

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
Využití magnetické levitace

Josef Benek

2018

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Josef BENEK**
Osobní číslo: **E15B0150P**
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Využití magnetické levitace**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Popište podrobně princip magnetické levitace.
2. Diskutujte a popište možnosti využití magnetické levitace v praxi.
3. Provedte výpočet a sestavte cívku použitelnou k magnetické levitaci.
4. Provedte shrnutí dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah kvalifikační práce: **30 - 40 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Roman Pechánek, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání bakalářské práce: **10. října 2017**

Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2018**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena v teoretické části na podmínky magnetické levitace a jednotlivé principy, kterými je prakticky řešena. Dále jsou popsány realizace daných principů v praktických systémech a jaké jsou snahy o jejich zlepšení. Praktická část je poté zaměřena na teoretickou i praktickou část ručního výpočtu a návrhu cívky (elektromagnetu), která může být použitelná pro realizaci jednoho z principů levitace, uvedených v teoretické části. Zde je navržena cívka pomocí výpočtu magnetické síly přes energii magnetického pole při zanedbání několika jevů magnetického obvodu. Při praktické realizaci nastalo několik problémů, především s počtem závitů (N) a nerovnoměrnou vzduchovou mezerou (δ), a proto se muselo přejít k praktickému změření. Díky němu byla zjištěna velká nepřesnost výpočtů oproti reálnému obvodu, a proto se musela provést menší oprava ve výpočtech (nezanedbání rozptylových toků). Díky tomu se přesnost výpočtu výrazně zlepšila.

Klíčová slova

Magnetická levitace, elektrodynamický princip levitace (EDS), elektromagnetický princip levitace (EMS), lineární asynchronní motor (LIM), magnetická ložiska, maglev, praktické využití magnetické levitace, návrh cívky, magnetický odpor, relativní permeabilita, magnetická síla, elektromagnet, měření elektromagnetu

Abstract

This bachelor thesis is focused on theoretical description of principles and requirements, which are needed for practical realization of magnetic levitation. There are descriptions of principles in specific systems, including their improvements. Practical part of thesis is focused on theoretical and practical part of manual calculation of design of coil (electromagnet), which could be used for realization of one of the principles of magnetic levitation, mentioned in theoretical part. The coil is designed and computed with the help of computation of magnetic force, which neglect some effects of magnetic circuit. Some problems occurred in practical realization, which caused different number of coils (N) and unequal air gap (δ), this led to need of practical measurements. It was found, that there was big inaccuracy in computations compared to practical realization, which led to their correction (computations with dispersive flows). Precision of calculations was then thanks that really improved.

Key words

Magnetic levitation, electrodynamic suspension (EDS), electromagnetic suspension (EMS), linear induction motor (LIM), magnetic bearing, maglev, practical use of magnetic levitation, design of the coil, magnetic resistance, relative permeability, magnetic force, electromagnet, measurement of electromagnet

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 5/28/18

Josef Benek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu bakalářské práce Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky v průběhu tvoření práce, za jeho přístup a metodické vedení práce.

Dále bych rád poděkoval Prof. Ing. Danielovi Mayerovi, DrSc. za cenné rady a informace, které mi poskytl, a které mi, mimo jiné, pomohly se rozhodnout, jakým směrem se bude má práce ubírat.

V poslední řadě bych rád poděkoval i Ing. Bedřichovi Bednářovi za poskytnutí potřebného vybavení při tvorbě praktické části práce.

Obsah

OBSAH.....	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	10
ÚVOD.....	12
1 PRINCIP MAGNETICKÉ LEVITACE.....	13
1.1 OBECNÁ PROBLEMATIKA MAGNETICKÉ LEVITACE.....	13
1.1.1 Zdvihové síly.....	13
1.1.2 Stabilita.....	14
1.2 METODY MAGNETICKÉ LEVITACE.....	15
1.2.1 Levitace pomocí elektrodynamického principu (<i>Electrodynamic suspension - EDS</i>).....	16
1.2.2 Levitace pomocí elektromagnetického principu (<i>Electromagnetic suspension - EMS</i>).....	18
1.2.3 Magnetická levitace pomocí diamagnetických, supravodivých materiálů.....	19
2 VYUŽITÍ MAGNETICKÉ LEVITACE V PRAXI.....	22
2.1 BEZKONTAKTNÍ TAVENÍ KOVŮ.....	22
2.1.1 Princip základní funkce a příklad praktické realizace.....	22
2.1.2 Nevýhody bezkontaktního tavení, nové inovace.....	23
2.1.3 Praktické použití.....	24
2.2 MAGNETICKÁ LOŽISKA.....	24
2.2.1 Základní princip funkce <i>AMB</i>	24
2.2.2 Základní princip funkce <i>EDB</i> , typy ložisek.....	25
2.2.3 Nové inovace.....	26
2.2.4 Výhody a nevýhody <i>AMB</i> , <i>EDB</i> a jejich praktické použití.....	26
2.3 LINEÁRNÍ ASYNCHRONNÍ MOTORY, VYUŽITÍ MAGNETICKÉ LEVITACE V DOPRAVNÍCH SYSTÉMECH.....	27
2.3.1 Princip a konstrukce <i>LIM</i>	27
2.3.2 Nevýhody <i>LIM</i> a nové inovace.....	28
2.3.3 Praktické použití <i>LIM</i>	29
2.4 MAGLEV SYSTÉMY	30
2.4.1 Princip maglevu <i>EMS</i>	31
2.4.2 Princip maglevu <i>EDS</i> a jeho nevýhoda.....	32
2.4.3 Obecné výhody a nevýhody maglevu.....	34
2.4.4 Nové inovace, <i>Halbachova soustava</i> a <i>Inductrack</i>	34
2.4.5 Využití maglev systémů.....	36
3 NÁVRH A KONSTRUKCE CÍVKY PRO MAGNETICKOU LEVITACI.....	37
3.1 TEORETICKÝ ÚVOD.....	38
3.1.1 Výpočet hmotnosti přitahovaného (levitovaného) objektu.....	38
3.1.2 Výpočet magnetického obvodu a výpočet síly.....	39
3.1.3 Porovnání síly magnetické a gravitační, kontrola na praktickou realizaci.....	45
3.2 PRAKTICKÝ VÝPOČET.....	46

3.2.1	<i>Prvotní výpočet hmotnosti přitahovaného (levitovaného) objektu.....</i>	<i>46</i>
3.2.2	<i>Výpočet magnetického obvodu ideálního a reálného.....</i>	<i>52</i>
3.2.3	<i>Výpočet proudu pro vznik dostatečné síly magnetické pole.....</i>	<i>56</i>
3.2.4	<i>Kontrola pro praktickou montáž, parametry prakticky zkonstruované cívky</i>	<i>59</i>
3.3	PRAKTICKÁ KONSTRUKCE A MĚŘENÍ CÍVKY.....	63
3.3.1	<i>Problémy s konstrukcí, nerovnoměrná δ</i>	<i>63</i>
3.3.2	<i>Praktické měření cívky (elektromagnetu).....</i>	<i>63</i>
3.3.3	<i>Teoretické určení proudů elektromagnetu.....</i>	<i>71</i>
3.3.4	<i>Porovnání měření a teoretických výpočtů, zhodnocení přesnosti použité metody a její zlepšení.....</i>	<i>73</i>
4	ZÁVĚR.....	78
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	81
	PŘÍLOHY.....	1

Seznam symbolů a zkratek

AM.....	Asynchronní motor
AMB.....	Active magnetic bearing – aktivní magnetická ložiska
$a_{stř}, a_{kr}$	Délka středního sloupku cívky, Délka krajního sloupku cívky $[m]$
B	Magnetická indukce $[T]$
b	Šířka transformátorového jádra $[m]$
d_v	Průměr vodiče $[m]$
EDB.....	Electrodynamic bearing – elektrodynamická ložiska
EDS.....	Electrodynamic suspension – elektrodynamický princip levitace
EMS.....	Electromagnetic suspension – elektromagnetický princip levitace
F_m, F_g	Síla magnetického pole, gravitační síla $[N]$
g	Gravitační zrychlení $[m \cdot s^{-2}]$
H	Magnetická intenzita $[H \cdot m^{-1}]$
I	Elektrický proud (protékající cívkou) $[A]$
I_1, I_2	Teoretické rozsahy proudů pro reálný magnetický obvod $[A]$
I_{1m}, I_{2m}	Naměřené hodnoty proudů při prvním a druhém měření $[A]$
I_{1t}, I_{2t}	Teoretické hodnoty proudů pro ideální magnetický obvod $[A]$
J, J_{dov}	Proudová hustota materiálu, dovolená proudová hustota vodiče $[A \cdot m^{-2}]$
k	Koeficient plnění transformátorového jádra $[-]$
L	Indukčnost $[H]$
LIM.....	Linear induction motor – lineární asynchronní motor
LSM.....	Linear synchronous motors – lineární synchronní motor
$l, l_{stř}$	Délka střední jádrové spojky, délka střední siločáry $[m]$
Maglev.....	Magnetic levitation – magnetická levitace
m, m_E, m_v	Hmotnost cívky, Hmotnost jádra cívky, hmotnost vodiče $[kg]$
N	Počet závitů cívky $[z]$
N_1	Počet závitů na jednu namotanou vrstvu cívky $[z]$
R_m	Reluktance (magnetický odpor) obvodu $[H^{-1}]$
$R_{mx}, R_{m\delta x}$	Reluktance vzduchové mezery $[H^{-1}]$

$R_{m_{Fex}}$	Reluktance magnetického jádra cívky	$[H^{-1}]$
R_p	Parazitní odpor indukčnosti	$[\Omega]$
S_v	Průřez vodiče	$[m^2]$
S_x, S_{δ_x}	Plocha vzduchové mezery	$[m^2]$
$S_{Fex}, S_{Fe\delta_x}$	Plocha magnetického jádra cívky	$[m^2]$
U_m	Magnetické napětí	$[A]$
V_v	Objem vodiče	$[m^{-3}]$
v	Výška sloupku jádra cívky	$[m]$
vr	Počet namotaných vrstev závitů cívky	$[-]$
W_m	Energie magnetického pole	$[J]$
Φ	Magnetický tok	$[Wb]$
δ	Vzduchová mezera	$[m]$
δ_{1m}, δ_{2m}	Změřené a aritmeticky dopočtené vzduchové mezery pro obě měření	$[m]$
$\delta_{výp}$	Chyba teoretického výpočtu proudu oproti naměřenému	$[\%]$
μ	Permeabilita materiálu	$[H \cdot m^{-1}]$
μ_0	Absolutní permeabilita	$[H \cdot m^{-1}]$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H \cdot m^{-1}$
μ_r	Relativní permeabilita materiálu	$[-]$
ρ	Hustota materiálu	$[kg \cdot m^{-3}, g \cdot cm^{-3}]$

Úvod

Tato práce se zabývá problematikou magnetické levitace. Ta je v poslední době velmi rozvíjenou a zajímavou technologií, neboť skýtá spoustu příležitostí a výhod oproti dosud konvenčně používaným systémům v určitých oblastech (nejznámější je její rozvoj v dopravních systémech). Díky poslednímu technologickému vývoji jsou navíc nejen objevovány nové možnosti zlepšení doposud zavedených systémů, ale i možnosti nového využití.

V první části práce je obecně popsána problematika magnetické levitace, nebo-li co se skrývá pod jejím pojmem a jaké základní podmínky jsou potřebné pro její vznik. Dále jsou zde rozebrané jednotlivé principy, na kterých funguje. Těmi jsou konkrétně princip elektrodynamický, princip elektromagnetický a princip levitace pomocí diamagnetických (supravodivých) materiálů.

Ve druhé části jsou poté popsány praktické realizace principů elektrodynamického a elektromagnetického a jejich použití ve světě a jaké jsou realizovány pokusy pro zlepšení jejich funkce.

Třetí část se poté zabývá teoretickým návrhem cívky pro magnetickou levitaci podle elektromagnetického principu. Po návrhu následuje i popis její praktické konstrukce s již konkrétními parametry a také i problémy, které při konstrukci vznikly. Na navržené cívce pak je provedeno praktické měření, které je poté porovnáno s dříve určenými předpoklady a výpočty.

1 Princip magnetické levitace

1.1 Obecná popis a problematika magnetické levitace

Magnetická levitace je metoda, kdy předmět levituje ve vzduchu bez jakékoliv jiné podpory, než sil magnetického pole. Magnetická pole jsou zde použita převážně k potlačení účinků gravitačního pole na daný objekt. [1]

Na to, zda nám bude objekt levitovat jen pomocí magnetických sil, mají vliv dva zásadní parametry:

1. Zdvihové síly – tyto síly musí směřovat proti gravitačnímu zrychlení a musí být právě tak velké, aby potlačily jeho vliv na daný předmět.
2. Stabilita – ta nám zamezí, aby předmět spontánně nesklouzl nebo se nepřevrátil do takové polohy, která vyloučí působení zdvihových sil. [1]

1.1.1 Zdvihové síly

Magnetické materiály a systémy na sebe mohou působit silou přitahovací nebo odpuzovací. Ta závisí na síle magnetického pole a na ploše magnetů, které na sebe působí. [1]

Pro vytvoření magnetického pole pouze na zvednutí předmětu můžeme použít jakýkoliv druh magnetů. Permanentní magnety, elektromagnety, diamagnety, supravodivé magnety a i magnetické pole, vyvolané průchodem elektrického proudu skrz elektrický vodič. [1]

Pro výpočet zdvihových sil zavádíme pojem magnetický tlak (P_B), který nám udává hustotu energie spojenou s magnetickým polem. Je totožný s jakýmkoliv jiným tlakem, s tím rozdílem, že je nesen magnetickým polem a ne kinetickou energií molekul v plynu. Pro jeho výpočet v základních jednotkách platí tento vztah:

$$P_B = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (1.1)$$

1.1.2 Stabilita

Pro popis stability systému je velmi důležité Earnshawovo pravidlo z roku 1842, pojmenované podle britského matematika Samuel Earnshaw. Toto pravidlo bylo sice poprvé použité na popis elektrostatických polí, ale dá se aplikovat i na pole, kde jsou přítomny síly, jejichž velikost klesá s druhou mocninou vzdálenosti (např. pole gravitační a elektrické). Také se aplikuje na pole magnetická, která jsou emitována permanentními magnety. [1] [2]

Earnshawovo pravidlo nám ve své podstatě říká, že magnetický levitační systém, ve kterém jsou použity pouze tvrdé permanentní magnety, nemůže být nikdy stabilní. Nejjednodušším příkladem jsou dva dipólové magnety. Pokud je umístíme nad sebe tak, aby si stejná magnetická pole čelila (sever proti severu, jih proti jihu), tak nám sice vzniká odpuzovací síla, která by byla schopna zajistit levitaci jednoho z magnetů, ale tento systém nikdy nebude stabilní. Jeden z magnetů se vlivem působících sil přetočí a následně dojde k jejich vzájemnému přitáhnutí. [1] [2]

K Earnshawovu pravidlu se od roku 1939 vztahuje i Braunbeckovo rozšíření. Pojmenované podle německého fyzika Wenera Braunbecka nám říká, že pokud nejsou materiály magneticky tvrdé a velikost jejich relativní permeability (značena jako μ_r) je větší než jedna (paramagnety), tak způsobují v magnetickém levitačním systému jeho destabilizaci. Pokud je ale materiál s relativní permeabilitou menší než jedna (diamagnety), tak umožňují systému být naopak stabilní. [1] [2]

Statická stabilita

Statická stabilita znamená, že jakékoliv malé vybočení ze stabilní rovnováhy vyvolá takovou výslednou sílu, která vychýlený levitující předmět vrací zpět do rovnovážného bodu. Síly působící v trojrozměrném prostoru na jakýkoliv paramagnetický předmět v libovolné kombinaci gravitačních nebo elektrostatických polí, způsobí v nejlepším případě to, že poloha tělesa bude nestabilní minimálně podél jedné osy. [1] [2]

Existuje několik možností, jak dosáhnout stabilní levitace, například s využitím elektronické stabilizace nebo již zmíněnými diamagnetickými materiály. Dá se ukázat, že diamagnetika jsou stabilní minimálně podél jedné osy a mohou být stabilní i podél všech os. Také elektrické vodiče mohou mít relativní permeabilitu v časově proměnných magnetických polích menší než jedna, takže některá uspořádání založená na elektromagnetech se střídavým napájením mohou být automaticky stabilní. [1] [2]

Dynamická stabilita

Dynamická stabilita nám říká, že levitující systém je schopen utlumit všechny vibrační pohyby vedoucí k takovým vibracím, které způsobují opuštění oblasti stability. Vibrace lze tlumit např.:

- vnějším mechanickým tlumením (hydraulickým tlumičem, odporem vzduchu),
- tlumením vířivými proudy v elektricky vodivém materiálu,
- laděným tlumičem s přídatnou hmotou uvnitř levitujícího tělesa apod. [1] [2]

1.2 Metody magnetické levitace

Pro úspěšné levitování objektů a jejich stabilizaci ve všech 6 osách (podle stupňů volnosti; 3 osy translační a 3 osy rotační) můžeme použít kombinaci různých typů magnetů. V praxi se ale používají v podstatě tři základní typy levitace, jejichž principy jsou uvedeny níže. [1]

1.2.1 Levitace pomocí elektrodynamického principu (Electrodynamic suspension - EDS)

Princip této levitace je odvozen od dvou významných fyzikálních zákonů formulovaných dvěma významnými osobnostmi.

Zákon elektromagnetické indukce

Zákon elektromagnetické indukce byl formulován v roce 1831 americkým fyzikem Michaelem Faradayem. Znění tohoto zákona je: „Změní-li se magnetický indukční tok uzavřeným vodičem za dobu Δt o $\Delta\Phi$, indukuje se ve vodiči elektromotorické napětí, jehož střední hodnota je“ [3]:

$$U_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Budeme-li tedy mít uzavřený elektrický obvod (uzavřenou jednoduchou smyčku), a vystavíme ho působení magnetického pole o proměnlivé intenzitě, indukuje se nám v daném uzavřeném obvodu napětí. Díky tomu dojde ke vzniku indukovaných elektrických proudů, které budou elektrickým vodičem protékat. Tyto proudy se odborně nazývají jako proudy vířivé. [4]

Proměnlivého magnetického pole lze dosáhnout několika způsoby. Při stacionárním zdroji magnetického pole, jaké emituje permanentní magnet nebo cívka (elektromagnet), která je připojena na stejnosměrný zdroj napětí (popřípadě proudu), dosáhneme indukce napětí tím, že mechanicky pohybujeme buď zdrojem magnetického pole a nebo uzavřeným elektronickým obvodem. Dochází zde ke změně mechanické rychlosti v čase a tak i ke změně magnetického toku v čase. Díky tomu dojde ke vzniku indukovaného napětí v uzavřeném obvodu. [4]

Druhý způsob je ten, že budeme mít nestacionární zdroj magnetického pole. Toho lze dosáhnout pomocí elektromagnetu, který je připojen ke střídavému zdroji napětí. Tím dochází ke stálé změně proudu v čase a z toho vyplývající stálá změna magnetického toku v čase. Nejčastěji v našich podmínkách je to průběh $\sin(\omega t)$. [5] [6]

Lenzův zákon

Lenzův zákon formulován v roce 1834 německým fyzikem Heinrichem Friedrichem Lenzem má následující znění: „*Indukovaný elektrický proud v uzavřeném obvodu má takový směr, že svým magnetickým polem působí proti změně magnetického indukčního toku, která je jeho příčinou.* [7]”

Znění tohoto zákona má v našem případě velký význam. Vyplývá z něj, že proud, který byl vytvořen indukovaným napětím, vytvoří vlastní magnetické pole. Díky tomu se v případě jeho dostatečné intenzity bude uzavřený elektrický obvod (smyčka) odpuzovat od zdroje magnetického pole. Toho docílíme velkým vířivým proudem ve smyčce, a z toho vyplývá i potřeba velkého indukovaného napětí. Toho, jak můžeme vidět ze vztahu pro indukované napětí podle Faradayova zákona (1.2), lze znovu dosáhnout dvěma způsoby. [6]

První způsob je ten, že přivedeme dostatečně velký proud do závitů cívky. Tento způsob je ale velmi nevýhodný, protože by bylo zapotřebí zdroje pro generování dostatečně velkého proudu, a i poté by bylo velmi pravděpodobně dosaženo minimální levitace. [5] [6]

Další způsob je ten, že dojde ke změně proudu ve velmi malém časovém úseku. V takovém případě i velmi malá změna proudu způsobí indukci velkého napětí. K dosažení toho by byl připojen elektromagnet k vysokofrekvenčnímu zdroji proudu (popřípadě napětí). [5] [6]

Pro správnou funkci je také důležité, aby pro vodiče vytvářející magnetické odpuzovací síly, byly použity dobře vodivé, ale diamagnetické nebo paramagnetické materiály. V případě použití vodičů z feromagnetických materiálů dojde naopak k přitahování vodičů k elektromagnetu a to i přesto, že je zde současně přítomna odpuzující síla vytvořena vířivými proudy. [5] [6]

Skin efekt

V praxi se pro větší efektivitu této metody levitace (i levitace následující) používají v praxi vysokofrekvenční lanka (vf lanka). To znamená že místo pevného vodiče je použito souboru malých vodičů zamotaných do sebe. [5] [6]

Důvod použití vf lanek je kvůli tzv. Skin efektu. Tento efekt způsobuje, že při stále větší frekvenci proudu vodičem protékající, je tento proud vytlačován od středu vodiče k jeho povrchu. To má za následek, že je plocha uvnitř vodiče nevyužívaná a kvůli tomu se zvětší energetické ztráty na vodiči (větší impedance vodiče). [5] [6]

Při nízkých frekvencích budou mít lanka větší impedanci, neboť zcela nevyplní plochu jako pevný vodič. Při vyšších frekvencích se u nich ale Skin efekt neuplatní v takové míře jako u pevného vodiče. To má za následek větší využití celkové plochy vodiče, takže i menší energetické ztráty. [5] [6]

1.2.2 Levitace pomocí elektromagnetického principu (Electromagnetic suspension - EMS)

Princip využití této levitace spočívá v použití permanentních magnetů a elektromagnetů zároveň. Z Earnshawova pravidla vyplývá, že pokud na sebe působí permanentní magnety svou neměnou silou magnetického pole, tak se zvětšující se vzdáleností přitažlivá síla klesá a naopak, když se magnety přibližují, tak síla roste. Takový systém je nestabilní, neboť je zapotřebí pro stabilitu systému přesně pravý opak. Když se tedy permanentní magnet nepatrně odchýlí od stabilní polohy, je zapotřebí nepatrně větší síly magnetického pole k navrácení předmětu zpět. Z tohoto důvodu je zapotřebí přidat k permanentním magnetům i, střídavým zdrojem napájené, elektromagnety. Ty nám budou zajišťovat převážně potřebnou stabilitu systému, zatím co permanentní magnety nám zajistí potřebné zdvihací síly. [1]

