

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Návrh aktuátoru s permanentním magnetem

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

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

Jméno a příjmení: **Martin KURFIŘT**
Osobní číslo: **E11B0050P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Název tématu: **Návrh aktuátoru s permanentním magnetem**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte rešerši používaných lineárních elektromechanických měničů.
2. Formulujte matematický model pro řešení aktuátoru s permanentním magnetem.
3. Proveďte počítačovou simulaci aktuátoru.
4. Proveďte diskuzi dosažených výsledků.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **20 - 30 stran**

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**


Seznam odborné literatury:

- 1. MAYER D., ULRYCH B.: Elektromagnetické aktuátory**
- 2. DRAXLER K.: Magnetické prvky a měření, ČVUT Praha, 1994**

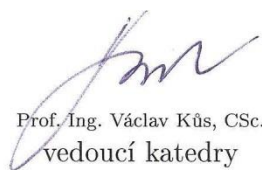
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Mach**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **14. října 2013**

Termín odevzdání bakalářské práce: **9. června 2014**


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




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Tato bakalářská práce je zaměřena na elektromagnetické aktuátory, které v dnešní době doplňují starší pneumatické a hydraulické systémy. Hlavním cílem práce byl návrh akčního členu elektromagnetického ventilu s působením v místě toku kapaliny a to s použitím numerického modelu magnetického pole. Navržený akční člen ventilu byl následně vyroben a také experimentálně ověřen.

Klíčová slova

Elektromagnetický aktuátor, ventil, matematický model, permanentní magnet.

Abstract

This Bachelor's is focused on the electromagnetic actuators that nowadays replace older pneumatic and hydraulic systems. The main purpose of work was a proposal actuator solenoid valve with operations in place of liquid flow by using a numerical model of the magnetic field. The proposed actuator valve was subsequently manufactured and experimentally verified.

Key words

Electromagnetic actuators, valve, mathematical model, permanent magnet.

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 5.6.2014

Martin Kurfiřt

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Františku Machovi a dále Doc. Ing. Pavlu Karbanovi Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení mé práce.

Dále bych chtěl poděkovat rodině, která mě celou dobu podporovala a také Janu Hlavničkovi, se kterým jsme se zabývali návrhem a výrobou aktuátoru a celý rok jsme vzájemně spolupracovali.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	9
ÚVOD	10
1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY	11
1.1 TYPY AKTUÁTORŮ	11
1.2 LINEÁRNÍ ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY	12
1.3 SPECIÁLNÍ TYPY ELEKTROMAGNETICKÝCH AKTUÁTORŮ	13
2 ZÁKLADNÍ KONCEPTY ELEKTROMAGNETICKÉHO VENTILU	14
2.1 AKČNÍ ČLEN VENTILU MIMO MÍSTO PŮSOBENÍ	14
2.2 AKČNÍ ČLEN VENTILU V MÍSTĚ PŮSOBENÍ	15
3 NÁVRH VENTILU S VYUŽITÍM PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	16
3.1 MATEMATICKÝ MODEL	16
3.2 PARAMETRY VENTILU ZÍSKANÉ SIMULACÍ	21
4 VÝROBA A OŽIVENÍ VENTILU	24
4.1 VÝKRESY A MODELY	24
4.2 PRŮBĚH VÝROBY	25
4.3 KOMPLETACE VENTILU	25
4.4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VENTILU	25
ZÁVĚR	27
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	28
PŘÍLOHY	29

Seznam symbolů a zkratek

F	síla [N]
B	magnetická indukce [T]
μ	permeabilita [H/m]
H	intenzita magnetického pole [A/m]
J	proudová hustota [A/m^2]
I	elektrický proud [A]
k	koeficient plnění cívky [-]
N	počet závitů cívky [-]
r	poloměr [m]
l	délka vodiče v cívce [m]
ρ	měrný elektrický odpor [Ωm]
R	elektrický odpor [Ω]
U	elektrické napětí [V]
s	dráha [mm]
W_m	energie magnetického pole [J]
L	indukčnost [L]
τ	časová konstanta [ms]

Úvod

Předkládaná práce je zaměřena na návrh elektromagnetického ventilu s permanentním magnetem a jeho výrobu. Elektromechanické aktuátory nachází své uplatnění v mnoha odvětvích, kde se používají jako alternativa k stávajícím hydraulickým nebo pneumatickým systémům. Výhodou elektromechanických aktuátorů je jejich rychlost, jednoduchá údržba a dosažení velkých výstupních sil. Cílem této práce je navrhnout a vyrobit jeden z prototypů elektromagnetického ventilu s využitím permanentních magnetů.

První část práce se zabývá vysvětlením pojmu aktuátor a seznámením s různými typy. Druhá část práce nám popisuje současně používaná a nová řešení elektromagnetického ventilu. Třetí část popisuje návrh a simulaci již konkrétního aktuátoru, včetně vypočtených parametrů. Ve čtvrté části je popsána jeho výroba, kompletace, oživení a ověření základní činnosti celého systému.

1. Úvod do problematiky

Elektromechanické aktuátory jsou ve vyspělých technologiích často používanými komponenty. Setkáváme se s aktuátory nejrůznějších konstrukčních úprav a parametrů, od mikroaktuátorů až po aktuátory velkých výkonů. [1]

1.1 Typy aktuátorů

Aktuátor, mnohdy nazývaný jako výkonový převodník či akční člen, je zařízení, které převádí vstupní veličinu (energii elektrickou, teplotní, apod.) na výstupní mechanický pohyb.

Aktuátor může být svou technickou podstatou:

- elektromechanický (řízený elektrickým signálem),
- pneumatický (řízený tlakovým plynným médiem),
- hydraulický (řízený tlakovým kapalným médiem),
- speciální (řízený např. teplotou, světlem apod.). [1]

Elektromechanické aktuátory jsou významnými prvky výrobních a dopravních mechatronických soustav. Jsou to zařízení, která převádí elektrické napětí/proud přivedené na vstup aktuátoru, na akční mechanickou veličinu na jeho výstupu, tj. na sílu, deformaci, pootočení, točivý moment apod. [1]

Jedním z typů je elektromagnetický aktuátor. Zde je princip transformace energie založen na silovém působení v magnetickém poli. Výstupní veličina je zpravidla spojena s pohybem. Aktuátor pak přeměňuje elektrickou energii na energii mechanickou, kde vzhledem k velké hustotě energie, kterou lze do magnetického pole akumulovat, lze dosáhnout velkých mechanických sil. [1][3]

Některé typy aktuátorů s elektrickým či magnetickým polem využívají specifických vlastností materiálů pevné fáze, například tepelně dilatačních elastických vlastností (termoelastické aktuátory), obráceného piezoelektrického jevu (piezoelektrické aktuátory), magnetostrikce (magnetostrikční aktuátory), nebo elektrostrikce (elektrostrikční aktuátory). V současné době jsou ve vývoji aktuátory používající tzv. inteligentní materiály, např. materiály s tvarovou pamětí. Jsou to perspektivní materiály pro výrobu mikroaktuátorů, pracujících v mikro-elektromechanických systémech, a mají velmi zajímavé aplikace, např. v lékařství, kosmonautice, vojenské technice apod. Nejrozšířenější jsou aktuátory s magnetickým polem.[1]

Dělení aktuátorů podle stupňů volnosti:

- Lineární aktuátory, tj. aktuátory s posuvným (translačním) pohybem. Síla aktuátoru může být generována přímo působením magnetického pole cívky protékané proudem na feromagnetikum, anebo nepřímým působením např. tím, že dochází k elektrickému ohřevu určitého, vhodně navrženého dilatačního elementu. Do kategorie lineárních aktuátorů patří i lineární motory, které mají ale omezenou dráhu pohybu. Často vykonávají vratný pohyb, který může být periodický.
- Rotační aktuátory, tj. aktuátory s točivým (rotačním) pohybem; jsou to v podstatě nejrůznější elektrické motory (komutátorové, asynchronní, synchronní).
- Aktuátory s větším počtem stupňů volnosti; na jejich výstupu je pohyb v rovině (aktuátory planární), na kulové ploše (aktuátory sférické) apod.

