

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**NÁVRH A EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ  
ELEKTROMAGNETICKÉHO AKTUÁTORU**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2013/2014

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

Jméno a příjmení: Bc. Ivan NOVÝ  
Osobní číslo: E12N0019K  
Studijní program: N2644 Aplikovaná elektrotechnika  
Studijní obor: Aplikovaná elektrotechnika  
Název tématu: Návrh a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru  
Zadávací katedra: Katedra elektroenergetiky a ekologie

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

1. Zpracujte rešerši na téma elektromechanických měničů.
2. Formulujte problém, sestavte matematický model a vytvořte algoritmus pro výpočet.
3. Realizujte výpočet a na jeho základě optimalizujte parametry měniče.
4. Navrhněte experimentální ověření měniče.
5. Porovnejte výsledky získané z modelu a experimentu.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


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

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Anotace**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh, výrobu a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru. Účelem návrhu je dosažení konstantní síly aktuátoru v nejvyšším možném rozsahu pohybu jádra. Toho je docíleno vhodnou konstrukcí magnetického obvodu. Sestavení matematického modelu a numerický výpočet aktuátoru byl realizován v aplikaci Agros2D, která je určena pro řešení fyzikálních polí. Na základě výsledků byla provedena optimalizace parametrů aktuátoru. Podle navrženého modelu byl následně vyroben reálný aktuátor. Na něm pak bylo provedeno měření statických charakteristik. Výsledky měření byly porovnány s matematickým modelem.

## **Klíčová slova**

Elektromagnetický aktuátor, feromagnetické jádro, metoda konečných prvků (FEM), matematický model, optimalizace, parametrická studie, statická charakteristika

## **Abstract**

This final thesis is focused on a suggestion, a production and on an experimental verification of an electromagnetic actuator. The objective is to achieve a constant force of the actuator in its highest possible extend of the core motion. It is achieved by a suitable construction of a magnetic circuit. Both composition of mathematical model and numerical calculation of the actuator were realized in the application Agros2D intended for physical fields solving. On the basis of results were made the optimization of actuator specifications. According to the suggested model was produced a real actuator. After that it was used for measuring of static characteristics. The results of measuring were compared with the mathematical model.

## **Key words**

Elektromagnetic actuator, ferromagnetic core, finite element method (FEM), mathematical model, optimization, parametric study, static characteristic

## Prohlášení

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

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou 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 diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 12.5.2014

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu práce Doc. Ing. Pavlu Karbanovi Ph.D. a konzultantovi Ing. Františkovi Machovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A JEJICH JEDNOTKY</b> .....	<b>11</b>
<b>1. Úvod do oblasti elektromechanických měničů</b> .....	<b>12</b>
1.1. Základní pojmy .....	12
1.2. Dělení elektromagnetických aktuátorů .....	14
1.3. Požadavky kladené na elektromagnetické aktuátory .....	15
1.4. Využití elektromagnetických aktuátorů .....	16
<b>2. Koncepte technického řešení</b> .....	<b>17</b>
2.1. Zadané požadavky na řešený aktuátor .....	17
2.2. Základní konstrukce aktuátoru .....	17
2.3. Základní popis funkce.....	18
<b>3. Teoretický rozbor</b> .....	<b>20</b>
3.1. Síly v magnetickém poli .....	20
3.2. Jouleovy ztráty v induktoru.....	21
3.3. Formulace problému .....	21
3.4. Sestavení matematického modelu.....	23
3.4.1. Metoda okrajové úlohy pro rovnice potenciálů.....	23
3.4.2. Vektorový magnetický potenciál.....	23
3.4.3. Sestavení matematického modelu .....	24
3.4.4. Řešení okrajové úlohy .....	27
3.5. Algoritmus pro výpočet.....	27
3.5.1. Energetický funkcionál.....	28
3.5.2. Zpracování softwarovými produkty .....	28
<b>4. Návrh elektromagnetického aktuátoru</b> .....	<b>30</b>
4.1. Realizace výpočtu .....	30
4.2. Návrh a optimalizace aktuátoru.....	33
4.3. Návrh elektrického obvodu .....	40
<b>5. Výroba navrženého aktuátoru</b> .....	<b>42</b>
<b>6. Experimentální ověření</b> .....	<b>43</b>
<b>7. Optimalizace tvarem jádra aktuátoru</b> .....	<b>46</b>
<b>8. Závěr – stručné shrnutí, porovnání výsledků</b> .....	<b>48</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>49</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>50</b>



<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>51</b>
<b>SEZNAM PŘÍLOH .....</b>	<b>51</b>

## Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh, výrobu a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru. Text je rozdělen do pěti částí. Úvodem je zmíněna problematika aktuátorů, základní dělení, požadavky na aktuátory a využití v současných technologiích. Ve druhé části je řešena koncepce technického řešení, kde je charakterizována základní konstrukce aktuátoru a popis jeho funkce. V následující třetí části je popisován teoretický rozbor, tj. transformace energie, vznik silového působení, ztráty, sestavení matematického modelu a algoritmu pro výpočet. Čtvrtá část obsahuje návrh magnetického a elektrického obvodu aktuátoru a dále optimalizaci jeho parametrů. Pátá, závěrečná část, je věnována výrobě, experimentálnímu ověření výsledků získaných z aplikace Agros2D a reálného aktuátoru a stručnému shrnutí.

## Seznam použitých veličin a jejich jednotky

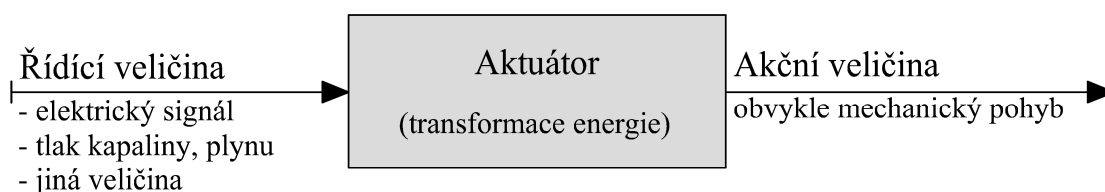
$A$	[Wb/m]	Vektorový magnetický potenciál
$B$	[T]	Magnetická indukce
$D$	[C/m <sup>2</sup> ]	Elektrická indukce
$E$	[V/m]	Intenzita elektrického pole
$F$	[N]	Síla
$H$	[A/m]	Intenzita magnetického pole
$I$	[A]	Elektrický proud
$J$	[A/m <sup>2</sup> ]	Hustota vodivého proudu
$L$	[H]	Vlastní indukčnost
$P_J$	[J]	Ztrátový výkon (Jouleovy ztráty)
$R$	[Ω]	Elektrický odpor
$U_m$	[A]	Magnetické napětí
$W_m$	[J]	Energie magnetického pole
$w_e$	[J/m <sup>3</sup> ]	Hustota energie elektrického pole
$w_m$	[J/m <sup>3</sup> ]	Hustota energie magnetického pole
$\varepsilon_0$	[F/m]	Permitivita vakua
$\mu_0$	[H/m]	Permeabilita vakua
$\varepsilon_r$	[-]	Relativní permitivita
$\mu_r$	[-]	Relativní permeabilita
$\Phi$	[Wb]	Magnetický indukční tok
$\psi$	[C]	Elektrický indukční tok

*Pozn.: V textu diplomové práce jsou skalární veličiny zapisovány kurzívou, vektorové veličiny tučnou kurzívou.*

# 1. Úvod do oblasti elektromechanických měničů

## 1.1. Základní pojmy

Základním pojmem využívaným v této oblasti je aktuátor. Často se také používají pojmy akční člen nebo výkonový převodník. Obecně jde o zařízení, které transformuje vstupní energii - řídicí veličinu, na výstupní energii - akční veličinu, která je obvykle navázaná na mechanický pohyb, viz obr. 1.1.



Obr. 1.1. Blokové schéma obecného aktuátoru.

Princip transformace energie v aktuátoru je dán charakterem přiváděné vstupní energie. Tato energie může být různého původu, např. elektrická, elektromagnetická, mechanická, tlaková, teplotní, světelná apod. Základní dělení aktuátorů podle fyzikální povahy řídicí veličiny je na:

- elektromechanické aktuátory řízené elektrickým signálem
- pneumatické aktuátory řízené tlakem kapaliny
- hydraulické aktuátory řízené tlakem plynu
- speciální aktuátory řízené např. teplotou, světlem apod.

Elektromechanické aktuátory jsou v současné době významnými a často používanými prvky ve všech vyspělých technologiích. Jsou to zařízení převádějící elektrické napětí nebo proud na vstupu aktuátoru, na akční veličinu na výstupu, nejčastěji na mechanický pohyb – posun, pootočení, točivý moment, nebo na jiné projevy silového působení – např. deformaci. Elektromechanické aktuátory pracují buď na principu silového působení elektrického pole na elektricky nabitý vodič, popř. na dielektrikum, nebo na principu silového působení magnetického pole na feromagnetický materiál, nebo na proudovodiče (resp. cívku). Některé speciální typy aktuátorů s elektrickým nebo magnetickým polem, jako např. termoelastické,

piezoelektrické, elektrostriční, magnetostrickční, využívají specifických vlastností některých materiálů [1].

Elektromechanická transformace je zpravidla uskutečňována působením sil mezi statickou a pohyblivou částí aktuátoru, které jsou od sebe odděleny vzduchovou mezerou. Pro výpočet energie v této mezeře jsou významnými veličinami permitivita  $\varepsilon_0$  vakua a permeabilita vakua  $\mu_0$  [14]. Hodnoty těchto materiálových konstant jsou:

$$\varepsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \quad \text{F/m}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} = 1,256 \cdot 10^{-6} \quad \text{H/m}$$

Pokud jsou např. zvoleny hodnoty pro elektrickou intenzitu  $E = 3 \cdot 10^6$  V/m a pro magnetickou indukci  $B = 1,6$  T, a poté dosazeny do vztahů pro objemovou hustotu energie:

$$\text{elektrického pole } w_e = \frac{1}{2} ED = \frac{1}{2} \varepsilon E^2, \quad \varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r$$

$$\text{magnetického pole } w_m = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu H^2 = \frac{1}{2} \frac{B^2}{\mu}, \quad \mu = \mu_0 \mu_r$$

vychází poměr hustot energií (relativní permitivita vzduchu  $\varepsilon_r \cong 1$ , relativní permeabilita vzduchu  $\mu_r \cong 1$ ) [14]:

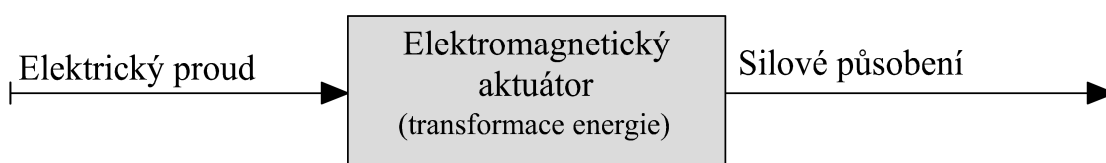
$$\frac{w_m}{w_e} \cong 2,55 \cdot 10^4$$

Lze tedy vyvodit závěr, že aktuátory pracující na principu sil vyvolaných elektrickým polem nejsou vhodné pro transformaci velkých výkonů, neboť je u nich dosahována nízká hustota energie elektrického pole a s tím související nepatrné síly. Jsou však využívány v oblastech s velmi malými výkony (např. mikromotory nebo kondenzátorové mikrofony), kde nelze aplikovat aktuátory pracující na principu sil vyvolaných magnetickým polem. Důvodem je požadavek magnetického obvodu na velký objem. Naopak, aktuátory fungující na principu magnetického pole dosahují vysoké hustoty energie magnetického pole a tím také velkého silového působení. Proto jsou nejrozšířenější v aplikacích, kde je uvažováno s transformací velkých výkonů, např. u elektromotorů, elektromagnetů [14]. Obecně platí, že výše popsáná převaha magnetických sil nad elektrickými je platná pouze z makroskopického pohledu. V mikroskopickém měřítku převažuje elektrická síla nad magnetickou.

Nepostradatelným konstrukčním materiálem aktuátorů s magnetickým polem jsou feromagnetické látky, jejichž relativní permeabilita dosahuje značně vysokých hodnot. Svými

vlastnostmi tak prezentují jistou anomálii v přírodě, kdy vnějším magnetickým polem s poměrně nízkou intenzitou  $H$  je u nich možné dosáhnout vysokých hodnot magnetické indukce  $B$ .

Obsahem diplomové práce bude dále podrobnější rozbor aktuátorů, které jsou řízené elektrickým signálem, tedy elektromechanických aktuátorů, resp. elektromagnetických aktuátorů, které jsou podmnožinou elektromechanických aktuátorů. Blokové schéma elektromagnetického aktuátoru je znázorněno na obr. 1.2.



Obr. 1.2. Blokové schéma elektromagnetického aktuátoru.

## 1.2. Dělení elektromagnetických aktuátorů

Obecně lze dělit elektromagnetické aktuátory podle různých hledisek. Základní dělení je uvažováno podle závislosti vstupního elektrického signálu, resp. proudu na čase, podle počtu fází a podle způsobu mechanického pohybu na výstupu.

Dělení aktuátorů podle závislosti vstupního elektrického proudu na čase:

- stejnosměrné aktuátory, u nichž je vstupní řídicí veličina - elektrický proud časově neproměnný
- střídavé aktuátory, u nichž se vstupní řídicí veličina - elektrický proud s časem periodicky mění

Dělení střídavých aktuátorů podle počtu fází:

- jednofázové aktuátory
- vícefázové, nejčastěji trojfázové aktuátory

Dělení podle způsobu mechanického pohybu na výstupu (vyskytují se i kombinace uvedených způsobů):

- lineární aktuátory - tj. s posuvným neboli translačním pohybem – akční veličina působí po přímce. Využívají přímého působení magnetického pole na feromagnetikum, popř. na cívky protékané proudem, nebo nepřímého působení tím, že je realizován elektrický odporový, popř. indukční ohřev dilatačního prvku – jsou to tzv. termoelastické aktuátory. Mezi lineární aktuátory se řadí i lineární motory využívající principy elektrických točivých strojů.
- rotační aktuátory – tj. s točivým pohybem – akční veličina působí po kružnici. Jedná se o různé typy elektrických motorů, např. synchronní, asynchronní, komutátorové.
- aktuátory s více stupni volnosti – akční veličina působí ve více směrech. Příkladem mohou být planární aktuátory, kde pohyb na výstupu je realizován v rovině, nebo sférické aktuátory, u nichž je pohyb na výstupu realizován na kulové ploše [1].

### 1.3. Požadavky kladené na elektromagnetické aktuátory

Vzhledem k rozmanitosti využití a velkému rozsahu výkonů, se kterými pracují různé typy elektromagnetických aktuátorů, je zřejmé, že i nároky kladené na tato zařízení se budou lišit podle konkrétní aplikace. Kromě obecných požadavků, jako jsou např. rozměry, tvar, hmotnost, velikost budícího proudu, maximální oteplení, účel použití atd., je při návrhu podstatným hlediskem statická charakteristika aktuátoru. Ta udává závislost síly působící na pohyblivé jádro, na poloze tohoto jádra, resp. na velikosti vzduchové mezery. Požadovanými parametry jsou:

- tvar charakteristiky – např. plochá, strmá, stoupající, klesající
- interval síly vyvinuté aktuátorem
- rozmezí posunu pohyblivého jádra
- doba funkce aktuátoru – krátkodobá, trvalá

Tyto parametry, resp. statickou charakteristiku, lze modifikovat v širokém rozsahu vhodnými konstrukčními úpravami magnetického obvodu, včetně pohyblivého jádra, volbou použitých materiálů nebo velikostí, popř. průběhem budícího proudu.

Pokud je požadováno vyšetření přechodových jevů v aktuátorech, využívají se dynamické charakteristiky. Jestliže mají být respektovány nelinearity magnetického obvodu je i z hlediska numerického výpočtu zpracování dynamických charakteristik značně pracné. V tomto případě aktuátor prezentuje elektromechanický obvod, v němž se uplatňují aktivní elektrické prvky (zdroje napětí a proudu), pasivní elektrické prvky (rezistory, cívky, kondenzátory), aktivní mechanické prvky (zdroje sil), pasivní mechanické prvky (hmota, tlumiče, pružiny). Takový obvod je popisován soustavou diferenciálních rovnic 1. řádu, tzv. stavovými rovnicemi, kde proměnnými veličinami jsou napětí, proudy, posuvy, rychlosti a zrychlení [1].

#### 1.4. Využití elektromagnetických aktuátorů

S elektromagnetickými aktuátory je v současnosti možné se setkat v mnoha oborech lidské činnosti. Jsou vyráběny v různých konstrukčních úpravách a velikostech, s různými parametry, od zařízení pracujících s malými výkony v podobě tzv. mikroaktuátorů, po zařízení pracujících s velkými výkony [2]. Někdejší využití v podobě stykačů, relé, elektromagnetů, reproduktorů, měřicích přístrojů, motorů v elektromechanických pohonech je dnes rozšířeno do mnoha dalších oblastí, včetně nových vyspělých technologií, jako je např. automobilový průmysl, letecký průmysl, robotika, biomedicínké inženýrství, kosmonautika. Hojně jsou dnes využívány některé speciální typy elektromagnetických aktuátorů, jako jsou magnetické brzdy, čerpadla roztavených kovů, popř. lineární motory. Tyto motory jsou nasazovány např. za účelem řízeného pohybu regulačních tyčí atomových reaktorů.

