

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

K 13115 – Katedra elektroenergetiky



**Modelování a optimalizace aktuátoru
založeného na technologii paralelního uzavření magnetického toku**

**Modelling and Optimization
of Parallel Path Magnetic Technology Actuator**

Diplomová práce

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management

Studijní obor: Elektroenergetika

Vedoucí práce: Ing. Jiří Doubek

Bc. Vladislav Kučera

Praha 2014

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

katedra elektroenergetiky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student: **Bc. Vladislav Kučera**

Studijní program: Elektrotechnika, energetika a management
Obor: Elektroenergetika

Název tématu: **Modelování a optimalizace aktuátoru založeného na technologii paralelního uzavření magnetického toku**

Pokyny pro vypracování:

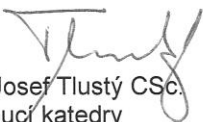
1. Popište princip technologie paralelního uzavření magnetického toku.
2. Funkci a možnou optimalizaci aktuátoru popište pomocí matematického - numerického modelu.
3. Navržený model ověřte experimentálně.

Seznam odborné literatury:

- [1] FLYNN, Charles J. Methods for controlling the path of magnetic flux from a permanent magnet and devices incorporating the same [patent]. Užitný vzor, US6246561 B1. Uděleno 31.07.1998.
- [2] MAYER, Daniel a Bohuš ULRYCH. Elektromagnetické aktuátory. Praha: BEN, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [3] KOLÁŘ, Vladimír, Ivan NĚMEC a Viktor KANICKÝ. FEM: principy a praxe metody konečných prvků. Praha: Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.

Vedoucí: Ing. Jiří Doubek

Platnost zadání: do konce letního semestru 2014/2015


prof. Ing. Josef Tlustý CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Ripka, CSc.
děkan

V Praze dne 6. 2. 2014

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne

.....

Podpis

Poděkování:

Rád bych poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Jiřímu Doubkovi, za navedení tím správným směrem při seznámení s tematikou řešeného problému a za mnoho trpělivosti s četnými dotazy.

Také chci velice poděkovat svým rodičům za podporu při studiu na vysoké škole a své přítelkyni za podporu a protrpěné chvíle při psaní této práce.

Abstrakt:

Práce se zabývá návrhem aktuátoru, který využívá technologii paralelního uzavření magnetického toku, tzv. PPMT. Tato technologie umožňuje ovládání magnetického toku permanentních magnetů, který je řízen cívkami v paralelních magnetických obvodech. Teoretický úvod práce pojednává o základních principech PPMT technologie. V práci je zahrnut, jak matematický, tak numerický model. Numerický model je navržen v aplikaci Agros2D, a reálně popisuje rozložení pole v aktuátoru. Tato aplikace využívá pro řešení *hp*-FEM, tedy adaptabilní metodu konečných prvků vyššího řádu z knihovny Hermes2D. V závěru je vyhotoven reálný model aktuátoru a experimentálně ověřeny teoretické předpoklady.

Klíčová slova:

PPMT, paralelní uzavření magnetického toku, aktuátor, metoda konečných prvků, *hp*-FEM, Agros2D, Hermes2D.

Summary:

The thesis deals with a draft of an actuator based on the so-called Parallel Path Magnetic Technology. This PPMT technology enables to control magnetic fluxes of parallel permanent magnets by parallel field coils placed together in a magnetic circuit. At first, a theoretical introduction of elementary principles of the PPMT technology is presented. The thesis interprets the proper mathematical model and for a given arrangement its numerical solution using the code Agros2D. The numerical solution depicts a distribution of resulting fields within the considered actuator arrangement. The process of the solving is represented by the Finite Element Method, namely *hp*-FEM method of higher order adaptability from the Hermes2D library. Finally, an experimental model is built to verify the presented theoretical background.

Keywords:

PPMT, Parallel Path Magnetic Technology, actuator, Finite Element Method, *hp*-FEM, Agros2D, Hermes2D.

Seznam použitých zkratek a symbolů:

PPMT - technologie paralelního uzavření magnetického toku (Parallel Path Magnetic Technology)

Φ - magnetický indukční tok

B - magnetická indukce

F - síla

S - obsah

μ_0 - permeabilita vakua

B_r - remanentní indukce

δ - velikost vzduchové mezery

W_m - magnetická energie

H - intenzita magnetického pole

I - proud

U_m - magnetomotorické napětí

N - počet závitů cívky

μ - permeabilita

μ_r - relativní permeabilita

V - objem

A_s - práce vnějších sil

FEM - metoda konečných prvků (Finite Element Method)

MKP - metoda konečných prvků

hp -FEM - adaptabilní metoda konečných prvků vyššího řádu přesnosti

Ω - oblast řešení

Γ - hranice řešení

Π - funkcionál

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$ - residuum

A - vektorový magnetický potenciál

J_{ext} - orientovaná proudová hustota

v - rychlost

D - indukce elektrického pole

E - intenzita elektrického pole

ε - permitivita

w_{em} - hustota energie

T_m - Maxwellův tenzor magnetického pole

M - moment

NdBF_e - neodym-bor-železo

α_r - úhel natočení magnetů

γ - konduktivita

k - koeficient plnění cívek

d - průměr vodiče

l_0 - počáteční délka

F_0 - síla potřebná k prodloužení pružiny

k_p - tuhost pružiny

OBSAH

Seznam použitých zkratk a symbolů	7
Obsah	9
1 Úvod	12
2 Aktuátory	13
2.1 Elektromechanické aktuátory	13
3 Technologie paralelního uzavření magnetického toku	14
3.1 Popis principu magnetických toků	14
3.1.1 Jednocestný magnetický tok s jedním zdrojem	14
3.1.2 Dvoucestný magnetický tok s jedním zdrojem	15
3.1.3 Jednocestný magnetický tok s paralelním umístěním zdrojů	17
3.1.4 Jednocestný magnetický tok se sériovým umístěním zdrojů	17
3.1.5 Řízení magnetického toku jednocestné	18
3.1.6 Řízení magnetického toku dvoucestné	19
3.1.7 Řízení magnetického toku paralelně spojených permanentních magnetů	20
3.2 Princip PPMT aktuátoru	21
3.3 Teorie k popisu PPMT	23
3.3.1 Základní vztahy	23
3.3.2 Zjednodušující úvahy	27
4 Metoda konečných prvků	30
4.1 Matematická definice FEM	30
4.2 Obecnější tvar FEM	30
4.3 Princip FEM	32
4.4 Aplikace FEM	34
5 Matematický model	35
5.1 Obecná rovnice magnetického pole	35
5.1.1 Vektorový magnetický potenciál	35

5.1.2	První Maxwellova rovnice	36
5.1.3	Okrajové podmínky	36
5.2	Energie a síly v elektromagnetickém poli	37
5.2.1	Hustota energie v elektromagnetickém poli	37
5.2.2	Energie a síly ve stacionárním magnetickém poli	37
6	Numerický model	39
6.1	Základní popis aplikace Agros2D	39
6.2	Preprocesor	39
6.2.1	Model pro preprocesor	39
6.3	Processor	39
6.4	Postprocesor	40
6.4.1	Model v postprocesoru	41
6.5	Definování problému	41
7	Návrh obvodu a jeho optimalizace	43
7.1	Návrh magnetického obvodu	43
7.2	Návrh elektrického obvodu	45
7.2.1	Cívky s průměrem drátu 0,5 mm a 2 000 závitů	45
7.2.2	Cívky s průměrem drátu 1 mm a 1000 závitů	47
7.2.3	Cívky s průměrem drátu 0,7 mm a 1 600 závitů	48
7.2.4	Optimalizace elektrického obvodu	48
8	Řešení numerického modelu	50
8.1	Oblast řešení	50
8.2	Modelování bez proudu cívkami	50
8.3	Modelování při průchodu proudu cívkami	53
9	Řešení navrženého obvodu a přípravku pro měření	62
9.1	Konstrukce PPMT aktuátoru	62
9.2	Konstrukce přípravku pro měření	64

10	Měření na experimentálním modelu	66
10.1	Měření statických charakteristik.....	66
10.2	Měření pomocí síly pružiny.....	71
10.3	Nejistoty měření	76
11	Analýza výsledků.....	77
11.1	Analýza statických charakteristik.....	77
11.2	Analýza měření pomocí pružin	80
12	Závěr	82
13	Seznam použité literatury	84
14	Přílohy.....	I

1 ÚVOD

Předkládaná diplomová práce se zabývá modelováním a optimalizací aktuátoru založeného na technologii paralelního uzavření magnetického toku. Název této technologie vychází z překladu anglického názvu *parallel path magnetic technology* (PPMT). Technologie využívá ovládání magnetického toku permanentních magnetů, který je řízen cívkami v paralelních magnetických obvodech.

Předložené téma bylo zvoleno z důvodu, že využití technologie PPMT ve srovnání s konvekčními elektromagnetickými technologiemi přináší jisté nesporné výhody. Také je možnost využití PPMT technologie nejen u aktuátorů, ale také u motorů, rotačních pohonů a generátorů. Díky tomu má tato technologie velký potenciál.

Hlavním cílem této práce je vytvořit model, na jehož základě bude následně vyroben funkční vzorek PPMT aktuátoru, na kterém se experimentálně ověří předpoklady. Práce je také zaměřena na tvorbu numerického a matematického modelu.

Práce je tedy složena ze tří hlavních témat. V první části se práce zaměří na vytvoření přehledného zpracování základních teoretických principů technologie paralelního uzavření magnetického toku. Zde budou popsány jednotlivé, pro práci důležité, principy magnetických polí a jejich rovnice.

Druhá část se zabývá popisem funkce a optimalizace aktuátoru, nejen pomocí matematického a numerického modelu za použití znalostí principů technologie a využití výpočetních aplikací, kterými je např. Agros2D. Celý model, kterým se tato práce zabývá, je z důvodu rozsahu práce řešen pouze jako statický.

Třetí závěrečnou částí je navržený a sestrojený model PPMT aktuátoru ověřit experimentálně. Pokusíme se zejména potvrdit funkčnost a ověřit příslušné teoretické předpoklady, které jsme nastínili v první části práce.

Téma samotné práce, tedy technologie paralelního uzavření magnetického toku, je velice rozsáhlé a komplikované, proto se v práci využívá určitých zjednodušujících úvah, které ovšem neovlivňují závěry této práce.

Teoretická část

2 AKTUÁTORY

Aktuátory jsou také nazývané jako akční členy, či výkonové převodníky. Tato zařízení transformují vstupní (řídící) veličinu na výstupní (akční) veličinu, zpravidla mechanickou. Výstupní mechanická veličina vyvolává silové působení, které nejčastěji způsobuje pohyb po určité dráze, ale může také docházet k jiným účinkům např. deformaci. Z hlediska fyzikální povahy vstupní (řídící) veličiny existují aktuátory elektromagnetické, světelné, teplotní atd. Podle způsobu přeměny energie se aktuátory dělí na:

- elektromechanické - řízené elektrickým signálem,
- pneumatické - řízené plynem,
- hydraulické - řízené kapalinou,
- nekonvekční - piezoelektrické, bimetalové, elektrochemické apod. [1]

V této práci se budeme zabývat pouze elektromechanickými aktuátory.

2.1 Elektromechanické aktuátory

Elektromechanické aktuátory využívají elektro-magneticko-mechanického principu a podle definice aktuátoru z předešlé kapitoly je vstupní veličinou elektrický signál ve formě napětí nebo proudu a výstupem je mechanická veličina. Funkce těchto aktuátorů je založena na silovém působení:

- elektrického pole na nabitá tělesa a dielektrika,
- magnetického pole na feromagnetika a vodiče procházené proudem.

Častěji se používá působení magnetického pole z důvodu vyšších hodnot materiálových konstant, díky čemuž je vyšší hustota energie a tedy i silové působení magnetického pole. Proto takové aktuátory nazýváme elektromagnetické. [1]

3 TECHNOLOGIE PARALELNÍHO UZAVŘENÍ MAGNETICKÉHO TOKU

Název dále popsané technologie, jako technologie paralelního uzavření magnetického toku, je odvozen z anglického názvu Parallel Path Magnetic Technology. Pro tento název bude dále v textu používána všeobecně využívaná zkratka PPMT.

U technologie PPMT se využívá takové uspořádání magnetického obvodu, díky kterému je možné uzavírání magnetického indukčního toku (Φ), přes více paralelních cest s možností řízení tohoto toku. Která z cest bude tedy v daný okamžik aktivní, a na kterou část bude v tento okamžik síla vyvolaná tímto tokem působit, je podstatou této technologie. Magnetický obvod se skládá z permanentního magnetu v kombinaci s elektromagnetem.

Motor založený na technologii PPMT roku 1995 v U. S. A. patentoval pod číslem US 006246561B1 vynálezce Charles J. Flynn. Dodnes jej využívá firma Flynn Research Inc. při výrobě motorů, generátorů, rotačních a lineárních aktuátorů, magnetických západek atd.

Užití technologie PPMT s ostatními elektromechanickými zařízeními přináší následující výhody:

- kompaktnější rozměry,
- menší hmotnost,
- nižší provozní teplota,
- větší energetická účinnost.

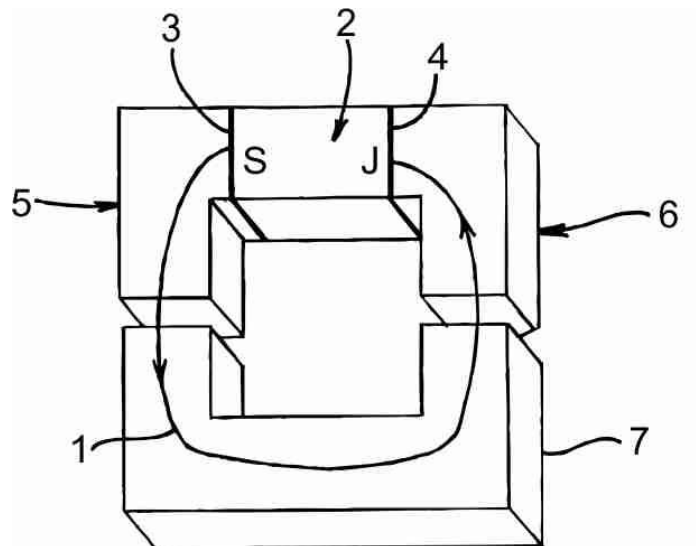
Díky těmto vlastnostem je využívání technologie PPMT stále atraktivnější v průmyslových odvětvích a nejen ve vojenském a vesmírném průmyslu. [2]

3.1 Popis principu magnetických toků

Abychom mohli lépe pochopit technologii PPMT, budeme se nejprve věnovat základním principům magnetických toků, které jsou podstatné pro pochopení technologie.

3.1.1 Jednocestný magnetický tok s jedním zdrojem

Na Obr. 1 je zařízení, které využívá magnetický indukční tok **1**, který je vyvolán permanentním magnetem nebo elektromagnetem **2** se severním pólem **3** a jižním pólem **4**. Na tyto póly magnetu dosedají pólové nástavce **5** a **6**, magnetická cesta je dále uzavřena přes tzv. kotvu **7**. Pólové nástavce a kotva jsou vyrobeny z měkkého železa nebo jiného magnetického materiálu, který má nízkou hysterezi a nízkou reluktanci. Zařízením tedy prochází magnetický indukční tok **1** od severního pólu k jižnímu, který je přímo úměrný magnetické indukci B .



Obr. 1 - Jednocestný magnetický tok [2]

Mezi kotvou **7** a pólovými nástavci **5,6** vzniká díky magnetické indukci přídržná síla F , kterou je možné popsat následující rovnicí:

$$F = \frac{B^2 S}{2\mu_0}, \quad [\text{N}, \text{T}, \text{m}^2, \text{Hm}^{-1}] \quad (3.1)$$

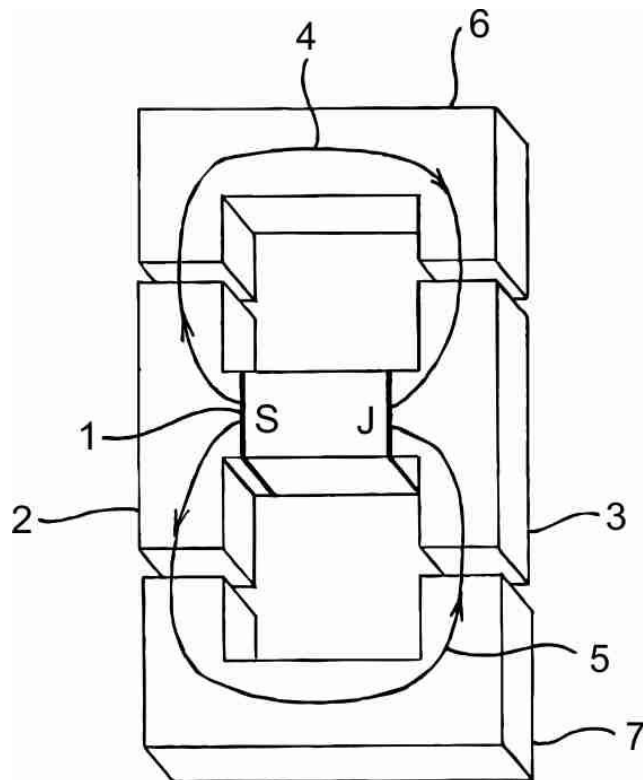
kde B je magnetická indukce, S je obsah sousedních stran, a μ_0 permeabilita vakua. Tato rovnice platí za předpokladu, že magnetická indukce je konstantní na celém magnetickém indukčním toku **1**. Celková brzdná síla kotvy proti pólovým nástavcům je určena rovnicí:

$$F_{r1} = \frac{B^2 S}{\mu_0}. \quad [\text{N}, \text{T}, \text{m}^2, \text{Hm}^{-1}] \quad (3.2)$$

[2]

3.1.2 Dvoucestný magnetický tok s jedním zdrojem

Na Obr. 2 je vidět zařízení, které využívá stejný zdroj magnetického toku **1**, jako byl použit v případě jednocestného magnetického toku na Obr. 1. Pólové nástavce **2, 3** jsou opět umístěny u pólů zdroje magnetického toku a rozdělují magnetický indukční tok ze zdroje na dva magnetické indukční toky **4, 5**, které mají dohromady stejný magnetický indukční tok, jako v případě jednocestného magnetického toku z Obr. 1. Tyto magnetické indukční toky jsou uzavřeny přes tzv. kotvy **6, 7**.



Obr. 2 - Dvoucestný magnetický tok [2]

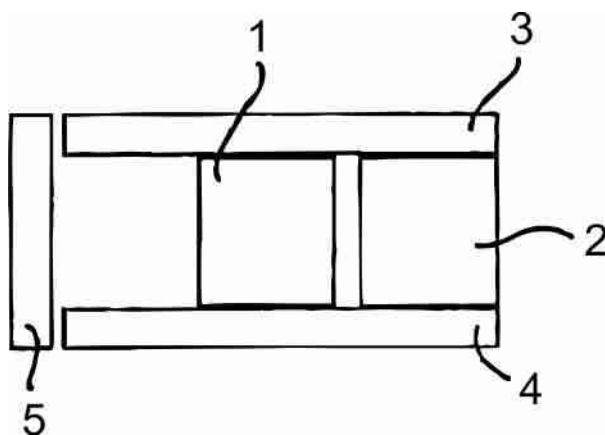
Magnetický indukční tok od zdroje je rozdělen do dvou cest **4**, **5**. Magnetický indukční tok cestami je přímo úměrný magnetické indukci jednou cestou, ale o polovinu nižší než je magnetická indukce způsobená jednocestným magnetickým tokem z Obr. 1. Z těchto podmínek vyplývá rovnice pro brzdnou sílu kotvy **7**, proti pólovým nástavcům **2**, **3** stanovena jako:

$$F_{t2} = \frac{\left(\frac{B}{2}\right)^2 A}{\mu_0} = \frac{B^2 A}{4\mu_0} = \frac{F_{t1}}{4}. \quad [N, T, m^2, Hm^{-1}, N] \quad (3.3)$$

Z této rovnice je tedy zřejmé, že stejné množství magnetické indukce podél dvou cest oproti jedné cestě sníží přídržnou magnetickou sílu kotvy o jednu čtvrtinu, oproti jedné polovině, jak by se dalo očekávat. Tento jev vyplývá z různých propustných cest a poskytuje nám vlastnosti, které v technologii PPMT využíváme. [2]

3.1.3 Jednocestný magnetický tok s paralelním umístěním zdrojů

Na Obr. 3 jsou umístěny dva paralelní zdroje magnetického toku **1, 2**, na které jsou přiloženy pólové nástavce **3, 4** a na tyto nástavce dosedá tzv. kotva **5**. Díky paralelním zdrojům magnetického indukčního toku je magnetická indukce přes kotvu dvojnásobná oproti tomu, kdyby byl připojen pouze jeden zdroj magnetického toku. Ale intenzita magnetického pole H , kterou působí samotné paralelní zdroje magnetického toku **1, 2** je stejná, jako v případě, kdy by byl pouze jeden zdroj magnetického indukčního toku. Tento fakt platí bez ohledu na to, zda jsou zdroje magnetického indukčního toku permanentní magnety, elektromagnety nebo jsou jejich kombinací. [2]



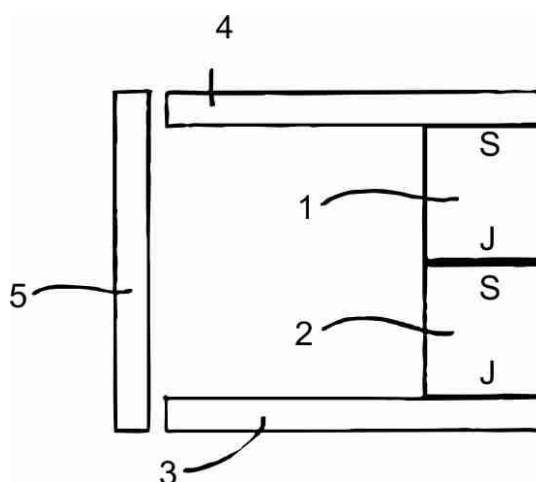
Obr. 3 - Jednocestný magnetický tok s paralelním umístěním zdrojů [2]

3.1.4 Jednocestný magnetický tok se sériovým umístěním zdrojů

Na Obr. 4 jsou umístěny dva zdroje magnetického indukčního toku sériově **1, 2** na zdroje dosedají pólové nástavce **3, 4** a k těmto nástavcům je připojena tzv. kotva **5**. V případě sériového zapojení se budou lišit závislosti magnetické indukce a intenzity magnetického pole podle povahy zdrojů magnetického toku.

1. Oba zdroje magnetického indukčního toku **1, 2** jsou permanentní magnety, což ale nezpůsobuje, že intenzita magnetického pole se zdvojnásobí oproti stavu, kdy je přítomen pouze jeden permanentní magnet. Magnetická indukce procházející kotvou **5** bude též stejná, jako v případě připojení pouze jednoho magnetu.
2. Oba zdroje magnetického indukčního toku **1, 2** jsou stejné elektromagnety, intenzita magnetického pole je dvojnásobná oproti stavu, kdy je pouze jeden elektromagnet. Magnetická indukce se zvyšuje podle dané hysterezní závislosti.

3. Pokud je zdroj magnetického indukčního toku permanentní magnet **1** a elektromagnet **2**, intenzita elektrického pole je zvýšená oproti použití jednoho zdroje. Díky tomu, že permanentní magnet je blízko nasycení magnetické indukce, může být zvýšena magnetická indukce z remanence B_r na B_{max} pomocí elektromagnetu. V případě, že je elektromagnet v kontaktu s permanentním magnetem, roste magnetická indukce, až dokud hodnota magnetické indukce nedosáhne B_{max} . Potom už elektromagnet nepřispívá, pokud není možná cesta kolem permanentního magnetu; tu bychom nazvali by-pass. [2]

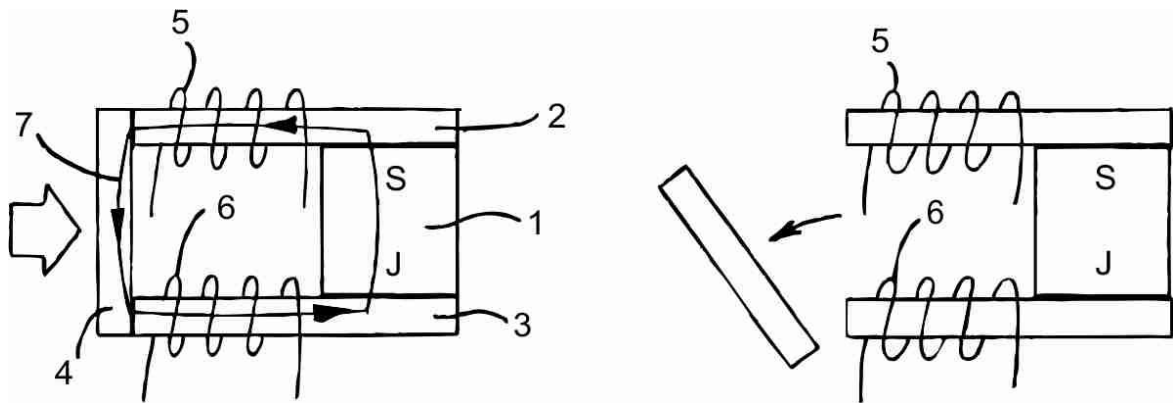


Obr. 4 - Jednocestný magnetický tok se sériovým umístěním zdrojů [2]

3.1.5 Řízení magnetického toku jednocestné

Na Obr. 5 je zobrazeno zařízení s jednocestným řízením magnetického indukčního toku za použití permanentního magnetu **1**, pólových nástavců **2**, **3**, tzv. kotvy **4** a řízených cívek **5**, **6**. Pokud nejsou řídicí cívky pod napětím (Obr. 5 vlevo), představuje cesta **7** průchod magnetického indukčního toku z permanentního magnetu **1**. Magnetický indukční tok **7** způsobuje, že je kotva **4** přitahována k pólovým nástavcům.

Pokud řídicí cívky napájíme, tak aby vytvořily stejně velký magnetický indukční tok, ale opačný k toku od permanentního magnetu **1**, je magnetický indukční tok z permanentního magnetu blokován a kotva **4** není přitahována žádnou silou a odpadne, viz. Obr. 5 vpravo. Toto zařízení je možné využít, ale výhodnější využití je u zařízení, které má více cest magnetického indukčního toku. [2]

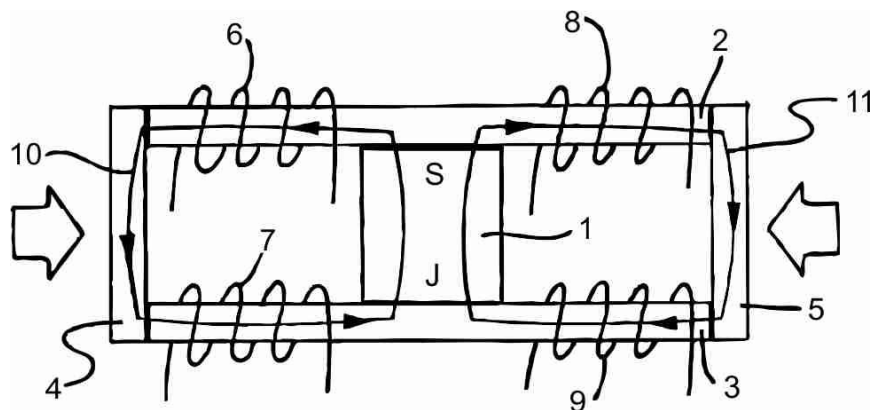


Obr. 5 - Řízení magnetického toku jednocestné [2]

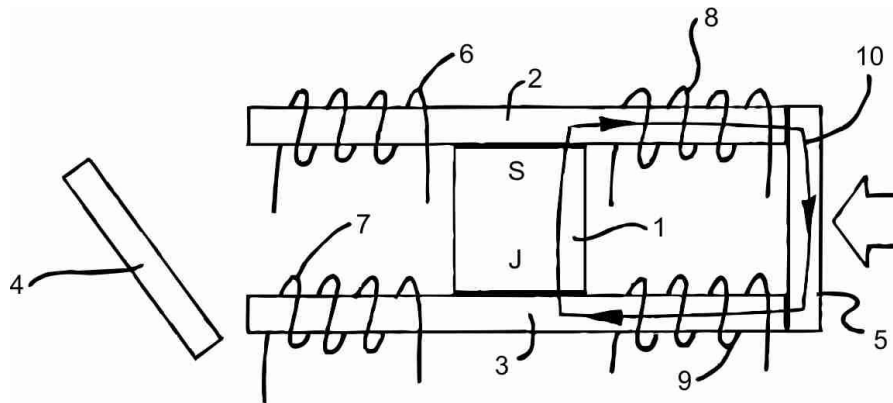
3.1.6 Řízení magnetického toku dvoucestné

Na Obr. 6 je znázorněno řízení magnetického indukčního toku dvoucestné. V tomto zařízení se využívá permanentního magnetu **1**, pólových nastavců **2, 3**, tzv. kotev **4, 5** a řízených cívek **6, 7, 8, 9**. Na tomto obrázku jsou vidět také cesty magnetického indukčního toku **10, 11**, které mají shodnou reluktanci. Pokud není na řídicí cívky připojeno napětí, je magnetický indukční tok z permanentního magnetu **1** rozdělen na dva stejné magnetické indukční toky **10, 11**. Díky těmto magnetickým indukčním tokům jsou kotvy **4, 5** přitahovány stejnou silou k pólovým nastavcům **2, 3**.

Pokud jsou na Obr. 7 řídicí cívky **6, 7** napájeny tak, aby vytvořily stejný magnetický indukční tok, jako magnetický indukční tok **10** z Obr. 6 vyvolaný permanentním magnetem, ale opačným směrem, je síla, která působí na kotvu **4**, blokována a kotva odpadne, viz Obr. 7, ale také se zvýší magnetický indukční tok na cestě **10** (**11** na Obr. 6). Ten způsobí, že magnetická indukce bude dvakrát vyšší, než pokud jsou řídicí cívky **6, 7** bez napájení. Proto je síla působící na kotvu **5** čtyřikrát vyšší oproti kotvě na Obr. 6. Pokud bychom napájeli řídicí cívky **8, 9**, je možné dosáhnout opačného stavu.



Obr. 6 - Řízení magnetického toku dvoucestné bez napájení [2]

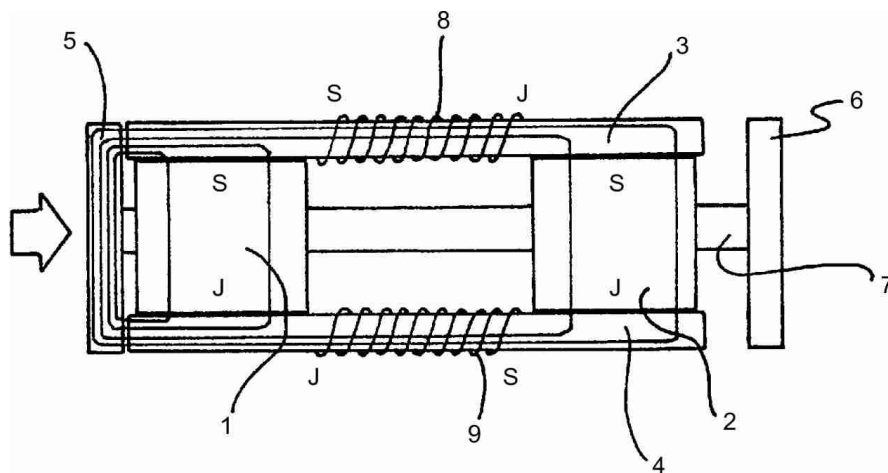


Obr. 7 - Řízení magnetického toku dvoucestné s napájením [2]

Z tohoto výkladu je zřejmé, že spojovací sílu permanentního magnetu **1**, kterou přitahujeme kotvu, je tedy možné přepnout dvoucestně za použití jedné poloviny výkonu, který by potřebovaly cívky na stejný magnetický tok podél jedné cesty. Schopnost snadného přepínání magnetické spojovací síly je možné efektivně využít u pístových, rotačních pohybů a energetické transformace. [2]

3.1.7 Řízení magnetického toku paralelně spojených permanentních magnetů

Na Obr. 8 je znázorněno provedení zařízení pro řízení magnetického indukčního toku dvou paralelně spojených permanentních magnetů. Na toto zařízení jsou použity dva permanentní magnety **1, 2**, které mají severní a jižní pól umístěny se shodnou orientací. Na permanentní magnety dosedají pólové nástavce **3, 4**. A magnetický obvod uzavírají tzv. kotvy **5, 6**, které jsou dohromady spojeny tyčí **7**, která umožňuje kotvám pohyb do záběru a ze záběru pro různé napětí řídicích cívek. Dále jsou na Obr. 8 zobrazeny řídicí cívky **8, 9**, které jsou umístěny mezi permanentní magnety na pólových nástavcích. Řídicí cívky je možné napájet tak, že u řídicí cívky **8** je severní pól vlevo a jižní pól vpravo, naopak u řídicí cívky **9** je severní pól vpravo a jižní pól vlevo. Řídicí cívky jsou tedy spojeny antiparalelně. Pokud jsou řídicí cívky napájeny, jak je uvedeno, je poměr magnetických toků takový, že přitahuje kotvu **5** s pomocí obou permanentních magnetů a kotva **6** je odpojena. [2]



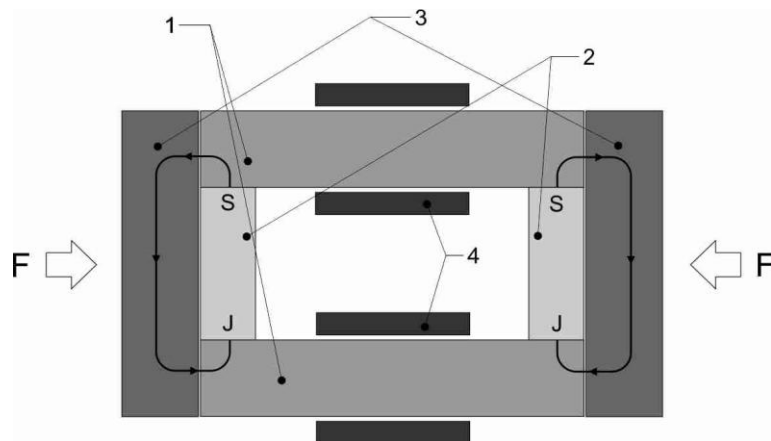
Obr. 8 - Řízení magnetických toků paralelně spojených permanentních magnetů [2]

3.2 Princip PPMT aktuátoru

Princip PPMT aktuátoru, kterým se zabývá tato práce, vychází z uspořádání podle kapitoly 3.1.7 Řízení magnetického toku paralelně spojených permanentních magnetů.

Pro zjednodušení následujícího výkladu a rovnic se vychází z předpokladu, že zařízení a veškeré jeho části pracují za ideálních podmínek.

PPMT aktuátor je zobrazen na Obr. 9. Magnetický obvod je složen z dlouhých feromagnetických tyčí, pólových nástavců **1**. Tyto pólové nástavce jsou od sebe odděleny dvěma stejně orientovanými permanentními magnety **2**. Pro uzavření magnetického obvodu je použito kratších feromagnetických tyčí tzv. kotev **3**, které jsou umístěny na levé a pravé straně a dosedají na pólové nástavce. Mezi pólovými nástavci a kotvou se nachází vzduchová mezera. Na delších feromagnetických tyčích mezi permanentními magnety jsou umístěny dvě řídicí cívky **4**, které mohou být připojeny ke zdroji proudu. Spojení řídicích cívek je antiparalelní. Znárodnění takového uspořádání aktuátoru je uvedeno na Obr. 9.

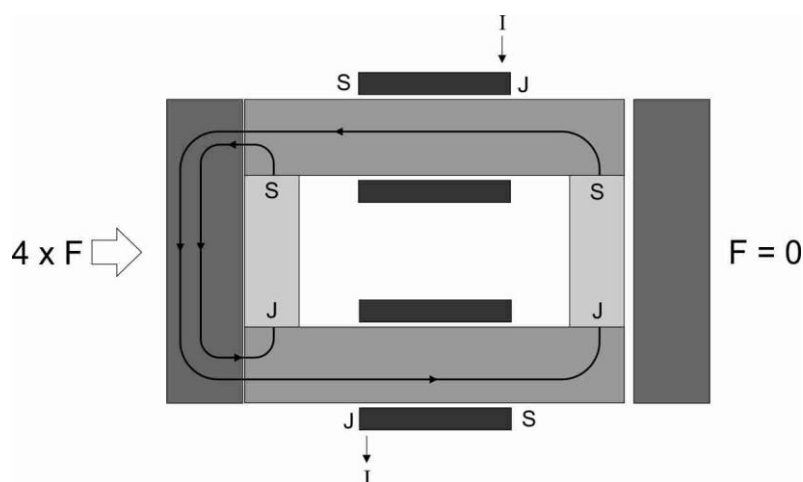


Obr. 9 - Schéma PPMT aktuátoru bez napájení

V případě, že řídicími cívkami neprochází proud, magnetický obvod se chová, jako by řídicí cívky neexistovaly (neovlivňují směr magnetického indukčního toku) a obě kotvy jsou k magnetickému obvodu přitahovány silou permanentních magnetů F . Magnetický obvod je ideálně symetrický, obě síly jsou stejné. Chování magnetického indukčního pole je znázorněno na Obr. 9.

V případě, že řídicími cívkami začne protékat proud, který vytvoří na cívkách určitou polaritu, jak je uvedeno na Obr. 10, způsobí řídicí cívky magnetický indukční tok, který při tomto uspořádání zvyšuje působení magnetického indukčního toku na levé straně, zatím co v našem případě magnetický indukční tok na pravé straně klesá a to až do té doby, kdy velikost proudu dosáhne hodnoty, která způsobí, že magnetický indukční tok řídicími cívkami je co do velikosti stejný s magnetickým indukčním tokem jednoho magnetu. Až tato situace nastane, veškerý magnetický indukční tok se bude uzavírat přes levou kotvu, hodnota tohoto magnetického indukčního toku se tedy zdvojnásobí.

Výsledkem tohoto působení, je že přitažná síla na levé straně roste, zatím co přitažná síla působící na pravou stranu postupně klesá, díky tomu může být kotva na pravé straně odstraněna. Po odstranění pravé kotvy vyvolává magnetický indukční tok přitažnou sílu levé kotvy, která je v ideálním případě čtyřikrát větší než původní síla. Z důvodu vyvolané dvojnásobné magnetické indukce B . Tato magnetická indukce je přímo úměrná magnetickému indukčnímu toku a magnetická energie mezery W_m je úměrná B^2 , proto hodnota magnetické energie vzroste čtyřikrát. Sílu F působící na kotvu můžeme také definovat jako $\frac{dW_m}{d\delta}$, kde δ je velikost vzduchové mezery. Pokud se vzduchová mezera nemění, magnetická energie vzroste u příslušné kotvy čtyřikrát, z tohoto důvodu síla se zdvojnásobením magnetického indukčního toku také vzroste čtyřikrát.



Obr. 10 - Schéma PPMT aktuátoru s napájením

V našem případě budeme využívat síly pružin, z důvodu odstranění kotvy. Ty mají za stavu, kdy neprochází proud, menší sílu, než jsou síly permanentních magnetů, které působí na kotvy. Po odtahení pravé kotvy vznikne vzduchová mezera. Pokud je magnetický obvod stále ovlivněn magnetickým indukčním polem, vybuzeným řídicími cívkami a vzniklá vzduchová mezera je dostatečně velká, lze napájení řídicích cívek vypnout. Aktuátor zůstane ve stavu, kdy je levá strana přitahována čtyřnásobnou silou. Zařízení tedy zůstane v tomto stavu bez nutnosti napájení. Připojíme-li na cívku další krátkodobý impuls, ale tentokrát s opačným směrem proudu, připne se tentokrát pravá spojka, za předpokladu, že síla působící nyní na pravé straně je vyšší než součet síly pružiny a možných třecích sil.

K ovládání této technologie musí mít řídicí cívka pouze dostatečný proud, aby se magnetický tok vytvořený touto cívkou rovnal magnetickému toku jednoho permanentního magnetu. To je výhoda všech zařízení využívající technologii PPMT, tedy že demagnetizace jedné a magnetizace druhé části probíhá pouze jedním proudovým impulzem, který musí vyrovnat magnetický indukční tok pouze jednoho permanentního magnetu a poté je možné napájení odpojit, pokud to umožňuje geometrické uspořádání zařízení. [3], [4]

3.3 Teorie k popisu PPMT

Z důvodu pochopení principů, z kterých technologie PPMT aktuátoru vychází, je nutné si uvést některé základní vztahy a ty s některými zjednodušeními aplikovat.

3.3.1 Základní vztahy

Pro stacionární magnetické pole je zapotřebí znát některé základní vztahy.

První Maxwellova rovnice

Jednou ze základních rovnic je první Maxwellova rovnice v integrálním tvaru:

$$\oint_c H dl = I_c, \quad [Am^{-1}, A] \quad (3.4)$$

kde H je intenzita magnetického pole, I_c je celkový proud.