Reálné aktuátory mohou být kombinací uvedených typů. Příkladem je lineární aktuátor, jehož posuvný pohyb vykonává závitová tyč, kterou vysouvá rotující matice spojená s rotorem krokového motoru. Tento typ aktuátoru se používá pro přesné polohování. [1]

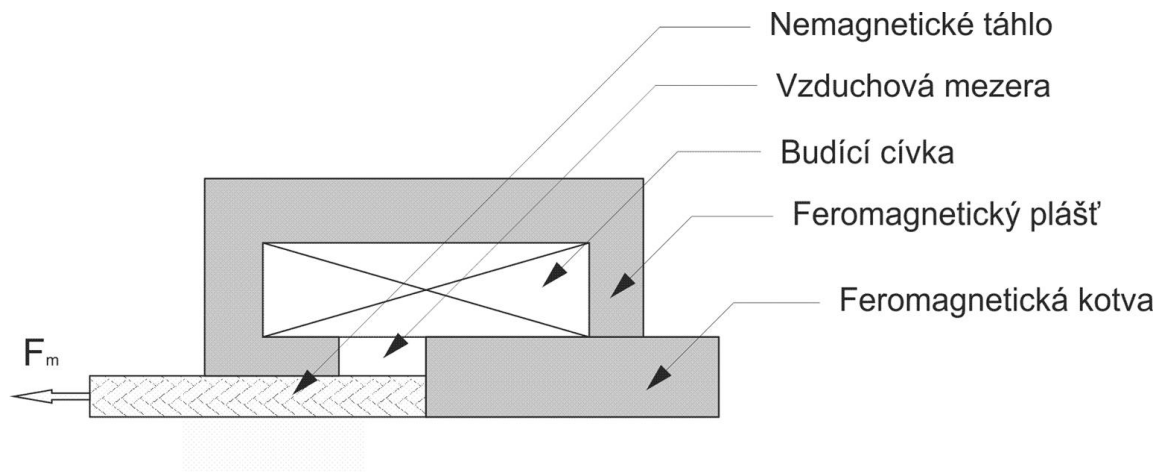
Podle vstupního elektrického signálu se rozlišují:

- aktuátory stejnosměrné,
- aktuátory střídavé, speciálně aktuátory třífázové. [1]

1.2 Lineární elektromagnetické aktuátory

Princip činnosti takového aktuátoru je zobrazen na obrázku č. 1. Proud, protékající cívkou, indukuje do magnetického obvodu magnetické pole. Magnetický indukční tok se uzavírá pláštěm aktuátoru, kotvou a přes vzduchovou mezeru. Ke kotvě aktuátoru je připevněno táhlo, které přenáší pohyb o síle F_m vně aktuátoru. Pro maximální sílu aktuátoru musí být dimenzováno jeho jádro i uchycení.

Magnetický tok se snaží jít cestou nejmenšího odporu. Zde největší magnetický odpor působí vzduchová mezera mezi kotvou a pláštěm, magnetický odpor železné části v porovnání se vzduchovou mezerou lze zanedbat. Působením magnetického toku se začne vzduchová mezera zmenšovat. To způsobí zvětšování magnetické indukce B a růst síly F_m až do doby, kdy dojde k dotyku kotvy a pláště.



Obr. 1 - Aktuátor využívající silové působení magnetického pole na feromagnetické jádro

Při návrhu aktuátoru je nutné se zabývat i tvarem statické charakteristiky (závislost síly na vzduchové mezeře). Podle požadavků na charakteristiku je potřeba upravit model aktuátoru. Hlavními parametry jsou:

- tvar charakteristiky (strmá, plochá, lineární),
- interval, v němž se nachází hodnoty F_m ,
- doba funkce aktuátoru (krátkodobé, trvalé)

Požadovaných charakteristik lze dosáhnout změnou budícího proudu v cívce, úpravou velikosti vzduchové mezery, zvýšením průřezu magnetického obvodu či jeho úpravami (zaoblení, zkosení, apod. ploch v okolí vzduchové mezery a v místě pohybu).

1.3 Speciální typy elektromagnetických aktuátorů

Do této skupiny patří aktuátory, které přímo neprodukují mechanickou sílu působící pohyb jiného objektu. Tato síla pouze umožňuje realizaci nějakého dalšího požadovaného efektu. Mezi tyto aktuátory patří:

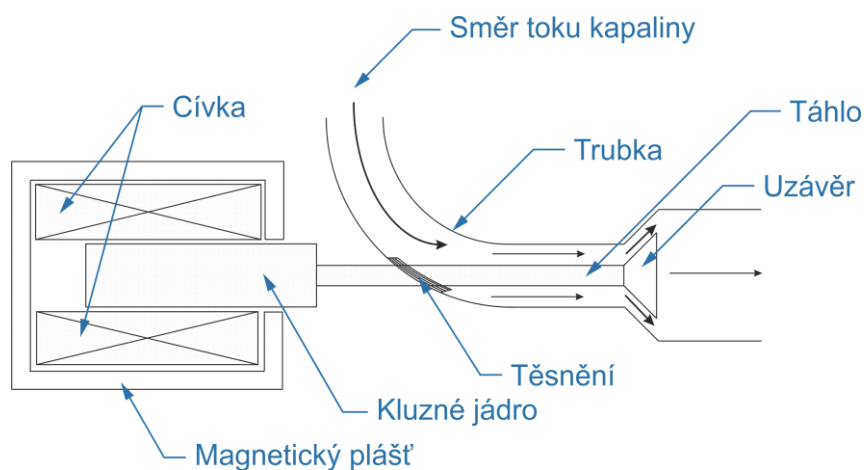
- magnetická brzda (generující třecí sílu, případně třecí moment),
- čerpadlo elektricky vodivých kapalin (nejčastěji roztavených kovů). Toto zařízení může pracovat v kontinuálním režimu (chladicí smyčky vysokoteplotních atomových reaktorů) nebo diskontinuálním (dávkovač roztavených kovů). [1]

2 Základní koncepty elektromagnetického ventilu

2.1 Akční člen ventilu mimo místo působení

Používaný typ ventilu je zobrazen na obr. 2. V tomto případě, je akční část ventilu umístěna mimo místo působení. Zde je umístěn vně potrubí s kapalinou. Toto konstrukční řešení je náročnější na prostor a celkové uchycení ventilu. Samotný uzávěr bývá s kluzným jádrem akčního členu propojen dlouhým táhlem. Největší problém nastává v místě, kde se musí táhlo dostat skrze stěnu dovnitř trubky. Zde musí být umístěno těsnění, které je velmi náchylné na poruchu a je potřeba jej častěji kontrolovat. Může docházet k prostupu nečistot po táhle skrze těsnění do kapaliny, nebo k uvolňování mikroskopických částí těsnění při tření. Stejný problém nastává i uvnitř potrubí, kde se nečistoty v kapalině opět usazují na těsnění. Pohyblivé části je nutné zakrýt, aby nemohlo dojít k jejich poškození.

Celá instalace ventilu je náročná. Je potřeba vyrobit uchycení celého systému tak, aby nebyla trubka namáhána. Samotná trubka musí být vyrobena a upravena pro vstup táhla a použití uzávěru.