Velká pozornost je v současnosti věnovaná vývoji tzv. mikroaktuátorů využívajícím elektromagnetické, elektrodynamické, magnetoelastické, magnetostriktivní principy. Jsou vyvíjeny mikroaktuátory využívající tzv. inteligentní materiály (např. s tvarovou pamětí). Všechny tyto mikroaktuátory je možné implementovat v systémech MEMS (mikroelektromechanické systémy), jenž mohou být využívány při výrobě speciálních integrovaných obvodů. Jsou nasazovány ve speciálních aplikacích v robotických systémech, lékařství, vojenské technice, kosmonautice atd. [2]. Další zajímavou myšlenkou je např. využití elektromechanických systémů používající ferokapalinu ke zvýšení silového působení, kdy je vzduchová mezera v magnetickém obvodu vyplněna ferokapalinou s permeabilitou  $\mu_r > 1$ . Přítomností ferokapaliny je způsoben pokles celkové reluktance a s tím související nárůst magnetické indukce, resp. velikosti síly.



## 2. Koncepce technického řešení

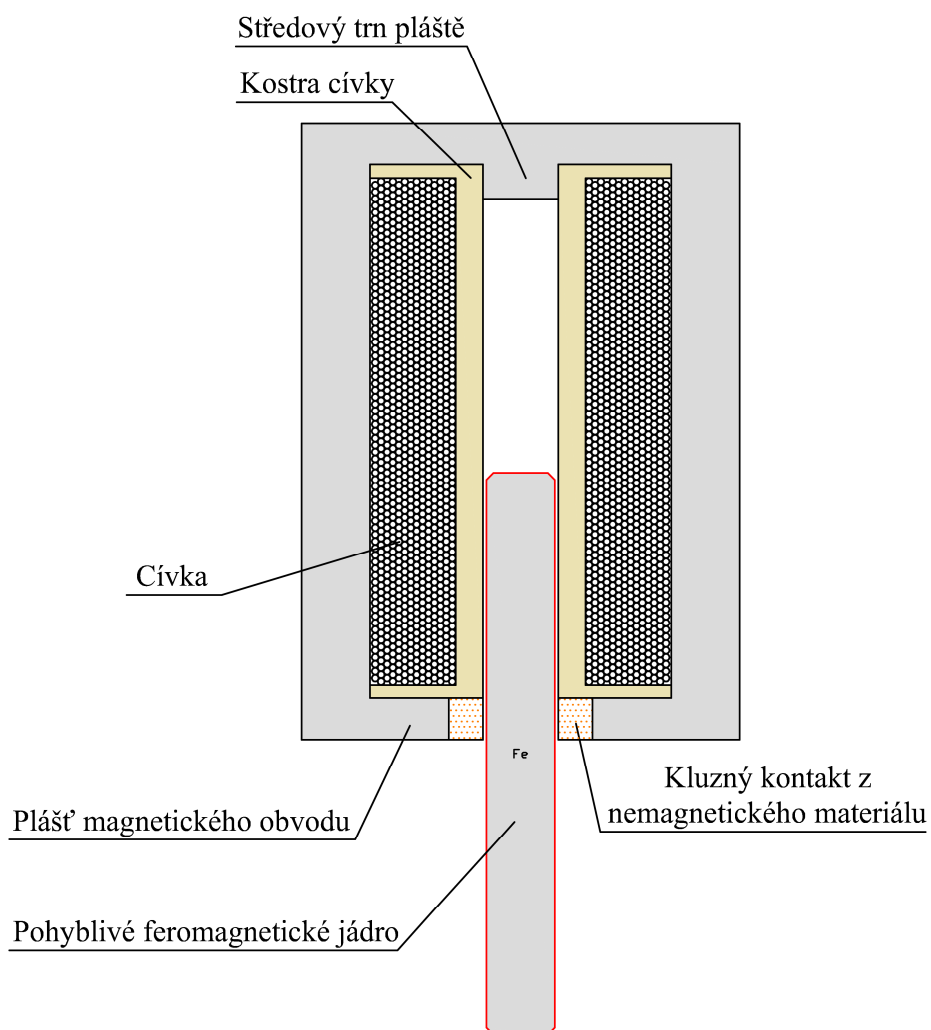
### 2.1. Zadané požadavky na řešený aktuátor

Zadání této diplomové práce bylo upřesněno tak, aby navrhovaný aktuátor splňoval tyto požadavky:

- 1) Bude navržen stejnosměrný lineární elektromagnetický aktuátor s posuvným (translačním) pohybem využívající silového působení magnetického pole na feromagnetický materiál.
- 2) Zdrojem magnetického toku aktuátoru budou dvě cívky. Po dosažení koncové polohy pohyblivého jádra bude možné proud do jedné cívky vypnout, druhá cívka bude ve funkci přídržné cívky s ohledem na minimalizaci budícího proudu aktuátoru v sepnutém stavu.
- 3) Hodnoty síly  $F$  vyvinuté aktuátorem budou v rozmezí desítek newtonů.
- 4) Dráha pohybu jádra bude v rozsahu jednotek centimetrů.
- 5) Hlavním cílem návrhu je dosažení konstantní síly aktuátoru v co největším rozsahu pohybu jádra vhodnou konstrukcí magnetického obvodu. Tzn., tvar statické charakteristiky má být plochý.

### 2.2. Základní konstrukce aktuátoru

Základní konstrukce aktuátoru, tj. uspořádání elektrického a magnetického obvodu, včetně jejich jednotlivých částí, je uvedeno na obr. 2.1. Elektrický obvod je vytvořen vinutím cívky, která je zdrojem pro vznik magnetického toku v aktuátoru. Cívka je zhotovena navinutím měděného izolovaného drátu na kostru cívky. Magnetický obvod aktuátoru je tvořen pláštěm a pohyblivým jádrem, které se pohybuje uprostřed v ose aktuátoru. Obě součásti jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu. Mezi pláštěm a jádrem je vložený kluzný kontakt z nemagnetického materiálu.



Obr. 2.1. Základní konstrukce aktuátoru.

### 2.3. Základní popis funkce

Princip funkce aktuátoru, který využívá silového působení magnetického pole na feromagnetické jádro je zřejmý z obr. 2.1. Pokud protéká cívkou o  $N$  závitů budící proud, indukuje se v magnetickém obvodu pláště a pohyblivého jádra magnetické pole o magnetické indukci  $B$ . Toto magnetické pole, uzavírající se feromagnetickým pláštěm a jádrem, silově působí na pohyblivé jádro.

Působící sílu lze rozložit na radiální a axiální složku. Jelikož jde v tomto případě o rotačně symetrické uspořádání aktuátoru, měla by se v ideálním případě radiální složka síly vyrovnat. V reálném případě však vždy dochází k nějaké nesymetrii, např. nedokonalým

navinutím cívky, nepřesnosti v geometrických rozměrech magnetického obvodu, a radiální složka síly tak není zcela potlačena. Pohyb jádra v radiálním směru lze omezit kluzným kontaktem z nemagnetického materiálu, který je vložen mezi pohyblivé jádro a plášť. Tímto uspořádáním se snižuje třecí síla a je zabráněno přímému spojení jádra a pláště. Vliv axiální složky síly se projevuje vtahováním pohyblivého jádra do aktuátoru.

Dále je z obr. 2.1. zřejmé, že v počáteční poloze jádra se nachází nejmenší vzduchová mezera právě mezi jádrem a pláštěm, tj. v místě kluzného kontaktu. Zde je soustředěna podstatná část energie magnetického pole, a proto v případě nesymetrie mohou být síly působící v radiálním směru mnohonásobně vyšší než síly v axiálním směru a pohyb jádra směrem do aktuátoru by nebyl vůbec realizován. V koncové poloze jádra, kdy jádro těsně dosedá na středový trn pláště, je naopak vliv axiální složky síly maximální a dosahuje mnohonásobné hodnoty síly, která působí v počáteční poloze jádra.

Se změnou polohy jádra dochází ke změnám poměrů sledovaných veličin v aktuátoru. Zmenšuje se vzduchová mezera mezi pohyblivým jádrem a středovým trnem pláště, zároveň dochází ke zvyšování síly v axiálním směru. Dále se mění rozložení magnetického pole, magnetického toku, magnetické indukce, magnetické intenzity, reluktance magnetického obvodu, hustoty energie, permeability v závislosti na magnetické indukci, velikost indukčností cívek.

### 3. Teoretický rozbor

Nástroje pro teoretický rozbor funkce elektromagnetického aktuátoru vycházejí ze znalostí teorie elektromagnetického pole, především pak soustavy Maxwellových rovnic. Pro základní popis elektromagnetického pole se využívají skalární, vektorové, popř. tenzorové veličiny, Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru pro popis v určitém bodě elektromagnetického pole a v integrálním tvaru pro popis elektromagnetického pole v jisté prostorové oblasti. Maxwellovy rovnice v integrálním tvaru jsou názornější, ale je výhodnější pracovat s jejich diferenciálním tvarem, který však platí pouze v regulárních bodech elektromagnetického pole.

Jelikož u navrhovaného aktuátoru je budící proud stejnosměrný, je uvažováno, při zanedbání přechodových jevů, časově neproměnné elektromagnetické pole, resp. stacionární proudové elektrické pole a stacionární magnetické pole. Pojem stacionární pole znamená, že náboje jsou v rovnoměrném pohybu, tj. vytváří elektrický proud, na rozdíl od pole statického, kdy jsou náboje v klidu. Proudovým polem je myšleno pole stacionárního elektrického proudu ve vodivém prostředí.

#### 3.1. Síly v magnetickém poli

Feromagnetický obvod pláště a feromagnetické pohyblivé jádro aktuátoru působí vzájemně na sebe silou prostřednictvím magnetického pole. Vlivem pohybu části magnetického obvodu – pohyblivého jádra, dochází ke změně indukčnosti cívky. Ze vztahu pro energii magnetického pole:

$$W_m = \frac{1}{2} LI^2$$

plyne závislost energie magnetického pole na změně indukčnosti, resp. na pohybu jádra aktuátoru. Při změně indukčnosti cívky posunutím části magnetického obvodu – pohyblivého jádra, ve směru osy  $z$  o element dráhy  $dz$ , bude vykonaná elementární práce  $dA = F_z dz$ . Tato elementární práce změní energii magnetického pole o hodnotu  $dW_m$  [11]. Proto platí, že:

$$F_z = \frac{dW_m}{dz}$$

Za předpokladu konstantního proudu v cívce, bude potom síla působící při změně indukčnosti:

$$F_z = \frac{1}{2} I^2 \frac{dL}{dz}$$

Z uvedeného vztahu vyplývá, že hodnota síly působící na pohyblivé jádro v ose  $z$ , se bude měnit v závislosti na poloze tohoto jádra, resp. bude závislá na velikosti vzduchové mezery. Tato závislost je znázorňována statickou charakteristikou aktuátoru. Statickou charakteristiku lze modifikovat v širokém rozsahu konstrukčními úpravami magnetického obvodu, popř. volbou materiálu nebo budícího proudu.

### 3.2. Jouleovy ztráty v induktoru

Průchodem elektrického proudu vodičem cívky o odporu  $R$  dochází k tzv. disipaci elektrické energie. Energie proudového pole se transformuje na tepelnou energii, vodič cívky se zahřívá a teplo se odvádí do okolního prostředí. Jde o nevratný proces. Vzniklé teplo je tzv. Jouleovo teplo a vyjadřuje se pomocí Jouleových ztrát (ztrátového výkonu)  $P_J$  [2]:

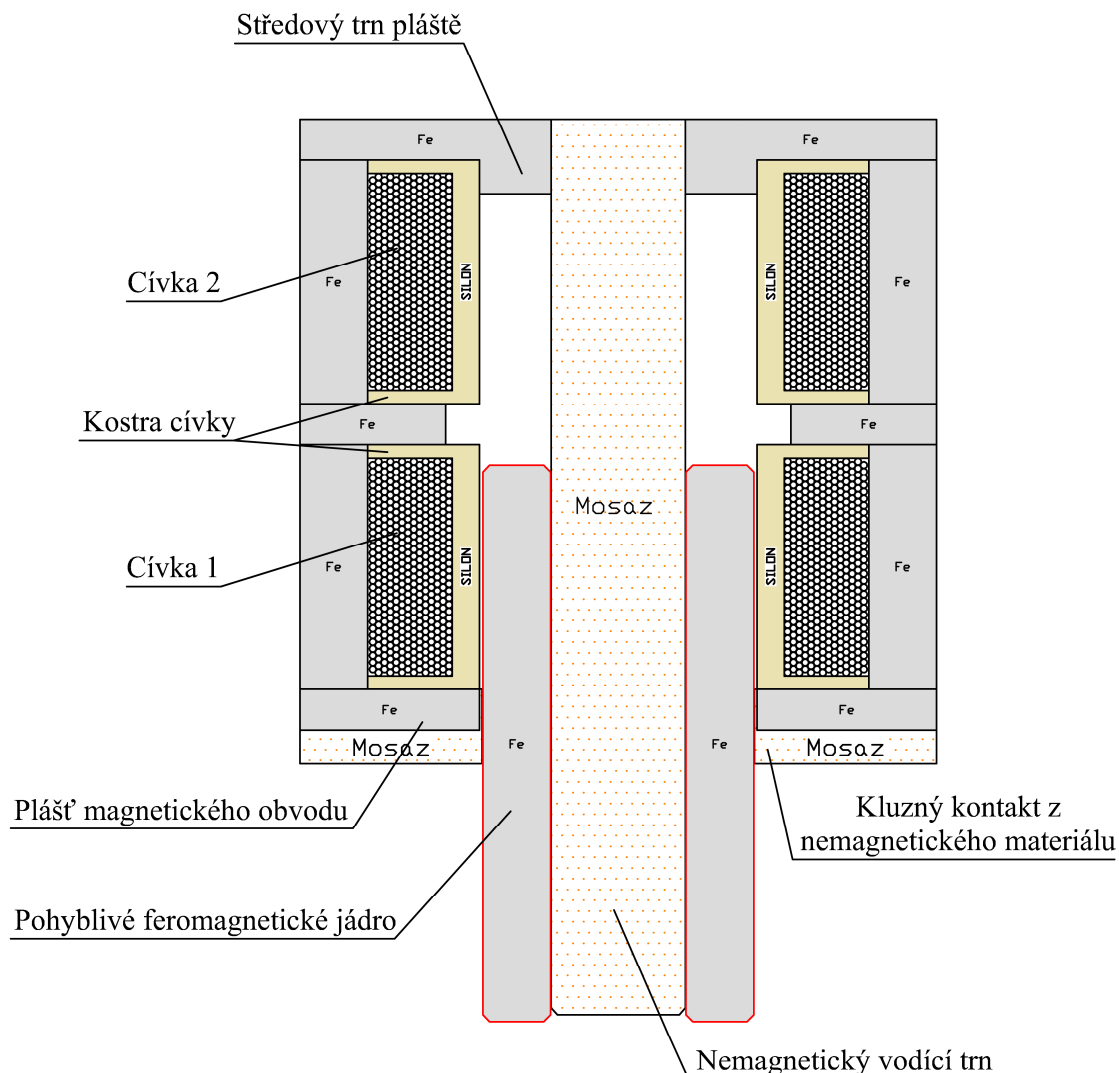
$$P_J = RI_b^2$$

Cívkami navrhovaného aktuátoru protéká stejnosměrný budící elektrický proud  $I_b$ . Proto je, vyjma přechodového děje, uvažováno stacionární magnetické pole aktuátoru, při němž se neuplatní vliv hystereze magnetického obvodu, ani ztráty energie vířivými proudy jako v případě časově proměnného magnetického pole. Z tohoto důvodu je magnetický obvod aktuátoru zhotoven z masivního železa. Z výše uvedeného plyne, že se v navrhovaném aktuátoru uplatňují pouze ztráty stacionárního proudového pole, tj. Jouleovy ztráty. Tyto ztráty jsou neúčinným efektem, který způsobuje oteplení aktuátoru a tím snižuje jeho účinnost [2].

### 3.3. Formulace problému

Konstrukce navrhovaného aktuátoru je zobrazena na obr. 3.1. Elektrický obvod tvoří dvě cívky, které jsou rozměrově i konstrukčně totožné. Plášť s pohyblivým jádrem, které jsou vyrobeny z feromagnetického materiálu, tvoří magnetický obvod aktuátoru. Uprostřed aktuátoru je nemagnetický vodič trn, po kterém se pohybuje feromagnetické jádro. V tomto konstrukčním provedení může při pohybu jádra síla vzrůstat jen do určité polohy jádra, pak se

může snižovat, zastavit, popř. působit v protisměru. Vše úzce souvisí s geometrickým uspořádáním magnetického obvodu pláště a pohyblivého jádra.



Obr. 3.1. Konstrukce navrhovaného aktuátoru.

Cílem návrhu aktuátoru je, aby v co největším rozsahu pohybu jádra aktuátoru působila co nejrovnoměrněji konstantní síla. Hodnota síly  $F$  vyvinutá aktuátorem má být v rozmezí desítek newtonu a dráha pohybu jádra má být v rozsahu jednotek centimetrů. Tyto požadavky mají být dosaženy vhodnou konstrukcí magnetického obvodu, přičemž zdrojem magnetického toku aktuátoru jsou dvě cívky, kterými prochází stejnosměrný budící proud. K analýze takto formulovaného problému je nutné znát rozložení magnetického pole navrhovaného aktuátoru. Vzhledem ke stejnosměrnému budícímu proudu protékajícího cívkami se tato práce bude dále věnovat stacionárnímu magnetickému poli.

