

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**Martin
Cahyna**

Prohlášení

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

Dne:

Podpis:

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Cahyna** Jméno: **Martin** Osobní číslo: **419591**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav přístrojové a řídicí techniky**
Studijní program: **Strojírenství**
Studijní obor: **Informační a automatizační technika**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Laboratorní model Maglev

Název bakalářské práce anglicky:

Maglev laboratory model

Pokyny pro vypracování:

Cílem práce je návrh, mechanická konstrukce, elektronika a řízení laboratorního modelu systému Maglev.

- 1) rešerše jak systém Maglev funguje
- 2) návrh jednoduchého mechanického modelu. Předpoklad 3D tisku součástí
- 3) výběr senzorů polohy a aktuátorů (cívky a permanentní magnety)
- 4) sestavení systému
- 5) návrh a experimentální ověření řídicího algoritmu pro udržování v konstantní výšce nad tratí. Cílem není algoritmus pro pohyb vpřed nebo vzad.

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:

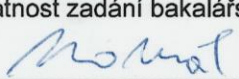
doc. Ing. Martin Novák Ph.D., ústav přístrojové a řídicí techniky FS

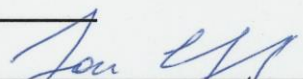
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:


Datum zadání bakalářské práce: **19.04.2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **16.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: _____


Podpis vedoucí(ho) práce

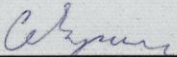

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

19. 4. 2017
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Martinu Novákovi Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.

Mé poděkování též patří Ing. Lubomíru Musálkovi za pomoc se simulacemi a také mé rodině a přítelkyni, kteří mě podporovali a byli mi vždy nablízku po celou dobu mého studia.

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá technologií MAGLEV, porovnáním systémů EMS, EDS a inductrack, simulací magnetického pole v Agros2D a tvorbou reálného modelu koleje s vagónem založeného na systému EMS s řízením konstantní výšky nad tratí.

Klíčová slova

MAGLEV, Agros2D, EMS, EDS, Inductrack

Abstract

This bachelor thesis deals with MAGLEV technology, comparing EMS, EDS and inductrack systems, magnetic field simulation in Agros2D and creating a real model track with wagon based on EMS with constant height control above the track.

Keywords

MAGLEV, Agros2D, EMS, EDS, Inductrack

1. Obsah

1. Obsah.....	6
2. Úvod.....	8
3. Historie MAGLEV	8
4. Systémy.....	8
4.1. EMS	8
4.2. EDS.....	9
4.3. Inductrack	10
5. První návrh.....	10
5.1. Volba systému	10
5.2. Detailní popis.....	11
5.2.1. Klasické cívky	11
5.2.2. Pásy z drátů	12
5.2.3. Laminovaný žebřík	12
5.3. Výpočty.....	13
6. Druhý návrh	14
6.1. Volba systému	14
6.2. Detailní popis.....	14
6.3. Výpočty	15
6.3.1. Předběžný návrh.....	15
6.3.2. Agros2D.....	16
6.4. Skutečný model	17
6.4.1. Trať s cívkami.....	17
6.4.1.1. První pokus	17
6.4.1.2. Druhý pokus.....	18
6.4.1.3. Třetí pokus.....	19
6.4.1.4. Pokus čtvrtý	21

6.4.1.5. Pokus pátý.....	21
6.4.2. Vagónky	23
6.4.2.1. Magnety.....	23
6.4.2.2. První vagónek.....	23
6.4.2.3. Druhý vagónek	23
6.4.3. Trať.....	24
6.5. Elektronické prvky	25
6.5.1. Řídící deska	25
6.5.1.1. Raspberry Pi B+	25
6.5.1.2. Arduino Nano.....	26
6.5.2. Optický senzor	27
6.5.3. Silové prvky	29
6.5.4. Zapojení silového obvodu	31
6.6. Naprogramování algoritmu	32
6.6.1. Prostředí Arduino IDE	32
6.6.2. Použité příkazy	33
6.6.3. Algoritmus	33
6.7. Reálný experiment	34
7. Závěr	36
8. Bibliografie	37
9. Přílohy.....	38

2. Úvod

Cílem této práce je napsat rešerši na téma MAGLEV systémů. Dále pak vybrat z rešerše jeden systém a vytvořit na jeho základě funkční laboratorní model. Model by měl být řízený, aby udržoval konstantní výšku nad tratí.

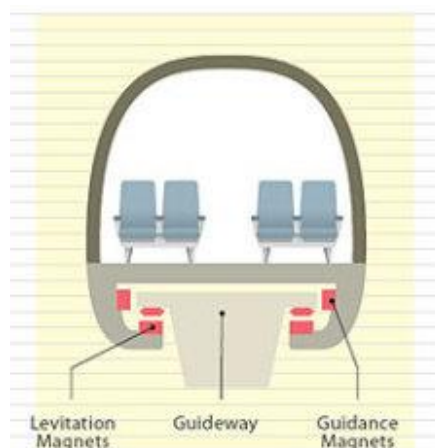
3. Historie MAGLEV

Poprvé bylo označení MAGLEV použito v 60. letech fyzikem Howardem T. Coffeyem. Je to spojení slov *magnetic* a *levitation*. V angličtině toto slovo označuje nejen magnetickou levitaci, ale i technologii dopravních prostředků, které jsou na ní založené. Důvodem vzniku rychlovlaků typu MAGLEV není jen jejich ekonomická výhodnost, ale především to, že měli vyplnit mezeru v dopravě. V době vzniku bylo možné se přepravovat letecky rychlostí kolem 800 km/h nebo autem rychlostí 130 km/h. Tyto vlaky měli vyplnit mezeru a pohybovat se rychlostí kolem 300 km/h. Jedním z prvních projektů byl německý TRANSRAPID. První zkušební tratě vznikly v 70. letech. Nyní se zkušební dráha nachází v Dolním Sasku u města Lathen. V roce 1993 byl na této trati dosažen rekord 450 km/h. [1] Aktuální rychlostní rekord drží japonská firma JR Central, jejichž vlak dosáhl rychlosti 603 km/h. [2]

4. Systémy

4.1. EMS

Zkratka electromagnetic suspension. První projekt TRANSRAPID byl postaven na tomto systému. Jedná se o jediný systém z těchto 3, který nepotřebuje pomocná kola. Princip spočívá v přitahujících se magnetech.

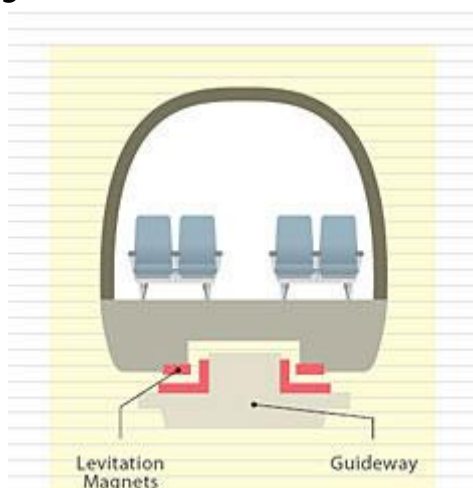


Obrázek 1 – Systém EMS [3]

Na vlaku se zespodu nachází levitační cívky, které jsou přitahovány k magnetům na hlavní dráze (koleji). Aby se vlak nedotýkal, má ještě po stranách vodící cívky, které udržují stabilitu. Cívky na vlaku neslouží však jen k levitaci, ale i k pohybu. Jedná se o rozvinutý lineární motor. Tento systém je velice pohodlný pro pasažéry, jelikož při provozu nedochází ani při nízkých rychlostech k „drncání“. Je to díky řízené levitaci, která má navíc další výhodu v tom, že posádka je vystavená jen minimálně magnetickému poli. V případě poruchy je nutné, aby měl tento systém záložní baterie. Aktuálně je tento systém komerčně využíván v čínském městě Shanghai. První komerční nasazení bylo v prosinci 2003 v Německu. [3]

4.2. EDS

Zkratka electrodynamic suspension. Tento systém byl vyvinut Japonskými inženýry. Využívá odpuzující síly magnetů.

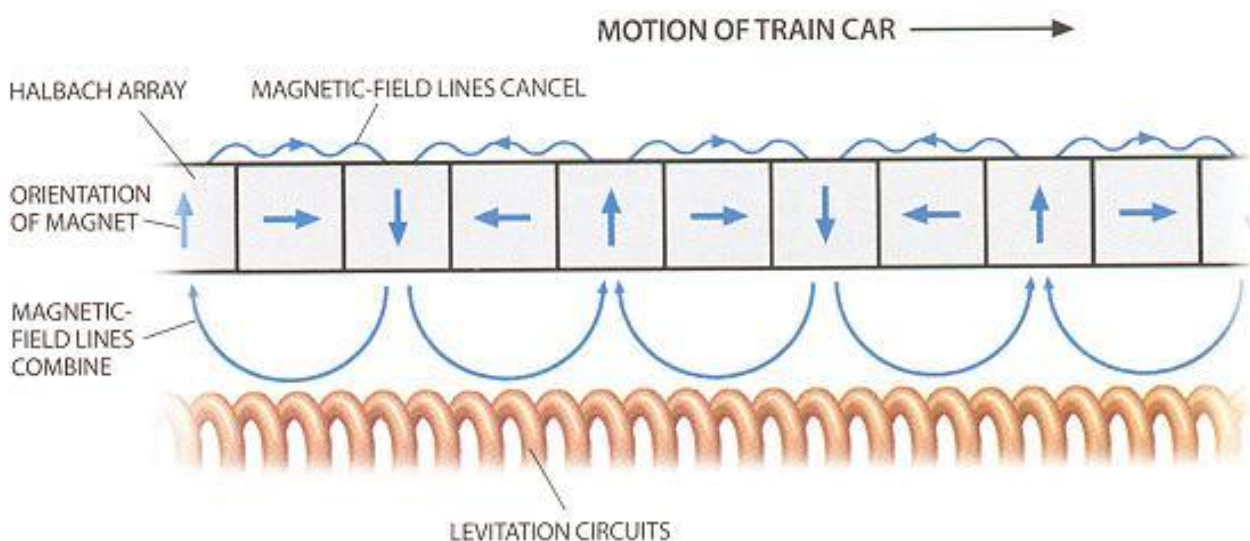


Obrázek 2 – Systém EDS [3]

Na vlaku se zespod nachází magnety. Většinou se dnes jedná o neodymové magnety. Na koleji se nachází supravodivé cívky. Výhodou systému EDS oproti EMS je, že není třeba vytvářet elektrický proud trvale. Supravodivé cívky stačí chladit. Jelikož mají nulový odpor, tak v nich proud „trvale krouží“ a tím vytváří trvalé magnetické pole. Materiál, který se dnes používá je na bázi YBaCuO. Jeho výhodou oproti mědi je, že ho stačí chladit kapalným dusíkem místo kapalného hélia. Tento vlak však musí mít i gumová kola, jelikož do rychlosti 100 km/h je levitace nestabilní. Tato kolečka jsou však výhodou, protože pokud by došlo k výpadku energie, vlak dosedne bez nehody. Nevýhodou je, že kabina musí být odstíněna proti magnetickému poli. Neodymové magnety vytváří velice silné pole, které by mohlo poškodit například kreditní karty. [3]

4.3. Inductrack

Tento systém je nástupcem EDS. Není však ještě nikde komerčně nasazený.



Obrázek 3 - Systém Inductrack [3]

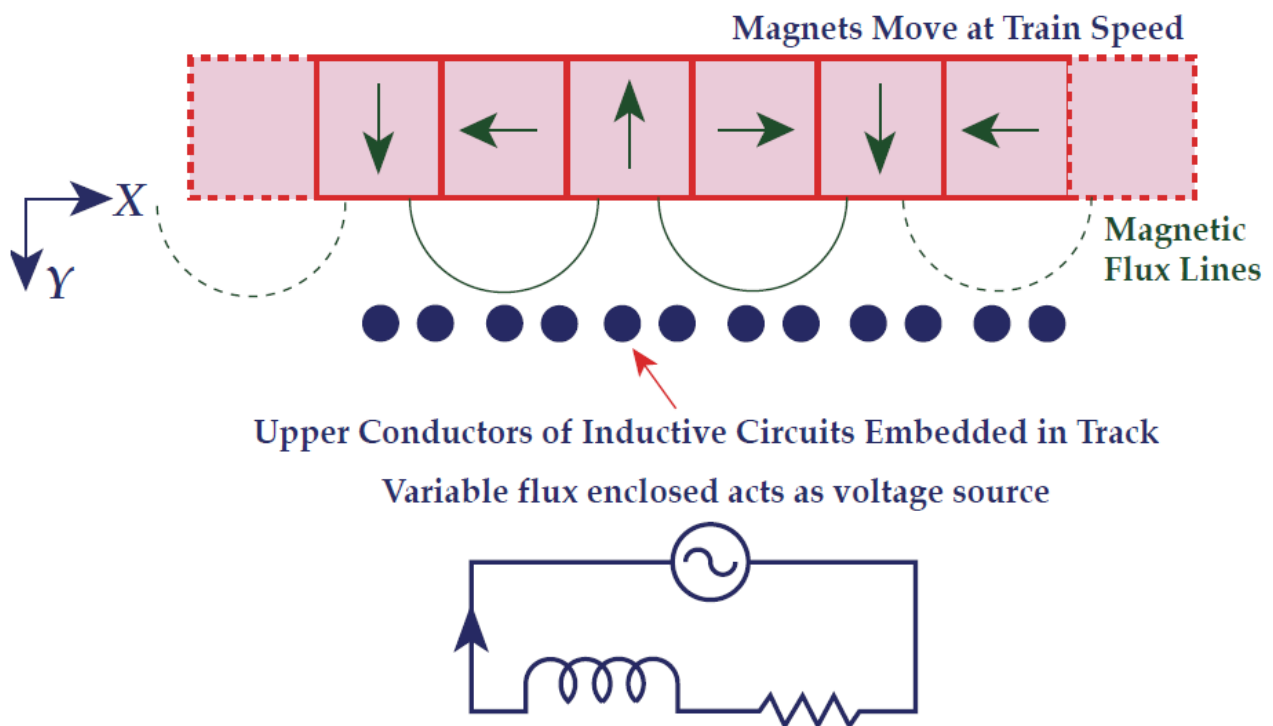
Zde se na vlaku opět zespolu nachází magnety. Nyní jsou však poskládané do takzvaného Halbachova pole. Toto pole na jedné straně zesílí magnety, na druhé straně však oslábnu. Na koleji je položený plochý žebřík vyrobený z mědi a zalitý v laminátu. Výhodou systému Inductrack je, že je celý pasivní. Není nutné dodávat elektrický proud ani chladit magnety nebo cívky. Jediné, co je třeba, tak je rozpořhobovat vlak na určitou rychlost. Vlak poté začne sám indukovat proudy v měděném žebříku a ty odpuzují magnety. Rozděluje se na Inductrack I a Inductrack II. Rozdíl je v rychlosti, při které dochází k levitaci. První je pro vyšší rychlosti, druhý má dvě Halbachova pole, tudíž stačí rychlost menší. I tento systém stejně jako EDS musí mít podpůrná kolečka na rozjezd. Momentálně však neexistuje žádný vlak, který by toto využíval. [3]

5. První návrh

5.1. Volba systému

Pro malý laboratorní model jsem nejprve zvolil systém Inductrack, protože mě zaujala energetická nenáročnost.