Tato rovnice známá také jako „Zákon celkového proudu, kde rovnice vyjadřuje, že oběhové magnetické napětí na libovolně uzavřené orientované křivce c je rovno proudu, který je s křivkou c spřažen.“ [5 str. 55] Tato rovnice říká, že se v okolí vodiče, kterým prochází proud I_c , vytváří magnetické pole s intenzitou magnetického pole H . [5]

Magnetomotorické napětí

Celkový proud I_c je v magnetických obvodech také nazýván jako magnetomotorické napětí U_m . Magnetomotorické napětí pro cívku o N závitoch, kterými protéká proud I , je dáno rovnicí [5]:

$$U_m = N \cdot I = I_c. \quad [\text{A}, -, \text{A}] \quad (3.5)$$

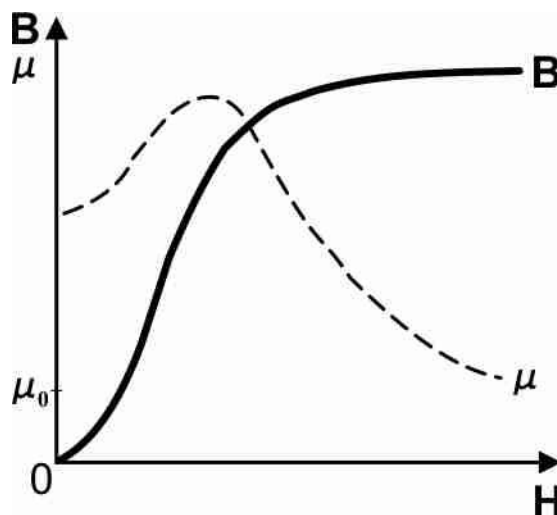
Magnetická indukce

Pro intenzitu magnetického pole H a magnetickou indukci B platí:

$$B = \mu \cdot H, \quad [\text{T}, \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}] \text{ kde } \mu = \mu_0 \mu_r, \quad (3.6), (3.7)$$

kde μ je permeabilita a udává magnetické vlastnosti prostředí, μ_0 permeabilita vakua definována $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m] a μ_r relativní permeabilita, kterou lze kvantitativně hodnotit chování látek v magnetickém poli. Pro feromagnetické látky je relativní permeabilita značně vysoká $\mu_r \gg 1$ a magnetická indukce se v těchto látkách výrazně zvýší. Feromagnetické látky umožňují dosáhnout vysoké hodnoty magnetické indukce a tedy i magnetického indukčního toku, proto se využívají jako konstrukční materiál v elektrických zařízeních.

Feromagnetika jsou magneticky nelineární, tato nelinearita je zřejmá z Obr. 11, tedy tzv. magnetizační křivky. Tato křivka udává závislosti $B = B(H)$ a $\mu = \mu(H)$. [5]



Obr. 11 - Magnetizační křivka [5]

Magnetický indukční tok

Definice magnetického indukčního toku, tedy toku vektoru magnetické indukce orientovanou plochou, je:

$$\phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S}, \quad [\text{Wb}, \text{T}, \text{m}^2] \quad (3.8)$$

kde ϕ je magnetický indukční tok, \mathbf{B} je magnetická indukce a S je plocha.

Dosazením rovnice magnetického indukčního toku (3.8) a rovnice magnetické indukce (3.6) do první Maxwellovy rovnice (3.4) je zřejmé, že pokud vodičem protéká proud, tak tento proud vytvoří tok magnetické indukce plochou, což je magnetický indukční tok. Pokud je tento vodič navinut kolem magnetického obvodu, jak je tomu v případě aktuátoru, magnetický obvod má podle předešlých úvah $\mu_r \gg 1$ (v okolí je vzduch s $\mu_r \cong 1$), proto bude téměř celý magnetický indukční tok procházet magnetickým obvodem aktuátoru. Pokud je magnetický indukční tok označený ϕ spřažený s jedním závitěm vodiče, můžeme celkový magnetický indukční tok, který vytvoří N závitů, vyjádřit:

$$\phi_c = N \cdot \phi, \quad (3.9)$$

kde ϕ_c je celkový spřažený magnetický indukční tok, N počet závitů a ϕ je magnetický indukční tok jedním závitěm. [5]

Energie magnetického pole

Máme-li prostorovou oblast V a v ní magnetické pole, které je charakterizováno vektory intenzity elektrického pole H a magnetickou indukcí B , lze magnetickou energii vyjádřit:

$$W_m = \int_V w_m dV, \quad [\text{J}, \text{Jm}^{-3}, \text{m}^3] \quad (3.10)$$

kde W_m je energie magnetického pole, w_m je hustota energie magnetického pole a V je prostorová oblast.

Hustota energie magnetického pole je dána:

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B}. \quad [\text{Jm}^{-3}, \text{Am}^{-1}, \text{T}]$$

(3.11)

Pro lineární prostředí, pokud je permeabilita konstantní, můžeme hustotu energie vyjádřit:

$$w_m = \int_0^B H dB = \frac{1}{\mu} \int_0^B B dB = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2} B \cdot H = \frac{1}{2} \mu H^2, \quad (3.12)$$

z těchto úvah je zřejmé, že magnetická energie v daném objemu V je úměrná kvadrátu indukce magnetického pole, případně intenzity magnetického pole. [5]

Síla z energie magnetického pole

Pokud máme soustavu n smyček s procházejícími proudy I_1, \dots, I_n , na i -tou smyčku bude působit síla F po dráze ds . Tato síla vykoná práci:

$$dA_s = \mathbf{F} ds = F_s ds, \quad [\text{J, N, m}] \quad (3.13)$$

potom podle zákona zachování energie platí:

$$dA_s = dA_v - dW_m, \quad (3.14)$$

kde A_s je práce vnějších sil, dA_v je změna energie magnetického indukčního toku spřaženého se smyčkami a W_m energie magnetického pole všech smyček. Pokud jsou proudy ve vodičích konstantní, pak:

$$dW_m = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n I_i d\phi_i, \quad [\text{J, A, Wb}] \quad (3.15)$$

$$dA_v = \sum_{i=1}^n I_i d\phi_i = 2dW_m, \quad (3.16)$$

potom tedy:

$$dA = \mathbf{F} ds = 2dW_m - dW_m = dW_m, \quad (3.17)$$

odkud:

$$\mathbf{F} = \frac{\partial W_m}{\partial \mathbf{s}}, \quad [\text{N, J, m}] \quad (3.18)$$

kde F je síla působící na kotvu, W_m je energie magnetického pole a s je dráha, po které se kotva pohybuje. [5]

3.3.2 Zjednodušující úvahy

Abychom byli schopni popsat chování magnetického obvodu aktuátoru několika rovnicemi, je nutné použít některá zjednodušení.

Magnetický indukční tok průchod

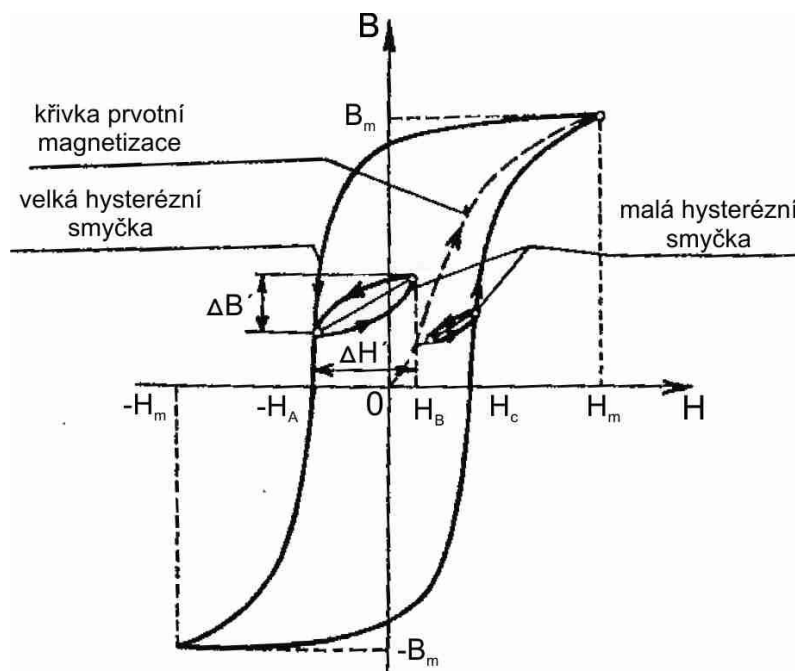
Všechny větve magnetického obvodu s průřezem S mají rozloženou magnetickou indukci rovnoměrně, díky tomu nedochází ke shlukování indukčních čar a přesycení magnetického obvodu, proto lze rovnici (3.8) upravit na obecný tvar:

$$\phi = B \cdot S, \quad [\text{Wb, T, m}^2] \quad (3.19)$$

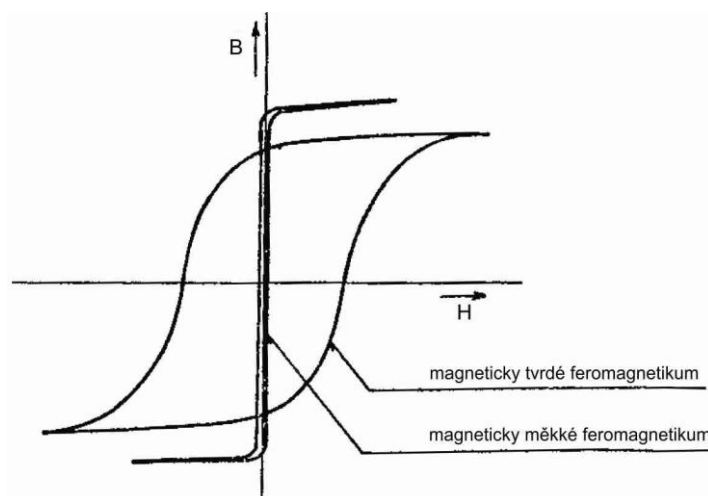
avšak ve skutečnosti dochází při průchodu magnetického indukčního toku vzduchovou mezerou k rozptylu. Magnetický indukční tok podle rovnice (3.19) se při průchodu vzduchovou mezerou zmenšuje, také se část magnetického indukčního toku neuzavírá magnetickým obvodem a vzniká rozptylový tok. Tyto rozptyly na počátku simulačního modelu zanedbáme. [5]

Linearizace magnetického obvodu

Magnetický obvod, který se nechová lineárně, chceme linearizovat. To znamená lineární závislost mezi magnetickou indukcí a intenzitou magnetického pole, chceme tedy konstantní permitivitu v daném materiálu ($\mu = \text{konst.}$). V magnetickém obvodu, kterým se zabývá tato práce, se nacházejí tři druhy materiálu. Ve vzduchové mezeře je vzduch, který má relativní permeabilitu blízkou jedné, tudíž toto prostředí je lineární. Dále jádra z feromagnetického materiálu a permanentní magnet, to jsou nelineární materiály. Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole je určena hysterezní smyčkou. Každý materiál má charakteristickou hysterezní smyčku (Obr. 12), rozměry této hysterezní smyčky se výrazně liší pro magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály, viz Obr. 13. [5]



Obr. 12 - Velká a malá hysterézní smyčka [5]



Obr. 13 - Hysterézní smyčky magneticky tvrdého a měkkého feromagnetika [5]

- Linearizace jader

Pólové nástavce a kotvy jsou z feromagnetického materiálu z magneticky měkké oceli. Tento materiál se vyznačuje strmou křivkou prvotní magnetizace a velmi úzkou hysterézní smyčkou. Je zde tedy vysoká hodnota permeability a malá koercivita, často se v tomto případě hysterese zanedbává a uvažuje se pouze křivka prvotní magnetizace. Křivka prvotní magnetizace je ovšem také nelineární a proto tuto křivku proložíme přímkou, abychom zajistili konstantní permeabilitu. [5]

- Linearizace permanentního magnetu

Permanentní magnet je magneticky tvrdé feromagnetikum, a jak je tedy zřejmé z Obr. 13, že má malou permeabilitu a vysokou hodnotu koercivity. Z důvodu široké hysterezní smyčky je nutné brát v úvahu hysterezi permanentního magnetu. Pracovní bod permanentního magnetu se pohybuje mezi koercivitou H_c a remanencí B_r , tedy ve druhém kvadrantu. Jelikož všechny informace o průběhu charakteristiky permanentního magnetu jsou hodnoty koercivity a remanence, proložíme křivku mezi těmito body přímkou, abychom zajistili konstantní permeabilitu. [5]

4 METODA KONEČNÝCH PRVKŮ

Tato metoda se využívá při řešení nejen okrajových úloh pro stacionární elektrická a magnetická pole. Zkratka FEM – z anglického názvu Finite Element Method, což odpovídá českému názvu metoda konečných prvků, značeno také zkratkou MKP.

4.1 Matematická definice FEM

Matematická podstata FEM spočívá v tzv. diskretizaci úlohy, která je opakem kontinuálního řešení. Což znamená, že hledání neznámých funkcí v oblasti Ω s hranicí Γ je nahrazeno hledáním konečného počtu hodnot těchto funkcí nebo parametrů, z nichž lze zkonstruovat přibližné řešení.

Tímto způsobem postupovaly i starší metody:

- klasické variační metody, které hledaly součinitele předem zvolených funkcí, které měly obecně nenulové hodnoty v celé oblasti Ω ,
- metoda sítí (diferenční), která nahrazovala derivace diferencemi, obecněji lineárními kombinacemi několika funkčních hodnot v uzlech sítě,
- metoda kolokační se omezovala na přibližné splnění daných podmínek v několika vybraných bodech Ω a Γ .

Formálně se těmito metodami vždy převedlo analytické řešení diferenciálních rovnic na řešení soustav algebraických lineárních rovnic. Stejně je tomu i v případě FEM. Ovšem pokrok oproti předešlým metodám je ve způsobu tohoto převodu. Matematicky řečeno volbě báze funkcí, do kterých rozkládáme hledané funkce. Tento rozklad úzce vážeme na rozdělení oblastí Ω na podoblasti Ω_e , které nazýváme konečné prvky na rozdíl od „nekonečně malých diferenciálů“ $d\Omega$, $d\Gamma$ přesné analýzy. [6]

Přesná matematická definice FEM:

„FEM je zobecněná Ritz-Galerkinova variační metoda, užívající báze funkcí s malým kompaktním nosičem, úzce spjatým se zvoleným rozdělením řešené oblasti na konečné prvky.“
[6 str. 21]

4.2 Obecnější tvar FEM

Pokud se budeme blíže zabývat aditivností daného funkcionálu

$$\Pi = \sum_e \Pi_e$$

případně řešením omezeného integrálu v oblasti

$$\Omega = \sum_e \Omega_e,$$

potom,

$$I = \int_{\Omega} \dots d\Omega = \sum_e \int_{\Omega_e} \dots d\Omega_e, \quad (4.1)$$

je jedinou podmínkou pro sestavování výpočtů součinitelů neznámých a absolutních členů vyvinutých pomocí FEM. Z tohoto důvodu se FEM používá i na úlohy, u kterých nelze definovat žádnou veličinu povahy Π , ale známe diferenciální rovnice $\mathbf{L}_1(\mathbf{u}) = \mathbf{0}$ v oblasti Ω a okrajové podmínky $\mathbf{L}_2(\mathbf{u}) = \mathbf{0}$ na její hranici Γ , kterým musí funkce u , kterou hledáme, vyhovět. Může také jít o vektorovou funkci $\mathbf{u} = [u, v, \dots]^T$, potom je také více rovnic \mathbf{L}_1 a podmínek \mathbf{L}_2 , zapsaných maticovým označením. Dále lze tedy opět parametrizovat úlohu $\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{U}\mathbf{a}$ nebo přímo $\hat{\mathbf{u}} = \mathbf{V}\mathbf{A}$ s neznámými součiniteli \mathbf{a} či parametry \mathbf{A} . Pokud dosadíme určitý soubor hodnot \mathbf{a} či \mathbf{A} do předešlých rovnic, tyto rovnice nebudou přesně splněny, protože na pravé straně nevyjdou identicky nuly, ale nějaké funkce v Ω a Γ , které můžeme nazvat „residuum ε_1 a ε_2 “, což jsou obecně vektorové funkce:

$$\mathbf{L}_1 \mathbf{u} = \varepsilon_1 \neq \mathbf{0} \text{ v } \Omega \quad (4.2)$$

$$\mathbf{L}_2 \mathbf{u} = \varepsilon_2 \neq \mathbf{0} \text{ na } \Gamma \quad (4.3)$$

nyňí lze využít princip vážených residuí. Základní úvaha pro jednu neznámou funkci je taková, že pro přesné řešení u jsou residua (4.2), (4.3) identicky nulová, proto jsou také identicky nulové součiny $\varepsilon_1 g_1$ v Ω a $\varepsilon_2 g_2$ na Γ při libovolných „váhových funkcích“ g_1 v Ω a g_2 na Γ . Omezený integrál z identické nuly má přesně nulovou hodnotu, proto pro přesné řešení u a libovolné „váhy“ g_1 , musí platit:

$$R = \int_{\Omega} \varepsilon_1 g_1 d\Omega + \int_{\Gamma} \varepsilon_2 g_2 d\Gamma = 0, \quad (4.4)$$

přičemž řešení podmínku (4.4) nesplní. Pokud bychom postupně dosazovali různé soubory hodnot \mathbf{A} nebo \mathbf{a} do (4.4), při pevně zvolených vahách g_1, g_2 budou vycházet různé hodnoty

celkové „chyby R oproti nule“, tedy např. pro určité soubory $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_m$ budou vyházet $R = -6385,51; 800,75; -1263,04; \dots -38,51$. Absolutně nejmenší chyba R by byla např. pro soubor Δ_{83615} , a to $R=0,0445996$. Je možné, že se také najde případ, který v dané přesnosti poskytne $R=0$. Potom lze tento soubor parametrů prohlásit za nejlepší ve smyslu splnění podmínky (4.4) při zvolených vahách g_1, g_2 a příslušné přibližné řešení $\hat{\mathbf{u}}$ použijeme dále. Tento postup je lehce pochopitelný, ale prakticky zcela nepoužitelný. Iv případě, že bychom abstrahovali od kontinuální možnosti změn jednotlivých parametrů Δ_j souboru:

$$\Delta = [\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_j, \dots, \Delta_{N-1}, \Delta_N]^T, \quad (4.5)$$

a dále se omezili na uzlové body číselné osy, vyloučili technicky nesmyslné hodnoty Δ_j , vyřešili vliv volby g_1, g_2 atd. Stejně by podle (4.5) zbylo tolik souborů, že žádný počítač by nenašel nejlepší hledaný soubor v přijatelném čase.

Řešení spočívá v tom, že se R po dosazení (4.5) do (4.4) a provedení integrací (po prvních Ω_e, Γ_e) stane funkcí N parametrů $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$:

$$R(\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_N) = 0. \quad (4.6)$$

Pokud jsou rovnice (4.2), (4.3) lineární, potom je rovnice (4.4) lineární v parametrech $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$. Můžeme tedy sestavit N algebraických lineárních rovnic tak, že rovnici (4.4) napíšeme N -krát s N různými váhovými funkcemi $(g_1, g_2), j = 1, 2, \dots, N$;

$$R_j(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N. \quad (4.7)$$

Podle soustavy N rovnic (4.7) lze vyřešit hledané parametry $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_N$, čímž nalezneme přibližné řešení úlohy. Pokud operátory L_1, L_2 nejsou lineární, rovnice (4.7) je také nelineární, což způsobí, že se musí použít např. Newton-Raphsonova metoda, ale zásadně tento fakt neomezí použitelnost postupu. [6]

4.3 Princip FEM

Metoda konečných prvků může být charakterizována jako modifikace klasických variačních metod. Princip si ukážeme na okrajovém problému $\Omega \cup \Gamma$, kde Ω je regulární oblast v \mathbf{R}^2 , resp. \mathbf{R}^3 a $\partial\Omega = \Gamma = \Gamma_I \cup \Gamma_{II}$, popsáno rovnicemi:

$$-\operatorname{div}(p \operatorname{grad} u) = f \quad \text{na } \Omega, \quad (4.8)$$

$$u = g_I \quad \text{na } \Gamma_I, \quad (4.9)$$

$$-p \frac{\partial u}{\partial n} = g_{II} \quad \text{na } \Gamma_{II}. \quad (4.10)$$

V uvedených rovnicích u je neznámá funkce proměnných souřadnic x, y (případně z), p na Ω je daná konstanta, či funkce souřadnic nebo funkce pro proměnný $|\operatorname{grad} u|$, f je daná konstanta nebo funkce souřadnic definovaná na Ω , g_I je daná funkce (okrajová podmínka) definovaná na Γ_I , parciální derivace u podle n je derivace ve směru vnější normály k Γ_{II} po spojitěm prodloužení z Ω do hranice Γ_{II} a p na Γ_{II} je spojitě prodloužení funkce p z oblasti Ω do hranice Γ_{II} .

Rovnici (4.8) vynásobíme variací funkce u , tedy funkcí $v = \delta u$ takovou že platí:

$$v = 0 \quad \text{na } \Gamma_I. \quad (4.11)$$

Vzniklou rovnici integrujeme přes oblast Ω , z čehož dostaneme:

$$\int_{\Omega} -\operatorname{div}(p \operatorname{grad} u) \cdot v \, d|\Omega| = \int_{\Omega} f \cdot v \, d|\Omega|. \quad (4.12)$$

Levou stranu rovnice (4.12) užitím Greenovy věty upravíme:

$$\int_{\Omega} -\operatorname{div}(p \operatorname{grad} u) \cdot v \, d|\Omega| = \int_{\Omega} p \operatorname{grad} u \cdot \operatorname{grad} v \, d|\Omega| - \int_{\Gamma} p \frac{\partial u}{\partial n} v \, d|\Gamma|. \quad (4.13)$$

Z důvodu podmínky (4.11) je

$$\int_{\Gamma} p \frac{\partial u}{\partial n} v \, d|\Gamma| = \int_{\Gamma_{II}} p \frac{\partial u}{\partial n} v \, d|\Gamma|. \quad (4.14)$$

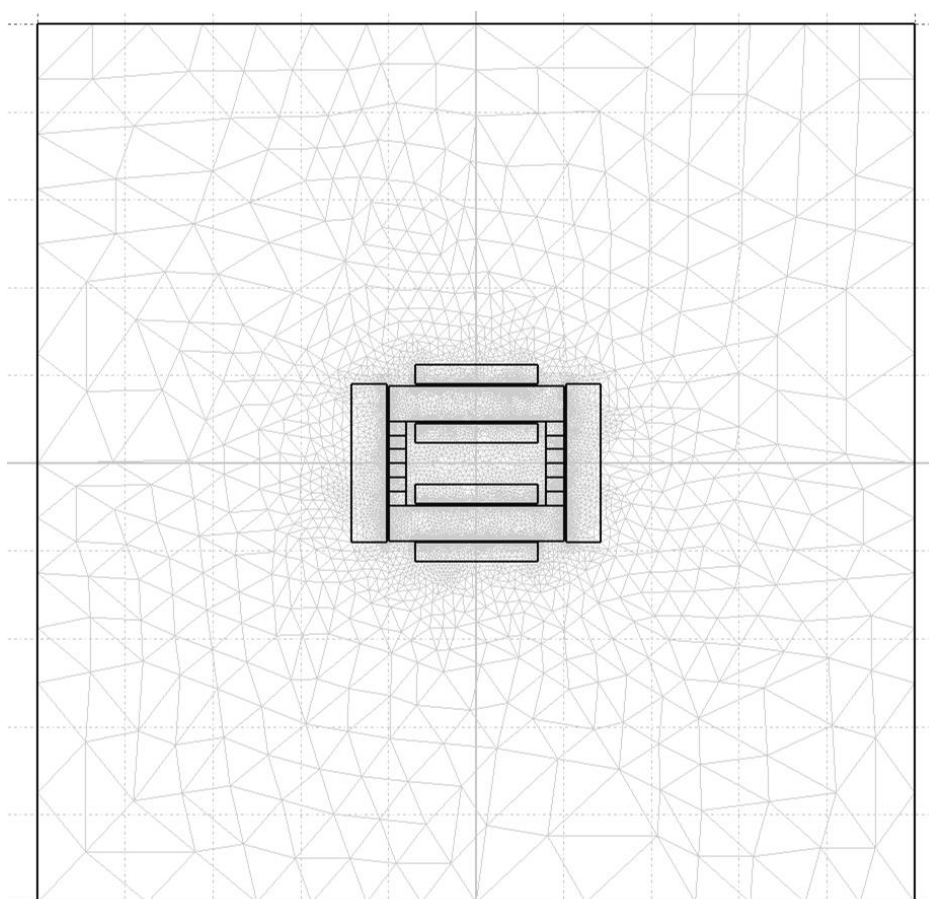
Po dosazení rovnice (4.14) do rovnice (4.13) vznikne:

$$\int_{\Omega} -\operatorname{div}(p \operatorname{grad} u) \cdot v \, d|\Omega| = \int_{\Omega} p \operatorname{grad} u \cdot \operatorname{grad} v \, d|\Omega| - \int_{\Gamma_{II}} p \frac{\partial u}{\partial n} v \, d|\Gamma|. \quad (4.15)$$

Když funkce u splňuje na Γ_I okrajovou podmínku (4.9) a na $\Omega \cup \Gamma_{II}$ pro funkci u platí integrální podmínka (4.15), při čemž v je libovolná funkce, která splňuje podmínku (4.11), pak se tato funkce u nazývá slabé řešení okrajového problému (4.8) a (4.10). Název slabá řešení se používá z důvodu skutečnosti, že slabé řešení okrajové úlohy nemá tak silné požadavky na hladkost vystupujících funkcí oproti klasickému řešení. [7]

4.4 Aplikace FEM

Algoritmus uvedený v této kapitole je implementovaný v aplikaci Agros2D, která je využita pro numerické řešení modelu. Tato aplikace využívá slabé řešení pro okrajovou podmínku - uvedeno v kapitole 4.3, a pro řešení parciální diferenciální rovnice z kapitoly 5.1, která je popsána v knihovně Hermes2D a řešena pomocí hp -FEM. Aplikace Agros2D využívá k diskretizaci navržené geometrie program Triangle, který vytvoří vysoce kvalitní nestrukturovanou konečnou trojúhelníkovou síť. Tato triangulace je pro řešený model uvedena na Obr. 14.



Obr. 14 - Triangulace pracovní oblasti Agros2D

5 MATEMATICKÝ MODEL

Matematický model řešení navrhovaného PPMT aktuátoru je obecně popsán rovnicemi, které jsou implementovány v knihovně Hermes2D, kde jsou řešeny pomocí adaptabilní metody konečných prvků vyššího řádu přesnosti tato metoda nese zkratku *hp*-FEM.

5.1 Obecná rovnice magnetického pole

Obecná distribuce magnetického pole aktuátoru je popsána parciální diferenciální rovnicí:

$$\operatorname{curl}\left(\frac{1}{\mu}(\operatorname{curl}\mathbf{A} - \mathbf{B}_r)\right) - \gamma\mathbf{v} \times \operatorname{curl}\mathbf{A} = \mathbf{J}_{ext}, \quad \left[\text{Hm}^{-1}, \text{Wbm}^{-1}, \text{T}, \text{Sm}^{-1}, \text{ms}^{-1}, \text{Wbm}^{-1}, \text{Am}^{-2} \right] \quad (5.1)$$

kde μ je permitivita, \mathbf{A} je magnetický vektorový potenciál, \mathbf{B}_r je remanentní indukce, γ je konduktivita, \mathbf{v} je rychlost, \mathbf{J}_{ext} je orientovaná proudová hustota. Funkce curl je pouze anglické označení funkce rot. [8], [9]

Tato práce se zabývá z důvodu svého rozsahu pouze statickým modelem, proto v rovnici (5.1) zanedbáme rychlost \mathbf{v} ($\mathbf{v}=\mathbf{0}$). Tedy i levá část $\gamma\mathbf{v} \times \operatorname{curl}\mathbf{A}$ je zanedbána.

Pro úplné vysvětlení této parciální diferenciální rovnice si nejprve vysvětlíme funkci magnetického vektorového potenciálu.

5.1.1 Vektorový magnetický potenciál

Pro definici vektorového magnetického potenciálu vycházíme ze čtvrté Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0, \quad (5.2)$$

a z jiné identity vektorové funkce \mathbf{A} z vektorové analýzy, která říká, že:

$$\operatorname{div} \operatorname{rot} \mathbf{A} = 0. \quad (5.3)$$

Odkud je definice:

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (5.4)$$

jednotkou vektorového magnetického potenciálu je $[\text{Wb}/\text{m}]$. Tato funkce je spojitá diferencovatelná funkce polohy a její rozložení jednoznačně definuje rozložení vektoru magnetické indukce. Opačné tvrzení je ale nepravdivé. Vektorový potenciál je funkcí

nejednoznačnou, může se lišit o gradient libovolné skalární funkce, a proto zavádíme další podmínku, která se nazývá Coulombova:

$$\operatorname{div} \mathbf{A} = 0. \quad (5.5)$$

Aby byla velikost magnetického vektorového potenciálu dána pevně, musíme ještě stanovit konstantu a tu určíme normováním, tak, že zvolíme místo, v němž bude jeho hodnota nulová.

[10]

5.1.2 První Maxwellova rovnice

Pokud si upravíme první část parciální diferenciální rovnice (5.1), dostaneme se k první Maxwellově rovnici v diferenciálním tvaru, z níž vymizí časové derivace a neuplatní se zde ani volné elektrické náboje. Z důvodu řešení v magnetostatickém poli je potom:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}. \quad (5.6)$$

Dále, abychom získali tento tvar Maxwellovy rovnice z první části parciální diferenciální rovnice $\operatorname{rot}(\frac{1}{\mu}(\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r))$ použijeme definici magnetického vektorového potenciálu (5.4), kde lze dále přepsat:

$$\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r = \mathbf{B} - \mathbf{B}_r = \mathbf{B}_{MO}, \quad (5.7)$$

kde \mathbf{B}_{MO} je magnetická indukce magnetického obvodu.

Rovnici lze s ohledem na (3.6) přepsat do tvaru:

$$\operatorname{rot}(\frac{1}{\mu} \mathbf{B}_{MO}) = \operatorname{rot} \mathbf{H}, \quad (5.8)$$

z čehož je patrná výsledná první Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru (5.6). [10]

5.1.3 Okrajové podmínky

Z důvodu platnosti Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru jen v regulárních bodech, je třeba definovat okrajové podmínky. Okrajové podmínky platné na hranicích definičních oblastí dělíme:

- Dirichletova okrajová podmínka, kdy je znám potenciál na hranici, známá též jako okrajová podmínka I. druhu,
- Neumannova okrajová podmínka, kdy je známa derivace potenciálu ve směru vnější normály k hranici, známá též jako okrajová podmínka II. druhu,
- smíšená okrajová podmínka, kdy na část hranice je dána Dirichletova okrajová podmínka a na zbývající část Neumannova okrajová podmínka. [5], [10]

Z tohoto důvodu je nutné uzavřít definiční oblast vytvořením vnější hranice, na které je platná Dirichletova podmínka:

$$A=0. \quad (5.9)$$

5.2 Energie a síly v elektromagnetickém poli

Elektromagnetické pole je charakterizováno určitou energií a silovými účinky působícími na určitá tělesa. Energie pole souvisí s prací, kterou je třeba vykonat, aby toto pole vzniklo.

5.2.1 Hustota energie v elektromagnetickém poli

Pokud je prostředí dielektricky a magneticky měkké určí se:

$$w_{em} = \int_0^D \mathbf{E}d\mathbf{D} + \int_0^B \mathbf{H}d\mathbf{B}. \quad [\text{Jm}^{-3}, \text{Vm}^{-1}, \text{Cm}^{-2}, \text{Am}^{-1}, \text{T}] \quad (5.10)$$

Jestliže je prostředí lineární, určí se za použití (3.6) a rovnice pro materiálové vztahy intenzity elektrického pole a indukce elektrického pole:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \cdot \mathbf{E}, \quad [\text{Cm}^{-2}, \text{Fm}^{-1}, \text{Vm}^{-1}] \quad (5.11)$$

z těchto rovnic je výsledná rovnice dána:

$$w_{em} = \frac{1}{2} \varepsilon |\mathbf{E}|^2 + \frac{1}{2\mu} |\mathbf{B}|^2. \quad [\text{Jm}^{-3}, \text{Fm}^{-1}, \text{Vm}^{-1}, \text{Hm}^{-1}, \text{T}] \quad (5.12)$$

[10]

5.2.2 Energie a síly ve stacionárním magnetickém poli

Uvažujme izolovanou soustavu složenou z n uzavřených proudových smyček protékaných stejnosměrnými proudy. Na smyčky přitom působí určité síly, které se je snaží přemístit tak,

aby soustava v dané konfiguraci byla v poloze s minimální energií. Řekněme, že se k -tá smyčka účinkem síly \mathbf{F} přemístí o dráhu ds , přičemž magnetický tok v této smyčce zůstane konstantní. Tato problematika je blíže popsána v kapitole 3.3.1. Energie pole se změní podle:

$$dW = -\mathbf{F}ds. \quad [\text{J, N, m}] \quad (5.13)$$

Potom z této rovnice lze odvodit sílu:

$$\mathbf{F}_s = -\left(\frac{\partial W}{\partial s}\right)_{\phi=\text{konst}}, \quad (5.14)$$

kde F_s je složka síly ve směru vektoru ds .

Pokud chceme vyjádřit silové účinky výlučně pomocí vektorů pole, budeme vycházet z Maxwellova tenzoru magnetického pole:

$$\mathbf{T}_m = \frac{1}{\mu_0\mu_r} \begin{pmatrix} \frac{1}{2}(B_x^2 - B_y^2 - B_z^2) & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & \frac{1}{2}(B_y^2 - B_z^2 - B_x^2) & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & \frac{1}{2}(B_z^2 - B_x^2 - B_y^2) \end{pmatrix}, \quad (5.15)$$

kde jednotlivé prvky matice udávají normálovou (diagonální prvky) a tečnou (mimodiagonální prvky) indukci ve všech třech směrech.

Celkovou sílu působící na těleso v prostorové oblasti Ω s hranicí Γ a její vnější normálou \mathbf{n} určíme podle:

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \oint_{\Gamma} [\mathbf{H}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) + \mathbf{B}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) - \mathbf{n}(\mathbf{H} \cdot \mathbf{B})] dS. \quad (5.16)$$

Dále lze učit podobně také moment:

$$\mathbf{M} = \mathbf{r} \times \mathbf{F} = \frac{1}{2} \oint_{\Gamma} [(\mathbf{r} \times \mathbf{H})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}) + (\mathbf{r} \times \mathbf{B})(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H}) - (\mathbf{r} \times \mathbf{n})(\mathbf{H} \cdot \mathbf{B})] dS. \quad [\text{Nm, m, N}] \quad (5.17)$$

[10]

6 NUMERICKÝ MODEL

Z důvodu potvrzení principu a optimalizace PPMT aktuátoru je třeba navrhnout numerický model, podle kterého se bude výrobek konstruovat. Díky tomuto modelu je možnost určit rozložení magnetického pole, zjistit výsledné hodnoty síly a energie. Pro návrh numerického modelu byla použita aplikace Agros2D.

6.1 Základní popis aplikace Agros2D

Agros2D je univerzální multiplatformní aplikace určená pro řešení fyzikálních polí. Tato aplikace je vytvořena v jazyce C++ a pro řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D založenou na adaptabilní metodě konečných prvků vyššího řádu přesnosti *hp*-FEM. Tato knihovna je vyvíjena na univerzitě v Renu v USA. Aplikace Agros2D je vyvíjena na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni a je distribuována pod GNU GPL v2 licenci. Aplikace jak název napovídá, umožňuje řešení polí ve 2D kartézském nebo osově symetrickém uspořádání. Je možnost analyzovat ustálený stav, harmonickou analýzu a přechodový děj. Aplikace Agros2D je složena z jednotlivých částí, které se nazývají preprocesor, procesor a postprocesor. [11]

6.2 Preprocesor

Tato funkce v aplikaci Agros2D slouží k definování problému. Vytváříme zde geometrii řešené části, definici vlastností materiálů a definici okrajových podmínek. Obsahuje základní operace pro práci s uzly, hranami a značkami oblastí. [12]

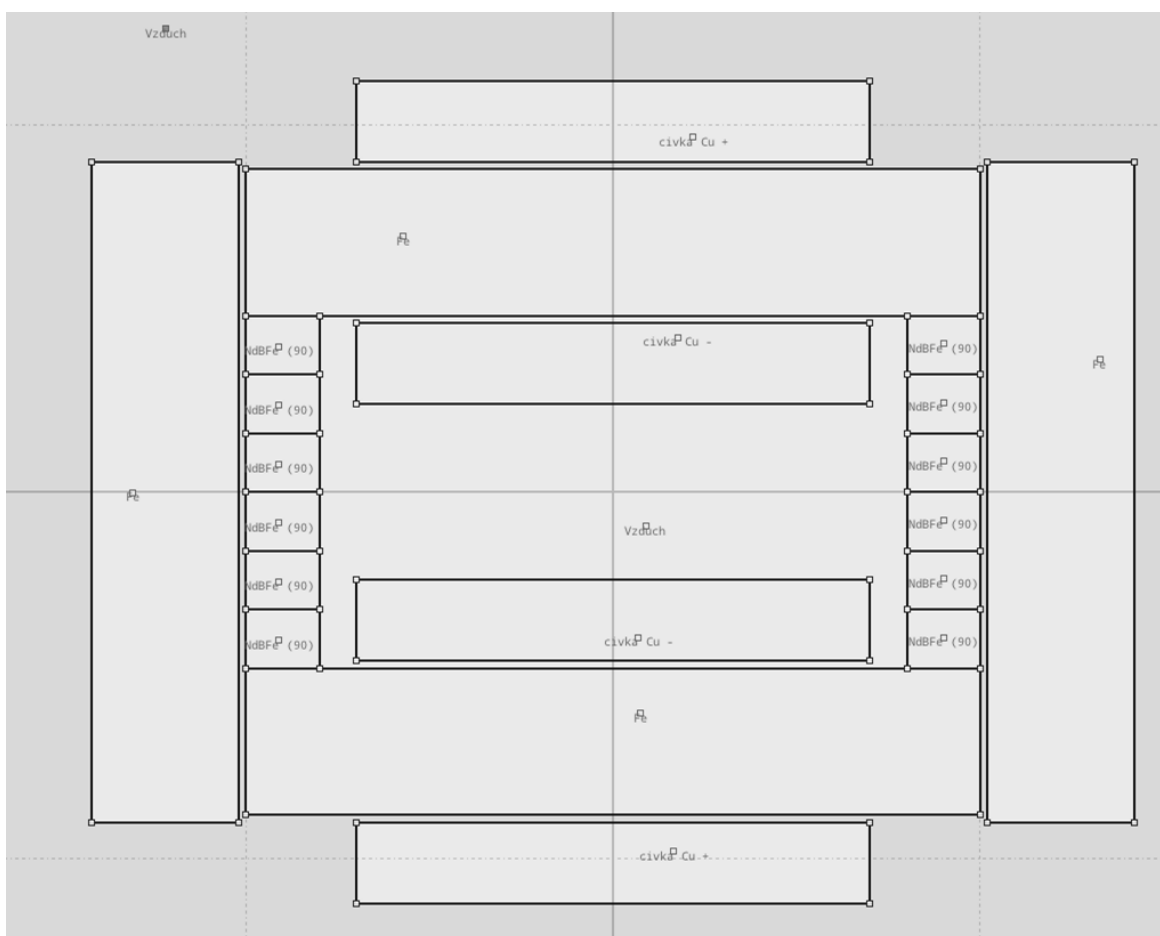
6.2.1 Model pro preprocesor

Použitím uzlů a hran byl vytvořen 2D model PPMT aktuátoru podle dříve zmíněné teorie a skutečných rozměrů použitých pro výrobu aktuátoru. V modelu bylo třeba definovat vnější hranici, která bude dostatečně vzdálená, a na této hranici bude platit Dirichletova podmínka (5.9). Dále jsou v modelu definovány oblasti, kterými jsou feromagnetická jádra, permanentní magnety (NdBFe), polarizované měděné cívky a vzduch. Kostry cívek jsou v modelu nahrazeny vzduchem, protože fyzikálně v magnetickém poli vykazují shodné vlastnosti. Výsledná geometrie vytvořená pro numerický model je uvedena na Obr. 15.