Elektromagnety nám mohou generovat dva druhy magnetických sil podle přitažlivosti. Buď nám budou levitující předmět, pomocí principu vířivých proudů popsaném výše, mírně odpuzovat, a nebo naopak přitahovat. Metoda přitahu má sama o sobě určitou boční stabilitu, a proto se i více využívá. [1]

Ať už ale použijeme jakoukoliv metodu magnetické přitažlivosti, tak potřebujeme elektromagnety spínat tak, aby nám levitovaný předmět svými silami příliš nepřitáhly a nebo naopak neodpudily. To znamená, že síla magnetická (F_m) by měla být rovna síle gravitační (F_g). Aby toho bylo dosaženo, musí být systém realizován se zpětnovazební smyčkou. Ta zajistí díky snímání polohy předmětu (snímání vzduchové mezery δ) konstantní magnetickou sílu. To je zajištěno obvody, které zařídí spínání jednotlivých elektromagnetů podle toho, v jaké poloze se v daný okamžik nachází levitovaný předmět. Tyto obvody zareagují na proměnný elektrický signál, který dají právě snímače polohy, pro které nejčastěji používáme Hallovy nebo optické snímače. [1]

Tím, že je do obvodu zavedena zpětnovazební smyčka, je tedy vlastně vytvořen servomechanismus. Automatické zařízení, které používá negativní zpětnou vazbu pro zjištění chyb a jejich následné odstranění pro správnou funkčnost celého systému. [1]

1.2.3 Magnetická levitace pomocí diamagnetických, supravodivých materiálů

Diamagnetismus a diamagnetické materiály, levitace pomocí diamagnetických materiálů

Diamagnetismus je vlastnost, kterou má každý materiál na světě. Tento jev se projevuje tím, že pokud je vložen diamagnetický materiál do prostředí, kde působí magnetické pole, tak ve vlastní struktuře (natáčením dipólů materiálu) vytvoří magnetické pole, které působí proti vnějšímu magnetickému poli. Tím dojde k odpuzování materiálu od zdroje vnějšího magnetického pole. Tato vlastnost se ale neprojeví bez přítomnosti magnetického pole, a i poté se nemusí projevit, pokud pole není dostatečně velké. U většiny diamagnetických materiálů je jev odpuzování velmi slabý. [2]

Diamagnetickými materiály jsou vlastně i feromagnetické a paramagnetické materiály. U nich je ale tento jev slabý a je zakryt výraznějším jevem, ať už feromagnetickým, nebo paramagnetickým. [2] [8]

Na diamagnetické materiály se Earnshawovo pravidlo nevztahuje. To znamená, že tyto materiály dokážou být inherentně stabilní při magnetické levitaci. Bohužel k vlastní levitaci potřebují extrémně silné pole vzhledem k jejich malým rozměrům. Typicky se hodnota magnetické indukce pole pohybuje okolo hodnoty 16 Tesla. To lze odvodit ze vztahu uvedeného níže. [2] [8] [9]

Vzorec minimálního kritéria pro diamagnetickou levitaci je (ρ je hustota materiálu, g je gravitační zrychlení, χ je magnetická susceptibilita a μ_0 je absolutní permeabilita):

$$B \cdot \frac{dB}{dz} = \mu_0 \cdot \rho \cdot \frac{g}{\chi} \quad (1.3)$$

Za předpokladu ideálních magnetických podmínek solenoidu podél svislé osy z bude levitovat voda při $B \cdot \frac{dB}{dz} \approx 1400 T^2 \cdot m$ a grafit při $B \cdot \frac{dB}{dz} \approx 375 T^2 \cdot m$. Z tohoto důvodu nelze v praxi tyto materiály použít k magnetické levitaci.

Existují ale materiály, které za určitých podmínek vykazují silné diamagnetické vlastnosti a těmito materiály jsou tzv. supravodiče. [2] [8] [9]

Supravodivost a dělení supravodičů

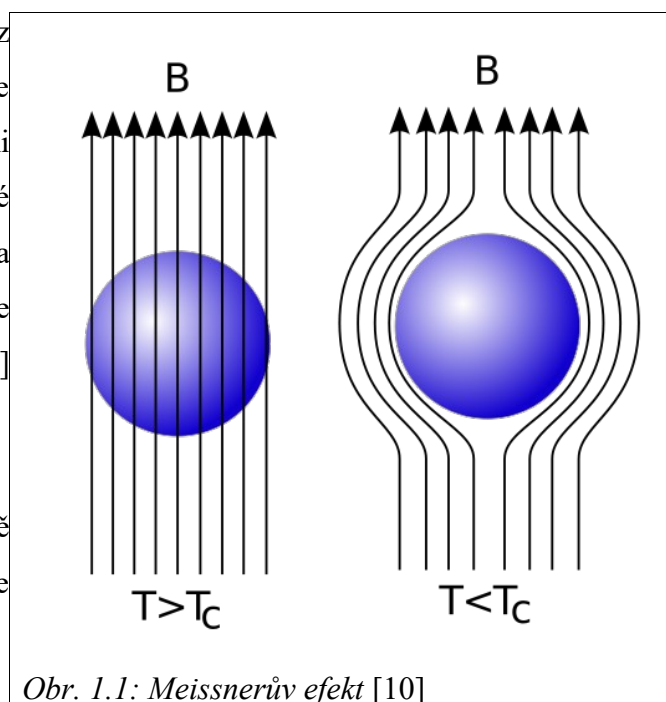
Supravodivost je vlastnost určitých materiálů, kdy jejich rezistivita poklesne při teplotě blížící se absolutní nule (0 K) na neměřitelně nízkou hodnotu. [8] [9]

Supravodivý jev se tedy projeví při vložení určitého elektricky vodivého materiálu do extrémně chladného prostředí (například tekutého hélia) a tím ho tak ochladíme až pod jeho tzv. kritickou teplotu. Pokud takto ochlazený materiál připojíme ke zdroji elektrického proudu, nebude klást žádný zaznamatelný elektrický odpor a díky tomu na něm nevznikají žádné Jouleovy ztráty. Tento jev byl objeven v roce 1911 Heikem Kamerlinghem Onnesem. [8] [9]

Supravodivost také charakterizujeme Meissnerovým efektem. Tento efekt objeven v roce 1933 Waltherem Meissnerem a Robertem Ochsenfeldem by ideálně měl způsobovat, že magnetické pole je ze supravodiče zcela odpuzováno. To znamená, že se supravodič chová

jako dokonalé diamagnetikum viz obr. 1.1. V reálném případě ale magnetické pole do supravodiče velmi slabě proniká a to do hloubky nazývané jako “London penetration depth” a označovanou jako λ . Její hodnota se pohybuje přibližně mezi 50 a 500 nm. [8] [9]

Samotné supravodiče dělíme ještě na dva základní typy, a to na supravodiče I. a II. typu.



Obr. 1.1: Meissnerův efekt [10]

Supravodiče I. typu jsou čisté kovy jako například olovo, rtuť, cín atd. Tyto materiály, nazývané někdy také jako měkké supravodiče, ztrácejí při velmi silném magnetickém poli svou supravodivost (přestanou ji vykazovat). Pro tyto materiály platí všechny výše uvedené vlastnosti včetně Meissnerova efektu při jakékoliv velikosti magnetického pole (samozřejmě kromě polí, kdy už ztrácí supravodivé vlastnosti). [8] [9]

Supravodiče II. typu jsou nejrůznější slitiny kovů (např. Nb₃Sn, Nb₃Al) i kompozitních materiálů obsahující měď a nekovové složky. Tyto materiály vykazují jev supravodivosti i při intenzitě magnetických polí deseti až stonásobně vyšších než supravodiče I. typu. Také pro ně platí výše uvedené vlastnosti kromě Meissnerova efektu. Tyto vodiče pro magnetická pole o malé intenzitě tento efekt vykazují, ale pro silnější magnetická pole tento efekt již neplatí. To znamená, že tyto materiály nejsou dokonalými diamagnetiky. [8] [9]

Levitace pomocí supravodivých materiálů

Levitace pomocí supravodičů je vlastně speciálním druhem levitace pomocí vířivých proudů. Proud protékající supravodičem vytváří velmi silné magnetické pole, které se odpuzuje od pole vytvořeného permanentními magnety, popřípadě vodiče zavinutého do uzavřené smyčky a připojeného na zdroj o proměnné hodnotě proudu. [1] [8]

Tento druh levitace je ale principiálně o dost odlišný. Ke generaci velkého magnetického pole není potřeba generovat tak vysoké frekvence jako v případě EDS, neboť je zde proud mnohonásobně větší. Dochází zde také, na rozdíl od obyčejných vodičů, k uplatnění Meissnerova efektu. Navíc potřebujeme pro tyto materiály mít speciální podmínky, aby se chovaly jako supravodiče (chlazení tekutým héliem nebo dusíkem). [1] [8]

Pro magnetickou levitaci je obvykle použit materiál spadající do kategorie supravodičů I. druhu. Je to kvůli jeho schopnosti zachovat si dokonalé diamagnetické vlastnosti při téměř jakékoliv intenzitě magnetického pole. [1] [8] [9]

2 Využití magnetické levitace v praxi

Využití magnetické levitace je v dnešní praxi široké. Každý z uvedených způsobů magnetické levitace má svá pro i proti co se týče použití v různých aplikacích.

Zde je práce zaměřena na využití magnetické levitace fungující zejména na principu EDS. Ta má totiž v praktické realizaci širší oblast využití, než magnetická levitace realizovaná principem EMS.

Uvedeme zde několik nejdůležitějších systémů, které byly realizovány pomocí obou principů, základní funkce, jejich nevýhody, pokusy o jejich zlepšení, a kde jsou tyto systémy použity v praxi.

2.1 Bezkontaktní tavení kovů

Bezkontaktní tavení kovů je realizováno principem EDS. První realizace proběhla již v 50. letech minulého století. Cívkou byla kovová trubka, stočena do tvaru kužele s plochým vrcholem. Trubka dovozovala cirkulaci chladicí kapaliny a byla zároveň protékána elektrickým proudem o frekvenci několika desítek kHz. V uvedeném systému bylo taveno jen malé množství kovu. [11]

2.1.1 Princip základní funkce a příklad praktické realizace

Princip bezkontaktního tavení je jednoduchý. Materiál, který chceme tavit, umístíme dovnitř cívky bez magnetického jádra. Do cívky poté přivedeme proud o vysoké frekvenci. V tavicím materiálu se začne indukovat napětí a tím dojde i k vytvoření vířivých proudů, které se uzavírají v celém objemu materiálu. Díky vysoké frekvenci na cívce jsou i tyto proudy velké a dojde k postupnému zahřívání materiálu. Postupně tak dojde vlivem vířivých proudů k jeho tavení. Zároveň s tím dojde i k magnetickému zdvihu materiálu do středu cívky. To je způsobeno



Obr. 2.1: Konstrukce studeného kelímku [12]
magnetickými siločarami, které materiál vtáhnou do takového místa v cívce, aby intenzita celkového magnetického pole byla co největší. [11] [12]

Bezkontaktní tavení se dnes realizuje například jako konstrukce studeného kelímku, která byla vynalezena francouzským doktorem Rolandem Erstem (viz obr. 2.1). Tato konstrukce sestává z křemenného válce, působícího jako komora s řízenou atmosférou, který je obalen cívkou o čtyřech závitech vyrobených z malých měděných trubic. Uvnitř křemenného izolátoru je několik rovnoměrně rozmístěných vodivých profilů vyrobených z mědi, mezi nimiž je velmi malá mezera (přibližně půl milimetru). Každý profil působí jako zkratovaná sekundární strana, jehož primární stranou je cívka. Tak se magnetické pole vytvářené cívkou přenáší uvnitř sekci, které tvoří studený kelímek. [12]

2.1.2 Nevýhody bezkontaktního tavení, nové inovace

Hlavní nevýhoda tohoto systému vyplývá z již výše uvedeného principu. Tou je ta, že tavený materiál (kov nebo slitina) musí být elektricky vodivý, jinak k žádnému tavení nedochází.

Další nevýhoda spočívá v množství taveného materiálu. V současnosti lze v praxi zatím dosáhnout jen konstrukce zařízení pro relativně malé množství taveného materiálu (maximálně 50 – 100 g). Nicméně je možné, že se to brzy změní a to díky projektu na kterém pracují Matthew J.M. Krane, R. Mark Ward, Stuart Rudoler, Andrew J. Elliott, a Ashish Pate (více zde [13]). V uvedeném projektu jsou místo jedné cívky použity dvě, které spolu tvoří vzájemně ortogonální magnetické pole. Díky tomu by měl být systém schopen tavit i materiály o hmotnosti až 500 g (experiment byl zatím proveden na tavení hliníkových vzorků). [13]

2.1.3 Praktické použití

Tento princip tavení se výhodně využívá pro tavení kovů, které mají vysokou teplotu tání a u nichž vyžadujeme vysokou technickou čistotu (např. titan). Proto je tato metoda tavení používána na kovy, které jsou poté používány jak v oblasti elektroniky a leteckého průmyslu, tak i v odvětví pro výrobu šperků. [12]

2.2 Magnetická ložiska

Vývoj magnetických (bezkontaktních) ložisek jako takový začal už v polovině 20. století. Síly magnetického pole zde zajišťují stabilní polohu pevné a rotující části ložiska. Díky tomu, že zde nedochází k fyzickému kontaktu, tak mají tato ložiska oproti valivým a kluzným ložiskům spoustu výhod. Mají dlouhou životnost, jsou schopna pracovat v extrémních podmínkách (při rychlostech přes 100 000 ot/min a teplotách v rozmezí – 250 až 500 °C) a jsou nehlukná. Výhody ale vyvažují dvě nevýhody a to jejich menší měrná nosnost a dynamická tuhost oproti ložiskům mechanickým. [14]

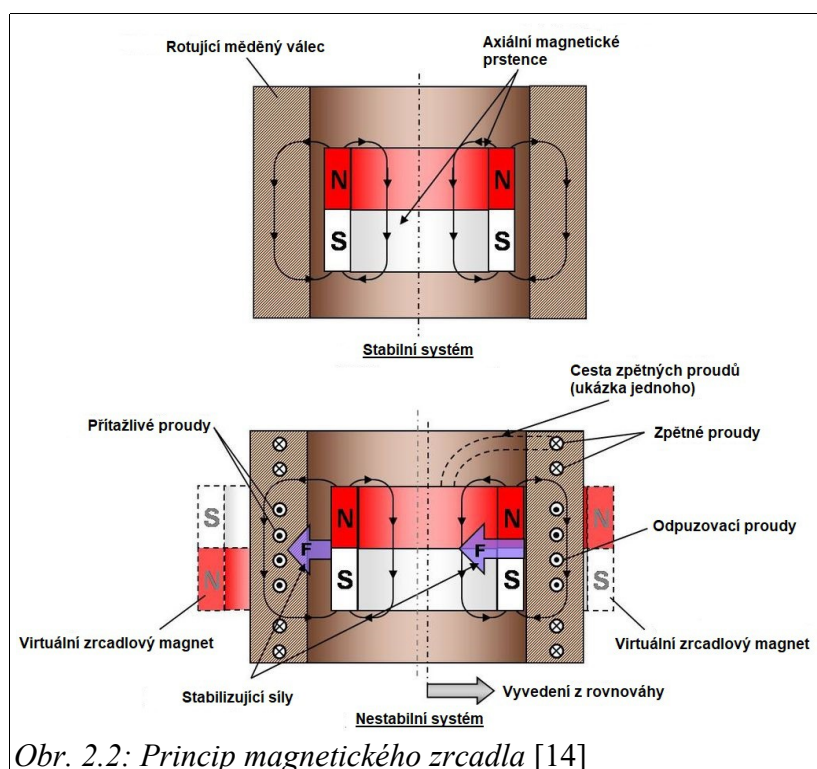
Magnetická ložiska dělíme kromě tradičního rozdělení (radiální a axiální) také podle toho, zda potřebují pro svou funkci dodávat elektrickou energii a to na pasivní a aktivní. Pasivním ložiskům magnetické pole zajišťuje většinou sada permanentních magnetů. Existují ale také speciální druhy magnetických ložisek, které fungují na principu EDS, která se nazývají ložiska elektrodynamická (electrodynamic bearing – EDB). Aktivní magnetická ložiska (active magnetic bearing – AMB) pracují většinou pomocí sestavy elektromagnetů a zpětnovazební smyčky (princip EMS). [14]

2.2.1 Základní princip funkce AMB

Aktivní ložiska na principu EMS používají permanentní magnety (umístěny na rotoru), které zajišťují magnetický zdvih rotoru a různě spínané elektromagnety zajišťují jeho stabilní polohu. Pro potřebný magnetický zdvih rotoru je zapotřebí rotor z permanentních magnetů také i pro EDB. [15]

2.2.2 Základní princip funkce EDB, typy ložisek

Princip EDB je celkem jednoduchý. Při průtoku elektrického proudu rotorem a jeho mechanickém pohybu, dojde k indukci napětí a následně průtoku elektrického proudu na vinutých drátech. Tím se vytvoří potřebné magnetické pole pro magnetickou levitaci rotoru. Pokud se rotor na malý okamžik vychýlí ze stabilní polohy, dojde na jedné straně k větší indukci proudu a vzniku většího magnetického pole, který vrátí rotor do stabilní polohy (elektrické vodiče tedy fungují jako tzv. magnetické zrcadlo, viz obr. 2.2). [14] [15]



EDB (stejně jako i AMB) existují ve dvou základních provedeních:

Radiální magnetické ložisko - tato ložiska fungují na výše již popsaných principech. K realizaci jsou použity permanentní magnety a obyčejné odporové vodiče, které zajišťují stabilitu. Problémem s těmito ložisky byly ztráty způsobené zejména vířivými proudy, ty se ale již v praktickém provozu podařilo omezit na malé hodnoty. To se podařilo hlavně díky dizertační práci doktora Torbjörna Lembkeho [16], kterou publikoval na KTH, ve Stockholmu na Royal Institute of Technology v roce 2005. [14]

Lineární magnetické ložisko - tyto dynamická ložiska fungují na principu inductrack, který využívá halbachových polí a smyček z litzových vodičů. Princip inductracku je popsán podrobněji v pozdější kapitole. [14]

2.2.3 Nové inovace

U EDB se již pracuje na dalším zlepšení. Analyzují se modely na provedení null-flux (provedení s nulovým tokem) EDB. To v podstatě znamená, že by došlo k indukci elektrického proudu ve vodičích, jen pokud by se rotor vychýlil ze své stabilní polohy. Na uvedení tohoto systému do praxe je ale ještě daleko, neboť jeho realizace je složitá (viz [17]).

2.2.4 Výhody a nevýhody AMB, EDB a jejich praktické použití

Výhody AMB spočívají oproti obecně pasivním zejména ve stabilitě systému, neboť pasivní magnetické ložisko axiální nemůže být radiálně stabilní a naopak, pokud to nezajistíme dodatečnou konstrukcí (např. opěrná mechanická ložiska). Tato ložiska mají ale také řadu nevýhod. Musí mít zajištěnou dodávku elektrické energie během provozu, takže jsou méně spolehlivá. Také mají díky tomu vyšší spotřebu a jsou složitější na realizaci. [15]

EDB, která jsou speciálním případem pasivních ložisek, se dají použít tam, kde se dají použít i AMB fungující na principu EMS s tím rozdílem, že mají několik zásadních výhod. Vzhledem k tomu, že EDB nepotřebují řízené napájené elektromagnety, tak jsou levnější, mají jednodušší realizaci zapojení a nemají tak velké ztráty. [15]

Magnetická ložiska obecně se běžně používají ve watt-hodinových elektroměrech pro měření spotřeby energie v domácnosti a také nástrojích, kde vyžadujeme velkou přesnost. Navíc magnetická ložiska mohou lépe fungovat ve vakuu a podporovat tak zařízení lépe než obyčejná ložiska. Příkladem může být použití v systémech na ukládání energie ze setrvačnicku. Obyčejná ložiska zde rychle selhávají kvůli špatnému mazání. [15] [18]

Dále se magnetická ložiska používají v dopravě. Konkrétně u vlaků typu maglev, aby se dosáhlo nízkého šumu a hladké jízdy tím, že se odstraní fyzické kontaktní plochy. [14] [18]

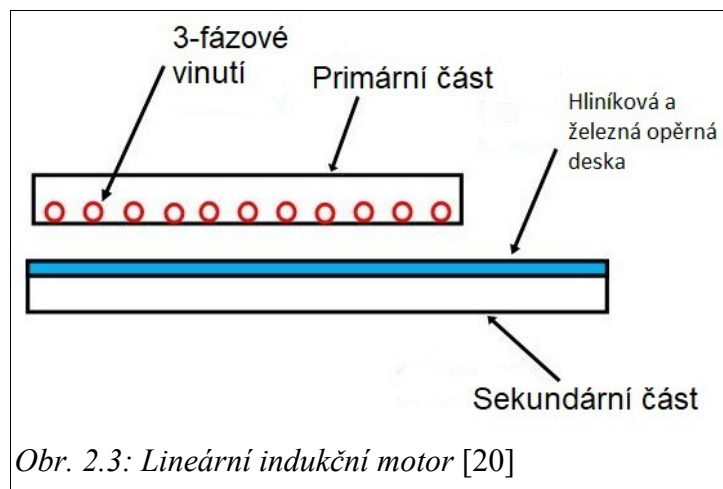
Používají se také ještě například v turbokompresorech, vakuových čerpadlech, gyroskopech atd. Velké využití mají také ve zdravotnictví u výroby pomocných srdečních komor (např. LifeFlow). [14] [15] [18]

2.3 Lineární asynchronní motory, využití magnetické levitace v dopravních systémech

Lineární asynchronní motory (Linear induction motor - LIM) jsou motory, napájené střídavým proudem, které pracují podle stejných obecných zásad jako asynchronní (induction) motory (AM). Narozdíl od nich jsou ale tyto motory navrženy tak, aby produkovaly moment v přímém směru, a proto mají charakteristicky tyto motory konečnou primární a sekundární délku. Díky tomu, na rozdíl od konvenčních AM, dochází ke vzniku koncových efektů, o kterých se detailně zmíníme. [19]

2.3.1 Princip a konstrukce LIM

LIM mají obvykle primární (statorovou) část složenou z plochého, laminovaného magnetického jádra s příčnými drážkami (často rovného řezu) s primárním třífázovým vinutím uloženým v nich. Každé vinutí nám nejen dává střídavé napětí o různé fázi, ale také se jejich vinutí fyzicky překrývají. Sekundární ("rotorová") část motoru často tvoří hliníková deska s železnou opěrnou deskou (viz obr. 2.3). V některých případech jsou vytvořeny LIM oboustranné, nebo-li primární částí umístěnou na každé straně sekundární části. V tom případě není zapotřebí opěrné železné desky. [19] [21]



