

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh aktuátoru založeného na PPMT technologii**

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

Jméno a příjmení: **Jan LAKSAR**  
Osobní číslo: **E10B0067P**  
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**  
Název tématu: **Návrh aktuátoru založeného na PPMT technologii**  
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte rešerši technologie PPMT.
2. Navrhňte konkrétní uspořádání aktuátoru PPMT.
3. Ověřte parametry aktuátoru pomocí numerického modelu.
4. Navrhňte experimentální ověření technologie.
5. Srovnejte numerický a experimentální model.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**  
Seznam odborné literatury:


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

Vedoucí bakalářské práce: **Doc. Ing. Pavel Karban, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2012**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **7. června 2013**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2012

**Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na aktuátory založené na PPMT technologii. Ta umožňuje ovládání magnetického toku permanentních magnetů pomocí cívek protékaných proudem. Prvním bodem návrhu takového aktuátoru je vytvoření matematického popisu. Navazuje na něj numerický model v programu Agros2D, který reálně popisuje rozložení magnetického pole pro konkrétní uspořádání aktuátoru. Nejdůležitější součástí této práce je experimentální ověření vyrobeného aktuátoru a porovnání získaných výsledků s numerickým modelem. V této práci byla ověřena funkčnost aktuátoru, poměr mezi jednotlivými stavy odpovídá numerickému modelu, ale všechny naměřené hodnoty jsou mnohem menší, než hodnoty získané numerickým modelem.

**Klíčová slova**

PPMT, aktuátory, metoda konečných prvků, Agros2D

**Abstract**

The bachelor thesis presents PPMT actuators. This technology controls permanent magnet's flux with flux steering coils. First point of design of the actuator contains mathematical description of actuator. Next step is numerical model in Agros2D, which describes real magnetic field distribution for a specific organization choice. The most important part of this work is experimental verification of made actuator and comparison obtain values with numerical model. In this thesis was verified functionality of the actuator, relation between states agrees with the numerical model but all measured values are much smaller than values of the numerical model.

**Key words**

Parallel path magnetic technology, actuators, finite element method, Agros2D

## **Prohlášení**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 5.6.2013

Jan Laksar

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Pavlovi Karbanovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vedení práce. Rád bych také poděkoval katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni za poskytnutí materiálu a prostor k výrobě aktuátoru.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 PPMT AKTUÁTORY</b> .....	<b>10</b>
1.1 OBECNĚ O AKTUÁTORECH .....	10
1.1.1 Elektromechanické aktuátory.....	10
1.2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY PPMT .....	10
1.3 PRINCIP PPMT ZAŘÍZENÍ .....	11
<b>2 TEORETICKÝ ZÁKLAD K POPISU PPMT AKTUÁTORU</b> .....	<b>13</b>
2.1 ZÁKLADNÍ VZTAHY .....	13
2.2 ZJEDNODUŠUJÍCÍ ÚVAHY .....	15
2.2.1 Zjednodušení průchodu magnetického toku .....	15
2.2.2 Linearizace magnetického obvodu .....	16
<b>3 ANALYTICKÝ MODEL</b> .....	<b>18</b>
3.1 ROVNICE PRO ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU .....	18
3.1.1 Stav první, kotvy přitažené .....	19
3.1.2 Stav druhý, přitažená jen jedna kotva .....	19
3.2 DALŠÍ POSTUP ŘEŠENÍ .....	20
<b>4 NUMERICKÝ MODEL</b> .....	<b>20</b>
4.1 SPECIFIKA PROGRAMU AGROS2D .....	20
4.1.1 Preprocesor .....	21
4.1.2 Procesor .....	22
4.1.3 Postprocesor .....	23
4.1.4 Editor skriptů .....	24
<b>5 ŘEŠENÍ KONKRÉTNÍHO USPOŘÁDÁNÍ AKTUÁTORU</b> .....	<b>24</b>
5.1 ŘEŠENÍ ANALYTICKÉHO MODELU .....	25
5.2 ŘEŠENÍ NUMERICKÉHO MODELU .....	27
<b>6 VÝROBA PPMT AKTUÁTORU</b> .....	<b>28</b>
6.1 URČENÍ ROZMĚRŮ A VÝROBA MAGNETICKÉHO OBVODU .....	28
6.2 VÝROBA ELEKTRICKÉHO OBVODU .....	29
<b>7 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ AKTUÁTORU</b> .....	<b>29</b>
7.1 VÝROBA PŘÍPRAVKU PRO MĚŘENÍ .....	30
7.2 POSTUP MĚŘENÍ .....	31
<b>8 ANALÝZA VÝSLEDKŮ</b> .....	<b>34</b>
8.1 VÝZNAM ANALYTICKÉHO MODELU .....	34
8.2 POROVNÁNÍ NUMERICKÉHO MODELU S EXPERIMENTÁLNÍM OVĚŘENÍM .....	34
<b>9 ZÁVĚR</b> .....	<b>37</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>38</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>



## Seznam symbolů a zkratek

PPMT	.....	Parallel Path Magnetic Technology
$\Phi$	.....	magnetický indukční tok [ $Wb$ ]
$I$	.....	elektrický proud [ $A$ ]
$F$	.....	síla [ $N$ ]
$B$	.....	magnetická indukce [ $T$ ]
$W_m$	.....	energie magnetického pole [ $J$ ]
$\delta$	.....	vzduchová mezera [ $m$ ]
$H$	.....	intenzita magnetického pole [ $A\ m^{-1}$ ]
$l$	.....	délka indukční čáry [ $m$ ]
$U_m$	.....	magnetické napětí [ $A$ ]
$N$	.....	počet závitů [-]
$\mu$	.....	permeabilita [ $H\ m^{-1}$ ]
$\mu_r$	.....	relativní permeabilita [-]
$S$	.....	plocha [ $m^2$ ]
$w_m$	.....	hustota energie magnetického pole [ $J\ m^{-3}$ ]
MATLAB	.....	Matrix Laboratory
$A$	.....	vektorový magnetický potenciál [ $Wb\ m^{-1}$ ]
$J$	.....	proudová hustota [ $A\ m^{-2}$ ]
MKP	.....	metoda konečných prvků

V textu jsou skalární veličiny označeny kurzívou ( $I$ ,  $w_m$ ,  $\mu$ ) a vektorové veličiny tučnou kurzívou ( $H$ ,  $B$ ,  $A$ ).

## Úvod

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena na problematiku elektromechanických aktuátorů, konkrétně se věnuje aktuátoru založenému na PPMT technologii.

PPMT (*Parallel Path Magnetic Technology*) je technologie, která umožňuje ovládání magnetického toku permanentních magnetů pomocí cívek protékaných proudem. Nespornou výhodou této technologie je nulová energetická náročnost v klidovém stavu, přechod do jiného stavu je realizován pouze krátkým proudovým pulsem.

Hlavním cílem této bakalářské práce je návrh takového aktuátoru. Ten spočívá ve volbě konkrétního uspořádání, matematickém popisu a tvorbě numerického modelu, na jehož základě bude aktuátor vyroben. Nejdůležitější součástí této práce je experimentální ověření vyrobeného aktuátoru a porovnání s numerickým modelem.

Očekávání od této bakalářské práce jsou zejména spojena s potvrzením funkčnosti aktuátoru a ověřením příslušných teoretických předpokladů.

# 1 PPMT aktuátory

Úvodní kapitola je zaměřena na rozdělení aktuátorů, hlouběji se věnuje elektromechanickým aktuátorům a PPMT zařízením.

## 1.1 Obecně o aktuátorech

Aktuátory, též nazývané akční členy, jsou zařízení převádějící vstupní veličinu na veličinu mechanickou. Ta vyvolává silové působení, které má nejčastěji za následek pohyb po určité dráze, ale mohou se projevat i jiné účinky, např. deformace. Z hlediska fyzikální povahy řídicí (vstupní) veličiny existují aktuátory elektrické elektromagnetické, světelné, teplotní atd. Podle způsobu přeměny energie dělíme aktuátory na

- elektromechanické – řízené elektrickým signálem,
- pneumatické – řízené plynem,
- hydraulické – řízené kapalinou a
- nekonvenční (ostatní) – piezoelektrické, bimetalové, elektrochemické apod. [1]

V rámci této práce jsou nejdůležitější prvně jmenované, elektromechanické.

### 1.1.1 Elektromechanické aktuátory

Elektromechanické aktuátory jsou v technické praxi často používaná zařízení, zejména ve výrobních a dopravních soustavách u manipulátorů, robotických soustav apod. Jak již bylo řečeno, vstupní veličinou je elektrický signál ve formě napětí nebo proudu a výstupem je mechanická veličina. Funkce takového aktuátoru je založena na silovém působení

- elektrického pole na nabitá tělesa a dielektrika a
- magnetického pole na feromagnetika a vodiče procházené proudem. [1]

V praxi se téměř výhradně využívá působení magnetického pole díky vyšším hodnotám materiálových konstant, z čehož vyplývá větší hustota energie a tedy i silové působení pole magnetického [2]. Takové aktuátory je pak možno pojmenovat jako elektromagnetické.

## 1.2 Úvod do problematiky PPMT

Název *Parallel Path Magnetic Technology (PPMT)* lze interpretovat jako technologii s takovým uspořádáním magnetického obvodu, které umožňuje uzavírání se magnetického indukčního toku  $\Phi$  přes více paralelně umístěných částí a řízení, která z těchto částí bude v daný okamžik aktivní a na kterou část bude působit síla tímto polem (tokem) vyvolaná.

V roce 1995 získal Charles J. Flynn patent na motor založený na PPMT technologii [3]. Funkčnost této technologie byla prokázána na mnoha prototypových zařízeních a firma *Flynn Research Inc.* využívá PPMT při výrobě motorů, generátorů, rotačních a lineárních aktuátorů, magnetických západek a svorek atd. Ve srovnání s ostatními elektromechanickými zařízeními, přináší technologie PPMT tyto výhody:

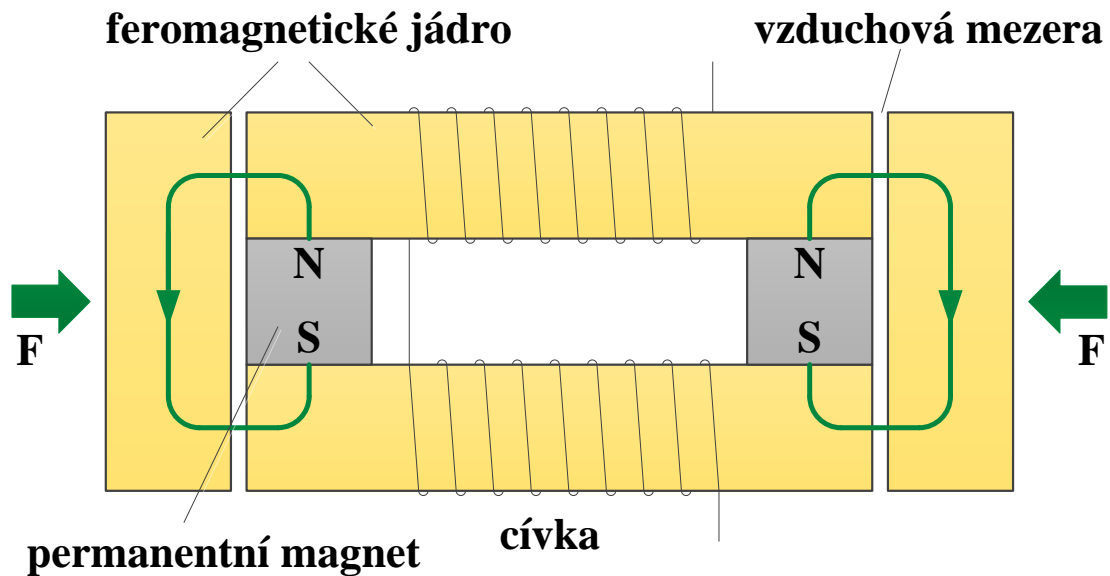
- kompaktnější rozměry
- menší hmotnost
- nižší provozní teplota
- a s tím spojená větší účinnost
- vyšší hustota výkonu
- širší oblast výkonu (popř. momentu) s vysokou účinností. [4]

PPMT se využívá také pro vojenské účely. Jeden ze zákazníků, *Boeing Phantom Works*, říká: "*PPMT is the biggest leap in motor and generator design logic in more than a hundred years*" [4].