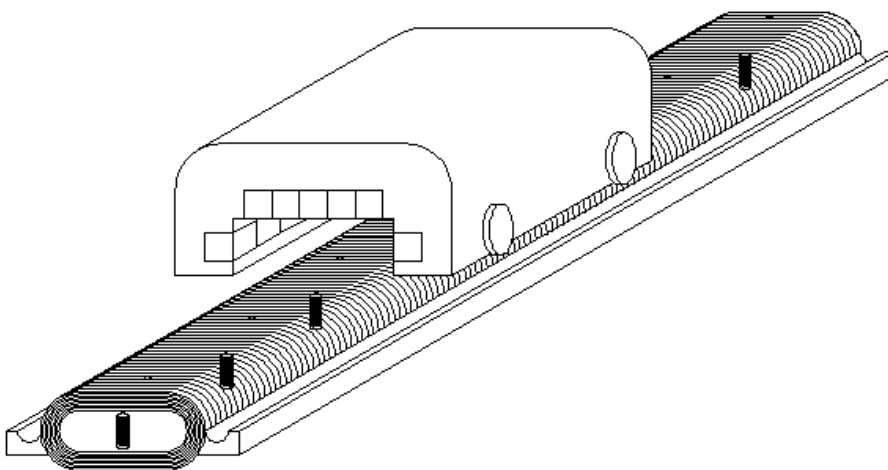
5.2. Detailní popis



Obrázek 4 -Elektrické schéma Inductrack [8]

Jak již bylo řečeno, na spodu vlaku se nachází Halbachovo pole. To je tvořené zpravidla neodymovými magnety. Jejich remanence je kolem 1,05 – 1,3 T. [4] Na koleji se mohou nacházet 3 různé druhy „cívky“. Tento druh provedení dokáže mít velikou sílu. Poměr toho, kolik uzvedne ku tomu, kolik sám váží (angl. Lift/Drag) je 200:1. Pro představu, klasický raketový motor má 25:1.

5.2.1. Klasické cívky



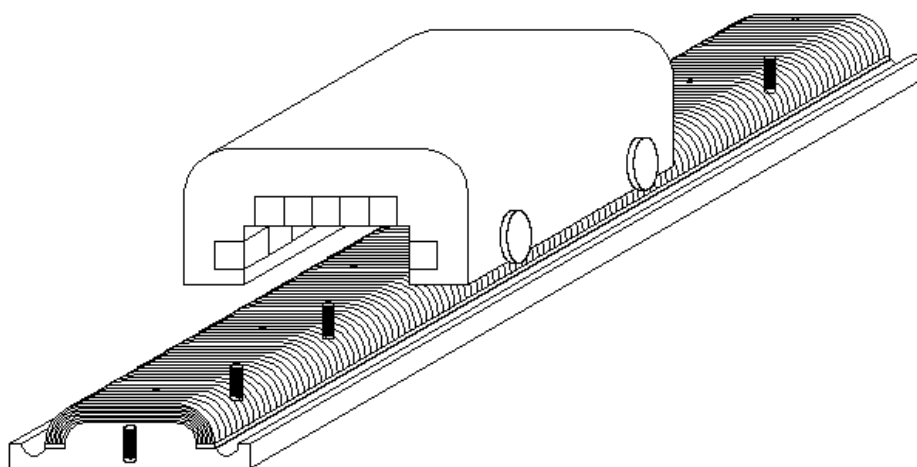
Obrázek 5 - Inductrack s cívkami [5]

Klasické cívky byly prvním prototypem. Rychle se od nich upustilo, jelikož spotřeba mědi je na větší vzdálenosti opravdu velká. Byly použity jen na první model trati Inductrack na světě. S modelem přišli v „Lawrence Livermore National Laboratory“.

[5]

5.2.2. Pásy z drátů

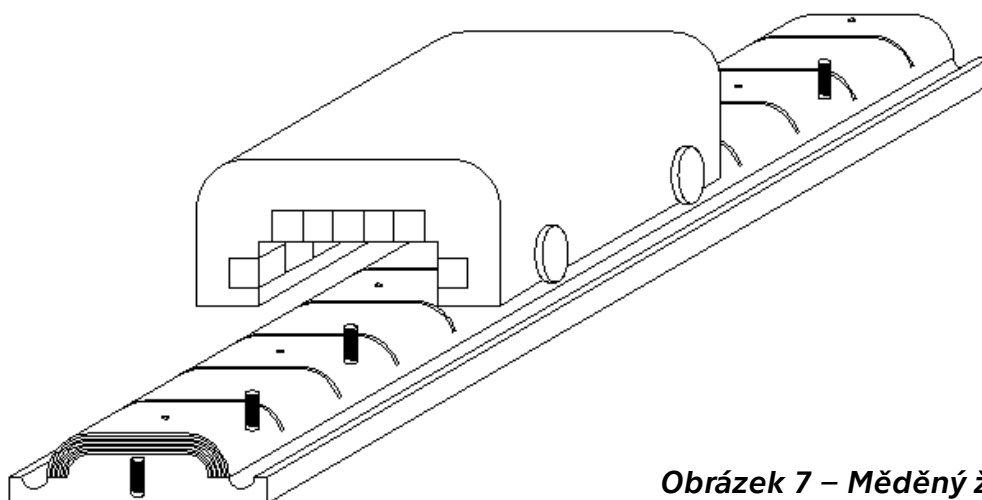
Tyto pásy nebo svazky drátů jsou aktuálně užívané u Inductrack II, tj. pro malé rychlosti. Jsou to svazky měděného drátu zabalené do nerezového obalu a na konci propojené měděným plátkem. [5]



Obrázek 6 – Inductrack se svazky drátů [5]

5.2.3. Laminovaný žebřík

Třetí možností podkladu, která je zároveň nejvíce ekologická a ekonomická je měděný žebřík. Je tu možnost použít i hliník, jelikož vířivé proudy se vytvoří i v něm.



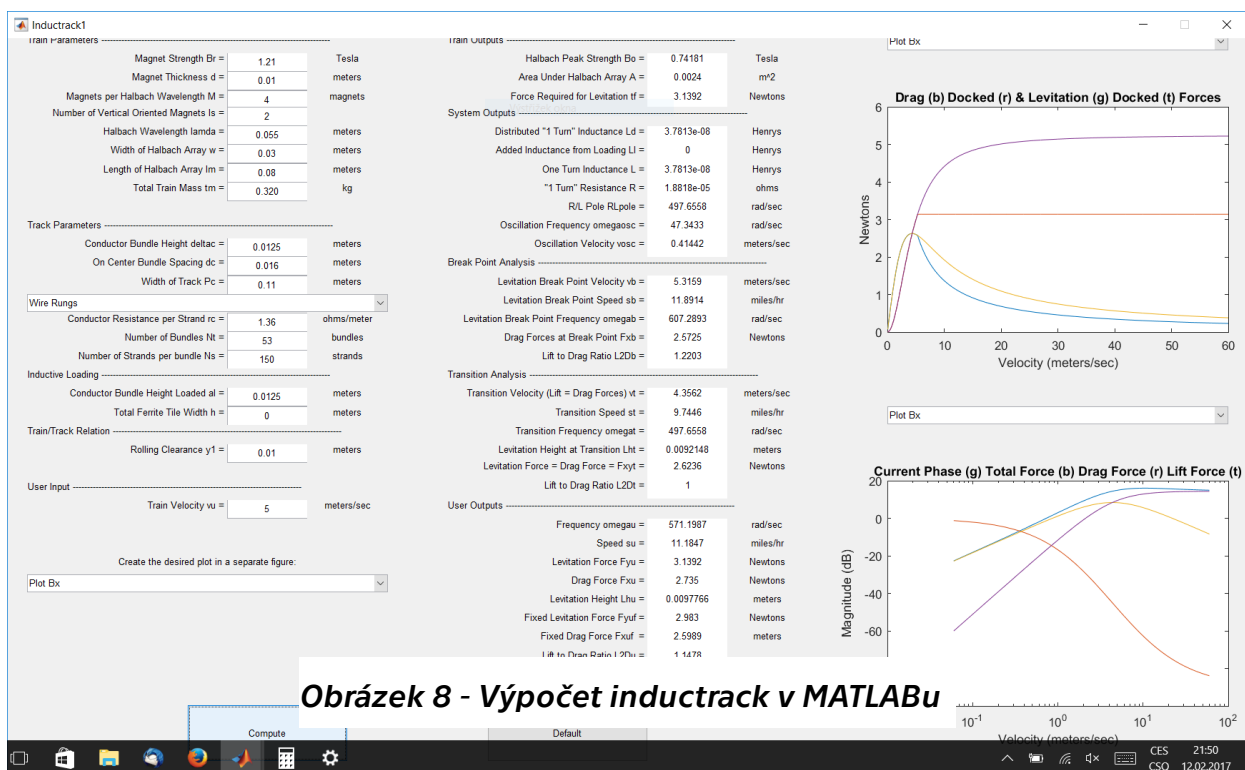
Obrázek 7 – Měděný žebřík [5]

Jejich výroba je jednoduchá, stačí plát mědi a do něj se vyříznou nebo vypálí drážky, následně se zalaminují dohromady ve více vrstvách. [5]

5.3. Výpočty

Na systém inductrack existují výpočtové vzorce, které jsou však velice obsáhlé.

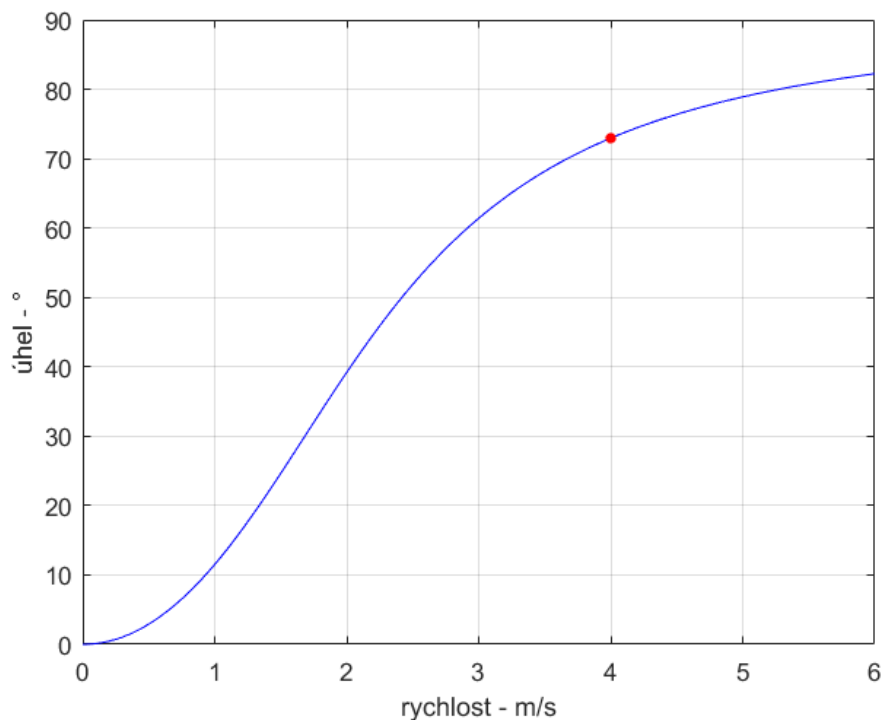
Pro praktické výpočty se však jako výhodnější ukázalo použít software MATLAB. Pro výpočet síly, která zvedá vagoněk jsem použil již vytvořený skript ze zdroje [5].



Obrázek 8 - Výpočet inductrack v MATLABu

Výsledky z tohoto programu ukázaly, že je třeba dosáhnout rychlosti 5 m/s. Jako prostorové parametry pro tento model jsem si určil kružnici o průměru 1 metr. Dále jsem si musel spočítat obvodovou rychlost na této kružnici a odstředivou sílu. Po vytvoření grafu v MATLABu však vyšlo, že odstředivá síla je příliš veliká a bude třeba naklonit dráhu. Z grafu však vycházelo, že je třeba jí naklonit o 72°.

První návrh tedy nemohl být realizován z důvodu, že při nulové rychlosti by vlak nedržel na dráze a spadl by. Jako další jsem tedy zvolil systém EMS.



Obrázek 9 - Graf závislosti naklonění dráhy na rychlosti

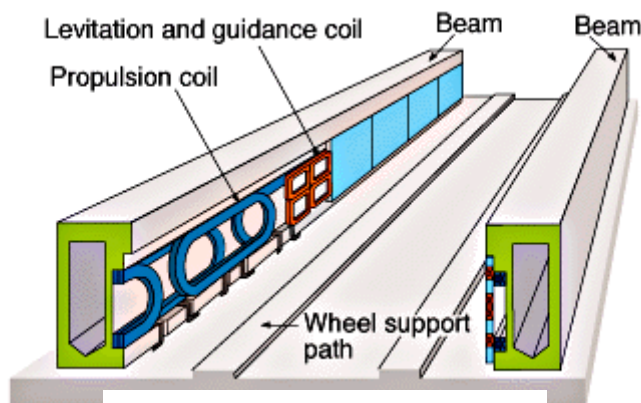
6. Druhý návrh

6.1. Volba systému

Pro druhý návrh jsem zvolil systém EMS, který je jediný, co nepotřebuje kolečka. Navíc nepotřebuje žádné supravodivé materiály.

