

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**Katedra elektroenergetiky a ekologie**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Bistabilní elektromagnetický ventil**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2015/2016

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

Jméno a příjmení: **Bc. Martin KURFIŘT**  
Osobní číslo: **E14N0065P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Bistabilní elektromagnetický ventil**  
Zadávající 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. Proveďte rešerši konstrukčních provedení a využití elektromagnetických aktuátorů ve funkci ventilu pro řízení toku tekutiny.
2. Vytvořte kompletní konstrukční návrh elektromagnetického ventilu pracujícího v bistabilním režimu.
3. S využitím matematického modelu proveďte návrh všech dílčích částí ventilu.
4. Proveďte studii dynamických vlastností ventilu a stanovte jeho provozní parametry.
5. Navržený ventil zkonstruujte a proveďte základní ověření jeho funkce a otestujte jej pod zatížením.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího  
Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran  
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická  
Seznam odborné literatury:


1. B. Nesbitt : Handbook of Valves and Actuators, Valves Manual International, Elsevier Science, 2011
2. H. Janocha. Actuators: Basics and Applications, Springer, 2010
3. R. R. Chladny, C.R. Koch, A.F. Lynch: Modeling automotive gas-exchange solenoid valve actuators, IEEE Transactions on Magnetics, 41(3):1155-1162, 2005
4. B. Warberger, J. Feller, C. Guntermann, T. Nussbaumer, J.W. Kolar : High-dynamics low-cost flow control with solenoid actuator for ultrahigh purity applications, IEEE Transactions on Industry Applications, 47(5):2268-2273, 2011
5. F. Mach: Pokročilé metody a algoritmy pro analýzu sdružených úloh v elektromagnetismu, disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2014

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Mach, Ph.D.  
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 15. října 2015  
Termín odevzdání diplomové práce: 16. května 2016

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



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

V Plzni dne 15. října 2015

## **Abstrakt**

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh, konstrukci a testování bistabilního elektromagnetického ventilu. V první části diplomové práce jsou představeny kapalinové ventily, které pro svůj pohon využívají elektrickou energii. Práce pokračuje formulací obecného matematického modelu elektromagnetického ventilu, který je následně využit pro návrh prototypu a stanovení jeho provozních parametrů. Ventil je na základě návrhu vyroben a sestaven. Při závěrečném testování jsou ověřeny základní vlastnosti prototypu a následuje diskuze těchto výsledků.

## **Klíčová slova**

Koaxiální ventil, elektromagnetické pole, permanentní magnet, matematický model, přímé řízení.

**Abstract**

This study is focused on the design, construction and testing of bistable electromagnetic valve. The fluid valves are presented in the first part of the thesis. These valves act as electric propulsions. The formulation of the mathematical model of the electromagnetic valve follows. This model is used for prototyping and setting the operating parameters. The valve is manufactured and assembled afterwards. The basic characteristics of a prototype are validating during final testing. The discussion of these results follows.

**Key words**

Coaxial valve, electromagnetic field, permanent magnet, mathematical model, direct control.

## **Prohlášení**

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.

.....

podpis

V Plzni dne 10.5.2016

Martin Kurfiřt

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále všem zaměstnancům a spolupracovníkům na katedře teoretické elektrotechniky, kteří mi během práce pomáhali připravovat a provádět měření.