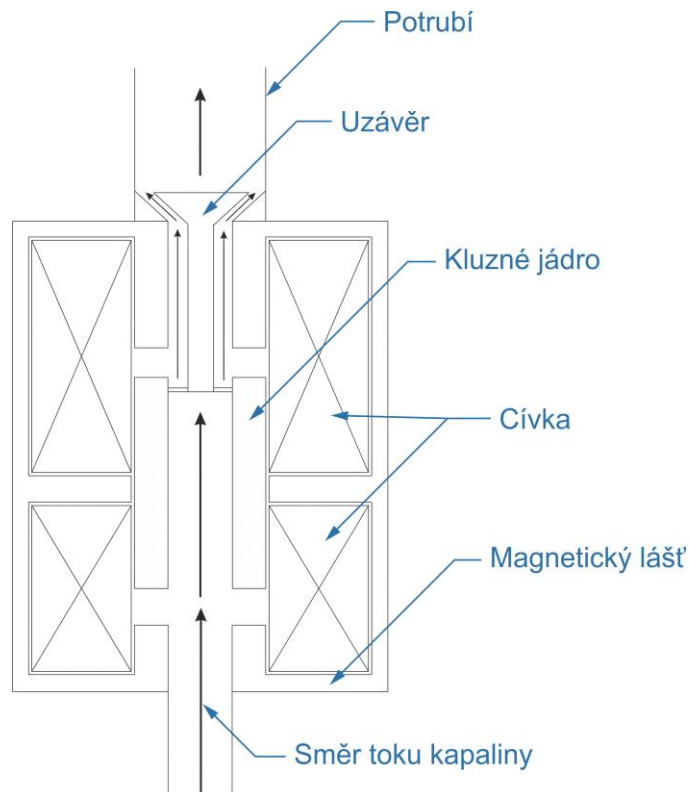
Obr. 2 – Akční člen ventilu mimo místo působení

;

2.2 Akční člen ventilu v místě působení

Umístění celého ventilu přímo jako součást systému nám ušetří místo a odpadnou nám i problémy s utěsněním táhla při vstupu do trubky. Zde je ventil přímo vložen na trubku a kapalina protéká uvnitř těla ventilu. Vstup i výstup pláště ventilu jsou opatřeny závitem a tak samotná instalace ventilu je velice jednoduchá.

Asi největším problémem při tomto řešení je nutnost zamezit vniku kapaliny do elektrické části ventilu.

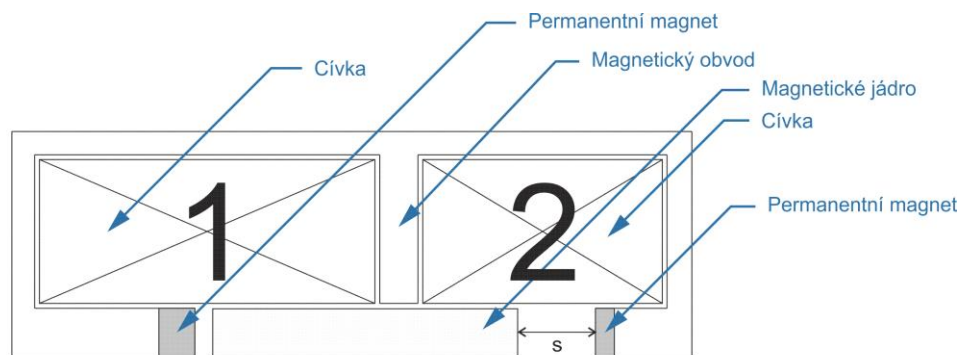


Obr. 3 – Akční člen ventilu v místě působení

3 Návrh ventilu s využitím permanentních magnetů

3.1 Matematický model

K návrhu magnetického obvodu byl použit program Agros2D a jeho podprogram Serial Calculations. Magnetické pole bylo řešeno jako dvoudimenzionální magnetostatická úloha ve válcových souřadnicích [3] r , φ , z . Všechny hodnoty a nastavení, která se nachází v této kapitole, jsou konečné hodnoty při návrhu. Samozřejmě v průběhu návrhu docházelo k jejich optimalizaci, změnám tvaru, velikosti jednotlivých částí apod. Konečná podoba je na obrázku 4 a jsou zde také popsány hlavní části ventilu. Vzdálenost s v tomto obrázku popisuje dráhu pohybu jádra. Pokud je vzdálenost $s = 0$ mm, ventil je uzavřen, při $s = 8$ mm je ventil otevřen. Cívky jsou pro lepší přehlednost v práci popsány čísly 1 a 2, která odpovídají obrázku 4.



Obr. 4 - Jednoduchý nákres

Spínání ventilu se provádí pomocí krátkých proudových impulzů. Sám ventil má působením permanentních magnetů dvě stabilní polohy (otevřený, uzavřený). Jiná poloha není z technického hlediska možná. Když se má ventil otevřít, pošle se krátký proudový impulz do cívky 1, která zajistí posun jádra a otevření ventilu. Při pokynu zavřít, proběhne vše podobně, ale impulz jde do cívky 2. Pokud není požadavek na změnu polohy jádra, tak ani jedna cívka napájena není.

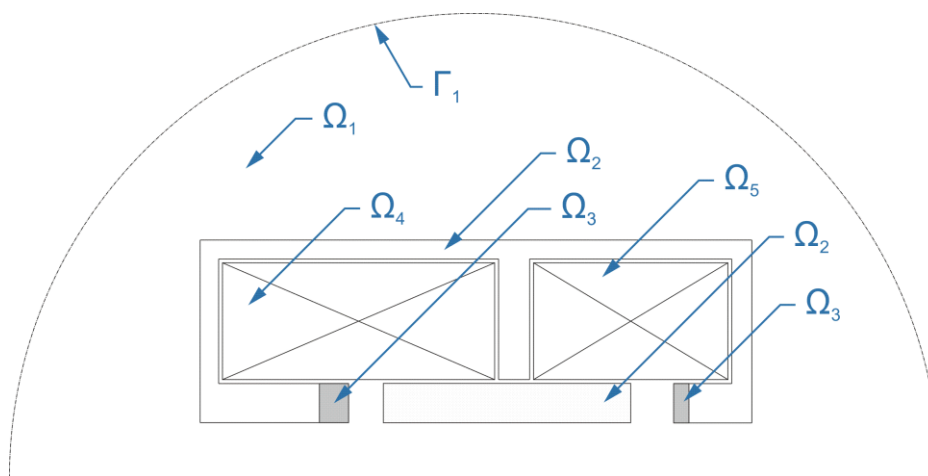
Rozložení magnetického pole lze popsat parciální diferenciální rovnicí, která vychází z první Maxwellovy rovnice (Ampérův zákon celkového proudu) formulovanou pro vektorový magnetický potenciál A . Rovnice byla použita ve tvaru

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu(\mathbf{B})} \cdot (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (1.1)$$

kde $\mu(\mathbf{B})$ je permeabilita, která je závislá na velikosti magnetické indukce \mathbf{B} , \mathbf{B}_r je remanentní indukce permanentních magnetů a \mathbf{J}_{ext} značí externí proudovou hustotu. [4]

Hranice definiční oblasti, která tvoří povrch aktuátoru, je za předpokladu nulového magnetického pole vně siločárou a lze tedy zavést Dirichletovu podmínku. Tato podmínka platí i na hranici symetrie, která prochází středem aktuátoru. Na obou hranicích lze tedy použít rovnice pro okrajovou podmínku. Pro dosažení co nejpřesnějšího výsledku, byla vnější půlkruhová hranice posunuta do takové vzdálenosti, aby nedocházelo k ovlivňování výpočtu, ale aby zbytečně velká vzdálenost nezvyšovala náročnost výpočtu[3]. Poloměr půlkruhu byl tedy stanoven na 25 cm, při uvažované výšce aktuátoru 10 cm.

Na obrázku 5 je zobrazeno, k jaké části matematického modelu přísluší rovnice z tabulky č. 1.