6.2. Detailní popis

EMS je oproti Inductrack aktivní systém, tj. potřebuje pro levitaci aktivní zdroj energie, v tomto případě elektřinu. Trať se skládá ze dvou částí, levitační a propulsní.



Obrázek 10 - Schéma EMS [3]

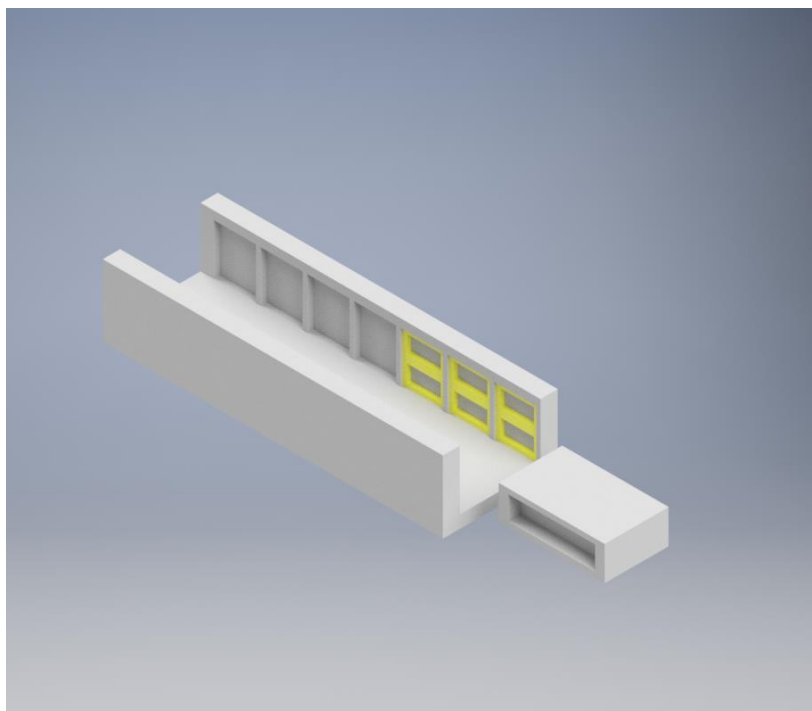
Principem levitačních cívek je, že jsou rozdělené na horní a dolní. A každá má jiný směr toku proudu, tudíž i jiný pól magnetického pole. Na vlaku je umístěný magnet, který magnetickým pólem odpovídá pólu dolní cívky, takže se odpuzují. Naopak k horní cívce je magnet přitahován, takže dochází k levitaci. Dále jsou tu cívky propulsní. Ty mají mnohem silnější magnetické pole. Do těchto cívek je puštěn proud, pokud je požadován pohyb. Zjistí se nejprve poloha vlaku a pak se do cívky před ním pustí proud tak, že magnety na stranách, které slouží k levitaci, jsou zároveň využity k pohybu a jsou přitaženy do pole propulsní cívky. Než se však vlak dostane do středu cívky, je pole vypnuto a zapnuto opět v cívce před ním.

6.3. Výpočty

U tohoto systému jsou výpočty velice náročné a neexistují konkrétní vzorce, proto se využívá numerických simulací. Já jsem na doporučení využil k simulaci program Agros2D ze Západočeské univerzity v Plzni.

6.3.1. Předběžný návrh

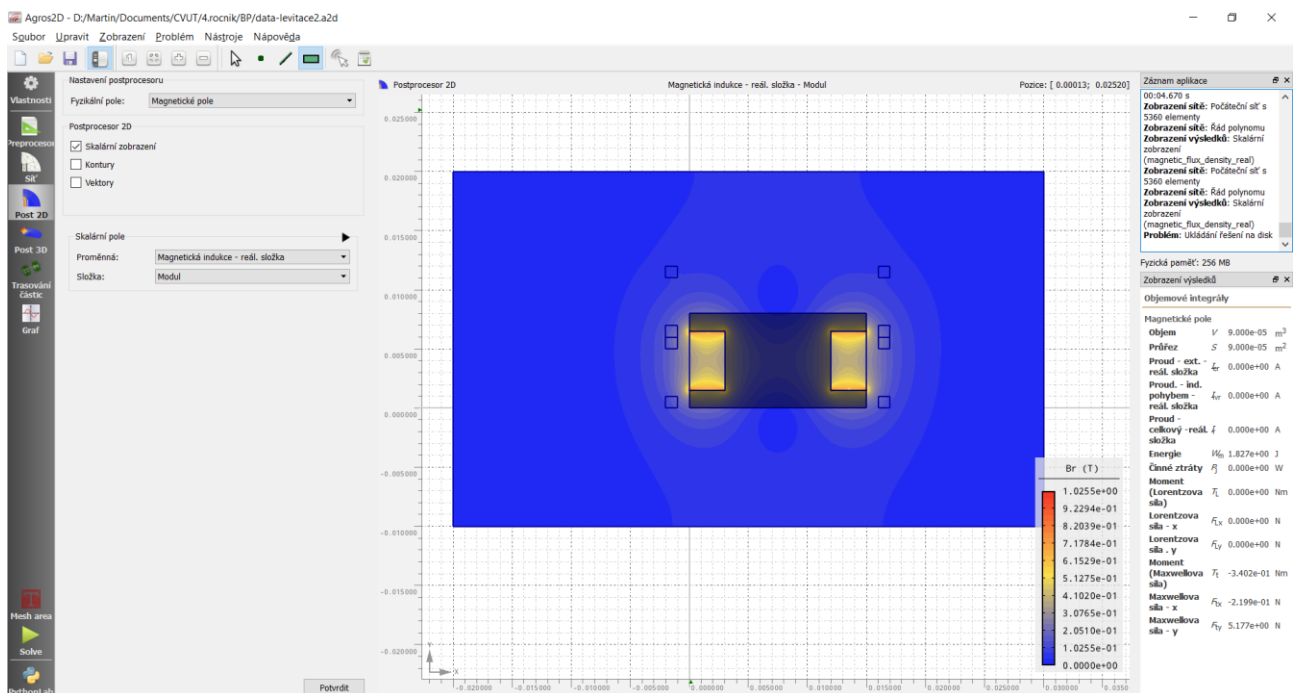
Jako předběžný návrh volím stejné provedení jako na obrázku 10, ale bez propulsních cívek. Vagónek bude mít pouze 2 magnety. Trať bude vypadat jako koridor, který bude mít po stranách cívky (v obrázku 11 žlutou barvou).



Obrázek 11 - Předběžný model

6.3.2. Agros2D

Agros2D je multiplatformní aplikace na řešení fyzikálních problémů založená na knihovně Hermes. Aplikace podporuje i skriptování v programovacím jazyce Python. Program má 3 osy: X, Y a Z. Osa Z je pevně nastavená na 1 m, proto má program v názvu 2D. Po zapnutí programu nastavíme problém, jaký chceme řešit. V mém případě se jedná o magnetismus. Dalším krokem je vytvoření modelu, konkrétně řezu. Můj výpočet se týká pouze levitačních cívek. Vymodeloval jsem je jako čtvercové plochy, kdy plocha odpovídá $S_C = S_d * n * \varepsilon$, kde S_d je průřez drátu, n je počet závitů a $\varepsilon = 0,5$ je součinitel plnění. Dále jsem vymodeloval vagónek se dvěma magnety po stranách. Všem ohraničeným prostorům jsem přiřadil parametry materiálů, ze kterých jsou ve skutečnosti vyrobené. Cívky z mědi, magnety z neodymu a vagónek z plastu. Cívkám jsem nastavil, že jimi prochází proud 15 A. Parametr, který se zadává jsou totiž Ampérvzávity, tudíž jedním drátem prochází 1 A při použití 15 závitů. Důležité bylo celý experiment ohraničit a nastavit jako atmosféru vzduch, kdy na konci ohraničení již nepůsobí žádné magnetické pole. Poté jsem již nechal pracovat program, který vytvořil trojúhelníkovou síť a v ní počítal jednotlivé magnetické pole. Výsledná Maxwellova síla je potom spočítána programem jako integrál na plochách magnetu.



Obrázek 12 - Agros2D

6.4. Skutečný model

Jelikož výpočty vycházely dobře, začal jsem tisknout první model vagónku.

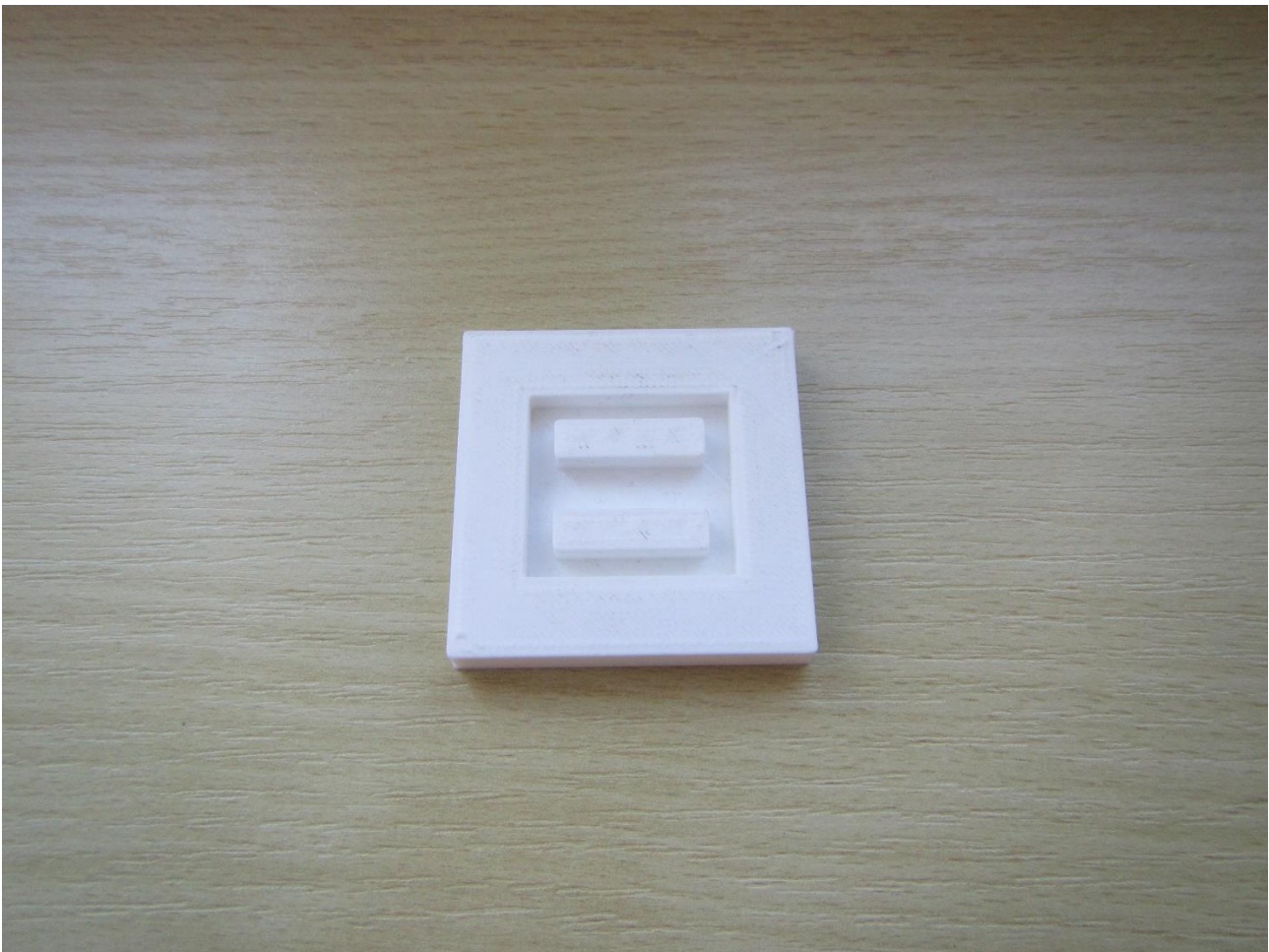
6.4.1. Trať s cívkami

Trať je navržena jako lineární segment, ze kterých je možné postavit dále celou dráhu.

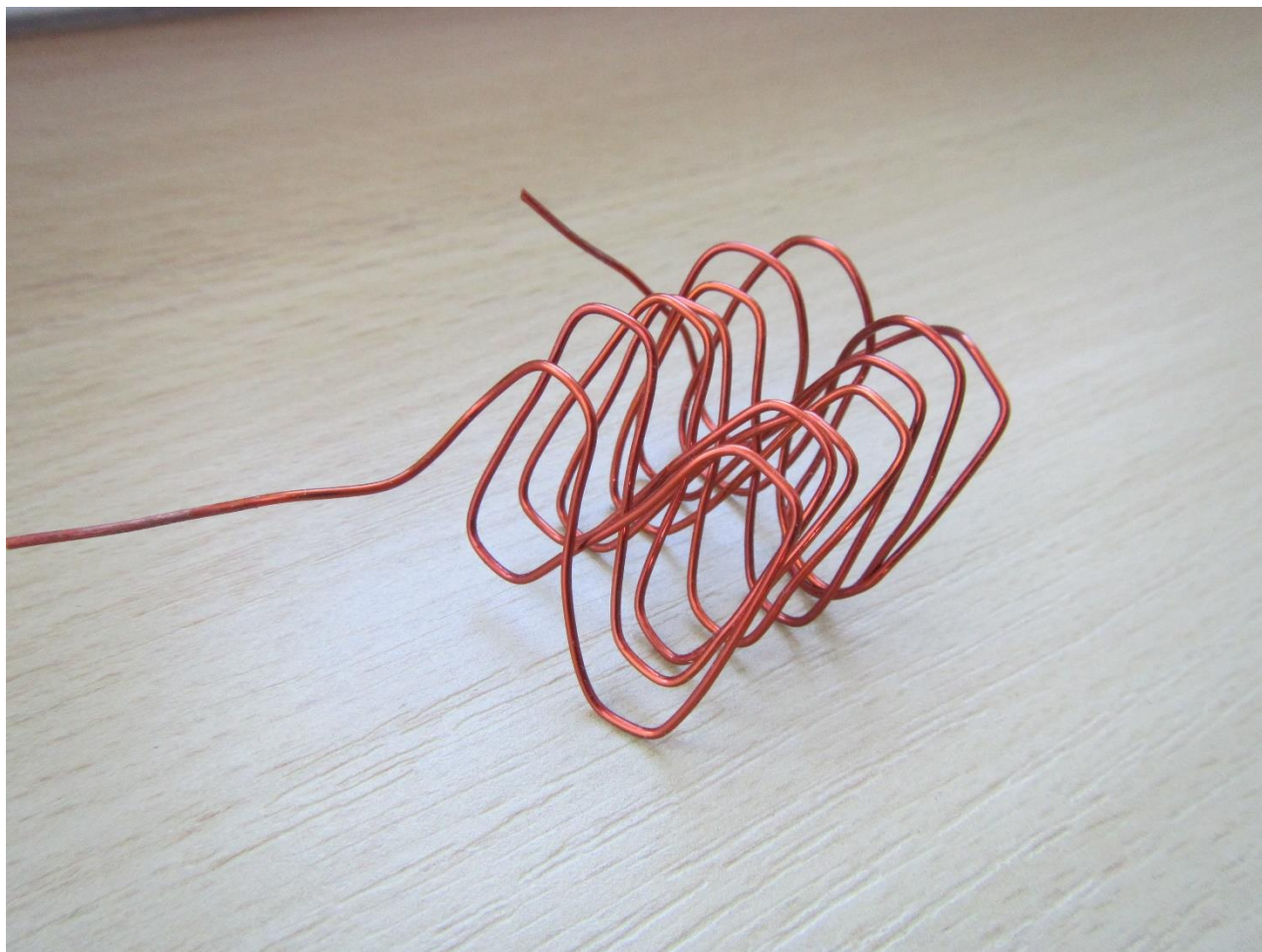
6.4.1.1. První pokus

Nejprve jsem zkusil cívky vytvářet jako osmičky. To by mělo výhodu, že do jednoho páru by vedly pouze 2 dráty. Problém byl však v tom, jak je navinout.