### 1.3 Princip PPMT zařízení

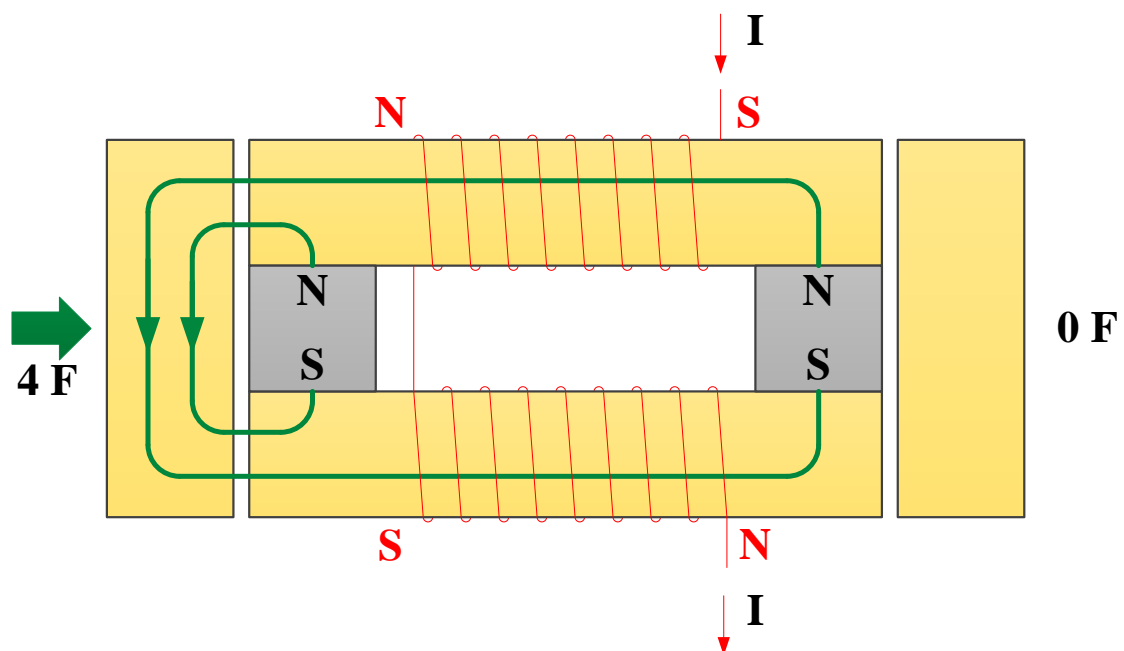
*Pozn.: Všechna odvození a všechny úměry a úvahy uvedené v této podkapitole jsou založené na určitých ideálních předpokladech a zanedbáních za účelem maximálního zjednodušení rovnic a vzorců, které jsou pro vysvětlení principu zbytečně složité. Podrobnější analýze včetně potřebné teorie se věnují kapitoly 2 a 0.*

PPMT používá dva nebo více paralelně umístěných permanentních magnetů tak, aby na sebe mohly působit, a ovlivňuje toto působení pomocí cívek umístěných mezi magnety. Nejjednodušší příklad takového uspořádání je aktuátor na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: PPMT aktuátor [4]

Je patrné, že pokud neprotéká žádný proud  $I$ , cívky nijak neovlivňují směr uzavírání magnetického toku a na obě pohyblivá jádra působí stejná síla  $F$ , vyvolaná přilehlým magnetem. Pokud cívkami protéká proud, jak je naznačeno na Obr. 1.2, vytvoří cívky magnetický tok, který bude při daném uspořádání procházet jádrem umístěným vpravo ve směru opačném, než tok vytvoření magnetem. Tyto protichůdné toky jsou pouze fiktivní a ve skutečnosti se v jádře nachází tok jediný, jehož velikost se při daném smyslu bude s rostoucím proudem zmenšovat.



Obr. 1.2: Vliv proudu protékajícího cívkami [4]

Až se velikost proudu dostane na takovou hodnotu, kdy magnetický tok vybuzený oběma cívkami bude co do velikosti stejný s magnetickým tokem jednoho magnetu, přestane se uzavírat jádrem vpravo a celý se odkloní. Veškerý tok se bude uzavírat přes levé jádro a jeho hodnota se oproti stavu na Obr. 1.1 zdvojnásobí. Magnetická indukce ve vzduchové mezeře  $B$  je přímo úměrná magnetickému toku  $\Phi$ , a magnetická energie mezery  $W_m$  je úměrná  $B^2$ , takže její hodnota vzroste čtyřikrát. Sílu  $F$  na jádro můžeme definovat jako  $\frac{dW_m}{d\delta}$ , kde  $\delta$  je velikost vzduchové mezery. Pro konstantní změnu  $d\delta$  změna energie  $dW_m$  vzroste čtyřikrát, tudíž síla se zdvojnásobením magnetického toku také vzroste čtyřikrát, jak je vyznačeno na Obr. 1.2. Ještě jednou opakuji, že uvedené úvahy vyžadují jistá omezení a zjednodušení a že slouží pouze k vysvětlení principu funkce PPMT aktuátoru.

Magnetický obvod je stále ovlivněn polem vybuzeným protékajícím proudem. Pokud na straně nulové síly po odklonění magnetického toku zajistíme vytvoření dostatečně velké vzduchové mezery (odpadnutí kotvy), můžeme řídicí cívky vypnout a aktuátor zůstane v tomto stavu čtyřnásobného silového působení bez nutnosti napájení. Pokud bychom chtěli přepnout aktuátor do druhého směru, postačí proudový impuls opačného směru [4].

Princip vysvětlený na lineárním aktuátoru používají i ostatní PPMT zařízení. Na principu aktivování částí magnetického obvodu ve vhodném okamžiku fungují krokové a spínané reluktanční motory [5]. Výhodou nejen aktuátorů a motorů, ale také všech ostatních zařízení založených na technologii PPMT je, že demagnetizace jedné a magnetizace druhé části probíhá jedním impulsem, který musí vyrovnat tok pouze jednoho magnetu, a následně můžeme napájení odpojit, dokud to umožňuje geometrie obvodu, nebo dokud ji nechceme změnit [4].

## 2 Teoretický základ k popisu PPMT aktuátoru

K pochopení principů, na kterých PPMT aktuátor funguje, je nutné znát základní vztahy a umět je s několika zjednodušujícími předpoklady použít.

### 2.1 Základní vztahy

Pro vyšetřování stacionárních magnetických polí se uplatňuje několik vztahů, všechny zde uvedené jsou popsány v [2]. Jedním ze základních je první Maxwellova rovnice ve tvaru

$$\oint_c \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_c , \quad (2.1.1)$$

též nazývána zákon celkového proudu. Z této rovnice vyplývá, že se v okolí vodiče procházeného proudem  $I_c$  vytvoří magnetické pole o intenzitě  $\mathbf{H}$ . Celkový proud  $I_c$ , který se v magnetických obvodech také nazývá magnetické napětí  $U_m$ , je pro cívku o  $N$  závitěch protékanou proudem  $I$  definován vztahem

$$I_c = U_m = N \cdot I . \quad (2.1.2)$$

Mezi intenzitou magnetického pole  $\mathbf{H}$  a magnetickou indukcí  $\mathbf{B}$  platí úměra

$$\mathbf{B} = \mu \cdot \mathbf{H} , \quad (2.1.3)$$

kde veličina  $\mu$  se nazývá permeabilita a charakterizuje magnetické vlastnosti prostředí a je možno ji vyjádřit ve tvaru  $\mu = \mu_0 \mu_r$  , kde konstanta  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [Hm<sup>-1</sup>] se nazývá permeabilita vakua a  $\mu_r$  je relativní permeabilita. Pro feromagnetické látky platí  $\mu_r \gg 1$ , ale feromagnetika představují nelineární prostředí, pro která platí  $\mu = \mu(H)$ . Tato nelinearita se zobrazuje tzv. magnetizační křivkou jednotlivých materiálů [2].

Magnetický indukční tok je definován jako tok vektoru  $\mathbf{B}$  orientovanou plochou  $S$ .

$$\phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} \quad (2.1.4)$$

Použitím I. Maxwellovy rovnice ( 2.1.1 ) a vztahů ( 2.1.3 ), ( 2.1.4 ) dojdeme k závěru, že vodič protékaný proudem vytvoří tok magnetické indukce  $\mathbf{B}$  plochou  $S$ , tedy magnetický tok. Aplikováním tohoto závěru na příklad závitů kolem magnetického obvodu (případ řešeného aktuátoru), kdy pro magnetický obvod platí  $\mu_r \gg 1$  (okolí je vzduch s  $\mu_r \cong 1$ ), bude téměř celý tok procházet magnetickým obvodem. Pokud označíme  $\Phi$  jako magnetický tok spřažený s jedním závitěm, celkový tok  $\Phi_c$  vytvořený  $N$  závitěmi bude

$$\phi_c = N \cdot \phi . \quad (2.1.5)$$

U elektromagnetických aktuátorů je nejdůležitější hodnota velikost síly, kterou působí magnetické pole na pohyblivé části magnetického obvodu. Ke zjištění této síly je nutné nejprve vyšetřit energetické poměry v daném magnetickém poli. Lze dokázat platnost vztahu

$$W_m = \int_V w_m dV , \quad (2.1.6)$$

kde  $w_m$  je hustota energie magnetického pole

$$w_m = \int_0^B \mathbf{H} d\mathbf{B} . \quad (2.1.7)$$

Pro lineární prostředí platí

$$w_m = \frac{1}{2}BH = \frac{B^2}{2\mu} = \frac{1}{2}\mu H^2 \quad (2.1.8)$$

a magnetická energie v určitém objemu  $V$  je úměrná kvadrátu magnetické indukce, popř. intenzity [2].

Po zjištění energie magnetického pole můžeme určit sílu působící na pohyblivé jádro podle definice

$$\mathbf{F} = \frac{\partial W_m}{\partial \mathbf{s}} , \quad (2.1.9)$$

kde  $s$  je dráha, po které se jádro pohybuje.

## 2.2 Zjednodušující úvahy

Pro možnost popsat magnetický obvod řešeného aktuátoru několika rovnicemi je nutné zavést určitá zjednodušení [2].

### 2.2.1 Zjednodušení průchodu magnetického toku

- V průřezu  $S$  všech větví magnetického obvodu je magnetická indukce  $B$  rozložena rovnoměrně, takže nedochází ke zhušťování indukčních čar a přesycování magnetického obvodu a rovnice ( 2.1.4 ) přechází do zjednodušeného tvaru

$$\phi = BS . \quad (2.2.1)$$

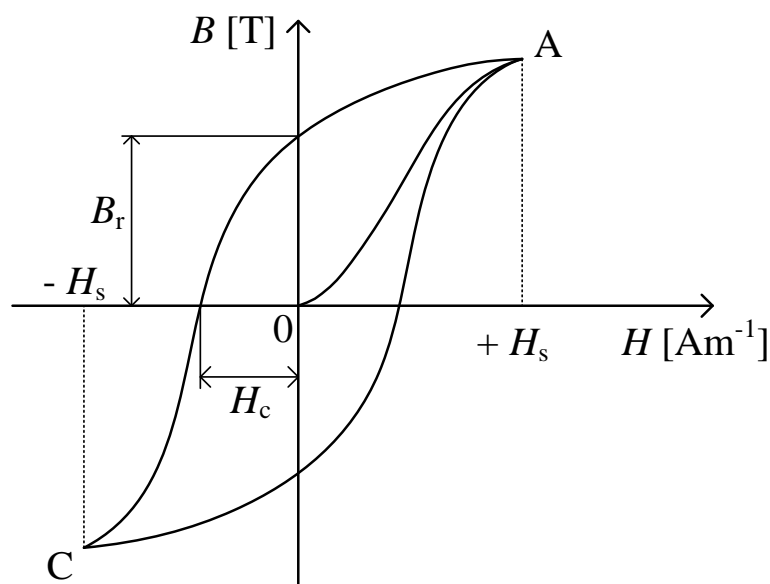
- Indukční čáry v magnetickém obvodu mají různou délku, a proto se zavádí střední indukční čára, která všechny nahradí
- U skutečného pole dochází ve vzduchové mezeře k rozptylu, kdy stejné množství magnetického toku jako ve feromagnetickém jádře prochází větší plochou a tím se skutečná indukce ve vzduchové mezeře podle rovnice ( 2.2.1 ) zmenšuje. Zároveň se



část toku neuzavírá magnetickým obvodem, ale okolním vzduchem a tím také vzniká rozptylový tok. Oba druhy rozptylu zanedbáme.

## 2.2.2 Linearizace magnetického obvodu

Linearizace znamená zavedení lineární závislosti mezi indukci  $B$  a intenzitou  $H$ , tedy  $\mu = \text{konst.}$  (v daném materiálu). V magnetickém obvodu používáme tři druhy materiálů. Vzduch, který je charakteristický relativní permeabilitou blízkou jedné, je prostředím lineární. Feromagnetikum a permanentní magnet lineární materiály nejsou a závislost  $B$  na  $H$  je určena hysterezní smyčkou (viz Obr. 2.1). Ta je pro každý materiál charakteristická a její rozměry se výrazně liší pro magneticky měkké a tvrdé materiály.



