

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Návrh a diagnostika elektromagnetického aktuátoru**

***VYMĚNIT ZA ZADÁNÍ!!!!***

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá návrhem elektromagnetického aktuátoru s více cívkami, jeho numerickým řešením ve výpočtovém programu Agros2D a ověřením jeho funkčnosti na experimentálním zařízení.

## **Klíčová slova**

Aktuátor, elektromagnetické pole, Agros2D, jádro aktuátoru, plášť aktuátoru, cívka, statická charakteristika

**Abstract**

This work deal with a proposal of electromagnetic actuator with more coils, numerical solution of actuator in computational program Agros2D and verification of actuator on the experimental equipment.

**Key words**

Actuator, electromagnetic field, Agros2D, core of actuator, wrap of actuator, coil, static characteristic

## **Prohlášení**

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

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

.....  
podpis

V Plzni dne 4.6.2014

Jan Hlavnička

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu této práce Ing. Františku Machovi a Doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. za ochotu, vstřícný přístup a cenné rady při řešení problémů, které při řešení této práce nastaly.

Mé velké díky patří také mé rodině a přítelkyni za možnost studovat kvalitní vysokou školu, dále za podporu, péči a trpělivost, kterou mi projevovali během celé doby studia.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>7</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>8</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>1 ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY</b> .....	<b>10</b>
1.1 PROVEDENÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH AKTUÁTORŮ .....	10
1.1.1 <i>Aktuátor využívající silové působení magnetického pole na feromagnetické jádro</i> .....	10
1.1.2 <i>Aktuátor využívající silového působení magnetického pole permanentních magnetů</i> .....	12
1.1.3 <i>Termoelastické aktuátory</i> .....	12
1.2 PRINCIP VZNIKU SILOVÉHO PŮSOBENÍ .....	13
1.3 VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH AKTUÁTORŮ .....	14
<b>2 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ A CÍLE PRÁCE</b> .....	<b>14</b>
2.1 METODY NÁVRHU TYPICKÉ PRO ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY .....	14
2.1.1 <i>Řešení magnetických obvodů pomocí Hopkinsonova zákona</i> .....	14
2.1.2 <i>Využití modelu magnetické pole k řešení MKP</i> .....	16
2.2 DÍLČÍ CÍLE PRÁCE .....	17
<b>3 NÁVRH ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORU</b> .....	<b>18</b>
3.1 SPECIFIKACE NAVRHOVANÉHO AKTUÁTORU .....	18
3.2 AGROS2D .....	19
3.3 VSTUPNÍ PODKLADY PRO NUMERICKÝ MODEL .....	20
3.4 NUMERICKÝ MODEL .....	21
3.5 VYPOČTENÉ HODNOTY .....	22
3.6 NÁVRH ŘÍZENÍ .....	24
<b>4 VÝROBA NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>26</b>
4.1 KONSTRUKČNÍ ZMĚNY OPROTI NUMERICKÉMU MODELU .....	26
4.2 VÝROBA JÁDRA A PLÁŠTĚ AKTUÁTORU .....	26
4.3 VÝROBA CÍVEK AKTUÁTORU .....	26
4.4 ZOHLEDNĚNÍ KONSTRUKČNÍCH ÚPRAV .....	26
<b>5 DIAGNOSTIKA NAVRŽENÉHO ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>28</b>
5.1 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY .....	28
5.2 POROVNÁNÍ NAMĚŘENÝCH A VYPOČTENÝCH HODNOT .....	28
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>30</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>31</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>

## Seznam symbolů a zkratk

$I$	Elektrický proud [A]
$\zeta$	Vzduchová mezera [mm]
$F_m, F_L$	Síla magnetického pole [N]
$B$	Magnetická indukce [T]
$f$	Frekvence [Hz]
$\mu$	Permeabilita [H/m]
$J$	Proudová hustota [A/m <sup>2</sup> ]
$W_m$	Energie magnetického pole [J]
$L$	Indukčnost [H]
$U_m$	Magnetické napětí [A]
$R_m$	Magnetický odpor [H <sup>-1</sup> ]
$A$	Magnetický potenciál
$\Phi$	Magnetický tok [Wb]
$N$	Počet závitů
$S$	Plocha [m <sup>2</sup> ]
$k_p$	Koeficient plnění
$\Gamma$	Hranice zkoumané oblasti
$z$	Posun jádra [mm]



## Úvod

Předkládaná práce se zabývá návrhem elektromagnetického aktuátoru a jeho následnou realizací. Aktuátor byl navržen ve vývojovém prostředí programu Agros2D, který je vyvíjen Katedrou teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Práce je rozdělena do několika částí. V první části je uveden elektromagnetický aktuátor jako obecné zařízení, jeho funkce a základní typy. Další část obsahuje současný stav znalostí, tedy současné využití aktuátorů, metody jejich návrhu a jejich budoucí využití. Tato část také obsahuje volbu aktuátoru, kterému se tato práce dále věnuje. V následující části je uveden návrh modelu vybraného aktuátoru, návrh jeho magnetického obvodu a řízení. Poslední část obsahuje diagnostiku navrženého zařízení na experimentálním vzorku.

# 1 Elektromagnetické aktuátory

Lineární aktuátor je zařízení, které přeměňuje vstupní formu energie na lineární posun na výstupu. Typickým příkladem lineárního aktuátoru je pneumatický píst, který k lineárnímu posunu využívá silového působení tlaku plynu v nádobě. Elektronicky ovládané aktuátory naopak využívají k lineárnímu posunu otáčivý pohyb DC motorku. Aktuátory elektromagnetické, jak již z názvu vyplývá, využívají k lineárnímu posuvu sílu magnetického pole, působící na feromagnetické jádro aktuátoru, která je vyvolaná proudem ve vodiči budící cívky aktuátoru.

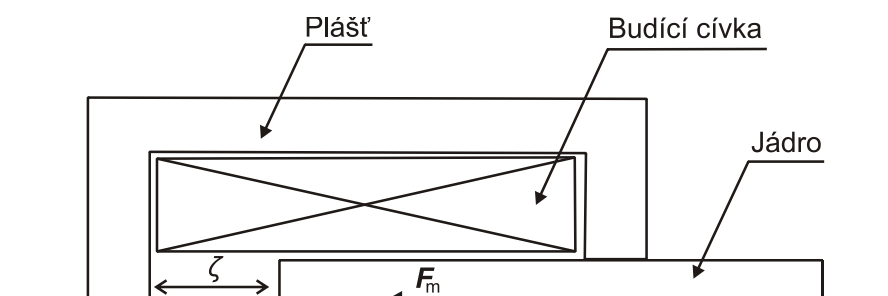
Tyto aktuátory se využívají pro své krátké reakční časy a velké silové účinky. Mezi další výhody patří jednoduchá robustní konstrukce, variabilita zařízení a možnosti jeho ovládání.

## 1.1 Provedení elektromagnetických aktuátorů

Elektrické aktuátory lze na základě jejich konstrukce rozdělit do tří základních skupin, které jsou popsány v následujících podkapitolách.

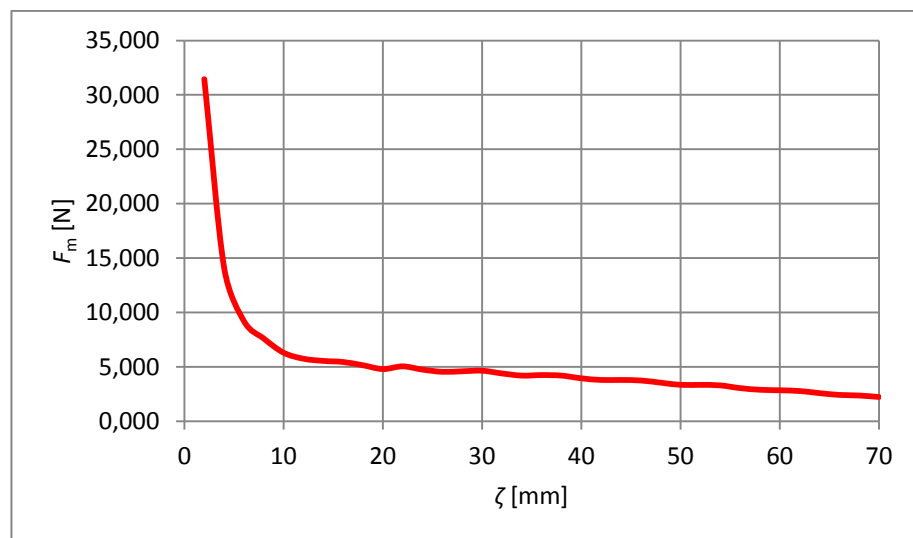
### 1.1.1 Aktuátor využívající silové působení magnetického pole na feromagnetické jádro

Jedná se o nejjednodušší elektromagnetický aktuátor. Tento elektromagnetický aktuátor využívá sílu magnetického pole působící na feromagnetický materiál, vyvolanou průchodem elektrického proudu vodičem. Samozřejmě se nevyužívá jeden samostatný vodič, ale cívka s více závitů. Ta je napájena zdrojem konstantního proudu. Do cívky, která je navinuta na magneticky nevodivou kostru, je vtahováno feromagnetické jádro. Pro maximální využití magnetického toku je cívka zasazena do feromagnetického pláště. Základní části elektromagnetického aktuátoru jsou znázorněny na *Obr. 1.1*.



Obr. 1.1 Základní principiální schéma elektromagnetického aktuátoru.

Jak je patrné na *Obr. 1.1*, jádro aktuátoru je vzdálené od pláště o vzduchovou mezeru  $\zeta$ . V okamžiku připojení cívky ke zdroji začne cívkou protékat elektrický proud  $I$ , který indukuje v magnetickém obvodu, tvořeném feromagnetickým jádrem a pláštěm, magnetický tok  $\Phi$ . Toto magnetické pole působí na jádro silou  $F_m$ . Silový účinek je využit ke zmenšení vzduchové mezery  $\zeta$ . Čím menší vzduchová mezerka je, tím větší síla působí na jádro aktuátoru. Změříme-li silové působení cívky na jádro aktuátoru, dostáváme statickou charakteristiku aktuátoru, jejíž příklad je uveden na *Obr. 1.2*. Tvar této charakteristiky je typický pro aktuátor uvedený na *Obr. 1.1*.

