



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

## ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

## ELEKTROMAGNETICKÁ LEVITACE

ELECTROMAGNETIC LEVITATION

### BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Kondys

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Martiš, Ph.D.

BRNO 2022

# Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

**Student:** David Kondys

**ID:** 222880

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2021/22

**NÁZEV TÉMATU:**

## Elektromagnetická levitace

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Uveďte možné způsoby a konfigurace elektromagnetické levitace předmětů pro demonstrační účely.
2. Pro jednu zvolenou koncepci proveďte elektromagnetické simulace a zhodnoťte dosažitelné parametry (reálná levitační vzdálenost a hmotnost předmětu atd.). Vyberte nejlepší řešení.
3. Proveďte návrh elektrické části zařízení – výběr typu snímače polohy, regulační struktura, výkonová část.
4. Realizujte zkušební konstrukci včetně realizace potřebné elektroniky. Pokuste se zařízení uvést do chodu.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] Patočka, M.: Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoproudé elektrotechnice.
- [2] Vorel, P.: Průmyslová elektronika. Skriptum FEKT VUT.
- [3] Vorel, P., Procházka, P.: Řídicí členy v elektrických pohonech. Skriptum FEKT VUT.

**Termín zadání:** 7.2.2022

**Termín odevzdání:** 31.5.2022

**Vedoucí práce:** Ing. Jan Martiš, Ph.D.

**prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.**

předseda rady studijního programu

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **Abstrakt**

Práce se zabývá problematikou magnetické levitace. Je rozdělena na dvě hlavní kapitoly. První kapitola je zaměřena na obecné seznámení s magnetickou levitací. Popisuje druhy magnetické levitace, jejich využití a princip provedení. Konec kapitoly je zaměřen na detailnějšímu popisu magneticky levitovaných vlaků MAGLEV. Popisuje historii vlaků, jejich užití a konstrukci. V druhé kapitole se zaměřuje na návrh zařízení pro demonstraci magnetické levitace. Prvně se zabývá simulací elektromagnetického problému v programu FEMM. Dále pro zvolenou konfiguraci polohy elektromagnetu a levitujícího magnetu popisuje návrh konstrukce zařízení v programu SOLIDWORKS a jeho výrobu. Výsledkem práce je pokus o vyrobení takového zařízení, které dokáže stabilně udržet levitující magnet ve vzduchu.

## **Klíčová slova**

MAGLEV, magnetická levitace, elektromagnet, neodymový magnet, FEMM, SOLIDWORKS

## **Abstract**

The thesis deals with the issue of magnetic levitation. It is divided into two main chapters. The first chapter is focused on a general introduction to magnetic levitation. It describes the types of magnetic levitation, their use and the principle of execution. The end of the chapter is focused on a more detailed description of magnetically levitated MAGLEV trains. It describes the history of these trains, their use and construction. The second chapter is focused on the design of a device for demonstrating magnetic levitation. First, it deals with the simulation of an electromagnetic problem in the FEMM program. In addition, for the selected position configuration of the electromagnet and levitating magnet, it describes the design of the construction of the device in SOLIDWORKS and its manufacture. The result of the work is an attempt to make such a device that can stably keep the levitating magnet in the air.

## **Keywords**

MAGLEV, magnetic levitation, electromagnet, neodymium magnet, FEMM, SOLIDWORKS

## **Bibliografická citace**

KONDYS, David. Elektromagnetická levitace [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-05-28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/142478>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Jan Martiš.

## Prohlášení autora o původnosti díla

**Jméno a příjmení studenta:** *David Kondys*

**VUT ID studenta:** *222880*

**Typ práce:** *Bakalářská práce*

**Akademický rok:** *2021/22*

**Téma závěrečné práce:** *Elektromagnetická levitace*

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 29. května 2022

-----  
podpis autora

## **Poděkování**

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Janu Martišovi, Ph.D. za odbornou a pedagogickou pomoc a za doplnění všech potřebných informací při postupu zhotovení mé bakalářské práce.

V Brně dne: 29. května 2022

-----  
podpis autora

# Obsah

<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD.....</b>	<b>10</b>
<b>2. MAGNETICKÁ LEVITACE.....</b>	<b>11</b>
2.1 DRUHY MAGNETICKÉ LEVITACE.....	11
2.1.1 <i>Pomocí permanentních magnetů.....</i>	<i>11</i>
2.1.2 <i>Elektromagnetická levitace – EMS.....</i>	<i>11</i>
2.1.3 <i>Elektrodynamická levitace – EDS.....</i>	<i>12</i>
2.1.4 <i>Halbachova soustava permanentních magnetů.....</i>	<i>13</i>
2.1.5 <i>Diamagnetická levitace a pomocí supravodičů.....</i>	<i>14</i>
2.2 MAGNETICKÁ LEVITACE V PRAXI.....	15
2.2.1 <i>Vysokorychlostní vlaky.....</i>	<i>15</i>
<b>3. SIMULACE LEVITOVANÉHO ZAŘÍZENÍ PRO DEMONSTRAČNÍ ÚČELY .....</b>	<b>17</b>
3.1 DRUHY KONFIGURACE ELEKTROMAGNETICKÉ LEVITACE.....	17
3.1.1 <i>Levitace odpuzováním.....</i>	<i>17</i>
3.1.2 <i>Levitace s regulací magnetického pole.....</i>	<i>17</i>
3.2 SIMULACE MAGNETICKÉ LEVITACE.....	17
3.2.1 <i>Provedení s otevřeným magnetickým obvodem.....</i>	<i>18</i>
3.2.2 <i>Provedení s uzavřenou magnetickou smyčkou.....</i>	<i>20</i>
<b>4. NÁVRH A KONSTRUKCE LEVITAČNÍHO ZAŘÍZENÍ.....</b>	<b>21</b>
4.1 KONSTRUKCE DRŽÁKU ELEKTROMAGNETU.....	21
4.1.1 <i>Části sestavy.....</i>	<i>21</i>
4.2 SNÍMAČ.....	25
<b>5. ZÁVĚR.....</b>	<b>27</b>
<b>LITERATURA.....</b>	<b>28</b>

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Princip obvodu EMS .....	12
Obrázek 2 - Průběh síly zdvihové a brzdící v závislosti na rychlosti [1] .....	13
Obrázek 3 - Tyčové a kruhové uspořádání magnetů Halbachovy soustavy [5] .....	14
Obrázek 4 - Princip lineárního motoru [3] .....	16
Obrázek 5 - Vysvětlení způsobu levitace a schopnost držení konstantní výšky [1] .....	16
Obrázek 6 - Výsledek simulace magnetického obvodu s otevřenou magnetickou smyčkou .....	19
Obrázek 7 - Výsledek simulace obvodu s uzavřeným magnetickým polem .....	20
Obrázek 8 - Spodní část základny jako model v SOLODWORKS .....	22
Obrázek 9 - vrchní část základny jako model v SOLODWORKS .....	23
Obrázek 10 - vrchní část ramene držáku jako model v SOLIDWORKS .....	23
Obrázek 11 - spojka ramene jako model v SOLIDWORKS .....	23
Obrázek 12 - univerzální díl jako model v SOLIDWORKS .....	24
Obrázek 13 - celková konstrukce držáku elektromagnetu .....	25
Obrázek 14 - zvolený senzor GP2Y0A21YK .....	26



# 1. ÚVOD

Moje bakalářská práce se bude zabývat problematikou magnetické levitace. V začátku své práce budu obecně popisovat magnetickou levitaci a na jakém principu spočívá. Následně se zaměřím na různé typy a druhy metod pro vytvoření magnetické levitace. Tyto metody popíšu a vysvětlím hlavní metody, které se v současnosti využívají v praxi. Dále přejdu k praktickému využití magnetické levitace a detailněji popíšu technologii magneticky levitujících rychlovlaků MAGLEV.