Podle konstrukce obvykle existují dva typy lineárních motorů:

1. *Kratší primární část* – kde je primár kratší než sekundár tvořen vodivou deskou. [21]
2. *Kratší sekundární část* – kde je vodivá deska menší než primár tvořen vinutím umístěným v laminovaných drážkách. [21]

Krátké sekundární LIM mají nejčastěji vytvořené paralelní spojení mezi cívkami stejné fáze. Krátké primární mají obvykle cívky spojeny do série. [19] [21]

Princip LIM je v zásadě celkem jednoduchý. Jedná se vlastně jen o otevřený AM, který vlivem střídavého třífázového proudu přivedeného do statorových vinutí, způsobí indukci napětí v sekundární části. Ta se vlivem vytvořených vířivých proudů a vzniku vlastního magnetického pole, začne odpuzovat od části statorové. [19] [21]

Statorové otáčky magnetického pole jsou stejné jako u AM, dány vzorcem [21]:

$$n_s = 2 \cdot \frac{f_s}{P} \quad (2.1)$$

Přímočará pohybová rychlost takového pole je poté [21]:

$$v_s = 2 \cdot t \cdot f_s \quad (2.2)$$

Rychlost sekundární části motoru je poté jako u AM daná vztahem [21]:

$$v_r = (1 - s) \cdot v_s \quad (2.3)$$

2.3.2 Nevýhody LIM a nové inovace

Nevýhodou LIM jsou již zmíněné koncové efekty, které se obecně rozdělují na dva druhy. Ty se nazývají statické a dynamické koncové efekty

Statické koncové efekty - jsou způsobeny otevřenou (konečnou) strukturou magnetického obvodu statoru. Asymetrické umístění jednotlivých vinutí způsobuje asymetrii ve fázi indukce a proto se v proudu vinutí objevují i negativní sekvenční komponenty. To nastává i přesto, že napájení je symetrické. [22]

Dynamické koncové efekty - vznikají při relativním pohybu statorové a rotorové části vůči sobě. Obecně můžeme konstatovat, že čím větší je lineární rychlost rotoru, tím větší je pozorovatelný efekt. Lze ho zpozorovat tím, že se nám při stále větší rychlosti také stále zvětšuje vzduchová mezera mezi oběma částmi motoru a to způsobuje větší rozptyl magnetického pole (toku) do okolí. Obecně může být zpozorováno pomocí tzv. koncového faktoru Q [22], že dynamické efekty rostou s lineární rychlostí motoru (rostoucí tloušťkou vzduchové mezery) a klesají s délkou statorového vinutí. [22]

Při počítání celkových ztrát stroje se také objevuje dodatečný odpor. To znamená, že ve stroji vznikají i dodatečné, nežádoucí Jouleovy ztráty. Tento odpor je navíc proměnný a závislý na faktoru Q . [22]

Nové inovace

Kvůli výše uvedeným efektům se u LIM hledají nové způsoby na jejich vytvoření, díky kterým by se tak efekty neprojevovaly. Takovým návrhem se zabývají v této práci [22]. Zde je navržena tzv. minimalizační technika elektrických ztrát (electrical loss minimization technique – ELMT). ELMT je navržena pro polohově (vektorově) řízené LIM. Podle dosavadních výsledků dokáže tato technika redukovat Jouleovy ztráty až 22 % při malých

rychlostech a dává nám větší schopnost řídit LIM při vysoké rychlosti až o 24 %. [22]

2.3.3 Praktické použití LIM

Největší využití LIM je v současné době v dopravních systémech, často jako pohony pro systémy maglev (**m**agnetic **l**evitation), jejichž princip funkce popíšeme později. Za zmínku zde ale stojí první komerční nízkorychlostní maglev, postaven v Anglii poblíž města Birmingham. Tato vytvořená železniční linka, kterou můžeme vidět na obr. 2.4, byla uvedena do provozu již v roce 1984, měla 600 m a vlak nad ní levitoval ve výšce 15 mm. Tento vlak byl poháněn právě vůbec prvně vytvořeným LIM. Zde se také v průběhu let tyto motory staly nejčastěji využívanými. [20] [21] [24]

Použití LIM je nezávislé na maglevu a proto je můžeme najít i třeba v některých metrech (nejdelší známé metro používající LIM se nachází ve Vancouveru a je 60 km dlouhé) a nebo i v horských drahách. [20] [21] [25]



Obr. 2.4: První nízkorychlostní maglev postaven v Birminghamu v Anglii [23]

Mimo dopravní prostředky se LIM používají jako zdvihací mechanismy v hlubinných dolech nebo u posuvných dveří nízkopodlažních tramvají (například Eurotram). Jejich použití je ale čím dál častější v systémech na řízení pohybu. Například se tak používá dvouosý lineární motor, což je speciální zařízení k přímému dvourozměrnému řízení, ať už pohybu laserových řezáků tkaniny (popřípadě plechu) a nebo pro automatické tažení a tvarování kabelů. [26]

Poslední využití lineárních motorů, o kterých se zmíníme je jejich použití pro spuštění letadel. První takový systém (systém Westinghouse Electropult) byl použit už v roce 1945. V současnosti se pracuje na systému EMALS (Electromagnetic Aircraft Launch System), u kterého jsou ale ještě stále ještě menší problémy s realizací. [27]

2.4 Maglev systémy

Maglev jsou systémy železniční dopravy, které používají dvě sady magnetických systémů (magnetů). Jednu sadu pro levitaci vlaku nad tratí a druhou pro její posun podél ní. Magnetické systémy fungují na námi výše uvedených principech (EMS a EDS). [28] [29]

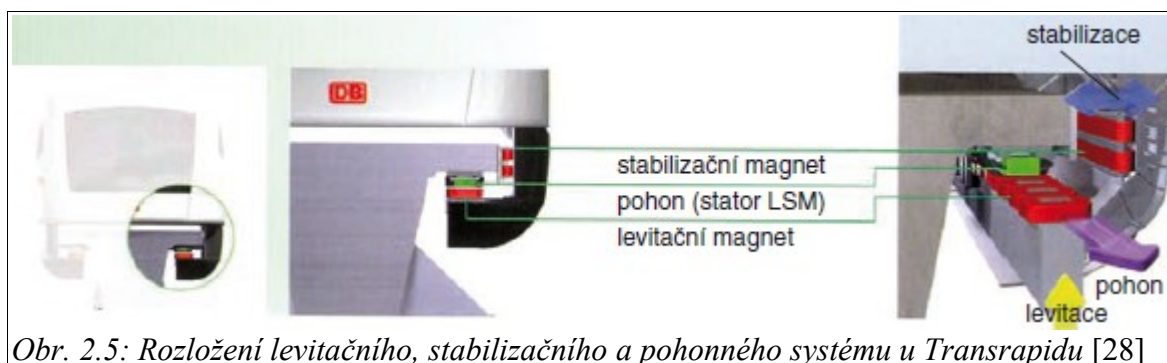
2.4.1 Princip maglevu EMS

Princip této levitace je víceméně již popsán v obecné problematice. Pomocí snímačů polohy snímáme vzduchovou mezeru mezi tratí a vozidlem. Pomocí řízeného spínání elektromagnetů zajistíme, aby vzduchová mezera byla konstantní, a aby vozidlo stabilně levitovalo (ideálně, v praxi ale dochází k menším odchylkám). [28]

Praktická realizace EMS

Jak je tato levitace realizována lze vidět u systému Transrapid. Ten byl poprvé vyvinut a prakticky realizován německým inženýrem Hermannem Kemperem v roce 1935 (210 kg funkční model). [28]

Trat' je pokryta paketama plechů, na kterých jsou zespodu připevněny vodiče napájené třífázovou sítí. Vozidlo samotné má na sobě připevněné elektromagnety, které se spínají a přitahují k vodičům uloženým v trati, jak můžeme vidět na obr. 2.5, kde je mimo jiné ještě vidět také postranní stabilizaci systému (kvůli průjezdu vozidla zatáčkama nebo bočnímu větru). Vodiče v samotné trati slouží také jako dlouhé statorové vinutí pro LSM (lineární synchronní motor). Ty fungují podobně jako synchronní motory, ale jsou podobně jako LIM rozvinuty do dráhy. Tyto motory jsou poslední dobou také preferovanější v aplikacích Maglevů. [28]

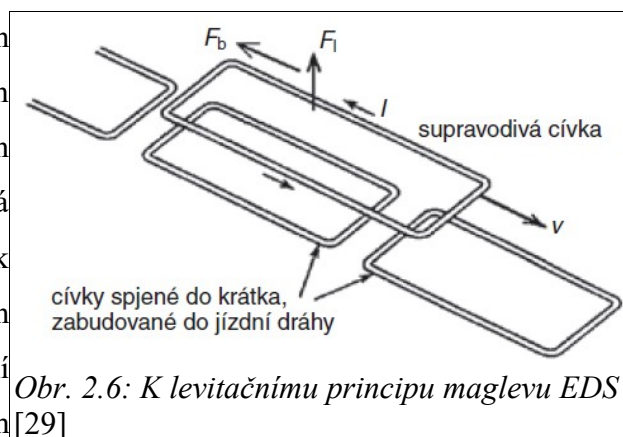


Obr. 2.5: Rozložení levitačního, stabilizačního a pohonného systému u Transrapidu [28]

Vzduchová mezera u systémů Transrapid byla obvykle mezi 10 až 12 mm. Díky rychlému technologickému posunu a větší přesnosti výroby je nyní možná i realizace, kdy levitace nechává vzduchovou mezeru velkou pouze 8 až 9 mm. [28]

2.4.2 Princip maglevu EDS a jeho nevýhoda

Tento systém můžeme vidět zobrazen na obr. 2.6. Nad soustavou obdélníkových cívek spojených do krátka a zabudovaných v trati se pohybuje další cívka, jíž protéká stejnosměrný proud. Při jejím pohybu se tak mění magnetický tok a indukuje v pevných cívkách napětí. Ty vytvoří vlastní magnetické pole, které působí navzájem



Obr. 2.6: K levitačnímu principu maglevu EDS [29]

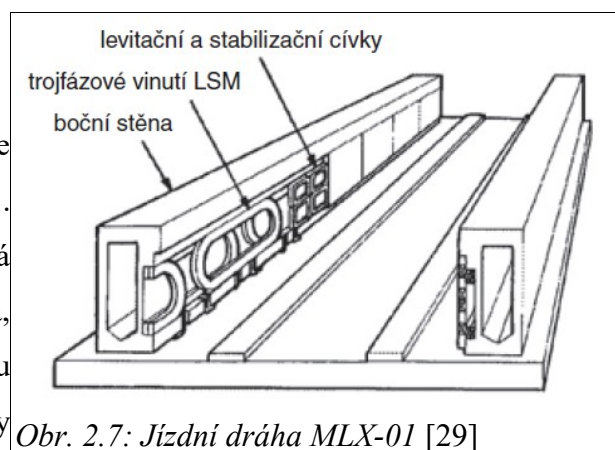
s magnetickým polem pohybující se cívky. Díky tomu působí na pohybující se cívku síla o dvou složkách. Jedna složka cívku odpuzuje od trati, zatím co druhá působí proti směru jejího pohybu. To je problém, neboť tato složka síly musí být překonávána poté pohonem, který cívku pohybuje (obvykle pohon LIM). [29]

Aby daný princip ale fungoval, tak levitační síla musí být dostatečná na levitaci nejen vlaku samotného, ale i pasažérů. K tomu je zapotřebí velmi silné pole pohybující se cívky a z toho plynoucí extrémně vysoký budící proud (řádově až stovky kA). Toho je dosaženo tím, že pohybující se cívka bude vytvořena ze supravodivého materiálu (ten je uložen v kryostatu, aby si zachoval svůj supravodivý stav). Tím pádem dojde i při relativně malé indukci napětí v pohybující se cívkě k protečení značného proudu. [29]

Z výše uvedeného principu je zřejmé, že když se cívka ve vozidle nepohybuje, vzniká nulová odpuzující magnetická síla a pohybuje-li se cívka pomalu, tak síla není dostatečná. Proto má tato metoda největší nevýhodu v tom, že potřebujeme vozidlo opatřit navíc i koly, které používá při rozjezdu a dojezdu. Z toho tedy plyne i mechanické brzdění při malých rychlostech. Zatím probíhají jen teoretická šetření ohledně levitační a brzdící síly potřebné pro úplné odstranění mechanických částí. [29]

Praktická realizace EDS

Pro realizaci systému se podíváme na japonský superexpres MLX-01. Jak můžeme vidět na obr. 2.7, je zde výrazná změna oproti Transrapidu a tou je ta, že levitační cívky (a stator LSM) jsou zabudovány v bočních stěnách kolejí a je tedy

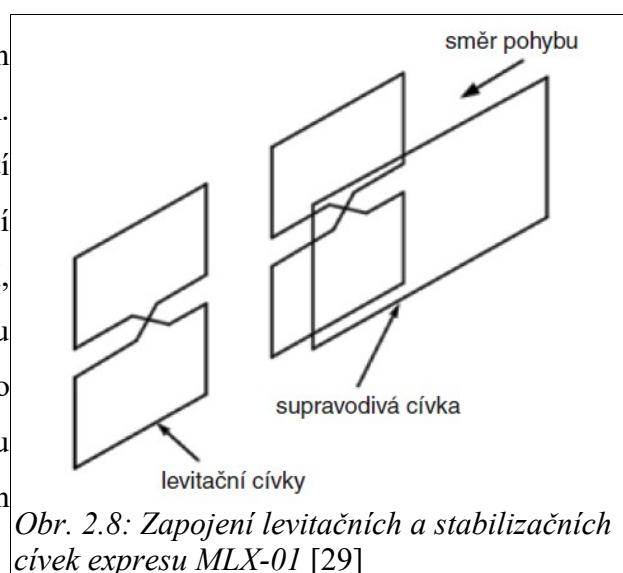


Obr. 2.7: Jízdní dráha MLX-01 [29]

i od prvního pohledu trochu nejasné, jak tato levitace funguje. Pro její vysvětlení je zde uvedena další ilustrace na obr. 2.8. Na ilustraci můžeme spatřit dvě levitační cívky, které jsou zapojeny do krátka a vířivý proud v dolní cívce bude mít opačný smysl (orientaci) oproti proudu v cívce horní. Supravodivé cívky ve vozidle jsou zabudovány v podvozku a vzhledem k levitačním cívkám jsou umístěny nesymetricky, o něco níže pod středem horní a dolní levitační cívky. Při rozjezdu se do dolních cívek indukují vyšší napětí než do horních. Takže díky tomu ve výsledku vzniká při pohybu tohoto vozidla nejen síla odpuzovací (dolní cívka), ale i síla přitahovací (horní cívka). Tyto síly jsou při rychlosti větší 80 km/h již dostatečné k tomu, aby způsobily levitaci vozidla. [29]

2.4.3 Obecné výhody a nevýhody maglevu

Tyto systémy mají spoustu kladných vlastností oproti klasickým železnicím. V dnešní době dosahují velkých rychlostí (nejvyšší zatím dosažená je 603 km/h pomocí EDS). Potřebují minimální údržbu vedení, protože nedochází k žádnému mechanickému opotřebení a nejsou tak ani hlučné jako obyčejné vlaky. Mají ku příkladu i velkou stoupavost, nepotřebujeme tedy pro jejich trasy vybudovávat tolik tunelů. [28] [29]



Obr. 2.8: Zapojení levitačních a stabilizačních cívek expresu MLX-01 [29]

Výše uvedené výhody ale vyvažuje i několik nevýhod. Jednou z největších je jejich cena, neboť tyto systémy nejsou kompatibilní s klasickými železničními kolejemi a potřebují tedy

vystavit svou vlastní trasu se svými vlastními parametry. Pro příklad můžeme uvést demonstrační linku v Šanghaji, Shanghai maglev (Transrapid), která stála 1,2 miliardy dolarů na vybudování (je zde započítáno i například speciální školení obsluhy). Další nevýhodou systémů je jejich složitost, neboť zde je zapotřebí složitých provozních a řídicích systémů a, v případě supravodičů u EDS, i výborné zajištění chladících systémů. Z uvedených důvodů se proto také tyto tratě budují jen několik desítek kilometrů dlouhé (Shanghai maglev je jen 30,5 km dlouhý). [28] [29]

2.4.4 Nové inovace, Halbachova soustava a Inductrack

V současné době se pracuje nejvíce na tom, aby byly tyto systémy ekonomičtější a díky tomu by se také daly stavět i delší tratě. Proto se hledají i jiné způsoby, díky kterým by mohly levitace fungovat. [29]

Supra Trans

Výzkumný ústav v Drážďanech vyvinul funkční model pomalého vozítka, které funguje na principu odpuzování pomocí Meissnerova jevu. V trati u demonstračního modelu byly zabudovány permanentní NdFeB magnety. Na vozítku samotném byly umístěny kvádříky ze supravodiče YBCO chlazené tekutým dusíkem. Pohon zde zajišťuje LIM, se statorem v jízdni dráze. [29]

MagTube

Americká firma LaunchPoint Technologies, Inc. navrhla možný budoucí prostředek dopravy, který by překonal dosavadní systémy Maglevů. Jedná se o superrychlostní expres, který by se pohyboval uvnitř válcového tubusu, ze kterého by byl vyčerpán vzduch. Pro levitaci by bylo použito Halbachovy soustavy permanentních magnetů*. Tato soustava umístěna na podvozku vozidla i na trati by měla zajistit levitaci vozidla přibližně 80 mm nad tratí. [29]

Díky tomu, že by systém měl dosahovat levitace bez dodávaného výkonu, měl by být bezhlučný, levnější a dosahovat větších rychlostí než dosavadní systémy (až 800 km/h).

Zdá se tedy, že projekt může být největším průlomem v oblasti dopravy od dob vynálezu maglevů jako takových. [29]

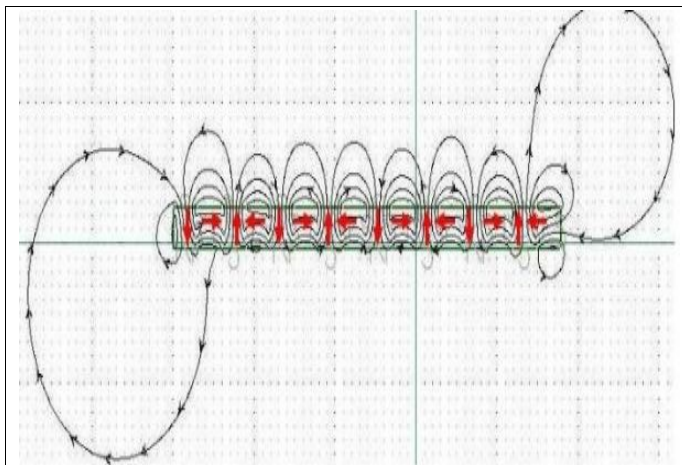
*Halbachova soustava

Tato soustava, uspořádaná z vysoce kvalitních permanentních magnetů, má jednu zvláštní vlastnost. Magnety jsou v ní uspořádány tak, aby jedna (silnější) strana měla velmi silné a podél osy x proměnlivé magnetické pole. Strana druhá má potom magnetické pole velmi



Obr. 2.9: Uspořádání permanentních magnetů v Halbachově soustavě [32]

slabé (uspořádání je vidět na obr. 2.9). Díky tomu se celek téměř chová jen jako jednostranný magnet. Průběh magnetického pole Halbachovy soustavy můžeme vidět na obr. 2.10.



Obr. 2.10: Rozložení magnetického pole u Halbachovy soustavy magnetů [33]

Halbachova soustava samotná se používá ve spoustě aplikací a to od těch průmyslových až po použití pro magnety umístěné v urychlovači částic (wiggler magnety). [30] [31]

Největší použití Halbachovy soustavy je ale pro výrobu Inductrack, což je pasivní, bezporuchový EDS systém, který používá pro magnetickou levitaci vozidel bezmotorové smyčky

drátů v trati a permanentní magnety umístěny na vozidle. Pokud vozidlo uvedeme dostatečnou silou do pohybu, tak díky proměnnému magnetickému poli v Halbachově soustavě, budou vznikat vířivé proudy ve smyčkách v trati a vozidlo se tak začne pohybovat a levitovat. Tento systém má různé druhy Inductracku pro různá použití (např. Inductrack I je pro vysokorychlostní provoz). [30] [31] [34]

Na systému Inductracku se již navrhuje několik tratí maglevu. Především je to kvůli pasivitě systému, ale také tomu, že systém dokáže, na rozdíl od klasického EDS, levitovat vozidlo při menších rychlostech (35 km/h pro testovací model). [30] [31] [34]

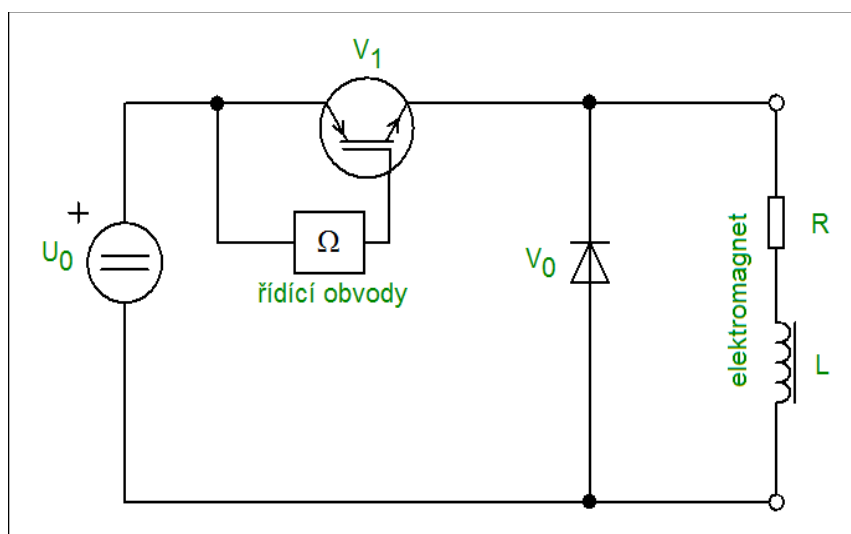
2.4.5 Využití maglev systémů

Německý systém Transrapid byl použit například v městech Hamburku a Šanghaji. Dále byly vystavěny také v zemích Japonska a Severní Koreje a všechny linky jsou dodnes používány. Linka, která byla vystavěna a zrušena, byla například již zmíněná linka v Birminghamu (1984–95). Uzavřeny byly také linky v Emslandu (1984–2012), Vancouveru (1986–88) a Berlíně (1989–91), všechny kvůli zastaralému systému. V současné době jsou zatím plánovány nové realizace linek ve velkém množství v USA, Švýcarsku, Číně atd. [28] [35]

Superexpres fungující na principu EDS se prvně vystavil v roce 1977 u města Mijazaki (ostrov Kjúšú, Japonsko). Byla to zkušební trať o délce 7 km a délce vozidla 29 m. Další zkušební trať byla vybudována v roce 1990 v prefektuře Yamanaši (Japonsko) o délce 42,8 km, která byla v roce 2007 zavřena. První komerční superexpres MLX-01 byl vybudován v roce 1997 a dosáhl rychlosti 552 km/h. Tato trať je stále funkční a dosahuje díky lepším technologiím ještě větších rychlostí (zatím největší dosažena je 603 km/h). V Japonsku již probíhají další výstavby tratí pro superexpresy a další jsou navrhované pro USA a Austrálii. [29] [36] [37]

3 Návrh a konstrukce cívky pro magnetickou levitaci

Tato část práce je zaměřena na praktický návrh a konstrukci cívky, která bude moci být použita pro magnetickou levitaci. Zde zatím je řešen návrh stejnosměrného elektromagnetu, který bude schopen se jen pomocí sil magnetického pole udržet přitažen k magnetickému materiálu a odolávat tak působení gravitační síly. Spočte se tedy, na jakou vzdálenost (vzduchovou mezeru δ) je schopen se elektromagnet přitáhnout (udržet).



