

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2019

**PAVEL
BLAŽEK**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Blažek** Jméno: **Pavel** Osobní číslo: **464535**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**
Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Jak pracuje Maglev

Název bakalářské práce anglicky:

How does Maglev work

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je rešerše a návrh laboratorního modelu systému Maglev.

- 1) rešerše jak systém Maglev funguje
- 2) návrh jednoduchého laboratorního modelu
- 3) otestování a předvedení funkčnosti modelu

Seznam doporučené literatury:

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

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

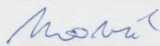
doc. Ing. Martin Novák, Ph.D., odbor elektrotechniky FS

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

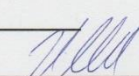
Datum zadání bakalářské práce: **26.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **12.06.2019**

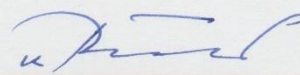
Platnost zadání bakalářské práce: _____



doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



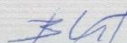
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

26-04-2019

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Poděkování

Touto cestou bych chtěl poděkovat doc. Ing. Martinu Novákovi, Ph.D., za odborné vedení práce, cenné rady a čas, který mi věnoval během zpracování této bakalářské práce.

Děkuji také mým rodičům, sestře a příbuzným za podporu v průběhu mého studia.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a pod vedením vedoucího práce.

Datum:

.....

Podpis

Anotační list

Název práce:

Jak pracuje Maglev

Autor:

Pavel Blažek

Ústav:

Ústav přístrojové a řídicí techniky

Vedoucí práce:

doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.

Anotace:

Práce se zabývá systémem Maglev, zejména principem fungování jednotlivých konstrukčních typů této technologie a základní problematikou elektromagnetismu. Dále popisuje výrobu jednoduchého prototypu a posléze finálního laboratorního modelu Maglev s příslušným hardwarem a softwarem.

Klíčová slova:

Maglev, cívka, magnetismus, levitace

Abstract:

The work deals with the Maglev system, especially with the principle of the functioning of individual design types of this technology and the basic issues of elektromagnetism. It also describes the production of a simple prototype and then the final Maglev laboratory model with appropriate hardware and software.

Keywords:

Maglev, coil, magnetism, levitation

Obsah

1. Úvod	8
2. Vztah mezi elektrickým a magnetickým polem	9
2.1. Lorentzova a Ampérova síla	9
2.2. Biotův-Savartův zákon	9
2.3. Magnetické pole solenoidu, Ampérův zákon	11
3. Magnetická levitace ve vlakové dopravě	13
4. Typy systému Maglev	14
4.1. EMS systém	14
4.1.1. Levitace a boční navádění	14
4.1.2. Propulze	15
4.1.2.1. Lineární synchronní motor s dlouhým statorem	15
4.1.2.2. Lineární indukční motor s krátkým statorem	16
4.2. EDS systém	16
4.2.1. Supravodivost a její vlastnosti	16
4.2.2. Supravodiče	17
4.2.3. Levitace a boční navádění	17
4.2.4. Propulze a řazení cívek	18
5. Laboratorní model	19
5.1. Cíl práce	19
5.2. Základní vize modelu	19
5.3. Výběr prvků pro laboratorní model	19
5.4. Výroba prototypu	21
5.4.1. Základní principy funkce	21
5.4.1.1. Řešení levitace	21
5.4.1.2. Řešení bočního navádění	22
5.4.1.3. Řešení pohybu	22
5.4.1.4. Ovládání	23
5.4.2. Zkušební úsek tratě	24
5.4.3. Dimenzování jádra cívek	25

5.4.4.	Volba drátu	25
5.4.5.	Výběr permanentních magnetů	26
5.4.6.	Použité elektronické prvky	27
5.4.6.1.	Arduino Mega 2560.....	27
5.4.6.2.	Optický člen.....	27
5.4.6.3.	Schottkyho dioda	27
5.4.6.4.	Tranzistor.....	27
5.4.7.	Zapojení	28
5.4.7.1.	Obvod se snímačem CNY 70	28
5.4.7.2.	Obvod s cívkami.....	28
5.5.	Vývoj prototypu	29
5.5.1.	První zkouška – levitace	29
5.5.2.	Druhá zkouška – levitace	30
5.5.3.	Třetí zkouška – pohyb.....	31
5.5.4.	Čtvrtá zkouška	32
5.5.5.	Pátá zkouška	32
5.6.	Výroba modelu.....	33
5.6.1.	Konstrukce modelu	33
5.6.2.	Cívky.....	34
5.6.3.	Model vlaku	35
5.6.4.	Elektronika.....	35
5.6.4.1.	Driver servomotorů PCA9685.....	36
5.6.4.2.	DPS se snímači CNY 70.....	36
5.6.4.3.	DPS s tranzistory	37
6.	Měření.....	37
7.	Kompletní sestava	38
8.	Závěr.....	39
9.	Použité zdroje	40
10.	Přílohy.....	41

1. Úvod

Maglev je název pro moderní způsob vlakové dopravy. Jedná se o technologii přepravy postavené na principu magnetické levitace, podle níž byla také pojmenována. Interakcí mezi magnetickými komponenty budící magnetické pole je vlak nadnášen, veden a poháněn bez kontaktu se zemí. V dnešní době se jedná o vysokorychlostní pozemní dopravu vyznačující se vysokou bezpečností, spolehlivostí, nízkou spotřebou a šetrností vůči životnímu prostředí. [1]

Tato práce se zabývá problematikou systému Maglev a její obsah vznikl na základě zadání práce. Mým úkolem bylo napsat odbornou rešerši na téma Maglev a sestavit jednoduchý funkční laboratorní model využívající principy magnetické levitace, na kterém jsem měl ukázat, jakým způsobem tato technologie pracuje. Rozdělil jsem tedy text na dvě hlavní části.

Obsahem první části je odborná rešerše, která se zabývá zákony elektromagnetismu pro lepší pochopení fyzikálních pojmů, které jsem během psaní použil. Dále zahrnuje popisy některých základních typů systému Maglev, zejména principy, na kterých fungují a jejich porovnání.

Druhá část je rozsáhlejší a obsahuje řešení praktického úkolu. Je rozdělena do několika podkapitol, které sledují vývoj zkušebního prototypu až k sestavení finálního modelu. Při stavbě jsem se inspiroval bakalářskou prací [2], která na toto téma v minulosti vznikla a já tak mohl využít některých poznatků, ke kterým její autor dospěl. Vzhledem k tomu, že systém Maglev je velice pokročilá technologie, bylo nelehkým úkolem postavit funkční model na základě toho, co mi mohla nabídnout školní laboratoř a zároveň využít dostupných a cenově nenáročných materiálů. Proto jsem často improvizoval a byl nucen měnit svá rozhodnutí. Celkový vývoj prototypu byl doprovázen řadou neúspěšných zkoušek, ale zároveň nezbytných k dosažení správné funkce finálního modelu.

2. Vztah mezi elektrickým a magnetickým polem

2.1. Lorentzova a Ampérova síla

Pohybuje-li se náboj o velikosti q a rychlostí \vec{v} v magnetickém poli, působí na něj tzv. Lorentzova síla \vec{F} daná vztahem

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

kde \vec{B} je vektor magnetické indukce.

Protéká-li elektrický proud vodičem umístěným v homogenním magnetickém poli, působí na celý vodič součet Lorentzových sil, neboť elektrický proud vzniká pohybem nabitých částic. Tato výsledná síla se nazývá Ampérova síla.

Pokud uvažují tenký vodič o délce l , který se nachází v homogenním magnetickém poli definovaným vektorem magnetické indukce \vec{B} , lze spočítat velikost síly působící na pohybující se nabitě částice, tedy na celý vodič o délce l . Protékající proud má velikost $\vec{I} = \tau\vec{v}$, kde τ je lineární hustota náboje a je rovna $\tau = dQ/dl$. Vektor rychlosti \vec{v} náboje je tečnou k vodiči v uvažovaném bodě a platí tedy $d\vec{l} \uparrow\uparrow \vec{I}$. Elementární magnetická síla, která působí na elementární úsek vodiče má velikost

$$d\vec{F} = dQ\vec{v} \times \vec{B} = \tau dl\vec{v} \times \vec{B} = I d\vec{l} \times \vec{B}. \quad (2)$$

Po integraci je celková síla rovna

$$\vec{F} = \int_0^l (I d\vec{l} \times \vec{B}) = I\vec{l} \times \vec{B}. \quad (3)$$

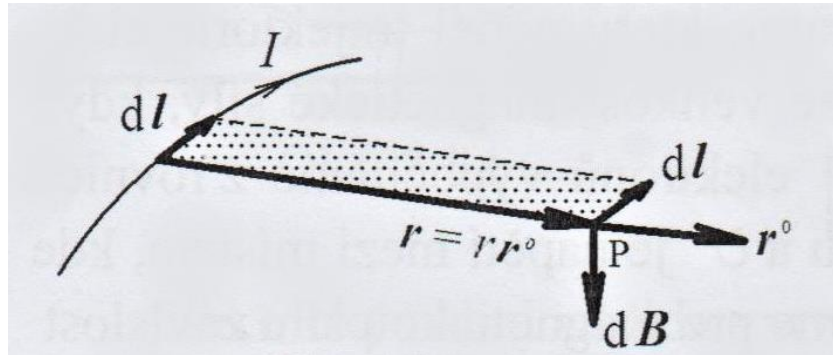
2.2. Biotův-Savartův zákon

Zákon říká, že protéká-li elektrický proud vodičem, vytvoří se kolem něj magnetické pole, které je popsáno rovnicí

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I(d\vec{l} \times \vec{r}^0)}{r^2}, \quad (4)$$

kde $d\vec{B}$ je elementární příspěvek magnetické indukce v bodě P od elementárního úseku $d\vec{l}$ vodiče o délce l , jenž je orientován ve směru tekoucího proudu. Vektor $\vec{r} = r\vec{r}^0$ spojuje

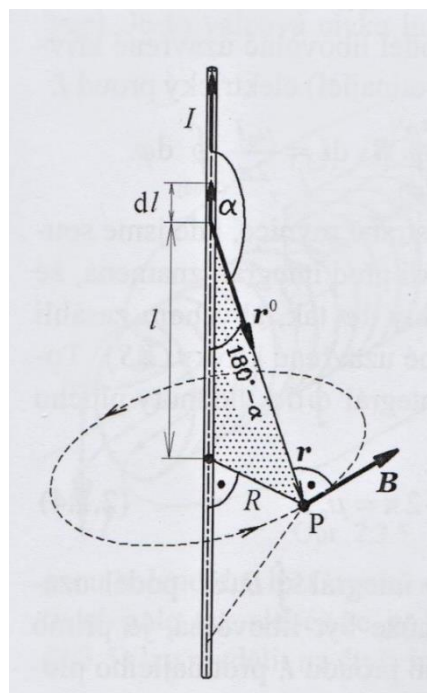
počátek vektoru elementu délky vodiče se zvoleným bodem P v prostoru, ve kterém chceme zjistit magnetickou indukci \vec{B} . Permeabilita vakua je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.



Obr. 1 Grafické znázornění zákona [3]

Je nutné si uvědomit, že všechny elementární příspěvky $d\vec{B}$ jsou kolmé k rovině, určené bodem P a osou vodiče. Rovnici (4) lze přepsat na tvar

$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}. \quad (5)$$



Obr. 2 Magnetické pole kolem dlouhého přímého tenkého vodiče [3]

Integrací získáme velikost magnetické indukce v bodě P od nekonečně dlouhého vodiče

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{(\infty)} \frac{dl \sin \alpha}{r^2} \quad (6)$$

a platí, že $l = R \cotg(180 - \alpha) = -R \cotg(\alpha)$. Tedy $dl = (R / \sin^2 \alpha) d\alpha$ a $R = r \sin \alpha$. Uvažují-li konstantní proud a vzdálenost R bodu P od proudu I tak platí, že

$$B = \int_0^\pi \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R}{\sin^2 \alpha} \frac{\sin^2 \alpha}{R^2} \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}. \quad (7)$$

2.3. Magnetické pole solenoidu, Ampérův zákon

Jak již bylo popsáno výše, přímý vodič, kterým protéká elektrický proud, kolem sebe vytváří magnetické pole a magnetické indukční čáry jsou v tomto případě uzavřené křivky – kružnice. Vektor magnetické indukce je rovnoběžný s elementárním úsekem této křivky dl a platí tedy

$$\vec{B} \cdot d\vec{l} = B dl \quad (8)$$

Křivkový integrál po uzavřené křivce o poloměru r z magnetické indukce \vec{B} je roven

$$\oint_{(kružnice)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = B 2\pi r. \quad (9)$$

Po dosazení vztahu (7) dostaneme

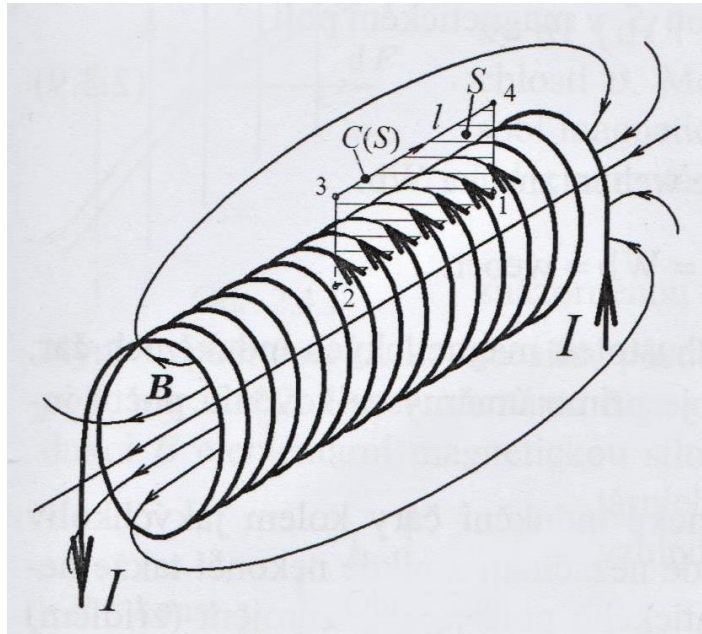
$$\frac{\mu_0 I}{2\pi r} 2\pi r = \mu_0 I. \quad (10)$$

Směr magnetické indukce je určen pravidlem pravé ruky. Palec ukazuje směr proudu a prsty následují směr magnetické indukce \vec{B} .