V druhé kapitole se budu zabývat simulací, návrhem a konstrukcí zařízení pro demonstrační účely, které využívá principu magnetické levitace. Prvně uvedu pár teoretických způsobů, jakým by šlo zařízení provést a způsoby nasimuluji. Simulaci budu provádět v programu FEMM. Jednu nasimulovanou konfiguraci si zvolím a pokusím se zkonstruovat zařízení, které by dokázalo provést stabilní levitaci magnetu. Pro toto zařízení budu vybírat snímač polohy, navrhovat desku plošného spoje s regulátorem a vyrábět držák elektromagnetu.

Toto téma jsem si zvolil převážně ze zájmu se dozvědět více o samotném magnetismu a magnetické levitaci. Magnetická levitace z mého důvodu velice zajímavá, ale ve školách málo kdy detailněji probíraná. Jako studenty výkonové elektroniky si myslím, že je dobré se v tomto oboru orientovat, protože magnetismus a elektřina spolu blízce souvisí.

## 2. MAGNETICKÁ LEVITACE

Překonání přitažlivé síly Země byl vždy složitý úkol mnoha vědců a techniků.

V současnosti, levitace tělesa nebo jiného objektu ve vzduchu pomocí magnetického pole není nic neproveditelného. Využití tohoto principu dnes můžeme najít od izolování laboratorních přístrojů proti vibracím po dopravu lidí pomocí vysokorychlostních vlaků. Technické provedení magnetické levitace jsou různé a záleží na různé konfiguraci magnetického pole.

Magnetickou levitaci chápeme jako metodu udržet předmětu ve vzduchu. Snažíme se překonat gravitační sílu působící na předmět pomocí síly magnetické. Pro vytvoření stabilní levitace musíme magnetické pole regulovat, protože jak nám říká Earnshawovo pravidlo, nabitý náboj nemůže být nehybně (staticky) držen ve vzduchu pouze pomocí magnetického pole. [1] [9]

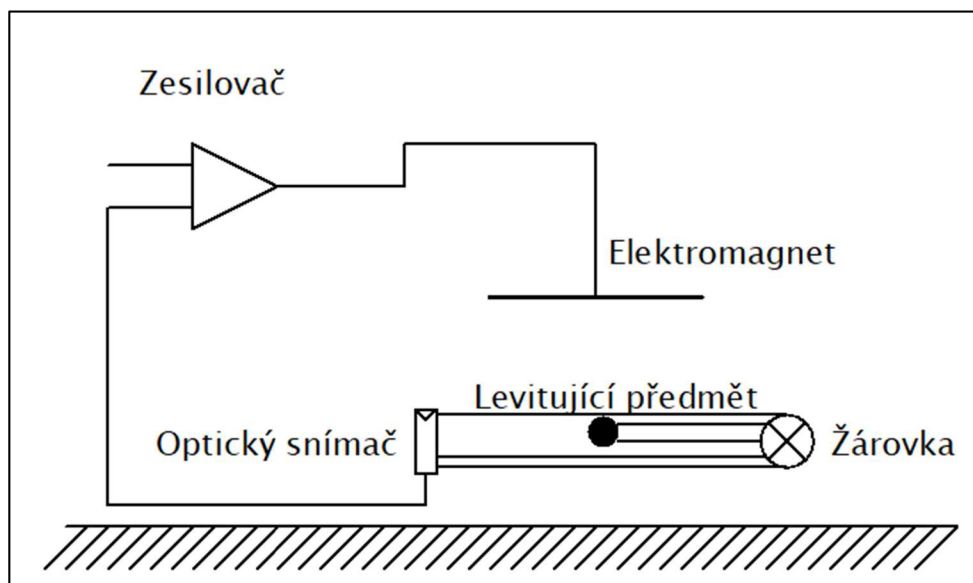
### 2.1 Druhy magnetické levitace

#### 2.1.1 Pomocí permanentních magnetů

Tento způsob provedení **magnetické levitace (maglev)** je dosažen pomocí mechanické podpory, která udržuje magnety v ose na nepovolí sklouznutí horního magnetu. Někdy se také tato metoda nazývá pseudolevitace. Zde může dojít k ustálení obou magnetů do klidu, což by zakazovalo Earnshawovo pravidlo, ale díky mechanické části se toto pravidlo zde neuplatňuje. [1] [9]

#### 2.1.2 Elektromagnetická levitace – EMS

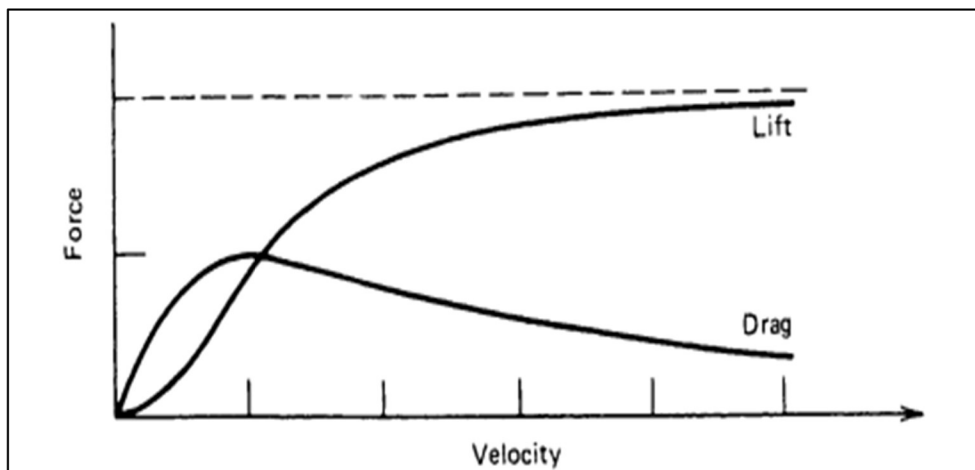
Elektromagnetická levitace – EMS (Electro-Magnetic Suspension), tato metoda levitace spočívá v přitahování nebo odpuzování feromagnetického materiálu elektromagnetem. Metoda je nestabilní, protože nastanou dva možné případy. Buď je tíha feromagnetického materiálu příliš velká a magnetické pole elektromagnetu příliš slabé, tedy materiál spadne na zem, anebo je síla magnetického pole dostatečně velká a materiál se „přilepí“ k elektromagnetu. Zde je potřeba přidat elektrický obvod, který dokáže regulovat sílu magnetického pole dostatečně přesně, že se feromagnetický materiál úplně nepřitáhne ani nespadne na zem. Tento regulační obvod se obecně skládá z regulátoru, který je připojen na snímač polohy levitovaného tělesa. Snímačem může být jednoduchá optická závora, která posílá informace regulátoru se zesilovačem a ten následně pomocí informací snímače zesiluje nebo zeslabuje magnetické pole elektromagnetu. [1] [9]