Obr. 3.1: Základní zapojení pulsního měniče pro snižování napětí se zátěží RL [38]

Pro levitaci metodou elektromagnetického závěsu poté bude připojen stejnosměrný zdroj přes pulsní měnič pro snižování napětí (viz obr. 3.1) [38]. Díky spínání IGBT tranzistorů poté bude udržována střední hodnota elektrického proudu cívkou taková, jaká bude spočtena pro stejnosměrný elektromagnet. Toho se dosáhne řídicími obvody, řízených pomocí snímače polohy levitovaného objektu (optický snímač polohy nebo snímač Hallův).

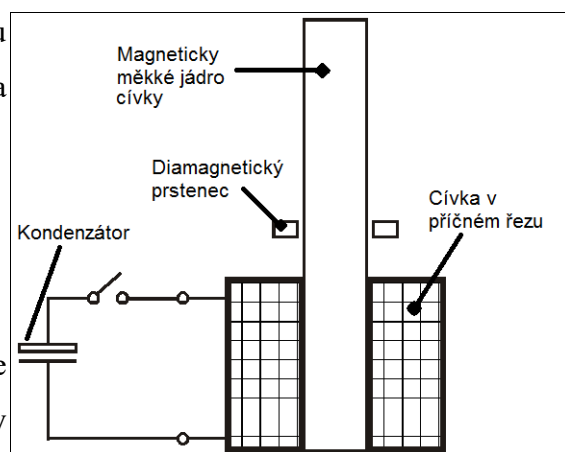
Další možností realizace by bylo možné pomocí principu EDS. Může být systém buď, který by stabilně levitoval (například uzavřenou smyčku měděného vodiče a nebo hliníkovou destičku), a nebo systém fungující na principu pulsní levitace. Pro praktickou realizaci by byl dostupný a zkonstruovatelný jeden z prvních takových systémů, jehož název je Thompson jumping ring. Tento systém sice vznikl jako experiment pana Elihu Thompsona již v roce 1887, ale moderní systémy jsou od tohoto experimentu stále odvozovány. [39]

Princip Thompsonova experimentu byl celkem jednoduchý. Cívka byla namotána na feromagneticky měkkém, dlouhém jádře. Nad ní byl okolo jádra umístěný prstenec diamagnetického, ale dobře elektricky vodivého materiálu. K vyvedeným vodičům cívky je poté připojen již předem nabitý kondenzátor. Připojením tak vznikne uzavřený obvod, ve kterém dochází k přechodovému ději druhého řádu. Díky tomu tak vznikne velká proudová špička, která pomocí cívky (u níž vznikne velké, časově proměnné magnetické pole) indukuje napětí v diamagnetickém prstenci. Ten vlivem vířivých proudů a vznikem opačného

magnetického pole, které působí proti tomu v cívce, vystřelí podél feromagnetického jádra vzhůru. Schéma lze vidět na obr. 3.2. [39]

3.1 Teoretický úvod

Před výpočtem a konstrukcí cívky je potřebné si nejdříve definovat základní vztahy a zákony, které jsou pro výpočet nezbytné.



Obr. 3.2: Thompson jumping ring - základní schéma zapojení [39]

3.1.1 Výpočet hmotnosti přitahovaného (levitovaného) objektu

Před výpočtem cívky podle magnetických vlastností musí být nejdříve spočtena hmotnost tělesa, které bude přitahováno. To je potřebné pro určení magnetické síly potřebné pro překonání síly gravitační. Toho je docíleno pomocí jednoduchého výpočtu objemu tělesa (3.1), pomocí něhož je doložena hmotnost.

$$V = a \cdot b \cdot v \quad (3.1)$$

Pro výpočet hmotnosti je potřebné, v případě složitějšího tvaru magnetického jádra cívky, rozdělit výpočet objemu objektu na více částí. Ty jsou poté sečteny pro konečný výsledek.

Pro výpočet hmotnosti je poté použit klasický výpočet:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.2)$$

Dále se také bude muset vypočítat hmotnost samotného vodiče na objektu. Určí se přes jeho délku a průřez, který se při známém, zvoleném průměru vodiče d_v , spočte jako:

$$S_v = \frac{\pi \cdot d_v^2}{4} \quad (3.3)$$

Objem vodiče bude dopočítán jako:

$$V_v = S_v \cdot l \quad (3.4)$$

Hmotnost zde se získá již podle vzorce (3.2).

Celková hmotnost vodiče je tedy nakonec spočtena jako součet hmotnosti vodiče a jádra elektromagnetu.

$$m = m_E + m_v \quad (3.5)$$

3.1.2 Výpočet magnetického obvodu a výpočet síly

Pro výpočet magnetického obvodu je nejdříve potřeba zavést několik zjednodušení, které výrazně usnadní postup řešení.

Zjednodušení jsou:

1. V průřezu S každé větve magnetického obvodu je magnetická indukce B rozložena rovnoměrně. Magnetický tok Φ je tedy zjednodušen z obecné rovnice výpočtu magnetického toku, který vychází ze IV. Maxwellovy rovnice, podle vztahu (3.6), na tvar (3.7). To platí pouze tehdy, bude-li vektor magnetické indukce B kolmý na plochu S , na kterou působí.

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (3.6)$$

$$\Phi = B \cdot S \quad (3.7)$$

2. Délka větve magnetického obvodu je nahrazena délkou střední siločáry.
3. Jsou zanedbány veškeré rozptylové magnetické toky. Ty jsou největší ve vzduchových mezerách a lze je zanedbat, jen pokud jsou tyto mezery dostatečně malé (řádově jen několik mm). [6] [40]

Pro praktické výpočty magnetického pole navíc nejsou uvažovány žádné okrajové jevy. To znamená, že magnetické pole bude analyzováno jen ve 2D prostoru (osy X a Y). [40]

Pokud by tato zjednodušení nebyla zavedena, nebylo by možné dopočítat správný výsledek bez pomoci nějakého specializovaného programu. Takto je výpočtem získána přibližná představa o magnetickém obvodu za pomoci jen několika základních vztahů, které jsou uvedeny níže. [6] [40]

Je zapotřebí vypočítat magnetickou sílu F_m elektromagnetu. Pro to je možné si zvolit dvě cesty výpočtu přes energii magnetického pole W_m , přičemž pro obě uvedené cesty musí být zvolen počet závitů cívky N a velikost vzduchové mezery δ (v jednotkách milimetrů) [40]:

- 1) Zvolí se hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_δ . Ta bude volena v rozumných mezích vzhledem k možné praktické realizaci (rozsah od 0 T do 1 T).

Vzhledem k zanedbání rozptylového toku bude magnetická indukce v železe stejná jako v δ , tedy $B_\delta = B_{Fe}$. Poté lze i dopočítat magnetickou intenzitu H v mezeře δ i v železe podle vzorce (3.8), u kterého vzhledem ke zjednodušením se nemusí uvažovat veličiny jako vektorové, z toho tedy plyne [5] [6] [40]:

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} \rightarrow H = \frac{B}{\mu} \quad (3.8)$$

Permeabilita μ se spočte jako [6] [40]:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0 \quad (3.9)$$

Relativní permeabilita železa μ_r se může s měnícím se H měnit a to díky postupnému magnetickému sycení materiálu. Pro výpočet je ale v obou případech předpokládáno, že je obvod magneticky lineární, nebo-li $\mu_r = \text{konst.}$ [5] [6] [40]

Po vypočtení magnetické intenzity je zjištěna pomocí 1. Maxwellovy rovnice (3.10) hodnota proudu potřebného pro hodnotu magnetické indukce.

$$\oint_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = I_c \quad (3.10)$$

Cirkulace vektoru intenzity magnetického pole \mathbf{H} je po orientované, uzavřené křivce, rovna celkovému součtovému proudu s touto křivkou spřažený I_c . [5] [40]

Díky zavedeným zjednodušením a vztahu (3.8) je možné přepsat 1. Maxwellovu rovnici na tvar [40]:

$$H \cdot l_{stř} = N \cdot I \quad (3.11)$$

Díku tomu je snadné určit proud, který bude potřeba pro nabuzení cívky tak, aby měla potřebnou intenzitu magnetického pole. Také je zde zaveden další zjednodušující předpoklad a to ten, že relativní permeabilita železa $\mu_r \rightarrow \infty$. Díky tomu zůstává intenzita H jen ve vzduchové mezeře δ a celkovou střední délku siločáry $l_{stř}$ lze nahradit pouze délkou δ , to znamená [40]:

$$I = \frac{H_\delta \cdot \delta}{N} \quad (3.12)$$

Proud I pro potřebné magnetické pole je spočten, teď se musí určit, jakou sílu bude takové magnetické pole mít. To je provedeno pomocí výpočtu energie magnetického pole W_m . Ta je obecně v prostorové oblasti V stacionárního magnetického pole charakterizována vektory \mathbf{H} a \mathbf{B} . Vztah pro W_m je formálně stejný pro elektrostatickou energii a to je [40]:

$$W_m = \int_V w_m dV \quad (3.13)$$

Pro hustotu energie magnetického pole w_m , platí pro lineární prostředí ($\mu = \text{konst.}$) [40]:

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B} = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{\mu} = \frac{1}{2} \cdot \mu \cdot H_\delta^2 \quad (3.14)$$

Po dosazení vztahu (3.14) do vztahu (3.13) za výše uvedených předpokladů se může energie spočítat při změně objemu jen podél osy Y (u které se mění jen δ) jako:

$$W_m = w_m \cdot S \cdot \delta = \frac{1}{2} \cdot \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \cdot S \cdot \delta = \frac{\Phi^2}{4 \cdot \mu_0 \cdot S} \cdot \delta, \quad (3.15)$$

přičemž za S je dosazena celková plocha vzduchové mezery, na kterou bude magnetické pole působit. [40]

Ted' stačí už jen určit magnetickou sílu F_m . Pokud je soustava izolovaná (nemění se v ní Φ), tak lze pro elektromagnet, s konstantním zdrojem proudu a třemi stupni volnosti pohybu, definovat vektor F_m jako [40]:

$$F_m = \text{grad } W_m \Big|_{I=\text{konst.}} \quad (3.16)$$

V případě naší realizace má ale elektromagnet jen jeden stupeň volnosti. Tou je osa Y , podél které se mění jen veličina δ . Z toho tedy plyne [40]:

$$F_m = \frac{dW}{d\delta} \quad (3.17)$$

Po této derivaci se ze vztahu (3.15) stane vztah [40]:

$$F_m = \frac{\Phi^2}{4 \cdot \mu_0 \cdot S} \quad (3.18)$$

Následující metoda pro výpočet energie a síly magnetického pole lze použít jen a pouze za předpokladu, že je obvod magneticky lineární ($\mu = \text{konst.}$). Pokud by se jednalo o magneticky nelineární obvod, musela by síla F_m být dopočtena metodou 1). [6] [40]

2) Jako první je spočtena celková reluktance (magnetický odpor) obvodu. Ta lze dopočítat pomocí následujícího vztahu [5] [40]:

$$R_m = \frac{\int dl}{\mu \cdot S} \quad (3.19)$$

Pokud je délka l integrována po střední větvi $l_{stř}$ obvodu, průřez větve obvodu je konstantní, a hlavně je obvod magneticky lineární, tak se R_m vypočte jako [5] [40]:

$$R_m = \frac{l}{\mu \cdot S} \quad (3.20)$$

Pro jednodušší výpočet celkového R_m bude stejně jako v metodě 1) relativní permeabilita železa $\mu_r \rightarrow \infty$. Díky tomu se může tedy počítat jen reluktance vzduchové mezery δ . [5] [6] [40]

Pro další postup je zapotřebí definovat několik dalších základních vztahů pro výpočet magnetických obvodů, než bude možné dopočítat energii obvodu pro naši aplikaci. Prvním takovým je Hopkinsonův zákon (vztah (3.21)). Je to jeden ze základních vztahů, používaných k řešení magnetických obvodů a vyjadřuje: „*Magnetické napětí U_m na větvi magnetického obvodu je rovno magnetickému toku Φ procházejícímu větvi násobenému magnetickým odporem (čili reluktancí) R_m větve.* [40]“

$$U_m = R_m \cdot \Phi \quad (3.21)$$

Hopkinsonův zákon je vlastně analogický k Ohmovu zákonu v elektrických obvodech. V magnetických se tedy obvodech objevují Kirchhoffovy zákony, které analogicky formulují vztahy pro magnetický tok a magnetické napětí. Zde je pro výpočet potřebný jen 2. Kirchhoffův zákon pro magnetické obvody, který říká, že pro libovolnou smyčku magnetického obvodu platí (po menších úpravách) [5] [40]:

$$\sum_k U_{mk} = \sum_k N_k \cdot I_k \quad (3.22)$$

Obvod bude pro náš případ obsahovat jen jeden zdroj magnetického napětí, a proto lze napsat [5] [40]:

$$U_m = N \cdot I \quad (3.23)$$

Posledním vztahem, který je zapotřebí, je statická definice indukčnosti [5] [6] [40]:

$$L = N \cdot \frac{\Phi}{I} \quad (3.24)$$

Díky Hopkinsonovu zákonu a 2. Kirchhoffovu pro magnetické obvody se poté tato definice může upravit na vztah [6] [40]:

$$L = \frac{N \cdot U_m}{I \cdot R_m} = N \cdot \frac{N \cdot I}{I \cdot R_m} = \frac{N^2}{R_m} \quad (3.25)$$

Poté už se jen vyjádří energie magnetického pole cívky jako [6] [40]:

$$W_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2}{R_m} \cdot I^2 \quad (3.26)$$

Magnetická síla se už dopočte podle vztahu (3.17) uvedeného v metodě 1). [6] [40]

3.1.3 Porovnání síly magnetické a gravitační, kontrola na praktickou realizaci

Po spočítání magnetické síly ji porovnáme se silou gravitační F_g . Ta se určí jako:

$$F_g = m \cdot g \quad (3.27)$$

Pro město Plzeň je $g = 9,81305 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ podle Cassiniova vzorce a nadmořskou výšku 400 m. [41]

Porovnání se silou magnetickou přinese dva různé výsledky podle metody výpočtu.

Podle metody 1), bude magnetická síla menší nebo větší, než je vyžadována. V prvním případě se bude muset navýšit magnetická indukce pro větší sílu a bude to vyžadovat přepočtení všech dosavadních hodnot. V druhém případě to bude pro návrh cívky znamenat, že bude muset být větší frekvence pro spínání IGBT tranzistorů při pozdější praktické realizaci elektromagnetické levitace.

Podle metody 2), není stále vypočtená hodnota proudu I pro potřebnou sílu na přitáhnutí elektromagnetu. Toho se docílí právě porovnáním sil. Když se dosadí síla gravitační F_g do magnetické F_m , může se poté vyjádřit požadovaný proud I . Tak by se měla dostat taková hodnota I , která bude vytvářet přesně takové magnetické pole, které udrží elektromagnet přitažený. Dále také se může zpětně přes Hopkinsonův zákon dopočítat magnetický tok Φ a díky tomu i magnetickou indukci v železe B_{Fe} a ve vzduchové mezeře B_δ .

Kvůli zjednodušením, která jsou provedena po cestě, se bude požadovaný I pro obě metody o něco málo lišit. Pro lepší praktickou realizaci například metody 2), se musí vypočítat magnetický odpor obvodu tentokrát bez zanedbání magnetického odporu železa a dosadit výsledek do Hopkinsonova zákona. Díky tomu se změní magnetické napětí U_m (Φ zůstane stejný) a dopočte se tak přes 2. Kirchhoffův zákon pro magnetické obvody nová hodnota I .

Jako poslední budou muset být provedeny dvě kontroly pro praktickou realizaci. První kontrola je praktická realizace cívky se zvoleným počtem závitů (zda nebude potřebné zmenšit počet závitů). Druhou kontrolou poté bude kontrola na proudovou hustotu ve vodiči cívky. To se provede pomocí obecného vztahu výpočtu proudu I přes proudovou hustotu J (vztah je odvozen z IV. Maxwellovy rovnice) [5]:

$$I = \int_S \mathbf{J} d\mathbf{S} \quad (3.28)$$

Za předpokladu homogenního rozložení proudu ve vodiči a toho, že je vodič dokonale vodivý, lze napsat:

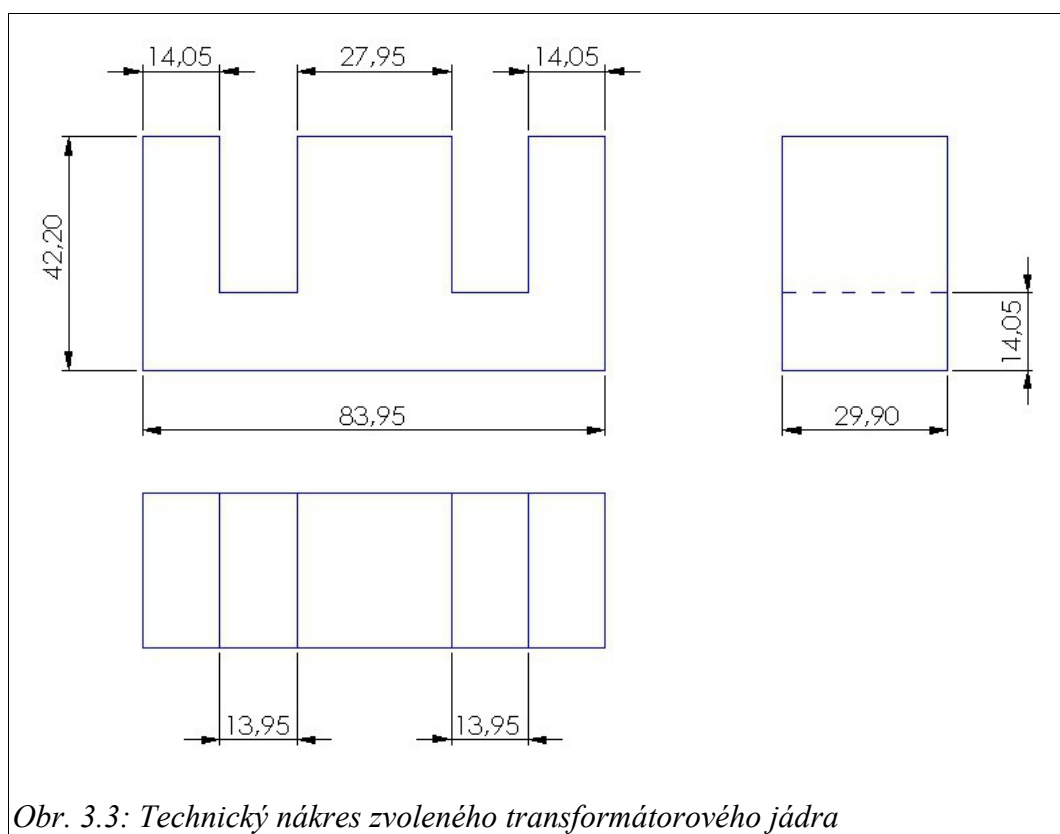
$$I = J \cdot S \rightarrow J = \frac{I}{S} \quad (3.29)$$

Hodnota by se měla držet u měděných vodičů okolo hodnoty $J_{dov} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro náš případ, viz [42]. Tuto hodnotu lze překročit za předpokladu, že se cívka nebude provozovat trvale, ale jen v určitých časových intervalech, jinak hrozí přehřátí vodiče cívky a poškození jeho izolace. [5] [6]

3.2 Praktický výpočet

3.2.1 Prvotní výpočet hmotnosti přitahovaného (levitovaného) objektu

Jako magnetické jádro cívky, která se bude přitahovat, bylo zvoleno skládané jádro transformátoru ve tvaru písmena E (viz obr. 3.3), které se bude přitahovat k podobně konstruovanému objektu ve tvaru písmena I. Rozměry byly změřeny s přesností $\pm 0,05$ mm, neboť takové přesnosti dosahuje analogové posuvné měřítko, kterým bylo změřeno jádro transformátoru. K vykreslení obr. 3.3 byl použit program SolidWorks (SW), verze education 2013-2014.



Pro jednotlivé rozměry budou zavedena označení v tabulce 3.1, která budou dále používána ve výpočtech.

Tabulka 3.1: Tabulka rozměrů magnetického jádra podle obr. 3.3

Název a označení okótované části jádra	Rozměry [mm]
Délka jádrové spojky - l	83,95
Výška sloupku jádra - v	42,20
Šířka jádra - b	29,90
Délka středního sloupku jádra - $a_{stř}$	27,95
Délka krajního sloupku jádra - a_{kr}	14,05
Délka mezery mezi sloupky jádra - l_m	13,95
Výška střední jádrové spojky - v_{sp}	14,05

Výpočet objemu jádra se rozdělí na tři části, které se spočtou podle vztahu (3.1) a poté se sečtou dohromady. Vypočítán tedy bude objem středního sloupku $V_{stř}$, objem jednoho z krajních sloupků V_{kr} a objem jádrové spojky V_{sp} .

$$V_{stř} = a_{stř} \cdot b \cdot v = 27,95 \cdot 29,9 \cdot 42,2 = 35\,266,75 \text{ mm}^3 = 35,267 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{kr} = a_{kr} \cdot b \cdot v = 14,05 \cdot 29,9 \cdot 42,2 = 17\,728,01 \text{ mm}^3 = 17,728 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V_{sp} = v_{sp} \cdot b \cdot l = 14,05 \cdot 29,9 \cdot 83,9 = 35\,245,97 \text{ mm}^3 = 35,246 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$V = V_{stř} + 2 \cdot V_{kr} + V_{sp} = (35,267 + 2 \cdot 17,728 + 35,246) \times 10^{-6} = 105,969 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \quad (3.30)$$

Pro vypočítání objemu stačí už jen dopočítat hmotnost podle vztahu (3.2). Ten ale musí být ještě upraven, neboť jádro transformátoru není celistvé, ale je složeno z elektrotechnických plechů (transformátorových plechů, železo s obsahem křemíku), které jsou odizolovány elektricky nevodivým plnivem. Hmotnost plniva při výpočtu hmotnosti je zanedbána (nízká hustota a objem) a tak bude vztah (3.2) upraven za pomoci koeficientu plnění k na:

$$m_E = k \cdot \rho \cdot V \quad (3.31)$$

V našem případě výpočtu je $k = 0,94$.