6.3 Procesor

Procesor řeší příslušné rozložení pole, tedy stanovení potenciálů. Aplikace Agros2D využívá k diskretizaci navrhnuté geometrie řešeného problému program Triangle založený

na Delaunay triangulaci, tento program vytvoří vysoce kvalitní nestrukturovanou konečnou trojúhelníkovou síť, kde pro každé dva trojúhelníky platí, že nemají žádnou společnou plochu, ale vždy sousedí jednou společnou stranou, až na umístění na hranici kde sdílejí společnou hranu s hranicí. Toto rozdělení na trojúhelníky se používá z důvodu dokonalého vyplnění i složitých oblastí. Procesor dále využívá při výpočtu elementy vyššího řádu přesnosti a automatickou *hp*-adaptivitu, což znamená automatické zjemnění trojúhelníkové sítě a zvýšení řádu aproximovaného polynomu dle potřeby. Nakonec procesor vytvoří soustavu algebraických rovnic a jejich řešení. [12]



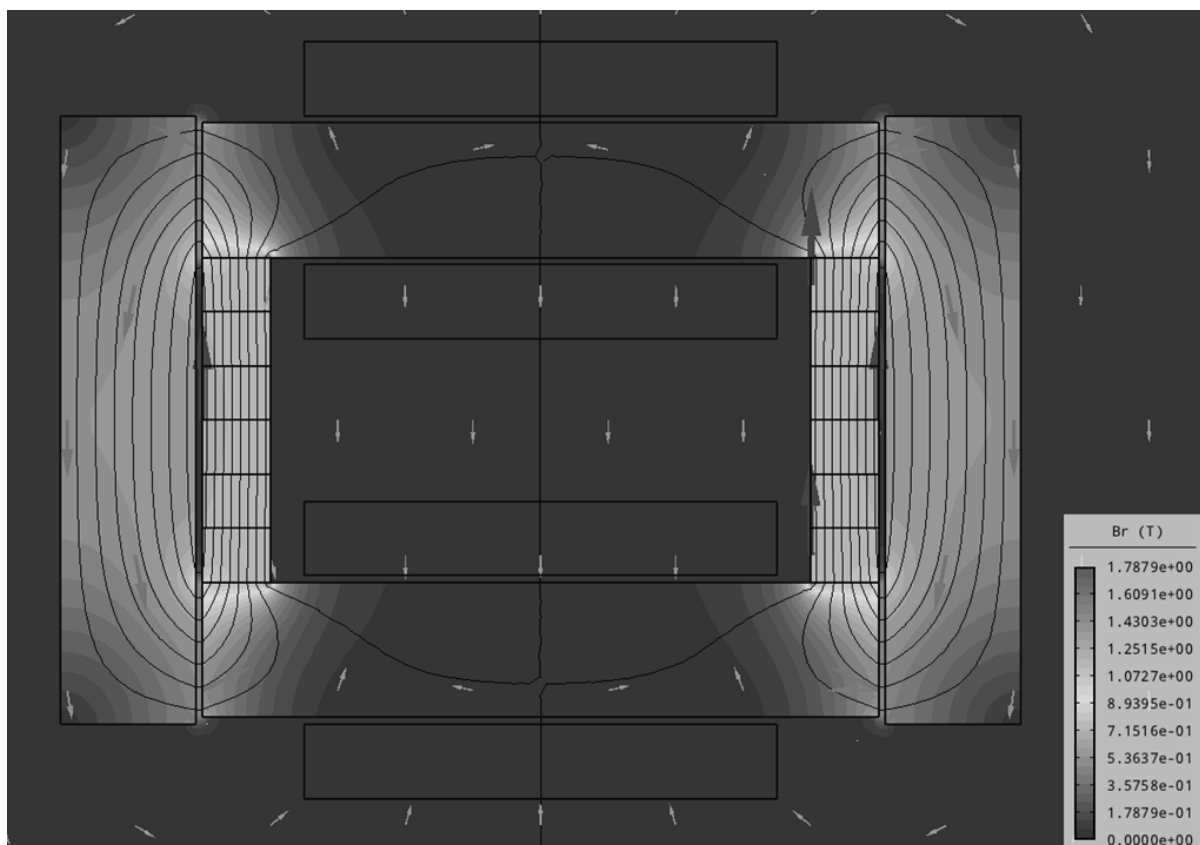
Obr. 15 - Numerický model PPMT aktuátoru Agros2D

6.4 Postprocessor

Postprocessor slouží k analýze vypočtených dat. Získané hodnoty pole lze zobrazit pomocí barevných map, vektorů. Další možností je přímo z vektorového magnetického potenciálu určit magnetickou indukci, intenzitu magnetického pole. Dále lze zpracovat povrchové a objemové integrální veličiny, které charakterizují dané pole. Veškeré získané výsledky je možno zobrazit ve formě grafu, či exportovat jako bitmapový obrázek. [12]

6.4.1 Model v postprocesoru

Zobrazení výsledné magnetické indukce pro navrhovaný PPMT aktuátor, při velikosti vzduchových mezer 1 mm, kdy jako zdroje magnetického pole působí pouze permanentní magnety, cívky jsou odpojeny, je zobrazeno na Obr. 16.



Obr. 16 - Rozložení magnetické indukce, vektory magnetické indukce a siločáry vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 1 \text{ mm}$, $J = 0 \text{ A/mm}^2$

6.5 Definování problému

Řešíme PPMT aktuátor, který je tvořen feromagnetickými jádry, cívkami, permanentními magnety a je obklopen vzduchem. Podle zvolených rozměrů se vytvoří odpovídající geometrie, viz Obr. 15. Dále je vytvořeno pět různých oblastí nebo-li materiálů s parametry:

- feromagnetická ocel $\mu_r = 400$,
- vzduch $\mu_r = 1$,
- neodymový magnet NdBFe $\mu_r = 1,1$; $B_r = 1,2 \text{ T}$; $\alpha_r = 90^\circ$,
- cívky s rozdílnými polaritami proudové hustoty a $\mu_r = 0,99$; $\gamma = 6 \cdot 10^7 \text{ Sm}^{-1}$.

Zvolíme typ fyzikálního pole, kterým je v našem případě magnetické pole. Nastavíme okrajovou podmínku - Dirichletovu podmínku $A = 0$.

Proudová hustota cívek

Z důvodu několika možných konfigurací průchodu proudu cívkami je třeba navrhnout několik možných proudových hustot, které budou zadány do aplikace. Proudové hustoty se počítají podle parametrů cívek a požadovaného proudu. Nejprve je třeba stanovit koeficient plnění cívek k :

$$k = \frac{\pi \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^2 \cdot N}{a \cdot b}, \quad [-, m, -, m, m] \quad (6.1)$$

kde d je průměr vodiče, N počet závitů cívky, a šířka cívky, b délka cívky.

Proudová hustota se dále dopočítá podle vztahu:

$$J_{ext} = \frac{N \cdot I}{a \cdot b \cdot k}, \quad [Am^{-2}, -, A, m, m, -] \quad (6.2)$$

kde N je počet závitů, I je proud závitem, a je šířka cívky, b je délka cívky a k je koeficient plnění cívky.

Praktická část

7 NÁVRH OBVODU A JEHO OPTIMALIZACE

Při návrhu modelu aktuátoru jsem vycházel z poznatků, které jsou uvedeny v teoretickém úvodu. Vychází se zejména z principů podle kapitoly 3.2, kde je konkrétní uspořádání zobrazeno na Obr. 9, podle kterého jsem návrh PPMT aktuátoru realizoval.

Pro moji práci mi byla dodána část materiálu přímo katedrou elektroenergetiky ČVUT v Praze, ten byl připraven přímo pro výrobu modelu PPMT aktuátoru, neboť model aktuátoru bude na katedře sloužit také v budoucnu.

7.1 Návrh magnetického obvodu

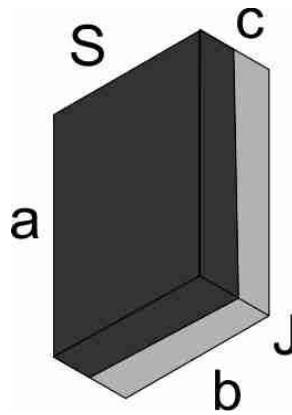
Z důvodu dodání materiálu musel můj návrh rozměrů obvodu v první fázi vycházet z poskytnutých neodymových magnetů, které byly katedrou zakoupené ještě před samotným začátkem mé práce. Rozměr těchto neodymových magnetů byl 50 x 25 x 10 mm. Podle těchto rozměrů jsem tedy navrhl magnetický obvod s následujícími parametry.

Šířku celého magnetického obvodu jsem zvolil stejnou jako šířku magnetů, tedy 25 mm. Rozměr pevného jádra jsem navrhl následovně: výška 20 mm a délka 100 mm. Důvodem volby těchto rozměrů bylo, že do středu mezi jádra se musí umístit magnety, kdy má každý magnet rozměr 10 mm, což je dohromady 20 mm, a zbývá tedy 80 mm na navinutí cívky. Tento rozměr jsem předpokládal jako dostatečný, pro umístění vinutí. Rozměr kotvy jsem navrhl podle podobných kritérií šířka 25 mm, výška 20 mm a délka 90 mm, jelikož výška magnetů je 50 mm, a pokud se připočte ještě výška dvou pevných jader vyjde již zmíněných 90 mm. Dále jsem z důvodu dodacích termínů učinil objednávku na jádra, blíže o tom bude pojednávat následující kapitola.

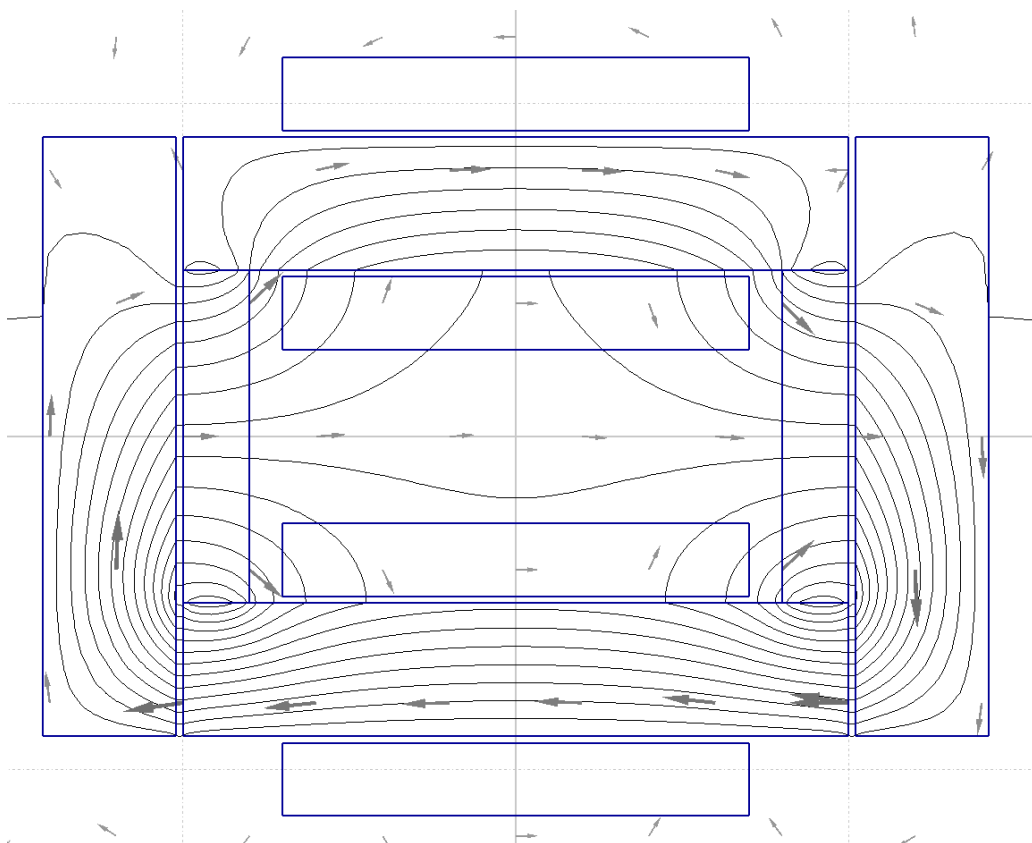
Pro tento obvod jsem navrhl numerický model se skutečnými rozměry v aplikaci Agros2D. Tento model byl podkladem pro další část optimalizace elektrického obvodu.

Ve druhé fázi návrhu magnetického obvodu jsem zjistil, že magnety dodané katedrou jsou nevyhovující z důvodu špatné orientace. Označení dodaných neodymových magnetů bylo NH143 - 50x25x10 N35 což vysvětluje orientaci magnetů, kde a délka je 50 mm, b šířka 25 mm a c výška 10 mm uvedeno na Obr. 17. Magnet má tedy směr magnetování na výšku, což znamená, že při umístění magnetu v pozici, pro kterou jsem navrhl jádra by byl jeden pól vlevo a druhý vpravo, tedy jeden blíže kotvě a druhý směrem k cívkám. Domníval jsem se, že s touto orientací magnetů nebude aktuátor funkční. Proto jsem tuto situaci numericky

namodeloval v aplikaci Agros2D s orientací odpovídající zjištěným skutečným. Tato modelová situace potvrdila moji domněnku a s těmito magnety by aktuátor skutečně nefungoval. Modelová situace je uvedena na Obr. 18, z tohoto obrázku je zřejmé, že při



Obr. 17 - Neodymový magnet NH143 - 50x25x10 N35 [14]



Obr. 18 - Špatná orientace magnetů, rozložení vektorů magnetické indukce a siločar vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 1 \text{ mm}$ a $J = 1,3 \text{ A/mm}^2$

průchodu proudu cívkami se magnetický indukční tok neuzavírá cestou mimo jednu z kotev, ale stále přes obě. Pouze se vyhýbá čelům těchto kotev, proto PPMT aktuátor s těmito magnety nemůže plnit svou teoretickou funkci.

V této fázi již nebylo možné změnit objednávku na rozměry jádra, proto jsem musel respektovat rozměry, které jsem již dříve zvolil. A pro tyto rozměry vybrat vhodné magnety, které jsem nově objednal. Podle rozměrů jsem tedy zvolil neodymové magnety od firmy Magsy, s. r. o. s označením VMM4 - N35 s rozměry a délka 25 mm, b šířka 10 mm a c výška 8 mm. Tyto magnety jsou také orientovány na výšku a po vyskládání šesti kusů magnetů na výšku na sebe dosáhneme hodnoty 48 mm, což byla hodnota, která se nejvíce přibližovala původním zvoleným 50 mm. Po této úpravě budou kotvy na každé straně obvodu vystouplé o 1 mm, což nebude mít žádný vliv na funkčnost PPMT aktuátoru, k čemuž jsem dospěl opět díky numerickému modelu.

7.2 Návrh elektrického obvodu

Po návrhu nového magnetického obvodu jsem mohl navrhnout elektrický obvod, který je složen ze dvou cívek. Každá z těchto cívek se bude nacházet na svém pevném jádře. Cívky podle teoretických předpokladů musí vyvinout takovou hodnotu magnetické indukce, aby byla tato hodnota co do velikosti stejná jako magnetická indukce vyvolaná jedním magnetem, aby se po dosažení této hodnoty magnetické indukce mohl celý magnetický tok uzavírat přes jednu kotvu, splnit tedy teoretické předpoklady technologie.

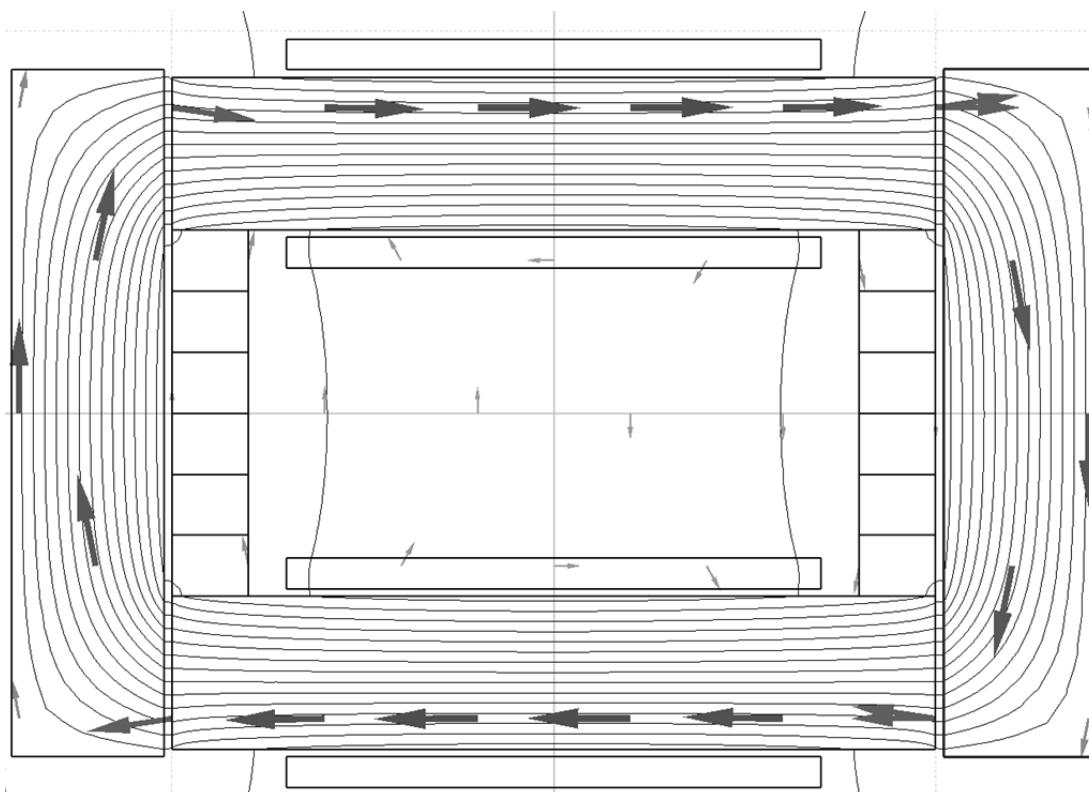
Limitujícím parametrem pro návrh cívek bylo omezení prostorem pro umístění cívek. Po složení magnetického obvodu jsem určil maximální možné rozměry pro cívku: šířku 20 mm a délku cívky 70 mm.

Pro optimalizaci cívek jsem tedy vycházel ze dvou již zmíněných parametrů. Pro zjištění, zda je magnetická indukce optimální, jsem měřil sílu působící na kotvu, kde podle matematického modelu úpravou (5.16) je maxwellovská síla úměrná kvadrátu magnetické indukce. Maxwellovská síla použitých magnetů na kotvu je 34,4 N. V aplikaci Agros2D jsem namodeloval příslušné geometrické rozložení a zjišťoval velikosti maxwellovské síly působící na kotvu, kterou vyvolají cívky. Nyní rozebereme pouze pro ilustraci postupu optimalizace tři možné způsoby, z nichž jeden byl zvolen pro výrobu skutečného navrženého elektrického obvodu.

7.2.1 Cívky s průměrem drátu 0,5 mm a 2 000 závitů

Tuto možnost jsem zvolil jako variantu, kde budou rozměry každé cívky vyhovovat požadavku na prostor. Díky malému průměru budou moci touto cívkou protékat pouze menší proudy, ale zase bude mít cívka více ampér závitů, tedy větší magnetomotorické napětí.

Pro rozměr 1000 závitů na jednu cívku a průměr drátu 0,5 mm jsem namodeloval odpovídající simulaci, která je zobrazena na Obr. 19.



Obr. 19 - Model PPMT optimalizace el. obvodu, zdroj pouze cívky s proudem 0,7 A při 1000 závitěch s průměrem 0,5 mm, $F = 42,5$ N, zobrazeny vektory magnetické indukce a siločáry magnetického indukčního toku

Podle ní jsem zjistil, že maxwellovská síla působící na kotvu při napájení cívek proudem 0,6 - 0,7 A a vzduchové mezeře 1 mm se u těchto hodnot pohybuje v rozmezí 31,5 - 42,5 N, tyto hodnoty síly odpovídají síle magnetů.

Tuto variantu jsem nezvolil jako optimální jednak z důvodu ekonomického díky velkému množství použitých závitů, a tedy i velké délce měděného drátu. Dále také tato varianta nedosahovala neoptimálnějších výsledků což je uvedeno v Tab. 1. Konkrétněji je tím myšlena situace při průchodu proudu cívkami ve stavu kdy na levou kotvu téměř nepůsobí síla a na pravou kotvu by měla působit síla téměř čtyřnásobná, což je zobrazeno na Graf 1. Dalším důvodem pro nezvolení této varianty bylo, že při modelování s větší vzduchovou mezerou by byla síla limitním faktorem, pro použití různých typů pružin, které budou použity při experimentálním ověření funkce.

7.2.2 Cívky s průměrem drátu 1 mm a 1000 závitů

Jako jednu z dalších variant jsem zvolil dvojnásobný průměr vodiče oproti předchozí variantě a to 1 mm a menší počet závitů na každé cívce s počtem 500. Již podle těchto parametrů bude moci touto cívku protékat větší proud, ale bude menší magnetomotorické napětí, díky menšímu počtu závitů.

Tento rozměr cívky jsem namodeloval a při simulaci byla odečtena hodnota maxwellovské síly působící na kotvu se vzduchovou mezerou 1 mm při proudu 0,5 - 0,6 A v rozmezí 33,7 - 47,9 N, kde tyto hodnoty odpovídají síle magnetů.

Tuto variantu jsem také nezvolil jako optimální, z důvodu nižší velikosti působení síly na kotvu, jak je zobrazeno na Graf 1. Hlavním důvodem pro nevyužití této varianty bylo, že hrozilo velmi reálné riziko, že z konstrukčního hlediska není pro tuto cívku dostatečný prostor v magnetickém obvodu. Protože skutečný rozměr složené cívky se výrazně zvýší oproti modelové situaci, kdy při výpočtu rozměrů cívky uvažují pouze průměr vodiče.

Tab. 1 - Optimalizace elektrického obvodu

	Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
	I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
	A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,5 mm, N=1000	0	0	1	1	34,4	34,4
	0,10	0,51	1	1	24,4	36,2
	0,20	1,02	1	1	14,3	56,2
	0,30	1,53	1	1	9,6	74,7
	0,40	2,04	1	1	4,7	91,5
	0,50	2,55	1	1	1,6	110,0
	0,60	3,06	1	1	0,8	130,2
	0,70	3,57	1	1	0,9	153,5
	0,80	4,07	1	1	3,6	178,4
	0,90	4,58	1	1	5,9	200,7
0,7 mm, N=800	0	0	1	1	34,4	34,4
	0,10	0,26	1	1	20,9	51,3
	0,20	0,52	1	1	8,4	74,3
	0,30	0,78	1	1	3,9	95,2
	0,40	1,04	1	1	0,5	122,2
	0,50	1,30	1	1	0,4	152,5
	0,60	1,56	1	1	3,7	186,2
	0,70	1,82	1	1	10,3	223,3
	0,80	2,08	1	1	23,4	262,8
	0,90	2,34	1	1	33,6	307,6
1 mm, N=500	0	0	1	1	34,4	34,4
	0,10	0,13	1	1	22,0	49,7
	0,20	0,25	1	1	13,6	62,3
	0,30	0,38	1	1	3,2	86,8
	0,40	0,51	1	1	1,6	110,1
	0,50	0,64	1	1	0,1	136,6
	0,60	0,76	1	1	1,1	166,9
	0,70	0,89	1	1	4,9	194,4
	0,80	1,02	1	1	7,6	223,7
	0,90	1,15	1	1	20,8	265,7

7.2.3 Cívky s průměrem drátu 0,7 mm a 1 600 závitů

Tento průměr drátu 0,7 mm a počet závitů 800 na jednu cívku jsem volil jako vhodný kompromis mezi velikostí protékaného proudu a velikostí magnetomotorického napětí.

Tento rozměr cívek byl také namodelován při simulaci, kde byla odečtena hodnota maxwellovské síly působící na kotvu se vzduchovou mezerou 1 mm při proudu 0,4 - 0,5 A v rozmezí 26,9 - 42,0 N, kde tyto hodnoty odpovídají síle magnetů.

Tuto možnost jsem zvolil jako neoptimálnější z důvodu téměř ideálních parametrů síly při průchodu proudu 0,5 A, kde síla působící na levou kotvu je 0,4 N a na pravou kotvu je síla 152,5 N, což odpovídá teoretickému předpokladu, že síla při ideálním napájení cívek je čtyřnásobná. Tato síla je větší než čtyřnásobek, ovšem hodnota této síly je pouze modelovaná, proto se domnívám, že reálná hodnota bude o něco nižší. Síly, které působí na kotvu, jsou uvedeny v Tab. 1 a zobrazeny na Graf 1. Dalším důvodem pro volbu této varianty bylo, že z konstrukčního hlediska je zde dostatek místa pro navinutí cívek odpovídajících skutečným rozměrům, délka drátu je také z ekonomického hlediska přijatelná pro zhotovení cívek. Pro tyto cívky jsem tedy navrhl rozměr samonosných jader podle rozměru feromagnetického jádra a následně zadal výrobu cívek s odpovídajícím průměrem 0,7 mm drátu a počtem závitů na cívku 800.

7.2.4 Optimalizace elektrického obvodu

Optimalizaci elektrického obvodu jsem provedl pomocí aplikace Agros2D, kde jsem pro každý rozměr cívek stanovil odpovídající geometrii se vzduchovou mezerou 1 mm, která nejlépe odpovídá situaci z teoretického úvodu pro model PPMT aktuátoru. Dále jsem pro každý daný průměr drátu a počet závitů musel stanovit odpovídající koeficient plnění podle (6.1) a dále proudovou hustotu podle (6.2), která se zadala do modelu. Hodnoty proudové hustoty jsem vypočetl pro každý případ v softwaru Wolfram Mathematica 9.0. Hodnoty jsou dopočteny podle zvolených proudů v rozsahu 0 - 1 A s krokem 0,1 A. Tento výpočet byl proveden pro všechny návrhy elektrického obvodu a pro ilustraci je zde uveden pouze výpočet pro zvolený elektrický obvod. Výpočet je zobrazen na Obr. 20:

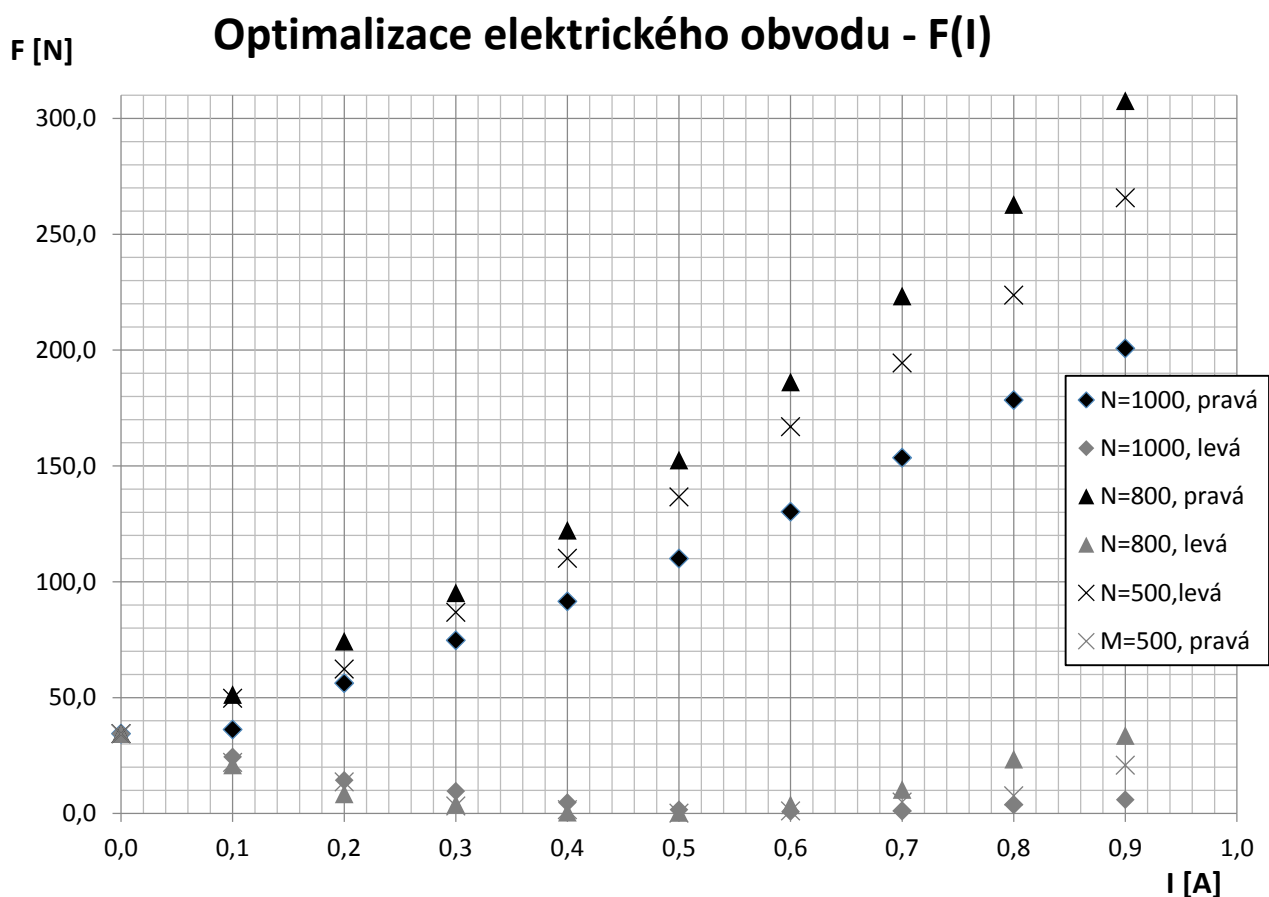

```

a = 0.07;
In[9]:= b = 0.0056;
d = 0.0007;
n = 800;
Iz = {0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0};
s = a * b;
k =  $\frac{\pi * (\frac{d}{2})^2 * n}{a * b}$ ;
Jext =  $\frac{n * Iz}{s * k}$ 
Out[15]= {259845., 519690., 779534., 1.03938*106, 1.29922*106,
1.55907*106, 1.81891*106, 2.07876*106, 2.3386*106, 2.59845*106}

```

Obr. 20 - Wolfram Mathematica 9.0 výpočet proudové hustoty, drát 0,7 mm, 800 závitů

kde a, b jsou rozměry cívky v metrech, d je průměr drátu v metrech, n je počet závitů v jedné cívce, I_z je zadávaný proud v ampérech a k je koeficient plnění cívky, který v tomto případě vychází 79 %, jako nutný mezivýpočet pro zjištění proudové hustoty J_{ext} v Am^{-2} . Tato proudová hustota se dále zadává v numerickém modelu pro požadovanou hodnotu proudu, každá cívka má opačnou polaritu proudové hustoty, tedy opačné znaménko.



Graf 1 - Návrh optimalizace elektrického obvodu pro $\delta = 1$ mm, a různé typy cívek

8 ŘEŠENÍ NUMERICKÉHO MODELU

Celé řešení numerického modelu jsem prováděl v aplikaci Agros2D. Z této aplikace uvedu v textu některé výstupy ve formě obrázku pouze pro některé stavy, kde jsou nejlépe viditelné změny. V textu jsou obrázky v černobílé podobě pouze pro ilustraci problému. Barevné obrázky jsou uvedeny v příloze. Dalším výstupem je hodnota změřené maxwellovské síly pro zadané parametry, kterou jsem pro jednotlivé skupiny měření zaznamenal do tabulek.

Aplikace Agros2D počítá s hloubkou modelu 1 m, ale naše hloubka skutečného modelu je pouhých 0,025 m což je čtyřicetkrát méně. Proto jsem z numerického modelu vyexportoval rozložené hustoty energie, které podle (5.14) odpovídá rozložení maxwellovské síly. Numerickou integrací hustoty energie jsem stanovil střední hustotu energie a k ní jsem mohl stanovit střední hustotu síly. Dále jsem všechny hodnoty maxwellovské síly přepočítal, veškeré hodnoty uvedené v této práci jsou již přepočítané. Přesný postup všech přepočtů v práci nebudu uvádět z důvodu velkého rozsahu a nepřímou souvislostí s řešenými problémy této práce.

8.1 Oblast řešení

Pro ověření principu fungování PPMT aktuátoru z teoretické části je nutné stanovit oblasti řešení, pro které je možné potvrdit fungování principu. Byla zvolena statická charakteristika závislosti síly působící na jádro na velikosti vzduchové mezery, statická charakteristika závislosti síly působící na jádro podle velikosti proudu a velikosti vzduchové mezery. Musel jsem tedy stanovit velikosti vzduchové mezery, pro které jsem následně modelování prováděl. Zvolil jsem tedy hodnoty 1 mm, z důvodu ukázky idealizovaného fungování, dále pak hodnoty 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 a 90 mm. Hodnotu 5 mm jsem považoval za hodnotu nejbližší možnou pro experimentální ověření aktuátoru.

Jako další jsem stanovil hodnoty proudu, pro které jsem prováděl modelování. Tyto hodnoty byly 0; 0,1; 0,3; 0,5; 0,7 a 0,9 A. Tyto hodnoty byly stanoveny podle provedené optimalizace elektrického obvodu.

8.2 Modelování bez proudu cívkami

První modelování jsem provedl pro statistickou charakteristiku závislosti síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajících proudů. Uvažoval jsem možnosti, kdy mají obě kotvy stejnou vzduchovou mezeru, a předpokládal jsem, že i díky symetrii mají stejnou hodnotu síly

pro pravou i levou kotvu. I přes to jsem odečítal obě hodnoty, proto se v některých případech liší.

Druhé modelování jsem provedl opět pro statistickou charakteristiku závislosti síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajícího proudu, tentokrát pouze pro pravou kotvu, levá kotva nebyla umístěna v magnetickém obvodu.

Pro tyto modelované stavy jsou hodnoty síly uvedeny v Tab. 2 a Tab. 3. Podle hodnot, jsem sestrojil graf, do kterého jsem vynesl jak závislost dvou kotev se stejnou vzduchovou mezerou, tak jedné kotvy. Do grafu je při závislosti dvou kotev vynášena pouze hodnota síly působící na pravou kotvu, vzhledem k symetrii sil.

Porovnáním hodnot z Tab. 2 a Tab. 3 je patrné, že v ideálním případě, kdy je velikost

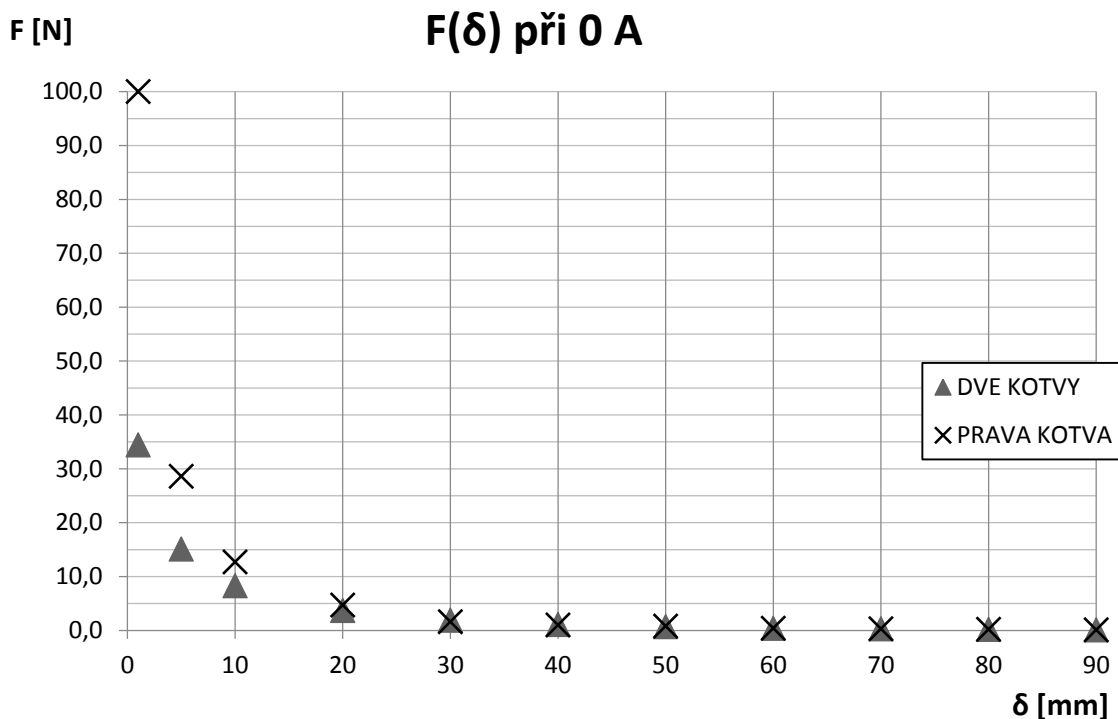
Tab. 2- Hodnoty sil působící na dvě kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0 \text{ A}$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0	0	1	1	34,4	34,4
0	0	5	5	15,1	15,1
0	0	10	10	8,4	8,3
0	0	20	20	3,7	3,7
0	0	30	30	1,9	1,9
0	0	40	40	1,1	1,1
0	0	50	50	0,7	0,7
0	0	60	60	0,4	0,4
0	0	70	70	0,3	0,3
0	0	80	80	0,2	0,2
0	0	90	90	0,1	0,1

Tab. 3 - Hodnoty sil působící na pravou kotvu, různé vzduchové mezery, $I = 0 \text{ A}$

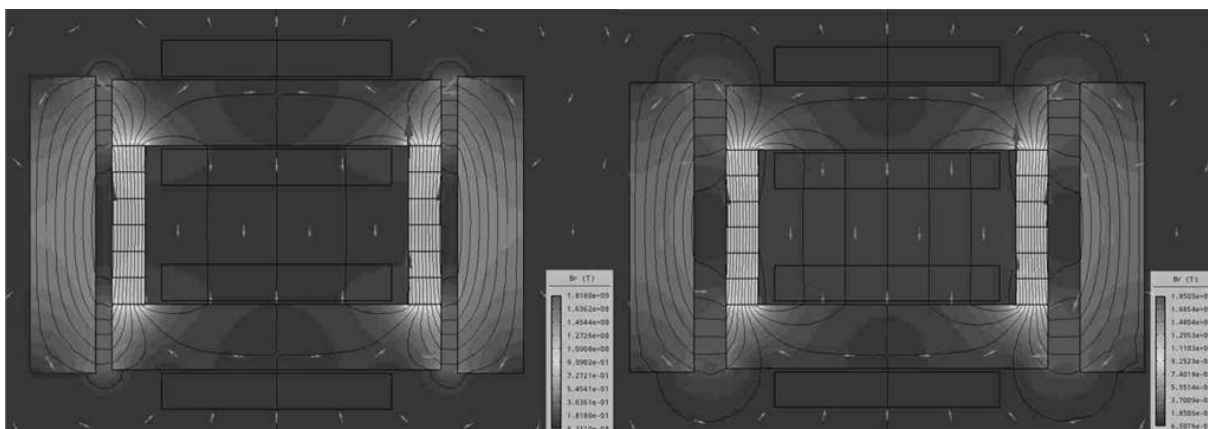
Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0	0	-	1	-	100,0
0	0	-	5	-	28,6
0	0	-	10	-	12,7
0	0	-	20	-	4,7
0	0	-	30	-	1,6
0	0	-	40	-	1,0
0	0	-	50	-	0,8
0	0	-	60	-	0,4
0	0	-	70	-	0,3
0	0	-	80	-	0,2
0	0	-	90	-	0,1

vzduchové mezery 1 mm, je hodnota síly téměř třináásobná. S rostoucí vzduchovou mezerou hodnota síly klesá a od velikosti vzduchové mezery 20 mm jsou hodnoty téměř srovnatelné. Srovnání hodnot sil je zobrazeno v Graf 2.



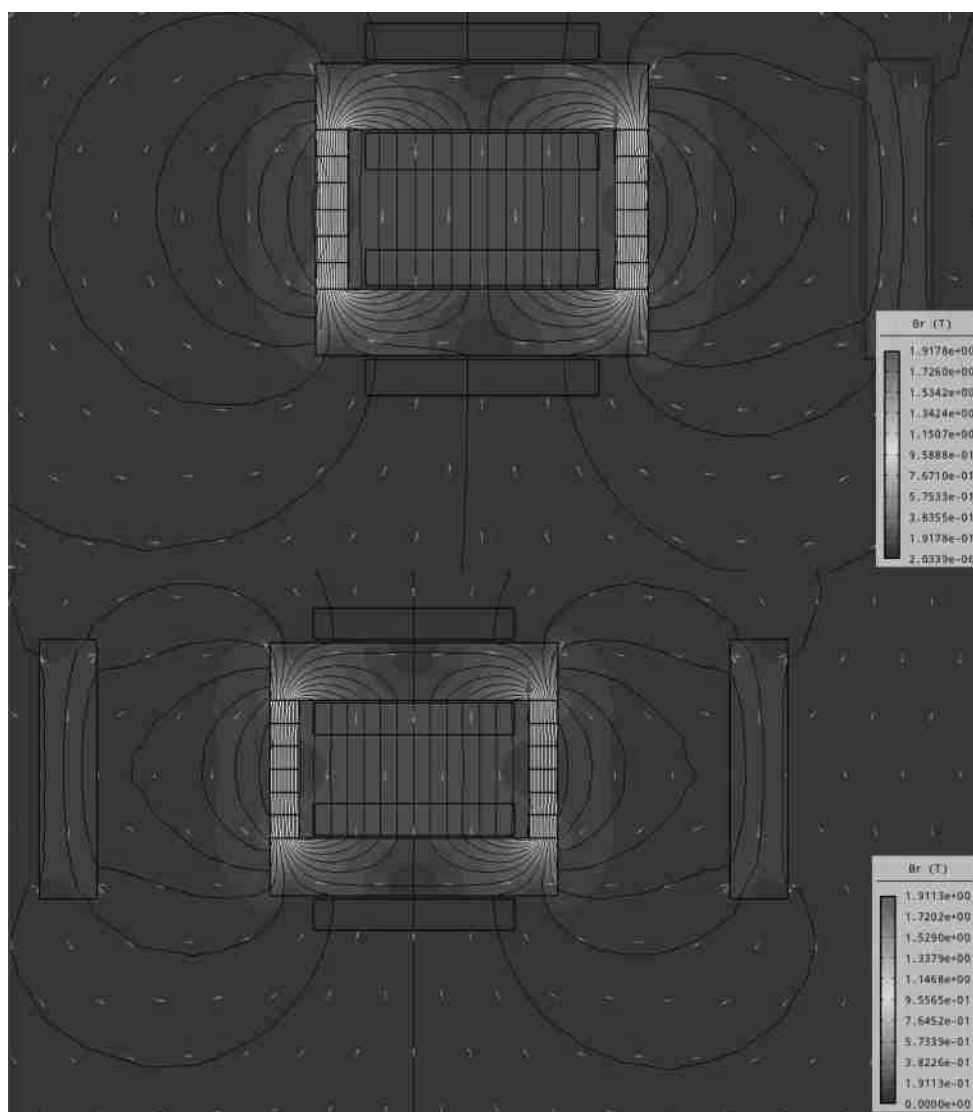
Graf 2 - Statické charakteristiky závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0$ A

Zobrazení výsledné magnetické indukce pro velikosti vzduchových mezer 5 mm a 10 mm, kdy jako zdroje magnetického pole působí pouze permanentní magnety a cívky jsou odpojeny, je zobrazeno na Obr. 21.