První pokus byl namotat cívku do zapuštěné drážky. To však nedopadlo dobře, jelikož se drát nedá utáhnout, a tak se sám rozvinul.



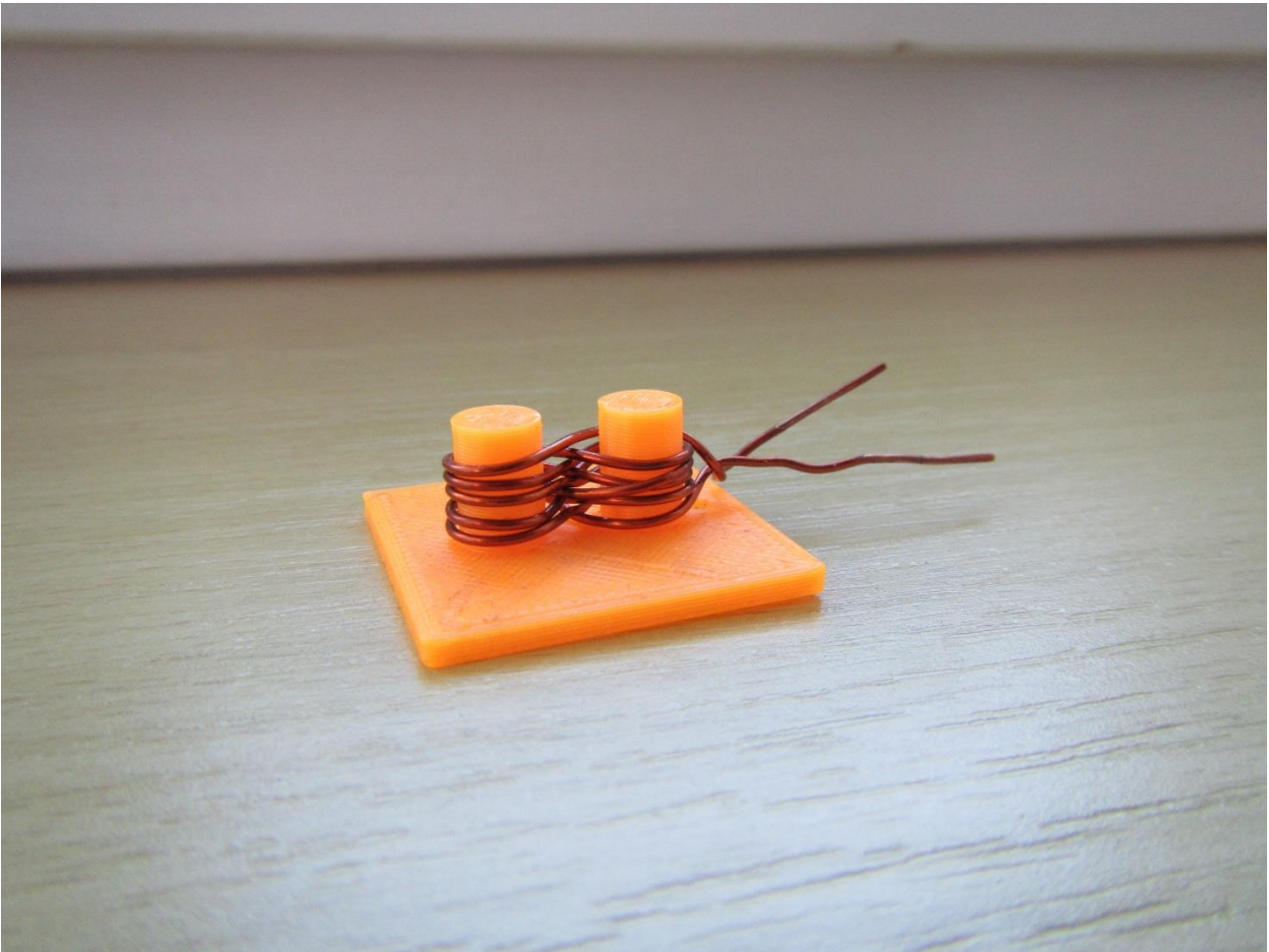
Obrázek 13 - První přípravek na navíjení



Obrázek 14 - Nedostatečně utažený drát

6.4.1.2. Druhý pokus

Druhý pokus jsem začal úvahou, že vlastně vůbec nevádí, zda bude jádro uvnitř vzduchové nebo z plastu. Proto jsem vytiskl model s kruhovými jádry. Při namotávání se však ukázalo, že je to též nemožné, jelikož v určitém místě, konkrétně uprostřed musí drát projít pokaždé, a proto tam výška narůstá dvojnásobnou rychlostí.



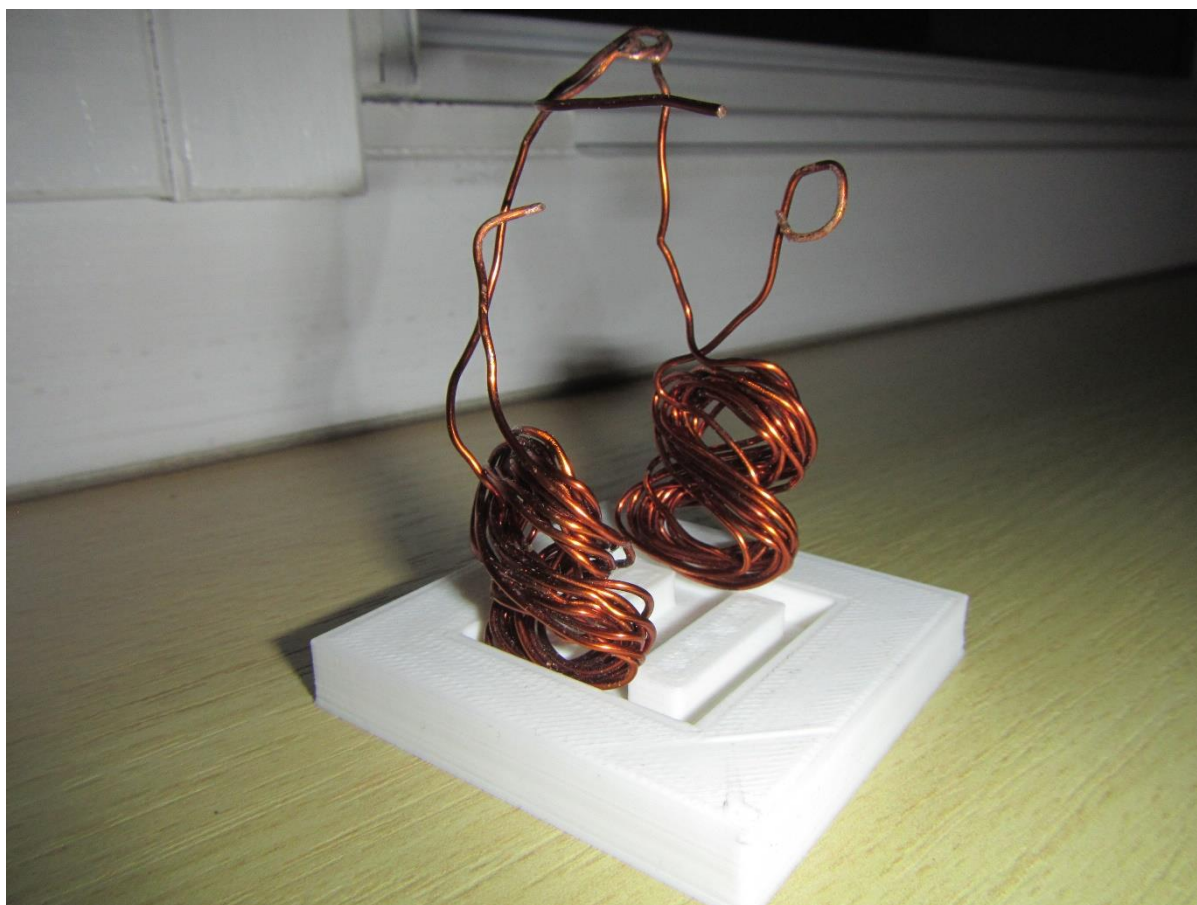
Obrázek 15 - Navíjecí přípravek s kruhovými jádry

6.4.1.3. Třetí pokus

Třetí pokus už byl první funkční, nicméně ne ještě jako dráha. Princip navíjení byl navinout obdélníkový tvar a ten následně překroutit o 180° . Vznikla tak cívka s tvarem 8. U tohoto pokusu jsem dosáhl i levitace, ovšem při proudu 3,2 A. To se od simulace v Agros2D velice lišilo.



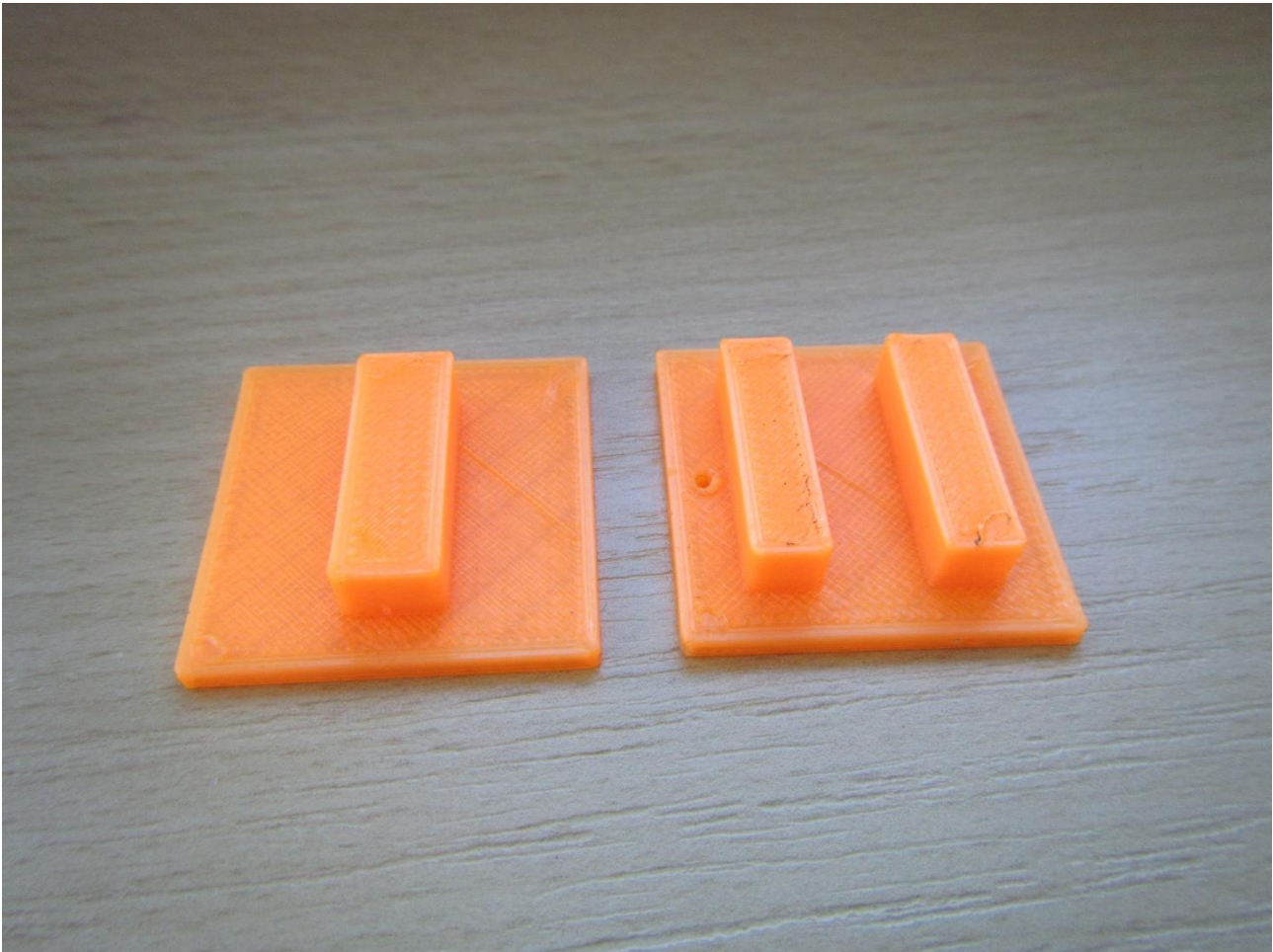
Obrázek 16 - Překroucené funkční cívky



Obrázek 17 - Spojené kroucené cívky při testování

6.4.1.4. Pokus čtvrtý

Při čtvrtém pokusu jsem se odpoutal od myšlenky cívek ve tvaru 8. Čtvrtý pokus byl tvořený dvěma obdélníky.



