



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

MAGNETICKY LEVITUJÍCÍ VOZÍTKO

MAGNETICALLY LEVITATED CART

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. RASTISLAV JANČUŠ

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. PETR BLAHA, Ph.D.

BRNO 2014



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Kybernetika, automatizace a měření

Student: Bc. Rastislav Jančuš

ID: 115191

Ročník: 2

Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Magneticky levitující vozítko

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou magnetické levitace
2. Navrhněte a realizujte magnetickou dráhu, nad kterou bude levitovat vozík. Pro levitaci použijte kombinace permanentních magnetů a elektromagnetů.
3. V prostředí Matlab Simulink vytvořte model pro simulaci přitahování feromagnetického materiálu elektromagnetem. Navrhněte na tento model algoritmus zpětnovazebního řízení.
4. Otestované algoritmy vyzkoušejte na reálném vzorku levitujícího vozíku.
 - a. Vyberte vhodnou řídicí platformu a zvolte (případně realizujte) výkonový zesilovač pro elektromagnety na bázi PWM.
 - b. Zpětnou vazbu vytvořte vhodně zvoleným snímačem vzdálenosti. V případě potřeby využijte zpětnou vazbu od měřených proudů.
5. Porovnejte výsledky získané ze simulací a z reálných experimentů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Caha, Z.; Černý, M.: Elektrické pohony, Praha, SNTL 1990.
[2] Vas, P.: Parameter Estimation, Condition Monitoring and Diagnosis of Electrical Machines. Clarendon press, Oxford, 1993, ISBN 0-19-859375-9.

Další dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 19.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.

Předseda oborové rady

Abstrakt

Táto diplomová práca zhrňuje obecné teoretické poznatky v oblasti permanentných magnetov a elektromagnetizmu. Popisuje jednosmerný elektromagnet ako základný stavebný kameň levitujúceho rýchlovlaku. Ďalej sa práca venuje aj základným podvozkom a princípom využívajúcich sa pri levitácii vo vysokorýchlostnej doprave.

Druhá praktická časť práce obsahuje návrh konštrukcie levitujúceho vozíku a analýzu získaného matematického modelu elektromagnetu. Práca popisuje postup návrhu riadenia pre bočnú stabilizáciu elektromagnetov a samotnú realizáciu reálneho modelu, vrátane odladenia komunikácie počítača so stavmi snímačov a porovnanie reálneho modelu s modelom simulovaným v programovom prostredí Simulink.

Kľúčové slová

magnetická levitácia, levitace, maglev, vysokorýchlostná doprava, vysokorýchlostní, permanentný magnet, permanentní, magnety, elektromagnet, riadenie, řízení, matematický model elektromagnetu, levitující vozík, levitující, magnetická dráha, simulácia, simulace, femm, matlab, simulink, mathworks

Abstract

Diploma thesis is summarizing common theoretical knowledge about permanent magnets and electromagnetism. Represent DC electromagnet as basic part for levitated high-speed train. Work is analyzing basics under cart and principles used for magnetic levitation in high-speed transportation.

Second practice part including projecting construction levitated cart and analyzing acquired mathematical model of electromagnet. Work is analyzing process for projecting control for side electromagnets and realization real model, including tuning computer communication with states of sensors and comparison real model with model simulated in program Simulink.

Keywords

magnetic levitation, maglev, high-speed transportation, permanent magnet, magnets, electromagnet, control, regulation, mathematical model electromagnet, levitation car, magnetic railway, simulation, femm, matlab, simulink, mathworks

Bibliografická citácia

JANČUŠ, R. *Magneticky levitující vozítka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2014. 126 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Petr Blaha, Ph.D.

Prehlásenie

Prehlasujem, že svoju diplomovú prácu na tému *Magneticky levitujúci vozítko* som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho diplomovej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej diplomovej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto diplomovej práce som neporušil autorská práva tretích osôb, ani som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných alebo majetkových a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúceho zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení časti druhej, hlavy VI. diel 4 Trestného zákonníka č. 40/2009 Sb.

V Brne dňa: **19. mája 2014**

.....
podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Petrovi Blahovi, Ph.D. za účinnú metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenné rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

Takisto sa chcem poďakovať prof. Ing. Jarmile Dědkovej, CSc. za úvodnú pomoc pri návrhu konštrukcie modelu a veľká vďaka ešte patrí doc. Dr. Ing. Miroslavovi Patočkovi za značnú pomoc pri tvorbe matematického modelu elektromagnetu.

V Brne dňa: **19. mája 2014**

.....
podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	9
2	FYZIKÁLNY PRINCÍP A ZDROJE MAGNETICKÉHO POJA	10
2.1	Základné fyzikálne veličiny popisujúce magnetické pole.....	10
2.1.1	Rozdelenie magnetických materiálov	12
2.1.2	Hodnotenie vlastností magnetických materiálov	13
2.2	Permanentné magnety	14
2.2.1	Charakteristické parametre permanentných magnetov	16
2.2.2	Magnetizácia, demagnetizácia permanentných magnetov	16
2.2.3	Typy permanentných magnetov	17
2.2.4	Silové pôsobenie permanentných magnetov	21
2.3	Supravodivosť, supravodivé magnety	22
2.4	Earnshawov teorém.....	23
3	JEDNOSMERNÝ ELEKTROMAGNET	26
3.1	Indukčnosť jednosmerného elektromagnetu	26
3.2	Ťažná sila elektromagnetu.....	29
3.3	Model jednosmerného elektromagnetu pre magnetický záves.....	31
3.4	Model levitačného elektromagnetu	35
4	MAGNETICKÁ LEVITÁCIA A JEJ VYUŽITIE V DOPRAVE	38
4.1	Shanghai maglev - najmodernejší druh dopravy	38
4.2	Obečná charakteristika systému maglev	39
4.3	Fyzikálne princípy a konštrukcie podvozkov.....	40
4.3.1	EMS, podvozok s elektromagnetickým zavesením.....	40
4.3.2	EDS, podvozok s elektrodynamickým zavesením	44
4.3.3	Halbachova sústava permanentných magnetov, Inductrack.....	47
4.3.4	Amlev systém.....	50
4.4	Pohon pre levitujúce dopravné systémy	51
4.5	Brzdové systémy pre maglev vlaky	52
5	PROGRAMOVÉ VYBAVENIE PRE SIMULÁCIU	53
5.1	Program FEMM	53
5.2	Matlab	54
6	UVAŽOVANÁ KONŠTRUKCIA VOZÍKU.....	55

7	NÁVRH A RIADENIE BOČNÝCH ELEKTROMAGNETOV	57
7.1	Získanie vhodného modelu elektromagnetu	57
7.2	Stanovenie pracovného bodu, návrh elektromagnetu	58
7.3	Voľba vhodného snímača vzdialenosti	61
7.4	Zjednodušenia a linearizácia nelineárneho modelu elektromagnetu.....	61
7.5	Merania na reálnom elektromagnete, simulácia, stanovenie rozdielov.....	64
7.6	Obecný návrh kaskádového regulátora pre model	68
7.7	Porovnanie riadenia lineárneho a nelineárneho modelu.....	69
7.8	Aplikácia pre riadenie dvoch elektromagnetov.....	70
7.9	Výber vhodnej riadiacej elektroniky, aplikácia navrhnutého riadenia.....	71
7.9.1	Realizácia a meranie PWM.....	73
7.10	Návrh filtrov a výsledné prenosy, výsledný regulátor, anti-windup	77
7.10.1	Návrh filtrov a výsledné prenosy	77
7.10.2	Návrh výsledného kaskádového regulátora.....	79
7.10.3	Anti-windup	82
7.11	Porovnanie simulovaných a reálnych hodnôt, zhodnotenie regulácie	84
8	ZÁVER A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV.....	89
	LITERATÚRA.....	90
	ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV	95
	ZOZNAM OBRÁZKOV	98
	ZOZNAM TABULIEK.....	101
	ZOZNAM PRÍLOH.....	102
	Príloha A.....	103
	Príloha B.....	104
	Príloha C.....	105
	Príloha D.....	106
	Príloha E (prúdová schéma).....	107
	Príloha F (realizovaný modul).....	109
	Príloha G.....	118
	Príloha H.....	120
	Príloha I	125

1 ÚVOD

Potlačenie gravitácie by umožnilo vznášanie predmetu či človeka v priestore. Táto predstava prevádza človeka od nepamäti. Dlhá bola iba vďačným námetom pre autorov žánru sci-fi, ktorí vo svojich predstavách rozvíjajú rôzne fantastické zariadenia využívajúce levitáciu. Skúmaním elektromagnetického poľa sa však dospelo k záveru, že magnetickú levitáciu je možné realizovať.

V súčasnosti nachádza magnetická levitácia uplatnenie vo vysokorýchlostnej doprave (vysokorýchlostný dopravný prostriedok je možné v dnešnej dobe definovať ako prostriedok, ktorý dosahuje rýchlosť 250 km/h a vyššiu). Avšak je to najmodernejší, najrýchlejší, ale najdrahší druh dopravy. Magneticky levitujúce vlaky fungujúce na tomto princípe premávajú v Japonsku na trati Shanghai.

Maximálna dosiahnutá rýchlosť pre magneticky levitujúci vlak predstavuje niečo okolo 581 km/h. O niečo menšia je dosiahnutá maximálna rýchlosť francúzskym vlakom TGV (približne 575 km/h) využívajúcim synchronný motor. Rozdiel však spočíva v bezpečnosti. Keďže vlak TGV sa pri tejto rýchlosti nachádza na pokraji "fyzikálnej hranici". Na rozdiel od maglev vlaku, ktorý pri tejto rýchlosti využíva iba časť svojho potenciálu a jeho rýchlosť je obmedzená odporom vzduchu. Pre využitie plného potenciálu magnetického vlaku by bolo nutné skonštruovať tzv. vákuový tunel, z ktorého by bol vzduch z väčšej časti odčerpaný. V takomto tuneli môže vlak dosahovať rýchlostí podstatne väčších, niečo vyše 3 500 km/h, niektoré zdroje uvádzajú až 6 000, či 8 000 km/h (maximálna dosiahnuteľná rýchlosť pochopiteľne závisí od miery odčerpania vzduchu z tunela). Pri takejto rýchlosti by len pre predstavivosť cesta z Londýna do New Yorku trvala približne jednu hodinu.

Princíp magnetickej levitácie nachádza uplatnenie takisto pri výrobe magnetických ložísk. Vhodným riadením je tak možné doceliť, napr. že nedochádza k absolútne žiadnemu kontaktu statora s rotorom a tým je opotrebovanie jednotlivých častí motora znateľne menšie a nevyžaduje takmer žiadnu údržbu (mazanie apod.).

Táto diplomová práca sa bude zaoberať levitáciou, u ktorej hrá hlavnú úlohu magnetické pole vytvárané permanentnými magnetmi a elektromagnetmi. Cieľom bude realizovať levitujúci vozík a tým si osvojiť poznatky a princípy využívajúce sa aj pri reálnych magneticky levitujúcich vlakoch.

Vychádzajúc z definície levitačného systému, ktorá hovorí o tom, že je to také zariadenie, ktoré umožní stabilne umiestniť teleso v priestore bez kontaktu s pevnou zemou, bude nutné sa v tejto diplomovej práci venovať vhodným riadením pre vytvorenie danej stabilnej polohy levitujúceho vozíku.

2 FYZIKÁLNY PRINCÍP A ZDROJE MAGNETICKÉHO POĽA

Magnetické pole je fyzikálne pole, ktorého zdrojom je pohybujúci sa elektrický náboj (teda elektrický prúd). Magnetické pole je teda možné pozorovať okolo elektrických vodičov, kde je zdrojom voľný elektrický prúd, ale taktiež okolo tzv. permanentných magnetov, kde sú zdrojom poľa viazané elektrické prúdy. Magnetické pole môže byť taktiež vyvolané zmenami elektrického poľa [11].

2.1 Základné fyzikálne veličiny popisujúce magnetické pole

Magnetický tok (Φ) - vektorová fyzikálna veličina vyjadrujúca počet indukčných siločiar magnetického poľa prechádzajúceho danou plochou, kolmou na smer orientácie siločiar. Jednotkou v medzinárodnej sústave jednotiek SI je 1 Wb (Weber) alebo tiež $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ v základnej sústave [12].

Magnetický indukčný tok vytváraný magnetickou indukciou B na ľubovoľnej orientovanej ploche S je možné definovať ako [13]:

$$\Phi = \int_S B dS \quad 2.1$$

Pri výpočtoch magnetických obvodov sa však najčastejšie využíva obecný matematický vzťah pre homogénne pole [12]:

$$\Phi = B \cdot S \quad 2.2$$

Intenzita magnetického poľa (H) - vektorová fyzikálna veličina, vyjadrujúca mohutnosť magnetického poľa v závislosti na faktoroch, ktoré pole vytvárajú (napr. veľkosť elektrického prúdu pretekajúceho vodičom cievky), nezávisle na parametroch prostredia, v ktorom je magnetické pole vytvárané. Jednotkou v SI je $1 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$ (Ampér na meter) [12].

Základným obecným vzťahom pre intenzitu stacionárneho magnetického poľa budeného ustáleným voľným elektrickým prúdom I_{vol} je Ampérov zákon [14]:

$$\oint_C H dl = I_{vol} \quad 2.3$$

Kde integrácia prebieha pozdĺž dĺžky l ľubovoľne zvolenej uzavretej krivky C obklopujúcej voľný elektrický prúd [14]. Pri výpočtoch intenzity magnetického poľa sa najčastejšie používa závislosť [12]:

$$H = \frac{B}{\mu} = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad 2.4$$

Alebo tiež vzťah, kde M predstavuje magnetizáciu, charakterizujúcu účinky viazaných magnetických prúdov [14]:

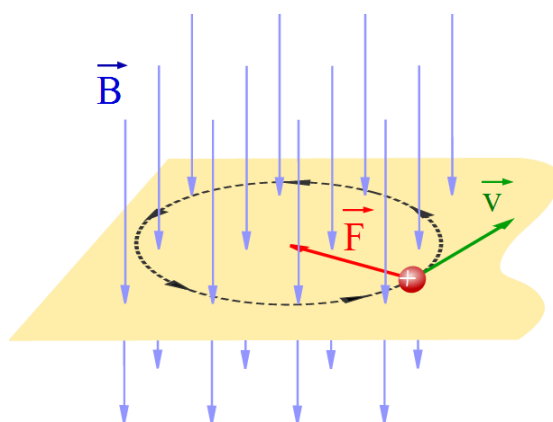
$$H = \frac{B}{\mu} - M \quad 2.5$$

Magnetická indukcia (\mathbf{B}) - vektorová fyzikálna veličina, vyjadrujúca počet indukčných siločiar magnetického poľa prechádzajúceho jednotkovou plochou (1 m^2), kolmou na smer siločiar, teda hustotu indukčných siločiar daného magnetického poľa. Jednotkou v SI je 1 T (Tesla) alebo tiež $\text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ v základnej sústave [12].

Magnetická indukcia vyjadruje silové účinky magnetického poľa na pohybujúce sa častice s nábojom alebo magnetickým dipólovým momentom. Veľkosť magnetickej indukcie v bode je možné definovať ako veľkosť maximálnej sily cez smer pohybu náboja - sily F_{max} pôsobiacej na tento náboj, ktorá pripadá na jednotkovú hodnotu $Q \cdot v$ [15]:

$$B = \frac{F_{max}}{Q \cdot v} \quad 2.6$$

Pri riešení magnetických obvodov sa však často vychádza z rovníc 2.2 a 2.4.



Obrázok 2.1: Silové pôsobenie magnetického poľa na pohybujúci sa náboj [15]

Permeabilita (μ) - skalárna fyzikálna veličina vyjadrujúca magnetickú polarizovateľnosť (magnetickú priepustnosť pre magnetické pole) prostredia, v ktorom je magnetické pole vytvárané. Jednotkou v SI je 1 H/m (Henry na meter), $\text{m.kg.s}^{-2}.\text{A}^{-2}$ v základnej sústave SI [15].

Permeabilita pozostáva z dvoch zložiek, ktorou je permeabilita (priepustnosť) vákua, označovaná ako μ_0 a relatívna permeabilita prostredia μ_r :

$$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r \quad 2.7$$

Permeabilita vákua je všeobecne známa konštanta $\mu_0 = 4.\pi.10^{-7}$ H/m. Relatívna permeabilita je bezrozmerná veličina definujúca magnetickú priepustnosť daného materiálu. Udáva koľkokrát je daný materiál magneticky polarizovateľnejší v porovnaní s vákuom.

Materiál	Relatívna permeabilita
Permalloy	50 000 - 140 000
Železo	300 - 10 000
Kobalt	80 - 200
Kvapalný kyslík	1,003 620
Platina	1,000 264
Hliník	1,000 023
Plynný kyslík	1,000 001 86
Voda	0,999 991
Meď	0,999 990

Tabuľka 2.1: Relatívne permeability vybraných materiálov [16]

2.1.1 Rozdelenie magnetických materiálov

Diamagnetické materiály ($\mu_r < 1$) - vonkajšie magnetické pole je týmto prostredím mierne oslabované. Medzi diamagnetické látky sú zaradované interné plyny, bromid draselný, voda, kuchynská soľ, meď, bizmut, ortuť, zinok olovo striebro, zlato, niektoré plasty, organické látky a ďalšie látky [12].

Zvláštnu skupinu diamagnetických materiálov tvoria supravodiče (kapitola 2.3), ktoré sa chovajú ako ideálne diamagnetikum a teda ich relatívna permeabilita $\mu_r \Rightarrow 0$ [4], tieto materiály magnetické pole značne oslabujú.

Paramagnetické materiály ($\mu_r > 1$) - ich atómy majú vo valenčnej sfére elektrónového obalu spravidla menej než 4 elektróny a vonkajšie magnetické pole je týmto prostredím mierne zosilnené. Do skupiny paramagnetických látok je zaradený

napr. plynný kyslík, kvapalný kyslík, hliník, platina, paládium, vanád, chróm, titán, ebonit, horčík, sodík, draslík, vzduch, rôzne prechodné kovy, kovy vzácnych zemín a iné materiály.

Feromagnetické materiály ($\mu_r \gg 1$) - ich atómy majú čiastočne neobsadené niektoré vnútorné sféry elektrónového obalu a súčasne splňujú požiadavku na určitý interval hodnôt pomeru medzi medzi-atómovou vzdialenosťou a polomerom atómu. Vonkajšie magnetické pole je týmto prostredím veľmi zosilnené.

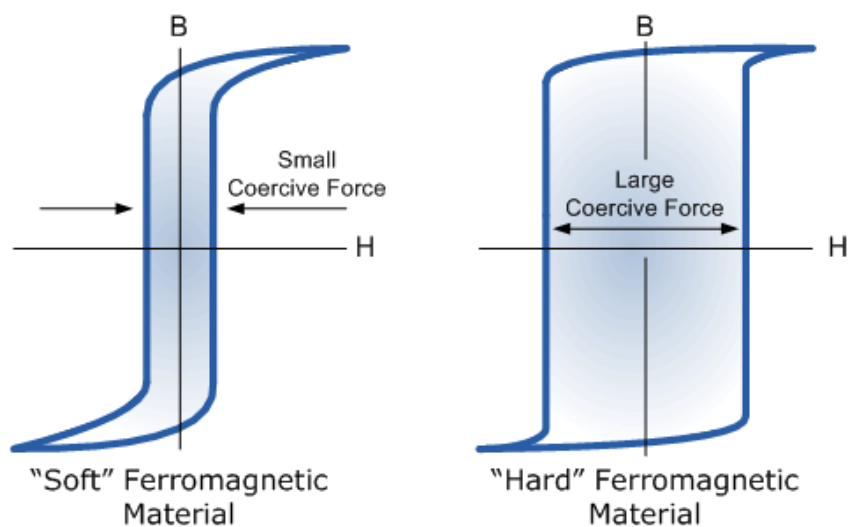
Keď je pri ohrievaní feromagnetických látok prekročená určitá teplota (tzv. Curierova teplota, napr. pre železo 770 °C), zmení sa feromagnetická látka na paramagnetickú a pokiaľ je zmagnetizovaná dôjde k jej odmagnetizovaniu. Medzi feromagnetické látky je zaradené železo, kobalt, nikel, gadolínium a jeho zliatiny [12].

2.1.2 Hodnotenie vlastností magnetických materiálov

V technickej praxi sa najčastejšie používajú feromagnetické materiály, ktorých magnetické vlastnosti sú nelineárne závislé na intenzite magnetického poľa. Pre hodnotenie a porovnanie ich magnetických parametrov sa preto používajú grafické metódy, ktorými sú magnetizačné krivky alebo krivky prvotnej magnetizácie a hysterézne slučky.

Krivka prvotnej magnetizácie vyjadruje závislosť hodnoty magnetickej indukcie na meniacej sa hodnote intenzity magnetického poľa materiálu, ktorý ešte nebol namagnetovaný (nebol zámerné vystavený pôsobeniu magnetického poľa).

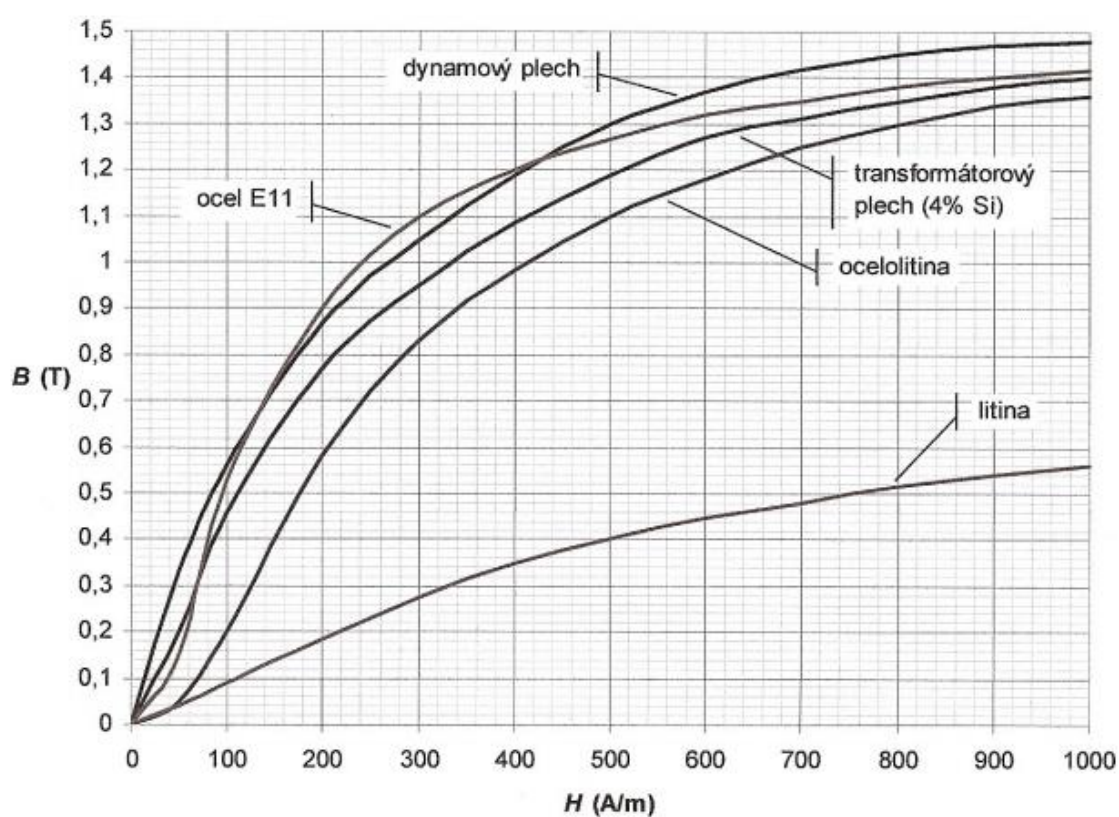
Hysterézna slučka vyjadruje závislosť hodnoty magnetickej indukcie na meniacej sa intenzite magnetického poľa, pri opakovanej protismernej magnetizácii daného feromagnetického materiálu.



Obrázok 2.2: Hysterézna slučka mäkkého a tvrdého feromagnetického materiálu [17]

Magnetické vlastnosti feromagnetických materiálov definuje magnetizačná krivka spolu s hysteréznou slučkou, čo predstavuje znázornenie závislosti magnetickej indukcie na intenzite magnetického poľa $B = f(H)$ [12].

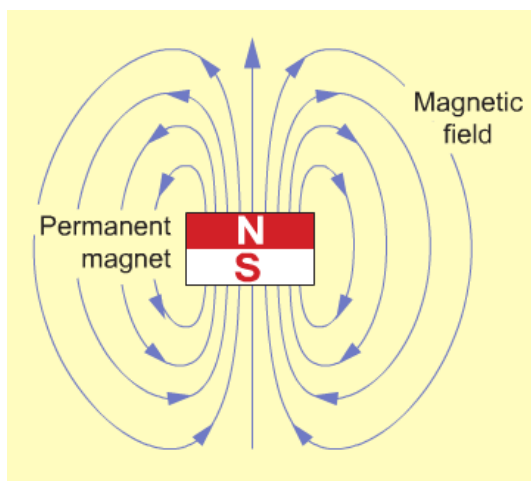
Na základe priebehu magnetizačnej krivky je možné magnetické materiály rozdeliť na magneticky mäkké a tvrdé (Obrázok 2.2). Ideálne tvrdé magnetické materiály sú také, ktoré po vybratí z magnetického poľa zostávajú trvalo zmagnetizované. Logicky sa tým tvrdé feromagnetické materiály používajú pri výrobe permanentných magnetov. Naopak mäkké magnetické materiály po vybratí z poľa magnetické vlastnosti strácajú. Používajú sa pre výrobu jadier cievok, elektromagnetov, transformátorov a všade tam, kde sú tieto vlastnosti žiadané.



Obrázok 2.3: Magnetizačné krivky vybraných mäkkých technických materiálov [29]

2.2 Permanentné magnety

Permanentný magnet je objekt, ktorý v priestore vo svojom okolí vytvára magnetické pole, bez vonkajších vplyvov. Vyskytuje sa prirodzene v horninách, ale je možné ho taktiež vyrobiť [18].



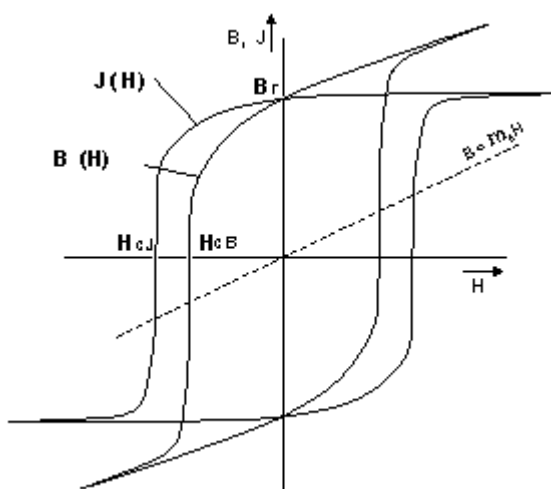
Obrázok 2.4: Znáznornenie magnetického poľa permanentného magnetu [19]

Pri výrobe permanentných magnetov sa využíva vlastnosť magneticky tvrdých materiálov, kde daný materiál je vložený do dostatočne silného poľa (na pomerne krátky časový okamžik). Po ukončení pôsobenia tohto poľa si magnet zachováva značnú magnetickú polarizáciu J [20]:

$$B = \mu_0 \cdot H + J \quad 2.8$$

Kombináciou rovníc 2.4 a 2.8 je možné zapísať výsledný vzťah pre magnetickú polarizáciu:

$$J = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot H \quad 2.9$$



Obrázok 2.5: Hysterézná slučka $B = f(H)$ a $J = f(H)$ [20]

Závislosti $B = f(H)$ a $J = f(H)$ (Obrázok 2.5) sa od seba odlišujú aditívnou zložkou $\mu_0 H$ (rovnica 2.8). Závislosť magnetickej indukcie od intenzity magnetického poľa sa využíva častejšie v technickej praxi. Závislosť polarizácie od intenzity slúži skôr oblasti materiálového výskumu [20].

2.2.1 Charakteristické parametre permanentných magnetov

Trvalý magnet je spravidla charakterizovaný základnými parametrami, ktorou je koercivita (H_C), remanencia (B_r) a maximálnym súčinom BH_{max} .

Koercivita H_C [A/m] je taká intenzita magnetického poľa, ktorá pôsobí proti smeru spontánnej magnetizácie až dosiahne celkovej indukcie v látke $B = 0$. Parameter koercivity je mierou odolnosti magnetu proti odmagnetizovaniu (vonkajším poľom aj vlastnou demagnetizáciou).

Remanencia B_r [T] je hodnota magnetickej indukcie, ktorá sa ustáli po zmagnetizovaní v uzavretom obvode magnetu bez pôsobenia vonkajšieho magnetického poľa. Parameter remanencie je pre oba krivky zhodný, čo ale neplatí pre parameter koercivity, preto sa rozlišuje H_{CJ} a H_{CB} (Obrázok 2.5).

Maximálny súčin BH_{max} [J/m³] nazývaný tiež maximálny energetický súčin, je úmerný magnetickej energii, uloženej v magnetu optimálneho tvaru. Parameter súčinu odpovedá interakčnej sile magnetu voči iným feromagnetickým predmetom (najčastejšie voči železu) [20]. Na magnetizačnej krivke odpovedá bodu s najväčším súčinom magnetickej indukcie a intenzity magnetického poľa [21].

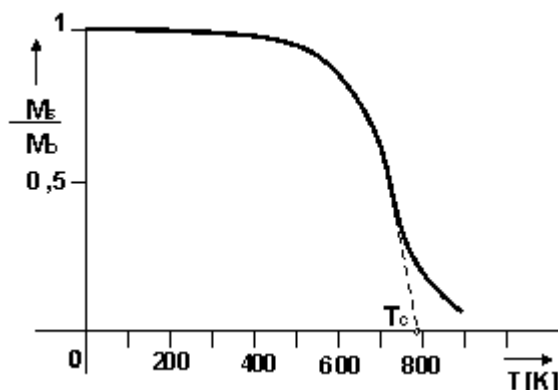
2.2.2 Magnetizácia, demagnetizácia permanentných magnetov

Aby trvalý magnet plnil svoju funkciu, je nutné ho po vyrobení zmagnetizovať. Pri magnetizovaní trvalých magnetov sa používajú väčšinou špeciálne magnetizačné stroje na princípe elektromagnetu, ktorého cievky sú napájané pulzovým prúdom veľkej hodnoty, získané vybitím batérie kondenzátora alebo zo špeciálne navrhnutého pulzového zdroja.

Naopak pri demagnetizácii sa znižuje celková polarizácia magnetu. Čo je docielené pôsobením vonkajšieho magnetického poľa k smeru polarizácie. Okrem toho je však každý magnet podrobený pôsobením vnútorného demagnetizačného poľa H_d , ktorého vznik súvisí s princípom znižovania jeho vnútornej energie. Veľkosť demagnetizačného poľa je dané vzťahom [20]:

$$H_d = -K_d \cdot \frac{J}{\mu_0} \quad 2.10$$

Kde K_d je demagnetizačný faktor závislý od tvaru magnetu a smeru magnetizovania. Jeho presný výpočet je v obecnom prípade komplikovaný, preto sa v praxi využívajú tabuľkové hodnoty [20].



Obrázok 2.6: Teplotná demagnetizácia permanentného magnetu [20]

Permanentný magnet je možné v podstate demagnetizovať aj pôsobením teploty. Teplotná závislosť je definovaná tzv. Curieovou teplotou T_C , ktorá je priesečníkom smernice zostupnej časti krivky s teplotnou osou (Obrázok 2.6). Pri použití trvalých magnetov je nutné dbať o to, aby sa pracovná teplota nepriblížila T_C . Bezpečná vzdialenosť je približne do 0,4 násobku T_C [20].

2.2.3 Typy permanentných magnetov

Medzi najrozšírenejšie magnety patria feritové. Avšak dostupné a známe sú aj iné typy ako neodymové, plastomagnety (neodymové v plastovom nosiči), AlNiCo magnety a samárium-kobaltové magnety.

2.2.3.1 Feritové magnety

Vyrábajú sa z bárya ($BaFe_{12}O_{19}$) alebo z feritu stroncia ($SrFe_{12}O_{19}$) ako izotropné a anizotropné materiály. Metódy výroby týchto magnetov sú podobné spôsobom výroby iných keramických materiálov. Pri výrobe anizotropných magnetov prebieha operácia lisovania v magnetickom poli, ktorá orientuje zrná prednostnými osami magnetizácie pozdĺž siločiar poľa. V procese výroby izotropných feritových magnetov sa vonkajšie magnetické pole počas lisovania neaplikuje. Preto anizotropné magnety dosahujú značne vyšších hodnôt základných magnetických parametrov (asi štvornásobne vyššia hodnota maximálneho energetického súčinu a asi dvojnásobne vyššia remanencia).

Vlastnosti feritových magnetov:

- hodnoty remanencie B_r sú približne 2,3 krát menšie ako u iných magnetoch
- hodnoty maximálneho energetického súčinu BH_{max} sú podobné ako pri magnetoch AlNiCo
- magnety majú približne 3,8 krát vyššie hodnoty koercivity H_{CJ}
- vyznačujú sa pomerne nízkou teplotnou stabilitou
- majú vysokú maximálnu pracovnú teplotu T_{max} (vyššiu majú iba magnety AlNiCo)
- koercivita H_{CJ} s klesajúcou teplotou rýchlo klesá

Hlavné prednosti feritových magnetov:

- vysoká koercitívna intenzita magnetického poľa H_{CJ}
- vysoká rezistivita (umožňujúca prevádzku v premenlivých magnetických poliach)
- vysoká maximálna teplotná odolnosť
- odolnosť voči korózii
- pomerne nízka cena

Feritové magnety predstavujú pri mnohých aplikáciách prijateľný kompromis medzi ekonomickými a technickými požiadavkami. Používajú sa v motoroch, prúdových generátoroch, v elektronike (reproduktory, alarmy, mikrofóny), mechanické hračky a magnetické zámky. Ako separátory, upínače a všade tam, kde je dostatok konštrukčného priestoru a nevyžaduje sa miniaturizácia ani vysoká teplotná stabilita [22].

Materiál	B_r [mT]	H_{CB} [kA/m]	H_{CJ} [kA/m]	BH_{max} [kJ/m ³]
F10T izotropný	200 - 235	125 - 160	210 - 280	6,5 - 9,5
F20	320 - 380	135 - 190	140 - 195	18,0 - 22,0
F25	360 - 400	135 - 170	140 - 200	22,5 - 28,0
F30	370 - 400	175 - 210	180 - 220	26,0 - 30,0
F30BH	380 - 400	230 - 275	235 - 290	27,0 - 32,5
F35	410 - 430	220 - 250	225 - 255	31,5 - 35,0

Tabuľka 2.2: Magnetické parametre vybraných feritových magnetov [22]

2.2.3.2 Neodymové magnety

Za svoje vynikajúce vlastnosti vďaka zlúčenine $Nd_2Fe_{14}B$ objavenej v roku 1984. Vyrábajú sa technológiou práškovej metalurgie a vďaka lisovaniu v magnetickom

poli alebo plastickom spracovaní pri vyššej teplote získavajú anizotropnú štruktúru. Vzhľadom na obsah neodymu, ktorý je vysoko náchylný na oxidáciu, sú magnety opatrené tenkými ochrannými antikoroznými vrstvami.

Vlastnosti neodymových magnetov:

- rekordné hodnoty maximálneho energetického súčinu BH_{\max} (400 kJ/m³)
- vysoké hodnoty magnetickej indukcie B_r (podobne ako u magnetov AlNiCo)
- koercitívna intenzita magnetickeho poľa H_{CJ} je niekoľkonásobne vyššia
- nižší rozsah pracovných teplôt v porovnaní so samárium-kobaltovými magnetmi
- ich magneticke vlastnosti sú v značnej miere závislé na teplote
- vyhovujú podmienkam pomerne vysokého stupňa miniaturizácie [22]

Materiál	B_r [T]	H_{CB} [kA/m]	H_{CJ} [kA/m]	BH_{\max} [kJ/m ³]	T_{\max} [°C]
N30	1,08 – 1,15	min. 796	min. 955	223 - 247	80
N35	1,17 – 1,21	min. 859	min. 955	263 - 287	80
N40	1,25 – 1,28	min. 923	min. 955	302 - 326	80
N45	1,32 – 1,38	min. 875	min. 955	342 - 366	80
N50	1,40 – 1,45	min. 836	min. 875	366 - 390	80

Tabuľka 2.3: Magneticke parametre vybraných neodymových magnetov [22]

2.2.3.3 Plastomagnety

Vlastnosti plastomagnetov:

- maximálny energetický súčin BH_{\max} a remanentná indukcia B_r sú približne dva krát väčšie ako pri najsilnejších feromagnetických magnetoch (u anizotropných až štyri krát)
- majú vysoké hodnoty koercivity H_{CJ}

Hlavné prednosti plastomagnetov:

- vysoká reprodukovateľnosť magnetických parametrov
- možnosť výroby komplikovaných a reprodukovateľných tvarov bez drahého strojného obrábania
- vysoká odolnosť voči korózii
- použitie v oblasti silných demagnetizačných polí
- veľmi vysoké hodnoty koercivity H_{CJ} [22]

2.2.3.4 AlNiCo magnety

Magnety je možné vyrábať metalurgickými metódami (odlievaním) alebo práškovou metalurgiou. V súčasnosti sa najčastejšie vyrábajú ako izotropné magnety.

Vlastnosti AlNiCo magnetov:

- hodnoty maximálneho energetického súčinu BH_{\max} sú o niečo väčšie alebo sa blížia k hodnote BH_{\max} anizotropných feritových magnetov
- hodnoty remanencie B_r sú podobné s neodymovými magnetmi
- nízke hodnoty koercivity H_{CJ}
- nemožnosť použitia v prítomnosti silných demagnetizačných polí

Prednosti AlNiCo magnetov:

- prvenstvo v teplotnej stabilite
- vysoká hodnota maximálnej pracovnej teploty T_{\max}
- odolnosť voči korózii

Nízke (ploché) magnety AlNiCo podliehajú ihneď po vybratí z budiaceho magnetu značnej demagnetizácii a ich pracovný bod je položený dosť nízko pod hodnotu remanentnej indukcie. Údery a nárazy do magnetu majú taktiež vplyv na jeho demagnetizáciu. Preto sa v praxi častejšie používajú hlavne vysoké magnety AlNiCo, ktoré sú viac odolné proti týmto javom. Alebo sa montujú do magnetických obvodov a až potom sa podrobujú magnetizácii, čo umožňuje ich pracovný bod nastaviť blízky remanencii B_r .

Tieto magnety sa využívajú predovšetkým v meracích prístrojoch, kontrolných zariadeniach, v rôznych typoch meničov a snímačoch, v motoroch a prúdových generátoroch a v mnoho ďalších zariadení, v ktorých je potrebné stabilné magnetické pole nezávislé na teplote a konštrukčný priestor je dostatočne veľký na umiestnenie magnetu [22].

2.2.3.5 Samárium-kobaltové magnety

Vyrábajú sa na báze dvoch zlúčenín Sm_2Co_5 a Sm_2Co_{17} , obvykle ako magnety anizotropné.

Vlastnosti samárium-kobaltových magnetov:

- vyznačujú sa vyššou remanenciou B_r
- majú vyššiu tepelnú stabilitu
- energetický súčin BH_{\max} je viac než päťnásobne vyšší ako u feritových magnetov alebo magnetov AlNiCo

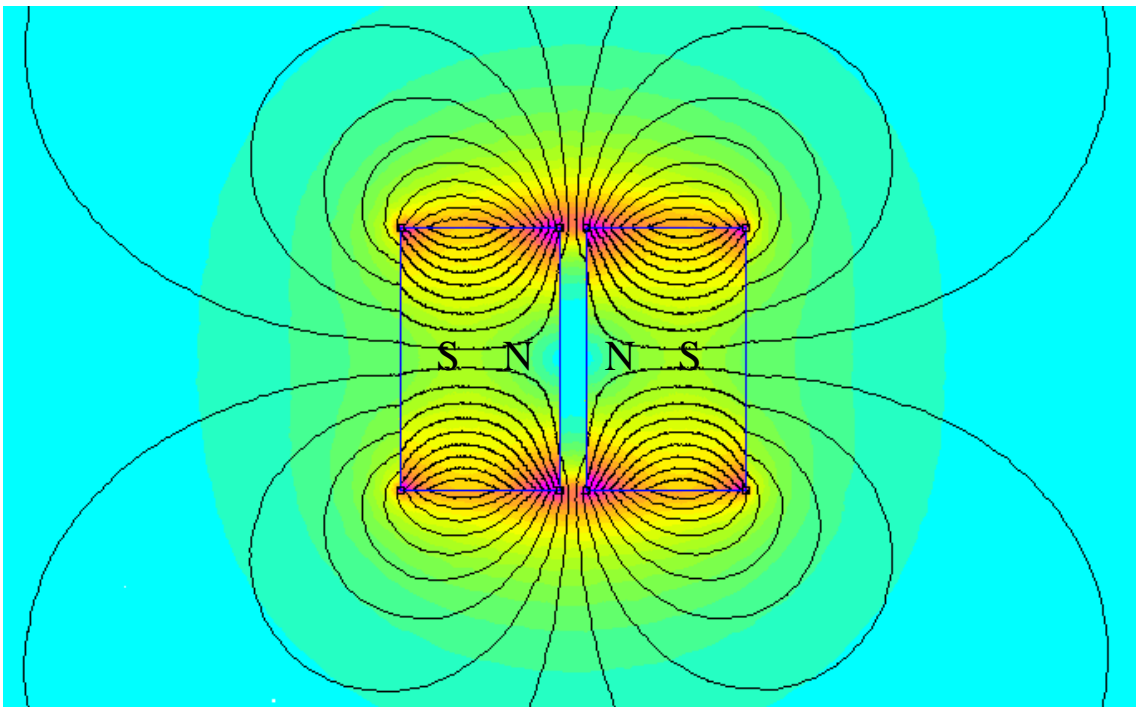
- hodnoty koercivity H_{CJ} sú viac než dvakrát väčšie ako u feritových magnetov
- maximálna pracovná teplota T_{max} je značne nižšia ako Curieová teplota T_C

Hlavné prednosti samárium-kobaltových magnetov:

- vysoká teplotná stabilita magnetických parametrov
- vysoká hodnota energetického maximálneho súčinu BH_{max} , koercivity H_{CJ} a remanencie B_r
- v rozsahu pracovných teplôt majú magnety vysokú odolnosť voči korózii
- možnosť použitia v oblasti silných demagnetizačných polí

Uplatňujú sa predovšetkým v zariadeniach vyžadujúcich stabilné magnetické pole pri premenlivej teplote (-60 až 250 °C). Použitie magnetov vďaka vysokým magnetickým hodnotám umožňuje miniaturizáciu zariadení, ktorá bola doposiaľ vyrábaná s využitím feritových magnetov a magnetov AlNiCo [22].

