



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY

A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY

A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

ZAŘÍZENÍ PRO NASTAVENÍ POLOHY DRŽÁKU KARTÁČŮ

EQUIPMENT FOR POSITION ADJUSTMENT OF BRUSHES HOLDER

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Josef Škoda

VEDOUcí PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Mach, Ph.D.

BRNO 2018

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Josef Škoda

ID: 186728

Ročník: 3

Akademický rok: 2017/18

NÁZEV TÉMATU:

Zařízení pro nastavení polohy držáku kartáčů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s teorií stejnosměrných strojů.
2. Seznamte se s navrhováním elektromagnetů.
3. Proveďte analytický návrh elektromagnetu, který bude součástí zařízení pro natáčení držáku kartáčů.
4. Analytický návrh elektromagnetu ověřte pomocí simulací metodou konečných prvků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] KOPYLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů: celostátní vysokoškolská učebnice pro elektrotechnické fakulty vysokých škol technických. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1988, 685 s.

[2] BAŠTA, J.; KULDA, V.; DVOŘÁK, F. a kol. Měření na elektrických strojích – část 3. měření na stejnosměrných strojích, Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1961, 250 s.

[3] CHMELÍK, K. a VESELKA, F. Kluzný kontakt v elektrických strojích. Ostrava: Key Publishing, 2007. ISBN 978-80-87071-59-5.

Termín zadání: 5.2.2018

Termín odevzdání: 28.5.2018

Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Konzultant:

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na problematiku životnosti stejnosměrných motorů. Po teoretickém rozboru byly navrženy úpravy, které pomůžou nastavit správnou polohu kartáčů a tím i vylepší komutaci i celkové vlastnosti stejnosměrného motoru.

Klíčová slova

Stejnoseměrný motor, komutátor, elektromagnet, natočení kartáčů.

Abstract

My bachelor's thesis is aimed at problematics of lifetime of DC motor. After a theoretical analysis the improvements were designed which can adjust the right position of the brushes and this will also improve commutation and the general properties of the DC motor.

Keywords

DC motor, commutator, electromagnet, turning of brushes

Bibliografická citace:

Škoda, J. Zařízení pro nastavení polohy držáků kartáčů. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2018. 53 s.
Vedoucí práce: Ing. Martin Mach, Ph.D.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou závěrečnou práci na téma Zařízení pro nastavení polohy držáků kartáčů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

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

V Brně dne **22. května 2018**

.....

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Martinu Machovi, PhD. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne **22. května 2018**

.....
podpis autora

Obsah

Seznam příloh	12
1 Úvod	13
2 Stejnosměrné stroje	14
2.1 Konstrukce stejnosměrného stroje	14
2.1.1 Komutace	14
2.1.2 Komutační proces	15
2.1.3 Reakce kotvy	16
2.1.4 Kontrola komutátoru	18
2.1.5 Komutace a její vyšetřování	18
2.2 Zlepšení komutace	20
2.2.1 Natočení kartáčů	20
2.2.2 Návrh zlepšení komutace	20
3 Návrh stejnosměrného elektromagnetu	22
3.1 Elektromagnetické pole	22
3.2 Elektromagnety	22
3.2.1 Magnetický obvod	23
4 Návrh elektromagnetu	26
4.1 Technický popis	26
4.2 Návrh pomocí programu FEMM	28
4.2.1 Stanovení geometrie elektromagnetu	28
4.2.2 Postup vytvoření návrhu	29
4.2.3 Návrh modelu v programu FEMM	30
4.2.4 Nastavení materiálů	30
4.2.5 Zpracování výsledků	33
4.3 Analýza stejnosměrného elektromagnetu	34
4.3.1 Tvar „CI“ verze návrhu č.1	34
4.3.2 Tvar „CIx“ – verze návrhu č.2	40
4.3.3 Tvar „I“ – verze návrhu č.3	43
4.3.4 Tvar „I“ – verze návrhu č.4	47
5 ZÁVĚR	51
Literatura	52
Seznam symbolů, veličin a zkratk	53

Seznam obrázků

<i>Obr.2.1.1: Princip funkce komutátoru a průběh indukovaného napětí</i>	14
<i>Obr.2.1.2: Zeslabení pole magnetů reakcí kotvy při natočení kartáčů</i>	15
<i>Obr.2.1.3: Průběh proudu v komutující cívice</i>	16
<i>Obr.2.1.4: Reakce kotvy I</i>	17
<i>Obr.2.1.5: Reakce kotvy II</i>	17
<i>Obr.2.1.6: Reakce kotvy při skutečném provozním stavu a natočení kartáčů</i>	17
<i>Obr.2.1.7: Skutečný průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře</i>	18
<i>Obr.2.2.1: Návrh elektromagnetického mechanismu</i>	21
<i>Obr.2.2.2: Natočení nosiče kartáčů pomocí elektromagnetu</i>	21
<i>Obr.3.2.5: S Magnetický průběh v dlouhé magnetické mezeře</i>	23
<i>Obr.4.1.1: Elektromagnet typ „CI“ osazen pružinami</i>	26
<i>Obr.4.1.2: Elektromagnet typ „I“</i>	27
<i>Obr.4.2.1: Návrh rozmístění</i>	28
<i>Obr. 4.2.2: Volba typu operace</i>	29
<i>Obr.4.2.3: FEMM – základní nastavení</i>	29
<i>Obr.4.2.4: Navržený model elektromagnet</i>	30
<i>Obr.4.2.5: Volba materiálu</i>	31
<i>Obr.4.2.6: Nastavení cívky elektromagnetu</i>	31
<i>Obr.4.2.7: Nastavení magnetizační charakteristiky oceli</i>	32
<i>Obr.4.2.8: B-H charakteristika materiálu M700-50A</i>	32
<i>Obr.4.2.9: Okrajové podmínky</i>	32
<i>Obr.4.2.10: Působení síly elektromagnetu na jádro</i>	33
<i>Obr.4.2.11: Působení síly elektromagnetu na jádro</i>	33
<i>Obr.4.3.1: Elektromagnet typ „CI“</i>	34
<i>Obr.4.3.2: Model elektromag, pole v programu FEMM – návrh č.1 „CI“</i>	37
<i>Obr.4.3.3: Měřená plocha magnetické indukce</i>	38
<i>Obr.4.3.4: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly</i>	39
<i>Obr.4.3.5: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	39
<i>Obr.4.3.6.: Elektromagnet typ „CI“</i>	40
<i>Obr.4.3.7: Model elektromagnetického pole v programu FEMM</i>	40
<i>Obr.4.3.8: Měřená plocha magnetické indukce</i>	41
<i>Obr.4.3.9: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly</i>	42
<i>Obr.4.3.10: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	42
<i>Obr.4.3.11: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	43
<i>Obr.4.3.12.: Elektromagnet typ „I“</i>	43
<i>Obr.4.3.13: Model elektromagnetického pole v programu FEMM</i>	44

<i>Obr.4.3.14: Měřená plocha magnetické indukce</i>	45
<i>Obr.4.3.15: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly</i>	46
<i>Obr.4.3.16: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	46
<i>Obr.4.3.17: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	47
<i>Obr.4.3.18: Model elektromagnetického pole v programu FEMM</i>	48
<i>Obr.4.3.19: Měřená plocha magnetické indukce</i>	48
<i>Obr.4.3.20: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly</i>	49
<i>Obr.4.3.21: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci</i>	50

Seznam tabulek

<i>Tab. č.1 : Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.1</i>	38
<i>Tab. č.2: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.2</i>	41
<i>Tab. č.3: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.3</i>	45
<i>Tab. č.4: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.4</i>	49

Seznam příloh

Příloha 1.: DC motor typ P2XR492 – výkres

1 ÚVOD

Náplní a cílem této práce je vypracování návrhu možnosti zlepšení komutace, která bude mít vliv na životnost stejnosměrného stroje. Prvním krokem řešení tohoto zadání je seznámit se s daným strojem, pochopit jeho principy a odhalit problémy, na které poté budu moci navázat s případným řešením. Důležitým zdrojem informací jsou dostupné zdroje, jako je literatura od autorů, kteří se touto nebo blízkou problematikou zabývali.

Jako zkušební stroj, který bude předmětem šetření, jsem si zvolil motor konstruovaný ve firmě ATAS Náchod typ P2XR492. Jedná se o stejnosměrný motor o jmenovitém napětí 24 V se zatížením pro oba smysly otáčení (viz. příloha č.1).

Na začátku je seznámení se stejnosměrným motorem z hlediska jeho funkčních procesů, kde je vysvětlen pojem komutace, činnost kartáčů a elektromagnetické procesy.

Dalším krokem je stanovení problému, ke kterému dochází při komutaci a návrh řešení. Pro pochopení bude následovat grafické zobrazení řešení podpořené simulací v dostupném softwarovém programu.

2 STEJNOSMĚRNÉ STROJE

2.1 Konstrukce stejnosměrného stroje

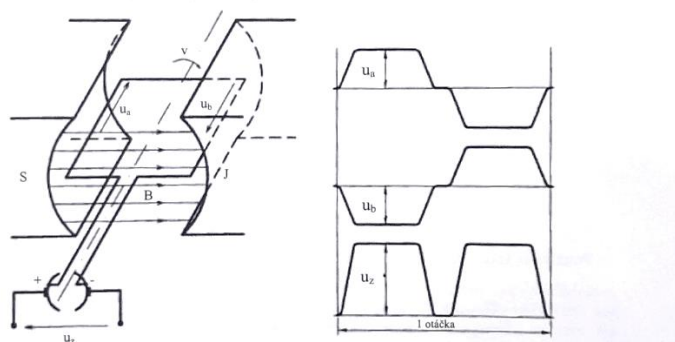
Stejnoscsměrný motor může být využit buď jako motor, nebo jako dynamo. Základní části motoru jsou rotor a stator. Uspořádání statoru je složeno z pólů budících vinutí. Buzení pólů je zajištěno stejnosměrným proudem, nebo permanentním magnetem.

Po obvodu se střídá polarita hlavních pólů. Mezi těmito póly může být stator stejnosměrného stroje vybaven pomocnými komutačními póly se střídavou polaritou. Rotor je složen z navzájem odizolovaných plechů, které jsou pevnou součástí na hřídele. V drážkách rotorových plechů jsou navinuty cívky, které mají oba konce napojeny na komutátorové lamely, které jsou navzájem odizolované. Počet kartáčů, které kloužou po komutátoru, odpovídá počtu hlavních pólů na statoru. Střídají se kladné a záporné kartáče, a i ve stejném smyslu jsou zapojeny na svorkách stroje [3].

2.1.1 Komutace

Podstatou komutace je měnící se proud na cívce kotvy, která je na obou koncích přes lamely komutátoru zkratována sběracím kartáčem.

Pro názornou představu můžeme činnost stejnosměrného stroje sledovat na modelu s jednou smyčkou na rotoru. Proudění siločar magnetického toku směřuje ze severního pólu, přes vzduchovou mezeru, železo motoru, druhou vzduchovou mezeru k jižnímu pólu a jsou uzavřeny vnějším magnetickým obvodem. Smyčka je ukotvena svými konci na dvě lamely komutátoru. Pokud budeme otáčet komutátorem úhlovou rychlostí ω_{mech} , tak se bude ve smyčce indukovat napětí podle indukčního zákona ($u = Blv$).

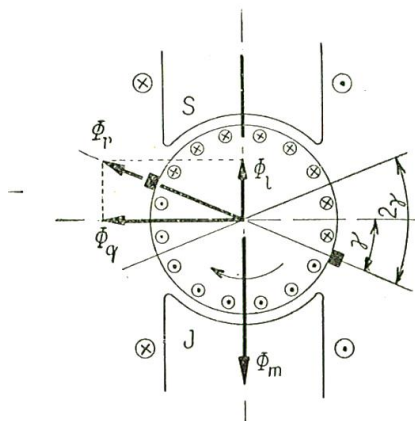


Obr. 2.1.1.: Princip funkce komutátoru a průběh indukovaného napětí [1].

Na kartáčích je pulsující stejnosměrné napětí $u_z = u_a + u_b$. Zde komutátor působí jako usměrňovač. Pokud se vinutí bude skládat z mnoha cívek zapojených v sérii, dostaneme napětí prakticky nezvlněné [1].

Pokud připojíme ke kartáčům zdroj stejnosměrného napětí, smyčkou začne protékat proud a na vodiče smyčky bude působit síla, která zapříčiní pohyb smyčky. Při natočení smyčky o více jak 90° , změní se tok proudu ve vodičích, ale protože se vodič dostal pod opačný pól, zůstává působící síla stejná. Pro plynulý pohyb je na rotoru zastoupeno několik cívek rovnoměrně rozložených po celém obvodu [3].

Vinutí kotvy stejnosměrného stroje je obvodově uzavřené s výstupem na jednotlivé lamely, které dělí toto vinutí na paralelní větve. Pokud se kotva otáčí, přecházejí cívky z jedné paralelní větve do druhé. Tento stav nastává v neutrální oblasti osy, kdy se v magnetickém poli neindikuje žádné napětí. Pokud by stroj byl bez zátěže, nachází se neutrální osa uprostřed mezi póly. Stroj pracující se zátěží má vlivem reakce neutrální osu posunutou u motoru proti směru otáčení o úhel γ a v případě dynama naopak.



Obr.2.1.2.: Zeslabení pole magnetů reakcí kotvy při natočení kartáčů [6].

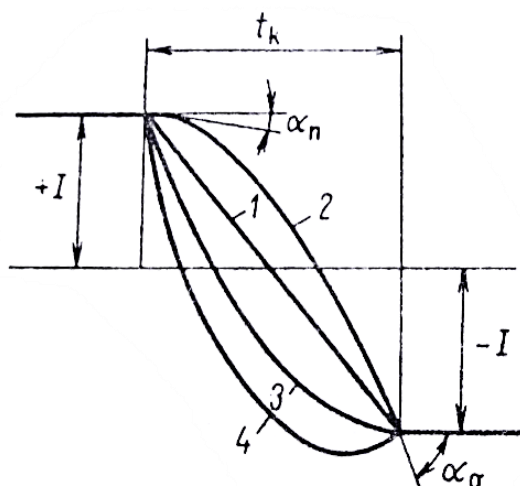
2.1.2 Komutační proces

Zjednodušeně předpokládejme, že máme kartáč stejně široký jako lamela a smyčkové vinutí. Kotva se pootočí o vzdálenost šířky lamely a kartáč dosedne na následující lamelu. Při přechodu z lamely 1 na lamelu 2 se přemění proud z $+I$ na $-I$. Tato změna proběhne za určitý čas, kterou označujeme tk . Při zanedbatelné šířce izolace mezi lamelami můžeme dobu komutace vypočítat podle vzorce 2.1 [2]:

$$tk = \frac{bk}{vk} \quad (2.1)$$

kde: bk – šířka kartáče
 vk – obvodová rychlost komutátoru

Tento proces představuje ideální komutaci, ke které se v praxi můžeme přiblížit. Nazýváme tuto komutaci přímkovou (odporovou)
Lineární průběh komutace je vychýlen o působení fyzikálních vlivů, které přímku vychýlí do překomutovaného nebo podkomutovaného stavu.