Obrázek 1 - Princip obvodu EMS

### 2.1.3 Elektrodynamiccká levitace – EDS

Elektrodynamiccká levitace – EDS (Electro-Dynamic Suspension) funguje na principu odpuzování elektromagnetu od vodivé plochy nebo pásu. Položíme-li elektromagnet nad vodivou plochu v klidu, elektromagnet spadne a nebude levitovat. Pro to, aby tato metoda fungoval se musí plochy vůči sobě pohybovat. Tím ve vodivé ploše vznikají vířivé proudy, které působí na magnetické pole elektromagnetu a na cívku elektromagnetu začnou působit dva druhy sil. První síla odpudivá, která udržuje cívku v levitované poloze, a drhá, brzdná síla, která působí proti pohybu cívky po vodivé ploše. EDS je velice stabilní, když se cívka pohybuje vysokými rychlostmi, proto je jedním ze způsobu provedení vysokorychlostních vlaků. Nevýhoda EDS je, že ve vodivém pásu vzniká pouze slabé magnetické pole, a proto aby byla levitace dostatečně silná (aby se například vlak udržel ve vzduchu i s pasažéry) musí cívkou protékat veliký stejnosměrný budící proud pro vytvoření silného magnetického pole. [1] [9]

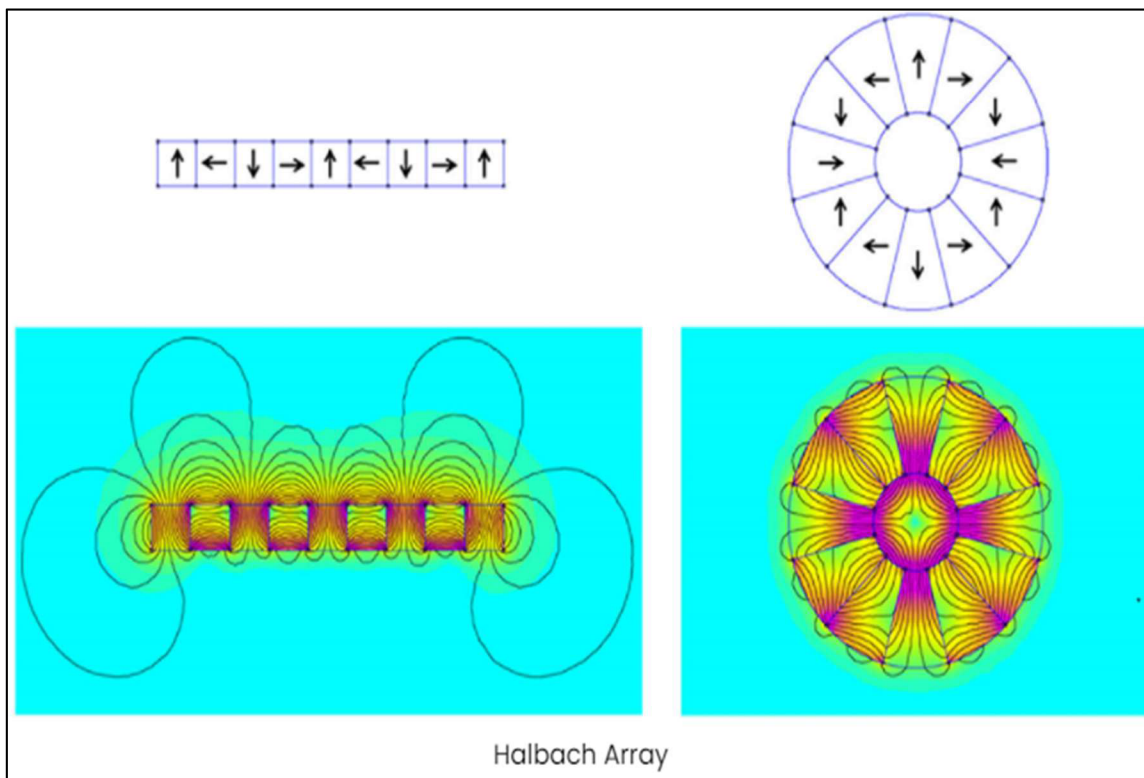


Obrázek 2 - Průběh síly zdvihové a brzdicí v závislosti na rychlosti [1]

#### 2.1.4 Halbachova soustava permanentních magnetů

Halbachova soustava permanentních magnetů (anglicky Halbach array) je specifická soustava poskládaných permanentních magnetů. Byla objevena Johnem C. Mallinsonem roku 1970 a byla užita ke zlepšení technologie nahrávání dat na magnetické pásky. Až nezávisle na něm roku 1980, vědec Klasem Halbachem z Lawrence Berkeley National Laboratory v Kalifornii, využil tuto soustavu magnetů pro vytvoření urychlovače částic.

Tato soustava permanentních magnetů, pokud správně poskládána, naindukuje na jedné straně daleko silnější magnetické pole než na druhé straně soustavy. Pro vytvoření magnetické levitace pomocí Halbachovy soustavy musí být pod soustavou permanentních magnetů nakrátko zapojená soustava cívek. Když se soustava magnetů pohybuje, indukuje se v cívkách proud, a tím se vytvoří magnetické pole kolem cívek. Pole vytvořené cívkami působí na magnetické pole magnetů a udržuje tak soustavu magnetů ve vzduchu (v levitaci). Z důvodu jednoduchého směrování magnetického pole se tato soustava využívá u vědeckých pokusů jako jsou FELs (Free Electron Lasers) nebo synchrotron, což je druh kruhového urychlovače částic. Dále se v současnosti používají jako magnetická ložiska nebo u vysokorychlostních vlaků. [1] [5] [6] [9]



Obrázek 3 - Tyčové a kruhové uspořádání magnetů Halbachovy soustavy [5]

### 2.1.5 Diamagnetická levitace a pomocí supravodičů

Diamagnetický materiál, pokud se vloží do magnetického pole, tak je tím polem odpuzován. Diamagnetický materiál, natáčením vlastních dipólů, vytvoří vlastní pole, které působí opačně na magnetické pole vytvořené magnetem. V přírodě se vyskytují materiály, například bismut nebo grafit, pouze s nízkou hodnotou diamagnetismu ( $\mu_r$  se téměř rovná 1) a proto v praxi nejsou moc využitelné pro vytvoření levitace. Pro vytvoření větší odpudivé síly se používají materiály nazvané supravodiče, které mají výborné diamagnetické vlastnosti. [1] [4] [8] [9]

#### Supravodiče

Supravodivé materiály jsou takové materiály, které když ochlazeny na velice nízkou teplotu, kolem 0 K (-273,15 °C), tak představují nulový elektrický odpor. Tedy proud procházející supravodivým vodičem nevytváří napětí. Existují i materiály, které dosáhnou supravodivosti za vyšších teplot jako například Yttrium-baryum oxid měďnatý, který je supravodivý i při teplotě 77 K.