2.2.4 Silové pôsobenie permanentných magnetov



Obrázok 2.7: Znárodnenie magnetického poľa dvoch súhlasne orientovaných magnetov

Maximálna sila, ktorou môže permanentný magnet ťahať alebo tlačiť je približne rovná sile magnetického poľa vo vnútri tenkej vzduchovej medzery v uzavretej

magnetickej slučky o priereze a indukcii tohto magnetu. Výsledkom delenia tejto sily s prierezom je tlak, ktorý magnetické pole spôsobuje. Vzťah pre hľadanú silu je [18]:

$$F = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0} \quad 2.11$$

Pokiaľ je magnetom zdvíhané závažie vo vertikálnom smere o hmotnosti m , jeho maximálna hmotnosť je daná vzťahom [18]:

$$m = \frac{B^2 \cdot S}{2 \cdot \mu_0 \cdot g} \quad 2.12$$

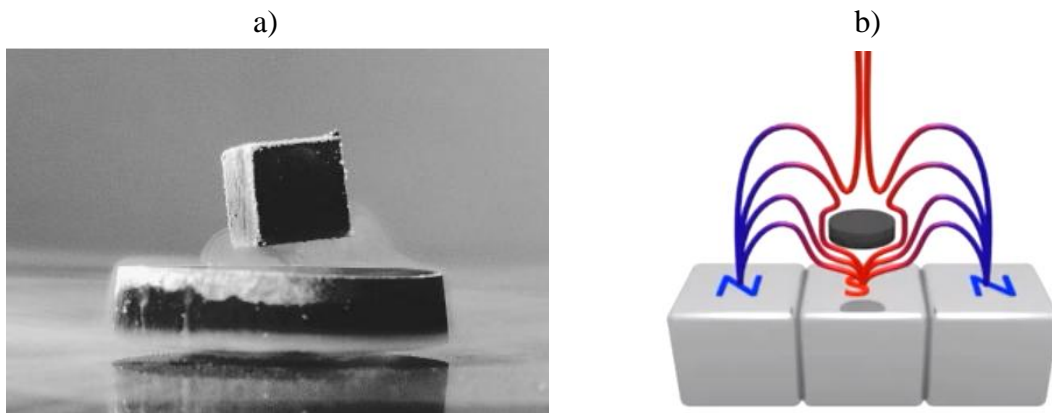
Kde g je gravitačné zrýchlenie, približne rovné $9,81 \text{ m/s}^2$.

2.3 Supravodivosť, supravodivé magnety

Supravodivosť je jav kvantovej mechaniky, pri ktorom materiál nekladie žiadny znamenitý odpor priechodu elektrického prúdu, nevoľňuje žiadne ohmické teplo a materiál vypudzuje zo svojho objemu magnetické siločiaru, čím odpudzuje vonkajšie magnetické pole (tzv. Meissnerov jav) a pri priechode prúdu sám okolo seba vytvára silné magnetické pole [7].

Supravodivé magnety sú elektromagnety vyrobené zo supravodivých materiálov. Ich výhody spočívajú v nevykazovaní elektrického odporu, preto je možné ich raz nabiť, uzavrieť obvod a nechať elektrický prúd behať magnetom prakticky neobmedzene dlhú dobu. Ďalšou výhodou je schopnosť vytvárať rádovo intenzívnejšie magnetické pole v porovnaní s permanentnými magnetmi a elektromagnetmi. Obrovskou nevýhodou je nutnosť udržiavania magnetu pod kritickou teplotou supravodivého materiálu. Supravodivé magnety pracujú pri teplote 4 K (-269 °C) a nižšej, čo vyžaduje chladenie kvapalným héliom, ktoré je pomerne drahé. Keď dôjde u nabitého magnetu k vzostupu teploty alebo inej veličiny (napr. lokálnej intenzity magnetického poľa) nad jej kritickú hodnotu, materiál magnetu prejde do normálneho (nesupravodivého) stavu a všetka energia uložená v magnete sa uvoľní vo veľmi krátkom časovom okamžiku. Tento dej sa nazýva quench a je prevádzaný prudkým ohriatím magnetu a jeho okolia, čím môže dôjsť aj k poškodeniu vlastnej cievky. Malé magnety väčšinou quench prežijú bez poškodenia. Pre veľké magnety, ktoré pracujú blízko hranice ich stability môže mať quench nepríjemné následky, preto sa používajú rôzne systémy detekcie a ochrany magnetu.

Pre konštrukciu supravodivých magnetov sa využívajú zliatiny kovov. Veľmi často ide o NbTi (Niob-Titanium) alebo Nb₃Sn (Niobium-Tin) [8].



Obrázok 2.8: a) Meissnerov jav, b) ukážka stabilnej levitácie vytvorená kombináciou permanentných magnetov a supravodivého magnetu [19][20]

2.4 Earnshawov teorém

Podľa Earnshawovej teórie žiadne statické sústavy magnetických dipólov nemôžu byť stabilné. Magnetickým dipólom je aj permanentný magnet (so severným a južným pólom). Čo inými slovami znamená, že nie je možné vytvoriť stabilnú levitáciu len pomocou permanentných magnetov bez akejkoľvek pevnej opory.

Dôkaz tejto teórie spočíva vo vyjadrení energie magnetického dipólu U pomocou dipólového momentu M a magnetickej indukcie B [23]:

$$U = -M \cdot B = -M_x \cdot B_x - M_y \cdot B_y - M_z \cdot B_z \quad 2.13$$

Pre nájdenie stabilnej polohy dipólu je nutné nájsť minimum energie magnetického dipólu U , teda pre druhú parciálnu deriváciu podľa súradníc (využitím Laplaceovho operátora) musí platiť [23]:

$$\nabla^2 U = \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} > 0 \quad 2.14$$

$$\nabla^2 U = - \frac{\partial^2 (M_x \cdot B_x + M_y \cdot B_y + M_z \cdot B_z)}{\partial x^2} - \frac{\partial^2 (M_x \cdot B_x + M_y \cdot B_y + M_z \cdot B_z)}{\partial y^2} - \frac{\partial^2 (M_x \cdot B_x + M_y \cdot B_y + M_z \cdot B_z)}{\partial z^2} > 0 \quad 2.15$$

Dipólový moment M predstavuje konštantu, po jeho vytknutí musí platiť [23]:

$$\nabla^2 U = -M_x \cdot \nabla^2 B_x - M_y \cdot \nabla^2 B_y - M_z \cdot \nabla^2 B_z > 0 \quad 2.16$$

Avšak bez použitia premenlivej magnetickej indukcie (napr. použitím elektromagnetu a zmenou prúdu) je divergencia magnetickej indukcie rovná nule [23]:

$$\nabla^2 B_x = \nabla^2 B_y = \nabla^2 B_z = 0 \quad 2.17$$

Teda kombináciou posledných dvoch rovníc, pre stabilnú levitáciu musí platiť:

$$\nabla^2 U = -M_x \cdot 0 - M_y \cdot 0 - M_z \cdot 0 > 0 \quad 2.18$$

Čo evidentne nikdy splnené nebude. Toľko k dôkazu nemožnosti vytvoriť stabilnú levitáciu len pomocou permanentných magnetov.

Daný dôkaz však platí iba pre paramagnetické a feromagnetické materiály. Zahrňujúc diamagnetické materiály je rovnica 2.13 vyjadrená ako [23]:

$$U = -M \cdot B = -k B \cdot B = -k \cdot (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) \quad 2.19$$

Kde $k > 0$ pre paramagnetické (feromagnetické) materiály a $k < 0$ pre diamagnetické materiály. Pre vyšetrenie stability sa bude vychádzať opäť z rovnice 2.14 a teda pre stabilnú levitáciu musí platiť:

$$\begin{aligned} \nabla^2 U = -k \cdot \frac{\partial^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}{\partial x^2} - k \cdot \frac{\partial^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}{\partial y^2} \\ - k \cdot \frac{\partial^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2)}{\partial z^2} > 0 \end{aligned} \quad 2.20$$

Po vytknutí konštanty k je možné predchádzajúcu rovnicu zapísať ako:

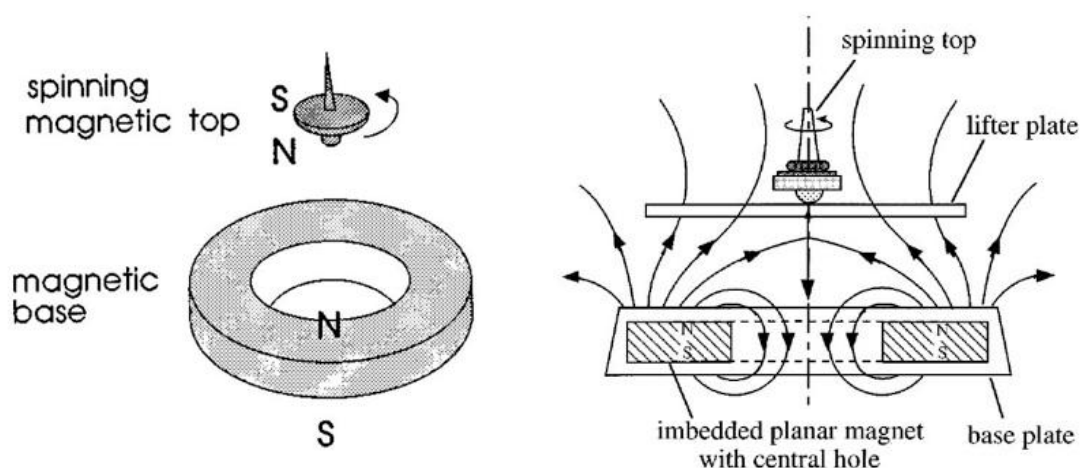
$$\nabla^2 U = -k \cdot \nabla^2 (B_x^2 + B_y^2 + B_z^2) > 0 \quad 2.21$$

Z výsledného zápisu je teda jasné, že paramagnetické (aj feromagnetické) materiály majú energetické maximá, ale žiadne energetické minimá, teda paramagnetické (feromagnetické) materiály sú nestabilné vo všetkých smeroch a

nemôžu byť stabilné vo všetkých smeroch. Na rozdiel od diamagnetických materiálov, ktoré môžu mať energetické minimá a nemôžu mať energetické maximá. Teda sú stabilné vo všetkých smeroch a nemôžu byť nestabilné vo všetkých smeroch [23].

Earnshawov teorém nestability magnetických dipólov je však možné "obísť" niekoľkými možnými spôsobmi:

- použitím diamagnetického materiálu a vytvorením stabilnej levitácie, vychádzajúc z rovnice 2.21
- použitím permanentných magnetov spolu s elektromagnetmi a reguláciou magnetického poľa so spätnou väzbou
- ponechaním rotovania levitovaného predmetu (rotáciou je stabilizovaná orientácia magnetického momentu v priestore, je vytvorený v podstate magnetický gyroskop a tak je predmet vložený do poľa permanentného magnetu, čo je využívané v komerčných Levitronoch®)
- použitím oscilujúcich magnetických polí [24]



Obrázok 2.9: Znáznornenie princípu Levitronu® [37]

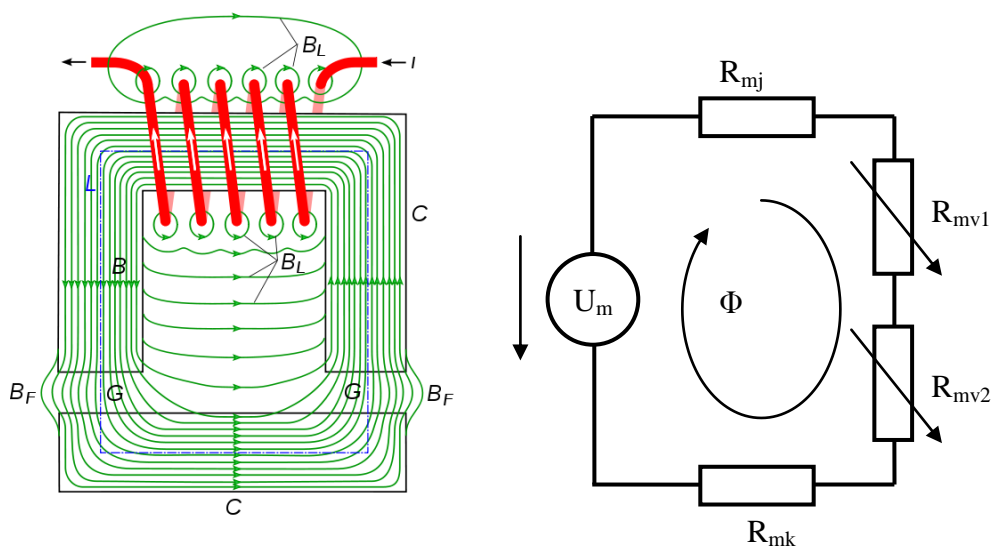
3 JEDNOSMERNÝ ELEKTROMAGNET

Elektromagnet je elektrický stroj premieňajúci elektrickú energiu na mechanickú, je to elektromechanický menič energie. Všeobecne pozostáva elektromagnet najčastejšie z jadra vyrobeného z magneticky mäkkého železa (kapitola 2.1.2). Magneticky mäkké materiály sa používajú práve kvôli vyhovujúcim podmienkam možnosti rýchleho zmagnetizovania a odmagnetizovania jadra a vytváranie tak premenlivého magnetického poľa. Druhou neoddeliteľnou súčasťou elektromagnetu je cievka navinutá na jadre.

Ovládanie magnetického poľa o určitej intenzite, ktoré vytvára magnetický tok pretekajúci jadrom, prebieha zmenou prúdu v budiacej cievke elektromagnetu. Veľkosť magnetického toku závisí lineárne od budiaceho prúdu alebo tiež od počtu závitov budiacej cievky. Najčastejšie sú aplikácie, pri ktorých sa v magnetickom obvode nachádza ešte iný magnetický materiál a vytvárané magnetické pole tým spôsobuje silové účinky na daný materiál.

Jednosmerný elektromagnet je z fyzikálneho hľadiska pomerne zložitý stroj. Avšak je možné zostaviť jeho dynamické rovnice a analyzovať ho z mnoho hľadísk, napr. z hľadiska indukčnosti, energie a koenergie sústavy, pomocou rovníc pre elektrickú časť, z hľadiska ťažnej sily apod. V tejto práci sú popísané analýzy, ktoré boli skutočne nejakým spôsobom využité pri simulácii alebo návrhu reálneho modelu.

3.1 Indukčnosť jednosmerného elektromagnetu



Obrázok 3.1: a) Nákres jednosmerného elektromagnetu [30], b) Náhradná schéma jednosmerného elektromagnetu

Elektromagnet s budiacou cievkou a vzduchovou medzerou (Obrázok 3.1a) môže byť vyjadrený náhradnou schémou (Obrázok 3.1b). Táto náhradná schéma pozostáva z elektromotorického napätia U_m , magnetického odporu jadra R_{mj} , magnetického odporu kotvy R_{mk} a magnetických odporov vzduchových medzier R_{mv} . Celým obvodom preteká magnetický tok Φ , ktorý vytvára úbytky magnetických napätí na jednotlivých magnetických odporoch [29].

Podľa náhradnej schémy je teda možné zapísať rovnicu pre celkový magnetický odpor obvodu:

$$R_m = R_{mj} + R_{mk} + 2 \cdot R_{mv} \quad 3.1$$

Magnetický tok, pretekajúci obvodom, je odvodený podľa Hopkinsonovho zákona (analogicky k Ohmovému zákonu) [29]:

$$\Phi = \frac{U_m}{R_m} = \frac{N \cdot i}{R_m} \quad 3.2$$

Kde N predstavuje počet závitov cievky a i okamžitý prúd tečúci elektromagnetom. Experimenty skúmajúce elektromagnetickú indukciu umožnili spojiť hodnotu indukovaného elektromotorického napätia so zmenami magnetického toku prechádzajúceho elektrickým obvodom, na základe čoho bol odvodený Faradov zákon elektromagnetickej indukcie (pre elektromagnet s N závitmi) [31]:

$$U_m = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt} \quad 3.3$$

Pre výpočet indukovaného elektromotorického napätia v cievke je takisto možné použiť dynamickú definíciu [32]:

$$U_m = -L \cdot \frac{di}{dt} \quad 3.4$$

Odvodením z rovníc 3.3 a 3.4 je získaná nasledujúca rovnica, vyjadrujúca indukčnosť elektromagnetu:

$$L \cdot \Delta i = \Delta \Phi \cdot N \Rightarrow L = \frac{N^2}{R_m} \quad 3.5$$

Veľkosť magnetického odporu R_m je značne závislá od vzduchovej medzery x medzi jadrom a kotvou, tým je indukčnosť prepísaná do závislosti:

$$L(x) = \frac{N^2}{R_m(x)} \quad 3.6$$

Magnetický odpor pre homogénne pole vo vzduchovej medzere je definovaný ako [29]:

$$R_{mv} = \frac{x}{\mu_0 \cdot S_{fe}} \quad 3.7$$

Kde x predstavuje dĺžku vzduchovej medzery a S_{fe} je plocha, jedného pólu elektromagnetu. Výsledný magnetický odpor pre dve vzduchové medzery teda bude:

$$R_m = R_{mv1} + R_{mv2} = \frac{x}{\mu_0 \cdot S_{fe}} + \frac{x}{\mu_0 \cdot S_{fe}} = \frac{2 \cdot x}{\mu_0 \cdot S_{fe}} \quad 3.8$$

Dosadením rovnice 3.8 do rovnice 3.6 je možné zapísať indukčnosť ako funkciu dĺžky vzduchovej medzery x :

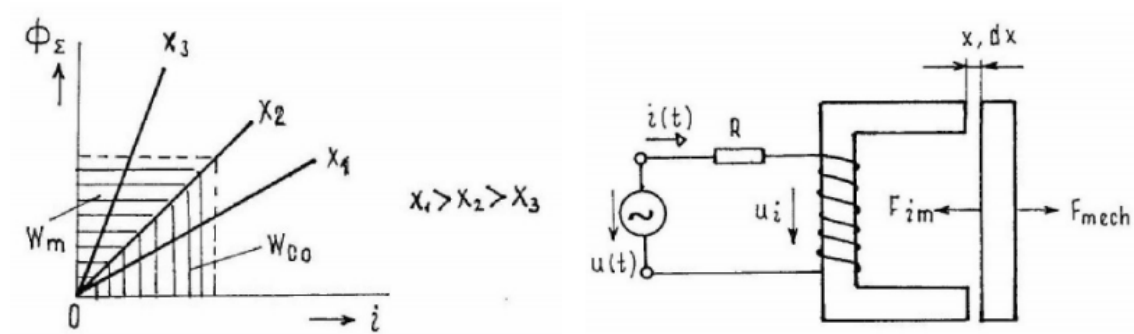
$$L(x) = \frac{N^2 \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{2} \cdot \frac{1}{x} \quad 3.9$$

Magnetický odpor jadra a kotvy je v tomto zápise zanedbaný (vid'. rovnica 3.8), pretože je výrazne menší ako odpor vzduchu. Avšak pri veľmi malých vzduchových medzerách, kde sa začína prejavovať už aj odpor magnetických materiálov voči odporom vzduchových medzier začína táto rovnica strácať na presnosti a nie je možné z nej vychádzať. Rovnica je obmedzená aj minimálnou indukčnosťou elektromagnetu, teda bude platiť iba po určitú vzdialenosť od feritového materiálu. Ak sa bude teda vzdialenosť naďalej zväčšovať indukčnosť elektromagnetu zostane konštantná. Túto minimálnu indukčnosť je možné určiť z teórie viacvrstvovej cievky s príslušným jadrom. Avšak minimálna indukčnosť môže byť značne závislá aj od vzdialenosti styčných plôch elektromagnetu, cez ktoré sa uzatvára magnetický obvod, preto je najideálnejšie ju stanoviť meraním bez prítomnosti referenčného železa, do ktorého by sa uzatváral magnetický obvod.

Rovnicu 3.9 je možné rozdeliť na dve časti a odvodiť tak konštantu L_0 , ktorá posluží pre prehľadnejší výpočet indukčnosti na základe veľkosti vzduchovej medzery, potom bude platiť:

$$L_0 = \frac{N^2 \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{2} \Rightarrow L(x) = L_0 \cdot \frac{1}{x} \quad 3.10$$

3.2 Ťažná sila elektromagnetu



Obrázok 3.2: a) Ampérweberová charakteristika sústavy ($\Phi_\Sigma = \Psi$), b) Elektromagnet s premenlivou vzduchovou medzerou [29]

Pre odvedenie sily F_{im} (Obrázok 3.2b), ktorou elektromagnet pôsobí, sa bude vychádzať zo zákona zachovania energie [29]:

$$dW_{el} = dW_m + dW_{mech} \quad 3.11$$

Kde $dW_{el} = u \cdot i \, dt = i \cdot d\Psi$ je element energie dodanej do sústavy zo zdroja, $dW_{mech} = F_{im} \, dx$ je element mechanickej práce, ktorú sústava vykoná proti vonkajším mechanickým silám F_{mech} a dW_m je zmena magnetickej energie sústavy pri zmene vzduchovej medzery [29].

Pre vyjadrenie hľadanej sily F_{im} pomocou magnetickej koenergie z ampérweberovej charakteristiky (Obrázok 3.2a) bude platiť [29]:

$$W_m + W_{co} = i \cdot \Psi \quad 3.12$$

Kde Ψ predstavuje magnetický tok elektromagnetu spriahnutý s jeho závitmi [29]:

$$\Psi = N \cdot \Phi \quad 3.13$$

Obecná magnetická koenergia W_{co} v závislosti na vzduchovej medzere bola odvodená ako [29]:

$$W_{co} = \int_0^i \Psi di = \int_0^i L \cdot i di = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2 \Rightarrow W_{co} = \frac{1}{2} \cdot L(x) \cdot i^2 \quad 3.14$$

Po dosadení konštanty L_0 do rovnice 3.14 teda platí:

$$W_{co} = \frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{i^2}{x} \quad 3.15$$

Za predpokladu konštantného prúdu i pri zmene vzduchovej medzery o dx pre silu F_{im} bude odvodením z rovníc 3.11 a 3.12 platiť [29]:

$$F_{im} = \frac{dW_{co}}{dx} \quad i=\text{konšt.} \quad 3.16$$

Dosadením a deriváciou je možné zapísať výsledný vzťah pre silu elektromagnetu:

$$F_{im} = \frac{\partial W_{co}(i, x)}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{i^2}{x} \right\} = -\frac{1}{2} \cdot L_0 \cdot \frac{i^2}{x^2} \quad 3.17$$

Záporné znamienko výslednej sily predznačuje, že sila bude pôsobiť v opačnom smere v zmysle narastajúcej vzduchovej medzery x . Ďalej vo výpočtoch je pre jednoduchosť volený opačný smer tejto sily, preto je uvažovaná v kladnom zmysle.

Pri výpočtoch a linearizácii modelov elektromagnetov pre vytvorenie stabilnej levitácie sa zvykne veľmi často používať závislosť:

$$F_{im} = K_{em} \cdot \frac{i^2}{x^2} \quad 3.18$$

K_{em} v tejto závislosti predstavuje istú konštantu elektromagnetu, ktorá je daná parametrami navrhnutého elektromagnetu. Z rovníc 3.10 a 3.17 je teda jasné, že pre konštantu elektromagnetu platí nasledujúci vzťah:

$$K_{em} = \frac{1}{2} \cdot L_0 = \frac{N^2 \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{4} \quad 3.19$$

Pre výpočet sily elektromagnetu, vychádzajúc z magnetickej indukcie, je takisto možné použiť rovnicu 2.11, ktorá platí pre permanentné magnety. Je nutné ju samozrejme upraviť v prípadoch, kde elektromagnet má dve styčné plochy s kotvou, teda bude platiť:

$$F_{im} = 2 \cdot \frac{B^2 \cdot S_{fe}}{2 \cdot \mu_0} = \frac{B^2 \cdot S_{fe}}{\mu_0} \quad 3.20$$

3.3 Model jednosmerného elektromagnetu pre magnetický

záves

Magnetický záves sa v dnešnej dobe používa najčastejšie v laboratóriách pre demonštráciu funkčnosti magnetickej levitácie. Pozostáva z jednosmerného elektromagnetu (často s jadrom v tvare I), malej magnetickej guľky a snímača vzdialenosti, ktorý vyhodnocuje vzdialenosť guľky od elektromagnetu, na základe čoho prebieha riadenie prúdu elektromagnetom a tým aj sily, ktorou pôsobí na guľku.

Pre udržanie guľky vo vzduchu sa musia sily F_c a F_g vyrušiť (Obrázok 3.3). Sila elektromagnetu F_c je definovaná ako sila F_{im} z predchádzajúcej kapitoly (rovnica 3.18). Teda pre pôsobiace sily bude platiť:

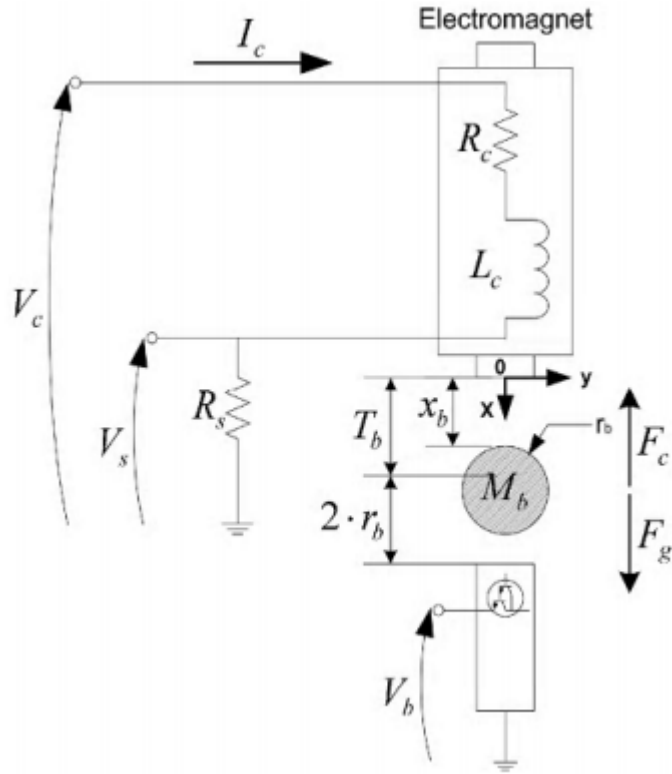
$$F = F_g - F_{im} \quad 3.21$$

Pre gravitačnú silu platí všeobecne známy vzťah $F_g = m \cdot g$, pre celkovú silu F (vyjadrenú ako súčin hmotnosti a zrýchlenia) pôsobiacu na guľku teda platí:

$$m \cdot a = m \cdot g - K_{em} \cdot \frac{i^2}{x^2} \quad 3.22$$

Výsledný nelineárny zápis správania modelu má teda tvar:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = g - \frac{K_{em}}{m} \cdot \frac{i^2}{x^2} \quad 3.23$$



Obrázok 3.3: Nákres modelu magnetického závesu [33]

Pre návrh regulátora, ktorý riadi prúd vhodným spôsobom aby si guľka držala pozíciu, sa zvykne závislosť sily elektromagnetu linearizovať v okolí pracovného bodu [34]:

$$F_{im} = F_{im0} + \left. \frac{\partial F_{im}}{\partial x} \right|_{i_0, x_0} \cdot (x - x_0) + \left. \frac{\partial F_{im}}{\partial i} \right|_{i_0, x_0} \cdot (i - i_0) \quad 3.24$$

Kde i_0 a x_0 predstavujú hodnoty zvoleného prúdu a vzdialenosti v danom pracovnom bode. Po derivácii predchádzajúcej rovnice vznikne linearizovaná rovnica definujúca silu elektromagnetu:

$$F_{im} = K_{em} \cdot \frac{i_0^2}{x_0^2} - K_{em} \cdot \frac{2 \cdot i_0^2}{x_0^3} \cdot \Delta x + K_{em} \cdot \frac{2 \cdot i_0}{x_0^2} \cdot \Delta i \quad 3.25$$

Pri dodržaní rovnosti:

$$m \cdot g = K_{em} \cdot \frac{i_0^2}{x_0^2} \quad 3.26$$

Je možné skombinovaním rovnice 3.23 a 3.25 zapísať:

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{K_{em}}{m} \cdot \frac{2 \cdot i_0^2}{x_0^3} \cdot \Delta x - \frac{K_{em}}{m} \cdot \frac{2 \cdot i_0}{x_0^2} \cdot \Delta i = K_2 \cdot \Delta x + K_1 \cdot \Delta i \quad 3.27$$

Čo vedie na výsledný lineárny prenos modelu:

$$F_{S_{ix}}(p) = \frac{X(p)}{I(p)} = \frac{\Delta x}{\Delta i} = \frac{K_1}{p^2 - K_2} \quad 3.28$$

Kde pre uvedené konštanty platí nasledujúce:

$$K_1 = -\frac{K_{em}}{m} \cdot \frac{2 \cdot i_0}{x_0^2} \quad K_2 = \frac{K_{em}}{m} \cdot \frac{2 \cdot i_0^2}{x_0^3} \quad 3.29$$

Na lineárny prenos sa potom navrhuje regulátor, najčastejšie metódou štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu alebo požadovaným rozložením pólov (metódou GMK).

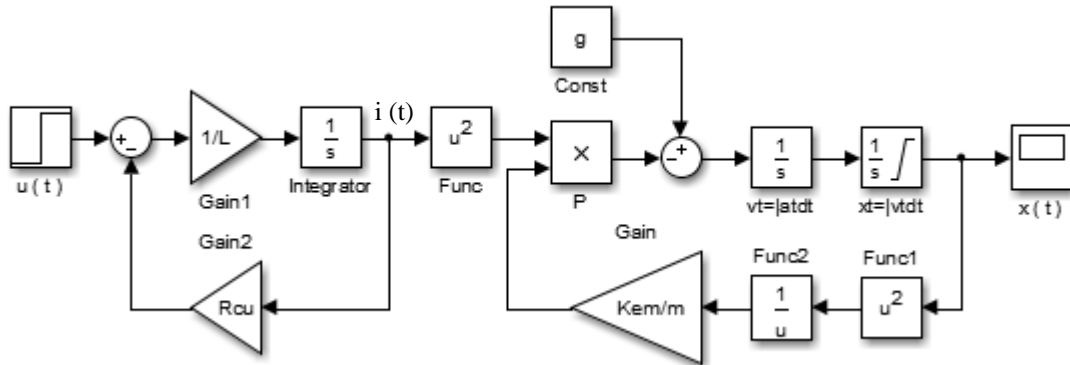
Uvedené úvahy však vychádzajú zo vstupného prúdu, skutočnou vstupnou veličinou je napätie privádzané na svorky elektromagnetu, pre ktoré platí:

$$u(t) = R_{cu} \cdot i(t) + L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad 3.30$$

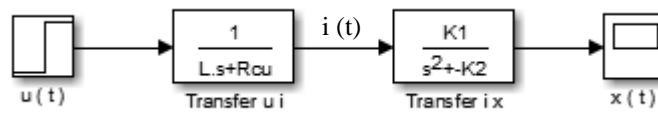
R_{cu} predstavuje odpor drôtu, z ktorého je elektromagnet navinutý a L indukčnosť elektromagnetu. Po prevedení Laplaceovej transformácie na predchádzajúcu rovnicu je zapísaný výsledný prenos medzi napätím a prúdom:

$$F_{S_{ui}}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{Lp + R_{cu}} \quad 3.31$$

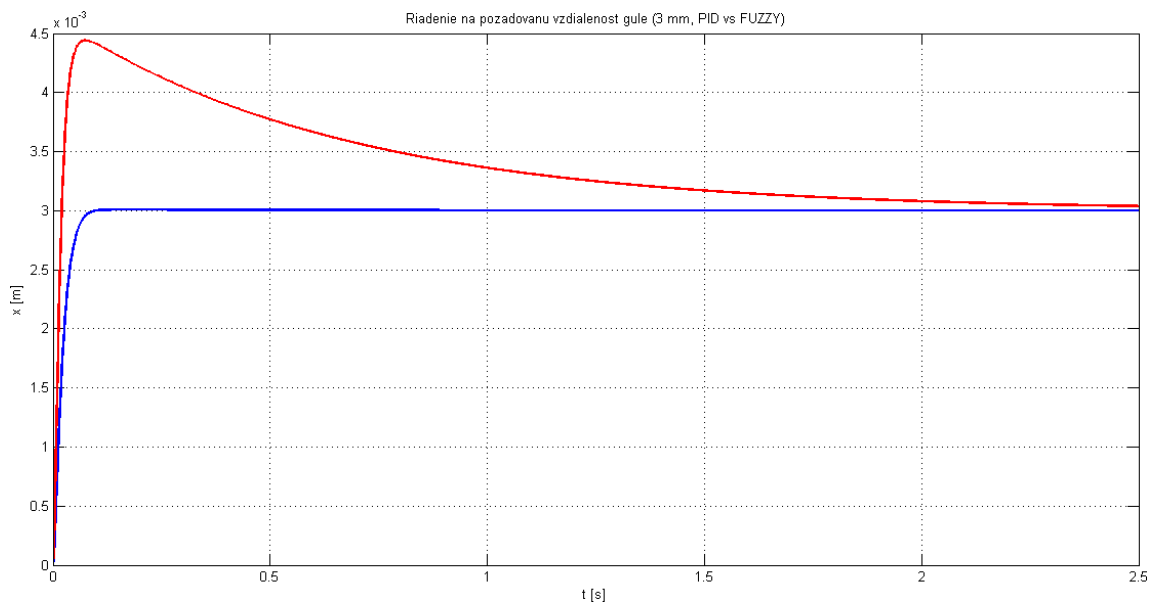
Nelineárny model magnetickú závesu tak tvoria rovnice 3.23 a 3.30. Linearizovaný model je možné zostaviť prenosmi 3.28 a 3.31.



Obrázok 3.4: Výsledný nelineárny model magnetického závesu



Obrázok 3.5: Linearizovaný model magnetického závesu



Obrázok 3.6: Príklad odozvy vzdialenosti riadenej magnetickej gule od elektromagnetu pomocou klasického PID regulátora (červená) a fuzzy PID regulátora (modrá)

3.4 Model levitačného elektromagnetu

Levitačný elektromagnet je využívaný ku konštrukcii vysokorýchlostných vlakov, v inom usporiadaní ku konštrukcii magnetických ložísk. Jedná sa o aktívnu magnetickú levitáciu, pri ktorej je regulačným obvodom udržiavaná konštantná vzduchová medzera medzi elektromagnetom a koľajnicou. Z pohľadu kybernetiky je magnet akčným členom a pracuje ako lineárny motor, konajúci prácu pri pohybu vo zvislom smere. Voľba súradnicového systému matematického modelu plyní z nákresu (Obrázok 3.7), čo predstavuje voľbu kladných smerov polohy, rýchlosti, zrýchlenia a síl. Sila F_r má význam ľubovoľnej rušivej dynamickej sily, ktorá môže na magnet pôsobiť [35].

Pre výslednú akceleračnú silu, teda pre zrýchlenie bude platiť [35]:

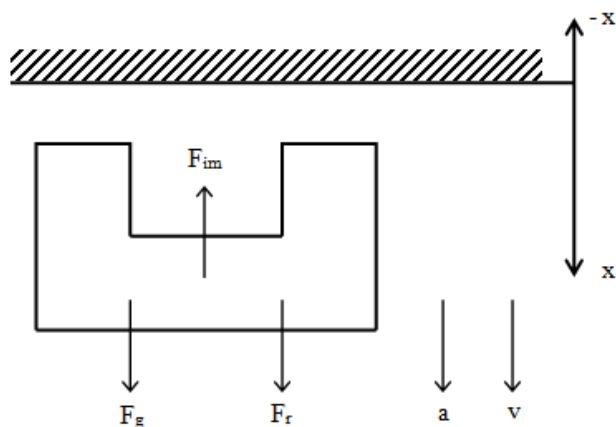
$$F = F_g + F_r - F_{im} \Rightarrow a = g + \frac{F_r - F_{im}}{m} \quad 3.32$$

Z fyzikálneho hľadiska platí, že rýchlosť je integrálom zo zrýchlenia [35]:

$$v(t) = v_p + \int a(t) dt \quad 3.33$$

Okamžitá poloha (dĺžka vzduchovej medzery) je vyjadrená integrálom z rýchlosti [35]:

$$x(t) = x_p + \int v(t) dt \quad 3.34$$



Obrázok 3.7: Základné usporiadanie levitačného elektromagnetu

Pre výpočet sily elektromagnetu F_{im} bude platiť rovnica 3.20. Pre svorkové napätie elektromagnetu platí rovnica [35]:

$$u(t) = R_{cu} \cdot i(t) + \frac{d\Psi(t)}{dt} = R_{cu} \cdot i(t) + N \cdot S_{fe} \cdot \frac{dB(t)}{dt} \quad 3.35$$

Integráciou predchádzajúcej rovnice je možné určiť magnetickú indukciu [35]:

$$B(t) = B_p + \frac{1}{N \cdot S_{fe}} \cdot \int |u(t) - R_{cu} \cdot i(t)| dt \quad 3.36$$

Kde B_p predstavuje ľubovoľnú integračnú konštantu definujúcu počiatočnú magnetickú indukciu. Celkové magnetické napätie magnetického obvodu je možné vyjadriť rovnicou [35]:

$$N \cdot i = 2 \cdot H_x \cdot x + H_{fe} \cdot l_{fe} = 2 \cdot \frac{B}{\mu_0} \cdot x + H(B) \cdot l_{fe} \quad 3.37$$

Kde funkcia $H(B)$ je inverznou funkciou k magnetizačnej charakteristike $B(H)$ použitého železa. Z predchádzajúcej rovnice plynie [35]:

$$i = \frac{2 \cdot B \cdot x}{N \cdot \mu_0} + \frac{l_{fe}}{N} \cdot H(B) \quad 3.38$$

Matematický model levitačného elektromagnetu tak tvoria rovnice 3.32, 3.33, 3.34, 3.20, 3.36 a 3.38. Matematický model realizovaný v prostredí Simulinku je zobrazený v prílohe A. Do modelu je pridané obmedzenie čo do vzdialenosti od referenčnej koľajnice, obmedzenie v zmysle saturačného účinku feritového jadra elektromagnetu a konštanta rozšírenia vzduchovej medzery v pracovnom bode na základe simulácie a reálne nameraných hodnôt pre nehomogénne pole vo vzduchovej medzere.

Model je ešte rozšírený o horný a dolný doraz, pretože ak dôjde k posunu elektromagnetu k hraničným hodnotám vzdialenosti je generované falošné zrýchlenie a rýchlosť, ale predovšetkým falošný stav integrátora zrýchlenia, ktorý zostáva integrovať naďalej. Táto skutočnosť bola vyriešená pridaním vlastnej funkcie medzi výslednú silu modelu a aktuálne zrýchlenie. Funkcia má 4 vstupy: F je výsledná sila modelu (rovnica 3.32), x predstavuje aktuálnu vzdialenosť, m je hmotnosť sústavy a x_m predstavuje maximálnu možnú vzdialenosť elektromagnetu od koľajnice.

```

function [a, y] = fcn(F, x, m, xm)
a = F/m;
y = 0;

if (x >= xm) && (F > 0)
    a = 0;
    y = 1;
elseif (x <= 0) && (F < 0)
    a = 0;
    y = 1;
end
end

```

Obrázok 3.8: Algoritmus horného a dolného dorazu elektromagnetu

Z uvažovaného algoritmu teda vidieť, ak elektromagnet narazí na maximálnu vzdialenosť x_m a výsledná sila pôsobí naďalej rovnakým smerom, je natvrdo nastavené na výstupe nulové zrýchlenie a vynulovaný integrátor zrýchlenia ($y = 1$), čo vedie na nulovú rýchlosť (elektromagnet sa zastaví na hraničnej hodnote vzdialenosti). Potom pri ďalšom pohybe (ak zmení výsledná sila smer) sa elektromagnet začne pohybovať s počiatočnou podmienkou $v = 0$ m/s. To isté bude platiť aj pre druhý ($x = 0$ m) doraz.

4 MAGNETICKÁ LEVITÁCIA A JEJ VYUŽITIE V DOPRAVE

4.1 Shanghai maglev - najmodernejší druh dopravy

Vysokorýchlostný, bezpečný, pohodlný, energeticky úsporný, šetrný k životnému prostrediu, aj tak je možné definovať najmodernejší súčasný druh dopravy.

So stavbou šanghajskej trati pre ukázkovú prevádzku maglev sa začalo v marci 2001. Trať začína na západnej strane stanici Longyang Road a na východe končí stanicou Medzinárodné letisko Pudong. Celková dĺžka trate činí 30 km dvojkoľajovej prevádzky s možnosťou obratu. Má dve nástupné/výstupné stanice, dve napájacie stanice, 1 prevádzkový dispečing a jedno centrum údržby. Projektová maximálna rýchlosť činí 430 km/h.

Pravidelná prevádzka bola zahájená počiatkom roku 2004, Maglev Shanghai sa tak stal najrýchlejším traťovým vozidlom na svete podľa cestovného poriadku. Doba jazdy v jednom smere trvá približne 8 minút. Súprava po 3 a pol minúte dosiahne maximálnu rýchlosť 430 km/h, pričom urazí približne 12,5 km. Maximálnu rýchlosť udržiava po dobu 50 sekúnd a na poslednom úseku dlhom opäť 12,5 km spomaľuje k cieľovej stanici [1][3].

Ako prvá trať určená pre komerčnú prevádzku vlakov typu maglev prispieva táto stavba veľkým dielom k zlepšeniu dopravnej situácie z centra mesta na medzinárodné letisko v Pudongu a zároveň je významným krajinným prvkom modernej medzinárodnej metropoly [1].