### 3.4. Sestavení matematického modelu

#### 3.4.1. Metoda okrajové úlohy pro rovnice potenciálů

Jednou z metod vhodných pro řešení složitých 2D polí je univerzální metoda okrajové úlohy pro rovnice potenciálů. Metoda spočívá v řešení Poissonovy (Laplaceovy) rovnice pro skalární, resp. pro vektorový magnetický potenciál, která splňuje zadané okrajové podmínky a podmínky na rozhraní. Řešení je analytické nebo numerické [3].

Pojem řešení (analýza) stacionárního magnetického pole je možné si představit na následující úloze: Jsou zadány rozměry aktuátoru, včetně budící cívky a v ní protékající proud a dále vlastnosti materiálů, z nichž je aktuátor vyroben. Úkolem je najít rozložení magnetické indukce  $\mathbf{B}$  (stavový vektor) v magnetickém obvodu aktuátoru, ve vzduchových mezerách, popř. v jeho okolí. Z matematického hlediska se jedná o výpočet Maxwellových rovnic, které magnetické pole popisují. Bohužel přímé řešení Maxwellových rovnic je značně obtížné, a proto byly vyvinuty zjednodušující matematické metody [1]. Jednou z nich je výše zmiňovaná metoda okrajové úlohy pro potenciál, při níž je aplikován tento postup:

- hledaný stavový vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  je nahrazen pomocnou veličinou, nazývanou jako vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$  [1]
- rovnice popisující stacionární magnetické pole jsou formulovány pomocí vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{A}$ , výhodou je získání snadněji řešitelných rovnic [1]
- rovnice s neznámým vektorovým magnetickým potenciálem  $\mathbf{A}$  se vyřeší obvykle numericky [1]
- z vypočítaného vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{A}$  je zpětně určen příslušný stavový vektor magnetické indukce  $\mathbf{B}$  [1]

#### 3.4.2. Vektorový magnetický potenciál

Vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$  podstatně zjednodušuje analýzu magnetického pole. Jedná se o spojitou vektorovou funkci polohy  $\mathbf{A} = \mathbf{A}(x, y, z)$ , jejíž jednotkou je weber na metr [Wb/m], a je definována vztahem [2]:

$$\mathbf{B} = \text{rot}\mathbf{A}$$

### 3.4.3. Sestavení matematického modelu

První etapou metody okrajové úlohy pro rovnice potenciálů je sestavení matematického modelu. Ve stacionárním magnetickém poli jsou určeny v dané geometrické oblasti příslušné stavové vektory prostřednictvím vektorového magnetického potenciálu. Problém stanovení vektorového potenciálu je popisován ve tvaru parciálních diferenciálních rovnic. Pro jednoznačnost řešení těchto rovnic, je nutné zadání dalších informací o hledaných vektorových potenciálech, resp. o jejich derivacích v určitých bodech definiční oblasti. Těmito informacemi jsou hodnoty potenciálů na okrajích definiční oblasti, čili stanovení okrajových (hraničních) podmínek a formulace podmínek, které musí potenciál splnit na rozhraní, tj. v místě styku dvou různých prostředí (magnetik). Takto vyjádřený matematický model je nazýván okrajovou úlohou, resp. úlohou s okrajovými podmínkami [2].

Při sestavování matematického modelu byla nejprve stanovena definiční oblast, ve které bylo řešeno magnetické pole aktuátoru. Jelikož je řešený aktuátor rotačně symetrický podle osy  $z$ , která je jeho středem, je definiční oblast definovaná ve válcovém souřadném systému  $(r, z)$ . Tato oblast, s hranicí  $\Gamma$ , je složena z několika podoblastí, z nichž každá je charakterizována svým magnetickým prostředím s permeabilitou  $\mu$ . Je předpokládáno, že tato prostředí jsou homogenní, izotropní, a v případě použitého materiálu (železo) pro magnetický obvod jsou nelineární, z důvodu nelineární závislosti permeability na hodnotě intenzity magnetického pole  $\mu = \mu(H)$  [1]. Jednotlivé podoblasti jsou vzájemně odděleny rozhraními (místa styku podoblastí). Body uvnitř jednotlivých podoblastí jsou regulární, body na jejich rozhraní jsou neregulární [2].

Druhou částí sestavování matematického modelu bylo vyjádření rovnic magnetického pole v jednotlivých podoblastech pomocí vektorového magnetického potenciálu, kterým se nahrazují hledané stavové vektory. V podoblasti, v níž se nacházejí závity cívky, působí proudová hustota  $\mathbf{J}$  – viz obr. 3.2. Zde byla uplatněna první Maxwellova rovnice v diferenciálním tvaru (bez posuvného proudu)  $\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$ . S využitím vztahu pro magnetickou indukci, vyjádřenou magnetickou intenzitou a permeabilitou  $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$  a dále vztahu pro definici vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}$  byla první Maxwellova rovnice postupně upravena:

$$\begin{aligned} \text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \text{rot } \frac{1}{\mu} \mathbf{B} &= \mathbf{J} \end{aligned}$$

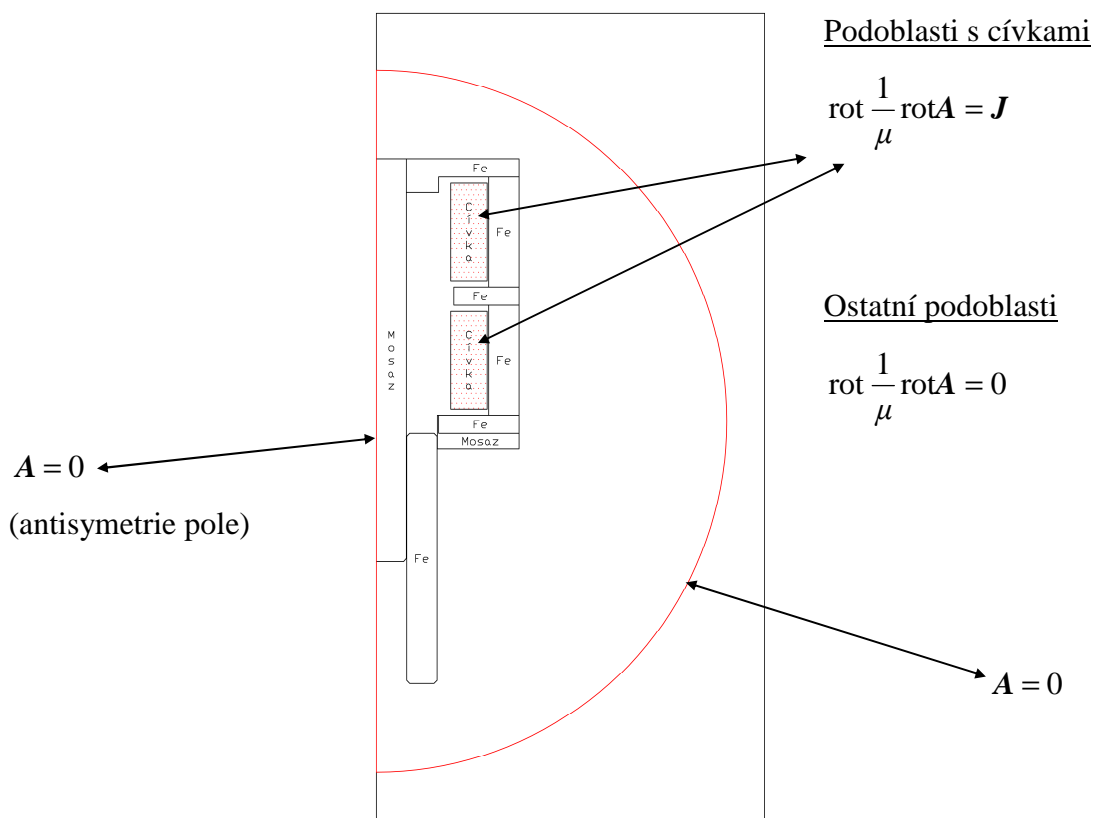


$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = \mathbf{J}$$

Výsledná rovnice je diferenciální rovnicí pro vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$ . Vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$  působí ve stejném směru jako vektor proudové hustoty  $\mathbf{J}$ . V ostatních podoblastech je tato rovnice pro vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$  totožná, s tím rozdílem, že proudová hustota  $\mathbf{J}$  zde nepůsobí a je tedy rovna nule. Rovnice přechází na tvar:

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \mathbf{A} = 0$$

Třetí částí sestavování matematického modelu bylo stanovení okrajových (hraničních) podmínek pro vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$ , které jsou platné na hranici definiční oblasti. Formulace těchto podmínek je nutná pro zajištění jednoznačnosti předchozích diferenciálních rovnic, kdy se z nekonečného počtu možných řešení vybírá jediné hledané řešení vyhovující konkrétnímu zadání [3].



Obr. 3.2. Vektorový magnetický potenciál + okrajové podmínky.

Podle známé hodnoty na hranici je obvykle možnost zvolit některou z těchto podmínek:

- je-li známá hodnota vektorového magnetického potenciálu  $A$  na hranici, pak se jedná o okrajovou podmínku 1. druhu, tzv. Dirichletovu okrajovou podmínku
- je-li známá hodnota  $\frac{\partial A}{\partial n}$  - derivace vektorového magnetického potenciálu  $A$  na hranici ve směru vnější normály k hranici, pak se jedná o okrajovou podmínku 2. druhu, tzv. Neumannovu okrajovou podmínku [3]
- je-li na části hranice známá Dirichletova okrajová podmínka a na zbývající části hranice Neumannova okrajová podmínka, pak se jedná o smíšenou okrajovou podmínku [3]

Pro řešení aktuátor byla zvolena Dirichletova okrajová podmínka (1. druhu) jak na hranici definiční oblasti, která představuje povrch koule kolem aktuátoru, tak na hranici definiční oblasti, která představuje osu symetrie aktuátoru – viz obr. 3.2. V obou případech platí, že hodnota vektorového magnetického potenciálu  $A$  na těchto hranicích se rovná nule. Pro hranici tvořící povrch koule kolem aktuátoru to vyplývá z předpokladu, že veškeré magnetické pole je uvažováno uvnitř této koule, a že vně koule je magnetické pole nulové. Pro hranici tvořící osu symetrie aktuátoru vyplývá nulový vektorový potenciál z antisymetrie pole. Protože na obou hranicích je vektorový magnetický potenciál  $A$  konstantní, resp. ekvipotenciální, lze tyto hranice považovat za magnetické indukční čáry, resp. magnetické silové čáry. Toto tvrzení vyplývá z již zmiňované důležité vlastnosti vektorového magnetického potenciálu  $A$ , a to, že magnetické indukční čáry jsou totožné s ekvipotenciálami vektorového magnetického potenciálu [2].

Čtvrtou částí sestavování matematického modelu bylo stanovení podmínek na rozhraní, kde se stýkají dvě magnetika s rozdílnými permeabilitami  $\mu_1, \mu_2$ . Body na takovémto rozhraní jsou neregulární, neplatí zde Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, a proto ani Poissonova, resp. Laplaceova rovnice. Výhodné je podmínky na rozhraní pro stavové vektory  $H$  a  $B$  opět vyjádřit prostřednictvím vektorového magnetického potenciálu  $A$ . Platí, že vektorový magnetický potenciál je i na rozhraní dvou různých magnetik spojitý, tj.:

$$A_2 = A_1$$

při známé hodnotě vektorového magnetického potenciálu, popř.:

$$\frac{1}{\mu_2} \frac{\partial A_2}{\partial n_{12}} = \frac{1}{\mu_1} \frac{\partial A_1}{\partial n_{12}}$$

při známé derivaci vektorového magnetického potenciálu. Výraz  $\frac{\partial A}{\partial n_{12}}$  je derivace ve směru vnější normály k rozhraní, orientované z magnetika 1 do magnetika 2 [2].

#### 3.4.4. Řešení okrajové úlohy

Druhou etapou metody okrajové úlohy pro rovnice potenciálů je řešení okrajové úlohy, resp. výpočet sestaveného matematického modelu a zpětné vyjádření stavových vektorů prostřednictvím vypočtených hodnot vektorového magnetického potenciálu  $A$ . Výpočet může být analytický, který je vhodný pouze pro jednodušší úlohy nebo numerický, který je určen pro komplikované definiční oblasti. Pro numerické výpočty jsou k dispozici různé numerické metody, např. metoda konečných prvků (MKP, FEM), metoda konečných diferencí (FDM) – diferenční metoda, metoda hraničních prvků (BEM) – integrální metoda, metoda konečných objemů, metody stochastické [2].

### 3.5. Algoritmus pro výpočet

Vzhledem ke složitosti řešeného aktuátoru byl, pro účely jeho návrhu a simulace, zvolen numerický výpočet s využitím metody konečných prvků MKP, která je v současné době nejužívanější metodou těchto výpočtů. Tato metoda se dobře osvědčuje především u komplikovaných geometrických soustav. Její možnosti využití jsou velmi široké. Dá se použít nejen pro stacionární magnetická pole, ale také pro časově proměnná elektromagnetická pole a i jiná fyzikální pole, např. teplotní pole, pole hydrodynamického proudění, atd. Výborně se uplatňuje při řešení různorodých technických systémů, u kterých současně působí různá fyzikální pole, např. elektromagneticko – tepelné, apod. Jedná se o tzv. sdružené problémy [2]. Metoda MKP je založena na diskretizaci vyšetřovaných oblastí, kdy jsou jednotlivé definiční oblasti proloženy vhodnou diskretizační sítí. V MKP je v nejjednodušších případech trojúhelníková síť (pro 2D) nebo čtyřstěnová (pro 3D) [1].

### 3.5.1. Energetický funkcionál

Metoda konečných prvků využívá pro řešení okrajové úlohy, resp. určení vektorového magnetického potenciálu, variační principy teorie elektromagnetického pole. Obdobně jako je makroskopická teorie elektromagnetického pole v klasickém pojetí popisována na základě zákonů formulovaných Maxwellovými rovnicemi, lze za její základ pokládat i jiné soustavy axiomů. Těmi mohou být právě i variační principy (principy, které jsou vyjádřeny prostřednictvím variačního počtu - oboru matematické analýzy, který se věnuje minimalizaci a maximalizaci funkcionálů, což jsou zobrazení z množiny funkcí do množiny reálných čísel). Jedním z nich je např. Thomsonův variační princip pro stacionární magnetická pole. Veličiny magnetického pole, jako je vektorový magnetický potenciál, magnetická indukce, magnetická intenzita, nabývají takových hodnot, že při daných podmínkách je minimální rozdíl mezi energií magnetického pole  $W_m$  a energií  $W$ , která je potřebná pro vytvoření zdrojů pole [6].

$$W_m - W = \min$$

Rozdíl energií je z matematického hlediska funkcionálem příslušné veličiny pole a nazývá se energetický funkcionál  $F$ . Funkcionál přiřazuje každé funkci právě jedno reálné číslo z daného definičního oboru. Pro určitý okrajový problém lze nalézt konkrétní tvar energetického funkcionálu prostřednictvím variačního počtu. Definiční oblast  $\Omega$  se může skládat z podoblastí  $\Omega_p$  ( $p=1, 2, \dots, q$ ), na jejichž rozhraní jsou splněny hraniční (přechodové) podmínky. Takovýto okrajový problém je totožný s variačním problémem, a tím je určení funkce  $u$ , pro kterou nabývá energetický funkcionál  $F$  minima.

### 3.5.2. Zpracování softwarovými produkty

Ke zpracování těchto rozsáhlých soustav a k matematickému modelování jsou využívány moderní softwarové produkty věnující se problematice elektromagnetických polí. V současnosti je k dispozici široká nabídka těchto programů, jako např.: ANSYS, Maxwell, COMSOL Multiphysics, Opera, Flux, CST Studio Suite, QuickField, FEMM, Agros2D. Z hlediska základní struktury, prakticky každý z těchto programů, je rozdělen do tří částí, kterými jsou preprocessor, procesor a postprocessor.

V části preprocesoru se zpracovávají vstupní data daného řešeného problému. Těmi zpravidla bývají geometrické rozměry definičních oblastí (u některých programů možnost importu z různých CAD systémů), hodnoty materiálových charakteristik, popisující fyzikální vlastnosti daného prostředí, hraniční podmínky (okrajové podmínky, popř. počáteční

podmínky) a veličiny budící příslušné pole (proudy, napětí, náboje, remanentní magnetické indukce a koercitivní síly u permanentních magnetů, atd.). Dále se v preprocesoru provádí již popisovaná diskretizace vyšetřovaných oblastí, kdy jsou definiční oblasti proloženy vhodnou diskretizační sítí (tzv. „meshování“). Tato síť je vytvořena automaticky a obvykle je k dispozici možnost její „ruční“ modifikace, např. korigování hustoty sítě [1].

V procesoru se uskutečňuje vlastní numerické řešení dané okrajové úlohy. Tzn., že v uzlech diskretizační sítě jsou stanoveny příslušné hodnoty hledané veličiny, např. vektorový magnetický potenciál v případě magnetického pole, resp. mohou být případně stanoveny přímo hodnoty stavových veličin daného pole. V procesoru bývá implementováno několik samostatných modulů, z nichž každý je určený k řešení specifické úlohy. Mohou to být např. procesorové moduly určené pro 2D nebo 3D úlohy, pro stacionární, nestacionární, harmonická pole, pro magnetická pole v točivých strojích a mnoho dalších [1].