Obr.2.1.3.: Průběh proudu v komutující cívice [2].

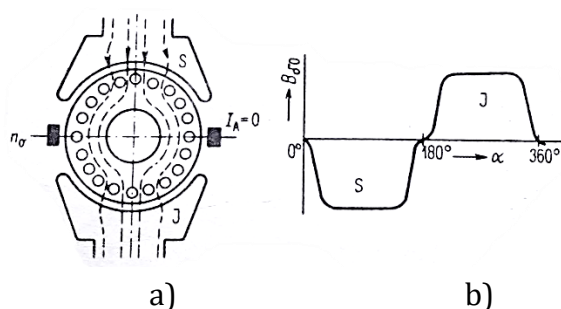
Legenda: 1 – přímková (odporová) komutace.
2 – indukční komutace, 3 – upravený průběh komutace, 4 – překomutováno.

Při přechodu z jedné lamely na druhou se kartáče nacházejí v neutrální ose. Ve vyzkratované komutující cívice se přestane indukovat napětí, ale indukuje se zde reaktanční napětí u_k . Podle Lencova pravidla se reaktanční napětí snaží zabránit změně proudu, proto se komutace na cívice zpočátku zpomalí a poté zrychlí, aby celkový čas odpovídal hodnotě t_k . Tato komutace vytváří nepříznivé vlivy, zejména v konečné fázi zrychlení, kdy lamely opouštějí kontakt s kartáčem, a indukuje se zde větší množství reaktančního napětí u_k . To má za příčinu vznik nežádoucího jiskření mezi kartáčem a komutátorem a vznik přídavného příčného proudu v komutujícím obvodu. Tento průběh se nazývá podkomutovaný.

2.1.3 Reakce kotvy

Pokud prochází vodiči kotvy proud, vznikne magnetomotorické napětí, které vyvolává magnetický tok. Toto působení je důsledkem reakce kotvy.

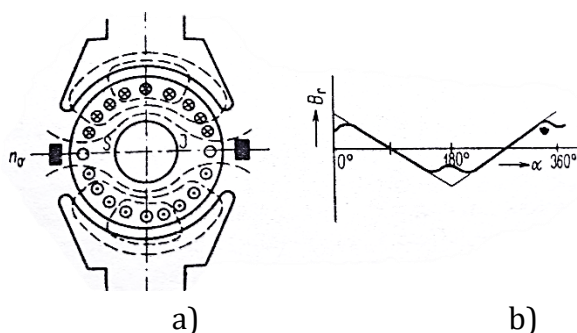
Předpokládejme, že vinutím kotvy neprochází proud a stroj je buzen pouze proudem I_b . Neutrální osa n je kolmá na osu hlavních pólů. Magnetické pole je zde tvořeno hlavními póly [2].



Obr.2.1.4. : Reakce kotvy

a) proud kotvy I_A , b) průběh magnetické indukce [2].

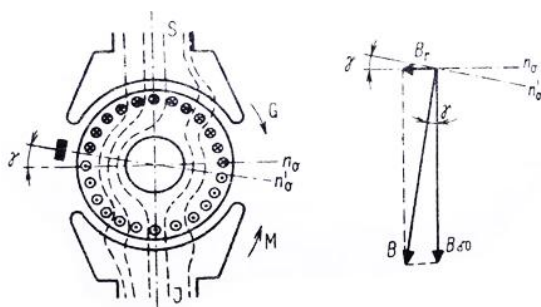
Po odpojení budícího vinutí, vznikne magnetické pole, které magnetuje stroj příčně. Průběh magnetické indukce B_r , vzniklé reakcí kotvy, je dán magnetickým odporem, který je nejmenší pod póly a největší mezi póly. Zde se skutečný průběh magnetické indukce B_r liší od teoretického průběhu, který je přímkový [2].



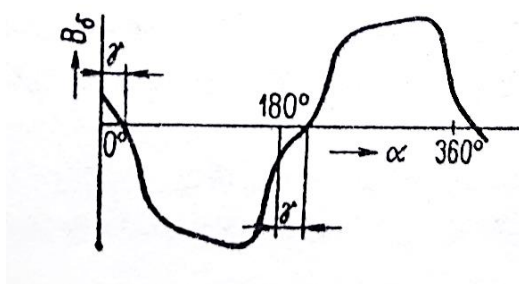
Obr.2.1.5.: Reakce kotvy II

a) budící proud I_b , b) průběh magnetické indukce [2].

Skutečný provozní stav se ve stroji projeví oběma popsány případy. Na průběhu indukčních čar výsledného magnetického pole je vidět posun neutrální osy o úhel γ . O stejný úhel musíme také natočit kartáče, abychom zachovali jejich neutrální polohu. U dynama je posunutí po směru točení a u motoru proti směru točení [2].



Obr.2.1.6. : Reakce kotvy při skutečném provozním stavu a natočení kartáčů [2].



Obr.2.1.7. : Skutečný průběh magnetické indukce ve vzduchové mezeře [2].

Při změně proudu se v komutující cívce indukují reaktanční napětí:

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \quad (2.2)$$

L_c - vlastní indukčnost komutující cívky

Pro přímkovou komutaci platí:

$$U_r = L_c \frac{2I}{T_k} \quad (2.3)$$

T_k – časová změna proudu za dobu komutace z hodnoty $+I$ na $-I$ [1].

2.1.4 Kontrola komutátoru

Předpokladem správného chodu komutátoru je dobrý mechanický kontakt dosedacích ploch kartáčů s povrchem komutátoru. Kartáč reaguje i na drobné mikromechanické nedokonalosti lamel. Komutátor při otáčkách nesmí vlivem nesouososti hřídele s komutátorem házet. Lamely nesmějí vyčnívat nebo být propadlé. To vše má vliv na případném nežádoucím jiskření a opalování, a to už při rozdílech v tisícinách milimetrů [7].

2.1.5 Komutace a její vyšetřování

Elektrické stroje s komutátorem musí pracovat při zaběhnutých kartáčích a libovolném zatížení bez nežádoucího jiskření a bez poškození povrchu kartáčů a komutátoru. Pokud přetížíme stroj proudem o 1,5násobek I_n po dobu 2 min. ve spojení nakrátko, nesmí dojít k opálení komutátoru a povrch komutátoru bez dalšího čištění a oprav je schopen dalšího provozu.

Pro posouzení kvality komutace identifikujeme jiskření, které podle stupně intenzity dokážeme rozlišit. Předpokládáme, že stroj pracuje v klidu, nedochází ke chvění, je v dobrém stavu, prostředí je čisté bez prachu, kartáče jsou zaběhnuté a nařízeny do správné polohy se správným přitlakem a přiměřenou vůlí v krabičkách držáků [7].

2.1.5.1 Perlení

Jedná se o nepatrné jiskření ve tvaru jiskřiček způsobující žhavé částice zplynované při volném pohybu, projevuje se obvykle na vnější odbíhající hraně kartáče. Toto jiskření nepoškozuje komutátor [7].

2.1.5.2 Zelenavé jiskření

Způsobuje elektrickými obloučky na odbíhající straně z vytvořených plynů Bílé až mírně červené jiskření – na odbíhající hraně způsobené jemnými částicemi uhlíkového materiálu rozžhavené přerušováním proudu na kartáčích [7].

2.1.5.3 Jiskření až praskání

Jsou viditelné hrubší jiskry elektricky rozžhavených částic, vystřelovaných velkou rychlostí vysokým tlakem plynů z dosedací plochy kartáče na komutátoru. Původ je v prudkém zplynění uvolněných částic uhlíkového materiálu kartáče nebo mědi z komutátoru při přechodu proudu.

Lokální žhavení kartáčů do červena – způsobené proudovým přetížením a spojené s praskáním a vystřelováním jisker [7].

2.1.5.4 Projiskření (kruhový oheň)

Vzniká vzplanutím částic a prachu usazeného mezi lamelami komutátoru při nebezpečném vysokém středním lamelovém napětí nebo velkém proudovém přetížení při zkratu nebo proudových nárazech. Zlepšení lze dosáhnout sražením hran lamel po jejich délce. Může také dojít k přemostění od katodické hrany lamely k anodické hraně sousední lamely, což má za příčinu uhlíkový a měděný prach.

Kontrolu komutace je nutné kontrolovat v ustáleném teplém stavu stroje, kdy se na povrchu komutátoru vytvoří patina. Proto je zapotřebí pozorovat stroj při práci v plném zatížení, které odpovídá provoznímu namáhání [7].

2.2 Zlepšení komutace

Reaktanční napětí je nutné potlačit komutačním napětím o stejné velikosti.

Abychom vylepšili vlastnosti komutace a tím potlačili škodlivé vlivy reaktančního napětí, musíme posunout komutující cívku do magnetického pole s odpovídající magnetickou indukcí, která zaručí v cívce vznik komutačního napětí. Jsou dva způsoby, kterými můžeme dosáhnout tento stav. První způsob, který nás bude zajímat, je natočení kartáčů z neutrální polohy, v případě motoru, proti směru točení. Druhý způsob, který se využívá u větších motorů je osazení statorového vinutí komutačními (pomocnými) póly.

2.2.1 Natočení kartáčů

Pokud bude stejnosměrný stroj pracovat naprázdno, při nastavené neutrální poloze bude jeho komutace dokonalá. Při zátěži se v motorickém režimu posune osa neutrální polohy o úhel γ . Tímto natočením neovlivníme vlastní reaktanční napětí komutující cívk. Posunutím kartáčů o další úhel β se komutující cívce dostane odpovídající komutační napětí s příslušnou indukcí ze sousedního pólu. Správná velikost úhlu se stanovuje experimentálně podle nejmenšího jiskření na komutátoru.

Natočení kartáčů je rychlá a jednoduchá úprava, avšak nedá se využít u strojů se střídáním směru otáček, kdy nastavení musí být v neutrální poloze.

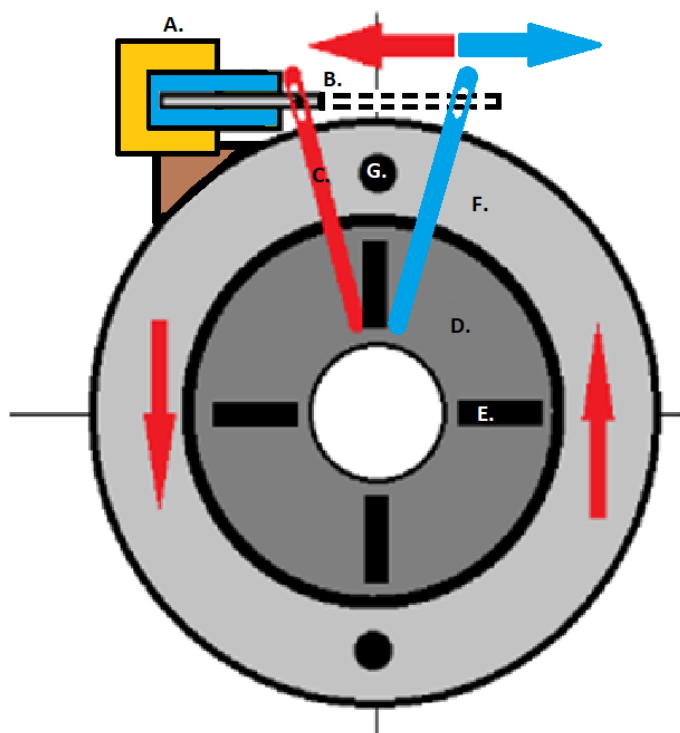
2.2.2 Návrh zlepšení komutace

Z uvedeného obsahu je patrné, že komutace se zlepší natočením kartáčů o požadovaný úhel, který nám potlačí vliv reaktančního napětí a přiblíží se vlastnostem, které má motor nastavený v neutrální poloze při chodu naprázdno. To znamená, že naší snahou bude přiblížení se k lineární komutaci.

Jedním z možných řešení se naskytá v možnosti natočení nosiče kartáčů pomocí síly, kterou vyvolá instalovaný elektromagnet. Při průchodu proudem vodičem by se nosič kartáčů natočil v motorickém režimu proti směru otáčení, a to přitažením pomocí elektromagnetické síly. Při změně polarity, a tedy opačném směru otáčení, by došlo k přerušení napětí, elektromagnetická síla by přestala působit a ocelové jádro by pomocí pružiny posunulo nosič kartáčů do optimální polohy pro daný směr otáčení.

Schéma mechanické jednotky posuvu kartáčů do optimální polohy je na obr. 2.2.1.

Zde je znázorněn elektromagnet A na levé, který přitahuje ocelové jádro B podle polarity a směru otáčení motoru. Ocelové jádro posouvá unašeč C , který ovládá střední část nosiče D kartáčů. Nosič kartáčů je pohyblivá část, sesazena do obvodového nosiče F . Tento obvodový nosič je pevně ukotven k ložiskovému štítu motoru. Mezi nosiči D a F je kluzné ložisko, pro snadné ovládání a stabilní nastavení kartáčů do žádané polohy.