Obr. 2.1: Hysterezní smyčka

- *Linearizace feromagnetika*

Na pevná i pohyblivá jádra byla použita magneticky měkká ocel. Magneticky měkká feromagnetika se vyznačují strmou křivkou prvotní magnetizace (křivka 0-A na Obr. 2.1) a velmi úzkou hysterezní smyčkou. Mají tedy vysokou hodnotu permeability, malou koercivitu  $H_c$  a často se hystereze zanedbává a uvažuje se jen křivka prvotní magnetizace. Ta je však nelineární a je nutné ji proložit přímkou a tím zajistit  $\mu = \text{konst.}$

- *Linearizace permanentního magnetu*

Permanentní magnet je magneticky tvrdý materiál s malou permeabilitou, vysokou hodnotou koercivity a širokou hysterezní smyčkou, proto je nutné vzít v úvahu jeho hysterezi. Jeho pracovní bod se pohybuje ve druhém kvadrantu, tedy mezi koercivitou  $H_c$  a remanencí

$B_r$ . Vzhledem k tomu, že všechny známé informace o průběhu charakteristiky jsou jen hodnoty  $H_c$  a  $B_r$  [6], je nutné proložit křivku mezi těmito body přímkou. Směrnice rovnice přímky v souřadném systému HB má tvar

$$B = k \cdot H + q \quad (2.2.2)$$

Postupným dosazením  $H = 0$  a  $B = 0$  lze získat soustavu dvou rovnic o dvou neznámých a určit z ní hodnoty konstant  $k$  a  $q$ .

$$B_r = k \cdot 0 + q \quad (2.2.3)$$

$$0 = k \cdot (-H_c) + q \quad (2.2.4)$$

V grafu se bod označující hodnotu  $H_c$  nachází v záporné polovině osy, avšak fyzikálně je podstatná velikost koercivity, tedy její absolutní hodnota. Do rovnice ( 2.2.4 ) je proto nutné dosadit  $-H_c$ , aby byl zápis matematicky správný. Z rovnice ( 2.2.3 ) lze snadno určit hodnotu  $q = B_r$  a dosazením do ( 2.2.4 ) získat  $k = \frac{B_r}{H_c}$ . Rovnice přímky, po které se pohybuje pracovní bod magnetu, má tvar

$$B = \frac{B_r}{H_c} \cdot H + B_r \quad (2.2.5)$$

Pro aktuátor jsou použity neodymové magnety typu VMM10 a platí pro ně následující tabulka:

**Tab. 2.1:** Magnetické vlastnosti použitých neodymových magnetů [6]

VMM – teplotní odolnost do 80 °C						
Typ	Remanence $B_r$ [mT]			Koercivita $H_c$ [kA m <sup>-1</sup> ]		
	minimální	maximální	střední	minimální	maximální	střední
VMM10	1380	1450	1415	876	969	922,5

Použitím středních hodnot remanence a koercivity (a základních jednotek) má konečný vztah tvar

$$B = 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot H + 1,415 \quad (2.2.6)$$

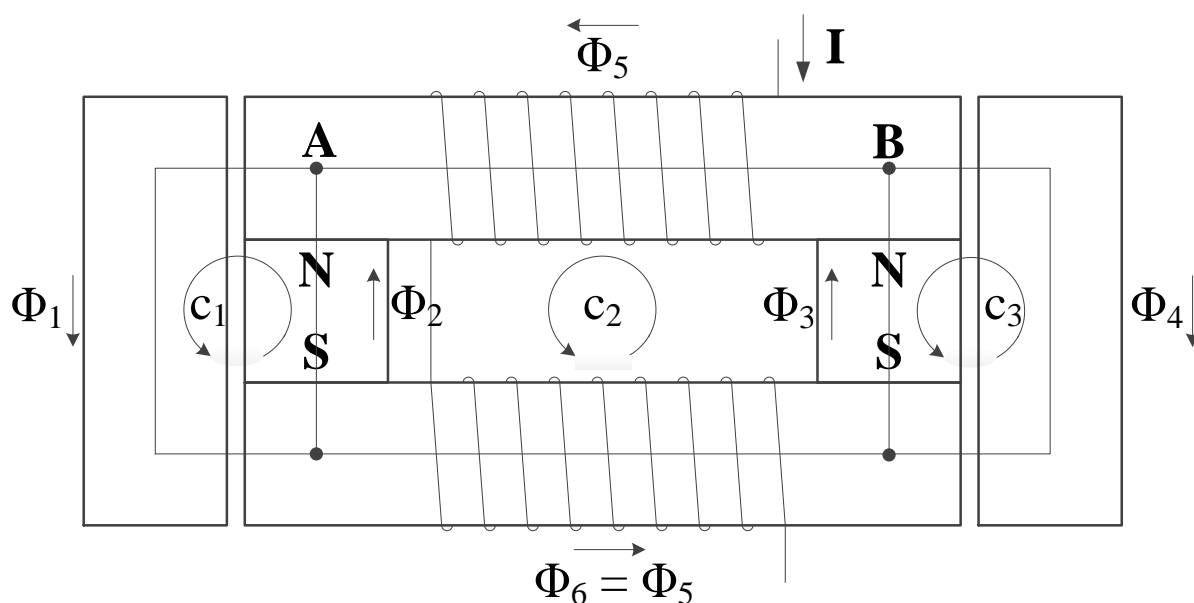
### 3 Analytický model

Pro analytické vyšetření magnetického pole a zejména pro určení síly na obě pohyblivá jádra v závislosti na hodnotě procházejícího proudu cívkami se využije analogie mezi obvodem elektrickým a magnetickým. Tato analogie je patrná z následující tabulky a na magnetické obvody lze tedy aplikovat Kirchhoffovy zákony.

**Tab. 3.1:** Analogie mezi elektrickým a magnetickým obvodem [2]

Veličiny elektrických obvodů	$I$	$U$	$R$	$\gamma$	$U_0$
Veličiny magnetických obvodů	$\Phi$	$U_m$	$R_m$	$\mu$	$NI$

S ohledem na zjednodušující úvahy popsané v podkapitole 2.2 je možno nakreslit následující schéma s příslušnými smyčkami a uzly.



Obr. 3.1: Schéma magnetického obvodu

#### 3.1 Rovnice pro řešení magnetického obvodu

Jak již bylo řečeno v podkapitole 1.3, jsou důležité dva stavy aktuátoru. První je zobrazen na předchozím obrázku. Obě kotvy jsou přitaženy, stejně vzdálené. Druhý stav nastane po dosažení nulové síly na jednu z kotev, kterou zajistí proud procházející cívkami. Kotva následně „odpadne“, proud přestane protékat a aktuátor má v magnetickém obvodu jen jednu kotvu.

### 3.1.1 Stav první, kotvy přitažené

Lze vytvořit soustavu pěti rovnic, vycházející z uzlů A a B (I. Kirchhoffův zákon pro tok  $\Phi$ ) a smyček  $c_1$  až  $c_3$  (II. Kirchhoffův zákon pro magnetická napětí), kde integrál ( 2.1.1 ) přechází v součin velikosti intenzity magnetického pole  $H$  a délky střední indukční čáry  $l$  (stejný směr vektorů  $\mathbf{H}$  a  $d\mathbf{l}$  a konstantní velikost indukce v dané oblasti).

$$\begin{aligned}
 \text{A:} \quad & \Phi_1 - \Phi_2 - \Phi_5 = 0 \\
 \text{B:} \quad & -\Phi_3 + \Phi_4 + \Phi_5 = 0 \\
 c_1: \quad & H_1 l_1 + 2H_{10} \delta_1 + H_2 l_2 + H_{ml} l_m = 0 \\
 c_2: \quad & H_5 l_5 - H_2 l_2 - H_{ml} l_m + H_5 l_5 + H_3 l_3 + H_{mp} l_m = NI \\
 c_3: \quad & -H_4 l_4 - 2H_{40} \delta_p - H_3 l_3 - H_{mp} l_m = 0
 \end{aligned} \tag{3.1.1}$$

Součiny  $H_1 l_1$  až  $H_5 l_5$  jsou magnetická napětí v jádrech, kde protékají toky  $\Phi_1$  až  $\Phi_5$ ,  $H_{10} \delta_1$  udává magnetické napětí ve vzduchové mezeře ve schématu zobrazené vlevo a  $H_{ml} l_m$  je magnetické napětí levého magnetu. Vydělením rovnic pro uzly průřezem  $S$  (ve všech místech stejný) se jejich smysl nezmění a neznámé jsou jednotlivé magnetické indukce ( 2.2.1 ). Vztahem ( 2.2.5 ) pro intenzitu magnetického pole v magnetech  $H_{ml}$  a  $H_{mp}$  a vztahem ( 2.1.3 ) pro feromagnetická jádra a úpravou rovnic se získá soustava pěti rovnic pro indukce  $B_1$  až  $B_5$ :

$$\begin{aligned}
 B_1 - B_2 - B_5 &= 0 \\
 -B_3 + B_4 + B_5 &= 0 \\
 \left( \frac{l_1}{\mu_{Fe}} + \frac{2\delta_1}{\mu_0} \right) B_1 + \left( \frac{l_2}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_2 &= H_c l_m \\
 - \left( \frac{l_2}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_2 + \left( \frac{l_3}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_3 + \frac{2l_5}{\mu_{Fe}} B_5 &= NI \\
 \left( \frac{l_3}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_3 + \left( \frac{l_4}{\mu_{Fe}} + \frac{2\delta_p}{\mu_0} \right) B_4 &= H_c l_m
 \end{aligned} \tag{3.1.2}$$

### 3.1.2 Stav druhý, přitažená jen jedna kotva

Soustava pro řešení tohoto stavu bude mít jenom tři rovnice pro tři neznámé magnetické indukce  $B_1$  až  $B_3$ . Z Obr. 3.1 vyplývá, že  $B_4 = 0$  T a  $B_3 = B_5$  a řešená soustava rovnic vypadá následovně:

$$\begin{aligned}
 B_1 - B_2 - B_3 &= 0 \\
 \left( \frac{l_1}{\mu_{Fe}} + \frac{2\delta_1}{\mu_0} \right) B_1 + \left( \frac{l_2}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_2 &= H_c l_m \\
 - \left( \frac{l_2}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_2 + \left( \frac{l_3}{\mu_{Fe}} + \frac{2l_5}{\mu_{Fe}} + \frac{H_c}{B_r} l_m \right) B_3 &= NI
 \end{aligned} \tag{3.1.3}$$

### 3.2 Další postup řešení

Ze soustav rovnic ( 3.1.2 ) a ( 3.1.3 ) je patrné, že kromě hledaných magnetických indukcí je neznámé zdrojové magnetické napětí  $NI$ . To musí mít takovou hodnotu, aby vytvořilo magnetickou indukci o stejné velikosti, jako indukce v příslušné vzduchové mezeře, a opačném směru (indukce  $B_4$ ). Tím dosáhne energie ve vzduchové mezeře nulové hodnoty a síla na pohyblivé jádro bude také nulová (energie dosáhne svého extrému). Skutečný počet závitů bude určen z vyrobeného aktuátoru a lze lehce vypočítat požadovaný proud  $I$ .

Následný výpočet zahrnuje určení hodnoty  $B_1$  a  $B_4$  pro proměnnou vzduchovou mezeru  $\delta$  (minimální hodnota je ta pracovní, při které byl hledán proud  $I$ ). Dále podle vzorce ( 2.1.8 ) probíhá výpočet hodnoty hustoty energie magnetického pole v levé a pravé vzduchové mezeře. Objemový integrál ( 2.1.6 ) lze nahradit výrazem

$$W_m = 2S \int_{\delta} w_m d\delta, \quad (3.2.1)$$

protože hodnota  $w_m$  se mění jen se vzduchovou mezerou a na celém průřezu je stejná a energie se uvažuje ve dvou vzduchových mezerách (na jedno pohyblivé jádro). Síla se pak vypočítá podle vztahu ( 2.1.9 ) jako  $F = \frac{\partial W_m}{\partial \delta}$ .

Pro řešení obou soustav rovnic a další výpočty jsem vytvořil skript v programu MATLAB.

## 4 Numerický model

Jedním z hlavních bodů této bakalářské práce je vytvoření numerického modelu navrhovaného aktuátoru. Cílem tohoto modelu je potvrzení výsledků získaných výpočty, určení rozložení magnetického pole a zpřesnění hodnot výsledné síly a energie. K vytvoření tohoto modelu jsem použil program Agros2D.

### 4.1 Specifika programu Agros2D

Agros2D je univerzální multiplatformní aplikace určená pro řešení fyzikálních polí. Využívá knihovnu Hermes2D založenou na *hp*-FEM (adaptivní metoda konečných prvků vyššího řádu přesnosti). Aplikace je vyvíjena na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni a je distribuována pod GPL licencí. Agros2D umožňuje řešit pole elektrostatické, magnetické, elektrické proudové, teplotní a akustické a problematiku strukturální mechaniky v kartézském a osově symetrickém souřadném systému. [7]

Samotné řešení úlohy (nejen v programu Agros2D) se skládá ze tří částí. Preprocesor, procesor a postprocesor.

#### 4.1.1 Preprocesor

Preprocesor slouží k definování problému. Programy pro řešení fyzikálních polí využívají k výpočtu řešení okrajových úloh pro potenciál, Agros2D nevyjímaje. Pro magnetické pole se využívá rovnice pro vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$ , pro který platí: [2]

$$\mathbf{B} = \text{rot } \mathbf{A} \quad (4.1.1)$$

Úpravou a dosazením do první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru dostáváme vztah pro magnetický potenciál [2]

$$\text{rot } \frac{1}{\mu} (\text{rot } \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) = \mathbf{J}, \quad (4.1.2)$$

kde  $\mathbf{J}$  je proudová hustota. Rovnice bude mít nenulovou pravou stranu jen v oblasti cívek.