Dalším případem je vinutý solenoid, který mě zajímá z hlediska technologie Maglev nejvíce. Proud tekoucí cívku vytváří kolem solenoidu magnetické pole, které je charakteristické tím, že uvnitř cívky se vektory magnetické indukce orientují ve směru osy cívky, se kterou jsou rovnoběžné. Vystupují z ní na koncích a na vnější straně

solenoidu se uzavírají. Znamená to tedy, že lze solenoid využít jako permanentní magnet, ve kterém směr proudu určí orientaci magnetického pole. Na obr. 3 je vyznačena integrační cesta C , čímž je obdélník s vrcholy 1234. Platí, že

$$\oint_{C(S)} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \int_1^2 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_2^3 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_3^4 \vec{B} \cdot d\vec{l} + \int_4^1 \vec{B} \cdot d\vec{l} \quad (11)$$



Obr. 3 Magnetické pole solenoidu [3]

Vně solenoidu je magnetické pole velice slabé, lze ho tedy považovat za nulové. Na úseku 23 a 14 je magnetická indukce \vec{B} kolmá na $d\vec{l}$ integrační křivky a integrály tedy považují také za nulové. Integruji pouze na úseku 12, kde je magnetická indukce \vec{B} rovnoběžná s $d\vec{l}$ integrační křivky. Platí tedy

$$\int_1^2 \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \int_1^2 dl = Bl \quad (12)$$

$$Bl = \mu_0 \sum I. \quad (13)$$

Vyznačenou plochou protéká součet proudů

$$\sum I = nI, \quad (14)$$

kde n je počet závitů solenoidu ve vyznačené oblasti. Získáváme vztah

$$B = \frac{\mu_0 n I}{l} = \mu_0 z I, \quad (15)$$

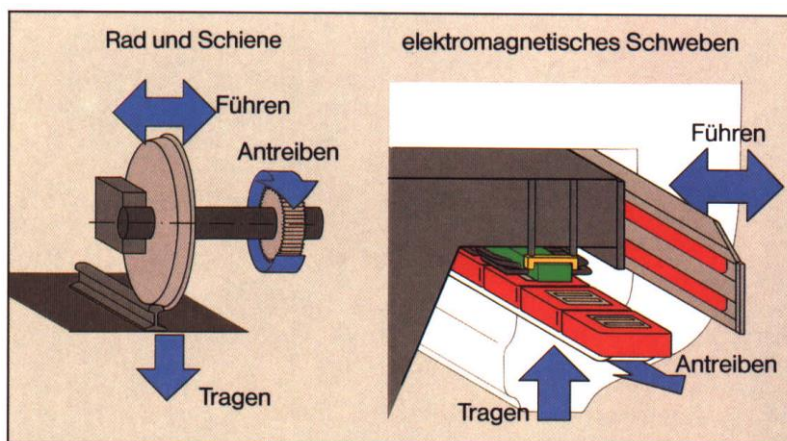
kde z [počet závitů/m] je hustota závitů.

Velikost magnetické indukce vinutého solenoidu je tedy funkcí elektrického proudu a počtu závitů. [3]

3. Magnetická levitace ve vlakové dopravě

V tradiční koncepci kolejového vozidla je zajištěn pohyb, podpora a vedení vozidla pomocí kol dotýkajících se kolejnic. Kroutící moment z motoru je přenášen na kola jejichž kuželový tvar a okolek navádí vlak a zabraňují vykolejení.

Vlaky využívající magnetickou levitaci se nedotýkají během provozu tratě, po které jedou. Kola jsou nahrazena silou, kterou je vůz nadnášen, veden a poháněn. Obecně jsou trať či vlak vybaveny elektromagnety produkující potřebnou magnetickou sílu, která je řízená snímači, zajišťující přesný odstup od dráhy. Mechanika je zde tedy nahrazena elektronikou. Historie vývoje systému Maglev je velice bohatá a přinesla s sebou řadu experimentů a prototypů, přičemž každý typ s sebou nese svá specifika. Širší uplatnění si našly dva základní systémy: EDS a EMS systém. [4]



Obr. 4 Základní rozdíl mezi kolejovým vozidlem a systémem Maglev [4]

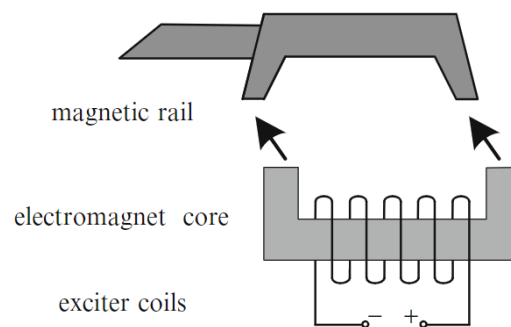
4. Typy systému Maglev

4.1. EMS systém

EMS (electromagnetic suspension) využívá elektromagnety umístěné na spodní straně vlaku, které produkují magnetické pole a tím se přitahují k feromagnetické trati. [5]

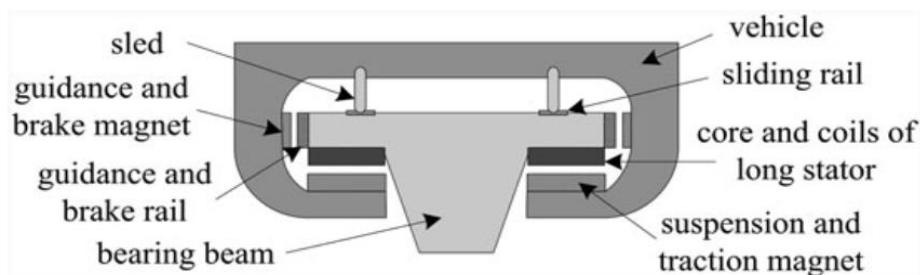
4.1.1. Levitace a boční navádění

V praxi se uplatnily dvě technologie levitace a bočního navádění. První z nich sjednocuje levitační i naváděcí elektromagnety systému EMS v jeden velký elektromagnet. Toto konstrukční řešení reprezentuje např. model HSST vyvinutý v Japonsku. [1] Levitace a boční navádění je zde realizováno jedním druhem elektromagnetů. Na obr. 5 je vidět, že pokud vlak mírně vybočí, je přitahován zpět do středu dráhy. Přitažlivá síla, která vlak navádí, je ale relativně malá, proto se tento typ vlaku hodí pro městskou dopravu kvůli nízkým provozním rychlostem. [5]



Obr. 5 Jeden elektromagnet zajišťuje levitaci a vedení, typ HSST [5]

Dalším řešením je oddělení levitačních a vodících elektromagnetů EMS systému. Německý Transrapid využívající tuto konstrukci je vybaven rozsáhlým nosným a vodícím systémem. Trať obsahuje řadu nosných i vodících elektromagnetů, které jsou samostatně řízené indukčními snímači. Ty zajišťují dostatečný odstup od trati. [5] Podpůrné elektromagnety na vlaku přitahují ze spodu vůz směrem vzhůru k feromagnetické trati a snaží se překonat tíhu vlaku stejně jako v případě HSST. Vzdálenost mezi elektromagnety a trati je 10 mm. Na bocích je odstup mezi vlakem a trati 15 cm. Každý oddíl vlaku je vybaven více než 15 nosnými a 13 vodícími magnety. Oddělení cívek a rozsáhlá aktivní kontrola vzduchových mezer umožňuje dosáhnout vysokých rychlostí až 500 km/h a na rozdíl od typu HSST se Transrapid využívá k meziměstské dopravě jako vysokorychlostní dopravní prostředek. [4]



Obr. 6 Podpůrný systém Transrapid [5]

4.1.2. Propulze

Pohyb vlaku směrem vpřed či vzad je realizován lineárním motorem. Vlaky Maglev využívají zejména dvou typů a sice lineární synchronní motor s dlouhým státorem a lineární indukční motor s krátkým státorem.

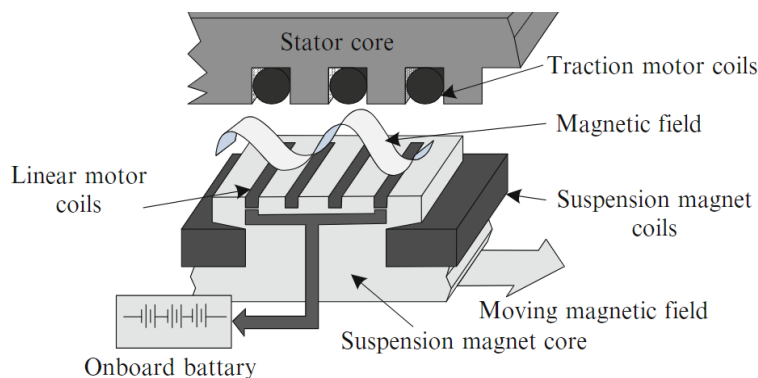
4.1.2.1. Lineární synchronní motor s dlouhým státorem

Lineární synchronní motor s dlouhým státorem využívá např. typ Transrapid. Státorem je zde myšlena trať a rotorem je samotný vlak. Elektrická energie je zde vzájemnou indukcí přenášena z tratě na vlak bez mechanického kontaktu při vysokých rychlostech. Proto je tento typ lineárního motoru vhodný pro vysokorychlostní vlaky Maglev. [5]

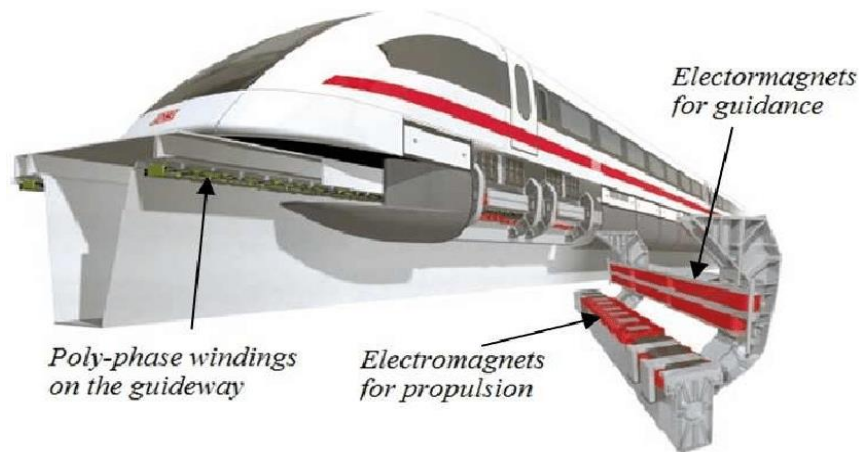
Mezi elektromagnety vlaku Transrapid a feromagnetickou trať jsou zabudovány pakety s třífázovým vinutím. Toto vinutí produkuje proměnlivé „cestující“ magnetické pole, které žene vlak kupředu. Se státorem interagují elektromagnety na vlaku, které svým magnetickým polem následují pole vyvolané třífázovým vinutím. Tedy rychlost vlaku je zde závislá na frekvenci třífázového napětí.

Velice výhodné je řešení napájení trati elektrickým proudem. Trať je rozdělena na segmenty a vždy je napájen ten segment, kterým vlak zrovna projíždí. [4]

Spotřeba celého zařízení je 160 kW. Do rychlosti 100 km/h je vlak napájen z baterií na palubě. Nad rychlostí 100 km/h začínají napájet vlak lineární generátory a přenos je bezkontaktní. Za normálního provozu jsou baterie na palubě nabitě, energie se poté využívá k zastavení vlaku. [5]



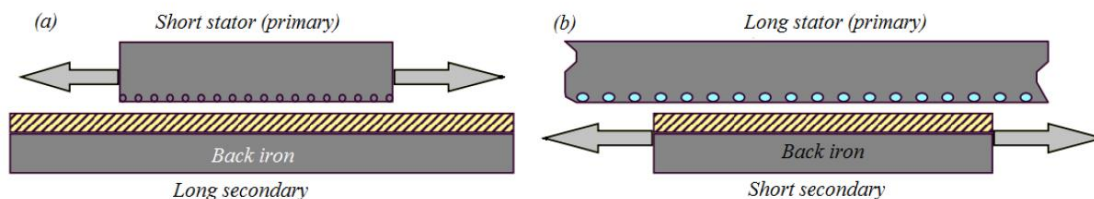
Obr. 7 Princip fungování lineárního synchronního motoru s dlouhým státorem [5]



Obr. 8 Řazení elektromagnetů v systému Transrapid [1]

4.1.2.2. Lineární indukční motor s krátkým statorem

Tento motor používá nízkorychlostní model HSST. Je sice cenově méně nákladný, avšak jeho výkon a efektivita jsou nízké. Přenos energie je prováděn kontaktně mezi tratí a jedoucím vozidlem, což je jedním z důvodů, proč je používán u nízkorychlostních vlaků Maglev dosahujících rychlostí okolo 100 km/h. [5]



Obr. 9 Porovnání lineárního indukčního motoru s krátkým a dlouhým statorem [1]

4.2. EDS systém

EDS (electrodynamic suspension) využívá ve svých cívkách supravodivé materiály, jejichž magnetické pole produkuje dostatečně velké elektromagnetické odpuzující se síly, umožňující levitaci a pohyb vlaku. EDS systém využívá elektromagnetické indukce. Rychlým pohybem vlaku se supravodivými magnety vůči cívkám na trati se indukuje v těchto cívkách napětí, které vyvolá vznik magnetického pole opačného směru. Výsledkem je odpudivá síla působící mezi zdrojem magnetického pole, tedy supravodivou cívkou a indukovaným polem. Tento systém je reprezentován např. japonským typem MLX01. [1]

4.2.1. Supravodivost a její vlastnosti

Supravodivost je stav materiálu, jehož odpor je zanedbatelně malý až nulový.

