



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

LEVITAČNÍ ELEKTROMAGNET

APPARATUS FOR ELECTROMAGNETIC LEVITATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Kondys

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Martiš, Ph.D.

BRNO 2023

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: David Kondys

ID: 222880

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

**NÁZEV
TÉMATU:**

Levitační elektromagnet

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Porovnejte různé konfigurace levitačního zařízení vhodného pro levitaci menších reklamních předmětů.
2. Vyberte vhodnou geometrickou koncepci zařízení a proveďte sérii elektromagnetických simulací pro zhodnocení dosažitelných parametrů (hmotnost a vzdálenost levitovaného předmětu od cívky / jádra), vyberte nejvhodnější geometrii magnetického obvodu.
3. Vyberte vhodný typ snímače vzdálenosti. Podle výsledků simulace popište převodní charakteristiku elektromagnetu (závislost síly na proudu).
4. Sestavte zkušební konstrukci levitačního zařízení a pokuste se je provizorně 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: 6.3.2023

Termín odevzdání: 29.5.2023

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

Tato práce se zabývá magnetickou levitací. Je rozdělena do dvou hlavních kapitol. Ze začátku první kapitoly rozebírá druhy magnetické levitace a popisuje jejich využití v praxi. Dále je zaměřená na rychlovlaky MAGLEV, které magnetickou levitaci využívají.

Druhá kapitola je o praktické výrobě zařízení pro demonstraci magnetické levitaci. Na začátku rozebírá možné provedení magnetické levitace a to zhodnotí. Dále si vybrané provedení nasimuluje a vytvoří ze simulací graf, popisující potřebnou sílu pro uzvednutí předem zvoleného předmětu. Dále rozebírá možné snímače vzdálenosti, které pro tuto konstrukci mohou být užitečné. Nakonec popíše praktickou výrobu konstrukce zařízení, tedy výrobu cívky elektromagnetu a držáku elektromagnetu. Nakonec zhodnotí naměřené hodnoty při spuštění zařízení.

Klíčová slova

MAGLEV, magnetická levitace, elektromagnet, neodymový magnet, FEMM, snímač vzdálenosti, síla

Abstract

This paper deals with magnetic levitation. It is divided into two main chapters. At the beginning of the first chapter, it discusses the types of magnetic levitation and describes their use in practice. It then focuses on the MAGLEV high-speed trains that use magnetic levitation.

The second chapter is about the practical fabrication of equipment to demonstrate magnetic levitation. In the beginning, it discusses possible designs of magnetic levitation and evaluates this. Next, it simulates the chosen design and produces a graph from the simulations describing the force required to pick up a preselected object. It also discusses possible distance sensors that may be useful for this design. Finally, it describes the practical fabrication of the device design, i.e., the fabrication of the solenoid coil and the solenoid holder. Finally, it evaluates the measured values when the device is started.

Keywords

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

Bibliografická citace

KONDYS, David. Levitační elektromagnet [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-05-29]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/152440>. 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:	<i>David Kondys</i>
VUT ID studenta:	<i>222880</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/23</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Elektromagnetická levitace</i>

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: 25. května 2023

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: 25. května 2023

podpis autora

Obsah

SEZNAM OBRÁZKŮ	9
1. ÚVOD.....	10
2. MAGNETICKÁ LEVITACE.....	11
2.1 DRUHY MAGNETICKÉ LEVITACE.....	11
2.1.1 Pomocí permanentních magnetů.....	11
2.1.2 Elektromagnetická levitace – EMS.....	11
2.1.3 Elektrodynamická levitace – EDS.....	12
2.1.4 Hybridní magnetická levitace – HML.....	13
2.1.5 Levitace pomocí supravodičů.....	14
2.1.6 Supravodiče	15
2.1.7 Halbachova soustava permanentních magnetů.....	15
2.2 MAGNETICKÁ LEVITACE V PRAXI.....	16
2.2.1 Vysokorychlostní vlaky.....	16
3. PRAKTICKÁ ČÁST LEVITAČNÍHO ELEKTROMAGNETU.....	19
3.1 DRUHY KONFIGURACE ELEKTROMAGNETICKÉ LEVITACE.....	19
3.1.1 Elektromagnetická levitace.....	19
3.1.2 Elektrodynamická levitace.....	20
3.1.3 Levitace pomocí permanentních magnetů.....	20
3.2 SIMULACE MAGNETICKÉ LEVITACE.....	20
3.2.1 Zhodnocení.....	22
3.3 PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKA ELEKTROMAGNETU.....	23
4. SNÍMAČE VZDÁLENOSTI.....	26
4.1 ULTRAZVUKOVÝ SNÍMAČ VZDÁLENOSTI.....	26
4.2 SNÍMAČ S HALLOVOU SONDOU	27
4.3 INFRAČERVENÝ SENZOR.....	28
5. VÝROBA ZKUŠEBNÍ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO MAGNETICKOU LEVITACI..	29
5.1 VÝROBA KOSTRY ZAŘÍZENÍ.....	29
5.1.1 Cívka.....	29
5.1.2 Konstrukce ramene	30
5.1.3 Měření.....	32
5.1.4 Zhodnocení.....	33
6. ZÁVĚR.....	34
LITERATURA.....	36

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 - Princip obvodu EMS	12
Obrázek 2 - Průběh zdvihové a brzdící síly v závislosti na rychlosti [1]	13
Obrázek 3 - Tyčové a kruhové uspořádání magnetů Halbachovy soustavy [5]	16
Obrázek 4 - Princip lineárního motoru [3]	18
Obrázek 5 - Vysvětlení způsobu levitace a schopnost držení konstantní výšky [1]	18
Obrázek 6 - Simulace s největší vzdáleností předmětu při splnění potřebné síly	23
Obrázek 7 - Princip Hallova senzoru [15]	27
Obrázek 8 - Hotová namotaná cívka	30
Obrázek 9 - Hotová kostra s cívkou	31
Obrázek 10 - Vytvořený předmět pro měření levitace	32

1. ÚVOD

Moje bakalářská práce se bude zabývat problematikou magnetické levitace. Práce má dvě hlavní části. První část se zabývá teorií. Prvně budu obecně popisovat magnetickou levitace a na jakém principu spočívá. Následně se zaměřím na různé typy a druhy metod pro vytvoření magnetické levitace. Tyto metody popíšu a vysvětlím hlavní užití, 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 kostry zařízení pro demonstrační účely, které využívá principu magnetické levitace. Prvně uvedu pár teoretických způsobů, jakým by šlo zařízení provést jako třeba elektromagnetická levitace přitahováním a odpuzováním elektrodynamická levitace. Vyberu si vhodnou konfiguraci a nasimuluji její provedení. Simulaci budu provádět v programu FEMM. Následně vyberu pár snímačů vzdálenosti, ty popíšu a vyberu vhodné na sestaví levitačního zařízení. Nakonec nasimulovanou konfiguraci se pokusím zkonstruovat, tedy vytvořím kostru zařízení, které by dokázalo provést levitaci magnetu. Vytvořené zařízení zapojím a změřím, jestli simulace odpovídá reálnému výrobku. Hádám, že naměřená hodnota nebude přesně sedět se simulací, ale bude se jí blížit.