Objem je již určen a zbývá hustota transformátorových plechů. Ta je různá a mění se právě podle obsahu křemíku. Pro náš výpočet je zvolena hodnota $\rho = 7\,650 \text{ kg/m}^3$, která odpovídá 3% obsahu křemíku v celkovém objemu jádra [43]. Poté tedy:

$$m_E = k \cdot V \cdot \rho = 0,94 \cdot 105,969 \times 10^{-6} \cdot 7650 = 762,02 \times 10^{-3} \text{ kg} = 762,02 \text{ g}$$

Je tedy spočítaná hmotnost magnetického jádra. Teď se určí hmotnost vodiče cívky, která závisí na délce vodiče, čili počtu závitů, a na jeho průřezu. Pro první výpočet byl zvolen počet závitů cívky $N = 500$ a $S_{Cu} = 1 \text{ mm}^2$. Pro výpočet později je hned také určen průměr jádra vodiče ze vztahu (3.3).

$$d_v = \sqrt{\frac{4 \cdot S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1}{\pi}} = 1,13 \text{ mm}$$

Potřebná délka vodiče na závity je spočtena podle rozměrů jádra cívky. Na první vrstvu cívky stačí znát rozměry střední části jádra E, které se ale ještě musí upravit, neboť cívka nesmí být navinuta přímo na železe. Pro tyto účely tedy bude vytisknuta pomocí 3D tiskárny plastová kostra cívky, na které budou závity navinuty. Tato kostra navíc i rozměrově omezí prostor pro závity. Proto se vytiskne kostra cívky co možná nejtenčí (podle použité 3D tiskárny) a rozměry středního sloupku budou změněny. V našem případě je nejtenčí použitelná vrstva rovna hodnotě $v_k = 0,6 \text{ mm}$. Tím se dostanou nové rozměry výšky středního sloupku v_n , nová délka a_{nT} a šířka b_{nT} (teoretické rozměry).

$$v_n = v - 2 \cdot v_k = 42,2 - 2 \cdot 0,6 = 41 \text{ mm} \quad (3.32)$$

$$a_{nT} = a_{stř} + 2 \cdot a_k = 27,95 + 2 \cdot 0,6 = 29,15 \text{ mm} \quad (3.33)$$

$$b_{nT} = b + 2 \cdot b_k = 29,9 + 2 \cdot 0,6 = 31,1 \text{ mm} \quad (3.34)$$

Při praktické realizaci musely být rozměry délky a šířky kostry zvětšeny kvůli větší pevnosti konstrukce a lepšímu tisknutí. Kostra cívky se tak skládá ze dvou, do sebe skládaných částí. Proto nové rozměry délky středního sloupku a_{nI} a jeho šířky b_{nI} jsou:

$$a_{n_1} = 31,4 \text{ mm}$$

$$b_{n_1} = 33,3 \text{ mm}$$

Teď je vypočteno, kolik závitů cívky se dá vedle sebe umístit na jednu vrstvu cívky (N_1) a kolik vrstev (vr) bude potřeba pro celkové navinutí cívky:

$$N_1 = \frac{v_n}{d_v} = \frac{41}{1,13} = 36,28 \text{ z} = 36 \text{ z} \quad (3.35)$$

$$vr = \frac{N}{N_1} = \frac{500}{36} = 13,88 \approx 14 \text{ vrstev} \quad (3.36)$$

S každou další vrstvou vr , se zvětšuje průměr jádra, na který se cívka namotává a z toho plyne i větší délka vodiče na jeden závit cívky a poté i na jednu vrstvu. Toho ale lze dosáhnout pomocí výpočtů uvedených pro následující tabulku, kde jsou použity pro každou vrstvu.

Výpočet délky a šířky závitu (od 2. vrstvy výše):

$$a_{nx} = a_{n(x-1)} + 2 \cdot d \quad x \in \langle 2, 3, \dots, vr \rangle \quad (3.37)$$

$$b_{nx} = b_{n(x-1)} + 2 \cdot d \quad (3.38)$$

Celková délka vodiče pro jeden závit cívky l_y :

$$l_y = 2 \cdot (a_{ny} + b_{ny}) \quad y \in \langle 1, 2, \dots, N_1 \rangle \quad (3.39)$$

Délka vodiče pro jednu vrstvu cívky l_z :

$$l_z = l_y \cdot N_1 \quad z \in \langle 1, 2, \dots, vr \rangle \quad (3.40)$$

Celková délka vodiče l_C pro cívku s přidanou délkou $l_p = 100$ [mm], kvůli vývodu vodiče pro připojení cívky ke zdroji je poté spočtena jako:

$$l_c = \sum_z l_z + l_p \quad (3.41)$$

Ted' už se jen vynese tabulka s konkrétními hodnotami pro náš případ. Nesmí se také zapomenout, že v případě poslední vrstvy nebude potřeba celá vrstva pro namotání posledních závitů, a proto bude její délka menší (viz výpočet vztahu (3.36)).

Tabulka 3.2: Výpočet odhadované délky vodiče pro cívku s $N = 500$ z

Vrstva	Délka [mm]	Šířka [mm]	Délka jednoho závitu [mm]	Délka Vrstvy [mm]
1.	31,40	33,30	129,40	4 658,40
2.	33,66	35,56	138,44	4 983,84
3.	35,92	37,82	147,48	5 309,28
4.	38,18	40,08	156,52	5 634,72
5.	40,44	42,34	165,56	5 960,16
6.	42,70	44,60	174,60	6 285,60
7.	44,96	46,86	183,64	6 611,04
8.	47,22	49,12	192,68	6 936,48
9.	49,48	51,38	201,72	7 261,92
10.	51,74	53,64	210,76	7 587,36
11.	54,00	55,90	219,80	7 912,80
12.	56,26	58,16	228,84	8 238,24
13.	58,52	60,42	237,88	8 563,68
14.	60,78	62,68	246,92	7 901,44
Přidaná délka [mm]	–	–	–	100,00
Celková délka [mm]	–	–	–	93 944,96

Příklady výpočtů do tabulky:

Délka a šířka závitu 3. závitu – (3.37) a (3.38):

$$a_{n3} = a_{n2} + 2 \cdot d = 33,66 + 2 \cdot 1,13 = 35,92 \text{ mm}$$

$$b_{n3} = b_{n2} + 2 \cdot d = 35,56 + 2 \cdot 1,13 = 37,82 \text{ mm}$$

Délka vodiče pro 3. závit cívky – (3.39):

$$l_3 = 2 \cdot (a_{n3} + b_{n3}) = 2 \cdot (35,92 + 37,82) = 147,48 \text{ mm}$$

Délka vodiče pro 3. vrstvu cívky – (3.40):

$$l_3 = l_3 \cdot N_1 = 147,48 \cdot 36 = 5\,309,28 \text{ mm}$$

Celková délka vodiče cívky – (3.41):

$$l_C = \sum_{z=1}^{14} l_z + l_p = 93\,844,96 + 100,00 = 93\,944,96 \text{ mm}$$

Objem vodiče dle upraveného vztahu (3.4):

$$V_v = S_v \cdot l_C = 1 \cdot 93\,944,96 = 93\,944,96 \text{ mm}^3 = 93,945 \text{ cm}^3$$

Pro naši aplikaci byl zvolen výše zmíněný měděný (Cu) vodič, který má hustotu $\rho_{\text{Cu}} = 8,94 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Poté tedy celková hmotnost vodiče je použitím vztahu (3.4):

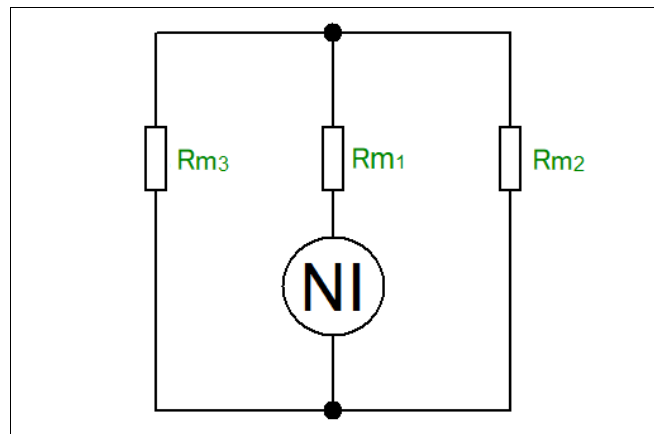
$$m_v = \rho_{\text{Cu}} \cdot V_v = 8,94 \cdot 93,945 = 839,87 \text{ g}$$

Celková hmotnost přitahovaného objektu je poté podle vztahu (3.5):

$$m = m_E + m_v = 762,02 + 839,87 = 1\,601,89 \text{ g} = 1,602 \text{ kg}$$

3.2.2 Výpočet magnetického obvodu ideálního a reálného

Pro výpočet magnetického obvodu je zvolena metoda 2) z teoretického úvodu, kde je nejdříve vypočítán magnetický odpor obvodu, kde se relativní permeabilita železa $\mu_r \rightarrow \infty$. Zvolená hodnota vzduchové mezery pro prvotní výpočet je $\delta = 1 \text{ mm} (= 0,001 \text{ m})$.



Obr. 3.4: Náhradní schéma magnetického obvodu při $\mu \rightarrow \infty$

Pro výpočet ideálního magnetického obvodu je dobré si nakreslit jeho náhradní schéma, které je vidět na obr. 3.4.

Z dané ilustrace je vidět, že se potřebuje vypočítat jen magnetický odpor R_{m1} podle vztahu (3.20) a poté magnetický odpor R_{m2} . Magnetický odpor R_{m3} je poté díky symetrickým rozměrům jádra cívky roven magnetickému odporu R_{m2} . Nejdříve ale ještě je potřebný výpočet plochy obou vzduchových mezer.

$$S_1 = a_{stř} \cdot b_{stř} = 27,95 \cdot 29,9 = 835,705 \text{ mm}^2 = 835,705 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$S_2 = a_{kr} \cdot b_{kr} = 14,05 \cdot 29,9 = 420,095 \text{ mm}^2 = 420,095 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Magnetické odpory vzduchových mezer jsou poté přes vztah (3.19) rovny:

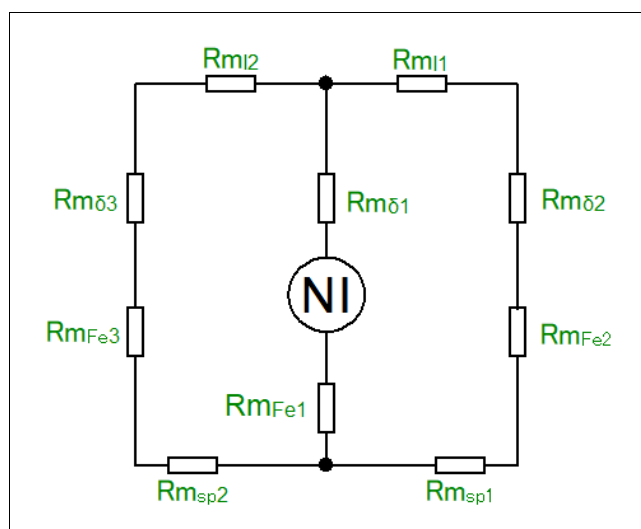
$$R_{m1} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{S_1} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{835,705 \times 10^{-6}} = 952\,219,6 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{m2} = R_{m3} = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{S_2} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7}} \cdot \frac{0,001}{416,72 \times 10^{-6}} = 1\,894\,273,2 \text{ H}^{-1}$$

Celkový odpor je poté jen sériovou kombinací magnetického odporu R_{m1} a polovičního odporu R_{m2} , neboť paralelní kombinací dvou stejně velkých odporů se dostane odpor poloviční [5] [6]. Z toho tedy plyne, že celkový odpor obvodu R_m je roven:

$$R_m = R_{m1} + \frac{R_{m2}}{2} = 952\,219,6 + \frac{1\,894\,273,2}{2} = 1\,899\,356,2 \text{ H}^{-1} = 1,899 \text{ MH}^{-1} \quad (3.42)$$

Díky tomu je vypočten ideální magnetický odpor obvodu. Pro doplnění je zde ještě uveden výpočet reálného magnetického obvodu, který je později využit. Pro něj musí být zvolena hodnota relativní permability železa z rozsahu $\mu_r = 2000\text{-}6000$, kterého transformátorové plechy obvykle dosahují [44]. Pro náš výpočet je zvolena relativní permeabilita $\mu_r = 4\,000$. Náhradní schéma obvodu je vidět na obr. 3.5.



Obr. 3.5: Náhradní schéma magnetického obvodu při $\mu_r = 4000$

Odpor $R_{m\delta1}$ a $R_{m\delta2}$ jsou již vypočtené v případě ideálního magnetického obvodu a není potřeba se jimi znovu zabývat. Proto se hned přejde k výpočtu magnetického odporu jádra cívky. Nejdříve jsou vypočteny plochy, které jsou účinně zmagnetovány v případě jádra. Zde budou totiž plochy menší, než ve vzduchové mezeře. To nastává kvůli koeficientu plnění k , neboť do výpočtu nelze zahrnovat i plochu nemagnetického plniva mezi jednotlivými plechy. Tak vznikne vztah:

$$S_{Fe} = S \cdot k \quad , \quad (3.43)$$

podle kterého jsou dopočteny plochy pro magnetické odpory v transformátorovém jádru.

[5] [6]

$$S_{Fe1} = S_1 \cdot k = 835,705 \cdot 0,94 = 785,563 \text{ mm}^2 = 785,563 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$S_{Fe2} = S_2 \cdot k = 420,095 \cdot 0,94 = 394,889 \text{ mm}^2 = 394,889 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

$$S_{Fe\text{sp}} = S_{FeI} = a_{sp} \cdot b \cdot k = 14,05 \cdot 29,9 \cdot 0,94 = 394,889 \text{ mm}^2 = 394,889 \times 10^{-6} \text{ m}^2$$

Dále je potřebný rozměr délky pro jednotlivé odpory v železe. U odporů R_{MFe1} , R_{MFe2} a R_{MFe3} je to jednoduché, neboť jejich délka je stejná jako výška sloupku trafa. Z toho plyne:

$$v = l_1 = l_2 = l_3 = 42,2 \text{ mm} = 0,0422 \text{ m}$$

U odporu spodních a horních je to už složitější, neboť zde bude docházet k zakřivení střední siločáry, jak můžeme i vidět z bližšího pohledu načrtnutého jádra na obr. 3.6.



Výpočet zakřivení střední siločáry se určí trochu zjednodušeně a to tím, že nahradíme nepravidelné zakřivení výpočtem délky čtvrtiny kruhu, jehož poloměr (nebo průměr) bude aritmetickým průměrem z rozdílných rozměrů. Z toho vychází vztah (3.43), do kterého se i hned dosadí.

$$l_{sp1} = l_{hl} = l_{sp2} = l_{h2} = \frac{\pi \cdot d_1}{4} + l_m + \frac{\pi \cdot d_2}{4} = \frac{\pi \cdot 21}{4} + 13,95 + \frac{\pi \cdot 14,05}{4} = 41,48 \text{ mm} = 41,48 \times 10^{-3} \text{ m} \quad (3.43)$$

Pro jednodušší počítání stačí znovu vypočítat jen odpor prostřední větve obvodu a jedné krajní, neboť ta druhá je symetricky stejná. To bude tedy znamenat, že celkový odpor bude znovu sériovou kombinací větve prostřední a poloviční hodnoty větve krajní. K dopočtu se použijí vztahy (3.19) a (3.41).

$$R_{m\delta 1} = R_{m1} = 952\,219,6 \, H^{-1}$$

$$R_{m2} = R_{m\delta 2} = R_{m\delta 3} = 1\,894\,273,2 \, H^{-1}$$

$$R_{mFe1} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l_1}{S_{Fe1}} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \cdot 4\,000} \cdot \frac{0,0422}{785,563 \times 10^{-6}} = 10\,687,1 \, H^{-1}$$

$$R_{mFe3} = R_{mFe3} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l_2}{S_{Fe2}} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \cdot 4\,000} \cdot \frac{0,0422}{394,889 \times 10^{-6}} = 21\,260,2 \, H^{-1}$$

$$R_{mFe\,sp1} = R_{mFe\,11} = R_{mFe\,12} = R_{mFe\,12} = \frac{1}{\mu_0 \cdot \mu_r} \cdot \frac{l_{sp}}{S_{Fe\,sp}} = \frac{1}{4\pi \times 10^{-7} \cdot 4\,000} \cdot \frac{41,48 \times 10^{-3}}{394,889 \times 10^{-6}} = 20\,897,5 \, H^{-1}$$

$$R_{mR} = R_{m\delta 1} + R_{mFe1} + \frac{R_{m\delta 2} + R_{mFe2} + 2 \cdot R_{mFe1}}{2}$$

$$R_{mR} = 952\,219,6 + 10\,687,1 + \frac{1\,894\,273,2 + 21\,260,2 + 2 \cdot 20\,897,5}{2} = 1\,941\,570,9 \, H^{-1} = 1,942 \, MH^{-1}$$

Jak je tedy dokázáno, předpokládaný reálný magnetický odpor R_{mR} se příliš neliší od hodnoty ideálního magnetického odporu R_{mc} . Tak se může vypočítat magnetická síla F_m jen s ideálním magnetickým obvodem a relativně malou chybou ve výpočtu.

3.2.3 Výpočet proudu pro vznik dostatečné síly magnetické pole

Zde se musí nejdříve odvodit vztah pro sílu F_m pro náš konkrétní magnetický obvod, ze kterého poté lze vyjádřit vztah pro proud I . Toho se dosáhne pomocí statické definice indukčnosti L ze vztahu (3.25) dosazené do vztahu (3.26) pro energii W_m . Ten je derivován ve vztahu (3.17) pro F_m a ta je porovnávána se silou gravitační F_g spočítanou podle vztahu (3.27). [6]

$$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2}{R_m} \cdot I^2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{N^2 \cdot I^2}{\frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{S_1} + \frac{2}{\mu_0} \cdot \frac{\delta}{S_2}} = \frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}{\delta \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)} \quad (3.45)$$

$$F_m = \frac{\delta W}{\delta \delta} = -\frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}{\delta^2 \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)} \quad (3.46)$$

$$F_g = m \cdot g$$

F_m bude působit v opačném směru oproti F_g , a proto lze napsat:

$$F_g = -F_m \quad (3.47)$$

Ted' už jen stačí vyjádřit obě síly a pro získání vztahu pro I .

$$m \cdot g = +\frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}{\delta^2 \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \delta^2 \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)}{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}} \quad (3.48)$$

Vztah pro proud je tedy odvozený a stačí jen dosadit naše hodnoty:

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,602 \cdot 9,81305 \cdot 0,001^2 \cdot ((420,095 + 2 \cdot 835,705) \times 10^{-6})}{500^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}} = 772,12 \text{ mA}$$

Pro doplnění se zde ještě dopočte velikost toku Φ pomocí Hopkinsonova zákona (3.21) a velikost magnetické indukce B_{Fe} a B_δ (vztah 3.7). Pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře jsou zanedbány rozptylové toky, ale i tak bude menší než magnetická indukce v železe, kvůli koeficientu plnění (působení Φ na menší plochu). Výpočet je přehledový, aby se zjistilo, jaká přibližná hodnota Φ (popřípadě indukce) pro vytvoření síly F_m tak velké, aby byla rovna síle F_g pro případ $\delta = 0,001$ m. Pro jiné hodnoty δ se může hodnota Φ lišit.

$$\Phi = \frac{Um}{Rmc} = \frac{N \cdot I}{Rmc} = \frac{500 \cdot 772,12 \times 10^{-3}}{1,899 \times 10^6} = 203,30 \mu Wb$$

$$B_{Fe} = \frac{\Phi}{S_{Fel}} = \frac{203,30 \times 10^{-6}}{785,563 \times 10^{-6}} = 258,80 \text{ mT}$$

$$B_\delta = \frac{\Phi}{S_1} = \frac{203,30 \times 10^{-6}}{835,705 \times 10^{-6}} = 243,27 \text{ mT}$$

Pro prvotní odhad konstrukce je stanoven výpočet. Jak ale lze pozorovat, vzduchová mezera δ je velmi malá a efekt magnetické síly pro přitahování by nebyl moc patrný. Výpočet jako takový by ale byl přesnější, kvůli malému rozptylu magnetického toku Φ v mezeře δ . Pokud by se ještě zpětně pomocí Hopkinsonova a 2. Kirchhoffova zákona pro magnetické obvody dopočítal potřebný proud I pro stejné Φ , ale jako magnetický odpor R_m by se tentokrát dosadil odhadovaný reálný magnetický, získala by se hodnota vypočteného proudu, která by ještě více blížila reálné hodnotě.

Pro lepší pozorovatelnost efektu (a později i větší efekt levitace) se zvolí magnetická indukci ve vzduchové mezeře $B_\delta = 0,8$ T pro $\delta = 0,001$ m. Stačí jen už dopočítat I pro nové B a Φ .

$$\Phi = B_\delta \cdot S_1 = 0,8 \cdot 835,705 \times 10^{-6} = 668,56 \mu Wb$$

$$Um = R_m \cdot \Phi = 1,899 \times 10^6 \cdot 668,56 \times 10^{-6} = 1269,6 A$$

$$Um = N \cdot I \Rightarrow I = \frac{Um}{N} = \frac{1269,6}{500} = 2,54 A$$

Nově vypočítané I tedy vyvolá novou magnetickou sílu F_m (viz. vztah (3.46), ale bez znaménka (-), neboť nám záleží jen na velikosti síly a ne jejím směru):

$$F_m = \frac{1}{2} \frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}{\delta^2 \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)} = \frac{1}{2} \frac{500^2 \cdot 2,54^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}{0,001^2 \cdot (420,095 \times 10^{-6} + 2 \cdot 835,705 \times 10^{-6})} = 170 N$$

Jak ale je určeno již v teoretickém úvodu, tato síla je příliš velká vzhledem k tomu, že je požadován pro tuto metodu rovnovážný stav mezi silou magnetickou a gravitační. Pro to, aby se tak stalo, se tedy bude muset zvětšit δ . Díky tomu bude tedy patrnější efekt síly F_m a je i tak výhodně získán vztah pro výpočet δ pro jakkoliv silné magnetické pole.

$$\delta = \sqrt{\frac{N^2 \cdot I^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}{2 \cdot m \cdot g \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)}} = \sqrt{\frac{500^2 \cdot 2,54^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}{2 \cdot 1,602 \cdot 9,8154 \cdot (420,095 \times 10^{-6} + 2 \cdot 835,705 \times 10^{-6})}} = 3,29 mm \quad (3.49)$$

3.2.4 Kontrola pro praktickou montáž, parametry prakticky zkonstruované cívky

Všechny potřebné parametry pro konstrukci elektromagnetu jsou určeny. Teď už je potřebná jen kontrola, zde lze cívku podle daných parametrů prakticky zkonstruovat.

