kapacita a schopnost snést velmi nízké napětí, ale nevýhoda, že nesmí být zasazen do plošného spoje opačnými póly.

Pro návrh levitátoru byl použity dva elektrolytické kondenzátory o kapacitě 1nF a 4,7 μF .



Obr. 2.5.1 – Elektrolytický kondenzátor

Rezistory

Pasivní elektrotechnická součástka, projevující se v ideálním případě jedinou vlastností – elektrickým odporem. Důvodem zařazení rezistoru do obvodu je obvykle snížení velikostí elektrického proudu nebo získání určitého úbytku napětí. V obvodu jsou využity odpory k dosažení správných hodnot napětí a proudů dle datasheetů, jmenovitě jsou upraveny pro citlivost fototranzistoru, operačního zesilovače a elektromagnetu.



Obr. 2.5.2 – Rezistor

Infra dioda

Je elektronická polovodičová součástka obsahující přechod P-N. Narozdíl od klasických diod, infra vyzařuje UV záření v úzkém spektru barev a používá se v široké řadě aplikací. V levitátoru je uplatněna v optické závoře.



Obr. 2.5.3 – IR dioda

Operační zesilovač

Je univerzální stejnosměrný zesilovací analogový elektronický obvod. V obvodu slouží k regulaci proudu. V projektu je využita polovina operačního zesilovače 1458.



Obr. 2.5.4 – Operační zesilovač

Potenciometr

Aby bylo možné levitovat různé objekty o různých hmotnostech, je zapotřebí nastavit jmenovitou hodnotu budicího proudu dle konkrétně levitovaného tělesa. Za tímto účelem lze využít např. potenciometr, nebo trimr. Byl zvolen potenciometr 500k Ω .



Obr. 2.5.5 – Potenciometr

Dioda

Je elektronická polovodičová součástka s dvěma elektrodami. Každá dioda má dva vývody, které se nazývají katoda a anoda. Základní funkce je, že dovoluje tok proudu směrem od anody ke katodě. V opačném směru proud neteče. V obvodu je využito diody BA159.



Obr. 2.5.6 – Křemíková dioda

Tranzistor

Je elektronická polovodičová součástka, kterou tvoří dvojice přechodů PN. Základní vlastností tranzistoru je schopnost zesilovat – malé změny napětí nebo proudu na vstupu mohou vyvolat velké změny napětí nebo proudu na výstupu.

V obvodu mám tranzistor IRF 540 z důvodu spínání – spíná dle polohy umístěného předmětu v optické závoře.



Obr. 2.5.7 – Tranzistor IRF540

Fototranzistor

Je elektronická polovodičová součástka. Dopadajícím zářením do kolektorového PN přechodu se otevře přechod mezi bází a emitorem. Tranzistor se otevře a prochází jím proud z připojeného zdroje. Průchod nosičů náboje lze řídit velikostí dopadajícího záření. Fototranzistor je v mém projektu využit v optické závoře a zvolil jsem fototranzistor BP109.