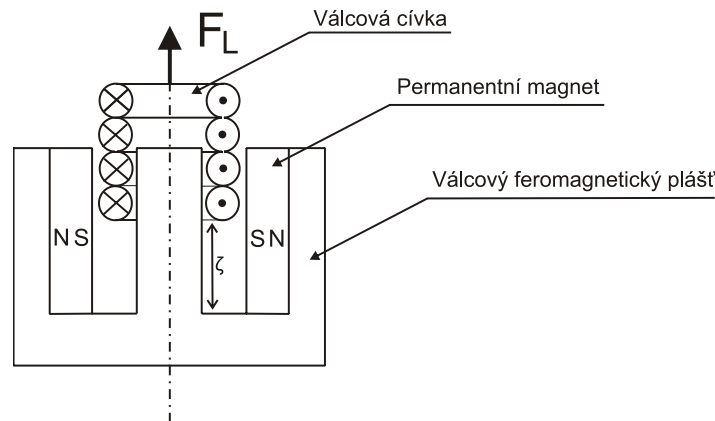


*Obr. 1.2* Typická statická charakteristika elektromagnetického aktuátoru

Tvar statických charakteristik lze přizpůsobit požadavkům, podle kterých má aktuátor pracovat. Lze charakteristiku upravovat například pomocí tvarování jádra i magnetického obvodu. Silové účinky lze ovlivnit například velikostí napájecího proudu.

### 1.1.2 Aktuátor využívající silového působení magnetického pole permanentních magnetů

Činnost těchto aktuátorů využívá silového působení permanentních magnetů, které svou silou nemusejí působit jen na cívku protékanou proudem (Obr. 1.3), ale také na jádro aktuátoru.



Obr. 1.3 Aktuátor využívající silového působení permanentního magnetu na cívku protékanou proudem.

Na Obr. 1.3 je uvedeno principiální schéma aktuátoru využívajícího magnetickou sílu permanentního magnetu, která působí na válcovou cívku. Velikost síly  $F_L$  závisí na velikosti proudu protékaného cívku a magnetické indukci  $B_r$  charakterizovanou remanentní indukci permanentního magnetu. Směr této síly lze ovlivnit směrem protékaného proudu a orientací magnetů. I pro tento typ aktuátoru lze vytvářet různé průběhy statických charakteristik v závislosti na geometrických parametrech a budícím proudem.

Působí-li permanentní magnet svou silou na feromagnetické jádro aktuátoru, cívka aktuátoru slouží k zesílení magnetického pole (čímž dojde k rychlejšímu přitažení jádra nebo možnosti přitahování těžších předmětů), nebo k jeho zeslabení (toho využíváme např. pro posun jádra aktuátoru do jiné polohy, zvýšení vzduchové mezery  $\zeta$ ).

### 1.1.3 Termoelastické aktuátory

Termoelastické aktuátory jsou rozděleny podle použitého dilatačního prvku na bimetalické a monometalické. V obou případech je jejich princip totožný. Cívka je buzena střídavým proudem  $I_z$  o frekvenci  $f$ , který vytvoří v dilatačním prvku časově proměnné magnetické pole. Toto pole indukuje vířivé proudy, které dilatační prvek zahřejí. Tímto ohřevem dochází v dilatačním prvku ke zvýšení teploty, termoelastické napjatosti a následně k deformaci a posuvu [1].

## 1.2 Princip vzniku silového působení

Energie magnetického pole aktuátoru  $W_m$  je závislá na indukčnosti cívky  $L$ . Tato indukčnost se mění v závislosti na zasunutí pohyblivého jádra, tedy na velikosti vzduchové mezery  $\zeta$ , která vzniká v ose řešeného aktuátoru mezi pohyblivým jádrem a pláštěm. Pro sílu  $F_z$ , působící na pohyblivé jádro aktuátoru v ose procházející jeho středem platí podle obecné definice síly magnetického pole vztah

$$F_z = \frac{\partial W_m}{\partial \zeta} = \frac{1}{2} * I^2 * \frac{dL(\zeta)}{d\zeta}, \quad (1.1)$$

z něhož je zřejmé, že velikost síly působící na pohyblivé jádro je závislá na poloze jádra. Tato závislost je označována jako statická charakteristika [1].

Velikost síly působící v magnetickém poli lze určit i pomocí Maxwellova magnetického tenzoru pnutí.

## 2 Současný stav znalostí a cíle práce

### 2.1 Využití elektromagnetických aktuátorů

Elektromagnetické aktuátory disponují velmi krátkou reakční dobou a poměrně velkými akčními silami. S přihlédnutím k těmto skutečnostem lze tyto prvky instalovat do zařízení, u kterých očekáváme rychlou reakci. Avšak i přesto jsou aktuátory konstruovány spíše experimentálně, např. pro ovládání spojky v závodních vozech.

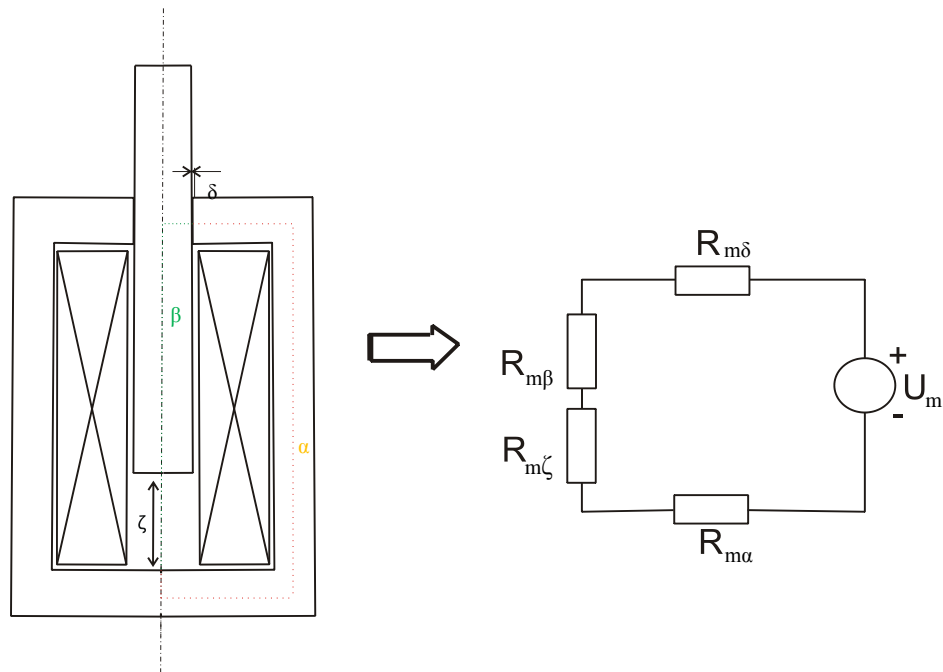
Hlavní využití elektromagnetické aktuátory nacházejí jako manipulátory. Tyto prvky v současné době procházejí velkým vývojem, potenciál jejich budoucího uplatnění je značný. V současné době jsou využívány převážně v automobilovém průmyslu, např. firmou Continental [2] jsou užívány jako elektronicky řízené škrťací ventily nebo ventily recirkulace výfukových plynů. Dále se využívají jako tlumiče nebo jako vypínače hlavních pólů v automatizačních prvcích typu recloser distribuční sítě 22 kV.

### 2.2 Metody návrhu typické pro elektromagnetické aktuátory

Pro návrh elektromagnetických aktuátorů se používají základní metody pro řešení elektrických a magnetických polí, ale také pokročilé metody, jakou je např. metoda konečných prvků. Pro řešení magnetických polí využíváme Maxwellovy rovnice, okrajové podmínky pro potenciály a řešení magnetických obvodů pomocí Hopkinsonova zákona a magnetického odporu. Veličiny a postupy užívané k výpočtu elektromagnetických polí jsou uvedeny v následujících podkapitolách.

#### 2.2.1 Řešení magnetických obvodů pomocí Hopkinsonova zákona

Pro řešení magnetických obvodů se využívá převodu magnetického obvodu na náhradní schéma popsané Hopkinsonovým zákonem a magnetickými odpory. Příklad tohoto převodu je uveden na *Obr. 2.1*.



Obr. 2.1 Ekvivalentní magnetický obvod pro elektromagnetický aktuátor

Ekvivalentní obvod uvedený na Obr. 2.1 znázorňuje základní principiální schéma elektromagnetického aktuátoru. Magnetické napětí  $U_m$  [A], které vyjadřuje parametry použité cívky aktuátoru, je dáno vztahem

$$U_m = N * I, \quad (2.1)$$

kde  $N$  je počet závitů budící cívky a  $I$  je proud tekoucí budící cívkou.

Magnetický odpor (reluktance)  $R_m$  [ $H^{-1}$ ] je dán vztahem

$$R_m = \int_l \frac{dl}{\mu * S}, \quad (2.2)$$

kde  $S$  je plocha průřezu pláště nebo vzduchové mezery. Permittivita prostředí  $\mu$  je materiálovou konstantou prostředí, v němž se elektromagnetické pole nachází. Délka střední siločáry posuzované části je  $l$ .

Magnetický odpor  $R_{m\delta}$  znázorňuje odpor vzduchové mezery mezi jádrem a pláštěm aktuátoru,  $R_{m\alpha}$  odpor pláště aktuátoru.  $R_{m\zeta}$  odpor vzduchové mezery mezi spodní stranou jádra a pláštěm aktuátoru a  $R_{m\beta}$  odpor jádra aktuátoru.

## 2.2.2 Využití modelu magnetického pole

Rozložení magnetického pole lze pro případ obecného elektromagnetického aktuátoru popsat parciální diferenciální rovnicí, vycházející z první Maxwellovy rovnice, formulovanou pro vektorový potenciál  $\mathbf{A}$ . Pro výsledky této práce byla tato rovnice zjednodušena na tvar

$$\operatorname{rot}\left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B})}\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)=\mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (2.3)$$

kde  $\mu$  značí permeabilitu, která pro zpřesnění této práce byla závislá na magnetické indukci  $\mathbf{B}$ . Tato závislost je uvedena na *Obr. 3.3*.  $\mathbf{J}_{\text{ext}}$  je proudová hustota magnetického pole. Výpočet této veličiny pro účely této práce je uveden v kapitole 3.3.