Vzhledem k tomu, že Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru platí jen v regulárních bodech, je nutné definovat okrajové podmínky, které platí na hranicích definičních oblastí. Existují dva (tři) druhy okrajových podmínek:

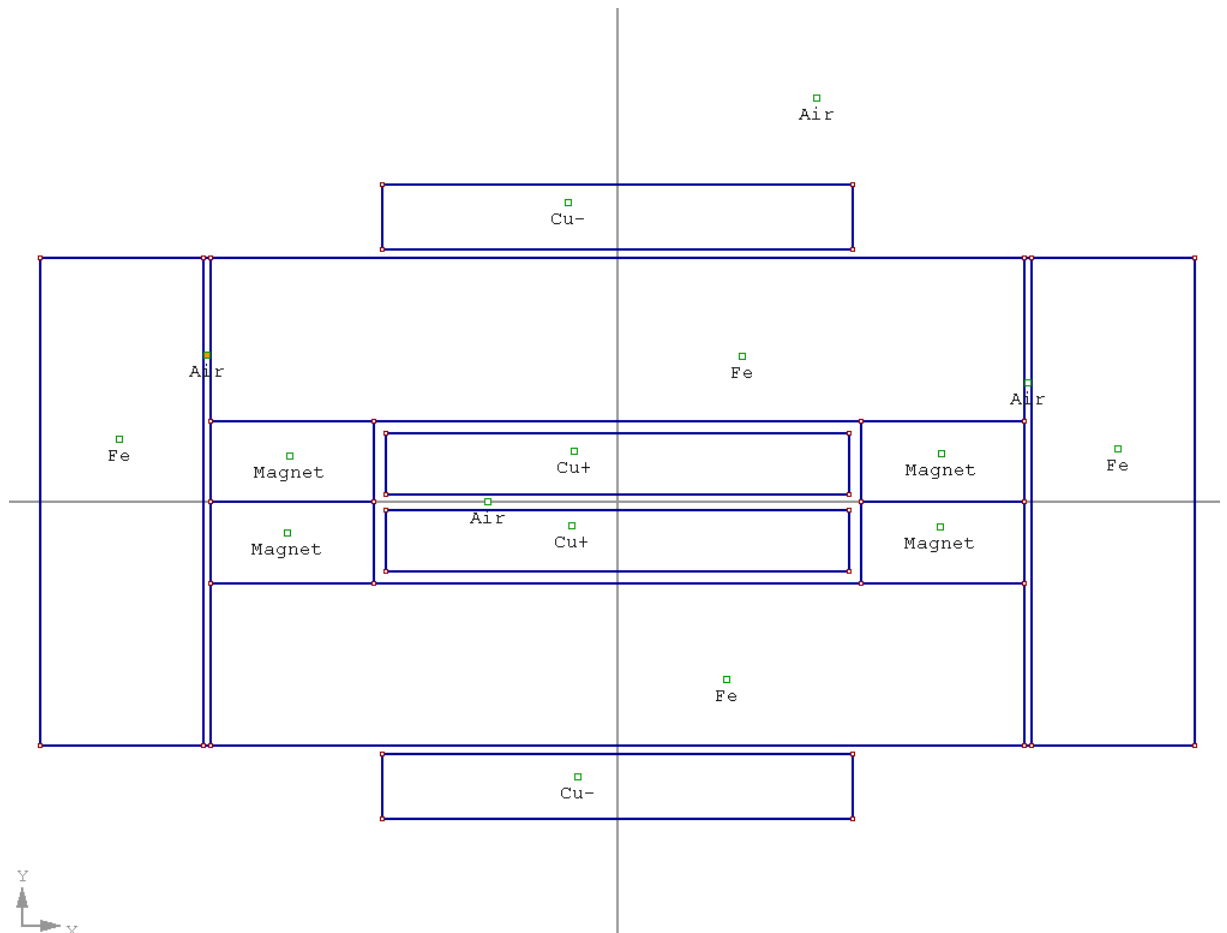
- Dirichletova okrajová podmínka, kdy známe potenciál na hranici (okrajová podmínka I. druhu)
- Neumannova okrajová podmínka, kdy známe derivaci potenciálu ve směru vnější normály k hranici (okrajová podmínka II. druhu)
- smíšená okrajová podmínka (na části hranice je dána Dirichletova a na zbývajících částí Neumannova okrajová podmínka) [2]

Je tedy nutné uzavřít definiční oblast vytvořením vnější hranice, na které platí Dirichletova podmínka

$$\mathbf{A} = 0. \quad (4.1.3)$$

Po volbě druhu pole a typu problému je nutná tvorba geometrie řešeného problému. Agros2D umožňuje práci s uzly, hranami a značkami oblastí. Pomocí uzlu a hran se vytvoří 2D geometrie v kartézské souřadné soustavě  $xy$  obdobná všem předchozím obrázkům. Ve směru osy  $z$  se rozložení magnetického pole nemění, viz kapitola 5. V modelu se nachází pět druhů oblastí: feromagnetická jádra, magnety, vzduch a měděná cívka s kladnou a zápornou proudovou hustotou (proud vstupující do nákrasny a vystupující z nákrasny). Kostra cívky a

ostatní, z hlediska funkčnosti magnetického obvodu, pasivní prvky budou respektovány vzduchem (relativní permitivita blízká 1). Výsledná geometrie aktuátoru je zobrazena na Obr. 4.1. Vnější oblast vzduchu je rozdělena pro výpočet energie pouze ve vzduchové mezeře a ne v celém objemu okolního vzduchu (výpočet energie se provádí v celé mezeře, na rozdíl od analytického modelu). Vnější hranici tvoří kružnice s definovanou podmínkou ( 4.1.3 ).



Obr. 4.1: Geometrie řešeného PPMT aktuátoru

#### 4.1.2 Procesor

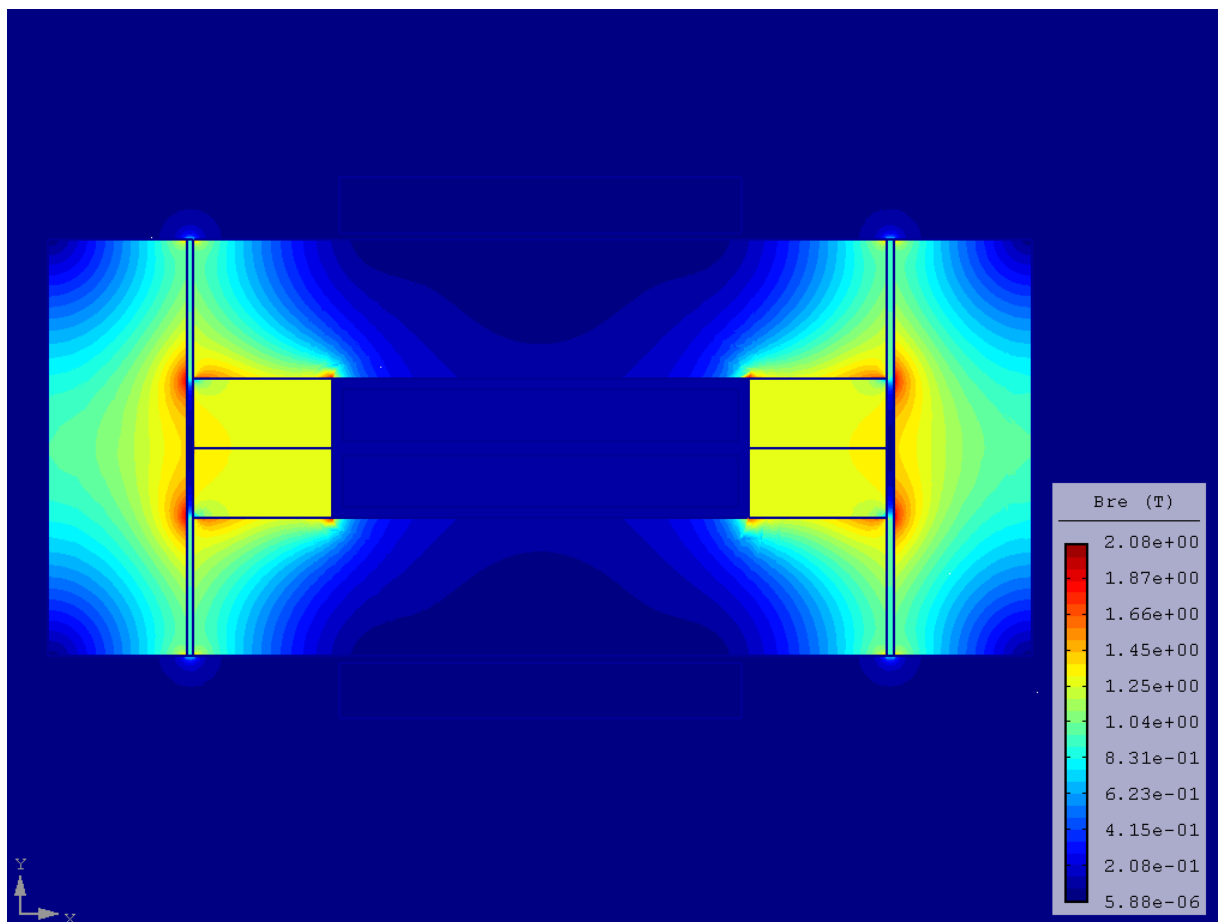
Procesor slouží k samotnému řešení příslušného pole, tedy stanovuje rozložení potenciálu. Naprostá většina programů pro řešení fyzikálních polí využívá dnes metodu konečných prvků (MKP, FEM – finite element method). Stejně tak i Agros2D. Ta spočívá v několika krocích [8].

MKP je založena na diskretizaci geometrie, tedy rozdělení oblasti na konečný počet trojúhelníkových podoblastí. Pro každé dva trojúhelníky platí, že nemají žádný společný bod, jeden společný bod nebo společnou celou jednu stranu a zároveň žádný trojúhelník neprotíná rozhraní. Rozdělení na trojúhelníky je výhodné, protože dokážou dobře vyplnit i složité

oblasti [8]. Agros2D využívá k triangulaci pracovní oblasti program Triangle [7]. Procesor využívá elementy vyššího řádu přesnosti a automatickou *hp*-adaptivitu, která dokáže automaticky zjemnit trojúhelníkovou síť a zvýšit řád aproximovaného polynomu dle potřeby [7]. Posledním krokem procesoru je tvorba soustavy algebraických rovnic a její řešení.

#### 4.1.3 Postprocesor

Postprocesor slouží k analýze získaných dat a výpočtu veličin z potenciálu. Přímo z vektorového magnetického potenciálu lze určit magnetickou indukci ( 4.1.1 ), intenzitu magnetického pole ( 2.1.3 ) a hustotu magnetického pole ( 2.1.7 ). Tyto hodnoty lze následovně zobrazit pomocí barevné mapy, vektorů nebo kontur [7]. Je také možno zobrazit lokální veličiny ve zvoleném bodě nebo provést výpočet povrchových a objemových integrálů, např. energie [7]. Získané výsledky lze také zobrazit ve formě grafu a všechny výsledky je možno exportovat jako bitmapový obrázek [7]. Na Obr. 4.2 je zobrazeno výsledné rozložení magnetické indukce s velikostí obou vzduchových mezer 1 mm, kdy jako zdroje magnetického pole působí pouze permanentní magnety, cívkami tedy neprotéká proud.



Obr. 4.2: Rozložení magnetické indukce  $B$  pro klidový stav řešeného aktuátoru  $J = 0 \text{ A mm}^{-2}$  a  $\delta = 1 \text{ mm}$



Další exportované obrázky jsou součástí přílohy. Příloha A zobrazuje triangulaci sítě a Příloha B rozložení magnetické indukce a kontur přechodného stavu s protékajícím proudem.