Obr. 21 - Rozložení magnetické indukce, vektorů magnetické indukce a siločar vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 5$ mm (vlevo) a $\delta = 10$ mm (vpravo), $I = 0$ A

Z Obr. 21 je patrné měnící se rozložení siločar vektorového magnetického potenciálu, kde při zvyšující se vzduchové mezeře se zvyšuje i rozptyl magnetického pole. Z tohoto důvodu se také síly ve stavech, kdy jsou dvě kotvy se stejnou vzduchovou mezerou a pouze pravou kotvou u velkých vzduchových mezer téměř neliší jak je patrné z Graf 2. Snímek z aplikace pro stav stejné vzduchové mezery dvou kotev a pouze pravé kotvy na Obr. 22 zobrazuje rozptyl magnetického pole.



Obr. 22 - Rozložení magnetické indukce, vektorů magnetické indukce a siločar vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 60 \text{ mm}$, $I = 0 \text{ A}$

8.3 Modelování při průchodu proudu cívkami

Jako další modelovou situaci jsem zvolil stav, kdy proud prochází cívkami. Tyto modelové situace mají za úkol ukázat vliv proudu v cívkách na magnetické pole magnetů, tedy

na změnu magnetických cest a tím i změnu síly. Pro všechny stavy jsem zaznamenával hodnoty působící jak na pravou kotvu, tak i na levou kotvu. Zaznamenané hodnoty jsou uvedeny v tabulkách (Tab. 4 - Tab. 8). Pro zvolené hodnoty proudů jsem sestrojil charakteristiky, kde z důvodu přehlednosti nejsou vyneseny hodnoty pro vzduchovou mezeru o velikosti 1 mm, síly odpovídající této vzduchové mezeře výrazně převyšují síly v ostatních případech, grafy by následně neměly z důvodu rozsahu stupnice vypovídající hodnotu. Tato hodnota je odečítána zejména z důvodu téměř ideálních podmínek.

Tab. 4 - Hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0,1$ A

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,10	0,26	1	1	20,9	51,3
0,10	0,26	5	5	12,7	17,7
0,10	0,26	10	10	7,4	9,3
0,10	0,26	20	20	3,4	4,0
0,10	0,26	30	30	1,8	2,0
0,10	0,26	40	40	1,0	1,2
0,10	0,26	50	50	0,7	0,8
0,10	0,26	60	60	0,4	0,5
0,10	0,26	70	70	0,3	0,3
0,10	0,26	80	80	0,2	0,2
0,10	0,26	90	90	0,1	0,2

Tab. 5 - Hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0,3$ A

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,30	0,78	1	1	3,9	95,0
0,30	0,78	5	5	8,5	26,6
0,30	0,78	10	10	5,6	11,5
0,30	0,78	20	20	2,8	4,8
0,30	0,78	30	30	1,5	2,4
0,30	0,78	40	40	0,9	1,4
0,30	0,78	50	50	0,6	0,9
0,30	0,78	60	60	0,4	0,5
0,30	0,78	70	70	0,3	0,4
0,30	0,78	80	80	0,2	0,3
0,30	0,78	90	90	0,1	0,2

Tab. 6 - Hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0,5 \text{ A}$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,50	1,30	1	1	0,4	152,5
0,50	1,30	5	5	5,1	30,4
0,50	1,30	10	10	4,1	14,0
0,50	1,30	20	20	2,2	5,6
0,50	1,30	30	30	1,3	2,7
0,50	1,30	40	40	0,8	1,6
0,50	1,30	50	50	0,5	1,0
0,50	1,30	60	60	0,3	0,6
0,50	1,30	70	70	0,2	0,4
0,50	1,30	80	80	0,2	0,3
0,50	1,30	90	90	0,1	0,2

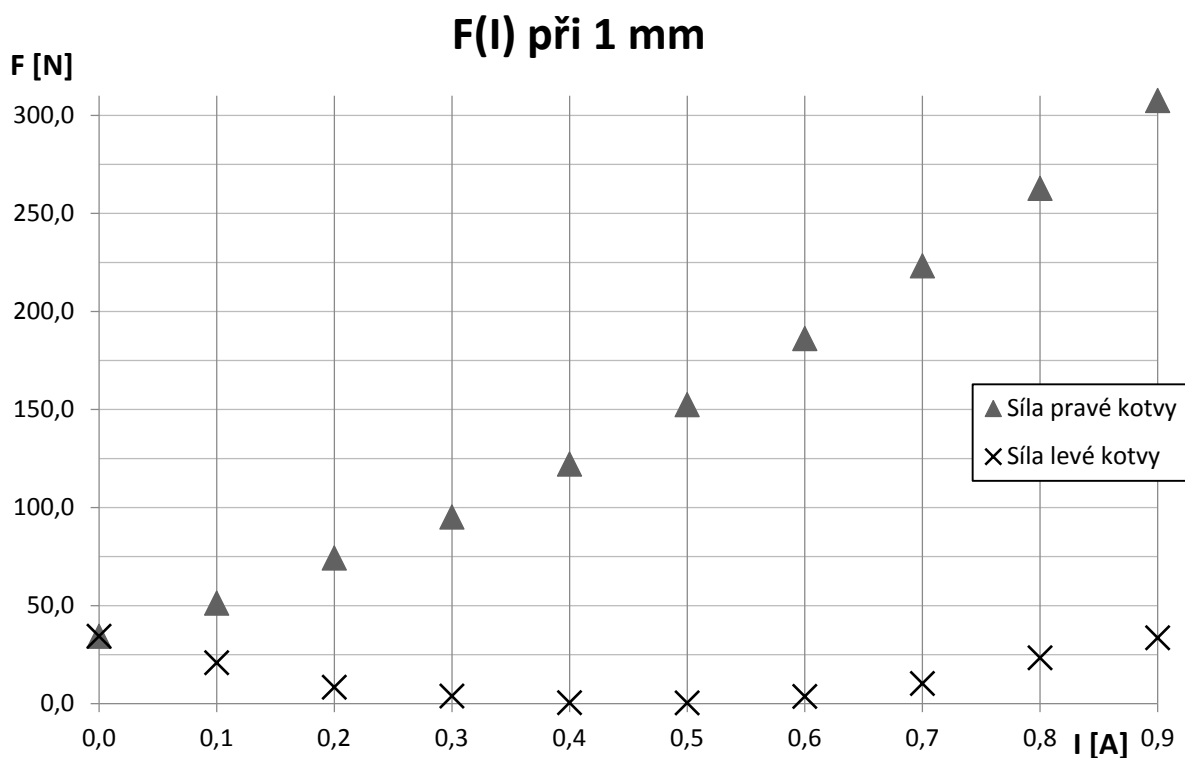
Tab. 7 - Hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0,7 \text{ A}$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,70	1,82	1	1	10,3	223,2
0,70	1,82	5	5	2,9	37,9
0,70	1,82	10	10	2,8	16,7
0,70	1,82	20	20	1,7	6,4
0,70	1,82	30	30	1,0	3,1
0,70	1,82	40	40	0,6	1,7
0,70	1,82	50	50	0,4	1,1
0,70	1,82	60	60	0,3	0,6
0,70	1,82	70	70	0,2	0,4
0,70	1,82	80	80	0,2	0,3
0,70	1,82	90	90	0,1	0,2

Pro vzduchovou mezeru 1 mm, kdy jsou podle předpokladů ideální podmínky, jsem vytvořil Graf 3. Podle tohoto grafu je patrné, že demagnetizace při ideálních podmínkách nastává v rozmezí proudů 0,4 - 0,5 A. Dále je na grafu patrné, že pokud dále zvyšují proud a levá kotva zůstává v blízkosti magnetického obvodu, dochází ke zvyšování síly na tuto kotvu. Levá kotva je tedy dále přitahována k obvodu magnetickou silou, kterou vyvolaly cívky. Vlastní toky cívek tedy přemohly toky magnetů natolik, že nyní samy přitahují levou kotvu. Při příliš vysokých proudech tedy dochází k tzv. přemagnetování.

Tab. 1 - Hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0,9 \text{ A}$

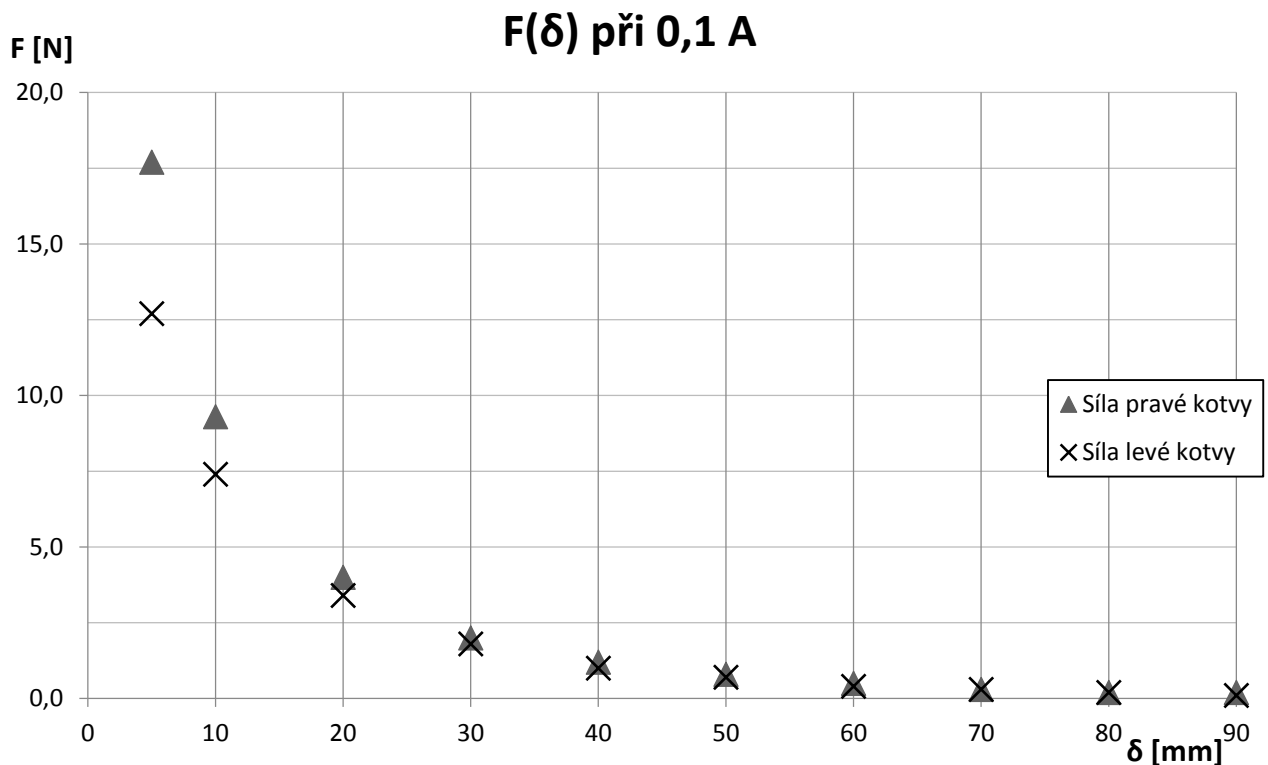
Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,90	2,34	1	1	33,6	307,6
0,90	2,34	5	5	1,9	46,4
0,90	2,34	10	10	1,8	19,6
0,90	2,34	20	20	1,3	7,3
0,90	2,34	30	30	0,8	3,5
0,90	2,34	40	40	0,5	2,0
0,90	2,34	50	50	0,3	1,2
0,90	2,34	60	60	0,2	0,7
0,90	2,34	70	70	0,2	0,5
0,90	2,34	80	80	0,1	0,3
0,90	2,34	90	90	0,1	0,2



Graf 3 - Charakteristika závislosti síly na velikosti proudu pro $\delta = 1 \text{ mm}$

Pro Tab. 4 až Tab. 8 je možné sestavit velké množství charakteristik, z důvodu rozsahu dále v textu uvedu pouze některé druhy charakteristik. Pro ověření principu PPMT aktuátoru jsem zvolil tyto druhy charakteristik:

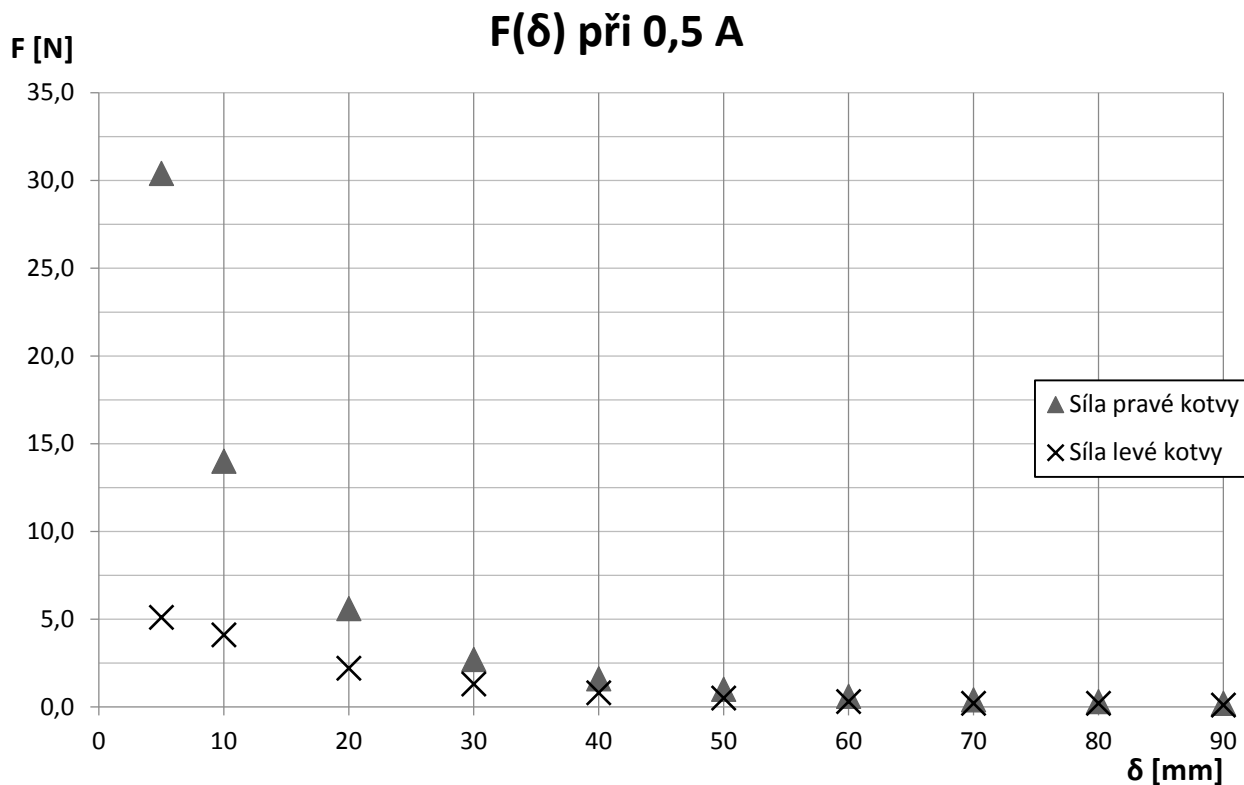
- závislost velikosti síly na vzduchové mezeře $F = f(\delta)$ při určitém proudu, síla působící na obě kotvy,
- závislost síly na velikosti proudu $F = f(I)$ při určité vzduchové mezeře, síla působící na obě kotvy,
- závislost velikosti síly na vzduchové mezeře $F = f(\delta)$ působící na pravou kotvu při různých proudech.



Graf 4 - Charakteristika závislosti síly na velikosti vzduchové mezeře, $I = 0,1 A$

Z charakteristik závislosti síly na velikosti vzduchové mezeře pro proudy 0,1 A a 0,5 A zobrazených na Graf 4 a Graf 5 je patrné, že s rostoucím proudem se zvyšuje síla působící na pravou kotvu a také se snižuje síla, která působí na levou kotvu. Tento stav je způsoben tím, že se zvyšováním proudu také roste magnetická indukce cívek a posiluje tím magnetický tok pro pravou kotvu, tím i zvyšuje působící sílu na tuto kotvu, současně také omezuje působení magnetické indukce na levou kotvu, čímž se snižuje působící síla na tuto kotvu. Charakteristiky pro ostatní simulované proudy jsou uvedeny v Příloha 1.

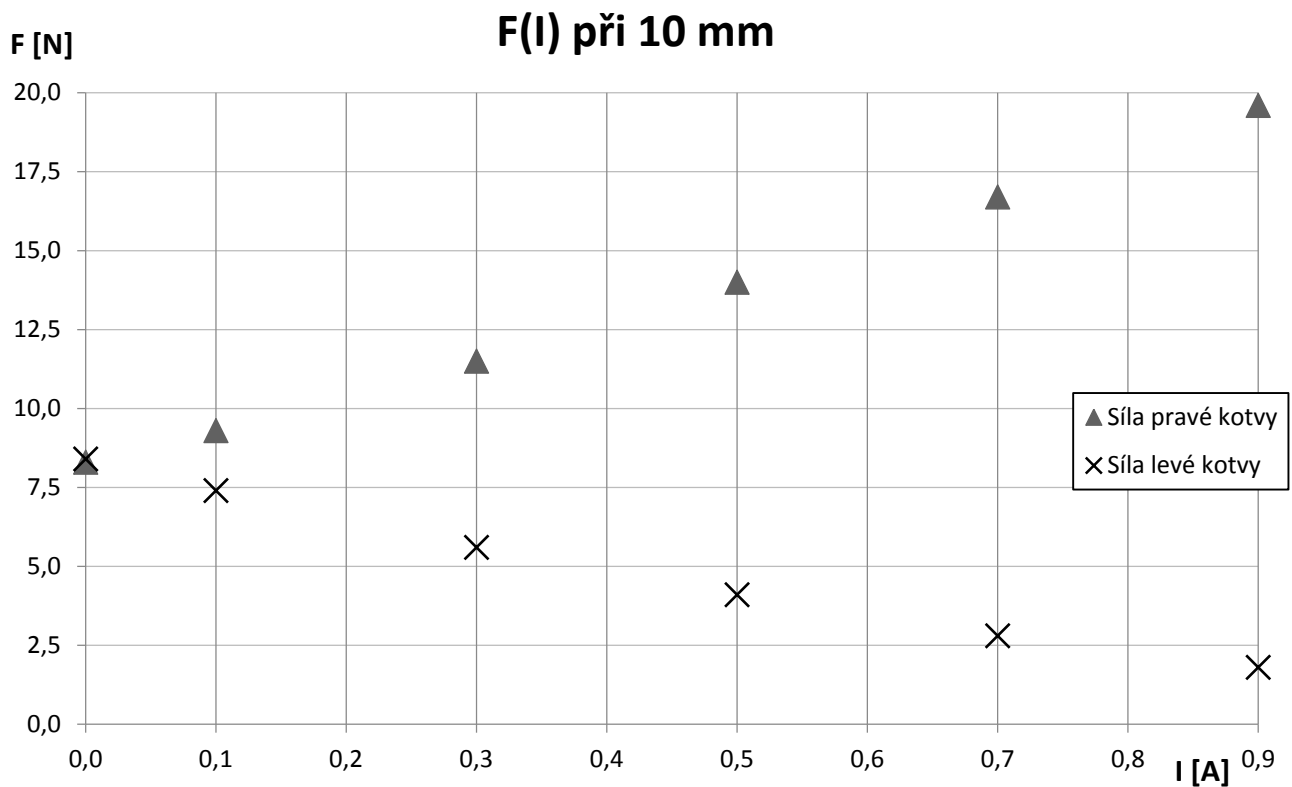
Na Graf 4 a Graf 5 je také patrný vliv rozptylových cest v případě vyšší vzduchové mezeře, kdy při této mezeře jsou síly téměř shodné.



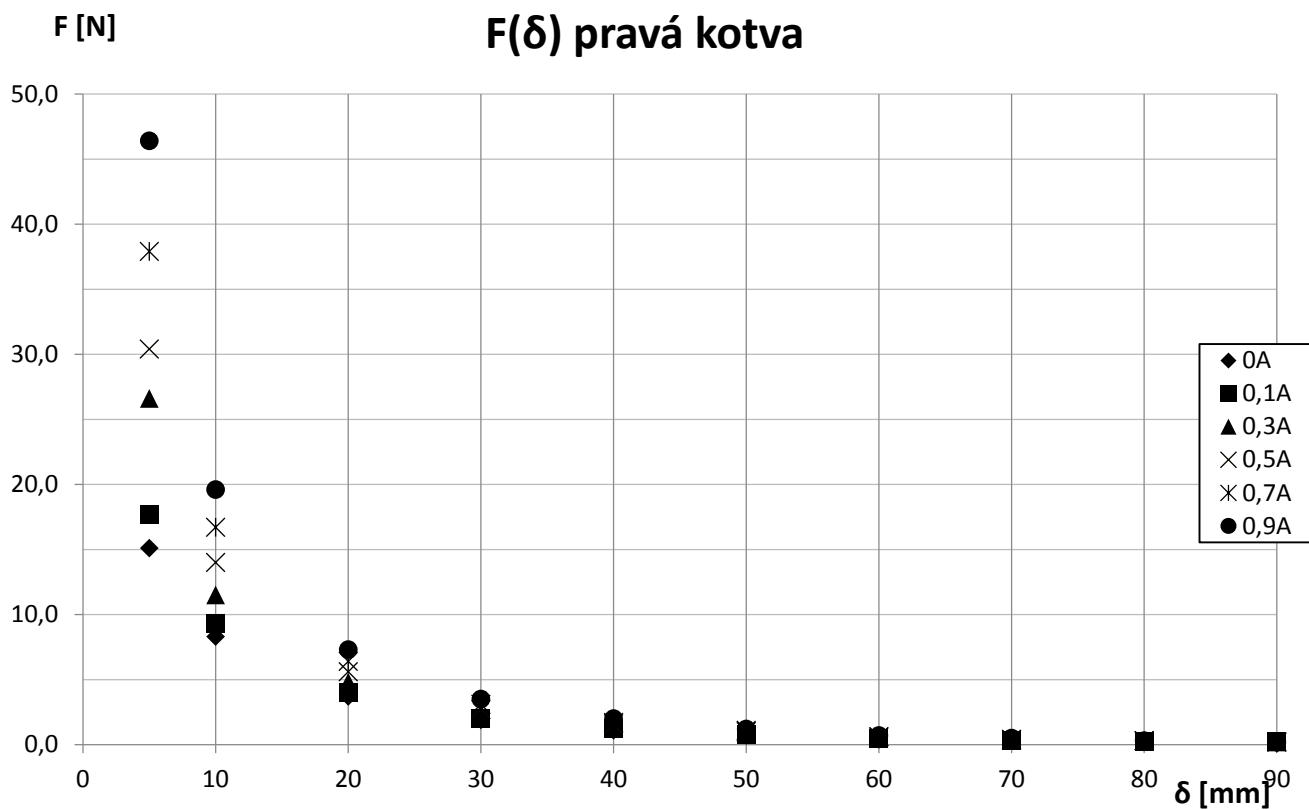
Graf 5 - Charakteristika závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0,5 A$

Závislost síly na velikosti proudu pro vzduchovou mezeru 10 mm je uvedena na Graf 6. Pokud porovnáme situaci s touto vzduchovou mezerou se situací, kdy je vzduchová mezeru 1 mm, což jsou téměř ideální podmínky reprezentované na Graf 3, je patrné, že pro větší vzduchovou mezeru není průběh totožný a s rostoucím proudem se velikost síly na pravou kotvu zvyšuje a na levou klesá. Pokud bychom zvyšovali proud, opět by nastal stav, kdy začne síla působící na levou kotvu opět růst, tedy tzv. přemagnetování. Případ, který zde popisují simuluje situaci, kdy mají obě kotvy stejnou vzduchovou mezeru.

Z charakteristiky závislosti síly na velikosti vzduchové mezery působící pouze na pravou kotvu při různých proudech Graf 7 je patrné, že se zvyšujícím se proudem v dané vzduchové mezeře roste také síla. Tento stav ovšem platí pouze do určité velikosti vzduchové mezery a opět také platí, že při vzduchové mezeře větší jak 50 mm je velikost sil v závislosti na působícím proudu téměř totožná díky velkým rozptylovým cestám.



Graf 6 - Charakteristika závislosti síly na velikosti proudu pro $\delta = 10$ mm

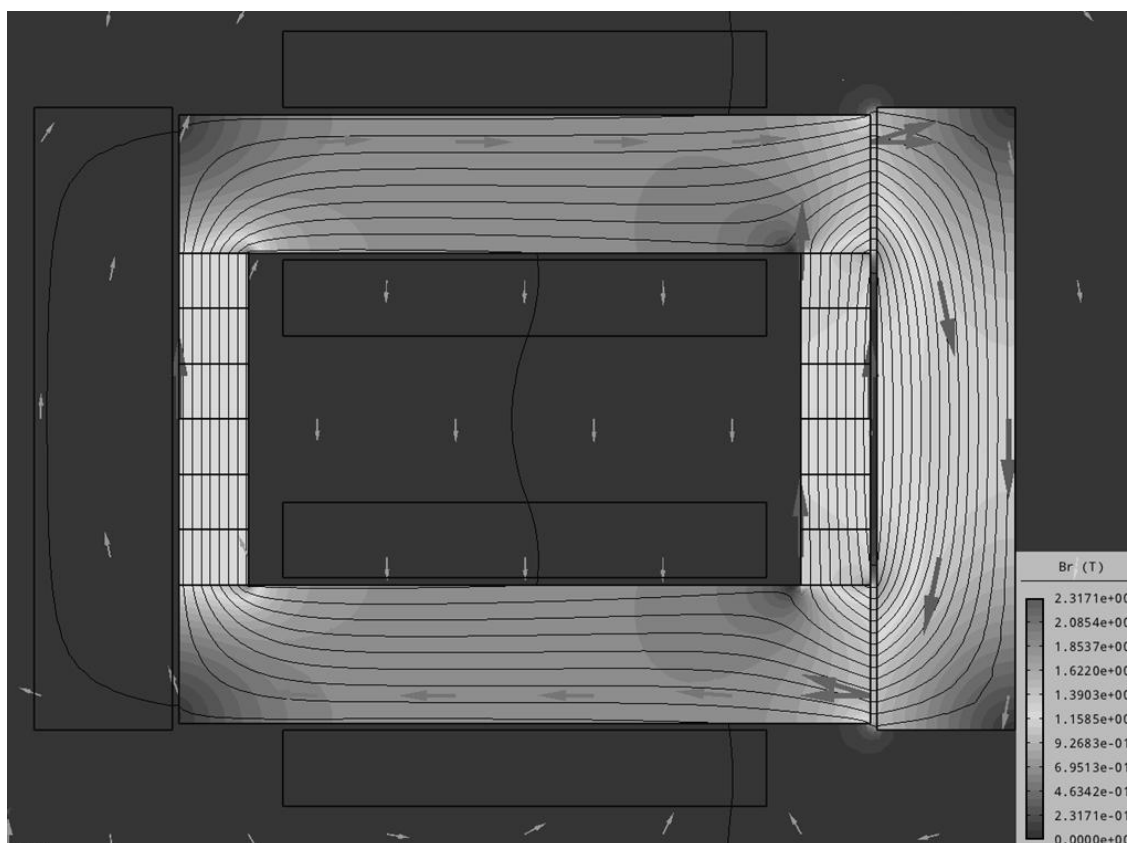


Graf 7 - Charakteristika závislosti síly pravé kotvy na velikosti vzduchové mezery pro různé proudy

Výstupy Agros2D

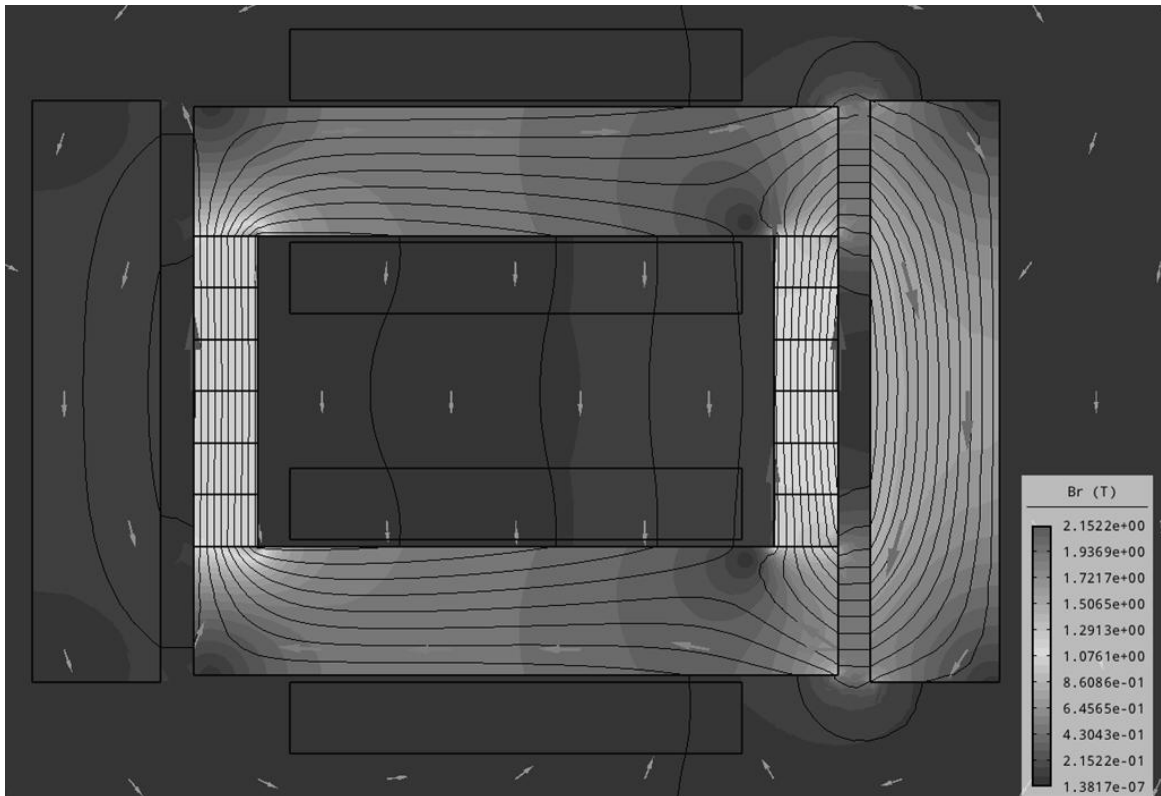
Pro znázornění chování magnetické indukce v PPMT aktuátoru simulované v softwaru uvedu některé exportované obrázky.

Na Obr. 23 je zobrazen ideální případ se vzduchovou mezerou 1 mm a proudem protékajícím cívkami 0,5 A. Pokud budeme pozorovat chování siločar vektorového magnetického potenciálu, z obrázku je zřejmé, že pravou kotvu prochází téměř veškeré siločáry vektorového magnetického potenciálu, kdežto levou kotvu téměř neprochází. Jedná se tedy o stav, kdy by měla působit síla na pravou kotvu čtyřnásobná oproti stavu, kdy nejsou cívky napájeny. Na levou kotvu by tedy měla působit síla nulová dle teoretických předpokladů.

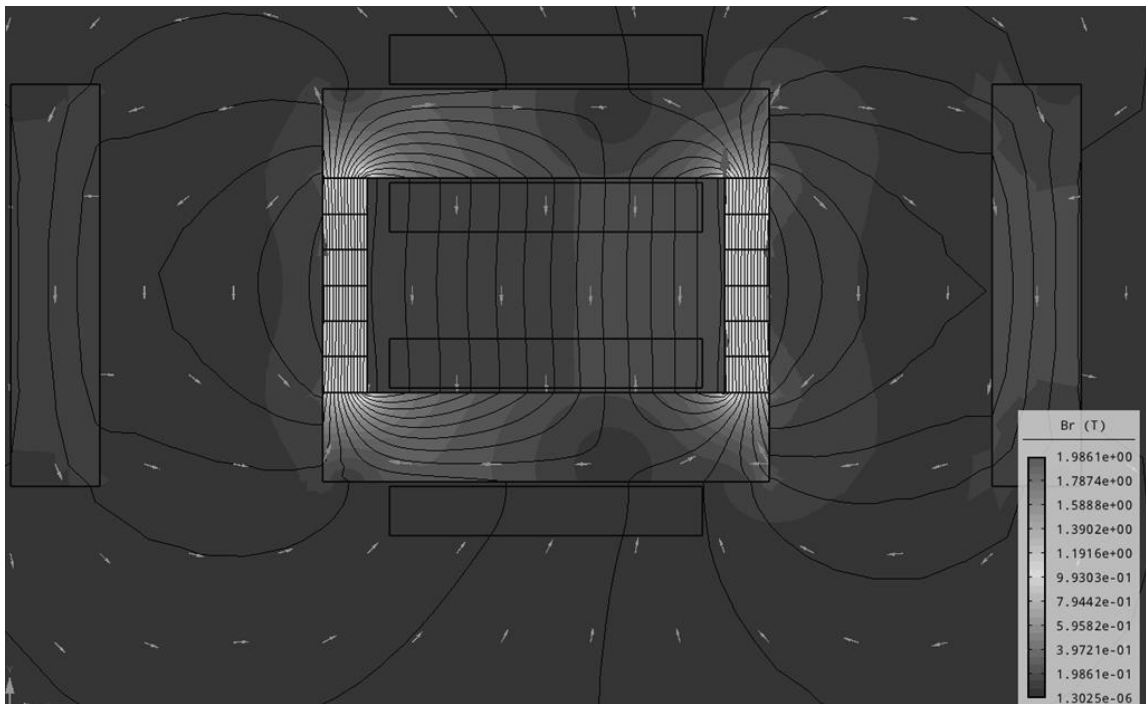


Obr. 23 - Rozložení magnetické indukce, vektorů magnetické indukce a siločar vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 1$ mm, $I = 0,5$ A

Na Obr. 24 je zobrazen případ se vzduchovou mezerou 5 mm a proudem protékajícím cívkami 0,9 A. Pokud budeme pozorovat chování siločar vektorového magnetického potenciálu, z obrázku je tedy patrné, že větší část siločar prochází pravou kotvou. Na pravou kotvu tedy působí opět větší síla.



Obr. 24- Rozložení magnetické indukce, vektory magnetické indukce a siločáry vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 5 \text{ mm}$, $I = 0,9 \text{ A}$



Obr. 25- Rozložení magnetické indukce, vektorů magnetické indukce a siločar vektorového magnetického potenciálu při $\delta = 50 \text{ mm}$, $I = 0,9 \text{ A}$

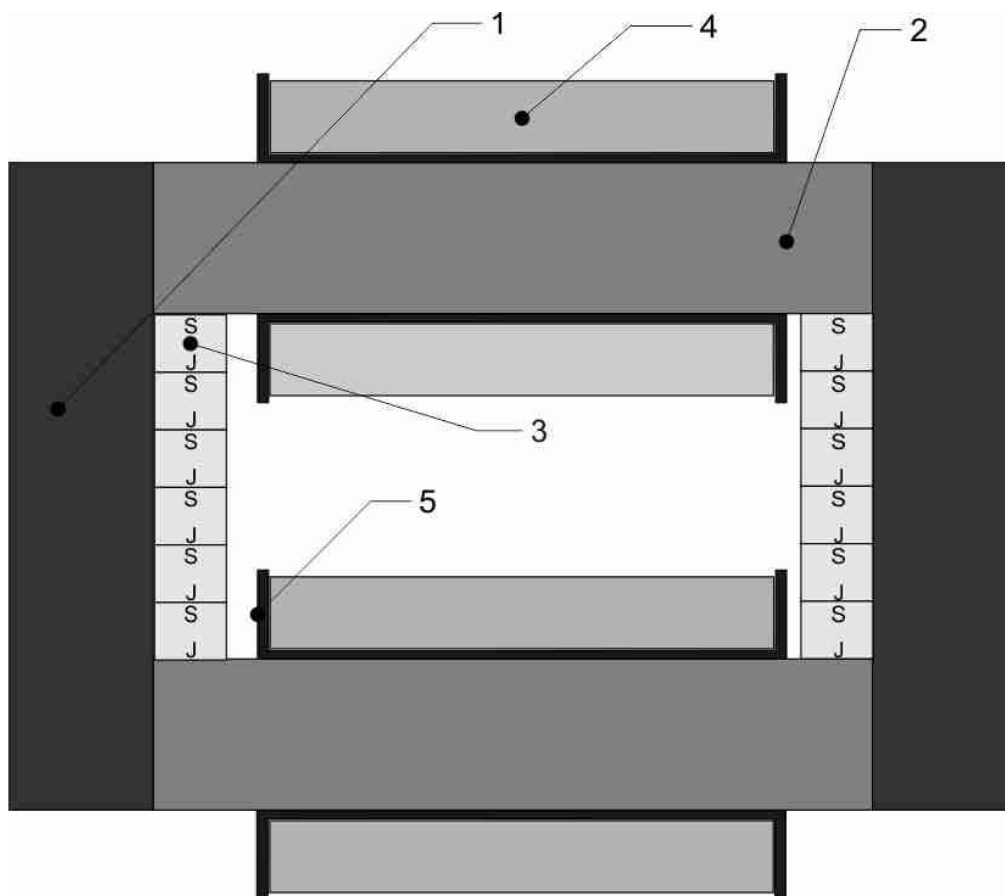
Na Obr. 25 je zobrazen případ se vzduchovou mezerou 50 mm a proudem protékajícím cívkami 0,9 A. Z tohoto obrázku je podle chování siločar vektorového magnetického potenciálu patrný, že vliv rozptylových cest při velkých vzduchových mezerách, kdy je síla působící na pravou a levou kotvu téměř totožná.

9 ŘEŠENÍ NAVRŽENÉHO OBVODU A PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ

9.1 Konstrukce PPMT aktuátoru

Podle navrženého a optimalizovaného obvodu z kapitoly 7 jsem sestrojil skutečný realizovaný PPMT aktuátor, který je složen z magnetické a elektrické části.

Magnetická část je tvořena pohyblivými feromagnetickými jádry **1**, pevnými feromagnetickými jádry **2**, permanentními magnety **3**. Elektrická část je tvořena vinutím cívek **4**, které jsou navinuty na samonosných jádrech **5**, pro možnost pozdějšího výzkumu na přípravku je tedy jednoduchá možnost změny počtu závitů a průřezu vodiče. Řez PPMT aktuátorem je zobrazen na Obr. 26. Přesné rozměry jednotlivých částí aktuátoru, podle kterých byly vyrobeny jednotlivé díly, jsou zobrazeny v Příloha 3.