Při numerickém řešení metodou konečných prvků, která je v této oblasti často využívána, je nutné řešenou úlohu omezit okrajovými podmínkami pro magnetický potenciál:

- **Dirichletova**

Na hranici zkoumané oblasti  $\Gamma$  je známá hodnota vektorového potenciálu  $\mathbf{A}$ . S touto okrajovou podmínkou se lze setkat např. v pravoúhlých souřadnicích, pokud hranicí  $\Gamma$  je indukční čára. Platí totiž, že v pravoúhlých souřadnicích jsou indukční čáry totožné s ekvipotenciálami vektorového potenciálu, tj.  $A_z = \text{konst.}$  [1]

- **Neumannova**

Tato podmínka předpokládá na hranici zkoumané oblasti  $\Gamma$  známou derivaci vektorového potenciálu podle vnější normály  $\frac{d\mathbf{A}}{dn}$ .



### 2.3 Dílčí cíle práce

Hlavním cílem práce bylo navržení experimentálního zařízení elektromagnetického aktuátoru využívající silové působení magnetického pole působící na feromagnetické jádro.

Dílčími cíli byli:

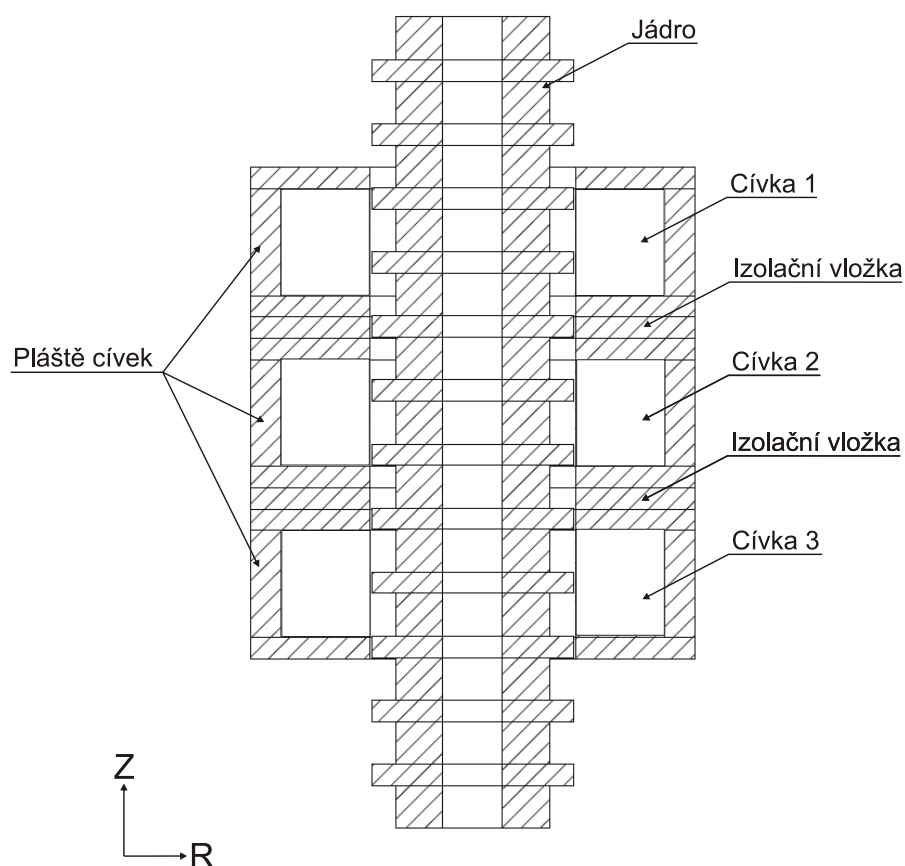
- *Návrh magnetického obvodu*
- *Návrh budících cívek*
- *Výroba magnetického obvodu a navinutí cívek*
- *Návrh a realizace řízení*
- *Kompletace zařízení*
- *Návrh a sestavení měřící aparatury*
- *Experimentální ověření funkčnosti zařízení a prokázání teoretických předpokladů*

### 3 Návrh elektromagnetické aktuátoru

Pro tuto práci byl zvolen aktuátor se třemi řídicími cívkami. Aktuátor je osově symetrický. Parametry cívek jsou totožné, jsou umístěny nad sebou ve stejné vzdálenosti a jsou napájeny stejnosměrným proudem. Principem funkce vybraného aktuátoru je postupné spínání řídicích cívek v určeném časovém intervalu a tím postupné posouvání jádra aktuátoru. Jádro je pro tuto aplikaci speciálně upraveno, na jeho povrchu jsou zuby, které slouží jako vodivá cesta magnetického toku  $\Phi$ .

#### 3.1 Specifikace navrhovaného aktuátoru

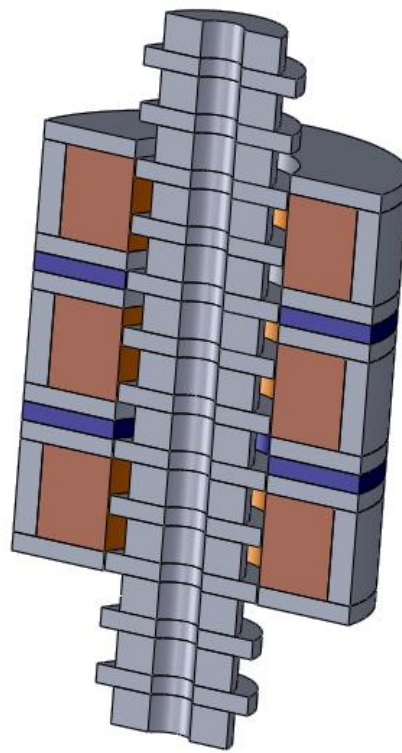
Nákres navrhovaného zařízení je uveden na *Obr. 3.1*. Navrhovanému předpokladu umístění cívek nad sebou předcházela studie umístění cívek na sebe. Tento předpoklad umožňoval regulaci síly působící na jádro aktuátoru pomocí připínání nebo odpínání cívek. Z pohledu dalšího zkoumání se však tato varianta jevila jako nezajímavá, proto od ní bylo upuštěno.



Obr. 3.1 Nákres navrhovaného aktuátoru

Každá cívka je zasazena v plášti z feromagnetického materiálu. Tyto pláště jsou od sebe izolovány 5 mm vysokou podložkou z izolačního materiálu tak, aby magnetická pole jednotlivých cívek nebyla vzájemně ovlivněna.

Jádro aktuátoru je tvořeno speciálně tvarovanou tyčí ze stejného materiálu jako plášť cívek. Tato tyč má na svém povrchu 5 mm dlouhé a 5,5mm vysoké zuby, které udávají základní délku posuvu aktuátoru. Vždy, když jedna z cívek sepne, bude k ní vlivem působení síly magnetického pole přitažen jeden ze zubů jádra. Cívky budou postupně přepínány v předem definovaném pořadí, aby docházelo k plynulému lineárnímu posuvu na zvolenou stranu. Jedná se tedy o aktuátor schopný posuvu ve dvou směrech.



Obr. 3.2 3D znázornění modelu zařízení navrženého v programu Solid Works 2010 [4]

### 3.2 Agros2D

Agros2D je program vyvíjený Fakultou elektrotechnickou Západočeské univerzity v Plzni, který slouží k numerickému řešení elektromagnetických polí. Podobně jako většina profesionálních programů obsahuje tři do značné míry autonomní části: preprocesor, procesor a postprocesor. V preprocesoru je možné modelovat požadovaný prvek, zadávat jeho geometrické parametry, měnit jeho charakteristiky, vkládat hodnoty námi požadovaných veličin. Procesor provádí vlastní numerické výpočty řešení příslušné úlohy, tj. v uzlech

diskretizační síť určuje hodnoty hledané veličiny. Např. v úloze řešení magnetického pole počítá v těchto bodech vektorový magnetický potenciál apod. Postprocesor graficky znázorňuje vypočtené veličiny z procesoru, je možné si zde vykreslit charakteristiky veličin, barevně či vektorově znázornit rozložení magnetického pole v okolí zkoumaného prvku apod. Dále umožňuje výpočty integračních veličin.

### 3.3 Vstupní podklady pro numerický model

K návrhu elektromagnetického aktuátoru s využitím třech cívek umístěných nad sebou bylo použito numerického návrhu v programu Agros2D [3]. Pro správné návržení aktuátoru bylo třeba určit několik vstupních veličin zejména počet závitů cívek  $N$ , proudovou hustotu  $J$  a zohlednění charakteristik magnetické indukce v závislosti na měrné permeabilitě feromagnetických materiálů. Počet závitů  $N$  byl spočten na základě vztahu

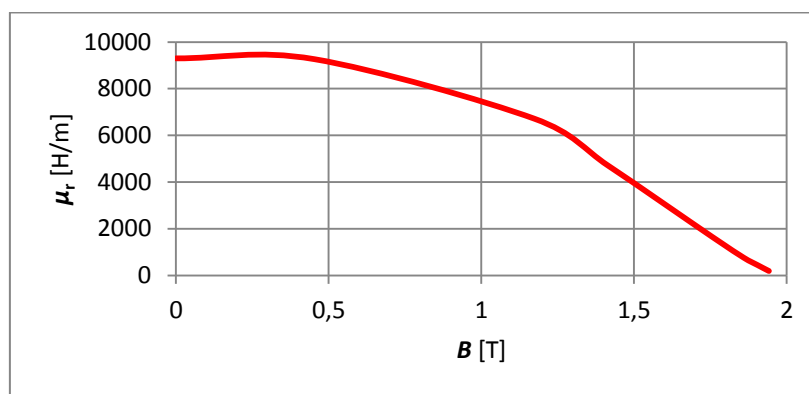
$$N = \frac{S_{civky}}{S_{drátu}} * k_p, \quad (3.1)$$

kde  $S$  značí plochu cívky nebo drátu a  $k_p$  koeficient plnění. Pro tuto práci byl zvolen vodič o průměru 0,5 mm a koeficient plnění 0,6. Uvažujeme tedy, že počet závitů  $N$  je 669. Proudová hustota

$$J = \frac{I}{S_{civky}} * N, \quad (3.2)$$

kteřá byla použita v návrhu je rovna  $1,54 \times 10^6$  A/m<sup>2</sup>. Tato hodnota uvažuje velikost napájecího proudu  $I = 2$  A. Uvažujeme-li délku použitého vodiče 145 m vyrobeného z mědi, je jeho odpor 13,187 Ω. Pro napájení cívek je tedy potřeba napájecí zdroj, který je schopen dodat stejnosměrný proud 2 A a 26,5 V.