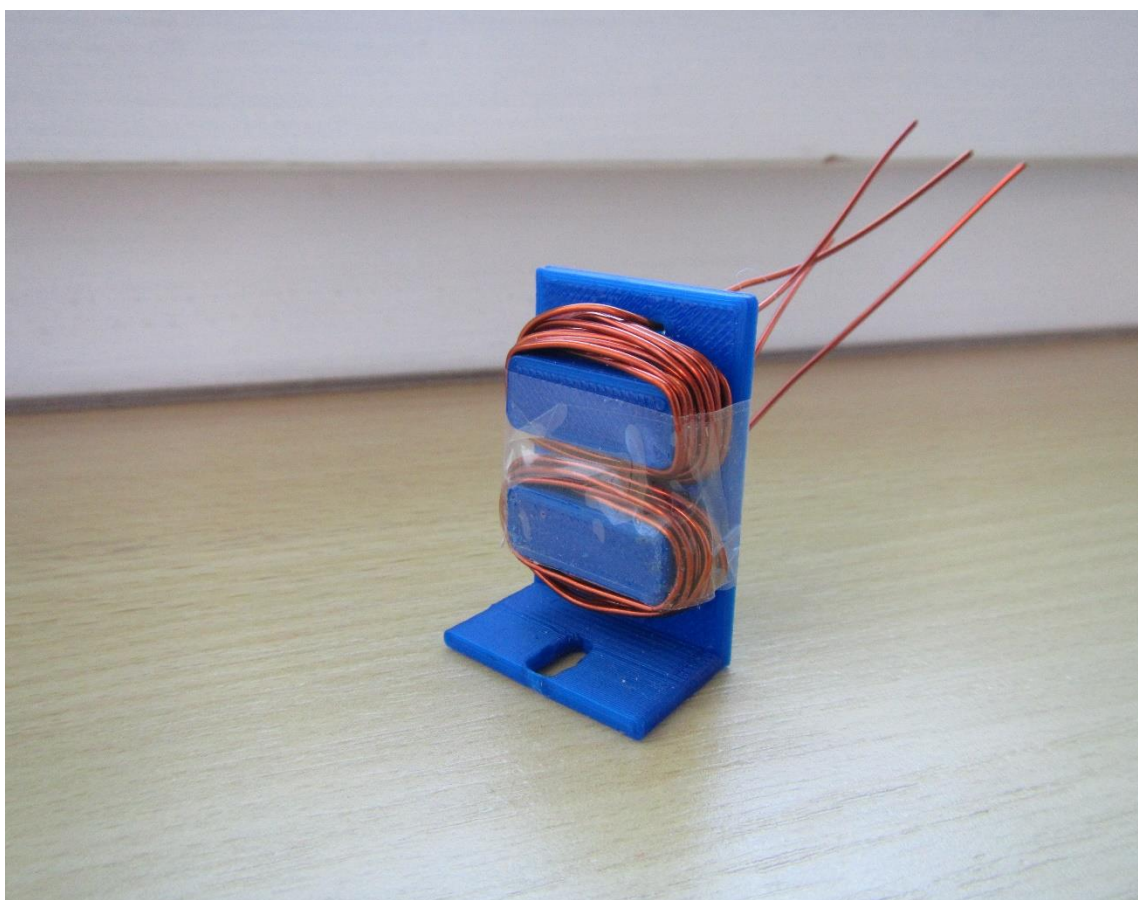
Obrázek 18 - Přípravek na navíjení obdélníku

6.4.1.5. Pokus pátý

U pátého pokusu došlo už jen k modifikaci navíjecího přípravku, do kterého jsem dal šroubek. Byl totiž problém s navíjením a utahováním, kdy závity dokázaly roztáhnout přípravek. Dále došlo k úpravě plastového držáku cívek, který tvoří kolej. Přidal jsem rádius v rozích jádra, takže se snadněji nasazuje a dále byla do dna vytištěna podlouhlá díra, takže je možné ho přišroubovat k podkladu a zároveň nastavit rozteč.



Obrázek 20 - Finální přípravek



Obrázek 19 - Finální segment s navinutýma cívkami

6.4.2. Vagónky

6.4.2.1. Magnety

Použil jsem magnety, které se používají i u skutečných vlaků, a to neodymové magnety. Jejich rozměr je 20x5x3 mm. Jejich magnetická remanence je 1,2 T.

6.4.2.2. První vagónek

První návrh je pouze kostička z plastu, která má po stranách drážky na vložení magnetů. Model z programu Inventor je vidět na obrázku 11. Magnety do této kostičky nebyly nijak zalepeny, jsou pouze přitahovány magnetickou silou skrz plast. Tento vagónek má však problém s pohybem, jelikož „skáče“ mezi jednotlivými cívkami.

6.4.2.3. Druhý vagónek

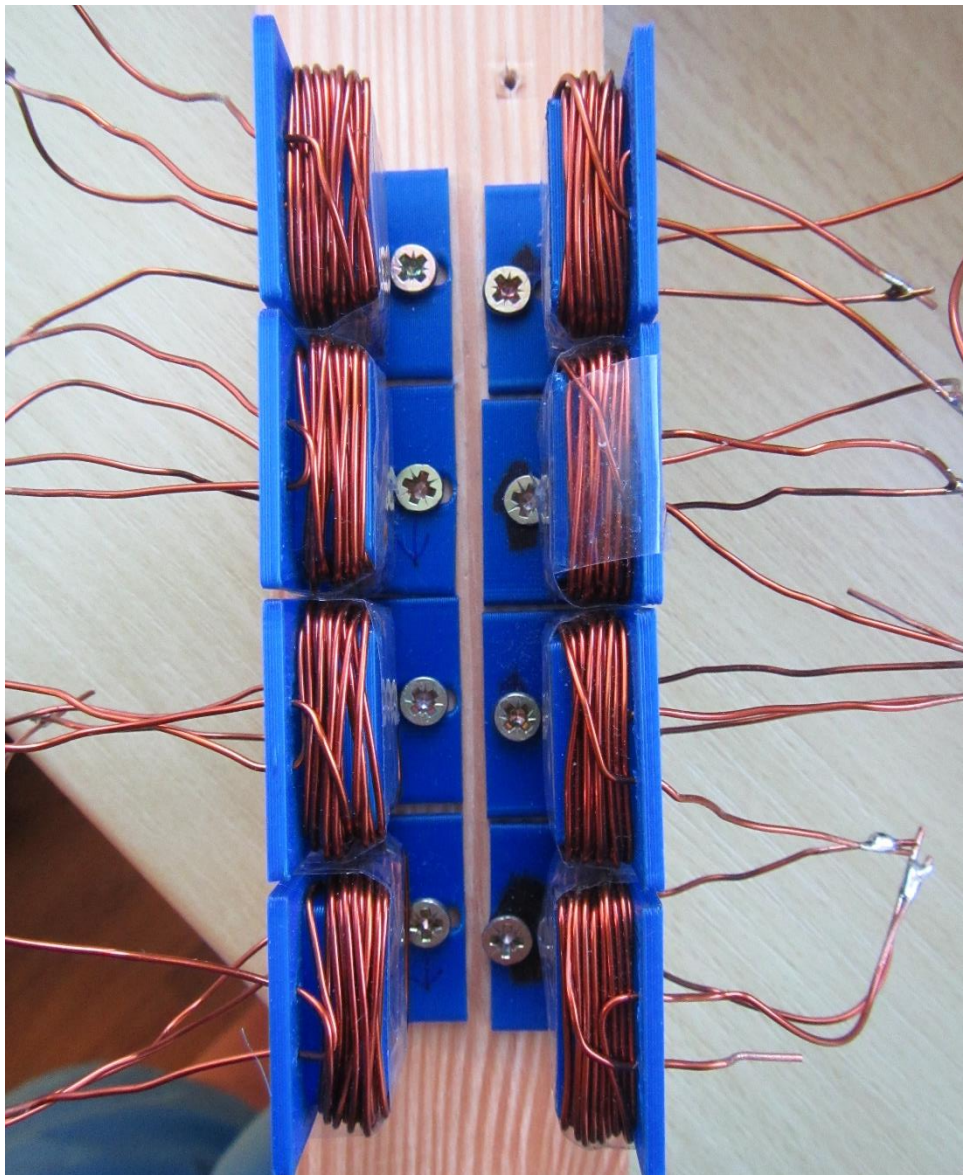
Druhý návrh je již vyšší a má v sobě 4 magnety. Magnety jsou posunuty o 1,5 délky rozteče cívek, tudíž pohyb vagónku by měl být teoreticky plynulejší.



Obrázek 21 - Delší vagónek se 4 magnety

6.4.3. Trať

Jednotlivé segmenty jsem připevnil na dřevěnou latku tak, aby utvořily koridor, který tvoří danou trať. Při použití finálních segmentů jsem se dokázal dostat na levitaci při proudu již 1,5 A. Dále jsem otestoval maximální proud, než se drát začne ohřívat. Podmínkou je teplota 55°C, jelikož plast, ze kterého je dráha vytištěna má teplotu měknutí 60°C. Maximální proud byl až 4,2 A po dobu 45 vteřin. Navržený drát má průměr 1 mm. Jeho trvalá zátěž dle katalogu je 1A. Experimentálně jsem se ale dostal až na hodnotu 3A bez jakéhokoli oteplení, jelikož celkový výkon je menší. Napětí jsem zvolil 5V, aby to bez problému prošlo všemi cívkami. Celkový výkon je tedy při zatížení 3A jen 15W.



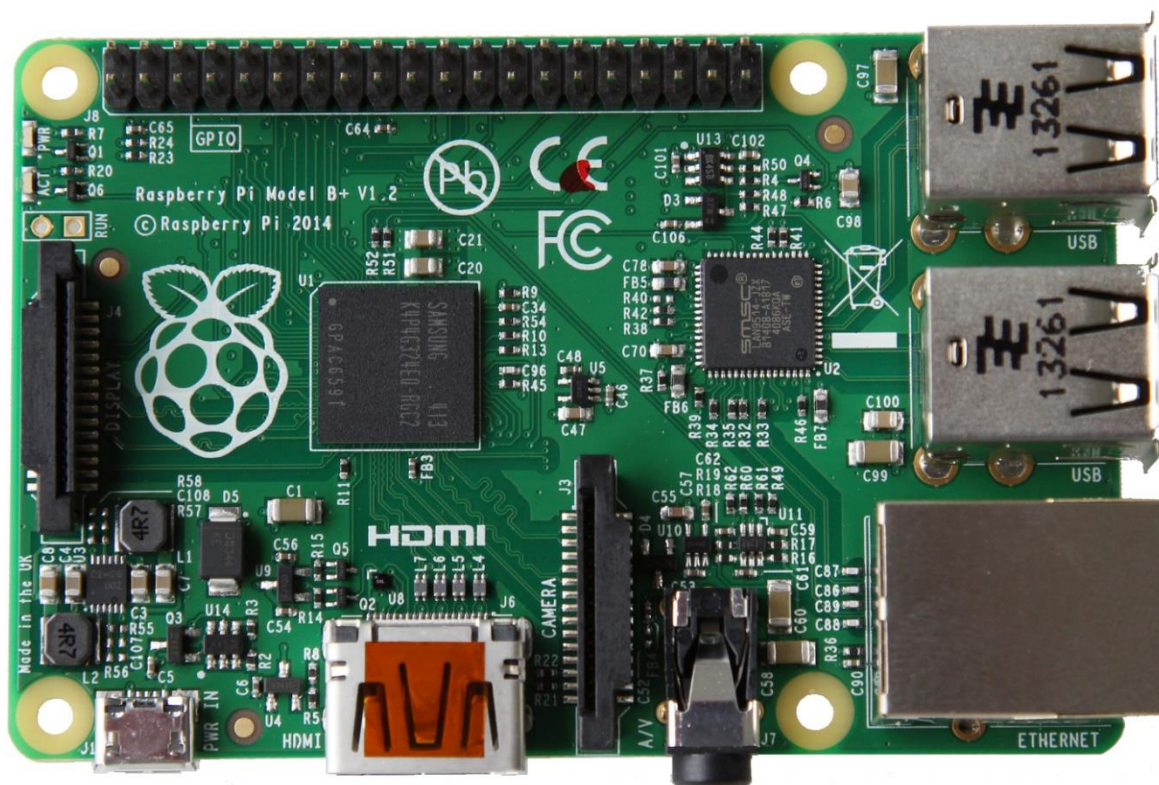
Obrázek 22 - Trať

6.5. Elektronické prvky

6.5.1. Řídící deska

6.5.1.1. Raspberry Pi B+

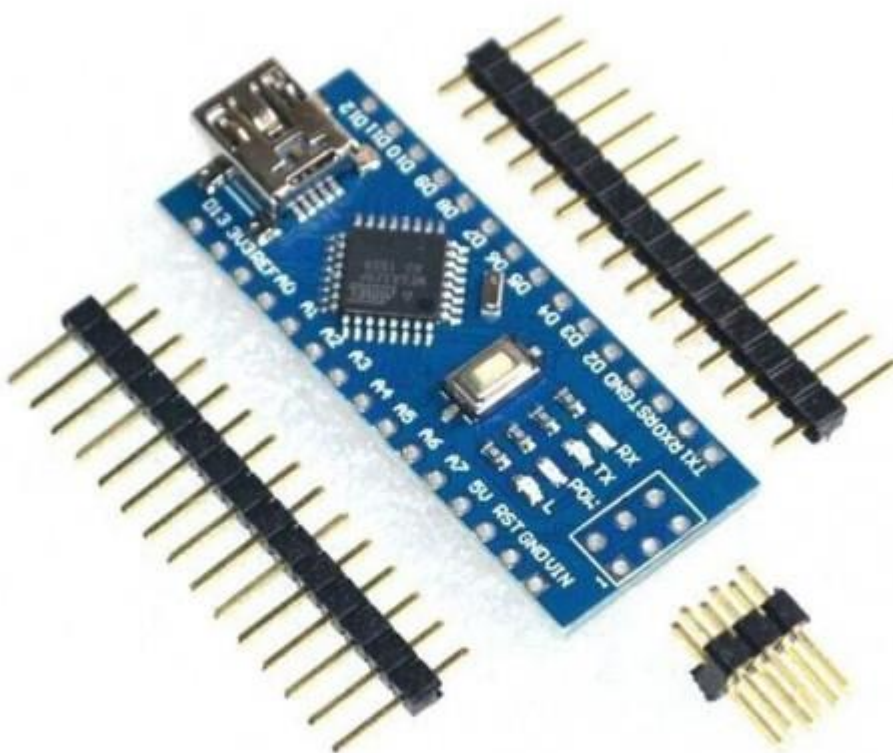
Jako první návrh hlavního řízení trati jsem zvolil Raspberry Pi. Je to malý levný počítač s GPIO vstupy/výstupy. Jeho výhodou je, že má operační systém, tudíž by bylo možné během provozu přímo zpracovávat data například do grafu jednoduchou cestou pomocí programovacího jazyka Python a zobrazovat je na monitoru připojeném přes HDMI. Nevýhodou je však to, že Raspberry disponuje pouze jedním PWM výstupem a nemá žádný analogový vstup, tudíž by se musel zapojovat ještě A/D převodník. Z toho důvodu jsem nakonec zvolil Arduino.