Obr. 26 - Navržené uspořádání PPMT aktuátoru v řezu

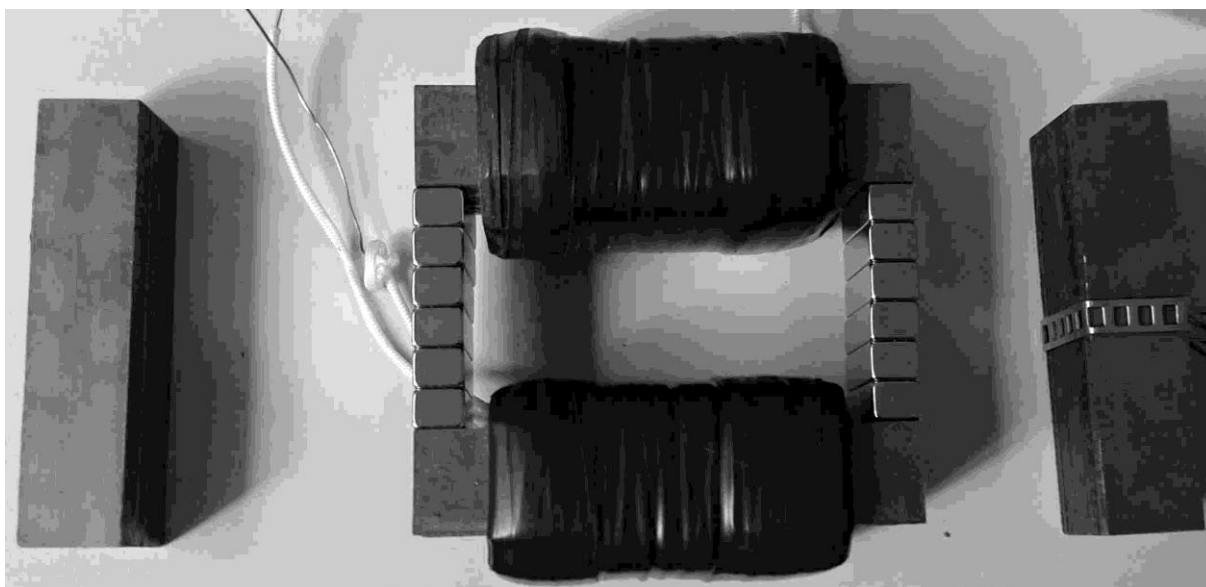
Celé navržené uspořádání PPMT aktuátoru je připraveno na možné budoucí změny parametrů, pro modelování jiných případů v budoucnosti. Je tomu tak z důvodu hrazení nákladů na tvorbu celého modelu z grantu na katedře elektroenergetiky na ČVUT FEL v Praze.

Feromagnetická jádra, pohyblivá i pevná, byla zhotovena z izotropních plechů s označením M330 - 35A o tloušťce 0,35 mm s jakostí dle normy EN 10106. Parametry plechů, které byly dodány výrobcem, jsou: maximální ztráty 3,3 W/kg při 1,5 T / 50 Hz, a relativní permeabilita $\mu_r = 400$. Tyto plechy byly nastříhány podle požadovaných rozměrů, viz Příloha 3. Po nastříhání byly plechy složeny do paketů v počtu 77 kusů, které byly dále fixovány epoxidovou pryskyřicí, následná celková hloubka je tedy 27 mm. [13]

Další částí magnetického obvodu jsou dva permanentní magnety, kde je každý magnet složen ze šesti neodymových magnetů ve tvaru hranolu s rozměry 25 x 10 x 8 mm, které jsou magnetovány kolmo na plochu. Typ použitých neodymových magnetů VMM4 - N35 s odtrhovou silou 62,9 N a remanencí 1,2 T při teplotě okolí 20 °C. Důvodem použití tohoto typu magnetů je dostupnost, magnety s touto orientací na plochu v požadovaném rozměru se nepodařilo zajistit. Proto bylo jako řešení zvoleno použití již zmíněných šesti menších magnetů, ze kterých je složen magnet s odpovídajícím rozměrem. [14]

Elektrickou část tvoří dvě cívky, které jsou umístěny na samonosném jádře z tvrzeného papíru. Na toto jádro každé cívky bylo navinuto 800 závitů za použití lakovaného měděného drátu o průměru 0,7 mm. Cívku jsem následně umístil na pevné feromagnetické jádro. Cívky jsou spojeny antiparalelně a celkový počet závitů aktuátoru je tedy 1 600 závitů.

Na Obr. 27 je fotografie sestaveného experimentálního modelu.



Obr. 27 - Experimentální model PPMT aktuátoru

9.2 Konstrukce přípravku pro měření

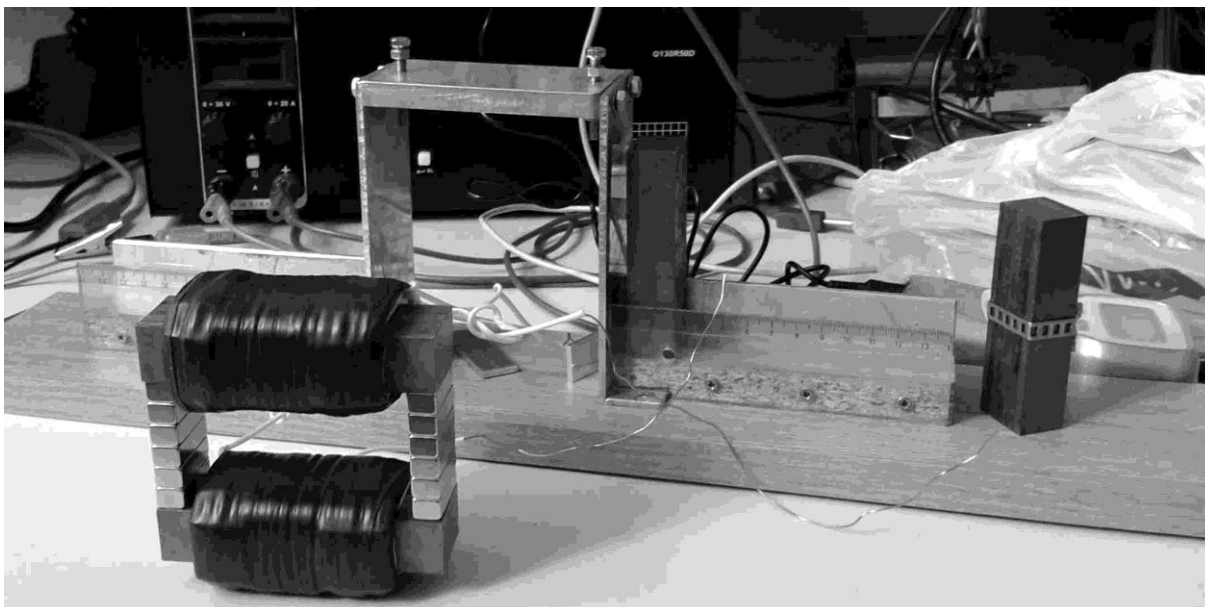
Z důvodu ověření funkce experimentálního modelu bylo mým dalším úkolem sestavit vhodný přípravek pro měření. Důležitou podmínkou pro sestavení přípravku je, aby přípravek neovlivňoval průběh měření. Použitý materiál tedy nesmí ovlivňovat magnetické pole. Další podmínkou pro použitý materiál byla pevnost. Rozhodl jsem se tedy jako materiál využívat výhradně hliník a dřevotřísku.

Pro uchycení aktuátoru jsem využil hliníkovou konstrukci s čelními plechy o tloušťce 3 mm, které jsem svařil do tvaru L, a připravil otvory pro uchycení. Pro vrchní díl jsem použil také hliník o tloušťce 10 mm, do kterého jsem vytvořil závity pro upevnění bočních čel, které svírají aktuátor vcelku. Dále jsem do horního dílu připravil další dva závity pro fixování aktuátoru ve vertikální rovině, kde se po podložení spodního jádra docílí utažením zafixování v požadované poloze. Z důvodu potřeby pohybu kotev pro změnu vzduchové mezery jsem vytvořil z leštěné dřevotřísky vodící prostor, aby se kotva pohybovala pouze v požadovaném směru. Proto jsem na hrany připevnil konstrukci z hliníkového plechu a pravítka. Toto pravítko jsem přesně upravil, aby se přímo na něm daly stanovit hodnoty vzduchové mezery jak pro pravou, tak pro levou kotvu. Pro snížení tření mezi dřevotřískou a kotvou jsem využil vazelínu. Tuto hliníkovou konstrukci jsem umístil na nosnou dřevotřískovou desku pro možnost manipulace s celým přípravkem.

Dalším požadavkem na měření bylo přichycení siloměru a také pružin. Pro tuto možnost jsem připevnil na desku svařený profil ve tvaru L, ve kterém jsou umístěny otvory pro tyč se závitem, na kterém je očko pro zavěšení pružin. Díky křídlové matce je možnost přesného nastavení vzduchové mezery. Siloměr jsem dále umístil na dřevotřískovou desku pomocí připravených otvorů. Tato dřevotřísková deska se také nasadila na tyč se závitem, která byla umístěna v nižším otvoru. Na siloměr jsem potom použil nástavec pro měření s hákem na konci pro zachycení ke kotvě.

Na kotvu jsem připevnil pásek z nemagnetického materiálu, který obepínal kotvu a stahoval se opět nemagnetickým šroubkem. Tím jsem na kotvě vytvořil otvor, za který bylo možné připnout jak siloměr, tak i pružiny.

Konstrukce pro měření i s aktuátorem je zobrazena na Obr. 28.

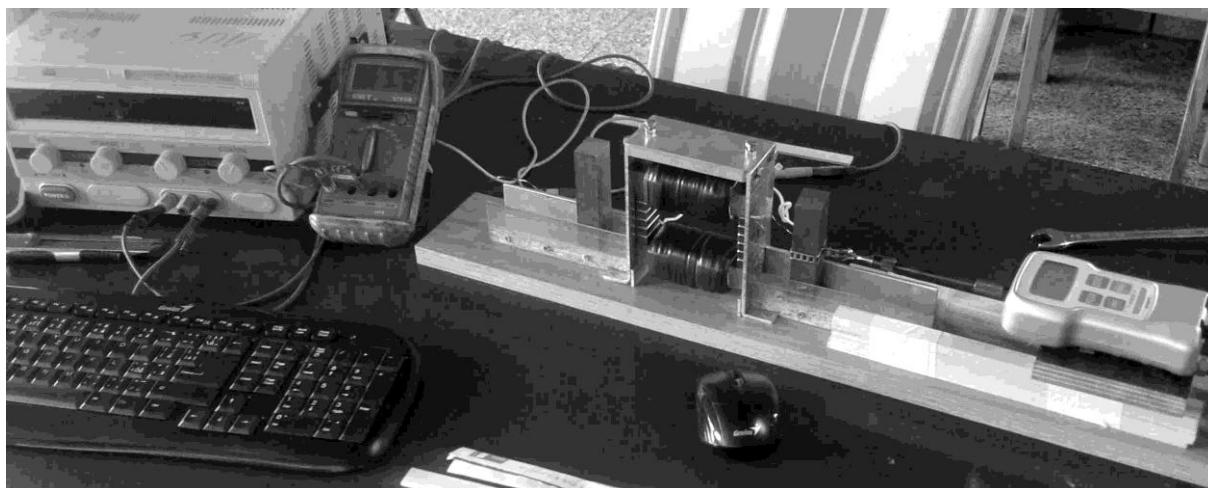


Obr. 28 - Konstrukce pro měření

Po umístění experimentálního modelu do konstrukce jsem připravil měřicí stanoviště, které je zobrazeno na Obr. 29. Na stanovišti jsem použil přístroje, které jsem uvedl níže v seznamu.

Použité přístroje:

- laboratorní zdroj HY3020 0 - 30 V / 0 - 20 A
- digitální siloměr SHIMPO - typ FGN - 50 B, měřicí rozsah 0 - 50 N, dělení 0,01 N přesnost 0,2 % ± 1 digit
- digitální multimetr UNI-T UT 83, rozsah 10 A, přesnost DC proud 0,8 % ± 1 digit
- posuvné měřidlo



Obr. 29 - Měřicí stanoviště pro ověření experimentálního modelu PPMT aktuátoru

10 MĚŘENÍ NA EXPERIMENTÁLNÍM MODELU

Pro měření jsem využil měřicí stanoviště z Obr. 29. Díky konstrukci přípravku pro měření je minimální velikost vzduchové mezery omezena. Pro měření síly siloměrem je nutné, aby měřený objekt, tedy kotva, nedoléhal na jiný. Proto jsem stanovil minimální vzduchovou mezeru pro toto měření na 5 mm. Při měření za pomoci pružin nevadí, že se kotva dotýká jiného objektu, proto se v tomto případě měření provádí již od velikosti vzduchové mezery 4 mm. Pokud bylo třeba nastavit konstantní vzduchovou mezeru pro levou kotvu, využil jsem dřevěných destiček s přesně stanovenou tloušťkou, které jsem umístoval mezi jádro a kotvu.

Abych ověřil skutečnou funkčnost experimentálního modelu PPMT aktuátoru, rozhodl jsem se nejprve pro měření statických charakteristik závislosti síly na vzduchové mezeře pro různé velikosti proudu. Tyto charakteristiky mohou porovnat s řešeným numerickým modelem. Toto měření by se dalo nazvat jako měření pomocí siloměru. A jako druhé měření jsem se rozhodl měřit působení pružin na odpadnutí nebo naopak přitažení kotvy. Jedná se tedy o měření pomocí pružin.

10.1 Měření statických charakteristik

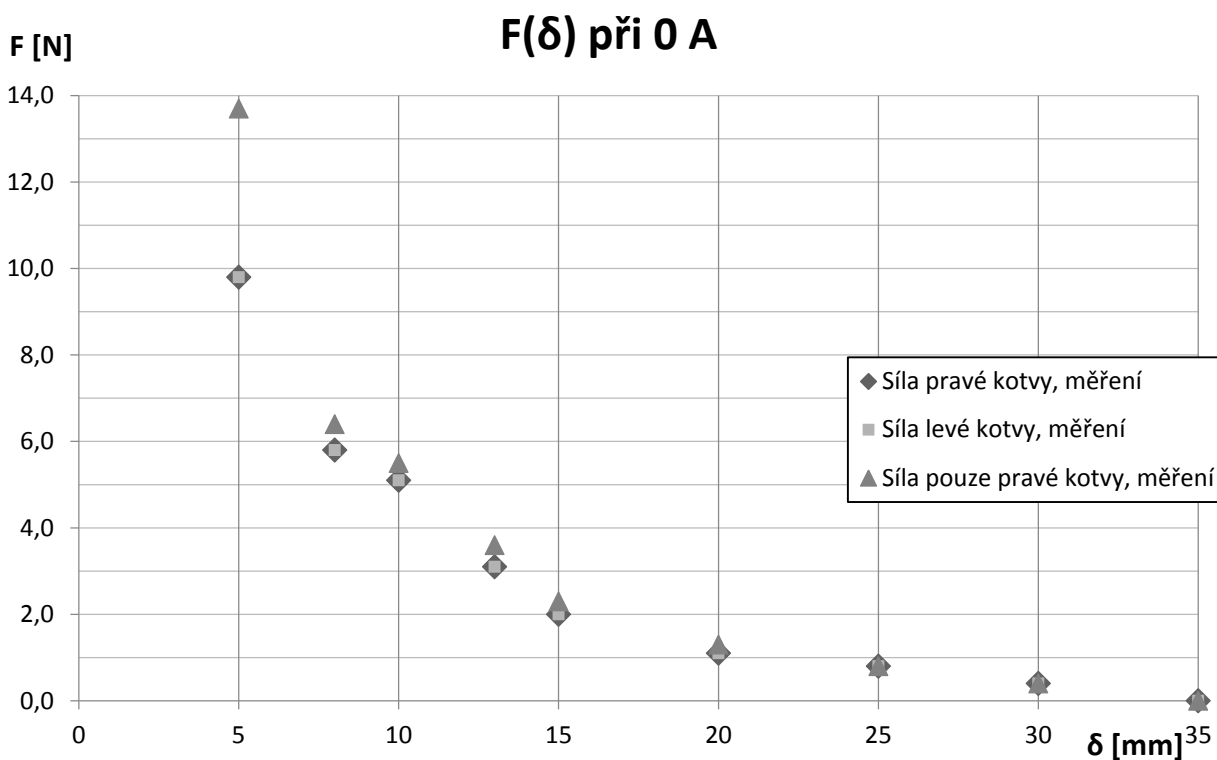
Toto měření vychází ze zjištění síly v závislosti na vzduchové mezeře pro různé proudy. Jako první jsem zvolil měření ve stavu, kdy cívkami neprotéká proud, toto měření jsem provedl pro dvě kotvy se stejnou vzduchovou mezerou a také pouze pro pravou kotvu, kdy je z obvodu odstraněna levá kotva, z důvodu porovnání s numerickým modelem. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 9 a Tab. 10.

Tab. 2 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I = 0$ A

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0	0	5	5	9,8	9,8
0	0	8	8	5,8	5,8
0	0	10	10	5,1	5,1
0	0	13	13	3,1	3,1
0	0	15	15	2,0	2,0
0	0	20	20	1,1	1,1
0	0	25	25	0,8	0,8
0	0	30	30	0,4	0,4
0	0	35	35	0,0	0,0

Tab. 3 - Naměřené hodnoty sil působící na pravou kotvu, různé vzduchové mezery, $I = 0 \text{ A}$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy	Síla pravé kotvy
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0	0	-	5	-	13,7
0	0	-	8	-	6,4
0	0	-	10	-	5,2
0	0	-	13	-	3,6
0	0	-	15	-	2,3
0	0	-	20	-	1,3
0	0	-	25	-	0,8
0	0	-	30	-	0,4
0	0	-	35	-	0,0



Graf 8 - Měřená charakteristika závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0 \text{ A}$

Pro měření bez protékajícího proudu jsem vytvořil Graf 8, z tohoto grafu je zjevné, že pokud je odstraněna jedna kotva, síla působící na zbylou kotvu se zvýší. Nicméně v případě, kdy vzduchová mezera dosahuje hodnoty 25 mm a větší, jsou síly shodné. Měření jsem prováděl pouze do velikosti vzduchové mezery 35 mm, kde již bylo působení síly nulové.

Při druhém měření jsem ověřoval vliv protékajícího proudu cívkami na magnetické pole magnetů. Měření jsem provedl pro stejné vzduchové mezery obou kotev. Rozsah zkušebních

proudů jsem zvolil 0,1 - 1,1 A s krokem 0,2 A. Pro zjištění síly působící na levou kotvu jsem otočil polaritu proudu v cívkách. Tento postup měření jsem zvolil z důvodu, že pro měření je uzpůsobena pouze jedna strana modelu a také díky symetrii modelu. Uvedený rozsah proudů jsem zvolil téměř shodný s numerickým modelem z důvodu pozdějšího porovnání.

Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 11 až Tab. 16.

Tab. 4 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=0,1 A$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,10	0,26	5	5	8,1	13,5
0,10	0,26	8	8	4,2	7,2
0,10	0,26	10	10	3,6	6,1
0,10	0,26	13	13	2,7	3,8
0,10	0,26	15	15	2,2	2,6
0,10	0,26	20	20	1,3	1,8
0,10	0,26	25	25	0,9	1,2
0,10	0,26	30	30	0,6	0,7
0,10	0,26	35	35	0,1	0,1

Tab. 5 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=0,3 A$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,30	0,78	5	5	5,9	14,6
0,30	0,78	8	8	3,3	9,5
0,30	0,78	10	10	2,7	5,8
0,30	0,78	13	13	2,3	3,8
0,30	0,78	15	15	2,1	2,4
0,30	0,78	20	20	1,1	1,5
0,30	0,78	25	25	0,8	0,9
0,30	0,78	30	30	0,6	0,7
0,30	0,78	35	35	0,0	0,3

Tab. 13 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=0,5 A$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,50	1,30	5	5	3,8	20,1
0,50	1,30	8	8	2,5	10,5
0,50	1,30	10	10	2,2	8,0
0,50	1,30	13	13	1,9	5,6
0,50	1,30	15	15	1,8	4,3
0,50	1,30	20	20	0,9	2,6
0,50	1,30	25	25	0,6	1,6
0,50	1,30	30	30	0,5	1,2
0,50	1,30	35	35	0,0	0,6

Tab. 14 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=0,7 A$

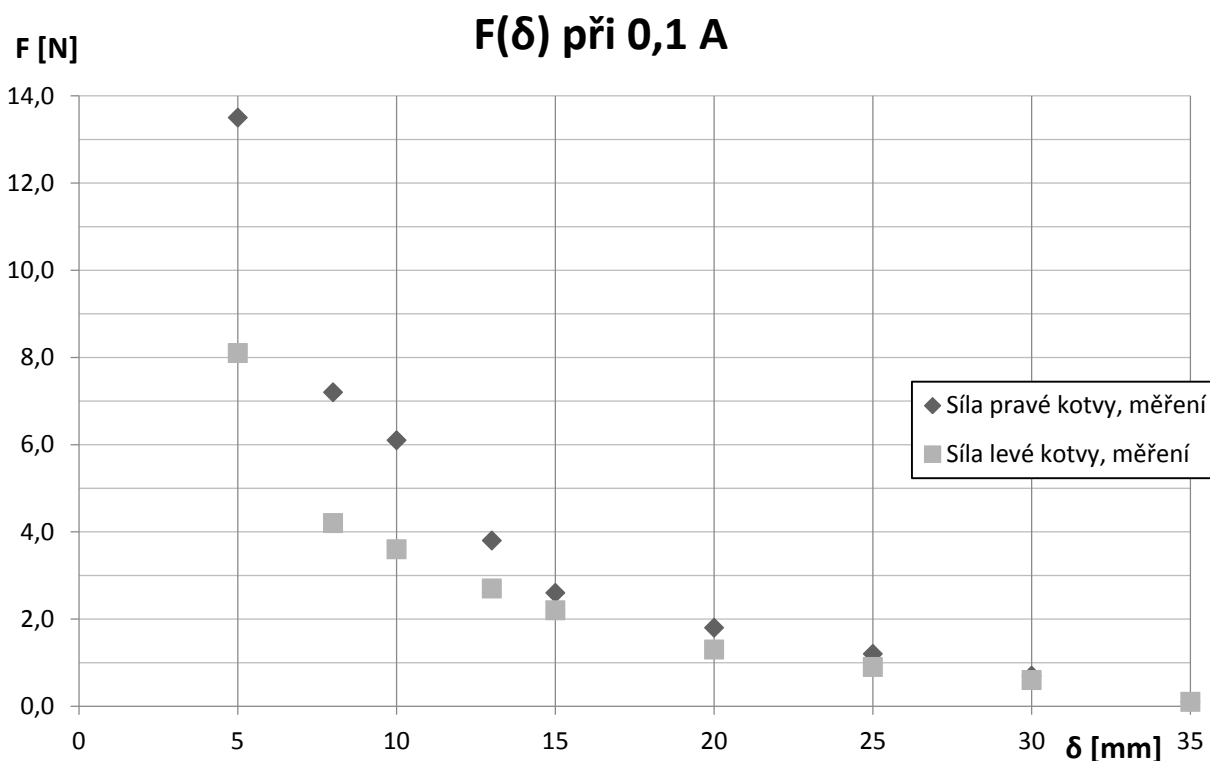
Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,70	1,82	5	5	2,1	22,1
0,70	1,82	8	8	1,7	12,2
0,70	1,82	10	10	1,6	9,0
0,70	1,82	13	13	1,5	5,8
0,70	1,82	15	15	1,4	4,5
0,70	1,82	20	20	0,7	2,8
0,70	1,82	25	25	0,6	1,9
0,70	1,82	30	30	0,5	1,5
0,70	1,82	35	35	0,0	0,7

Tab. 15 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=0,9 A$

Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
0,90	2,34	5	5	1,5	25,8
0,90	2,34	8	8	1,2	14,4
0,90	2,34	10	10	1,1	11,2
0,90	2,34	13	13	1,0	5,2
0,90	2,34	15	15	0,9	3,4
0,90	2,34	20	20	0,5	2,3
0,90	2,34	25	25	0,4	1,9
0,90	2,34	30	30	0,4	1,4
0,90	2,34	35	35	0,0	0,8

Tab. 16 - Naměřené hodnoty sil působící na kotvy, různé vzduchové mezery, $I=1,1 A$

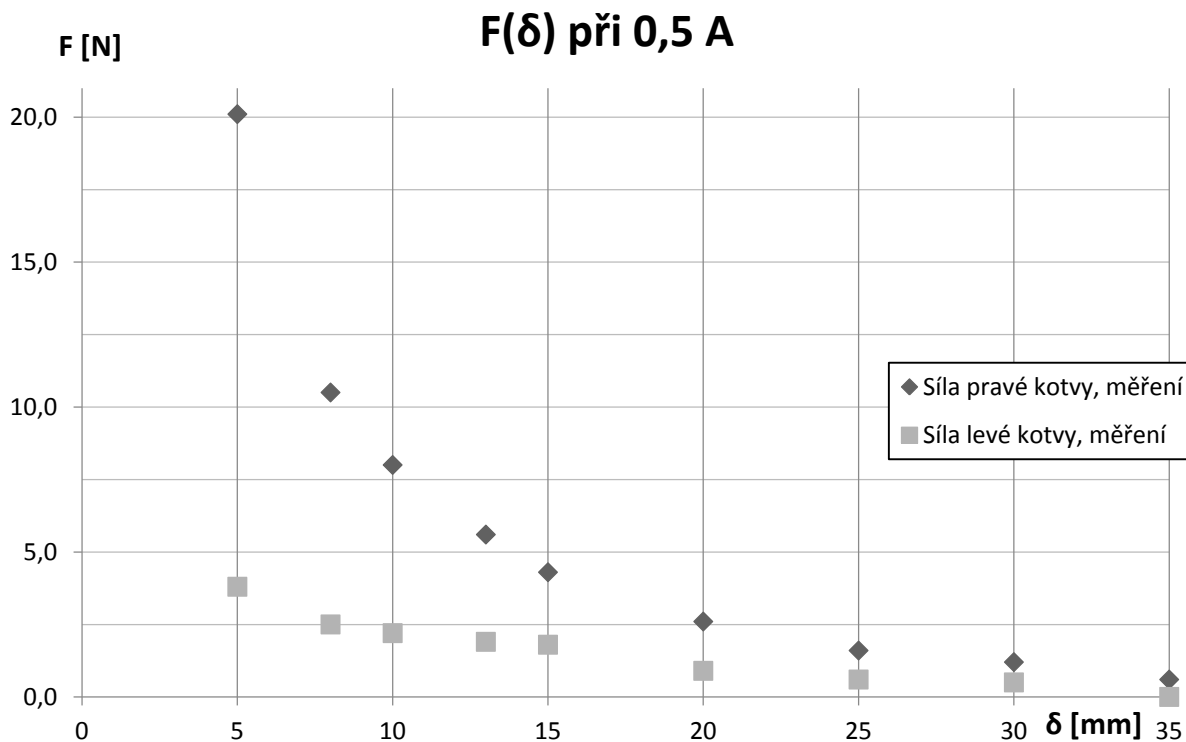
Proud	Proudová hustota	Velikost vzduchové mezery levá	Velikost vzduchové mezery pravá	Síla levé kotvy, měření	Síla pravé kotvy, měření
I	J	δ_L	δ_P	F_L	F_P
A	A/mm ²	mm	mm	N	N
1,10	2,86	5	5	1,0	31,9
1,10	2,86	8	8	0,9	18,6
1,10	2,86	10	10	0,8	13,3
1,10	2,86	13	13	0,7	8,3
1,10	2,86	15	15	0,6	6,2
1,10	2,86	20	20	0,4	3,4
1,10	2,86	25	25	0,4	2,3
1,10	2,86	30	30	0,3	1,5
1,10	2,86	35	35	0,0	0,9



Graf 9 - Měřená charakteristika závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0,1 A$

V textu jsou zobrazené pouze statické charakteristiky při proudu 0,1 A a 0,5 A. Ostatní změřené charakteristiky jsou uvedeny v Příloha 4. Z vynesných charakteristik je patrné, že s rostoucí vzduchovou mezerou síla působící na kotvy klesá. Při velikosti vzduchové mezery 25 mm a proudu 0,1 A jsou síly působící na pravou a levou kotvu téměř totožné, to je způsobeno velkými rozptylovými cestami. Ovšem při zvyšování proudu tento jev nastává při větší vzduchové mezeře. Podle tabulek je patrné, že se zvyšujícím se proudem

roste hodnota síly působící na pravou kotvu a klesá síla působící na levou kotvu. Z důvodu zatížení cívek nemohu napájet cívky do potřebného proudu, kdy by se u příslušné vzduchové mezery mohl nastat stav, který nastal v numerickém modelu, tedy tzv. přemagnetování.



Graf 10 - Měřená charakteristika závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0,5$ A

Při této sérii měření jsem z důvodu zvýšení přesnosti plánoval opakovat každé měření třikrát a z naměřených hodnot udělat průměr. Po provedení tohoto postupu se výsledky lišily pouze v setinách. Z tohoto důvodu a kvůli přesnosti siloměru jsem uvažoval pouze desetiny.

10.2 Měření pomocí síly pružiny

Pro další ověření funkčnosti PPMT aktuátoru jsem zvolil použití síly pružin. Využívání pružin by se dalo využít přímo ve funkčním aktuátoru, kde by docházelo při poklesu síly působící na kotvu pod hodnotu síly pružiny k odtážení. Následně by mohl nastat stav, kdy naopak posilují sílu působící na danou kotvu, a tím překonám sílu pružiny pro přitáhnutí. Tyto stavy vycházející z praxe jsem se pokusil experimentálně ověřit. Zvolil jsem tři typy přístupu.

Pro ověření jsem měl k dispozici tři pružiny dodané katedrou s následujícími parametry:

- Pružina I - $l_0 = 40$ mm; $F_0 = 1,4$ N; $k_p = 0,71$ Nmm⁻¹;
- Pružina II - $l_0 = 30$ mm; $F_0 = 2,2$ N; $k_p = 1,33$ Nmm⁻¹;
- Pružina III - $l_0 = 25$ mm; $F_0 = 3,3$ N; $k_p = 1,94$ Nmm⁻¹;

pro tyto pružiny jsem siloměrem stanovil hodnoty síly při prodloužení o Δl .

Postup ověření 1

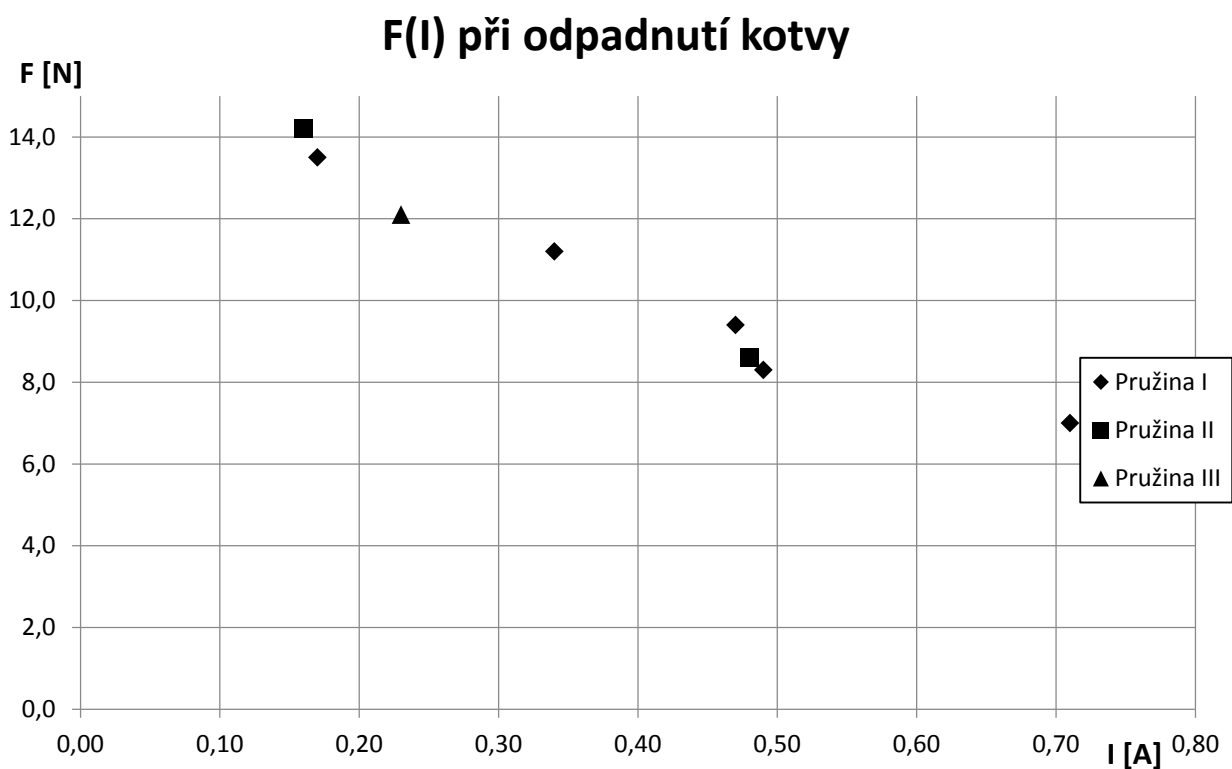
Model aktuátoru jsem ve výchozí pozici nastavil do polohy, kdy jsou přitažené obě kotvy. Nastavil jsem polaritu cívek tak, aby při zvyšování proudu byla přitahována levá kotva. To zároveň způsobuje, že síla působící na pravou kotvu postupně klesá, a pokud klesne na hodnotu nižší než je síla pružiny, kotva odpadne. Nejmenší možná vzduchová mezera pro tento stav je 4 mm. Tento postup jsem aplikoval pro všechny typy pružin. Měřené hodnoty pro všechny pružiny jsou uvedeny v Tab. 17.

Tab. 17 - Proud při odpadnutí pružiny $\delta = 4$ mm, postup 1

Prodloužení pružiny	Síla pružiny	Proud měřený při odpadnutí
Δl	$F_{\text{pružiny}}$	I
mm	N	A
Pružina I		
5	7,0	0,71
8	8,3	0,49
10	9,4	0,47
13	11,2	0,34
15	13,5	0,17
Pružina II		
5	8,6	0,48
8	14,2	0,16
Pružina III		
3	12,1	0,23

Výsledek tohoto měření odpovídá teoretickým předpokladům, jelikož při zvyšování proudu klesá síla působící na danou kotvu. Toto tvrzení je patrné při pohledu na Tab. 17, čím nižší silou působí pružina, tím vyšším proudem musím aktuátor napájet, aby kotva odpadla. Ve výsledku tedy není důležité, jaká pružina byla použita, ale jakou silou působí. Podle těchto předpokladů by graf závislosti síly na proudu, který z těchto hodnot sestavíme, měl mít klesající trend. Pokud se podíváme na Graf 11, tento trend souhlasí, drobné výchytky jsou způsobeny nepřesností měření.

Tímto postupem ověření aktuátoru jsem došel k závěru, že mechanická funkce aktuátoru při minimální možné vzduchové mezeře odpovídá předpokladům.



Graf 11 - Charakteristiky závislosti síly na velikosti proudu při odpadnutí kotvy, postup 1

Postup ověření 2

Při dalším postupu ověření funkce aktuátoru jsem uvažoval stav, kdy chci opět zvyšováním proudu posílit jednu kotvu a druhá kotva pomocí pružiny odpadne. Rozdíl oproti předchozímu postupu je, že odpadající kotva se nachází ve zvětšené vzduchové mezeře. To znamená, že kotva nedoléhá přímo na obvod. Předpokládal jsem nižší proudy, při kterých kotva odpadne. Tímto postupem mohu porovnat síly působící na kotvu ve větší vzduchové mezeře, která je srovnatelná s numerickým modelem. Pro toto měření jsem využil pružinu I a II. Měřené hodnoty jsou zaznamenané v Tab. 18.

U tohoto postupu měření jsem předpokládal, že pokud zvětším vzduchovou mezeru, snížím tím sílu, která působí na tuto kotvu. Dále jsem předpokládal, že pokud tedy zvýším vzduchovou mezeru, bude pro odpadnutí kotvy stačit menší hodnota proudu oproti menší vzduchové mezeře. Z Tab. 18 je patrné, že moje předpoklady souhlasí s naměřenými hodnotami. Opět jsem tedy došel k závěru, že mechanická funkce aktuátoru při požadované vzduchové mezeře odpovídá předpokladům.

Tab. 18 - Proud při odpadnutí kotvy, různé vzduchové mezery, postup 2

Velikost vzduchové mezery pravá	Prodloužení pružiny	Síla pružiny	Proud měřený při odpadnutí
δ_F	Δl	$F_{\text{pružiny}}$	I
mm	mm	N	A
Pružina I			
5	10	9,4	0,12
6	10	9,4	0,09
8	4	5,1	0,31
Pružina II			
5	5	8,6	0,20
6	3	5,9	0,27

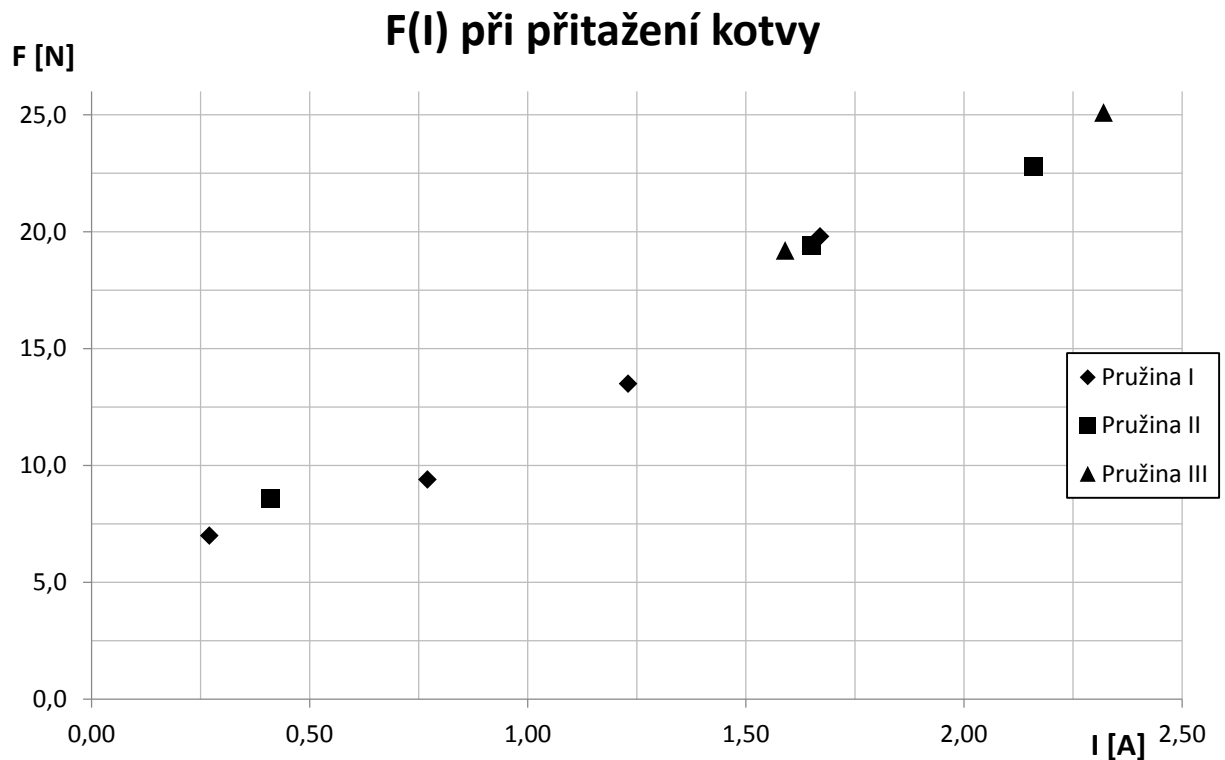
Postup ověření 3

Princip posledního postupu pro ověření funkce aktuátoru spočíval v posilování síly působící na pravou kotvu způsobenou zvyšováním proudu, až do doby kdy při vzduchové mezeře 10 mm bude kotva přitažena. V tomto případě jsem opět nastavoval prodloužení pružin tak, aby vyvinuly potřebnou sílu. Kotvu jsem v tomto případě připevnil na velikosti vzduchové mezery 10 mm tak, že nemohla být dále odtažena od aktuátoru, ale pro pohyb k jádru nebyla cesta blokována. Při tomto měření jsem cívky napájel po krátkou dobu, potřebnou k přitažení kotvy, proto jsem si dovolil napájet cívky větším proudem, než je proud dovolený pro vodič, který je ovšem stanoven pro trvalé zatížení. U měření jsem z důvodu oteplení cívek měřil v dostatečných intervalech, aby měření nebylo ovlivněno. Toto měření jsem aplikoval pro všechny typy pružin. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 19.

Z Graf 12 je patrné, že s rostoucím proudem je možné připnout kotvu, na kterou působí větší síla pružiny. Je tedy možné při vzduchové mezeře 10 mm připnout kotvu, na kterou působí síla 25,1 N nastavením proudu cívkami 2,32 A. Tento závěr by bylo možné využít u aktuátoru, kde by se pro napájení využíval impulzní zdroj proudu.