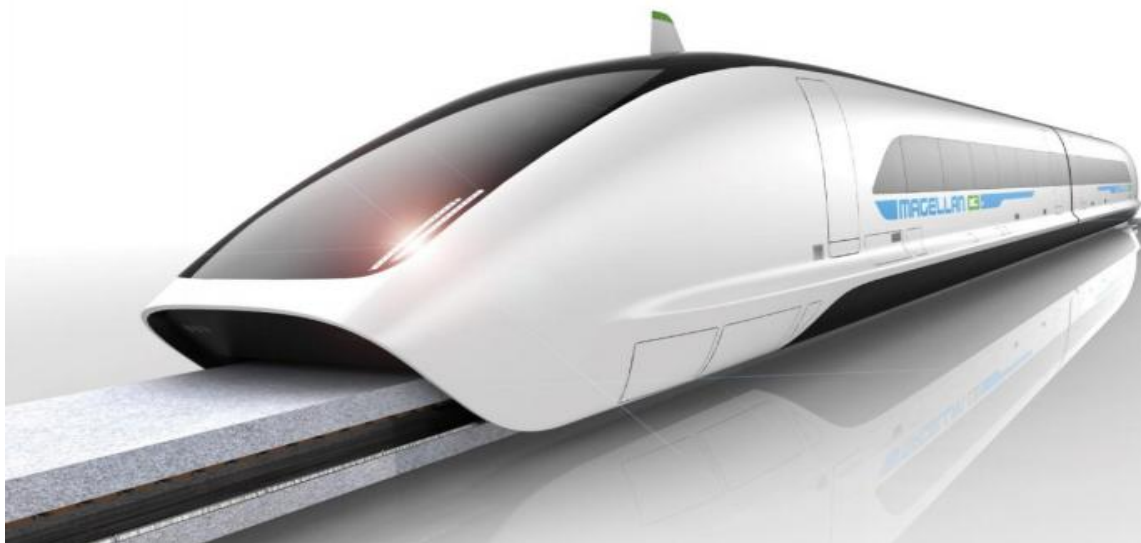


Obrázok 4.1: Šanghajska trati pre ukázkovú prevádzku vlaku maglev [1]

4.2 Obecná charakteristika systému maglev

- prevádzková rýchlosť je 400 až 500 km/h
- bezkontaktná levitácia bez opotrebovania, technológia pohonu a vedenia nezávislá na trení
- veľké zrýchlenie, vysoký brzdný výkon
- bez kontaktu s vodiacou dráhou a vďaka plynulej regulácii rýchlosti je jazda pohodlná a stabilná
- vysoká bezpečnosť, nehrozí vykoľajenie
- v porovnaní s inými dopravnými prostriedkami pri danej rýchlosti, výrazne nižšia hlučnosť
- ekologický druh dopravy, bez emisií a iných znečisťujúcich látok pozdĺž trati
- minimálny prienik magnetického poľa k pasažierom, pole je porovnateľné so zvyškovým geomagnetickým poľom
- nízka špecifická spotreba energie, nízke prevádzkové náklady avšak na úkor vysokých nákladov pri realizácii dráhy
- vyššia povolená stúpavosť pri návrhu trate (až 10 %)
- minimálne územné nároky na vodiacu dráhu [1]

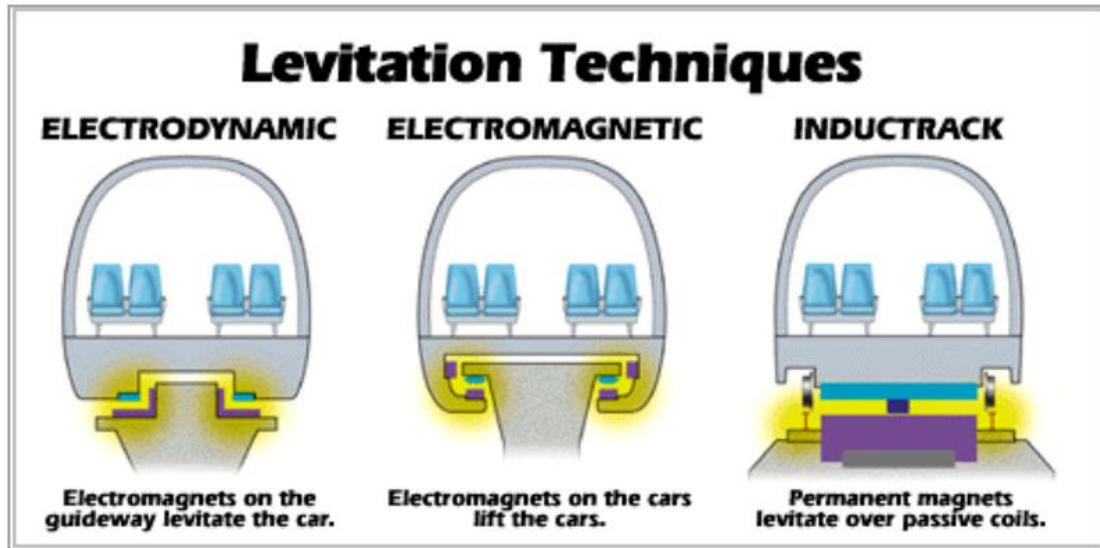
Ak berieme do úvahy uvedené vlastnosti, jedinou nevýhodou je podstatne nákladná realizácia magnetickej trate, čo predstavuje v dnešnej dobe veľkú prekážku. Avšak neustále vznikajú výskumné tímy zostavené z technikov, ktorí sa zaoberajú práve otázkou minimalizácie nákladov pre realizácie projektov magnetickej levitácie.



Obrázok 4.2: Dizajnerska ukážka magnetickeho vlaku [2]

4.3 Fyzikálne princípy a konštrukcie podvozkov

Typy podvozkov na základe použitých magnetov a elektromagnetov je možné rozdeliť na tri základné typy: podvozky s elektromagnetickým zavesením (EMS), podvozky s elektrodynamickým zavesením (EDS) a v súčasnosti nový typ Inductrack.



Obrázok 4.3: Princípy magnetickej levitácie v doprave [2]

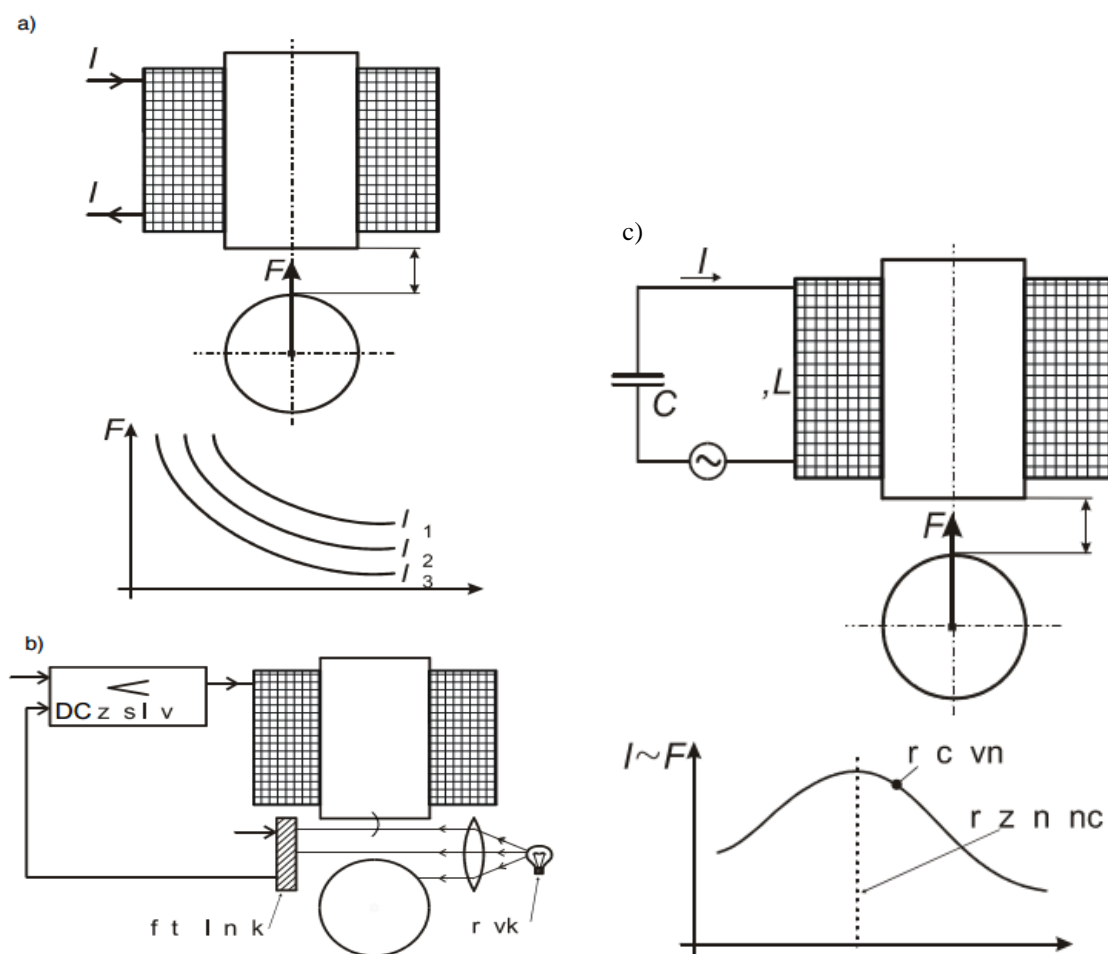
4.3.1 EMS, podvozok s elektromagnetickým zavesením

Princípom a konštrukciou sa jedná o najmenej náročný a zároveň najstarší systém podvozku [2].

EMS (Electro-Magnetic Suspension), nazývaná tiež elektromagnetická levitácia alebo levitácia priťahovaním, je založená na priťahovaní feromagnetického telesa elektromagnetom. Pri uvažovaní jednosmerného elektromagnetu (Obrázok 4.4a), ktorý priťahuje voľne uložené feromagnetické teleso silou F , je táto levitácia nestabilná. Nastane prípad kedy je sila F menšia ako gravitačná sila, daná hmotnosťou telesa a teleso opadne alebo prípad kedy je naopak sila F väčšia ako gravitačná a teleso sa pritiahne [4].

Magnetická príťažlivosť elektromagnetov sa mení nepriamo s kvadrátom vzdialenosti. Menšie rozmerové zmeny, ktoré medzi statorom a elektromagnetom nastanú, produkujú podstatne rozdielne sily. Tým pádom menšia smerová odchýlka levitujúceho predmetu alebo vlaku má tendenciu sa zhoršovať a narušiť krehkú rovnováhu levitujúceho predmetu. Preto sa k tejto technológii používa komplexný systém spätnej kontroly a regulácie magnetického toku, aby vlak neustále zachovával

konštantnú vzdialenosť od trati, približne 15 mm a nedochádzalo k nežiadanej oscilácii, rázom a neriadenému pohybu stroja vo zvislom aj vodorovnom smere [5][6].



Obrázok 4.4: a) Nestabilná EMS, b) stabilizácia EMS spätnou väzbou, c) stabilizácia EMS obvodom RLC [4]

4.3.1.1 Regulácia a riadenie EMS

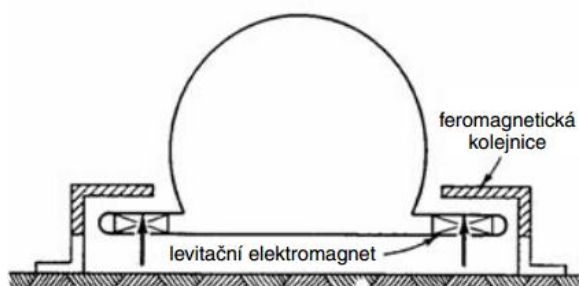
Pre dosiahnutie stability EMS je teda nutné zaviesť spätnú reguláciu budiaceho prúdu elektromagnetu. Regulátor nastavuje taký budiaci prúd, aby magnetický ťah bol neustále v rovnováhe s hmotnosťou telesa.

EMS je takisto možné stabilizovať pomocou striedavého elektromagnetu, ktorého budiaci prúd je samočinne regulovaný ladiacim obvodom RLC. Do série s cievkou elektromagnetu RL je zapojený kondenzátor, ktorého kapacita C je určená tak, aby pracovný bod A bol blízko rezonancie (Obrázok 4.4c). Keď sa vzdiali teleso od magnetu, klesne indukčnosť L jeho cievky, pracovný bod sa priblíži k rezonancii, budiaci prúd sa zväčší a teda aj sila pôsobiaca na teleso vzrastie. Naopak, keď sa teleso

priblíži k magnetu, vzrastie L jeho cievky, obvod RLC sa viac rozladí a prúd, teda aj príťažlivá sila poklesne. Avšak výhoda tohto levitačného zariadenia je iba zdanlivá. Časová konštanta obvodu RLC je pomerne veľká, čiže silové pôsobenie na teleso je slabo tlmené a pri poruche jeho stabilnej polohy vznikajú oscilácie, ktoré niekedy divergujú. Nevýhodou je tiež indukčný charakter obvodu pre stabilnú polohu telesa, teda jeho nízky účinník. Z týchto dôvodov sa k trakčným účelom tento spôsob levitácie nepoužíva [4].

4.3.1.2 Magnetické dopravné systémy na princípe EMS

Pri využívaní EMS v doprave však nejde o priťahovanie voľne uloženého feromagnetického telesa, ktorým bol vysvetlený princíp EMS. Vo vozidle sú umiestnené jednosmerné elektromagnety, ktoré sú priťahované k dolnej ploche oceľového rámu, ktorý je súčasťou jazdnej dráhy [4].



Obrázok 4.5: Starší spôsob využitia EMS - rez vozidla a dráhy [4]

Výhodou EMS (na rozdiel od EDS) je, že je možné levitovať vozidlo už v pokojnom stave (vozidlo nie je nutné vybavovať kolesami pre rozjazd), nepracuje so supravodičom a teda nevyžaduje náročné kryotechnické zariadenie (zariadenie, ktoré slúži na udržiavanie veľmi nízkej teploty) a prevádzka je tým úspornejšia. Nevýhodou je nestabilita samotného systému a teda nutnosť zavedenia spätnej väzby pre reguláciu. Systém na základe EMS pracuje s menšou vzduchovou medzerou, dôsledkom čoho sú väčšie nároky kladené na konštrukciu vozidla a dráhy [4].

4.3.1.3 Detailnejší popis Transrapidu 08 využívajúceho princíp EMS

Najpodrobnejšie rozpracovaný projekt magnetického superexpressu v Európe vznikol v Nemecku pod názvom Transrapid (TR).

Obrázok 4.6a znázorňuje rám vozidla, ktorý obopína jazdnú dráhu. S rámom a jazdnou dráhou sú spojené levitačné a pohonné magnety. Po stranách podvozku sú ešte zabudované vodiace magnety, ktoré zachytávajú bočné sily pri prejazde vozidla

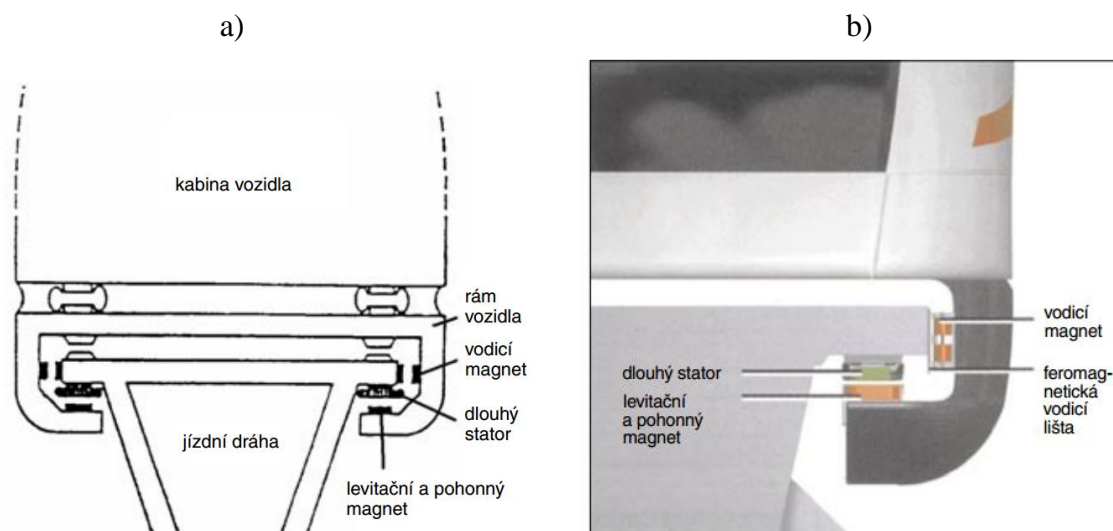
oblúkom a udržiavajú vozidlo v požadovanej polohe v priečnom smere. Budiaci prúd elektromagnetov je regulovaný tak, aby zdvih bol udržiavaný konštantný, okolo 10 mm.

Jazdná dráha je vedená vo výške 2 až 20 m nad zemou, je zo železobetónu. Packety sú z dynamových plechov so satorovým vinutím. Po celej dĺžke trati je teda rozložené trojfázové vinutie, ktoré je uložené v drážkach packetov. Pri napájaní zo siete sa vytvára postupné magnetické pole (u rotačných synchronných strojoch je to točivé magnetické pole), ktoré unáša nabudené elektromagnety uložené v ráme vozidla. Rýchlosť postupného magnetického poľa (teda aj rýchlosť vozidla) sa reguluje frekvenciou. Napájacie satorové veličiny je možné regulovať v medziach napätia 0 až 7800 V, prúdu 0 až 1 200 A, frekvencie 0 až 215 Hz.

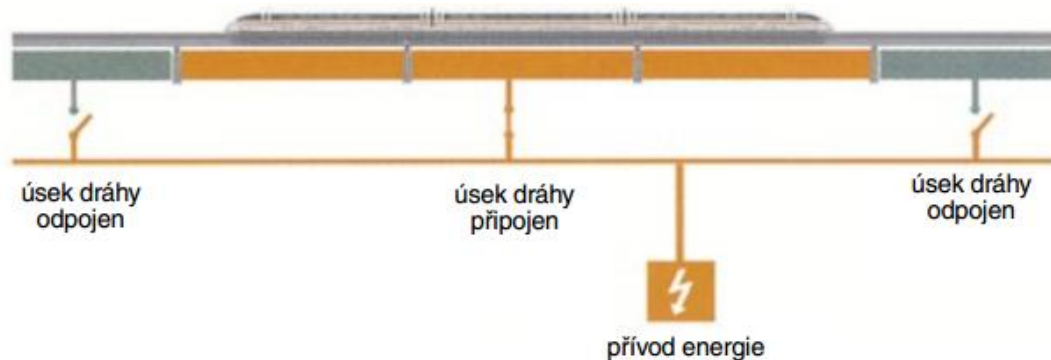
Pri rýchlostiach menších ako 100 km/h je vlastná spotreba krytá z batérií, pri vyšších rýchlostiach je dodávaná z lineárneho generátora, ktorý zároveň dobíja batérie. Lineárny generátor je zabudovaný do levitačných magnetov.

Pre zníženie strát energie v napájacej sústave je sator (trojfázové vinutie uložené v drážkach) rozdelené na dĺžkové úseky. Vždy je postupne napájaný ten úsek, ktorým práve prechádza súprava. Úseky sú napájané káblovým vedením z napájacích staníc, kam je energia privádzaná vedením 110 kV. Stanice sú opatrené meničmi na báze tyristorov GTO. Výkon jednotky meniča je 15 MV.A.

Celé zariadenie je riadené systémom prenosových dát OTN (Open Transport Network), ktorý pracuje na báze optických vlákien a rádiového spojenia na frekvencii 40 GHz [4].



Obrázok 4.6: a) Rez vozidlom a jazdnou dráhou Transrapid 08, b) levitačný, pohonný a vodiaci systém Transrapid 08 [4]



Obrázok 4.7: Postupné napájanie úsekov jazdnej dráhy maglev [4]

Parametre súpravy Transrapid 08:

- počet sekcií: 3
- dĺžka celej súpravy: 80 m
- počet cestujúcich: 311
- šírka/výška: 3,7/4,2 m
- maximálna rýchlosť: 500 km/h
- hmotnosť prázdnej/zaťaženej sústavy: 39/48 t na sekciu
- výkon: 16 MW
- prepravná kapacita: 40 000 osôb na deň, 95 jazd v jednom smere na deň
- rozjazdová akcelerácia: k dosiahnutiu rýchlosti 300 km/h je nutná dráha 5 km (pri klasickej železnici 28 km)
- spotreba energie: 20 kW/km pri rýchlosti 400 km/h (porovnateľná so spotrebou ICE pri rýchlosti 250 km/h)
- hluk: nižší ako u ostatných dopravných prostriedkoch
- magnetické pole v kabíne: nepatrné [4]

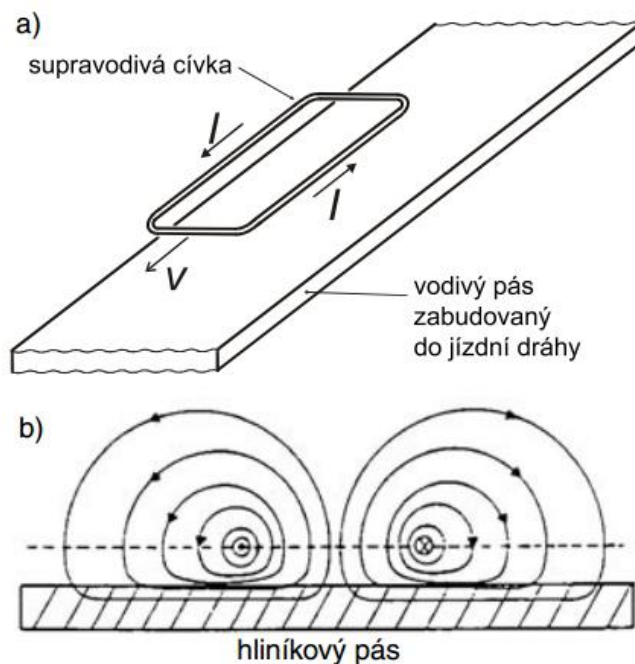
4.3.2 EDS, podvozok s elektrodynamickým zavesením

EDS (Electro-Dynamic Suspension), nazývaná tiež levitácia odpudzovaním (repulsívny typ levitácie), je založená na odpudzovaní jednosmerného elektromagnetu od pohybujúceho sa vodivého pásu (Obrázok 4.8a).

Pri uvažovaní plochej obdĺžnikovej cievky spojenej s vozidlom a napájanou jednosmerným budiacim prúdom, ktorá je uložená nad vodivým (hliníkovým) pásom. Keď sa cievka voči pásu nepohybuje, jednosmerné magnetické pole cievky preniká do vodivého pásu a medzi cievkou a pásom nepôsobia žiadne sily. Keď nastane pohyb cievky voči pásu, indukujú sa v pásu vírivé prúdy, ktorých magnetické pole je v interakcii s magnetickým poľom budiacej cievky.

Na cievku pôsobí sila, ktorá ma dve zložky: jedna zložka odpudzuje cievku od pásu a spôsobuje jej levitáciu a druhá zložka sily brzdí pohyb cievky a musí byť prekonaná zariadením, ktoré cievke dodáva pohyb, teda pohonom vozidla, v ktorom je cievka uložená. Magnetické pole vírivých prúdov pôsobí proti magnetickému poľu cievky, takže v páse je magnetické pole veľmi slabé (Obrázok 4.8b).

Aby levitačná sila bola dostatočná (napr. pri použití v dopravných systémoch levituje vozidlo spolu s pasažiermi), musí cievka indukovať extrémne silné magnetické pole. To je možné dosiahnuť, keď je cievka zo supravodiča a preteká ňou extrémne veľký budiaci prúd [4].



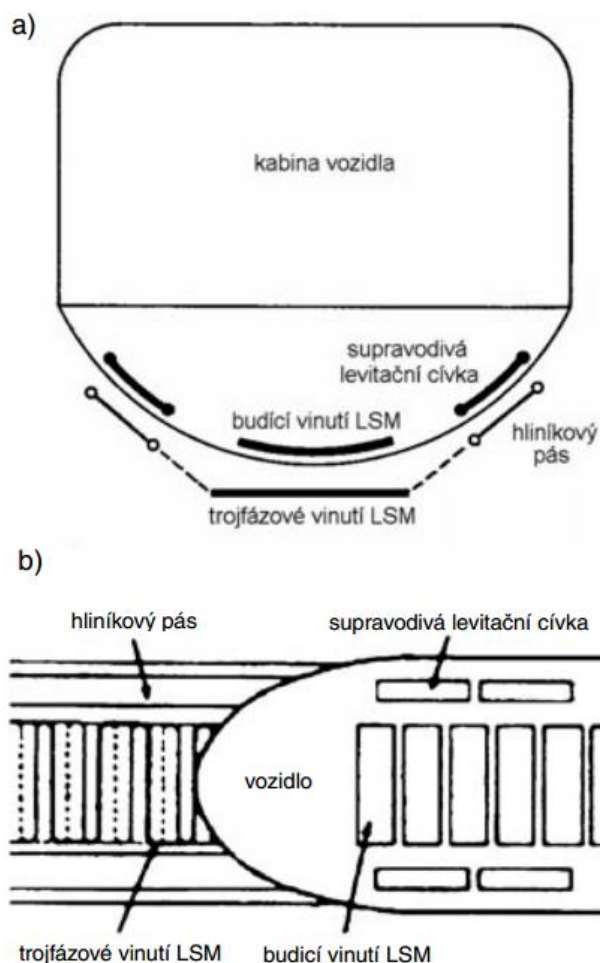
Obrázok 4.8: a) Pohybujúci sa supravodivý magnet nad vodivým pásom, b) magnetické pole pohybujúceho sa supravodivého magnetu [4]

Elektromagnety budené supravodivými cievkami, ktoré sú zhotovené zo zliatiny nióbu a titánu sú chladené kvapalným héliom na teplotu $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$. Spolu s kryostatom sú umiestnené vo vozidle. V jazdenej dráhe je umiestnený masívny hliníkový pás. Okrem neho sa tiež používa pás s obdĺžnikovými otvormi alebo cievky spojené nakrátko.

Pri prevádzke sa takisto ako pri EMS napájajú jednotlivé úseky dráhy, ktoré sú iba o niečo dlhšie ako dĺžka súpravy. Signál k zapnutiu úseku podáva rádiový polohový detekčný systém. Ním sa ovládajú meniče tranzistorov IGB, ktoré napájajú príslušné sekcie statorového vinutia.

Vozidlo je do pohybu uvedené klasickým spôsobom, kolesami ktoré sú zabudované do jeho podvozku. Postupne sa zvyšuje frekvencia napájača statorového

vinutia a narastá tým rýchlosť vozidla. Pri dosiahnutí rýchlosti 80 km/h sa indukujú dostatočne veľké prúdy, ktoré svojím magnetickým poľom levitujú vozidlo. Zdvih vozidla predstavuje 100 až 150 mm. Okrem toho tieto prúdy brzdia pohyb vozidla a vytvárajú silu, ktorá musí byť prekonaná pohonom vozidla [4].



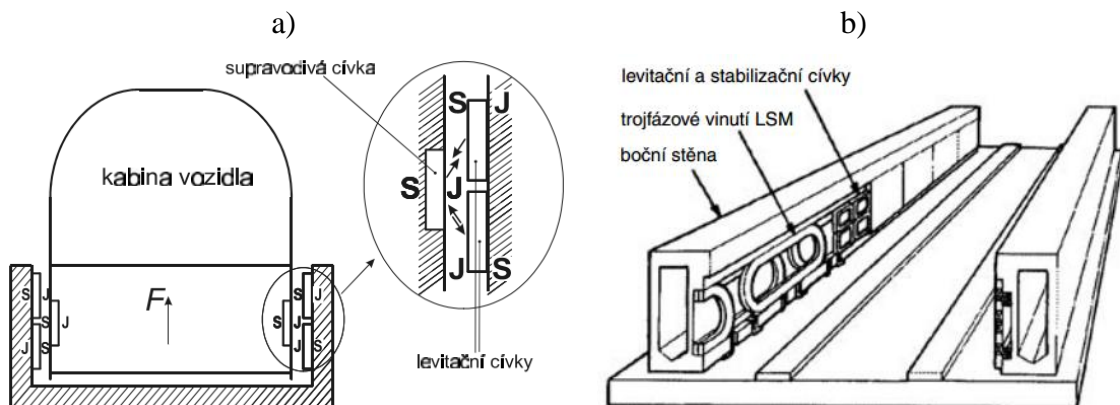
Obrázok 4.9: a) Rez vozidlom EDS a jazdnou dráhou, b) pohľad na vozidlo zhora [4]

4.3.2.1 Superexpresy novej koncepcie využívajúce princíp EDS

Nová koncepcia spočíva v umiestnení cievok v bočných stenách magnetickej dráhy. Základnú jednotku tvoria dvakrát dve cievky, zabudované v oboch bočných stenách, teda celkom osem cievok. V pokojnom stave podvozku sa neindukujú žiadne prúdy. Supravodivé cievky sú voči levitačným cievkam umiestnené asymetricky, o niečo nižšie pod stredom hornej a dolnej levitačnej cievky. Pri rozjazde sa do dolných cievok indukujú prúdy väčšie ako do horných. Cievky sú spolu prepojené tak, že prúd pretekajúci hornou cievkou preteká dolnou v opačnom smere. Podvozok je teda dolnou

cievkou odpudzovaný a hornou priťahovaný. Dostatočné magnetické pole je dosiahnuté pri určitej rýchlosti.

Levitačné cievky v bočných stenách zároveň zaisťujú bočnú stabilitu. Na protiľahlých stenách dráhy sú cievky prepojené tak, že pri odchýlke vozidla sa zväčšia prúdy s menšou vzduchovou medzerou a naopak. Tým vzrastie odpudivá sila v cievke s väčšou vzduchovou medzerou (klesne v cievke s menšou vzduchovou medzerou) a vozidlo je vytlačené do strednej polohy [4].



Obrázok 4.10: a) Umiestnenie levitujúcej a bočných stabilizačných cievok, b) jazdná dráha magnetického superexpressu [4]

4.3.3 Halbachova sústava permanentných magnetov,

Inductrack

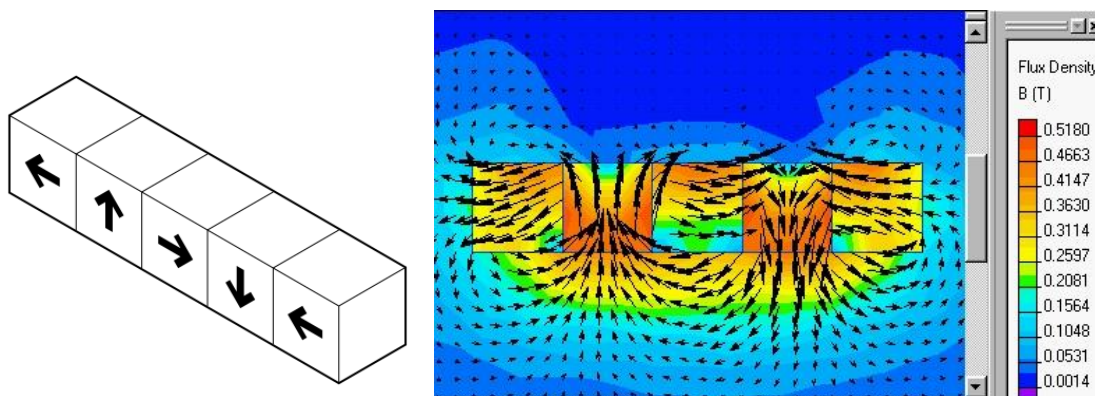
V roku 1985 navrhol fyzik Klaus Halbach usporiadanie permanentných magnetov, ktorými docielil mimoriadne silného magnetického poľa. Usporiadanie chcel pôvodne použiť pre konštrukciu urýchlovača častíc. Nedávno potom boli zostrojené prvé pasívne magnetické ložiská s Halbachovou sústavou permanentných magnetov.

Len prednedávnom bol v USA patentovaný magneticky levitujúci dopravný systém s označením Inductrack. V porovnaní s ostatnými uvedenými systémami, je systém veľmi jednoduchý a vykazuje veľmi výhodné levitačné vlastnosti [25].

4.3.3.1 Halbachova sústava permanentných magnetov

Klaus Halbach usporiadal permanentné magnety v tvare kvádrov (Obrázok 4.11a, šípkami sú vyznačené smery ich magnetizácie). Permanentné magnety boli zhotovené práškovou metalurgiou zo vzácnych zemín so zliatinou neodým-železo-bór (NdFeB), s remanentnou indukciou okolo 1,2 T (teda klasické neodýmové magnety).

Magnetické polia jednotlivých magnetov sa skladajú a výsledok je prekvapujúci: v oblasti pri dolnej časti sústavy je magnetické pole veľmi silné (dosahuje hodnoty až okolo 1T). V oblasti v hornej časti sústavy je magnetické pole veľmi slabé [25].



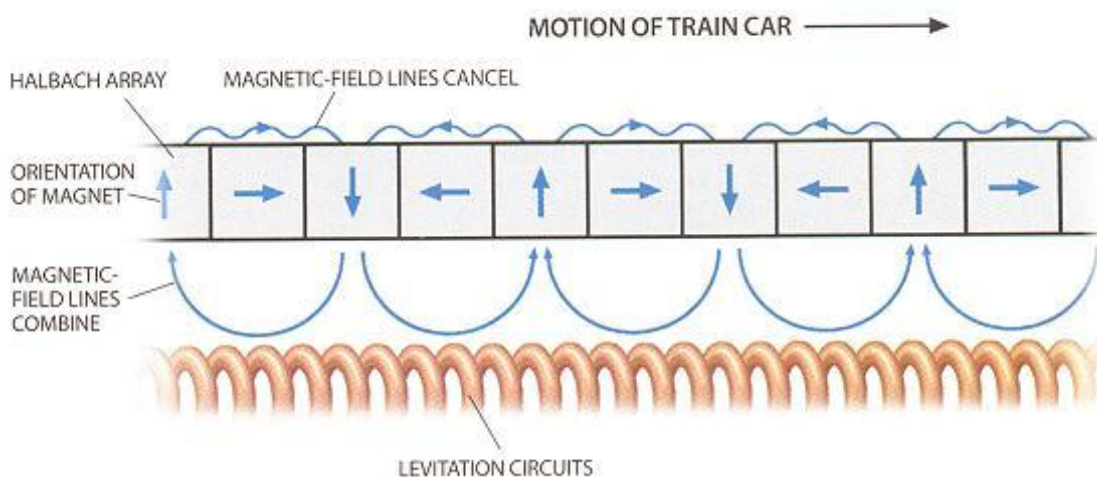
Obrázok 4.11: a) Zobrazenie smeru magnetizácie magnetov Halbachovej sústavy [41],
b) Magnetické pole permanentných magnetov Halbachovej sústavy [39]

4.3.3.2 Fyzikálny princíp Inductrack podvozku

Halbachova sústava je vhodná pre dopravné systémy, už len zo skutočnosti, že pomer hmotnosti sústavy magnetov k jej levitačnej sile je asi 1:50. Medzi značné výhody patrí absencia zložitej stabilizácie, nie na úkor straty bezpečnosti, ktorá zostáva naďalej vysoká, pretože pri strate napájania magnety strácajú svoju energiu postupne. Výhodou je aj absencia kryotechnického zariadenia pre supravodivé magnety, ktoré je inak nákladné na údržbu.

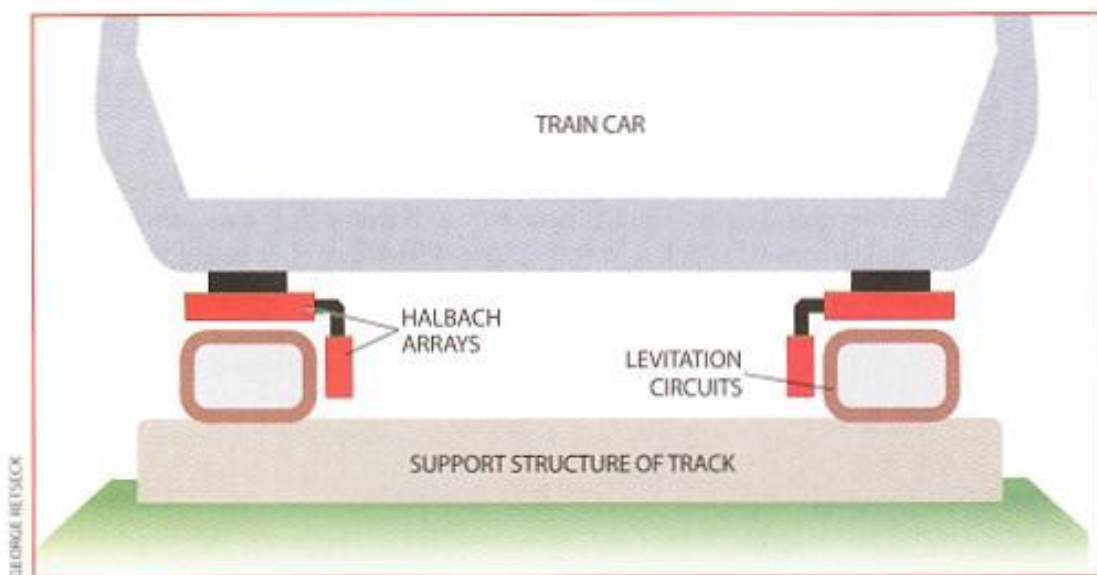
Okrem Halbachovej sústavy permanentných magnetov sa pre Inductrack používa sústava obdĺžnikových, tzv. levitačných cievok spojených nakrátko. Navzájom sú izolované a sú uložené tesne vedľa seba. Cievky sú svojou jednou stranou umiestnené v oblasti tesne pod dolnou časťou Halbachovej sústavy a sú zabudované do jazdnej dráhy. Halbachova sústava je spojená s vozidlom. Keď sa vozidlo pohybuje indukujú sa v cievkach prúdy, ktorých magnetické pole je v interakcii s magnetickým poľom permanentných magnetov a odpudzuje ich. Na vozidlo pôsobia dve sily: levitačná sila, ktorá vozidlo dvíha niekoľko centimetrov nad jazdnú dráhu a brzdiaca sila, ktorá bráni vozidlu pohybovať sa. Uvádza sa, že levitačná sila je omnoho väčšia než brzdiaca sila. Pri rýchlosti 500 km/h je pomer levitácie a brzdenia v pomere asi 1:200. V levitačných cievkach sa teda indukujú prúdy len keď sa vozidlo so sústavou pohybuje. Aby levitujúca sila dosiahla veľkosti potrebnej k dosiahnutiu levitácie vozidla, musí rýchlosť vozidla prekročiť určitú kritickú hodnotu. Ukazuje sa, že daná kritická rýchlosť je pomerne malá, rádovo sú to metre za sekundu. Vozidlo teda musí byť vybavené pomocnými kolesami pre rozjazd a spomaľovanie.

Levitačná sila s rýchlosťou vozidla rastie až dosiahne určitej medznej hodnoty, ktorá predstavuje hodnoty približne 40 t/m^2 aktívneho povrchu Halbachovej sústavy magnetov, ktorých hmotnosť je asi 800 kg/m^2 [25].



Obrázok 4.12: Principiálne usporiadanie podvozku na báze Halbachovej sústavy permanentných magnetov [26]

4.3.3.3 Využitie Inductrack systému v doprave



Obrázok 4.13: Inductrack podvozok pre dopravné systémy [26]

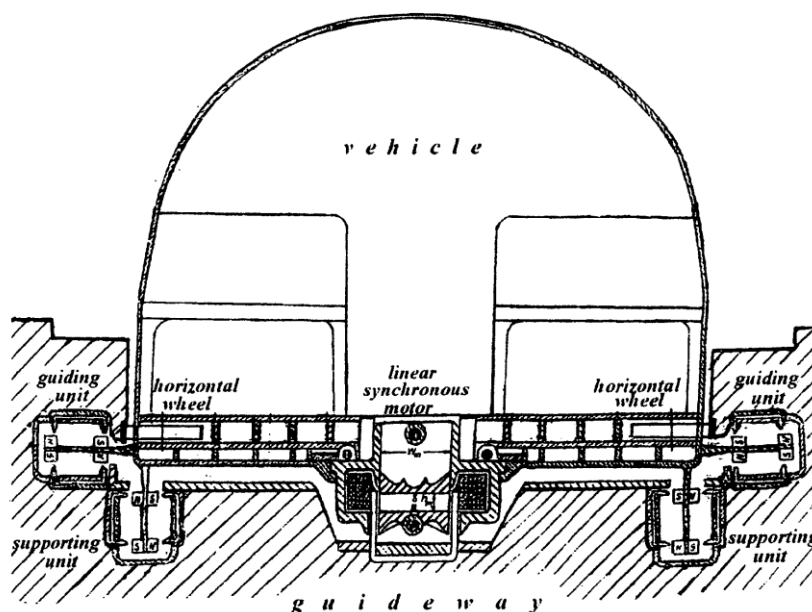
Obrázok 4.13 znázorňuje použitie systému Inductrack u magneticky levitovaného vozidla. Na každej strane vozidla sa používajú dve Halbachové sústavy magnetov. Dvojice väčších sústav sú umiestnené nad dlhšími stranami obdĺžnikových cievok, dvojice menších sústav sú natočené o 90° a umiestnené nad kratšími stranami levitačných cievok. Väčšie sústavy zaisťujú levitáciu, menšie stabilitu. Energia potrebná k prevádzke systému a náklady spojené s údržbou sú nižšie ako pri predošlých uvedených systémoch podvozkov.

Okrem levitačných cievok sa uvažuje o ekonomicky výhodnejšej alternatíve, u ktorej sú levitačné cievky nahradené hliníkovými plechmi obdĺžnikového tvaru. Plechy sú navzájom izolované a zložené do packetov. Pohybom Halbachovej sústavy sa v nich indukujú vírivé prúdy s podobnými účinkami ako u levitačných cievok.

NASA (National Aeronautics and Space Administration) sa venuje využitiu systému Inductrack pre štarty raketoplánov a kozmických rakiet. Ak by pomocou tohto levitačného systému s Halbachovými magnetmi bola uvedená raketa na rýchlosť odpovedajúcu Machovému číslu $M = 0,8$ (950 km/h), znamenalo by to úsporu raketového paliva o 30 až 40 %. Dĺžka štartovacej dráhy sa odhaduje na 1 km [25].

4.3.4 Amlev systém

V júli roku 2008 si Oleg Valentinovich Tozoni patentoval v USA Amlev. Amlev je regulujúci sa systém vysokorýchlostnej pozemnej dopravy pozostávajúci z permanentných magnetov a železných jadier (cievok) dômyselne rozmiestnených pre dosiahnutie stabilnej levitácie [27].

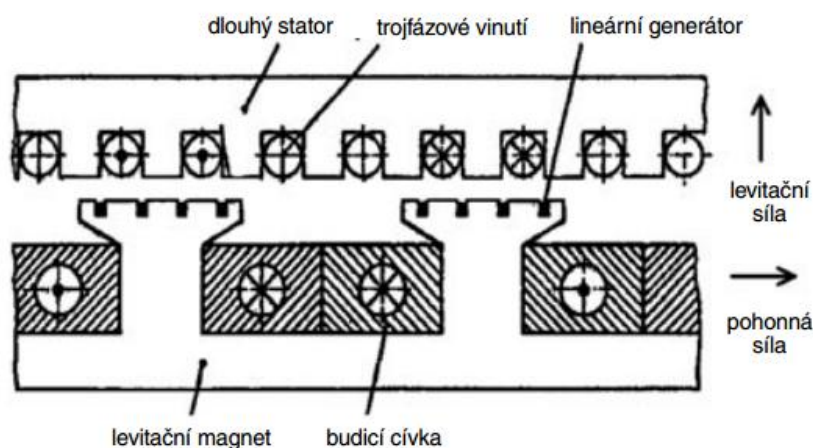


Obrázok 4.14: Podvozok systému Amlev [27]

System je stabilizovaný v oboch smeroch (vertikálne aj horizontálne) na obidvoch stranách vozidla. Stabilná levitácia je dosiahnutá pri rýchlosti 15 m/s a vyššej. Permanentné magnety sú umiestnené na pohybujúcom sa vlaku. Stator v podobe jadier a vinutí je rozložený po celej trati. Celkovo sa jedná o pomerne zložitý systém, predovšetkým náročný na realizáciu magnetickej dráhy. Pre stabilizáciu sú využívané princípy vyššie uvedených podvozkov.

4.4 Pohon pre levitujúce dopravné systémy

Pohonom pre magneticky levitujúce dopravné prostriedky je najčastejšie lineárny synchronný motor s dlhým statorom. Jeho princíp je analogický s klasickým synchronným motorom. Stator je rozvinutý do lineárneho tvaru a je rozťahnutý po celej dĺžke magnetickej dráhy. Rotor tvoria jednosmerné elektromagnety, ktoré sú najčastejšie spojené s rámom vozidla a zároveň majú levitačnú funkciu.

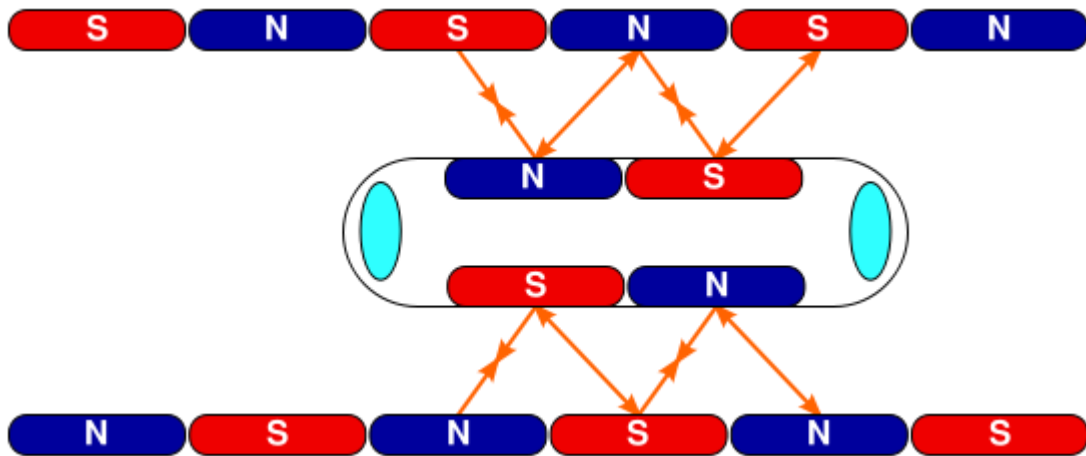


Obrázok 4.15: Usporiadanie lineárneho synchronného motora s dlhým statorom [4]

Lineárny synchronný motor (LSM) pracuje na princípe synchronného stroja s hladkým rotorom, kde primárna rozvinutá časť motoru (stator) obsahuje vinutie a sekundárna časť (rotor) je tvorená permanentnými magnetmi, elektromagnetmi alebo supravodivými magnetmi. Pokiaľ vinutím cievky v primárnej časti začne prechádzať elektrický prúd, dôjde k dočasnemu silovému pôsobeniu medzi vinutím a proti bežnými magnetmi a dochádza k pohybu [2].