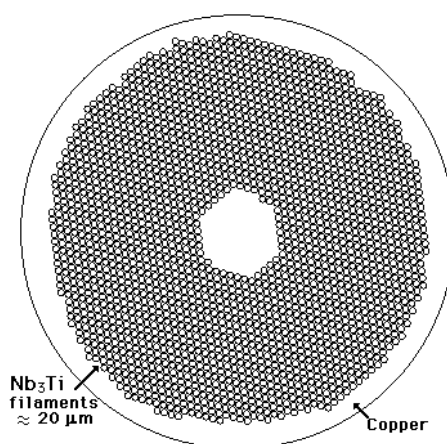
Nulový odpor je příčinou nulové disipace energie. To znamená, že v prstenci přivedeném do stavu supravodivosti protéká proud teoreticky nekonečně dlouho. Stav supravodivosti lze dosáhnout ochlazením vodiče na tzv. kritickou teplotu. [6]

Chování magnetického pole supravodiče popisuje Meissnerův efekt. Magnetické indukční čáry supravodivého materiálu přivedeného do stavu supravodivosti jsou vytlačeny vně vodiče na rozdíl od klasického vodiče, jímž procházejí magnetické indukční čáry přímo. Magnetické pole vně vodiče umožňuje vytvoření větších sil. [7]

4.2.2. Supravodiče

Vlaky Maglev, jako již zmiňovaný typ MLX01, založené na systému EDS, využívají ve svých elektromagnetech zejména slitinu Nb-Ti. [8] Vodič, ze kterého je supravodivý magnet vyroben, obsahuje velice tenká vlákna z této slitiny, která jsou zalitá v měděné matrici. Měď zde zajišťuje mechanickou stabilitu, ochranu vláken a vede proud, pokud dojde ke ztrátě supravodivosti. [9]

Supravodič je nutné chladit např. tekutým heliem. Při podchlazení na kritickou teplotu 10 K vytváří magnetické pole o velikosti až 15 T [10].

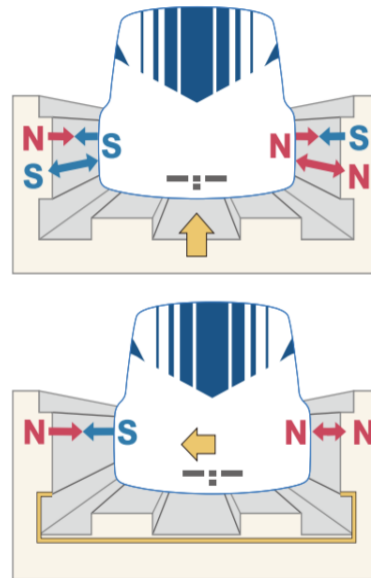


Obr. 10 Řez supravodičem [11]

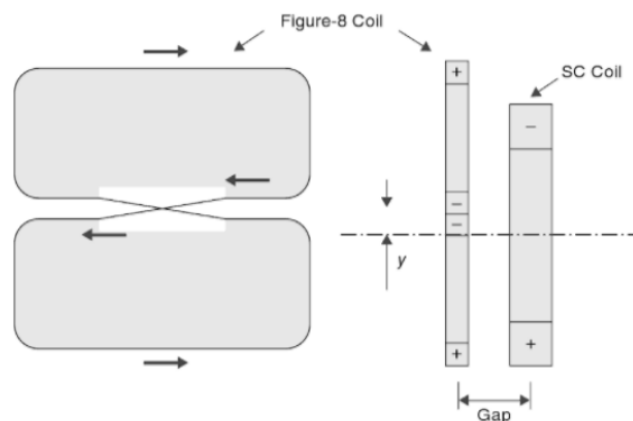
4.2.3. Levitace a boční navádění

Levitace je dosažena odpuzující se silami mezi supravodivými cívkami umístěnými na bokách vlaku a mezi levitačními cívkami, které mají přesně definovaný tvar a které jsou součástí betonové U-tratě. Tyto cívky mají tvar čísla 8. Pohybem vlaku nesoucí elektromagnety je v nich indukováno napětí a protékající proud takto tvarovanou cívkou separuje její magnetické pole na horní a dolní opačně orientovanou část. Jejich pozice je znázorněna na obr. 12. Řízení výšky je zde realizováno tak, že pokud klesne vlak příliš nízko pod určitou výškovou hladinu, je vytlačen odpudivou silou vyvolanou ve spodní smyčce a zároveň přitažen silou generovanou magnetickým polem horní smyčky. Proces pracuje i naopak.

Boční vedení je zajištěno indukcí proudu v cívkách způsobené přiblížením vlaku k jedné ze stran tratě. Inducí vznikne odpuzivá síla mezi supravodivými magnety a tratí a vlak je vtlačen zpět do středu trati. Princip je znázorněn na obr. 11. [12]



Obr. 11 Princip levitace a bočního navádění [12]



Obr. 12 Tok proudu v cívce ve tvaru osm [12]

4.2.4. Propulze a řazení cívek

Pohyb pracuje na principu tradičního lineárního synchronního motoru s dlouhým státorem stejně jako v případě systému Transrapid. V tomto případě je státorem opět trať, konkrétně betonová U-trať a rotorem je vlak. Stator je zde napájen třífázovým střídavým napětím, které vytváří proměnlivé „cestující“ magnetické pole, které vlak následuje. [5]

K tomu, aby mohl vlak fungovat na výše popsaném principu, musí dosáhnout určité rychlosti, aby došlo k indukci napětí v levitačních cívkách, a tedy k vzniku dostatečně velké odpuzivé síly, která překoná tíhu vozu. Než zrychlí na požadovanou rychlost nutnou ke vzniku dostatečně velké indukce, využívá přídatná kola. Po dosažení rychlosti cca 150 km/h vůz vzlétne. [1]

5. Laboratorní model

5.1. Cíl práce

Cílem praktické části této práce bylo navrhnout a postavit jednoduchý laboratorní model systému Maglev s využitím poznatků pospaných v teoretické části této práce a ukázat na něm, jak systém Maglev funguje.

Úkolem tedy bylo sestrojít nejen hardware zahrnující samotný model vlaku, úsek trati a elektroniku, ale i vytvořit program, který bude řídit levitaci a pohyb vlaku. Inspirací při návrhu elektroniky mi byla bakalářská práce [2], která vznikla na podobné téma v minulosti.

Text věnovaný praktické části práce se v prvních kapitolách zabývá porovnáním systémů EMS a EDS a výběru prvků pro můj laboratorní model. Následuje popis principu, na kterém model funguje a samotný vývoj zkušebního prototypu, návrh elektroniky, programu a jeho testování. Bakalářská práce končí popisem finálního modelu, který vznikl na základě funkčního prototypu.

5.2. Základní vize modelu

Kompaktní laboratorní model celého systému Maglev by se měl sestávat z rovného úseku trati, nad kterým se vznáší levitující model vlaku. Trať je vybavena snímači, které kontrolují levitaci vlaku a cívkami produkující magnetické pole. Elektrifikovaná je tedy trať, nikoliv vlak. Model vlaku je pouze konstrukce nesoucí permanentní magnety, které následují magnetické pole vyvolané cívkami na trati. Trať by měla být dlouhá přibližně 500 mm. Součástí modelu je i příslušná elektronika s programovací deskou, která řídí celý model. Kompletní model je ukotven na dřevěné desce.

5.3. Výběr prvků pro laboratorní model

Abych mohl sestrojít funkční model levitujícího vlaku s využitím dostupných prostředků, které mi mohla nabídnout školní laboratoř bylo nezbytné, stanovit si, jaké existují možnosti a co všechno jsem schopen využít. Začal jsem tím, že jsem porovnal oba systémy, tedy EDS a EMS, a vybral z nich prvky, které jsem byl schopen namodelovat, zjednodušit a vyrobit.

Tab. 1 srovnává pro přehlednost oba systémy a výstupem ve třetím sloupci jsou základní prvky, které pro mě byly výchozí a které jsem se rozhodl dále využít a upravit.

EMS	EDS	Zvolený prvek
Silové působení		
<i>Přitažlivé síly</i>	<i>Odpudivé síly</i>	<i>Přitažlivé síly</i>
Elektromagnety, vodiče		
<i>Klasický vodič</i>	<i>Supravodivý vodič</i>	<i>Klasický vodič</i>
Pohon		
<i>Lineární synchronní motor</i>	<i>Lineární synchronní motor</i>	<i>Jiná alternativa</i>
Tvar cívek		
<i>Kruhový tvar</i>	<i>Tvar čísla 8</i>	<i>Kruhový tvar</i>

Tab. 1 Rozhodovací tabulka pro výběr základních prvků pro model

První volbou byly působící síly. Ve svém modelu uvažuji malé rychlosti, proto vzájemná indukce nepřipadá v úvahu. Přitažlivé síly, na kterých je založen systém EMS, pracují při jakékoliv rychlosti bez použití podpůrných kol.

Systém EDS využívá supravodivých materiálů, které jsou nutné chladit kapalným heliem. Příprava takovýchto vodičů s chlazením by byla velice náročná. Zvolil jsem tedy klasický měděný vodič.

Společným prvkem pro oba systémy je princip propulze pracující jako lineární synchronní motor s dlouhým státorem. Pokud bych chtěl tento způsob trakce využít, potřeboval bych třífázové vinutí napájené třífázovým napětím. Jednodušším řešením bylo použít stejnosměrný zdroj napětí dostupný v laboratoři a pohyb modelu vlaku vpřed i vzad řídit algoritmem, který postupně spíná určité cívky – řídí jejich napájení stejnosměrným proudem.

Základem levitace je interakce magnetických polí vyvolaných permanentními magnety a elektromagnety. Vzhledem k tomu, že jsem se rozhodl pro využití přitažlivých sil, byly pro mě vhodné cívky klasického kruhového průřezu. Navíc jsou z hlediska výroby méně náročné než cívky ve tvaru 8.

Z této analýzy jsem usoudil, že při výrobě laboratorního modelu budu vycházet z konstrukčního řešení systému EMS, konkrétně typu Transrapid. Následující kapitola popisuje princip funkce prvního návrhu prototypu, použité materiály a řídicí prvky.

5.4. Výroba prototypu

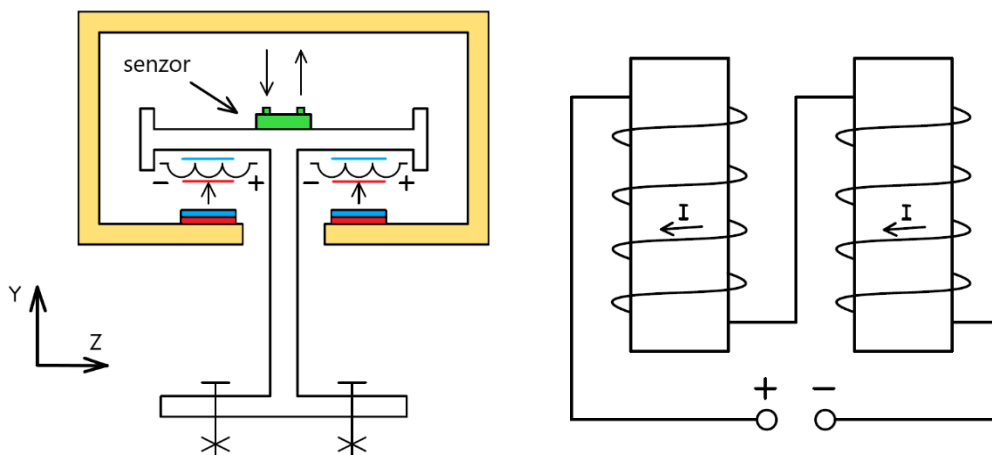
Výroba prototypu byla nezbytná k ověření mých předpokladů. Vyvíjel jsem tedy malý úsek trati s modelem vlaku a snažil se dosáhnout levitace a elementárního pohybu vlaku.