V poslední části programu postprocesoru se zpracovávají výsledky získané z procesoru. Může jít např. o grafické zpracování vypočítaných veličin v procesoru, nebo z nich následně dopočítaných veličin, se zobrazením jejich průběhů např. siločar, ekvipotenciál. Mohou být též znázorněny příslušné vektory nebo jen složky některých veličin, např. tečné, normálové, reálné, imaginární. V postprocesoru se dopočítávají další uživatelsky zajímavé veličiny, jako např. rozložení energie magnetického pole, indukčnost určená z magnetického pole, atd. Dále se v této části programu provádí export veličin v podobě grafických formátů (pro následnou editaci a tisk) a v podobě datových souborů (např. jako vstupní údaje pro další software) [2].

## 4. Návrh elektromagnetického aktuátoru

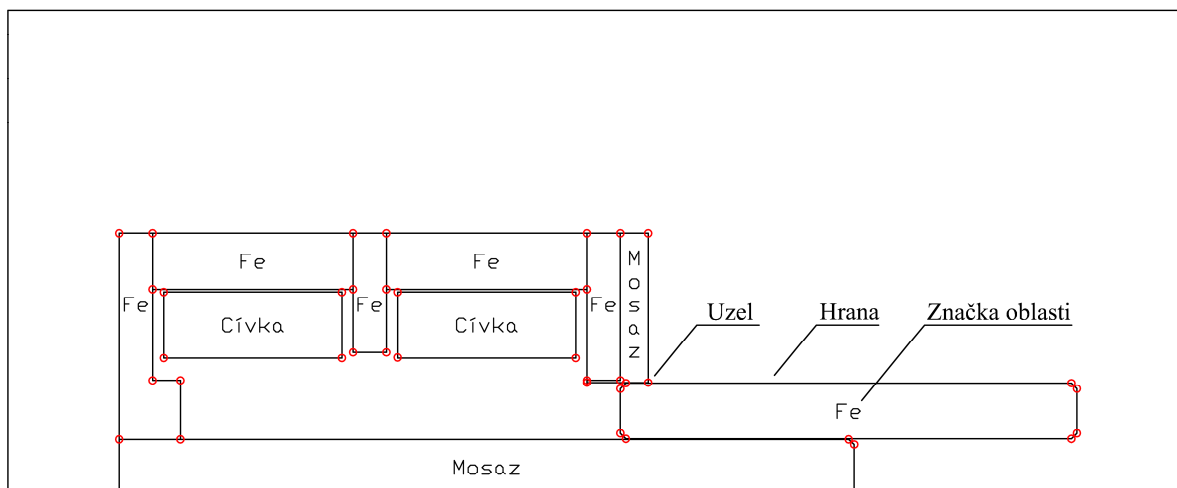
### 4.1. Realizace výpočtu

K modelování a numerickému výpočtu aktuátoru, který byl řešen v rámci této diplomové práce, byla použita aplikace Agros2D, která je vyvíjena na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni. Jedná se o univerzální multiplatformní aplikaci určenou pro řešení fyzikálních polí. Pro řešení parciálních diferenciálních rovnic využívá knihovnu Hermes2D založenou na adaptivní metodě konečných prvků vyššího řádu přesnosti (hp-FEM). Umožňuje řešit problémy elektrického, elektrického proudového, magnetického a teplotního pole v kartézském nebo osově symetrickém uspořádání. V Agros2D jsou dostupné analýzy ustáleného stavu, harmonická analýza a analýza přechodného děje [17].

Výpočet aktuátoru v aplikaci Agros2D byl realizován v několika krocích podle obecného postupu, který je využíván u většiny programů řešících fyzikální pole. Nejprve byly v části aplikace Agros2D nazvané „vlastnosti“ zvoleny: osově symetrický souřadnicový systém, trojúhelníková síť pro triangulaci a řešené fyzikální pole jako magnetické s analýzou ustáleného stavu. I když je feromagnetický materiál obecně nelineárním prostředím, byl přesto na počátku návrhu nejprve využíván lineární řešič. Výhodou této volby byla hlavně úspora času při základních výpočtech a tím rychlejší získání dílčích výsledků, které objasnily chování navrhovaného aktuátoru se dvěma cívkami. Pro finální výpočty při optimalizaci pak byla tato volba přepnuta na nelineární řešič Newtonovou metodou.

Vstupní parametry aktuátoru týkající se prostorového uspořádání, geometrických rozměrů, definiční oblasti, materiálových vlastností, okrajových podmínek a volby proudové hustoty ve vinutí cívek, byly definovány v následující části aplikace Agros2D pojmenované jako „preprocessor“. Jelikož byl uvažován válcový tvar aktuátoru, byl z pohledu prostorového uspořádání zvolen, již zmiňovaný, osově symetrický souřadnicový systém. Z důvodu osové symetrie bylo možné tedy rozměry uvažovaného aktuátoru zadávat jako 2D problém v souřadnicích  $R$  (poloměr) a  $Z$  (výška v ose  $z$ ) – viz obr. 3.2. Při numerickém výpočtu okrajové úlohy je snahou, aby definiční oblast byla co nejmenší. Opět byla využita osová symetrie a definiční oblast byla omezena pouze na polovinu uvažované oblasti. Vnější hranice definiční oblasti nebyla umístěna shodně s povrchem aktuátoru, ale byla odsunuta dále od jeho okraje. Nově je tak vnější hranice definiční oblasti z pohledu 2D vymezena polokružnicí a osou  $Z$ . Z pohledu 3D tak vlastně představuje povrch koule obklopující aktuátor. Touto

modifikací bylo možné dospět k přesnějším výsledkům, ve kterých je např. uvažovaný i rozptyl magnetického pole. Geometrické rozměry jednotlivých podoblastí byly poprvé zadány pouze jako předpokládané a v průběhu zpracování návrhu byly postupně upřesňovány.



Obr. 4.1. Geometrie modelu navrhovaného aktuátoru.

Vlastní geometrie modelu – viz obr. 4.1., byla vykreslena zadáváním jednotlivých uzlů spojovaných hranami. V každé vzniklé podoblasti byla umístěna pouze jedna tzv. značka oblasti. Prostřednictvím těchto značek byly nastaveny materiálové vlastnosti jednotlivých podoblastí, resp. byla nastavena hodnota relativní permeability příslušného materiálu v podoblasti. Pro všechny podoblasti, vyplněné vzduchem, mosazí a mědí, byla definována konstantní hodnota relativní permeability  $\mu_r = 1$ . V případě magnetického obvodu tvořeného feromagnetickým materiálem (železo), z důvodu nelineární závislosti permeability na hodnotě magnetické indukce, však nebyla volena pro  $\mu_r$  konstantní hodnota, ale nelineární průběh  $\mu_r$  pro zvolený feromagnetický materiál. V době zpracování návrhu byla v aplikaci Agros2D z běžně dostupných ocelí k dispozici  $\mu_r - B$  charakteristika oceli ČSN 11 373, ČSN 11 500 a ČSN 12 040. V rámci tohoto návrhu byly nelineární výpočty prováděny s ocelí ČSN 12 040 (resp. pro prvotní výpočty s lineárním řešičem bylo zvoleno  $\mu_r = 300$ ).

Jelikož podoblast vyplněná mědí, tj. oblast, ve které jsou navinuty závitové cívky, je uvažovaná jako zdroj v magnetickém poli, byla nastavena, v konfigurátoru značky oblasti pro měď, navíc ještě hodnota proudové hustoty  $J$ . Z dostupných informací bylo zjištěno, že proudová hustota měděného drátu v cívce může být trvale max. kolem  $3 - 3,5 \text{ A/mm}^2$

(s ohledem na možnosti odvodu tepla). Pro potřeby základních výpočtů byla nastavena hodnota proudové hustoty  $\mathbf{J} = 3\text{A/mm}^2$ .

Dále bylo zapotřebí v části preprocesoru definování okrajových podmínek na hranici definiční oblasti, která je vymezena polokružnicí a osou Z. Na obou těchto hranicích byla zvolena Dirichletova okrajová podmínka (1. druhu), se zadanou hodnotou vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{A} = 0$ . Jak již bylo zdůvodněno v předešlém textu, pro hranici tvořící polokružnici to vyplývá z úvahy, že veškeré magnetické pole je uvažováno uvnitř oblasti vymezené touto polokružnicí, a pro hranici tvořenou osou Z (osou symetrie) vyplývá nulový vektorový potenciál z antisymetrie pole.

Jelikož jsou stavové vektory  $\mathbf{H}$  a  $\mathbf{B}$  při numerickém výpočtu vyjádřeny prostřednictvím vektorového magnetického potenciálu  $\mathbf{A}$ , pro který platí, že je na rozhraní dvou různých magnetik spojitý, tj.:  $\mathbf{A}_2 = \mathbf{A}_1$ , nebylo nutné se zabývat podmínkami na rozhraní.

Následujícím krokem bylo proložení (triangulace) geometrického modelu, vytvořeného podle výše popsaného postupu, diskretizační sítě. Pro výchozí návrhy a získání představy o funkci aktuátoru se dvěma cívkami se ukázalo jako postačující ponechat základní nastavení parametrů sítě, tj. počet zjemnění = 1, řád polynomu = 2, s vypnutou prostorovou adaptivitou. Takto byla, podle aktuálně vyšetřovaného geometrického modelu, automaticky generována diskretizační síť s cca 6 000 - 20 000 uzly. Při konečné optimalizaci aktuátoru byly upraveny parametry sítě s ohledem na zpřesnění návrhu, kdy se neprojevíly změny výsledků o více jak 1%. Generovaná diskretizační síť pak obsahovala cca 54 000 uzlů.

Pomocí vestavěného nástroje „Serial Calculations“ v aplikaci Agros2D byl pak vytvořen skript simulující pohyb jádra. Ve skriptu byl proveden výběr uzlů, hran a značek oblastí, které bezprostředně souvisí s pohybem jádra. Dále v něm byla nastavena délka jednoho kroku, resp. o jak velkou vzdálenost se posune jádro aktuátoru do nové polohy, v níž bude proveden následující výpočet, a počet těchto kroků. Tímto byl vymezen maximální rozsah pohybu jádra aktuátoru. Posledním nastavením ve skriptu bylo zadání požadavku na výpočet Maxwellovy síly v axiálním směru působící na pohyblivé jádro. Po spuštění tohoto skriptu byla postupně v jednotlivých nastavených polohách (krocích) jádra vypočítávána požadovaná síla. Výsledné hodnoty síly, společně s příslušnou souřadnicí polohy jádra v ose Z, byly vypsány do konzole aplikace Agros2D. Zde byly tyto výsledky pomocí příkazu „pythonlab.chart (s, Fty)“ vykresleny do grafu znázorňujícího sílu působící na jádro v závislosti na poloze tohoto jádra.

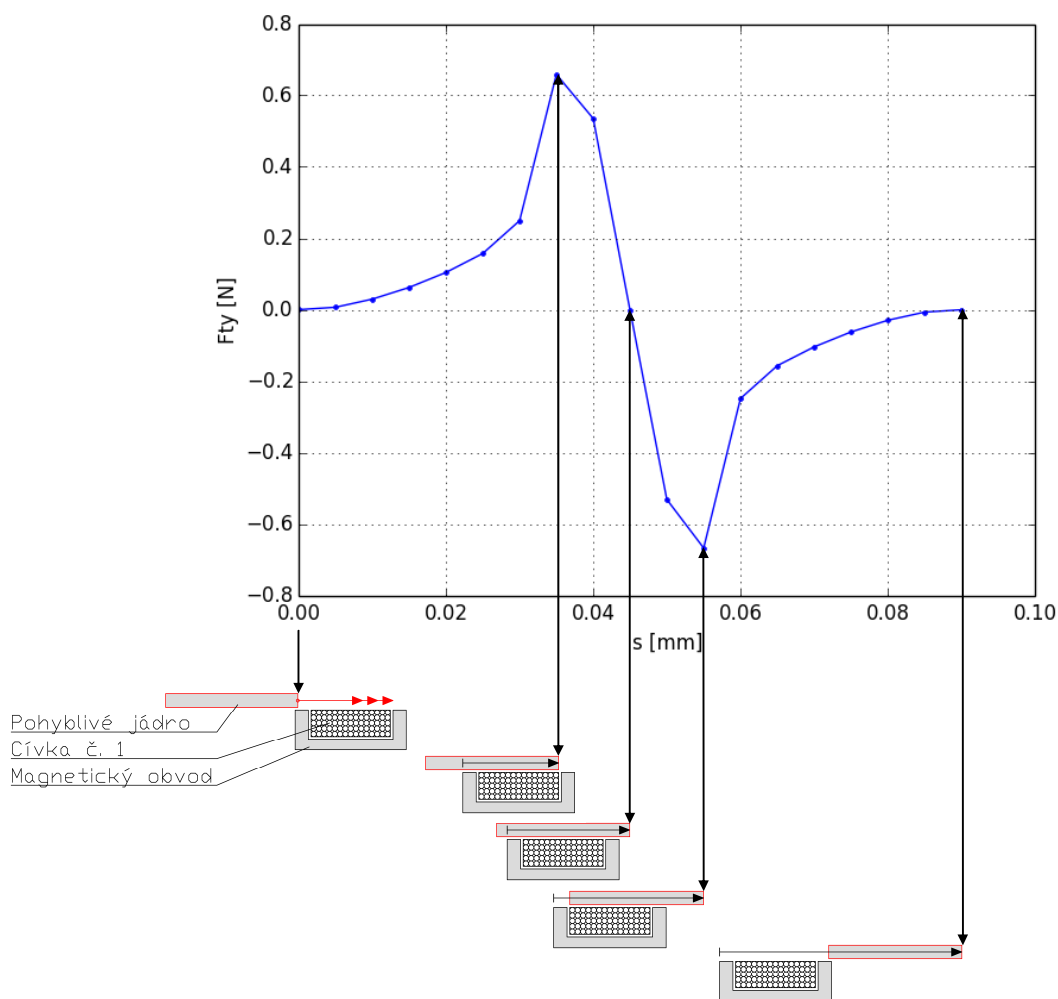


Pro získání optimálního řešení návrhu byl celý popsany postup mnohokrát opakován. Na základě předchozího výsledku byla pokaždé modifikována geometrie modelu, popř. změněno nastavení parametrů v preprocesoru a byl proveden nový výpočet. V postprocesoru aplikace Agros2D pak byla v průběhu návrhu průběžně prováděna i kontrola rozložení magnetické indukce  $B$  a permeability v magnetickém obvodu aktuátoru pro jednotlivé polohy pohyblivého jádra. Pokud bylo zjištěno, že je některá oblast přesycovaná, byly upraveny geometrické rozměry magnetického obvodu této oblasti.

## 4.2. Návrh a optimalizace aktuátoru

Na počátku návrhu byly nejprve uvažovány předpokládané rozměry a tvar magnetického obvodu. Z důvodu nedostupnosti potřebných informací o aktuátoru se dvěma cívkami, bylo nutné získat představu o funkci tohoto typu aktuátoru. To bylo učiněno prostřednictvím zkušebních simulací v programu Agros2D. Na jejich základě tak byly získávány dílčí výsledky, které postupně objasňovaly a zpřesňovaly chování aktuátoru, jehož zdrojem magnetického pole jsou dvě cívky. Návrh byl pro tyto účely prováděn se zjednodušujícím předpokladem, že bylo uvažováno pouze lineární prostředí a byla zvolena diskretizační síť s malou hustotou. Tím došlo k podstatnému zrychlení numerických výpočtů, resp. simulací. Z hlediska přesnosti výsledků se ukázal tento postup jako dostačující. Přestože bylo provedeno množství simulací, jsou dále v textu této práce popsány jen některé vybrané výsledky, které se ukázaly pro další úvahy jako podstatné.

Protože byl zvolen zjednodušující předpoklad s lineárním prostředím, bylo možné využít princip superpozice a simulovat vliv jednotlivých zdrojů, resp. cívek, v magnetickém obvodu. Na obr. 4.2. je znázorněn graf statické charakteristiky jedné části magnetického obvodu, jehož zdrojem je cívka č. 1.

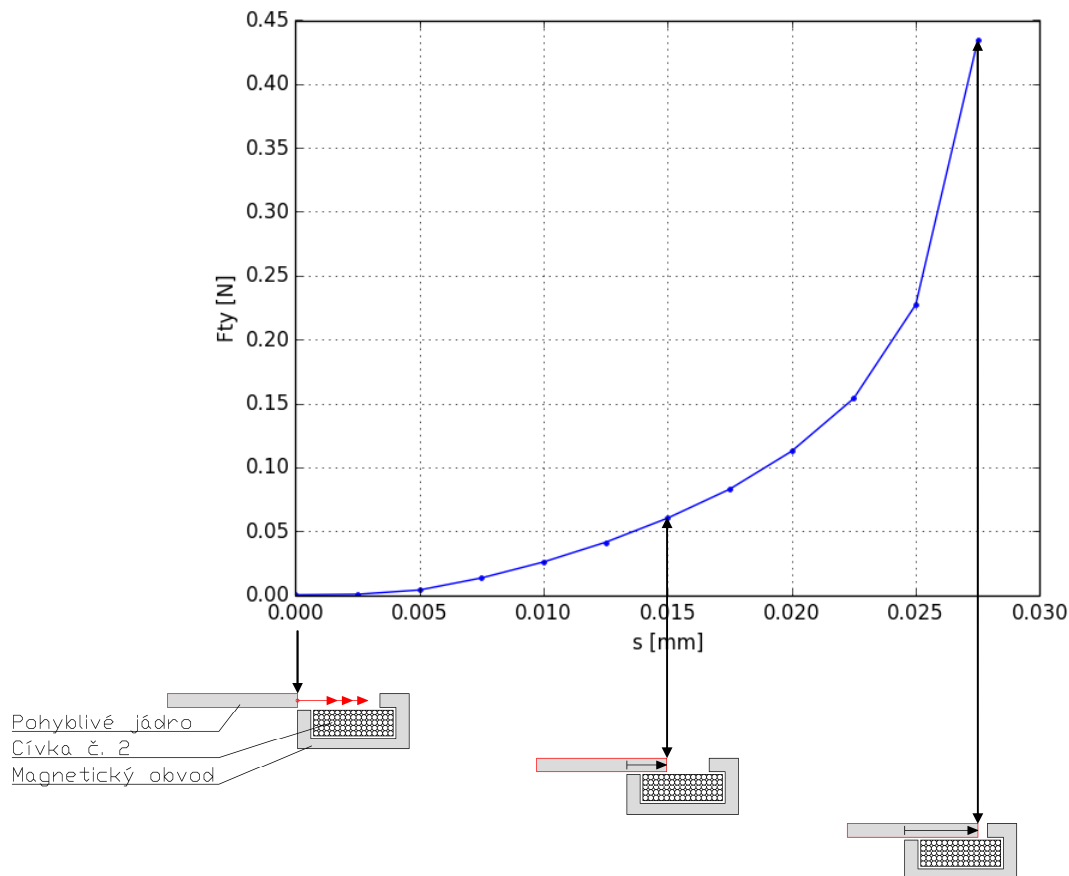


Obr. 4.2. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 1 s vyznačením polohy jádra.