Pro supravodiče platí Meissnerův jev, který udává, že magnetická indukce uvnitř supravodivého materiálu je nulová. To znamená, že je materiál dokonalým diamagnetikem. V reálných podmínkách tomu tak úplně není a magnetické pole u

supravodiče proniká do hloubky  $\lambda$ . Hodnota  $\lambda$  se nazývá „London penetration depth“ a udává se v rozmezí 10 až 100 nm. [4] [7] [8]

## 2.2 Magnetická levitace v praxi

### 2.2.1 Vysokorychlostní vlaky

#### Historie

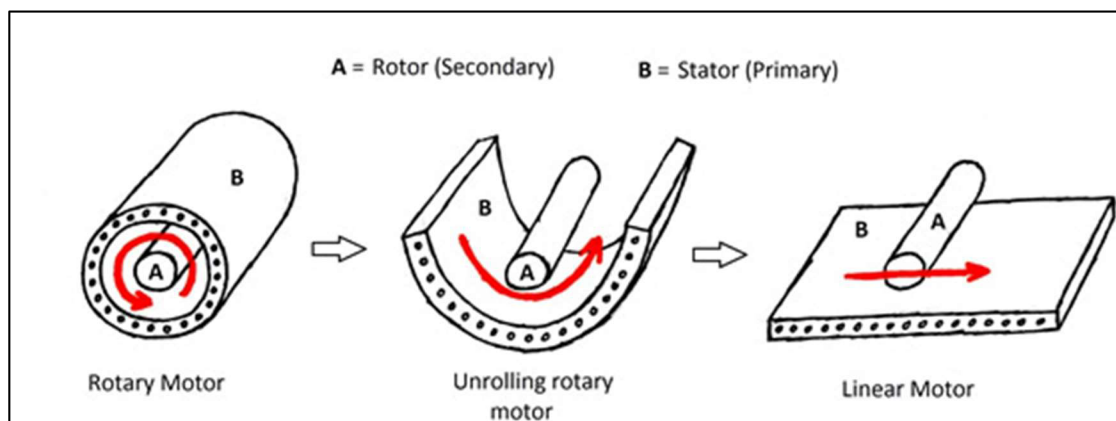
Využití magnetické levitace pro dopravu zboží a lidí není v současnosti překvapením. Však první zmínky od levitujícím transportu vyšli už roku 1904 profesorem Robertem Goddardem, který napsal práci s prvními náčrtky téhož stroje. Hlavními vývojáři maglevu bylo Německo a Japonsko. Kolem roku 1980, Němečtí inženýři postavili a otestovali prototyp Trans Rapid, který dosahoval rychlosti až 402 km/h. V Japonsku se ve stejné době postavil vlak ML-500 (později MLU), který dosahoval rychlosti až 483 km/h. Německá vláda v roce 2000 uzavřela další zkoumání a až roku 2002 byl v čínském Shanghaii postaven další Tran Rapid. Japonsko mezitím dále pokračovalo ve zkoumání a přišli s novým typem vlaku MLX, který již v roce 2003 dosahoval rychlosti přes 560 km/h. [3] [10]

#### Technické provedení vlaků MAGLEV

Vysokorychlostní vlak maglev se zcela liší oproti klasickému vlaku hlavně v podvozku a pohonu. Kola na maglevu se využívají pouze pro manipulaci vlaku za nízkých rychlostí a při rozběhu, než převezme práci magnetické pole (to jsou rychlosti do 100 km/h). Vlaky maglev mají mnoho výhod jako například jejich rychlý a tichý chod přispívá okolnímu prostředí. Dále systém je technicky odolný, a proto je velice odolný na podmínky počasí. Protože provedení levitace není nijak moc teplotně závislé, vlaky mohou pracovat v chladných podmínkách.

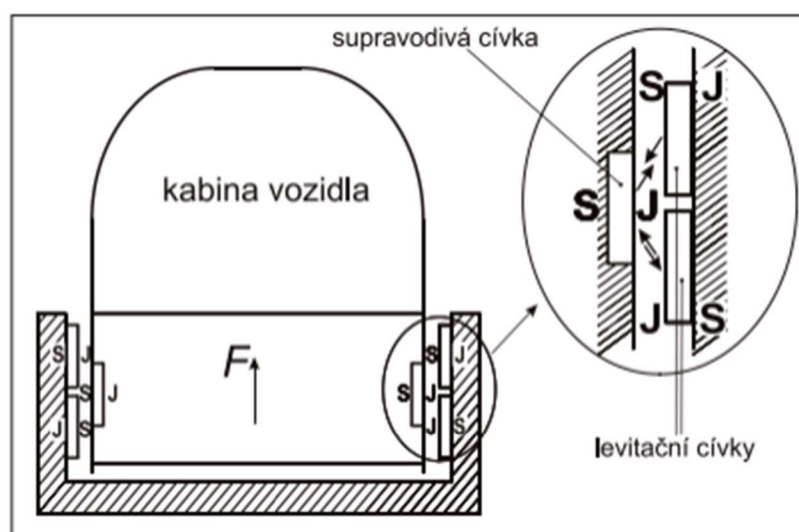
Pro úspěšné postavení magneticky levitujícího vlaku potřebujeme splnit tři hlavní problémy: pohon, levitaci a směrovost. [2] [3] [10]

Pohon magneticky levitujícího vlaku je tvořen lineárním motorem. Princip lineárního motoru je stejný jako u klasického rotačního synchronního nebo asynchronního motoru. Primární část neboli stator lineárního motoru je vodící plocha. Sekundární část motoru, rotor, se neotáčí jako u klasických rotačních motorů, ale pomocí přitahování a odpuzování magnetických polí statoru a rotoru se pohybuje podél statorové plochy. Sekundární část je součástí kostry vlaků maglev a je tvořena permanentními magnety. Pro zmenšení ztrát trojfázového vinutí se postupně napájí úseky trati. Úseky jsou jen o trochu delší, než jaká je délka soupravy. Prvotní rozjezd je prováděn klasicky pomocí podvozku, který se při dostatečné rychlosti (80-100 km/h) zasune do vlaku. [2] [3] [10]



Obrázek 4 - Princip lineárního motoru [3]

Levitace se dosahuje dvěma hlavními způsoby elektromagnetickou (EMS) a elektrodynamicou (EDS) levitací, které jsme si popsali dříve. U japonských vlaků SCMaglev se dosahuje výšky levitace 3,9 in (cože je kolem 10 cm) díky dvojici bočních magnetů. Ve chvíli, kdy vlak pod větším zatížením klesne, vzroste odpudivá síla spodního magnetu a vlak se zvedne do polohy rovnoměrnosti, doprostřed mezi magnety, kde se vzájemné síly vyrovnají. [2] [3] [10]



Obrázek 5 - Vysvětlení způsobu levitace a schopnost držení konstantní výšky [1]

Boční magnety také slouží k určování stability směrovosti transportu. Stabilizační magnety, které jsou umístěny naproti sobě, jsou spojeny navzájem propojeny z důvodů korekce této stability. Ve chvíli, kdy dojde k vychýlení vlaku k jedné straně, na té straně se indukují větší proud a začne působit větší síla, která vlak vrátí do původní stabilní polohy. [2] [3] [10]

## **3. SIMULACE LEVITOVANÉHO ZAŘÍZENÍ PRO DEMONSTRAČNÍ ÚČELY**

V této kapitole se budu zabývat simulací levitovaného zařízení pro demonstrační účely. Navrhované zařízení by mělo být schopno regulovaně udržet zvolený předmět nad zemí a udržovat co největší vzdálenost mezi předmětem a elektromagnetem.

### **3.1 Druhy konfigurace elektromagnetické levitace**

Způsobu vytvoření magnetické levitace je několik. Záleží na parametrech zadání, na rozměrech a dostupnosti výrobních materiálů, na náročnosti výroby apod. Náš výrobek bude sloužit k demonstraci principu levitace a snahou je, dosáhnout co největší vzdálenost mezi elektromagnetem a levitujícím předmětem.