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 pomocí magnetické síly. Snažíme se překonat gravitační sílu působící na předmět pomocí síly magnetické. K problematice levitace se blíže váže Earnshawova pravidlo, které říká, že není možné dosáhnout stabilní rovnovážné polohy pouze pomocí elektrostatických nebo magnetických sil působících mezi stacionárními náboji nebo magnety. Podle Earnshawova pravidla je elektrostatická nebo magnetická síla mezi stacionárními náboji nebo magnety vždy odpuzující, nikoli přitahující. To znamená, že pokud bychom chtěli stabilně umístit nabitý náboj nebo magnet do rovnovážné polohy pomocí elektrostatických nebo magnetických sil, síly by se vzájemně odpuzovaly a nedovolily by náboji nebo magnetu zůstat ve stabilním stavu. K vytvoření stabilní magnetické levitace lze dojít několika způsoby, některé z nich budu dále rozebírat. [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]

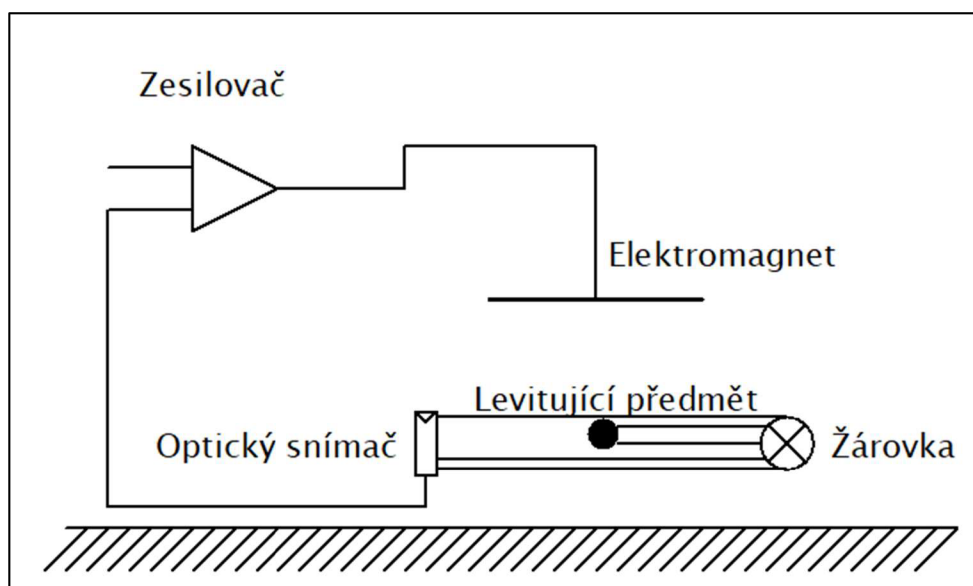
2.1.2 Elektromagnetická levitace – EMS

Elektromagnetická levitace – EMS (Electro-Magnetic Suspension), je konfigurace, která využívá elektromagnety k vytváření magnetického pole pro levitaci objektu bez

fyzického kontaktu. U elektromagnetické levitace se používají cívky se silnými elektromagnety. Tyto elektromagnety vytvářejí magnetické pole, které interaguje s magnety umístěnými na levitovaném objektu. Závislostí na síle a polaritě magnetického pole je možné dosáhnout vzájemného přitahování nebo odpuzování mezi elektromagnety a magnety objektu, což umožňuje zavěšení objektu ve vzduchu.

Jednou z hlavních výhod elektromagnetické levitace je možnost aktivní kontroly a stabilizace. Elektrický proud, který prochází cívkami elektromagnetů, může být řízen, což umožňuje upravovat sílu magnetického pole a tím i výšku zavěšení objektu. Tato aktivní kontrola umožňuje udržovat stabilitu objektu při pohybu, vyrovnávat vnější rušení a provádět přesné manévry.

Elektromagnetická levitace se používá v různých aplikacích. V průmyslu může být využito pro bezkontaktní zavěšení a manipulaci s objekty ve výrobních procesech. Vědecký výzkum využívá elektromagnetického zavěšení pro studium vlastností materiálů, reologie a dalších oblastí. [1] [9]



Obrázek 1 - Princip obvodu EMS

2.1.3 Elektrodynamická levitace – EDS

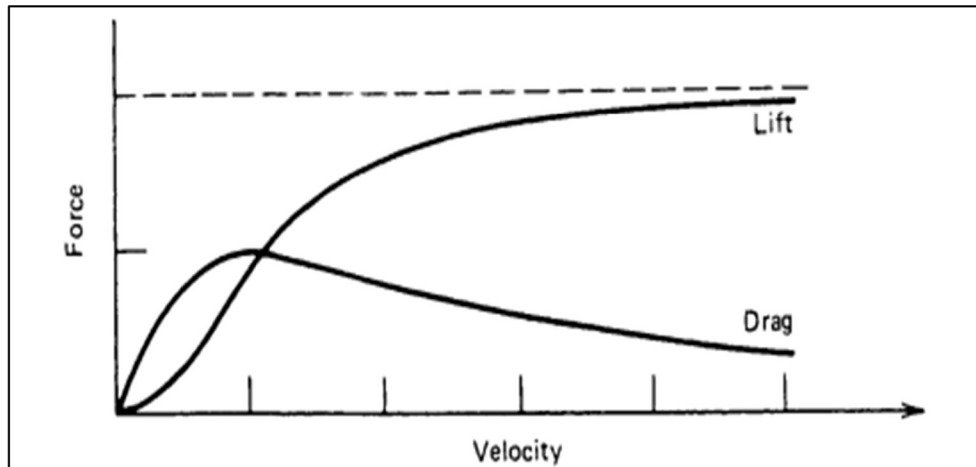
Elektrodynamická levitace – EDS (Electro-Dynamic Suspension)

U elektrodynamické levitace je levitující objekt vyroben z vodivého materiálu, často hliníku nebo mědi. Pod objektem jsou umístěny cívky, které generují střídavý

magnetický proud. Tento střídavý magnetický proud vytváří změněné magnetické pole, které indukuje vířivé proudy v zavěšovaném objektu. Vířivé proudy vodivého materiálu vytvářejí vlastní magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem generovaným cívkami. Tato interakce vytváří odpuzující se síly mezi objektem a cívkami, což umožňuje zavěšení objektu ve vzduchu.

Jednou z hlavních výhod elektrodynamického zavěšení je pasivní stabilita. Jakmile je objekt zavěšen, nevyžaduje žádnou aktivní kontrolu nebo napájení pro udržování zavěšení. Vířivé proudy a odpuzující se síly mezi objektem a cívkami poskytují přirozenou stabilitu proti vertikálním a horizontálním pohybům.

Ve vědeckém výzkumu je používáno pro studium dynamických vlastností materiálů, proudění a interakcí. V průmyslu může být využito pro bezkontaktní manipulaci s objekty, například při řízení polohy nebo vyrovnávání vibrací. V dopravě se elektrodynamické zavěšení využívá v systémech magnetických levitačních vlaků (maglev), kde generuje odpuzující se síly, udržuje vlak ve vzduchu a minimalizuje tření pro vysokou rychlost a plynulost pohybu. [1] [9]



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

2.1.4 Hybridní magnetická levitace – HML

Hybridní magnetická levitace – HML (Hybrid Magnetic Levitation) je konfigurace, která kombinuje prvky jak elektromagnetického zavěšení (EMS), tak elektrodynamického zavěšení (EDS). Je navrženo tak, aby dosáhlo vylepšené stability a kontroly nad zavěšeným objektem.

V HML se obvykle používají permanentní magnety k poskytnutí počáteční stability a zavěšení. Tyto permanentní magnety generují stálé magnetické pole, které interaguje se zavěšeným objektem, který často obsahuje také magnety. Odpudivé síly mezi permanentními magnety a magnety objektu umožňují zavěšení.

Pro dosažení dynamické kontroly a úprav stability se do systému začleňují elektromagnety a vodivé materiály. Elektromagnety jsou strategicky umístěny tak, aby vytvářely další magnetická pole, která lze ovládat upravováním elektrického proudu protékajícího cívkami. Změnou síly a polaritě těchto elektromagnetů lze upravit výšku zavěšení a stabilitu. Vodivé materiály, jako je hliník nebo měď, se používají k vytvoření vířivých proudů, když jsou vystaveny měnícímu se magnetickému poli vytvořenému elektromagnety. Tyto vířivé proudy v souladu s Lenzovým zákonem vytvářejí opačné magnetické pole, které interaguje s magnetickým polem permanentních magnetů a způsobuje zavěšení a stabilizaci.

Kombinace permanentních magnetů, elektromagnetů a vodivých materiálů v HML nabízí několik výhod. Permanentní magnety poskytují pasivní stabilitu, snižují závislost na aktivních kontrolních systémech a minimalizují spotřebu energie. Elektromagnety a vodivé materiály umožňují dynamickou kontrolu a jemné nastavení výšky zavěšení, stability a reakce na vnější rušení.

Systémy hybridního magnetického zavěšení nacházejí uplatnění v různých oblastech. Používají se v magnetických ložiskových systémech, kde je klíčová přesná kontrola a stabilita rotačních zařízení, jako jsou turbíny nebo setrvačníky. HML se také využívá v některých systémech magnetické levitace v dopravě, poskytující rovnováhu mezi stabilitou a kontrolou pro efektivní a bezpečný provoz. Celkově hybridní konfigurace magnetického zavěšení kombinuje výhody systémů EMS a EDS a nabízí vylepšenou stabilitu, kontrolu a energetickou účinnost v široké škále aplikací. [11] [12]

2.1.5 Levitace 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 (μ_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]

2.1.6 Supravodiče

Supravodivé materiály jsou specifické látky, které projevují nulový elektrický odpor při extrémně nízkých teplotách kolem 0 K (-273,15 °C). To znamená, že proud procházející supravodivým vodičem neprodukuje žádné napětí. Existují i materiály, které dosahují supravodivosti při vyšších teplotách, například Yttrium-baryum oxid měďnatý, který je supravodivý při teplotě 77 K.