Obrázok 4.16 znázorňuje princíp zrozumiteľnejšie. Pri prechode striedavého prúdu rotorom sa synchronne menia aj jednotlivé polarities. Táto zmena spôsobuje odpudzovanie v mieste kde nastanú rovnaké polarities a pritiahnutie do oblastí

s rozdielnymi polaritami. Silové pôsobenie, ktoré takto vzniká pôsobením polarít magnetických materiálov vyvoláva pohyb, ktorý môže nastať v oboch smeroch.



Obrázok 4.16: Princíp pohybu magneticky levitovaného vozidla pomocou lineárneho synchronného motora [36]

Maglev vlaky sú vybavené aj lineárnym generátorom, ktorý sa používa ako zdroj elektrickej energie pre vlastnú spotrebu vlaku. Zvykne byť aktivovaný pri vyšších rýchlostiach a jeho úlohou je zároveň dobíjať batérie, ktoré pokrývajú spotrebu vlaku pri nižších rýchlostiach. Generátor je zabudovaný do levitačných magnetov (Obrázok 4.15).

4.5 Brzdové systémy pre maglev vlaky

Primárnym brzdiacim mechanizmom pre magnetické vlaky je najčastejšie samotný lineárny motor. Motoru je postupne odoberaná elektrická energia a vozidlo začne pomaly spomaľovať a klesať. Vzhľadom k rýchlostiam aké sa dosahujú je hlavnou nevýhodou tejto metódy obrovská brzdiaca dráha.

Pre brzdenie sa využíva aj elektrodynamická rekuperačná brzda. Brzdenie sa deje prepolovaním, pričom lineárny synchronný stroj prechádza z motorického pohonu do režimu generátora. Energia získavaná brzdením sa vracia do riadiaceho centra, kde sa rekuperuje späť do siete [4].

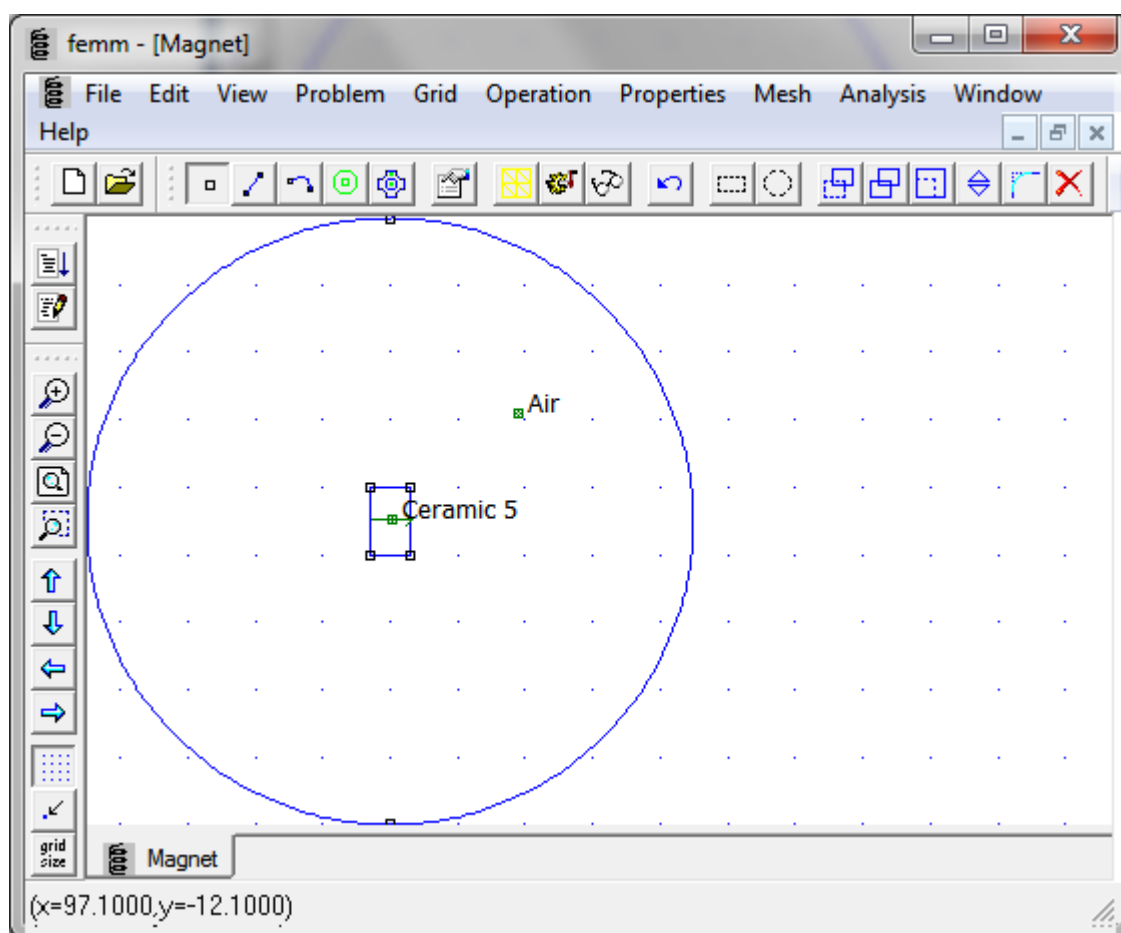
Elektrodynamické vlaky, pri ktorých funguje brzdenie lineárnym motorom len do určitého momentu, sú vybavené aj mechanickými brzdami. Mechanické brzdy môžu využívať trenie pre spomalenie alebo účinné kotúčové brzdy.

Ďalším spôsobom brzdenia, ktorý sa využíva hlavne pri vyšších rýchlostiach, je aerodynamická brzda. Pre brzdenie je využívaný odpor vzduchu. Princíp spočíva vo vysúvaní „krídel“ s čo najväčšou plochou alebo sú používané padáky.

5 PROGRAMOVÉ VYBAVENIE PRE SIMULÁCIU

5.1 Program FEMM

Počas celého priebehu praktickej časti práce bol využívaný program FEMM 4.2 x64 ako prostredník pre kontrolu vyššie uvedených teoretických znalostí s vytvorenými modelmi elektromagnetov. Tento simulačný program umožňoval aj lepšie vychytať reálne správanie, predovšetkým kvôli nehomogenite prostredia vo vzduchových medzerách elektromagnetov, ktoré spôsobovali azda najväčšie odchýlky od teoretických predpokladov.



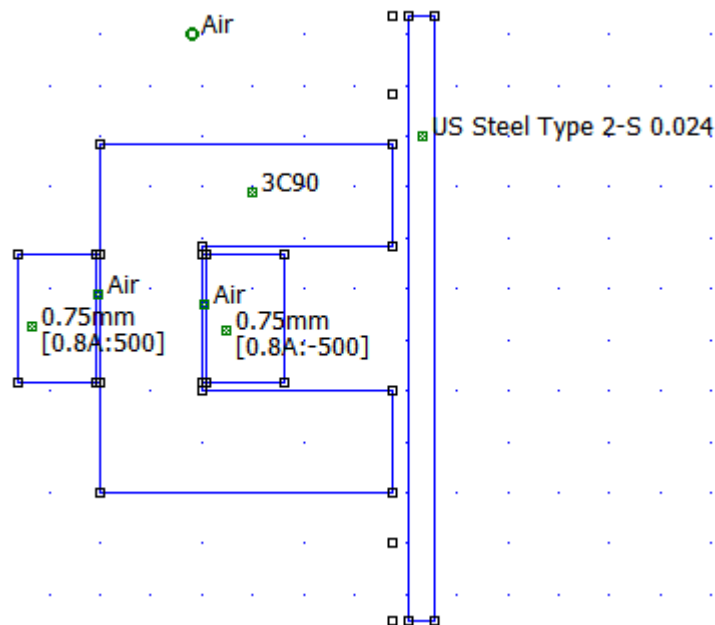
Obrázok 5.1: Pracovné prostredie programu FEMM

Program FEMM slúži k riešeniu nízkofrekvenčných elektromagnetických úloh pomocou dvojrozmerných modelov metódou konečných prvkov.

Metóda konečných prvkov je účinná metóda k riešeniu všetkých okrajových úloh inžinierskej praxe, ktoré sú popísané diferenciálnymi rovnicami. Metóda bola vyvinutá s nástupom digitálnych technológií koncom päťdesiatych rokov k riešeniu úloh z pružnosti a pevnosti v leteckom priemysle. V krátkej dobe bola zavedená aj do ostatných oblastí strojárstva, stavebníctva a elektrotechniky [38].

Postup výpočtu pri aplikáciách s metódou konečných prvkov:

- vygenerovanie siete prvkov s uzlami (hustota siete sa volí na základe požadovanej presnosti)
- aproximácia potenciálov na jednotlivých prvkoch z uzlových hodnôt
- dosadenie zvolenej aproximácie do diferenciálnej rovnice alebo jej ekvivalentu a zostavenie sústavy rovníc pre neznáme uzlové hodnoty
- vyriešenie sústavy
- spracovanie dodatočných požiadaviek, výpočet ďalších veličín a zobrazenie výsledkov [38]



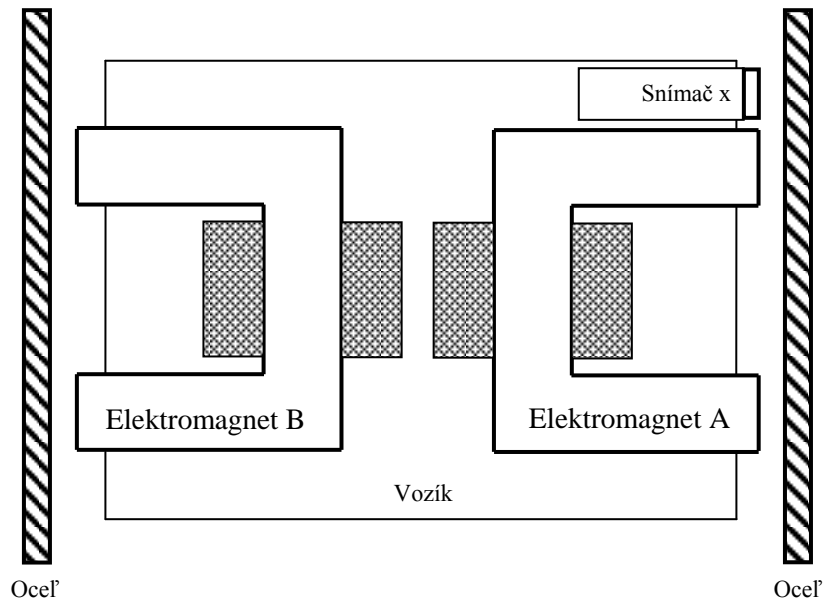
Obrázok 5.2: Príklad navrhnutého elektromagnetu k simulácii vo FEMM

5.2 Matlab

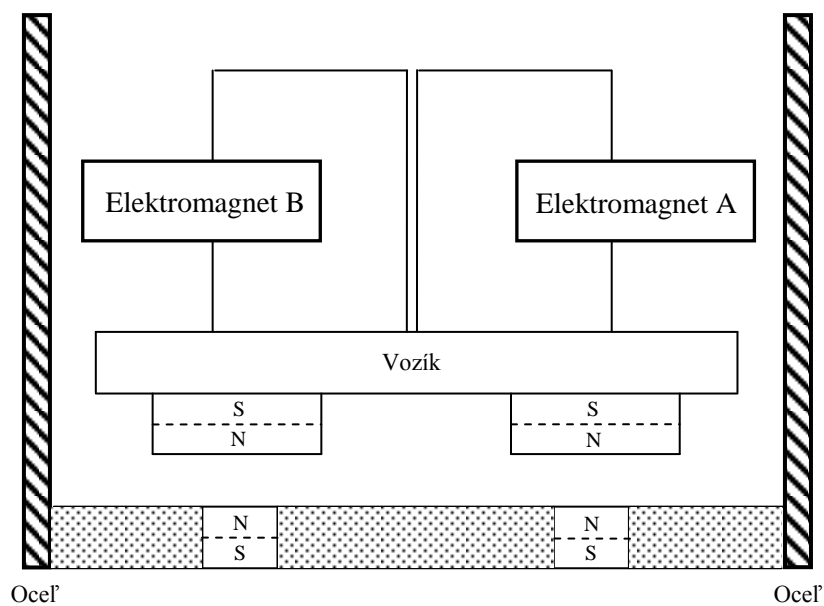
Pre simuláciu matematických modelov elektromagnetov a ich riadenia bol použitý program Matlab (konkrétne verzia R2013b 8.2.0.701 x64) v kombinácii so Simulinkom a príslušnými toolboxami.

6 UVAŽOVANÁ KONŠTRUKCIA VOZÍKU

Pre udržanie levitačného vozíku bola uvažovaná konštrukcia s vhodným umiestnením permanentných magnetov zo spodku vozíka a riadením elektromagnetov na bočných stranách konštrukcie.



Obrázok 6.1: Uvažovaná konštrukcia levitačného vozíku (pohľad zhora)



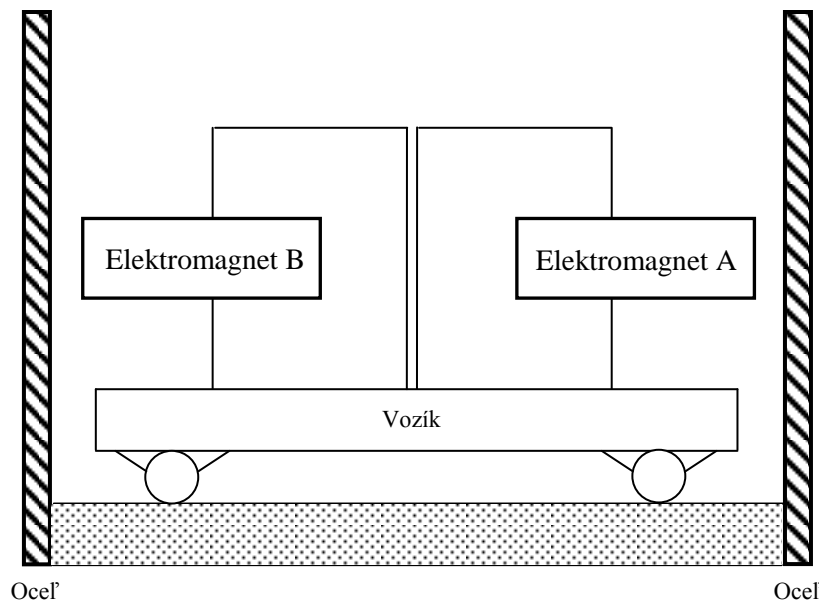
Obrázok 6.2: Uvažovaná konštrukcia levitačného vozíka (pohľad spredu)

Na základe uvažovanej konštrukcie bola problematika rozčlenená na dve časti:

- 1) Návrh a riadenie bočných elektromagnetov - časť zaujímavá z hľadiska kybernetiky, zahŕňa získanie poznatkov, vytvorenie modelov elektromagnetov, návrh a realizáciu riadenia pre elektromagnety.
- 2) Pokus o vytvorenie podvozku z permanentných magnetov. Táto úloha skôr vyžaduje znalosti správania magnetických polí permanentných magnetov a mnoho experimentovani v pokročilom nástroji pre simuláciu magnetického poľa a výpočet veľkosti a smeru výsledných síl, ktoré pôsobia na odpudzujúce sa magnety.

Samotná realizácia bola zahájená prvým krokom, pričom vozík bol umiestnený na štyri kolieska. Aj napriek tomu, že bude týmto vozík na pevnej podložke samotnú situáciu riadenia bočných elektromagnetov to nemení, rozdiel bude spočívať iba v tom, že bude navyše vznikať statické a dynamické trenie.

Obrázok 6.3 teda znázorňuje konštrukciu pre riadenie elektromagnetov, ktorá je v tejto práci najviac rozoberaná. Pohľad zhora pre predstavivosť ostáva rovnaký (viď. Obrázok 6.1).



Obrázok 6.3: Konštrukcia uvažovaná pre odladenie riadenia bočných elektromagnetov

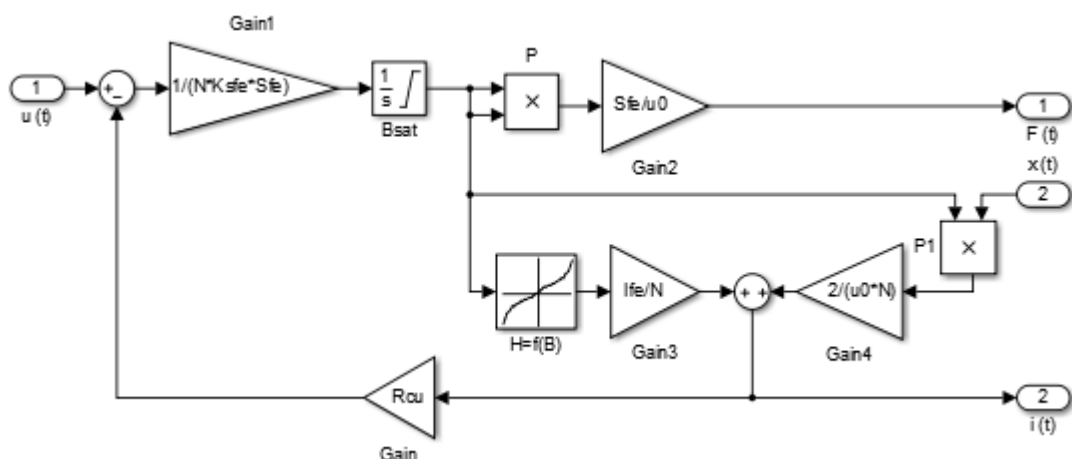
7 NÁVRH A RIADENIE BOČNÝCH ELEKTROMAGNETOV

Vzhľadom k tomu, že elektromagnet nie je lineárnym strojom, jedná sa určite o zaujímavú oblasť v oblasti kybernetiky, tiež nazývanú ako active magnetic bearing. Nejedná sa o najjednoduchšiu úlohu, už len z dôvodu, že daná oblasť je menej prebádaná ako napríklad oblasť motorov, s ktorou je porovnateľná ako sa neskôr ukáže.

Pre matematický návrh a samotnú realizáciu reálneho modelu bola využitá nasledujúca postupnosť krokov:

- 1) Získanie vhodného modelu elektromagnetu.
- 2) Stanovenie pracovného bodu, návrh elektromagnetu.
- 3) Voľba vhodného snímača vzdialenosti.
- 4) Zjednodušenie a linearizácia nelineárneho modelu elektromagnetu.
- 5) Merania na reálnom elektromagnete, simulácia, stanovenie rozdielov.
- 6) Obecný návrh kaskádového regulátora pre model.
- 7) Porovnanie riadenia lineárneho a nelineárneho modelu.
- 8) Aplikácia pre riadenie dvoch elektromagnetov.
- 9) Výber vhodnej riadiacej elektroniky, aplikácia navrhnutého riadenia.
- 10) Návrh filtrov a výsledné prenosy, výsledný regulátor, anti-windup.
- 11) Porovnanie simulovaných a reálnych hodnôt, zhodnotenie regulácie.

7.1 Získanie vhodného modelu elektromagnetu



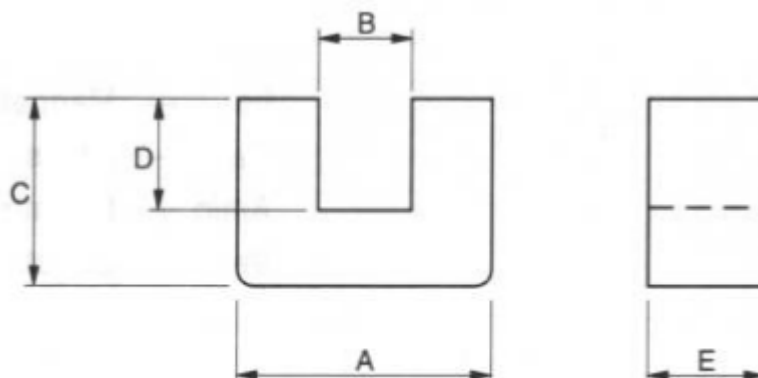
Obrázok 7.1: Elektromagnet ako subsystém používaný v riadiacich schémach

Pri realizácii bol využitý matematický model elektromagnetu zobrazený v prílohe A. Tento model bol upravený, aby zahŕňal zistené skutočnosti popísané v nasledujúcich kapitolách. Pre prehľadnejšiu orientáciu bol používaný elektromagnet ako subsystém s dvoma vstupmi a výstupmi (Obrázok 7.1). Vstup $u(t)$ predstavuje vstupné napätie privádzané na svorky elektromagnetu a $x(t)$ aktuálnu vzdialenosť elektromagnetu od ocele. Výstup $F(t)$ predstavuje aktuálnu silu generovanú elektromagnetom a výstup $i(t)$ prúd pretekajúci elektromagnetom.

7.2 Stanovenie pracovného bodu, návrh elektromagnetu

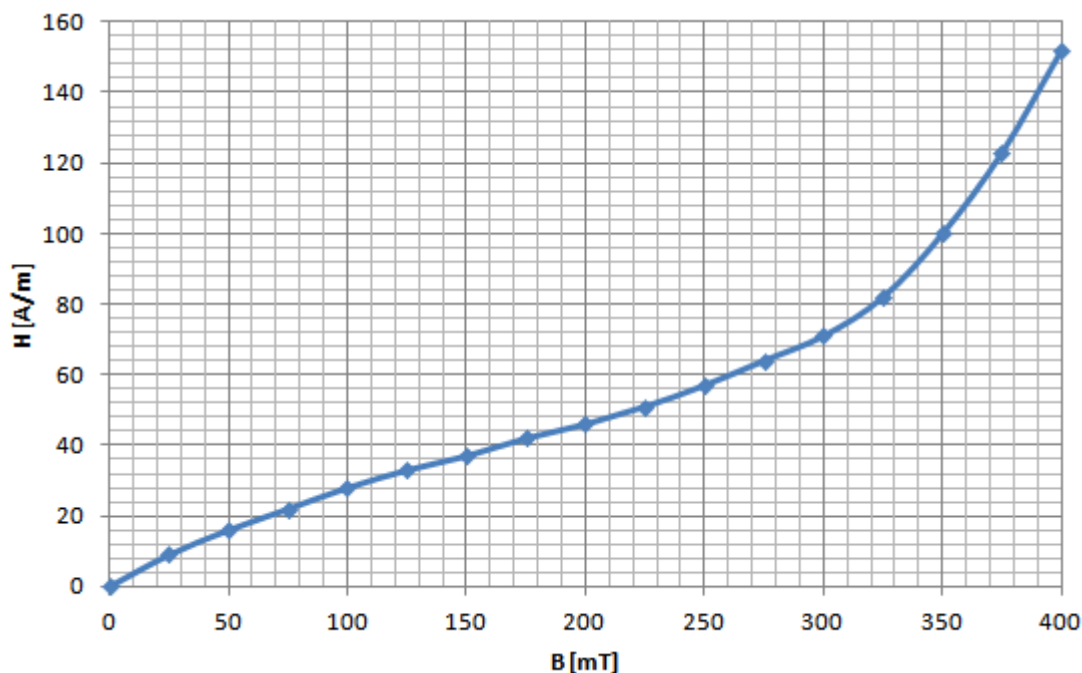
Samotný návrh elektromagnetu sa odvíja od zvolených hodnôt vzduchovej medzery a prúdu v pracovnom bode a samozrejme od požadovanej sily, pri ktorej by sa mal vozík ešte udržať v pracovnom bode. Pre začiatočnicke aplikácie riadenia je určite vhodnejšie voliť väčšie vzduchové medzery. Preto bola zvolená vzdialenosť $x_0 = 3$ mm. Zvolený prúd predstavuje polovicu maximálneho, teda $i_0 = -0,8$ A. Prúd je zvolený záporne, aby bola dosiahnutá kladná konštanta K_1 (rovnica 3.29). Maximálny prúd je daný prierezom vodiča použitého pri navíjaní elektromagnetu (0,75 mm) a samotnou elektronikou (maximum 2 A). Zvolený prúd bol teda o niečo menší $I_{\max} = -1,6$ A.

Feritové jadro, pochopiteľne v tvare U, bolo volené v rámci možností s rozmermi: A = 68,4 mm; B = 28,4 mm; C = 57,5 mm; D = 37,5 mm; E = 20,0 mm (Obrázok 7.2).



Obrázok 7.2: Označenie rozmerov zvoleného feritového jadra elektromagnetu

Dané feritové jadro je z materiálu CF139, na základe čoho je možné zistiť jeho inverznú funkciu magnetizačnej charakteristiky použitú v modeli elektromagnetu (Obrázok 7.3). Zaujímavá je ešte saturačná hodnota magnetickej indukcie ($B_{\text{sat}} = 0,49\text{T}$). Pri návrhu je určite lepšie sa držať pod touto hodnotou v lineárnej časti charakteristiky. Ďalšie informácie o použitom ferite sú zaznamenané v prílohe B.



Obrázok 7.3: Uvažovaná inverzná charakteristika $H = f(B)$ pre model elektromagnetu

Na základe týchto údajov boli prevedené základné výpočty v zvolenom pracovnom bode vychádzajúc z odvodených rovníc v teoretickom úvode. Výpočet plochy jedného pólu elektromagnetu:

$$S_{fe} = a^2 = 0,02^2 = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \quad 7.1$$

Konštanta pre výpočet indukčnosti (pre 500 navinutých závitov):

$$L_0 = \frac{N^2 \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{2} = \frac{500^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,256637 \cdot 10^{-6}}{2} = 6,2832 \cdot 10^{-5} \text{ H.m} \quad 7.2$$

Konštanta elektromagnetu:

$$K_{em} = \frac{N^2 \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{4} = \frac{500^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 1,256637 \cdot 10^{-6}}{4} = 3,1416 \cdot 10^{-5} \text{ H.m} \quad 7.3$$

Magnetický odpor vzduchových medzier v pracovnom bode:

$$R_{m0} = \frac{2 \cdot x_0}{\mu_0 \cdot S_{fe}} = \frac{2 \cdot 0,003}{1,256637 \cdot 10^{-6} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 11,94 \cdot 10^6 \text{ H}^{-1} \quad 7.4$$

Magnetický tok v pracovnom bode:

$$\Phi_0 = \frac{N \cdot i_0}{R_{m0}} = \frac{500 \cdot (-0,8)}{11,94 \cdot 10^6} = -33,51 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} \quad 7.5$$

Výpočet magnetickej indukcie v pracovnom bode (podľa rovnice 2.2):

$$B_0 = \frac{\Phi_0}{S_{fe}} = \frac{-25,133 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-4}} = -83,78 \cdot 10^{-3} \text{ T} \quad 7.6$$

A na záver je vypočítaná sila pôsobiaca medzi oceľou a elektromagnetom obidvoma odvodenými vzorcami pre porovnanie:

$$F_0 = \frac{B_0^2 \cdot S_{fe}}{\mu_0} = 2,234 \text{ N} \quad F_0 = K_{em} \cdot \frac{i_0^2}{x_0^2} = 2,234 \text{ N} \quad 7.7$$

Symbol	Hodnota	Vysvetlenie
K_{mm}	1000	konštanta pre prevod mm na m
a	0,02 m	rozmer pólu styčnej plochy elektromagnetu
S_{fe}	$4 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$	styčná plocha pre jeden pól elektromagnetu
μ_0	$1,256637 \cdot 10^{-6} \text{ H/m}$	permeabilita vákua
μ_r	2500	relatívna permeabilita feritového jadra
B_{sat}	0,49 T	saturačná magnetická indukcia feritového jadra
N	500	počet závitov elektromagnetu
l_{fe}	0,1968 m	dĺžka strednej siločiar (pre 5 mm šírku ocele)
I_{max}	-1,6 A	maximálny stanovený prúd
R_{cu}	2,65 Ω	odpor medeného drôtu, z ktorého je elektromagnet navinutý
U_{max}	-4,24 V	maximálne prípustné napätie ($I_{max} \cdot R_{cu}$)
x_0	0,003 m	vzduchová medzera v pracovnom bode
x_m	0,006 m	maximálna možná vzduchová medzera vozíku
i_0	-0,8 A	uvažovaný prúd v pracovnom bode
L_0	$1,3069 \cdot 10^{-4} \text{ H.m}$	konštanta pre výpočet indukčnosti (upravená vid' kapitola 7.5)
K_{em}	$3,1416 \cdot 10^{-5} \text{ H.m}$	konštanta elektromagnetu
m	1,65 kg	hmotnosť vozíku (zistená až po realizácii vozíku)

Tabuľka 7.1: Základné konštanty a ich hodnoty použité pri simulácii elektromagnetov

Pri samotnom návrhu elektromagnetu a celej konštrukcie je nutné si položiť ešte otázku akú silu vyvinie elektromagnet pri maximálnej vzduchovej medzere a maximálnom prúde s cieľom uviesť vozík do pohybu:

$$F_{max} = K_{em} \cdot \frac{(I_{max})^2}{x_m^2} = 3,1416 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{(-1,6)^2}{0,006^2} = 2,234 \text{ N} \quad 7.8$$

Vypočítaná sila sa javí ako dostatočná, v tomto prípade zvlášť pre prekonanie statického trenia, aby bol vozík vôbec uvedený do pohybu.

7.3 Voľba vhodného snímača vzdialenosti

Snímač vzdialenosti je v podstate druhým najdôležitejším prvkom celej sústavy. V prípade jeho nevhodného zvolenia môže byť riadenie modelu nerealizovateľné.

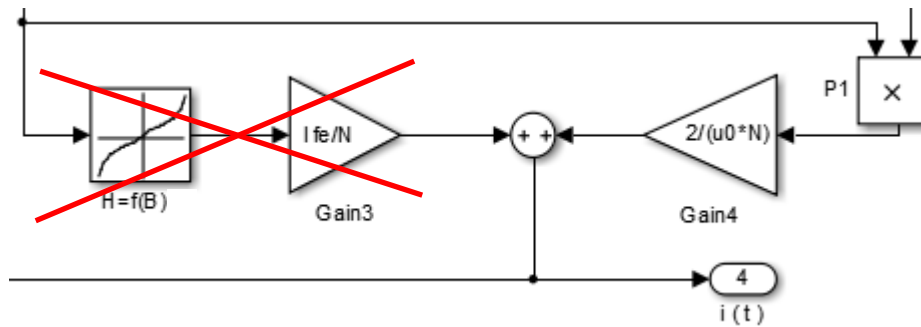
Zvolený snímač samozrejme musí byť analógový s výstupným napätím alebo prúdom. Ďalej sú pri voľbe tejto aplikácie dôležité parametre ako je rýchlosť (frekvencia) a samotný rozsah. Na základe toho bol zvolený snímač s rozsahom, ktorý presne odpovedá na model teda 0 až 6 mm a s pomerne prijateľnou $f = 1\text{kHz}$ frekvenciou. Konkrétna charakteristika zvoleného snímača je zhrnutá v prílohe C.

Ako vidieť charakteristika snímača (závislosť napätia od vzdialenosti v danom rozsahu) je takmer lineárna, takže pri jej linearizácii by nemali vznikať problémy. Pre získanie nižšieho napätia ako vstup do ADC prevodníka riadiaceho mikrokontroléra bol použitý klasický napäťový delič. Snímač vzdialenosti bol potom napájaný samostatným 24 V zdrojom zo siete.

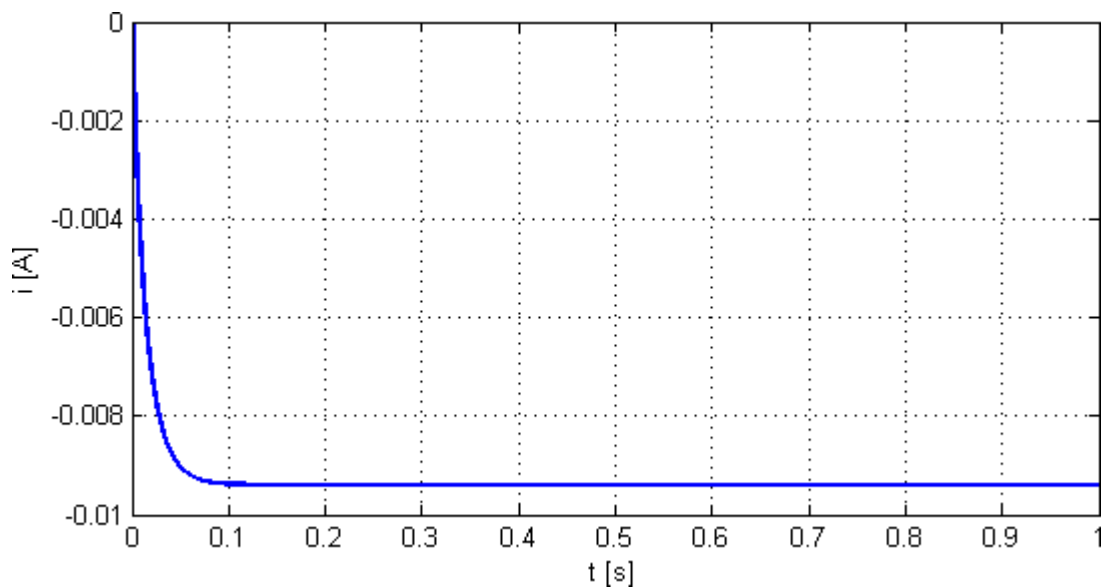
7.4 Zjednodušenia a linearizácia nelineárneho modelu

elektromagnetu

Prúdová vetva modelu elektromagnetu pozostáva z dvoch častí. Jedna je tvorená v podstate odporom feritového jadra a referenčnej koľajnice a druhá je závislá na vzduchovej medzere. Keďže je uvažovaná vzduchová medzera $x = 3 \text{ mm}$ v pracovnom bode, odpor jadra a železa môže byť zanedbaný, pretože je značne menší ako odpor vzduchovej medzery v danom bode. Táto úvaha povedie na prvé zjednodušenie nelineárneho modelu v oblasti prúdovej vetvy (Obrázok 7.4). Ako znázorňuje Obrázok 7.5, zanedbaný prúd tvorí niečo vyše 1 % celkového prúdu v pracovnom bode. Toto zjednodušenie povedie na odvodenie závislosti medzi privádzaným vstupným napätím a prúdom pretekajúcim elektromagnetom.



Obrázok 7.4: Zanedbaná časť prúdovej vetvy modelu elektromagnetu

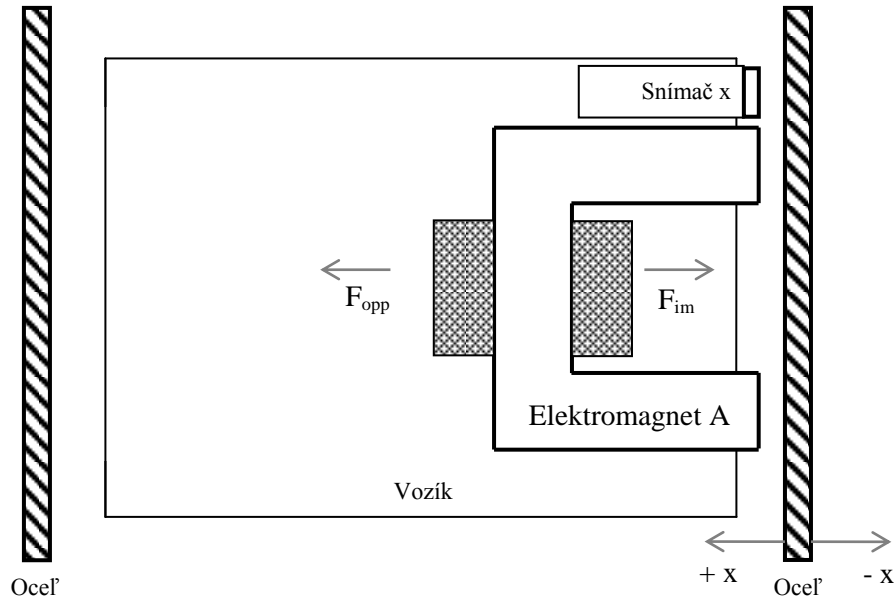


Obrázok 7.5: Veľkosť zanedbaného prúdu v pracovnom bode pri privedení napätia

Na základe uvedených úvah je možné odvodiť prenos napätia elektromagnetu na prúd v pracovnom bode:

$$F_{Sui}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{I}{\frac{L_0}{x_0} p + R_{cu}} = \frac{\frac{I}{R_{cu}}}{\frac{L_0}{x_0 \cdot R_{cu}} p + 1} \quad 7.9$$

Vidieť, že tento prenos sa zhoduje s teoretickým predpokladom (prenos 3.31) prenosu napätia na prúd jednosmerného elektromagnetu. Týmto je odstránená prvá nelinearita modelu. Ďalej pre skúmanie závislosti vzdialenosti od prúdu je uvažovaný jeden elektromagnet.



Obrázok 7.6: Uvažovaná konštrukcia pre linearizáciu jedného elektromagnetu (zhora)

Pre výslednú silu sústavy bude platiť (viď Obrázok 7.6):

$$F = F_{opp} - F_{im} \quad 7.10$$

F_{opp} predstavuje istú silu pôsobiacu proti sile vyvolanej elektromagnetom. Sila F_{im} je daná rovnicou 3.18. Následne je prevedená linearizácia podľa postupu uvedeného v kapitole 3.3. Avšak s menším rozdielom, je dodržaná rovnosť:

$$F_{opp} = K_{em} \cdot \frac{i_0^2}{x_0^2} \quad 7.11$$

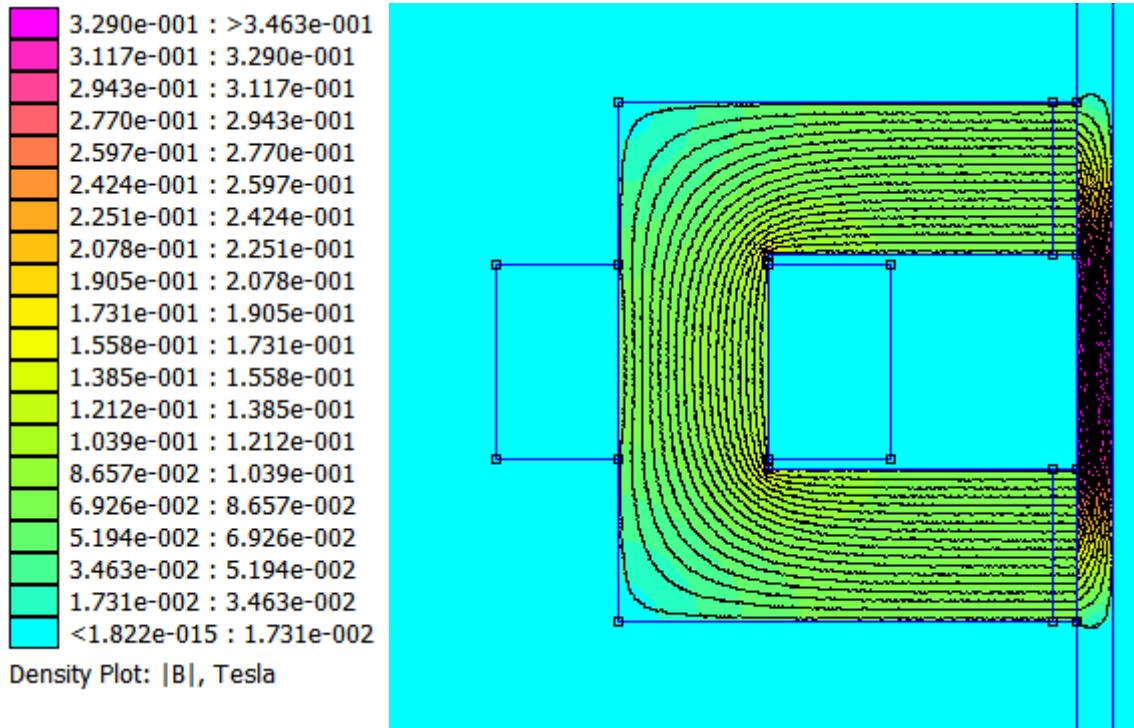
Teda $F_{opp} = 2,234 \text{ N}$. Celá úvaha vedie na výsledný prenos medzi prúdom a vzdialenosťou:

$$F_{six}(p) = \frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_1}{p^2 - K_2} \quad 7.12$$

Kde $K_1 = 3,385 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-1}$ a $K_2 = 902,635 \text{ s}^{-2}$ číselne na základe rovníc 3.29.

7.5 Merania na reálnom elektromagnete, simulácia, stanovenie rozdielov

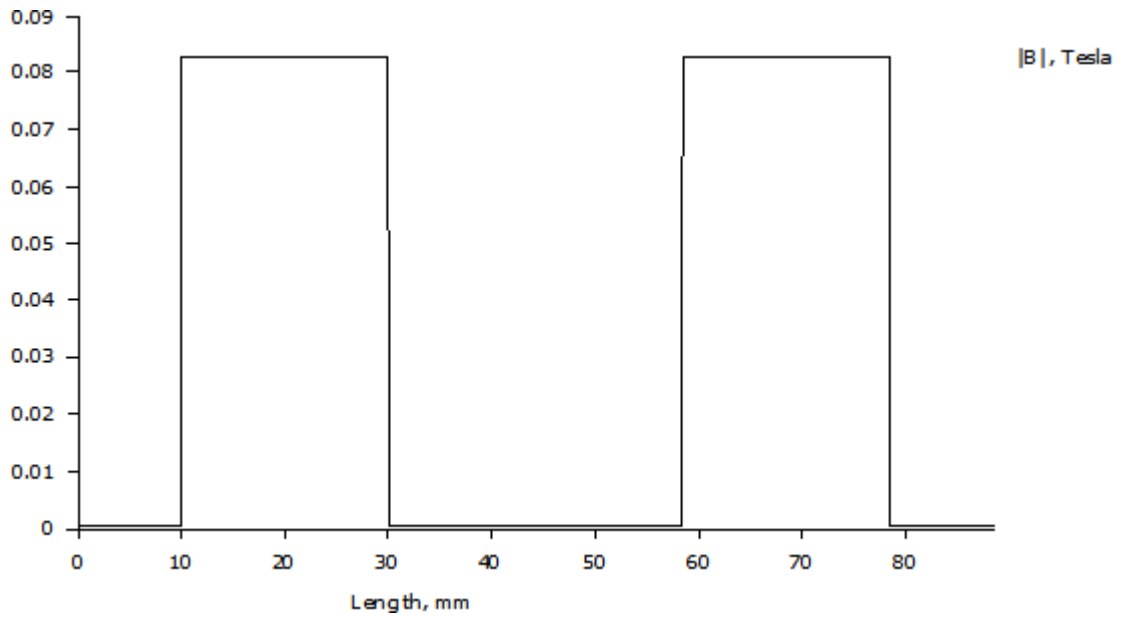
Všetky závislosti uvedené v teoretickom úvode a aj výpočty uvedené v tejto časti práce uvažujú homogénne pole vo vzduchovej medzere medzi koľajnicou a elektromagnetom. Pre vyobrazenie tejto skutočnosti bol použitý simulačný program FEMM (Obrázok 7.7).