5.4.1. Základní principy funkce

5.4.1.1. Řešení levitace

Vycházel jsem z konstrukčního řešení vlaku Transrapid. Na obr. 13 je znázorněno na jakém principu měl pracovat můj laboratorní model. Trať ve tvaru T (znázorněna bíle) nese na spodní straně cívky. Ty jsou řazené v párech podél celé trati ve směru osy x. Na obr. 13 je znázorněn právě jeden pár – segment. Taková to dvojice cívek je spojena v sériovém zapojení tak, aby při průchodu proudu byla orientace vytvořeného magnetického pole u obou cívek stejná. Budou-li mít obě cívky stejný počet závitů a bude jimi protékat společný proud, tak podle vztahu (15) bude jejich velikost magnetické indukce stejná. Magnetické pole solenoidů bude reagovat s opačně orientovaným magnetickým polem permanentních magnetů umístěných na vlaku (znázorněn žlutě), a tak dojde k jeho přitažení vzhůru v ose y ke spodní straně trati. Na obr. 13 je orientace magnetického pole vyznačena barevně, přičemž červená značí severní pól a modrá jižní pól.

Aby vlak levitoval se zachováním konstantní mezery mezi magnety a cívkami, je nutné na trať nainstalovat optický člen (znázorněn zeleně), který sleduje, jak vysoko je vlak nad tratí. Těchto snímačů je podél tratě v ose x umístěno několik, abych mohl řídit výšku kdekoliv během provozu. Pokud je vlak příliš nízko, tak zareaguje řídicí systém a cívkami proteče proud. Vlak se přitáhne vzhůru. Naopak, pokud je vlak příliš vysoko nad tratí, neprochází cívkami žádný proud. Jedná se tedy o dvoupolohovou regulaci. Přepínání se děje s vysokou frekvencí a pozorovateli se zdá, jako by se vlak vznášel v konstantní výšce.



Obr. 13 Princip levitace a schématické propojení cívek

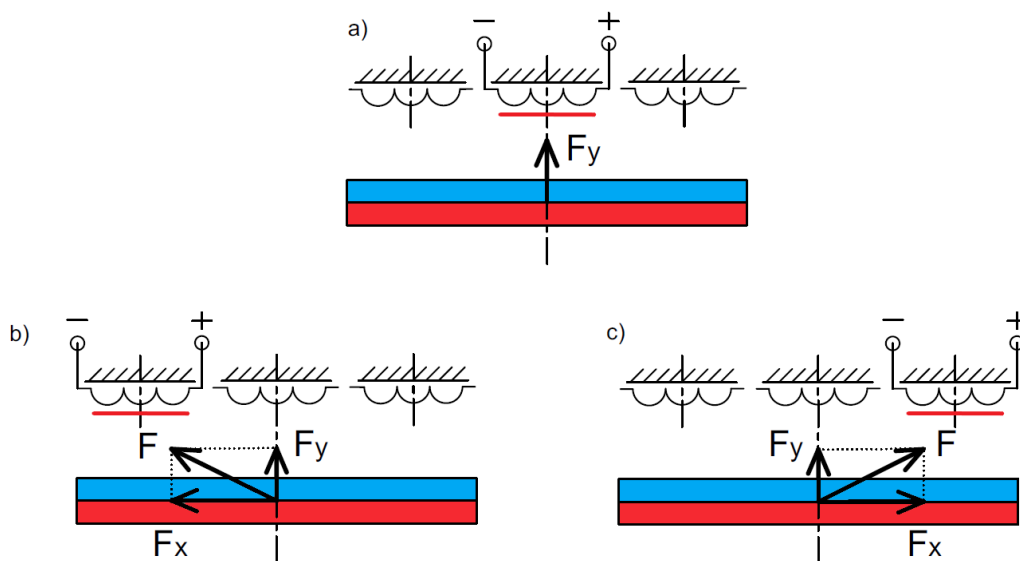
5.4.1.2. Řešení bočního navádění

Dalším úkolem bylo vyřešit, jakým způsobem bude vlak tažen do středu trati ve směru osy z. V kapitole 4.1.1. je popsán princip bočního navádění vlaku Transrapid pomocí působících elektromagnetů na bocích trati ve směru z. Musel bych tedy přidat cívky a optické členy i na boky mého modelu trati a zároveň přidat boční magnety na vůz. Vzhledem k tomu, že vlak nebude dosahovat vysokých rychlostí, trať bude rovná a jeho hmotnost bude několik gramů, provedl jsem předpoklad, že přitažlivá síla cívek zajišťující levitaci bude nejen vlak nadnášet, ale orientovat ho i do středu trati v ose z.

5.4.1.3. Řešení pohybu

Pohyb v ose x měl být zajištěn algoritmem zapínání a vypínání úseků trati, tedy systematickým pouštěním proudu do určitých párů cívek. Protože jsem použil stejnosměrný proud, jehož tok cívkami byl přesně definován jedním směrem, nemohl jsem využít odpudivé síly vyvolané opačným tokem proudu, která by vlak odtahovala předepsaným směrem. Řešením by bylo použít takzvané H – můstky, pomocí nichž by se dalo otáčet tok proudu, avšak celé zařízení by se velice zkomplikovalo.

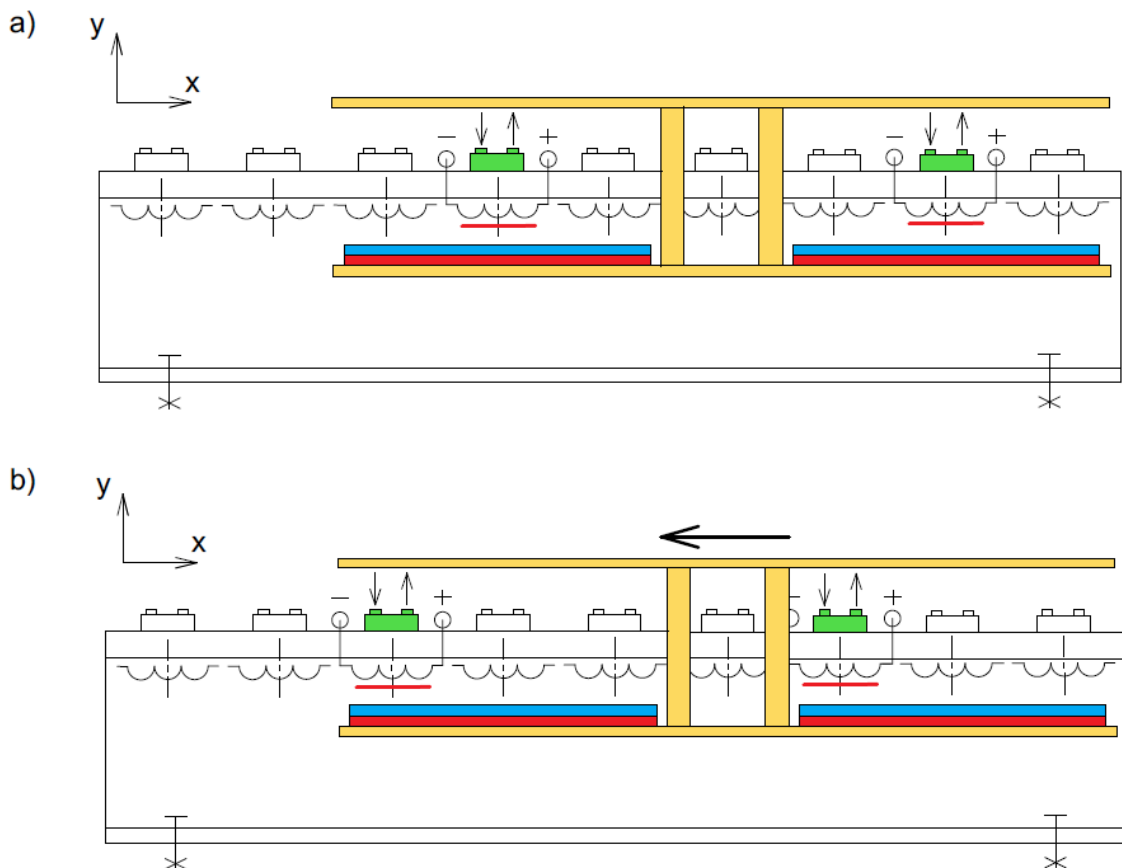
Musel jsem tedy pracovat s přitažlivými silami. Využil jsem faktu, že magnety si přitahují kovové předměty do svého středu, kde mají nejsilnější magnetické pole. Proto i mnou použité magnety na vlaku by se měly svojí plochou orientovat do os cívek vytvářejících magnetické pole. Překrývá-li magnet svojí plochou více cívek, jako je zobrazeno na obr. 14, bude se nacházet vždy v magnetickém poli jedné z nich, kterou poteče v daný okamžik proud (označené červeným pruhem), což bude mít za následek vtažení magnetu do centra magnetického pole této cívky, aniž by došlo k odtržení a jeho pádu.



Obr. 14 a) rovnovážná poloha, b) pohyb vlevo, c) pohyb vpravo

Na obr. 15 je schematicky znázorněno využití tohoto jevu na mém prototypu, s tím rozdílem, že magnetům na podvozku vlaku bráním řídicím systémem úplnému přitažení vzhůru k cívkám a ve výsledku se projeví pouze silová složka F_x viz obr. 14.

Sleduji dvojici zeleně značených optických členů, jejichž hodnoty na výstupu mě v daný okamžik zajímají. Aby byl vlak během levitace v rovnováze, tedy aby mezi tratí a vlakem byla konstantní mezera na přední i zadní straně vlaku, je zapotřebí, aby oba snímače v daný okamžik měly na výstupu stejné hodnoty. Takto aktivní dvojice snímačů je od sebe vzdálena tak, aby byly oba překryty odrazovou plochou vlaku (horní částí) a zároveň co nejdál od sebe k zajištění rovnováhy vlaku. Zároveň musí být v zákrytu i vnější sousední snímače po obou stranách. Každému optickému členu je přiřazen určitý počet párů cívek nacházející se v jeho blízkém okolí pod ním a udává v jaký okamžik se má do jednoho z jeho přiřazených párů cívek pustit proud, respektive zahájit spínací režim v cívkách. Pro názornost je na obr. 15 zobrazena situace, kdy každému snímači náleží právě jeden pár cívek.



Obr. 15 Pohyb v ose x

5.4.1.4. Ovládání

K řízení pohybu jsem použil potenciometr, jehož rozsah jsem rozdělil na tolik dílů, kolik je možných poloh vlaku. Každá poloha (2 páry cívek) tak získala, své pořadové číslo. Řídicí program obsahuje rovněž stejný počet bloků. Každý blok obsahuje algoritmus pro

levitaci nad dvěma určitými páry cívek, k nimž je přiřazen. Jeden blok programu je k vidění na obr. 16.

Hodnotapot představuje výchylku potenciometru, vyska_ představuje signál z optického členu a civkagate[] je označení pro určitý pár cívek. Lze také vidět, že vyska1 musí být větší než 405 a vyska3 větší než 480, aby se spustil proud do cívek. Teoreticky by měly být hodnoty v daný okamžik stejné, nicméně z důvodu nerovností modelu jsem musel srovnat vlak do vodorovné polohy tímto způsobem.

Poloha vlaku je tedy určena výchylkou na potenciometru a nemůže se stát, aby vlak přeskočil např. z prvního segmentu na třetí a spadl, ale musí se sepnout nejprve druhý a poté segment třetí.

```
if((vyska1 > 405) && (hodnotapot == 0))
{
    digitalWrite(civkagate[0], HIGH);
}
else
{digitalWrite(civkagate[0], LOW);
}

if((vyska3 > 480) && (hodnotapot == 0))
{
    digitalWrite(civkagate[2], HIGH);
}
else
{digitalWrite(civkagate[2], LOW);
}
```

Obr. 16 Ukázka jednoho bloku programu s řídicím algoritmem levitace

Je nutné poznamenat, že uvedená schémata jsou pouze orientační. Některé předpoklady byly chybné, jak se ukáže v následujících kapitolách, ve kterých je popsán podrobný popis stavby prototypu tratě a vlaku a jejich testování, na základě nichž byl model několikrát upraven.

5.4.2. Zkušební úsek tratě

Zkušební úsek tratě, který měl nést cívky a snímače jsem vyrobil z tenkých latí z balzového dřeva, neboť je snadno opracovatelné, dostupné a umožnil mi měnit libovolně tvar trati. K vyzkoušení vlaku jsem potřeboval trať osadit minimálně čtyřmi páry cívek, nutných k jednokrokovému posunu v ose x (o jeden segment).

5.4.3. Dimenzování jádra cívek

Abych mohl vyrobit dostatečně silnou cívku z hlediska přitažné síly, bylo zapotřebí vytvořit pevné jádro, na které budu drát navíjet, a které mi zajistí požadovaný tvar cívky a její velikost.



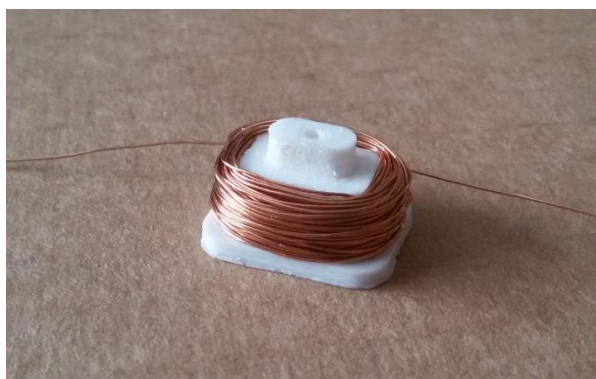
Obr. 17 Plastové jádro cívky

V běžných elektromagnetech se používá feromagnetické jádro. Já však potřeboval materiál, který nebude magnetický, ale diamagnetický s relativní permeabilitou $\mu_r < 1$, aby nedošlo k samovolnému přitažení magnetů na vlaku k jádrům cívek na trati. Dále nebylo vhodné použít nemagnetický kov jako je např. hliník nebo mosaz, protože by docházelo vlivem proměnného magnetického pole s vysokou frekvencí k indukci napětí v jádře a ke vzniku tzv. vířivých proudů, jejichž důsledkem je zahřívání cívky. Na výběr jsem měl např. plast nebo dřevo. Na obr. 17 je první plastový výtisk jádra cívky. Vrchní osazení – čep sloužil k uchycení cívky v trati.