Obr. 2.5.8 – Fototranzistor

Zdroj

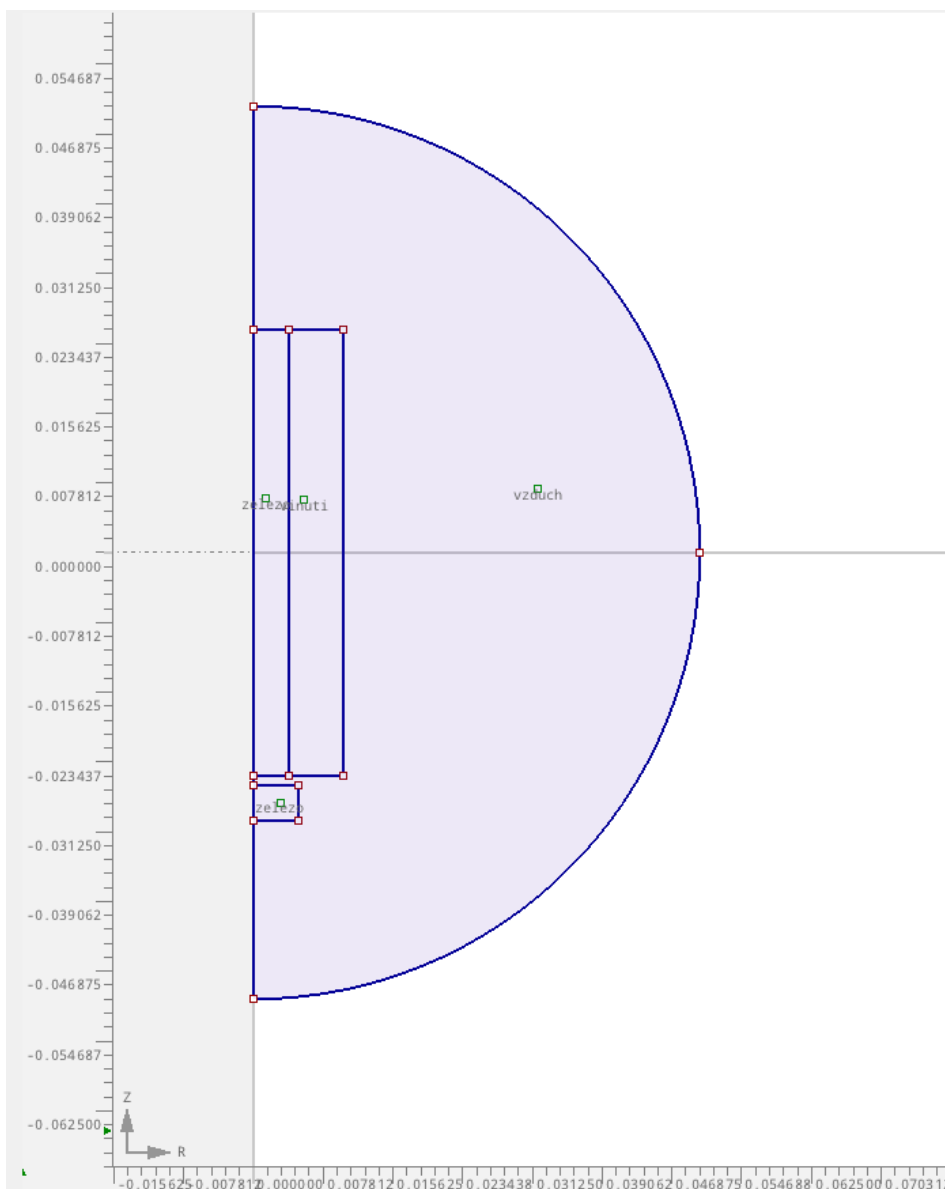
V modelu levitátoru použít zdroj 12V; 2A.