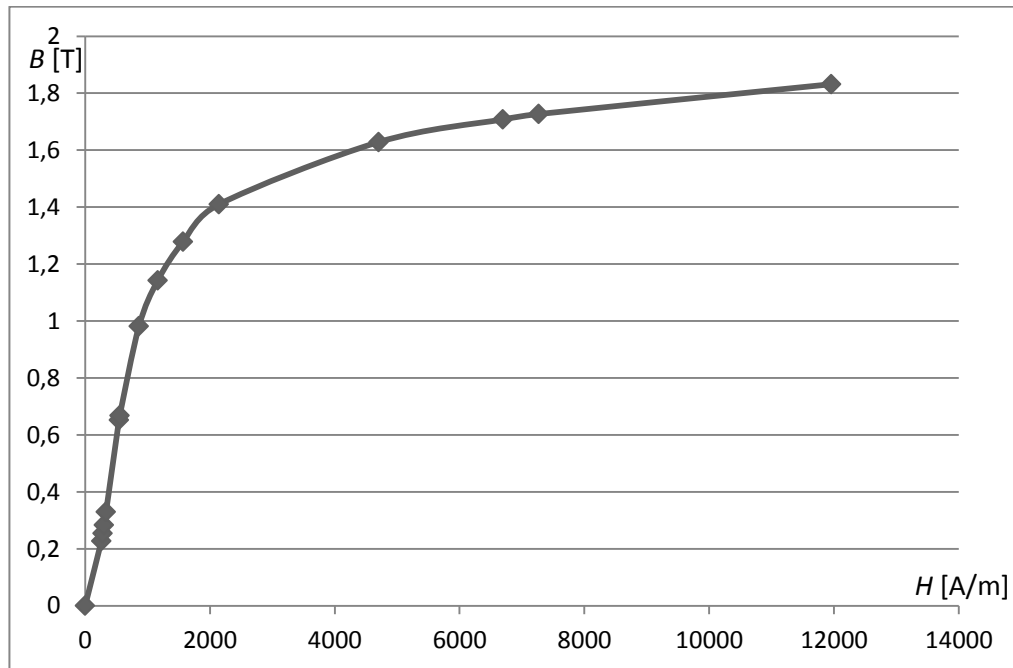
Obr. 5 - Popis oblastí pomocí rovnic

V tabulce 1 jsou rovnicemi popsány jednotlivé oblasti matematického modelu. Charakteristika železa je nelineární, a proto je zde permeabilita železa zastoupena pomocí $\mu(\mathbf{B})$. Její průběh je zobrazen na grafu 1.

vzduch	Ω_1	$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right] = 0$
železo	Ω_2	$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu(\mathbf{B}) \cdot \mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right] = 0$
magnety	Ω_3	$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu_0} \cdot (\text{rot } \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right] = 0$
cívka pod napětím	Ω_4	$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right] = J_{\text{ext}}$
cívka bez napětí	Ω_5	$\text{rot} \left[\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right] = 0$
okrajová podmínka	Γ_1	$\mathbf{A} = \mathbf{0}$

Tab. 1 - Popis oblastí pomocí rovnic

Magnetický obvod je tvořen feromagnetickým materiálem. V těchto oblastech je tedy počítáno, že jeho relativní permeabilita μ_r zde není konstantní, tzn. $B-H$ charakteristika tohoto materiálu není lineární. Vzhledem k tomu, že nebylo přesně známo, který materiál bude při výrobě použit, byla použita $B-H$ charakteristika běžné konstrukční oceli. Průběh charakteristiky je zobrazen na grafu 1. [3]



Graf 1 - $B(H)$ charakteristika železa

Nyní následuje výpočet několika základních hodnot, které potřebujeme pro průběh simulace, aby bylo možné získat další výsledky.

$S_{\text{cívky}}$ je plocha cívky při řezu (jak jsou zobrazeny na obr. 4). Průměr drátu ve výpočtech je 0,5 mm a jeho plocha ($S_{\text{závitu}}$) je 0,196 mm². Proud protékající jedním závitěm (I) je 2,5 A. Koeficient plnění cívky (k) byl určen 0,6. Poté nám vychází, že počet závitů cívky určíme pomocí vzorce

$$N = \frac{k \cdot S_{\text{cívky}}}{S_{\text{závitu}}} = \frac{0,6 \cdot 9,5 \cdot 10^{-4}}{1,96 \cdot 10^{-7}} = 2903 [-] \quad (1.2)$$

Ze známých hodnot můžeme také vypočítat proudovou hustotu v cívce.

$$J = \frac{I \cdot N}{S_{\text{cívky}}} = \frac{2,5 \cdot 2903}{9,5 \cdot 10^{-4}} = 7,64 \cdot 10^6 [\text{A/m}^2] \quad (1.3)$$

Další hodnota je určení středního poloměru cívky (r_s), který je 0,0305 m. Je to aritmetický průměr vnitřního poloměru (0,021 m) a vnějšího poloměru (0,04 m). S pomocí r_s a N je možno vypočítat délku potřebného vodiče (l)

$$l = 2 \cdot \pi \cdot r_s \cdot N = 2 \cdot \pi \cdot 0,0305 \cdot 2903 = 556 \text{ [m]} \quad (1.4)$$

Pokud známe délku vodiče, jeho průřez a měrný odpor mědi (ρ), vypočítáme elektrický odpor (R) celé cívky

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S_{\text{závitu}}} = \frac{16,78 \cdot 10^{-9} \cdot 556}{1,96 \cdot 10^{-7}} = 47,6 \text{ [\Omega]} \quad (1.5)$$

A jako poslední bylo vypočteno napětí (U), potřebné k napájení, aby cívkou protékal požadovaný proud 2,5A. Výpočet je prováděn v ustáleném stavu, působení přechodového děje při spínání je zanedbáno.

$$U = R \cdot I = 47,6 \cdot 2,5 = 119 \text{ [V]} \quad (1.6)$$

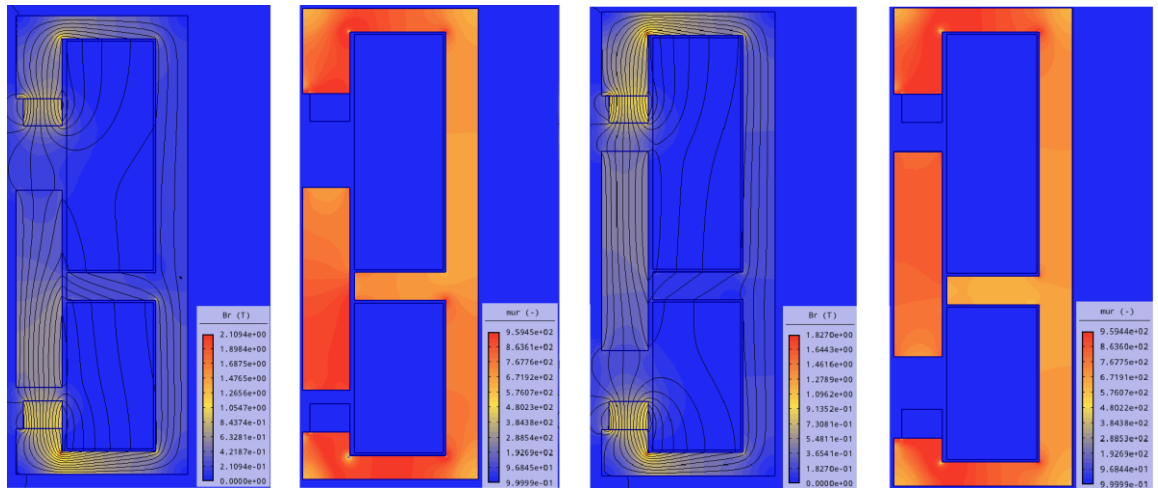
Pomocí stejného postupu jsou vypočteny hodnoty pro druhou cívku.

	$S_{\text{cívky}} \text{ [cm}^2\text{]}$	$N \text{ [-]}$	$l \text{ [m]}$	$R_{\text{cívky}} \text{ [\Omega]}$	$U_{\text{cívky}} \text{ [V]}$
Cívka č. 1	9,50	2903	556	47,6	119
Cívka č. 2	6,08	2148	356	30,48	76,2

Tab. 2 - Vypočtené parametry cívky

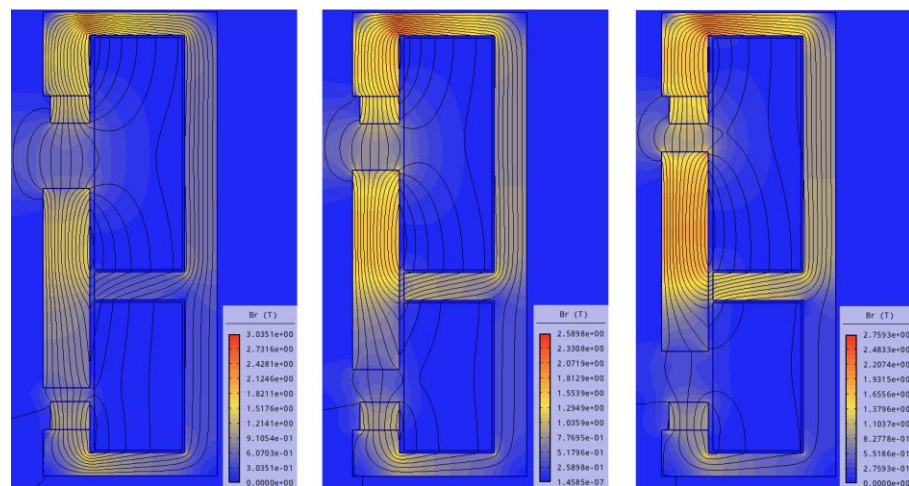
Následující obrázky znázorňují, jaké je rozložení relativní permeability a magnetické indukce, do které jsou vloženy kontury vektorového potenciálu, v matematickém modelu.