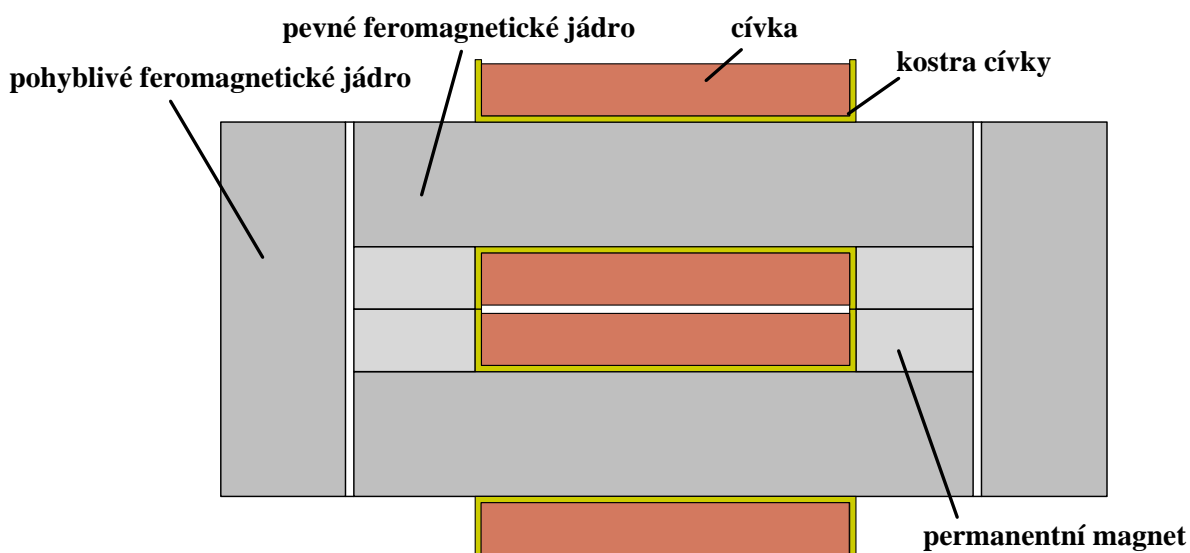
#### 4.1.4 Editor skriptů

Program Agros2D umožňuje také vytváření skriptů pomocí jazyka Python a jeho implementace do C++. Editor umožňuje vytvoření skriptu z modelu nakresleného v preprocesoru. Tím se výrazně zjednoduší zadávání bodů, hran, materiálů a okrajových podmínek do skriptu. Následně lze pomocí skriptu vytvořit cyklus posuvu části geometrie a vypočítat příslušný integrál a zobrazit výsledky ve formě grafů. [7]

K vytvoření skriptu jsem použil geometrii aktuátoru z Obr. 4.1. Posuvem levého feromagnetického jádra se mění energie v obou vzduchových mezerách, kterou lze získat jako objemový integrál. Sílu působící na jádro lze dostat jako povrchový integrál.

## 5 Řešení konkrétního uspořádání aktuátoru

Pro návrh konkrétního uspořádání aktuátoru jsem přímo vycházel z ilustrativního modelu na Obr. 1.1. Aktuátor se skládá z elektrické a magnetické části. Magnetický obvod tvoří permanentní magnety, feromagnetická jádra, pevná a pohyblivá, a vzduchová mezera. Elektrickou částí tvoří vinutí cívek na kostrách, které jsou umístěny na pevných jádrech. Více napoví řez aktuátorem na Obr. 5.1.



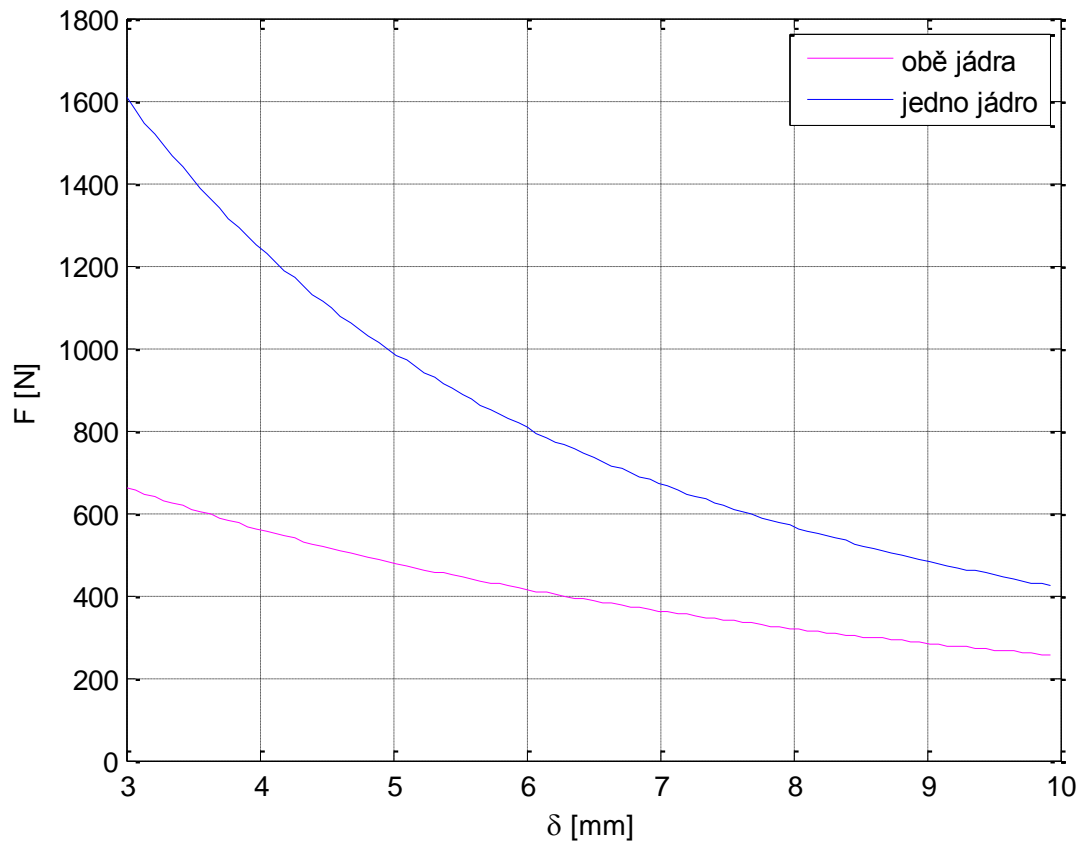
Obr. 5.1: Aktuátor v řezu

Umístění magnetů na okrajích nepohyblivých železných jader je výhodné, protože se mezi magnety nachází dostatečný prostor pro navinutí potřebného množství závitů obou

cívek. Každý magnet je složen ze dvou neodymových magnetů, magnetovaných kolmo na plochu, typ VMM10 [6]. Důvodem tohoto uspořádání je dostupnost magnetů s danými rozměry. Rozměry jednotlivých částí magnetického obvodu v milimetrech jsou vyznačeny v příloze A. Hloubka použitých magnetů a feromagnetických jader bude 40 mm. Oproti jejich šířce je tento rozměr dvojnásobný. Důvodem tohoto uspořádání je použití 2D modelu při numerickém vyšetření magnetického pole v aktuátoru. Geometrie modelu je vytvořena s předpokladem, že proud prochází kolmo k rovině zobrazení, kterou používám. Toto tvrzení však platí jen na části průřezu. Čím bude hloubka aktuátoru vyšší, tím větší část závitů bude opravdu kolmá k rovině zobrazení a model bude přesnější. Zároveň však roste objem použitého materiálu a s tím také délka jednoho závitu. Hloubka 40 mm je tedy kompromisem mezi dostatečnou přesností modelu a úsporou použitého materiálu.

## 5.1 Řešení analytického modelu

Na Obr. 5.2 je zobrazena závislost síly na velikosti vzduchové mezery pro první stav – přitažené obě kotvy a pro druhý stav – přitažená jen jedna kotva. Závislost je určena pro ustálený stav, tedy bez proudu procházejícího cívkami. Rozmezí vzduchové mezery 3 – 10 mm odpovídá hodnotám použitých při experimentálním ověření, viz dále.



Obr. 5.2: Graf závislosti síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajícího proudu, pro přitažené jedno a obě jádra, analytický model

Jak je z grafu patrné, velikost síly po odpadnutí jádra nedosahuje ani pro tento zidealizovaný analytický model čtyřnásobné hodnoty oproti stavu s oběma jádry přitaženými. To je způsobeno hysterezní křivkou permanentních magnetů. Permanentní magnet je zdrojem magnetické indukce  $B$ , která je analogií k elektrickému proudu v obvodu elektrickém. Permanentní magnet lze tedy přirovnat k reálnému zdroji proudu, jehož vnitřní odpor  $R_i$  je pro zlinearizovanou závislost  $B$  na  $H$  konstantní. Odpor feromagnetických jader lze vůči vzduchové mezeře  $R_\delta$  zanedbat. Na Obr. 5.3 a) je zobrazen elektrický obvod jako analogie stavu s přitaženými oběma kotvami a pro proud  $I$  platí:

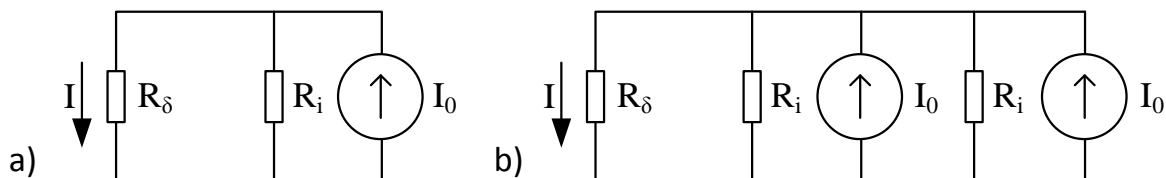
$$I = I_0 \frac{R_i}{R_i + R_\delta} \quad (5.1.1)$$

Obr. 5.3 b) zobrazuje elektrický obvod jako analogii stavu odpadlé kotvy, kdy magnety přitahují pouze jednu. Pro proud  $I$  platí v tomto případě vztah

$$I = 2I_0 \frac{\frac{R_i}{2}}{\frac{R_i}{2} + R_\delta} \quad (5.1.2)$$

Proud  $I_0$  je analogií pro remanentní indukci  $B_r$ . Zlomek, kterým se proud  $I_0$ , popř.  $2I_0$

násobí, je v rovnici ( 5.1.1 ) vždy větší, než v ( 5.1.2 ). Návratem zpět k magnetickému obvodu to tedy znamená, že magnetická indukce  $B$  procházející přes vzduchovou mezeru nikdy nenabude dvojnásobné hodnoty v případě jedné přitáhnuté kotvy oproti dvěma. Síla na tuto kotvu tedy vždy bude menší, než čtyřnásobná vůči stavu s oběma kotvami.

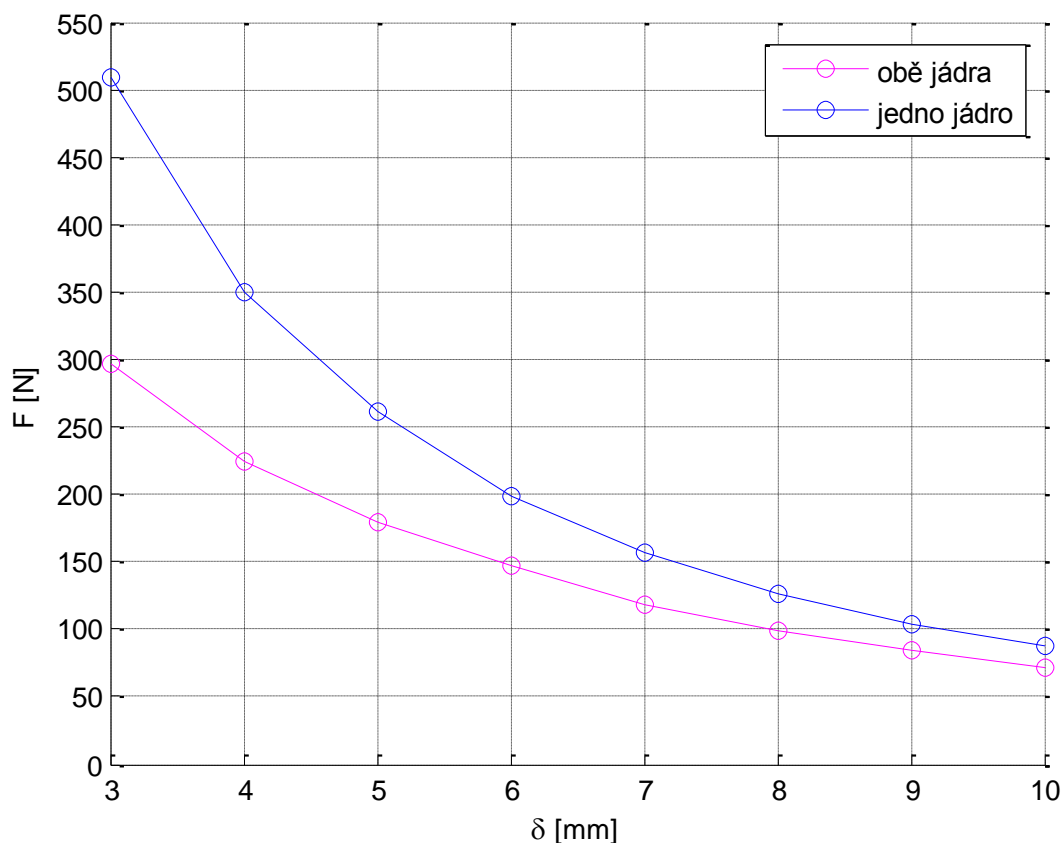


Obr. 5.3: Analogie elektrického obvodu pro a) jeden magnet a jednu vzduchovou mezeru, b) dva paralelní magnety a jednu vzduchovou mezeru

Výchozího předpokladu pro PPMT aktuátor tedy nelze dosáhnout ani teoreticky, pro ideální případ. Situace je poněkud odlišná s respektováním skutečné charakteristiky magnetu. Tu lze předpokládat silně nelineární s tvarem blízcím se obdélníku, hodnota magnetické indukce se tedy v oblasti blízké  $B_r$  s intenzitou magnetického pole příliš nemění. Tento model však zanedbává i rozptyl magnetického pole, který pro dané rozmezí vzduchové mezery bude velký. Hodnoty získané analytickým model proto vůbec neodpovídají realitě.