#### **3.1.1 Levitace odpuzováním**

Princip odpuzování magnetů již známe z předešlé kapitoly jako elektrodynamická levitace. V tomto případě by se předmět nepohyboval dopředu, ale snažil se dostat do klidové polohy pomocí regulace. Toto provedení by potřebovalo několik elektromagnetů najednou, které by vytvořili tzv magnetický polštář, který by držel předmět na sobě. Předmět by musel být nejlépe z diamagnetického materiálu a jak už víme, v přírodě se vyskytují jen lehce diamagnetické materiály (zlato, měď, olovo...). Z tohoto důvodu by se musel použít nějaký speciální materiál, který by nebyl ekonomický. Dále, pokud bych rád pokračoval v práci a chtěl celé zařízení postavit, regulování více elektromagnetů je výrazně náročnější než regulování jednoho.

#### **3.1.2 Levitace s regulací magnetického pole**

V této konfiguraci se zaměřím na metodu s otevřeným nebo uzavřeným magnetickým polem. Jde o dříve probranou elektromagnetickou levitaci (EMS), která pracuje na principu snímání polohy levitovaného předmětu a následně regulováním elektromagnetu tak, aby předmět zůstal levitovat v prostoru. Principiálně je tento způsob dle mého názoru jednodušší a nevyžaduje tolik práce. Rozdíl mezi elektromagnetickou levitací s otevřeným nebo uzavřeným polem je pouze ve velikosti a provedení jádra cívka elektromagnetu. V případě uzavření magnetického obvodu by mohla být magnetická síla být větší, než když je obvod otevřen. To ale zjistím až následnou simulací.

### **3.2 Simulace magnetické levitace**

První simulaci jsem provedl pro konfiguraci s otevřeným magnetickým polem. Simulaci magnetického obvodu jsem provedl v programu FEMM. Program FEMM



jsem do této doby ještě nepoužil, a tak jsme se s ním prvně musel seznámit a naučit se v něm pracovat. V programu jsem si zvolil axisymetrické provedení problému, což znamená osově souměrný problém. Elektromagnet je navržen vysoký 40 mm s průměrem 50 mm. Velikost jádra, které je z čistého železa, jsem v průběhu simulace měnil, abych dosáhl co nejlepší síly. Jádro jsem také nemohl zvolit příliš velké, byť na zvolený průměr elektromagnetu potřebuji navinout dostatečné množství vodičů pro vytvoření cívky. Cívka byla vytvořena z 1 mm měděného drátu. Pro možné a pohodlné navinutí závitů na jádro cívky, nesmím překročit hodnotu činitele plnění mědi ( $k_{pcu}$ ) přes 0,65. Dále jsem si musel dát pozor na velikost proudu, aby byla proudová hustota v rozumných hodnotách mezi 2,5 – 3,5 A/mm<sup>2</sup>.

Levitovaný předmět je kruhový magnet, který bude levitovat pod elektromagnetem. Magnet jsem si zvolil neodymový N42 v průměru 20 mm a vysoký 10 mm. Hmotnost levitovaného magnetu udávaná výrobcem je 24 g. Velikost síly pro překonání tíhového zrychlení a přitáhnutí magnetu odpovídá 0,235 N. Pro tyto hodnoty zadání jsem se následně snažil vytvořit simulace a dosáhnout co největší vzdálenosti mezi elektromagnetem a levitujícím permanentním magnetem.

### 3.2.1 Provedení s otevřeným magnetickým obvodem

Jako první simulaci magnetické levitace jsem si zvolil konfiguraci s otevřeným magnetickým obvodem. Již z teoretického rozboru jsem předpokládal, že tato konfigurace bude pro mé zařízení nejvhodnější, ale musel jsem teorii potvrdit simulací.

Podle dostupného materiálu jádra jsem si zvolil průměr jádra 8 mm. Mezi jádrem a vnitřní částí cívky elektromagnetu jsem nastavil 1 mm vzduchové mezery. Pro hodnotu činitele plnění mědi 0,63 jsem si spočítal počet závitů z následujícího vztahu:

$$N = \frac{k_{pcu} \cdot S_{cv}}{S_{vd}} = \frac{0,63 \cdot 16 \cdot 40}{0,5^2 \cdot \pi} = 513,37 \text{ z ,}$$

kde  $S_{cv}$  je plocha cívky

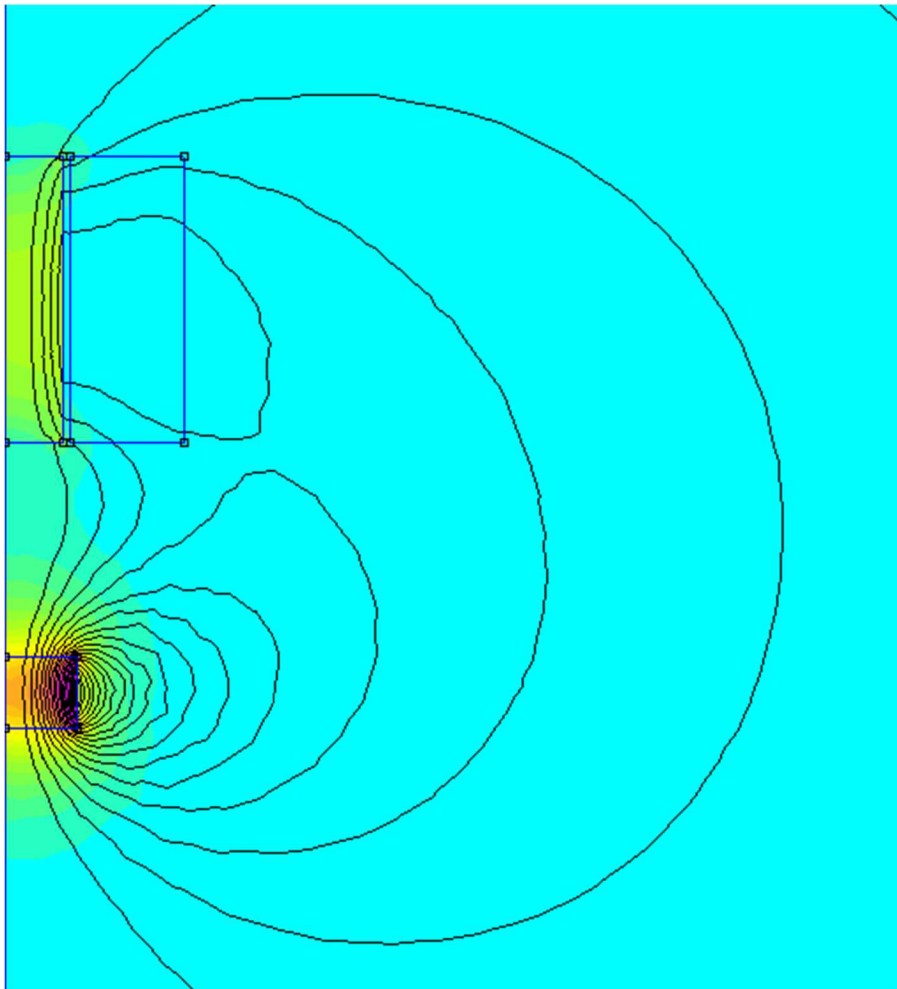
$S_{vd}$  je plocha (průřez) vodiče

Počet závitů jsem zaokrouhlil na 514 z a hodnotu jsem vložil do simulace. Vzdálenost mezi elektromagnetem a levitujícím magnetem jsem nastavil na 20 mm. Proud cívkou jsem nastavil na 2 A a pustil jsem simulaci. Výsledná síla vyšla 1,47 N. Síla vypočítaná počítačem je velká v porovnání s potřebnou silou, tak jsem zvětšil vzdálenost mezi elektromagnetem a levitujícím magnetem na 30 mm. Síla pro druhou simulaci vyšla 0,448 N, což je stále dostatečná síla, aby zařízení fungovalo. Rozhodl jsem se ale vzdálenost již nevětšovat. Další zvětšování vzdálenosti by již bylo pouze v jednotkách milimetrů a nechal jsem si jistou toleranci pro případ, že bych chtěl magnet vložit do krabičky pro estetické důvody. To by znamenalo, že tíha levitujícího