Z obrázku č. 6 je patrné, jaké je rozložení zobrazovaných hodnot za stavu, kde nejsou cívky buzeny a v aktuátoru dochází pouze k působení permanentních magnetů. První dva obrázky zleva popisují uzavřený ventil a druhé dva ventil otevřený. První a třetí obrázek zobrazují rozložení magnetické indukce a zbylé 2 předpokládanou relativní permeabilitu při řezu ventilem.

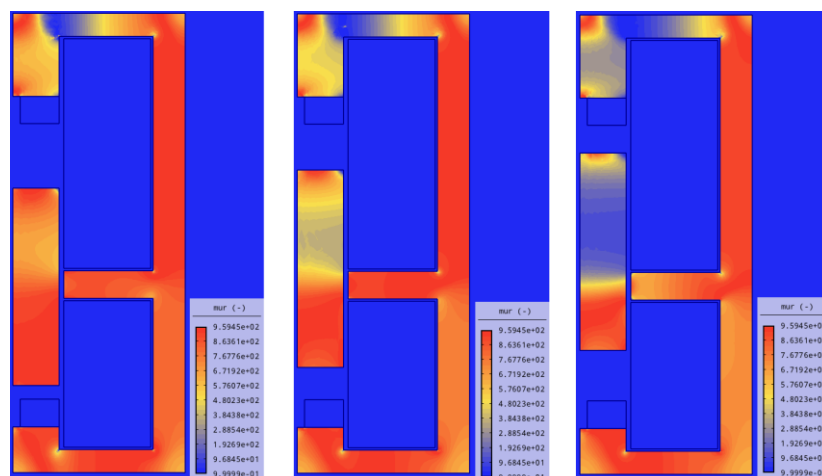


Obr. 6 - Rozložení B_r a μ_r při působení magnetu

Následující obrázky 7 a 8 zobrazují rozložení magnetické indukce a relativní permeability ve stavu, kdy je buzena horní cívka a ventil se otevírá. Zleva se jedná o polohu jádra v $s = 0$, 4 a 8 mm.



Obr. 7 - Rozložení B_r při otevírání ventilu

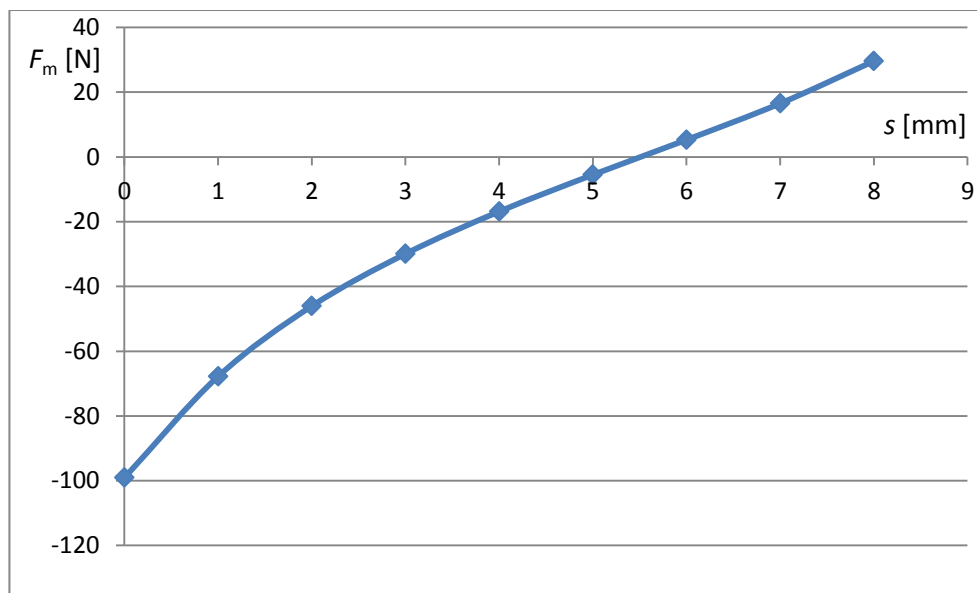


Obr. 8 - Rozložení μ_r při otevírání ventilu

3.2 Parametry ventilu získané simulací

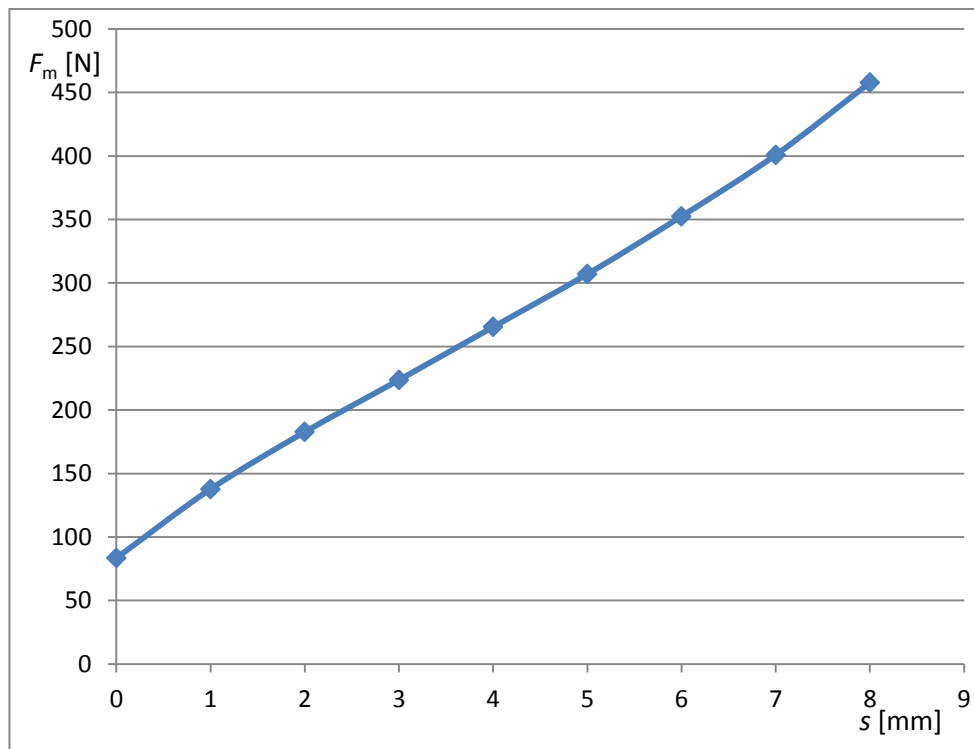
Nejdůležitějším parametrem, podle kterého docházelo ke změnám rozměrů a parametrů ventilu, bylo dosažení požadovaného silového působení na magnetické jádro. To muselo na uzávěr ventilu vyvinout dostatečnou sílu jak v otevřeném, tak uzavřeném stavu a i během přechodu mezi těmito stavy.

Na grafu 2 je zobrazen průběh síly působící na jádro v ose z, v jeho ose pohybu, pokud nejsou cívky napájeny a síla je tvořena jen magnetickým polem magnetů. V zavřeném stavu je jádro drženo silou téměř 100 N (síla na grafu je záporná, protože směr jejího působení je dolů) a v otevřeném stavu přidržováno silou 30 N.