Závislost relativní permeability na indukci, která byla zohledněna v nelineárním výpočtu numerického řešení aktuátoru, je uvedena na Obr. 3.3. Jedná se o charakteristiku čistého železa.

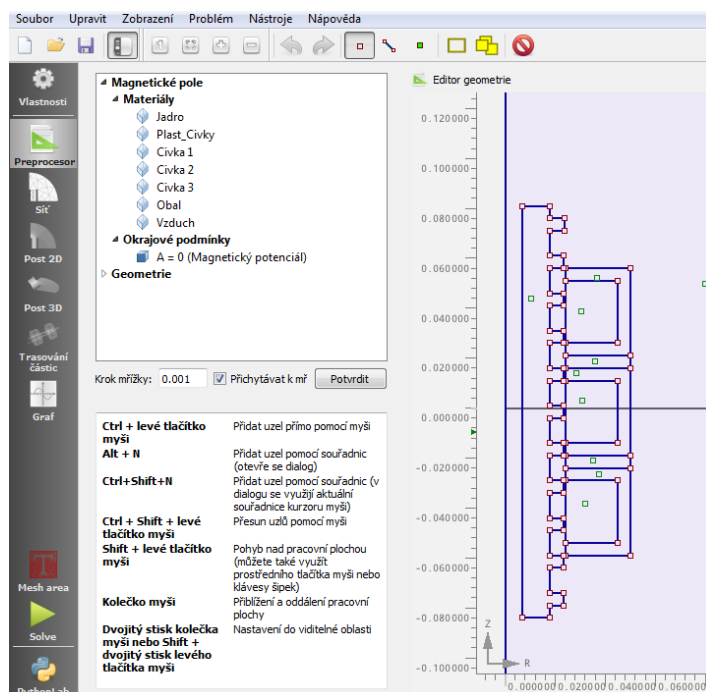


Obr. 3.3 Charakteristika magnetické indukce feromagnetických částí

### 3.4 Numerický model

Při navrhování numerického modelu a následných výpočtech byly uvažovány všechny veličiny vypočítané v kapitole 3.3. Dále byla definována hranice oblasti, která ohraničovala počítanou plochu. Vzdálenost této hranice byla konvergencí nastavena tak, aby neovlivnila probíhající výpočet. Na této hranici byla definována Dirichletova okrajová podmínka pro magnetický potenciál  $A = 0$ .

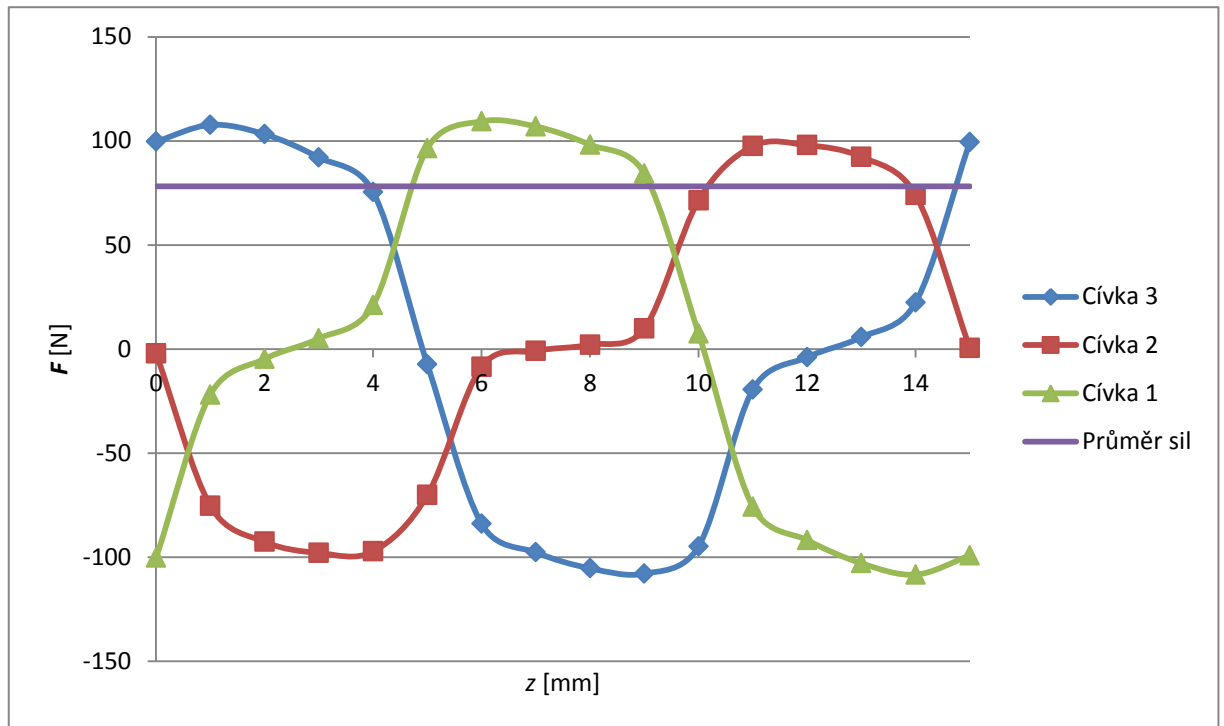
Výpočet statické charakteristiky byl proveden určením Maxwellovy síly v ose y (viz Obr. 3.5). Model navrhovaného aktuátoru nakreslený v preprocesoru programu Agros2D je znázorněn na Obr. 3.4.



Obr. 3.4 Ukázka vývojového prostředí programu Agros2D a model navrhovaného aktuátoru v preprocesoru tohoto programu

### 3.5 Vypočtené hodnoty

Pro navržený aktuátor byla vypočtena statická charakteristika, která je uvedena na *Obr. 3.5* ( $z$  značí polohu jádra). Ve výpočtu byla poloha jádra v základní poloze, která je znázorněna na *Obr. 3.2*. Z této polohy bylo jádro ve výpočtu posunováno směrem vzhůru po kroku 1 mm.



*Obr. 3.5 Statická charakteristika navrženého aktuátoru vypočtená programem Agros2D*

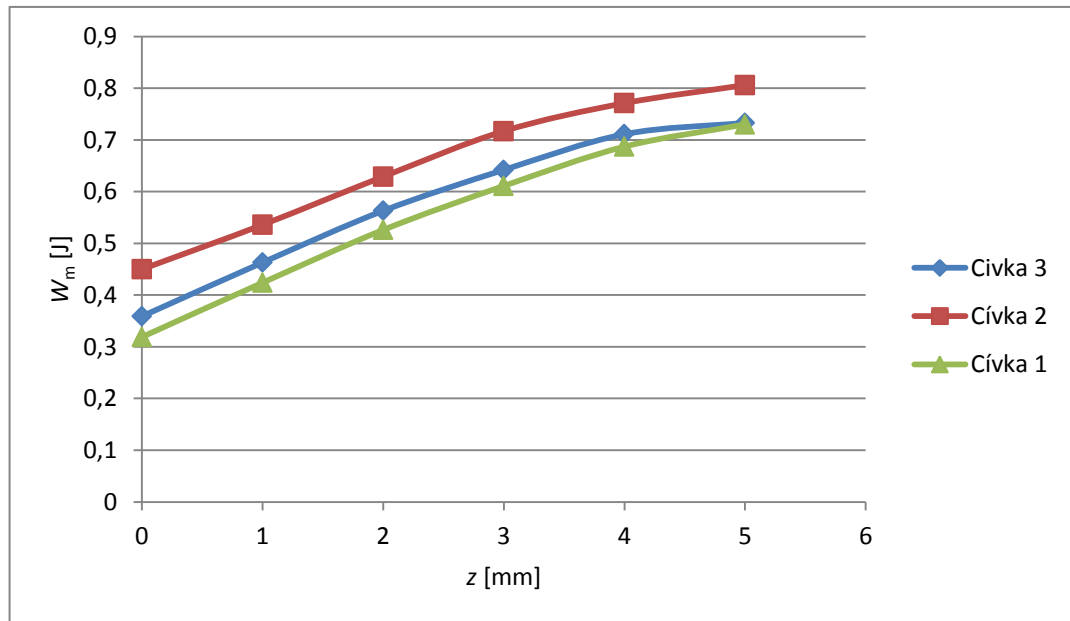
Ve výpočtu byla každá cívka napájena samostatně a bylo zaznamenáno silové působení po celý posun 15 mm. Ve statické charakteristice jsou uvedeny průběhy silového působení všech cívek. Z tohoto znázornění je patrné, že stálý silový účinek cívek, budeme-li je vhodně přepínat, je přibližně 50 N. Jedná se však pouze o teoretický předpoklad, neboť nezohledňuje třecí sílu.