První kontrolou je praktická montáž závitů. Rozměr mezery mezi středním a krajním sloupkem jádra cívky byl měřením určen jako $l_m = 13,95$ mm. Zde se tedy zkontroluje, zda se dá navržená cívka konstrukčně umístit do dané mezery spolu s vytisknutou, skládanou kostrou cívky.

Kostra cívky omezí prostor pro závity cívky o hodnotu l_k :

$$l_k = a_{nl} - a_{stř} = 31,4 - 27,95 = 3,45 \text{ mm} \quad (3.50)$$

Z toho plyne, že pro závity zde zbývá jen prostor, označený jako l_n :

$$l_n = l_m - l_k = 13,95 - 3,45 = 10,5 \text{ mm} \quad (3.51)$$

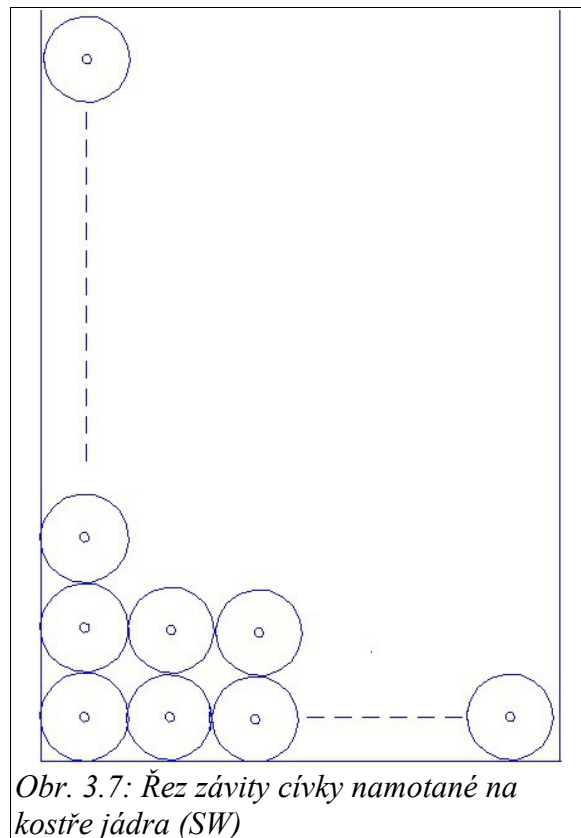
Vodič, který bude tedy namotán ve vrstvách kolem středního sloupku a kostry cívky (viz obr. 3.7) by neměl tento rozměr překročit a ani se mu rovnat.

Aby se závity cívky nedotýkaly krajního sloupku jejího jádra, tak musí tedy platit:

$$l_c < l_n \quad (3.52)$$

Z výpočtu hmotnosti je dosazen průměr vodiče $d_v = 1,13$ mm a počet vrstev (závitů vedle sebe) cívky je $vr = 14$ podle (3.36). Z toho tedy plyne:

$$l_c = d_v \cdot vr = 1,13 \cdot 14 = 15,82 \text{ mm} \quad (3.53)$$



Jak lze z daných hodnot vypočítat, zvolené závitů cívky pro teoretický výpočet se nemohou v žádném případě prakticky umístit do jádra. Z toho důvodu je potřeba menší počet závitů a také větší průměr, neboť u našeho výpočtu je proudová hustota vodiče J mírně vyšší než hodnota J_{dov} .

Pro výpočet nového počtu závitů je zvolen již konkrétní měděný vodič, který je na skladě dílny školy. Pro praktickou montáž byl zvolen vodič o průměru $d_v = 2$ mm.

Nejdříve bude vypočteno, kolik vrstev lze umístit podle vztahů (3.52) a (3.53) do jádra cívky, a poté kolik závitů lze umístit na jednu vrstvu cívky podle vztahu (3.35). Díky tomu a vztahu (3.36) se zjistí dovolený počet závitů. Poté pomocí nově daných parametrů se dopočítá, jaký proud I musí protékat pro zachování hodnoty magnetického napětí U_m a také magnetické síly F_m .

$$l_c < l_n \Rightarrow d_v \cdot vr < l_n$$

$$2 \cdot vr < 10,5 \Rightarrow vr < 5,25 \Rightarrow vr = 5$$

$$N = N_1 \cdot vr = 20 \cdot 5 = 100 \text{ z}$$

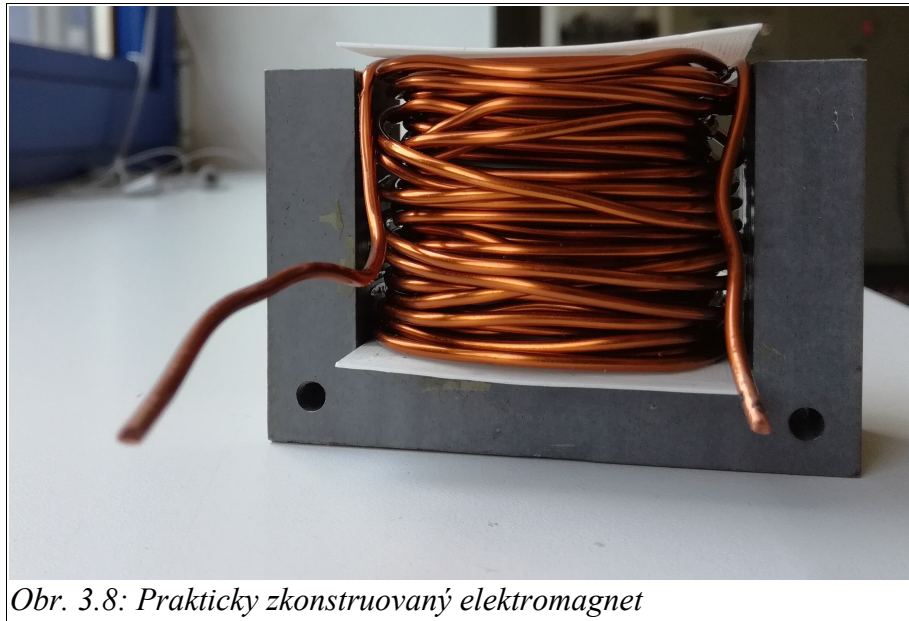
$$N_1 = \frac{v_n}{d_v} = \frac{41}{2} = 20,5 \text{ z} = 20 \text{ z}$$

Počet závitů je určen, teď už stačí určit I podle 2. Kirchhoffova zákona pro magnetické obvody (3.23).

$$I = \frac{U_m}{N} = \frac{1269,6}{100} = 12,696 \text{ A} = 12,7 \text{ A}$$

Tato velikost proudu by tedy platila pro případ, že by byl počet namotaných závitů cívky $N = 100$ (také hmotnost celé cívky by musela být $m = 1,602 \text{ kg}$). V případě praktické konstrukce je ale tento počet závitů menší a to $N = 52$. Důvodem, proč je jich tak málo je, že vodič o průměru $d_v = 2 \text{ mm}$ je celkem těžce tvarovatelný (je mechanicky tuhý). Jeho ruční namotávání na tenkou kostru cívky je velice obtížné a vzniká zde spousta volného místa, jak mezi jednotlivými závity vodiče, tak hlavně mezi jeho vrstvami. Také jedna část kostry cívky, jak můžeme vidět z obr. 3.8, se nám trochu vysunula při nasazování závitů spolu s kostrou na transformátorové jádro (tento problém bude více rozebrán v kapitole praktické konstrukce).

Aby se dosáhlo počtu závitů uvedenému v teoretických výpočtech, muselo by být použito zařízení, které by cívku namotalo. Zde by nastával ale i problém s kostrou cívky, která je velice křehká (zařízení by ji mohlo svým silovým působením zničit). I pokud by kostra cívky silové účinky vydržela, tak je dost pravděpodobné, že kvůli mechanické tuhosti vodiče bychom přišli o jednu vrstvu cívky (to by znamenalo, že by $N = 80 \text{ z}$).



Obr. 3.8: Prakticky zkonstruovaný elektromagnet

Změnou počtu závitů, které jsou navíc jiné délky než bylo vypočteno, se změnila celková hmotnost cívky, která je $m = 0,988$ kg. Cívka je tady lehčí než bylo předpokládáno. Z toho tedy plyne, že se navíc i změnila síla F_m , která z důvodu menší hmotnosti m , bude menší než síla vypočítaná. Z toho tedy plyne, že by stačil menší proud I na přitažení elektromagnetu, ale za předpokladu stejného počtu závitů N . Jelikož jejich počet se zmenšil téměř dvojnásobně, tak z toho plyne, že bude ve výsledku zapotřebí spíše daleko většího proudu I , než je proud určený. Pro stejnou vzduchovou mezeru δ lze určit novou sílu F_m podle vztahu (3.48) pomocí nových hodnot závitů N a hmotnosti celé cívky m .

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \delta^2 \cdot (S_2 + 2 \cdot S_1)}{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot S_2}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,988 \cdot 9,81305 \cdot 0,00329^2 \cdot ((420,095 + 2 \cdot 835,705) \times 10^{-6})}{52^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}} = 19,18 \text{ A}$$

Dosud probíhala první kontrola praktické konstrukce, která se později upravila poznatky se samotnou její realizací. Druhá kontrola na proudovou hustotu lze provést již daleko snadněji, ale ta se provede až po praktickém měření samotném.

3.3 Praktická konstrukce a měření cívky

3.3.1 Problémy s konstrukcí, nerovnoměrná δ

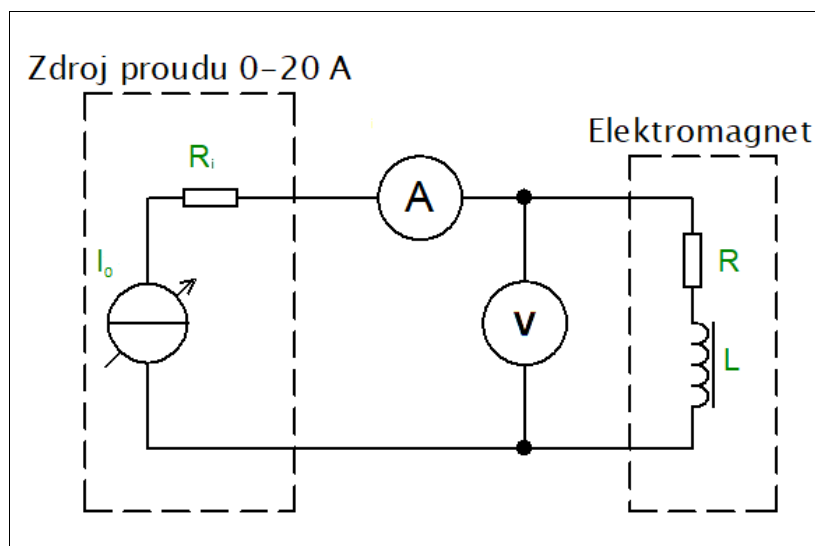
V teoretické části výpočtu byly uvedeny jisté předpoklady, které se bohužel v praxi těžko uplatňují. Skutečné parametry cívky, jak bylo již uvedeno, se zásadně liší oproti předpokladům, konkrétně tedy počet závitů N a z toho plynoucí i hmotnost cívky m . Problematickým parametrem se stala hlavně vzduchová mezera δ . Jak lze vidět z obr. 3.8, tak je horní strana kostry cívky velmi zvlněná a nerovnoměrná. Kvůli tomu je velmi problematické ji změřit. Kvůli této konstrukční nepříjemnosti bude magnetické pole nerovnoměrně rozloženo a bude tak obtížné i určit magnetický odpor vzduchové mezery. Ten by se tak musel vypočítat podle vztahu (3.19), neboť je díky nerovnoměrnosti vztah (3.20) nepoužitelný.

Největším problémem je ale závislost vzduchové mezery δ na silových účincích F_m , působící na vršek kostry cívky. Ta se deformuje, takže i po statickém změření δ na různých bodech cívky, jsou tyto hodnoty nepoužitelné. Pro to, aby se dokázalo určit, na jakou mezeru δ se vlastně dokáže elektromagnet přitáhnout a určit tak poté i ostatní veličiny, přejde se k praktickému měření cívky. Mezera δ se tak změří při silovém působení $F_m = F_g$ a odečte se hodnota proudu I , na kterou zůstane cívka přitažena k objektu ve tvaru písmena I.

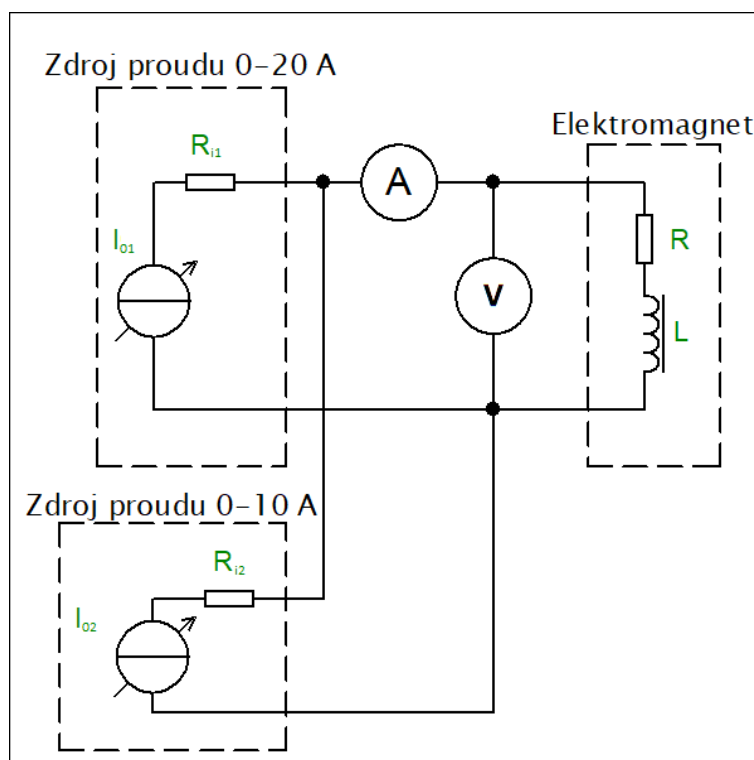
3.3.2 Praktické měření cívky (elektromagnetu)

Měření samotné se rozdělí na dvě části. Prvně je změřen potřebný proud I na to, aby se elektromagnet udržel přitažený na vzdálenost odpovídající převýšení kostry cívky oproti magnetickému obvodu (viz obr. 3.8). Tato vzdálenost je ale menší, než ta určená výpočtem v teoretické části a navíc by v praktické realizaci levitace byla celkem neúčinná, neboť by nebyl kvůli převýšení kostry cívky levitační jev vůbec pozorovatelný (cívka by se jen držela přitažena k objektu ve tvaru písmene I). V další části měření se proto δ zvětší. Toho se docílí pomocí vložení destičky z paramagnetického materiálu, která bude vložena na kostru cívky (její výška se ale kvůli nečistotám na ní nedá přesně určit).

Schéma zapojení:



Obr. 3.9: Zapojení pro první měření elektromagnetu



Obr. 3.10 Schéma zapojení pro druhé měření elektromagnetu

Postup měření:

Obvod byl pro první měření zapojen podle schématu zapojení na obr. 3.9. Cívka byla připojena pomocí šroubů s podložkami a matickami, protože použití krokosvorek při předpokládaných hodnotách proudu je nebezpečné z důvodu jejich možného poškození kvůli velké proudové hustotě J . Proud cívkou byl postupně zvyšován od 0 a průběžně při tom bylo testováno, zda se elektromagnet dokáže udržet přitažený k železnému objektu na určitou vzdálenost. Toho se dosáhne pouhým pokusem o zvednutí objektu kolmo vzhůru.

Měření druhé probíhalo podobně, ale je zde několik rozdílů. První je, že zde se musely nastavovat dva zdroje proudu a hlídat se i jejich hodnoty napětí, aby nedocházelo k vyrovnávání potenciálů na zdroji (jeden zdroj by dobíjel ten druhý a mohlo by dojít k jeho poškození). Dále byl také změněn bočník pro rozsah 0-24 A na ampérmetru, který byl pro něj určen (ZP 662/3), za bočník na rozsah proudu 0-60 A (X-7203), neboť původní bočník jak bylo během měření zjištěno, nestačil na určení proudu I_{2m} .

Proud byl zvyšován, dokud se cívka neudržela přitažena pro obě měření. Proud byl poté ještě snižován a zvyšován, dokud nebyla přesně nalezena taková hodnota, pro kterou platí, že se síla F_m rovná síle F_g . Při dané hodnotě proudu, která se označí jako I_m , se ještě určí hodnota mezery δ . Její přibližná hodnota se určí jejím změřením na několika místech a dopočtením aritmetického průměru (viz (3.54), k ve vzorci je počtem naměřených hodnot δ po délce jádra). Tak se nahradí nerovnoměrná δ hodnotou ekvivalentní naměřenou δ_m , která je rovnoměrná.

$$\delta_m = \frac{1}{k} \sum_1^k \delta_k \quad (3.54)$$

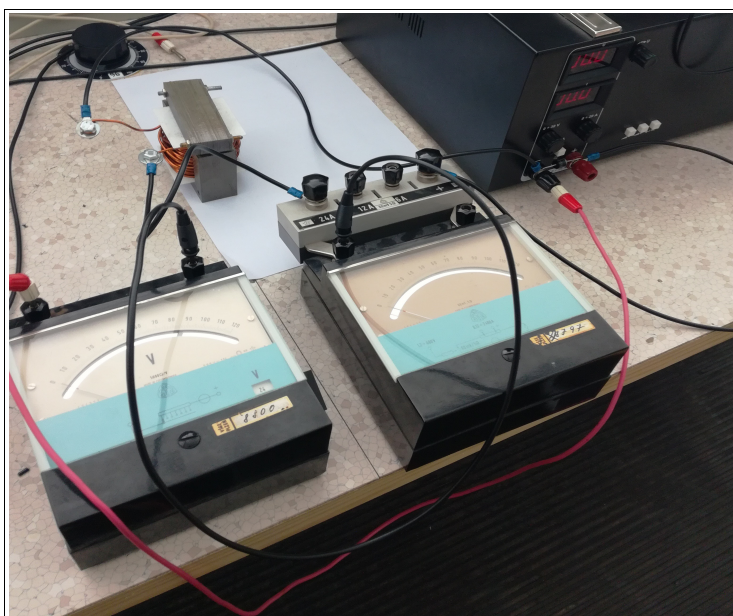
Při měření se také určí pomocí voltmetru, který naměří napětí U_m na elektromagnetu, a podle Ohmova zákona (3.55) hodnota parazitního odporu elektromagnetu R_p (odpor namotaného měděného vodiče). Tato hodnota udává přibližnou informaci pro případný dopočet vzniklého přechodového děje 1. řádu. Proto stačí naměřit jen pro hodnoty, kdy $I = I_m$.

$$R_p = \frac{U_m}{I_m} \quad (3.55)$$

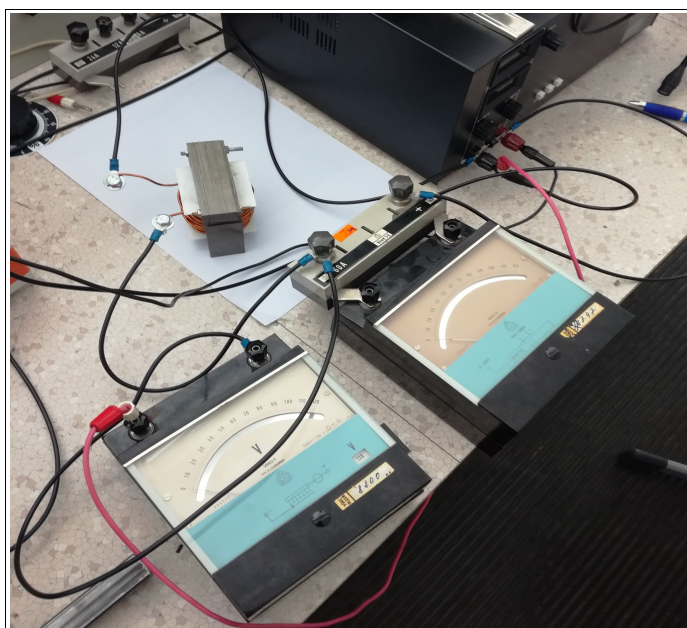
Po skončení měření je důležité postupně snižovat hodnotu proudu k nule, kvůli napěťové špičce, která by jinak vznikla při velké a rychlé změně proudu (přechodový děj 1. řádu).

Praktické měření a výpočty:

Reálné zapojení prvního obvodu je možné spatřit na obr. 3.11. Zapojení druhého obvodu poté na obr. 3.12.