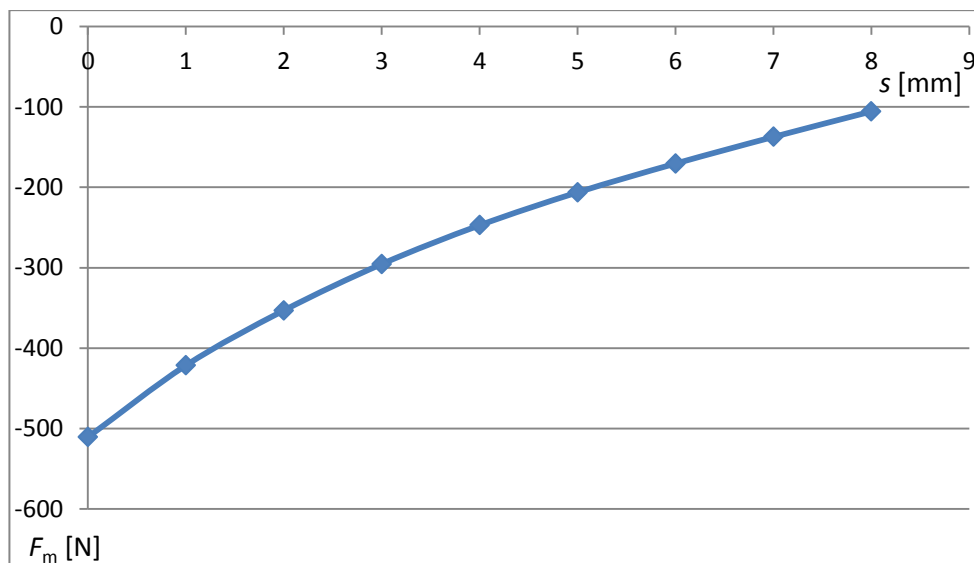
Graf 2 - Průběh síly (pouze magnety)

Pokud je napájena cívka 1 (otevírání ventilu), průběh této síly je zobrazen na grafu 3. Zde působící síla 83 N na jádro v poloze 0 mm a při plném otevření je síla 458 N.



Graf 3 - Průběh síly působící na jádro při sepnutí horní cívky

Poslední možností je stav, kdy je jádro umístěno v horní poloze, je sepnuta cívka 2 a ventil se zavírá. Průběh této síly na jádro je znázorněn na grafu 4. Na začátku pohybu, kdy je jádro ve vzdálenosti 8 mm je síla 105 N. Při uzavření ventilu je síla 510 N. Záporná znaménka v grafu opět značí, že síla působí směrem dolů.



Graf 4 - Průběh síly působící na jádro při sepnutí dolní cívky

Dalším zjištěným parametrem je indukčnost obou cívek. Pro výpočet indukčnosti byl použit vzorec

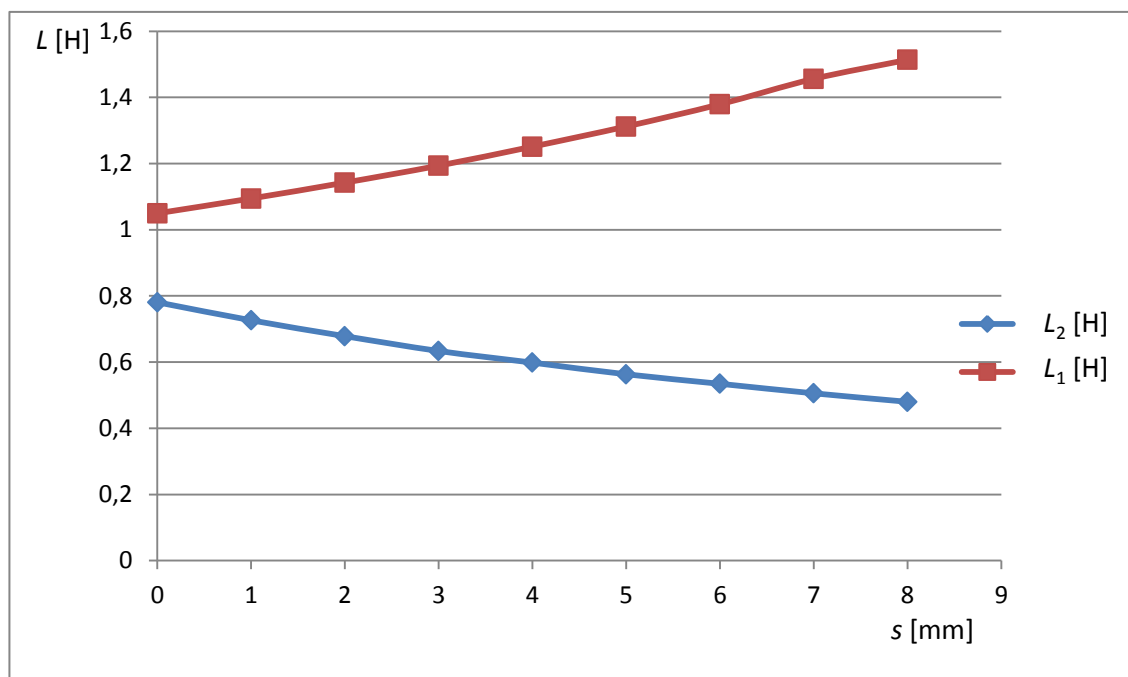
$$L = \frac{2 \cdot W_m}{I^2} = \frac{2 \cdot 2,44}{2,5^2} = 0,78 \text{ [H]} \quad (1.7)$$

kde W_m je celková magnetická energie (byla vypočtena ve všech oblastech modelu) z obr. 5 a I je proud pocházející cívkou.

V tab. 3 jsou hodnoty magnetické energie a indukčnosti cívek odpovídající poloze jádra. V grafu 5 jsou jen graficky zobrazeny hodnoty indukčností.

s [mm]	0	1	2	3	4	5	6	7	8
W_{m2} [N]	2,44	2,27	2,12	1,98	1,87	1,76	1,67	1,58	1,5
W_{m1} [N]	3,28	3,42	3,57	3,73	3,91	4,1	4,31	4,55	4,73
L_2 [H]	0,78	0,73	0,68	0,63	0,60	0,56	0,53	0,51	0,48
L_1 [H]	1,05	1,09	1,14	1,19	1,25	1,31	1,38	1,46	1,51

Tab. 3 - Hodnoty W_m a L v závislosti na poloze jádra



Graf 5 - Hodnoty L cívek v závislosti na poloze jádra

Hodnoty indukčnosti cívek jsou velké, a proto byla ještě vypočítána doba, za kterou se přechodový děj ustálí (proud protékající cívkou již bude konstantní). Elektrický obvod přechodového děje je složený ze sériového spojení odporu (R) a indukčnosti (L). Doba ustálení přechodového děje se udává jako 5ti násobek časové konstanty (τ), kde τ je:

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0,78}{30,48} = 25,6 \text{ [ms]} \quad (1.8)$$

a hodnota L je zvolena jako maximální indukčnost cívky (při názorném výpočtu použita cívka č. 2) a její odpor z tab. 2.

Když je takto vypočítáno τ i pro druhou cívku, výsledné τ se vynásobí pěti, tak doba ustálení přechodového děje (dosažení max. hodnoty proudu) nastane u cívky 2 v čase 128 ms a u cívky 1 v čase 159 ms. Pokud předpokládáme, že obě cívky budou napájeny dle hodnot uvedených v tabulce 2.

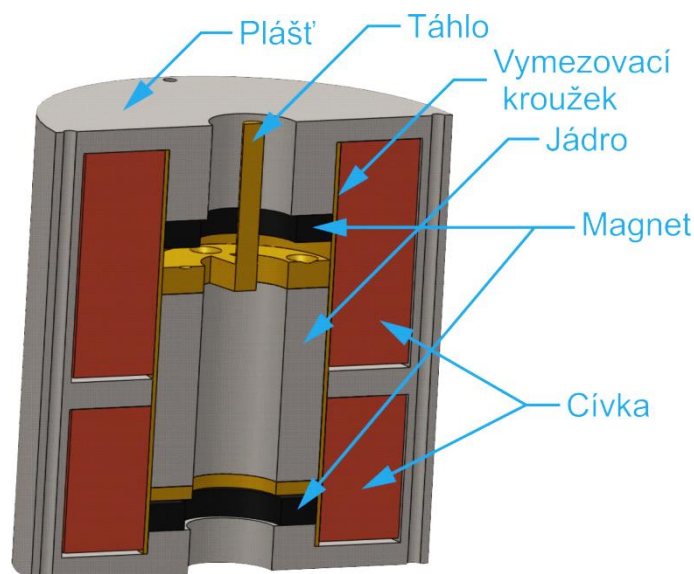
4 Výroba a oživení ventilu

4.1 Výkresy a modely

Pro grafické zpracování a tvorbu výkresů ventilu byl použit program SolidWorks, který nabízí plošné i objemové modelování. Byla využita i následná práce se sestavami složených z navržených součástí i jejich následné převedení to technického výkresu.