Nesmím zapomenout ani na společnosti Likost, Hennlich, GM Electronic, GES Electronics a další, na které jsem se během své práce obracel s dotazy a objednávkami, které často nebyly technicky správné, ale pracovníci mi vždy věnovali čas a nakonec jsem získal vše, co jsem potřeboval. Na konci práce se podařilo navázat i spolupráci se společností PEVEKO, která se zabývá výrobou elektromagnetických ventilů a podobné bistabilní ventily by ráda zařadila mezi své výrobky.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>1. ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b> .....	<b>10</b>
1.1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ .....	10
1.2 ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY VE FUNKCI VENTILU .....	11
1.2.1 <i>Elektromagnetický ventil</i> .....	11
1.2.2 <i>Elektrohydraulický servo ventil</i> .....	12
1.3 VYUŽITÍ ELEKTROMAGNETICKÝCH VENTILŮ .....	13
1.4 MOTIVACE PRÁCE .....	14
<b>2. TEORETICKÝ ROZBOR</b> .....	<b>15</b>
2.1 MAGNETICKÉ POLE .....	15
2.2 PROUDĚNÍ KAPALIN .....	15
2.3 ELEKTRICKÝ OBVOD .....	17
2.4 DYNAMIKA SYSTÉMU .....	18
<b>3. ZÁKLADNÍ KONCEPT AKČNÍHO ČLENU</b> .....	<b>19</b>
3.1 USPOŘÁDÁNÍ AKČNÍHO ČLENU .....	19
3.2 ZÁKLADNÍ STUDIE AKČNÍHO ČLENU .....	20
3.3 OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍ FUNKČNOSTI .....	24
<b>4. KONSTRUKCE A STAVBA PROTOTYPU VENTILU</b> .....	<b>26</b>
4.1 SEDLO VENTILU .....	26
4.2 UCHYCENÍ VENTILU .....	27
4.3 UTĚSNĚNÍ .....	28
4.4 SIMULACE PROUDĚNÍ KAPALINY .....	31
4.5 STANOVENÍ INDUKČNOSTI CÍVEK .....	32
4.6 DYNAMIKA POHYBU JÁDRA .....	33
4.7 SPÍNACÍ OBVOD .....	34
4.8 ZÁLOŽNÍ NAPÁJENÍ .....	36
4.9 ŘÍZENÍ VENTILU .....	36
4.9.1 <i>Obecný model řízení ventilu</i> .....	37
4.9.2 <i>Řízení prototypu ventilu</i> .....	38
<b>5. VERIFIKACE A TESTOVÁNÍ</b> .....	<b>40</b>
5.1 STATICKÉ CHARAKTERISTIKY .....	40
5.2 DYNAMICKÉ CHARAKTERISTIKY .....	43
5.3 OVĚŘENÍ KONSTANTY PŘECHODNÉHO DĚJE .....	44
5.4 MĚŘENÍ TLAKŮ A TLAKOVÉ ZTRÁTY .....	46
5.5 OVĚŘENÍ ZÁLOŽNÍHO NAPÁJENÍ .....	49
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>50</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>52</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>I</b>



## Seznam symbolů a zkratek

$\mu$ .....	permeabilita (H/m)
$B$ .....	magnetická indukce (T)
$T$ .....	teplota (°K)
$A$ .....	vektorový magnetický potenciál (W/m)
$F$ .....	síla (N)
$V$ .....	objem (m <sup>3</sup> )
$J$ .....	proudová hustota (A/m <sup>2</sup> )
$v$ .....	rychlost (m/s)
$p$ .....	tlak (Pa)
$\rho$ .....	hustota (kg/m <sup>3</sup> )
$\eta$ .....	dynamická viskozita (Ns/m <sup>2</sup> )
$f$ .....	vnitřní síly (N/m <sup>3</sup> )
$Q$ .....	průtok (m <sup>3</sup> /s)
$S$ .....	obsah (m <sup>2</sup> )
$c$ .....	součinitel odporu (-)
$u, U$ .....	napětí (V)
$i, I$ .....	proud (A)
$L$ .....	indukčnost (H)
$R$ .....	odpor ( $\Omega$ )
$t$ .....	čas (s)
$\delta$ .....	dráha (mm)
$m$ .....	hmotnost (kg)
$N$ .....	počet závitů (-)
$W$ .....	energie (J)
$\tau$ .....	časová konstanta (ms)
$C$ .....	kapacita (F)
GND .....	ground = uzemnění
fps .....	frames per second = počet snímků za vteřinu

# 1. Úvod do problematiky

## 1.1 Vymezení základních pojmů

Aktuátor je typickou součástí mechatronické soustavy (kombinace elektroniky, mechaniky, softwaru a řízení). Většinou se jedná o pohony, kde vstupní veličina je ovlivněna signály ze členů pro zpracování informace na výstupní výchylku konající požadovanou práci s požadovaným výkonem.