Legenda:

A - elektromagnet

B – jádro elektromagnetu

C – unašeč

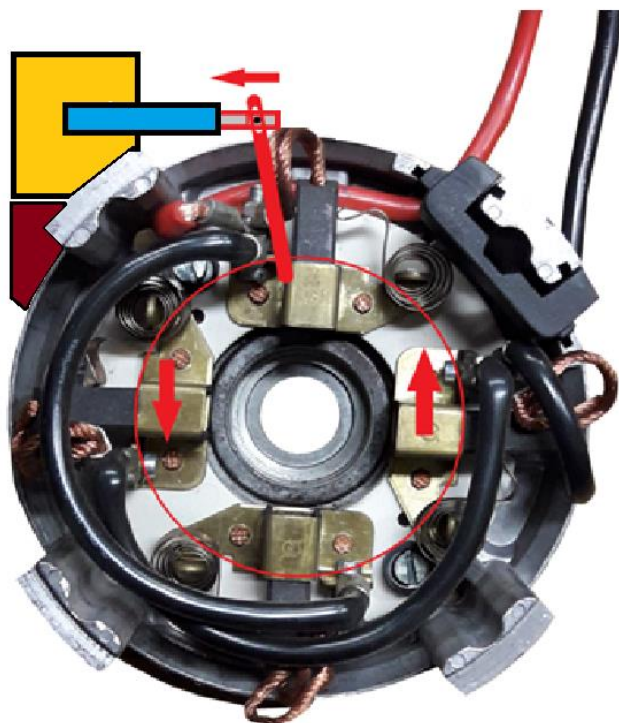
D – nosič kartáčů

E – kartáče

F – obvodový nosič

*G – kotevní šrouby
obvodového nosiče*

Obr.2.2.1 : Návrh elektromagnetického mechanismu



Obr.2.2.2 : Natočení nosiče kartáčů pomocí elektromagnetu

3 NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO ELEKTROMAGNETU

3.1 Elektromagnetické pole

Před návrhem mechanismu tvořeném elektromagnetem, nejprve přiblížíme samotnou teorii elektromagnetického pole.

Elektromagnetické pole nás obklopuje z mnoha stran a my jsme jeho součástí v různých formách působení. Působí na nás z vesmíru, přenášíme ho anténami a vytváříme je každým úsekem elektrického vedení. To pole je nositelem energie schopné konat práci. Má také svoji hmotnost, kterou vyjadřuje Einsteinův vztah:

$$W = mc^2 \quad (3.1)$$

Kvantitativně jsme schopni hodnotit pole podle sil, které působí na náboje a elektrické proudy.

Elektromagnetické pole působí na bodový náboj Q pohybující se relativní rychlostí v k jisté pozorovací soustavě silou, která se nazývá Lorentzova [9].

$$\mathbf{F} = Q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad [\text{N}; \text{C}, \text{V/m}, \text{m/s}, \text{T}] \quad (3.2)$$

Vektory $\mathbf{E}$ a $\mathbf{B}$ rozhodují o silových účincích náboje a považujeme je za základní vektor pole. Vektor $\mathbf{E}$ nazýváme intenzitou pole a vektor $\mathbf{B}$ magnetickou indukcí.

Kromě těchto uvedených vektorů se uplatňují ještě další vektory $\mathbf{D}$ a $\mathbf{H}$, které jsou vázány na budící volné náboje a proudy. Tyto čtyři vektory jsou uplatněny pro formulaci tzv. Maxwellovy rovnice. (skotský vědec J. C. Maxwell roku je zveřejnil 1873) [9].

3.2 Elektromagnety

Elektromagnety jsou zařízení využívající silové účinky elektrického proudu, a to buď k přidržení feromagnetických předmětů, nebo k výkonu mechanické práce.

Elektromagnety dělíme na:

- a) Přidržené – přitažlivé síly jsou využity k přidržení feromagnetických předmětů při přenášení, obrábění, brždění apod.
- b) Pohyblivé – síla posunutím části magnetického obvodu vykonává práci jako spínací, jistící přístroje.

Podle druhu budícího proudu jsou elektromagnety stejnosměrné a střídavé [4].

3.2.1 Magnetický obvod

Magnetický obvod se obvykle skládá z železných prvků, které tvoří uzavřenou cestu magnetického toku. Při začlenění pohyblivé části do magnetického obvodu vznikají v obvodu vzduchové mezery. Tyto mezery se volí jen tak dlouhé, jak je to nezbytně nutné, neboť spotřebují mnoho budícího proudu. Vzduchové mezery se vyskytují právě u pohyblivých elektromagnetů a u točivých elektrických strojů. Pro stanovení magnetomotorické síly využijeme následující vztahy (3.13 – 3.30), řešené v knize profesora L.Cigánka [4]:

$$F_m = \sum U_m = \Phi \sum R_m \quad (3.13)$$

Základní zákon magnetického obvodu vychází z předpokladu, že magnetomotorická síla F_m se rovná součtu magnetických napětí U_m všech částí obvodu, kde R_m představuje magnetický odpor části obvodu.

$$R_m = \frac{l}{\mu S} \quad (3.14)$$

Při malé vzduchové mezeře δ můžeme předpokládat, že indukční čáry jsou mezi čely pólů rovnoběžné. Vzorec můžeme ve jmenovateli upravit.

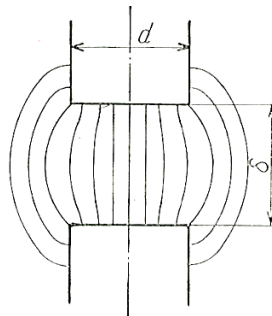
$$R_m = \frac{l}{\mu_0 \pi d^2} \quad (3.15)$$

Permeabilita vzduchu $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-6}$ H/m.

Podobně se vypočítá magnetický odpor kluzné vzduchové mezery.

$$R_{\delta p} = \frac{\delta_p}{\mu_0 \pi d a} \quad (3.16)$$

U delší vzduchové mezery δ nejsou mezi póly indukční čáry přímočaré, nýbrž se na vnějších stranách vyboulí.



Obr.3.2.5.: S Magnetický průběh v dlouhé magnetické mezeře

Magnetická vodivost se v takovém případě určuje matematickým nebo geometrickým řešením skutečného pole.

Požadavkem při návrhu elektromagnetu je určit rozměry jádra a cívky a navrhnout elektromagnetu požadované vlastnosti.

Tah elektromagnetu vypočítáme dle následujícího vztahu [4]:

$$F = \pi \cdot 10^5 \cdot B^2 \cdot d^2 \cdot \varepsilon^2 \cdot (1 + v) \quad (3.17)$$

U činitele rozšíření vzduchové mezery vyjadřujeme vyboulení magnetického pole. Pro výpočet použijeme empirický vzorec:

$$\varepsilon = 1 + \frac{\delta}{d} - \left(\frac{\delta}{d}\right)^2 \quad [-] \quad (3.18)$$

Rozměry elektromagnetu závisí na době jeho zatížení. Rozlišujeme elektromagnet trvale zatížený a krátkodobě zatížený.

Vhodné rozměry pro elektromagnet s válcovým jádrem a plochou vzduchovou mezerou při trvalém zatížení [4].

$$d = 0,115 \frac{F}{1+v} \sqrt[5]{\delta^2} \quad [\text{m; kg, m}] \quad (3.19)$$

Elektromagnet zatížený po dobu t_k .

$$d = 0,0275 \sqrt[6]{\frac{F}{1+v} \delta^2 t_k} \quad [\text{m; kg, m}] \quad (3.20)$$

Činitel zvětšení tahu tokem napříč cívkou:

$$v = \frac{2\delta^2}{d^2 \varepsilon^2 \ln(1+2\beta)} \quad (3.21)$$

Celková magnet motorická síla obvodu:

$$NI = \frac{10^7}{4\pi} B \delta k_s \quad (3.22)$$

Pro elektrický obvod cívky platí vztah:

$$U = RI = \frac{\rho}{s} \pi d (1 + \beta) NI \quad (3.23)$$

U – napětí na cívce, S – průřez drátu cívky, N – počet závitů cívky, I – proud cívky
Čistý průřez mědi cívky [4]:

$$NS = \xi \beta \lambda d^2 \quad (3.24)$$

ξ – činitel plnění, poměr průřezu čisté mědi k ploše cívky

Průřez drátu cívky:

$$S = \frac{4480}{U \varepsilon} k_s (1 + \beta) \varrho \delta \sqrt{\frac{F}{1+v}} \quad (3.25)$$

Pro trvalé zatížení se povrchem elektromagnetu trvale odvádí teplo. Pokud odvádění tepla je vztažené na válcový povrch cívky o chladiivosti α , je celková ztráta cívky [4]:

$$UI = \pi d^2 (1 + 2\beta) \lambda \alpha Tm \quad (3.26)$$

Tm – největší dovolená teplota, pro návrh použijeme $\alpha Tm = 1000 \text{ W/m}^2$ umístěné ve vzduchu a $\alpha Tm = 4000 \text{ W/m}^2$ umístěné v oleji.

Jedná se o soustavu rovnic o pěti neznámých a řešením je průměr jádra elektromagnetu:

$$d = \sqrt{\frac{20,2 \cdot 10^5 \varrho k_s^2 (1 + \beta) F \delta^2}{\xi \beta \lambda^2 \varepsilon^2 (1 + 2\beta) (1 + v) \alpha Tm}} \quad (3.27)$$

Stanovení indukce ve vzduchové mezeře:

$$B = \frac{\sqrt{F}}{560 d \varepsilon \sqrt{1+v}} \quad (3.28)$$

Počet závitů cívky:

$$N = \frac{\xi}{S} \beta \lambda d^2 \quad (3.29)$$

Proud cívky

$$I = \frac{10^7 B \delta k_s}{4\pi N} \quad (3.30)$$

Vhodné λ bývá 2 až 4. Vhodné β mezi 0,5 až 1.

Pokud má mít elektromagnet málo mědi volíme β co nejmenší, pokud má mít málo železa volíme β i λ velké.

Tímto jsme stanovili základní parametry, které použijeme při návrhu elektromagnetu.

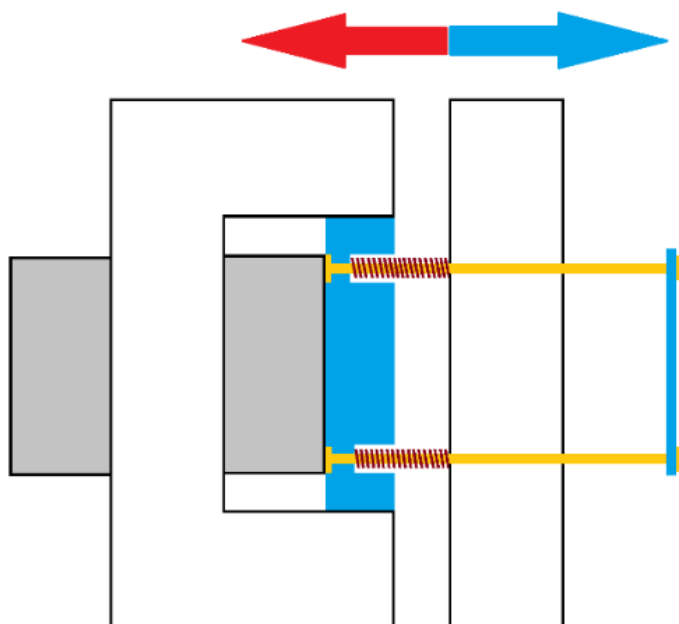
4 NÁVRH ELEKTROMAGNETU

4.1 Technický popis

Navrhnutí tvaru elektromagnetu musí vycházet ze základních požadavků, které od jeho funkce očekáváme. Předpokládáme, že elektromagnet bude v jednom směru přitahovat otočný mechanismus držáku kartáčů do optimální polohy a při zpětném chodu po přerušení napětí pružiny vrátí nastavení do výchozí polohy, která zajišťuje optimální chod motoru pro tento směr otáčení.

Základní požadavky na elektromagnet:

1. Tvar se musí co nejlépe přizpůsobit rozměrům stejnosměrného stroje, na kterém bude tento elektromagnet osazen.
2. Tahová síla bude dostatečně velká, aby přitáhla otočný mechanismus držáku kartáčů.
3. Tahová síla, po většinu doby působení, bude konstantní.
4. Pružiny budou dimenzovány na polovinu tahové síly elektromagnetu, aby kotva byla schopna eliminovat sílu pružiny až do konečné polohy a pružiny, po zániku působení elektromagnetické síly, zatlačily kotvu do výchozí polohy.



Popis mechanismu:

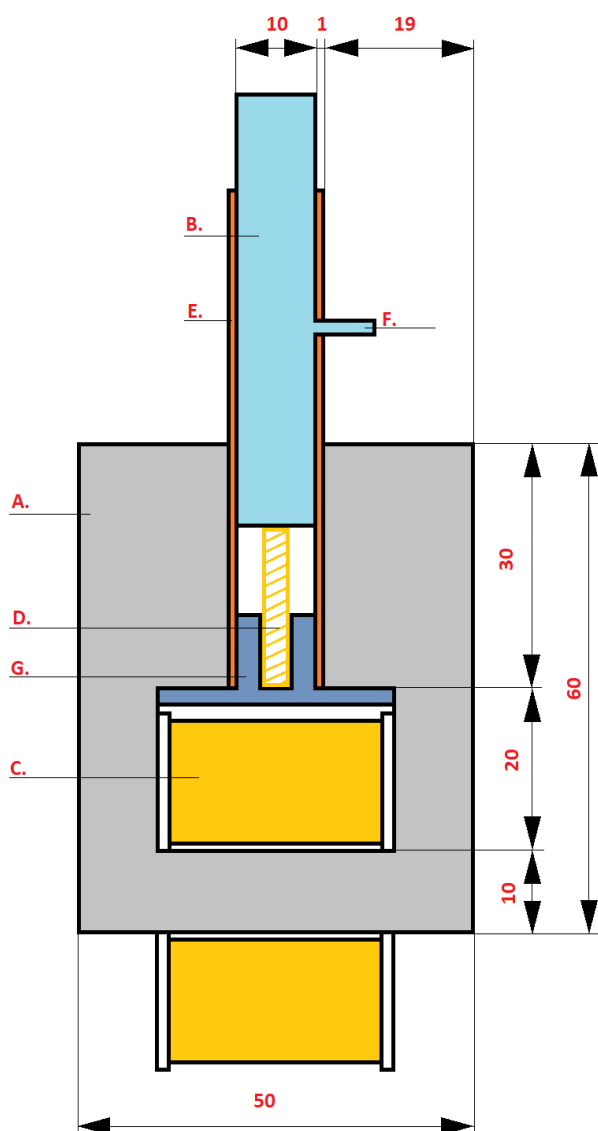
Červená šipka znázorňuje tahovou sílu elektromagnetu, modrá šipka představuje sílu pružin, které vracejí kotvu do výchozí polohy.

Obr.4.1.1.: Elektromagnet typ „CI“ osazen pružinami pro zpětný návrat kotvy to výchozí polohy.

Jako řešení jsou navrženy dva typy elektromagnetických mechanismu.

První verzí je tvar elektromagnetu, který byl označen jako „CI“. Zde je kotva osazena na mosazných vodících tyčích, které tvoří dráhu možného posunu. Pohyblivá kotva ovládá otočný držák kartáčů ve zvoleném směru.