Jako předloha posloužil návrh z Agros2D, jde o obrázek 4, do kterého byly doplněny nemagnetické součásti aktuátoru, které pro výpočet matematického modelu nejsou potřebné. Pevná část ventilu je tvořena pláštěm, magnety, cívkami a vymežovací vložkou. Pohyblivá část je tvořena jádrem a táhlem.

Bylo potřeba provést konstrukční úpravy, aby bylo možné ventil lehce rozložit a provést potřebné úpravy či opravit poškozenou součást. Proto byla vnější stěna pláště od původního matematického modelu rozšířena o 2 mm. A skrze stěnu byly navrženy 4 otvory tak, aby došlo k pevnému spojení celého ventilu a zároveň jej bylo možno podle potřeby kdekoliv ukotvit. Tím je zajištěna požadovaná pevnost i možnost opětovného rozložení.



Obr. 9 - Model aktuátoru

Průměr aktuátoru je 95 mm a jeho výška je 100 mm. Technické výkresy jsou umístěny v přílohách bakalářské práce a mají označení *A* až *E*. Ve výkresech jsou podrobné rozměry jednotlivých součástí tak, jak byly předány do výroby.

4.2 Průběh výroby

Po dokončení návrhu, byly technické výkresy ventilu předány firmě, která měla jeho výrobu zajistit. Jednalo se o výrobu ventilu bez navíjení cívek a nákupu magnetů.

První komunikace probíhala v pořádku, byly odeslány výkresy a domluveno předběžné určení ceny výroby. Po delší nečinnosti ze strany firmy, byla konečně oznámena cena. Ta byla značně vysoká, komunikace vážla také, takže ventil začala raději vyrábět Prototypová dílna ZČU. Zde již žádný problém nebyl a do týdne bylo vše hotové. První fotografie ventilu je umístěna v příloze – *F*. Materiál, který byl použit k výrobě pláště, je ocel ČSN 12040.

4.3 Kompletace ventilu

Cívky pro ventil byly navíjeny ručně na připravené kostry, aby cívky držely tvar a dalo se s nimi snáze pracovat. Při navíjení se používal měděný lakovaný drát, určený pro výrobu cívek, o síle 0,5 mm. Při navíjení bylo pravděpodobně dosaženo koeficientu plnění téměř 0,9. To je více, než je počítáno v matematickém modelu. Dále byly koupeny dva prstencové neodymové magnety. Pro následné sestavení byly koupeny ještě závitové tyče a mosazné šrouby (potřeba zachovat magnetickou izolaci na jádře).

Při sestavování ventilu, byly cívky vyjmuty z koster, na kterých byly navinuty, zpevněny lepicí páskou, jejich vývody opatřeny mechanickou izolací a byly vloženy do pláště ventilu. V příloze *G* se nachází fotografie po osazení cívek do ventilu. Do pláště bylo nutné ještě vybrousit vstupy pro vývody cívek, ventil byl osazen magnety, složen a stažen pomocí závitových tyčí. Fotografie po dokončení se nachází opět v příloze, písmeno *H*.

4.4 Experimentální ověření ventilu

Pro kontrolu, jestli nebyly cívky porušeny, byl změřen jejich elektrický odpor. Odpor cívky č. 1 je 43,3 Ω a cívka č. 2 má 30,62 Ω . Při porovnání s vypočteným elektrickým odporem z tab. 2 lze předpokládat, že cívky nebyly porušeny a blíží se předpokládaným hodnotám.

Dalším krokem bylo ověření velikosti budícího napětí cívek, při kterém dojde k přepnutí ventilu. Cívky byly připojeny na vypočtená napětí (podle tab. 2), první cívka napájena přibližně 120 V a druhá 75 V. Při těchto napětích docházelo k bezproblémovému chodu

ventilu. Napětí bylo snižováno na nejnižší hodnotu tak, aby nebyl vodič zatěžován při častějším spínání velkými proudy a nedocházelo k většímu oteplení, než je pro spínání nutné. Jedná se o spínání bez zátěže (jádro ani táhlo nezatiženo, působí pouze gravitační síla), a tak tyto hodnoty jsou nižší, než bylo vypočteno podle matematického modelu. Konečné hodnoty, při kterých nezatižený ventil spínal, jsou u první cívky 70 V a u druhé cívky 12,5 V. Při změřeném odporu první cívky $43,3 \Omega$ je spínací proud 1,62 A (výpočet podle rovnice 1.6). U druhé cívky byl změřený odpor $30,62 \Omega$, spínací proud vychází 0,41 A. Spínací proudy jsou u nezatiženého ventilu menší, než udávaly výpočty. Ty předpokládali spínací proud 2,5 A pro obě dvě cívky.

Přepínání ventilu je okamžité, indukčnosti a jím odpovídající přechodový děj na pohled nepůsobí žádné velké zpoždění po sepnutí. Funkčnost ventilu byla ověřena. Nachází se zde dvě krajní stabilní polohy, kdy je jádro drženo pomocí síly permanentních magnetů a při sepnutí příslušné cívky dojde k přepnutí. Při experimentálním ověření nedošlo k degradaci permanentních magnetů a nebylo patrné žádné zjevné oteplení.

Závěr

Předložená práce se snaží přiblížit problematiku elektromechanických aktuátorů ve funkci ventilu. Během posledních let se elektromagnetické aktuátory značně rozšířili a začínají se uplatňovat v mnoha odvětvích přes automobilový průmysl, zdravotnictví až po energetiku a další obory. Doplnují používané hydraulické či pneumatické systémy svojí menší velikostí, jednoduchostí celého systému ale hlavně svojí spolehlivostí a menší náročností na údržbu.

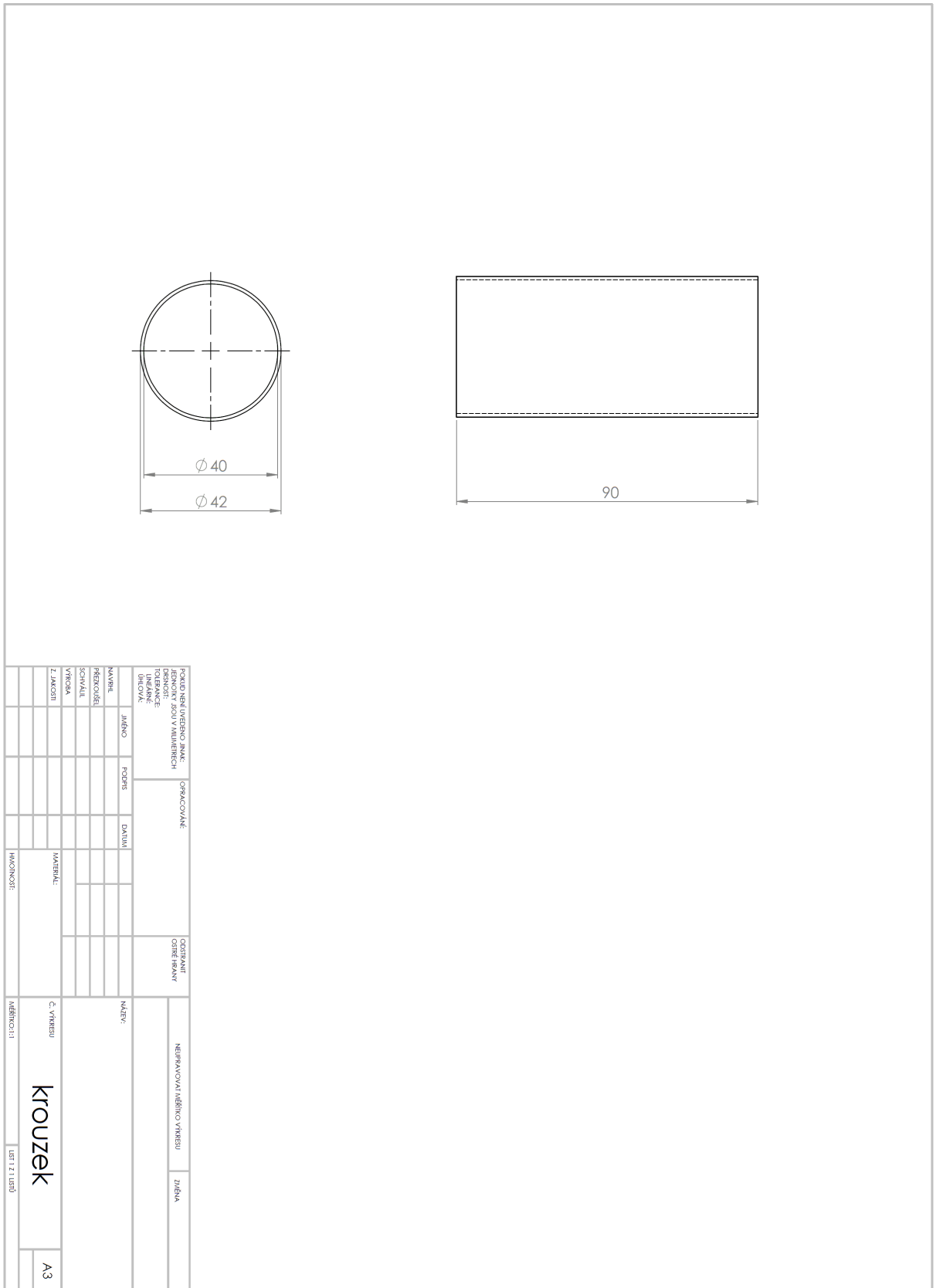
Hlavním cílem práce bylo navrhnout pomocí matematického modelu elektromagnetický ventil. To se podařilo. Dále se nad rámec zadání práce ventil vyrobil a získal se tak funkční prototyp s ojedinělou konstrukcí.