Aktuátory pracují s energií, která je pro funkčnost zařízení nezbytná. Klíčová je schopnost měnit míru svého působení, např. svůj výkon, podle přiváděného řídicího signálu. Při zanedbání společného přívodu energie, pak pomocí akčního členu, lze řídicím signálem (ideálně minimálním a beze ztrát) ovlivňovat velký pracovní výkon tohoto stroje. Aktuátor má nejčastěji nejen výkonový vstup a výstup jako měnič, ale navíc informační vstup pro řízení pracovního výkonu.

Aktuátory mohou být krokové (dvou a více polohové) nebo spojitě. Krokové se mohou nastavovat pouze do několika poloh, obvykle "otevřeno" a "uzavřeno", a hodí se pro méně náročné regulace a řízení. Spojitá výstupní charakteristika umožňuje nastavení hodnoty výstupního signálu do jakékoliv polohy mezi danými mezemi.

### **Dělení dle energie, která se používá ke konání práce:**

- elektrická (využívají elektro-mechanického principu; výhodou je rychlost a velikost síly; nevýhodou jsou nebezpečí spojená s elektrickým proudem);
- pneumatická (výhodou je ekologická nezávadnost ve srovnání s hydraulickými aktuátory; nevýhodou je zpoždění reakce oproti příkazu k činnosti);
- hydraulická (výhodou je velká mechanická síla na výstupu; nevýhodou je velikost stroje, nutnost vedení kapalin a ekologická závadnost často používaných minerálních olejů)

### **Dělení akčních členů dle následného působení:**

- krokové (stykače, krokové motory) vs. spojitě pohyblivé (písty, regulační ventily),
- omezené (píst, stykač) vs. nekonečné (zacyklené – dopravníky, motory),
- dle působení táhlo/páka (tlak i tah) vs. lanko (tah) vs. bodec (tlak),
- typ převodu lineární vs. nelineární závislost. [1][2]

## 1.2 Elektromagnetické aktuátory ve funkci ventilu

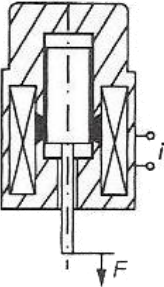
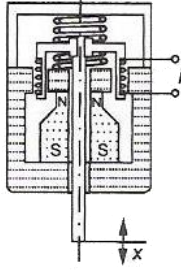
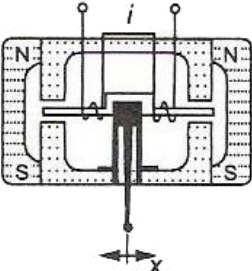
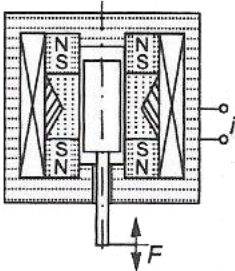
Ventily se nejčastěji používají pro dávkování a řízení směru proudění tlakového média. V případě řízení směru proudění média je potřeba pouze spínací mechanismus a zpětná klapka. Důležitým kritériem ventilu je ale tlaková ztráta tekutiny při jejím průchodu. Ventily určené pro dávkování mají tlakové ztráty nevyhnutelně větší.

Ovlivnění velikosti toku dochází pomocí proporcionálního ventilu (ventil je otevřen ve stabilní požadované poloze a tím je určen průtok) nebo pomocí nestabilního ventilu (množství propuštěného média je ovlivněno pulzujícím uzávěrem, kdy množství je závislé na poměru doby otevření/uzavření ventilu). V mnoha aplikacích by ale tento princip způsoboval nepřijatelné tlakové pulsování a proto se využívají proporcionální ventily. [3][4]

### 1.2.1 Elektromagnetický ventil

Vstupní elektrický signál je přímo převeden na sílu (tah, tlak, výchylku, ...), která ovládá uzávěr ventilu. Průtok tlakového média je ovládán změnou velikosti tlakové ztráty ve ventilu. Tyto typy ventilů jsou těžko použitelné, protože nedokáží generovat dostatečnou sílu, nebo dokáží sílu generovat na velmi krátké vzdálenosti. V tabulce 1.1 jsou znázorněny čtyři nejčastěji používané typy:

- Ventil s proporcionálním magnetem (proportional magnet) – má jednu stabilní polohu, do které je vracen pomocí pružiny. V nestabilní poloze (otevřeno) je držen pomocí magnetického pole cívky. Dosahuje velkých sil s nelineárním průběhem. Má větší nároky na řídicí elektroniku a kvalitu vstupního signálu.
- Ventil s pohyblivou cívkou (moving coil) – má opět jednu stabilní polohu a posun dříku nahoru či dolů je zajištěnou změnou magnetického pole cívek (změna polarity protékaného proudu). Dráha pohybu dříku je velice krátká.
- Ventil s výchylkou (torque motor) – opět středová stabilní poloha, výchylky je docíleno vytvořením magnetického toku cívkou a jeho působením na permanentní magnety (přiblížení či oddálení ramene). Dobré dynamické vlastnosti systému. Nevýhodou je opět krátká vzdálenost pohybu dříku.
- Lineární ventil (linear motor) – podobné vlastnosti jako ventil s výchylkou, jen nedochází k vychylování ramene, ale k přímému posunu dříku. [3][4]

	Ventil s proporcionálním magnetem	Ventil s pohyblivou cívkou	Ventil s výchylkou	Lineární ventil
				
Příkon (W)	5 - 40	0,2 - 5	0,02 - 4	10 - 40
Síla (Nmm)	20 - 1000	8 - 80	2 - 40	400 - 2000
Odchylka od linearity (%)	0,5 - 6	1 - 7	1 - 2	0,5 - 6
Frekvenční limit (Hz)	10 - 150	100 - 200	100 - 300	10 - 200

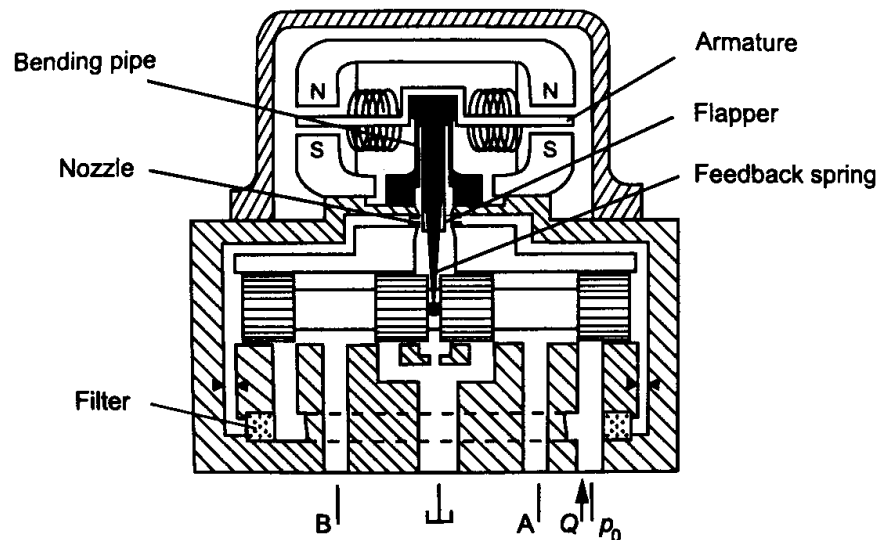
Tabulka 1.1 - Běžné elektromechanické převodníky [3]

### 1.2.2 Elektrohydraulický servo ventil

Elektrohydraulické ventily se vyvinuly z původních elektromagnetických ventilů. Využívají jejich výhod, dobré dynamické a statické vlastnosti a přidávají ještě robustnost a odolnost celého systému. To vyžaduje přesnější a složitější řízení než předchozí ventily.