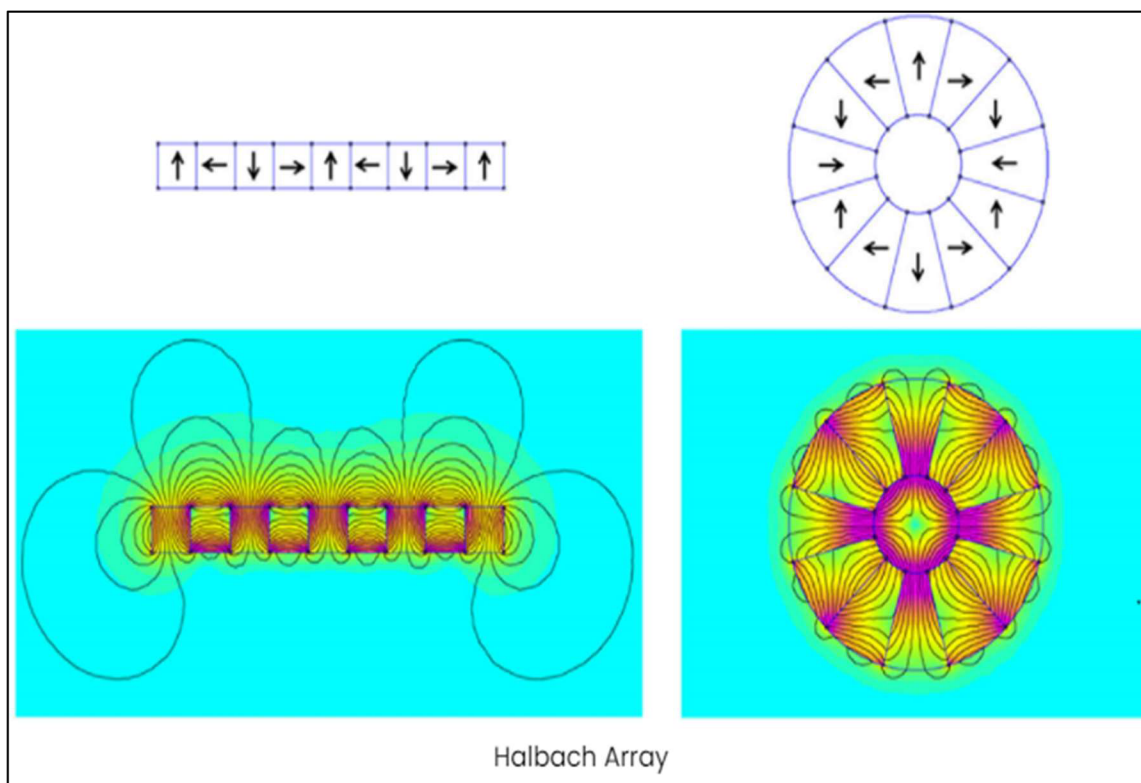
Supravodiče vykazují Meissnerův jev, který popisuje, že magnetická indukce uvnitř supravodivého materiálu je nulová. Jinými slovy, supravodivý materiál se chová jako dokonalý diamagnetikum. Ve skutečnosti se však v reálných podmínkách do supravodiče proniká magnetické pole do určité hloubky, která se nazývá "London penetration depth". Tato hloubka λ se obvykle pohybuje v rozmezí 10 až 100 nm. [4] [7] [8]

2.1.7 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]

2.2 Magnetická levitace v praxi

2.2.1 Vysokorychlostní vlaky

Historie

První koncepty magnetické levitace se objevily ve 20. letech 20. století, ale první reálné pokusy začaly až v 60. letech. Zde si můžeme všimnout dvou hlavních přístupů k maglev technologii: elektrodynamické a elektromagnetické.

Elektrodynamický systém byl vyvinut v Japonsku a první experimentální trať byla postavena v roce 1969. Tento systém využívá elektromagnetického pole generovaného kolejnicemi, na kterém je umístěn vlak s vodiči. Když se napájí vodiče ve vlaku, vytváří se proud, který interaguje s magnetickým polem a způsobuje levitaci a pohyb vlaku.

Elektromagnetický systém byl vyvinut v Německu. První experimentální trať tohoto typu byla postavena až v roce 1984. Tento systém využívá silné elektromagnety

na vlaku, které interagují s kolejnicemi, jež jsou vybaveny magnetickými cívkami. Elektromagnety na vlaku jsou napájeny střídavým proudem, který vytváří magnetické pole, které odpuzuje kolejnice a zajišťuje levitaci a pohyb vlaku.

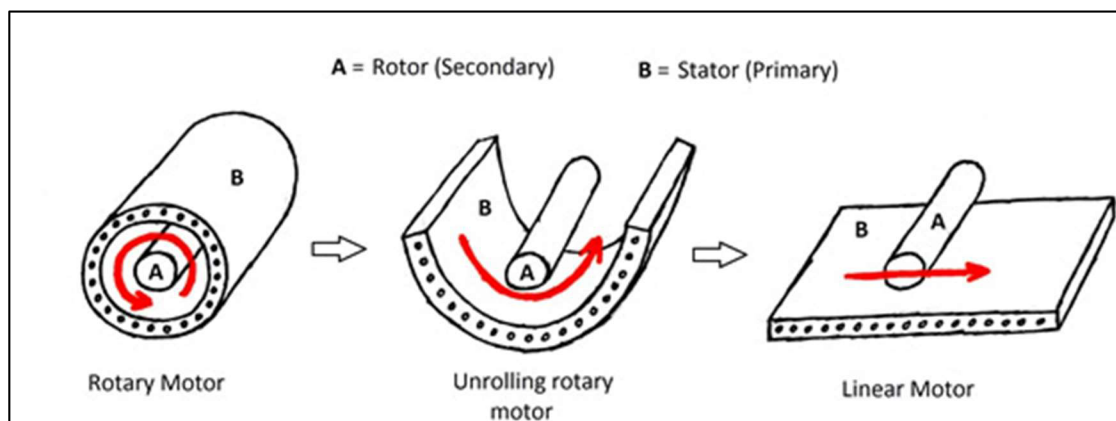
V průběhu let bylo vyvinuto několik různých konceptů maglev vlaků a provedeno několik pilotních projektů. Jeden z neznámějších je japonský vlak Shinkansen Maglev, který dosáhl rychlosti přesahující 600 km/h při testování. Další významnou maglev trati je Shanghai Maglev Train v Číně, který je v provozu od roku 2004 a dosahuje rychlosti až 430 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 a značně krátí čas dopravy. Dále díky bezkontaktního přístupu mezi vlakem a kolejnicemi dochází k minimálnímu opotřebení a tím se snižuje potřeba údržby.

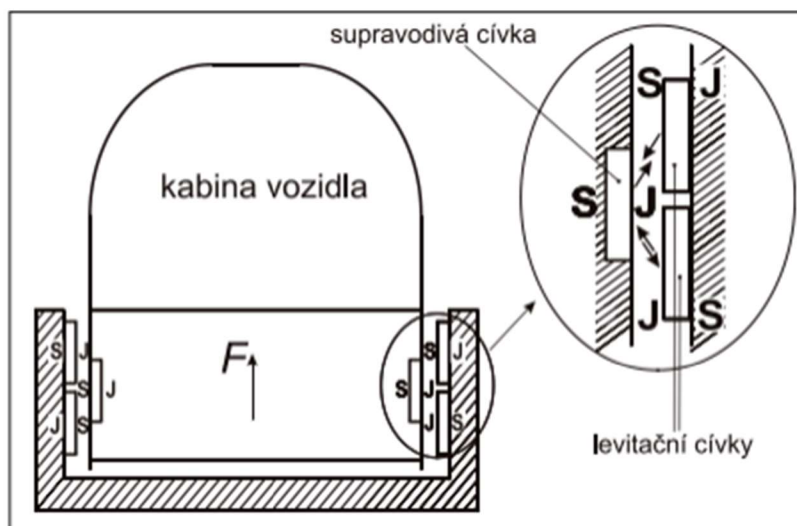
Pro úspěšné postavení magneticky levitujícího vlaku potřebujeme splnit tři hlavní problémy: pohon, levitaci a směrovost. [2] [3] [10]

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 mají také funkci zajištění stability směrovosti při transportu. Stabilizační magnety, umístěné proti sobě, jsou vzájemně propojeny s cílem korigovat tuto stabilitu. Pokud dojde k vychýlení vlaku na jednu stranu, na této straně se indukuje vyšší proud a začne působit silnější síla, která vrátí vlak do původní stabilní polohy. [2] [3] [10]

3. PRAKTICKÁ ČÁST LEVITAČNÍHO ELEKTROMAGNETU

Nyní se zaměřím více konkrétněji na problém levitace a budu vytvářet návrhy pro praktickou výrobu levitačního zařízení, které může být použito pro displej různých objektů.