Pod grafem jsou umístěny obrázky s významnými polohami pohyblivého jádra vzhledem k magnetickému obvodu pláště. Jsou umístěny tak, aby polohou odpovídaly příslušným bodům statické charakteristiky. Z obr. 4.2. lze usoudit, že pokud se bude pohyblivé jádro nacházet symetricky uprostřed magnetického obvodu, bude jeho poloha zřejmě nejstabilnější. Několikamilimetrovým posunem vlevo nebo vpravo na něj začne působit maximální síla a bude vtahováno zpět do středu. Po překročení určité mezní vzdálenosti od středu začne síla působící na jádro prudce klesat.

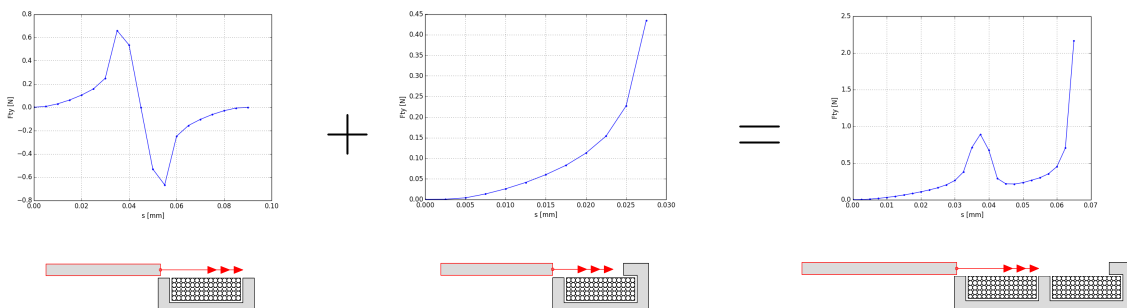
Na následujícím obr. 4.3. je znázorněn graf statické charakteristiky druhé části magnetického obvodu, jehož zdrojem je cívka č. 2. Průběh této charakteristiky se dal celkem předpokládat z úvahy, že se zmenšující se vzduchovou mezerou mezi pohyblivým jádrem a pláštěm magnetického obvodu roste síla působící na jádro v axiálním směru. Při simulacích byl pohyb jádra úmyslně ukončen těsně před koncovou polohou. Zde by již působily

několikanásobně velké hodnoty síly a nebylo by tak možné zvýraznit tu část statické charakteristiky, která je z hlediska této práce podstatná.

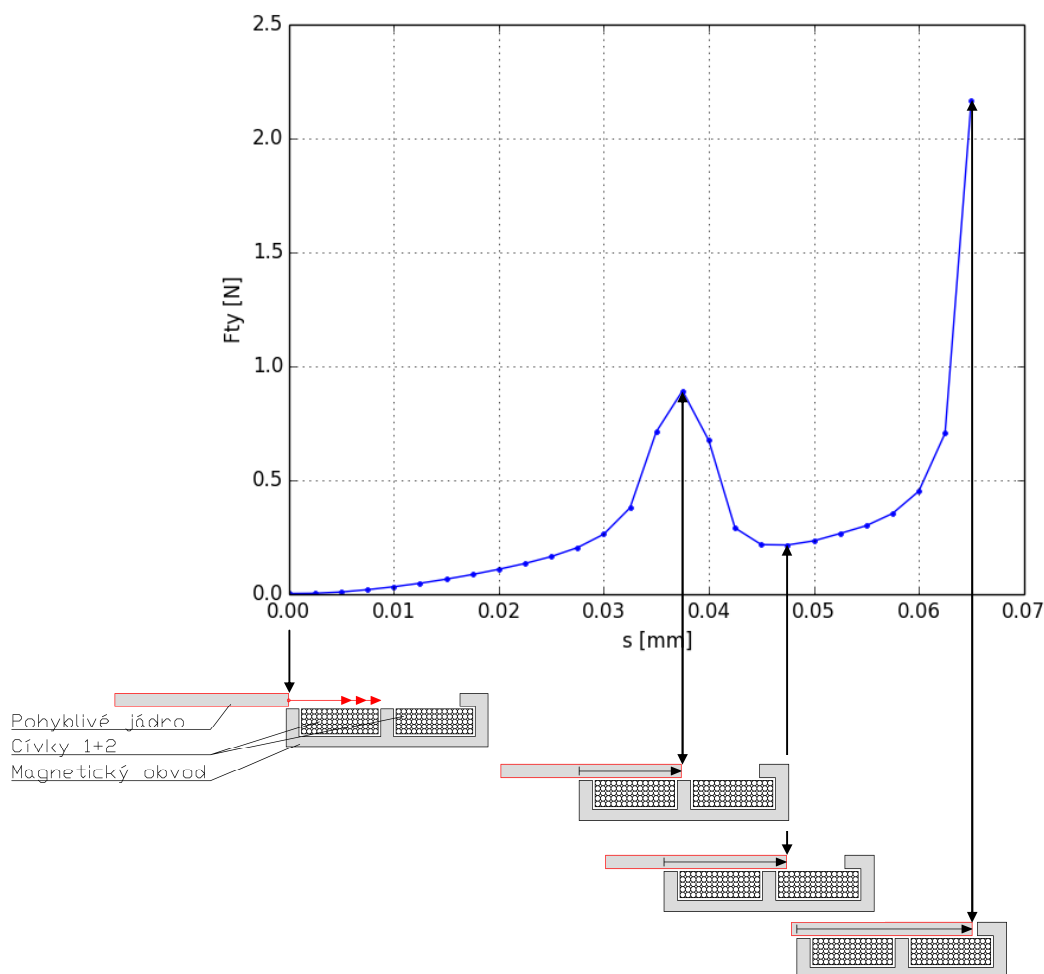


Obr. 4.3. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 2 s vyznačením polohy jádra.

Na základě předchozích simulací byla provedena superpozice magnetických obvodů s budícím proudem v obou cívkách – viz obr. 4.4. Jejím výsledkem je statická charakteristika na obr. 4.5.



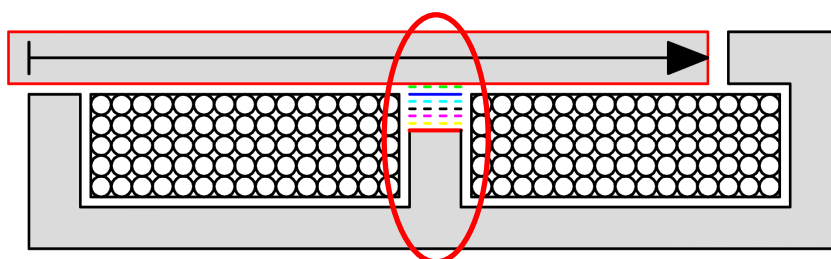
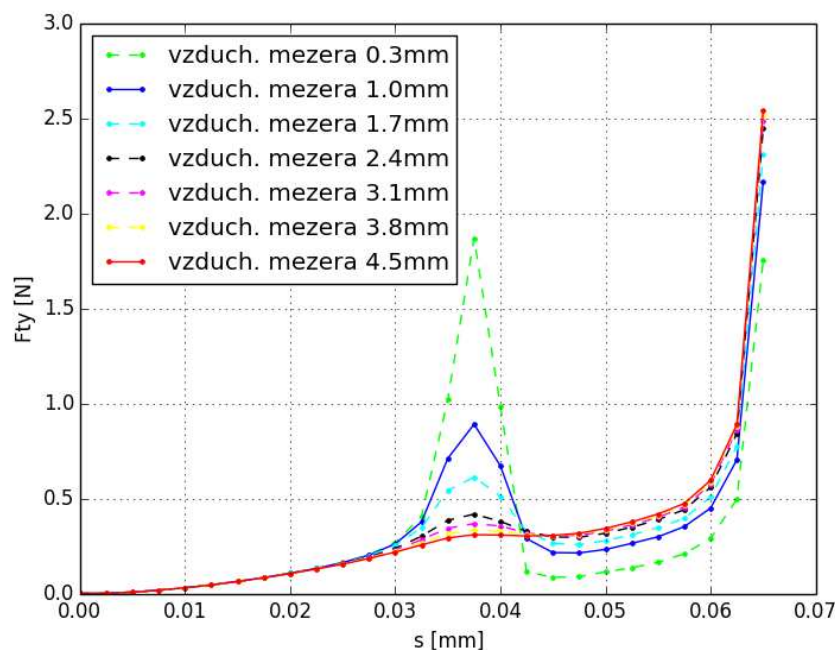
Obr. 4.4. Superpozice magnetických obvodů (zjednodušující předpoklad s lineárním prostředím).



Obr. 4.5. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 1+2 s vyznačením polohy jádra.

Je zde patrný účinek první cívky na začátku průběhu a také druhé cívky, která výrazně ovlivňuje symetrický průběh z obr. 4.2. za prvním vrcholem. Došlo zde k odstranění části průběhu, kde hodnoty síly nabývaly záporných hodnot. Magnetický obvod se dvěma cívkami a jeho statická charakteristika podle obr. 4.5. byl vzat jako základ pro další simulace, v nichž byl vyšetřován vliv jednotlivých geometrických rozměrů magnetického obvodu na průběh charakteristiky. Snahou bylo získat konstantní průběh síly působící na jádro v co nejdelším intervalu pohybu jádra a zároveň co nejvyšší hodnotu této síly. Bylo uskutečněno množství úprav na magnetickém obvodu i pohyblivém jádru (např. úprava rozměrů, umístění jednotlivých hran, zešikmení hran, atd.) a následných simulací. Z těchto pokusů se ukázalo, že nejvýraznější účinek pro docílení konstantního průběhu má umístění hrany středního sloupku

magnetického obvodu, resp. vzdálenost této hrany od stěny pohyblivého jádra. Výsledné statické charakteristiky pro několik poloh této hrany jsou zobrazeny na obr. 4.6.

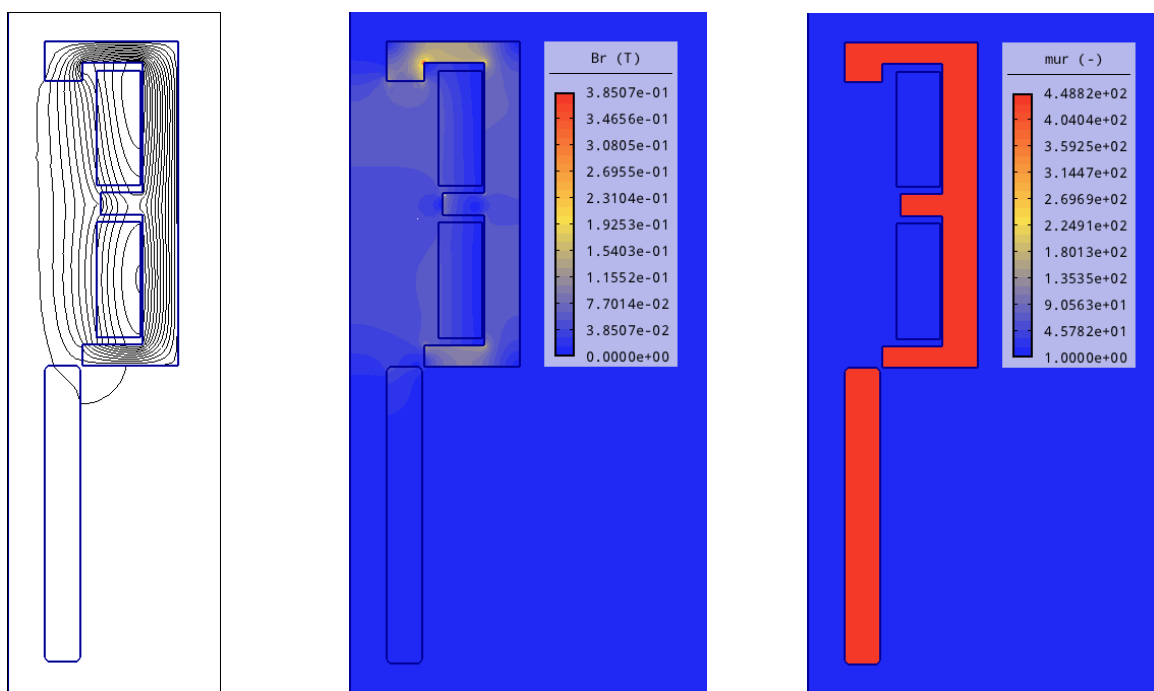


Obr. 4.6. Statické charakteristiky při posunu hrany středního sloupku.

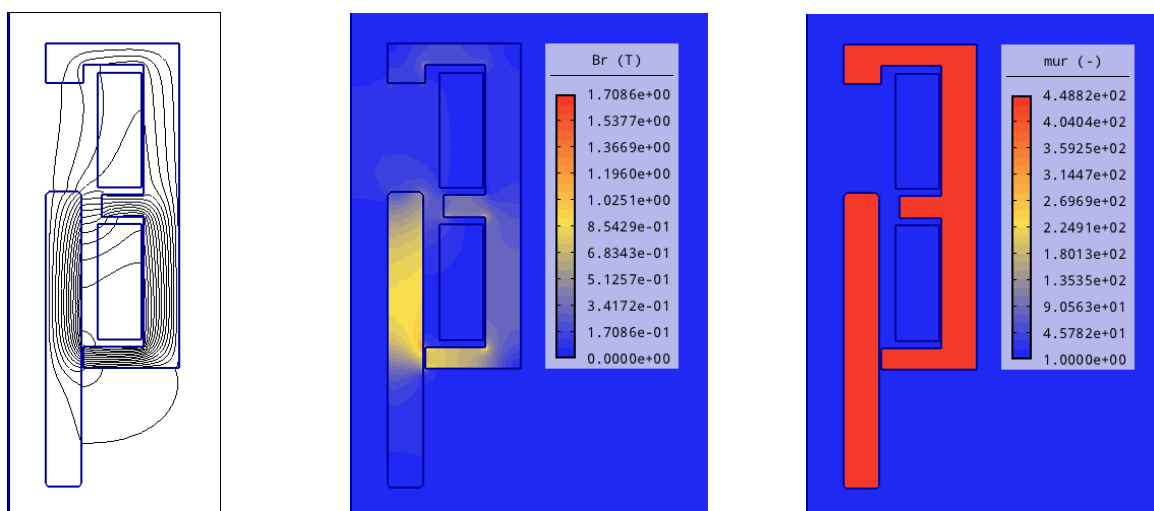
Barva jednotlivých průběhů koresponduje s příslušnou barvou umístění hrany středního sloupku v magnetickém obvodu. Posun hrany byl proveden ve stejných intervalech. Zelený čárkovaný průběh statické charakteristiky je pro případ, kdy byla hrana posunuta blíže ke stěně pohyblivého jádra. Modrý plný průběh je pro hranu v „základní poloze“, další průběhy jsou pro hrany umístěné vzdáleněji, než je základní poloha. Červený plný průběh již vykazuje v určité části konstantní hodnotu síly působící na pohyblivé jádro.