2.6 Návrh elektromagnetu

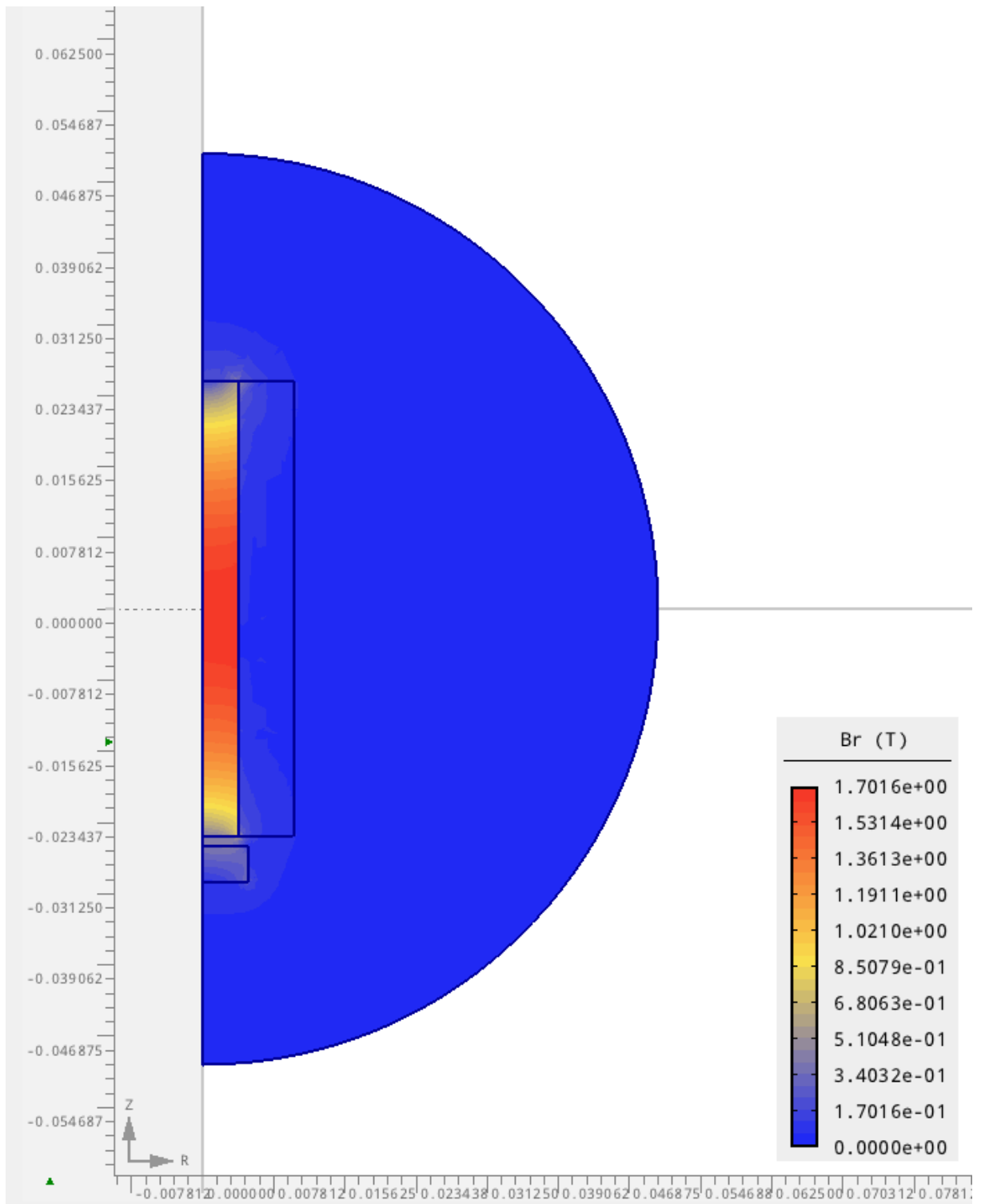
Při návrhu se vycházelo z předpokladu, že levitující předmět bude mít hmotnost kolem 0.2 kg. Minimální síla potřebná pro překonání gravitace by dle následujícího vzorce měla být minimálně o velikosti 2 N.