Pro aktuátor byly také stanoveny průběhy energií jednotlivých cívek. Tyto průběhy jsou znázorněny na *Obr. 3.6*. Z průběhů energií byl stanoven podle vztahu

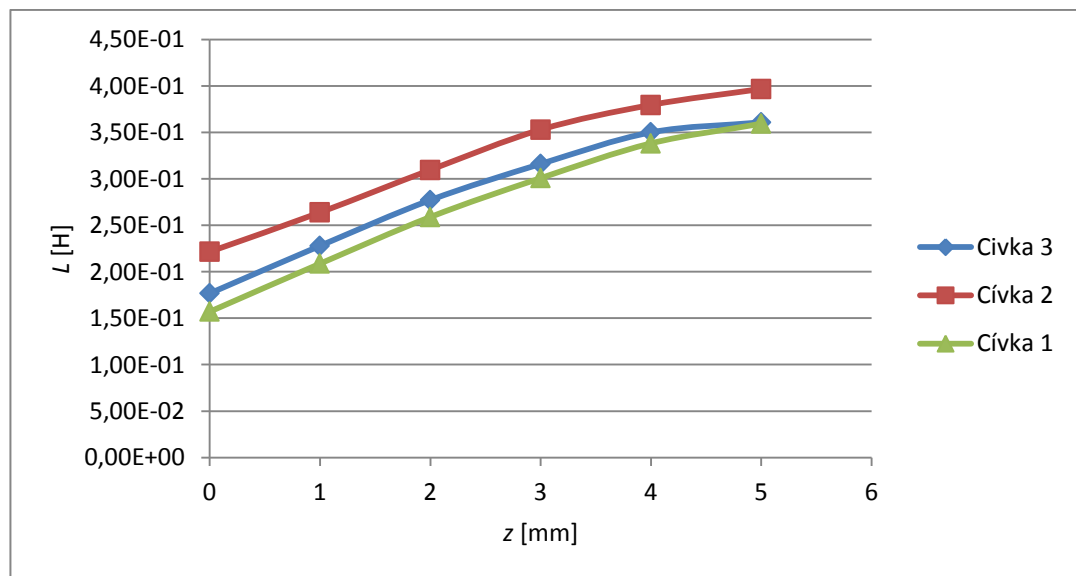
$$L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2}, \quad (3.3)$$

průběh indukčností cívek, který je uveden na *Obr. 3.7*. Průměrem všech hodnot indukčností dostáváme teoretickou předpokládanou hodnotu indukčnosti jedné cívky  $L = 292 \text{ mH}$ .

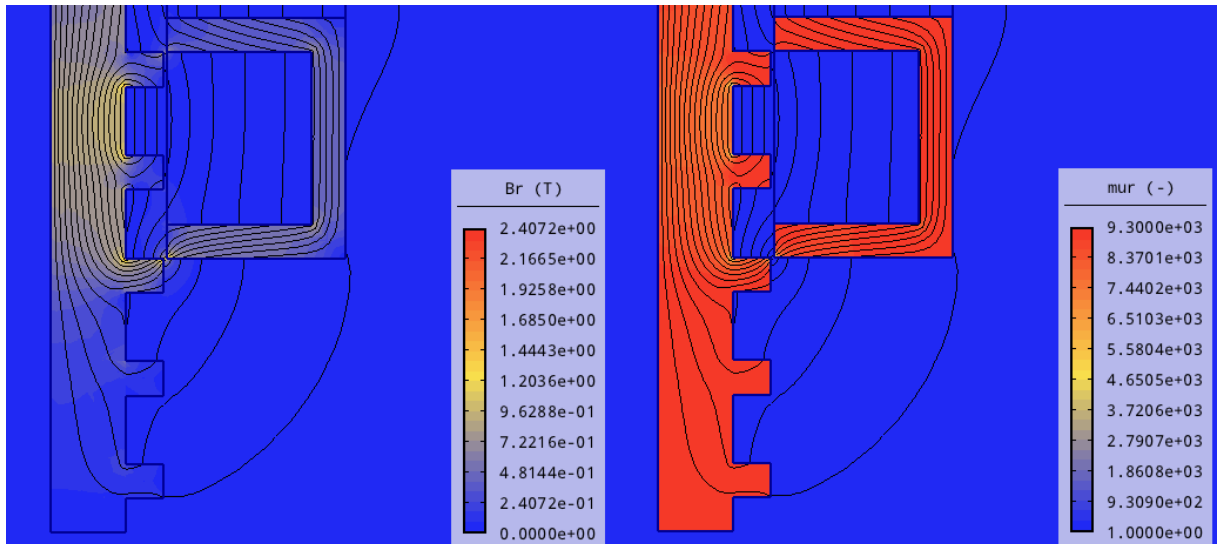
Tyto průběhy byly stanoveny pro každou cívku zvlášť, nebyly tedy napájeny dvě cívky současně. Cívky byly napájeny stejnosměrným proudem  $I = 2\text{A}$ .



Obr. 3.6 Průběhy energií jednotlivých cívek



Obr. 3.7 Průběhy indukčností jednotlivých cívek



Obr. 3.7 Magnetická indukce a relativní permeabilita na jedné z cívek aktuátoru

### 3.6 Návrh řízení

Pohyb aktuátoru je závislý na správném spínání jeho řídicích cívek. Předpoklad spínání cívek je dle spínacího diagramu uvedeném na Obr. 3.8. Řízení je realizováno pomocí tlačítkových spínačů a tranzistorů MOSFET. Schéma zapojení jednoho řídicího prvku je uvedeno na Obr. 3.9. Každá z cívek disponuje jedním tímto řídicím prvkem.

Pro jádro v základní poloze, uvedeném na Obr.3.1, platí postup spínání cívek pro cyklické spínání:

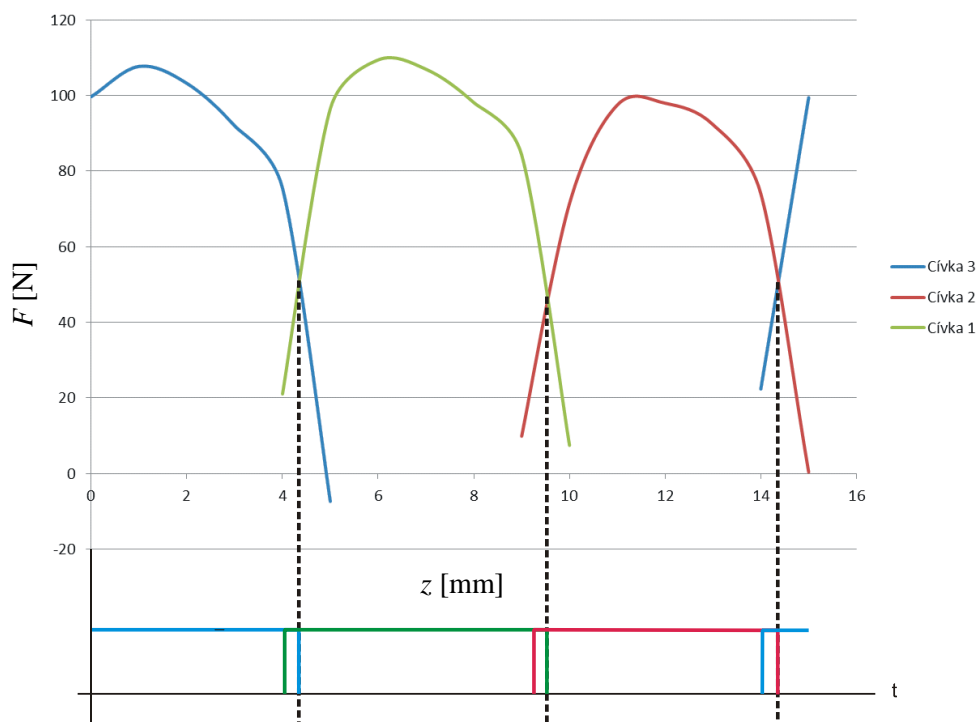
- *posun vzhůru*

Cívka č. 1 → Cívka č. 2 → Cívka č. 3

- *posun dolů*

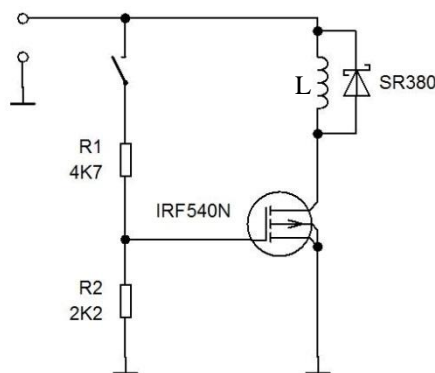
Cívka č. 2 → Cívka č. 1 → Cívka č. 3





Obr. 3.8 Spínací diagram cívek aktuátoru

Spínací diagram uvedený na *Obr. 3.8* uvažuje spínání cívek s částečným překrýváním, neboť v dané poloze jsou již cívky schopny si jádro aktuátoru „přitáhnout“ a lze tak lépe využít jejich silový potenciál.



Obr. 3.9 Spínací prvek jedné cívky

Jak je uvedeno na *Obr. 3.9*, ke spínání cívek bylo použito jednoduchého zapojení s tranzistorem MOSFET IRF540N. Tento tranzistor byl použit z důvodu velmi dobrých spínacích vlastností. Je opatřen děličem napětí pro přímé užití napájecího napětí pro spínání cívky. Cívka, kterou chceme sepnout, je umístěna v pozici L a je k ní paralelně připojena rychlá dioda SR380, která slouží k vybití napětí indukovaného v cívce po jejím odepnutí.

## 4 Výroba navrženého zařízení

### 4.1 Konstrukční změny oproti numerickému modelu

Z důvodu bezporuchového posuvu jádra aktuátoru byly do otvoru pro jádro přidány mosazné vodící tyče, které způsobily oddálení a zmenšení původně uvažovaných cívek. Z tohoto důvodu lze očekávat snížení účinné síly aktuátoru při napájecím proudu 2A.

### 4.2 Výroba jádra a pláště aktuátoru

Výroba jádra a pláště aktuátoru byla provedena prototypovými dílnami Západočeské univerzity v Plzni, aktuátor byl sestaven z „prstenců a puků“ jejichž přesné rozměry a množství je uvedeno v kapitole Přílohy. Tyto díly byly vyrobeny z konstrukční oceli, jejíž  $B-H$  charakteristiku bohužel výrobce nebyl schopen dodat. Pravděpodobně se jedná o ocel k zušlechťování ČSN 12040.