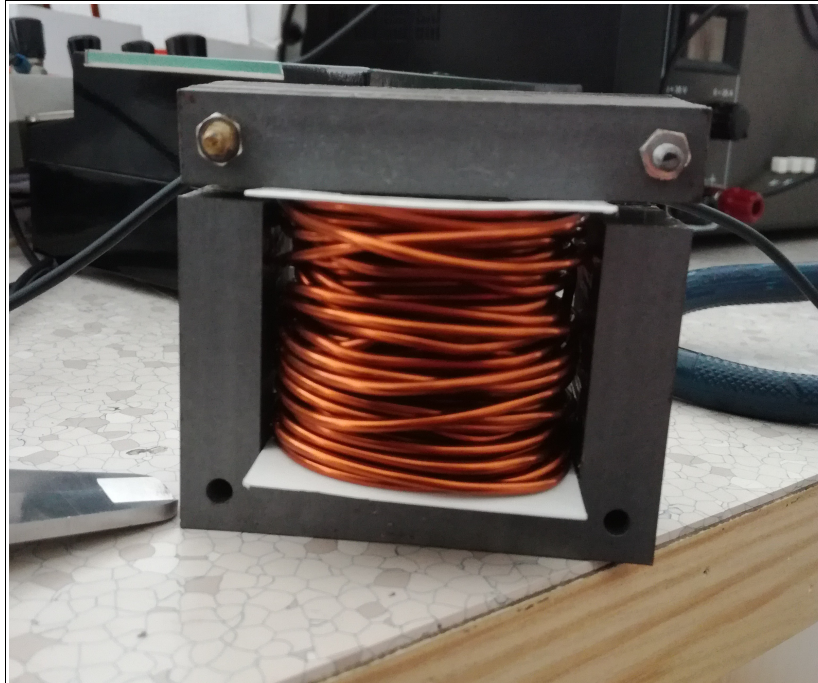


Obr. 3.11: Obvod pro první měření elektromagnetu

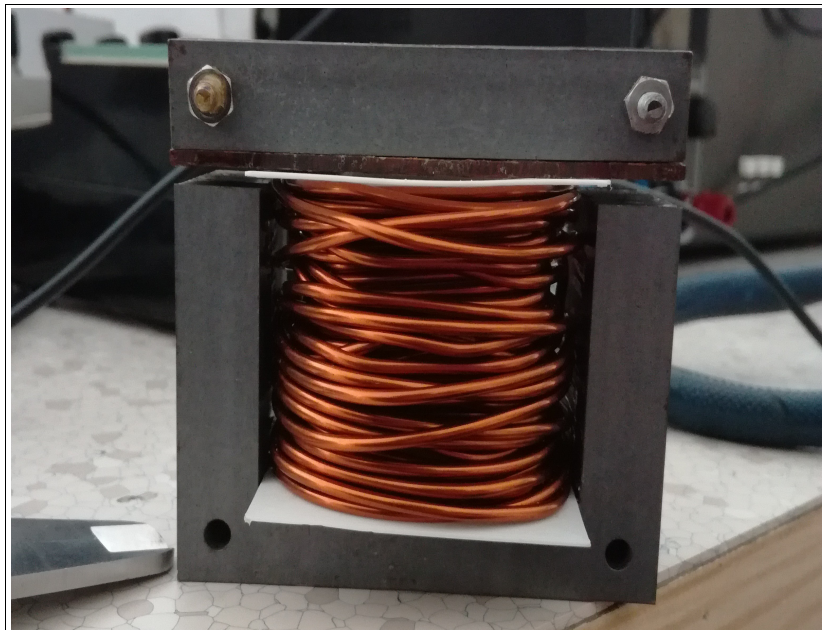


Obr. 3.12: Obvod pro druhé měření elektromagnetu (druhý proudový zdroj se nevešel do záběru)

Elektromagnet s objektem, ke kterému se přitahuje, je poté možné spatřit na obr. 3.13 pro první měření a na obr. 3.14 pro měření druhé.



Obr. 3.13: Elektromagnet spolu s objektem, ke kterému se přitahuje



Obr. 3.14: Elektromagnet s vloženou destičkou na kostře cívky

Naměřené a vypočtené hodnoty:

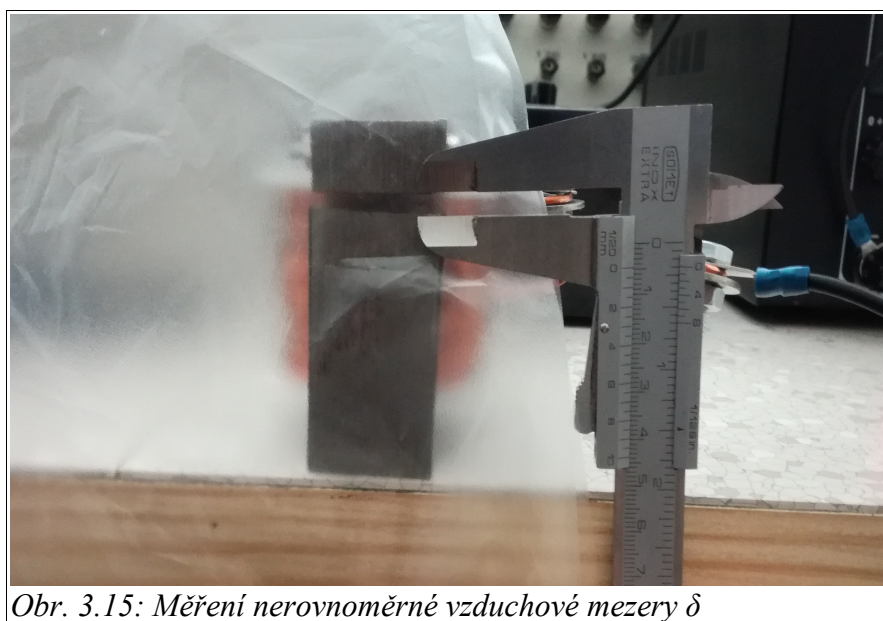
Tabulka 3.3: První měření přitahového proudu cívky

I [A]	0	10	15	15,5	15,7	15,8	16	20
Přitažení cívky	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO

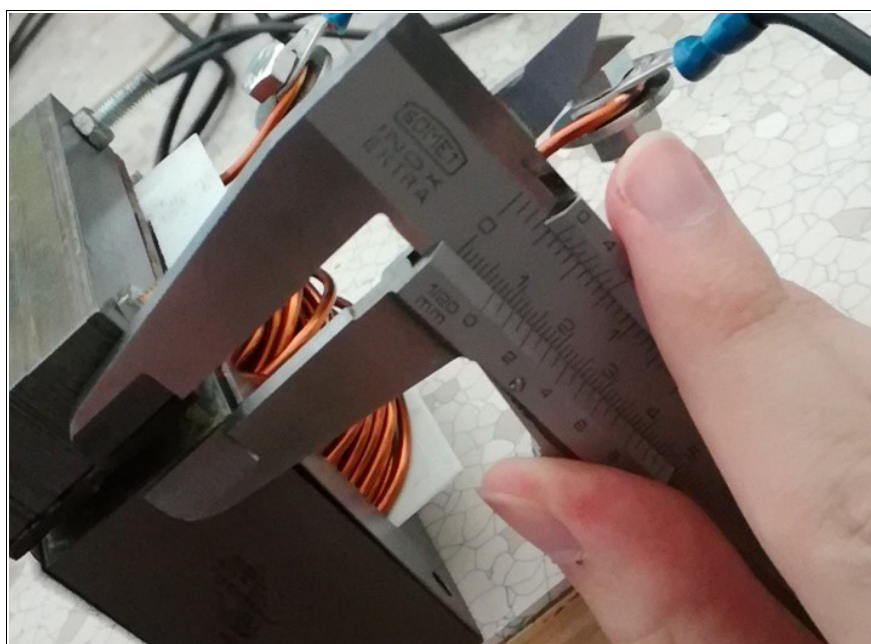
Tabulka 3.4: Druhé měření přitahového proudu cívky

I [A]	0	10	20	25	25,5	25,75	26	28	30
Přitažení cívky	NE	NE	NE	NE	NE	ANO	ANO	ANO	ANO

Hodnota proudu byla z tabulek 3.3 a 3.4 určena pro první měření $I_{1m} = 15,8$ A a druhé $I_{2m} = 25,75$ A. Během daných proudů byly určeny také hodnoty δ_{km} a δ_{2m} viz obr. 3.15 a 3.16. Vložená fólie je u prvního měření kvůli bezpečnosti práce, protože při případném zkratu cívky o magnetické jádro by mohlo dojít k ohrožení zdraví měřící osoby. Pro druhé měření bylo pečlivě překontrolováno, zda nemůže dojít ke zkratu. Zde nebylo možné měřit hodnoty přes fólii z časových důvodů (rychlý ohřev závitů cívky).

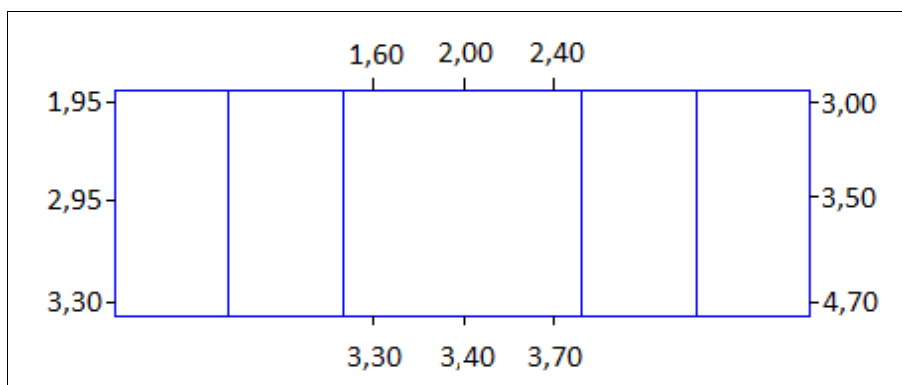


Obr. 3.15: Měření nerovnoměrné vzduchové mezery δ

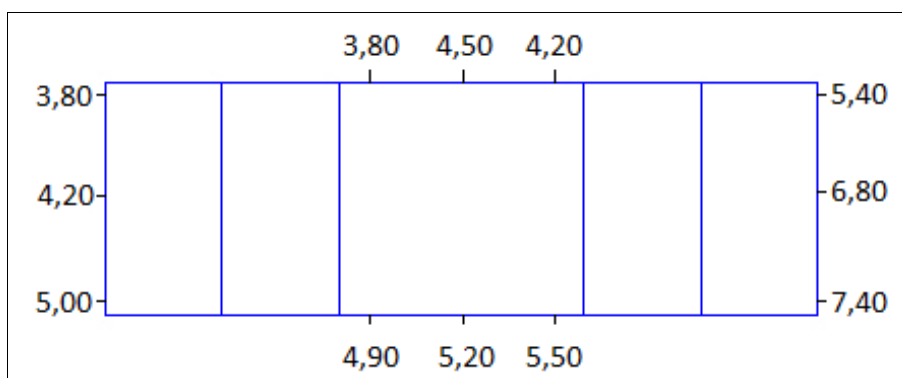


Obr. 3.16: Elektromagnet s vloženou destičkou na kostře cívky

Měřením bylo určeno celkem 12 hodnot δ pomocí posuvného měřítka po celé délce jádra a jsou znázorněny na půdorysu jádra cívky (obr. 3.17 a 3.18).



Obr. 3.17: Hodnoty mezery δ pro první měření (SW)



Obr. 3.18: Hodnoty mezery δ pro druhé měření (SW)

Z naměřených hodnot δ a pomocí vztahu (3.54) byly určeny hodnoty δ_{1m} a δ_{2m} a zaokrouhleny na setiny milimetru (nejbližší vyšší hodnotu).

$$\delta_{1m} = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \delta_k = \frac{1}{12} \cdot (1,95 + 2,95 + \dots + 3,50 + 4,70) = 3,044 \text{ mm} \approx 3,05 \text{ mm}$$

$$\delta_{2m} = \frac{1}{12} \sum_{k=1}^{12} \delta_k = \frac{1}{12} \cdot (3,80 + 4,20 + \dots + 6,80 + 7,40) = 5,294 \text{ mm} \approx 5,30 \text{ mm}$$

Naměřená hodnota napětí při proudu I_{1m} je $U_{1m} = 0,88 \text{ V}$, při I_{2m} je $U_{2m} = 1,42 \text{ V}$. Z toho tedy plyne podle vztahu (3.55), že odpor R_p se pohybuje přibližně mezi hodnotami:

$$R_p = \frac{U_{1m}}{I_{1m}} = \frac{0,88}{15,8} = 55,7 \text{ m}\Omega$$

$$R_p = \frac{U_{2m}}{I_{2m}} = \frac{1,42}{25,75} = 55,15 \text{ m}\Omega$$

Použité měřící přístroje:

- magnetoelektrický ampérmetr s otočnou cívkou, 8797, 652 690
- bočník pro ampérmetr, rozsah 0-24 A, ZP 662/3
- bočník pro ampérmetr, rozsah 0-60 A, X-7203
- magnetoelektrický voltmetr s otočnou cívkou, použité rozsahy 1,2 a 2,4 V, 8800
- Nastavitelný zdroj konstantního proudu, DIAMETRAL, rozsah nastavení proudu 0-20 A, Q130R50D, 169 950
- Nastavitelný zdroj konstantního proudu, DIAMETRAL, rozsah nastavení proudu 0-10 A, V130R50D, 214 957

3.3.3 Teoretické určení proudů elektromagnetu

Zde budou určeny pomocí vztahu (3.48) hodnoty proudu I pro δ_{1m} a δ_{2m} a porovnány s hodnotami naměřenými. Opačný postup nelze udělat, neboť před měřením nebyly hodnoty δ_{1m} a δ_{2m} známy. Nesmí se ale zapomenout, že tyto hodnoty jsou určeny pro ideální hodnotu magnetického odporu (jen odpor vzduchové mezery). Proto se zde také bude stanovovat rozsah proudů pro reálný magnetický odpor, pro rozsah hodnoty relativní permability železa $\mu_r = 2\ 000-6\ 000$.

Teoretický rozsah proudu pro první měření:

Podle vztahu (3.48) je proud, který je označen jako I_{1t} , pro ideální magnetický obvod roven:

$$I_{1t} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,988 \cdot 9,81305 \cdot 0,00305^2 \cdot ((420,095 + 2 \cdot 835,705) \times 10^{-6})}{52^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}} = 17,78 \text{ A}$$

Pro určení reálného odporu je potřeba nejdříve dopočíst hodnotu magnetického napětí U_m a poté i magnetického toku Φ . Pro to se použijí vztahy z teoretického úvodu, a postup zde jen popíšeme. Nejdříve se použije vztah (3.23) pro zjištění hodnoty U_m pro I_{1t} . Přes vztah (3.20) se určí velikost ideálního magnetického odporu pro $\delta = \delta_{1m}$. Hopkinsonovým zákonem (3.21) se určí velikost toku Φ . Při neměnném Φ a dopočteném reálném odporu (pro $\mu_r = 2\ 000-6\ 000$) se určí nová hodnota U_m podle (3.23). Díky tomu se získá nová hodnota proudu, označeného jako I_l , která se bude pohybovat v rozsahu, daným rozsahem relativní permeability μ_r .

Výsledky, získané v průběhu výpočtu:

U_m pro ideální magnetický obvod (3.23):

$$U_m = N \cdot I_{1t} = 52 \cdot 17,78 = 924,56 \text{ A}$$

Při $\mu_r = 2\,000$:

$$R_m = 5,792 \text{ MH}^{-1}; R_{mFe} = 0,085 \text{ MH}^{-1} \Rightarrow R_{mrl} = 5,877 \text{ MH}^{-1} \Rightarrow U_m = 938,146 \text{ A} \Rightarrow I_1 = 18,04 \text{ A}$$

Při $\mu_r = 6\,000$:

$$R_m = 5,792 \text{ MH}^{-1}; R_{mFe} = 0,028 \text{ MH}^{-1} \Rightarrow R_{mrl} = 5,82 \text{ MH}^{-1} \Rightarrow U_m = 929,047 \text{ A} \Rightarrow I_1 = 17,87 \text{ A}$$

Z toho plyne, že rozsah teoreticky spočteného proudu I_1 se pro první měření (mezeru $\delta = \delta_{1m}$) pohybuje v mezích $I_1 = 17,87\text{-}18,04 \text{ A}$.

Teoretický rozsah proudu pro druhé měření:

Podle vztahu (3.48) je proud I_{2t} , pro ideální magnetický obvod roven:

$$I_{2t} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,988 \cdot 9,81305 \cdot 0,00530^2 \cdot ((420,095 + 2 \cdot 835,705) \times 10^{-6})}{52^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 420,095 \times 10^{-6}}} = 30,9 \text{ A}$$

V průběhu výpočtů se zjistilo, že hodnota toku Φ , je stejná jako v případě prvního měření. Z toho plyne, že rozsah proudu I_2 se dá zjistit jako rozdíl I_{1t} a hodnot I_1 pro různé hodnoty permeability μ_r (vznik vztahu (3.56)).

Výsledky teoretického rozsahu proudu:

Při $\mu_r = 2\,000$:

$$I_2 = I_{2t} + (I_{1tr} - I_{1t}) = 30,9 + (18,04 - 17,78) = 31,16 \text{ A} \quad (3.56)$$

Při $\mu_r = 6\,000$ (3.56):

$$I_2 = I_{2t} + (I_1 - I_{1t}) = 30,9 + (17,87 - 17,78) = 30,99 \text{ A}$$

Rozsah teoreticky spočteného proudu I_2 se tedy pro druhé měření (mezeru $\delta = \delta_{2m}$) se pohybuje v mezích $I_2 = 30,99\text{-}31,16 \text{ A}$.

3.3.4 Porovnání měření a teoretických výpočtů, zhodnocení přesnosti použité metody a její zlepšení

Jak může být zpozorováno v průběhu počítání, tak se rozsahy teoreticky vypočítaných proudů I_1 a I_2 značně liší od rozsahu proudů I_{1m} a I_{2m} určených při praktickém měření. Minimální procentuální chybu výpočtu, označenou jen pro náš případ jako $\delta_{výp}$, lze určit z hodnoty proudu naměřeného I_m odečtené hodnotou nejmenšího proudu z teoreticky určeného rozsahu I . Rozdíl se podělí naměřeným proudem a vynásobí 100 pro výpočet chyby v procentech.

$$\delta_{výp} = \frac{I - I_m}{I_m} \cdot 100 \quad (3.57)$$

Minimální chyba výpočtu pro první měření (3.57):

$$\delta_{výp1} = \frac{I_1 - I_{1m}}{I_{1m}} \cdot 100 = \frac{17,87 - 15,8}{15,8} \cdot 100 = 13,1 \%$$

Minimální chyba výpočtu pro druhé měření (3.57):

$$\delta_{výp2} = \frac{I_2 - I_{2m}}{I_{2m}} \cdot 100 = \frac{30,99 - 25,75}{25,75} \cdot 100 = 20,35 \%$$

V našem případě je druhé měření důležitější, a proto je pro něj určena i maximální chyba výpočtu, která může vzniknout. Ta se získá dosazením nejmenší hodnoty z rozsahu I_{2m} a největší hodnoty I_2 do vztahu (3.57).

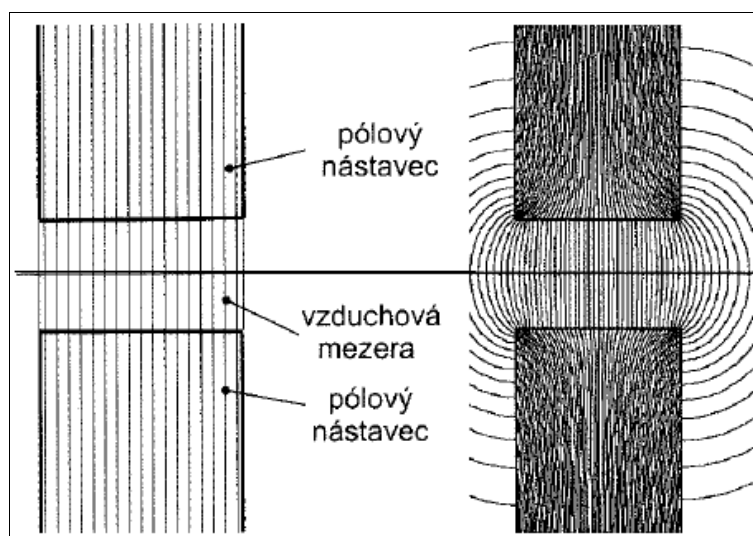
$$\delta_{výp2} = \frac{31,16 - 25,75}{25,75} \cdot 100 = 21,01 \%$$

Hodnota vypočítaného teoretického proudu se tedy pro oba případy velmi liší od skutečně naměřených hodnot. V případě druhého měření se hodnota výpočtové chyby pohybuje v rozsahu $\delta_{výp2} = 20,35-21,01 \%$. Také, jak může být zpozorováno, je tato chyba o přibližně

7 % větší oproti prvnímu měření. Z toho lze odvodit, že chyba výpočtu roste spolu s velikostí vzduchové mezery δ . Logicky lze tedy uvažovat, že chybu ve výpočtu nám nejvíce ovlivňuje mimo jiných, po cestě zanedbaných jevů, hlavně jev rozptylových toků.

Rozptylové toky, jak bylo již zmíněno v teoretickém úvodu, vznikají převážně ve vzduchových mezerách. Dochází zde k tomu, že magnetické pole, které místo toho, aby procházelo skrz vzduchovou mezerou rovnoměrně, se tzv. vyboulí. Pro lepší představu lze tento jev spatřit ve 2D ilustraci na obr. 3.18, která byla převzata (a mírně upravena) ze zdroje [40].

Jak lze z obr. 3.18 odvodit, díky rozptýlení pole, bude plocha, kterou magnetický tok prochází větší, než plocha při zanedbání tohoto jevu. Z toho a vztahu pro magnetický odpor obvodu (3.20) tedy plyne, že magnetický odpor vzduchové mezery bude daleko menší, než bylo předpokládáno. Kvůli tomu je použitá metoda výpočtu velmi nepřesná a bude lepší ji proto zpřesnit. To se dokáže udělat pomocí výpočtu vyklenutí magnetického pole.



Obr. 3.19 Magnetické pole v okolí vzduchové mezery pro idealizovaný průběh (vlevo) a průběh "skutečného" pole (vpravo) [40]

Určování, jak se vyklene magnetické pole, lze přibližně určit pomocí činitele vyklenutí magnetického toku ε . Pro něj platí empirický vztah (3.58), kde veličina d je pomocný průměr středního (popřípadě krajního) sloupku, který se určí pomocí vztahu (3.59). Vztah (3.59) platí dokud není $\delta = d$. [45]

$$\epsilon = 1 + \frac{\delta}{d} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta}{d} \right)^2 \quad (3.58)$$

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} \quad (3.59)$$

Vztahy se tedy použijí na výpočet vyklenutí u středního ($d_{stř}$) i krajního sloupku (d_{kr}) jádra jen pro výsledky z druhého měření (důležitější).

Výpočet činitele vyklenutí u středního sloupku podle (3.58) a (3.59):

$$d_{stř} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_{stř} \cdot b}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{27,95 \times 10^{-3} \cdot 29,90 \times 10^{-3}}{\pi}} = 32,62 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\epsilon_1 = 1 + \frac{\delta_{2m}}{d_{stř}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta_{2m}}{d_{stř}} \right)^2 = 1 + \frac{5,3 \times 10^{-3}}{32,62 \times 10^{-3}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{5,3 \times 10^{-3}}{32,62 \times 10^{-3}} \right)^2 = 1,15$$

Výpočet činitele vyklenutí u krajního sloupku podle (3.58) a (3.59):

$$d_{kr} = 2 \cdot \sqrt{\frac{a_{kr} \cdot b}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{14,05 \times 10^{-3} \cdot 29,90 \times 10^{-3}}{\pi}} = 23,13 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\epsilon_2 = 1 + \frac{\delta_{2m}}{d_{kr}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\delta_{2m}}{d_{kr}} \right)^2 = 1 + \frac{5,3 \times 10^{-3}}{23,13 \times 10^{-3}} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{5,3 \times 10^{-3}}{23,13 \times 10^{-3}} \right)^2 = 1,2$$

Činitele vyklenutí ϵ_1 a ϵ_2 jsou určeny a upraví se pomocí nich vztah (3.48) na vztah (3.60) pro zjištění teoretické velikosti proudu I pro $\delta = \delta_{2m}$.

$$I = \sqrt{\frac{2 \cdot m \cdot g \cdot \delta_{2m}^2 \cdot (S_2 \cdot \epsilon_2 + 2 \cdot S_1 \cdot \epsilon_1)}{N^2 \cdot \mu_0 \cdot S_1 \cdot \epsilon_1 \cdot S_2 \cdot \epsilon_2}} \quad (3.60)$$

$$I_{2t} = \sqrt{\frac{2 \cdot 0,988 \cdot 9,81305 \cdot 0,0053^2 \cdot ((420,095 \cdot 1,2 + 2 \cdot 835,705 \cdot 1,15) \times 10^{-6})}{52^2 \cdot 4 \pi \times 10^{-7} \cdot 835,705 \times 10^{-6} \cdot 1,15 \cdot 420,095 \times 10^{-6} \cdot 1,2}} = 28,33 \text{ A}$$

Po použití vztahu (3.56) se získá nová hodnota rozsahu teoretického proudu I_2 .