$$F = mg = 0.2 \times 9.81305 = 1.962 \text{ N}$$

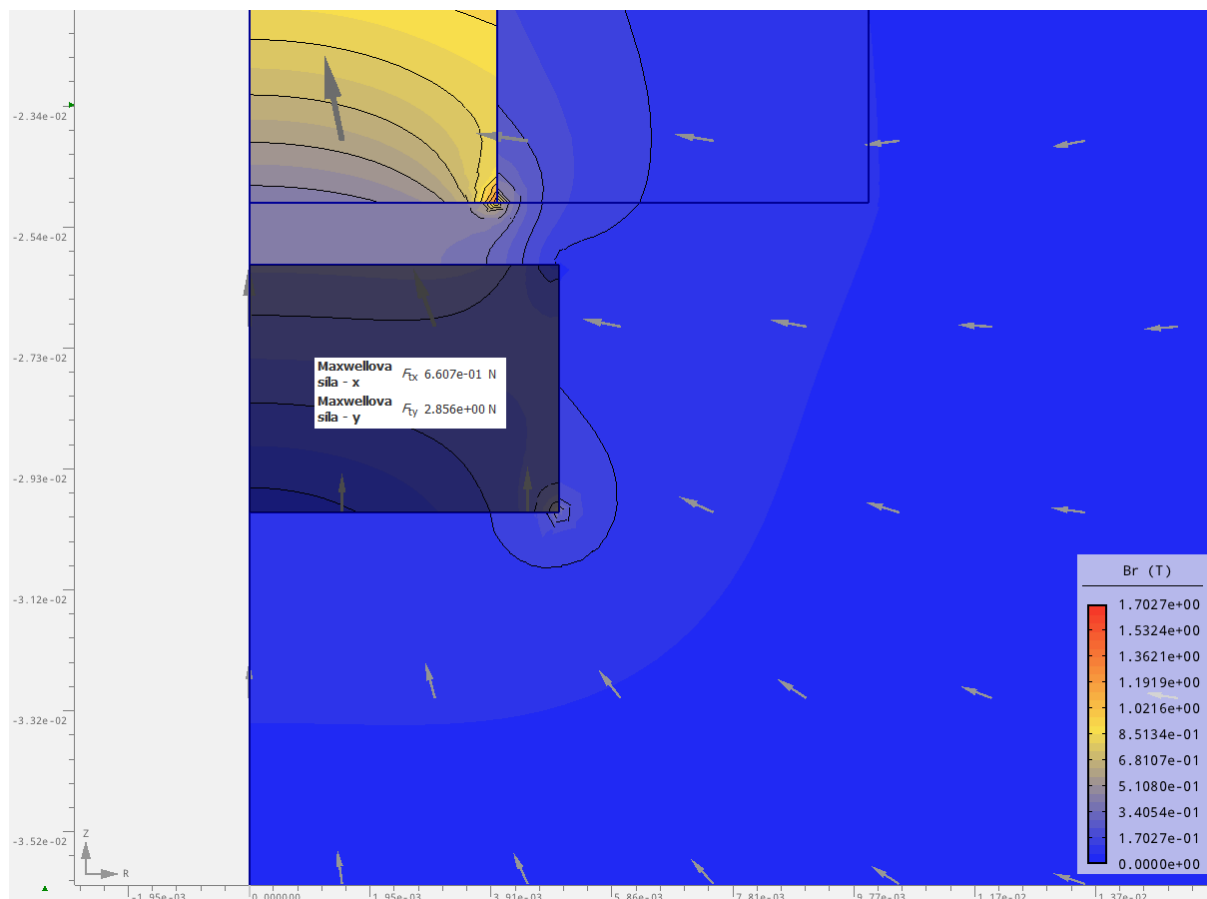
K simulaci jsem využil programu Agros2D [13] za použití předpokládaných reálných geometrických hodnot použitého elektromagnetu.



Obr. 2.6.1 – geometrie použitého modelu; Agros2D



Obr. 2.6.2 – Rozložení magnetické indukce; výsledek simulace, Agros2D



Obr. 2.6.3 – Detail magnetické indukce a výsledná působící síla ovlivňující levitující předmět; Agros2D