### 4.3 Výroba cívek aktuátoru

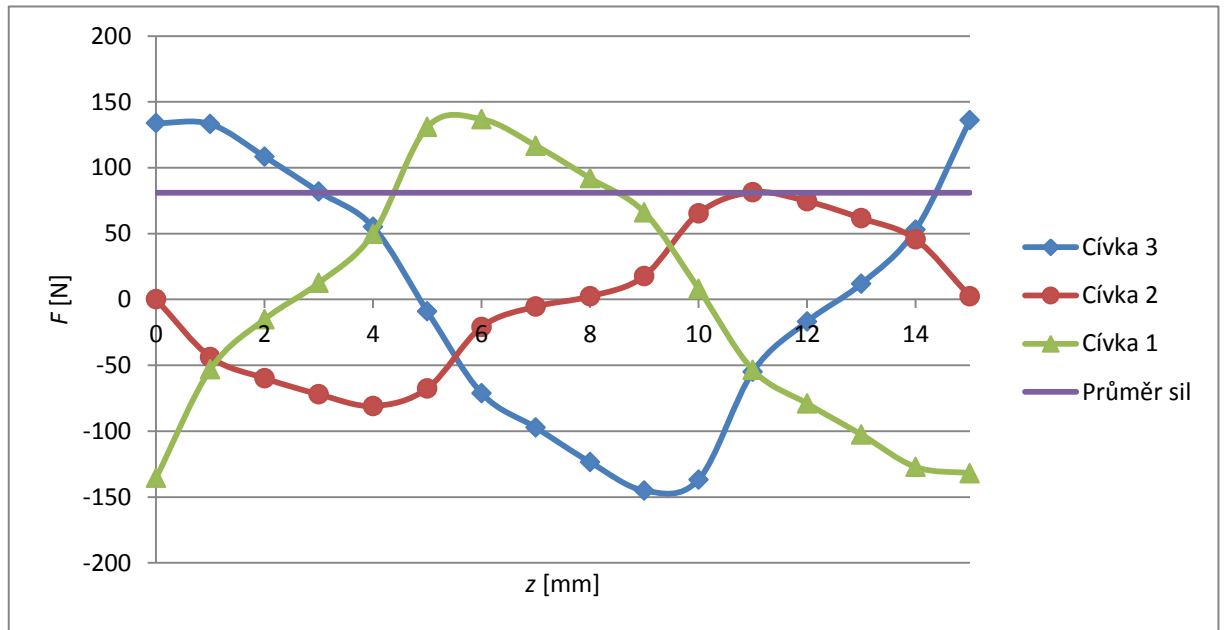
Navinutí cívek pro aktuátor proběhlo na Střední průmyslové škole v Českých Budějovicích, cívky byly navinuty z drátu o průměru 0,5 mm na kostru z prstence vyrobeného z Tecaformu AH60. Na jedné cívce je navinuto 800 závitů, což neodpovídá teoretickému předpokladu. Navíječka je schopna navíjet s koeficientem plnění vyšším než námi uvažovaných 0,6.

Dle teoretického předpokladu pro zmenšenou cívku s uvažovaným koeficientem plnění 0,6 bude mít každá cívka 557 závitů. Ve skutečnosti na ní bylo navinuto 800 závitů. Z toho plyne koeficient plnění  $k_p$  pro použitou navíječku 0,86.

### 4.4 Zohlednění konstrukčních úprav

S přihlédnutím ke skutečnostem popsaných v kapitolách 4.1 a 4.3 byl přepočítán teoretický model s uvažováním zvýšení vzduchové mezery mezi jádrem a cívkou. Dále je také nutné pozměnit hodnotu předpokládané proudové hustoty, viz. vztah (3.2).

Po uvažování těchto skutečností je hodnota proudové hustoty  $J = 3,657 \times 10^6 \text{ A/m}^2$ . Statická charakteristika pro toto uspořádání je na *Obr. 4.1*.



Obr. 4.1 Přepočítaná statická charakteristika zohledňující konstrukční úpravy

Jak je patrné z *Obr. 4.1*, tvar statické charakteristiky pro cívky 1 a 3 se příliš nezměnil, hodnoty účinné síly však vzrostly. Dále je zřejmý nižší silový účinek cívky 2. Tuto skutečnost přikládám za vinu částečnému odmagnetování jádra během výpočtu. Z tohoto důvodu lze předpokládat, že skutečný průběh síly bude jiný a současně je třeba snížit budící proud cívek, aby nedocházelo k odmagnetování jádra. Statická charakteristika také zohledňuje použitý materiál ČSN 12040.

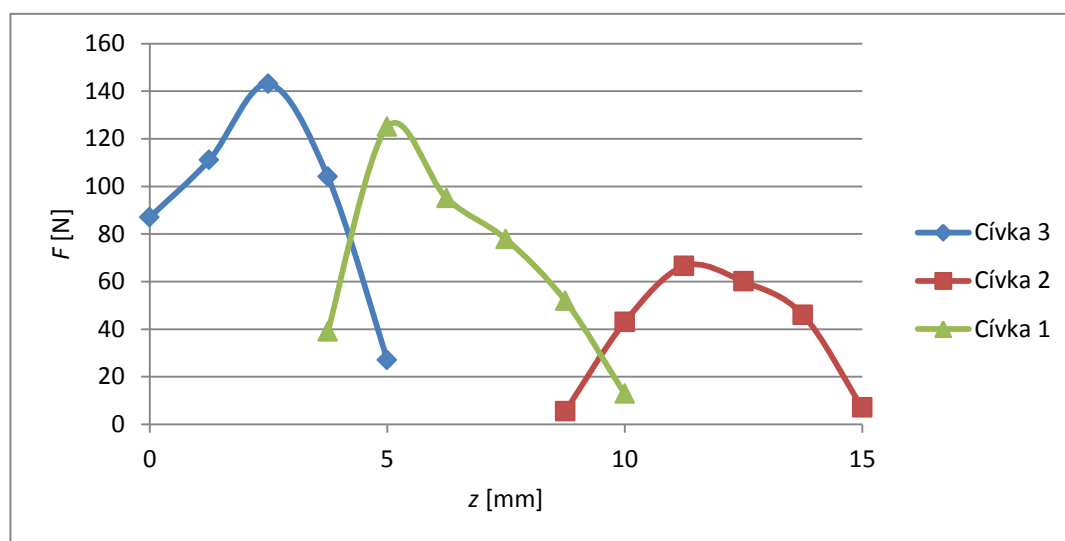
## 5 Diagnostika navrženého zařízení

Zařízení bylo zkompletováno v laboratoři katedry teoretické elektrotechniky na fakultě elektrotechnické. Před měřením statické charakteristiky byl aktuátor ozkoušen v horizontální poloze, bylo testováno řízení a správnost chodu.

Při kompletaci zařízení došlo k vychýlení z osy rotace, čímž dochází v určité poloze jádra aktuátoru k zadrhávání. Tuto skutečnost je možné vyřešit pootočením jádra a ručním odzkoušením správnosti pohybu.

### 5.1 Statické charakteristiky

Pro měření bylo využito měřící aparatury se siloměrem OMEGA DFG60 (přesnost  $\pm 0.2\%$  FS  $\pm 1$  LSD). Aktuátor byl zavěšen za jádro pomocí speciálního úchytu ve vertikální poloze. Měření probíhalo s omezením, neboť zavěšení aktuátoru neumožňuje měřit tlak vzhůru, ale pouze tah směrem dolů, čímž došlo k omezení měřených hodnot. Změřená statická charakteristika pro stejnosměrné napájení 2A při 40V je uvedena na *Obr. 5.1*.



Obr. 5.1 Statická charakteristika navrženého aktuátoru

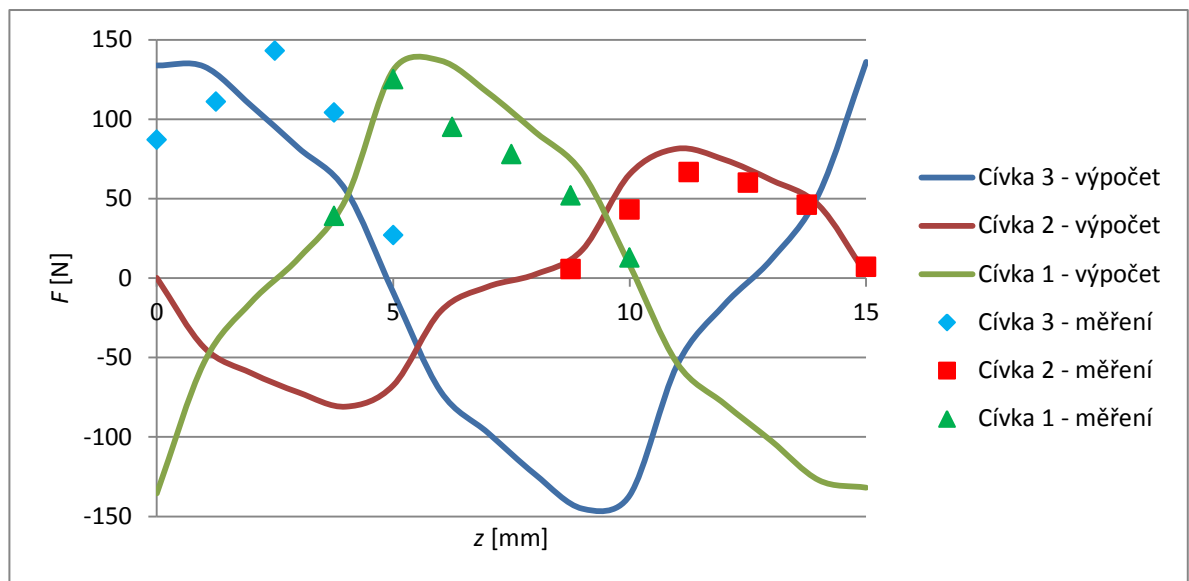
Jak je ze statické charakteristiky patrné, silové účinky cívky 2 jsou nižší než u zbývajících cívek. Tato skutečnost potvrdila teoretický předpoklad definovaný v kapitole 4.4. Jedná se tedy pravděpodobně o přesycení jádra aktuátoru.

### 5.2 Porovnání naměřených a vypočtených hodnot

Naměřené hodnoty první a třetí cívky potvrzují teoretický předpoklad definovaný v kapitole 3.5. Nedokonalý silový účinek druhé cívky lze přisoudit přesycení jádra, či

nerovnoměrnému navinutí této cívky. Průběh sil definovaný v kapitole 4.4 po zohlednění konstrukčních úprav je velmi podobný změřeným hodnotám. Potvrdil se i předpoklad nižšího silového působení cívky 2.