5.4.4. Volba drátu

Zvolil jsem měděný lakovaný drát, z důvodu dostupnosti a výborných vodivých vlastností. Proudová hustota měděného vodiče je 3 A/mm^2 . Dalším úkolem bylo vybrat vhodný průměr vodiče. Nejprve jsem vyzkoušel drát o průměru 1 mm, kterým jsem mohl vézt proud o velikosti až 2,5 A, aniž by došlo k zahřátí vodiče vlivem vnitřního odporu, ale bohužel se ukázalo, že takto silný drát je nevhodný z několika důvodů. Nekopíroval profil jádra podle mých představ, tedy výsledná cívka neodpovídala požadovanému tvaru a nedostatečně vyplňoval mezery v cívce. Proto jsem použil tenčí drát o průměru 0,3 mm, který je stavěný pro menší hodnoty proudu, ale výborně vyplnil prostor jádra, na které jsem namotal přesně 100 závitů.

Mým cílem však bylo zjistit, jestli je tato cívka po průchodu proudu schopna přitáhnout vlak vzhůru, přesněji řečeno jednu čtvrtinu hmotnosti vlaku, neboť vlak byl nesen čtyřmi cívkami najednou. To však záleželo na celkové hmotnosti konstrukce vlaku a zejména samotných magnetů.

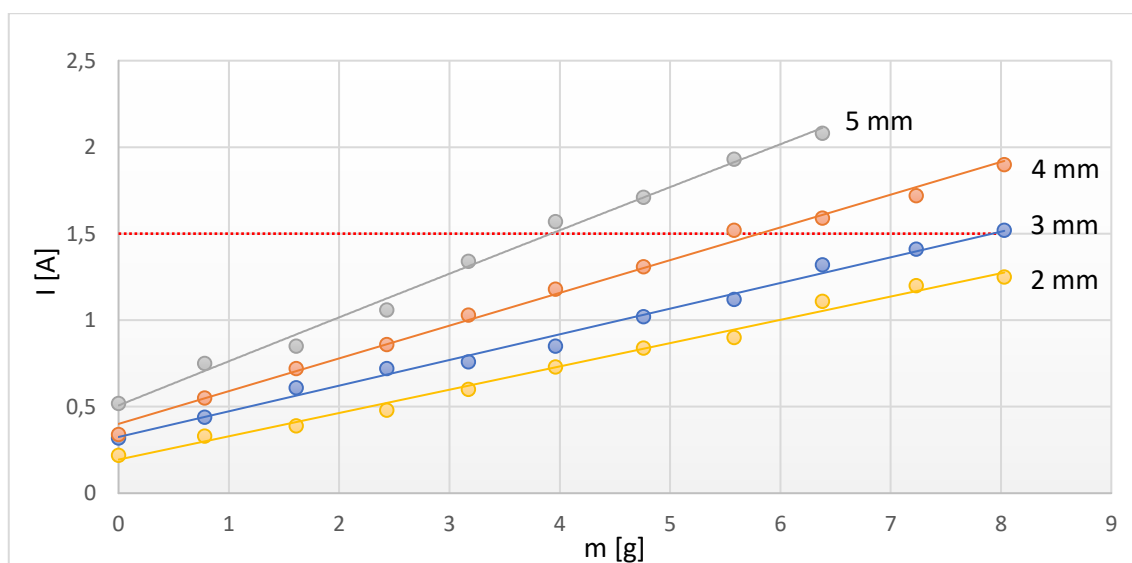


Obr. 18 Drát o průměru 0,3 mm namotaný na jádře

5.4.5. Výběr permanentních magnetů

Při výběru magnetů bylo nutné najít kompromis mezi rozměry, hmotností a magnetickou indukcí. Zvolil jsem neodymové magnety o rozměrech 20x4x3 mm a o hmotnosti 1,8 g. Abych zjistil, jak velký proud musí projít cívkou, aby došlo k přitažení magnetu nesoucí další závaží představující čtvrtinu zbylé konstrukce vlaku vzhůru, provedl jsem pokus, který mi poskytl velice přesné výsledky bez složitých výpočtů.

Navážil jsem si kovové podložky a jednu po druhé je zavěšoval na magnet. Ten jsem umístil pod cívkou s vyměřeným odstupem a sledoval, při jak velkém proudu se magnet se závažím přitáhne. Výsledky jsem zaznamenal do grafu viz obr. 19. Jednotlivé křivky jsou pro určitou vzdálenost mezi cívkou a magnetem. Na osu x jsem vynášel hmotnost samotných podložek, která představuje možnou váhu konstrukce bez permanentních magnetů. Z grafu je patrné, že jde přibližně o lineární závislost. Při proudu nad 1,5 A došlo k markantnímu zahřátí vodiče, a proto není vhodné překročit tuto hodnotu.



Obr. 19 Graf závislosti elektrického proudu v cívce na hmotnosti závaží

5.4.6. Použité elektronické prvky

5.4.6.1. Arduino Mega 2560

Arduino je programovatelná deska sloužící k vývoji projektů, při kterých je zapotřebí řízení. Existuje řada typů a já ve své práci použil Arduino Mega 2560, které má 54 digitálních vstupních/výstupních pinů. Čtrnáct z nich je využito k PWM modulaci. Dále obsahuje 16 analogových vstupních pinů.

K otestování mého prototypu mi stačilo zapojit pouze dvě optické závory na dva analogové vstupy a čtyři páry cívek, tedy čtyři tranzistory na čtyři PWM výstupy. Základní frekvence PWM signálu je přibližně 490 Hz, což mi mělo stačit k udržení levitace.

5.4.6.2. Optický člen

Ke snímání velikosti odstupej vlaku od trati jsem použil reflexní světelnou závorku CNY70, protože se osvědčila v bakalářské práci [2]. Jedná se o součástku obsahující diodu vysílající záření a fototranzistor umístěné v jedné rovině. Fototranzistor přijímá část odraženého záření od povrchu detekovaného předmětu. Podle intenzity přijímaného záření, závislé na odrazivosti plochy, vzniká na výstupu různě velké napětí, které vyhodnocuji.

5.4.6.3. Schottkyho dioda

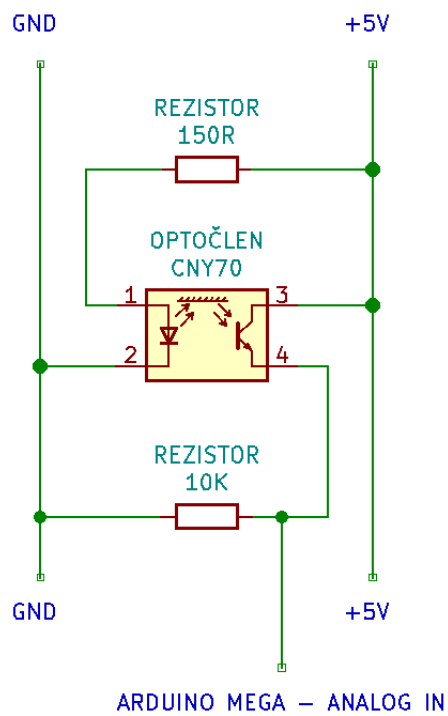
V rychle spínaných obvodech obsahující indukčnost dochází při rozpojování proudu ke krátkým napěťovým špičkám z důvodu hromadění energie na cívkách. Ke zkratování těchto špiček se využívá Schottkyho dioda připojená paralelně k cívkám. V mém případě jsem použil Schottkyho diodu SR350-TAP podle bakalářské práce [2]. Je dimenzovaná na maximální napětí 50 V a proudovou špičku 80 A.

5.4.6.4. Tranzistor

Ke spínání obvodu jsem využil unipolární tranzistor MOSFET IRF640N. Je dimenzován na napětí drain-source $V_{DS} = 200 \text{ V}$ a proud $I_D = 18 \text{ A}$. Na gate lze přivést napětí $\pm 20 \text{ V}$, přičemž mnou použité Arduino Mega operuje při PWM modulaci s napětím 5 V.

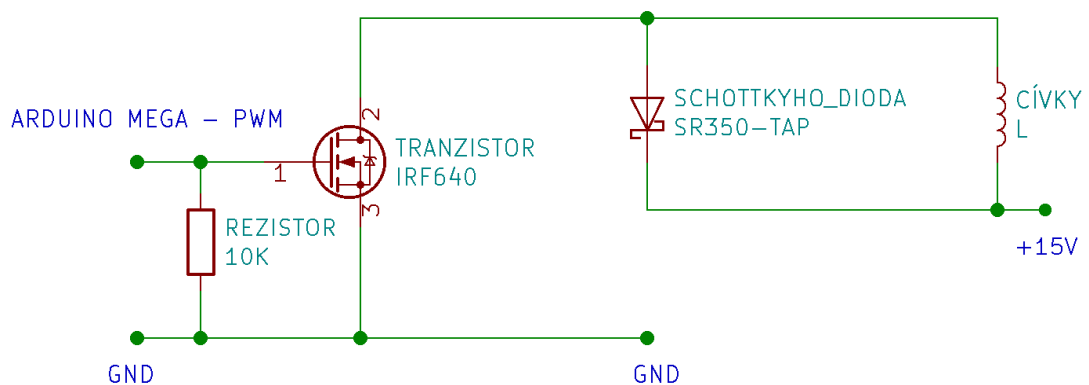
5.4.7. Zapojení

5.4.7.1. Obvod se snímačem CNY 70



Obr. 20 Zapojení snímače CNY 70

5.4.7.2. Obvod s cívkami

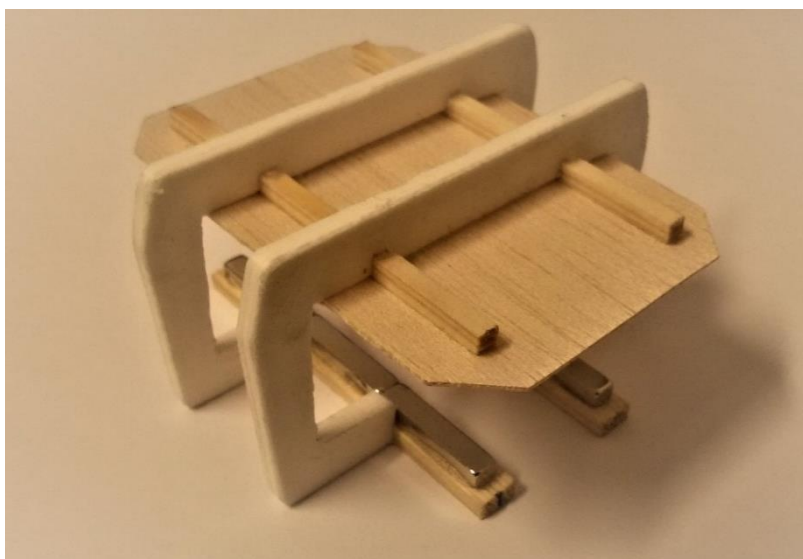


Obr. 21 Zapojení cívek

5.5. Vývoj prototypu

5.5.1. První zkouška – levitace

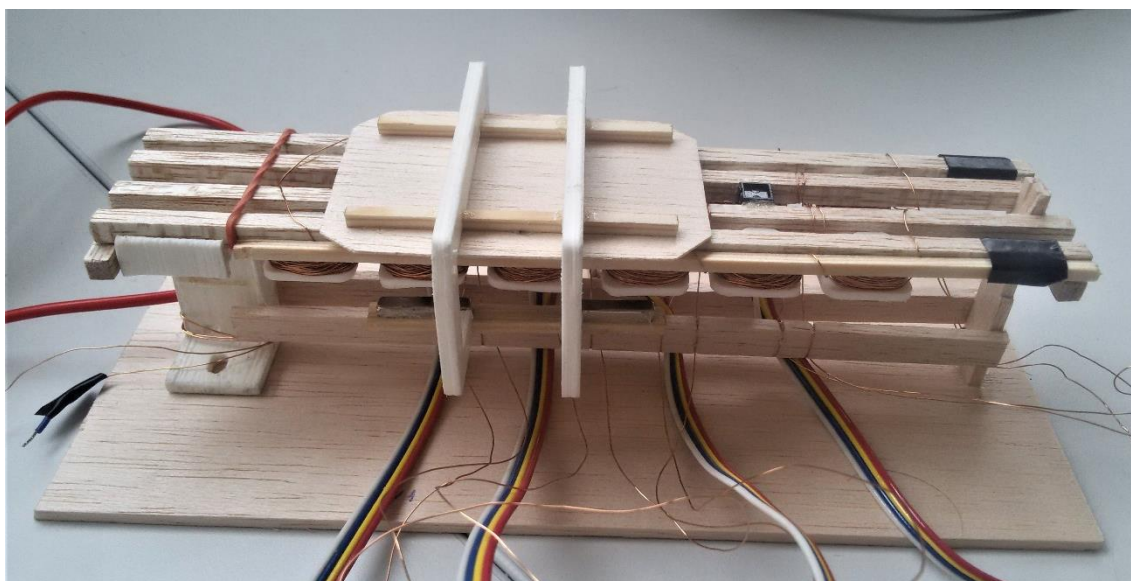
Měření ukázalo, že konstrukce modelu vlaku, by měla být co nejlehčí z důvodu omezení tekoucího proudu v cívkách. Na obr. 22 je návrh prvního modelu. Rozhodl jsem se v první řadě vyřešit otázku samotné levitace, a proto jsem první model vlaku navrhl pouze pro levitaci, nikoliv pro pohyb. Jedná se o jednoduchou konstrukci nesoucí 6 permanentních magnetů, tedy 2 řady po třech. Žebra spojující odrazovou plochu a podvozek s magnety jsou vytisknutá na 3D tiskárně. Plocha, od které se odráží záření snímačů je z tenkého balzového plátu a je podlepená bílým papírem pro lepší odrazivost. Provedl jsem předpoklad, že magnety řazené v řadě za sebou a orientované jedním pólem vzhůru vytvoří jakýsi jeden dlouhý magnet, který vytvoří nezdeformované magnetické pole.