## 5.2 Řešení numerického modelu

Obr. 5.4 zobrazuje graf závislosti síly působící na jedno jádro na vzduchové mezeře, pokud jsou přitáhnuty obě nebo pouze to jedno. Z grafu je patrné, že pro velkou vzduchovou mezeru se velikost síly v obou stavech příliš neliší. To je pravděpodobně způsobeno velkým rozptylem magnetického pole. Se zmenšující se vzduchovou mezerou je vliv rozdílu tvaru magnetického obvodu ztelnější.



Obr. 5.4: Graf závislosti síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajícího proudu, pro přitažené jedno a obě jádra, numerický model

## 6 Výroba PPMT aktuátoru

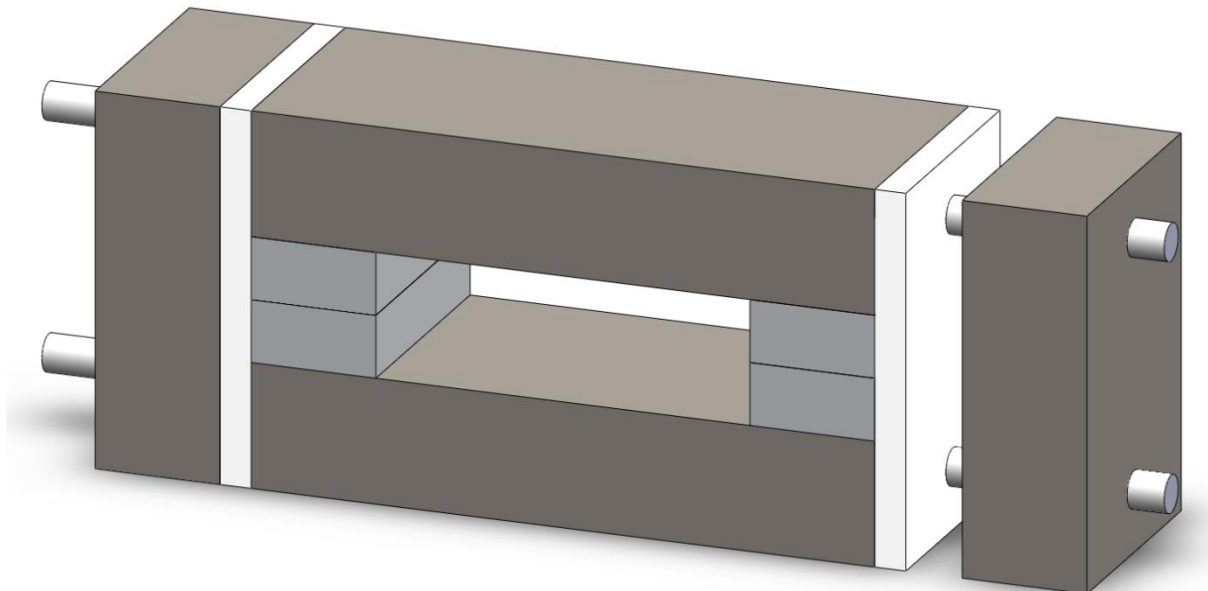
Po vytvoření analytického i numerického modelu je nutné ověřit také reálný aktuátor. K tomu je zapotřebí vyrobit všechny jeho části.

### 6.1 Určení rozměrů a výroba magnetického obvodu

Určení rozměrů navrhovaného aktuátoru podléhá několika kritériím. Z důvodu zajištění lepšího přiblížení numerického modelu realitě byla zvolena větší hloubka aktuátoru, než by bylo nutné. Konkrétní rozměry byly také přizpůsobeny dostupnými magnety. S ohledem na požadavek stejného průřezu magnetického obvodu ve všech místech, dostatek místa pro navinutí cívek a určitou kompaktnost celého aktuátoru jsem dospěl k rozměrům, které jsou v podobě rozměrových výkresů součástí přílohy.

K vytvoření dokumentace jsem použil 3D CAD software SolidWorks, který umožňuje tvorbu 3D dílů, skládání sestav a vygenerování výkresů z dílu nebo sestavy [9]. Pro správnou

funkčnost experimentálního modelu bylo nutné jej vybavit kluznými kontakty, které zajistí pohyb feromagnetických jader jen v požadovaném směru. Konstrukční provedení celého magnetického obvodu je zobrazeno na Obr. 6.1.



Obr. 6.1: Konstrukční provedení magnetického obvodu, sestava ze software SolidWorks

## 6.2 Výroba elektrického obvodu

Elektrický obvod je tvořen dvěma cívkami, na každém pevném jádře se nachází jedna. Obě cívky tvoří dvě části, kostra a samotné vinutí. Kostry cívek jsem vyrobil ze sklotextitové desky, ze které jsem vyříznul jednotlivé části a ty slepil pomocí kontaktního lepidla. Na tyto kostry jsem následně navinul cívky. Vzhledem k vlastnostem použitých magnetů lze očekávat velké hodnoty magnetické indukce, počet závitů cívek by měl být co nejvyšší. Proto jsem použil lakovaný měděný drát o průměru 0,5 mm. Mezi jednotlivé vrstvy závitů jsem vkládal izolační pásku a nakonec ovinul touto páskou celou cívku. Počet závitů  $N$  v obou cívkách jsem počítal během navíjení. Celkový počet závitů aktuátoru je 1700 závitů. Všechny materiál na výrobu aktuátoru mi byl poskytnut katedrou teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni, v jejíž laboratoři jsem výrobu zrealizoval.

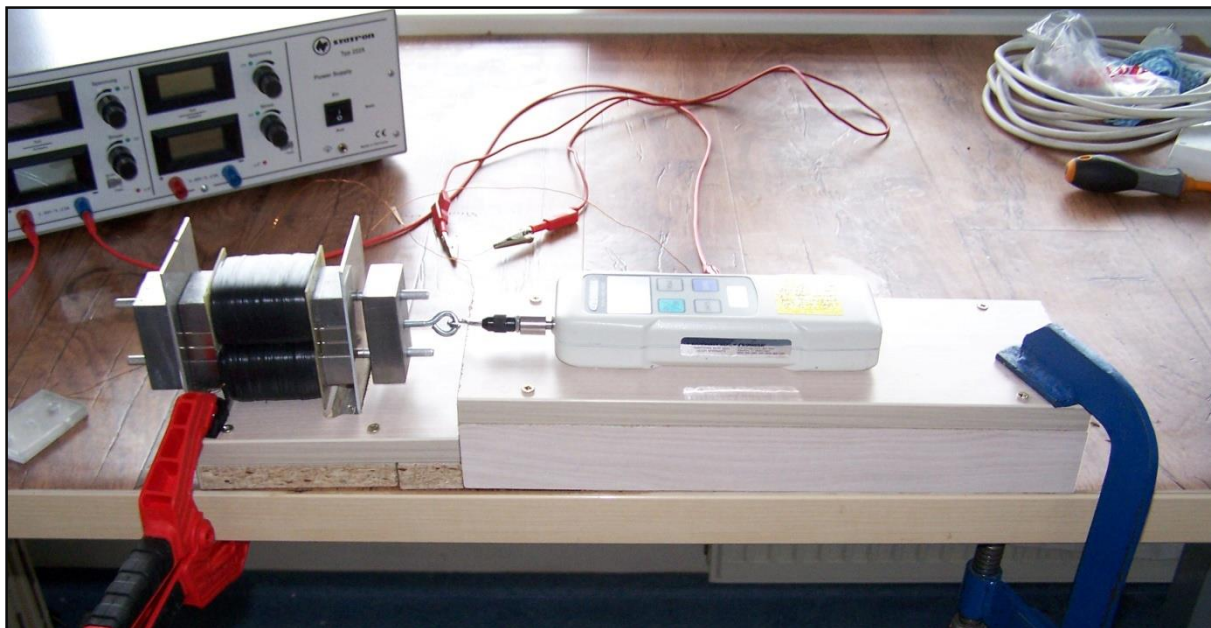
## 7 Experimentální ověření aktuátoru

Experimentální ověření aktuátoru spočívá v měření síly působící na pohyblivá jádra v závislosti na velikosti vzduchové mezery. K měření byl použit průmyslový digitální siloměr OMEGA DFG60-110 umožňující měřit sílu v tahu a tlaku až do hodnot 490 N. K měření bylo

nutné upevnit aktuátor i siloměr tak, aby se nemohly pohybovat a ovlivnit tak měření. Zároveň musí být umožněno měnit velikost vzduchové mezery v rozsahu několika mm. Siloměr je vybaven háčkem, za který je nutno pohyblivé jádro zachytit. Proto bylo nutné v pohyblivém jádru vytvořit otvor se závitem, pro očko se závitem. Hloubkou závitu očka v jádře, popř. i výměnou za očko s jinou délkou závitu lze volit velikost vzduchové mezery. Bylo dostačující takto uzpůsobit pouze jedno jádro, z důvodu symetrie aktuátoru. Efekt silového působení lze obrátit tím, že se změní směr protékání proudu. Vzduchová mezera na opačné straně je zajištěna vkládáním plastových destiček o různých tloušťkách mezi druhé pohyblivé jádro a pevnou část.

## 7.1 Výroba přípravku pro měření

Katedra teoretické elektrotechniky bohužel nevlastní přípravek vhodný pro tento experiment, proto jsem musel použít přípravek vlastní výroby. Přípravek by neměl nijak interagovat s magnetickým polem a zároveň být dostatečně pevný pro přesnost měření. Rozhodl jsem se pro horizontální provedení měření a jako nosnou část jsem použil dřevotřískovou desku. Kvůli snazší manipulaci se siloměrem a nastavování vzduchové mezery jsem se rozhodl připevnit aktuátor i siloměr každý na samostatnou desku. Připevnění siloměru bylo jednoduché, na spodní straně jsou připraveny otvory pro šrouby. K uchycení aktuátoru jsem použil nemagnetický plech o tloušťce 2 mm, který jsem ohnul, vyvrtal do něj otvory pro kluzné kontakty a pomocí něho připevnil nepohyblivou část aktuátoru k desce. Důvodem této volby byl požadavek na materiál velmi pevný a zároveň co nejtenčí, protože je tím určena minimální dosažitelná velikost vzduchové mezery. Průběh experimentu je zobrazen na Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Experimentální ověření aktuátoru

## 7.2 Postup měření

Základním charakteristickým prvkem klasických elektromechanických aktuátorů je jejich statická charakteristika, tedy závislost síly na poloze jádra pro různou velikost proudu. PPMT aktuátor obsahuje navíc permanentní magnety a má dvě pohyblivá jádra, tedy variant k měření je více. Součástí experimentálního ověření by mělo být proměření všech důležitých stavů. Jak již bylo několikrát řečeno, měřit se bude závislost síly působící na jedno pohyblivé jádro na vzduchové mezeře. Její velikost je z konstrukčních důvodů omezena. Použitím nemagnetických plechů na uchycení aktuátoru je její minimální velikost stanovena na 2 mm. Pro měření síly siloměrem je nutné, aby měřený objekt nedoléhal na jiný, ale byl držen pouze siloměrem. Proto jsem minimální měřenou vzduchovou mezeru zvolil 3 mm, maximální hodnotu jsem stanovil 10 mm.

Pro napájení jsem použil laboratorní zdroj Statron 2225 s rozsahem proudu 0–2,5 A. Tento rozsah bude plně dostačující, pro drát o průměru 0,5 mm rozhodně nedosahuje proudová zatížitelnost takových hodnot. Aktuátor bude vždy napájen jen po krátkou dobu potřebnou k zaznamenání velikosti síly, proto si mohu dovolit napájet cívky větším proudem, než při trvalém zatížení.

Prvním bodem měření je stav s přitaženými oběma kotvami, se stejnými vzduchovými mezerami a bez protékajícího proudu. Pro zvýšení přesnosti jsem měření opakovl třikrát a z naměřených hodnot udělal průměr, viz Tab. 7.1.