Servo ventily využívají malé vstupní energie, která dodá počáteční ovládací impulz. energii pro přepnutí ventil získává převodem kinetické energie média na energii statickou. Systém pomocných kanálků a komor při přepínání médium směřuje takovým směrem, že přepnutí nemusí překonávat tlakové rozdíly v médiu, ale zajistí pouze přestavení uzávěru.

Celkové fungování tohoto typu ventilu je zobrazeno na obrázku 1.1 jako příklad z mnoha dalších provedení. Vychýlením ramene pomocí magnetického toku dojde přes trn k posunu hlavního pístového uzávěru ventilu. Výsledný tlakový rozdíl v oblasti hlavního pístu způsobí, že píst je urychlen proti tlaku média a působení pružin. [3][4]



Obrázek 1.1 – Elektrohydraulický servo ventil [3]

### 1.3 Využití elektromagnetických ventilů

Elektromagnetické ventily najdou své uplatnění v oblastech, kde je potřeba využívat dálkově řízené ventily. Další možností, použití dálkově řízených ventilů jsou hydraulické a pneumatické systémy. Všechny tyto 3 možnosti vyžadují přepravu určité energie od zdroje k ovládanému ventilu.

Nevýhodou pneumatického a hydraulického systému je nutnost mít převodník energie na vstupu (čerpadlo oleje nebo kompresor vzduchu), které nejčastěji vstupní elektrickou energii převede na tlakovou potenciální energii. Tato energie je pomocí potrubí nebo hadic dovede k ventilu, kde vykoná požadovanou práci. V případě použití hydraulického systému, je potřeba olej dovést ještě zpět k čerpadlu. Vzduch je možné vypouštět do okolí.

V těchto případech je výhodnější použití přímo elektromagnetického ventilu, který působí jako převodník elektrické energie na kinetickou. Energie je mu dovedena pomocí tenkých elektrických vodičů.

Tyto ventily mohou najít uplatnění v různých oblastech, např.:

- potravinářský průmysl (zde není vhodné využívat hlavně hydraulický systém, z důvodu nutnosti použití oleje);
- zemědělství (ventily pro spínání zavlažování v pravidelných intervalech);
- vytápění (používají se na regulaci průtoku plynu v plynových kotlích);
- a jiné případy, kdy je potřeba řídit průtok kapalin nebo plynů.



Obrázek 1.2 – Běžně používané elektromagnetické monostabilní ventily od společnosti PEVEKO (levý pro kapaliny, pravý pro plyn)

#### 1.4 Motivace práce

Spolupráci s katedrou teoretické elektrotechniky a vývojem elektromagnetického ventilu jsem začal na konci druhého ročníku. Po dokončení a obhájení bakalářské práce jsem si sám říkal, že už v podobném stylu pokračovat nechci. Většina spolužáků svoji bakalářkou práci zpracovala z knih, porovnal určitě metody a měli hotovo. Já jsem trávil hodiny nad návrhem, následně zajištění výroby všech součástí a kompletací akčního členu ventilu. A až poté jsem psal samotnou práci. Když na začátku 4 ročníku přišla nabídka, abych pokračoval v práci dále a vyrobil funkční prototyp bistabilního ventilu, tak jsem neváhal ani chvíli a rozhodl se pokračovat.

Co mě práce naučila? Že jednání se společnostmi a lidmi je složité, zvláště když za nimi přijdu já a řeším takové neobvyklé věci (Lze domácí vodárnu napájet uzavřený okruh pro testování ventilu?, Potřeboval bych hadicemi propojit vodárnu a několik součástí ..., atd.). Samotné vedení projektu, kdy jsem musel vše důkladně plánovat (od modelu, návrhu až po zapojení všech jejich komponent) bylo komplikované a náročné. Některé součásti jsem nechal vyrobit, jiné běžně dostupné bylo potřeba sehnat a zakomponovat do ventilu. Veškeré montážní práce a přípravy podpurných součástí jsem dělal sám.

Těžko jde spočítat, kolik hodin jsem prací na ventilu strávil nebo kolik celý vývoj ventilu stál. Ale vím, že řešení tohoto komplexního projektu mě posunulo dále a prověřilo mé dovednosti. A hlavně po mně na katedře zůstane na památku ventil, který bude možné prezentovat studentům v dalších letech, což třeba některé z nich motivuje do podobného projektu, jaký jsem vedl já.