Druhou variantou je elektromagnet označen jako „I“. Kotva se pohybuje v mosazném pouzdru přitahována elektromagnetickou silou a pomocí pružinky při přerušení napětí vrací zpět.



Popis:

A – železo, B – kotva, C – cívka, D – pružina, E – pouzdro kotvy, F – polohový kolík, G – doraz kotvy

Obr.4.1.2.:Elektromagnet typ „I“

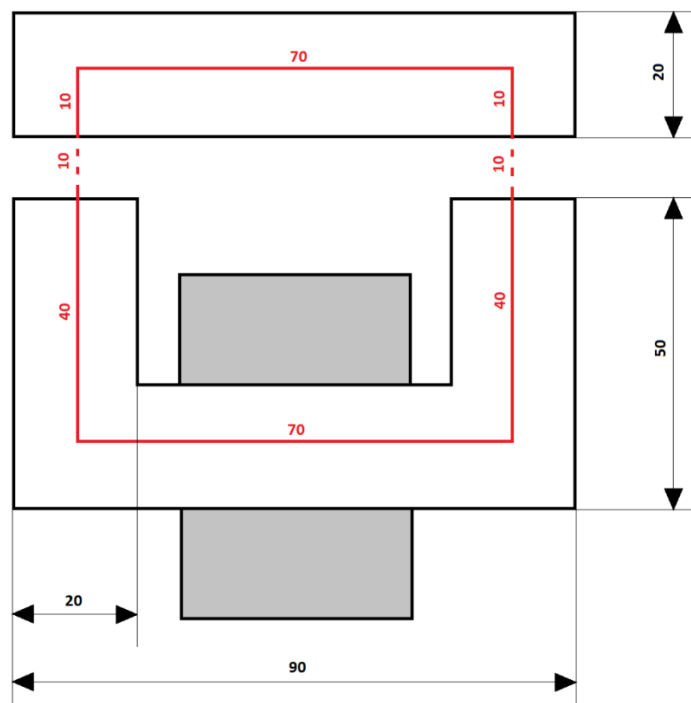
4.2 Návrh pomocí programu FEMM

Pomocí programu FEMM stanovíme výchozí návrh elektromagnetu, který bude pomocí elektromagnetického pole ovládat posuvný mechanismus, který bude nastavovat pozici kartáčů do takové polohy, která bude v protipohybu k aktuálním otáčkám motoru. Návrh vytvoříme pro jeden elektromagnet, který si budou jádro přitahovat v závislosti na nastavené polaritě elektromotoru.

Program FEMM je volně dostupný a přes své jednoduché ovládání splňuje naše požadavky na konečný výstup [14].

4.2.1 Stanovení geometrie elektromagnetu

Pro zpracování výsledného elektromagnetu je nutné předem si definovat geometrické rozměry modelu, které vycházejí z rozměrů samotného motoru a možného prostoru, kde chceme tyto elektromagnety umístit. Proto si stanovíme okótovaný náčrtek, který bude výchozím podkladem pro samotný návrh.



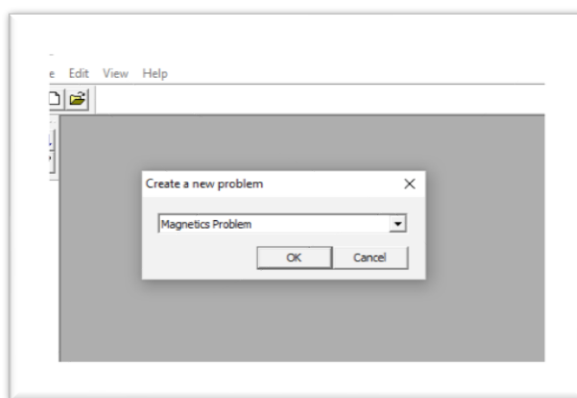
Obr.4.2.1.: Návrh rozmístění elektromagnetu – pohled shora

Posuvný mechanismus – A. v závislosti na polaritě protékajícího proudu je vtahován buď do protipohybu otáček motoru na pravou či levou stranu. Oba elektromagnety budou paralelně napájeny napětím ze svorkovnice v závislosti na směru otáček motoru. Jádru je přitahováno mezi mezeru dvou železných bloků – C., v kterých protéká elektromagnetické pole indukované dvěma cívkami – B.

Při návrhu se budeme zabývat pouze jednou stranou elektromagnetu.

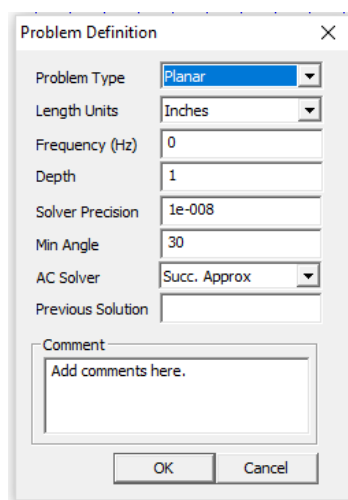
4.2.2 Postup vytvoření návrhu

Program FEMM po otevření nám nabízí dvě možnosti, a to otevřít nový nebo již uložený projekt. Zvolme otevření nového „magnetics problem“.



Obr. 4.2.2: Volba typu operace

Otevře se nám širší pole nástrojů. V menu zvolíme „Problém“, označíme typ problému „Planar“, protože se jedná o elektromagnet složený z dvou železných bloků o tloušťce 0,5 cm opatřené. V kolonce „Length units“ zvolíme jednotky nejlépe vystihující náš projekt.



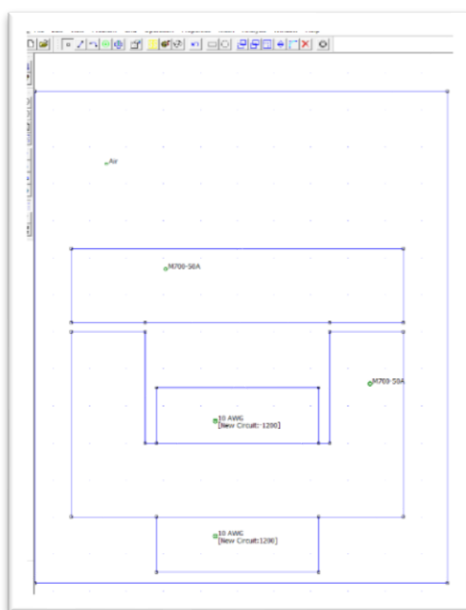
Obr.4.2.3: FEMM – základní nastavení

Dalším krokem je vytvoření geometrického modelu. Můžeme pokračovat dvěma způsoby. První způsob spočívá v přenosu vytvořeného souboru *.dxd z CAD programu příkazem File → Import DXF. Druhá možnost znamená vypracování modelu v samotném FEMMu [10].

4.2.3 Návrh modelu v programu FEMM

Pro snadnější zanašování pracovních bodů si upravíme rozestupy pomocí „grid size“ na levé pracovní liště na hodnotu 1. a aktivujeme přichytávání bodů, abychom přesně definovali rozměry po zvolených intervalech.

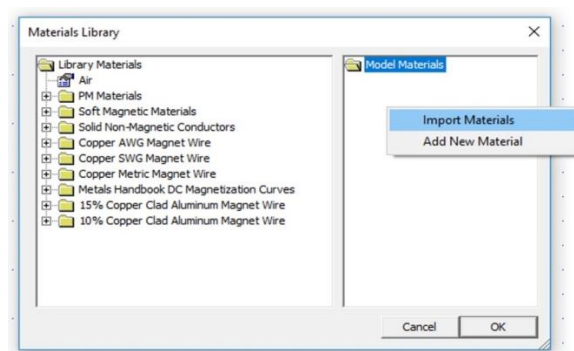
Pomocí úseček vytvoříme požadovaný model. Postupujeme tak, že si navolíme dva body a poté úsečkou navržené body spojíme. Do uzavřených oblastí navolíme zelené body [10].



Obr.4.2.4: Navržený model elektromagnet

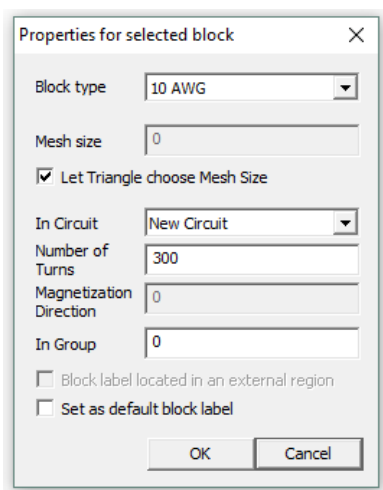
4.2.4 Nastavení materiálů

V nabídce menu nastavíme vlastnosti jednotlivých použitých materiálů volbou „Properties → Materials Library“. Materiály přetáhneme myší z levého okna do složky - Model Materials, nebo si importujeme materiál z již vytvořeného projektu a to kliknutím pravého tlačítka myši na volnou plochu pravého okna.



Obr.4.2.5 : Volba materiálu

V menu Properties → Circuit → Add Property definujeme proud pro cívku. Cívku pojmenujeme a nastavíme hodnotu proudu v ampérech. Nastavení necháme „Series“, kde závity jsou zapojené do série, v případě „Parallel“ se proud rozdělí do celé definované uzavřené oblasti a neumožní nám nastavit závity.



Obr.4.2.6 : Nastavení cívky elektromagnetu

Nyní nadefinujeme k jednotlivým pracovním bodům materiálové vlastnosti.

Pomocí aktivace zelené ikony se přepneme do pracovního režimu s těmito body. Pravým tlačítkem aktivujeme pracovní bod a mezeríkem otevřeme okno s jeho vlastnostmi. Zde vybereme z nabídky „Block type“ materiál, který jsme si v předchozím kroku importovali z knihovny, nebo si je vytvořili. K cívce u volby „In Circuit“ přiřadíme cívku a nastavíme v „Number of Turns“ počet závitů 100.

K ostatním blokům přiřadíme materiály v kolonce „Block Type“ [10].

Block Property

Name: M700-50A

B-H Curve: Nonlinear B-H Curve

Linear Material Properties

Relative μ_x : 5000 Relative μ_y : 5000

ϕ_{hx} , deg: 0 ϕ_{hy} , deg: 0

Nonlinear Material Properties

Edit B-H Curve ϕ_{hmax} , deg: 0

Coercivity H_c , A/m: 0 Electrical Conductivity σ , MS/m: 0

Source Current Density J , MA/m²: 0

Special Attributes: Lamination & Wire Type

Not laminated or stranded

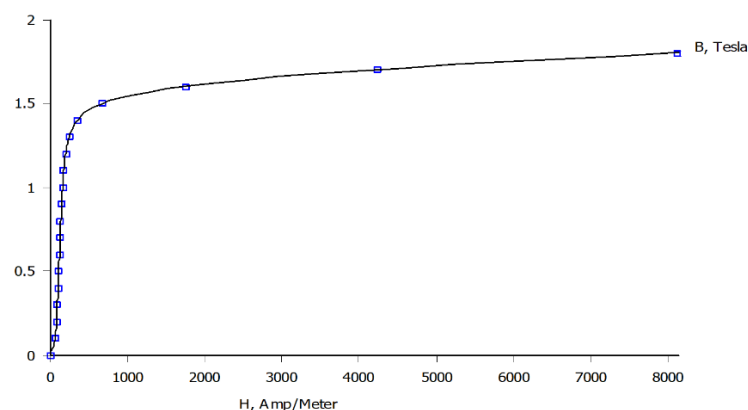
Lam thickness, mm: 0 Lam fill factor: 1

Number of strands: 0 Strand dia, mm: 0

OK Cancel

Obr.4.2.7: Nastavení magnetizační charakteristiky oceli

U nově zvoleného materiálu můžeme definovat magnetizační charakteristiku materiálu. Po otevření editačního okna B-H charakteristiky zadáme hodnoty podle datového listu výrobce materiálu. Následně si můžeme vygenerovat B-H křivku.



Obr.4.2.8: B-H charakteristika materiálu M700-50A [15]

Celý nadefinovaný objekt je potřeba ohraničit a přiřadit okrajové podmínky. V tomto případě je hraniční objekt obdélník, kde po rozkliknutí vlastností u jednotlivých přímek navolíme okrajové podmínky.

Boundary Property

Name: Okrajové podmínky

BC Type: Prescribed A

Small skin depth parameters

μ , relative: 0 σ , MS/m: 0

Mixed BC parameters

c_0 coefficient: 0 c_1 coefficient: 0

Prescribed A parameters

A_0 : 0 A_1 : 0 A_2 : 0

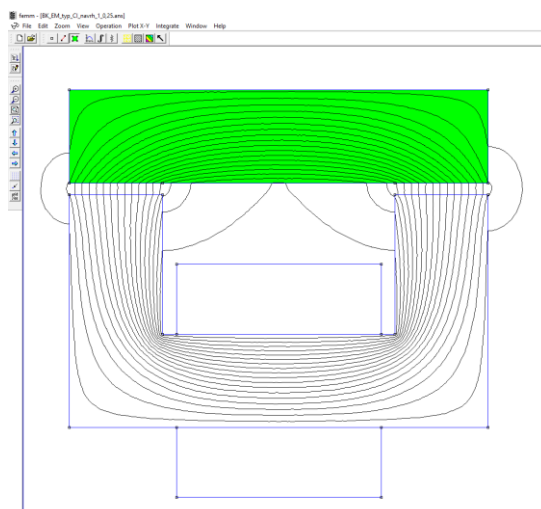
ϕ , deg: 0

OK Cancel

Obr.4.2.9.: Okrajové podmínky

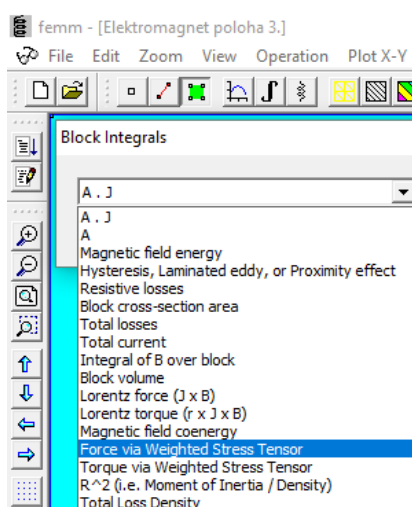
4.2.5 Zpracování výsledků

Po zadání potřebných hodnot můžeme provést výpočet. Jako první spustíme výpočet a poté klikneme na ikonu prohlížení výsledků. Tím se nám zobrazí prostředí postprocesoru, kde můžeme generovat dílčí výpočty. Základní hodnotu tahové síly elektromagnetu získáme plošným označením kotvy.