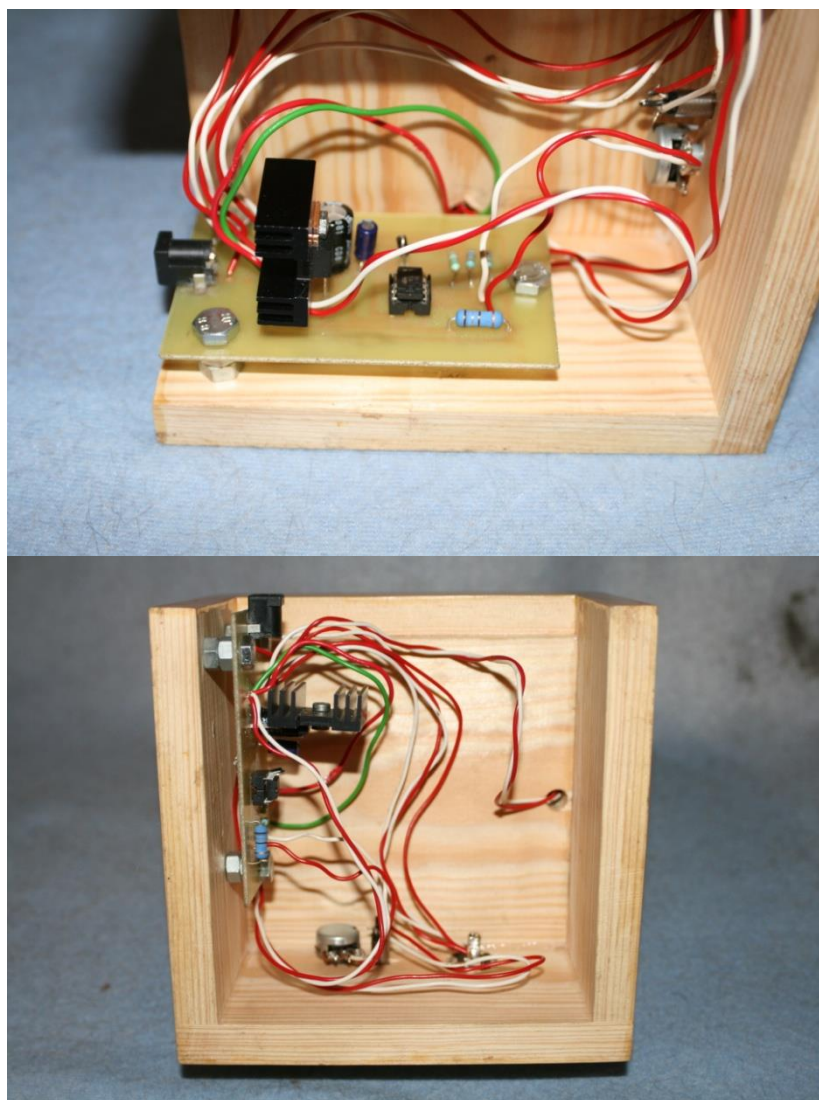
Z modelu je patrné, že za předpokladu $\delta = 0,01 \text{ m}$, $I_b = 2 \text{ A}$ bude třeba $N = 1200$. Výsledná síla za těchto podmínek je $F = 2.856 \text{ N}$, což je dostačující i pro těžší předměty. Na základě výsledků simulace byla ručně vyrobena solenoidní cívka s feromagnetickým jádrem s $N = 1200$ závitů z měděného lakovaného drátu a průměru $0,5 \text{ mm}$.

3 Konstrukce a verifikace levitátoru

3.1 Základna

Vyrobena ze smrkového dřeva, obdélníkových průřezů. Konstrukce přístroje byla zvolena z dřevěných profilů pro jejich snadnou dostupnost a celkem robustní konstrukci. Umožňuje zamaskovat vodiče do profilů a příjemný estetický vzhled. Konstrukce je slepena a začepována, povrchově upravena syntetickým bezbarvým lakem.

Základna přístroje spočívá na třech bodech, aby bylo dosaženo stabilní polohy při práci přístroje.



Obr. 3.1 – Základna

3.2 Stojany

Vyrobeny ze smrkového dřeva, obdélníkových průřezů. Využito pro umístění elektromagnetu a stínění.

3.3 Stínění optické části

Vyrobeny ze smrkového dřeva, ve tvaru kuželů. Aby nedocházelo k rušení správného světelného paprsku, je optická závora zastíněna pomocí dřevěných kuželů tak, aby se vnější optické vlivy eliminovaly. Stínící kužely jsou ke stojanům přilepeny, tudíž se jedná o nerozebíratelný spoj.



Obr. 3.3 – Stínění diod

3.4 Zhodnocení funkčnosti, výhody, nevýhody navrženého levitátoru

Navržené zařízení je plně funkční, je schopno levitovat objekty v rozsahu hmotností $m = 0 \sim 200 \pm 50$ g. Variability bylo dosaženo pomocí potenciometru vyvedeného na základní desku, kdy se správným manipulováním nastaví vhodná úroveň pro daný předmět.

Levitátor je osazen vypínačem, světelně signalizuje aktuální stav pomocí LED diody. Pro napájení je využito síťového napětí.