Tyto teoretické předpoklady byly podkladem pro výrobu reálného aktuátoru, na kterém měl být ověřen výsledný tvar statické charakteristiky. Od tohoto momentu již bylo ve výpočtech zohledněno nelineární prostředí magnetického obvodu. Původní náhodně zvolené rozměry byly pro výrobu modifikovány tak, aby byly dodrženy jednotlivé body v zadání diplomové práce. Výsledná geometrie aktuátoru je zobrazena na obr. 4.1. Na následujících

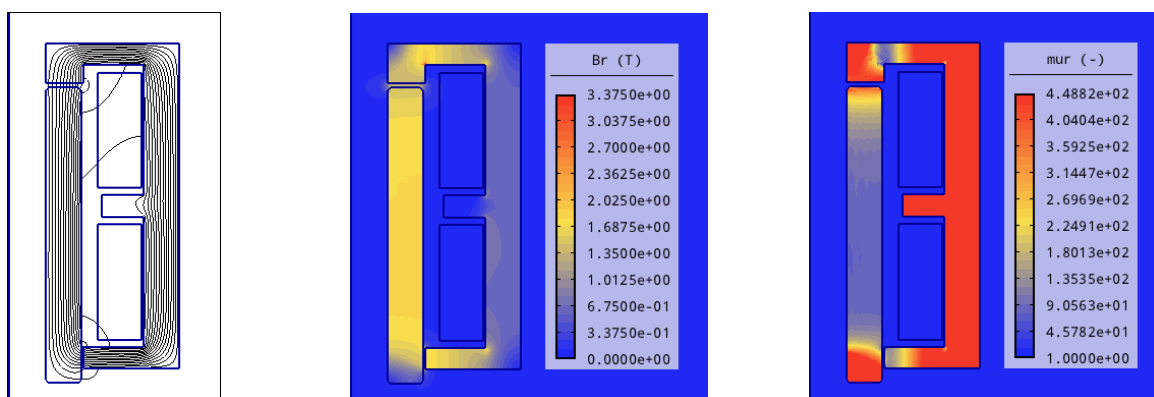
obr. 4.7. až obr. 4.8. je zobrazeno výsledné rozložení indukčních čar, magnetické indukce  $B$  a relativní permeability v magnetickém obvodu navrženého aktuátoru pro několik poloh pohyblivého jádra. V případě, že se někde vyskytují vyšší hodnoty magnetické indukce  $B$ , jedná se pouze o lokální přesycení, např. v rozích geometrie. Na obr. 4.9. je vidět z rozložení relativní permeability, že v konečné poloze již dochází k přesycení jádra.



Obr. 4.7. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $B$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 79 \text{ mm}$  a proudovou hustotu  $J_b = 4 \text{ A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

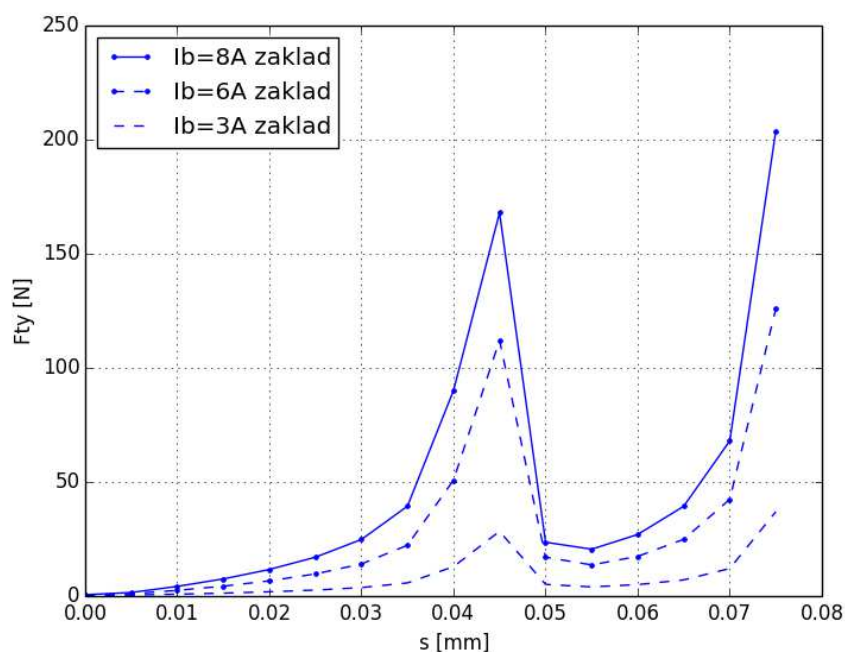


Obr. 4.8. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $B$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 30 \text{ mm}$  a proudovou hustotu  $J_b = 4 \text{ A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

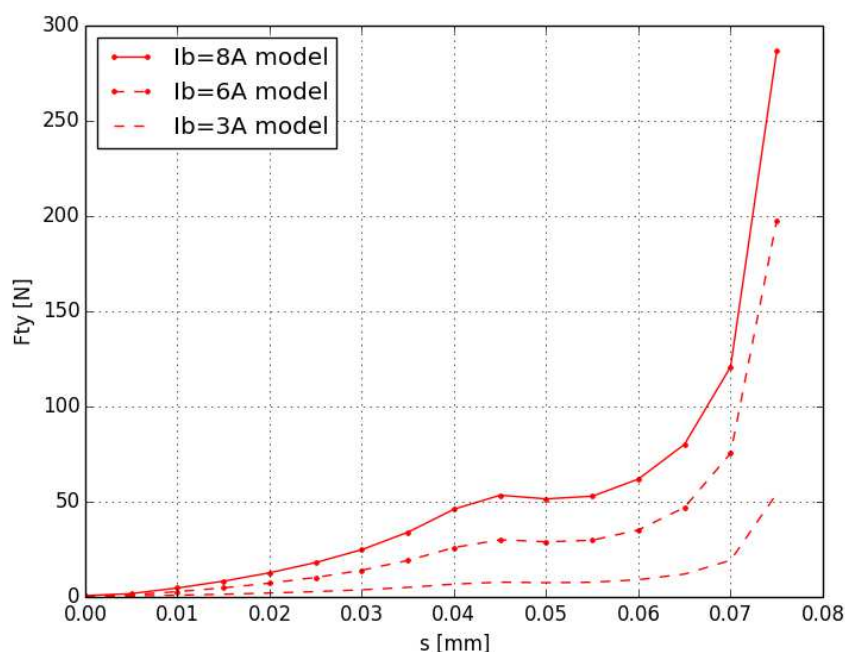


Obr. 4.9. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $B$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 1 \text{ mm}$  a proudovou hustotu  $J_b = 4 \text{ A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

Na obr. 4.10. jsou průběhy vypočtených statických charakteristik navrženého aktuátoru pro zvolené proudové hustoty, odpovídající budícím proudům 3A, 6A a 8A. Tyto proudy byly použity při měření na reálném aktuátoru. Z důvodu možnosti porovnání byly nejprve hodnoty vypočteny za předpokladu umístění hrany středního sloupku v „základní poloze“, tj. 0,5 mm od hrany pohyblivého jádra. Následný obr. 4.11. zobrazuje průběhy vypočtené za stejných podmínek, ovšem s posunutou hranou středního sloupku magnetického obvodu, umístěnou shodně s vyrobeným aktuátorem, tj. 5,5 mm od hrany pohyblivého jádra. Statické charakteristiky z obr. 4.11. byly nakonec srovnávány se změřenými charakteristikami.



Obr. 4.10. Vypočtené statické charakteristiky navrhovaného aktuátoru s hranou středního sloupku v „základní poloze“.



Obr. 4.11. Vypočtené statické charakteristiky navrhovaného aktuátoru s hranou středního sloupku, která je umístěna shodně s hranou vyrobeného aktuátoru.

### 4.3. Návrh elektrického obvodu

Zdrojem stacionárního magnetického pole řešeného aktuátoru jsou dvě cívky, kterými prochází stejnosměrný budící proud. V předešlé části textu popisující realizaci výpočtu bylo již uvedeno, že pro potřeby základních výpočtů byla nastavena hodnota proudové hustoty  $J = 3\text{A/mm}^2$ . Pro potřeby ověření a porovnání statických charakteristik vypočítaného modelu s reálným aktuátorem byly voleny hodnoty proudové hustoty dle tab. 4.1., které jsou vypočteny z příslušného uvažovaného budícího proudu  $I_b$  (při použití Cu drátu průřezu  $1,094\text{ mm}^2$ ). Přepočet je proveden s ohledem na koeficient plnění vinutí  $q$ , jehož hodnota byla zvolena 0,75 (poměr průřezu mědi, resp. čistého průřezu měděného drátu pronásobený počtem závitů k ploše řezu vinutím).

Tab. 4.1. Proudové a proudové hustoty zvolené pro ověření statických charakteristik.

$I_b$ [A]	3	6	8
$J_b$ [A/mm <sup>2</sup> ] bez koeficientu	2,74	5,48	7,31
$J_b$ [A/mm <sup>2</sup> ] s koeficientem 0,75	2,03	4,07	5,43



Z návrhu aktuátoru vznikl požadavek na potřebnou plochu průřezu pro vinutí v kostře jedné cívky, která má rozměry 32 mm x 12 mm. Na vinutí byl použitý navíjecí Cu drát o průřezu 1,094 mm<sup>2</sup>, což odpovídá průměru 1,18 mm. Jednoduchým výpočtem vychází, že v jedné cívce je možné navinout celkem 10 vrstev po 27 závitěch. Vzhledem ke způsobu provedení vinutí byla ale provedena korekce na 26 závitů v jedné vrstvě. Celkem tak vyšlo pro jednu cívku, že je možné reálně navinout 260 závitů. Celková délka cca 50 m navíjecího drátu potřebná pro vinutí jedné cívky byla určena ze střední délky jednoho závitu 191 mm pronásobenou 260 závitů. Celkový odpor vinutí jedné cívky 0,77 Ω pak mohl být dopočítán ze vztahu:

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S}$$

kam byl dosazen měrný elektrický odpor (rezistivita) mědi při 20°C  $\rho = 0,0169 \cdot 10^{-6} [\Omega \text{m}]$ . Z vypočítaného odporu a proudové hustoty  $J_b$ , resp. proudu  $I_b$  procházejícího vinutím cívky, bylo možné určit ztráty aktuátoru, které jsou pro uvažovaný ustálený stav dány pouze Jouleovými ztrátami, definované vztahem  $P_J = RI_b^2$ . Tímto bylo provedeno ověření navržených hodnot proudové hustoty z pohledu vzniku nadměrného tepla.

Tab. 4.2. Vypočítané Joulovy ztráty  $P_J$  jedné cívky v závislosti na proudové hustotě  $J_b$ .

$I_b$ [A]	3	6	8
$J_b$ [A/mm <sup>2</sup> ] - vinutí cívky	2,74	5,48	7,31
$P_J$ [W]	6,93	27,72	49,28

## 5. Výroba navrženého aktuátoru

Zpracování výkresů jednotlivých součástí aktuátoru bylo provedeno na základě exportu dat z aplikace Agros2D do souboru typu autocad.dxf. Soubor byl následně zpracován v programu AutoCAD, ve kterém byl částečně upraven, doplněn a okótován. Takto vytvořené výkresy byly podkladem pro výrobu reálného aktuátoru. Výrobu magnetického obvodu, resp. pláště, pohyblivého jádra, středního vodícího trnu, kluzného kontaktu a koster cívek, zajistila Katedra teoretické elektrotechniky FEL ZČU Plzeň. Plášť a pohyblivé jádro byly vyrobeny z běžně dostupné nízkouhlíkové (max. 0,2 % C) feromagnetické oceli ČSN 12 040. Jedná se o konstrukční ocel, která se využívá pro svařované konstrukce, součásti strojů, součásti tepelných energetických zařízení a tlakových nádob. Střední vodící trn a kluzný kontakt byly vyrobeny z mosazi z důvodu požadavku na co nejmenší koeficient tření a nemagnetický materiál těchto součástí. Kostry obou cívek byly zhotoveny ze silonu (materiál PA6), každá z jednoho dílu ve tvaru kladky. Na každou kostru byl ručně natočen navíjecí drát Cu o průměru 1,18 mm v 10 vrstvách po 26 závitěch, tedy shodně s výpočtem. Navíjecí drát, izolovaný základním lakem (modifikovaný polyvinyl formal) s použitím do teploty 120°C, je přímo určen pro vinutí motorů a cívek. Po sestavení všech částí byl aktuátor sešroubován pomocí čtyř závitových tyčí procházejících vnějším pláštěm aktuátoru.



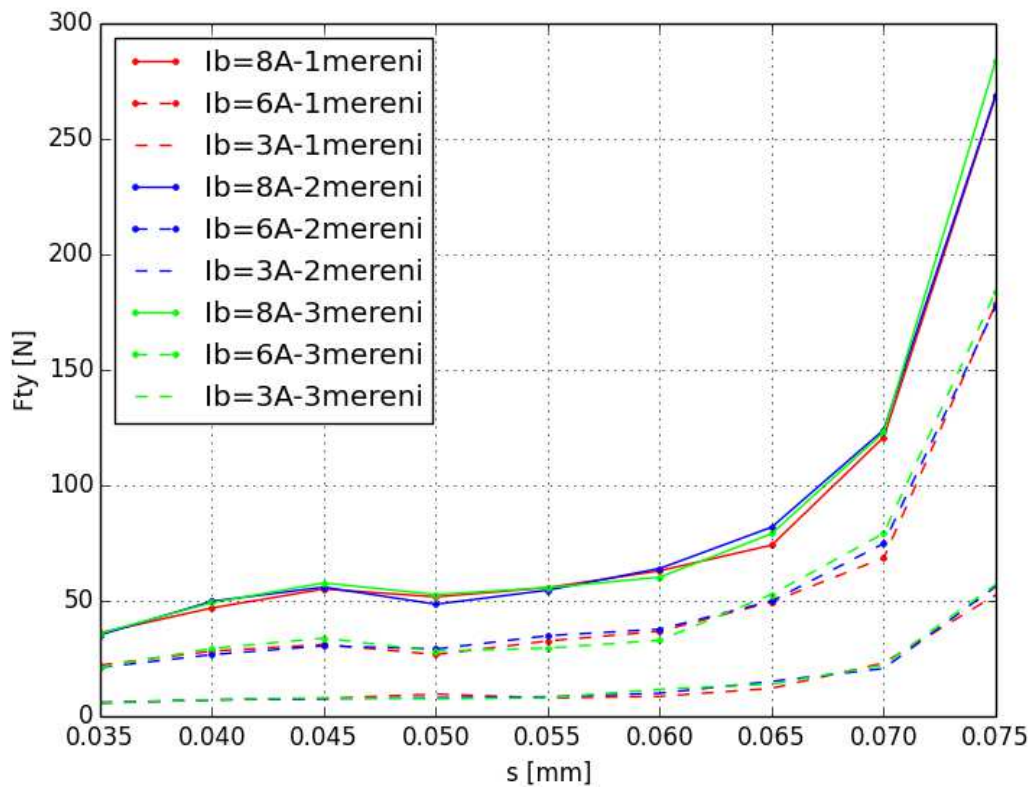
Obr. 5.1. Pohled na rozložený a sestavený aktuátor.

## 6. Experimentální ověření

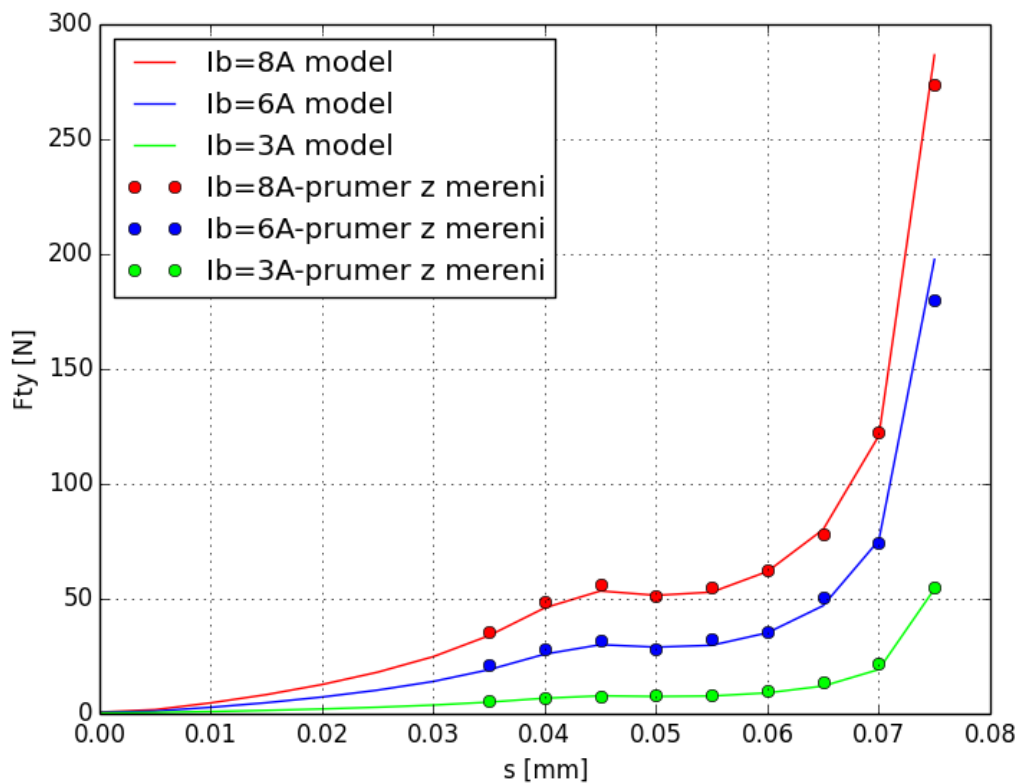
Ověření návrhu aktuátoru bylo provedeno měřením statických charakteristik pro různé hodnoty budícího proudu  $I_b$  odpovídající příslušným hodnotám proudové hustoty  $J_b$ . Měření bylo realizováno na měřícím přípravku, který je vybaven upevňovacími lištami, mechanismem umožňujícím změnu polohy pohyblivého jádra a digitálním siloměrem OMEGA DF 660 - 110 – viz obr. 6.3. Aktuátor byl důkladně přišroubován do upevňovacích lišt pomocí závitových tyčí a poloha digitálního siloměru byla přizpůsobena výšce aktuátoru. Před vlastním měřením byl digitální siloměr zkalibrován na nulovou hodnotu. Měření bylo uskutečněno pro vzduchovou mezeru od 5 mm do 45 mm v krocích po 5 mm pro budící proudy 3 A, 5 A a 8 A. Jako zdroj byl použitý DC laboratorní zdroj Q130R50D. Jednotlivé polohy jádra byly nastavovány a kontrolovány s použitím posuvného měřítka. Při měření byla vždy nejprve přesně nastavena poloha jádra, vynulován siloměr a poté zvyšován budící proud do cívek aktuátoru z nulové hodnoty postupně do hodnoty 3 A, 5 A, 8 A. Při takto nastavených proudech byla vždy odečtena hodnota síly ze siloměru a zapsána do tabulky. Poté byl proud do cívek přerušen, byla nastavena nová poloha a celý postup se opakoval. Důležité bylo dodržení postupného zvyšování hodnoty budícího proudu. Při překročení požadované hodnoty a následném snížení by vlivem hystereze docházelo ke zkreslení výsledků. Z naměřených hodnot byly vykresleny statické charakteristiky a ty pak byly srovnány se statickými charakteristikami získanými numerickým výpočtem.