Obr.4.2.10: Působení síly elektromagnetu na jádro

Kliknutím na ikonu s integrálem si v menu vybereme nabídku pro výpočet síly působení elektromagnetu na kotvu. Zde lze provádět další operace jako zobrazení prostorového rozložení magnetické indukce, zobrazení diskretizační sítě, výpočty elektromagnetických průběhů a hodnot atd.



Obr.4.2.11: Působení síly elektromagnetu na jádro

4.3 Analýza stejnosměrného elektromagnetu

Pokud máme navrženou geometrii elektromagnetu, můžeme přistoupit k analytickému návrhu elektromagnetu a současně si ověříme výpočet pomocí simulace metody konečných v programu FEMM. Ze zjištěných výsledků se pokusíme upravit stávající návrhy tak, abychom dosáhli lepších konečných vlastností, které budou mít vliv na tahovou sílu elektromagnetu.

4.3.1 Tvar „CI“ verze návrhu č.1

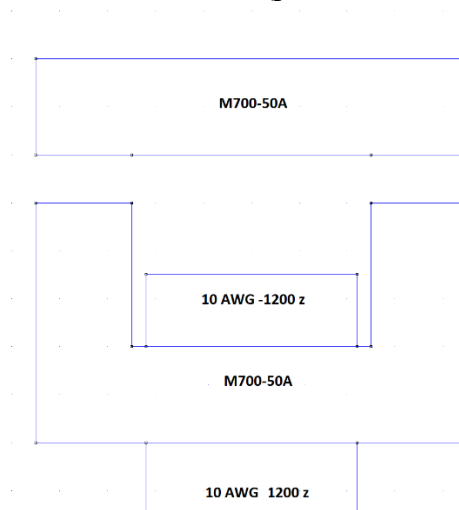
Základní parametry:

Cívka : 1200 závitů

Tloušťka Fe jádra 20 mm

Analytický výpočet tahové síly: 1,767 N (při vzduchové mezeře 10 mm)

Program FEMM : 2,2857 N (při vzduchové mezeře 10 mm)



Obr.4.3.1.: Elektromagnet typ „CI“ s délkou vzduchové mezery 10 mm – vytvořený v programu FEMM

4.3.1.1 Analytický výpočet – „CI“ č.1

Ze zadání můžeme vypočítat magnetický tok, který protéká přes železné jádro a vzduchovou mezeru. Uvažujeme, že magnetický tok je po celém průřez rovnoměrný. Pro výpočet elektromagnetické síly využijeme následujících vztahu (4.1 -4.27) převzaté z [13].

Na začátku si stanovíme celkový odpor jádra a vzduchové mezery (4.7).

Celkový magnetický odpor jádra a kotvy

$$R_{mFe} = R_{mj} + R_{mk} \quad (4.1)$$

$$R_{mj} = \frac{l_j}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_j} \quad (4.2)$$

$$R_{mj} = \frac{150 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{mj} = 298415,52 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{mk} = \frac{l_k}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot S_k} \quad (4.3)$$

$$R_{mk} = \frac{90 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} \quad (4.4)$$

$$R_{mk} = 179049,31 \text{ H}^{-1}$$

$$R_{mFe} = 298415,52 + 179049,31$$

$$R_{mFe} = 477464,83 \text{ H}^{-1}$$

Magnetický odpor vzduchové mezery je součtem magnetických odporů obou vzduchových mezer

$$R_{mv} = R_{mv1} + R_{mv2} \quad (4.5)$$

$$R_{mv} = \frac{x_{v1}}{\mu_0 \cdot S_{v1}} + \frac{x_{v2}}{\mu_0 \cdot S_{v2}} \quad (4.6)$$

$$R_{mv} = \frac{0,01}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}} + \frac{0,01}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 4 \cdot 10^{-4}}$$

$$R_{mv} = 39788735,77 \text{ H}^{-1}$$

Celkový magnetický odpor

$$R_m = R_{mFe} + R_{mv} \quad (4.7)$$

$$R_m = 477464,83 + 39788735,77$$

$$R_m = 40266200,6 \text{ H}^{-1}$$

Výsledná hodnota celkového odporu nám pomůže vypočítat indukčnost cívky a následně spřažený tok.

Indukčnost cívky

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4.8)$$

$$L = \frac{1200^2}{39788735,77}$$

$$L \approx 0,03619 \text{ H}$$

Celkový spřažený tok

$$\Psi = L \cdot i \quad (4.9)$$

$$\Psi = 36,19 \cdot 10^{-3} \cdot 1$$

$$\Psi \approx 36,19 \cdot 10^{-3} \text{ Wb}$$

Při stanoveném počtu závitů na cívce a stanovení procházejícího proudu můžeme vypočítat celkový magnetický tok.

Celkový magnetický tok

$$\phi = \frac{N \cdot i}{R_m} \quad (4.10)$$

$$\phi = \frac{1200 \cdot 1}{40266200,6}$$

$$\phi = 29,8017 \cdot 10^{-6} \text{ Wb} = 29,8017 \mu\text{Wb}$$

Vypočítáme magnetickou indukci, která prochází daným průřezem feromagnetického materiálu a vzduchové mezery.

Magnetická indukce

$$B = \frac{\phi}{S} \quad (4.11)$$

$$B = \frac{29,8017 \cdot 10^{-6}}{4 \cdot 10^{-4}}$$

$$B = 0,0745 \text{ T}$$

Intenzita magnetického pole

$$B = H \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \quad (4.12)$$

$$H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r} \quad (4.13)$$

$$H = \frac{0,0745}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1000}$$

$$H \approx 59,285 \text{ Am}^{-1}$$

Magnetická energie

$$W_m = W_{co} = \frac{1}{2} \cdot i \cdot \Psi \quad (4.14)$$

$$W_m = W_{co} = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 36,19 \cdot 10^{-3}$$

$$W_m = W_{co} = 18,096 \text{ mJ}$$

Stanovení vnitřní tahové síly

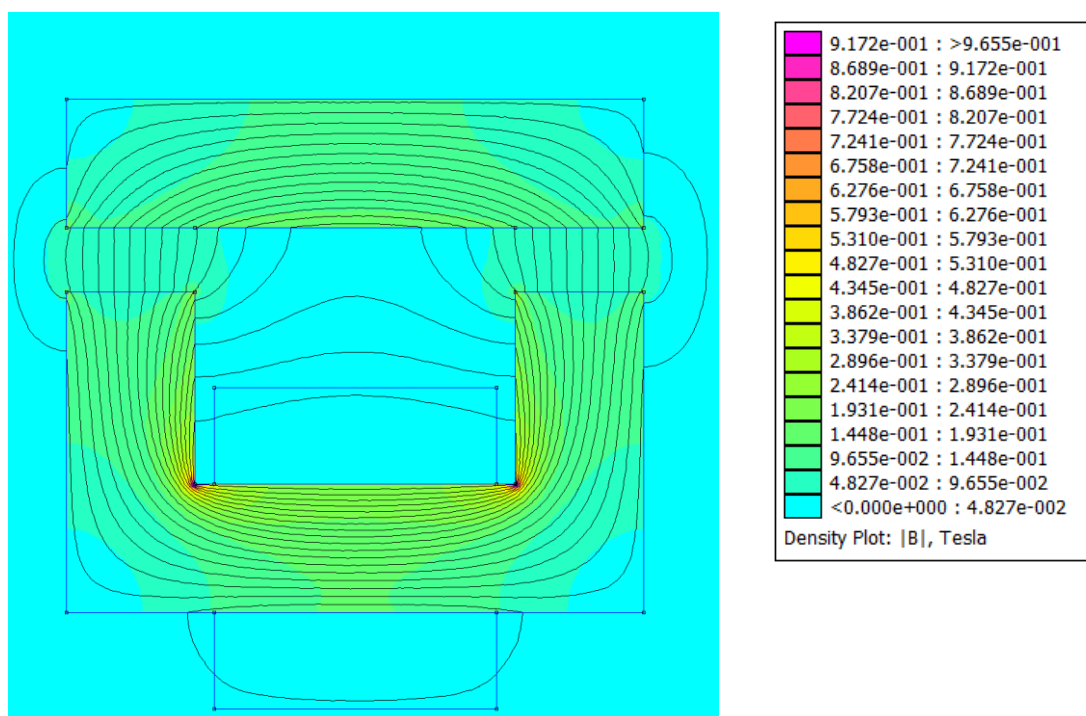
$$F_{im} = \frac{B^2 \cdot S}{\mu_0} \quad (4.15)$$

$$F_{im} = \frac{0,0745^2 \cdot 4 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-7}}$$

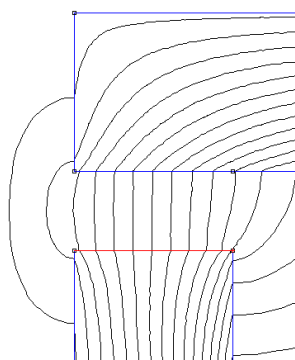
$$F_{im} \cong 1,767 \text{ N}$$

4.3.1.2 Simulace metodou konečných prvků (program FEMM) – „CI“ č.1

Navržená geometrie přenesená do programu FEMM vygeneruje výsledné elektromagnetické pole na němž je patrná magnetická indukce, která prochází feromagnetickým materiálem a vzduchovou mezerou.



Obr.4.3.2: Model elektromagnetického pole v programu FEMM – návrh č.1 „CI“

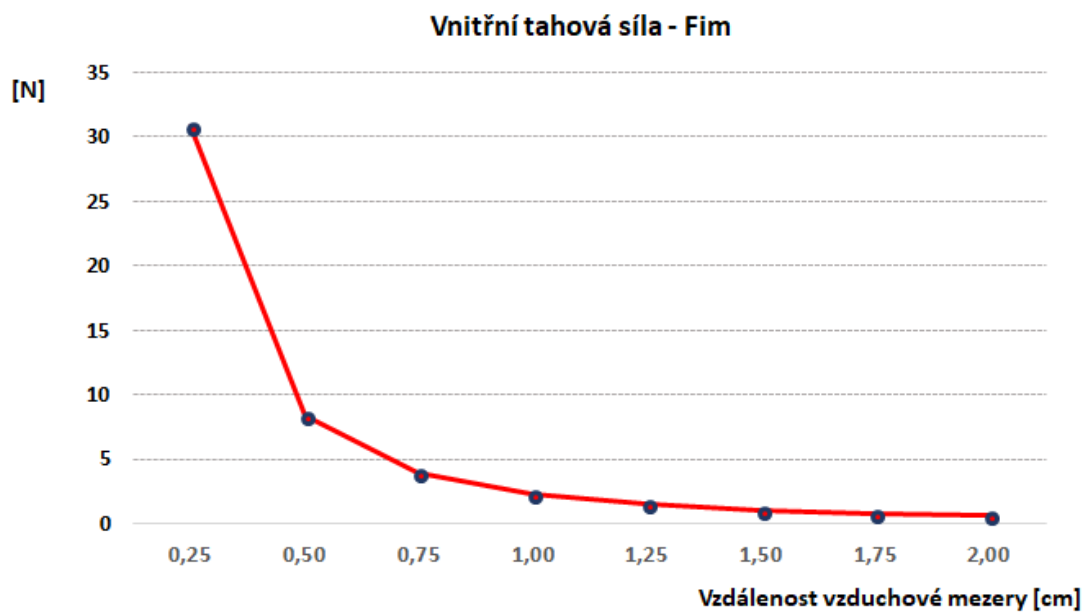


Obr.4.3.3: Měřená plocha magnetické indukce (červená úsečka)

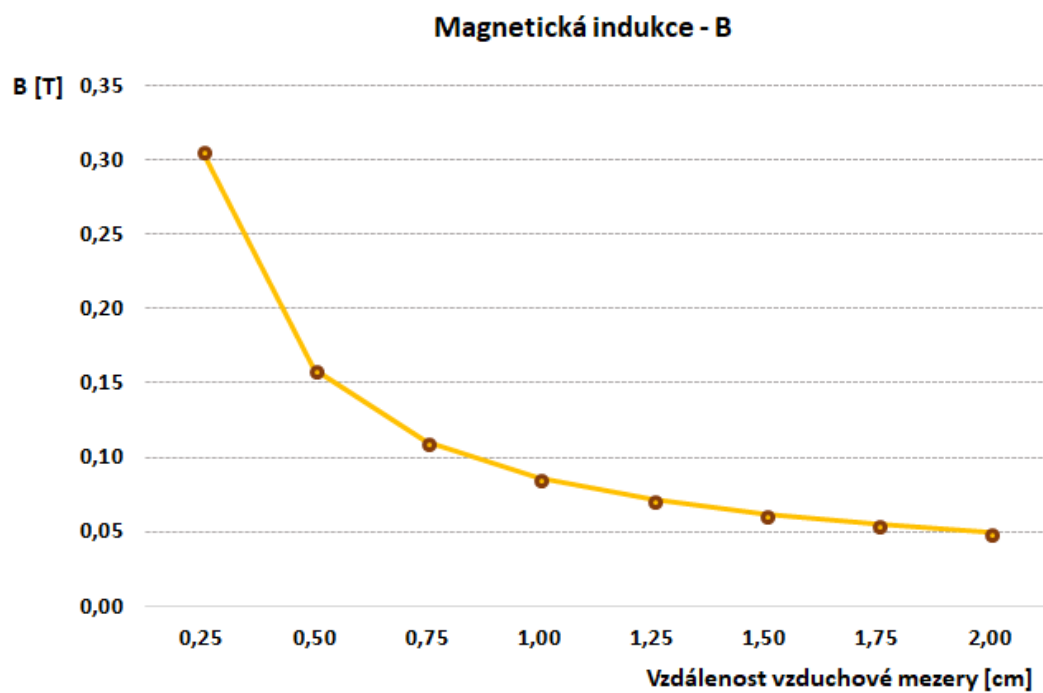
Ze simulovaných modelů nastavení vzduchové mezery je jako výstupní hodnota vygenerovaná vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce. Kromě prvního výsledku simulace jsou ostatní hodnoty vyneseny do grafu, pro závěrečné posouzení vhodnosti navrženého elektromagnetu.