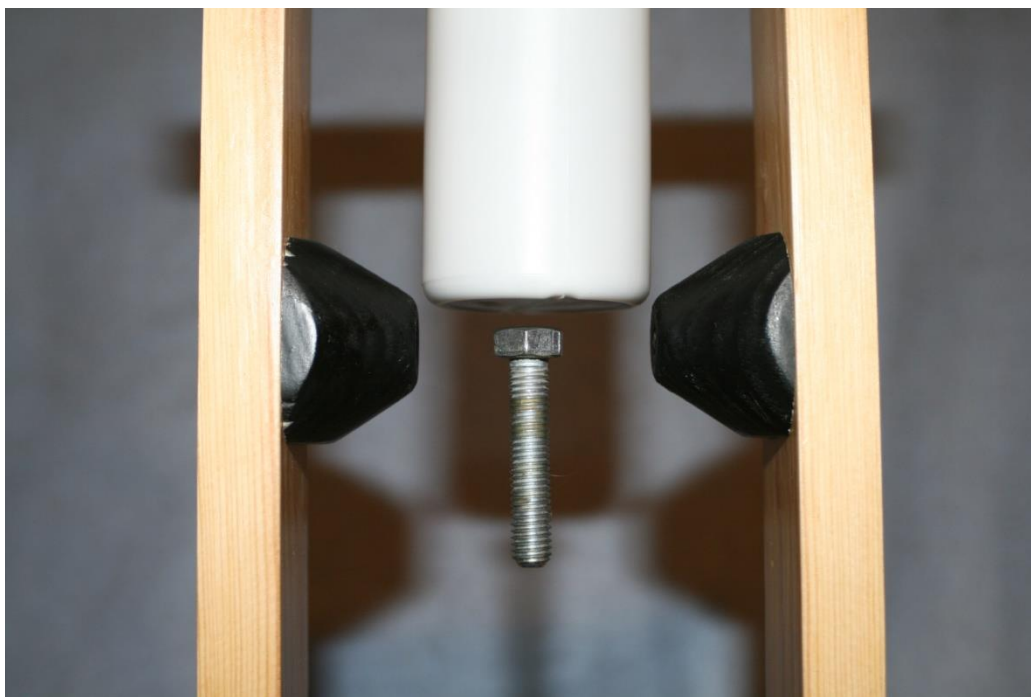
Zařízení bylo navrženo s ohledem na ochranu levitujících předmětů před pádem, ať už z důvodu výpadku napájení, či manuálního vypnutí levitátoru. Zachytávání padajících předmětů je vyřešeno ve dvou krocích. Pro utlumení dopadu je na základně umístěna molitanová pěna a jako zábrana proti vypadnutí levitujících součástí je konstrukce navržena tak, aby její zvýšené okraje případnému vypadnutí zabránily.

Mezi nevýhody patří hlavně nedostatečné chlazení budicí cívky a použitého tranzistoru. Cívka by při trvalém provozu odebírá přibližně 18W, ve vinutí vznikají Joulovy ztráty a dochází k oteplení elektromagnetu. Tranzistor je vybaven pasivním chladičem, který ho při dlouhodobém provozu nezvládá uchládit. Tyto nevýhody by bylo možné vyřešit přidáním aktivního chlazení, např. pomocí ventilátoru.

Další nevýhodou je již zmíněný rozsah hmotností předmětů daný výběrem budicího elektromagnetu. Levitace těžších předmětů by bylo možné dosáhnout odlišnou konstrukcí zařízení, volbou silnějšího elektromagnetu a příslušné elektroniky.



Obr. 3.4.1 – Hotové zařízení



Obr. 3.4.1 – Levitátor potvrzující svoji funkci levitací šroubu M80

4 Závěr

Magnetická levitace nachází řadu využití v praxi, od hraček pro děti až po magneticky levitované superexpresy. Na základě znalostí získaných studiem na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni a nastudováním problematiky magnetické levitace jsem navrhl a realizoval magnetický levitátor na principu EMS. Navržené zařízení je plně funkční a demonstruje aplikaci principu EMS včetně jeho výhod i nevýhod. EMS se jeví jako ideální princip pro dosažení levitace menších předmětů nízkých hmotností, pro levitaci těžkých objektů by bylo zapotřebí obrovského výkonu a značných finančních prostředků. Z tohoto důvodu se její využití jeví výhodným v hračkách a demonstračních zařízeních, nicméně ani značné finanční prostředky nejsou překážkou pro využití EMS v dopravě, konkrétně v Německu funguje systém zvaný Transrapid. Vozidlo je obepnuto nosníkem, který je pomocí Vlaky tohoto systému dosahují až $500 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Vozidlo obepíná nosník, na němž je na spodní straně umístěné trojfázové vinutí tvořící stator elektromagnetického pohonu. Na podvozku vlaku se nachází magnety, které fungují jako rotor. Po vpuštění trojfázového proudu do vinutí jsou tyto magnety přitahovány elektromagnetickou silou, tudíž se vozidlo nadzvedne a je přitahováno a pohybuje se ve zvoleném směru.