Následující část bude rozdělena do čtyř hlavních pod částí. V první části vyberu několik vhodných konfigurací magnetické levitace a ty mezi sebou porovnam. V druhé části provedu sérii simulací pro vhodnou geometrickou koncepci zařízení a zhodnotím dosažené parametry. Dále ve druhé kapitole budu ze simulací zjišťovat převodní charakteristiku elektromagnetu. Simulace budu provádět v programu FEMM. Třetí část bude věnovaná snímačům. Vyberu pár vhodných druhů snímačů, které popíšu a uvedu jejich možné použití při výrobě levitačního zařízení. Nakonec ve čtvrté a poslední kapitole popíšu výrobu zkušební konstrukce levitačního zařízení.

3.1 Druhy konfigurace elektromagnetické levitace

3.1.1 Elektromagnetická levitace

Princip elektromagnetické levitace, jak už víme, spočívá v tom, že síla vzniká působením dvou elektromagnetů nebo působení elektromagnetu na permanentní magnet, který je součástí levitujícího předmětu. V této konfiguraci může být hlavní elektromagnet zavěšen na rameni pod kterým bude předmět levitovat nebo můžeme umístit sestavu alespoň tří a více elektromagnetů dolů a předmět levituje nad ním. Hlavním rozdílem jsou orientace polí, které v případě předmětu pod elektromagnetem se přitahují a v případě, že se předmět vznáší nad cívkou, magnetické pole se vzájemně odpuzují. Při EMS je vždy nutné přiřadit elektrický obvod napájecí cívku nebo cívky, který obsahuje regulátor řídící výchylku předmětu od bodu stability.

Tuto konfiguraci jsem použil pro následné vytvoření simulace a pro konstrukční řešení zařízení.

3.1.2 Elektrodynamická levitace

Pro vytvoření mého zapojení, u elektrodynamické konfigurace vzniká hned několik problémů při porovnání s metodou EMS. První problém je ten, že levitující předmět musí být ze značné části vodivý, aby došlo k vytváření vířivých proudů, a tedy vznik magnetického pole působící proti cívkám. Nelze tedy použít jakýkoliv předmět, do kterého stačí vložit permanentní magnet. Další problém je, aby mohli vznikat vířivé proudy, musí vznikat střídavý magnetický proud. Ten lze vytvořit například magnetickou indukci, ke které je ale potřeba, aby se část zařízení s cívkou pohybovalo nebo otáčelo. Jiný způsob je napájení cívek střídavým proudem. Pro tento případ by se zařízení musel napájet ze zdroje střídavého napětí a musela by k tomu být správně vytvořená simulace. To vede ke komplikaci při konstrukci takového zařízení a jsou hlavní důvody, které mě vedli k tomu, abych netvořil zařízení magnetické levitace pomocí EDS.

3.1.3 Levitace pomocí permanentních magnetů

Stabilní levitace pouze pomocí dvou permanentních magnetů nejde vytvořit. Abychom si mohli vytvořit takovou levitaci musíme vytvořit mechanickou oporu, která zabrání, aby magnet sjel z magnetického polštářku. Tato mechanická opora musí zasahovat do jevu levitace, a tudíž cloní vystavenému předmětu, který levituje. Konstrukční provedení je ze všech konfigurací nejjednodušší, ale plně neplní úkol představení levitace.

3.2 Simulace magnetické levitace

Následuje druhá kapitola praktické části: Simulace. Pro simulování jsem si zvolil konfiguraci elektromagnetické levitace (EMS). Budu simulovat levitaci s otevřeným magnetickým obvodem. Budu se zaměřovat na vzdálenost předmětu od elektromagnetu, tudíž snaha o co největší sílu, budou mě zajímat závity, proud cívkou a výkon, který bude třeba uchládit.

Na začátek jsem si zvolil několik parametrů:

Jádro: kovové; válcový tvar; 50x100mm

Vodič pro vytvoření cívky: měděný; průměr 1 mm

Permanентní magnet: válcový tvar; neodymový N42

Činitel plnění k_{pcu} : <0,6

Proudová hustota: $2,8 \text{ A/mm}^2$ (volil jsem z rozmezí 2–3 A/mm^2)

V programu jsem si zvolil axisymetrické provedení problému, což znamená osově souměrný problém, protože řeším kruhové předměty. Celková výška cívky odpovídá výšce jádra, tedy 100 mm. Celkovou šířku elektromagnetu jsem zvolil 90 mm. Z toho jsem mohl vypočítat maximální počet závitů na cívku. Zvolil jsem si měděný drát s průměrem 1 mm.

$$N = \frac{k_{pcu} \cdot S_{cv}}{S_{vd}} = \frac{0,5 \cdot 21 \cdot 100}{0,5^2 \cdot \pi} = 1337 \text{ závitů} \quad (1.1)$$

kde S_{cv} je plocha cívky

S_{vd} je plocha (průřez) vodiče

Dále jsem si dopočítal proud cívkou ze zvolené proudové hustoty:

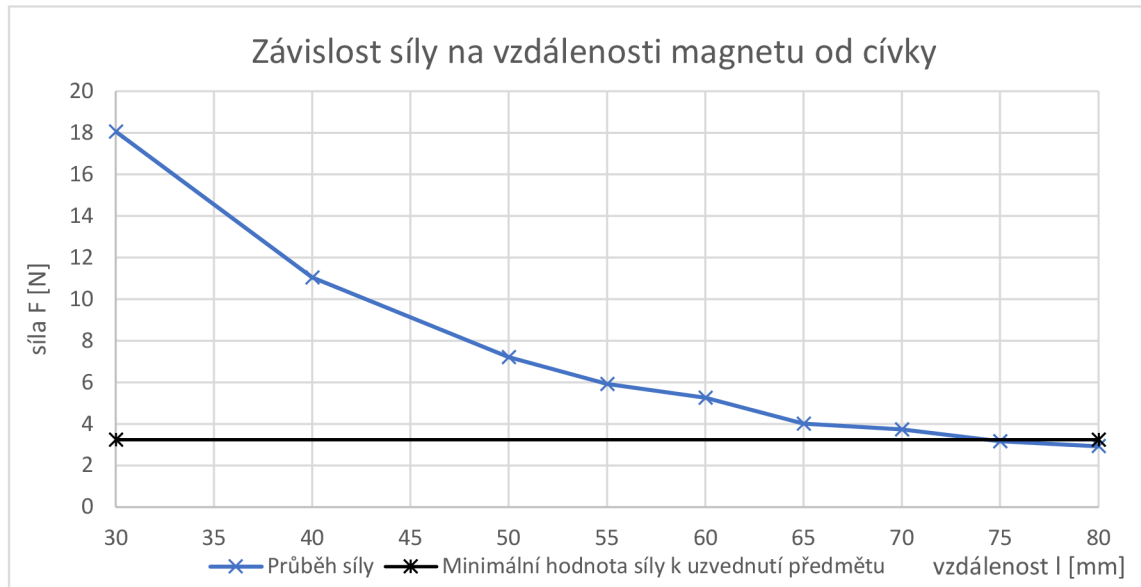
$$I = J \cdot S_{vd} = 2,8 \cdot 0,5^2 \cdot \pi = 2,19 \doteq 2,2 \text{ A} \quad (1.2)$$

kde J je zvolená proudová hustota

Spočítané hodnoty jsem vložil do simulace. Teď mi už jen zbylo určit si velikost permanentního magnetu. Permanentní magnet pod elektromagnetem nebude levitovat sám, ale bude vložen do předmětu k prezentaci. Předmět jsem zvolil jako prázdnou krabičku IGBT modulu, který dobře vystihuje můj ústav výkonové elektroniky. Do potřebné váhy tedy musím započítat i váhu krabičky modulu, která je přibližně 150 g. Permanentní magnet jsem si zvolil válcový s průměrem 45 mm a výškou 15 mm.