Obr. 22 První model vlaku

Test ukázal, že můj předpoklad byl chybný. Vlak nebyl schopen levitovat, neboť byl příliš těžký a choval se nepředvídatelně. Odstranil jsem tedy středové magnety, aby neovlivňovaly magnetické pole krajních magnetů a abych snížil hmotnost. Ukázalo se, že to byl správný postup. Vlak vykazoval známky levitace, ale pouze s mojí pomocí.

Boční navádění podle mého předpokladu nefungovalo a musel jsem vlak na bocích ručně podpírat. Dále se ukázalo, že velikost cívek nestačí na to, aby udržely vlak ve vzduchu po delší dobu. Průchodem proudu 0,75 A se začala plastová jádra zahřívat na teplotu tavení plastu, ze kterého byly vyrobeny – přibližně 70 C°, a deformovat se. První test byl tedy neúspěšný, nicméně ukázal, že zapojení a řídicí algoritmus pro levitaci pracuje správně a poukázal na nedostatky, které jsem vyřešil v následujících testech.

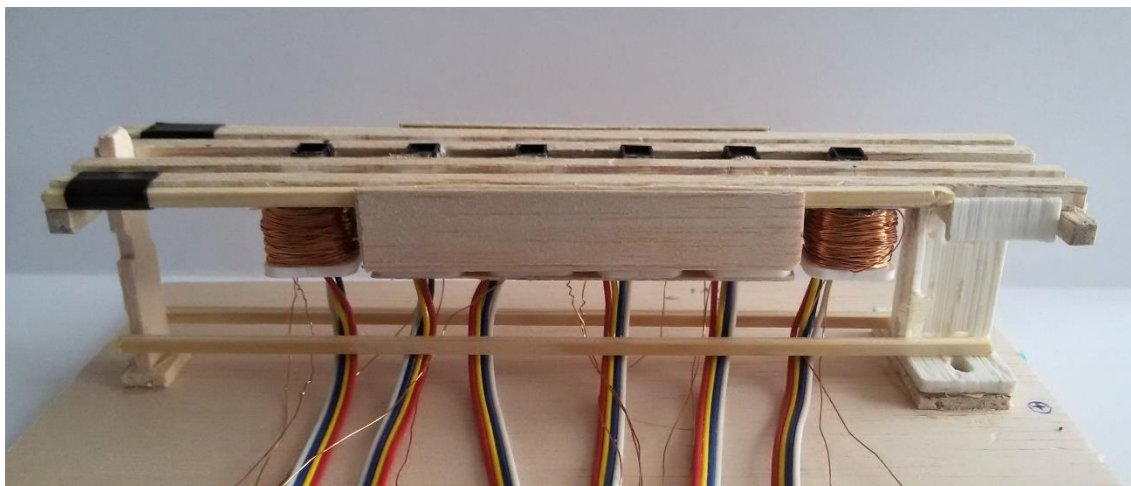


Obr. 23 První prototyp schopný levitace s fyzickou pomocí

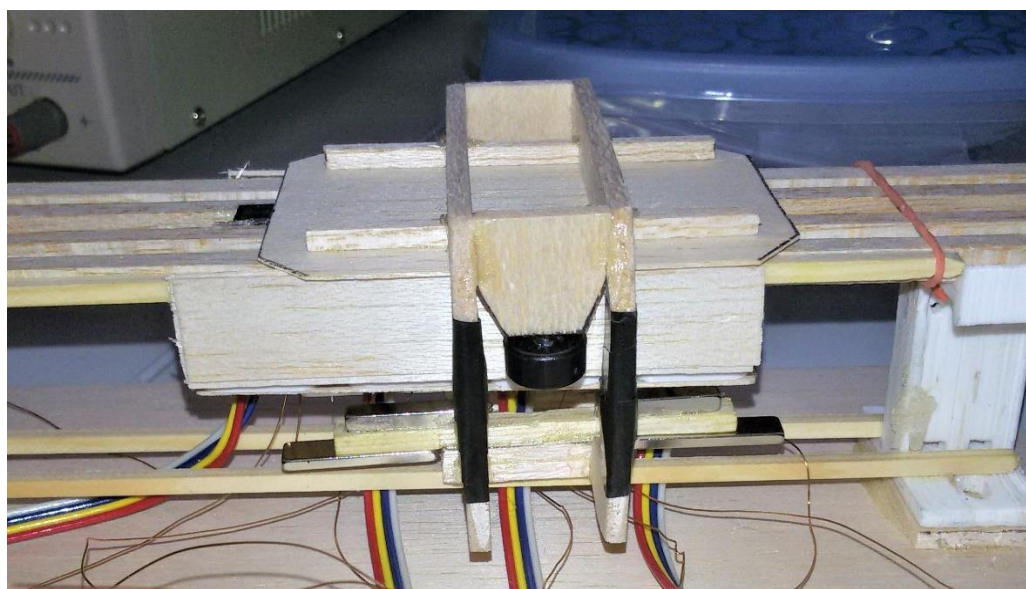
5.5.2. Druhá zkouška – levitace

Abych docílil stabilní levitace bez fyzické pomoci, rozhodl jsem se nainstalovat na boky vlaku jeden pár podpůrných koleček a na trať boční mantinely, o která se kola mohla zapřít. Magnety tvořily hlavní část hmotnosti vlaku, takže těžiště bylo nízko a vlak tak mohl být podpírán jenom v horní části. Model jsem odlehčil odebráním plastových žeber a nahradil je balzovými. Vlak byl nyní podstatně křehčí, ale o několik gramů lehčí. Dalším úkolem bylo vyřešit zahřívání cívek. Abych zesílil magnetické pole, bylo jedinou možností zvýšit počet závitů, protože na rozdíl od proudu se jednalo o parametr, jehož hodnotu jsem mohl libovolně zvyšovat. Jádra cívek jsem dvojnásobně zvětšil při zachování jejich průřezu a namotal na ně 200 závitů drátu o průměru 0,3 mm.

Po těchto úpravách jsem dosáhl levitace bez fyzické pomoci. Nicméně i po aplikování podpůrných kol se vlak nekontrolovatelně chvěl v ose z z důvodu drobné vůle mezi kolami a mantinely na trati. Tento problém se zlepšil přidáním dalších magnetů pod magnety na podvozku vlaku viz obr. 25. Jejich magnetické pole se tak zesílilo a nárůstem hmotnosti a snížením těžiště se utlumilo chvění vlaku. Tento pokus byl úspěšný a dosáhl jsem stabilní levitace. Abych však mohl s vlakem pohybovat po ose x bylo zapotřebí vybrat delší magnety, aby každý z nich překrýval minimálně tři cívky viz obr. 13 a 14.



Obr. 24 Upravená trať s většími cívkami a bočními mantinely

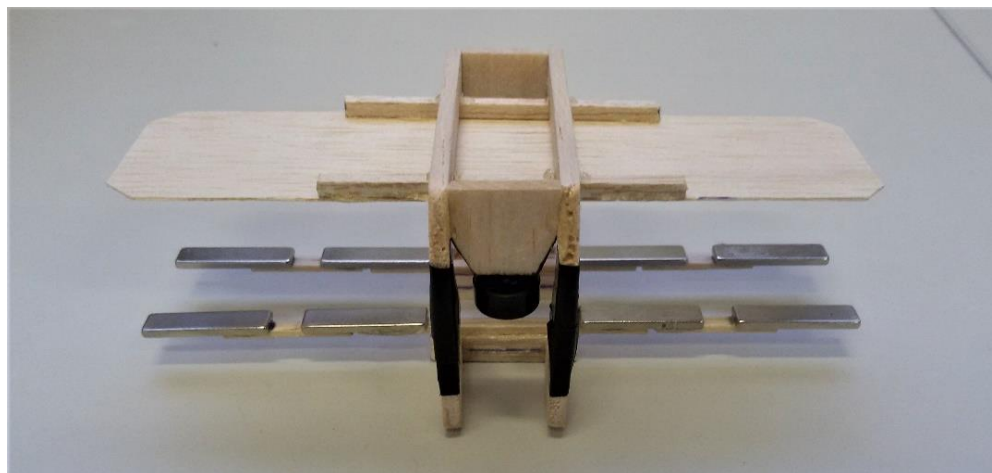


Obr. 25 Model schopný levitovat bez fyzické pomoci

5.5.3. Třetí zkouška – pohyb

Dalším krokem bylo prodloužit vlak při zachování podpůrných koleček. Přilepil jsem tedy na vlak delší odrazovou plochu a připravil si nový podvozek nesoucí magnety. Z katalogu jsem vybral magnety o rozměrech 25x6x2 mm a o hmotnosti 2,3 g, které byly jako jedny z mála použitelné, co se týče poměru síla, hmotnost a rozměr. První typ podvozku nepracoval správně. Místo jednoho dlouhého magnetu jsem použil tyto dva kratší, přilepené blízko u sebe a předpokládal jsem, že se vlak bude orientovat podle schématu na obr. 13, 14. Vlak se však choval nepředvídatelně a nebylo možné dosáhnout stabilní rovnovážné levitace. Vlak se přitahoval vždy více na jednu nebo na druhou stranu tam, kde byla dominantnější cívka. Dále bylo zřejmé, že takto prodloužený vlak nevydrží

levitovat vlivem nárůstu hmotnosti a slabého magnetického pole magnetů. Magnetická síla je závislá na výšce magnetu a 2 mm nestačily. Tento test byl tedy neúspěšný.



Obr. 26 Neúspěšný model vlaku

5.5.4. Čtvrtá zkouška

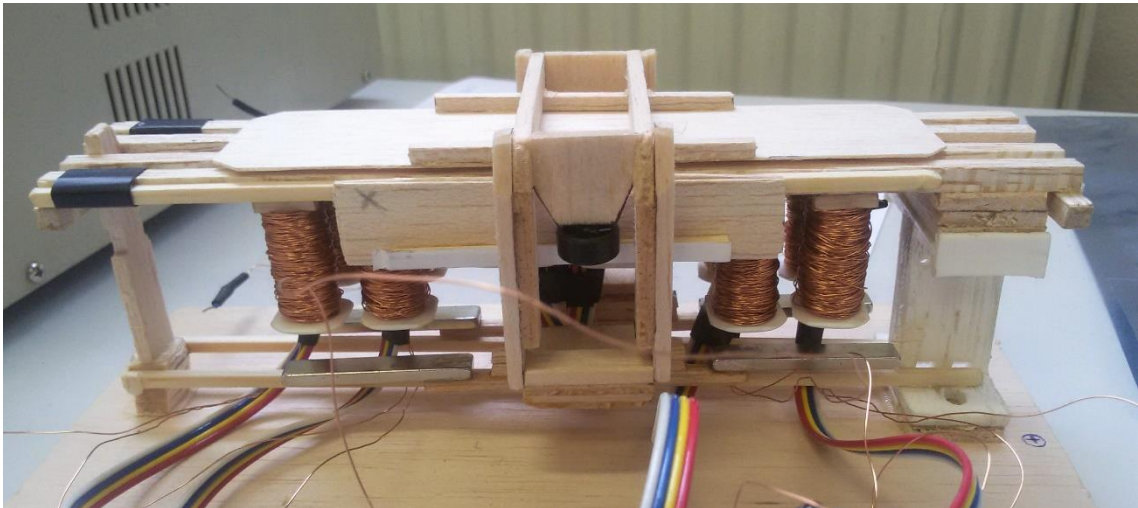
V katalogu byly k použití ještě dva magnety. První z nich měl hmotnost 6 g a druhý hmotnost 5 g. Nejprve jsem použil magnet o hmotnosti 5 g, jehož magnetická síla byla dvakrát menší než u 6 g magnetu. Nárůstem hmotnosti jsem musel opět zesílit magnetické pole cívek. Vyrobil jsem tedy úzká dřevěná jádra, na která jsem namotal 500 závitů drátu. Oproti původním cívkám mělo být jejich magnetické pole 2,5 x silnější. Jednotlivé páry cívek jsem umístil co nejvíce k sobě, aby použité magnety plně překrývaly vždy tři cívky. Magnety jsem přilepil na vlak tak, aby se jejich magnetická pole ovlivňovala co nejméně. Změnou rozměrů cívek, tedy nárůstem výšky jejich jader, jsem musel změnit i rozměry vlaku. Vyměnil jsem tedy původní žebra za větší a celý vlak jsem vyztužil.