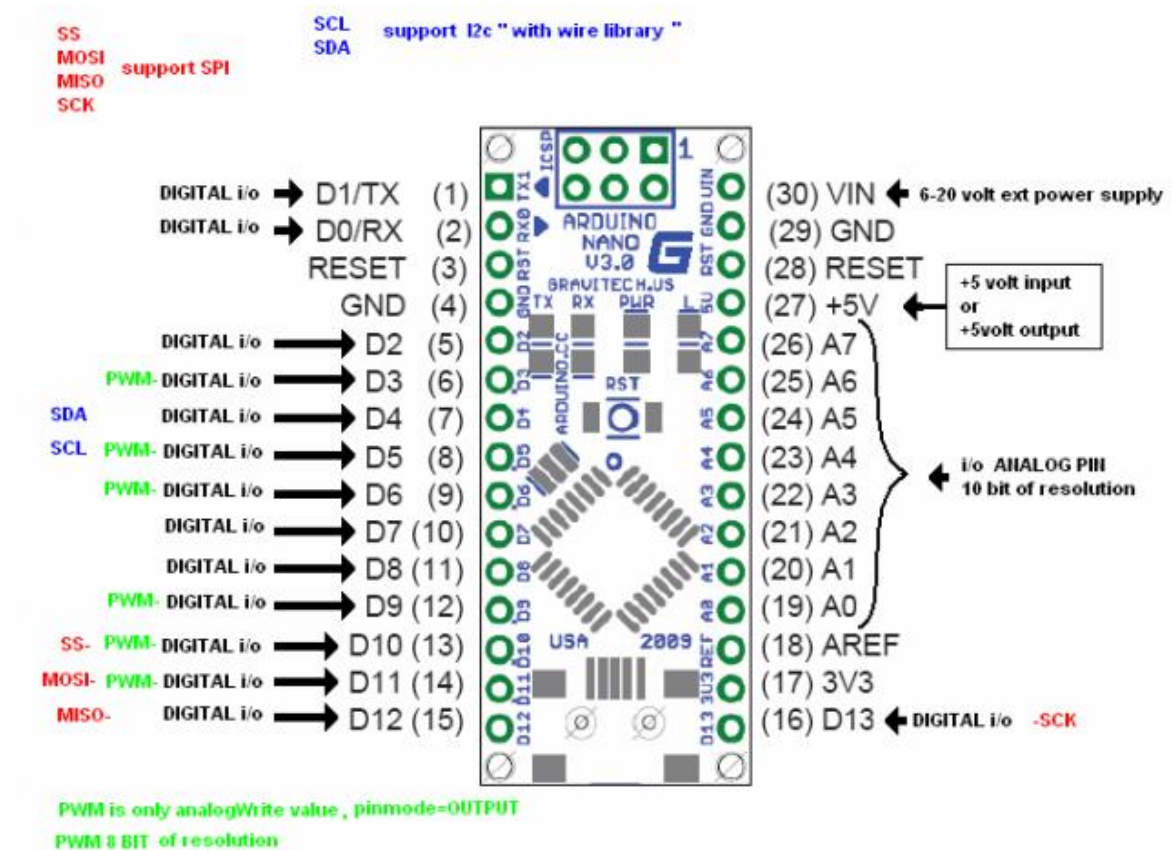
Obrázek 23 - Raspberry Pi B+

6.5.1.2. Arduino Nano

Arduino je název malého jednodeskového mikropočítače. Rodina arduino má velké množství modelů, například: Uno, Mega2560, Leonardo nebo Nano. Tyto mikropočítače disponují několika analogovými vstupy a digitálními piny, včetně PWM. Pro mě je důležité, aby měl minimálně jeden PWM výstup a 5 analogových vstupů. S ohledem na ekonomickou část jsem zvolil nakonec model Nano. Tento model má 8 analogových vstupů, 14 digitálních vstupů/výstupů, z toho 6 PWM portů. Napětí logické úrovně je 5V. Je osazena procesorem ATmega328 s taktem 16MHz. Flash paměť je 32 kB.



Obrázek 24 - Arduino Nano [10]



Obrázek 25 - Schéma pinů desky Nano [9]

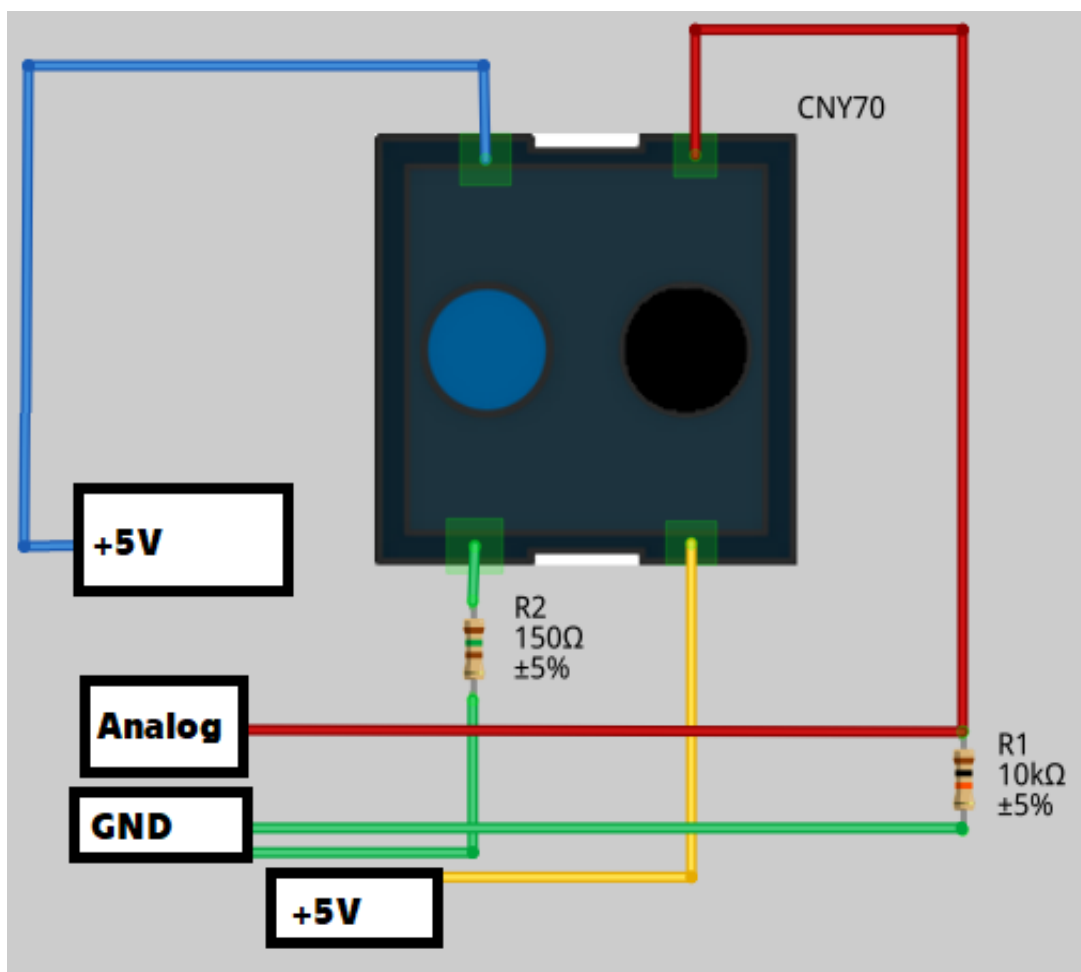
6.5.2. Optický senzor

Senzor vzdálenosti jsem vybral optický senzor CNY70. Jedná se o reflexní optočlen. Obsahuje 2 diody, vysílací a přijímací. Pokud je objekt v určité vzdálenosti, pak se odrazí jen menší množství světla a zbytek se rozptýlí. Přijímací dioda je fototranzistor, na kterém je možné naměřit napětí podle množství dopadajícího světla. Senzor bude zapojen do analogového vstupu. Data budou vyhodnocována z více senzorů současně.



Obrázek 26 - Reflexní optočlen CNY70 [6]

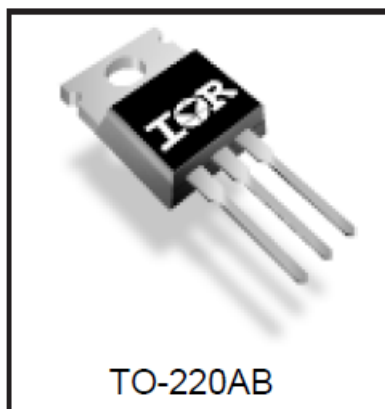
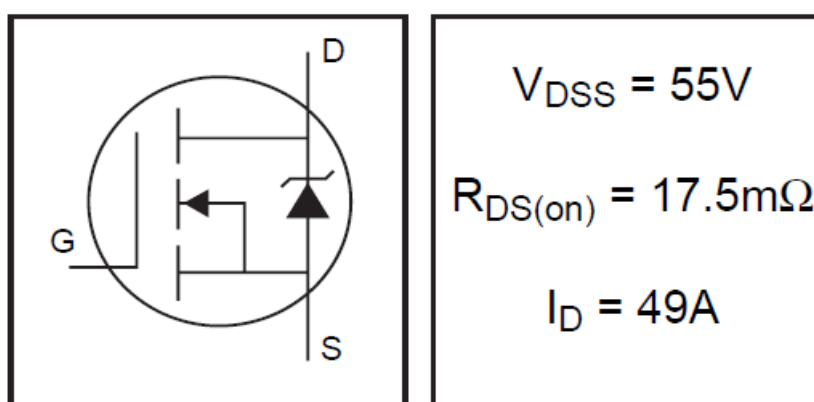
Důležité je též zapojení reflexního optočlenu.



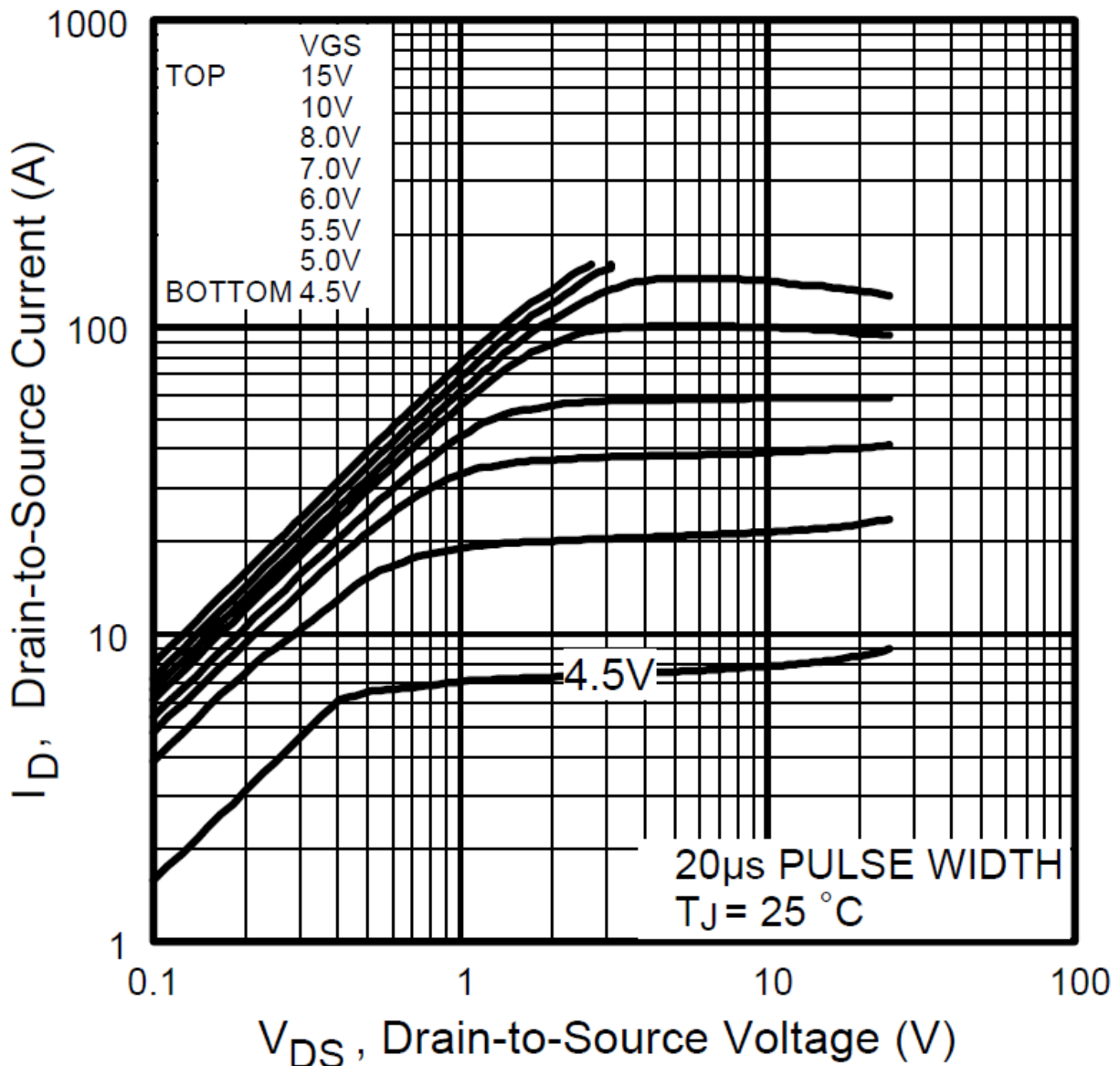
Obrázek 27 - Připojení CNY70 k Arduino

6.5.3. Silové prvky

Mezi silové řídicí prvky bych zařadil tranzistor a k němu ochrannou diodu. Typ tranzistoru jsem zvolil MOSFET. Proud, který protéká obvodem jsou maximálně 4 A. Napětí je 5 V. Tedy výkon v silové části je maximálně 20 W. Napětí, které dává arduino na ovládací části je 5 V. Těmto parametrům vyhovuje tranzistor IRFZ44N. Je to rychlý tranzistor, podporující PWM. Minimální napětí na Gate je 4,5 V. Pro 5 V na gate je schopný přenést při napětí v silové části 5 V proud 20 A s časem vypnutí a zapnutí 20 μ s.