Velikost magnetu jsem vybíral z katalogu různých obchodů, zvolil jsem největší možný magnet, který stále byl ekonomicky dostupný a taky ne příliš veliký.

Provedl jsem sérii simulací, u kterých jsem postupně vzdaloval levitující magnet od cívky a hodnoty jsem uvedl do grafu.

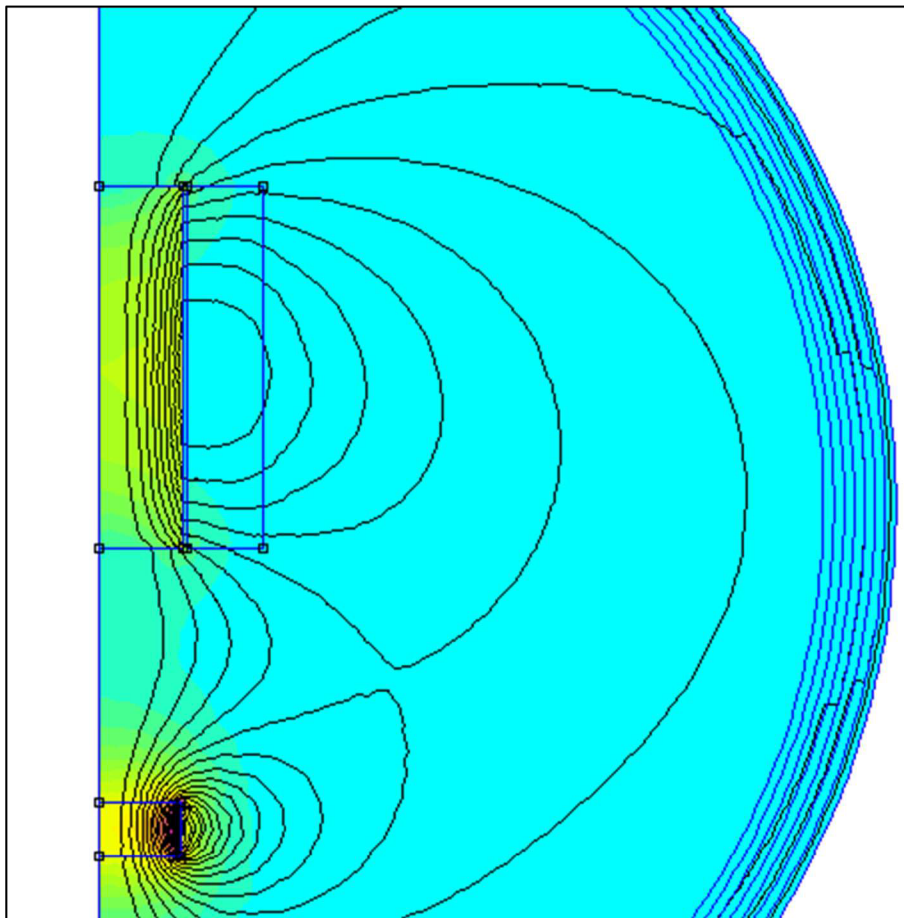


Graf 1- Závislost síly působící na permanentní magnet na zvyšující se vzdálenosti

3.2.1 Zhodnocení

Po vytvoření sérii desíti měření jsem výsledné hodnoty zapsal a vymaloval do grafu. (Graf 1) Pro možné porovnávání průběžných výsledků jsem prvně potřeboval vytvořit hranici minimální hodnoty síly. Na tu jsem došel sečtením hmotnosti zvoleného permanentního magnetu a hmotnosti krabičky IGBT modulu. Celková hmotnost vyšla na 331 g neboli 0,331kg. Po převedení hmotnosti na sílu jsem dosáhl výsledku 3,246 N. Znamená to tedy, že síla, která bude působit na zdvih permanentního magnetu v modulu musí být větší než 3,246 N. Tato hodnota je v grafu zaznačená černou přímkou. Modrá křivka dále znázorňuje, jak síla magnetických polí klesá se vzdáleností. Po proložení křivky spojnici trendu, jde vidět, že odpovídá klesající mocninné křivce. Můžu tedy potvrdit správnost simulace, jelikož síla elektromagnetu je mimo jiné závislá na druhé mocnině vzdálenosti.

Křivky v grafu se protínají přibližně v hodnotě vzdálenosti 74 mm. V bodě vzdálenosti 75 mm je modrá křivka těsně pod černou, a tedy v daném bodě není síla dostatečně veliká. Simulace v programu na počítači je samozřejmě pouze přiblížení a reálná hodnota propojení obou křivek se může mírně lišit. Pro praxi tedy budu počítat, že maximální hodnota vzdálenosti mezi permanentním magnetem a cívkou elektromagnetu bude 70 mm. V případě, že bych hmotnost levitujícího předmětu měnil, maximální vzdálenost by se měnila s druhou mocninnou.



Obrázek 6 - Simulace s největší vzdáleností předmětu při splnění potřebné síly

3.3 Převodní charakteristika elektromagnetu

V následující části kapitoly simulace se zaměřím na vyjádření a popisu převodní charakteristiky elektromagnetu. Budu se tedy zaměřovat na změnu síly se změnou proudu tekoucího v cívkě elektromagnetu.

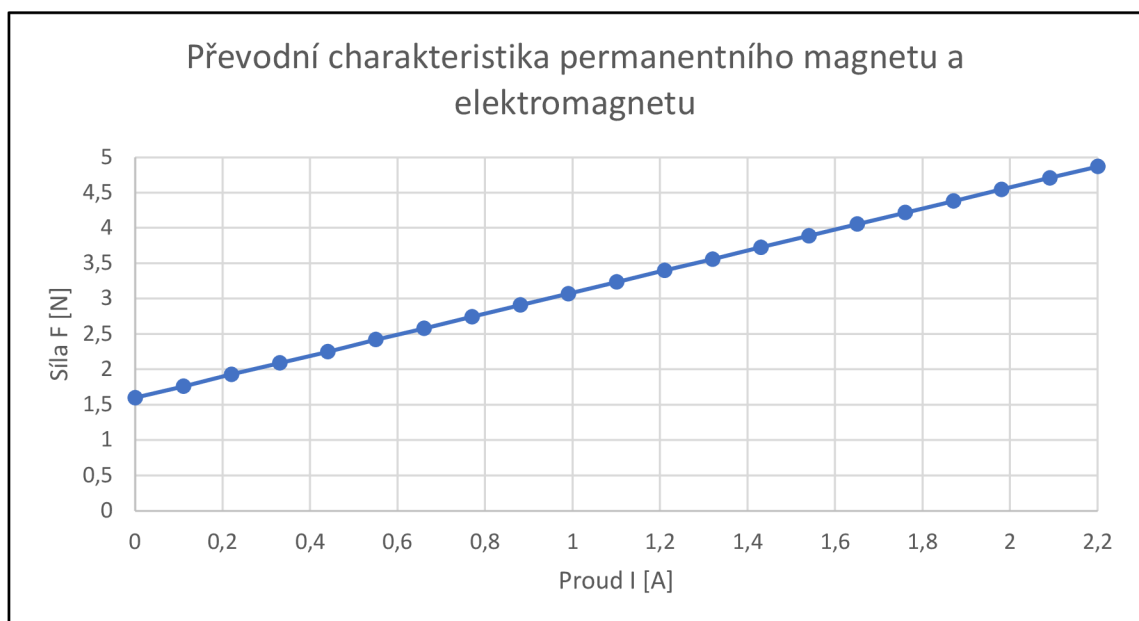
Když si vezmeme převodní charakteristiku dvou elektromagnetů, víme, že síla je přímo úměrná součinu proudu elektromagnetů. Matematicky se to zapíše následovně:

$$F \propto I_1 \cdot I_2, \quad (1.3)$$

kde I_1 a I_2 jsou proudy v cívkách elektromagnetů.