## 2. Teoretický rozbor

Kapitola seznamuje se základními fyzikálními problémy, které je potřeba při řešení elektromagnetického ventilu uvažovat. Jedná se o řešení magnetického pole ve všech částech ventilu, proudění média (kapaliny, plynu) skrze ventil, chování cívky jako elektrického obvodu a následnou dynamiku všech fyzikálních soustav ovlivňujících ventil.

### 2.1 Magnetické pole

Rozložení magnetického pole lze popsat parciální diferenciální rovnicí vyjádřenou z první Maxwellovy rovnice (Ampérův zákon celkového proudu) určené pro vektorový magnetický potenciál  $\mathbf{A}$ . Tato upravená rovnice je ve tvaru

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu(\mathbf{B}, T)} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (2.1)$$

kde  $\mu(\mathbf{B}, T)$  značí permeabilitu nelineárně závislou na magnetické indukci  $\mathbf{B}$  a teplotě  $T$ ,  $\mathbf{B}_r$  remanentní indukci permanentních magnetů a  $\mathbf{J}_{\text{ext}}$  externí proudovou hustotu.

Lze provést zjednodušení modelu, kdy pomíneme nelineární závislost permeability na teplotě. Tuto závislost lze zanedbat za běžných podmínek, kdy není dosahováno velkých teplot nebo velkých rozdílů mezi provozní teplotou zařízení. [1][5][6]

Výpočet síly v magnetickém poli lze popsat pomocí rovnice

$$\mathbf{F}_m = \frac{\partial W_m}{\partial \delta}, \quad W_m = \int_V \int_0^{\mathbf{B}} \mathbf{H} d\mathbf{B} dV, \quad (2.2)$$

kde  $\mathbf{F}_m$  je magnetická síla,  $W_m$  energie magnetického pole,  $\delta$  dráha pohybu jádra,  $\mathbf{H}$  intenzita magnetického pole a konečně  $\mathbf{B}$  magnetická indukce.

### 2.2 Proudění kapalin

Nestlačitelné proudění kapaliny lze popsat pomocí Navier-Stokesovy rovnice pro rychlost kapaliny  $\mathbf{v}$  v ustáleném stavu (ve svém zjednodušeném stavu) a tlaku  $p$

$$\rho \mathbf{v} \cdot \operatorname{grad} \mathbf{v} = -\operatorname{grad} p + \eta \Delta \mathbf{v} + \mathbf{f}, \quad (2.3)$$

$$\operatorname{div} \mathbf{v} = 0, \quad (2.4)$$

kde  $\rho$  je hustota kapaliny,  $\eta$  popisuje dynamickou viskozitu a  $\mathbf{f}$  reprezentuje vnitřní síly (např. gravitační). Síla působící na ventil se pak vypočte z rozložení tlaku (tlaková síla) a rychlosti (viskózní síla) na jejím povrchu.

Základní vlastností kapalin je vzájemná pohyblivost částic. Proto kapalná a plynná tělesa nemají stálý tvar. Přizpůsobují se tvaru prostoru a okolních pevných těles. Kapaliny dále

zachovávají svůj objem a jsou velmi málo stlačitelné. Dalším parametrem je viskozita (tření vznikající vzájemným smýkáním molekul).

Proudění je takový pohyb tekutiny, kdy u částic převažuje pohyb v jednom směru (např. proudění vody potrubím). Pohyb tekutin je složitější, protože částice mohou měnit svoji vzájemnou polohu. Každá částice v proudící tekutině má svoji určitou rychlost  $v$ , jejíž velikost a směr se může v závislosti na místě a čase měnit. Pokud je rychlost částic stálá, jde o ustálené nebo stacionární proudění. Trajektorie jednotlivých částic jsou znázorněny proudnicemi. Jedná se o smyšlené čáry, jejichž tečna v libovolném bodě má směr a rychlost pohybující se částice.