Obrázek 28 - Tranzistor IRFZ44N [7]

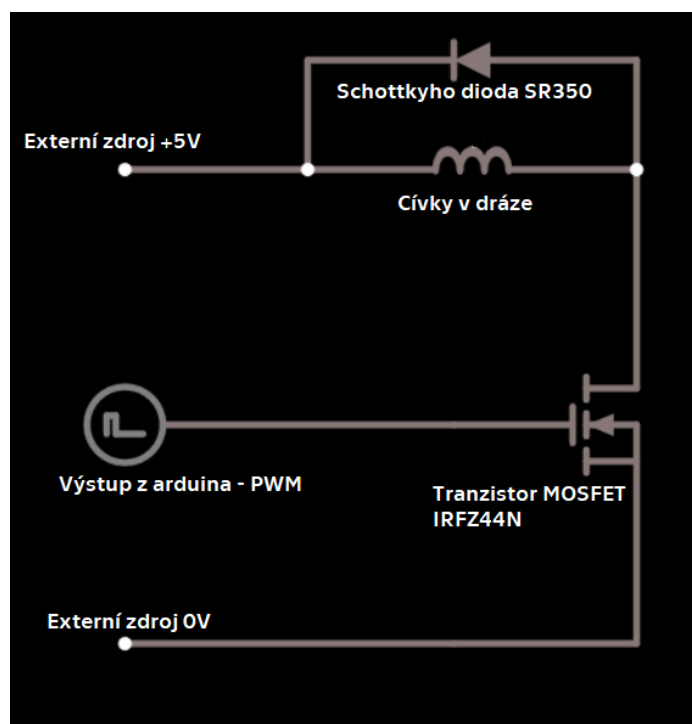


Obrázek 29 - Charakteristika tranzistoru [7]

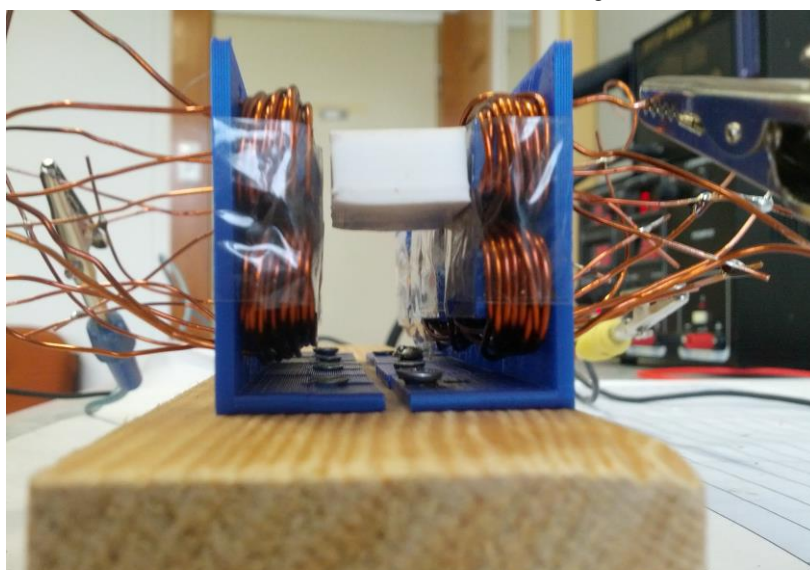
Jelikož se jedná o PWM ovládání cívek, je nutné tranzistor ochránit proti napěťovým špičkám, které vznikají při vypnutí obvodu podle vzorce $u_L = -L \frac{di_L}{dt}$. Proto vložíme do obvodu do série diodu. Je nutné použít Schottkyho diodu, jelikož je jediná dostatečně rychlá, aby dokázala přizpůsobit PWM modulaci. Konkrétně se jedná o diodu SR350-TAP. Její parametry jsou: Maximální napětí – 50 V a maximální špičkový proud – 80 A.

6.5.4. Zapojení silového obvodu

Obvod je napájen externím zdrojem +5 V, 4 A. Kladný pól zdroje je připojen na cívky trati. K cívkám je paralelně připojena dioda, která je v závěrném směru proti kladnému pólu zdroje, aby při sepnutém obvodu jí neprotékal proud. Následuje tranzistor. Výstup z cívek je připojen na Drain nožičku tranzistoru. Source je připojený na záporný pól zdroje. Na Gate je přivedený digitální výstup z arduina. Tranzistor díky PWM modulaci snižuje proud tekoucí do cívek, tudíž ovládá magnetické pole, které je v trati.



Obrázek 31 - Elektrické zapojení

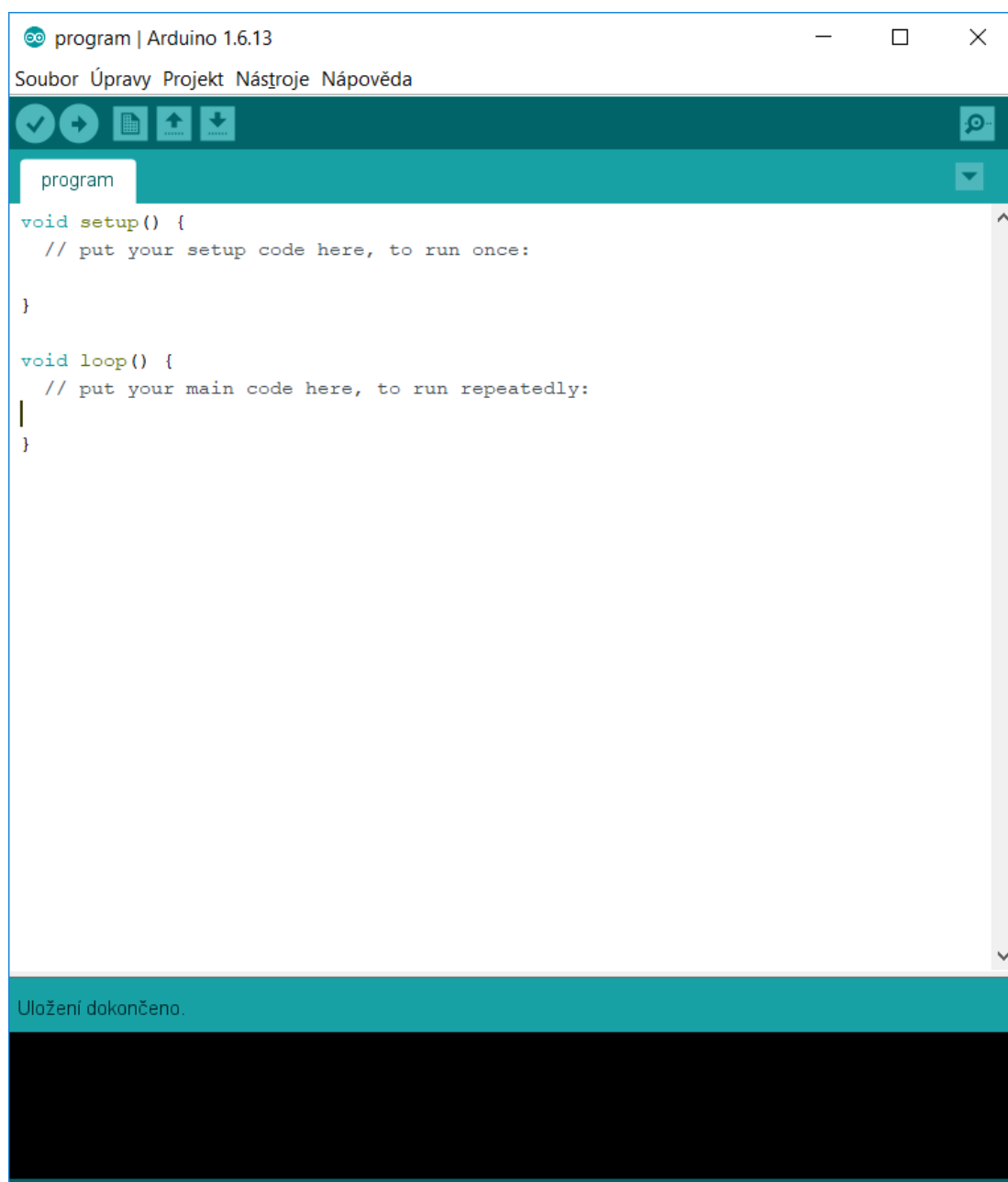


Obrázek 30 – Levitující vagónek (bez optických členů)

6.6. Naprogramování algoritmu

6.6.1. Prostředí Arduino IDE

Po stažení a instalaci prostředí ze stránek arduino.cc prostředí spustím. Důležité je nastavit vývojovou desku a port, na kterém komunikuje s počítačem. Toto se nastavuje v menu Nástroje. Po napsání programu se nachází v horním panelu tlačítka. První je „fajfka“. Toto tlačítko zkompiluje program. Druhé tlačítko vedle tohoto, šipka směřující doprava, nahrává program do arduina.



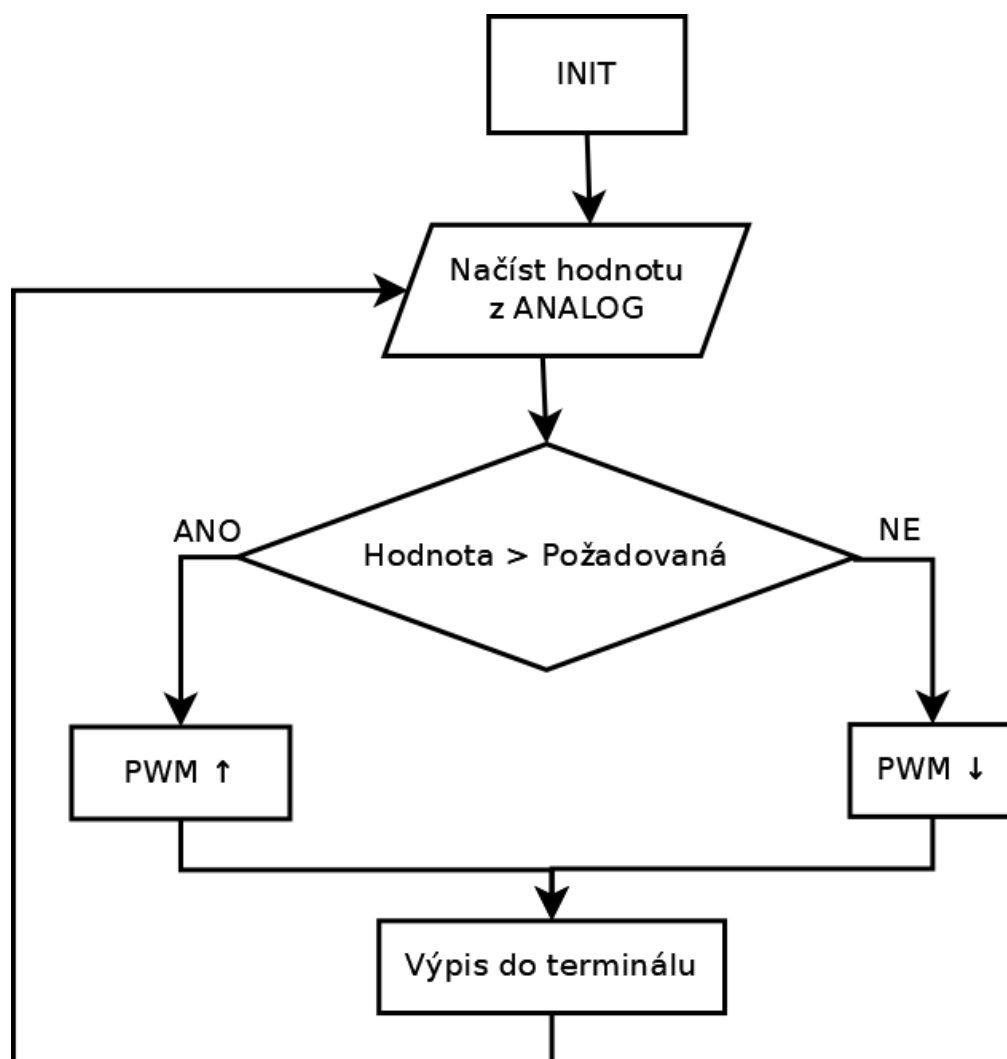
Obrázek 32 - Arduino IDE

6.6.2. Použité příkazy

Nebudu zde uvádět deklarace proměnných ani příkazy pro cykly nebo podmínky.