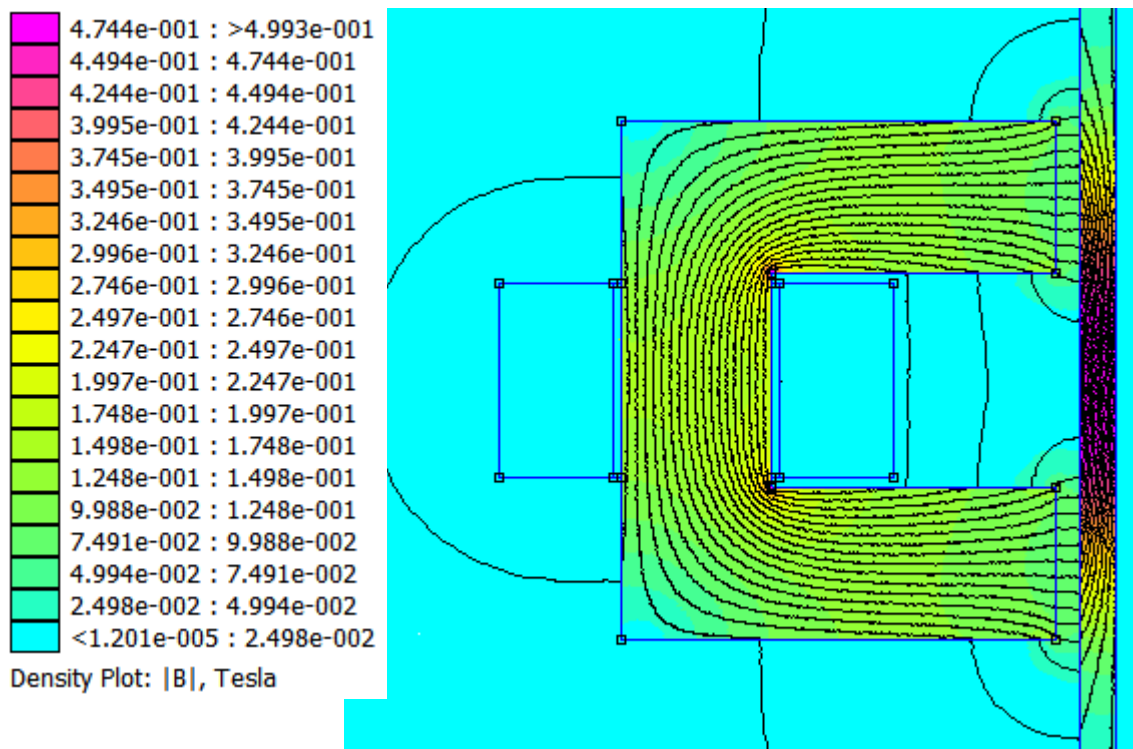
Obrázok 7.7: Homogénne magnetické pole uvažované v teoretických výpočtoch

Po navrhnutí modelu v programe FEMM je možné okrem zobrazenia poľa aj previesť kontrolu niektorých vypočítaných veličín v pracovnom bode. Napríklad vypočítaná sila $F_0 = 2,234$ N (rovnicu 7.7) a simulovaná v programe $F_0 = 2,19$ N. Obrázok 7.8 znázorňuje magnetickú indukciu simulovanú v programe, vypočítaná predstavuje $B_0 = 83,78$ mT.

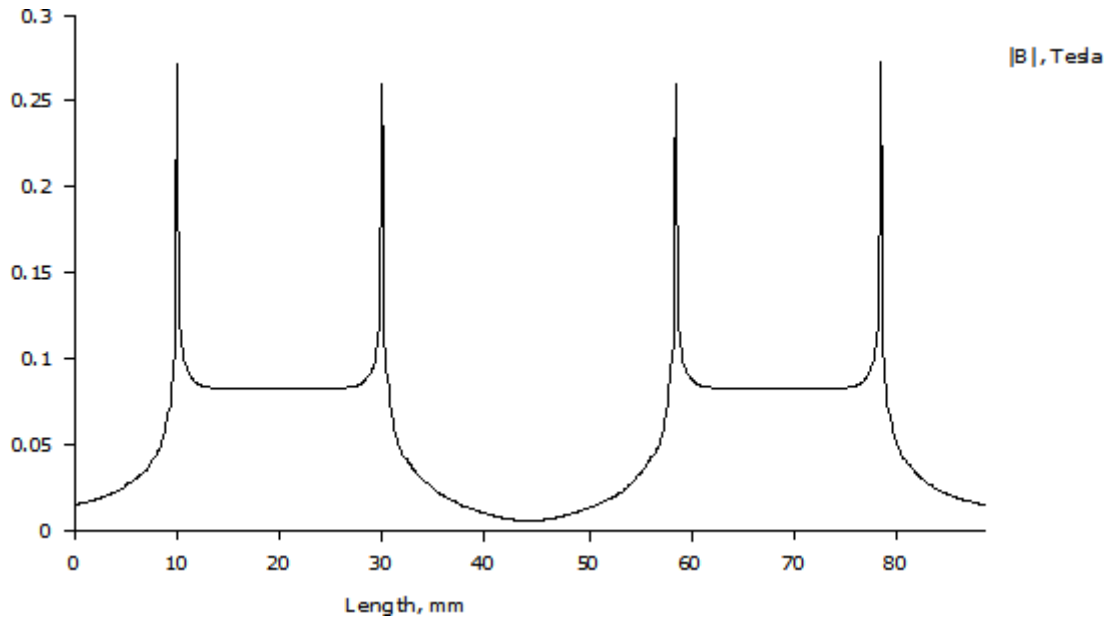
V skutočnosti je však magnetické pole vo vzduchovej medzere nehomogénne. Čo môže viesť k väčšiemu rozdielom medzi uvažovaným modelom a realitou. Vzduch s relatívnou permeabilitou $\mu_r = 1$ sa nachádza všade okolo elektromagnetu (homogénne pole uvažuje prostredie s $\mu_r \ll 1$, teda diamagnetické), čo vedie k celkovému zväčšeniu vodivosti vzduchovej medzery, teda k zmenšeniu jej magnetického odporu R_m . Tieto rozdiely boli vyhodnotené na základe meraní na reálnom elektromagnete.



Obrázok 7.8: Priebeg magnetickej indukcie na jednotlivých póloch elektromagnetu pre homogénne pole



Obrázok 7.9: Skutočné nehomogénne pole vo vzduchovej medzere elektromagnetu



Obrázok 7.10: Skutočný priebeh magnetickej indukcie na póloch elektromagnetu

Meraním pomocou osciloskopu na elektromagnete boli zistené značne odlišné časové konštanty medzi napätím a prúdom pri rôznych dĺžkach vzduchových medzier v pracovnom rozsahu. Práve nehomogénne pole vedie k podstatne väčšej indukčnosti elektromagnetu pri určitých medzerách na rozdiel od teoretických predpokladov. Na základe tohto zistenia bolo prevedené na modeli elektromagnetu tzv. rozšírenie vzduchovej medzery. Rozmer jedného styčného pólu elektromagnetu bol rozšírený na základe teórie rozšírenia vzduchovej medzery tlmivky [35]:

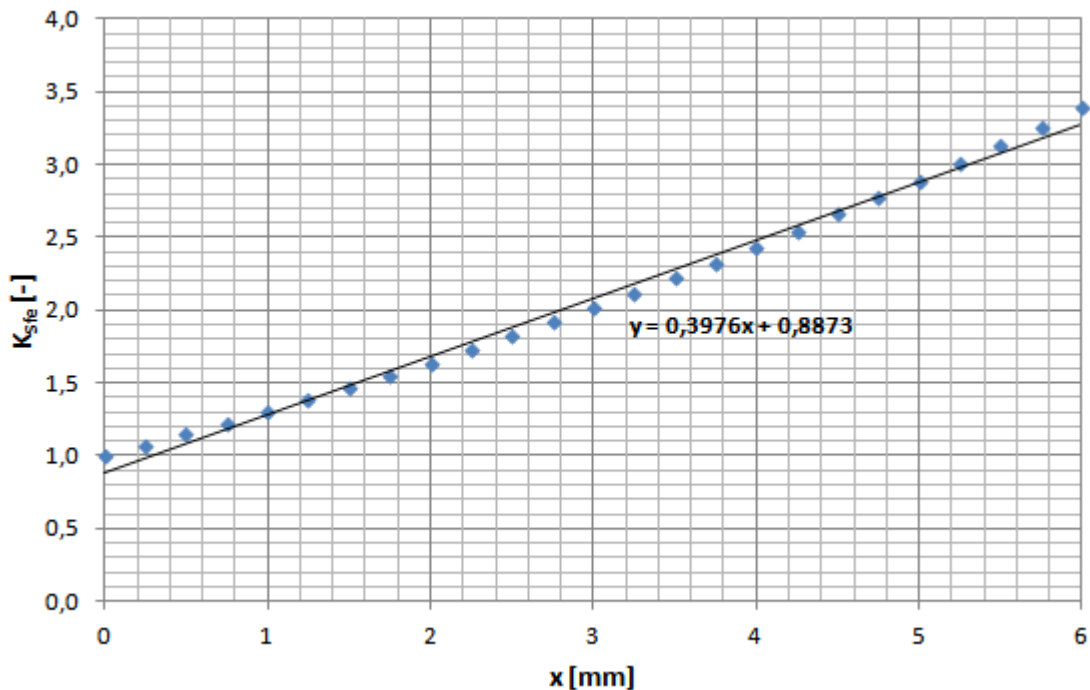
$$a_r = a + 2 \cdot \frac{2,8}{n} \cdot x = a + 2,8 \cdot x \quad 7.13$$

Kde n predstavuje počet pólov. Na základe tohto je potom možné určiť konštantu K_{Sfe} , ktorá hovorí o koľko bude uvažovaná rozšírená plocha väčšia od pôvodnej pri danej veľkosti vzduchovej medzery. Výsledná konštantu K_{Sfe} nie je celkom lineárne závislá od veľkosti vzduchovej medzery, avšak dá sa veľmi dobre linearizovať (Obrázok 7.11).

Teoretická časová konštantu je definovaná ako (podľa prenosu 7.9):

$$T_L = \frac{L_0}{x \cdot R_{cu}} \quad 7.14$$

Tabuľka 7.2 slúži pre porovnanie uvedených poznatkov s reálnym meraním.



Obrázok 7.11: Priebeh linearizácie konštanty rozšírenia vzduchovej medzery pólu elektromagnetu v pracovnom rozsahu

x [mm]	T_L [ms] (teoretická)	T_L [ms] (po aplikácii K_{Sfe})	T_L [ms] (nameraná)
1,4	16,94	24,45	19,52
2,3	10,31	18,57	18,58
3,0	7,90	16,44	17,03
3,7	6,41	15,11	16,72
4,7	5,04	13,90	15,94
6,0	3,95	12,93	14,40
-> ∞	-> 0	-> 0	11,80

Tabuľka 7.2: Porovnanie časových konštánt na základe teórie a merania

Posledný riadok tabuľky uvádza časovú konštantu nameranú bez prítomnosti referenčného železa. Je teda jasné, že aplikovanie rozšírenia vzduchovej medzery vedie na presnejšie výsledky indukčnosti, na základe čoho je upravená konštantu L_0 :

$$L_0 = \frac{N^2 \cdot K_{Sfe} \cdot S_{fe} \cdot \mu_0}{2} = 1,3069 \cdot 10^{-4} \text{ H.m} \quad 7.15$$

Do modelu je pridaná konštantu $K_{Sfe} = 2,08$ v pracovnom bode x_0 .

Tabuľka 7.2 tiež znázorňuje ako indukčnosť elektromagnetu stráca na presnosti pri priblížení elektromagnetu k oceli, keďže sa začína prejavovať magnetický odpor feritu a ocele.

Ešte je dobré pripomenúť, že dvojnásobný nárast indukčnosti v pracovnom bode nevedie na dvojnásobnú silu vyvolanú elektromagnetom. Nameraná sila pri nehomogénnom poli pomocou programu FEMM predstavuje $F_0 = 2,64$ N. Čo je približne 1,2-krát väčšia sila ako pri homogénnom poli. Vzhľadom k tomu, že nebude uvažované statické a dynamické trenie, ktoré pôsobí proti tejto sile, nebude uvažovaný ani tento nárast sily. Teda rovnica 3.19 pre výpočet konštanty elektromagnetu ostáva nezmenená.

7.6 Obecný návrh kaskádového regulátora pre model

Po uvedených úvahách boli metódou štandardného tvaru frekvenčnej charakteristiky otvoreného obvodu navrhnuté regulátory na prúdovú a vzdialenostnú vetvu linearizovaného modelu. Regulátory boli navrhnuté zatiaľ bez úvahy prenosov snímačov, prípadne ich filtrov a vzorkovania. Najprv bola riešená prúdová vetva s prenosom 7.9, kde postačuje úplne PI regulátor v tvare [40]:

$$F_{Rui}(p) = \frac{K_{ri} \cdot (T_{ri}p + 1)}{p} \quad 7.16$$

Pre otvorenú slučku s regulátorom tak bude platiť [40]:

$$F_{Oui}(p) = F_{Rui}(p) \cdot F_{Sui}(p) \quad 7.17$$

Následne sa slučka uzavrie [40]:

$$F_{Wui}(p) = \frac{F_{Oui}(p)}{1 + F_{Oui}(p)} \quad 7.18$$

Uzavretá slučka a prenos prúdu na vzdialenosť (prenos 7.12) sú pochopiteľne zapojené do série, na základe čoho je možné zapísať výsledný prenos:

$$F_{Oix}(p) = F_{Wui}(p) \cdot F_{Six}(p) \quad 7.19$$

Na tento prenos bol potom navrhovaný PID regulátor v toolboxe *sisotool*.

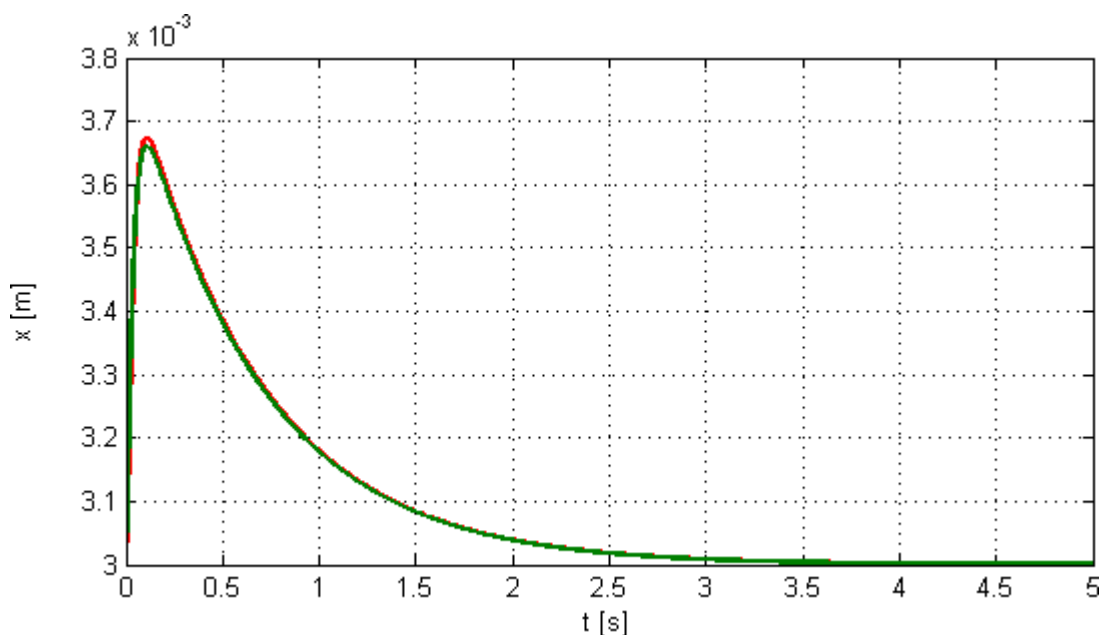
Prenos PID regulátora je v schéme vyjadrený ako:

$$F_{Rix}(p) = \frac{K_{rx} \cdot (T_{rx1}p + 1) \cdot (T_{rx2}p + 1)}{p \cdot (E_x p + 1)} \quad 7.20$$

Kde E_x predstavuje realizačnú konštantu regulátora. Do výsledného obvodu boli ešte na výstupy regulátorov pridané saturácie pre obmedzenie napätia a prúdu do pracovného rozsahu.

7.7 Porovnanie riadenia lineárneho a nelineárneho modelu

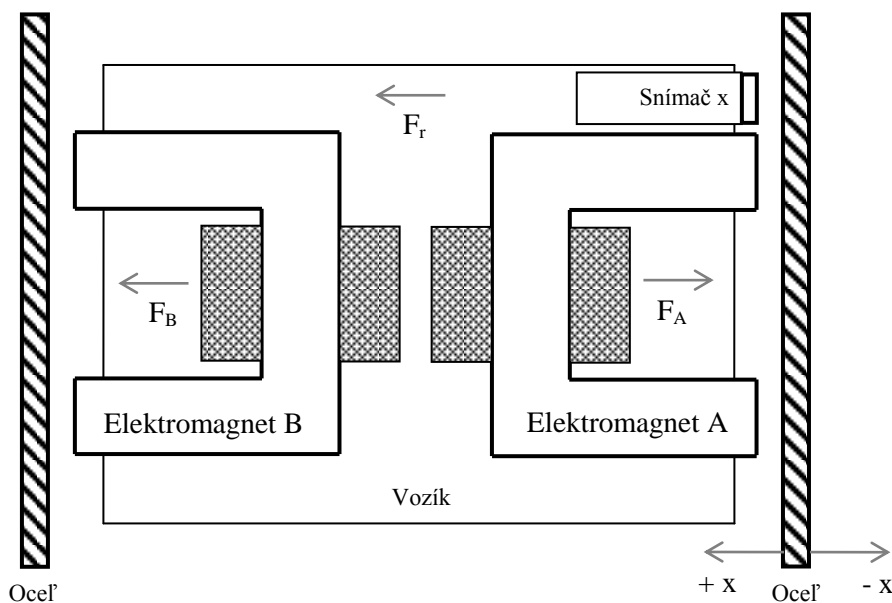
Po obecnom návrhu regulátora podľa predchádzajúcej kapitoly, bol aplikovaný pre nelineárny aj lineárny model elektromagnetu (ako zobrazuje príloha D). Rozdiely medzi lineárnym a nelineárnym systémom je možno analyzovať z mnoho hľadísk a je to nutné hlavne keď neodpovedá nelineárny systém linearizovanému. V tejto práci bola pre porovnanie získaná prechodová charakteristika s navrhnutými regulátormi v pracovnom bode.



Obrázok 7.12: Prechodová charakteristika nelineárneho (červená) a lineárneho (zelená) modelu po zavedení navrhnutej regulácie v pracovnom bode

7.8 Aplikácia pre riadenie dvoch elektromagnetov

Doposiaľ bol uvažovaný jeden elektromagnet s akousi virtuálnou protichodnou silou F_{opp} (Obrázok 7.6). Pre návrh riadenia dvoch elektromagnetov bola táto sila nahradená silou, ktorú generuje druhý elektromagnet B. Do obvodu bola pridaná rušivá sila F_r . Na základe tejto sily je možné určiť akú rušivú silu vozík vydrží.



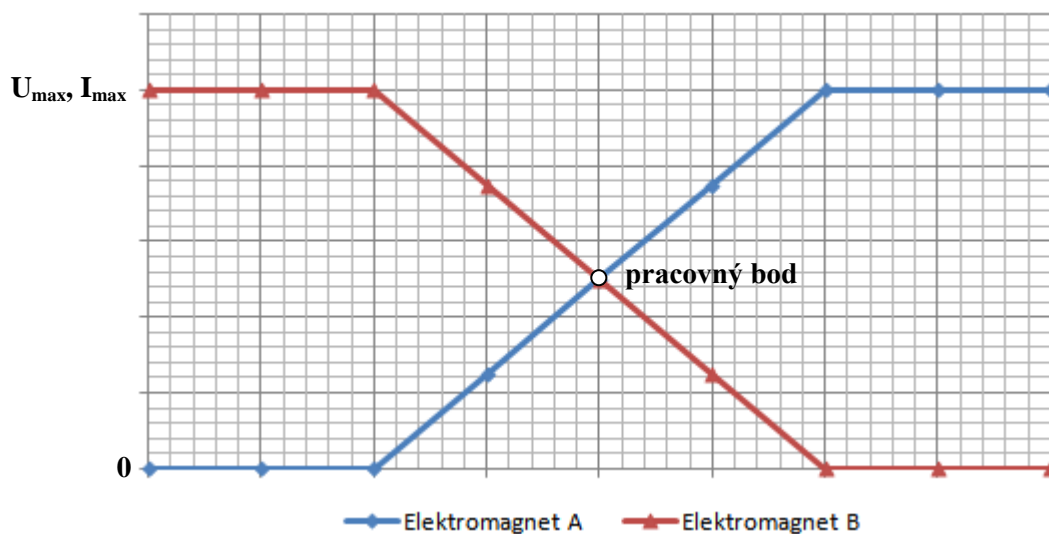
Obrázok 7.13: Výsledné uvažovanie smeru síl a vzdialenosti pre konštrukciu

Na základe obrázku je teda možné zapísať rovnicu výslednej sily:

$$F = F_r + F_B - F_A \quad 7.21$$

Obrázok 7.14 znázorňuje ako sa premieta žiadaná hodnota prúdu alebo napätia na vstupy elektromagnetov. Do elektromagnetu A vstupuje žiadaná hodnota podľa navrhnutého regulátora, do elektromagnetu B vstupuje opačná hodnota na základe stanoveného maximálneho prúdu/napätia. Pracovný bod je navrhnutý presne v polovici maximálnej hodnoty, v ktorom je dosiahnutá rovnosť $F_A = F_B$. Rušivá sila F_r vyvoláva odchýlky od pracovného bodu, čo vedie k rozdielnym prúdom elektromagnetov až po maximálnu hodnotu prúdu/napätia, ďalej už konštrukcia nevydrží a nastáva nežiaduci stav, pritiaženie príslušného elektromagnetu k referenčnej koľajnici.

Na základe tejto úvahy bola navrhnutá najskôr prúdová schéma, ktorá bola potom zjednodušená na napäťovú (výsledné schémy sú zahrnuté v prílohe E).



Obrázok 7.14: Uvažovaná inverzná charakteristika pre požadované napätie a prúd

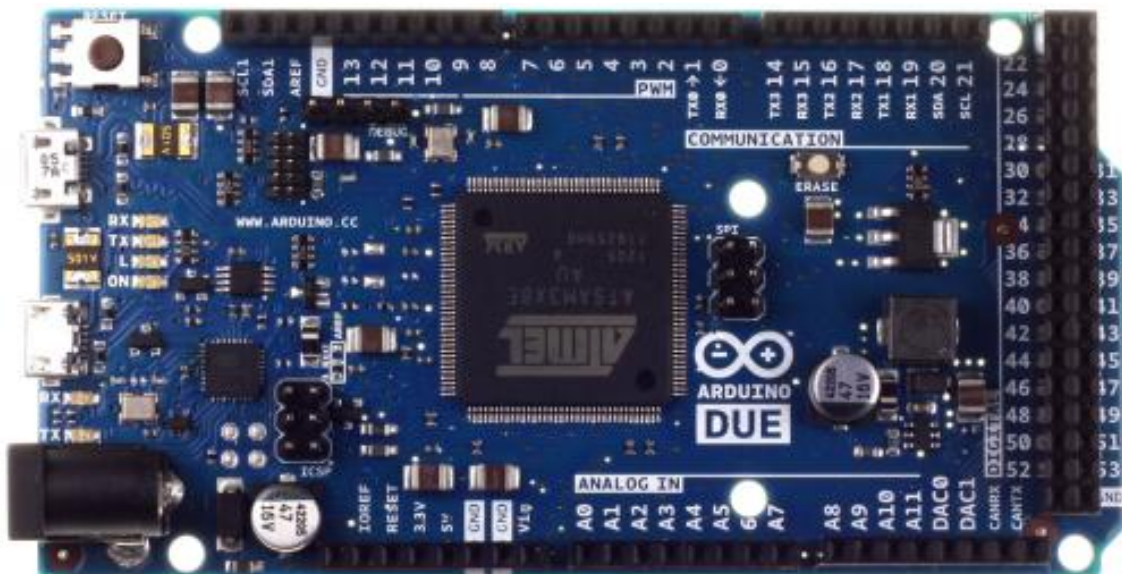
7.9 Výber vhodnej riadiacej elektroniky, aplikácia navrhnutého riadenia

Pre realizáciu riadenia bola vyberaná elektronika z rodiny Arduino®. Jedná sa o open-source platformu, ktorá využíva svoj vlastný jazyk založený na frameworku Wiring. Týmto bola docielená rýchla a jednoduchá komunikácia mikrokontroléra s počítačom cez sériovú linku pomocou rozhrania USB.

Spočiatku bolo navrhnuté riadenie testované na vývojovom kite Arduino® Uno R3, s mikrokontrolérom ATmega 328P. Avšak kit sa pre tento tip riadenia ukázal ako nedostatočný. S rýchlosťou ADC prevodu niečo vyše 100 μ s a všetkými požadovanými floatovými operáciami na ňom bolo možné dosiahnuť frekvenciu okolo 2 kHz, čo je pre túto aplikáciu nedostatočné.

Pokročilejší kit Arduino® Due (s mikrokontrolérom ATSAM3X8E) sa ukázal ako dostatočný, s rýchlosťou ADC prevodu do 5 μ s a inými operáciami trval výpočet algoritmu (pre napäťovú schému) približne 50 μ s, čo viedlo k frekvencii pod 20 kHz.

Pre riadenie elektromagnetov prostredníctvom PWM bol použitý kit Arduino® Motor Shield R3. Jedná sa o dvojkánalový menič s čipom L298, s maximálnym prúdom 2 A na jeden kanál (na základe čoho bol volený max. prúd 1,6 A). Dvomi kanálmi tohto kitu, tak bolo možné riadiť obidva elektromagnety. Kit má tiež zabudované snímače prúdu pre obidva kanály privedené priamo na vstup ADC prevodníka mikrokontroléra. V rámci práce bol motor kit doplnený o hliníkový chladič pre čip L298, ktorý sa pri zvolených prúdoch značne prehrieval. Všetky schémy použitých kitov sú zdokumentované v prílohe F.

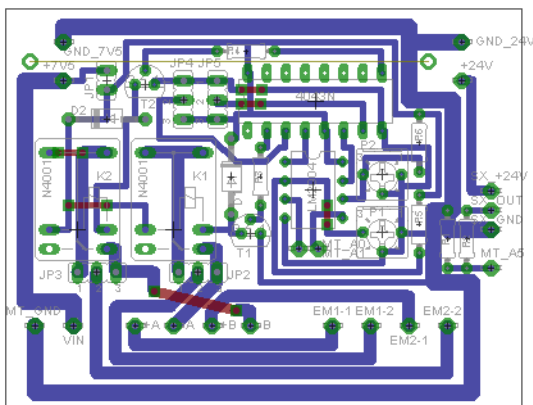


Obrázok 7.15: Náhľad na hlavný riadiaci kit s mikrokontrolérom ATSAM3X8E [42]

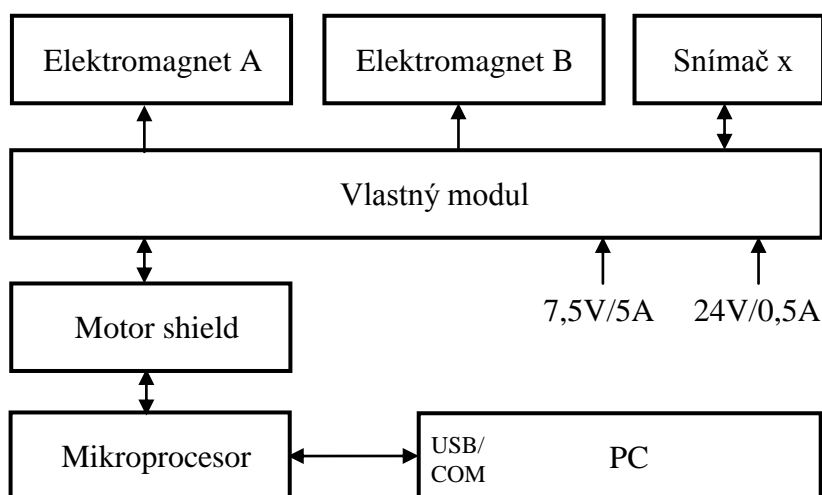
Pin	Popis, prepojenie s L298
A0	analogový prenos snímača prúdu elektromagnetu A
A1	analogový prenos snímača prúdu elektromagnetu B
A5	analogový prenos snímača vzdialenosti x
3 – PWMA	enable/povolenie pwm A (ENA pre L298)
11 – PWMB	enable/povolenie pwm B (ENB pre L298)
12 – DIRA	smer pre výstup A (IN1 pre L298)
13 – DIRB	smer pre výstup B (IN3 pre L298)
9 – BRAKEA	brzda A (IN2 = DIRA XNOR BRAKEA)
8 – BRAKEB	brzda B (IN4 = DIRB XNOR BRAKEB)

Tabuľka 7.3: Piny využívané pre prepojenie motor shieldu s riadiacim kitom a ich prepojenie s čipom L298

Pre prepojenie elektromagnetov a snímača vzdialenosti so zdrojmi napätia zo siete a kitom bola realizovaná vlastná doska (modul). Vytvorený vlastný modul zahŕňa aj prúdovú ochranu, ktorá vypína relé pri prekročení 1,8 A. Cez dané relé je potom prepojený elektromagnet k motor shieldu. Hodnoty aktuálneho prúdu sú pritom čerpané zo samotného snímača kitu a privádzané na komparátor, ktorý vypína/zapína set/reset obvod, takže po prekročení prúdu zostáva obvod trvale rozpojený. Až kým nie je opäť obnovený prepnutím jednotlivých jumperov. Týmto bola zabezpečená ochrana motor shieldu, hlavne pre testovacie účely. Navrhnutá schéma pre vlastný modul je zobrazená v prílohe F. Obrázok 7.17 znázorňuje výsledné blokové zapojenie potrebnej elektroniky.



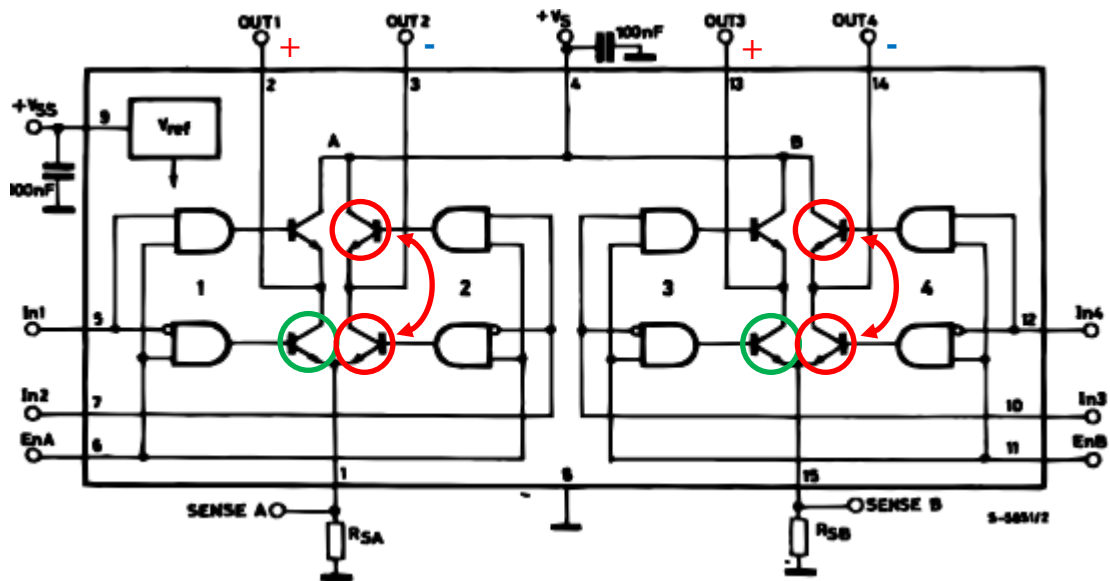
Obrázok 7.16: Navrhnutá a realizovaná doska vlastného modulu



Obrázok 7.17: Bloková schéma zapojenia elektroniky pre realizáciu modelu

7.9.1 Realizácia a meranie PWM

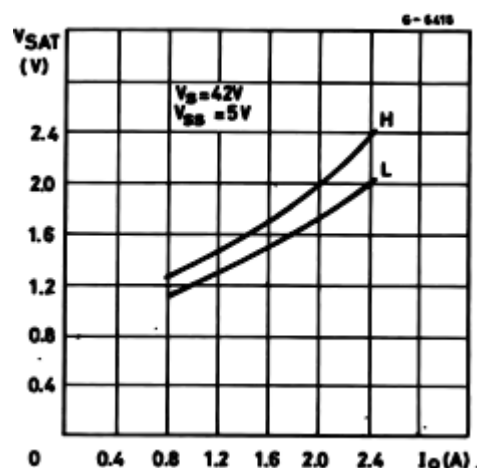
Pre stabilizáciu elektromagnetov bol pôvodne štvorkvadrantový menič (čip L298) využitý ako dvojkvadrantový, pretože bude postačovať iba prúd v jednom (zápornom) smere. To povedie (viď Obrázok 7.18) k tomu, že jeden tranzistor bude neustále otvorený (zelené kruhy Obrázok 7.18) a striedavo sa bude na výstup pripájať záporné alebo nulové napätie na základe otvárania/zatvárania tranzistorov (červené kruhy Obrázok 7.18). Je vidieť, že je elektronicky ošetrené to, aby len jeden z týchto tranzistorov bol otvorený, inak by došlo k skratu. Pre nulové napätie teda bude využitý mód fast motor stop. Je teda zrejmé, že piny ENA, ENB musia byť neustále v log. 1, piny IN1, IN3 v log. 0 a elektromagnety budú riadené pinmi EN2, EN4 (BRAKEA, BRAKEB), teda PWM bude prebiehať na 8. a 9. pine mikrokontroléra (Tabuľka 7.3).



Obrázok 7.18: Bloková schéma štvokvadrantového meniča L298, riadenie PWM [43]

Pre realizáciu PWM v mikrokontroléri bola nájdená, upravená a doplnená (pomocou datasheetu) knižnica, ktorej obsah je zobrazený v prílohe G. Bola doplnená predovšetkým o funkciu, ktorá čaká na prerušenie z PWM, čo sa využíva v riadiacej slučke a je tým dosiahnuté, že algoritmus sa vykoná presne x -krát za sekundu na základe zvolenej frekvencie, čo je dôležité hlavne pre presnejší výpočet integračnej a derivačnej zložky.

PWM bola pôvodne v mikrokontroléri riešená s rozlíšením 16-bitov, lenže sa ukázalo, že sa mapuje do základného 8-bitového rozlíšenia, takže bola prepísaná do základného tvaru.



Obrázok 7.19: Saturačné účinky tranzistorov meniča L298 [43]

Pre presnejšiu realizáciu bol menič ešte premeraný v celom rozsahu a to hlavne z dôvodu vzniku saturačných účinkov na tranzistoroch (Obrázok 7.19). Tieto saturačné účinky povedú práve k nie celkom lineárnej závislosti nastavenej hodnoty PWM a výsledného výstupného napätia. Čo by inak mohlo spôsobiť kmitanie vozíku.

Hodnoty prúdov uvedené v nasledujúcej tabuľke boli získané zo snímača prúdu na motor shielde a hodnoty napätí z klasického multimetra, ktorý meria strednú hodnotu. Sivo označený riadok predstavuje približný pracovný bod pre vozík.

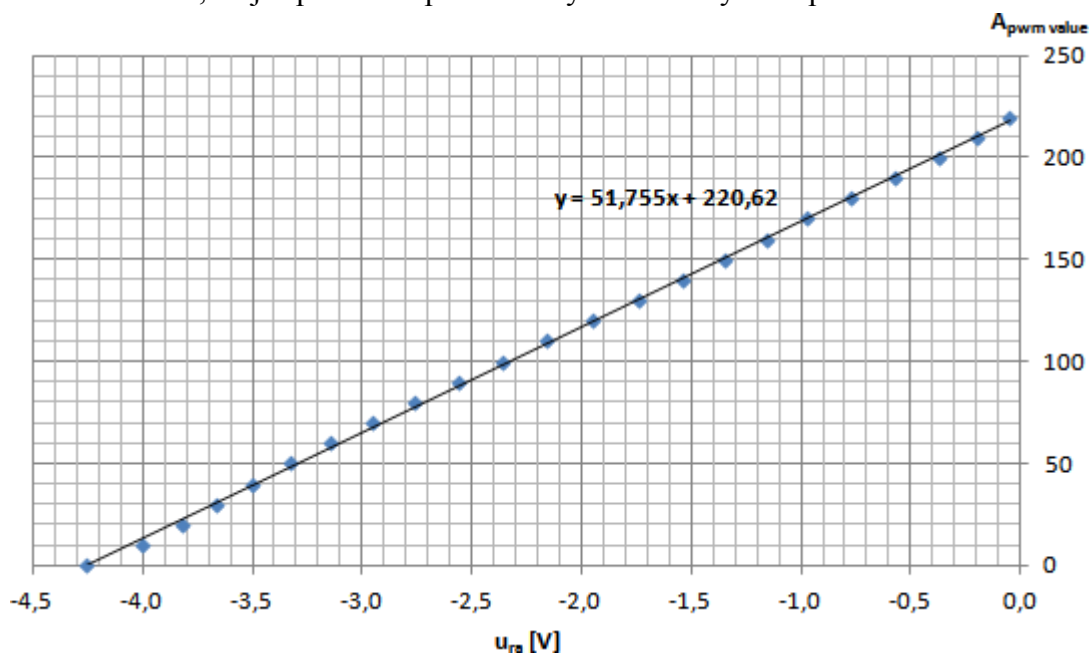
$A_{\text{pwm value}}$	$B_{\text{pwm value}}$	i_A [A]	i_B [A]	u_A [V]	u_B [V]
0	230	-1,640	-0,050	-4,290	-0,004
0	225	-1,640	-0,050	-4,280	-0,010
0	220	-1,620	-0,050	-4,260	-0,040
10	210	-1,510	-0,080	-4,000	-0,200
20	200	-1,430	-0,145	-3,820	-0,393
30	190	-1,350	-0,220	-3,660	-0,587
40	180	-1,290	-0,300	-3,500	-0,782
50	170	-1,230	-0,365	-3,330	-0,947
60	160	-1,155	-0,445	-3,140	-1,155
70	150	-1,080	-0,520	-2,950	-1,353
80	140	-1,005	-0,595	-2,760	-1,546
90	130	-0,935	-0,670	-2,560	-1,737
100	120	-0,860	-0,740	-2,360	-1,921
110	110	-0,790	-0,810	-2,160	-2,100
120	100	-0,710	-0,885	-1,946	-2,290
130	90	-0,640	-0,955	-1,740	-2,480
140	80	-0,560	-1,030	-1,540	-2,670
150	70	-0,490	-1,100	-1,347	-2,850
160	60	-0,420	-1,165	-1,160	-3,030
170	50	-0,350	-1,230	-0,972	-3,200
180	40	-0,285	-1,290	-0,770	-3,380
190	30	-0,210	-1,340	-0,572	-3,575
200	20	-0,130	-1,410	-0,370	-3,740
210	10	-0,080	-1,480	-0,195	-3,910
220	0	-0,060	-1,590	-0,048	-4,160
225	0	-0,050	-1,600	-0,015	-4,160
230	0	-0,050	-1,610	-0,006	-4,170

Tabuľka 7.4: Premeranie meniča L298 na základe vstupných hodnôt PWM

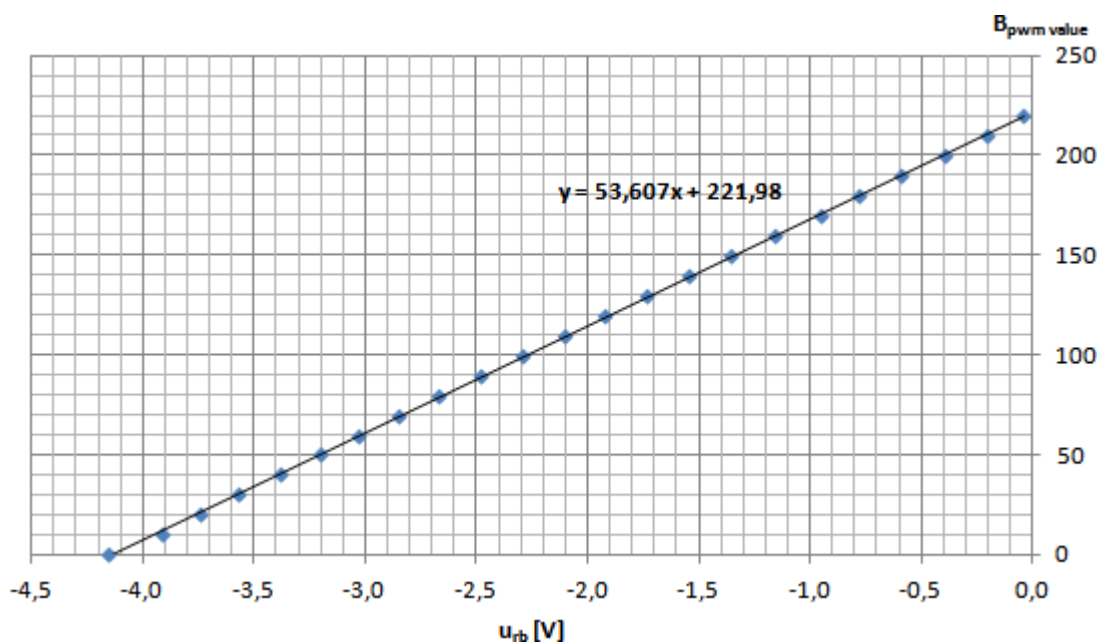
Menič bol napájaný 7,5 V zdrojom, čo je pomerne malé napätie. Ako záťaž boli použité už príslušne navrhnuté elektromagnety A/B. Vidieť teda (Tabuľka 7.4), že

PWM nie je úplne lineárna. Pôvodne by sa nulové napätie očakávalo pri hodnote 255 digit. PWM, lenže nastáva už pomaly pri hodnote 225.

Keďže výstupom regulátora v mikrokontroléri je požadovaná hodnota napätia, na základe nameraných údajov boli zostavené prevodné charakteristiky požadovaného napätia na príslušnú digitálnu hodnotu PWM pre oba elektromagnety. Je vidieť, že sú mierne rozdielne, čo je spôsobené predovšetkým rozdielnymi odpormi ich vinutia.