Tab. č.1 : Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.1

Návrh č.1 - "CI"			
Měření č.	Délka vzduchové mezery [cm]	Vnitřní tahová síla – F_{im} [N]	Magnetická indukce - B [T] (obr.:4.3.3)
1	0,01	893,98	1,67
2	0,25	30,80	0,31
3	0,5	8,34	0,16
4	0,75	3,92	0,11
5	1	2,29	0,09
6	1,25	1,50	0,07
7	1,5	1,06	0,06
8	1,75	0,78	0,05
9	2	0,59	0,05



Obr.4.3.4: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly elektromagnetu.



Obr.4.3.5: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci ve zvoleném bodě.

4.3.2 Tvar „CIx“ – verze návrhu č.2

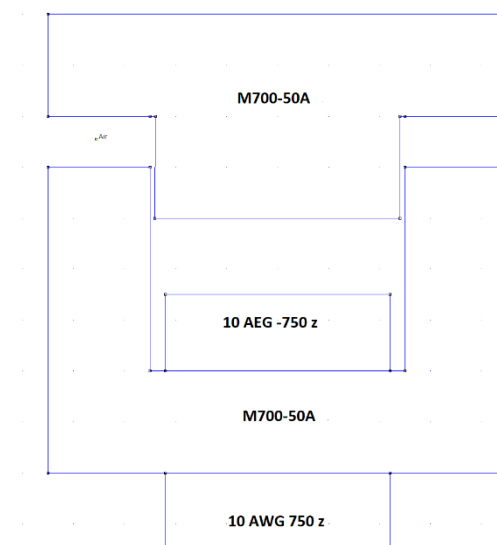
Základní parametry:

Tvar „CIx“ – úprava kotvy

Cívka : 750 závitů

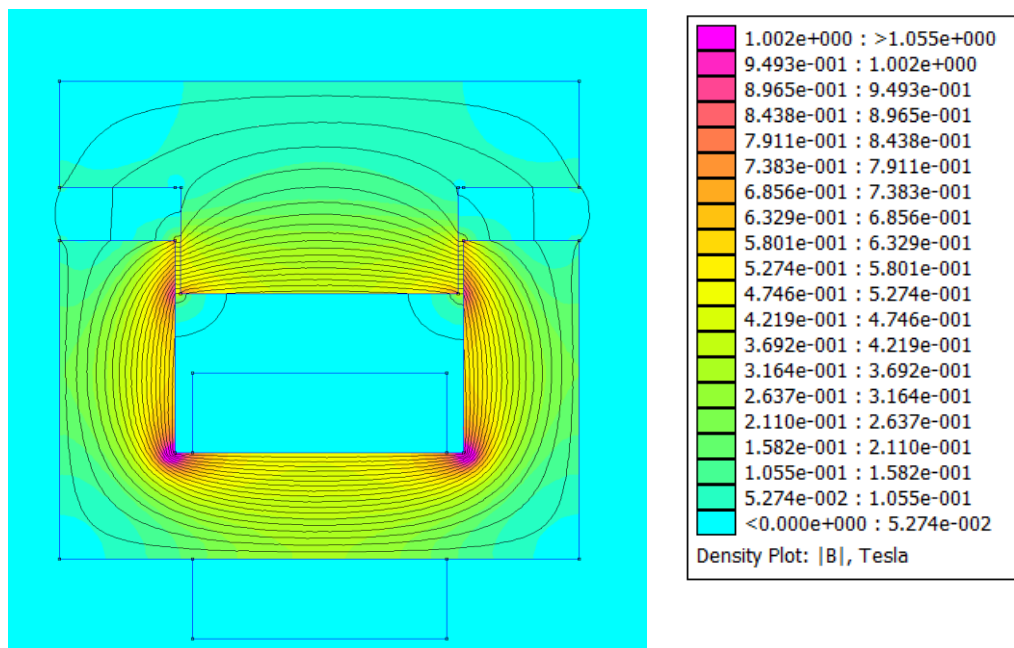
Program FEMM : 3,66506 N (posunutí
kotvy 10 mm)

Tloušťka Fe jádra 20 mm

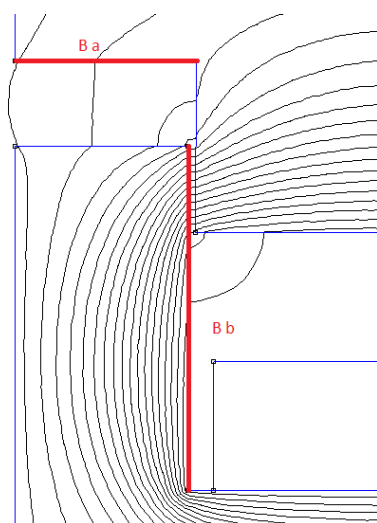


Obr.4.3.6.: Elektromagnet typ „CIx“ s délkou vzduchové mezery 10 mm – vytvořený v programu FEMM

4.3.2.1 Simulace metodou konečných prvků (program FEMM) – „CIx“ č.1



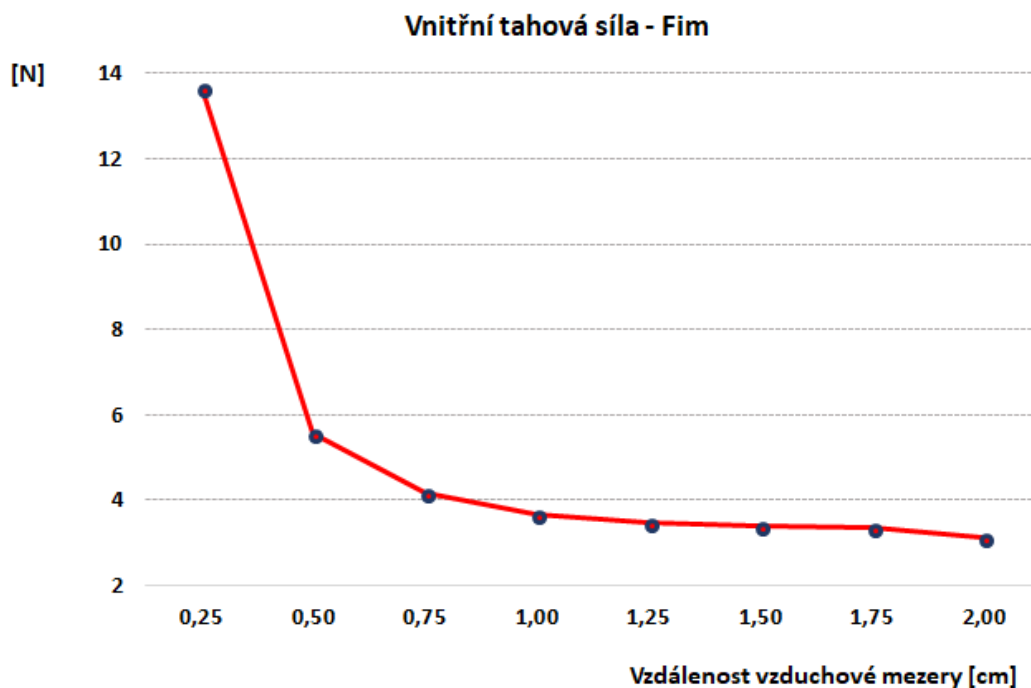
Obr.4.3.7: Model elektromagnetického pole v programu FEMM – návrh č.2 „CI“



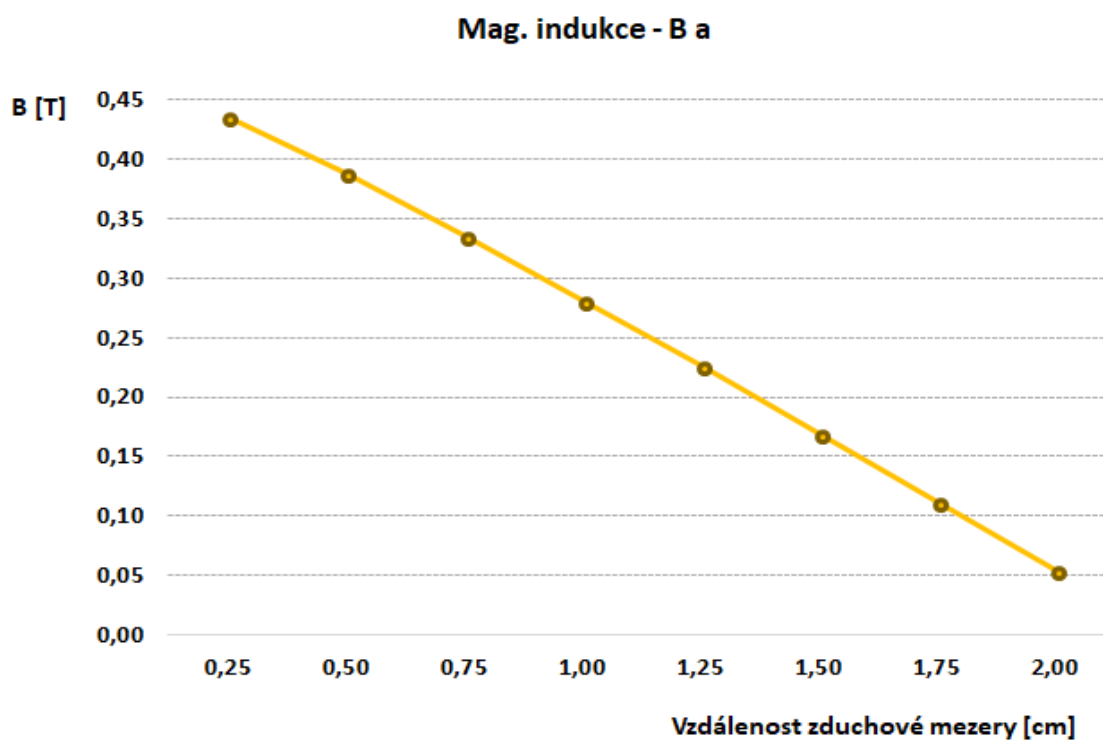
Obr.4.3.8: Měřená plocha magnetické indukce (červená úsečka)

Tab. č.2: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.2

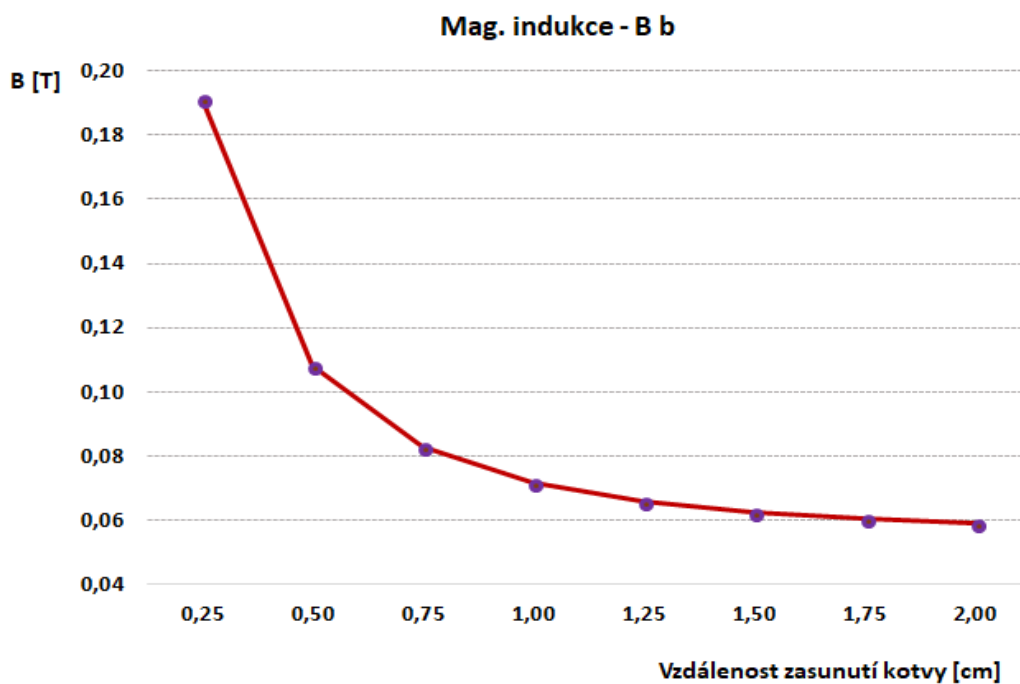
Návrh č.2 - "CI"				
Měření č.	Délka vzduchové mezery [cm]	Vnitřní tahová síla – F_{im} [N]	Magnetická indukce – B_a [T] (obr.: 4.3.8.)	Magnetická indukce – B_b [T] (obr.: 4.3.8.)
1,00	0,01	694,78	0,18	1,47
2,00	0,25	13,68	0,44	0,19
3,00	0,50	5,58	0,39	0,11
4,00	0,75	4,17	0,34	0,08
5,00	1,00	3,67	0,28	0,07
6,00	1,25	3,46	0,23	0,07
7,00	1,50	3,40	0,17	0,06
8,00	1,75	3,37	0,11	0,06
9,00	2,00	3,11	0,05	0,06



Obr.4.3.9: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na velikosti tahové síly elektromagnetu.

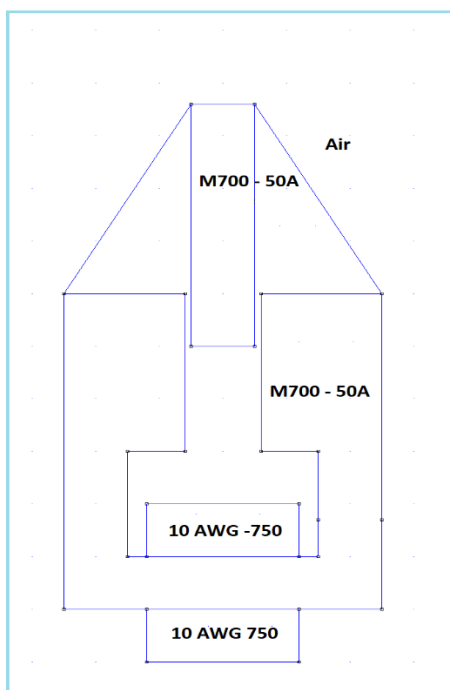


Obr.4.3.10: Závislost vzdálenosti vzduchové mezery na magnetické indukci ve zvoleném bodě.



Obr.4.3.11: Závislost polohy kotvy na magnetické indukci ve zvoleném bodě.