Práce a měření na ventilu budou stále pokračovat. Ještě je potřeba provést jeho diagnostiku: ověřit statické charakteristiky, časy sepnutí apod. K dokončení funkčního ventilu je potřeba provést vnitřní izolaci, aby proudící kapalina nemohla proniknout do elektrické části, připravit ventil na přichycení na trubku pomocí závitu a vyrobit výměnné uzávěry na táhlo, aby je bylo možno měnit podle způsobu použití. A také je již patrné, že bude potřeba provést konstrukční úpravy, aby byla snížena hlučnost ventilu při přepínání.

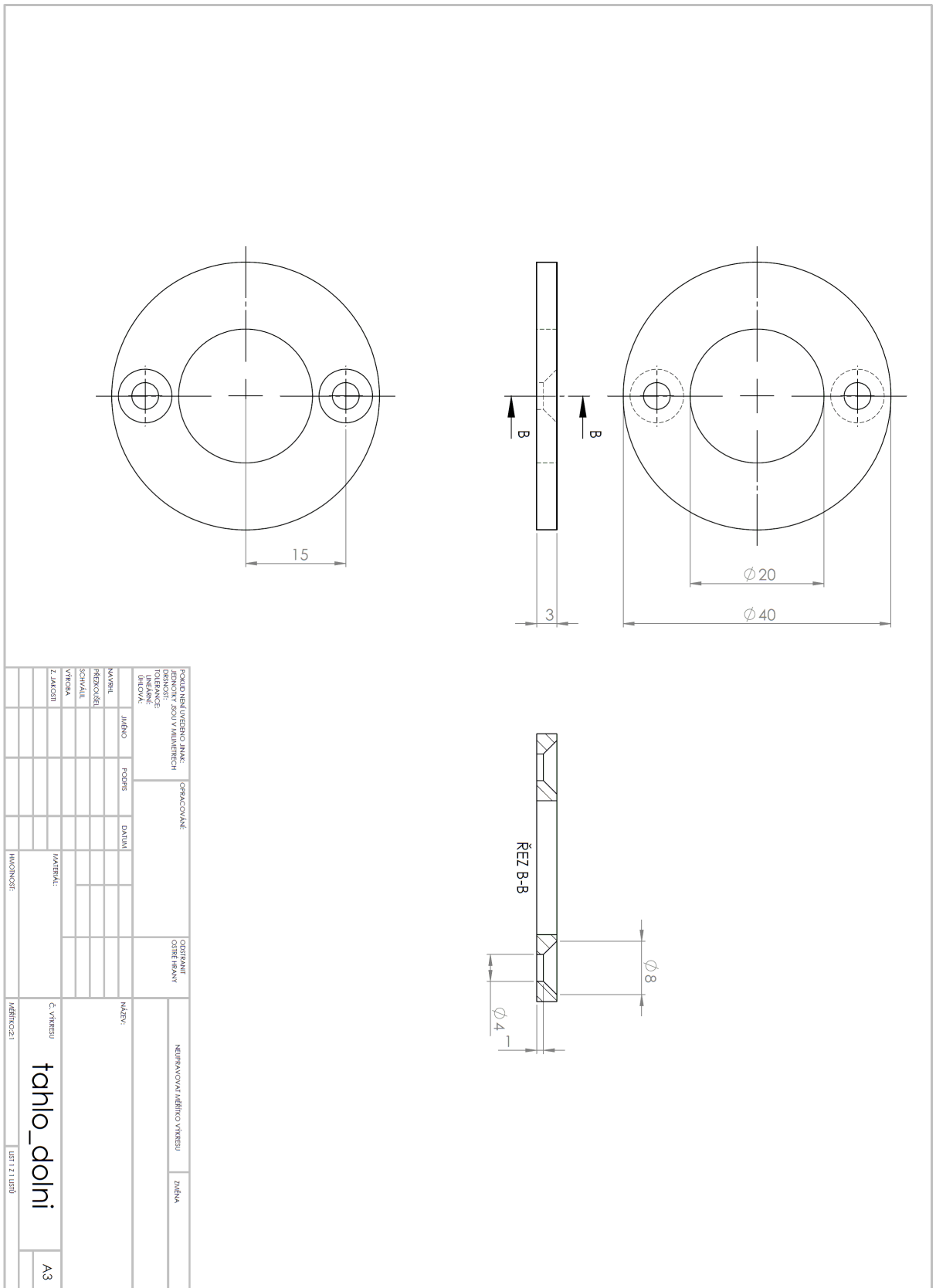
Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER D., ULRYCH B.: *Elektromagnetické aktuátory*, 1. vydání, Praha: BEN – technická literatura, 2008, 124 stran, ISBN 978-80-7300-216-9
- [2] DRAXLER K., KAŠPAR P., RIPKA P.: *Magnetické prvky a měření*, 2. vydání, Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999, 276 stran, ISBN 80-01-01909-08
- [3] MACH F., *Návrh a experimentální ověření elektromagnetického aktuátoru*, Západočeská univerzita v Plzni, 2009
- [4] MACH F., *Pokročilé metody návrhu lineárních elektromagnetických aktuátorů: teze dizertační práce*, Západočeská univerzita v Plzni, 2014
- [5] JANOCHA H. (Ed): *Actuators: Basics and Applications*, Springer Berlin, 2004, 343 stran, ISBN 3-540-61564-4
- [6] NESBITT B., *Handbook of Valves and Actuators: Valves Manual International*, Butterworth-Heinemann, 2011, 416 stran, ISBN 978-00-8054-928-6
- [7] MACH F., NOVÝ I., KARBAN P., DOLEŽEL I.: *Shape Optimization of Electromagnetic Actuators*, Západočeská univerzita v Plzni
- [8] MACH F., KARBAN P., DOLEŽEL I.: *Design of Novel Bearing-less Electromagnetic Actuator in Valve Operation*, Západočeská univerzita v Plzni

Příloha C – Technický výkres vodícího kroužku pro jádro



Příloha D – Technický výkres spodního dorazu pro jádro



Příloha F – Fotografie kostry aktuátoru



Příloha G – Fotografie rozloženého kompletního aktuátoru



Příloha H – Fotografie kompletního (sestaveného) aktuátoru