**Tab. 7.1:** Naměřené hodnoty pro přitažené obě kotvy,  $I = 0$  A

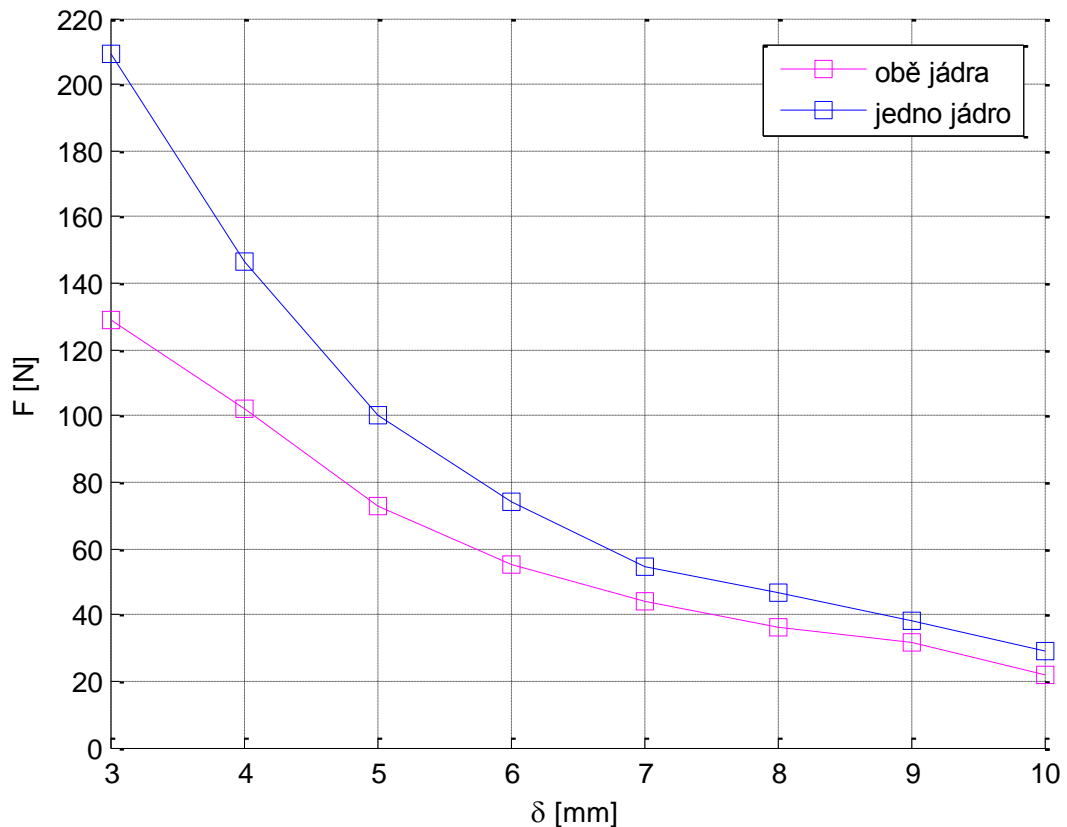
$\delta$ [mm]	10	9	8	7	6	5	4	3
$F_1$ [N]	22,1	30,1	36,2	42,0	56,7	72,0	109,5	133,1
$F_2$ [N]	22,3	32,0	37,4	46,3	53,5	73,2	96,5	128,3
$F_3$ [N]	21,6	33,2	35,1	44,2	54,9	72,7	100,8	125,1
$F$ [N]	22,0	31,8	36,2	44,2	55,0	72,6	102,3	128,8

Druhé měření se věnuje stavu s přitaženou pouze jednou kotvou a silovému působení na ni, jinak je shodné s prvním měřením.

**Tab. 7.2:** Naměřené hodnoty pro přitaženou jednu kotvu,  $I = 0$  A

$\delta$ [mm]	10	9	8	7	6	5	4	3
$F_1$ [N]	29,2	33,5	40,3	50,6	74,9	102,5	151,5	205,0
$F_2$ [N]	27,8	39,4	49,8	57,8	72,2	100,0	142,7	216,1
$F_3$ [N]	30,2	42,6	49,6	55,7	75,6	98,0	146,1	206,8
$F$ [N]	29,1	38,5	46,6	54,7	74,2	100,2	146,8	209,3

Na Obr. 7.2 je zobrazeno porovnání naměřených hodnot obou stavů. Trend je zde podobný jako pro numerický model, pro větší vzduchovou mezeru jsou velikosti sil obou stavů velmi blízké, s klesající  $\delta$  je rozdíl výraznější.



Obr. 7.2: Graf závislosti síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajícího proudu, pro přitažené jedno a obě jádra, experimentální ověření

Třetí měření mělo za úkol ukázat vliv proudu protékajícího cívkami na magnetické pole magnetů. Zvolil jsem variantu s oběma jádry a proudy od 0,5 do 2 A s krokem 0,5 A. Zvětšením proudu se zvýší velikost síly působící na jedno jádro a sníží na jádro druhé. Protože je pro měření uzpůsobena jen jedna strana aktuátoru, měřil jsem pořád sílu na jedno jádro a pro získání hodnoty druhého jádra obrátil směr proudu. Proto se v Tab. 7.3 nachází i záporné hodnoty proudu. Pro úplnost byl přidán i řádek hodnot bez protékajícího proudu.

Toto měření bylo prováděno pouze jednou z důvodu tepelné náročnosti na cívky a tedy i časové náročnosti měření. S klesající velikostí vzduchové mezery síla obecně roste. To úplně neplatí v oblasti vysokého proudu a malé vzduchové mezery. Hodnoty zde jsou velmi podobné, chyba vznikla pravděpodobně nepřesným nastavením velikosti vzduchové mezery. S klesající hodnotou proudu (včetně znaménka) velikost síly působící na jádro roste. Výjimkou jsou poslední dvě hodnoty pro vzduchovou mezeru 3 mm. Lze předpokládat takovou hodnotu síly, na kterou už nebyl měřicí přípravek, popř. ani siloměr, dimenzován. Proto nemají tyto hodnoty žádnou vypovídací hodnotu a ze souboru dat je možno je vyloučit.

Vzhledem k velkému množství parametrů hodnot (pro závislost síly na vzduchové mezeře nebo proudu) jsem se rozhodl tuto tabulku graficky nezobrazit.

**Tab. 7.3:** Velikost síly pro přitažené obě kotvy v závislosti na proudu a vzduchové mezeře

F [N]		$\delta$ [mm]							
		10	9	8	7	6	5	4	3
I [A]	2	5,8	7,4	9,0	9,5	11,3	12,5	11,8	7,1
	1,5	8,3	11,9	14,2	15,9	17,5	22,9	30,2	28,1
	1	12,9	18,8	22,5	24,9	28,7	42,7	48,9	45,7
	0,5	17,8	27,5	32,4	38,9	43,0	67,4	83,4	88,3
	0	22,0	31,8	36,2	44,2	55,0	72,6	102,3	128,8
	-0,5	28,4	36,8	46,6	53,9	66,7	113,2	176,2	192,1
	-1	37,4	46,8	62,6	74,5	89,3	158,4	213,8	254,0
	-1,5	48,0	60,8	79,2	94,2	115,5	230,2	338,0	267,7
	-2	58,0	78,1	103,5	119,2	178,4	321,6	370,0	280,4

## 8 Analýza výsledků

Posledním bodem této práce je porovnání výsledků dosažených pomocí analytického a numerického modelu a experimentálního ověření. Nejprve srovnám ustálené stavy s přitaženou jednou a oběma kotvami, zobrazené na Obr. 5.2, Obr. 5.4 a Obr. 7.2.

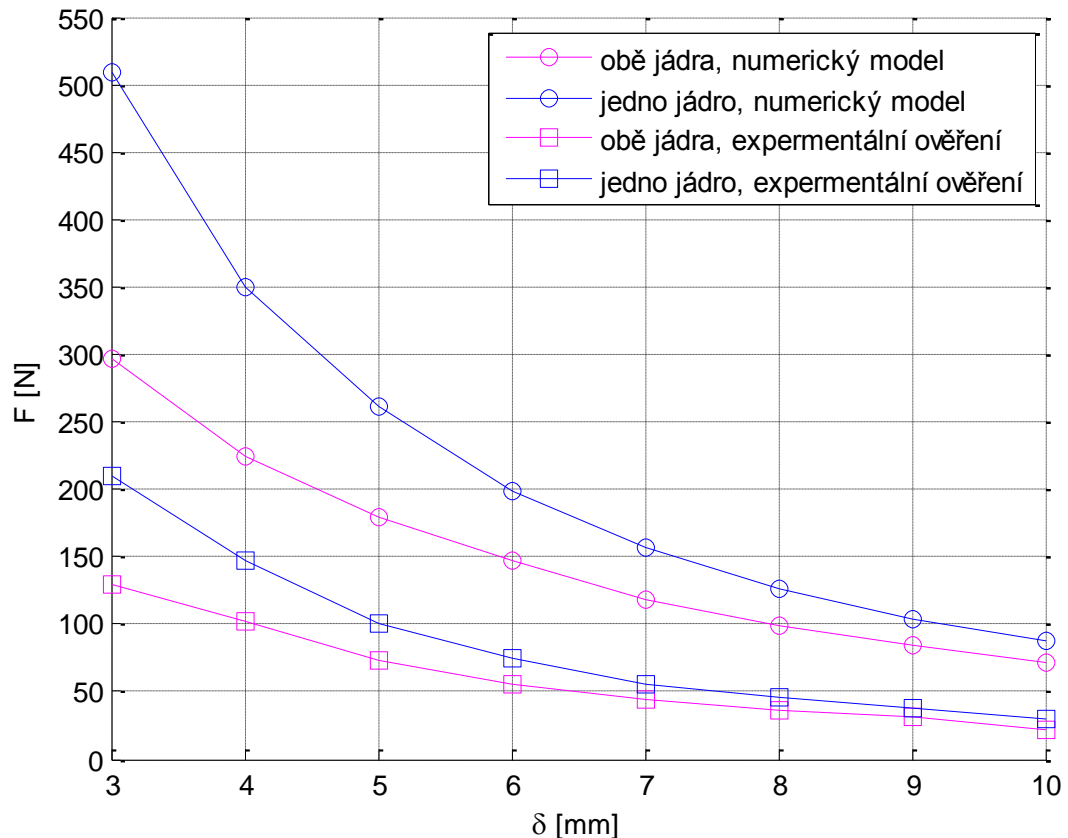
### 8.1 Význam analytického modelu

Analytický model potvrzuje základní předpoklady. Velikost síly roste s přiblížením jádra/jader k pevné části. Síla působící na příslušné jádro je větší, pokud druhé není součástí magnetického obvodu. Nejdůležitější závěr plynoucí z analytického modelu je ten, že není možné dosáhnout dvojnásobné hodnoty magnetické indukce a tedy čtyřnásobného silového působení na jádro, viz podkapitola 5.1. Za zmínku též stojí fakt, že to, kolikanásobná hodnota síly (indukce) bude po odpadnutí jádra, rozhoduje také velikost vzduchové mezery, viz Obr. 5.2. Poměr mezi silami v závislosti na  $\delta$  tedy není konstantní ani při zanedbání rozptylového toku. To je z hlediska důležitých vlastností analytického modelu vše, získané výsledky nemají vzhledem ke všem zanedbáním kvantitativní význam.

### 8.2 Porovnání numerického modelu s experimentálním ověřením

Grafy získané numerickým modelem i experimentálním ověřením mají základní tvary a vlastnosti jako analytický model. Zde už jsou však rozhodující i číselné hodnoty a ne jen trend

nárůstu/poklesu křivky. Obr. 8.1 zobrazuje hodnoty obou ustálených stavů získaných numericky a experimentálně. Na první pohled je patrné, že výsledky jednotlivých metod se vůbec neshodují. Tato odchylka je způsobena kombinací chyby numerického modelu a chyby experimentálního ověření.



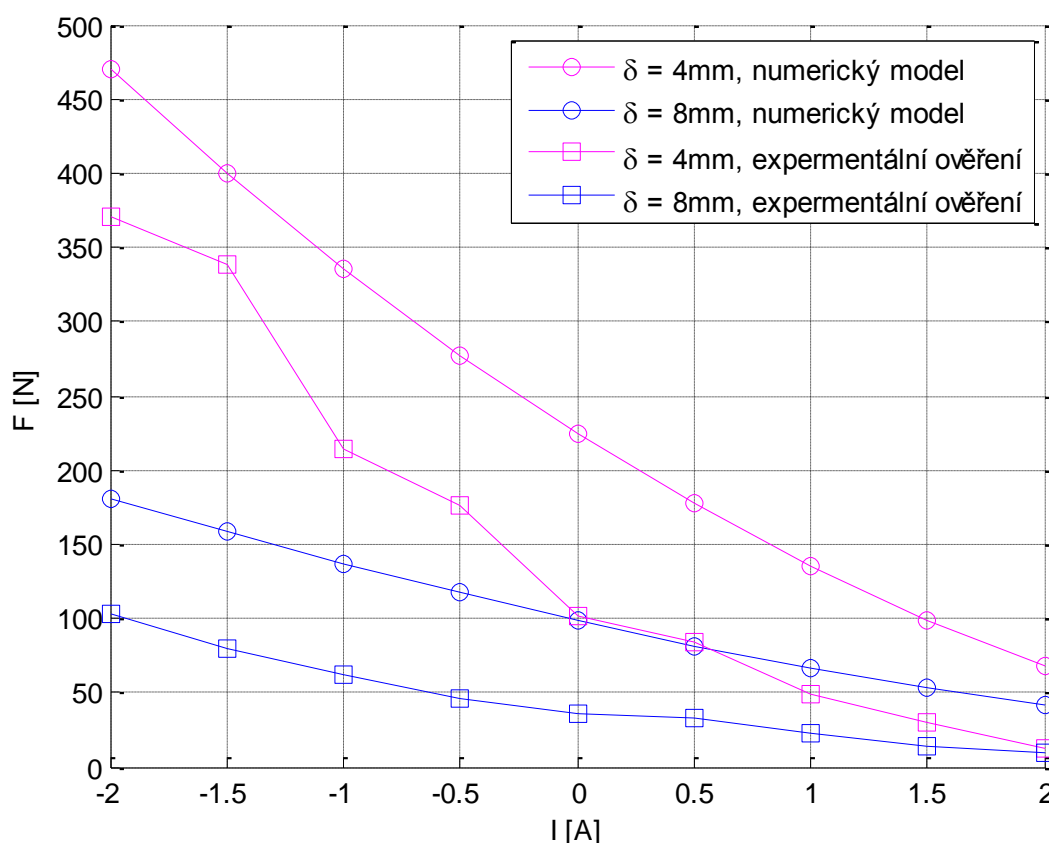
Obr. 8.1: Graf porovnání numerického modelu a experimentálního ověření, závislost síly na velikosti vzduchové mezery bez protékajícího proudu, pro přitažené jedno a obě jádra

Numerický model slouží ke správnému rozložení magnetického pole včetně rozptylu. Nerespektuje však nelinearitu magnetů a železa a tedy vliv sycení. Vzhledem k hodnotám remanentní indukce a koerzivní intenzity použitých magnetů je možné, že dochází k lokálnímu přesycování železa. Oproti numerickému modelu to znamená pokles relativní permeability a zvýšení rozptylového toku a tedy reálný pokles síly.