Při $\mu_r = 2\,000$:

$$I_2 = I_{2t} + (I_{2tr} - I_{2t}) = 28,33 + (18,04 - 17,78) = 28,59 \text{ A}$$

Při $\mu_r = 6\,000$:

$$I_2 = I_{2t} + (I_{2tr} - I_{2t}) = 28,33 + (17,87 - 17,78) = 28,42 \text{ A}$$

A nakonec chyba výpočtu $\delta_{výp2}$ se určí pomocí vztahu (3.57) pro obě meze.

Minimální chyba výpočtu $\delta_{výp2}$:

$$\delta_{výp2} = \frac{I_2 - I_{2m}}{I_{2m}} \cdot 100 = \frac{28,42 - 25,75}{25,75} \cdot 100 = 10,37\%$$

Maximální chyba výpočtu $\delta_{výp2}$:

$$\delta_{výp2} = \frac{I_2 - I_{2m}}{I_{2m}} \cdot 100 = \frac{28,59 - 25,75}{25,75} \cdot 100 = 11,03\%$$

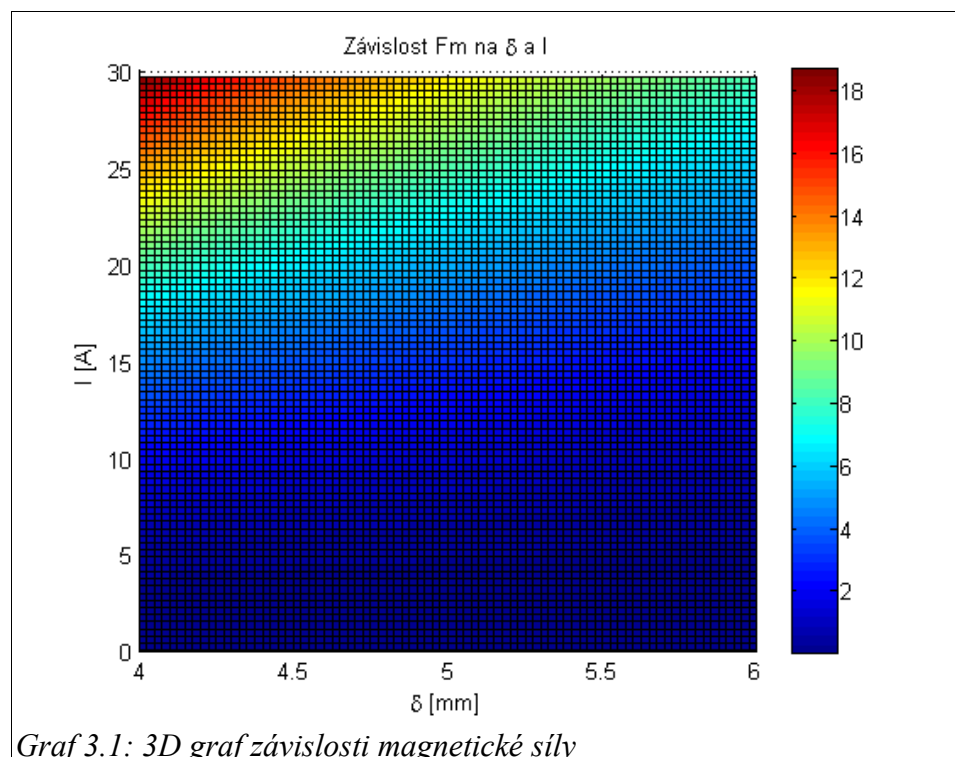
Chyba výpočtu pro druhé měření se při nezanedbání rozptylových toků pohybuje v rozsahu $\delta_{výp2} = 10,37\text{-}11,03\%$. To znamená, že při započítání odhadu rozptylových toků, se získá daleko lepší odhad skutečného chování magnetického obvodu než při jejich zanedbání. Chyba by mohla být ještě menší, pokud by bylo možné zajistit rovnoměrnou mezeru δ místo počítání aritmetického průměru z ní. Tento ruční výpočet je ale stále kvůli chybě pohybující se okolo hodnoty 10,7 % spíše přehledový a udává přibližné chování magnetického obvodu. Pro přesnější určení je zapotřebí určit jinou metodu výpočtu, při které by se popřípadě používaly specializované programy pro danou problematiku. I tak je tato použitá metoda výhodná z důvodu její jednoduchosti, neboť lze všechny hodnoty určit právě jen ručními výpočty.

Poslední velmi důležitou hodnotou je pro naši praktickou konstrukci proudová hustota J , která se vypočte pro druhé měření a rozsah proudů I_2 pomocí vztahu (3.29).

$$J = \frac{I_{2m}}{S_v} = \frac{25,75}{3,1416} = 8,2 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$$

Výsledná hodnota tedy vysvětluje rychlý ohřev závitů v průběhu druhého měření, neboť doporučená hodnota J pro trvalý provoz byla překročena více než trojnásobně ($J_{dov} = 2,5 \text{ A} \cdot \text{mm}^{-2}$). Z toho tedy i vyplývá, že případná realizace elektromagnetické levitace podle druhého měření, bude moci být v provozu jen výše zmíněných pár minut, jinak dojde k poškození izolace cívky a případnému zkratu.

Pro zajímavost na závěr se zde může ještě uvést graf závislosti F_m na obou měnících se parametrech I a δ (nebo-li 3D graf, viz graf 3.1). Hodnoty pro vykreslení δ se zvolily od 4 do 6 mm, neboť je to oblast našeho zájmu a také při hodnotách δ blízkých se 0 se síla zvětšuje až na tak velké hodnoty, že už nebylo možné barevně rozlišit hodnoty v oblasti našeho zájmu. Graf byl vykreslen v programu Matlab (matrix laboration), verzi 2013-2014. Okomentovaný program lze nalézt v přílohách k této práci.



4 Závěr

V úvodu této práce byly rozebrány základní požadavky pro magnetickou levitaci a jak je splnit. Hned poté byly uvedeny tři základní, nejčastěji používané principy pro její realizaci a do detailu popsány.

Dále bylo uvedeno, jak jsou jednotlivé principy realizovány v praxi a kde se v současné době používají. Každá popsaná realizace má stále své nedostatky, které potřebují vylepšit. Proto jsou zde uvedeny i odkazy na práce a experimenty akademiků, kteří se snaží přijít na způsoby jejich odstranění.

V teoretické části praktické realizace je nejdříve navrženo, jak lze realizovat v našich podmínkách elektrodynamický a elektromagnetický princip levitace (EDS a EMS), konkrétně se práce věnovala levitaci podle elektromagnetického principu. Pro její realizaci se začalo s návrhem cívky s jádrem z transformátorových plechů (ve tvaru písmena E), která by se dokázala silovým účinkem magnetického pole, působícím proti gravitační síle, přitáhnout na určitou vzdálenost (vzduchovou mezeru δ) k objektu, také zkonstruovaného z transformátorových plechů do tvaru písmena I. Pro realizaci levitace by poté stačilo pomocí vhodně zvoleného měniče a snímače polohy, pro zajištění střední hodnoty proudu I tak, aby odpovídala vypočítané stejnosměrné hodnotě.

Pro počítání magnetické síly navržené cívky byly navrženy dvě cesty postupu výpočtu přes magnetickou energii, pro které se muselo zavést nejdříve několik zjednodušení. Pro jeden zvolený postup byl nejprve náhodně zvolen počet závitů N a velikost vzduchové mezery δ . Obě hodnoty musely být upraveny a znovu přepočítány všechny předešlé získané hodnoty, kvůli praktickému namotání závitů na kostru cívky.

Při praktické realizaci došlo ke změně počtu závitů. Tato změna nastala hlavně kvůli mechanické tuhosti vodiče zvoleného pro realizaci, který tak omezil použitelný prostor pro závity cívky. Dále vodič v kombinaci s křehkou, skládanou konstrukcí kostry cívky způsobil její nerovnoměrný (zvlněný) povrch a částečné vysunutí od feromagnetického jádra

cívky. Kostra cívky se také, po bližším prozkoumání, mírně deformuje vlivem silových účinků magnetického pole. Díky tomu nebylo možné určit velikost vzduchové mezery δ , pokud nebyla cívka napájena. Proto se zde přešlo k praktickému měření.

Cívka byla při praktickém měření měřena pro dvě různé vzduchové mezery. První měření proběhlo na vzdálenost vysunuté a zvlněné kostry cívky, u druhého měření poté byla vložena mezi kostru a přitahovaný objekt paramagnetická destička. Pro obě měření byly zjištěny hodnoty proudu I_m pro odlišné hodnoty rovnoměrné vzduchové mezery δ_m , které byly dopočteny jako aritmetický průměr z naměřených hodnot δ po celé délce jádra.

Po praktickém měření byl proveden teoretický výpočet proudů I pro určené mezery δ_m . Tyto hodnoty se ale vlivem zanedbání rozptylových toků velmi lišily od skutečnosti. U druhého měření, která je z pohledu budoucí praktické realizace důležitější, byla určena mezera jako $\delta_m = 5,3$ mm. Zde byla hodnota teoretického proudu o více než 20 % větší než prakticky naměřený proud. Proto byla ještě provedena korekce výpočtu pomocí činitele vyklenutí magnetického toku ε (přibližný výpočet jevu rozptylového toku). Chyba výpočtu se díky tomu zmenšila na přibližně 10 %.

Cílem praktické části bylo navrhnout cívku, jejíž magnetické vlastnosti lze určit pomocí jednoduchých odvozování a výpočtů a získat tak představu o reálném chování magnetického obvodu bez použití specializovaných programů. Jak lze vidět z výsledné hodnoty chyby teoretického výpočtu, tak získaná představa o chování reálného magnetického obvodu je vzhledem k použité metodě výpočtu přijatelná.

Seznam použité literatury a informačních zdrojů

- [1] 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.
- [2] HEFLINGER, L. O. a M. D. SIMON a A. K. GEIM. Diamagnetically stabilized magnet levitation [online]. 2001 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://netti.nic.fi/~054028/images/LeviTheory.pdf>. Department of Physics and Astronomy, University of California, Los Angeles and Department of Physics and Astronomy, University of Manchester, UK.
- [3] Faradayův zákon elektromagnetické indukce :: MEF. Fyzika :: MEF [online]. Copyright © 2006 [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/304-faradayuv-zakon-elektromagneticke-indukce>
- [4] e-Fyzika.cz [online]. Copyright © [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <http://www.e-fyzika.cz/kapitoly/03-nestacionarni-magneticke-pole.pdf>
- [5] BENEŠOVÁ, Zdeňka a KARBAN, Pavel. Teoretická elektrotechnika 2 [přednáška], Plzeň: Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, 2016, [cit. 02.04.2018]
- [6] LEDVINOVÁ, Marcela. Teoretická elektrotechnika 2 pro KE,TE [přednáška], Plzeň: Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, 2017, [cit. 02.04.2018]
- [7] Lenz, E. (1834), "Ueber die Bestimmung der Richtung der durch elektrodynamische Vertheilung erregten galvanischen Ströme", *Annalen der Physik und Chemie*, 107 (31), pp. 483–494. A partial translation of the paper is available in Magie, W. M. (1963), [cit. 02.04.2018], *A Source Book in Physics*, Harvard: Cambridge MA, pp. 511–513.
- [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] Meissner effect | physics | Britannica.com. Encyclopedia Britannica | Britannica.com [online]. Copyright ©2018 Encyclop [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <https://www.britannica.com/science/Meissner-effect>
- [10] Electricalvoice. Meissner's Effect and Silsbee Rule: Meissner's Effect. *Electrical Voice* [online]. [cit. 2018-05-15]. Dostupné z: <https://electricalvoice.com/meissners-effect-and-silsbee-rule/>

- [11] SAGARDIA, SERGIO R. a R. S. SEGSWORTH. Electromagnetic Levitation Melting of Large Conduction Loads[online]. 1977 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4503361>. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS VOL. IA-13, NO. 1.
- [12] Unexpected Uses of Magnetic Levitation | COMSOL Blog. COMSOL Multiphysics® Modeling Software [online]. Copyright © 2018 by COMSOL Inc. All rights reserved [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/blogs/unexpected-uses-of-magnetic-levitation/>
- [13] A NEW TECHNOLOGY FOR LARGE SCALE ELECTROMAGNETIC LEVITATION MELTING AND CASTING OF METALS. Part II: experiments (PDF Download Available). ResearchGate | Share and discover research [online]. Copyright © 2008 [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/319700354_A_NEW_TECHNOLOGY_FOR_LARGE_SCALE_ELECTROMAGNETIC_LEVITATION_MELTING_AND_CASTING_OF_METALS_Part_II_experiments
- [14] Electrodynamic bearing. *Revolvy* [online], 1 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Electrodynamic%20bearing&item_type=topic&sr=50
- [15] MAYER, D.: Magnetická levitace a její využití. *Elektro*, 2003, č. 1., [cit. 2018-04-02]
- [16] LEMBKE, Torbjörn A. Design and Analysis of a Novel Low Loss Homopolar Electrodynamic Bearing [online]. Stockholm, 2005 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.magnetel.se/Dokument/PhDThesis.pdf>. Doctoral Dissertation. Submitted to the School of Electrical Engineering, KTH, in partial fulfilment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy.
- [17] DUMONT, Corentin, Virginie KLUYSKENS a Bruno DEHEZ. Null-Flux Radial Electrodynamic Bearing[online]. IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 50, NO. 10, 2014 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=489927>. Center for Research in Energy and Mechatronics, Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering, Université Catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve 1348, Belgium.
- [18] Impinna F., Detoni J.G., Tonoli A., Amati N. (2014). Test and Theory of Electrodynamic Bearings Coupled to Active Magnetic Dampers. [cit. 2018-04-02] In: 14th International Symposium on Magnetic Bearings, Linz, Austria, 11-14 August 2014. pp. 263-268
- [19] LAITHWAITE, ERIC R. Linear Electric Machines - A Personal View [online]. FELLOW, IEEE, 1975 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1451664>
- [20] Linear Induction Motor. *Circuit globe* [online].[cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://circuitglobe.com/linear-induction-motor.html>

- [21] SAHARAN, Sunil. Linear Induction Motor : Working, Application And Construction. [online]. 11. 7. 2010, 1 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://www.sunilsaharan.in/article.php?id=25>
- [22] ACCETTA, A., M. C. DI PIAZZA, M. LUNA a M. PUCCI. Electrical Losses Minimization of Linear Induction Motors Considering the Dynamic End-effects [online]. Palermo, Italy, 2017 [cit. 2018-04-03]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=8096740>. Institute of Intelligent System for the Automation (ISSIA)-CNR, uos of Palermo.
- [23] Carriage from Birmingham Airport's gliding Maglev train sells for £25,100. *Birmingham Live* [online], 27 November 2010 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.birminghammail.co.uk/news/local-news/carriage-from-birmingham-airports-gliding-maglev-136355>
- [24] The magnetic attraction of trains. *Sci/Tech* [online]. 1999, 9. 11. 1999, 1 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/488394.stm>
- [25] UrbanRail.Net > North America > Canada > British Columbia > Vancouver Skytrain. [urbanrail.net](http://www.urbanrail.net) > metro - subway - light rail[online]. Copyright © John Day [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: <http://www.urbanrail.net/am/vanc/vancouver.htm>
- [26] Mechatronic design of a z-φ induction actuator, P. de Wit, J. van Dijk, T. Blomer, and P. Rutgers, proc. of IEE EMD '97 Conference. [cit. 2018-04-28] Cambridge 1997. pp. 279-283,1-3 Sept. 1997
- [27] Fast Track. *CIVIL ENGINEERING MAGAZINE* [online]. November 2004, 1 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://thetransitcoalition.us/Civil%20Engineering%20Magazine%20-%20November%202004.htm>
- [28] MAYER, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů: (1.). *Elektro* [online]. 11/2007, 3 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/pokroky-ve-stavbe-magneticky-levitovanych-dopravnich-systemu-1--12203>
- [29] MAYER, Daniel. Pokroky ve stavbě magneticky levitovaných dopravních systémů: (2 – dokončení). *Elektro* [online]. 01/2008, 6 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/pokroky-ve-stavbe-magneticky-levitovanych-dopravnich-systemu-1--12203>
- [30] Stanford University - The Global Climate and Energy Project - energy research, climate change, global climate, global warming, greenhouse emissions, greenhouse gases, hydrogen economy, hydrogen power, renewable energy [online]. Copyright © [cit. 02.04.2018]. Dostupné z: https://gcep.stanford.edu/pdfs/ChEHeXOTnf3dHH5qjYRXMA/09_Post_10_1_1_trans.pdf
- [31] 600 Watt, 3d-printed, Halbach Array, Brushless Motor. *Make Sea* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z:

- https://www.makesea.com/web/cla/~50612/profile/-/asset_publisher/Rl6cqGtVw4Vb/content/660-watt-3d-printed-halbach-array-brushless-motor/pop_up?_101_INSTANCE_Rl6cqGtVw4Vb_viewMode=print&_101_INSTANCE_Rl6cqGtVw4Vb_languageId=en_U
- [32] Halbach Array. *China-Magnets-Source-Material.com* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.china-magnets-source-material.com/en/proshow/Halbach-Array-Magnets.html>
- [33] A New Approach for Magnetically Levitating Trains - and Rockets. *Popular Mechanics* [online]. May 1998, 3 [cit. 2018-04-28]. Dostupné z: <https://str.llnl.gov/str/Post.html>
- [34] POST, Richard F. a Dmitri D. RYUTOV. The Inductrack Approach to Magnetic Levitation [online]. 2000 [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.askmar.com/Inductrack/2000-4%20Magnetic%20Levitation.pdf>. Doctoral Dissertation. Lawrence Livermore National Laboratory P. O. Box 808, Mail Stop L-644 Livermore, CA 94551, USA.
- [35] Germany Scraps Transrapid Rail Plans. *DW* [online]. Germany, 2008 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.dw.com/en/germany-scraps-transrapid-rail-plans/a-3219174>
- [36] General Electric, Japan Rail and Mitsui all aboard high-speed rail proposal. *Financial Review* [online]. 2016 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <http://www.afr.com/brand/rear-window/general-electric-japan-rail-and-mitsui-all-aboard-highspeed-rail-proposal-20160512-gotq5d>
- [37] PFANNER, Eric. Japan Pitches Its High-Speed Train With an Offer to Finance. *The New York Times* [online]. 2013 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://www.nytimes.com/2013/11/19/business/international/japan-pitches-americans-on-its-maglev-train.html>
- [38] KŮS, Václav. Pohony a výkonová elektronika [přednáška], Plzeň: Fakulta elektrotechnická Západočeské univerzity v Plzni, 2017 [cit. 2018-04-30]
- [39] VACHTL, Daniel, Dobroslav KOVÁČ a Daniel MAYER. *Thompson Levitating Ring*. [cit. 2018-04-30], Faculty of Electrical Engineering, University of West Bohemia in Pilsen, Univerzitní 26, 306 14 Plzeň, Czech Republic.
- [40] MAYER, Daniel. *Aplikovaný elektromagnetismus*. Plzeň, Česká republika: Kopp, 2011 [cit. 2018-04-30]. ISBN 978-80-7232-436-1.
- [41] HAVIAR, Stanislav. *Technická fyzika pro FEL [cvičení]*, Plzeň: Fakulta aplikovaných věd v Plzni, 2016 [cit. 2018-04-30]
- [42] Návrh transformátoru – zjednodušený. *Studijní materiály elektro: pro učební obor elektrikář – slaboproud* [online]. 2010, 2010 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <http://www.mbest.cz/wp-content/uploads/2013/01/V%C3%BDpo%C4%8Det-transform%C3%A1toru-zjednodu%C5%A1en%C3%BD.pdf>

- [43] Electrical steel. *Revolvy* [online]. [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: https://www.revolvy.com/main/index.php?s=Grain-oriented%20electrical%20steel&item_type=topic
- [44] RAO, Dantam K. *BHmag - Magnetic Material Database* [online]. 2212 Lynnwood Dr., Niskayuna, NY 12309. USA, 2013 [cit. 2018-04-30]. Dostupné z: <https://magweb-website-magwebusa.netdna-ssl.com/wp-content/uploads/2013/05/BHmag-User-Manual.pdf>
- [45] KRÁL J., VANĚK J., *Elektromagnetické přístroje*. Skriptum VUT v Brně, 1984 [cit. 2018-05-18]

Přílohy

Okomentovaný program vytvořený v MATLABu pro vykreslení potřebných jednotlivých závislostí magnetické síly na měnícím se proudu a vzduchové mezeře.

```
clear
clc

N = 52; % Pocet zavitu
mi_0 = 4*(3.141592654)*1e-7; % Hodnota absolutni
% permeability
S1 = 835.705e-6; % Plocha vzduchove mezery
% stredniho sloupku
S2 = 420.095e-6; % Plocha vzduchove mezery
% krajniho sloupku
E1 = 1.15; % Cinitel vyklenuti pro
% stredni sloupek
E2 = 1.20; % Cinitel vyklenuti pro
% krajni sloupek

% Zavislost magneticke sily na
% menicim se protekajicim
% proudu a menici se vzduchove
% mezere(3D graf)

figure
I5=0.1:0.3691358:29.6308642; % Promenny proud
delta3=0.00400:0.000025:0.00600; % Promenna delta
deltapom = delta3.*1000; % Pomocna delta pro
% vykresleni grafu
delta4 = delta3(:); % Prevedeni delty ze radkoveho
% vektoru na sloupcovy
F5 = zeros(81); % Vytvoreni matice Fm, docasne
% naplnenou 0 o rozmeru 81x81

for k = 1:81
    for l = 1:81
F5(k,l)=((I5(k).^2.*N.^2.*mi_0.*S1.*E1.*S2.*E2)./
(2*(delta4(l).^2).*(S2.*E2+2.*S1.*E1)));

% Vytvoreni dvou cyklu for pro
% zaplneni cele matice vypoctenymi
% hodnotami Fm pro ruzne delta a I
    end
end
```

```
surf(deltapom,I5, F5);           % Vykreslení 3D grafu
title('Závislost Fm na \delta a I'); % Legenda
xlabel('\delta [mm]');
ylabel('I [A]');
zlabel('Fm [N]');
colorbar
view(2)
```