I přes veškeré úpravy se vlak nedokázal udržet ve vzduchu při maximálním možném proudu v cívkách. Tento test byl neúspěšný.

5.5.5. Pátá zkouška

Poslední možností bylo použít druhý již zmíněný typ magnetů o rozměrech 40x7x3 a o hmotnosti 6 g, tedy o gram těžší než předešlý použitý magnet, ale jeho síla byla dvakrát větší.

Tento test byl úspěšný. Dosáhl jsem na omezený čas stabilní levitace a posuvu v ose x, přičemž vlak přešel o jeden segment tratě 2x tam i zpět a poté se odtrhl z magnetického závěsu.

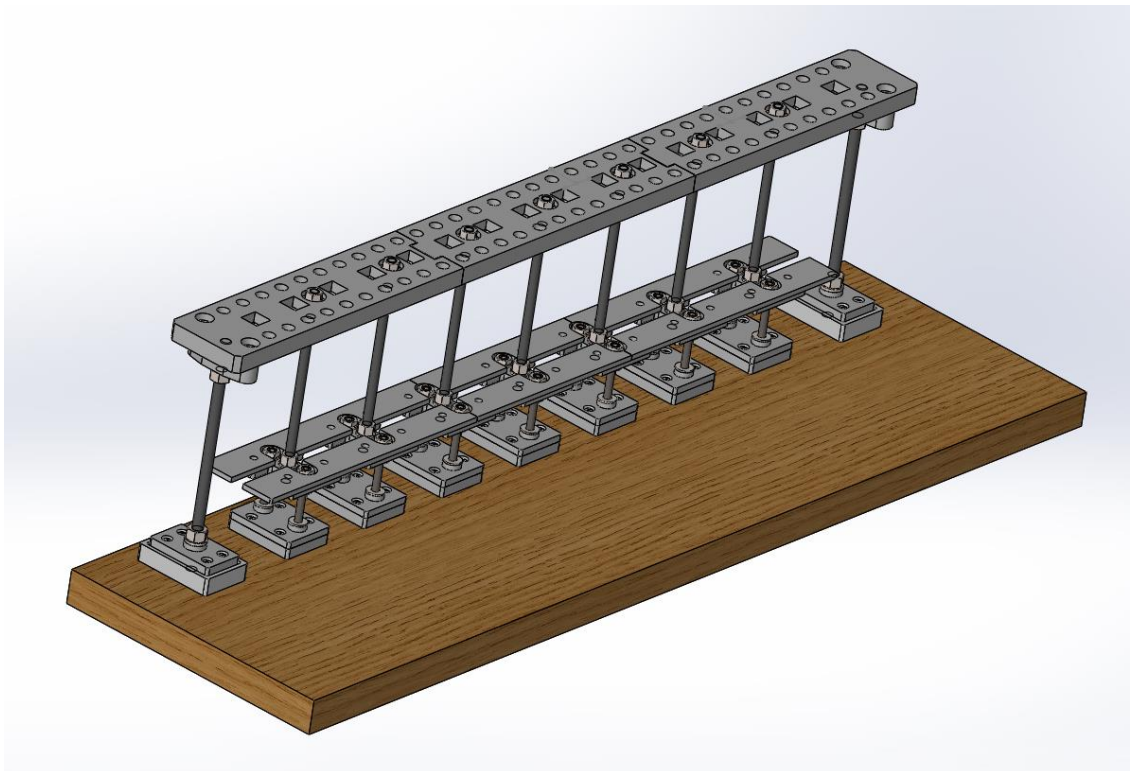


Obr. 27 Prototyp schopný levitace i pohybu

5.6. Výroba modelu

Prototyp systému Maglev byl funkční a začal jsem s návrhem samotného modelu, který měl být postaven na základě tohoto prototypu. I přes jeho funkčnost jsem musel řadu prvků upravit.

5.6.1. Konstrukce modelu



Obr. 28 3D návrh konstrukce trati bez cívek a elektroniky

Na obr. 28 je znázorněna celá nosná konstrukce trati. Ta je umístěná na desce z dřevotřísky o rozměrech 600x220x20 mm. Základním materiálem trati je plast a veškerý spojovací materiál je z mosazi.

Nosná plocha je kvůli omezenému pracovnímu prostoru 3D tiskárny rozdělena v horní části na 3 díly a obsahuje celkem 64 otvorů pro 32 párů cívek a 16 otvorů pro optické snímače CNY 70. Je sešroubovaná sedmi závitovými tyčemi M5 ke spodní konstrukci a dvěma krajními sloupy ze závitové tyče M6 přes plastové stojky přímo k dřevěné desce. Pod nosnou plochou se nachází lišta s otvory, která navádí vývody cívek a snímačů do středu trati, aby nebránily průletu vlaku. Lišta je přišroubovaná na spodní konstrukci z plastových dílů a mosazných šroubů. Vývody jsou dále vyvedeny do prostoru před modelem a zapojeny v deskách s plošnými spoji.

5.6.2. Cívky

Cívky byly hlavním prvkem, který byl zapotřebí upravit. Funkční prototyp mohl pracovat pouze po dobu několika sekund než se zahřálo vinutí z měděného drátu o průměru 0,3 mm. Ten jsem nahradil vodičem o průměru 0,5 mm. Plocha průřezu tedy vzrostla z 0,07 mm² na 0,196 mm², což mělo výrazně zmírnit zahřívání cívek, ale naopak došlo ke zvětšení jejich celkového rozměru – téměř na dvojnásobek při zachování 500 závitů. Jediný rozměr, který jsem mohl měnit byla délka jádra.

Průměr celé cívky má 13 mm a vinutí je namotáno na bukové kulatině o průměru 6 mm. Jako zářázky jsem použil mosazné podložky, které jsem zdeformoval kladivem. Ve dřívku cívky, tedy v části kulatiny, na které nebylo vinutí, a která měla být vsunuta do otvoru ve trati, jsem vyvrtal kolmo na osu cívky díru o průměru 2 mm, kterou měl vést vrut k zajištění cívky ve trati.

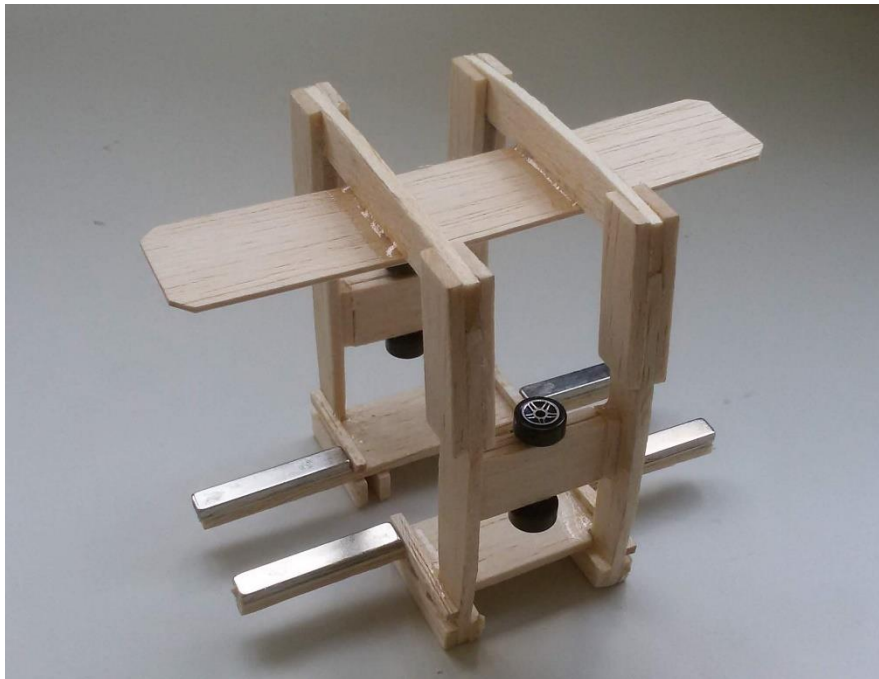


Obr. 29 Cívka pro finální laboratorní model

Abych vyrobil 64 cívek, bylo nezbytně nutné výrobu nějakým způsobem zautomatizovat. Vyrobil jsem si provizorní navíječku z vrtačky na ruční pohon, kterou jsem upnul do svěraku v horizontální poloze. Díky cívky jsem sevřel ve sklíčidle vrtačky. Spočítal jsem, že abych dosáhl na cívce 500 závitů, potřeboval jsem otočit klikou přesně 73 x.

5.6.3. Model vlaku

Vlak je konstrukčně velice podobný tomu, který jsem použil v mém funkčním prototypu s tím rozdílem, že obsahuje dva páry plastových koleček pro lepší stabilitu. Během lepení jsem kladl veliký důraz na přesnost. Rozteč magnetů ve směru z musela odpovídat rozteči páru cívek. Kolečka se valí po bočních mantinelech rovněž z balzy. Tyto plochy jsou sešroubovány tak, abych mohl měnit jejich vzdálenost od sebe a vymezit tak vůli mezi nimi a kolečky.



Obr. 30 Finální model vlaku

5.6.4. Elektronika

K připojení 16 snímačů a 64 cívek mi už nestačilo obyčejné nepájivé pole, ale bylo zapotřebí vytvořit tištěné spoje nejen k minimalizaci celkových rozměrů, ale i k celkové přehlednosti zařízení.

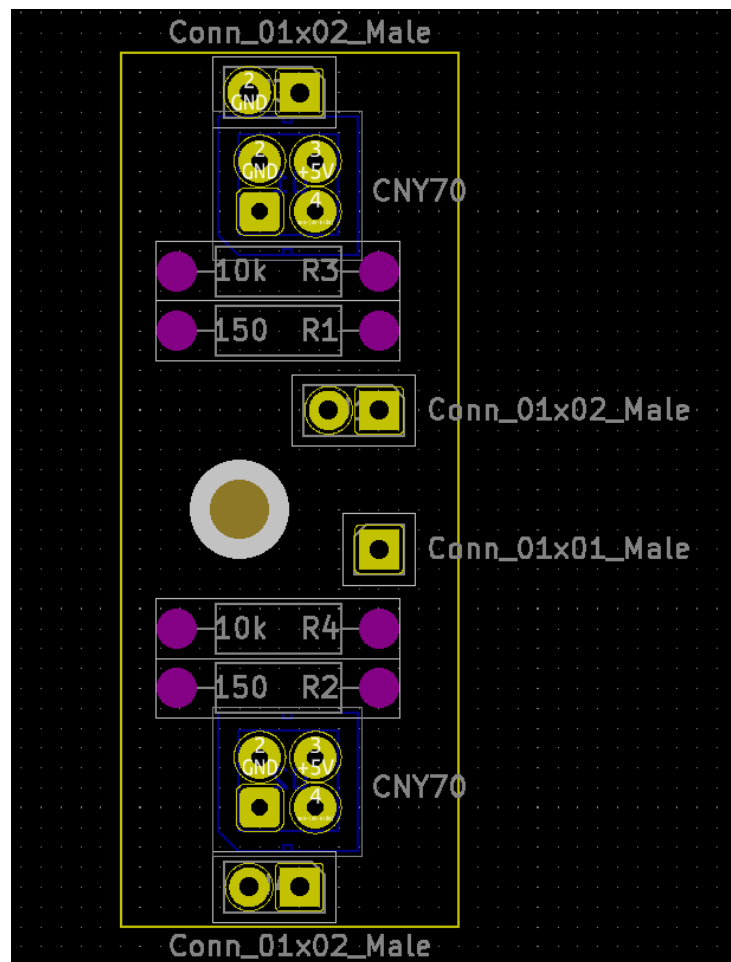
Vzhledem k tomu, že jsem využil celkem 16 optických členů CNY 70 vystačil jsem si s jedním Arduinem Mega, které má 16 analogových vstupů. Nicméně abych mohl řídit 32 párů cívek, bylo zapotřebí rozšířit Arduino přesně o dva drivery servomotorů obsahující obvod PCA9685.

5.6.4.1. Driver servomotorů PCA9685

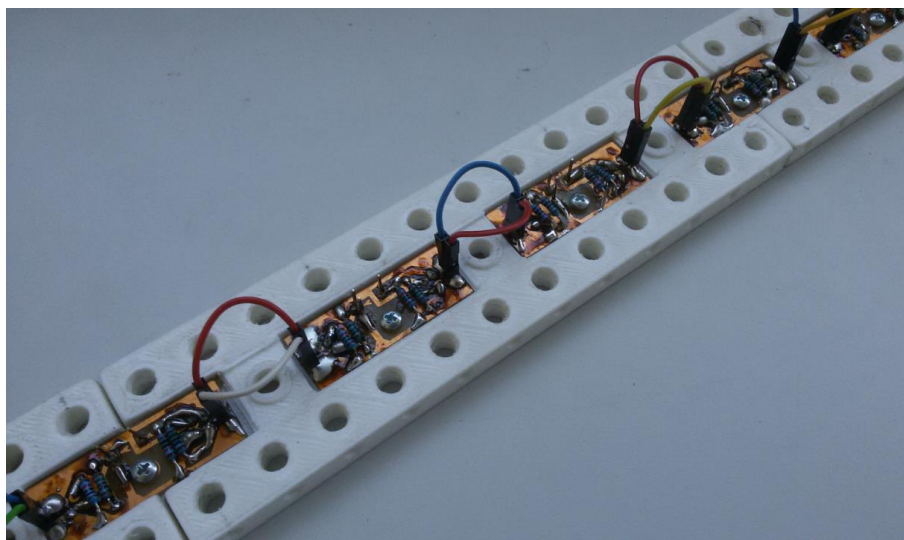
Jedná se o modul obsahující integrovaný obvod PCA9685 s 16 výstupy umožňující 12-bitovou PWM modulaci. S Arduinem komunikuje přes i2c sběrnici.