Tab. 19 - Proud při přitažení kotvy $\delta = 10 \text{ mm}$, postup 3

Velikost vzduchové mezery pravá	Prodloužení pružiny	Síla pružiny	Proud měřený při připnutí
δ_P	Δl	$F_{\text{pružiny}}$	I
mm	mm	N	A
Pružina I			
10	20	19,8	1,67
10	15	13,5	1,23
10	10	9,4	0,77
10	5	7,0	0,27
Pružina II			
10	15	22,8	2,16
10	10	19,4	1,65
10	5	8,6	0,41
Pružina III			
10	10	25,1	2,32
10	5	19,2	1,59



Graf 12 - Charakteristiky závislosti síly na velikosti proudu při přitažení kotvy,
 $\delta = 10 \text{ mm}$, postup 3

10.3 Nejistoty měření

Příklad určení nejistoty měření pro měření síly a proudu je uveden v následujících výpočtech. Jedná se o nejistotu měření metodou typu B, která využívá všechny dostupné informace, například specifikace dodané výrobcem přístroje.

- Nejistota typu B při měření síly pro hodnotu 18,6 N:

$$\pm(18,6 \cdot \frac{0,2}{100} + 0,01)N = \pm 0,047N \Rightarrow u_B = \frac{0,047}{\sqrt{3}}N \approx 0,027N \quad \mathbf{F = 18,6 \pm 0,027N.}$$

- Nejistota typu B při měření proudu pro hodnotu 1,67 A:

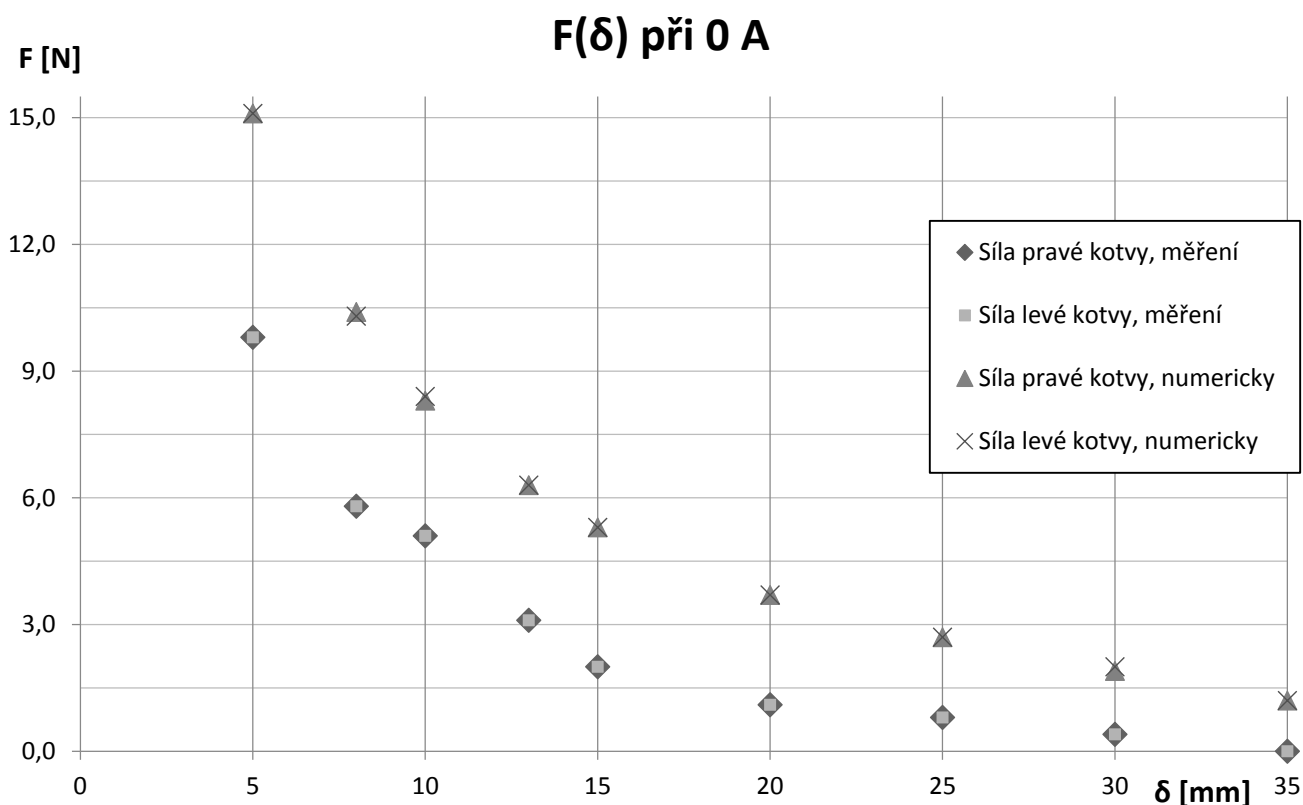
$$\pm(1,67 \cdot \frac{0,8}{100} + 0,01)A = \pm 0,023A \Rightarrow u_B = \frac{0,023}{\sqrt{3}}A \approx 0,014A \quad \mathbf{I = 1,67 \pm 0,014A.}$$

11 ANALÝZA VÝSLEDKŮ

V této kapitole se zaměřím na porovnání výsledků z numerického modelu a měření na experimentálním modelu. Porovnávat budu nejprve měření statických charakteristik PPMT aktuátoru, kde budu porovnávat velikosti působící síly na kotvy podle velikosti vzduchové mezery, dále také v závislosti na proudu protékajícím cívkami. Dále budu také porovnávat měření pomocí síly pružin, kde budu ověřovat předpokládanou hodnotu proudu, při které mělo nastat odpadnutí či přitažení kotvy.

11.1 Analýza statických charakteristik

Nejprve srovnám ustálené stavy, kdy neprotéká cívkami proud, se dvěma kotvami o stejné stejnou vzduchové mezeře a dále stav pouze s pravou kotvou. Výsledky budu porovnávat ve formě grafů, kde budu moci porovnat jak velikost číselné hodnoty, tak trend hodnot.

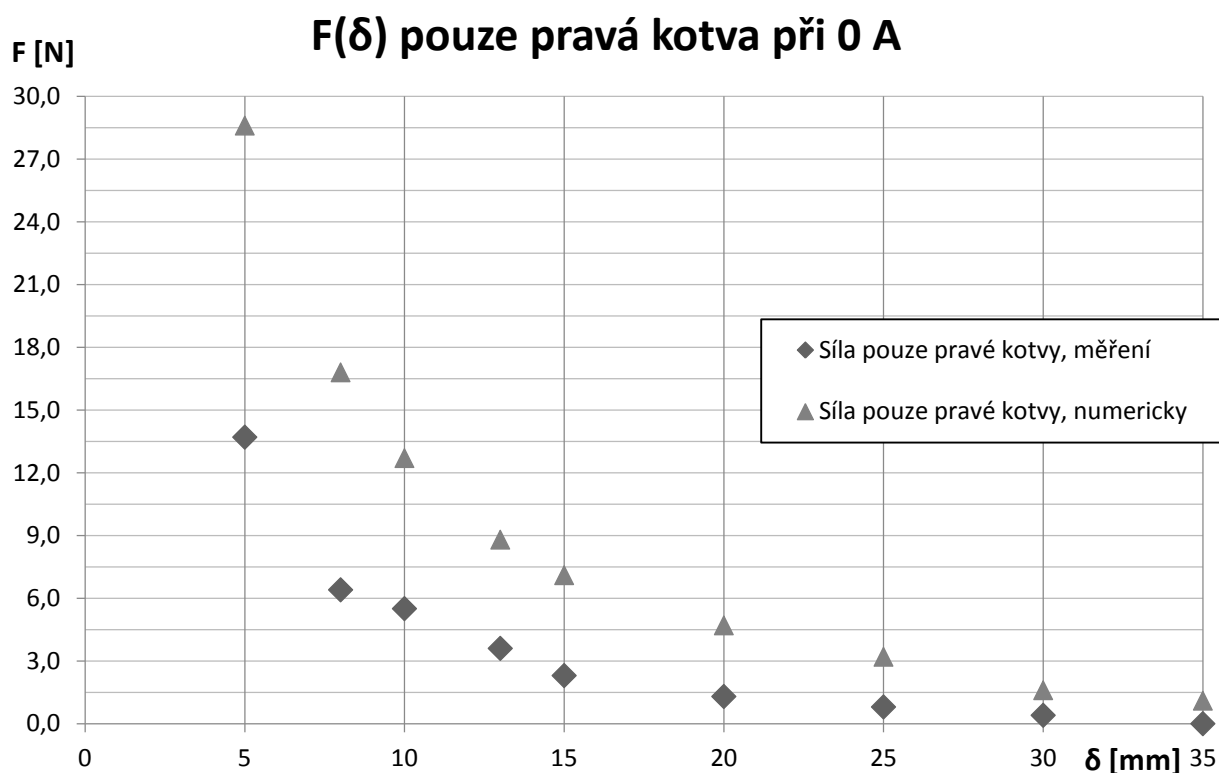


Graf 13 - Porovnání charakteristik závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0$ A

Na Graf 13 je patrné, že síly vycházející z numerického modelu jsou vyšší než skutečné naměřené síly, ale rozložení trendu hodnot odpovídá. Rozdíl ve velikosti síly je zřejmě způsoben tím, že numerický model nerespektuje nelinearitu magnetů a železa a tedy i vliv sycení. Je tedy možné, že v experimentálním modelu dochází k přesycování železa,

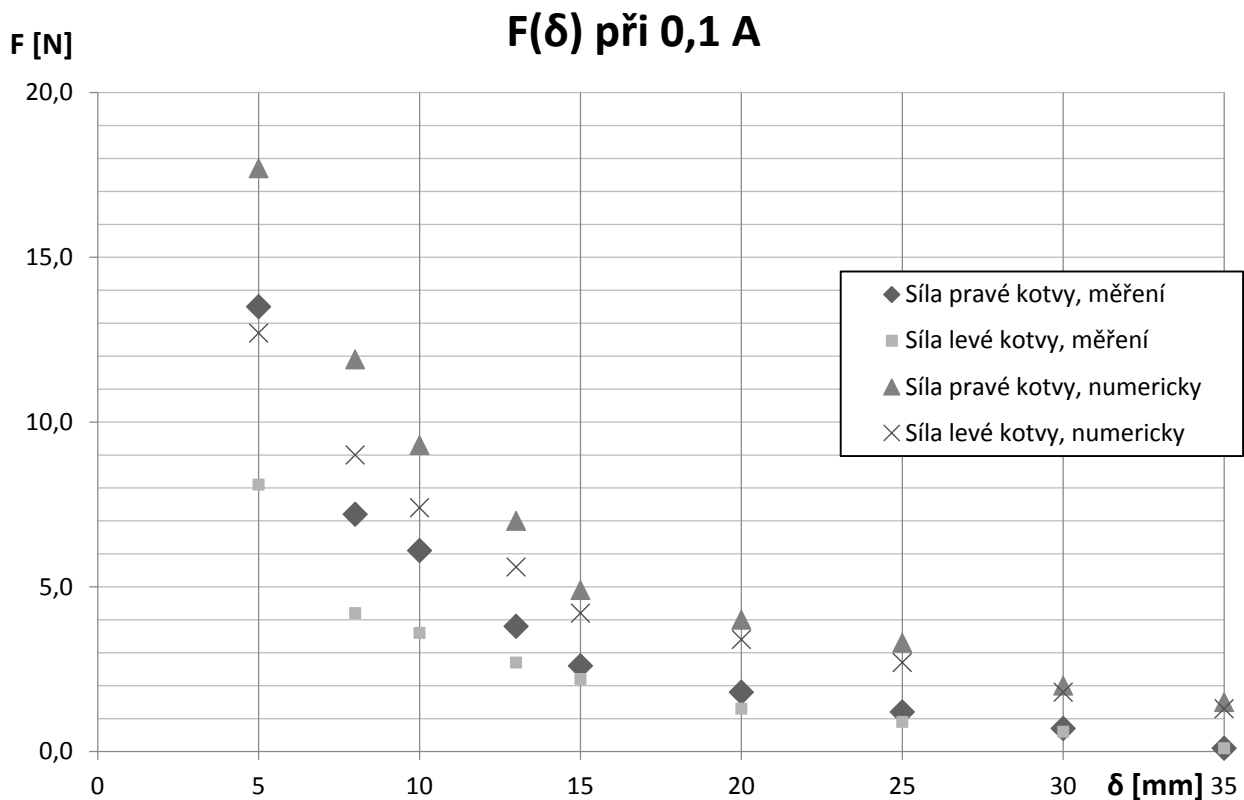
což má za následek pokles relativní permeability a zvýšení rozptylového toku, čímž dochází k poklesu síly. K rozdílu hodnot síly mezi numerickým modelem a experimentálním modelem dochází u všech porovnávaných průběhů, tento jev se dal předpokládat, jelikož nelze považovat výsledky z numerického modelu za výsledky odpovídající skutečným díky téměř ideálním podmínkám, které jsou u numerického modelu nastaveny.

Pro další porovnání výsledků jsem zvolil stav, kdy je přitažena pouze pravá kotva bez protékajícího proudu. Zobrazeno na Graf 14, z této charakteristiky je patrné, že síla, která působila pouze na pravou kotvu v numerickém modelu, se u vzduchové mezery 5 mm zvětšila téměř o sto procent. Naopak u experimentálního modelu se zvětší síly pouze o čtyřicet procent, tento jev mají nejspíše za následek velké rozptylové cesty magnetické indukce u experimentálního modelu.

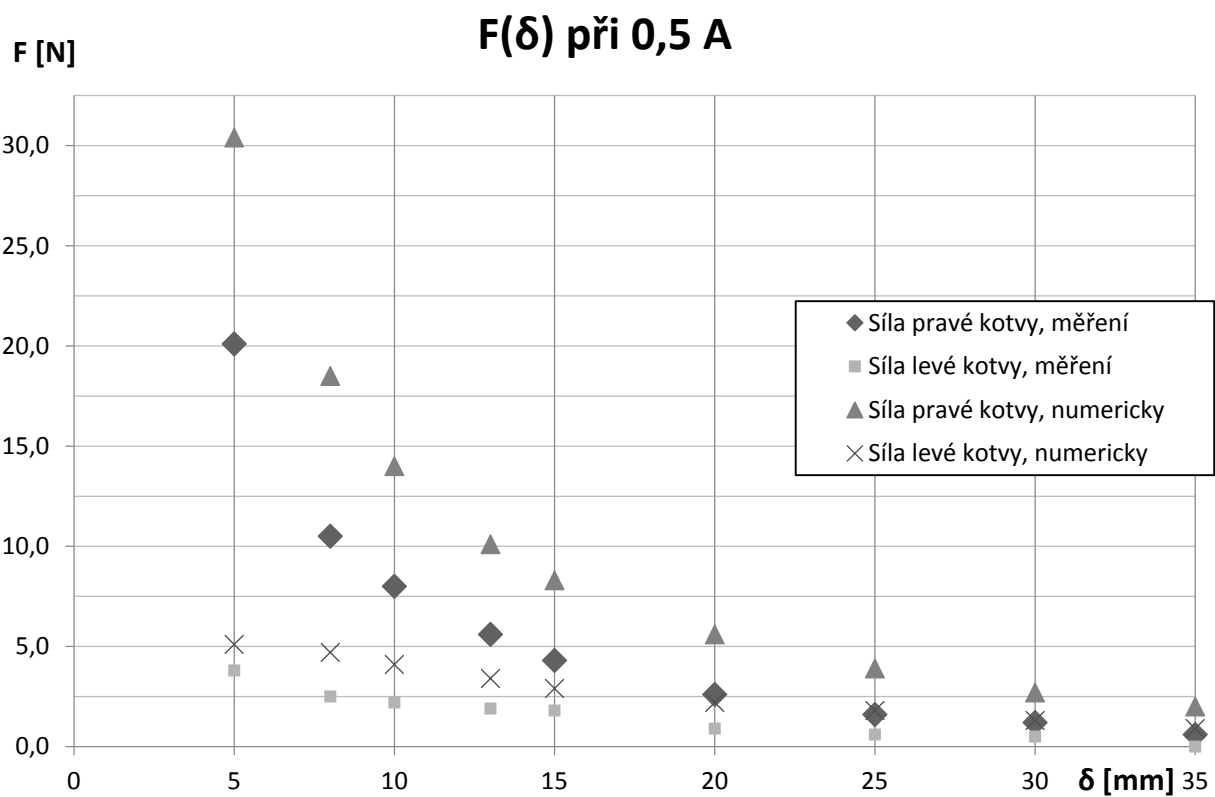


Graf 14 - Porovnání charakteristik závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, pouze pravá kotva, $I = 0 A$

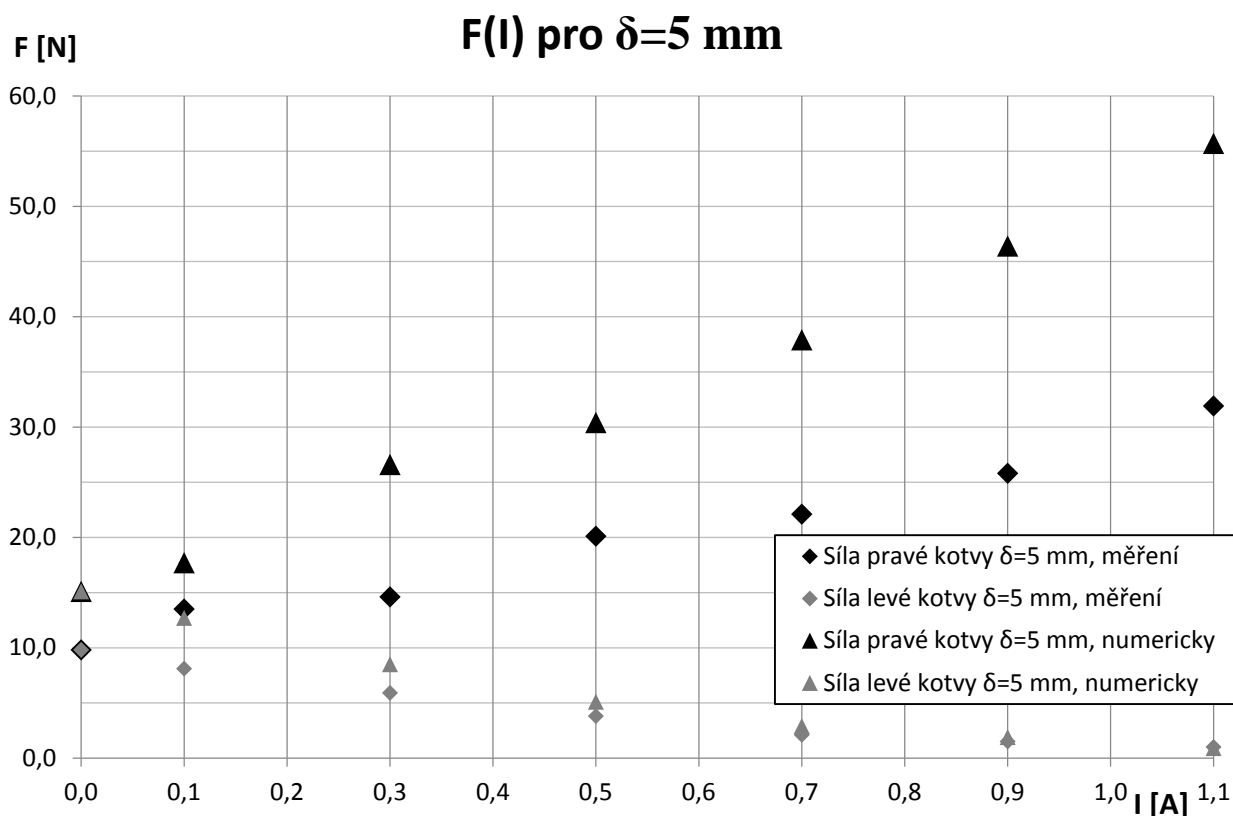
Graf 15 a Graf 16 zobrazují statické charakteristiky závislosti síly na vzduchové mezeře pro proudy 0,1 A a 0,5 A. Z těchto grafů je opět patrné, že síla působící na kotvu s rostoucí vzduchovou mezerou klesá. Na grafu je také patrný rozdíl ve velikosti hodnot síly pro numerický a experimentální model, klesající trend síly numerického a experimentálního ověření je opět shodný. V textu jsou uvedeny pouze tyto dvě charakteristiky, zbylé jsou uvedeny v Příloha 5.



Graf 15 - Porovnání charakteristik závislosti síly na velikosti vzduchové mezery, $I = 0,1$ A



Graf 17 zobrazuje závislost síly na proudu při konstantní vzduchové mezeře. Hodnotu velikosti vzduchové mezery jsem zvolil 5 mm, což je nejmenší možná hodnota. Na grafu je viditelný rozdíl mezi numerickým a experimentálním modelem, ale trend změny síly je pro zvolenou vzduchovou mezeru téměř totožný. Proto se mohou domnívat, že při nastavování velikosti vzduchové mezery jsem se nedopustil nepřesností.



Graf 17 - Porovnání závislosti síly na velikosti proudu při konstantní vzduchové mezeře 5 mm

11.2 Analýza měření pomocí pružin

Při analýze výsledků měření za použití síly pružin jsem se rozhodl porovnat postup ověření 2 viz kapitola 10.2, kde jsem při měření nastavil určitou vzduchovou mezeru a následně měřil proud, při kterém kotva odpadla. V Tab. 20 je zobrazeno porovnání těchto hodnot s hodnotami určenými numerickým modelem. Podle numerického modelu jsem předpokládal proud, při kterém působí síla na kotvu. Aby nastalo odpadnutí kotvy musela být síla pružiny větší než síla, která působí na tuto kotvu. Ve všech měřených případech nastal stav odpadnutí kotvy v předem určeném intervalu proudů, který odpovídá pravému sloupci Tab. 20. Pomocí tohoto měření jsem tedy ověřil předpokládanou funkci PPMT aktuátoru a lze prohlásit,

že rozsah hodnot z numerického modelu pro odpadnutí kotvy odpovídá naměřeným hodnotám proudů.

Tab. 20 - Porovnání proudů odpovídajících odpadnutí kotvy

Velikost vzduchové mezery	Síla pružiny	Proud měřený při odpadnutí	Numerický model	
			Síla působící na kotvu	Proud vyvolávající sílu na kotvu
δ_L	$F_{pružiny}$	I	F_P	I
mm	N	A	N	A
5	9,4	0,12	12,7	0,1
			8,5	0,3
5	8,6	0,20	12,7	0,1
			8,5	0,3
8	5,1	0,31	9,0	0,1
			6,6	0,3
			4,7	0,5

Při další analýze měření pomocí pružin jsem využil postup ověření 3 z kapitoly 10.2, kde jsem stanovoval proud potřebný pro přitažení kotvy při vzduchové mezeře 10 mm s různými silami pružin. Naměřené hodnoty tohoto postupu jsem porovnal s hodnotami numerického i experimentálního modelu viz Tab. 21.

Aby nastal stav, kdy aktuátor přitáhne kotvu, musí být síla, která působí na tuto kotvu, větší jak síla pružiny. Při porovnání síly mající překonat sílu pružiny podle numerického modelu neodpovídají hodnoty proudů skutečným naměřeným proudům. Naopak při porovnání měření na experimentálním modelu s hodnotami sil působícími na pravou kotvu, hodnoty proudu odpovídají. Díky této skutečnosti jsem potvrdil správnost měření.

Tab. 21 - Porovnání hodnot proudů při připnutí kotvy

Velikost vzduchové mezery pravá	Síla pružiny	Proud měřený při připnutí	Numerický model		Experimentální model	
			Síla působící na kotvu	Proud vyvolávající sílu na kotvu	Síla působící na kotvu	Proud vyvolávající sílu na kotvu
δ_P	$F_{pružiny}$	I	F_P	I	F_P	I
mm	N	A	N	A	N	A
10	7,0	0,27	8,3	0	8	0,5
10	8,6	0,41	9,3	0,1	9	0,7
10	9,4	0,77	11,5	0,3	11,2	0,9
10	13,5	1,23	13,5	0,5	13,3	1,1
10	19,2	1,59	19,6	0,9	-	-
10	19,4	1,65	19,6	0,9	-	-
10	19,8	1,67	22,8	1,1	-	-
10	22,8	2,16	22,8	1,1	-	-
10	25,1	2,32	-	-	-	-

12 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo nejprve simulovat chování modelu aktuátoru založeného na technologii paralelního uzavření magnetického toku, na jehož základě jsem následně vytvořil experimentální a dle dostupných prostředků optimální model PPMT aktuátoru. Na tomto modelu jsem následně ověřoval principy funkce celé technologie.

Před započítáním samotného návrhu bylo důležité důkladně prostudovat všechny teoretické principy technologie paralelního uzavření magnetického toku. Tyto získané informace, o které se opírají další části této práce, jsou uvedeny v teoretické části.

Využitím aplikace Agros2D jsem podle požadavků na rozměr magnetického obvodu optimalizoval návrh obvodu elektrického, kde jsem došel k závěrům, že optimální pro sestavení modelu je využití měděného drátu s průměrem 0,7 mm a počtem závitů na jednu cívku 800, přičemž v obvodu jsou dvě cívky umístěné antiparalelně. Sestavením příslušného numerického modelu v aplikaci Agros2D jsem mohl zobrazit předpokládané rozložení magnetického pole a dále určit maxwellovskou sílu působící na kotvy aktuátoru. Pomocí výstupů z numerického modelu jsem potvrdil, že při vzduchové mezeře 1 mm a při napájení cívek proudem v rozmezí 0,4 - 0,5 A dochází ke stavu, kdy na levou kotvu působí přitažná síla téměř nulová a na pravou kotvu působí síla čtyřnásobná, oproti původní síle působící na levou kotvu s nulovým proudem, kdy magnetické pole vyvolávaly pouze permanentní magnety.

Na základě optimalizace a numerického modelu jsem podle daného uspořádání vyrobil experimentální model PPMT aktuátoru. Pro tento model jsem zhotovil konstrukci pro měření, abych mohl ověřit principy funkce aktuátoru. Následně jsem zvolil dva druhy měření.

Nejprve jsem měřil statickou charakteristiku závislosti síly na vzduchové mezeře pro různé hodnoty proudu. Při porovnání jednotlivých stavů numerického a experimentálního modelu si číselně hodnoty neodpovídají, naměřené hodnoty jsou nižší, což je nejspíše způsobeno tím, že u numerického modelu je řešení při ideálních podmínkách. Nicméně trend a chování obou modelů si odpovídají.

Při dalším měření jsem ověřoval teoretickou funkčnost aktuátoru. Pomocí pružin známých vlastností jsem ověřoval dvě tvrzení. Nejdříve zda při průchodu proudu cívkami, a tím způsobeným posilováním síly působící na jednu kotvu, opravdu síla na druhou kotvu klesá. A následně při poklesu síly pod sílu pružiny kotva odpadne, jak by se dělo ve skutečném aktuátoru podle teoretických předpokladů. Tímto měřením jsem prokázal správnost tohoto předpokladu. Další tvrzení, které jsem ověřil, vycházelo z předpokladu, že pokud je kotva

odtažená, to znamená, že mezi jádrem a kotvou je vzduchová mezera, pak při správné orientaci průchodu proudu cívkami dojde k posílení síly působící na tuto kotvu, která tím překoná sílu pružiny kotva je následně přitažena a to představuje sepnutí skutečného aktuátoru.

Bohužel jsem experimentálním modelem nemohl ověřit, zda dokáže vyvinout čtyřnásobnou sílu působící na jednu kotvu oproti nulové síle působící na kotvu druhou, z důvodu měření již ve velké vzduchové mezeře. Jak díky konstrukci měřícího přípravku, tak z důvodu rozsahu siloměru jsem nebyl schopen proměřit síly, které vznikají při vzduchové mezeře 1 mm.

I přesto lze sestavení experimentálního modelu aktuátoru považovat za úspěšné, neboť je plně funkční a představuje nesporné výhody PPMT technologie. Pro další možnou ukázkou funkce PPMT technologie by bylo třeba vytvořit vhodný impulzní zdroj proudu, díky němuž by bylo možné dále zkoumat chování aktuátoru.

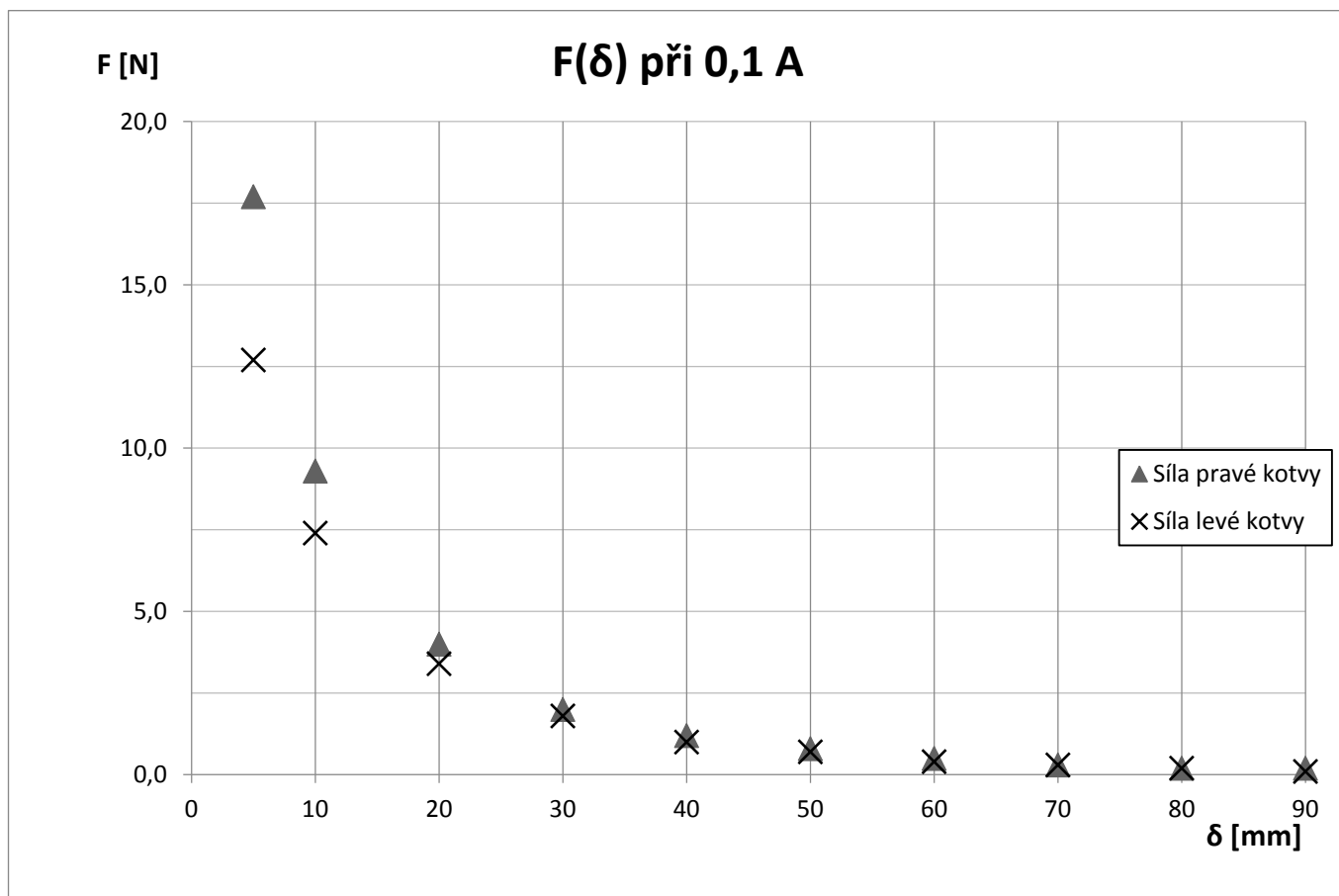
13 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

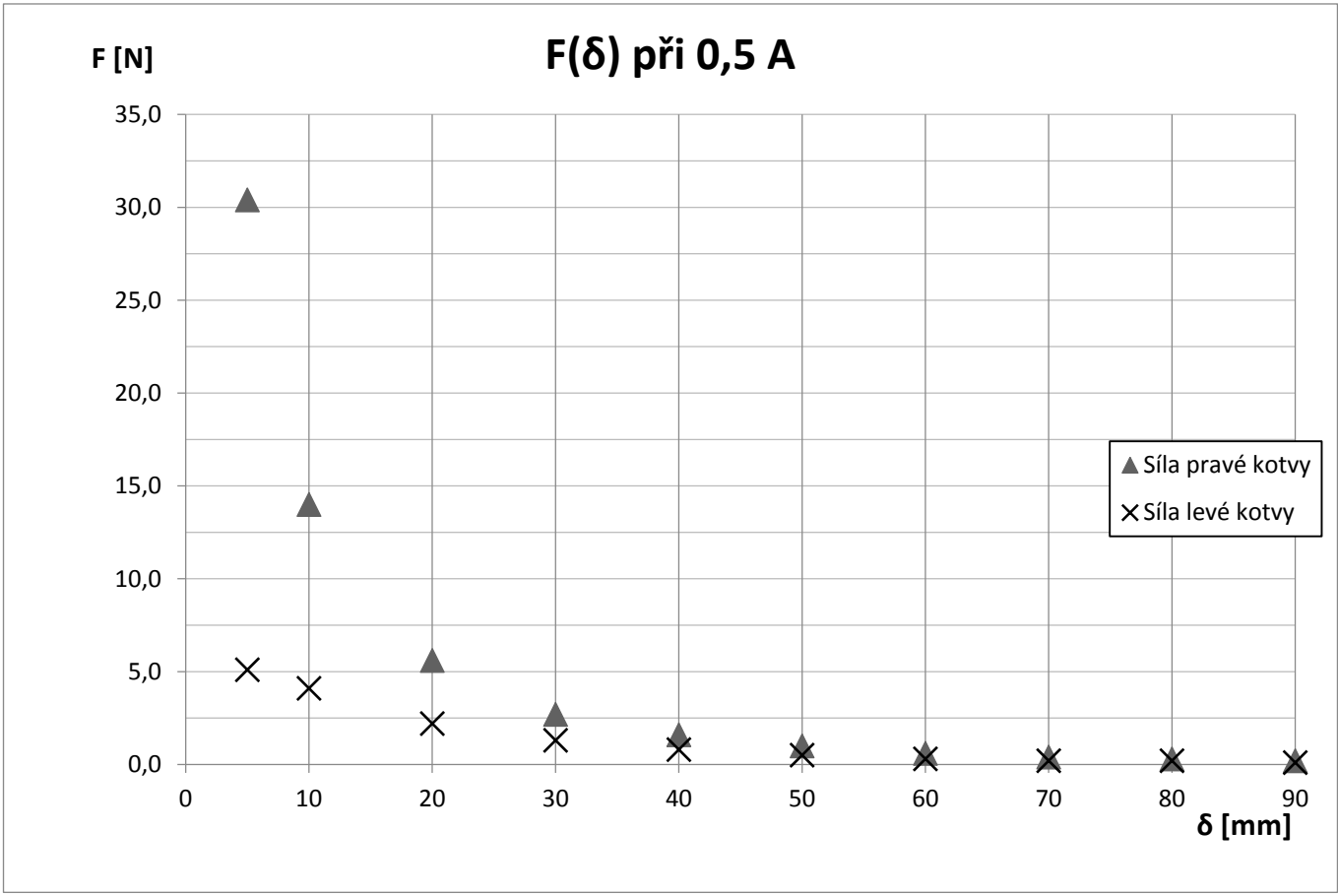
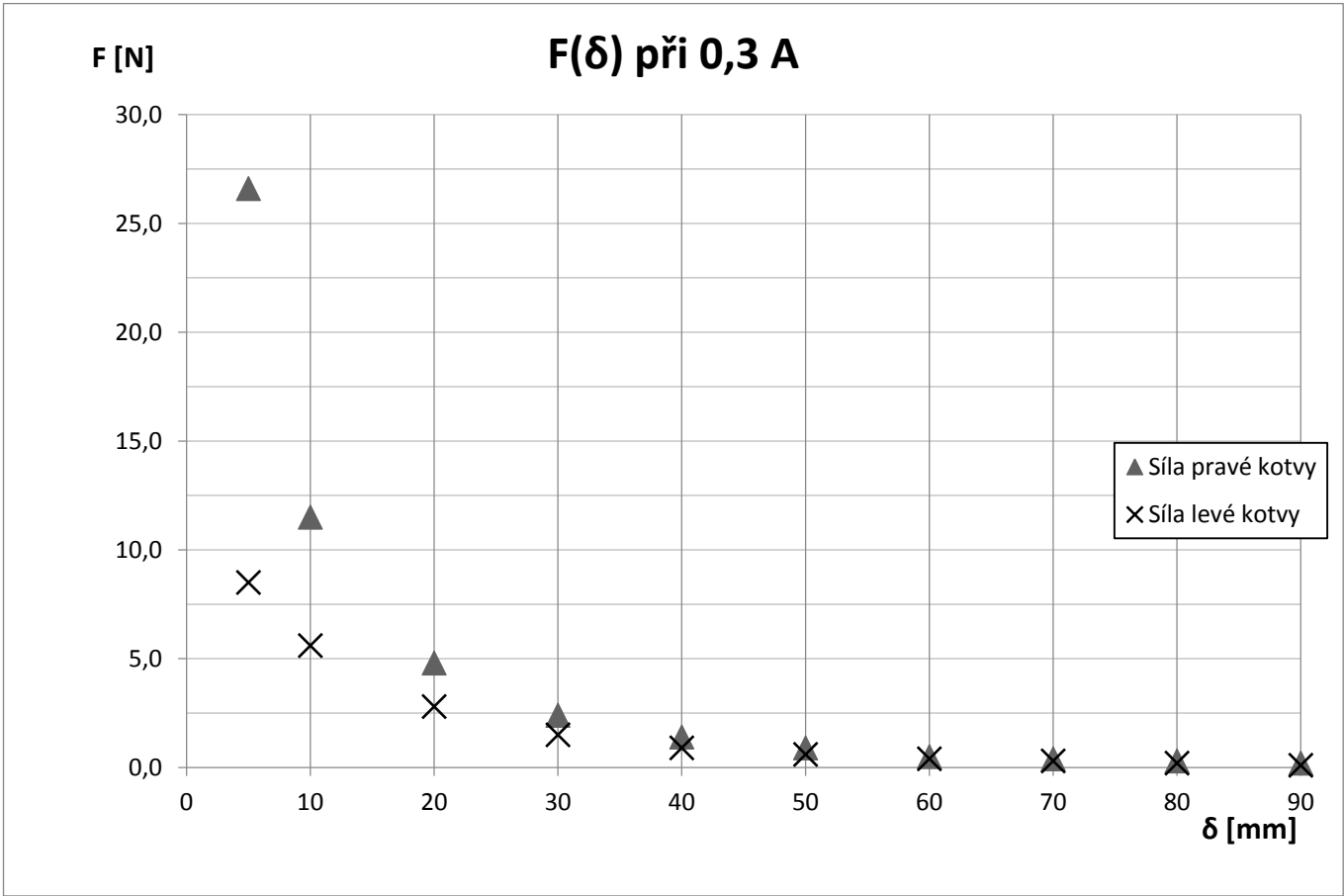
- [1]. **MAYER, Daniel, ULRYCH, Bohuš.** *Elektromagnetické aktuátory*. vyd. 1. Praha : BEN, 2008. str. 124. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [2]. **FLYNN, Charles, J.** *Methods for controlling the path of magnetic flux from a permanent magnet and devices incorporating the same*. US6246561 B1 USA, 12. 6 2001. Grant.
- [3]. Flynn Research Inc. *FRI Defining the Motors and Generators of Tomorrow*. [Online] [Citace: 20. 01 2014.]
<http://www.flynnresearch.net/technology/PPMT%20Technology.htm>.
- [4]. *Static and dynamic characteristics of PPMT electromagnet*. **MUSÁLEK, Lubomír, DOUBEK, Jiří, KYNCL, Jan.** Praha : CVUT, 2013. SPETO 2013.
- [5]. **MAYER, Daniel.** *Teorie elektromagnetického pole*. vyd. 3. Plzeň : Západočeská univerzita v Plzni, 2001. str. 355. ISBN 80-7082-826-9.
- [6]. **KOLÁŘ, Vladimír, NĚMEC, Ivan.** *FEM Principy a praxe metody konečných prvků*. vyd. 3. Praha : Computer Press, 1997. ISBN 80-7226-021-9.
- [7]. **DOLEŽEL, Ivo.** *Numerické metody řešení okrajových úloh*. [Učební text]. Plzeň : Doležel, 2002.
- [8]. *Numerical solution of coupled problems using code Agros2D*. **KARBAN, Pavel, MACH, František, KŮS, Pavel, DOLEŽEL, Ivo.** místo neznámé : Springer Vienna, 1. květen 2013, Computing, stránky 381 - 408. DOI 10.1007/s00607-013-0294-4.
- [9]. **KARBAN, Pavel, MACH, František, KŮS, Pavel, DOLEŽEL, Ivo.** hp-FEM. *HERMES2D*. [Online] [Citace: 15. únor 2014.] <http://www.hpfem.org/hermes/>.
- [10]. **DOLEŽEL, Ivo.** *Spojité modely elektromagnetických polí*. [Učební text]. Plzeň : Doležel, 2009.
- [11]. **KARBAN, Pavel, MACH, František, KŮS, Pavel, DOLEŽEL, Ivo.** AGROS2D. [Online] [Citace: 10. leden 2014.] <http://www.agros2d.org/>.
- [12]. **KARBAN, Pavel.** ABCLinuxu. [Online] 31. březen 2010. [Citace: 18. únor 2014.] <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>.
- [13]. **THERMA.** Therma FM. www.thermafz.cz. [Online] [Citace: 15. 02 2014.]
<http://www.thermafz.cz/>.
- [14]. **NEOMAG.** www.neomag.cz. [Online] [Citace: 16. 03 2014.]
<http://www.neomag.cz/cz/katalog/neodymove-magnety/hranoly/nh143-3611/>.