Tato závislost vychází z Ampérova zákona elektrodynamiky, který říká, že síla působící mezi dvěma vodiči je přímo úměrná jejich proudům. V případě elektromagnetů generuje každý elektromagnet své vlastní magnetické pole a proudy procházející vodiči určují intenzitu těchto magnetických polí. Interakce těchto magnetických polí pak vyvolává sílu mezi elektromagnety. Každopádně přesná závislost je ovlivněna několika dalšími faktory jako je geometrie, vzdálenost nebo magnetické vlastnosti materiálů.

Pro náš případ nás zajímá převodní charakteristika mezi elektromagnetem a permanentním magnetem. Teorie říká, že závislost síly na proudu by měla být lineární. V tomhle případě se permanentní magnet chová jako zdroj magnetického pole, na které reaguje elektromagnet generující vlastní magnetické pole. Proud procházející elektromagnetem ovlivňuje sílu interakce těchto magnetických polí. Pro ověření správnosti jsem provedl další sérii simulací, které jsem opět zapsal a vynesl do grafu. Simulace byly opět provedeny v programu FEMM.



Graf 2 - Výsledek převodní charakteristiky elektromagnetu

Graf 2 popisuje naměřené výsledky ze simulace přechodové charakteristiky. Z náklonu křivky lze poznat, že se jedná o lineární závislost síly na proudu, stejně jak říká teorie. Matematicky zápis by vypadal následovně:

$$F \propto I, \tag{1.4}$$

kde I je proud tekoucí v cívce elektromagnetu.

4. SNÍMAČE VZDÁLENOSTI

V další kapitole se budeme zabývat snímači. Vyberu si pár snímačů, které se hodí na vytvoření zařízení pro demonstraci magnetické levitace a ty detailněji popíšu a vysvětlím jejich užití na tuto práci.

Snímač je zařízení, které má schopnost detekovat, měřit nebo zachytávat fyzikální nebo chemické veličiny a převádět je na elektrický signál. Existuje široká škála snímačů s různými velikostmi a rozměry. Pro naše konkrétní použití se hlavně budeme dívat na snímače vzdáleností a snímače intenzity magnetického pole.

4.1 Ultrazvukový snímač vzdálenosti

Ultrazvukové snímače využívají ultrazvukových vln k detekci a měření objektů. Je navržen tak, aby generoval, vysílal a zachycoval ultrazvukové signály a na základě těchto signálů poskytoval informace o vzdálenosti, tvaru nebo pohybu objektů ve svém okolí. Princip fungování ultrazvukového snímače je založen na vysílání krátkých pulzů ultrazvukových vln pomocí vysílacího prvku (emitoru) a následného zachycování odražených vln pomocí přijímacího prvku (receiveru). Vysílací prvek generuje elektrické signály, které se převádějí na mechanické vibrace. Tyto vibrace vytvářejí ultrazvukové vlny, které se šíří do okolí. Když se ultrazvukové vlny setkají s objektem, část z nich se odrazí zpět do přijímacího prvku, který je dostatečně citlivý na zachycení těchto odražených signálů. Po zachycení odražených vln se opět přes mechanické vibrace signál mění na elektrický a je následně zpracován. Na základě časového rozdílu mezi vysláním signálu a příjmem odraženého signálu se vypočítá vzdálenost snímače k objektu. [13][18]

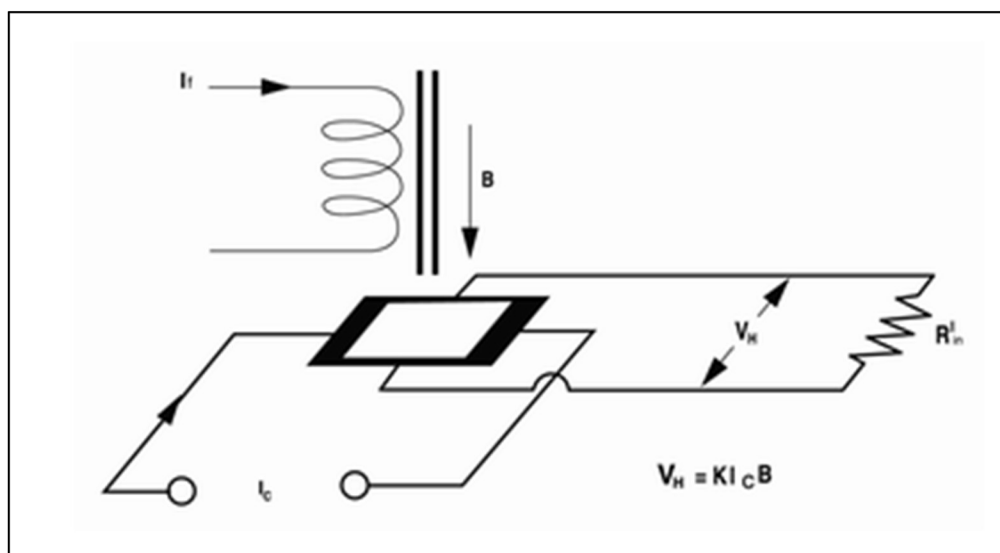
Pro náš případ ultrazvukový snímač, konkrétně snímač vzdálenosti, může být dvojího druhu. Záleží, zda ze senzoru vychází digitální nebo analogový signál. Senzor s digitálním výstupem potřebuje mikroprocesor, který se dá naprogramovat, aby správně měřil odchylku levitujícího magnetu a dával tak informaci regulátoru o úpravě intenzity magnetického pole. V případě, že konstruktér zařízení zvládá mikroprocesor naprogramovat, je tato varianta výhodnější, jak z hlediska rozměrů, tak i ceny snímače. Výhodou ultrazvukového snímače je jednoduché vložení do zařízení. Ultrazvukové vlny

se šíří všemi směry stejně (v našem případě přes vzduch) a je tedy možné snímač uložit pod elektromagnet a levitující předmět, kde snímač snímá vzdálenost daného předmětu.

Ultrazvukové snímače s analogovým výstupem jsou na připojené do obvodu s regulátorem jednodušší, ale zase jsou rozměrově větší a ekonomičtěji náročnější.

4.2 Snímač s Hallovou sondou

Hallová sonda využívá Hallův jev k měření intenzity magnetického pole. Když je Hallův senzor vystaven magnetickému poli, dojde k vytvoření siločar magnetického pole uvnitř senzoru. Když nosiče náboje vstoupí do tohoto magnetického pole, začne na ně působit Lorentzova síla, která je odchyluje do jedné strany senzoru. To způsobí, že se na této straně hromadí nosiče s opačným nábojem než na druhé straně senzoru. Díky této nerovnováze nosičů náboje vzniká elektrické pole uvnitř senzoru. Hallův senzor je vybaven dvěma kontakty, které jsou umístěny na protilehlých stranách senzoru. Připojením napájecího napětí mezi tyto kontakty vzniká elektrické napětí, známé jako Hallovo napětí. Velikost Hallova napětí je přímo úměrná intenzitě magnetického pole, které působí na senzor. Hallův senzor se lze dále napojit na vyhodnocovací obvod, který jeho výstup zpracuje a vyhodnotí. [14][15]



Obrázek 7 - Princip Hallova senzoru [15]

Hallův senzor pro vytvoření zařízení magnetické levitace, lze například použít detektor polohy pomocí změny intenzity magnetického pole. Hallův senzor se přidělá na konec elektromagnetu, a je dále připojen na elektrický obvod, který pomocí toho senzoru identifikuje změnu hodnoty magnetického pole. Dále podle vyhodnocení přidává nebo ubírá proud cívkou.[14][15]

4.3 Infračervený senzor

Infračervený senzor vysílá a zpětně detekuje infračervené záření nebo může být nastaven pouze na detekci infračerveného záření (teploty) těles nebo zařízení kolem. Jeho nejčastější využití je pro bezkontaktní měření teploty, pohybu, dálková komunikace se zařízením nebo detekci přítomnosti objektů.