předmětu by byla větší, a tudíž by byla potřeba i větší síla. Následně jsem snížil počet závitů na 490, abych zmenšil  $k_{pcu}$  na 0,6. Protože velikost síly je převážně otázka ampéřzávitů, klesla síla na hodnotu 0,424 N. Pokud bych chtěl sílu zvětšit, musel bych upravit počet ampéřzávitů. To bych mohl udělat zvětšením proudu protékajícím v cívice elektromagnetu, pokud nechám stejný počet závitů. Proudovou hustotu spočítám ze vztahu:

$$J = \frac{I}{S_{vd}} = \frac{2}{0,5^2 \cdot \pi} = 2,55 \text{ A/mm}^2$$

Proudová hustota vyšla poměrně nízká, tedy v případě potřeby větší síly ji můžu zvýšit.



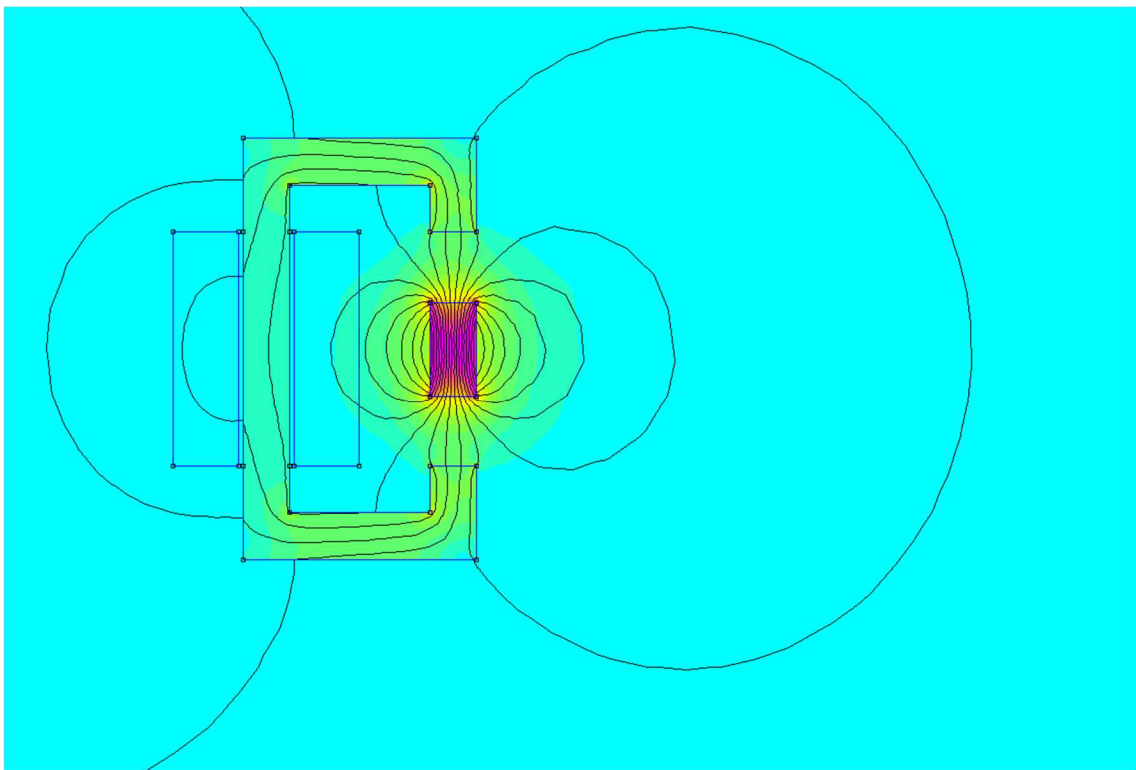
Obrázek 6 - Výsledek simulace magnetického obvodu s otevřenou magnetickou smyčkou

### 3.2.2 Provedení s uzavřenou magnetickou smyčkou

Jako další možný způsob provedení magnetické levitace je s uzavřenou smyčkou magnetického obvodu. Konstrukce je následně provedena tak, že celé rameno představuje jádro cívky a přes levitující magnet se magnetický obvod uzavírá. Tuto konfiguraci budu provádět v programu FEMM jako planární problém. Dle teoretického předpokladu, tato konfigurace nebude fungovat. Hlavním důvodem je velikost vzduchové mezery v nastaveném magnetickém obvodu. Dalším problémem bude způsob výroby a množství potřebného materiálu pro výrobu jádra.

Průřez jádra jsem zvolil jako čtverec o straně 10 mm, velikost kvádrové cívky jsem nastavil na 40x50 mm s hloubkou 10 mm. Počet závitů jsem si vypočítal a zaokrouhlil na 570 s činitelem plnění mědi 0,64. Proud jsem nechal původní z minulé simulace 2 A. Magnet jsem si zvolil také kvádrový s rozměry 10x20 mm a hloubkou opět 10 mm.

Výsledná síla v ose y vyšla pouze 0.157 N, a tak jsem se pokusil sílu zvětšit zvětšením proudu na 2,7 A, což odpovídá ještě unesitelné proudové hustotě  $3,44 \text{ A/mm}^2$ . Síla v tomto případě se naopak mírně zmenšil a na levitující magnet začala působit boční síla s téměř stejnou velikostí. Tato boční síla by hrála velikou roli v náročnosti zhotovení stabilní regulace, jestli by to vůbec bylo možné. Tento způsob by byl pro naše provedení nepoužitelný.



Obrázek 7 - Výsledek simulace obvodu s uzavřeným magnetickým polem

## 4. NÁVRH A KONSTRUKCE LEVITAČNÍHO ZAŘÍZENÍ

V minulé kapitole jsem se zabýval simulací magnetického problému levitace. Pro různé konfigurace jsem vytvořil v programu FEMM simulace, které mi potvrdili můj teoretický předpoklad a podali mi reálnější hodnoty. Pro konstrukci zařízení jsem si vybral konfiguraci s otevřeným magnetickým polem. Nyní se budu zabývat konstrukcí držáku elektromagnetu, návrhu desky plošného spoje výběru snímače, a nakonec se pokusím celé zařízení zapojit a oživit.