4.3.3 Tvar „I“ – verze návrhu č.3



Základní parametry:

Tvar „I“ Cívka : 750 závitů

Analytický výpočet tahové síly: 1,767 N (posunutí kotvy 10 mm)

Program FEMM : 1,40397 N

Tloušťka Fe jádra 10 mm

Obr.4.3.12.: Elektromagnet typ „I“ – vytvořený v programu FEMM

4.3.3.1 Analytický výpočet

$$L = \frac{N^2}{R_m} \quad (4.20)$$

$$R_{mv} = \frac{1}{\mu} + \frac{l}{S} \quad (4.21)$$

$$L = \frac{N^2 \cdot a \cdot x \cdot \mu_0}{t} = \frac{N^2 \cdot a \cdot \mu_0}{t} \cdot x \quad (4.22)$$

$$L = L' \cdot x \quad (4.23)$$

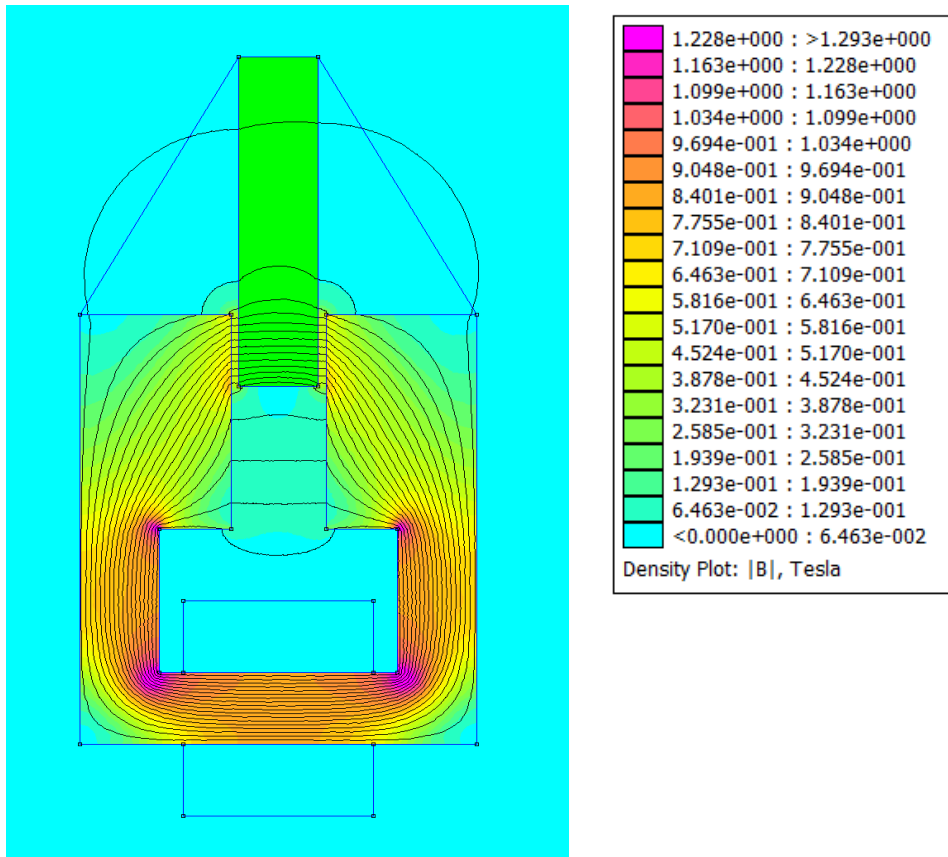
$$W_{co} = \frac{1}{2} L(x) \cdot i^2(t) = \frac{1}{2} i^2 L' \cdot i^2(t) \quad (4.24)$$

$$F_{im} = \left(\frac{dW_{co}}{dx} \right) = \frac{1}{2} i^2 \cdot L' \quad (4.25)$$

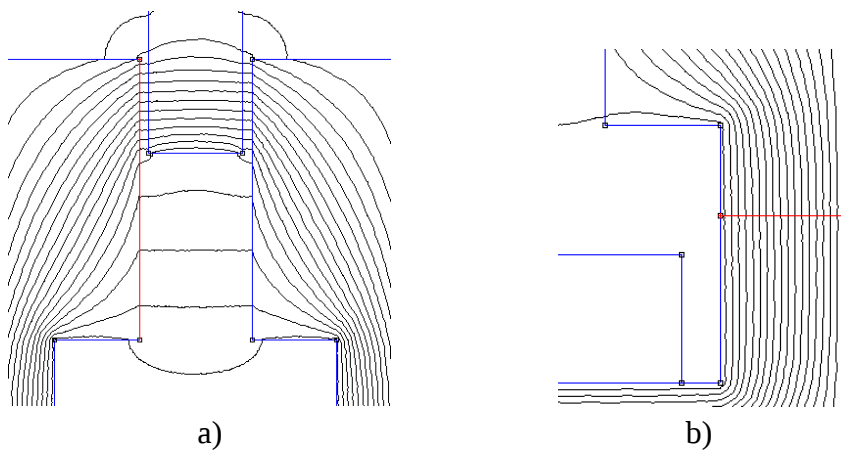
$$F_{im} = \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 10 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 750^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{im} = 1,7672 \text{ N}$$

4.3.3.2 Simulace metodou konečných prvků (program FEMM) – „I“ č.3



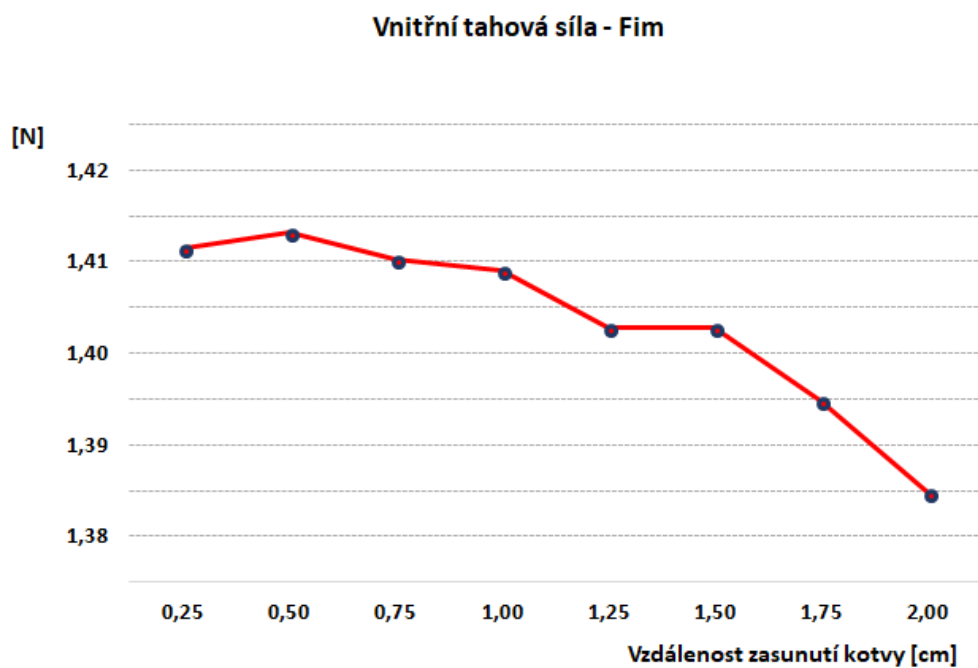
Obr.4.3.13: Model elektromagnetického pole v programu FEMM – návrh č.3 „I“



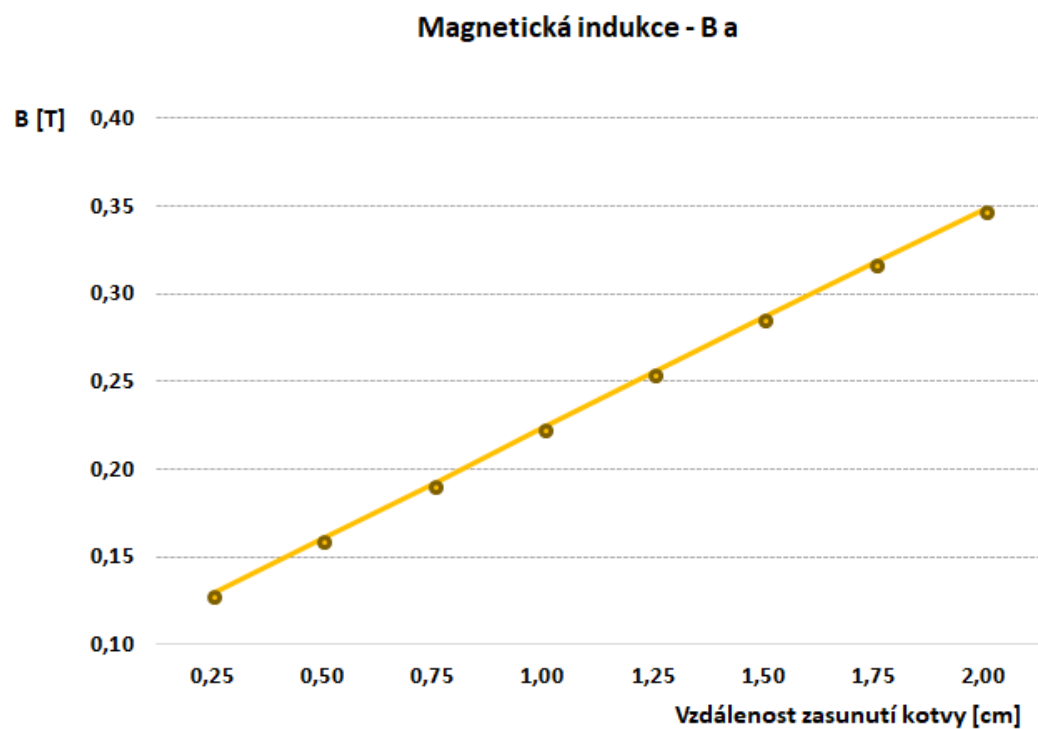
Obr.4.3.14: Měřená plocha magnetické indukce (červená úsečka)

Tab. č.3: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.3

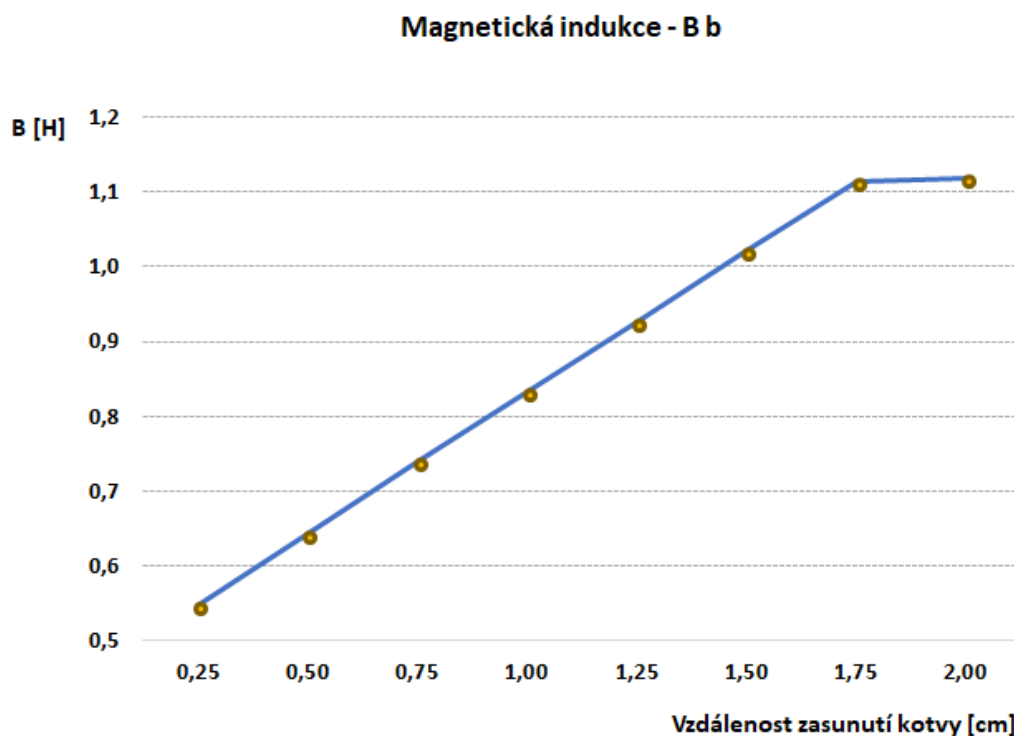
Návrh č.3 - "CI"				
Měření č.	Poloha kotvy [cm]	Vnitřní tahová síla - F_{im} [N]	Magnetická indukce - B [T] (obr.:4.3.14.a)	Magnetická indukce - B [T] (obr.:4.3.14.b)
1	0,01	1,27	0,10	0,46
2	0,25	1,41	0,13	0,55
3	0,5	1,41	0,16	0,64
4	0,75	1,41	0,19	0,74
5	1	1,41	0,22	0,83
6	1,25	1,40	0,25	0,93
7	1,5	1,40	0,29	1,02
8	1,75	1,39	0,32	1,11
9	2	1,38	0,35	1,12



Obr.4.3.15: Závislost polohy kotvy na velikosti tahové síly elektromagnetu.



Obr.4.3.16: Závislost polohy kotvy na magnetické indukci ve zvoleném bodě.



Obr.4.3.17: Závislost polohy kotvy mezery na magnetické indukci ve zvoleném bodě.