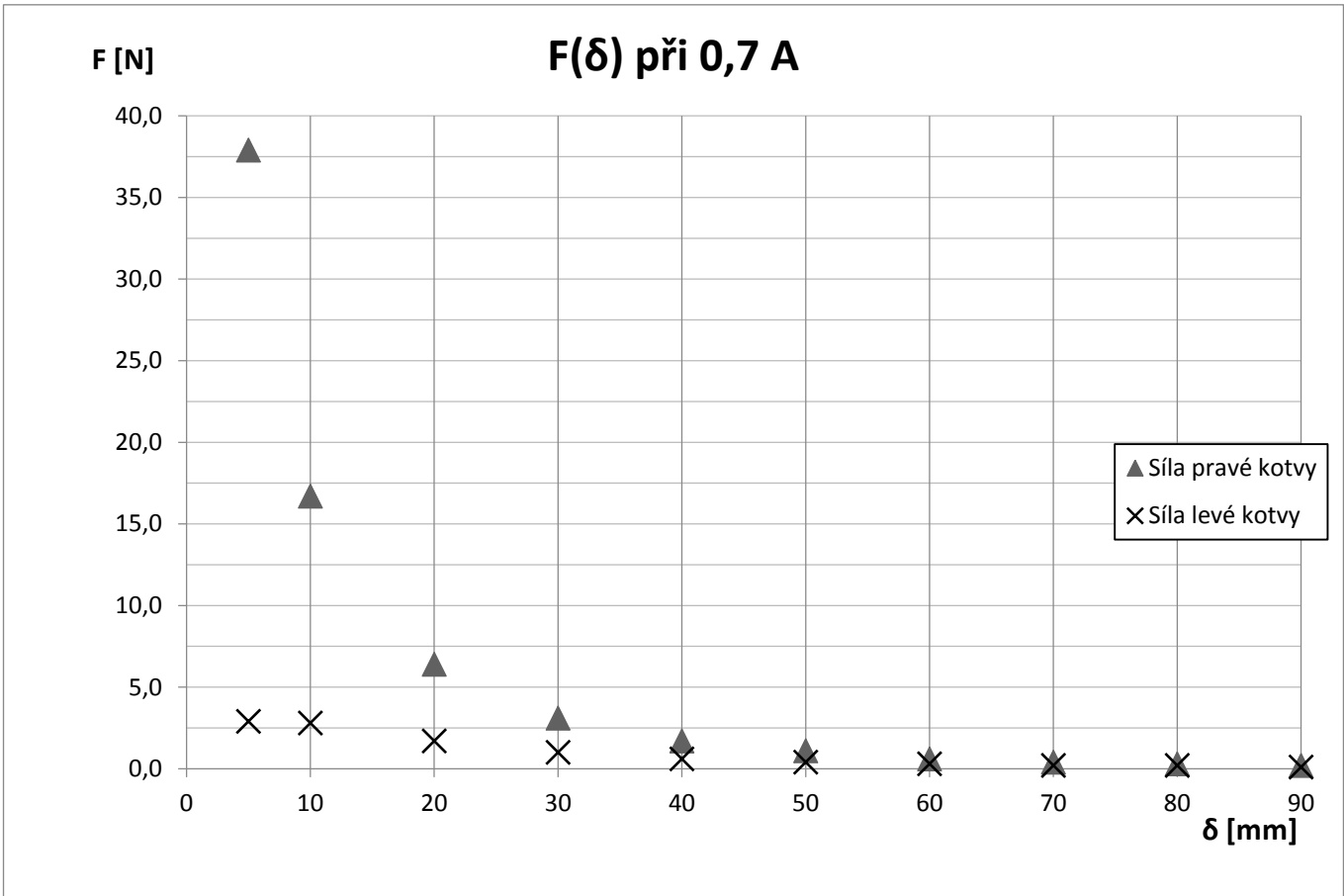
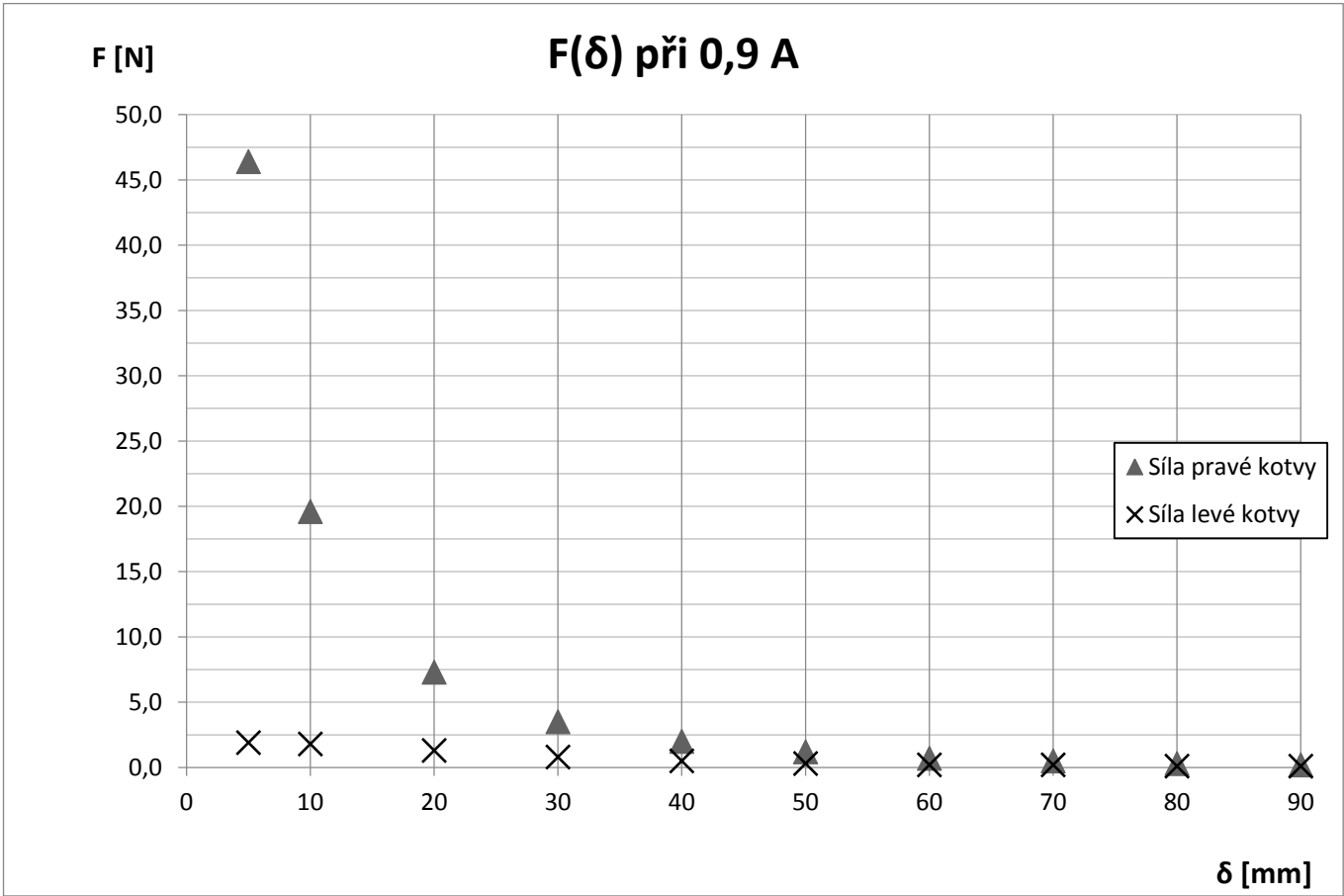
14 PŘÍLOHY

Příloha 1 - Modelované charakteristiky závislosti síly na velikosti vzduchové mezery	I
Příloha 2 - Výstupy Agros2D	IV
Příloha 3 - Technická dokumentace.....	VIII
Příloha 4 - Měřené statické charakteristiky	IX
Příloha 5 - Porovnání modelovaných a měřených statických charakteristik	XIII

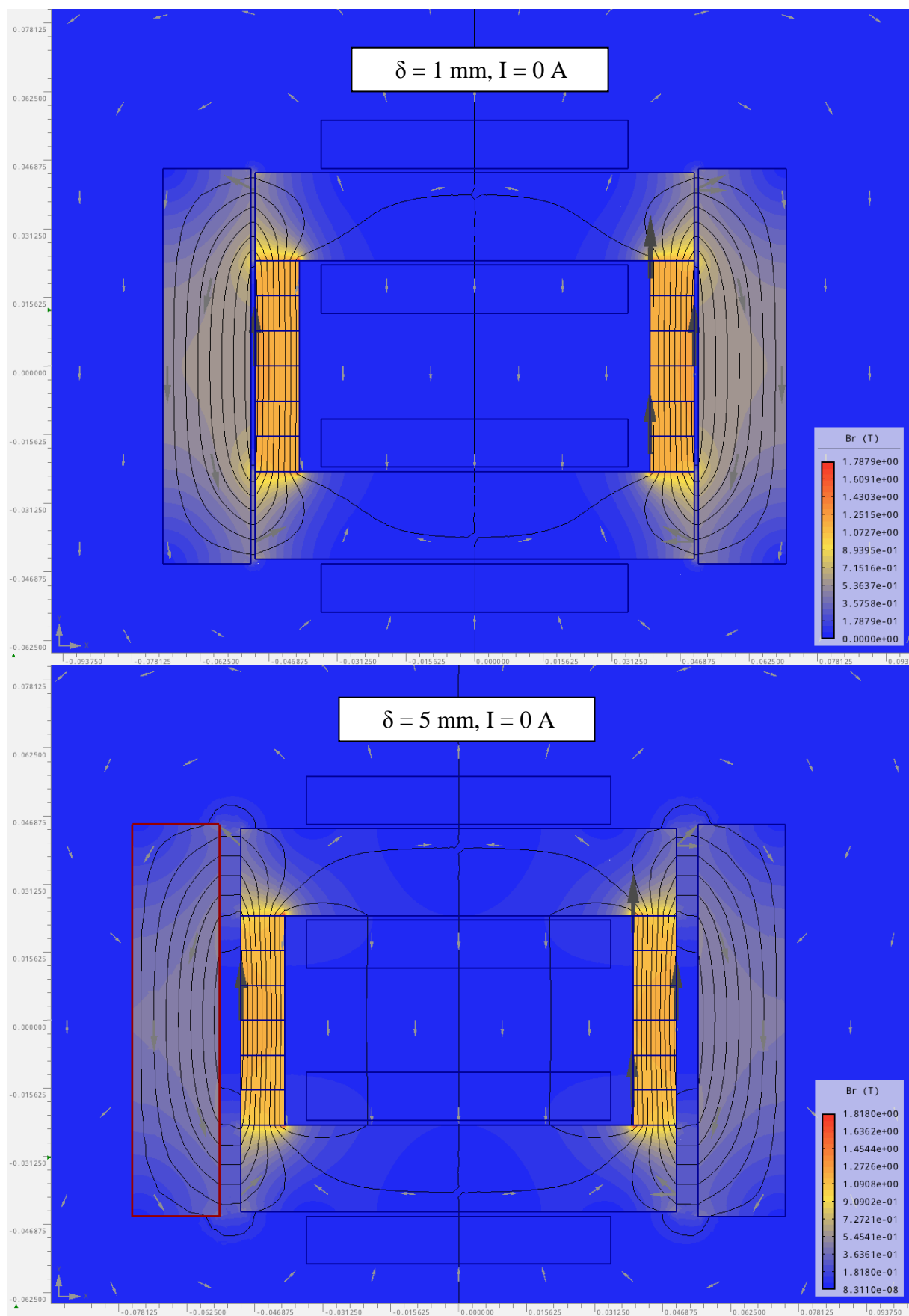
Příloha 1 - Modelované charakteristiky závislosti síly na velikosti vzduchové mezery

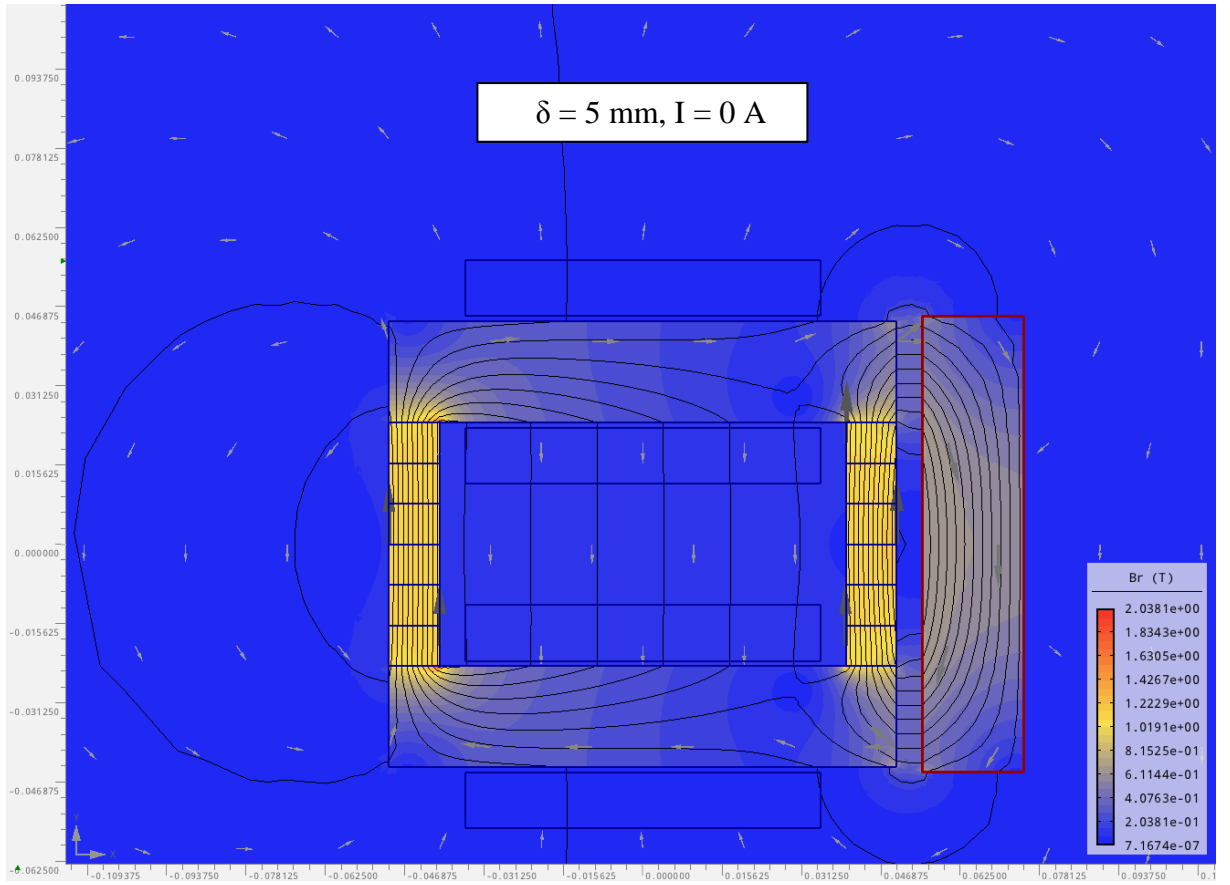
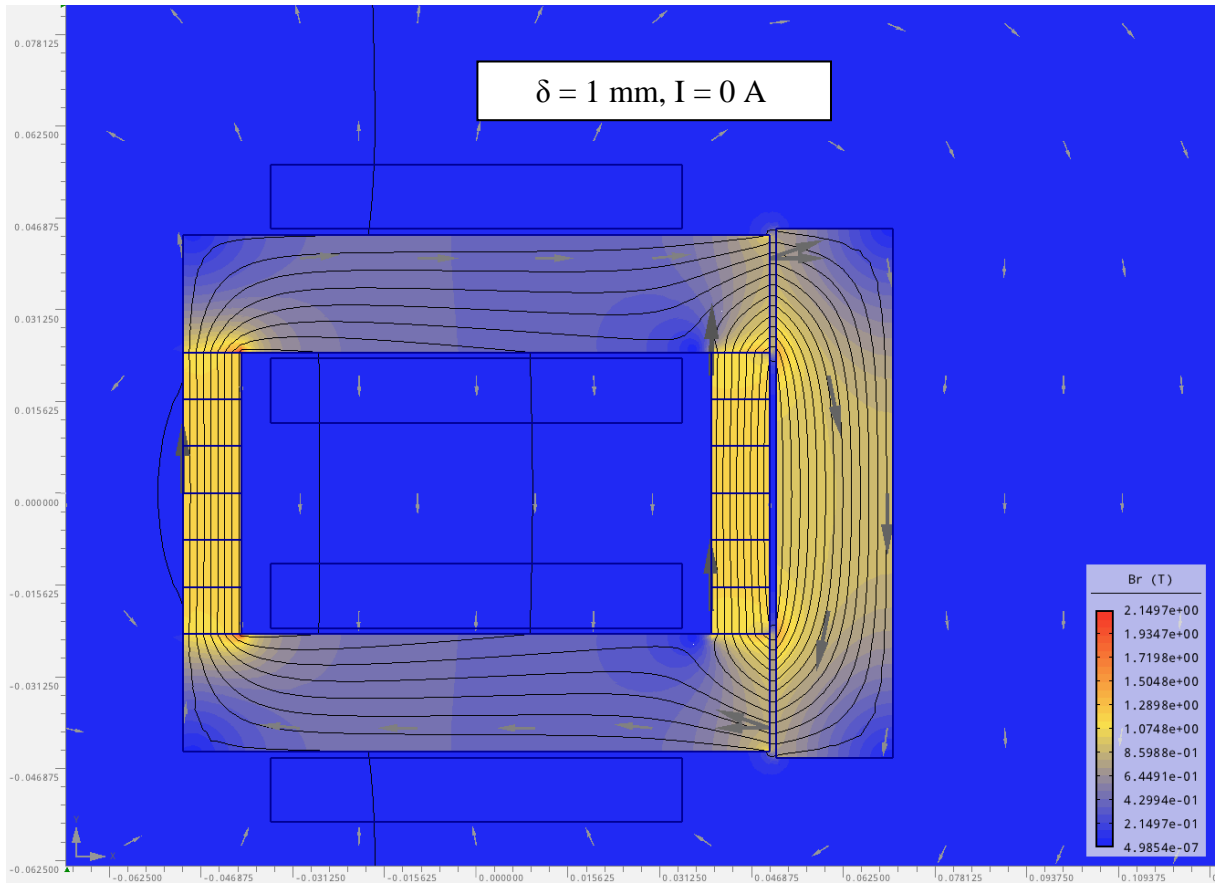


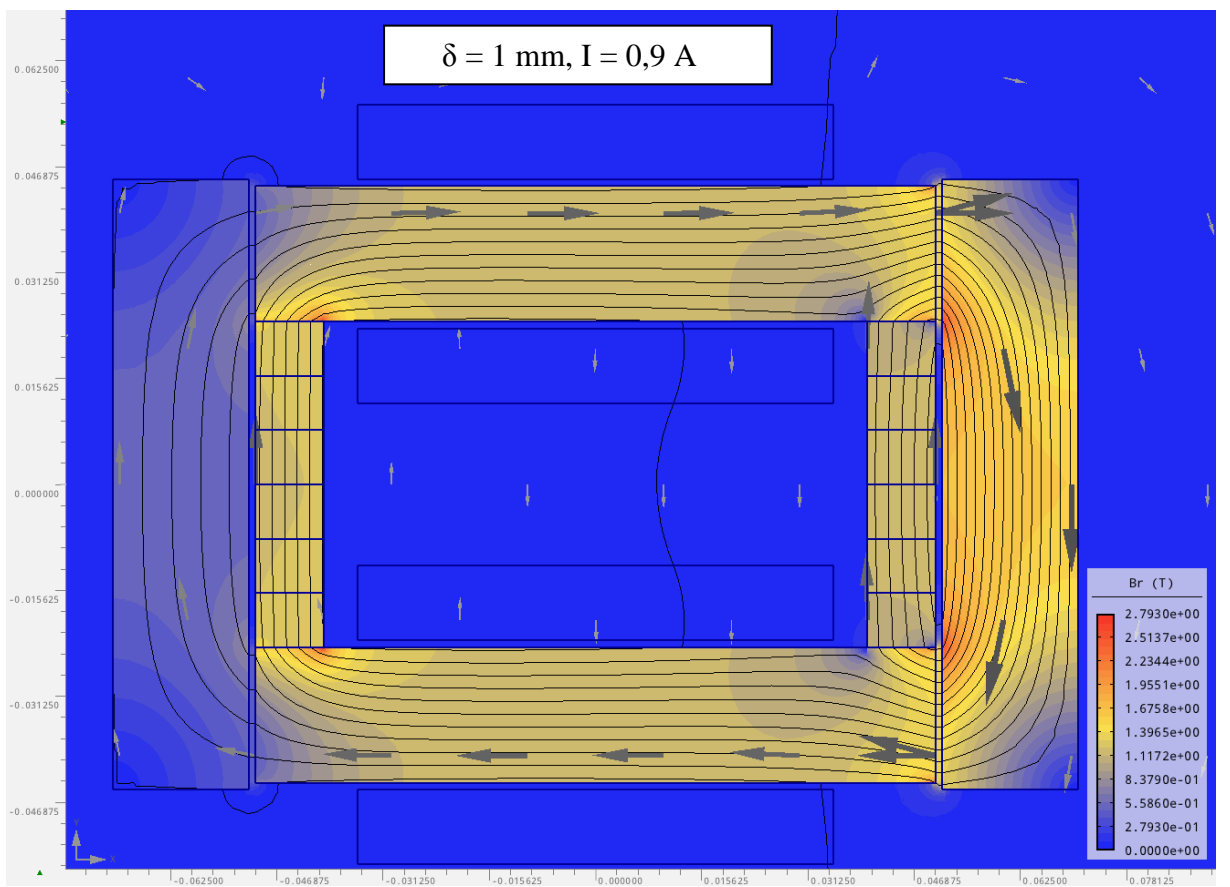
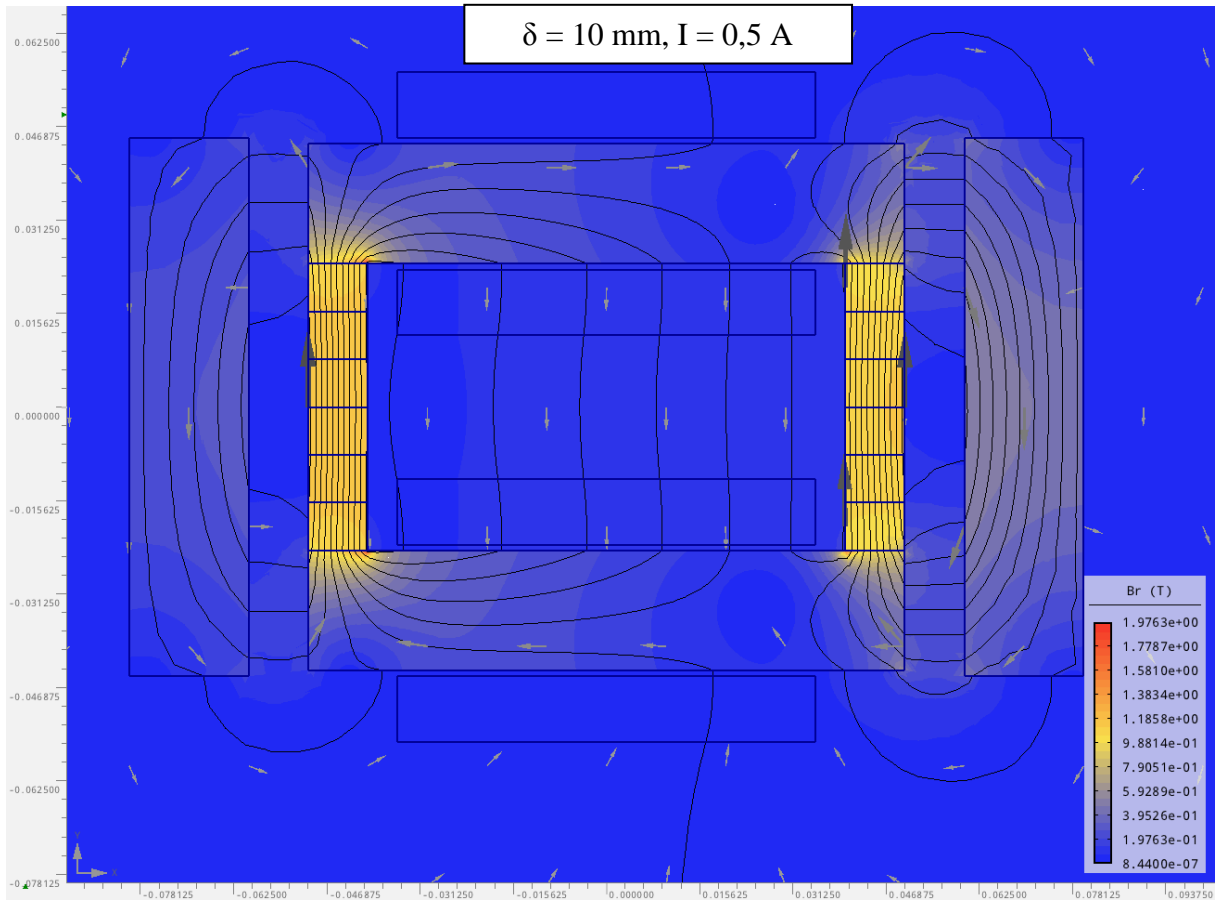


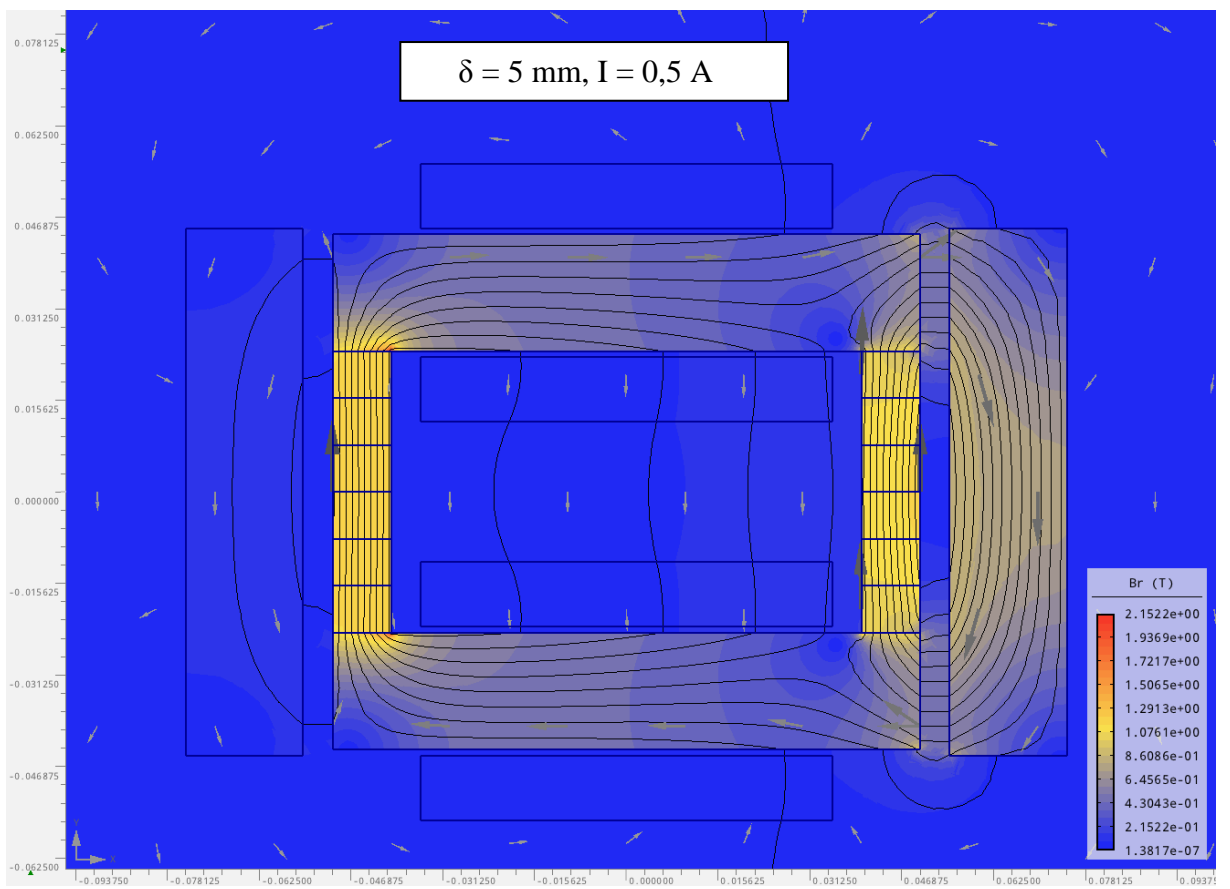
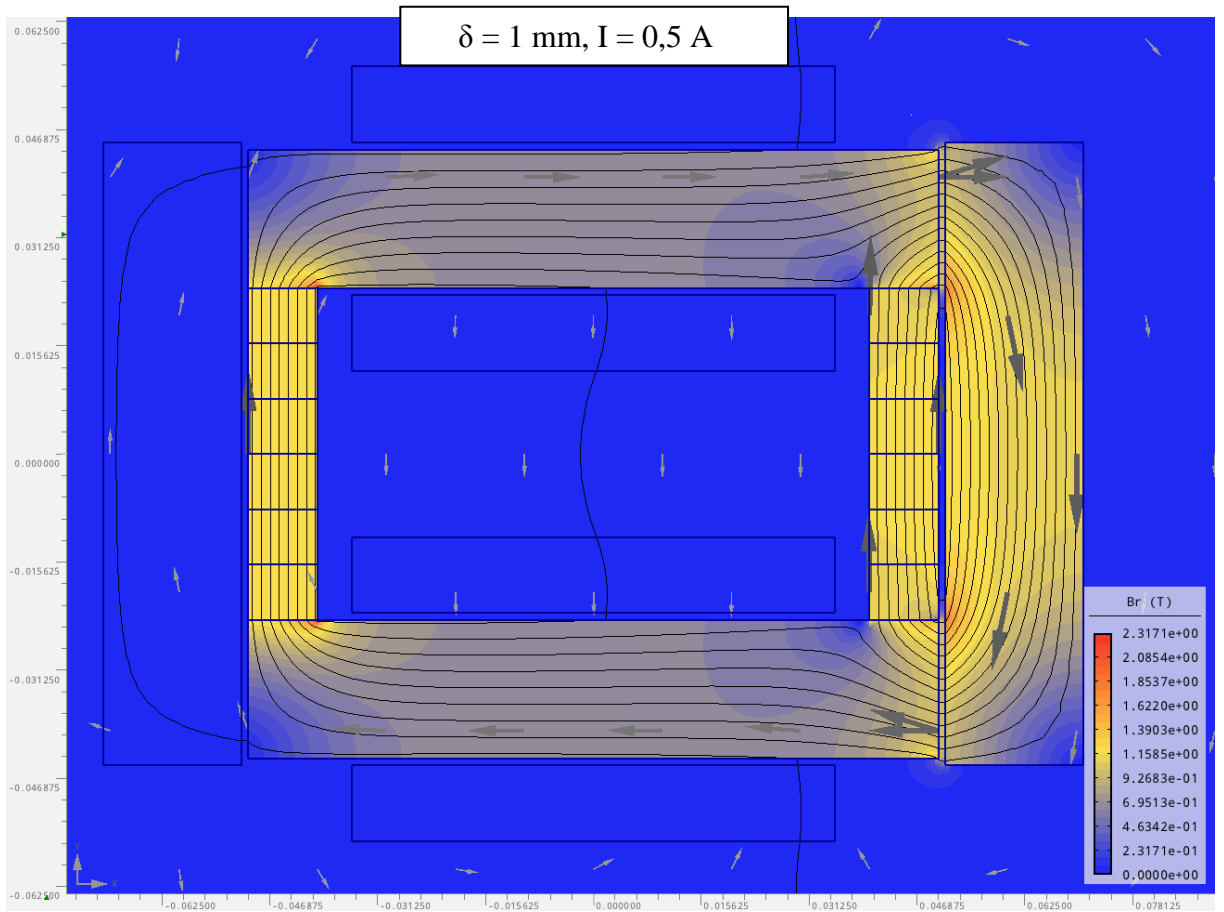