V měření byla zohledněna nemožnost měření tlaku (pohybu jádra aktuátoru opačným směrem). Mezi další chyby, které měření ovlivnily, patří i nepřesnost výroby a kompletace zařízení. Také nerovnoměrné navinutí cívek bylo pravděpodobně důvodem nedosažení předpokládaného silového účinku.



Obr. 5.2 Porovnání vypočtených a naměřených hodnot

## Závěr

Tato práce byla věnována návrhu a diagnostice aktuátoru s třemi řídicími cívkami. Tento aktuátor byl navržen v programu Agros2D s využitím matematického modelu dle kapitoly 2.1.2.

Problematika elektromagnetických aktuátorů, jejich technické provedení a možnosti využití byly popsány v kapitole 1. Konstrukční návrh aktuátoru s více řídicími cívkami byl stanoven v kapitole 3.1. Obecný matematický model použitý k výpočtu navrhovaného zařízení v rámci této práce je stanoven v kapitole 2.2.2. Ověření funkčnosti sestaveného aktuátoru a jeho diagnostika je popsána v kapitole 5.

Feromagnetické části navrženého zařízení byly vyrobeny z oceli ČSN 12040 a osazeny cívkami z drátu o průměru 0,5 mm. Zařízení bylo zkompletováno v laboratoři Katedry teoretické elektrotechniky a podrobno testováno. Zařízení se v současné době ovládá třemi tlačítky, která přivádějí stejnosměrný proud na cívky.

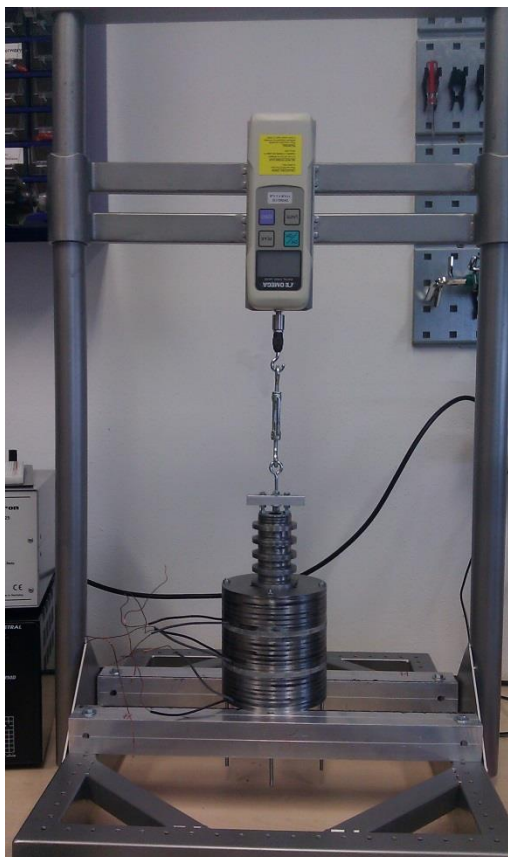
Zkonstruovaný aktuátor je plně funkční, výsledky experimentu se shodují s výsledky provedených simulací. Potenciál další práce na zařízení vidím ve vývoji automatického řízení, např. pomocí micropočítače, které by nahradilo dosavadní ruční spínání.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

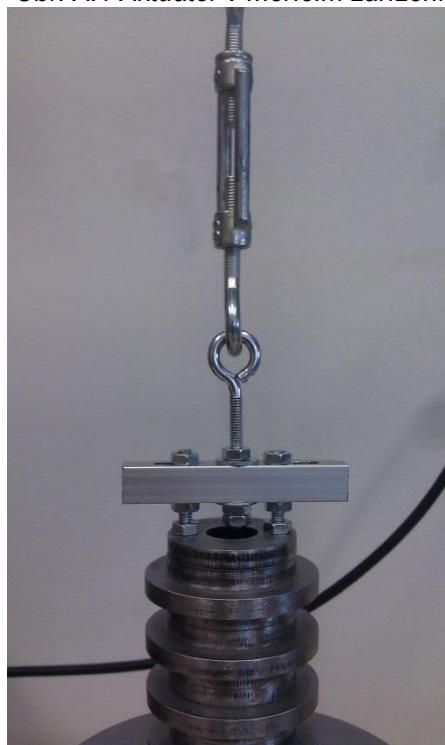
- [1] MAYER, Daniel a ULRYCH, Bohuš. *Elektromagnetické aktuátory*. 1. Vyd. BEN – technická literatura, 2008. 120 s.
- [2] Oficiální internetové stránky společnosti Continental <[http://www.conti-online.com/generator/www/start/com/en/index\\_en.html](http://www.conti-online.com/generator/www/start/com/en/index_en.html)> Citováno: 3. 6. 2014
- [3] Karban, P., Mach, F., Kůs, P., Pánek, D., Doležel, I.: *Numerical solution od coupled problems using code Agros2D*, Computing, 2013, Volime 95, Issue 1 Supplement, pp381-408, DOI 10.1007/s00607-013-0294-4
- [4] Oficiální internetové stránky programu Solid Works <[www.solidworks.com](http://www.solidworks.com)> Citováno: 3. 6. 2014
- [5] Mach, František. *Design od electromagnetic avruator and experimental verification of its paramtrs*. Advanced Methods of the Theory of Electrical Engineering, 2009
- [6] Doležel, I., Pánek, D., Ulrych, B.: *Actuator with permanent magnet controlled by very short current pulses*, Computation in Electromagnetics (CEM 2011), IET 8th International Conference on IET, 2011
- [7] Doležel, I., Mach, F., Ulrych, B.: *DC ferromagnetic actuator for extremely high forces, electromotion-cluj napoca*, 2005
- [8] Mayer, D.: *Aplikovaný elektromagnetismus*, Kopp, 2012, ISBN 9878072324248
- [9] Janota, H.: *Actuators: Basics and Application*. Splinger, 2010
- [10] Bauer, J.R.: *MAGnetic Actuators and Sensors*. Wiley, 2006
- [11] Husák, M.: *Mikrosenzory a mikroaktuátory*. Academia, 2008
- [12] Boldea, I., Nasar, S.A.: *Linear Electric Actuators and Generators*. Vambridge University Press, 2005
- [13] Standart technology inc <<http://standarttechnologyinc.com/>>. Citováno 3. 6. 2014
- [14] Eto magnetic gmbh. <<http://etogroup.com/>>. Citováno: 3. 6. 2014