4.3.4 Tvar „I“ – verze návrhu č.4

Základní parametry:

Tvar „I“

Cívka : 750 závitů

Analytický výpočet tahové síly: 3,5343 N (posunutí kotvy 10 mm)

Program FEMM : 2,80794 N

Tloušťka Fe jádra 20 m

4.3.4.1 Analytický výpočet

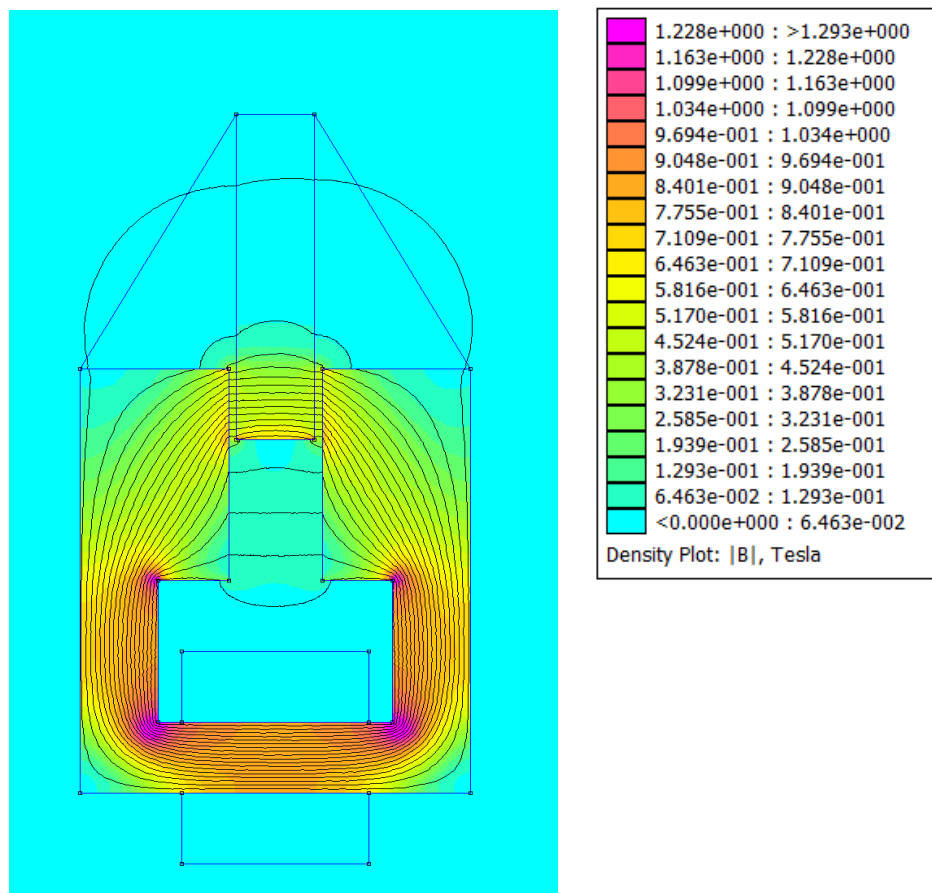
$$W_{co} = \frac{1}{2} L(x) \cdot i^2(t) = \frac{1}{2} i^2 L' \cdot i^2(t) \quad (4.26)$$

$$F_{im} = \left(\frac{dW_{co}}{dx} \right) = \frac{1}{2} i^2 \cdot L' \quad (4.27)$$

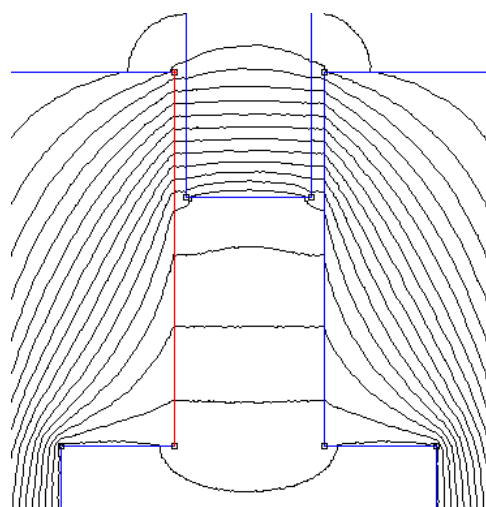
$$F_{im} = \frac{1}{2} \cdot 1^2 \cdot \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 20 \cdot 10^{-3}}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 750^2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}$$

$$F_{im} = 3.5343 \text{ N}$$

4.3.4.2 Simulace metodou konečných prvků (program FEMM) – „I“ č.3



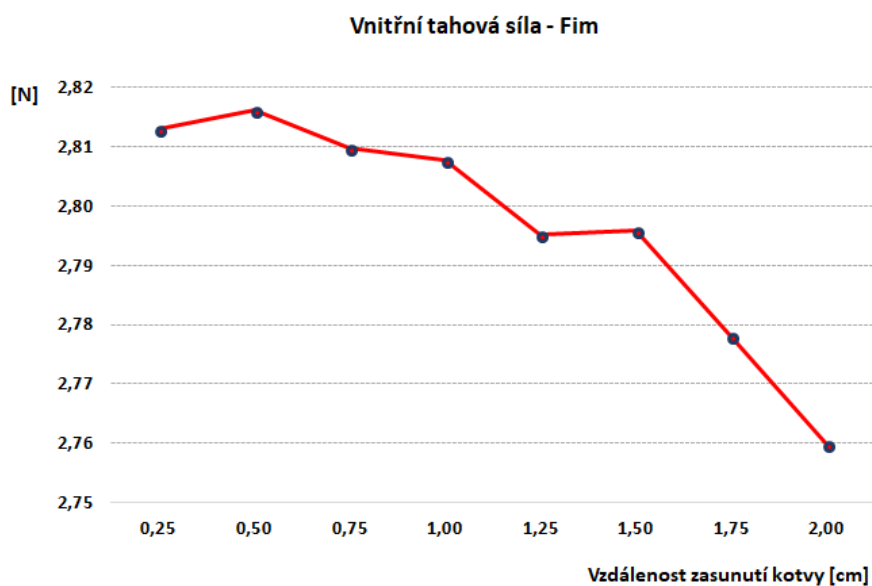
Obr.4.3.18: Model elektromagnetického pole v programu FEMM – návrh č.4 „I“



Obr.4.3.19: Měřená plocha magnetické indukce (červená úsečka)

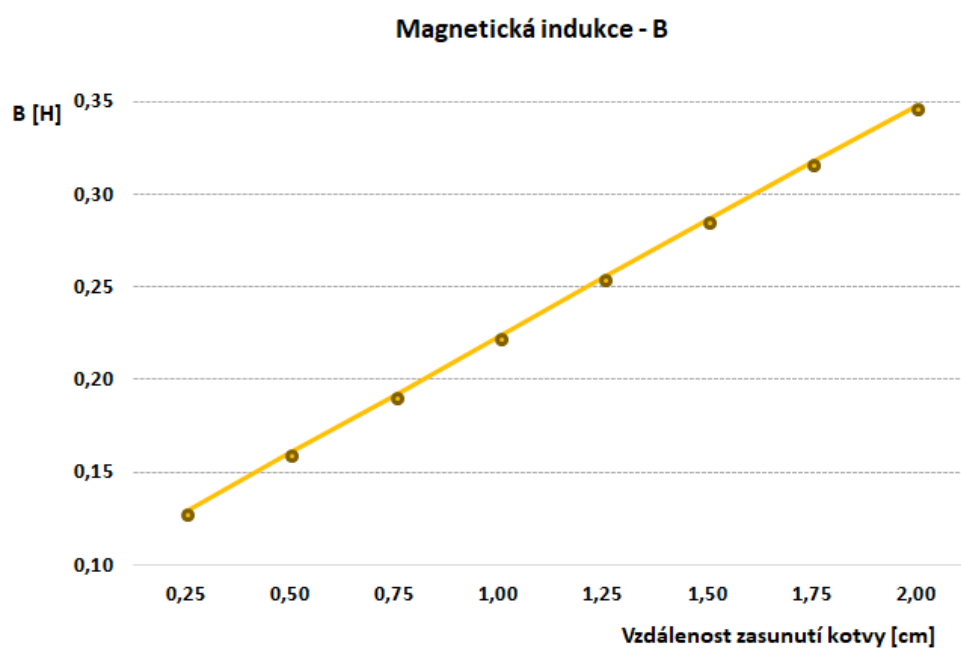
Tabulka č.4: Vnitřní tahová síla elektromagnetu a magnetická indukce ve zvoleném bodě – návrh č.4

Návrh č.4 - "I"			
Měření č.	Poloha kotvy [cm]	Vnitřní tahová síla - Fim [N]	Magnetická indukce - B [T] (obr.:4.3.19)
1	0,01	2,55	0,10
2	0,25	2,81	0,13
3	0,5	2,82	0,16
4	0,75	2,81	0,19
5	1	2,81	0,22
6	1,25	2,80	0,25
7	1,5	2,80	0,29
8	1,75	2,78	0,32
9	2	2,76	0,35



Obr.4.3.20:

Závislost polohy kotvy na velikosti tahové síly elektromagnetu.



Obr.4.3.21: Závislost polohy kotvy na magnetické indukci ve zvoleném bodě.

5 ZÁVĚR

Na zvolený typ stejnosměrného motoru byl proveden návrh na zlepšení komutace, který by měl vést k vylepšení vlastností, týkajících se chodu stejnosměrného stroje. V této bakalářské práci bylo snahou vyřešit teoreticky problém s pevně nastavitelným držákem kartáčů, u kterých není možnost přednastavení předstihu, protože daný typ stejnosměrného motoru se využívá pro oba směry otáček. U tohoto provedení není možnost v provozu předstih nastavit, proto bakalářská práce je zaměřena na navrhnutí možnosti tohoto nastavení za provozu. Výsledkem je návrh ovládání nosiče kartáčů, který upraví pozici uhlíku do nejpříjemnějšího nastavení, které bude šetrné, z hlediska průběhu komutace, k lamelám a vinutí motoru a tím i ovlivní životnost a chod stejnosměrného stroje.

Jako pohonné zařízení, které otáčí držákem kartáčů byl zvolen elektromagnet vhodných geometrických rozměrů. Dle výsledných charakteristik se rozhodovalo o vhodnosti daného typu, na kterém se vylepší fyzikální vlastnosti na požadovanou úroveň.

První typ elektromagnetu – tvar CI svou charakteristikou neuspokojoval zejména v záběrovém tahu, kde počáteční hodnota činila pouze 0,6 N. V návrhu je počítáno s pružinou, která působí na kotvu, aby ji po přerušení napětí při reverzním chodu motoru, vrátila do původní polohy. Síla pružiny v původní poloze by měla být poloviční hodnoty působící tahové síly elektromagnetu, v tomto případě 0,3 N. Proto bylo vhodné vylepšit vlastnosti elektromagnetu tak, aby počáteční tahová síla byla co největší a zároveň, aby se nezvětšovala geometrie tělesa. V návrhu č.2 se upravil tvar kotvy, která dovolila snížit závit cívký a navýšit počáteční tahovou sílu na 3,1 N. Tuto úpravu hodnotím pozitivně a se svými vlastnostmi by byla vhodná pro ovládání mechanismu držáku kartáčů.

Dalším návrhem č.3 se vylepšil tvar i charakteristika elektromagnetu, která dosahovala konstantní průběh, ale s menší tahovou silou. Proto byla zdvojnásobena tloušťka feromagnetického materiálu z 10 mm na 20 mm. Zde bylo dosaženo konstantních hodnot 2,8 N v celém průběhu posuvu a celkem přijatelných geometrických tvarů, které by vyhovovaly zvolenému typu motoru.

Literatura

- [1] CHMELÍK, L., VESELKA, F. Kluzný kontakt v elektrických strojích. KEY Publishing s.r.o., Nádražní 733/176, 702 00 Ostrava-Přívov, 2007, 258 stran, ISBN 978-80-87071-59-5
- [2] ŘÍHA, J., Elektrické stroje a přístroje, 288 stran, L26-C1-II-84/55746
- [3] UHLÍŘ, A KOLEKTIV, Elektrické stroje a pohony. Nakladatelství ČVUT, 2007, ISBN-978-80-01-03730-0
- [4] CIGÁNEK, L., Elektrické přístroje spínací, ochranné a řídící, SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, 1986, přístroje spínací, ochranné a řídící, Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha II v dubnu 1956, 392 str., L25-C3-4-II
- [5] CHLÁDEK, J., LAMMERANER, J., Elektrické stroje na stejnosměrný proud, Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha II v dubnu 1957, 416 str., L-25-B3-4-II
- [6] CIGÁNEK, L., BAUER, M., Elektrické stroje a přístroje, Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha II v dubnu 1957, 640 str., L25-C2-4-II/5270
- [7] BAŠTA, J., KULDA, V., DVOŘÁK, F., Měření na elektrických strojích, 3. Měření na stejnosměrných strojích, Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha 1, v květnu 1957, 252 str., L25b-B3-4-II/5434
- [8] KNOTEK, J., KNOTEK, J., L., Navíjení a převíjení malých elektrických strojů točivých, SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, 1990, 536 str., L25-E1-IV-33f/52636
- [9] HAŇKA, L., Teorie elektromagnetického pole, SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, 113 02 Praha 1, 1982, 224 str., L25-C3-IV-41f/58494
- [10] PEŠEK, M. *Program FEMM – podklady pro výuku v elektronické formě.* FEKT VUT v Brně, 2009. 54 s.
- [11] PATOČKA, M. *Magnetické jevy a obvody ve výkonové elektronice, měřicí technice a silnoprůdové elektrotechnice.* Nakladatelství VUTIUM roku 2011, Brno, ISBN 978-80-214-4003-6
- [12] MAYER, D., Aplikovatelný elektromagnetismus, nakladatelství KOPP, Šumavská 3, 370 01 České Budějovice, 532 str. ISBN 978-80-7232-424
- [13] MACEK, P. *Návrh a analýza elektromagnetu.* FEKT VUT v Brně, 2011. 58 s .
- [14] FEMM, freeware program, <http://www.femm.info>
- [15] <https://cogent-power.com/cms-data/downloads/m700-50a.pdf> – magnetické vlastnosti materiálů, datový list.

Seznam symbolů, veličin a zkratek

FEKT	Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií	
FEMM	Finite Element Method Magnetism	
VUT	Vysoké učení technické v Brně	
DC	Stejnoseměrný motor	
l	Délka	[m]
D	Elektrická indukce	[Cm-2]
U	Elektrické napětí	[V]
R	Elektrický odpor	[Ω]
I	Elektrický proud	[A]
W	Energie	[J]
f	Frekvence, kmitočet	[Hz]
E	Intenzita elektrického pole	[Vm-1]
H	Intenzita magnetického pole	[Am-1]
W_m	Magnetická energie	[J]
B	Magnetická indukce	[T]
W_{co}	Magnetická koenergie	[J]
F_m	Magnetická síla	[N]
U_m	Magnetické napětí	[A]
R_m	Magnetický odpor	[H-1]
R_{mj}	Magnetický odpor jádra	[H-1]
R_{mk}	Magnetický odpor kotvy	[H-1]
R_{mv}	Magnetický odpor vzduchové mezery	[H-1]
R_{mFe}	Magnetický odpor železa	[H-1]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
F_m	Magnetomotorické napětí	[A]
V	Objem	[m3]
S	Obsah plochy, průřez	[m2]
μ	Permeabilita	[Hm-1]
μ_0	Permeabilita	[Hm-1]
ϵ	Permitivita	[Fm-1]
N	Počet závitů cívky	[-]
J	Proudová hustota	[Am-2]
F	Síla	[N]
Ψ	Spřažený magnetický tok	[Wb]
L	Vlastní indukčnost	[H]