Obrázok 7.20: Prevod požadovaného napätia na digitálnu hodnotu PWM pre kanál A



Obrázok 7.21: Prevod požadovaného napätia na digitálnu hodnotu PWM pre kanál B

7.10 Návrh filtrov a výsledné prenosy, výsledný regulátor, anti-windup

7.10.1 Návrh filtrov a výsledné prenosy

Po realizácii samotného vozíka, odladení PWM a aplikácii regulátora (zatiaľ obecného) bolo nutné stanoviť vhodné filtrovanie. Spočiatku bola realizovaná iba filtrácia derivačnej zložky PID, bez ktorej by model nefungoval, pretože práve derivačná zložka vykazovala skreslené výsledky, v porovnaní so simuláciou (nadobúdala 10-krát väčšie hodnoty). Ako vhodnejšie sa ukázalo odstrániť filtráciu derivačnej zložky a filtrovať samotné dáta rovno z ADC prevodníka softvérovo v mikrokontroléri, aj napriek tomu, že to viedlo k dlhšiemu výpočtu. Výhodou softvérového filtrovania je, že je do neho zahrnutý šum snímača aj ADC prevodníka. Na rozdiel od napr. klasického RC filtra, ktorý by odfiltroval iba samotný šum snímača.

Na základe meraní bola teda zvolená časová konštanta pre filtrovanie snímača vzdialenosti $T_{fx} = 1$ ms. Filtrovanie snímača x sa ukázalo ako najdôležitejšie, pri snímači prúdu bol šum podstatne menší, zvolená časová konštanta $T_{fi} = 0,5$ ms.

Momentálne sú k dispozícii všetky údaje pre zápis výsledného prenosu napätia na prúd elektromagnetu, ktorý upravuje prenos 7.9:

$$F_{Sui}(p) = \frac{I(p)}{U(p)} = \frac{1}{\frac{L_0}{x_0} p + R_{cu}} \cdot \frac{1}{T_{fi} p + 1} \quad 7.22$$

A výsledný prenos prúdu na vzdialenosť pre návrh regulátora bude mať tvar (úprava prenosu 7.12):

$$F_{Sik}(p) = \frac{X(p)}{I(p)} = \frac{K_1}{p^2 - K_2} \cdot \frac{1}{T_{sx} p + 1} \cdot \frac{1}{T_{fx} p + 1} \quad 7.23$$

Kde T_{sx} predstavuje časovú konštantu odvodenú z frekvencie snímača f_{sx} :

$$T_{sx} = \frac{1}{2\pi \cdot f_{sx}} \quad 7.24$$

V uvedených prenosoch je uvažované jednotkové zosilnenie, pretože floatový mikrokontrolér umožňuje všetko prepočítavať na príslušné hodnoty. Napríklad pre snímač vzdialenosti platí prevod napätia 2,85 V pri 0,006 m. Uvažovaný je lineárny

priebeh napätia a vzdialenosti. Pre ADC prevod (12-bit) mikrokontroléra platí známy vzťah [44]:

$$ADC = \frac{V_{IN} \cdot 4096}{V_{REF}} \quad 7.25$$

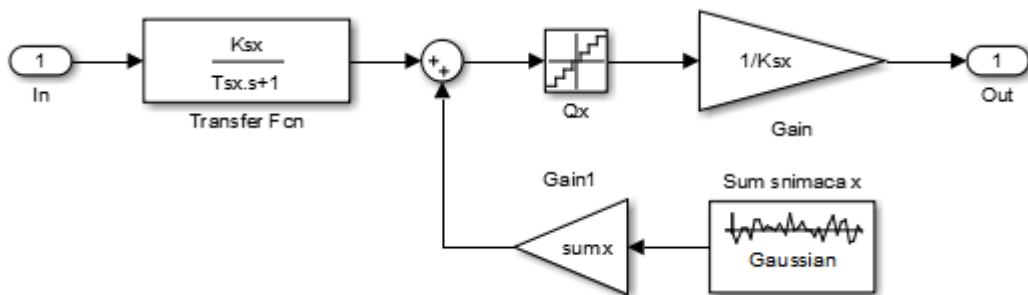
Pre snímač vzdialenosti ako bolo uvedené, teda bude platiť:

$$V_{IN} = 475 \cdot x \Rightarrow x = \frac{ADC \cdot V_{REF}}{4096 \cdot 475} = \frac{ADC \cdot 3,3}{4096 \cdot 475} = ADC \cdot 1,7 \cdot 10^{-6} \quad 7.26$$

Tým je získavaná presná vzdialenosť zo vstupného napätia ADC. Obdobne pre snímač prúdu uvádza výrobca 1,65 V pri prúde 1 A. Teda je získaná hodnota prúdu:

$$V_{IN} = 1,65 \cdot i \Rightarrow i = \frac{ADC \cdot V_{REF}}{4096 \cdot 1,65} = \frac{ADC \cdot 3,3}{4096 \cdot 1,65} = ADC \cdot 4,88 \cdot 10^{-4} \quad 7.27$$

Použitie uvedených konštánt je možné vidieť v prílohe H, kde sú vložené komplet algoritmy nahrávané do mikrokontroléra.



Obrázok 7.22: Uvažovaný model snímača vzdialenosti v subsystéme bez filtra

Obrázok 7.22 znázorňuje simulované správanie snímača vzdialenosti (viď schémy v prílohe E). Vzdialenosť je prepočítavaná na napätie a do sústavy je pridaný šum, približne na základe odmeraných hodnôt v mikrokontroléri. Napätie je opäť potom prepočítané späť na vzdialenosť, čo vedie celkovo na uvažovaný jednotkový prenos. Vzorkovanie Q_x je dané mikrokontrolérom, v tomto prípade 3,3V/4096, keďže je použité 12-bitové rozlíšenie.

Nasledujúca tabuľka zobrazuje pre prehľadnosť všetky konštanty použité pri simulácii a riadení ohľadom snímača vzdialenosti a prúdu.

Symbol	Hodnota	Vysvetlenie
f_{sx}	1 kHz	frekvencia snímača vzdialenosti
K_{sx}	475 V/m	prevod vzdialenosti na napätie snímača vzdialenosti
T_{sx}	$1,59 \cdot 10^{-4}$ s	časová konštanta vychádzajúca z frekvencie
sum_x	$1 \cdot 10^{-3}$	zosilnenie pre nastavenie šumu snímača vzdialenosti
Q_x	$8,06 \cdot 10^{-4}$ V	vzorkovanie napätia na ADC pre snímač vzdialenosti
T_{fx}	$1 \cdot 10^{-3}$ s	filtračná konštanta snímača vzdialenosti
Q_i	$4,88 \cdot 10^{-4}$ A	vzorkovanie snímača prúdu mikrokontrolérom
T_{fi}	$5 \cdot 10^{-4}$ s	filtračná konštanta snímača prúdu
Q_u	$19,3 \cdot 10^{-3}$ V	vzorkovanie požadovaného napätia (8-bitová PWM)

Tabuľka 7.5: Konštanty použité pri simulácii jednotlivých snímačov

7.10.2 Návrh výsledného kaskádového regulátora

Obecný regulátor bol navrhnutý už skôr, ako je v práci chronologicky popísané (kapitola 7.6). Teraz sú však k dispozícii výsledné prenosy vrátane filtrov na základe čoho bol prevedený návrh výsledného kaskádového regulátora. Prvý krok predstavuje návrh PI regulátora pre prúdovú slučku (prenos 7.22) v *sisotoole*:

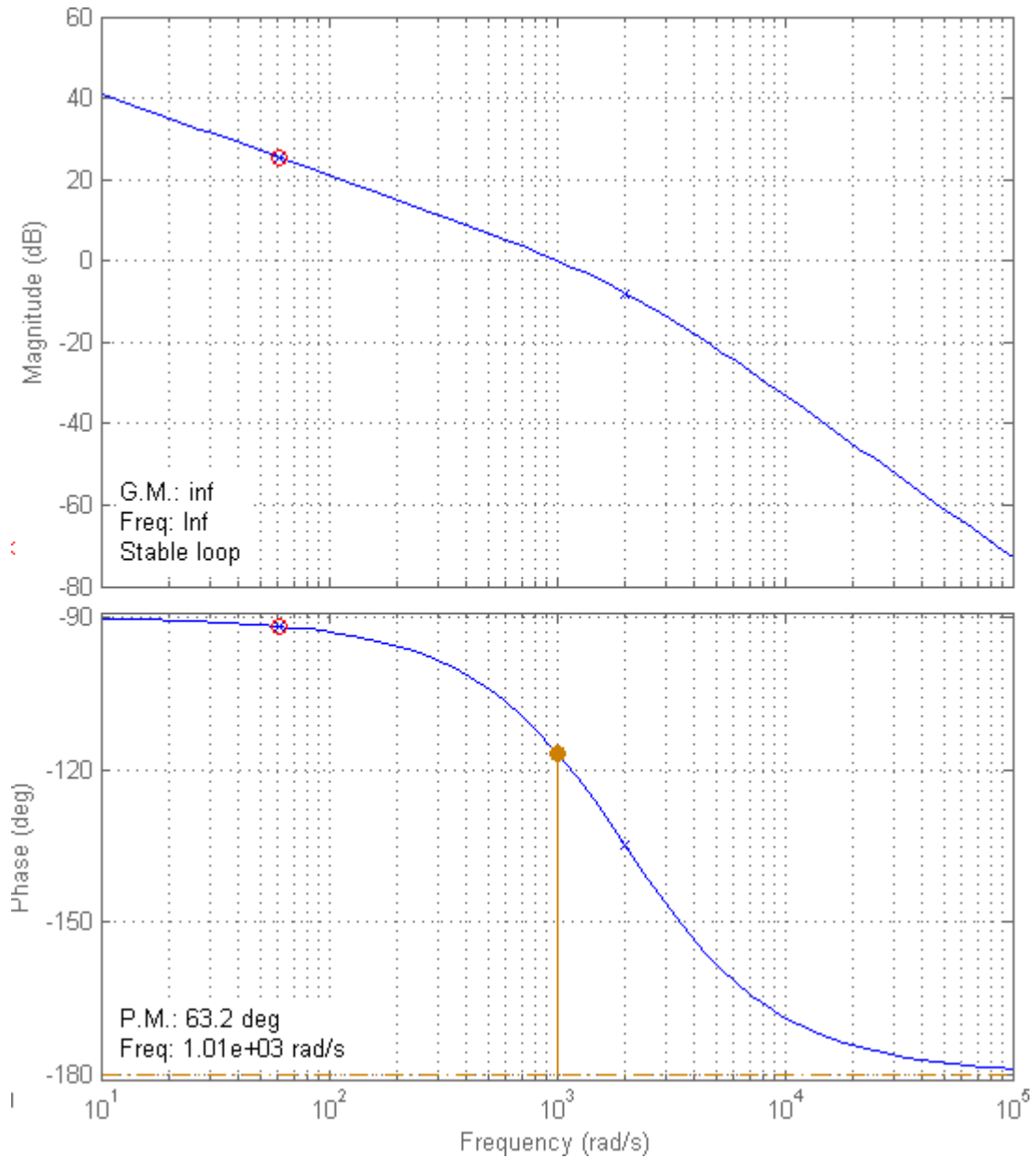
$$F_{Rui}(p) = \frac{K_{ri} \cdot (T_{ri}p + 1)}{p} = \frac{3000 \cdot (16,4 \cdot 10^{-3} p + 1)}{p} \quad 7.28$$

Časová konštanta T_{ri} je volená totožne s konštantou T_L v rovnici 7.14 (pre eliminovanie najväčšej časovej konštanty). Zosilnenie regulátora je volené prihliadajúc na zachovanie rýchlosti prechodového deja.

Ďalej bol získaný prenos F_{Oix} podľa rovníc 7.17, 7.18 a 7.19 v spomínanom obecnom návrhu regulátora (bol uvažovaný výsledný prenos 7.23 medzi prúdom a vzdialenosťou). Na prenos bol potom navrhnutý PID regulátor a bol vylepšený pomocou funkcionality *Automated Tuning* na robustnosť. Výsledný navrhnutý regulátor má tvar:

$$F_{Rix}(p) = \frac{K_{rx} \cdot (T_{rx1}p + 1) \cdot (T_{rx2}p + 1)}{p \cdot (E_x p + 1)} = \frac{1587 \cdot (0,032p + 1) \cdot (0,83p + 1)}{p \cdot (6,4 \cdot 10^{-5} p + 1)} \quad 7.29$$

Prenosy v uvedených tvaroch sú však použité iba v prílohe D pre porovnanie nelineárneho a lineárneho modelu elektromagnetu. Pre ich použitie v praxi boli odvodené tvary s proporcionálnou, integračnou a derivačnou zložkou.

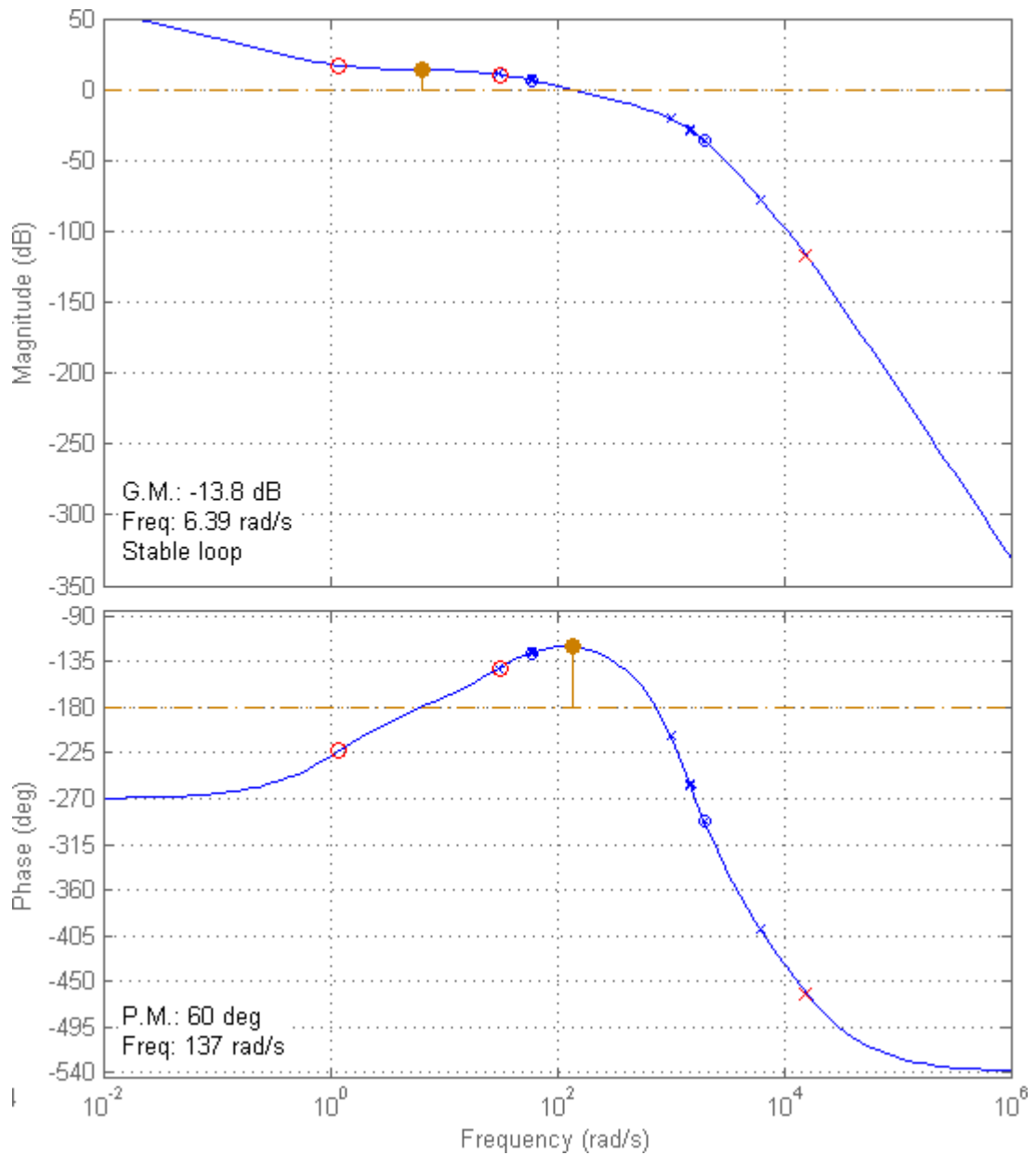


Obrázok 7.23: Frekvenčná a fázová charakteristika navrhnutého PI regulátora pre prúdovú slučku

Výsledný použitý regulátor prúdu vyjadrený pomocou jednotlivých zložiek bude mať nasledujúci tvar:

$$F_{Rui}(p) = K_{ri} \cdot T_{ri} + K_{ri} \cdot \frac{1}{p} = K_{pi} + K_{ii} \cdot \frac{1}{p} = 49,32 + 3000 \cdot \frac{1}{p} \quad 7.30$$

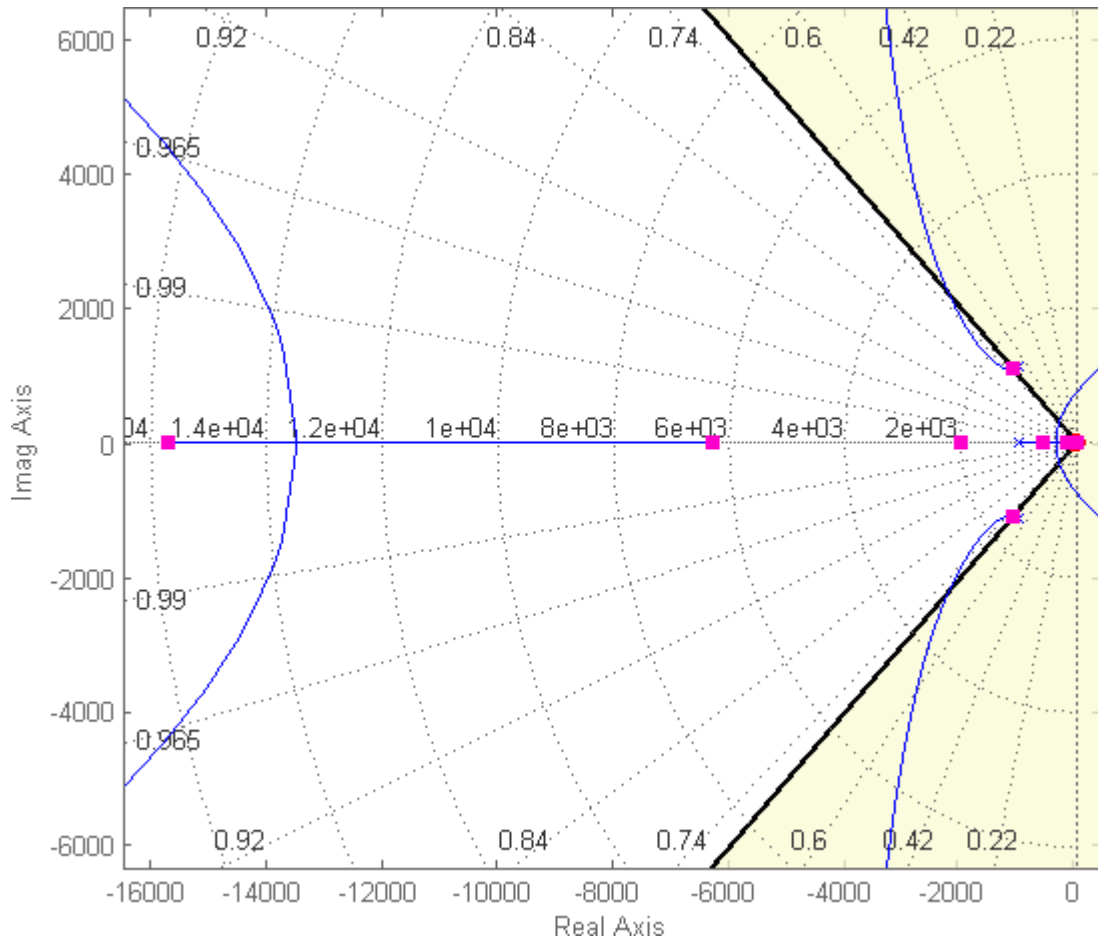
Regulátor v tomto tvare je potom nahrávaný do mikrokontroléra (príloha H).



Obrázok 7.24: Frekvenčná a fázová charakteristika výsledného PID regulátora vzdialenosti

Vyjadrenie výsledného PID regulátora pomocou jednotlivých zložiek (bez úvahy realizačnej konštanty):

$$\begin{aligned}
 F_{Rix}(p) &= K_{rx} \cdot (T_{rx1} + T_{rx2}) + K_{rx} \cdot T_{rx1} \cdot T_{rx2} p + K_{rx} \cdot \frac{1}{p} = K_{px} + K_{dx} p + K_{ix} \cdot \frac{1}{p} \quad 7.31 \\
 &= 1368 + 42,15 p + 1587 \cdot \frac{1}{p}
 \end{aligned}$$



Obrázok 7.25: Koreňový hodograf výsledného PID regulátora s tlmením $\zeta = 0,707$

7.10.3 Anti-windup

Na základe navrhnutých regulátorov boli v Simulinku prevedené experimenty, pri ktorých sa ukázalo, že približná veľkosť rušivej sily, ktorú je vozík schopný ustáť a udržať sa v pracovnom bode, bola rovná približne do 5 N. Po prekročení tejto sily je vozík pritiažený k elektromagnetu v smere rušivej sily. Avšak tu vznikol problém pri opätovnom pustení vozíka sa vozík nevyreguloval späť do pracovného bodu. Vznikajúce problémy boli spôsobené integračnou zložkou.

Ďalší problém vznikol pri menších vzdialenostiach, kde regulátor prestal strácať na funkčnosti, pretože bol navrhnutý pre pracovný bod. Pri menších vzdialenostiach už vznikali príliš veľké rozdiely medzi navrhnutým pracovným bodom a nelineárnym elektromagnetom.

Pre riešenie týchto problémov boli stanovené dva hraničné stavy, do ktorých keď sa elektromagnet dostane, nastane reset integrátorov, čím sa zabezpečí, že nebudú integrovať mimo rozsah. A požadované napätie pre elektromagnety bude pevne

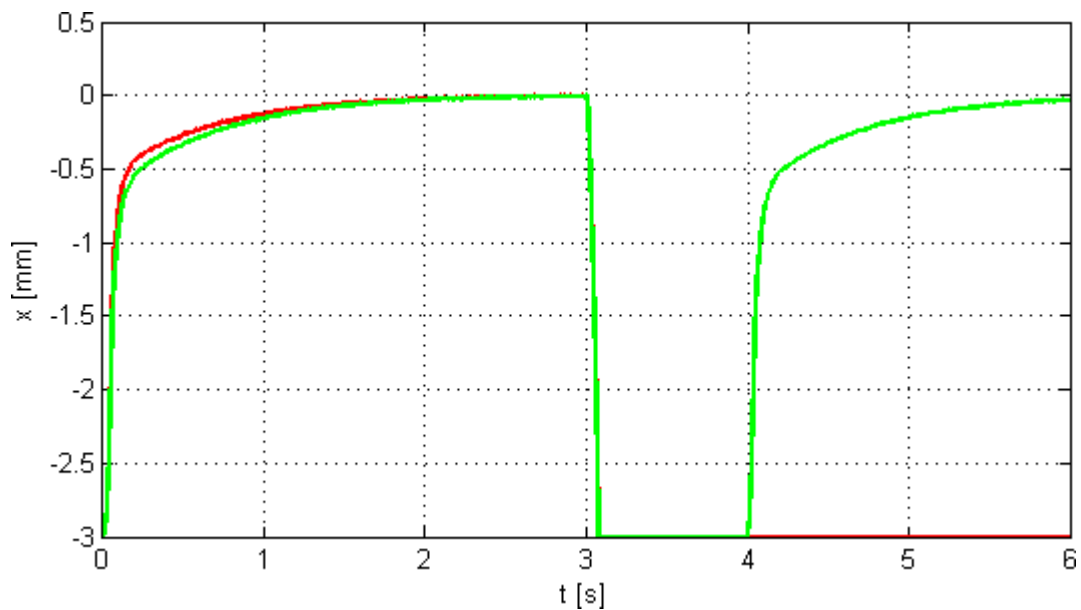
nastavené, tak aby pôsobilo proti sile, ktorá ťahá vozík k referenčnej koľajnici. Túto úvahu je možné zapísať do troch intervalov:

$$x > x_{bm} \quad - > \quad u_{ra} = U_{max} \quad u_{rb} = 0$$

$$x_{bm} \geq x \geq x_{b0} \quad \text{navrhnutý regulátor} \quad 7.32$$

$$x < x_{b0} \quad - > \quad u_{ra} = 0 \quad u_{rb} = U_{max}$$

Kde x predstavuje aktuálnu vzdialenosť zo snímača vzdialenosti, x_{bm} a x_{b0} sú hraničné stavy volené ako $\pm 0,5$ mm od konečných vzdialeností. Teda $x_{bm} = 5,5$ mm a $x_{b0} = 0,5$ mm. A u_{ra} , u_{rb} predstavujú jednotlivé žiadané napätia pre elektromagnety vystupujúce z regulátora. Ak sa ocitne vozík v hraničných stavoch sumačné zložky integrátorov sú nulované, čím je dosiahnutý okamžitý opätovný štart regulátorov. Táto úvaha je vyobrazená v napät'ovej schéme v prílohe E (prúdová schéma ju kvôli prehľadnosti nezahrňuje). V oboch algoritmoch je aplikovaná.



Obrázok 7.26: Porovnanie regulácie bez anti-windup (červená) a s anti-windup (zelená)

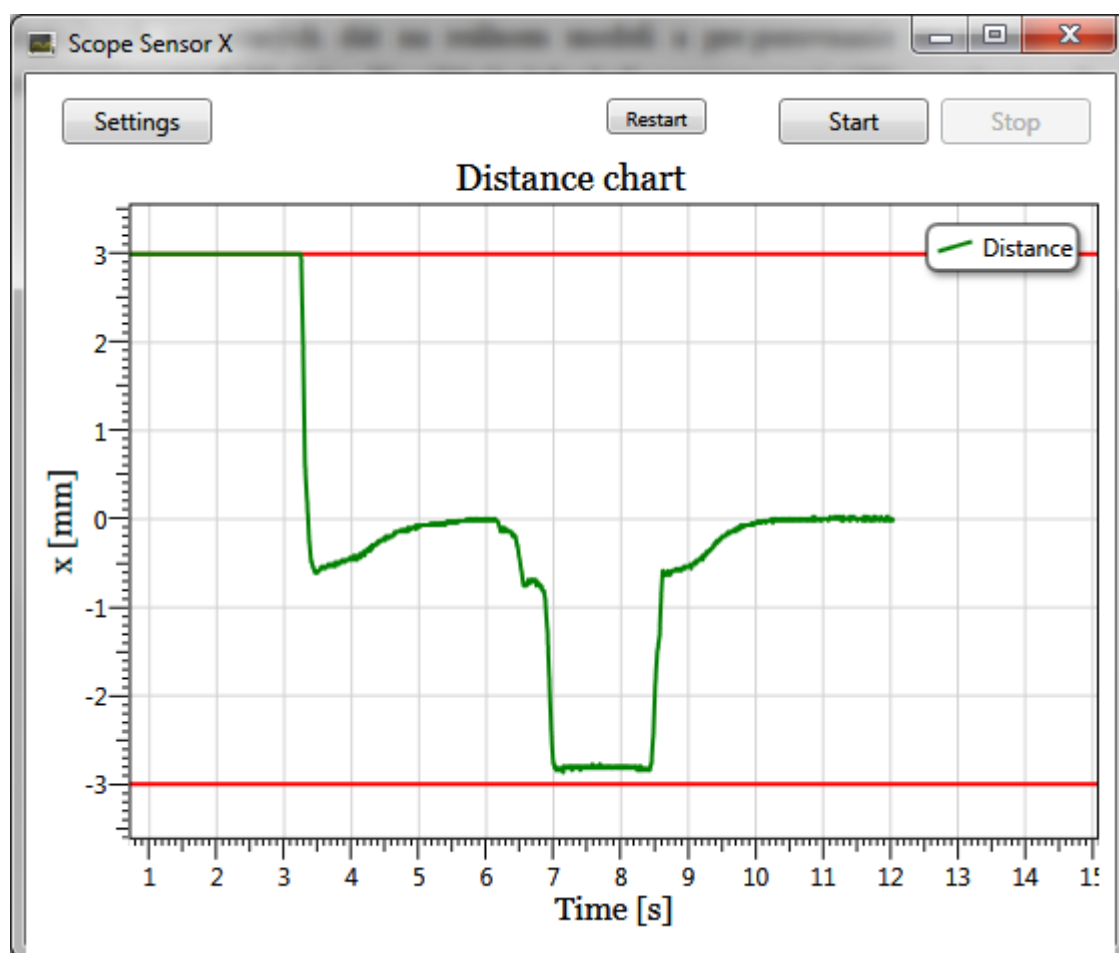
Obrázok 7.26 znázorňuje rozdiely regulovanej vzdialenosti bez a s navrhnutým anti-windupom, pričom rušivá sila ($F_r = 5,75$ N) pôsobí neprerušovane medzi 3. a 4. sekundou.

Na záver boli navrhnuté jednotlivé frekvencie, na ktorých pobeží aplikácia, na základe dĺžky trvania výpočtu jedného cyklu (pre napät'ovú schému niečo vyše 50 μ s).

Pre napäťovú schému teda bola zvolená frekvencia $f_{ru} = 16,47$ kHz, prúdová schéma obsahovala zložitejší výpočet, takže sa muselo ísť s frekvenciou nižšie $f_{ri} = 12,20$ kHz.

7.11 Porovnanie simulovaných a reálnych hodnôt, zhodnotenie regulácie

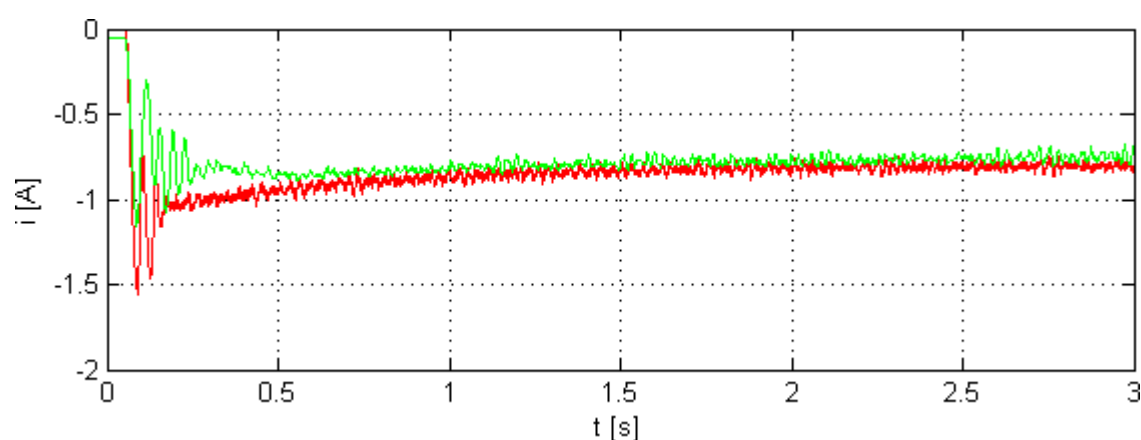
Vývojový kit Arduino® Uno s mikrokontrolérom ATmega 328p, ktorý sa ukázal ako nedostatočný pre riadiacu schému, bol využitý pre priame porovnanie simulovaných hodnôt s realitou. Obsahoval jednoduchý program (príloha H), ktorý číta napätie na vstupe 10-bitového ADC a prepočítava ho vhodnou konštantou do 8-bitovej podoby, ktorú potom neustále vysiela po sériovej linke (o rýchlosti 115 200 bps). Týmto je možné získať takmer 9 000 nameraných vzoriek napätia za sekundu.



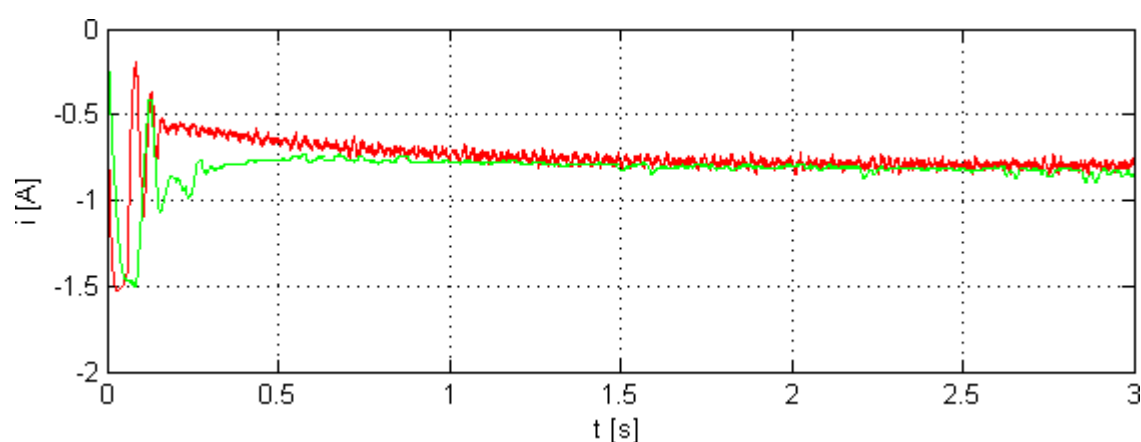
Obrázok 7.27: Náhľad na okno realizovaného programu pre meranie a aktuálne vyhodnocovanie vzdialenosti a prúdu

Na druhej strane bol vytvorený v rámci práce jednoduchý program v programovacom jazyku C# .NET, ktorý vysielané dáta z mikrokontroléra zachytáva a zobrazuje ich do grafu. Pre dynamické vykresľovanie grafu bola použitá knižnica Dynamic Data Display.

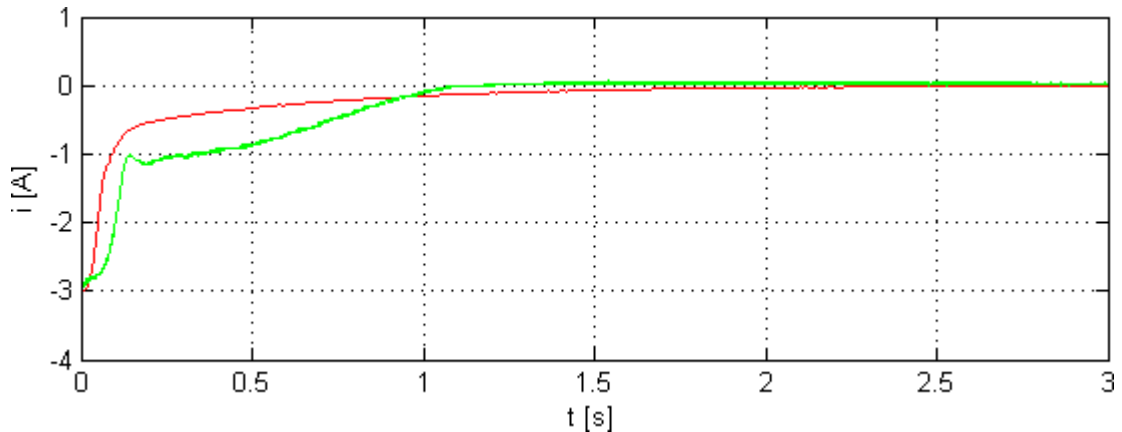
Program bol pôvodne vytvorený pre snímanie vzdialenosti x , neskôr bola vytvorená kópia a bol upravený aj pre zakresľovanie aktuálneho prúdu do grafu. Do programov bola pridaná funkcionálna, ktorá po skončení merania uloží všetky namerané dáta do textového súboru. Tieto textové súbory boli využité pre zobrazenie skutočných nameraných dát na reálnom modeli a pre porovnanie so simulovanými priamo v prostredí Matlabu. Na základe čoho boli vygenerované nižšie uvedené grafy.



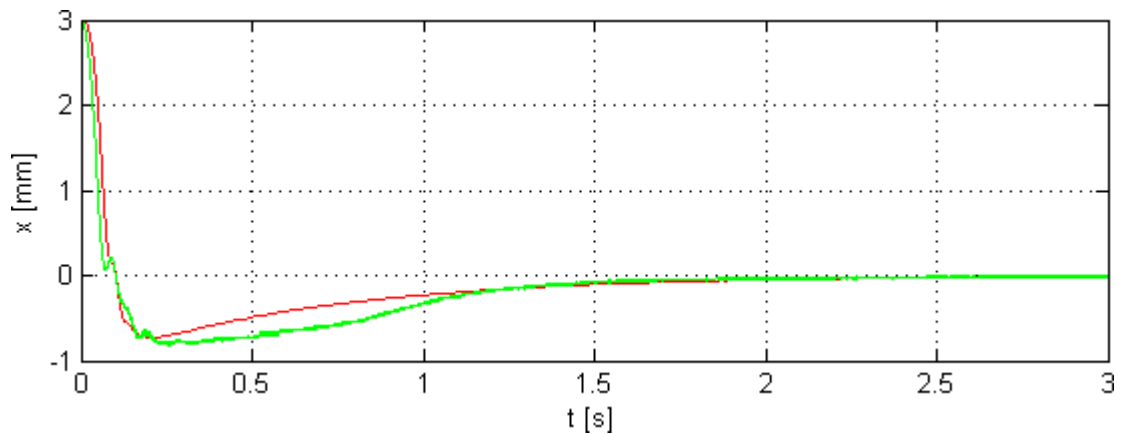
Obrázok 7.28: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu A (prúdová schéma)



Obrázok 7.29: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu B (prúdová schéma)



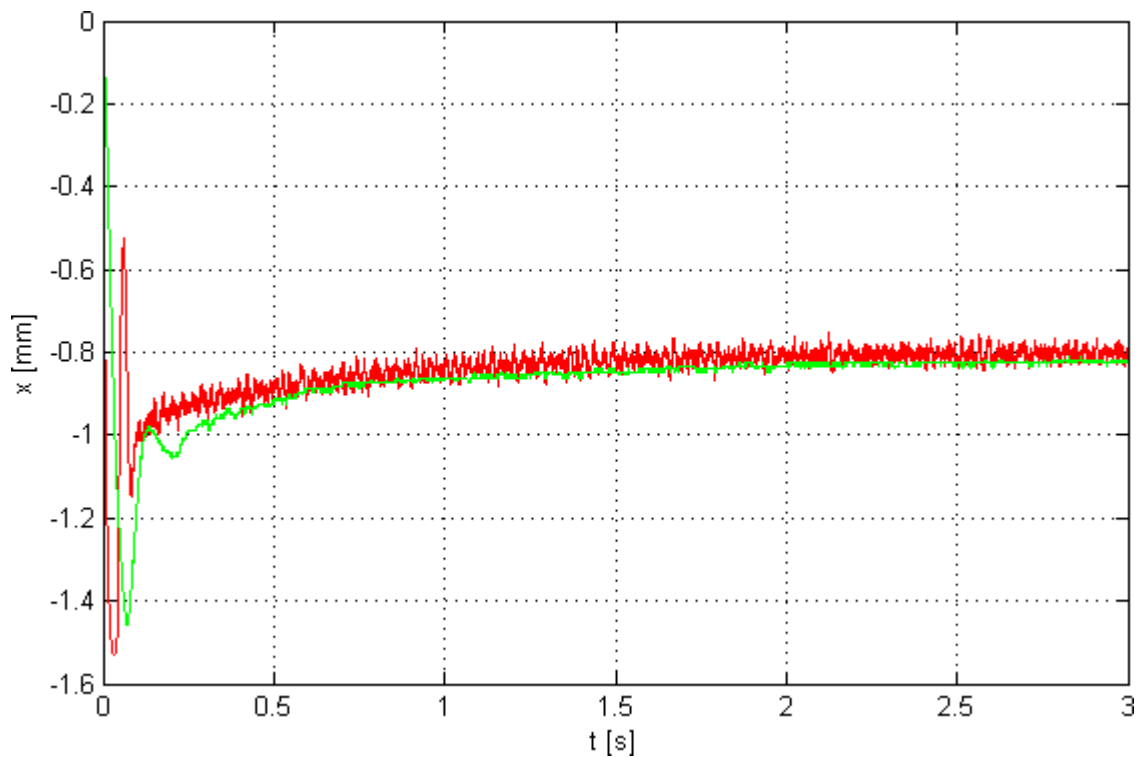
Obrázok 7.30: Prechodová charakteristika vzdialenosti pri $x_p = 6 \text{ mm}$ (napäťová sch.)



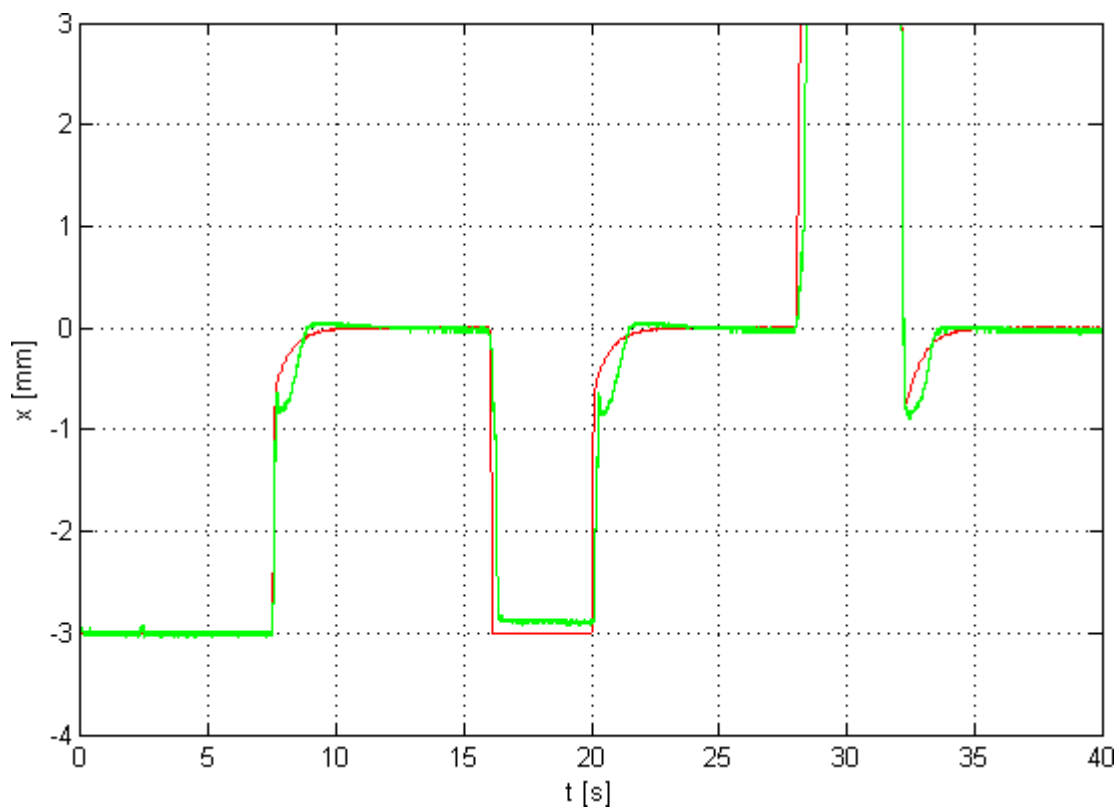
Obrázok 7.31: Prechodová charakteristika vzdialenosti pri $x_p = 0 \text{ mm}$ (napäťová sch.)

V uvedených grafických závislostiach znázorňuje červená farba simulované priebehy a zelená priebehy z reálneho modelu. Pri samotnom meraní boli dáta prenášané do ADC prevodníka prostredníctvom RC filtra.

Celkovo na základe získaných charakteristík je možné reguláciu považovať za úspešne zrealizovanú. Obrázok 7.33 znázorňuje priebeh v časovom okamžiku 40 sekúnd, kde pôsobili väčšie rušivé sily v oboch smeroch a následné okamžité vyregulovanie do pracovného bodu. Možno miestami bádať menšie oneskorenie reálneho priebehu v porovnaní so simulovaným, čo je samozrejme spôsobené predovšetkým statickým a dynamickým trením, ktoré nebolo do matematického modelu zahrnuté.