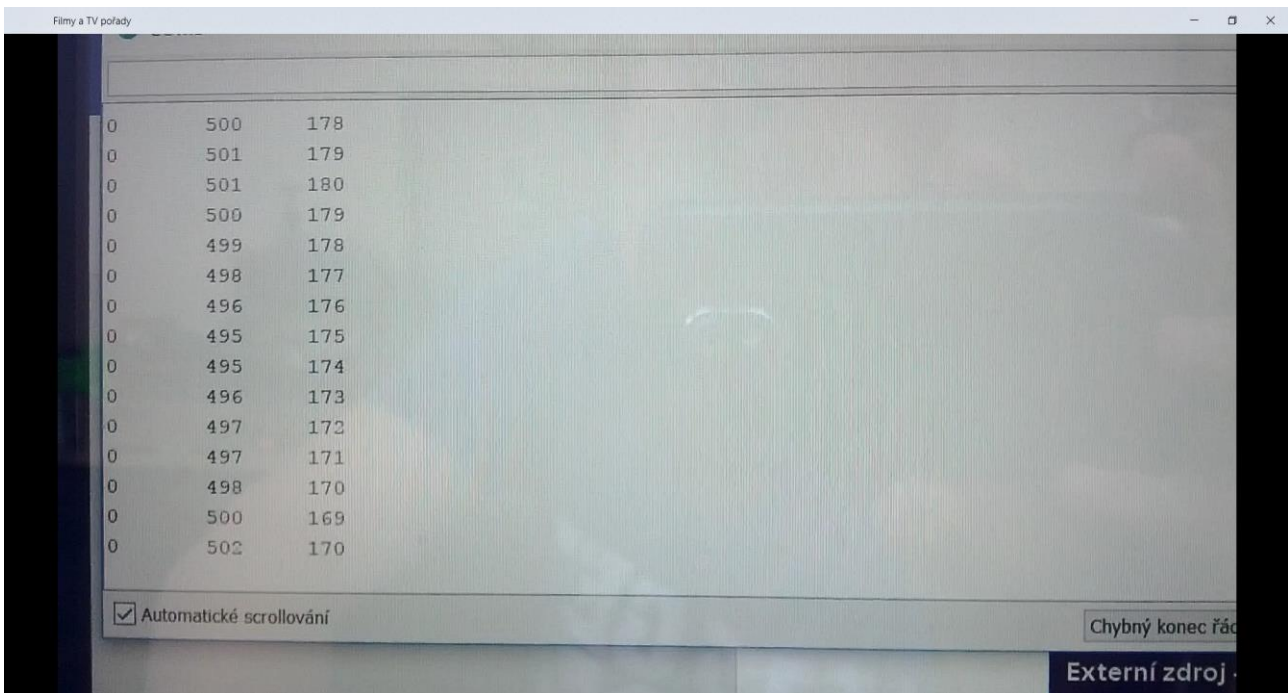
- `pinMode` – nastavuje mód, v jakém bude pracovat pin, který je dán do podmínky
- `analogRead` – čtení z analogového portu, rozlišení A/D převodníku je 1024
- `analogWrite` – nastavení PWM na portu v rozsahu od 0 do 254, kde 0 je 0V a 254 je 5V
- `digitalWrite` – nastavuje stav digitálního portu zap/vyp
- `Serial.begin(9600)` – zahajuje komunikaci do terminálu
- `Serial.print` – vypíše text do terminálu

6.6.3. Algoritmus



Obrázek 33 - Vývojový diagram algoritmu

Algoritmus funguje na stejném principu, jako sledovací A/D převodník. Na začátku nastavím požadovanou hodnotu, hodnotu šumu a PWM nastavím na 0. Poté algoritmus načte hodnotu z analogových výstupů a odfiltruje ty, které jsou pouze šum. Hodnota, která zůstane je pak porovnávána s požadovanou a podle výsledku z porovnání algoritmus buď přičte nebo odečte 1 k PWM. Hodnota se nastavuje na výstup pomocí příkazu `analogWrite`. Poté vypíše program do terminálu tento výstup: „0 485 168“. První číslo je číslo analogového vstupu, druhé je aktuální hodnota na tomto vstupu a třetí je aktuální hodnota PWM.



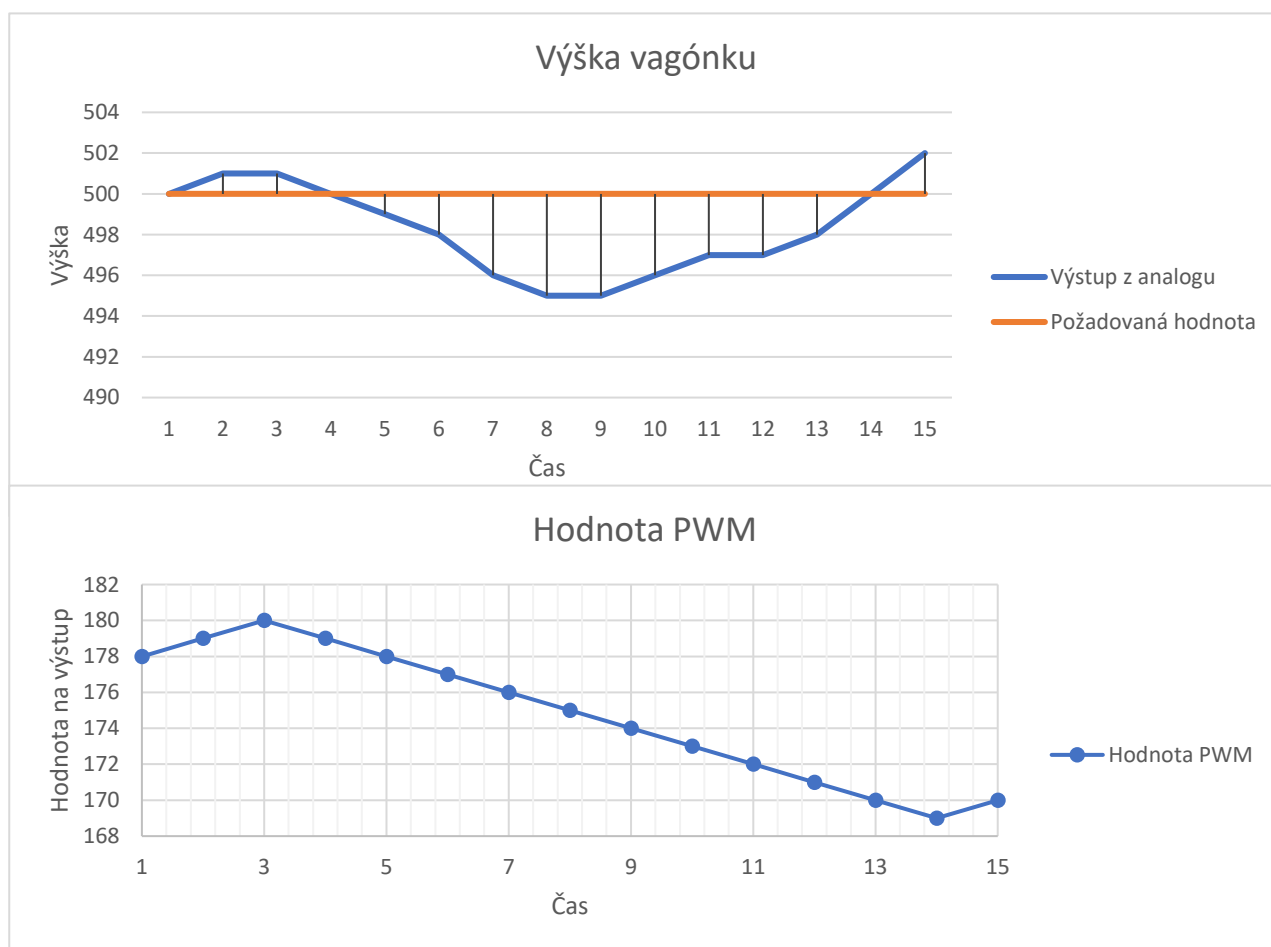
```
Filmy a TV pořady
0 500 178
0 501 179
0 501 180
0 500 179
0 499 178
0 498 177
0 496 176
0 495 175
0 495 174
0 496 173
0 497 172
0 497 171
0 498 170
0 500 169
0 500 170
 Automatické scrollování
Chybný konec řádku
Externí zdroj
```

Obrázek 34 – Výstup do konzole

6.7. Reálný experiment

Před prvním spuštěním jsem si vytvořil orientační program, nastavil v programu piny, na kterých se budou nacházet senzory a LEDka. Poté jsem celou soustavu zapojil. Pro začátek jsem zvolil požadovanou hodnotu porovnávanou s výstupem s ohledem na rozsah od 0 do 1024 na 500. Na zdroji napětí jsem nastavil 2 V a 3 A. Po spuštění program fungoval pouze z části. První potíž byla, že se mi omylem dotkly dráty mezi drain a gate. Naštěstí jsem měl malé napětí na zdroji, takže tranzistor se nespálil, jen to neregulovalo. Další problém byl s okolním světlem, které vytvářelo šum. Změnil jsem tedy v programu podmínku minimální hodnoty na analogu. Ta je třeba nastavit

pro každé prostředí kvůli světelným podmínkám. Po odstranění zkratu mezi gate a drain začalo celé zařízení fungovat. Testovací vagónek byl bílý dvoumagnetový. S nastavením, aby se cívky nehřáli a zároveň vagónek levitoval se hodnota PWM nachází na 170 z 254. Na zdroji bylo nastaveno 5 V a maximálně 4 A. Při použití automatického řízení stačilo počítači jen 1,36 A na dosažení stabilní levitace. Při ručním řízení jsem potřeboval 1,57 A. Další pokus jsem učinil s oranžovým vagónkem, který by se měl pohybovat plynuleji. Ovšem problém nastal s barvou. Při vložení oranžového vagónku do dráhy optické senzory nic nezaznamenaly. Snížil jsem tedy limit pro šum a zjistil, že při úplném položení oranžového vagónku na senzor generuje hodnotu kolem 347, což je pod nastavenou hodnotou šumu, která je 400. Pokusil jsem se to opravit tak, že jsem nalepil pod vagónek bílý papír. Poté začaly senzory zaznamenávat pozici podobně jako u prvního vagónku. Levitace ale nebyla tak dokonalá a při zvýšení napětí se zvedl i protékající proud na hodnotu až 4 A, což začalo cívky i tranzistor silně zahřívát. Tento vagónek tedy není úplně vhodným kandidátem.



Obrázek 35 – Ukázka regulace

7. Závěr

Reálný model se podařilo postavit a odzkoušet. Při řešení se ukázalo, že podstatným prvkem, který velice ovlivňuje chování při regulaci je barva a povrch, ze kterého je vyroben vagónek, resp. jeho spodní část. Je důležité systém naladit na místnost, ve které je provozován z hlediska osvětlení, které vytváří šum na senzorech. Při použití delších soustav vagónků je nutné načítat hodnoty z více senzorů a ty průměrovat. Je zde veliké množství věcí, které by se dali rozšířit. Vagónek je výškově stabilní, ale bylo by výhodnější nejspíše použít PID regulátor, aby byl schopný pružněji reagovat na případné zátěže. Současný algoritmus je omezený taktováním procesoru, jelikož vždy skáče pouze o 1. Dalším problémem je stranová nestabilita. Vagónek je vždy tažen k jedné z cívek po stranách. To by se dalo vyřešit nezávislým ovládním každé strany trati a přidáním dalších optických členů do středů cívek. Ty by pak stačilo porovnávat a stranově stabilizovat. Další možností je pohyb vpřed a vzad. To by se dalo vyřešit například přidáním propulsních cívek (na obrázku 10 zobrazené modře). Ty poté spínat pulzy a uvést tak vagónek do pohybu.

8. Bibliografie

- [1] BALOUN, Jan. *Systémy maglev v minulosti a současnosti* [online]. Praha, 2010, 11 s. [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: http://vrt.fd.cvut.cz/data/seminarky/2010zs/baloun__systemy-maglev-text.pdf. Semestrální práce. ČVUT.
- [2] HORÁČEK, Filip. Japonský vlak zlomil opět rychlostní rekord. Jel 603 kilometrů v hodině. In: *IDnes.cz* [online]. Praha: Mafra, 2015 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: https://ekonomika.idnes.cz/japonsky-vlak-prekonal-rychlostni-rekord-jel-603-kilometru-v-hodine-1d5-/eko-doprava.aspx?c=A150421__121501__eko-doprava__fih
- [3] KASSIM, Nadia, Raheel SHAIKH, Nor ZAINAL a Khalid KHAIRULANAM. *Maglev Trains: Class Project for EAB2083 Electromagnetics Theory (Team 18)*. In: *Maglev Suspension Systems* [online]. University of Technology PETRONAS, Malaysia: Dr. Mohd. Naufal Mohd. Saad, 2008 [cit. 2017-05-17]. Dostupné z: <https://emt18.blogspot.cz/>
- [4] JUHA PYRHÖNEN, Tapani, TRANSLATED BY HANNA NIEMELÄ. a TRANSLATED BY HANNA NIEMELÄ. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd ed. Chichester: John Wiley, 2009. ISBN 04-707-4008-6.
- [5] FRIEND, Paul. *Maglev Train 1. Bradley University: Electrical and Computer Engineering Department* [online]. Illinois: Bradley, 2004 [cit. 2017-05-18]. Dostupné z: <http://cegt201.bradley.edu/projects/proj2004/maglevt1/inductrack.html>
- [6] GM electronic, spol. s.r.o. | CNY70. In: *GM Electronic* [online]. Praha: GM electronic, spol. s.r.o., 2017 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/cny70>
- [7] *Datasheet IRFZ44N: PD-94053*. California, 2001. Dostupné také z: <http://www.ges.cz/sheets/i/irfz44n.pdf>
- [8] POST, R.F. a D.D. RYUTOV. The Inductrack: a simpler approach to magnetic levitation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2000, **10**(1), 901-

904. DOI: 10.1109/77.828377. ISSN 10518223. Dostupné také z:

<http://ieeexplore.ieee.org/document/828377/>

- [9] GUEST, Electroman. Topic: Connect Nano atmega328 to TFT 2.2" LCD. In: *Arduino forum* [online]. Italy: Arduino Software, 2014 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <http://forum.arduino.cc/index.php?action=dlattach;topic=233897.0;attach=78952>
- [10] Arduino Nano V3.0 ATmega328 16M 5V CH340G. In: *Arduino-shop.cz* [online].] Havlíčkův Brod: ECLIPSERA s.r.o., 2017 [cit. 2017-06-07]. Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/4941-large/arduino-nano-v30-atmega328-16m-5v-ch340g-zakladni-deska.jpg>
- [11] Cny70-arduino | Blog de PatagoniaTec Electronica. In: *Patagoniatec blog* [online].] Argentina: Patagoniatec, 2015 [cit. 2017-06-08]. Dostupné z: <http://saber.patagoniatec.com/wp-content/uploads/2015/04/cny70-arduino.png>

9. Přílohy

Přílohy se nachází na CD. Jsou to dvě videa z provozu levitace, program nahraný v arduinu a modely vláčeků, trati a přípravku pro navíjení cívek.