## Přílohy

### A. Fotografie navrženého zařízení

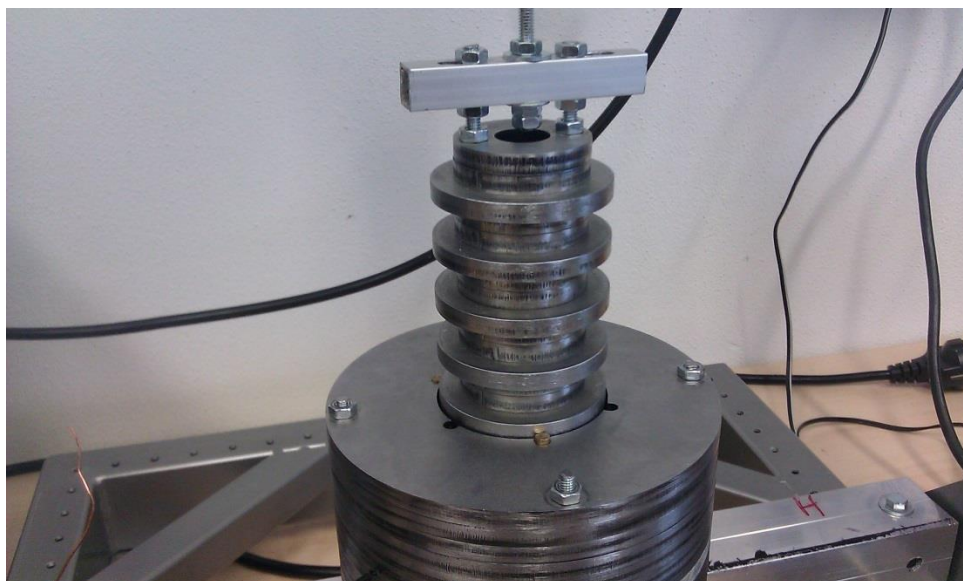


Obr. A.1 Aktuátor v měřícím zařízení

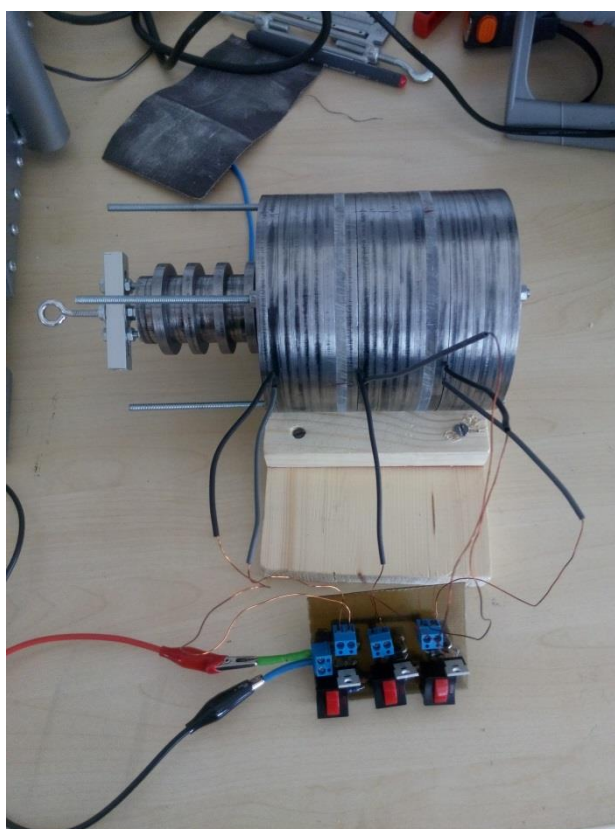


Obr. A.2 Speciální uchycení jádra pro měření statické charakteristiky

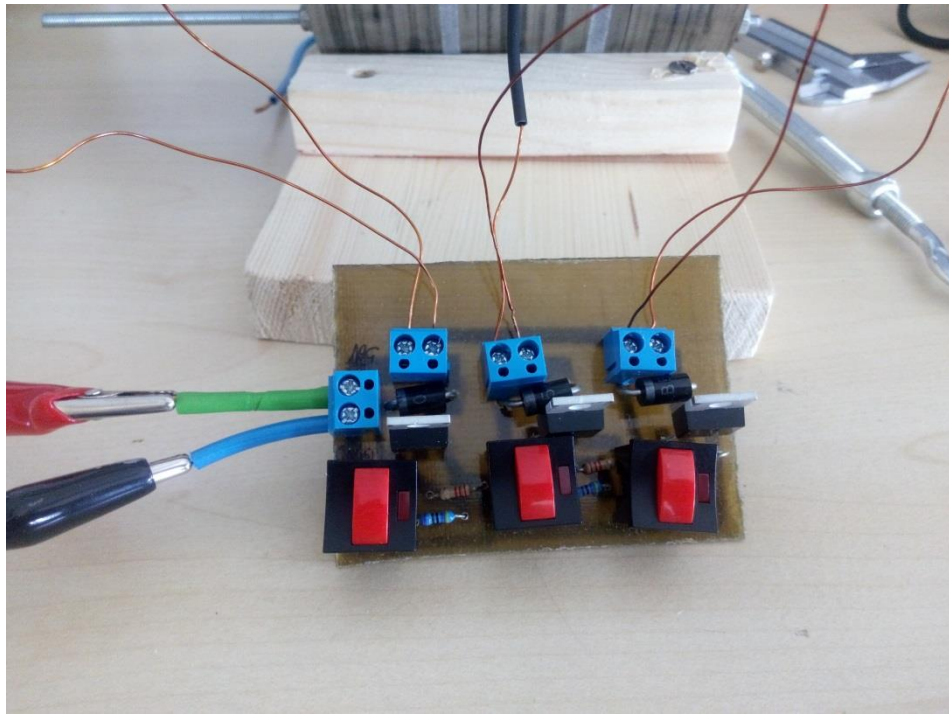




Obr. A.3 Detailní pohled na navržený aktuátor

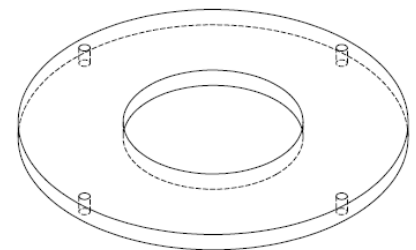
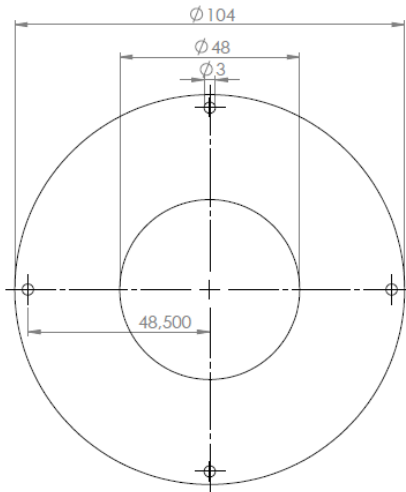


Obr. A.4 Sestavené experimentální zařízení včetně ovládání



Obr. A.5 Ovládání aktuátoru

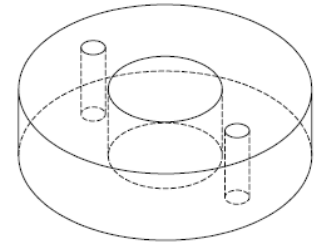
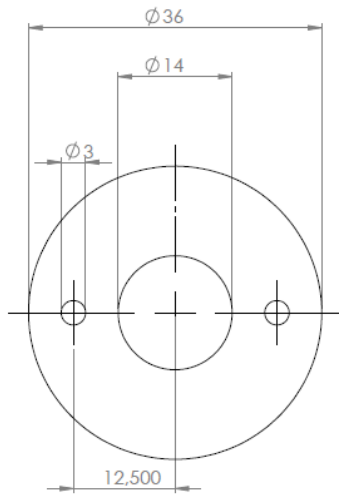
**B. Rozměry a použité materiály u jednotlivých částí navrhovaného aktuátoru**



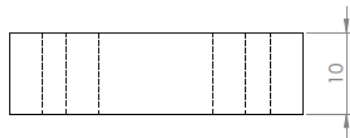
Materiál: Plast/Teflon/Silon  
 Vyrobit: 2x



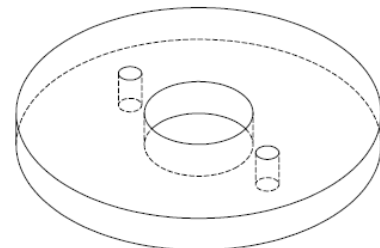
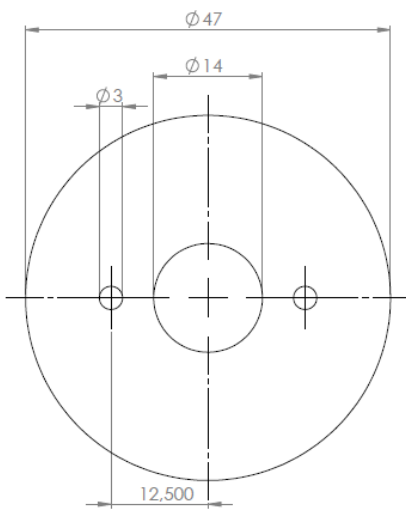
Obr. B.1 Meziplášťová izolace



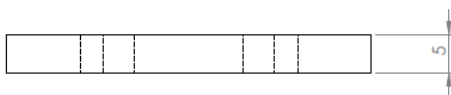
Materiál: Ocel/Železo  
Vyrobit: 13x



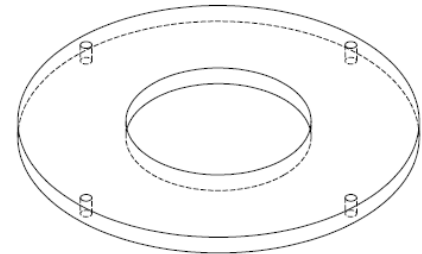
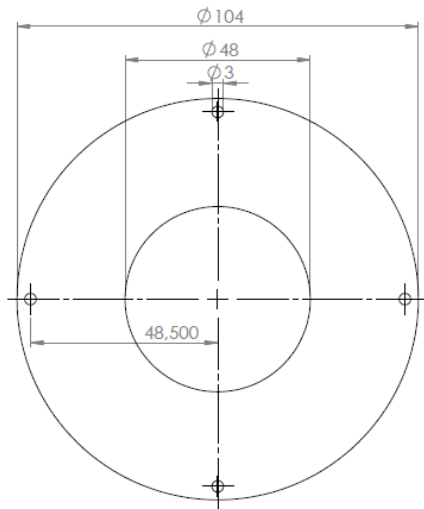
Obr. B. 2 Menší díl jádra aktuátoru



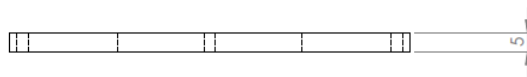
Materiál: Ocel/Železo  
Vyrobit: 12x



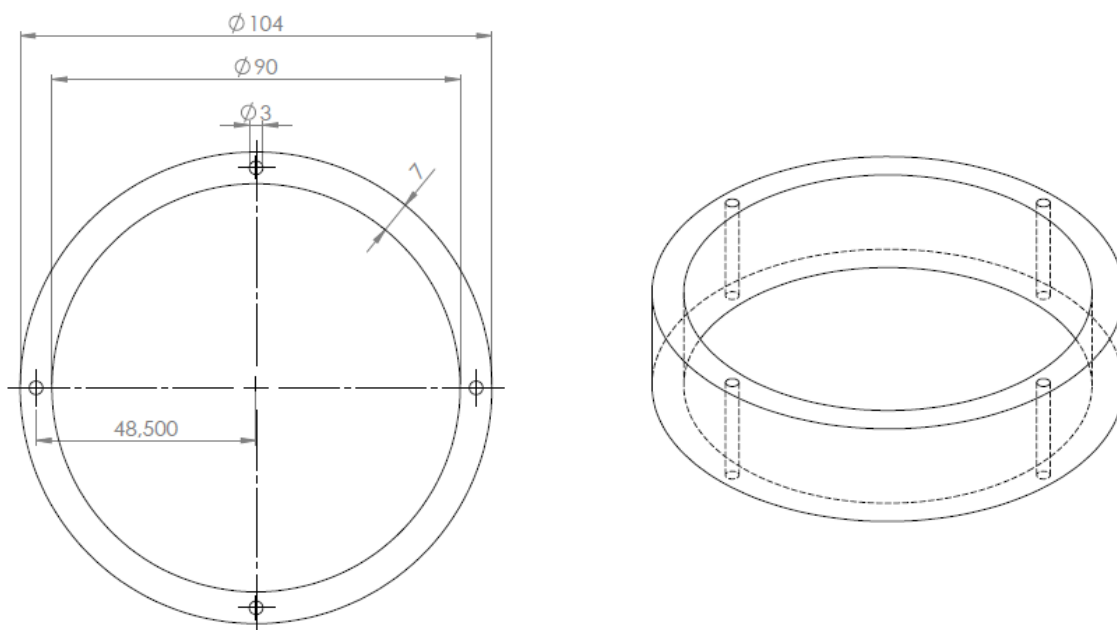
Obr. B.3 Větší díl jádra aktuátoru



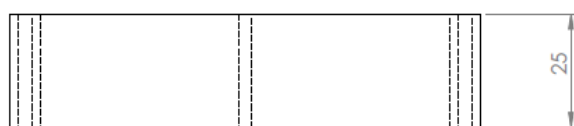
Materiál: Ocel/Železo  
 Vyrobit: 6x



Obr. B.4 Plášť - víko



Materiál: Ocel/Železo  
 Vyrobit: 3x



Obr. B.5 Plášť – obal