Příloha 2 - Výstupy Agros2D

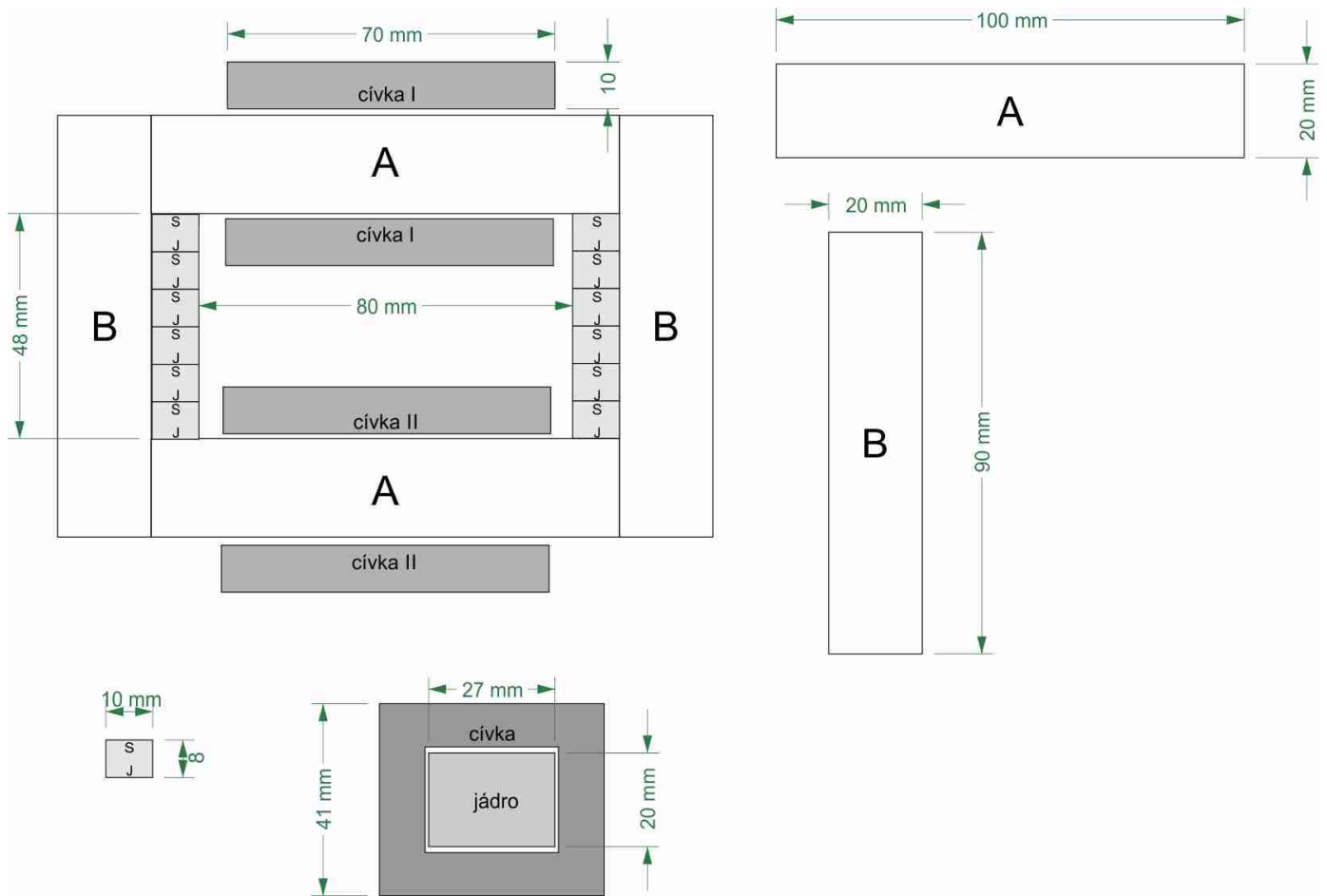




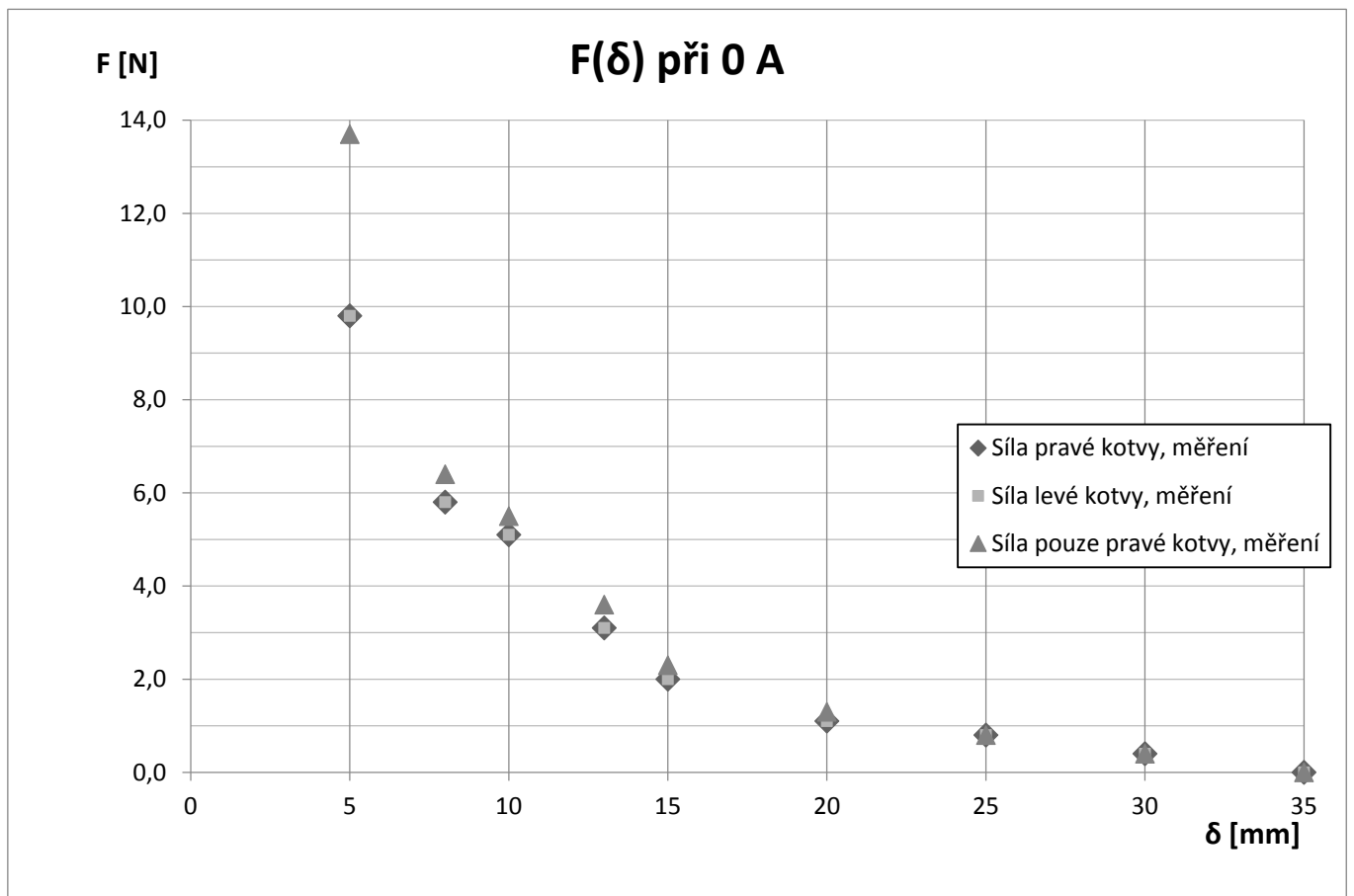


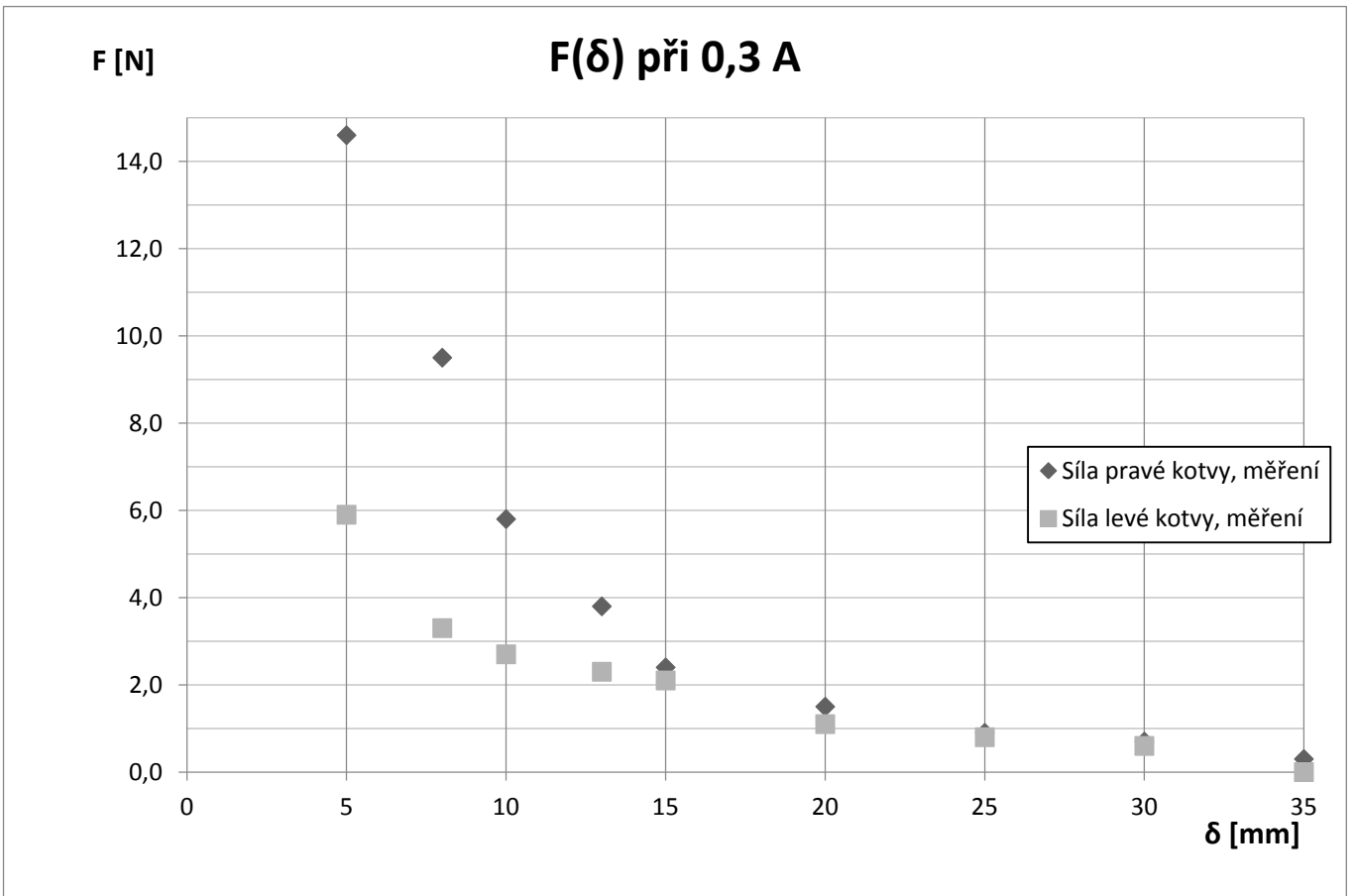
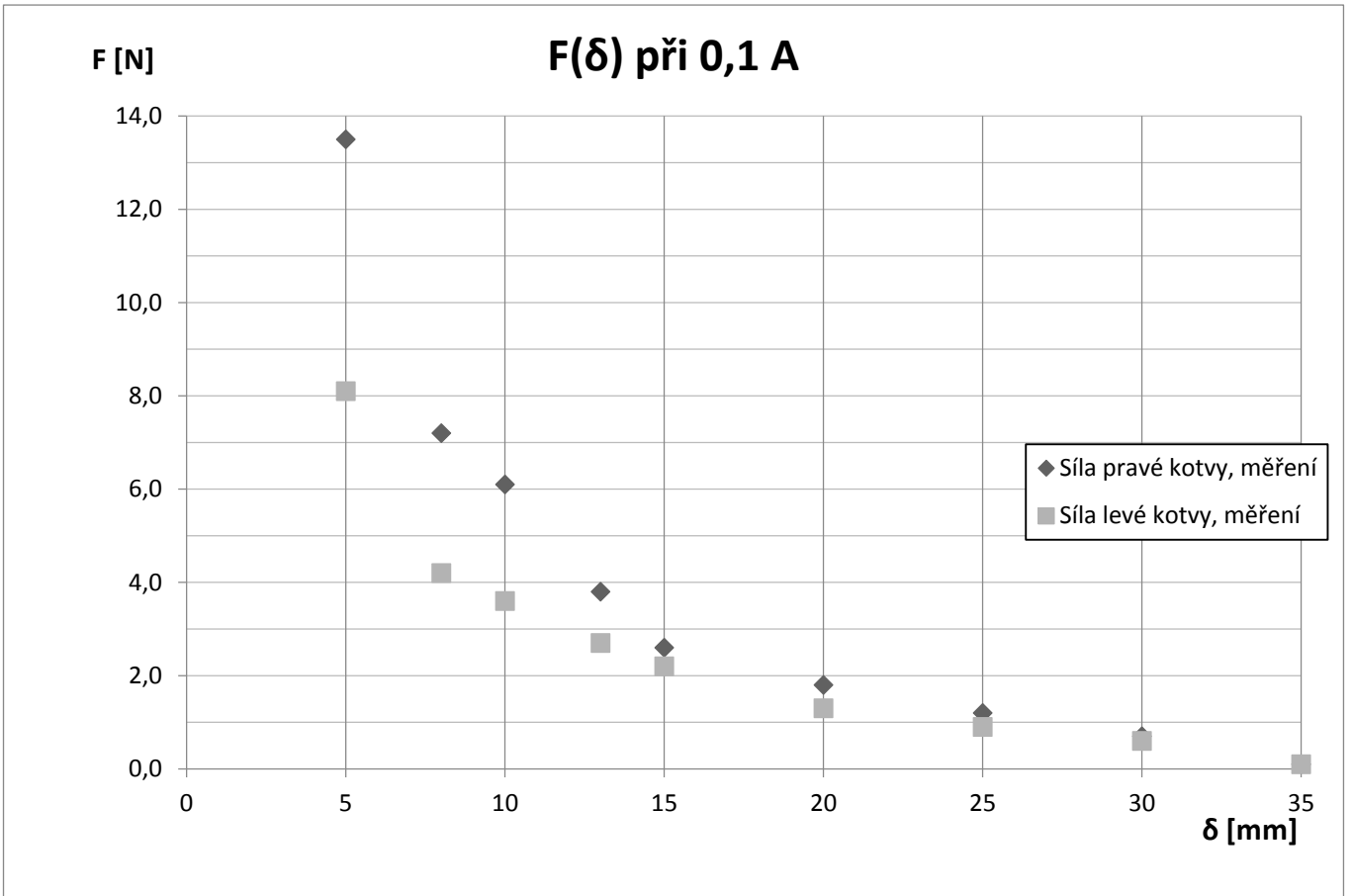


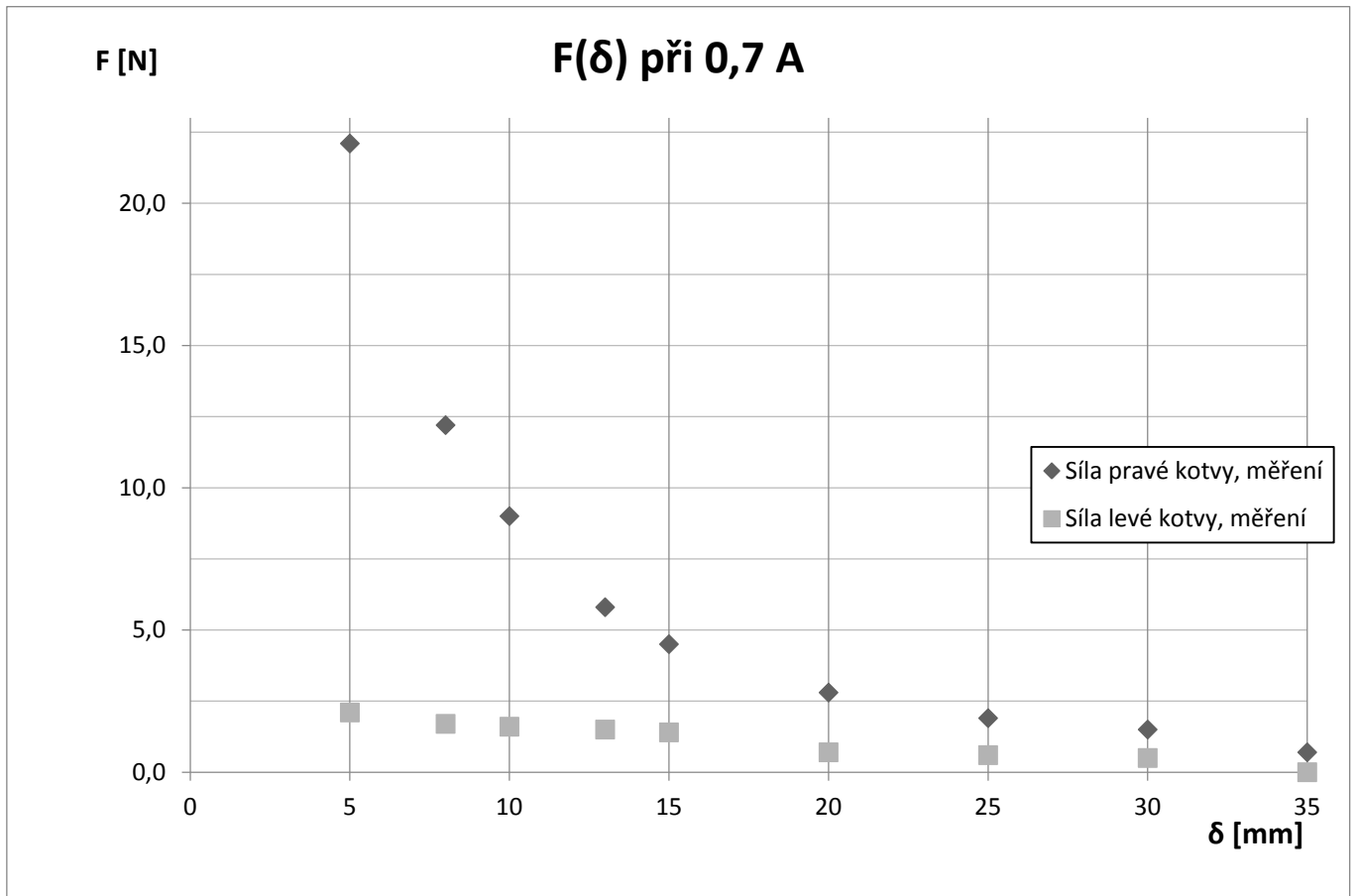
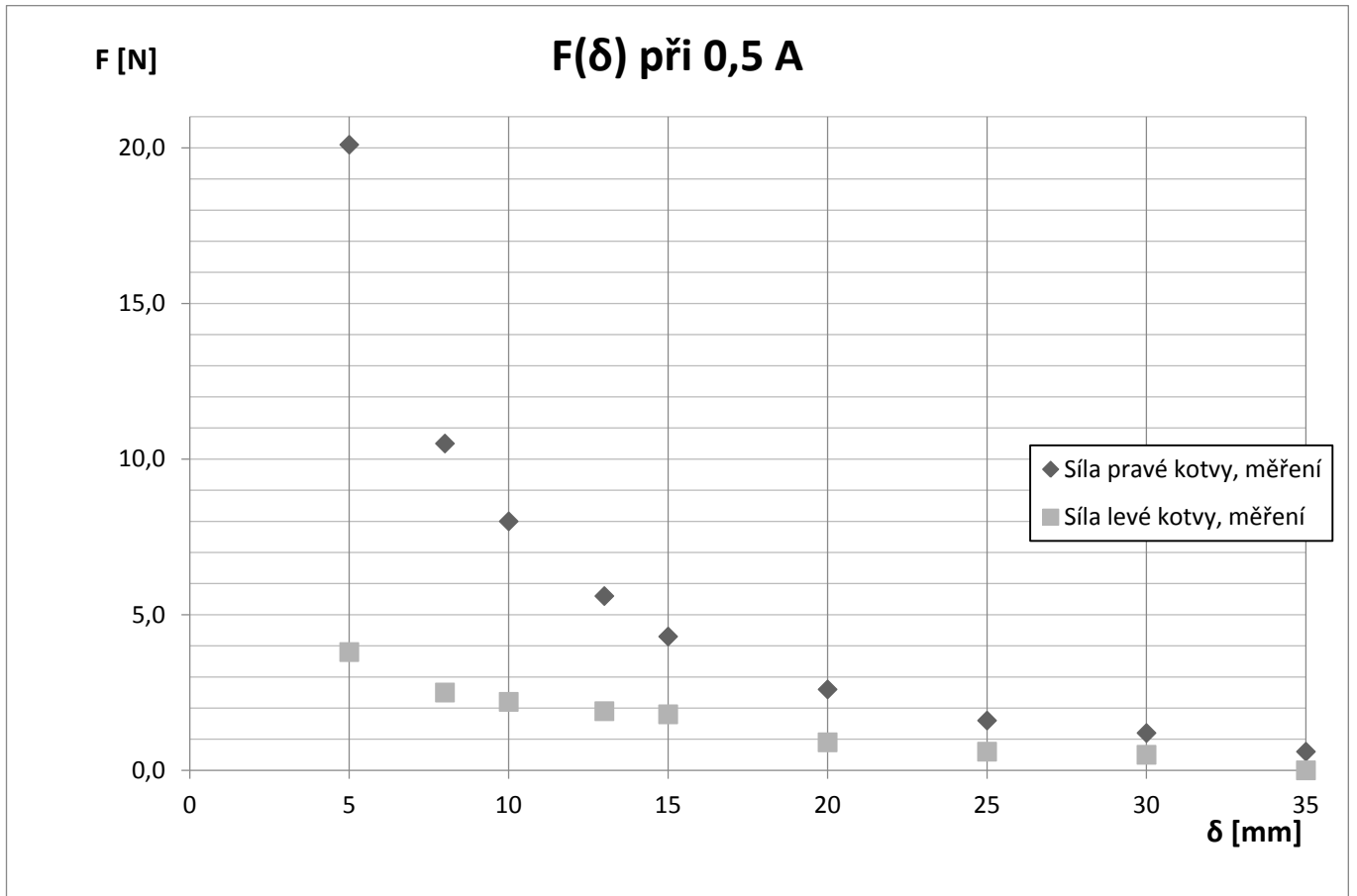
Příloha 3 - Technická dokumentace

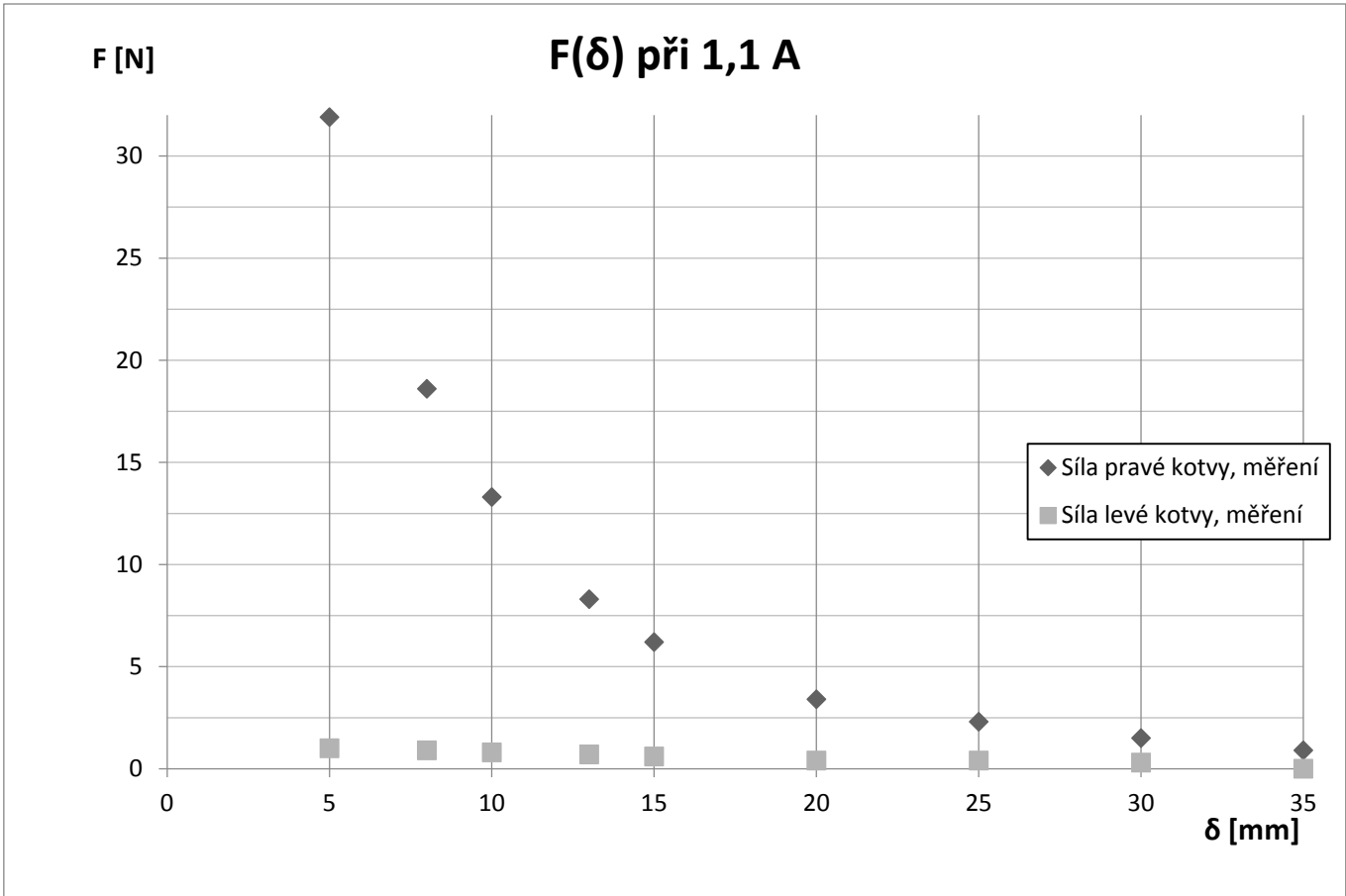
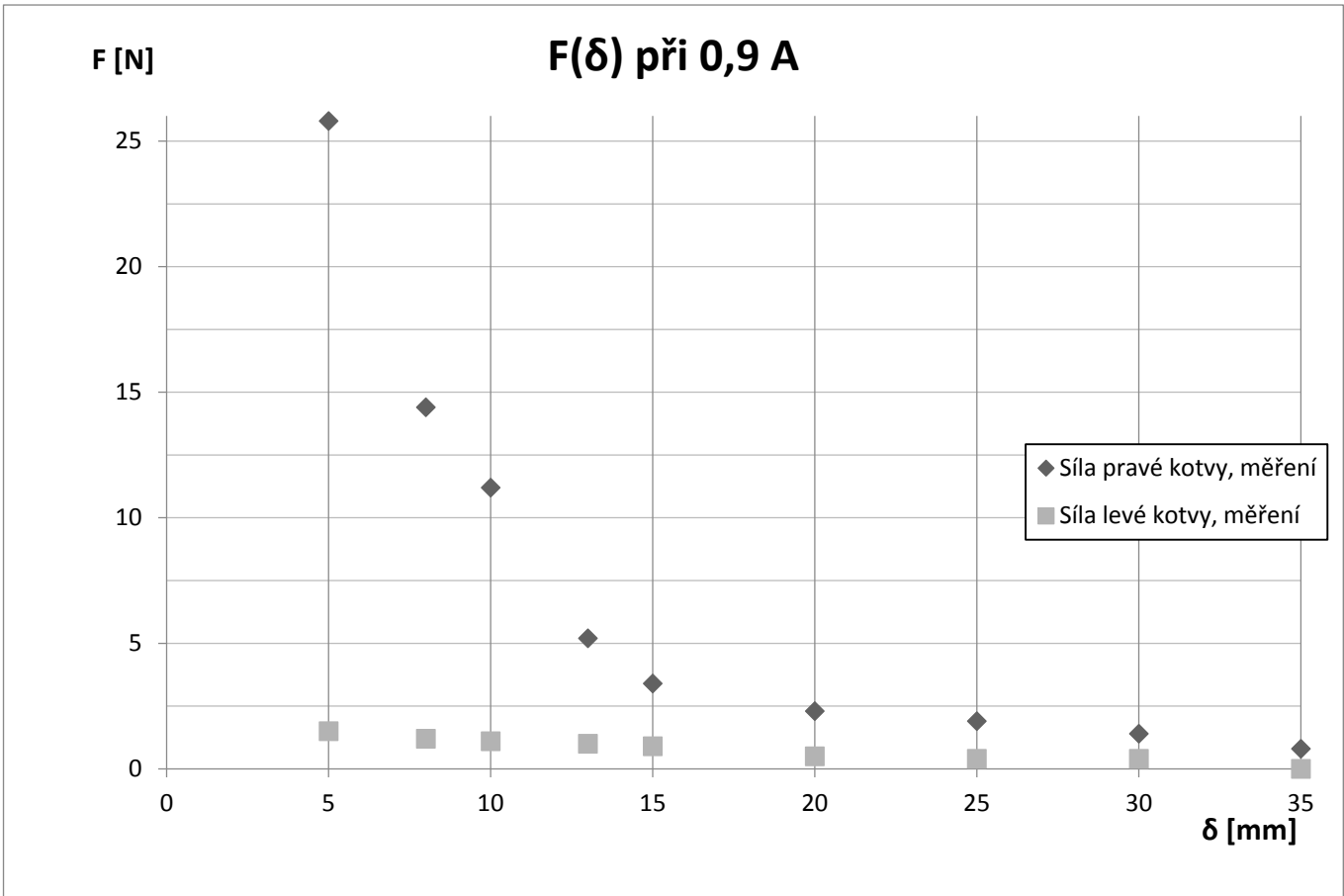


Příloha 4 - Měřené statické charakteristiky

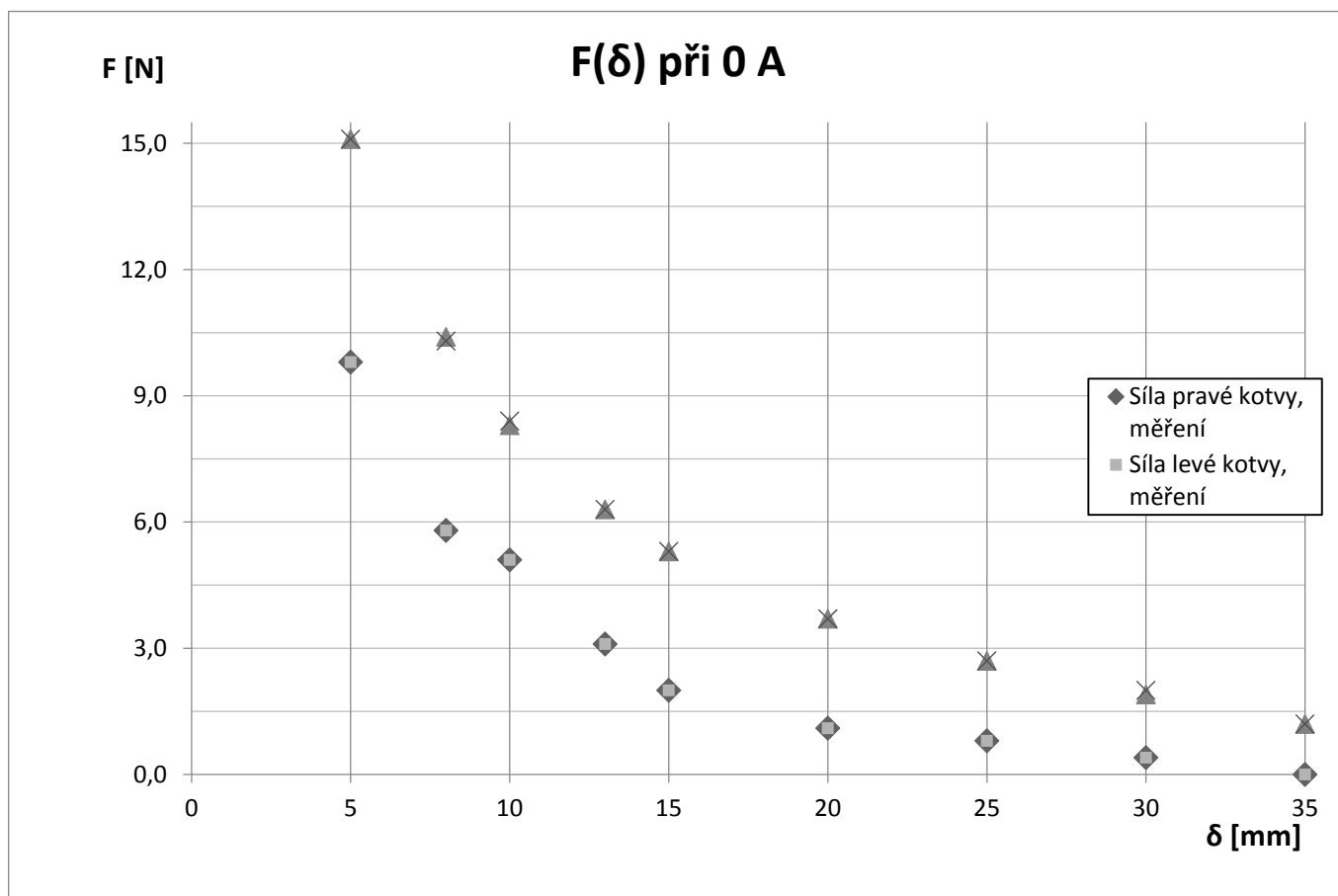




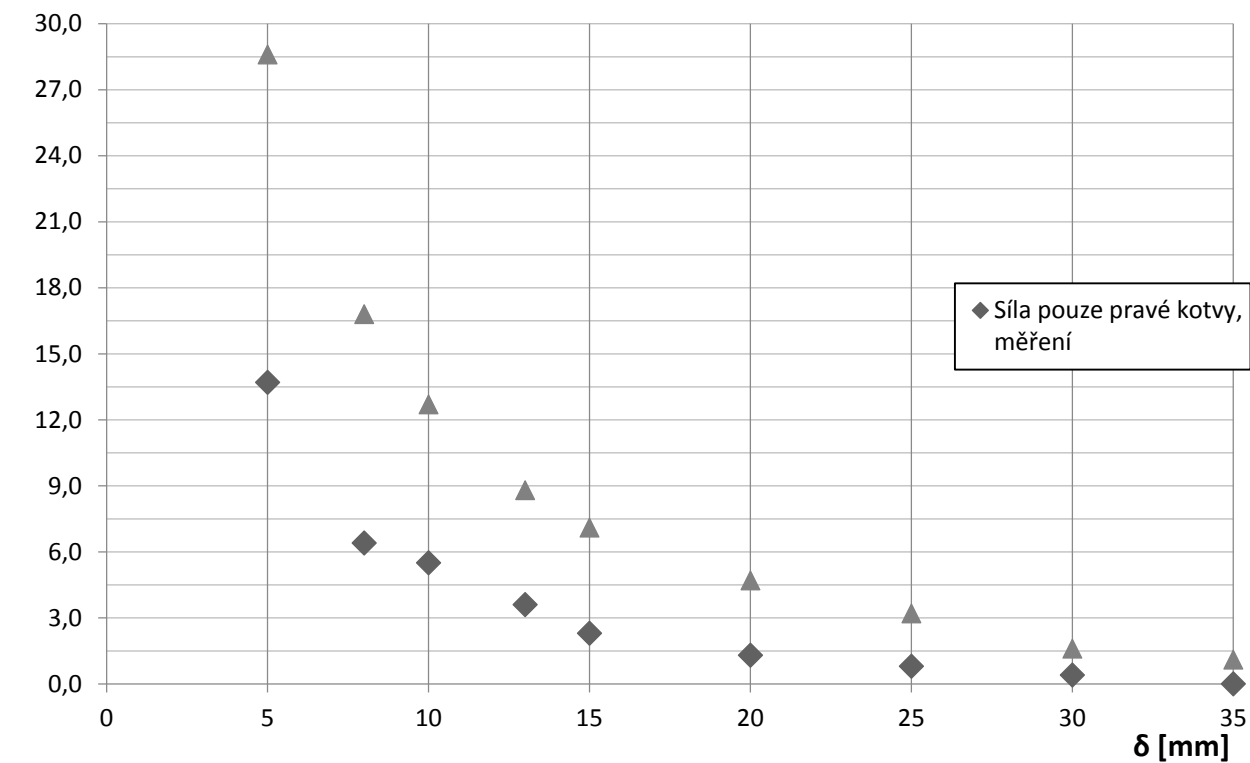




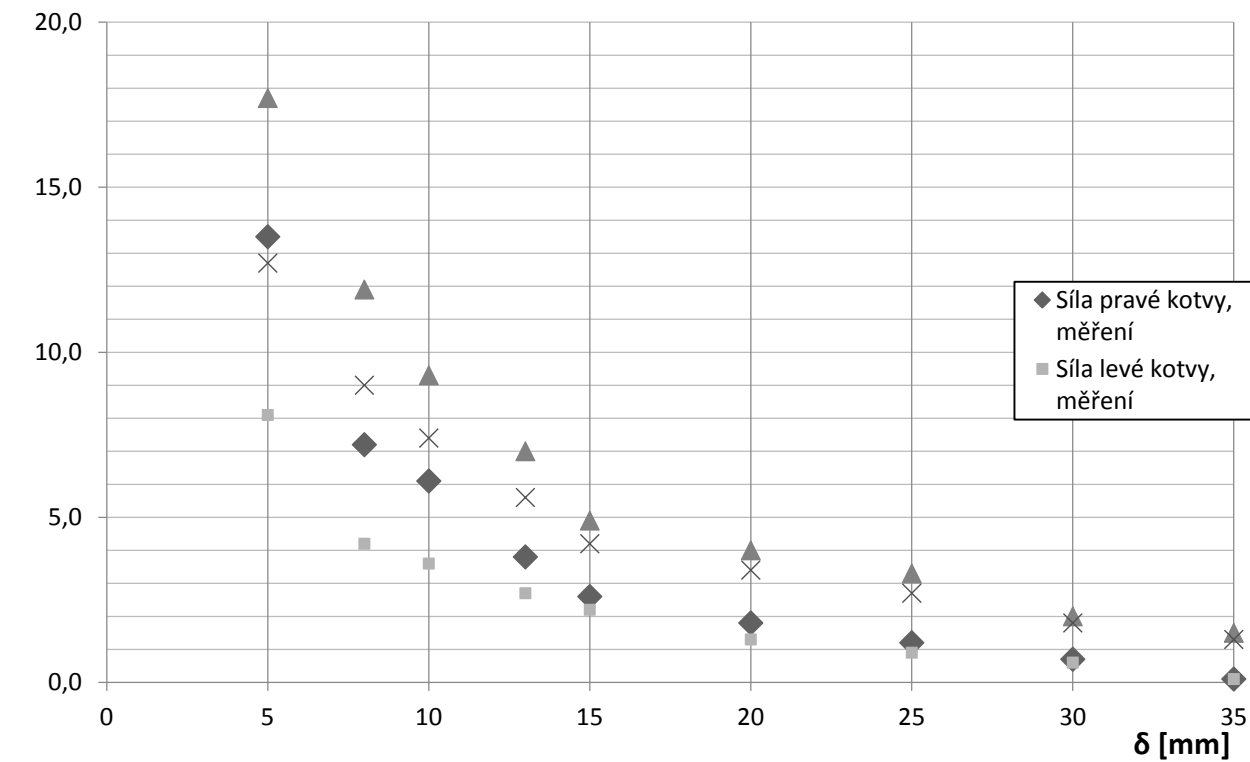
Příloha 5 - Porovnání modelovaných a měřených statických charakteristik



F(δ) pouze pravá kotva při 0 A

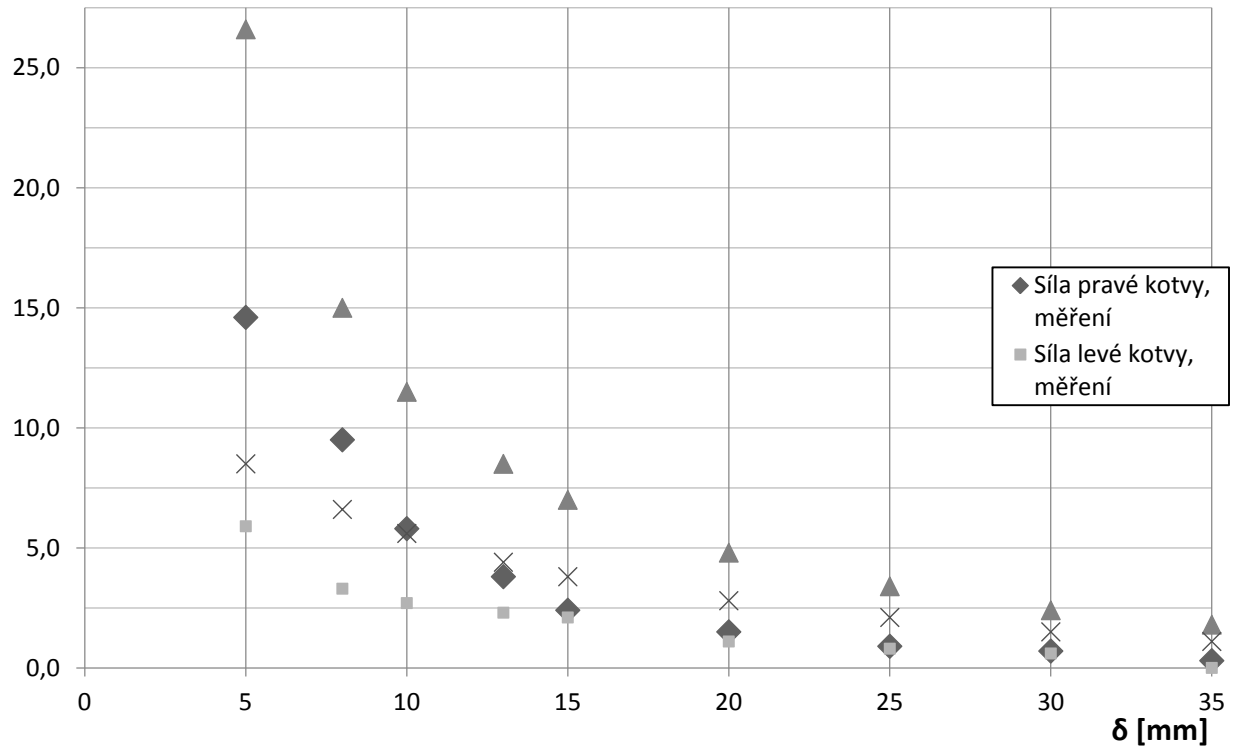


F(δ) při 0,1 A



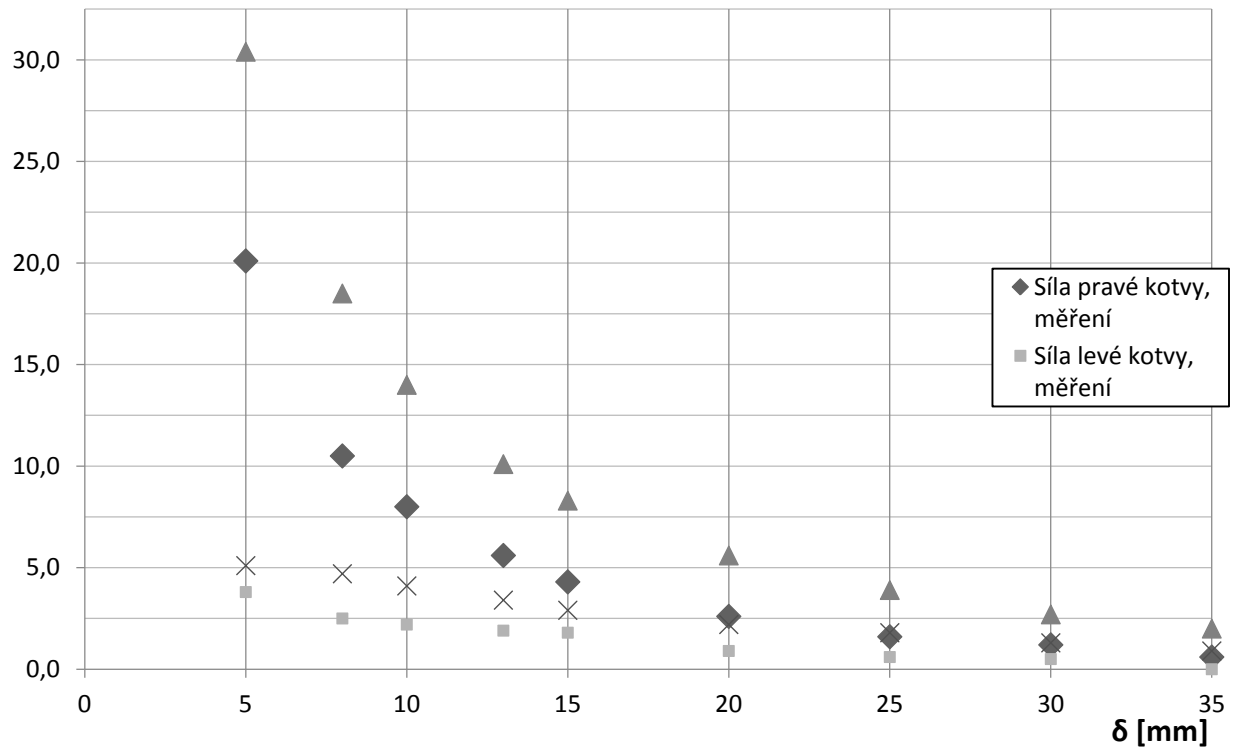
F [N]

F(δ) při 0,3 A



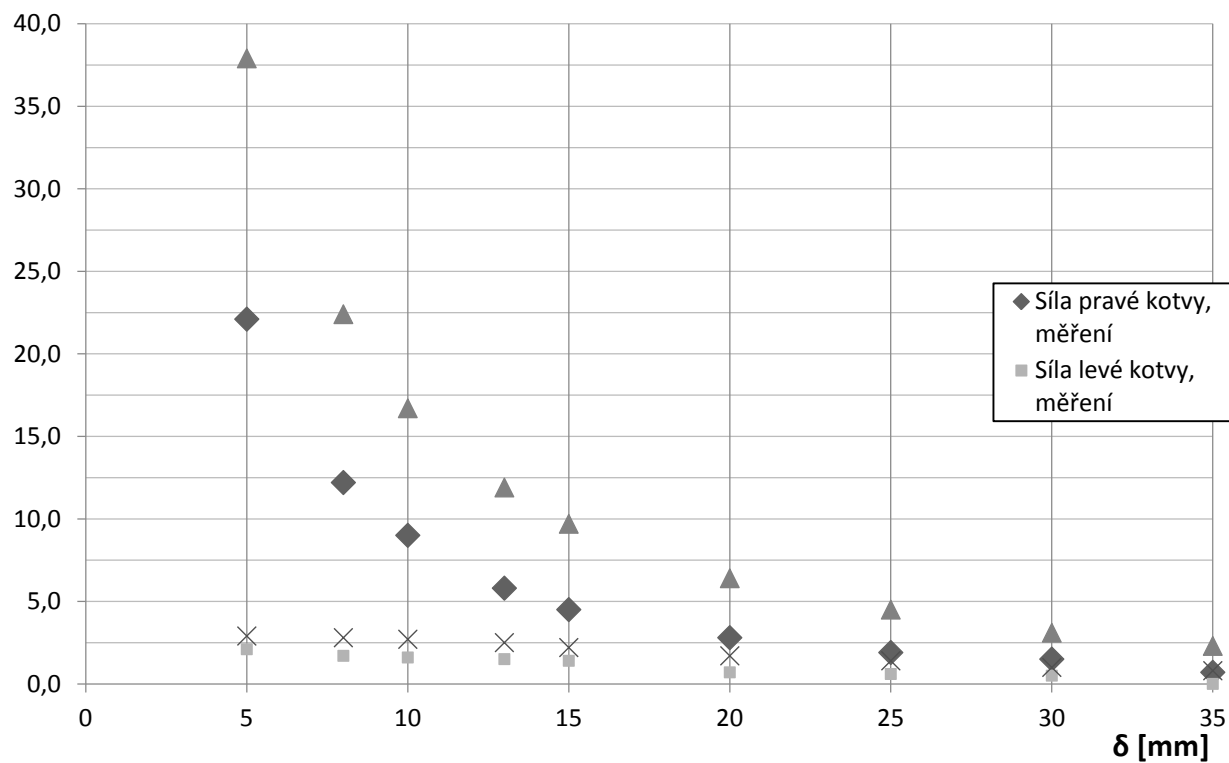
F [N]

F(δ) při 0,5 A



F [N]

F(δ) při 0,7 A



F [N]

F(δ) při 0,9 A