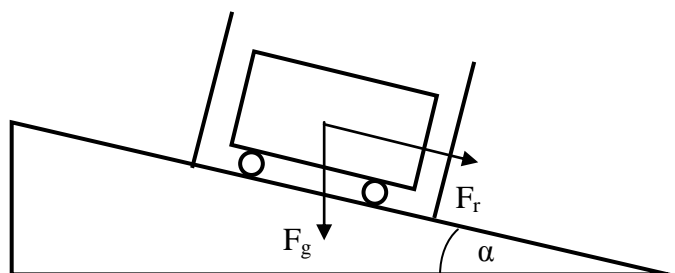
Obrázok 7.32: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu A (napäťová schéma)



Obrázok 7.33: Porovnanie reálneho správania vozíku so simuláciou za 40 s

Vozík bol navrhnutý pre istú maximálnu rušivú silu (približne 4,75 N v simulácii). Pôsobenie rušivej sily je možné pri reálnom modeli simulovať nakláňaním roviny. Rušivá sila, ktorá potom pôsobí na vozík je definovaná ako [45]:

$$F_r = F_g \cdot \sin \alpha \quad 7.33$$



Obrázok 7.34: Aplikácia vozíka na naklonenej rovine

Na základe zmeranej protihľej prepony v realite je možné stanoviť približný uhol α a z neho určiť približnú rušivú silu. Gravitačnú silu je možné pomocou hmotnosti číselne vyjadriť ako $F_g = 16,2$ N. Pri reálnom meraní strácal vozík stabilitu pri náklone niečo okolo $\alpha = 16^\circ$, čo približne predstavuje rušivú silu do 4,5 N. Teda skutočná rušivá sila je samozrejme o niečo menšia ako simulovaná, kvôli rozdielom medzi reálnymi a matematickými modelmi elektromagnetov a samotným riadením.

8 ZÁVER A ZHODNOTENIE VÝSLEDKOV

Zadanie diplomovej práce v oblasti elektromagnetizmu bolo slobodne volené samotným autorom. Nakoľko bol stupeň zadania posunutý o úroveň vyššie, nebolo primárnym cieľom sa hnať za jeho stopercentným naplnením. Vyššie nastavené zadanie skôr malo motivačný charakter preskúmať oboje oblasti elektromagnetizmu a permanentných magnetov a ich vzťah k realizácii magnetickej levitácie.

Úspešným dokončením stabilizácie dvoch elektromagnetov sa z pohľadu autora podarilo splniť niekoľko cieľov, t.j. odladenie komunikácie počítača s externou elektronikou, získanie viac znalostí v oblasti čo najjednoduchšieho použitia mikrokontrolérov a samotné porovnanie simulovaného matematického modelu s reálnym správaním. Pre naplnenie týchto cieľov bola volená práve možno menej prebádaná oblasť elektromagnetizmu.

Prieskum v oblasti permanentných magnetov prebehol v rámci časových možností diplomovej práce. Na základe experimentov s feritovými magnetmi (F30, Tabuľka 2.2) a s neodymovými (N40, N50, Tabuľka 2.3) bola realizovaná magnetická dráha (príloha I). Pri realizácii však bola dráha tvorená pozliepaním magnetov k sebe rovnakými pólmi (aby vznikol rovnaký pól na povrchu), čo sa ukázalo ako nevhodné riešenie, pretože v tom prípade bolo magnetické pole magnetov značne oslabené. Celkovo sa realizácia levitácie pomocou permanentných magnetov ukázala ako nie príliš vhodná. Jej dokazovanie vyžaduje pokročilejší 3D simulačný nástroj, ktorého výpočet by viedol k zobrazeniu všetkých troch zložiek výslednej sily medzi odpudzujúcimi sa magnetmi. Do budúcnosti by mohlo byť určite prínosnejšie realizovať a otestovať Halbachovú sústavu permanentných magnetov.

Celkovo boli poznatky získané pri realizácii diplomovej práce prínosné. Samotná téma však ešte vedie na kopec zaujímavých aplikácií a otázok, akými spôsobmi môže byť levitácia realizovaná. Príkladom ďalších aplikácií môže byť postupné znižovanie vzduchovej medzery (ktorá bola volená pre začiatočnícku aplikáciu), trebárs na 1 mm, kde výsledný model zvládne podstatne väčšie rušivé sily. Ďalším príkladom môže byť pokročilejšia aplikácia levitačného (visiaceho) elektromagnetu, prípadne iné aplikácie uvažujúce aj pohyb pomocou lineárneho motora.

LITERATÚRA

- [1] Šanghajský vlak Maglev. [Online].
Dostupné z: <http://www.svazdopravy.cz/html/cz/maglev.html>
[cit. 2013-04-23]
- [2] KOUTNÍK, J. *Design magnetického vlaku*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012, 88 s. Vedoucí diplomové práce: doc. akad. soch. Miroslav Zvonek, ArtD.
- [3] WIKIPEDIE. *Maglev v Šanghaji*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Maglev_v_Šanghaji
[cit. 2013-04-23]
- [4] MAYER, D. *Magnetická levitace a její využití*. Elektro, 2003, č.1, s. 4-12.
Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010304.pdf>
- [5] TSUCHIYA, M., OHSAKI, H. *IEEE Transactions on Magnetics: Characteristics of Electromagnetic Force of EMS-Type Maglev Vehicle Using Bulk Superconductors*. Japan: Dept. of Electr. Eng., Tokyo Univ., 2000, s. 3683 - 3685. ISSN 0018-9464 Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=908940&contentType=Journals+%26+Magazines>
- [6] GOODALL, R. *Physics in Technology: The theory of electromagnetic levitation*. Northren Ireland, 1985, s. 207 - 213.
Dostupné z: <http://iopscience.iop.org/0305-4624/16/5/I02>
- [7] WIKIPEDIE. *Supravodivost*. [Online].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Supravodivost> [cit. 2013-04-26]
- [8] MORAVEC, Z. *Supravodivé magnety*. [Online].
Dostupné z: <http://z-moravec.net/chemie/supravodice/supravodive-magnety/>
[cit. 2013-04-26]
- [9] ARCHER, R. *Superconductors*. [Online]. Dostupné z:
<http://www.chemistryexplained.com/St-Te/Superconductors.html#b>
[cit. 2013-04-26]

- [10] HEDBERG, J. *In Youtube: The Awesome Levitating Train*. [Online].
Dostupné z: <http://www.youtube.com/watch?v=GHtAwQXVsuk>
[cit. 2013-04-26]
- [11] WIKIPEDIE. *Magnetické pole*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetické_pole [cit. 2013-04-26]
- [12] *Fyzikální veličiny popisující magnetické pole*. [Online]. Dostupné z:
<http://www.supermagnety.cz/cz/64/teoreticky-uvod/fyzikalni-veliciny-popisujici-magneticke-pole/> [cit. 2013-04-26]
- [13] WIKIPEDIE. *Magnetický tok*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetický_tok [cit. 2013-04-26]
- [14] WIKIPEDIE. *Intenzita magnetického pole*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Intenzita_magnetického_pole
[cit. 2013-04-26]
- [15] WIKIPEDIE. *Magnetická indukce*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetická_indukce
[cit. 2013-04-26]
- [16] WIKIPEDIE. *Permeabilita*. [Online].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Permeabilita> [cit. 2013-04-26]
- [17] *Electronics Tutorial about Magnetic Hysteresis*. [Online].
Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/magnetic-hysteresis.html> [cit. 2013-04-27]
- [18] WIKIPEDIE. *Magnet*. [Online].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Magnet> [cit. 2013-04-28]
- [19] *Magnetic Field Lines*. [Online].
Dostupné z: <http://www.docstoc.com/docs/80144435/Magnetic-Field-Lines>
[cit. 2013-04-28]
- [20] ABC MAGNET, s. r. o. *Pojmy v magnetismu*. [Online].
Dostupné z: <http://www.abcmagnet.cz/pojmy-v-magnetismu.php>
[cit. 2013-04-30]

- [21] WIKIPEDIE. *Maximální energetický součín*. [Online].
Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Maximální_energetický_součín
[cit. 2013-05-01]
- [22] ENES, P. P. H. U., *Magnety*. [Online].
Dostupné z: <http://www.magnety-magnety.com/> [cit. 2013-05-01]
- [23] WIKIPEDIA. *Earnshaw's theorem*. [Online].
Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Earnshaw's_theorem
[cit. 2013-05-01]
- [24] WEISS, J., ROMAN, J. *Magnetická levitace*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská, 2008, 4 s.
Dostupné z: <http://fyzsem.fjfi.cvut.cz/2007-2008/Zima07/proc/levitron.pdf>
- [25] ELEKTRO. *Nové možnosti magnetické levitace v dopravě?* [Online].
Dostupné z: http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25632
[cit. 2013-12-26]
- [26] CLÍMANTICA. *Inductrack, levitación magnética para el transporte*. [Online].
Dostupné z: <http://ies.camilojosecela.climantica.org/2012/02/05/inductrack-levitacion-magnetica-para-el-transporte/> [cit. 2013-12-26]
- [27] GOOGLE PATENTS. *Amlev: Self-regulating type of Maglev high speed ground transportation based on permanent magnets and steel cores*. [Online].
Dostupné z: <http://www.google.com/patents/US20100005997>
[cit. 2013-12-26]
- [28] RAILWAY TECHNICAL RESEARCH INSTITUTE. *MLX01*. [Online].
Dostupné z:
http://www.rtri.or.jp/rd/division/rd79/yamanashi/english/html/mlx01_E.html
[cit. 2013-12-26]
- [29] MACEK, P. *Návrh a analýza elektromagnetu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 59 s.
Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [30] WIKIPEDIE. *Elektromagnet*. [Online].
Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnet> [cit. 2013-12-28]

- [31] WIKIPEDIE. *Zákon elektromagnetické indukce*. [Online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1kon_elektromagnetick%C3%A9_indukce [cit. 2013-12-29]
- [32] WIKIPEDIE. *Indukčnost*. [Online]. Dostupné z: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Induk%C4%8Dnost> [cit. 2013-12-29]
- [33] JIE, M., WENJUN, F. a FENGHUA, H. *2nd International Symposium on Systems and Control in Aerospace and Astronautics, 2008: Parameters Self-adjusting Fuzzy PID Control in Magnetic Levitation System*. China: Harbin Institute of Technology, 2008, 5 s. E-ISBN 978-1-4244-2386-6. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4776264
- [34] AHMAD, A.K., SAAD, Z., OSMAN, M.K., ISA, I.S., SADIMIN, S., ABDULLAH, S.S. *Second International Conference on Computational Intelligence, Modelling and Simulation (CIMSIM), 2010: Control of Magnetic Levitation System Using Fuzzy Logic Control*. Malaysia: Fac. of Electr. Eng., Univ. Teknol. MARA (UiTM) Malaysia, Permatang Pauh, 2010, s. 51 - 56. E-ISBN 978-0-7695-4262-1. Dostupné z: http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5701821
- [35] PATOČKA, M., *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřící technice a silnoproudé elektrotechnice*. Brno: VUTIUM, 2011. 564 s. ISBN: 978-80-214-4003- 6.
- [36] MAGLEV TRAINS. *Maglev propulsion*. [Online]. Dostupné z: <http://emt18.blogspot.cz/2008/10/maglev-propulsion.html> [cit. 2014-04-22]
- [37] DESHMANE, A., FISHER, K., *Levitron: Playing with magnetic levitation*. [Online]. Dostupné z: <http://web.mit.edu/viz/levitron/Physics.html> [cit. 2014-04-23]
- [38] PEŠEK, M. *Program FEMM - podklady pro výuku v elektronické formě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 54 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
- [39] FORCEFIELD. *Build a Halbach array*. [Online]. Dostupné z: <http://www.wondermagnet.com/halbach.html> [cit. 2013-12-26]

- [40] BLAHA, P., VAVŘÍN, P. *Řízení a regulace 1*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2005, 213 s.
- [41] WIKIMEDIA COMMONS. *Halbach array*. [Online]. Dostupné z: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Halbach_array.svg [cit. 2013-12-26]
- [42] ARDUINO. *Arduino Due*. [Online]. Dostupné z: <http://arduino.cc/en/Main/arduinoBoardDue> [cit. 2014-05-04]
- [43] STMICROELECTRONICS. *Dual full-bridge driver L298*. Datasheet. 2000, 13 s. Dostupné z: http://www.st.com/st-web-ui/static/active/en/resource/technical/document/datasheet/CD00000240.pdf?s_searchtype=keyword
- [44] ATMEL. *Atmel 8-bit Microcontroller with 4/8/16/32KBytes In-System Programmable Flash*. Datasheet. 2012, 660 s. Dostupné z: http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet.pdf
- [45] WIKIPEDIE. *Nakloněná rovina*. [Online]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Naklon%C4%9Bn%C3%A1_rovina [cit. 2014-05-06]

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

a	rozmer jedného pólu elektromagnetu, okamžité zrýchlenie
a_r	rozšírený rozmer jedného pólu elektromagnetu
ADC	digitálna hodnota ADC prevodu
B	magnetická indukcia
B_0	magnetická indukcia v pracovnom bode
BH_{max}	maximálny energetický súčin permanentného magnetu
B_p	počiatočná magnetická indukcia
B_r	remanencia permanentného magnetu
B_{sat}	saturačné účinky magnetickej indukcie feritového jadra
E_x	realizačná konštanta PID regulátora vzdialenosti
f	frekvencia
f_{ri}	frekvencia prúdovej schémy pre mikrokontrolér
f_{ru}	frekvencia napäťovej schémy pre mikrokontrolér
f_{sx}	frekvencia snímača vzdialenosti
F	výsledná pôsobiaca sila
F_0	sila pôsobiaca v pracovnom bode
F_A, F_B	sila, ktorou pôsobí elektromagnet A/B
F_g	gravitačná sila
F_{im}	sila vyvolaná jedným elektromagnetom
F_{im0}	počiatočná linearizovaná sila v pracovnom bode
F_{max}	maximálna možná sila
F_{opp}	opačná sila pre linearizovaný model elektromagnetu
F_r	rušivá sila
F_{0ix}	otvorená slučka prenosu prúdu na vzdialenosť
F_{0ui}	otvorená slučka prenosu napätia na prúd s PI regulátorom
F_{Rix}	prenos PID regulátora vzdialenosti
F_{Rui}	prenos PI regulátora prúdu
F_{Six}	prenos prúdu na vzdialenosť modelu elektromagnetu
F_{Sui}	prenos napätia na prúd modelu elektromagnetu
F_{Wui}	uzavretá slučka prenosu napätia na prúd s regulátorom
g	gravitačné zrýchlenie
H	intenzita magnetického poľa
H_C, H_{CJ}, H_{CB}	koercivita permanentného magnetu
H_d	vnútorné demagnetizačné pole
H_{fe}	intenzita magnetického poľa v jadre a kotve
H_x	intenzita magnetického poľa vo vzduchovej medzere
i	okamžitý prúd

i_0	prúd v pracovnom bode
i_A, i_B	okamžitý prúd elektromagnetu A/B
I_{max}	maximálny možný prúd
I_{vol}	ustálený voľný elektrický prúd
J	magnetická polarizácia
k	konštanta definujúca typ magnetického materiálu
K_1, K_2	konštanty linearizovaného modelu elektromagnetu
K_d	demagnetizačný faktor
K_{dx}	zosilnenie derivačnej zložky PID regulátora vzdialenosti
K_{em}	konštanta elektromagnetu
K_{ii}	zosilnenie integračnej zložky PI regulátora prúdu
K_{ix}	zosilnenie integračnej zložky PID regulátora vzdialenosti
K_{mm}	konštanta pre prevod m na mm
K_{pi}	zosilnenie proporcionálnej zložky PI regulátora prúdu
K_{px}	zosilnenie proporcionálnej zložky PID regulátora vzdialenosti
K_{ri}	zosilnenie PI regulátora prúdu
K_{rx}	zosilnenie PID regulátora vzdialenosti
K_{sfe}	konštanta pre úpravu indukčnosti pre nehomogénne pole
l_{fe}	dĺžka strednej siločiaru jadra a kotvy
L	indukčnosť
L_0	konštanta pre výpočet indukčnosti
m	hmotnosť
M	magnetizácia, dipólový moment
n	počet pólov
N	počet závitov
Q	náboj
Q_i	vzorkovanie snímača prúdu
Q_x	vzorkovanie napätia snímača vzdialenosti
Q_u	vzorkovanie požadovaného napätia PWM
R_{cu}	odpor medeného drôtu elektromagnetu
R_m	magnetický odpor obvodu
R_{m0}	magnetický odpor v pracovnom bode
R_{mj}	magnetický odpor jadra elektromagnetu
R_{mk}	magnetický odpor kotvy elektromagnetu
R_{mv}	magnetický odpor vzduchovej medzery
S	plocha
S_{fe}	plocha jedného pólu elektromagnetu
sum_x	zosilnenie šumu snímača vzdialenosti
t	okamžitý čas
T_C	Curieová teplota

T_L	časová konštanta pre prenos napätia na prúd
T_{max}	maximálna pracovná teplota
T_{fi}	časová konštanta pre filtráciu snímača prúdu
T_{fx}	časová konštanta pre filtráciu snímača vzdialenosti
T_{ri}	časová konštanta PI regulátora prúdu
T_{rx1}, T_{rx2}	časové konštanty PID regulátora vzdialenosti
T_{sx}	časová konštanta vychádzajúca z frekvencie snímača vzdialenosti
u	okamžité svorkové napätie
u_A, u_B	okamžité napätie na elektromagnete A/B
u_{ra}, u_{rb}	okamžité požadované napätie PWM pre elektromagnet A/B
U	magnetický dipól
U_m	elektromotorické napätie elektromagnetu
U_{max}	maximálne možné napätie
v	okamžitá rýchlosť
v_p	počiatočná rýchlosť
V_{IN}	vstupné napätie ADC prevodníka mikrokontroléra
V_{REF}	referenčné napätie mikrokontroléra pre ADC
W_{co}	magnetická koenergia
W_{el}	element energie dodaný zo zdroja
W_m	magnetická energia
W_{mech}	element mechanickej práce
x	okamžitá dĺžka vzduchovej medzery
x_0	dĺžka vzduchovej medzery v pracovnom bode
x_{b0}	hraničný stav k nulovej dĺžke vzduchovej medzery
x_{bm}	hraničný stav k maximálnej dĺžke vzduchovej medzery
x_m	maximálna dĺžka vzduchovej medzery
x_p	počiatočná dĺžka vzduchovej medzery
y	výstup horného a dolného dorazu privádzaný na povolenie integrátora
α	uhol naklonenej roviny
μ	permeabilita
μ_0	permeabilita vákua
μ_r	relatívna permeabilita
Φ	magnetický tok
Φ_0	magnetický tok v pracovnom bode
Ψ	magnetický tok elektromagnetu spriahnutý s jeho závitmi

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2.1: Silové pôsobenie magnetického poľa na pohybujúci sa náboj [15].....	11
Obrázok 2.2: Hysterézná slučka mäkkého a tvrdého feromagnetického materiálu [17]	13
Obrázok 2.3: Magnetizačné krivky vybraných mäkkých technických materiálov [29].	14
Obrázok 2.4: Znárodnenie magnetického poľa permanentného magnetu [19].....	15
Obrázok 2.5: Hysterézná slučka $B = f(H)$ a $J = f(H)$ [20]	15
Obrázok 2.6: Teplotná demagnetizácia permanentného magnetu [20]	17
Obrázok 2.7: Znárodnenie magnetického poľa dvoch súhlasne orientovaných magnetov	21
Obrázok 2.8: a) Meissnerov jav, b) ukážka stabilnej levitácie vytvorená kombináciou permanentných magnetov a supravodivého magnetu [19][20].....	23
Obrázok 2.9: Znárodnenie princípu Levitronu® [37].....	25
Obrázok 3.1: a) Nákres jednosmerného elektromagnetu [30], b) Náhradná schéma jednosmerného elektromagnetu	26
Obrázok 3.2: a) Ampérweberová charakteristika sústavy ($\Phi_{\Sigma} = \Psi$), b) Elektromagnet s premenlivou vzduchovou medzerou [29]	29
Obrázok 3.3: Nákres modelu magnetického závesu [33]	32
Obrázok 3.4: Výsledný nelineárny model magnetického závesu	34
Obrázok 3.5: Linearizovaný model magnetického závesu	34
Obrázok 3.6: Príklad odozvy vzdialenosti riadenej magnetickej gule od elektromagnetu pomocou klasického PID regulátora (červená) a fuzzy PID regulátora (modrá)	34
Obrázok 3.7: Základné usporiadanie levitačného elektromagnetu	35
Obrázok 3.8: Algoritmus horného a dolného dorazu elektromagnetu	37
Obrázok 4.1: Šanghajská trať pre ukážkovú prevádzku vlaku maglev [1].....	38
Obrázok 4.2: Dizajnérska ukážka magnetického vlaku [2]	39
Obrázok 4.3: Princípy magnetickej levitácie v doprave [2]	40
Obrázok 4.4: a) Nestabilná EMS, b) stabilizácia EMS spätnou väzbou, c) stabilizácia EMS obvodom RLC [4].....	41
Obrázok 4.5: Starší spôsob využitia EMS - rez vozidla a dráhy [4].....	42
Obrázok 4.6: a) Rez vozidlom a jazdnou dráhou Transrapid 08, b) levitačný, pohonný a vodiaci systém Transrapid 08 [4].....	43

Obrázok 4.7: Postupné napájanie úsekov jazdnej dráhy maglev [4]	44
Obrázok 4.8: a) Pohybujúci sa supravodivý magnet nad vodivým pásom, b) magnetické pole pohybujúceho sa supravodivého magnetu [4].....	45
Obrázok 4.9: a) Rez vozidlom EDS a jazdnou dráhou, b) pohľad na vozidlo zhora [4]	46
Obrázok 4.10: a) Umiestnenie levitujúcej a bočných stabilizačných cievok, b) jazdná dráha magnetického superexpressu [4]	47
Obrázok 4.11: a) Zobrazenie smeru magnetizácie magnetov Halbachovej sústavy [41], b) Magnetické pole permanentných magnetov Halbachovej sústavy [39].....	48
Obrázok 4.12: Principiálne usporiadanie podvozku na báze Halbachovej sústavy permanentných magnetov [26]	49
Obrázok 4.13: Inductrack podvozok pre dopravné systémy [26].....	49
Obrázok 4.14: Podvozok systému Amlev [27].....	50
Obrázok 4.15: Usporiadanie lineárneho synchronného motora s dlhým statorom [4] ...	51
Obrázok 4.16: Princíp pohybu magneticky levitovaného vozidla pomocou lineárneho synchronného motora [36].....	52
Obrázok 5.1: Pracovné prostredie programu FEMM	53
Obrázok 5.2: Príklad navrhnutého elektromagnetu k simulácii vo FEMM.....	54
Obrázok 6.1: Uvažovaná konštrukcia levitačného vozíku (pohľad zhora).....	55
Obrázok 6.2: Uvažovaná konštrukcia levitačného vozíka (pohľad spredu)	55
Obrázok 6.3: Konštrukcia uvažovaná pre odladenie riadenia bočných elektromagnetov	56
Obrázok 7.1: Elektromagnet ako subsystém používaný v riadiacich schémach	57
Obrázok 7.2: Označenie rozmerov zvoleného feritového jadra elektromagnetu.....	58
Obrázok 7.3: Uvažovaná inverzná charakteristika $H = f(B)$ pre model elektromagnetu	59
Obrázok 7.4: Zanedbaná časť prúdovej vetvy modelu elektromagnetu	62
Obrázok 7.5: Veľkosť zanedbaného prúdu v pracovnom bode pri privedení napätia	62
Obrázok 7.6: Uvažovaná konštrukcia pre linearizáciu jedného elektromagnetu (zhora)	63
Obrázok 7.7: Homogénne magnetické pole uvažované v teoretických výpočtoch	64
Obrázok 7.8: Pribeh magnetickej indukcie na jednotlivých póloch elektromagnetu pre homogénne pole.....	65
Obrázok 7.9: Skutočné nehomogénne pole vo vzduchovej medzere elektromagnetu ...	65

Obrázok 7.10: Skutočný priebeh magnetickej indukcie na póloch elektromagnetu.....	66
Obrázok 7.11: Priebeh linearizácie konštanty rozšírenia vzduchovej medzery pólu elektromagnetu v pracovnom rozsahu	67
Obrázok 7.12: Prechodová charakteristika nelineárneho (červená) a lineárneho (zelená) modelu po zavedení navrhutej regulácie v pracovnom bode.....	69
Obrázok 7.13: Výsledné uvažovanie smeru síl a vzdialenosti pre konštrukciu.....	70
Obrázok 7.14: Uvažovaná inverzná charakteristika pre požadované napätie a prúd	71
Obrázok 7.15: Náhľad na hlavný riadiaci kit s mikrokontrolérom ATSAM3X8E [42].	72
Obrázok 7.16: Navrhnutá a realizovaná doska vlastného modulu.....	73
Obrázok 7.17: Bloková schéma zapojenia elektroniky pre realizáciu modelu.....	73
Obrázok 7.18: Bloková schéma štvokvadrantového meniča L298, riadenie PWM [43]	74
Obrázok 7.19: Saturačné účinky tranzistorov meniča L298 [43]	74
Obrázok 7.20: Prevod požadovaného napätia na digitálnu hodnotu PWM pre kanál A	76
Obrázok 7.21: Prevod požadovaného napätia na digitálnu hodnotu PWM pre kanál B	76
Obrázok 7.22: Uvažovaný model snímača vzdialenosti v subsysteme bez filtra	78
Obrázok 7.23: Frekvenčná a fázová charakteristika navrhnutého PI regulátora pre prúdovú slučku.....	80
Obrázok 7.24: Frekvenčná a fázová charakteristika výsledného PID regulátora vzdialenosti	81
Obrázok 7.25: Koreňový hodograf výsledného PID regulátora s tlmením $\xi = 0,707$	82
Obrázok 7.26: Porovnanie regulácie bez anti-windup (červená) a s anti-windup (zelená)	83
Obrázok 7.27: Náhľad na okno realizovaného programu pre meranie a aktuálne vyhodnocovanie vzdialenosti a prúdu.....	84
Obrázok 7.28: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu A (prúdová schéma)	85
Obrázok 7.29: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu B (prúdová schéma)	85
Obrázok 7.30: Prechodová charakteristika vzdialenosti pri $x_p = 6$ mm (napät'ová sch.)	86
Obrázok 7.31: Prechodová charakteristika vzdialenosti pri $x_p = 0$ mm (napät'ová sch.)	86
Obrázok 7.32: Prechodová charakteristika prúdu elektromagnetu A (napät'ová schéma)	87
Obrázok 7.33: Porovnanie reálneho správania vozíku so simuláciou za 40 s	87
Obrázok 7.34: Aplikácia vozíka na naklonenej rovine.....	88

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 2.1: Relatívne permeability vybraných materiálov [16].....	12
Tabuľka 2.2: Magnetické parametre vybraných feritových magnetov [22]	18
Tabuľka 2.3: Magnetické parametre vybraných neodymových magnetov [22].....	19
Tabuľka 7.1: Základné konštanty a ich hodnoty použité pri simulácii elektromagnetov60	
Tabuľka 7.2: Porovnanie časových konštánt na základe teórie a merania	67
Tabuľka 7.3: Piny využité pre prepojenie motor shieldu s radiacim kitom a ich prepojenie s čipom L298.....	72
Tabuľka 7.4: Premeranie meniča L298 na základe vstupných hodnôt PWM	75
Tabuľka 7.5: Konštanty použité pri simulácii jednotlivých snímačov	79

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A

Matematický model levitačného elektromagnetu realizovaný v Simulinku.

Príloha B

Charakteristika zvoleného feritového jadra pre elektromagnety.

Príloha C

Charakteristika použitého snímača vzdialenosti.

Príloha D

Schéma pre porovnanie riadenia nelineárneho a lineárneho modelu v pracovnom bode.

Príloha E

Výsledné schémy riadenia dvoch elektromagnetov (prúdová a napäťová schéma).

Príloha F

Zdokumentovanie všetkej použitej elektroniky (schémy zapojení).

Príloha G

Doplnená knižnica pwm.h pre ovládanie PWM mikrokontroléra SAM3X.

Príloha H

Algoritmy nahrávané do mikrokontrolérov pre dané schémy zo softvéru Arduino®, verzia 1.5.6-r2.

Príloha I

Fotodokumentácia reálneho modelu.

Príloha J

Priložené DVD, ktoré obsahuje programy nahrávané do mikrokontrolérov, údaje o použitej elektronike (schémy, dosky, datasheety apod.), FEMM simulácie, fotografie, video, dáta k navrhnutým kostrám pre elektromagnety (kostry boli získané z 3D tlačiarne), Matlab a Simulink dáta (reálne dáta, konštanty, modely), údaje o prevedených meraniach a vytvorené programy v programovacom jazyku C# .NET.

Príloha B

Material Properties

Material	CF 139		
Base Material	MnZn		
Property	Symbol	Unit	
Initial Permeability (T = 25 °C)	μ_i		2100±20%
Flux density H = 1000 A/m, f = 10 kHz)	B_s (25 °C) B_s (100 °C)	mT mT	490 390
Residual Flux Density	B_r (25 °C)	mT	180
Coercivity	H_c (25 °C)	A/m	21
Power loss density 100 kHz, 100 mT, 100 °C 100 kHz, 200 mT, 100 °C 300 kHz, 100 mT, 100 °C 500 kHz, 50 mT, 100 °C	P_v	kW/m ³ kW/m ³ kW/m ³ kW/m ³	< 60 <380 <390 <215
Curie Temperature	T_c	°C	>210 °C
Sec. Max. Permeability	SMP	°C	90 – 110
Resistivity	ρ	Ωm	8
Density	d	Kg/m ³	4800
Core Shapes			RM, P, PM, EP, PTS, POT, PQ, E, EC, ETD EFC, EI, EER, EFF, Toroid

Príloha C

Technical data		IMA12-	06BE	3ZCOK						
Sensing range s_d	0 ... 6 mm									
Repeat accuracy ²⁾	0.3 mm ²⁾									
Repeat accuracy ($T_A = \text{constant}$)	± 0.01 mm									
Resolution	≤ 1 μm									
Supply voltage V_S	15 ... 30 V DC									
Ripple U_{rip}	≤ 20 % ³⁾									
Output voltage at Q_{A1}	$s = 0$ mm 0 V/- 0 + 0.4 V (23 °C)									
	$s = 3$ mm +5.2 V/ ± 0.4 V (23 °C)									
	$s = 6$ mm +10 V/ ± 0.4 V (23 °C)									
Load at voltage output Q_{A1}	≤ 10 mA									
No-load supply current ⁴⁾	≤ 12 mA									
Bandwidth	1,000 Hz ⁵⁾									
Time delay before availability	≤ 50 ms									
Temperature drift, of s_r	$\leq \pm 5$ % (0 ... +70 °C)									
	$\leq \pm 10$ % (-25 ... 0 °C)									
Connection type	Connector M12, 4-pin									
Enclosure rating	IP 67 ⁶⁾									
Short-circuit protection	✓									
Reverse polarity protection	✓									
Cable length	300 m max.									
Housing material	Brass nickel-plated, PBTP									

¹⁾ According to IEC 60947-5-2

²⁾ $U_S = 20 \dots 30$ V DC,
 $T_A = 23 \text{ °C} \pm 5 \text{ °C}$

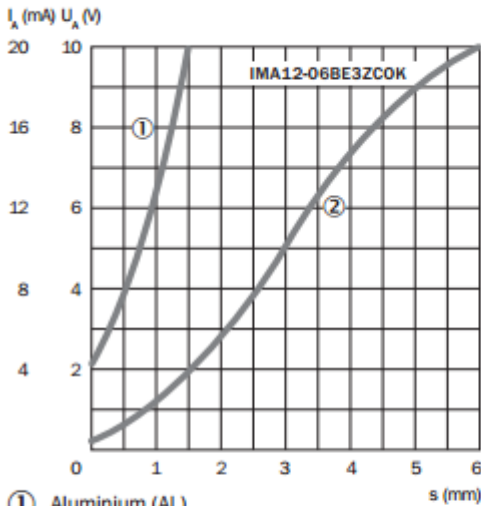
³⁾ Of U_S

⁴⁾ Without load

⁵⁾ -3 dB at $s = 3$ mm

⁶⁾ According to EN 60529: 2000-09

Response curve



① Aluminium (AL)

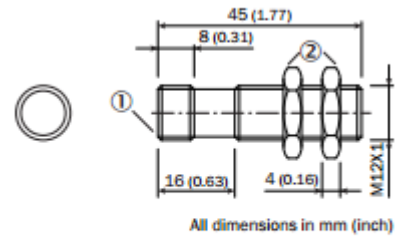
② St37 (FE)

Reduction factor R_M

The following are reference values, which may vary from type to type:

Steel (FE360)	1
Stainless steel (V2A)	Approx. 0.47
Aluminium (Al)	Approx. 0.28
Copper (Cu)	Approx. 0.20
Brass (Ms)	Approx. 0.35

Dimensional drawing



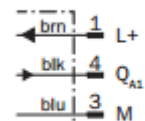
① Connection

② Fastening nuts (2 x), width across 17 mm, metal

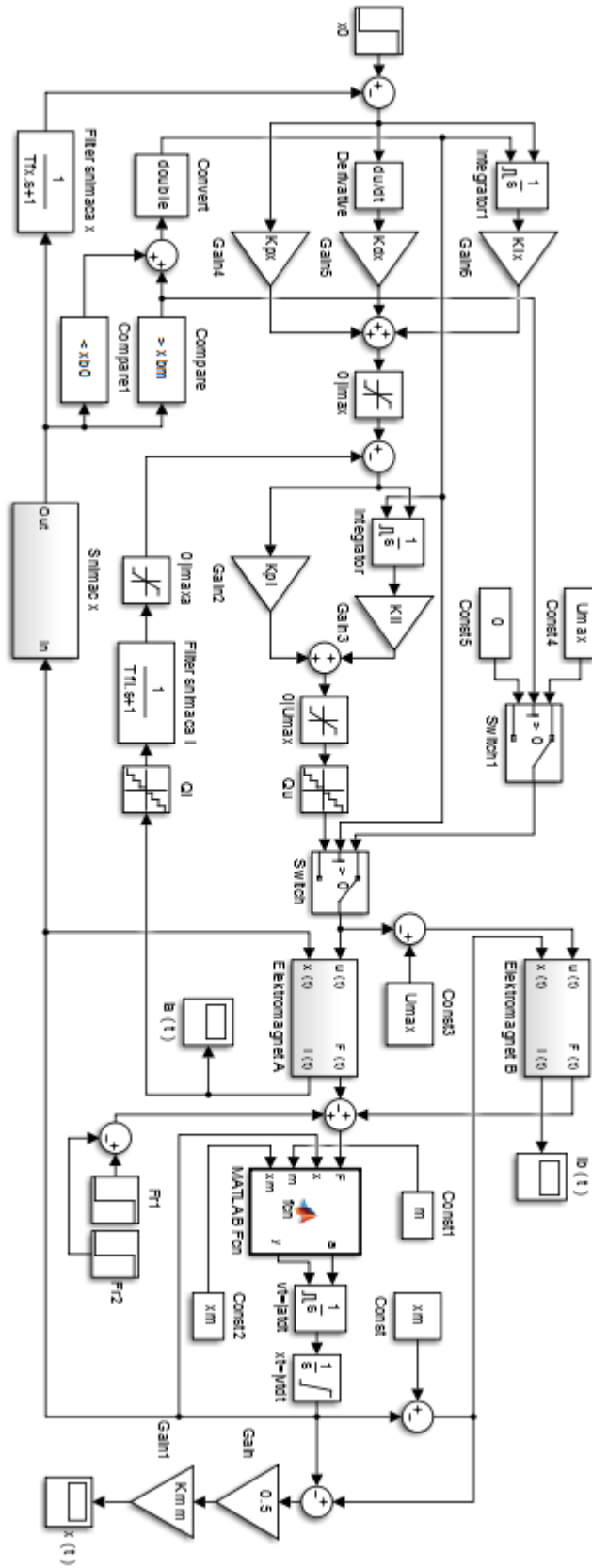
Connection type

IMA12-06BE3ZCOK

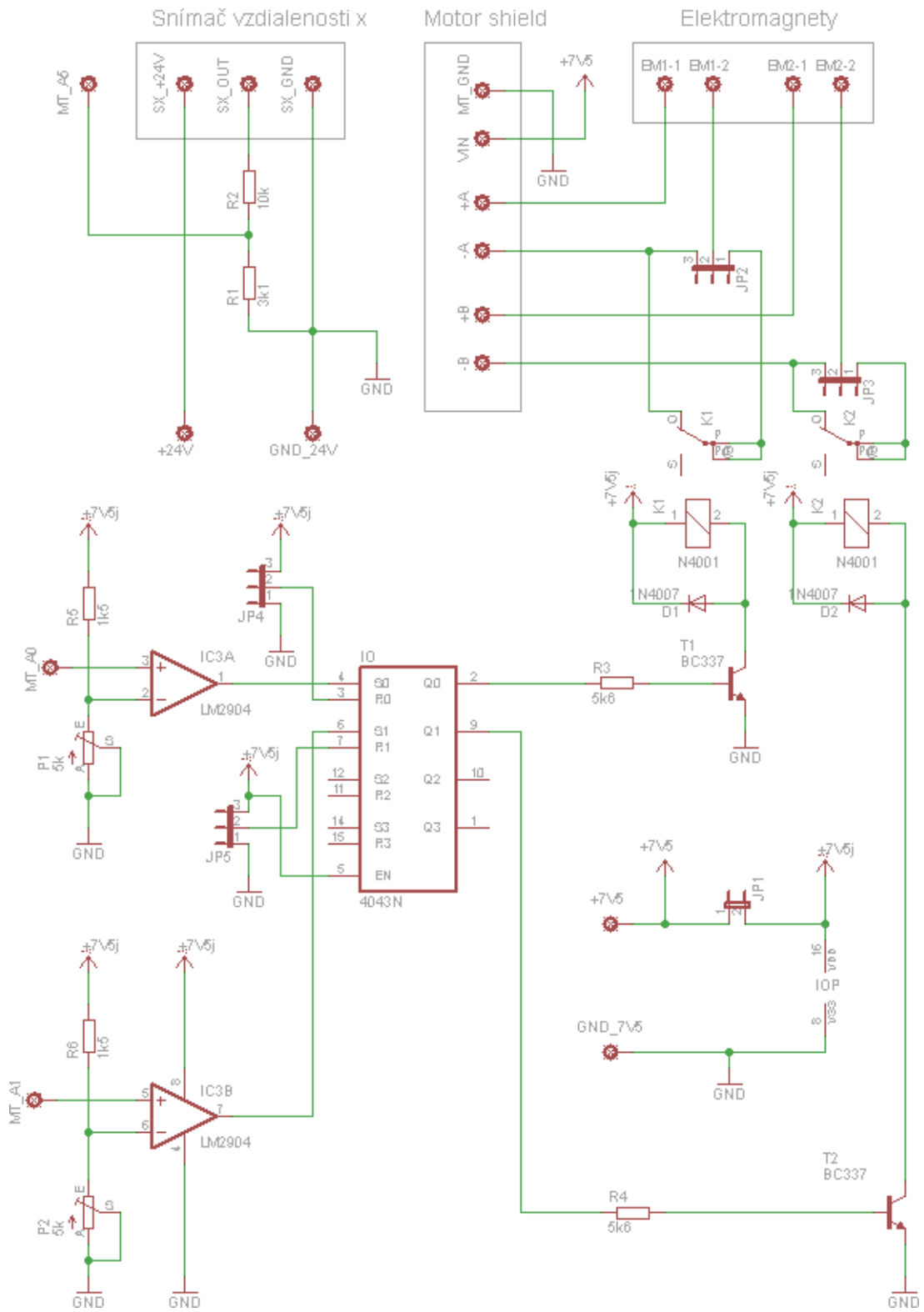
M12, 4-pin



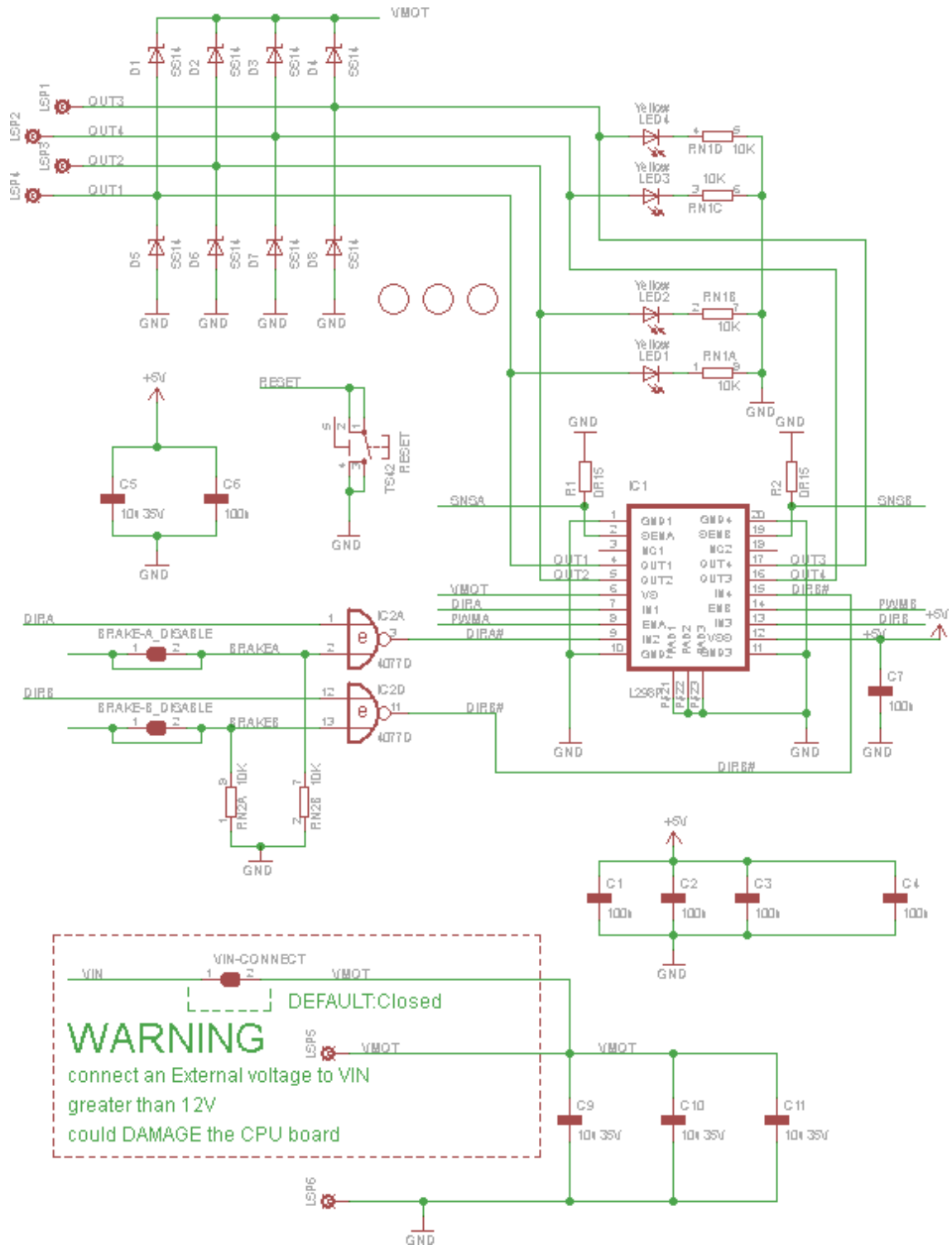
Napät'ová schéma



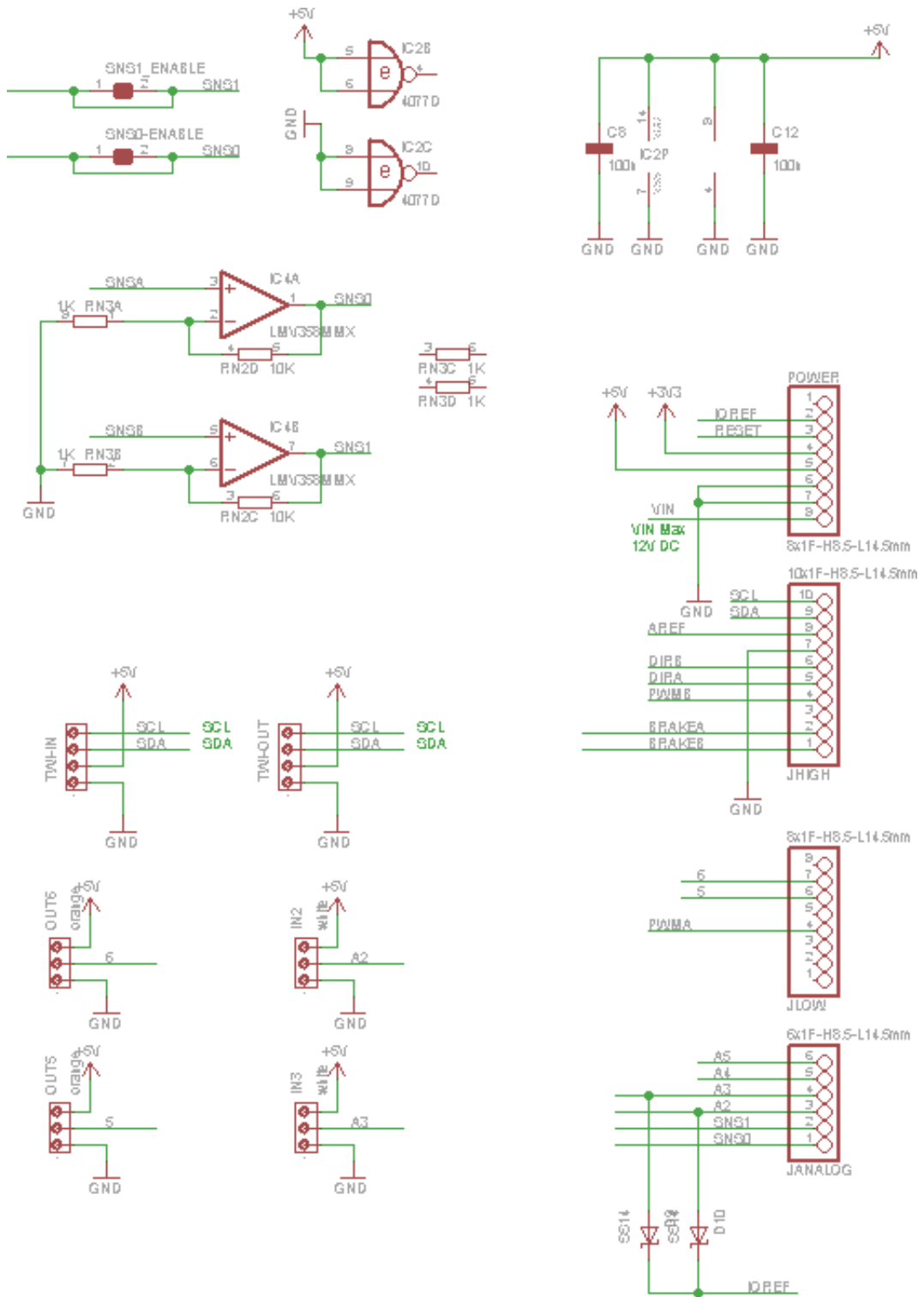
Príloha F (realizovaný modul)