Použití infračerveného senzoru u výroby levitačního zařízení lze provést dvěma způsoby. První způsob je použití senzoru jako světelnou závoru. Vysílač infračerveného záření se umístí na jednu stranu do výšky levitujícího předmětu a na druhou stranu se umístí přijímač téhož záření. Přijímač vyhodnocuje z množství záření, které se k němu dostalo, polohu levitujícího předmětu. Důležité je si uvědomit, že světelná závora nemá nekonečný rozsah, takže se může stát, že pokud by se levitující předmět dostal příliš vysoko nebo naopak nízko, světelná závora ho už nemusí zaregistrovat. Druhý způsob je podobný jako u ultrazvukového snímače. Infračervený snímač se, který sám obsahuje vysílač i přijímač záření, se umístí pod levitující předmět a snímá vzdálenost levitujícího předmětu. Tento způsob může být méně spolehlivý, jelikož může dojít k rušení okolním světlem, a tedy dojít k nepřesnosti měření. [16][17]

Tyto tři typy senzorů bych doporučil při výrobě zařízení pro demonstraci magnetické levitaci. Senzorů existuje opravdu veliké množství a pro jiné druhy zařízení nebo jiné velikosti konstrukcí se mohou ostatní druhy hodit více. V našem případě bych jako první volil ultrazvukový senzor s digitálním výstupem, který by se musel nastavit pomocí mikroprocesoru, ale z hlediska účinnosti si myslím, že je nejlepší volba. Pro větší zařízení, kde by cena nehrála roli bych doporučil i ultrazvukový snímač s analogovým výstupem.

5. VÝROBA ZKUŠEBNÍ KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO MAGNETICKOU LEVITACI

Nyní jsem potřeboval fyzický výrobek konstrukce zařízení pro magnetickou levitaci. Zařízení jsem následně provizorně zapojil a měřením ověřil, zda přibližně odpovídá výsledkům ze simulací.

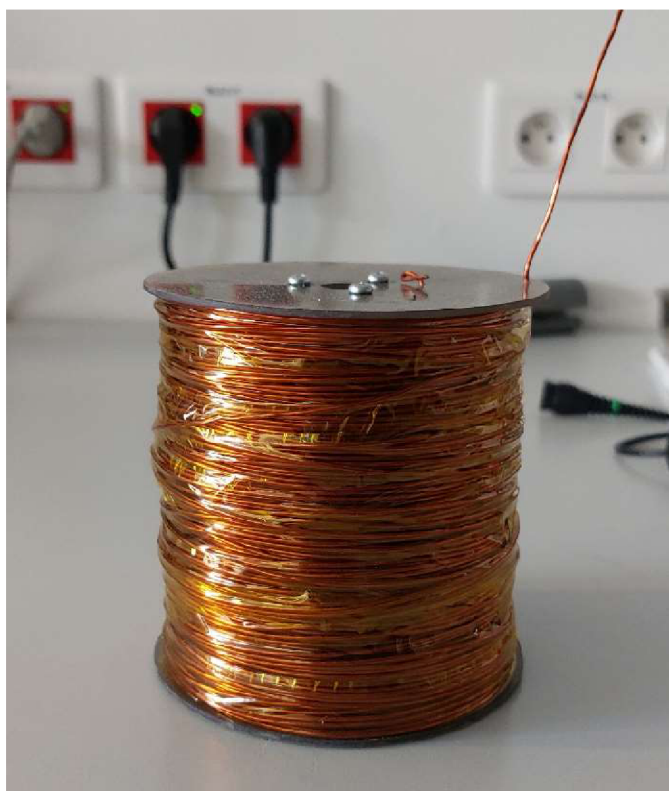
5.1 Výroba kostry zařízení

5.1.1 Cívka

Kostra zařízení se skládá ze dvou hlavních částí: cívka a rameno se základnou. Začal jsem u výroby cívky. Jako první jsem si potřeboval zajistit jádro cívky. V simulaci jsem pracoval s jádrem válcovým o průměru 50 mm a výškou 100 mm. Bohužel se mi podařilo získat pouze tyč s průměrem 40 mm. Znamená to, že na cívce bude více závitů. To naštěstí veliký problém není, budu si ale muset dát pozor, aby celkový odpor vinutí nebyl příliš veliký a podle toho změnit tloušťku měděného drátu. Ve chvíli, kdy jsem už měl váleček uříznutý a hrany jemně zkosené, musel jsem si vytvořit boky cívky, aby mi drát, který budu na jádro namotávat, nesjel. Vyřízl jsem si dva čtverce z desky sklolaminátu, které jsem ručním pilníkem dále opracoval do kruhového profilu. Destičky cívky jsem chtěl k jádru přišroubovat, proto jsem do něj z obou stran vyvrtal tři díry o průměru 3 mm a do otvorů ručně vyvrtal závity. V destičkách jsem vytvořil stejné díry ve stejném rozpoložení jako u jádra.

Pro jednodušší namotávání drátu na jádro, jsem musel vyvrtat díru skrz celé jádro. Díru mi pomohl vytvořit můj vedoucí na soustruhu, protože vrtání takové díry stolní vrtačkou by mohl být problém. Cívku jsem chtěl na rameno upevnit závitovou tyčí, a proto jsem si musel na jedné straně jádra vyvrtat další závit. Na stejnou stranu jako je vyřezaný závit, jsem do destičky vyvrtal dva malé otvory na vyvedení konců drátu. Až jsem všechny tyto kroky měl splněné, boky na jádro přišroubované, tak jsem šel namotávat na jádro měděný drát. Jelikož jsem měl jiný průměr jádra, než se kterým jsem prvně počítal, musel jsem si kvůli odporu zvolit větší průměr drátu. Použil jsem drát o průměru 1,12 mm, který by měl být dostačující. Potřeboval jsem si vyrobit „namotávačku“, která by mi ulehčila namotání drátu na cívku. Cívku, ze které jsem drát odmotával, jsem prostrčil tyčí a vložil do přepravky. Byla tedy ve vzduchu s šlo s ní

lehce otáčet. To samé jsem udělal s mojí cívkou. Jakmile bylo všechno připravené, prostrčil začátek dírkou v boku cívky na uchycení a začal jsem navíjet drát na jádro. Namotával jsem postupně po vrstvách, vždy po druhé nebo třetí vrstvě jsem si svůj pokrok zalepil izolační páskou, aby se mi vrstvy nerozmotávali a celá cívka se tak zpevnila. Namotávání trvalo několik hodin, vypočetl jsem něco mezi 3 až 4 kg mědi. Po namotání jsem konec drátu provedl druhou dírkou boční destičky, aby se nerozmotala, a celou cívku ještě jednou přelepil izolační páskou.



Obrázek 8 - Hotová namotaná cívka

5.1.2 Konstrukce ramene

Ve chvíli, kdy jsem už měl hotovou cívku, byla potřeba vytvořit konstrukci ramene, kam cívku pověším. Prvně se mi podařilo sehnat hliníkovou konstrukci ve tvaru C s profilem obdélníku. Z té konstrukce jsem si část odřízl, aby mi vznikl tvar L. Výška je necelých 25 cm a délka ramena je přibližně 20 cm. Místa řezu jsem pilníkem vyhladil, aby hrany nebyly příliš ostré. Na kratším konci asi 10 mm od kraje jsem vyvrtal díru, kudy povede závitová tyč, která bude držet cívku. Protože tíha cívky je kolem 4 kg, musel jsem rameno upevnit na něco tvrdého a pevného, aby se to pod námahou

neutrhl. Vybral jsem si tedy hliníkovou destičku, na kterou bude rameno přivařeno. Hliníkovou destičku, s rozměry 100x150x10 mm, jsem si objednal z obchodu, která mi do pár týdnů došla. Dále, protože nemám zkušenosti se svařováním a už vůbec ne hliníku, jsem šáněl někoho, kdo mi to svaří. Problém je, že taková malá zakázka velké firmy nezajímá, a proto jsem velice výjimečně dostal odpověď, a když už jsem odpověď dostal, bylo mi řečeno, že takové věci nedělají. Začal jsem přemýšlet, jestli to nepůjde vytvořit jiným způsobem, který si budu moct vytvořit sám, ale naštěstí jsem narazil na firmu Svařování Jelínek, kde jsem se dokázal domluvit na svařovací práci.

Nyní jsem měl rameno pevně přidělané k hliněné destičce a potřeboval jsem celou hliněnou kostru připevnit na základnu, která zařízení udrží a zbrání převrácení. Odřízl jsem si základnu o rozměrech 35x25 cm z desky bakelitu, na kterou rameno přišroubuji. K tomu jsem si prvně musel v hliněné destičce vyvrtat čtyři díry, každou v jednom rohu



Obrázek 9 - Hotová kostra s cívkou

a stejně rozpoložené díry vyvrtat i v základně. Do vyvrtaných otvorů jsem umístil šrouby a zespodu matkami utáhl. Takhle ale měla základna špatnou stabilitu, tak jsem ještě zespoda základny nalepil šest gumových nožiček, které pomůžou stabilitě zařízení.