Objem kapaliny, který proteče daným průřezem trubice za jednotku času, se nazývá objemový průtok  $Q_V$ . Protéká-li průřezem o plošném obsahu  $S$  kapalina rychlostí  $v$ , je objemový průtok

$$Q_V = S \cdot v. \quad (2.5)$$

Objem vody, který potrubím proteče za libovolnou dobu, lze pak měřit průtokoměrem. Ideální kapalina je nestlačitelná, proto se na žádném místě nemůže hromadit a objemový průtok je v každém průřezu stejný. Platí  $Q_V = \text{konst.}$ , což je rovnice spojitosti toku neboli rovnice kontinuity

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 = \text{konst.} \quad (2.6)$$

Vše platí za předpokladu, že se jedná o ideální kapalinu (dokonale tekutá, bez vnitřního tření, zcela nestlačitelná). Při jejím proudění je součin obsahu průřezu  $S$  a rychlosti proudu  $v$  v každém místě trubice stejný. V místě, kde se zúží průřez trubice, se zvýší rychlost proudění.

Výše uvedené zákonitosti platí pro ideální tekutiny, ale ve skutečnosti neplatí úplně přesně. Zvláště v reálné kapalině působí vždy proti pohybu částic odporové síly způsobené vnitřním třením v kapalině. U reálné kapaliny je rychlost částic závislá na poloze. Částice u stěny trubky se pohybují nejpomaleji, naopak částice ve středu potrubí se pohybují nejrychleji.

Když se těleso pohybuje vzhledem ke kapalině, dochází vždy k obtékání. Při obtékání působí mezi tekutinou a obtékaným tělesem hydrodynamická odporová síla. Při malých rychlostech je proudění kolem těles laminární (proudnice jsou rovnoběžné a nemísí se) a odporová síla je poměrně malá. Při větších rychlostech vzniká proudění turbulentní, velikost



odporové síly se zvětšuje už s druhou mocninou rychlosti  $v$ . Pro velikost odporové síly platí vztah

$$F_o = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \quad (\text{N}) \quad (2.7)$$

kde  $c$  je součinitel odporu pro daný tvar tělesa,  $\rho$  hustota proudícího média,  $S$  obsah průřezu tělesa kolmého ke směru pohybu a  $v$  relativní rychlost.

Další silou, která v kapalině může působit, je tlaková síla  $F_t$ , kterou lze popsat rovnicí

$$F_t = p \cdot S \quad (\text{N}) \quad (2.8)$$

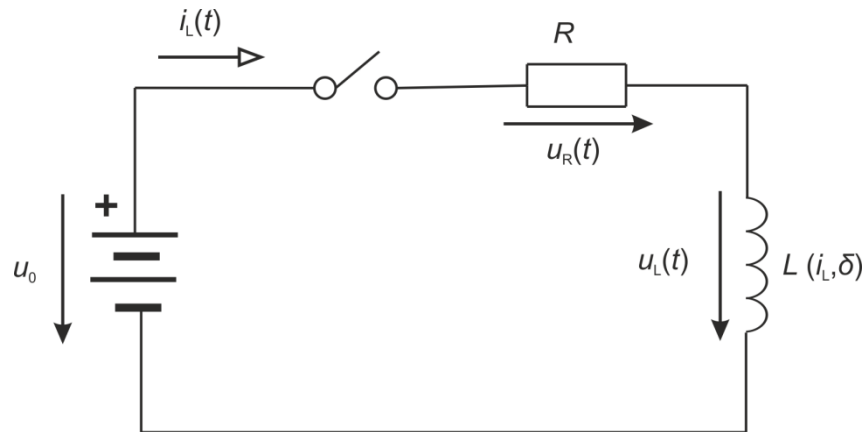
kde  $p$  je tlak působící tekutiny a  $S$  je plocha, na kterou síla působí. Je potřeba zmínit také viskózní sílu, která působí mezi částicemi v kapalině a je analogická s třecí silou, která působí u pevných látek. [7]

### 2.3 Elektrický obvod

Základní model elektrického obvodu tvořeného cívkou lze popsat jako jednoduchý RL obvod (obrázek 2.1). Jeho vlastnosti jsou popsány diferenciální rovnicí

$$R i_L(t) + L(i_L, \delta) \frac{di_L(t)}{dt} = u_0, \quad (2.9)$$

kde  $R$  je elektrický odpor budící cívky a připojovacích vodičů,  $i_L(t)$  časově proměnný proud v obvodu,  $L(i_L, \delta)$  indukčnost cívky, která je nelineárně závislá na protékajícím proudu a poloze jádra a  $u_0$  je stejnosměrné napětí zdroje.