### 4.1 Konstrukce držáku elektromagnetu

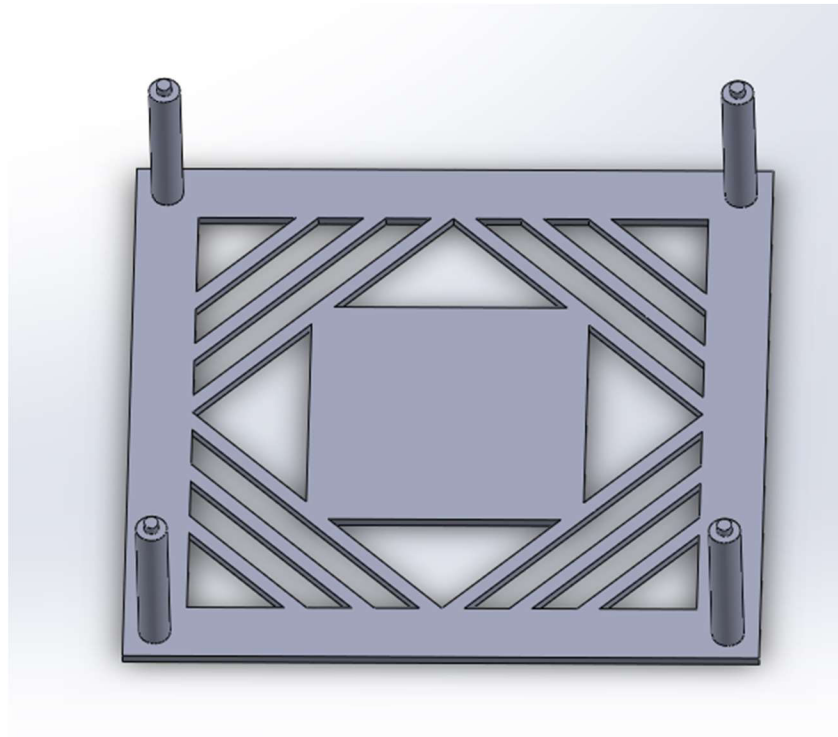
Při návrhu konstrukce držáku, musím hledět hned na několik záležitostí. Jako první věc, musí být držák dostatečně vysoký, aby se pod něj vlezla celá cívka elektromagnetu i s levitujícím magnetem a dole zbylo místo na snímač, který určitě bude mít svoji minimální pracovní vzdálenost. Dále musí být rameno držáku dostatečně pevné, aby celý elektromagnet uneslo. Spodní část musí být rovná, aby nebyl snímač nakloněn na jednu stranu, což by negativně ovlivňovalo regulaci. Nakonec zařízení musí obsahovat místo pro umístění DPS.

Navrhování modelu budu provádět pomocí programu SOLIDWORKS 2019. Výsledné modely pak budu tisknout na domácí 3D tiskárně firmy PRUSA RESEARCH.

#### 4.1.1 Části sestavy

##### Spodní část základny

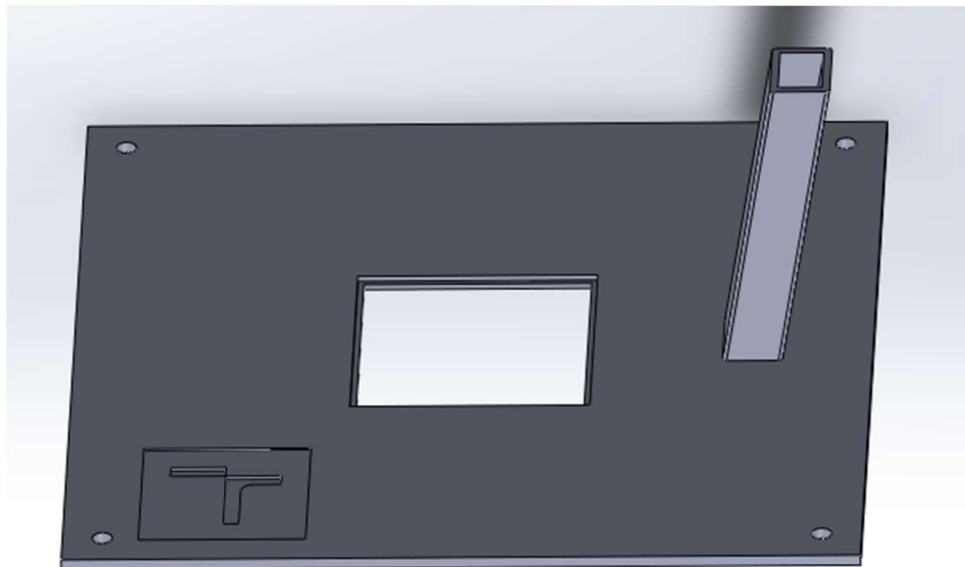
Konečná sestava se skládá z pěti částí. Velikost a složitost částí je přizpůsoben technologii tisku a maximálních možných rozměrů tiskárny. Na spodní části základny bude ležet deska plošného spoje. Deska má rozměry 200x200 mm s výškou 3 mm. Celá plocha není vyplněná z důvodu nižší časové náročnosti tisku a množství spotřebovaného materiálu. Sloupky v rozích základny tvoří místo mezi spodní a vrchní částí základny dostatečně veliký, aby se mezi ně vlezla deska plošného spoje společně se snímačem.



Obrázek 8 - Spodní část základny jako model v SOLODWORKS

### **Vrchní část základny**

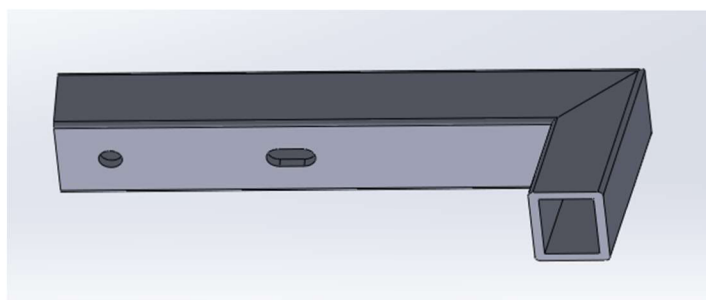
Vrchní část základny představuje rovnou plochu pro snímač a zároveň první část ramene držáku, které je materiálově spojené se základnou. Rameno je nakloněno pod úhlem  $80^\circ$  z důvodu rozložení tíhové síly elektromagnetu. Uprostřed základny je otevřený prostor pro univerzální díl, který je přizpůsobený snímači, aby byl přesně v rovině s plochou základny.



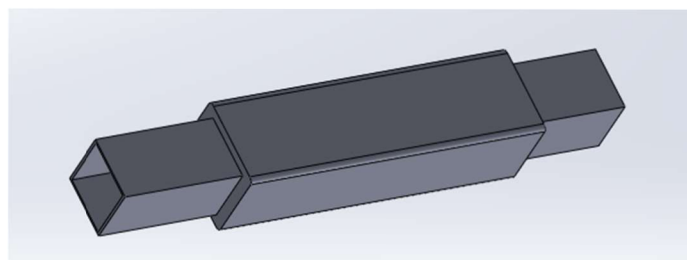
Obrázek 9 - vrchní část základny jako model v SOLODWORKS

### **Vrchní část ramena**

Ve vrchní části ramena je na jeho konci otvor pro šroub, který bude držet elektromagnet přesně ve středu základny a kolmo nad snímačem. Celé rameno je duté, do kterého se vloží vodiče spojující desku plošných spojů a elektromagnet. Dalším důvodem je estetika a bezpečnost zařízení. Mezi vrchní a spodní částí ramene bude spojka, která bude udávat celkovou výšku ramene v závislosti na potřebách snímače.