Pak mě už čekalo pouze uříznout kus závitové tyče, kterou jsem jednou stranou našrouboval do cívky, na to nasadil jednu matku, vložil do otvoru v rameni a druhou matkou zevnitř utáhl. Zařízení dřelo pevně a stabilně i při další manipulaci a měření.

5.1.3 Měření

Jako poslední činnost mě čekalo ověření funkčnosti a porovnání se simulací. V první řadě jsem musel vytvořit předmět, jehož váha se co nejpřesněji přiblíží váze v simulaci, tedy 331 g. Jelikož se mi nepodařilo získat krabičku IGBT modulu, jak jsem plánoval, musel jsem si poradit jinak. Povedlo se mi najít odřezky dřeva, které vážili dohromady s magnetem 350 g. To pro mé měření bylo dostačující, tak jsem vše slepil izolepou a šel měřit. Napojil jsem vyvedené dráty cívky na zdroj napětí a pokusil se pustit odpovídající výkon do cívky. Ze zdroje mi šly pustit 2 A, tedy musel jsem mírně zvednout napětí na 13,5 V, abych dosáhl výkonu 27 W. Ve chvíli, kdy výkon odpovídal, přiložil jsem dřevěnou destičku mezi cívku a předmět s permanentním magnetem a postupně destičku oddaloval, dokud mi předmět s magnetem nespádl. Jakmile předmět spadl, změřil jsem vzdálenost destičky od cívky a přičetl výšku předmětu. Celková vzdálenost vyšla 6,5 cm.



Obrázek 10 - Vytvořený předmět pro měření levitace

5.1.4 Zhodnocení

V simulaci mi vyšlo, že by se měl předmět udržet ve výši 7 cm. V praxi jsem dosáhl vzdálenosti 6,5 cm. Důvodů, proč jsme nedosáhli nasimulované vzdálenosti je několik. Jako první je, že jsme neměli přesně stejnou váhu předmětu jako v simulaci, to může mírně ovlivnit výsledek. Dále jsem měření prováděl pravítkem, a proto se mohla vyskytnout chyba při odečtu. Další nepřesnost tvořil zdroj napětí. Jak jsem dříve zmiňoval, nepouštěl jsem přesně stejný proud a napětí jako v simulaci. To mohlo také vést k chybě. Sám zdroj má jistou toleranci, která se mohla vyskytnout. Celkově bych tedy posoudil přístroj za ověřený a simulaci za potvrzenou.

6. ZÁVĚR

V první kapitole práce jsem důkladně popsal druhy magnetické levitace. Popsané druhy magnetické levitace jako elektromagnetická levitace, elektrodynamická levitace, levitace pomocí permanentních magnetů, kombinace elektromagnetické a elektrodynamické levitace, levitace pomocí supravodičů a zmínil jsem zvláštní magnetické uspořádání Halbachovu soustavu permanentních magnetů. Pokračoval jsem uvedením příkladu využití magnetické levitace v podobě vysokorychlostních vlaků MAGLEV. U vlaků MAGLEV jsem rozebral historii vlaků s použitím elektrodynamické levitace, které byly prvně zkonstruovány v Německu a vlaky, používající elektrodynamickou levitaci, které byly prvně vyvinuty v Japonsku. Nakonec jsem rozebral jejich technické provedení.

Druhá kapitola se zabývala praktickým výrobkem zařízení pro demonstraci magnetické levitace. Jako první jsem porovnal tři možná provedení, a to elektromagnetickou levitaci, elektrodynamickou levitaci a levitaci pomocí permanentních magnetů. Z nich jsem si vybral elektromagnetickou levitaci, kterou jsem zvolil pro výrobu přístroje. Dále jsem si vybral magnetické zapojení, které jsem nasimuloval a vynesl na graf. Vybral jsem si magnetické zapojení, kde je elektromagnet zavěšen na rameni a pod ním levituje předmět s permanentním magnetem uvnitř. Měl jsem zadanou celkovou váhu levitujícího předmětu, což byla 331 g. Váze 331 g odpovídá potřebná síla 3,2 N, tedy síla, kterou musí elektromagnet vzájemně s permanentním magnetem vytvořit je 3,2 N. To byla moje hraniční hodnota. Permanentní magnet jsem v simulaci postupně oddaloval od cívky elektromagnetu a hodnoty síly vynesl do grafu 1. Z grafu 1 pak vyšlo, že maximální vzdálenost je 7 cm. Potom jsem rychle rozebral několik snímačů vzdálenosti, které se hodí na konstrukci takového zařízení. Rozebral jsem ultrazvukový snímač, snímač s Hallovým jevem a infračervený snímač. Na konci části o snímačích jsem zvolil ultrazvukový snímač jako nejvhodnější. Úplně nakonec práce jsem popisoval tvoření konstrukce takového zařízení. Popsal jsem průběh vytvoření cívky elektromagnetu, výrobu držáku a jejich kompletaci. Jako poslední jsem si zařízení uvedl do běhu a naměřil jsem vzdálenost mezi předmětem a elektromagnetem, kdy síla už nebyla dostatečná, aby předmět udržela. Vzdálenost vyšla 6,5 cm, což je ovlivněno metodou měření, nepřesností váhy

předmětu, nepřesnost nastavování stejného napájecího výkonu a nepřesnost zdroje napětí. Můžu tedy nakonec říct, že praxe odpovídá simulaci a že jsem dosáhl požadovaného výsledku.

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/eesenior/designhandbook/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. 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. 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/>
- [11] Na, UJ (2019) „Design and Analysis of a New Hybrid Electromagnetic Levitation System“, Journal of the Korean Society of Industry Convergence . Korea Industrial Convergence Society, 22(1), pp. 29–37. doi: 10.21289/KSIC.2019.22.1.029.C. -H. Kim, H. -W. Cho, J. -M. Lee, H. -S. Han, B. -S. Kim and D. -S. Kim, "Levitation control of a hybrid-excited magnetic levitation vehicle," 2011 11th International Conference on Control, Automation and Systems, Gyeonggi-do, Korea (South), 2011, pp. 1020-1024.
- [12] R. Nishio, M. Ikeda, R. Sasaki, S. Ohashi, Study on control method of running velocity for the permanent magnet–HTSC hybrid magnetically levitated conveyance system,Physica C: Superconductivity and its Applications,Volume 471, Issues 21–22,2011,Pages 1492-1496,ISSN 0921-4534,<https://doi.org/10.1016/j.physc.2011.05.223>.(<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921453411003108>)
- [13] GIEMZA, M. Ultrazvukové měření vzdálenosti. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Sedláček.
- [14] 40× Hallův snímač v autě. K čemu slouží? - Unimagnet.cz. Neodymové magnety - Unimagnet.cz [online]. Copyright © 2023 UNIMAGNET [cit. 24.05.2023]. Dostupné z: <https://www.unimagnet.cz/clanek/589/magnety-v-automobilech-9-40-halluv-snimac-v-aute-k-cemu-je/>
- [15] Magnetické senzory s Hallovým efektem - 1. princip | Automatizace.HW.cz. Automatizace.HW.cz | Elektronika v automatizaci [online]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/magneticke-senzory-s-hallovym-efektem-1-princip>
- [16] Infrasensor - Světelné závory na odrazku. Infrasensor s.r.o. - Infračervené světelné závory, indukční snímače, senzory, bezpečnostní spínače, kontrola a měření plechu. [online]. Dostupné z: <https://www.infrasensor.cz/telcosensors/zavory-na-odrazku.html>
- [17] Infračervené snímače v automatizaci | MM Průmyslové spektrum. MM Průmyslové spektrum - nejčtenější strojírenský časopis a jeho digitální obsah |

MM Průmyslové spektrum [online]. Copyright © 2001 [cit. 25.05.2023].
Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/infracervene-snimace-v-automatizaci>

- [18] Ultrazvukový snímač . autosen.com - The Sensor Company [online]. Dostupné z: https://autosen.com/cs/Snimace-polohy/Ultrazvukove-senzory/Ultrazvukovy-snimac-AU002?gclid=CjwKCAjw67ajBhAVEiwA2g_jECyH_dhtUX5QeZcA04MwpnjHgzsnnwRAeaO8fwxOzcAr75cEGT5mYDhoCrmMQAvD_BwE#knowledge