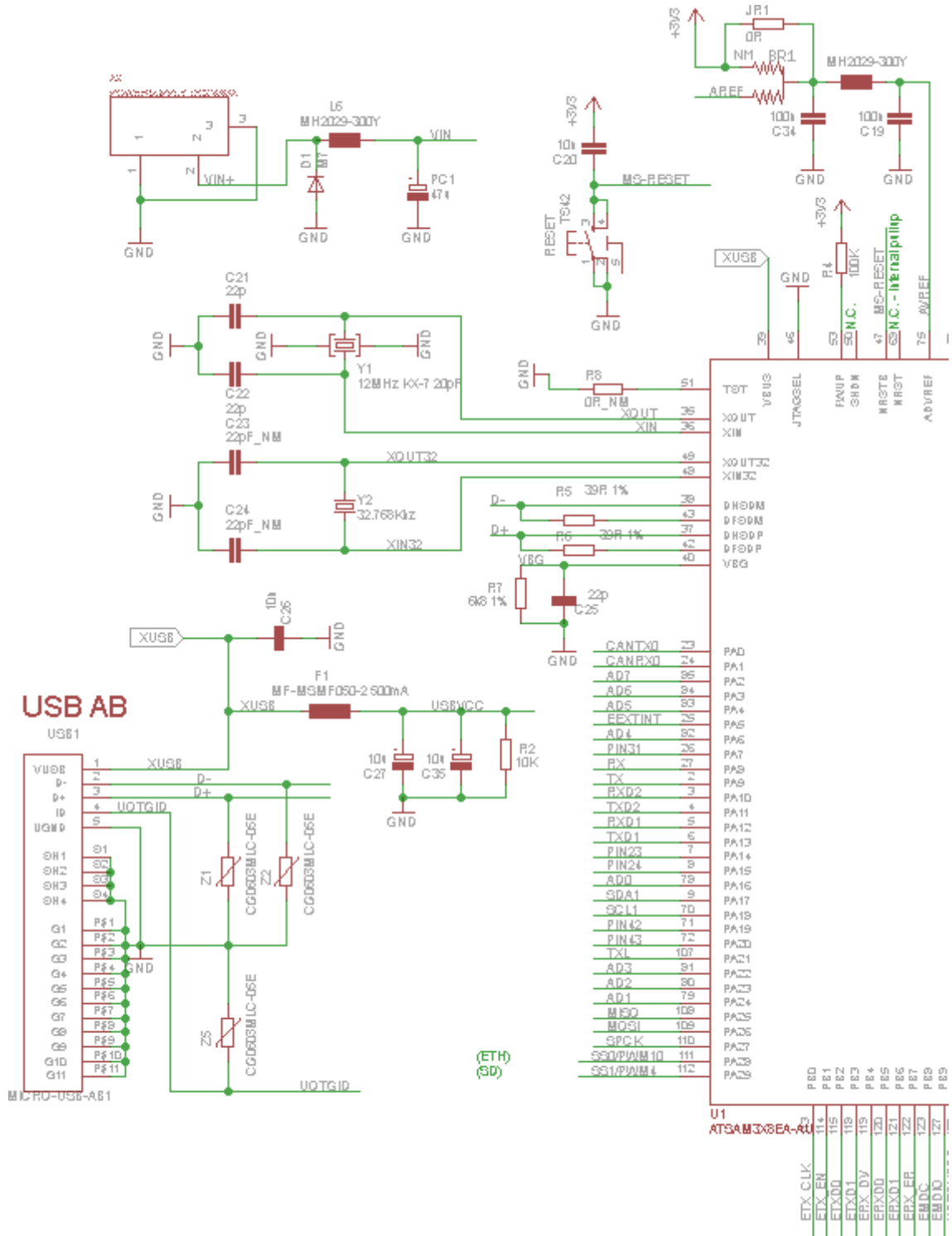
Arduino® Motor Shield R3 (1. část)



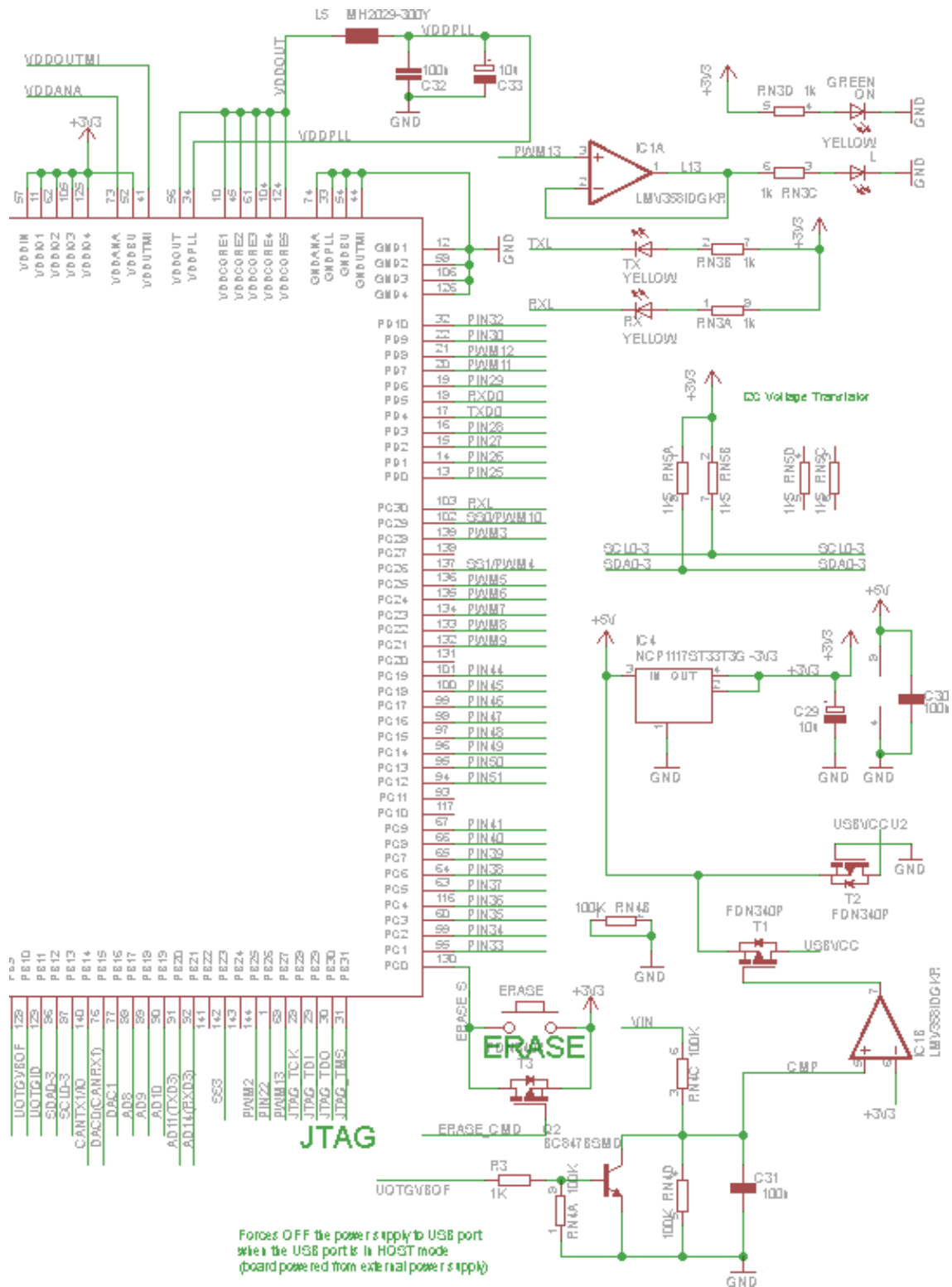
Arduino® Motor Shield R3 (2. část)



Arduino® Due (1. část)

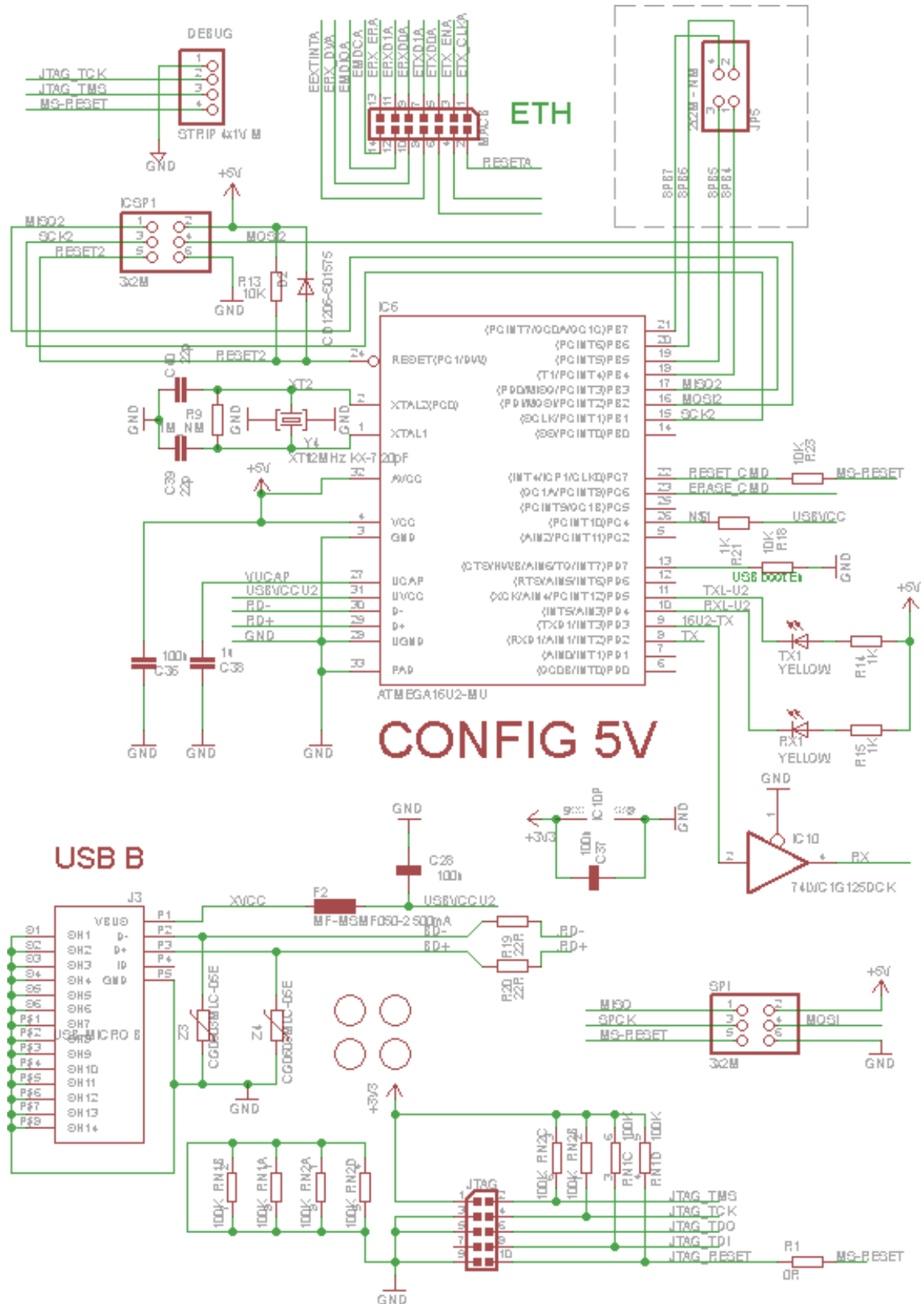


Arduino® Due (2. část)

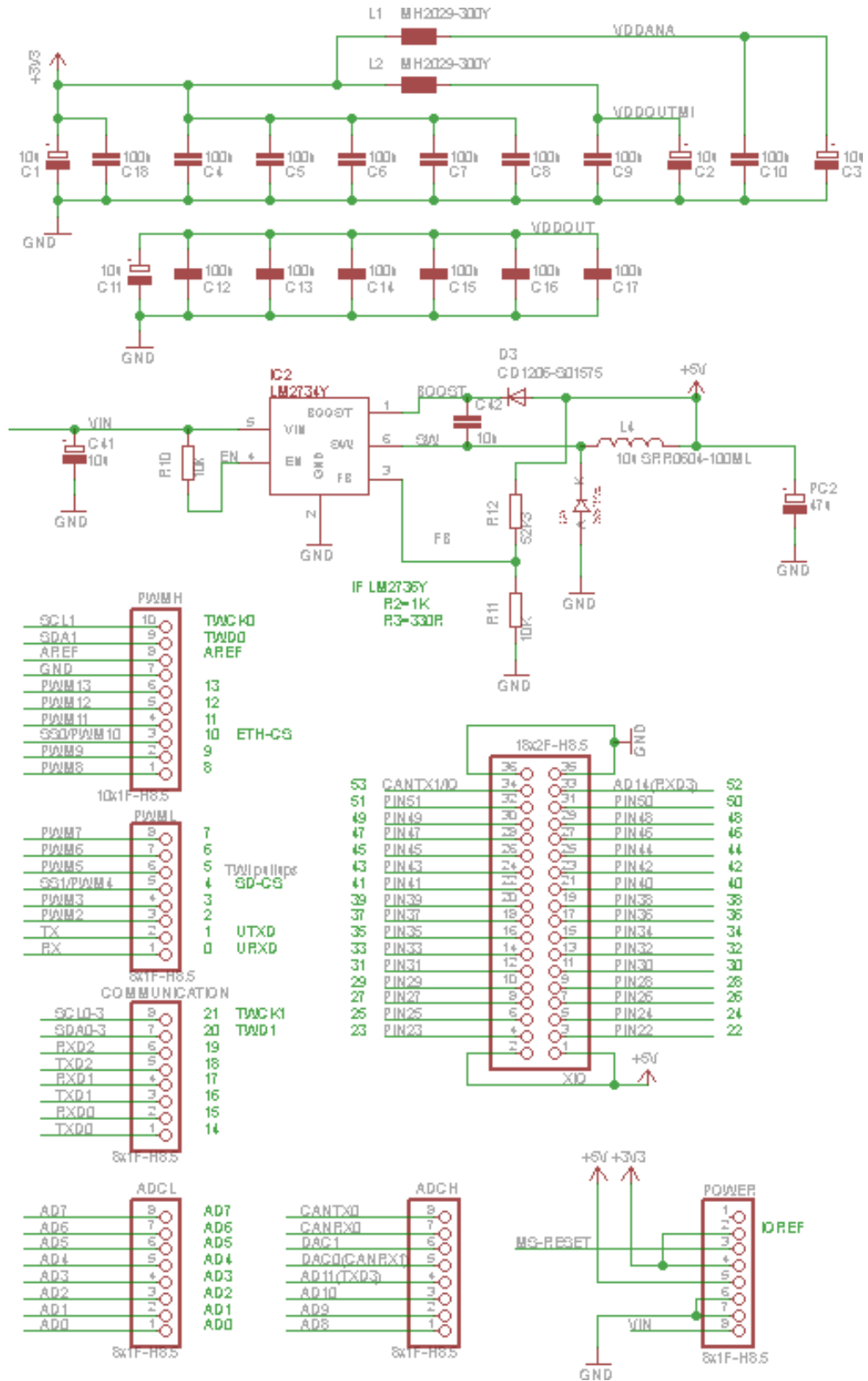


Forces OFF the power supply to USB port when the USB port is in HOST mode (board powered from external power supply)

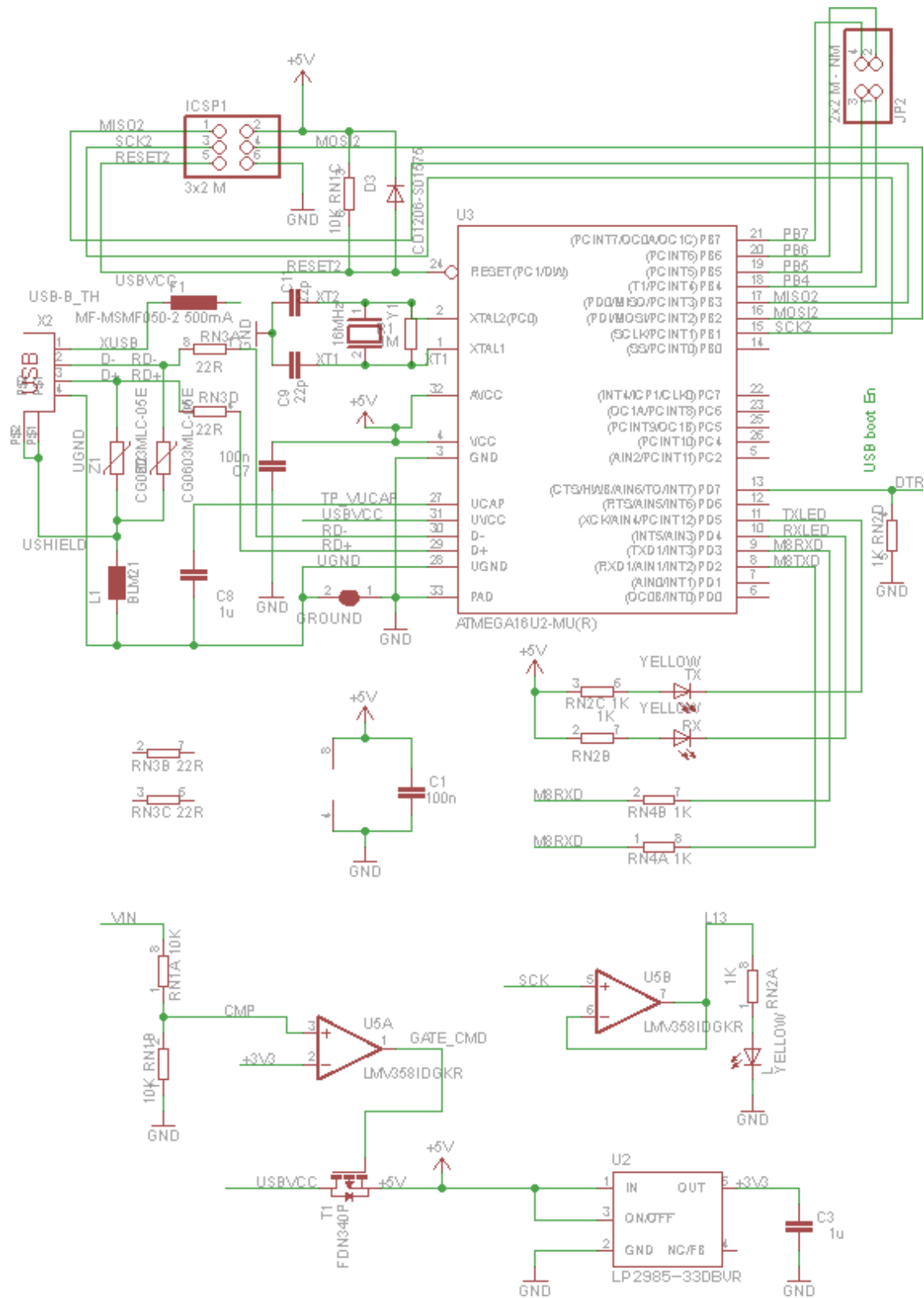
Arduino® Due (3. část)



Arduino® Due (4. část)



Arduino® Uno R3 (1. část)



Príloha G

```
#include "Arduino.h"

static int    pwm_resolution_nbit = 8;
static uint32_t pwm_clockA_freq = 0;
static uint32_t pwm_clockB_freq = 0;
static uint32_t pwm_max_duty_Ncount = 255;

void pwm_set_clockA_freq(uint32_t val)
{
    pwm_clockA_freq = val;
}

void pwm_set_clockB_freq(uint32_t val)
{
    pwm_clockB_freq = val;
}

// MAIN PWM INITIALIZATION
void pwm_setup( uint32_t pwm_pin, uint32_t pwm_freq, int iclock )
{
    uint32_t pwm_duty = 0;
    uint32_t chan = g_APinDescription[pwm_pin].ulPWMChannel;

    if (iclock==1) pwm_set_clockA_freq( pwm_max_duty_Ncount*pwm_freq );
    if (iclock==2) pwm_set_clockB_freq( pwm_max_duty_Ncount*pwm_freq );

    if (pwm_pin>=6 && pwm_pin<=9)
    {
        pmc_enable_periph_clk( PWM_INTERFACE_ID );
        PWMC_ConfigureClocks( pwm_clockA_freq, pwm_clockB_freq, VARIANT_MCK );

        PIO_Configure( g_APinDescription[pwm_pin].pPort, g_APinDescription[pwm_pin].ulPinType,
g_APinDescription[pwm_pin].ulPin, g_APinDescription[pwm_pin].ulPinConfiguration);
        if (iclock==1) PWMC_ConfigureChannel(PWM_INTERFACE, chan, PWM_CMR_CPRES_CLKA, 0, 0);
        if (iclock==2) PWMC_ConfigureChannel(PWM_INTERFACE, chan, PWM_CMR_CPRES_CLKB, 0, 0);

        PWMC_SetPeriod(PWM_INTERFACE, chan, pwm_max_duty_Ncount);
        PWMC_SetDutyCycle(PWM_INTERFACE, chan, pwm_duty);
        PWMC_EnableChannel(PWM_INTERFACE, chan);
    }
}

// WRITE DUTY CYCLE
void pwm_write_duty( uint32_t pwm_pin, uint32_t pwm_duty )
{
    uint32_t chan = g_APinDescription[pwm_pin].ulPWMChannel;
    PWMC_SetDutyCycle(PWM_INTERFACE, chan, pwm_duty);
};

// FORCE PWM STOP
void pwm_stop( uint32_t pwm_pin )
{
    pinMode(pwm_pin, OUTPUT); // sets the digital pin as output
    digitalWrite(pwm_pin, LOW); // sets the LED off
};
```

```
// ENABLE PWM INTERRUPT
void pwm_enable_interrupt( uint8_t pwm_pin )
{
    uint8_t channel = g_APinDescription[pwm_pin].ulPWMChannel;
    PWMC_EnableChannelIt(PWM_INTERFACE, channel);
};

// CHECK PWM INTERRUPT STATUS
bool pwm_interrupt( uint8_t pwm_pin )
{
    uint8_t channel = g_APinDescription[pwm_pin].ulPWMChannel;
    if (PWM_INTERFACE->PWM_ISR1 & (1 << channel))
    {
        return true;
    }
    else
    {
        return false;
    }
};
```

Príloha H

Prúdová schéma pre ATSAM3X8E

```
#include "pwm.h"

void setup() {
  // motor shield pins
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);

  digitalWrite(3, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(13, LOW);

  // setting pwm
  uint16_t freq = 12200;
  uint8_t zero = 255;
  analogReadResolution(12);

  // channel A
  pwm_setup(9, freq, 2);
  pwm_write_duty(9, zero);
  pwm_enable_interrupt(9);
  // channel B
  pwm_setup(8, freq, 2);
  pwm_write_duty(8, zero);

  delay(5000);
}

void loop() {
  uint16_t sec = 60;

  float x0 = 0.003;
  float Imax = -1.6;
  float Umax = -4.24;
  float Imaxp = (-1)*Imax;
  float freq = 12200.436;

  uint32_t pulse = 0;
  uint32_t pulses = sec*freq;

  // current controller
  float Kpi = 49.32;
  float Kii = 3000;

  // distance controller
  float Kpx = 1368;
  float Kdx = 42.15;
  float Kix = 1587;

  float timediff = 1/freq;
  float sumx = 0;
  float sumia = 0;
  float sumib = 0;

  float Kfi = 1/(0.0005*freq);
  float Kfx = 1/(0.001*freq);
  float ipa = 0;
  float ipfa = 0;
  float ipb = 0;
  float ipfb = 0;
  float xp = 0.006;
  float xpf = 0.006;

  uint16_t iadca;
  uint16_t iadcb;
  uint16_t xadc;
  uint8_t duty9;
  uint8_t duty8;

  float ia;
  float iifa;
  float ib;
  float iifb;
  float x;
  float xf;
  float xe;
  float xep;
  float dxdt;
  float ira;
  float irb;
  float iea;
  float ieb;
  float ura;
  float urb;

  while(pulse < pulses)
  {
    while(!pwm_interrupt(9));

    iadcb = analogRead(A1);
    ib = iadcb*0.000488;
```

```

// filter for i1
iifb = ipfb + Kfi*(ipb - (ipfb));

iadca = analogRead(A0);
ia = iadca*0.000488;
// filter for i2
iifa = ipfa + Kfi*(ipa - (ipfa));

xadc = analogRead(A5);
x = xadc*0.0000017;
// filter for x
xf = xpf + Kfx*(xp - (xpf));

xpf = xf;
xp = x;
ipfa = iifa;
ipa = ia;
ipfb = iifb;
ipb = ib;

xe = x0 - xf;
sumx += xe/freq;
dxdt = (xe - (xep))/timediff;
ira = sumx*Kix + dxdt*Kdx + xe*Kpx;
xep = xe;

if (ira < Imax) {
    ira = Imax;
}
else if (ira > 0) {
    ira = 0;
}

if (x < 0.0005) {
    sumx = 0;
    sumia = 0;
    sumib = 0;
    ira = 0;
}
else if (x > 0.0055) {
    sumx = 0;
    sumia = 0;
    sumib = 0;
    ira = Imax;
}

irb = ((-1)*ira) - Imaxp;
ieb = irb + iifb;
sumib += ieb/freq;
urb = sumib*Kii + ieb*Kpi;

if (urb < Umax) {
    urb = Umax;
}
else if (urb > 0) {
    urb = 0;
}

iea = ira + iifa;
sumia += iea/freq;
ura = sumia*Kii + iea*Kpi;

if (ura < Umax) {
    ura = Umax;
}
else if (ura > 0) {
    ura = 0;
}

duty9 = 51.8*ura + 221;
duty8 = 53.6*urb + 222;

if (duty9 >= 221) {
    duty9 = 235;
}
if (duty8 >= 222) {
    duty8 = 235;
}

pwm_write_duty(9, duty9);
pwm_write_duty(8, duty8);
pulse++;
}

pwm_write_duty(9, 255);
pwm_write_duty(8, 255);
while(1);
}

```

Napät'ová schéma pre ATSAM3X8E

```
#include "pwm.h"

void setup() {
  // motor shield pins
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(11, OUTPUT);
  pinMode(12, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(8, OUTPUT);
  pinMode(9, OUTPUT);

  digitalWrite(3, HIGH);
  digitalWrite(12, LOW);
  digitalWrite(11, HIGH);
  digitalWrite(13, LOW);

  // setting pwm
  uint16_t freq = 16470;
  uint8_t zero = 255;
  analogReadResolution(12);

  // channel A
  uint32_t tt = pwm_setup(9, freq, 2);
  pwm_write_duty(9, zero);
  pwm_enable_interrupt(9);
  // channel B
  pwm_setup(8, freq, 2);
  pwm_write_duty(8, zero);

  delay(5000);
}

void loop() {
  uint16_t sec = 60;

  float x0 = 0.003;
  float Imax = -1.6;
  float Umax = -4.24;
  float Umaxp = (-1)*Umax;
  float freq = 16470.588;

  uint32_t pulse = 0;
  uint32_t pulses = sec*freq;

  // current controller
  float Kpi = 49.32;
  float Kii = 3000;

  // distance controller
  float Kpx = 1368;
  float Kdx = 42.15;
  float Kix = 1587;

  float timediff = 1/freq;
  float sumx = 0;
  float sumi = 0;

  float Kfi = 1/(0.0005*freq);
  float Kfx = 1/(0.001*freq);
  float ip = 0;
  float ipf = 0;
  float xp = 0;
  float xpf = 0;
  float xep = 0;

  uint16_t iadc;
  uint16_t xadc;
  uint8_t duty9;
  uint8_t duty8;

  float i;
  float iif;
  float x;
  float xf;
  float xe;
  float dxdt;
  float ir;
  float ie;
  float ur;

  while(pulse < pulses)
  {
    while(!pwm_interrupt(9));

    iadc = analogRead(A0);
    i = iadc*0.000488;
    // filter for i
    iif = ipf + Kfi*(ip - (ipf));

    xadc = analogRead(A5);
    x = xadc*0.0000017;
    // filter for x
    xf = xpf + Kfx*(xp - (xpf));

    xpf = xf;
    xp = x;
    ipf = iif;
    ip = i;

    xe = x0 - xf;

    sumx += xe/freq;
    dxdt = (xe - (xep))/timediff;
    ir = sumx*Kix + dxdt*Kdx + xe*Kpx;
    xep = xe;

    if (ir < Imax) {
      ir = Imax;
    }
    else if (ir > 0) {
      ir = 0;
    }
  }
}
```

```

ie = ir + iif;
sumi += ie/freq;
ur = sumi*Kii + ie*Kpi;

if (ur < Umax) {
    ur = Umax;
}
else if (ur > 0) {
    ur = 0;
}

if (x < 0.0005) {
    sumx = 0;
    sumi = 0;
    ur = 0;
}
else if (x > 0.0055) {
    sumx = 0;
    sumi = 0;
    ur = Umax;
}

duty9 = 51.8*ur + 221;
duty8 = 53.6*((-1)*ur) - Umaxp) + 222;

if (duty9 >= 221) {
    duty9 = 235;
}
if (duty8 >= 222) {
    duty8 = 235;
}

pwm_write_duty(9, duty9);
pwm_write_duty(8, duty8);
pulse++;
}

pwm_write_duty(9, 255);
pwm_write_duty(8, 255);
while(1);
}

```

Algoritmus pre ATmega 328p

```
#ifndef sbi
#define sbi(sfr, bit) (_SFR_BYTE(sfr) |= _BV(bit))
#endif

void setup()          // run once, when the sketch starts
{
  sbi(ADCSRA,ADPS2);
  Serial.begin(115200);
}

void loop()          // run over and over again
{
  uint16_t v = EndAnalogRead();
  StartAnalogRead(0);
  uint8_t data = v/2.4375;
  Serial.write(data);
}

void StartAnalogRead(uint8_t pin)
{
  // set the analog reference (high two bits of ADMUX) and
  // select the
  // channel (low 4 bits). this also sets ADLAR (left-adjust
  // result)
  // to 0 (the default).
  ADMUX = (DEFAULT << 6) | (pin & 0x07);
  //ADMUX |= _BV(ADLAR);

  #if defined(__AVR_ATmega1280__)
  // the MUX5 bit of ADCSRB selects whether we're reading
  // from channels
  // 0 to 7 (MUX5 low) or 8 to 15 (MUX5 high).
  ADCSRB = (ADCSRB & ~(1 << MUX5)) | (((pin >> 3) &
  0x01) << MUX5);
  #endif
  // without a delay, we seem to read from the wrong channel
  //delay(1);

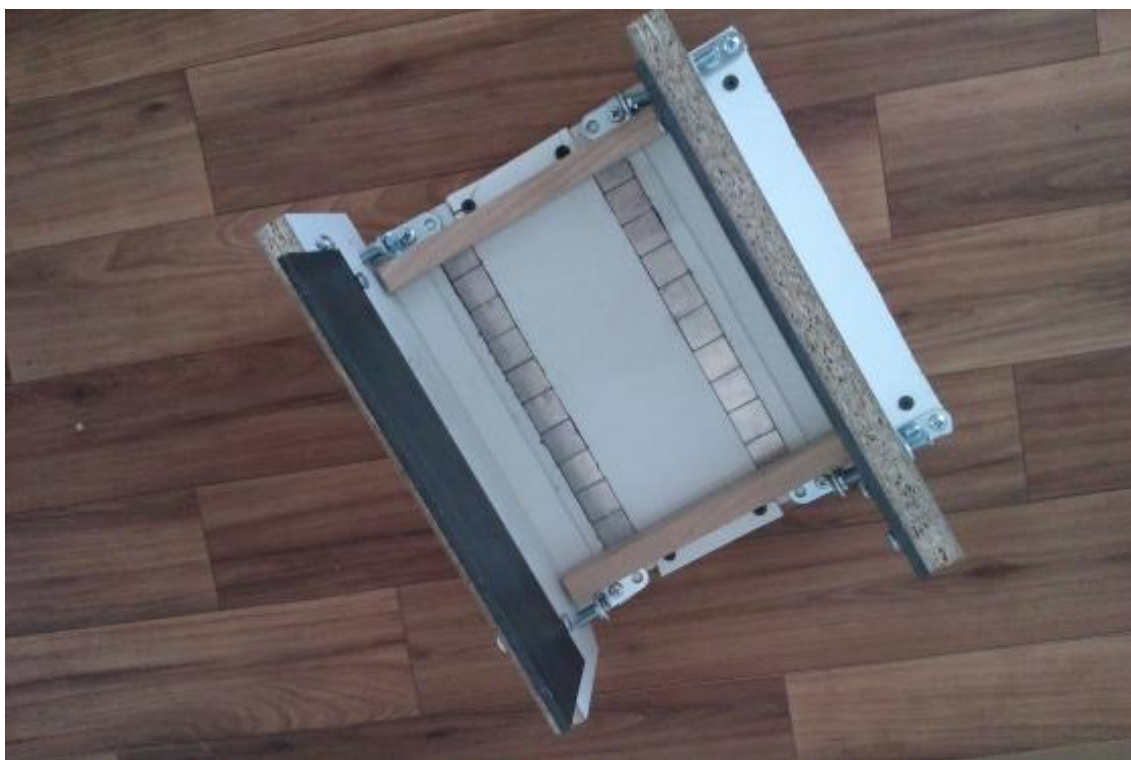
  // start the conversion
  sbi(ADCSRA, ADSC);
}

uint16_t EndAnalogRead()
{
  // ADSC is cleared when the conversion finishes
  while (bit_is_set(ADCSRA, ADSC));

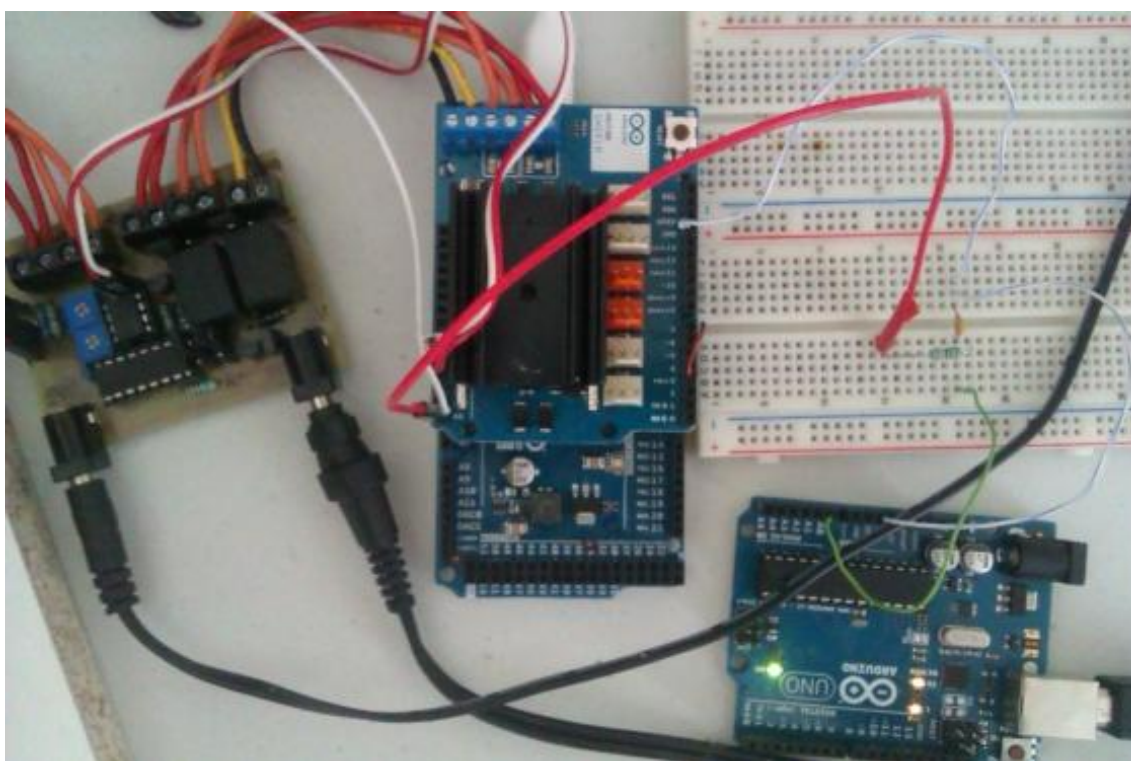
  // we have to read ADCL first; doing so locks both ADCL
  // and ADCH until ADCH is read. reading ADCL second
  // would
  // cause the results of each conversion to be discarded,
  // as ADCL and ADCH would be locked when it
  // completed.

  uint8_t low = ADCL;
  return ((ADCH&3)*255 + low);
}
```

Príloha I



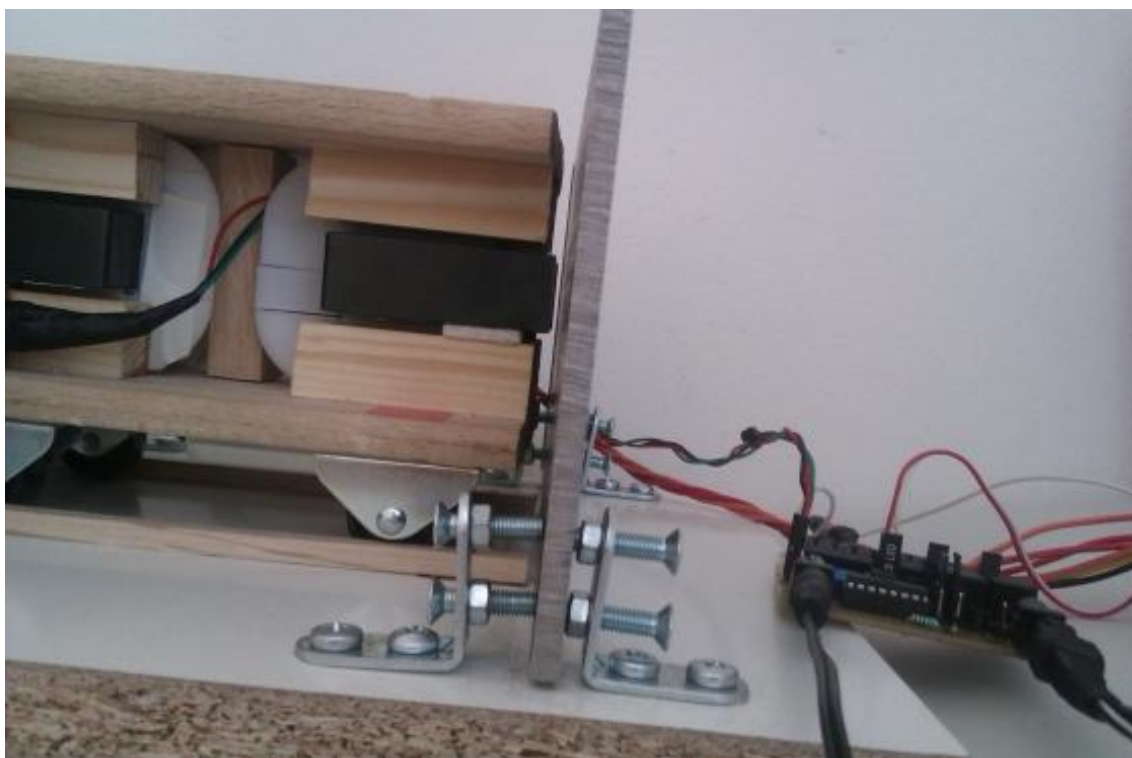
Realizovaná magnetická dráha



Riadiaca a vyhodnocovacia elektronika, realizovaný modul



Stabilizácia na naklonenej rovine (elektromagnet A)



Stabilizácia na naklonenej rovine (elektromagnet B)