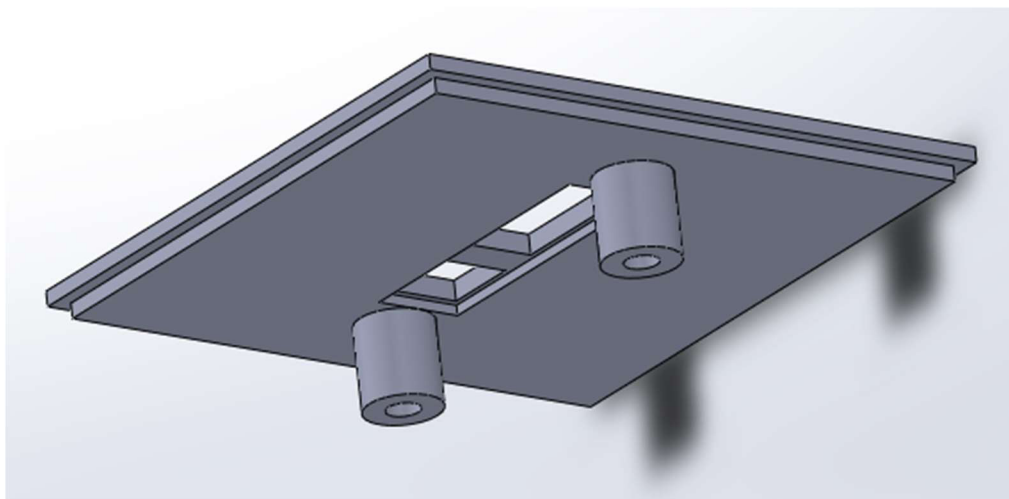
Obrázek 10 - vrchní část ramene držáku jako model v SOLIDWORKS



Obrázek 11 - spojka ramene jako model v SOLIDWORKS

### Univerzální díl na snímač

Tento díl je tvořen přímo na rozměry snímače, který je použitý v mém zařízení. Snímač se vloží zespodu dílu, aby vršek byl zarovnaný s plochou základny. Snímač se vsune do otvoru a z boku zašroubuje do válcových otvorů. Je to univerzální díl, protože v případě, že snímač nebude fungovat, lze otvor vymodelovat pro jiný zvolený snímač a usadit do středu základny.



Obrázek 12 - univerzální díl jako model v SOLIDWORKS

Po vytvoření všech dílů v programu SOLIDWORKS jsem začal modely postupně tisknout. Některé modely jsem musel trochu upravovat z důvodu tolerance, aby do sebe pěkně pasovali. Celkový čas tisku byl přibližně 24 h. Sestavená konstrukce je dostatečně pevná a rameno po vyzkoušení unese závaží s hmotností do 1 kg.



Obrázek 13 - celková konstrukce držáku elektromagnetu

## 4.2 Snímač

Snímač vzdálenosti hraje důležitou roli v provedení plynulé regulace. Snímání polohy lze provést několika způsoby. Já jsem si zvolil analogové provedení snímače z jednoho bodu. Další provedení mohlo být například optickou závorou, kde se levitující magnet pohybuje mezi vysílačem s přijímačem. Pro tento způsob bych musel zvolit jiné provedení držáku elektromagnetu.

Snímač musí být:

- dostatečně rychlý
- dostatečně přesný
- musí mít dostatečně velký pracovní rozsah (ne příliš velký ani malý)
- musí být odolný na vnější vlivy (různé osvětlení nebo zvukové frekvence)

Pro moje zapojení, asi nejvhodnější snímače jsou ultrazvukové. Jsou velice přesné a odolné proti vnějším vlivům. Z ekonomického hlediska jsou bohužel příliš náročné na



konstrukci mého zařízení. Rozhodl jsem se tedy použít senzor GP2Y0A21YK, který funguje na principu intenzity odraženého světla. Tento senzor pracuje od vzdálenosti necelých 10 cm až do 80 cm.



Obrázek 14 - zvolený senzor GP2Y0A21YK

## 5. ZÁVĚR

Cílem mé semestrální práce bylo seznámit se s problematikou magnetické levitace a následně nasimulovat způsob provedení magnetické levitace pro zařízení pro demonstraci magnetické levitace a pro zvolenou konfiguraci zařízení vyrobit. V první kapitole jsem vysvětlil princip magnetické levitace. Dále jsme popsal druhy levitace v praxi jako třeba elektromagnetická levitace (EMS), elektrodynamická levitace (EDS), levitace pomocí Halbachovy soustavy magnetů a magnetická levitace u supravodičů. Pokračoval jsem pak v příkladu, jak se takové způsoby používají v praxi u vysokorychlostních vlaků MAGLEV. Popsal jsem historii vlaků MAGLEV, jejich technologický princip a výhody používání takových vlaků.

V následující kapitole jsem rozebral způsoby pro vytvoření jednoduchého zařízení pro demonstrační účely. Pro simulaci jsem si vybral dva způsoby, a to metodu s otevřeným magnetickým obvodem a metodu s uzavřeným magnetickým obvodem. Obe metody jsem nasimuloval a snažil se dostat k co nejlepšímu výsledku dle zadání. Vybranou konfiguraci jsem začal realizovat. Prvně jsem si vybral snímač a následně jsem pro něj vytvořil praktickou konstrukci, která bude udržovat elektromagnet v dostatečné vzdálenosti.

## LITERATURA

- [1] *MAYER, Daniel. Elektrodynamika v energetice. Praha: BEN – technická literatura, 2005. ISBN 80-730-0164-0.*
- [2] *ScienceDirect. ScienceDirect [online]. Copyright © [cit. 06.01.2022]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/magnetic-levitation>*
- [3] *Maglev: Magnetic Levitating Trains | Electrical and Computer Engineering Design Handbook. sites.tufts.edu - Tufts Self-Serve Blogs and Websites. [online]. Copyright © [cit. 06.01.2022]. Dostupné z: <https://sites.tufts.edu/eeniordesignhandbook/2015/maglev-magnetic-levitating-trains/>*
- [4] *JAYAWANT, B. V. Electromagnetic suspension and levitation [online]. Great Britany, 1981 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/journals/IMT\\_JP\\_56.pdf](http://www.maglev.ir/eng/documents/papers/journals/IMT_JP_56.pdf). School of Engineering and Applied Sciences, University of Sussex, Brighton BN1 9QT, UK.*
- [5] *Everything You Need to Know About Halbach Arrays | Stanford Magnets. Custom Rare Earth Magnets and Magnetic Assemblies | Stanford Magnets [online]. Copyright © 1994 [cit. 06.01.2022]. Dostupné z: <https://www.stanfordmagnets.com/everything-you-need-to-know-about-halbach-arrays.html>.*
- [6] *What is a Halbach Array?. MAGCRAFT® Brand Rare Earth Magnets [online]. Dostupné z: <https://www.magcraft.com/blog/what-is-a-halbach-array>*
- [7] *Meissnerův jev :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 06.01.2022]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/424-meissneruv-jev>*
- [8] *DANIŠ, Stanislav. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: 9 let vysokoteplotní supravodivosti [online]. Praha, 1996 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: [https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139937/PokrokyMFA\\_41-1996-4\\_3.pdf](https://dml.cz/bitstream/handle/10338.dmlcz/139937/PokrokyMFA_41-1996-4_3.pdf). MFF UK.*
- [9] *Využití magnetické levitace [online]. Plzeň, 2018 [cit. 2021-12-07]. Dostupné z: <https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/32192/1/Pavel%20Cavajda%20-%20Bakalarska%20prace%20-%20MAGNETICKA%20LEVITACE%20A%20JEJI%20VYUZITI.pdf>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.*

- [10] Principles of the Superconducting Maglev system | SCMAGLEV | Central Japan Railway Company. SCMAGLEV | Central Japan Railway Company [online]. Copyright © Central Japan Railway Company. All rights reserved. [cit. 07.01.2022]. Dostupné z: <https://scmaglev.jr-central-global.com/about/>