Tab. 6.1. Naměřené hodnoty.

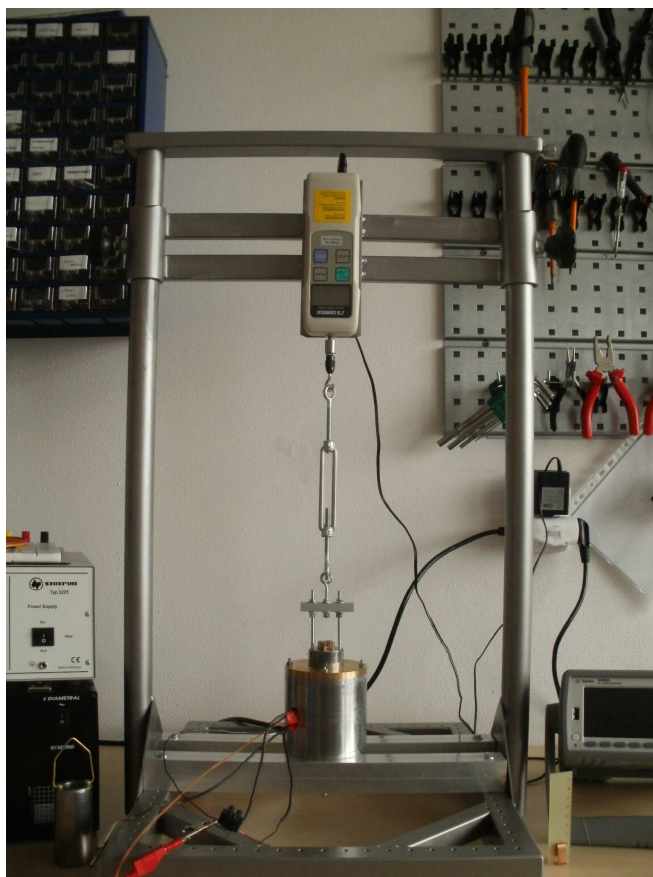
s [mm]	1. měření, $F_{ty}$			2. měření, $F_{ty}$			3. měření, $F_{ty}$			Průměrné hodnoty		
	$I_b=3A$	$I_b=6A$	$I_b=8A$	$I_b=3A$	$I_b=6A$	$I_b=8A$	$I_b=3A$	$I_b=6A$	$I_b=8A$	$I_b=3A$	$I_b=6A$	$I_b=8A$
35	5,3	21,8	35,8	5,7	20,8	34,9	5,4	20,9	35,6	5,5	21,2	35,4
40	6,8	27,9	46,6	6,8	26,4	49,5	6,9	29,1	48,9	6,8	27,8	48,3
45	7,4	30,8	54,8	7,3	30,2	55,6	7,7	33,5	57,4	7,5	31,5	55,9
50	9,3	26,4	51,4	7,7	28,8	48,2	7,2	27,9	52,4	8,1	27,7	50,7
55	7,6	32,3	55,4	8,1	34,6	54,3	7,7	29,2	55,4	7,8	32,0	55,0
60	8,3	36,5	62,7	9,7	37,4	63,7	11,4	32,6	59,9	9,8	35,5	62,1
65	11,8	49,2	73,8	14,8	49,6	81,6	13,6	52,5	78,8	13,4	50,4	78,1
70	22,8	68,3	120,5	20,4	74,5	123,7	21,9	78,9	122,7	21,7	73,9	122,3
75	52,2	178,2	268,2	55,9	177,2	268,7	56,8	183,7	283,5	55,0	179,7	273,5



Obr. 6.1. Změřené statické charakteristiky aktuátoru.



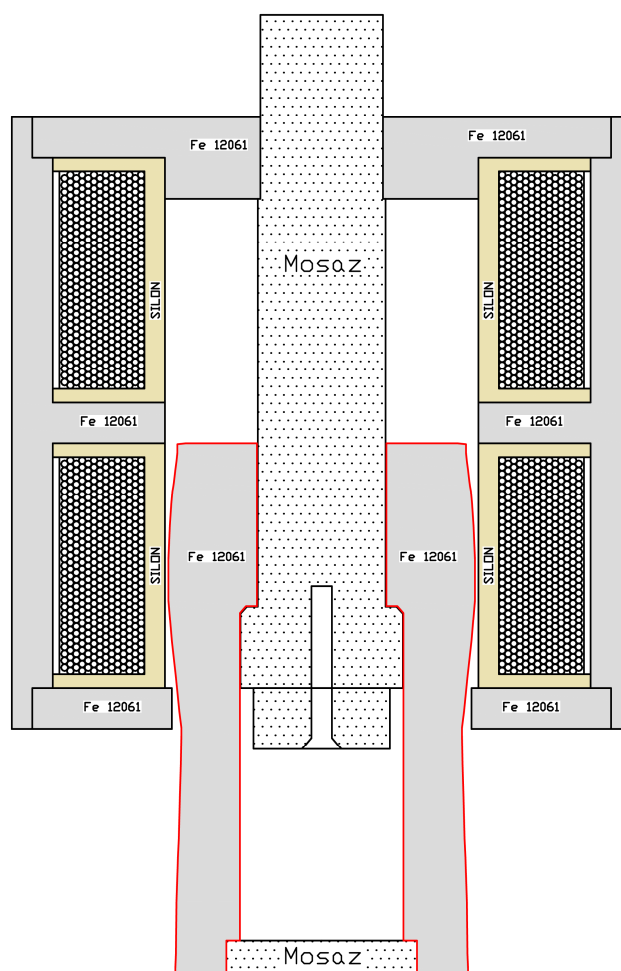
Obr. 6.2. Porovnání vypočtené a změřené statické charakteristiky aktuátoru.



*Obr. 6.3. Měření statické charakteristiky aktuátoru.*

## 7. Optimalizace tvarem jádra aktuátoru

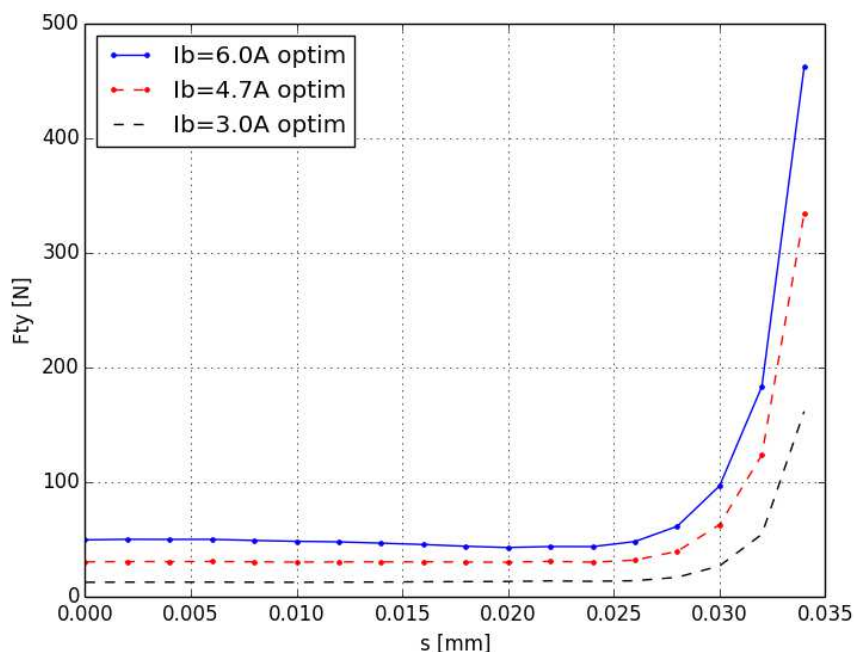
Nevýhodou výše popsané optimalizace, kdy je uvažován pouze posun hrany středního sloupku, je výrazný pokles hodnoty síly v prvním vrcholu průběhů statických charakteristik na obr. 4.6. Proto byly realizovány další simulace, při nichž bylo zkoumáno, zda a jakým způsobem lze dosáhnout ještě lepších vlastností než v předchozím případě. Ukázalo se, že vhodnou úpravou, resp. optimalizací tvaru vnější hrany jádra, lze částečně zabránit tak výraznému poklesu síly. Zároveň lze za prvním vrcholem průběhu dosáhnout v určitém rozsahu pohybu jádra téměř konstantní hodnoty síly působící na toto jádro. Celý aktuátor s takto upraveným jádrem je zobrazen na obr. 7.1.



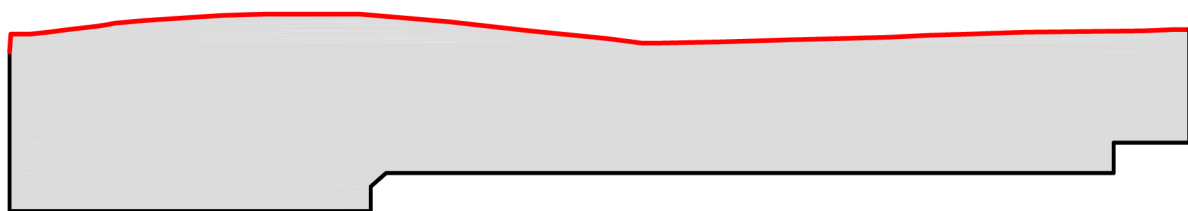
Obr. 7.1. Aktuátor s „optimalizovaným“ jádrem.

V tomto konstrukčním uspořádání jsou navíc uvažovány ještě další změny. Nejvýznamnější z nich je omezení dráhy pohybu jádra. Posunutím výchozí polohy jádra více

do středu aktuátoru dojde k „odříznutí“ první části průběhu statické charakteristiky před jejím prvním vrcholem. Tato výchozí poloha není zvolena náhodně, ale přesně v místě prvního vrcholu průběhu. Tím je zajištěno, že na jádro bude působit „maximální možná“ síla ihned na počátku pohybu jádra. Další část průběhu statické charakteristiky je ovlivňována právě tvarem vnější hrany jádra. Při numerických výpočtech bylo dosaženo takového tvaru této hrany, která odpovídá téměř konstantní síle na dráze dlouhé 25 mm – viz obr. 7.2. Optimalizovaný tvar hrany takového jádra je znázorněn v obr. 7.3.



Obr. 7.2. Statické charakteristiky aktuátoru s „optimalizovaným“ jádrem.



Obr. 7.3. Tvar hrany „optimalizovaného“ jádra aktuátoru.

## 8. Závěr – stručné shrnutí, porovnání výsledků

V předložené diplomové práci byl proveden návrh a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru se dvěma cívkami. Hlavním požadavkem bylo dosažení konstantní síly aktuátoru v nejvyšším možném rozsahu pohybu jádra. Na počátku návrhu byl nejprve zjišťován vliv jednotlivých cívek v magnetickém obvodu aktuátoru. Poté bylo zkoumáno ovlivňování statické charakteristiky z hlediska různých geometrických úprav magnetického obvodu. Na základě dílčích výsledků byla postupně získávána představa o funkci aktuátoru s tímto konstrukčním uspořádáním. Pro numerické řešení rozložení magnetického pole aktuátoru a simulace byla využívána aplikace Agros2D.

V průběhu návrhu bylo zjištěno, že jedním z nejvýraznějších prvků, ovlivňujícím konstantní průběh statické charakteristiky, je vzdálenost hrany středního sloupku magnetického obvodu od hrany pohyblivého jádra. Tento poznatek byl základem pro další modifikace jednotlivých parametrů aktuátoru a byl tak dopracován konečný návrh aktuátoru, včetně návrhu elektrického obvodu. Následujícím krokem bylo vypracování výkresové dokumentace. Ta byla podkladem pro výrobu reálného aktuátoru, na němž měly být ověřeny výsledky získané z numerických výpočtů.

Měření statických charakteristik vyrobeného aktuátoru bylo realizováno na měřícím přípravku v laboratoři Katedry teoretické elektrotechniky FEL ZČU Plzeň. Porovnáním výsledků získaných z numerických výpočtů a výsledků z provedených měření, byly potvrzeny teoreticky předpokládané výsledky. Větší odchylky průběhů, které se vyskytují při vyšších hodnotách budícího proudu, resp. při vyšším sycení magnetického obvodu, mohou být způsobeny nepřesnými hodnotami materiálových vlastností použitého materiálu pro magnetický obvod. Z výsledných statických charakteristik vyplývá, že je reálné v určité části jejich průběhu získat konstantní hodnotu síly.

V závěru práce byl proveden teoretický návrh aktuátoru s optimalizovaným tvarem jádra bez experimentálního ověření. Jeho hlavním přínosem by mělo být omezení výrazného poklesu hodnoty síly v prvním vrcholu průběhu statické charakteristiky vyrobeného aktuátoru a dosažení rovnoměrnějšího průběhu za tímto vrcholem.



## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Mayer D., Ulrych B.: Elektromagnetické aktuátory, *BEN - technická literatura*, Praha 2008, ISBN 978-80-7300-216-9, EAN 9788073002169
- [2] Mayer D.: Aplikovaný elektromagnetismus, *Kopp nakladatelství*, České Budějovice 2012, ISBN 978-80-7232-424-8
- [3] Mayer D.: Teorie elektromagnetického pole - 1. díl, *Západočeská univerzita v Plzni*, Plzeň 2004, ISBN 80-7082-826-9
- [4] Mayer D.: Teorie elektromagnetického pole - 2. díl, *Západočeská univerzita v Plzni*, Plzeň 2004, ISBN 80-7082-826-9
- [5] Mayer D., Ulrych B.: Základy numerického řešení elektrických a magnetických polí, *SNTL/ALFA*, Praha 1988
- [6] Mayer D., Polák J.: Metody řešení elektrických a magnetických polí, *SNTL/ALFA*, Praha 1983
- [7] Benešová Z., Mayer D.: Základní příklady z teorie elektromagnetického pole, *Západočeská univerzita v Plzni*, Plzeň 2001, ISBN 80-7082-818-8
- [8] Haňka L.: Teorie elektromagnetického pole, *SNTL/ALFA*, Praha 1982
- [9] Haňka L.: Teorie elektromagnetického pole, *SNTL/ALFA*, Praha 1975
- [10] Kvasnica J.: Teorie elektromagnetického pole, *ACADEMIA PRAHA*, Praha 1985
- [11] Novotný K.: Teorie elektromagnetického pole I, Vydavatelství ČVUT, Praha 2005, ISBN 80-01-03226-4
- [12] Votruba V., Muzikář Č.: Teorie elektromagnetického pole, *Nakladatelství Československé akademie věd*, Praha 1955
- [13] Szántó L.: MAXWELLOVY ROVNICE a jejich názorné odvození – 2. vydání, *BEN - technická literatura*, Praha 2012, ISBN 978-80-7300-450-7, EAN 9788073000967
- [14] Bartoš V., Červený J., Hruška J., Kotlanová A., Skala B.: Elektrické stroje, *Západočeská univerzita v Plzni*, Plzeň 2006, ISBN 80-7043-444-9
- [15] Rektorys K., a spolupracovníci: Přehled užití matematiky I, *Nakladatelství Prometheus*, Praha 1996, ISBN 80-85849-92-5
- [16] Polák J.: Vektorová analýza, *Západočeská univerzita v Plzni*, Plzeň 1999, ISBN 80-7082-577-4

[17] Karban, P., Mach, F., Kůs, P., Pánek, D., Doležel, I.: Numerical solution of coupled problems using code Agros2D, Computing, 2013, Volume 95, Issue 1 Supplement, pp 381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4

## Seznam obrázků

Obr. 1.1. Blokové schéma obecného aktuátoru.

Obr. 1.2. Blokové schéma elektromagnetického aktuátoru.

Obr. 2.1. Základní konstrukce aktuátoru.

Obr. 3.1. Konstrukce navrhovaného aktuátoru.

Obr. 3.2. Vektorový magnetický potenciál + okrajové podmínky.

Obr. 4.1. Geometrie modelu navrhovaného aktuátoru.

Obr. 4.2. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 1 s vyznačením polohy jádra.

Obr. 4.3. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 2 s vyznačením polohy jádra.

Obr. 4.4. Superpozice magnetických obvodů (zjednodušující předpoklad s lineárním prostředím).

Obr. 4.5. Statická charakteristika magnetického obvodu s cívkou č. 1+2 s vyznačením polohy jádra.

Obr. 4.6. Statické charakteristiky při posunu hrany středního sloupku.

Obr. 4.7. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 79$  mm a proudovou hustotu  $\mathbf{J}_b = 4\text{A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

Obr. 4.8. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 30$  mm a proudovou hustotu  $\mathbf{J}_b = 4\text{A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

Obr. 4.9. Rozložení magnetických indukčních čar, magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a relativní permeability pro vzduchovou mezeru  $\delta = 1$  mm a proudovou hustotu  $\mathbf{J}_b = 4\text{A/mm}^2$  navrženého aktuátoru.