Druhou příčinu takto rozdílných výsledků lze hledat v samotném experimentálním ověření. Dodržení všech podmínek pro použití siloměru je jeho chyba definována jako  $\pm 0.2\%$  F.S.  $\pm 1$  LSD, oproti naměřeným hodnotám zanedbatelná. Velký podíl na chybě měření může mít vyrobený přípravek. Tím, že je rozdělen na dvě části, může se část energie ztratit

mírným nakloněním částí k sobě. Díl se siloměrem je pevně uchycen kovovými svorkami. Ty však nemohly být použity pro díl s aktuátorem a byly nahrazeny plastovými. U nich byla při vysokých hodnotách síly i opticky viditelná jistá vůle. Dalším faktorem mohou být použité vruty, které mohly mírně ovlivnit magnetické pole, nepřesné a nestejné nastavení vzduchové mezery na obou stranách a mírná vůle plechů držících pevnou část aktuátoru. Neopatrnou manipulací při výrobě se podařilo kousek magnetu uštipnout a tím také mírně zhoršit jeho vlastnosti.

Obr. 8.2 zobrazuje vliv proudu na sílu při konstantní vzduchové mezeře (naměřené hodnoty z Tab. 7.3). Je zde opět viditelný rozdíl numerického a reálného modelu, avšak trend změny síly je u obou modelů pro danou vzduchovou mezeru téměř totožný. Z toho lze vyvodit závěr, že chyba nebyla způsobena špatným nastavením vzduchové mezery při experimentálním ověření aktuátoru.



Obr. 8.2: Graf závislosti síly na velikosti a směru proudu pro dvě různé vzduchové mezery, porovnání numerického modelu a experimentálního ověření

## 9 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a experimentálním ověřením PPMT aktuátoru. Aktuátor byl popsán několika rovnicemi, pro jejichž řešení jsem použil software MATLAB. Největším přínosem tohoto teoretického řešení je zjištění, že není ani teoreticky možné dosáhnout stavu čtyřnásobného silového působení, ale síla bude vždy o něco menší.

Numerický model v programu Agros2D zobrazuje předpokládané rozložení magnetického pole a zpřesňuje výsledky získané pomocí rovnic pro magnetický obvod, respektive potvrzuje, že těchto teoretických hodnot je nemožné u reálného zařízení dosáhnout.

Na základě těchto modelů pro konkrétní uspořádání byl aktuátor vyroben. Jeho experimentální ověření zahrnuje statické charakteristiky ustálených stavů i stavu s různými hodnotami proudu procházejícího cívkami. Porovnání jednotlivých stavů mezi sebou plně odpovídá předpokladům stanovených teoretickými výpočty i numerickým modelem. Bohužel číselně si numerický a reálný model vůbec neodpovídají, hodnoty změřené jsou mnohem nižší. Tato odchylka má dvě příčiny. První je nerespektování nelinearity feromagnetických jader i permanentních magnetů, díky čemuž může docházet k lokálnímu přesycování magnetického obvodu a reálnému poklesu působící síly. Druhá příčina je skryta v samotném experimentálním ověření. Přípravek, na kterém ověření proběhlo je ručně vyrobený a má jisté vady, díky nimž jsou změřené hodnoty určitě menší, než reálné.

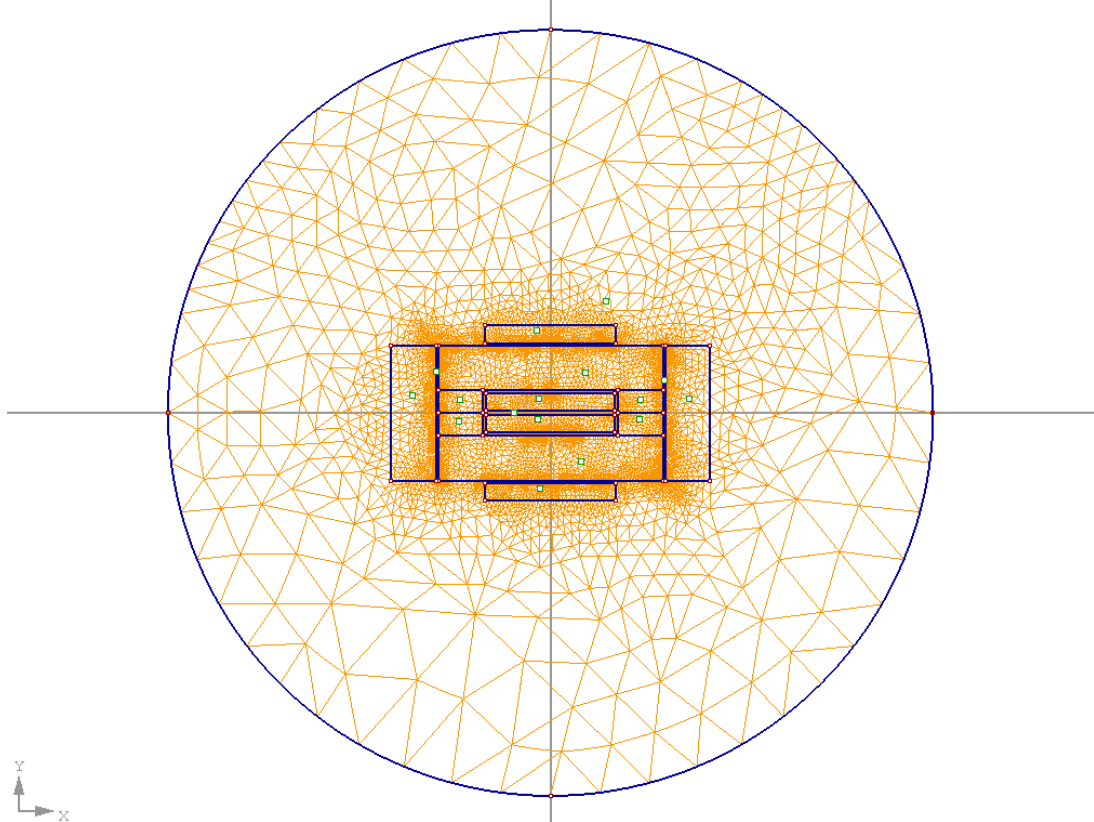
Přesto lze návrh považovat za úspěšný, protože aktuátor bezproblémově funguje a plně demonstruje sílu PPMT technologie. Toto uspořádání aktuátoru rozhodně není dokonalé, díky vlastnostem použitých magnetů bylo nutné vytvořit cívky s co největším počtem závitů, ale pořád je zapotřebí velkého proudu k ovládní aktuátoru.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

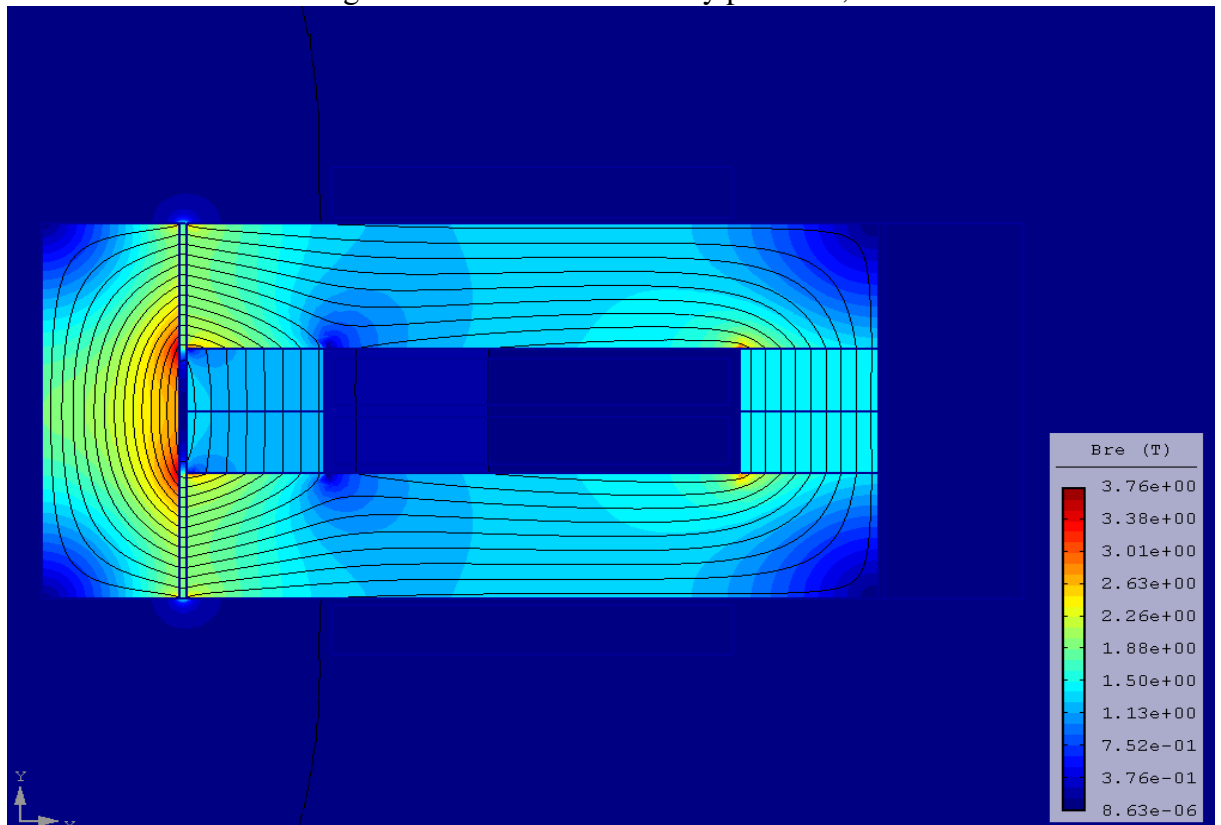
- [1] MAYER, Daniel, ULRYCH, Bohuš. *Elektromagnetické aktuátory*. 1. vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9
- [2] MAYER, Daniel. *Teorie elektromagnetického pole 1. díl*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2004. ISBN 80-7082-826-9
- [3] United States patent and Trademark Office [online]. Flynn, Charles J., US Patent No. 5455474 [cit. 16.2.2013]. Dostupné z: <http://patft.uspto.gov/netahhtml/PTO/srchnum.htm>
- [4] Flynn Research Inc. [online]. Oficiální internetová stránka [cit. 15.2.2013]. Dostupné z: <http://www.flynnresearch.net/>
- [5] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2009. ISBN 978-80-7043-509-0
- [6] Magsy, s.r.o. [online]. Oficiální internetová stránka [cit. 17.2.2013]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24797-neodymovy-magnet-ndfeb>
- [7] Abclinuxu [online]. Internetový portál [cit. 25.4.2013]. Dostupné z: <http://www.abclinuxu.cz/clanky/agros2d-aplikace-pro-reseni-fyzikalnich-poli>
- [8] MAYER, Daniel, POLÁK, Josef. *Metody řešení elektrických a magnetických polí*. 1. vyd. Bratislava: SNTL – Nakladatelství technické literatury, n. p. jako společné vydání s n. p. Alfa, vydavatelství technické a ekonomické literatury, 1983.
- [9] 3D CAD Design Software SolidWorks [online]. Oficiální internetová stránka [cit. 28.4.2013]. Dostupné z: <http://www.solidworks.com/>

## Přílohy

### Příloha A – Triangulace celé pracovní oblasti



### Příloha B – Rozložení magnetické indukce $B$ a kontury pro $J = 4,1 \text{ A mm}^{-2}$ a $\delta = 1 \text{ mm}$





**Příloha C – Výrobní výkresy pevného a pohyblivého jádra**