5.6.4.2. DPS se snímači CNY 70

Těchto spojů jsem vyrobil celkem 8. Každý nese 2 optické členy CNY 70, 4 rezistory 2x 10k a 2x 150 ohm a 7 kolíků pro připojení k napětí a zemi a k vyvedení analogového signálu z trati do Arduina. Na obr. 31 je schéma spoje s uspořádáním komponentů. Uprostřed je otvor pro vrut, kterým měla být připevněna ke spodní straně nosné desky trati.



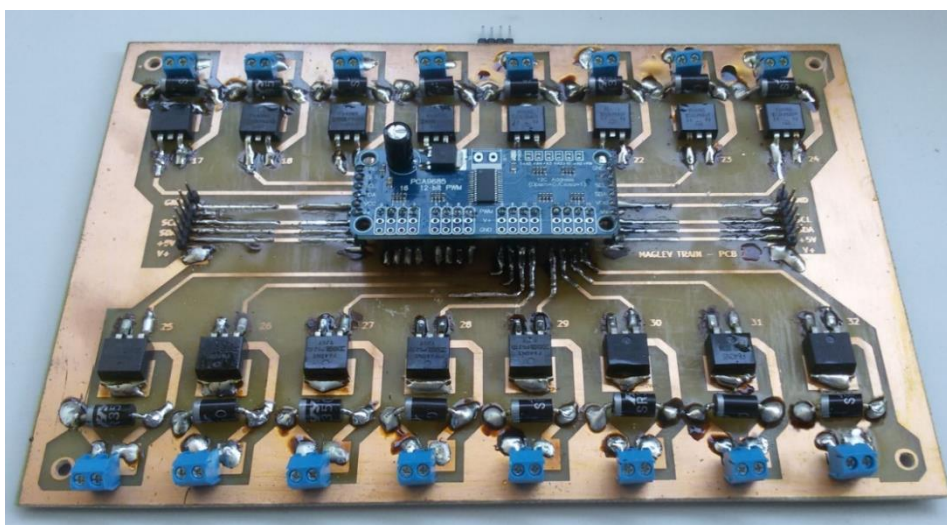
Obr. 31 Schéma DPS s vyznačenými součástkami



Obr. 32 Spodní strana nosné desky s tištěnými spoji připojené ke společnému napájení 5V a zemi

5.6.4.3. DPS s tranzistory

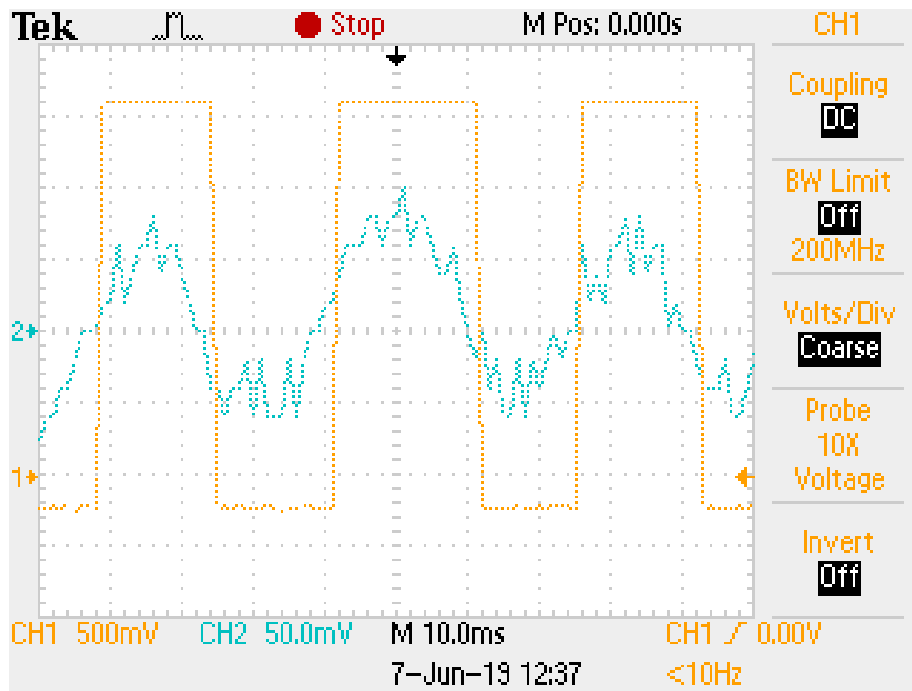
Vyrobil jsem celkem dva tištěné spoje, které řídí proud v cívkách. Uprostřed každého z nich se nachází driver servomotorů, 16 tranzistorů, 16 diod, 16 svorkovnic a 16 rezistorů. Desky obsahují piny pro SCL, SDA, OE, 15 V pro cívky, 5 V pro napájení driverů a GND. Zapojení odpovídá schématu na obr. 21.



Obr. 33 DPS s tranzistory

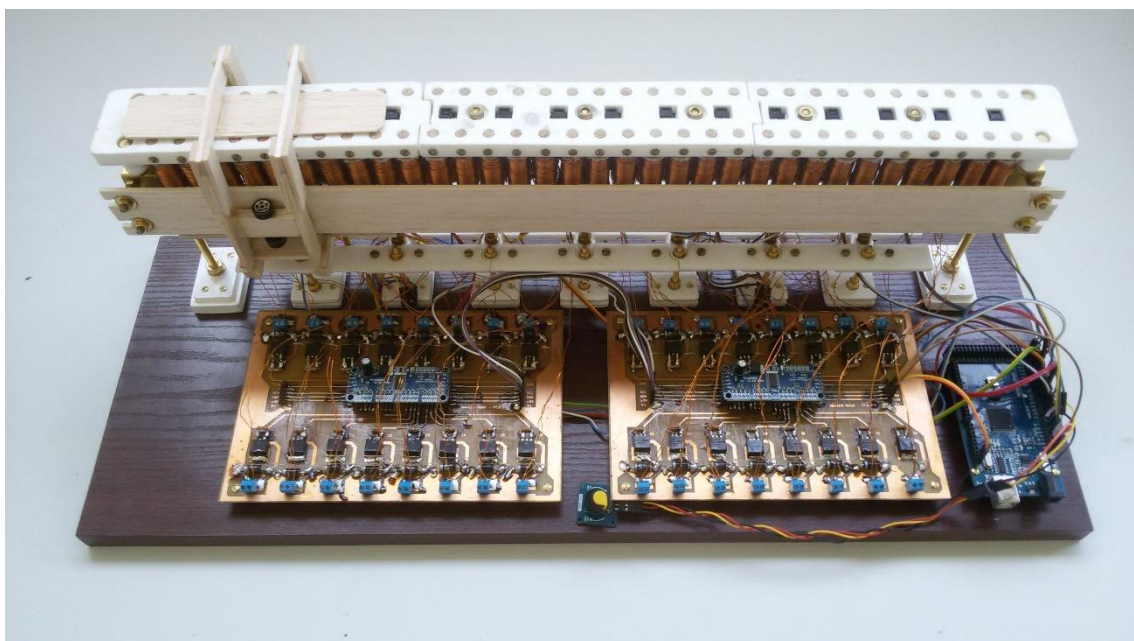
6. Měření

Provedl jsem měření pomocí osciloskopu, na kterém jsem sledoval chování dvoupolohové regulace během levitace vláčku. Na kanál 1 (žlutě) jsem přiváděl PWM signál a na kanál 2 (modře) napětí ze snímače.



Obr. 34 Záznam dvoupolohové regulace z osciloskopu během levitace

7. Kompletní sestava



Obr. 35 Kompletní model systému Maglev

8. Závěr

Model se podařilo zprovoznit pouze z části během stavby a poukazuje na nedostatky, které by byly zapotřebí odstranit. V příloze na CD je video ze zkušebního testování, na kterém vlak levituje a pohybuje se o jeden segment tam i zpět při napětí 16 V a proudu 7 A po dobu přibližně 14 sekund.

Prvním zásadním problémem je hmotnost vlaku. Celková váha 36 g se zdá být příliš velká na to, aby mohl vlak levitovat po delší dobu. Hmotnost se reguluje velice špatně. Její velkou část tvoří magnety, které váží 24 g a vyrobit pevnou konstrukci vážící méně než 12 g není snadným úkolem.

Řešením by bylo postavit vlak se železným podvozkem a vzduchové cívky nahradit cívkami s feromagnetickým jádrem. I když by byl vlak podstatně těžší, magnetické pole cívek by bylo mnohonásobně silnější a také by nedocházelo k samovolnému přitahování vlaku ke spodní straně trati. V tomto případě by bylo zařízení bez permanentních magnetů. Ve školních podmínkách by se však tento model obtížně realizoval.

Dalším nedostatkem je použití optických členů podle mého návrhu. Ty jsou velice citlivé na okolní světlo. Proto by bylo vhodné je nějakým způsobem odstínit, protože okolní světlo ovlivňuje výstupní napětí ze snímače. Obvodem mi protékal proud, aniž bych ho nějakým zařízením odebíral. Hledal jsem vyzkratovanou oblast a poté jsem si všiml, že mi na snímač svítí světlo z okna a tím pádem se spustil proud do cívky. Z tohoto důvodu jsem musel před každým testováním, které probíhalo následující den při jiném osvětlení místnosti, překalibrovat snímače na novou výškovou hladinu.

V neposlední řadě vidím také nedostatek v řízení. Dvoupolohová regulace způsobuje rozkmitání vlaku a pokud je mezi bočními mantinely velká mezera, tak se vlak odtrhne z magnetického závěsu. Pokud bychom tento způsob regulace chtěli dále použít, bylo by vhodné řídit každou cívku zvlášť, což by však vedlo k navýšení počtu snímačů. Lepším řešením by však podle mého názoru byla regulace elektrického proudu. Vlak by se choval stabilněji.

Nicméně tento model je připraven k dalšímu programování a vývoji. Nabízí možnost vyřešit magnetické boční navádění a vede k hledání cesty, jak odlehčit vlak a zároveň zesílit magnetické pole.

9. Použité zdroje

- [1] PAUDEL, Nirmal. DYNAMIC SUSPENSION MODELING OF AN EDDY – CURRENT DEVICE: AN APPLICATION TO MAGLEV. 2012. Dissertation. The University of North Carolina at Charlotte.
- [2] CAHYNA, Martin. *Laboratorní model Maglev*. 2017. Bakalářská práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky. Vedoucí práce doc. Ing. Martin Novák, Ph.D.
- [3] ČERNÝ, František, Ladislav SAMEK a Bruno SOPKO. *Fyzika II*. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2018. ISBN 978-80-01-06414-6.
- [4] UHLENBROCK, Markus, Volkhard NORDMAIER a Joachim H. SCHLICHTING. *Die Magnetschnellbahn Transrapid im Experiment* [online]. Der mathematische und naturwissenschaftliche Unterricht, 2000, 53/4, 220-226. [cit. 2019-02-15]. ISSN 0025-5866.
Dostupné z:
https://www.unimuenster.de/imperia/md/content/fachbereich_physik/didaktik_physik/publikationen/magnetschnellbahn_transrapid.pdf
- [5] ZHIGANG, Liu, Long ZHIQIANG, Li XIALONG. *Maglev Trains: Key Underlying Technologies* [online]. Heidelberg: Springer, 2015. [cit 2019-02-15].
Dostupné z:
<http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=nlebk&AN=980354&site=ehost-live&scope=site>
- [6] NAVE, Rod. Superconductivity [online]. Hyperphysics Georgia State University. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scond.html#c1>
- [7] NAVE, Rod. The Meissner Effect [online]. Hyperphysics Georgia State University. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/meis.html#c2>

- [8] THE REVIEW: SUPERCONDUCTING MAGLEV (SCMAGLEV) [online]. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
https://global.jr-central.co.jp/en/company/_pdf/superconducting_maglev.pdf
- [9] NAVE, Rod. Superconducting Magnets [online]. Hyperphysics Georgia State University. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scond.html#c1>
- [10] NAVE, Rod. Niobium-Titanium Superconductor [online]. Hyperphysics Georgia State University. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scmag.html>
- [11] NAVE, Rod. Superconducting Magnet Wire of Niobium-Titanium [online]. Hyperphysics Georgia State University. [cit. 2019-03-02].
Dostupné z:
<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Solids/scmag.html>
- [12] LARBALESTIER, David, Richard D. BLAUGHER, Robert E. SCHWALL, Robert S. SOKOLOWSKI, Masaki SUENAGA a Jeffrey O. WILLIS. *WTEC Panel Report on Power applications of superconductivity in Japan and Germany: Final Report* [online]. United States, 1997. [cit. 2019-03-03].
Dostupné z:
http://docplayer.net/44248157-Power-applications-of-superconductivity-in-japan-and-germany.html#show_full_text

10. Přílohy

Přílohy se nachází na CD. Jedná se o video ze zkoušky finálního modelu, testovací program pro Arduino, 3D modely dílů konstrukce + sestava a soubor se schémata tištěných spojů v programu KiCAD.