Obr. 4.10. Vypočtené statické charakteristiky navrhovaného aktuátoru s hranou středního sloupku v „základní poloze“.

Obr. 4.11. Vypočtené statické charakteristiky navrhovaného aktuátoru s hranou středního sloupku, která je umístěna shodně s hranou vyrobeného aktuátoru.

Obr. 5.1. Pohled na rozložený a sestavený aktuátor.

Obr. 6.1. Změřené statické charakteristiky aktuátoru.

Obr. 6.2. Porovnání vypočtené a změřené statické charakteristiky aktuátoru.

Obr. 6.3. Měření statické charakteristiky aktuátoru.

Obr. 7.1. Aktuátor s „optimalizovaným“ jádrem.

Obr. 7.2. Statické charakteristiky aktuátoru s „optimalizovaným“ jádrem.

Obr. 7.3. Tvar hrany „optimalizovaného“ jádra aktuátoru.

## Seznam tabulek

Tab. 4.1. Proudové hustoty zvolené pro ověření statických charakteristik.

Tab. 4.2. Vypočítané Joulovy ztráty  $P_J$  jedné cívky v závislosti na proudové hustotě  $J_b$ .

Tab. 6.1. Naměřené hodnoty.

## Seznam příloh

Příloha č. 1 - celkový výkres aktuátoru

Příloha č. 2 - výkres spodní části magnetického obvodu

Příloha č. 3 - výkres střední části magnetického obvodu

Příloha č. 4 - výkres horní části magnetického obvodu

Příloha č. 5 - výkres pláště magnetického obvodu

Příloha č. 6 - výkres pohyblivého jádra

Příloha č. 7 - výkres středového vodícího trnu

Příloha č. 8 - výkres kluzného kontaktu

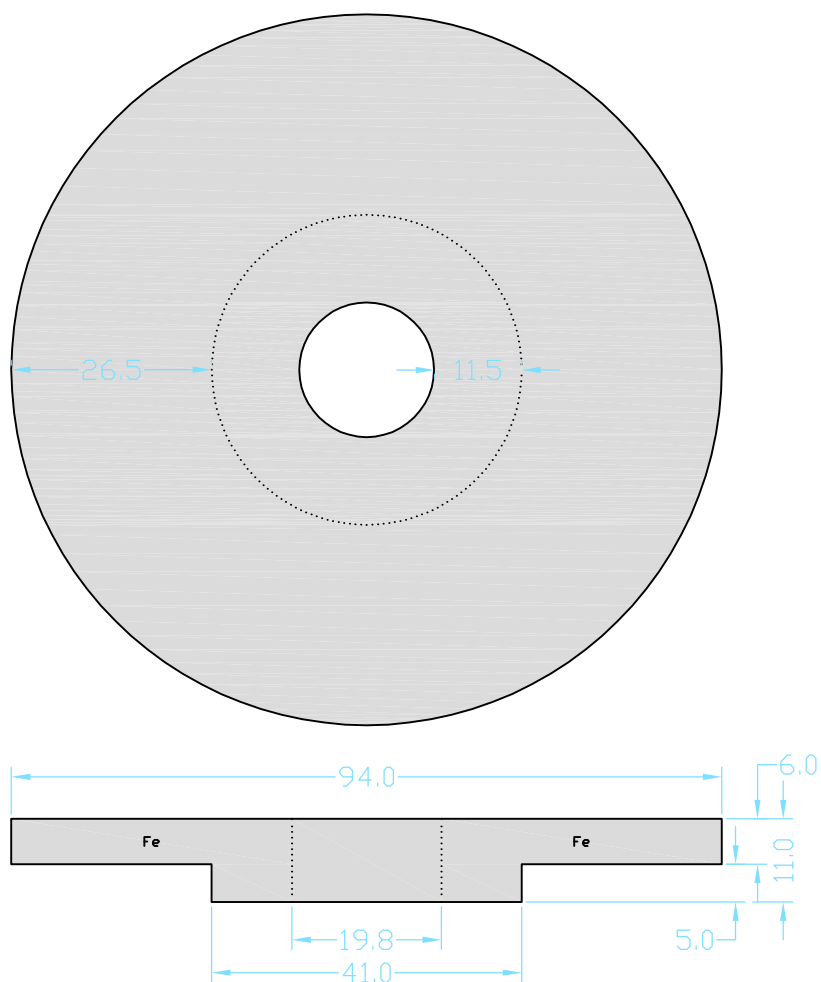
Příloha č. 9 - výkres kostry cívky



## Příloha č. 2 - výkres spodní části magnetického obvodu

Měřítko 1:1

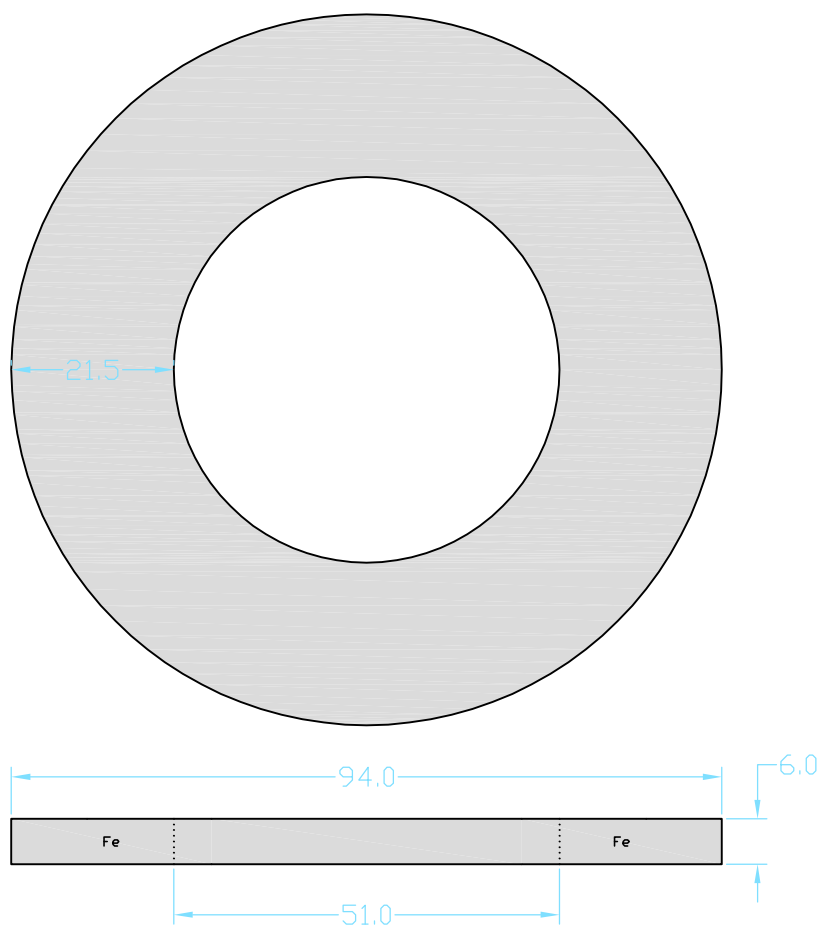
1 ks



## Příloha č. 3 - výkres střední části magnetického obvodu

Měřítko 1:1

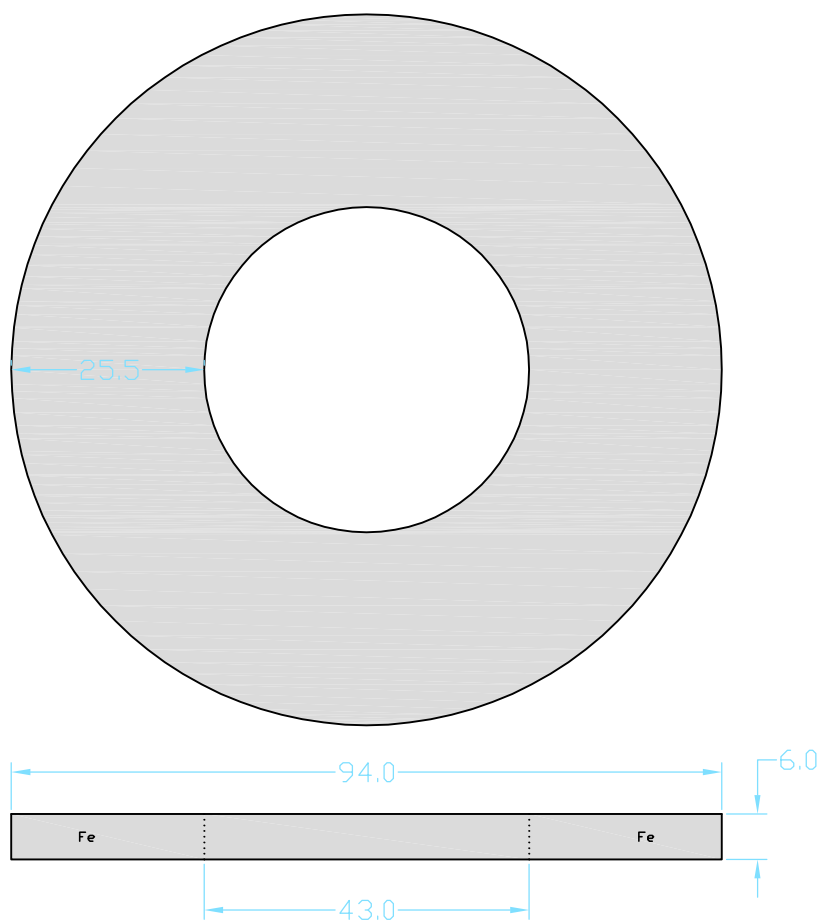
1 ks



## Příloha č. 4 - výkres horní části magnetického obvodu

Měřítko 1:1

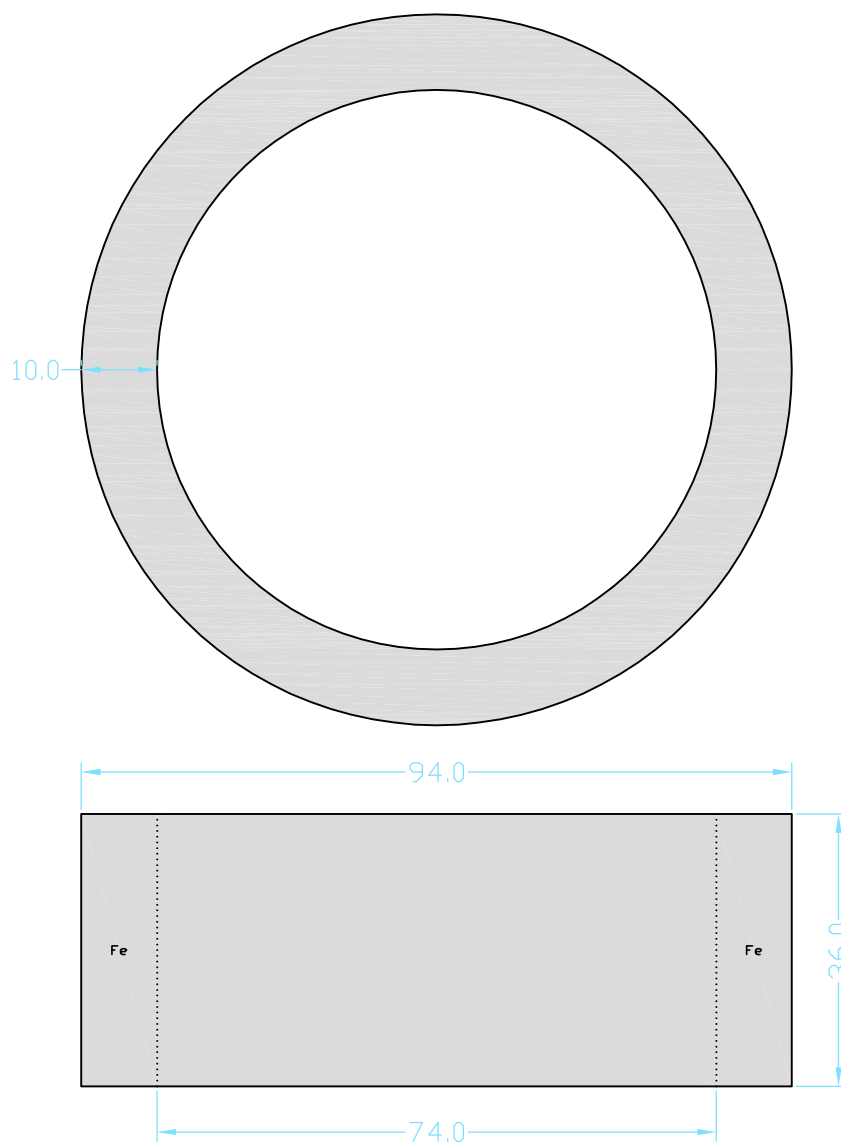
1 ks



## Příloha č. 5 - výkres pláště magnetického obvodu

Měřítko 1:1

2 ks



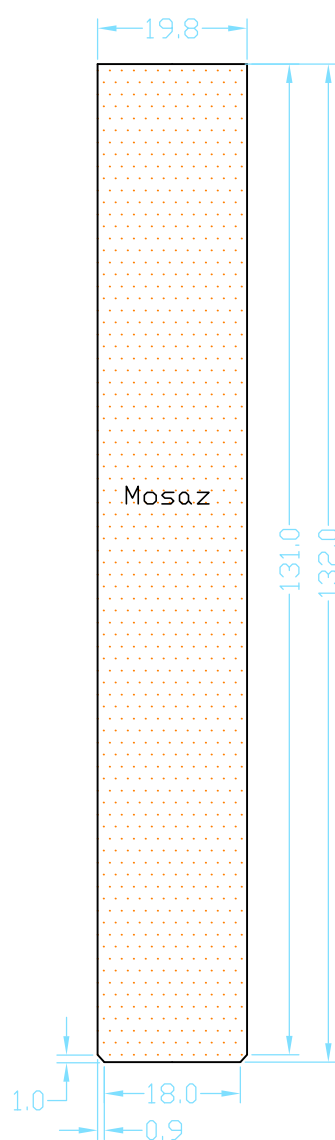
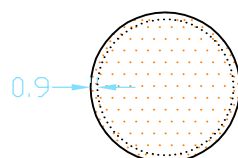




## Příloha č. 7 - výkres středového vodícího trnu

Měřítko 1:1

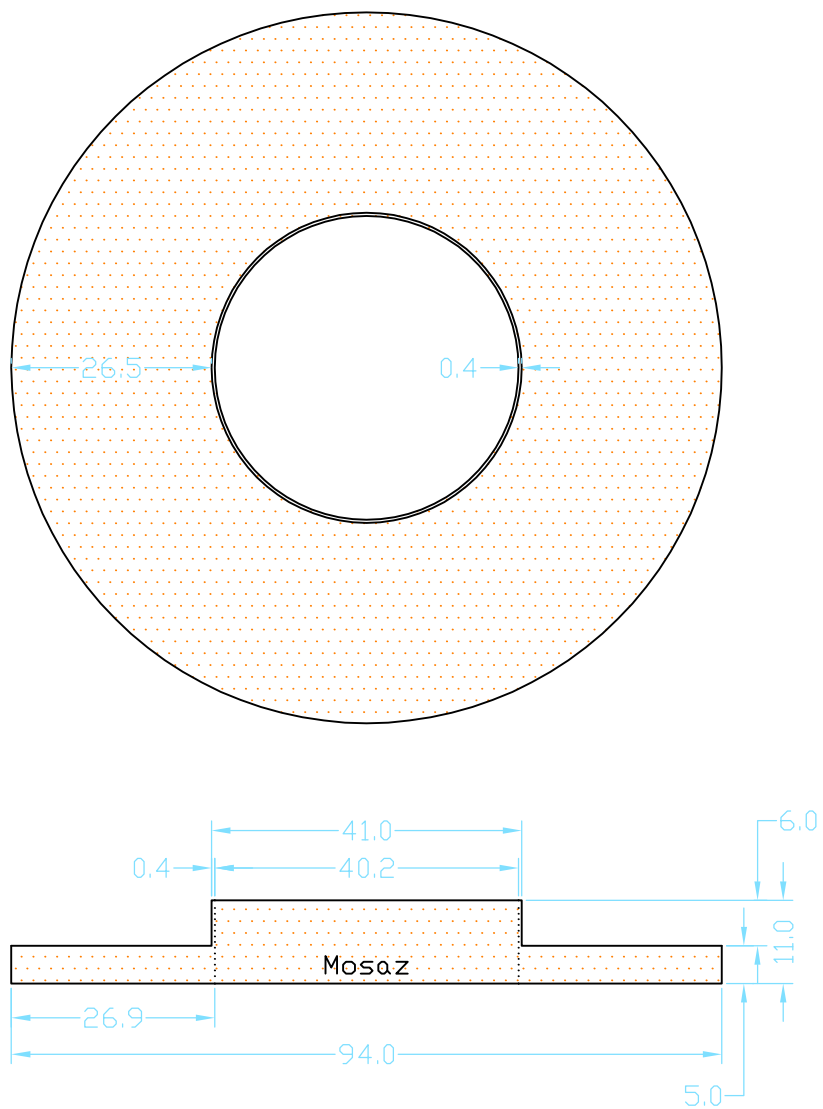
1 ks



## Příloha č. 8 - výkres kluzného kontaktu

Měřítko 1:1

1 ks



## Příloha č. 9 - výkres kostry cívky

Měřítko 1:1

2 ks