Použitá literatura

- [1] MAYER, Daniel. *Elektrodynamika v energetice*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005, 278 s. ISBN 80-7300-164-0.
- [2] MAYER, Daniel: *Magnetická levitace a její využití*. *Elektro*. ISSN 1210-0889. Roč. 13, č. 1 (2003), s. 4-12
- [3] MAYER, D., ULRICH, B.: *Halbachova soustava magnetů a její modifikace*. [online]. [cit. 2015-05-20]
Dostupné z: <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce4/45.pdf>
- [4] JEDLIČKA, M., KOTLAN, V.: *Výpočet statických charakteristik silového působení v elektrodynamickém systému levitace*. *Elektrotechnika a informatika 2004*. část 1., Elektrotechnika. 5. Ročník přehledky doktorských prací. ISBN 80-7043-328-0. Plzeň, Západočeská univerzita, 2004. S. 35-38
- [5] *Japan's maglev train sets world record: 603 kph* [online]. [cit. 2015-05-20]
Dostupné z: <http://edition.cnn.com/2015/04/21/asia/japan-maglev-train-world-record>
- [6] POWELL, J., DANBY, G.: *The New Mode of Transport For the 21st Century*. 21st Century, Summer 2003
- [7] BEATY, W.: *MAGNETIC LEVITATION DEVICE*. [online]. [cit. 2015-05-20]
Dostupné z: <http://amasci.com/maglev/maglev.html>
- [8] *Obvody se střídavým proudem*. [online]. [cit. 2015-05-20]
Dostupné také z: http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/elektrina/el_proud/stridavy_proud/rlc_obv/rlc.html
- [9] KOUTNÍK, Jan. *Design magnetického vlaku*. Brno, 2014. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=53255.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně.
- [10] MAYER, Daniel, *Nové možnosti magnetické levitace v dopravě?*. [online]. [cit. 2015-05-20] Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/nove-moznosti-magneticke-levitace-v-doprave--14291>
- [10] MIKUTA, Petr. *Elektromagnetický projekt magneticky levitovaného superexpresu*. Plzeň, 2014. [online]. [cit. 2015-05-20] Dostupné z: <https://otik.uk.zcu.cz/bitstream/handle/11025/12367/Diplomova%20prace-Elektromagneticky%20projekt%20magneticky%20levitovaneho%20superexpresu%3B%20Petr%20Mikuta.pdf?sequence=1>. Diplomová práce. Západočeská univerzita.
- [11] Ghen Q. Y.: *Magnetic Levitation Using High-Temperature Superconductors: A*

Materials Perspective. IEEE Trans. On Magn., Vol, 41, No. 6, Dec. 1992, str- 824-828.

- [12] PLOCEK, Robert. *TRANSRAPID*. 2009. [online].[cit. 2015-05-20]
Dostupné z: www.fd.cvut.cz/projects/k612x1zs/data/x1zs/transrapid.pdf. Seminární práce.
- [13] Agros 2D [online].[cit. 2015-05-20] Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>

Příloha A - Seznam součástek

Součástky na deskách plošných spojů		
Součástka:	Hodnota:	Popis:
C5	4 μ 7F	Elektrolytický kondenzátor, 50V, diskový, 5mm
C6	1nF	Keramický kondenzátor, 50V, diskový, 5mm
R6	180 Ω	Metalický rezistor
R8	22k Ω	Metalický rezistor
R9	22 Ω	Metalický rezistor
R10	5.6 Ω	Metalický rezistor
D2	/	Infra LED dioda
Q2	BP109	Fototranzistor
D1	BA159	Dioda
Q1	IRF540	Tranzistor
DIP8	1458	Operační zesilovač
X1	500k Ω	Potenciometr
V1	12V; 2A	Zdroj
E	/	Elektromagnet
D3	/	LED dioda