Obrázek 2.1 – Schéma zapojení ss obvodu

Elektrické pole, konkrétně proud procházející obvodem, ovlivňuje také model magnetického pole. Kdy je přímá závislost mezi  $i_L(t)$  a  $J_{\text{ext}}$ , kdy platí

$$i_L = \int_S J_{\text{ext}} dS. \quad (2.10)$$

## 2.4 Dynamika systému

Zkoumá závislosti, vazby a vzorce chování mezi jednotlivými veličinami systému. V našem případě se jedná o pohybové rovnice, které tvoří soustavu diferenciálních rovnic

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F} \quad (2.11)$$

$$\mathbf{v} = \frac{d\delta}{dt}, \quad (2.12)$$

kde  $m$  je hmotnost,  $\mathbf{v}$  rychlost pohybu,  $t$  čas,  $\mathbf{F}$  celková síla a  $\delta$  dráha pohybu.

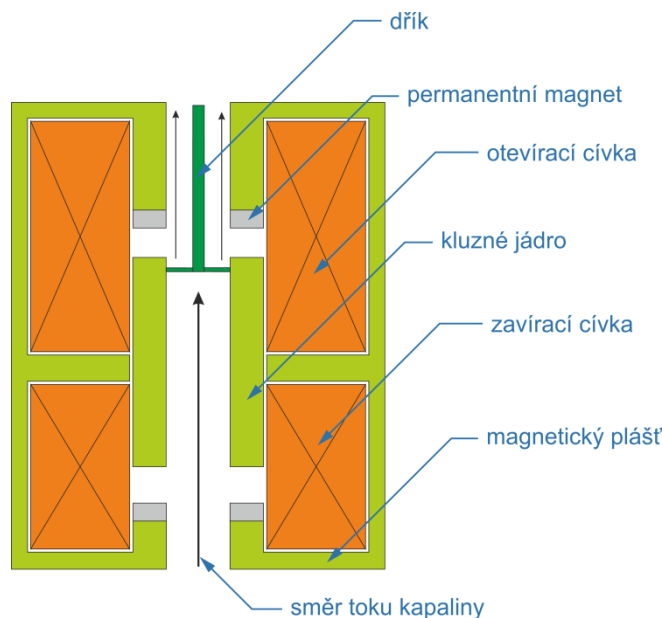
Výsledná síla  $\mathbf{F}$  je dána superpozicí sil, které na danou pohyblivou část působí. Jednotlivé složky a směry působení daných sil budou pro každý stav jiné, ale vždy budou působit alespoň dvě síly a to síla magnetického pole  $\mathbf{F}_m$  a gravitační síla  $\mathbf{F}_g$ . [5][8]

### 3. Základní koncept akčního členu

Návrhem prototypu akčního členu pro bistabilní elektromagnetický ventil jsem se zabýval již ve své bakalářské práci s názvem Návrh aktuátoru s permanentním magnetem [9]. V této práci je návrh a matematický model také podrobněji popsán.

#### 3.1 Uspořádání akčního členu

Akční člen ventilu byl navržen, aby bylo dosaženo maximální možné úspory prostoru, který je potřebný pro jeho montáž. Je tak přímo propojen s ventilem. Je použit princip, kdy kapalina prochází středem akčního členu – koaxiální provedení. Na obrázku 3.1 je uveden jednoduchý náčrt akčního členu. Jediný pohyblivý celek je tvořen kluzným jádrem a dříkem, který slouží pro propojení s uzávěrem.

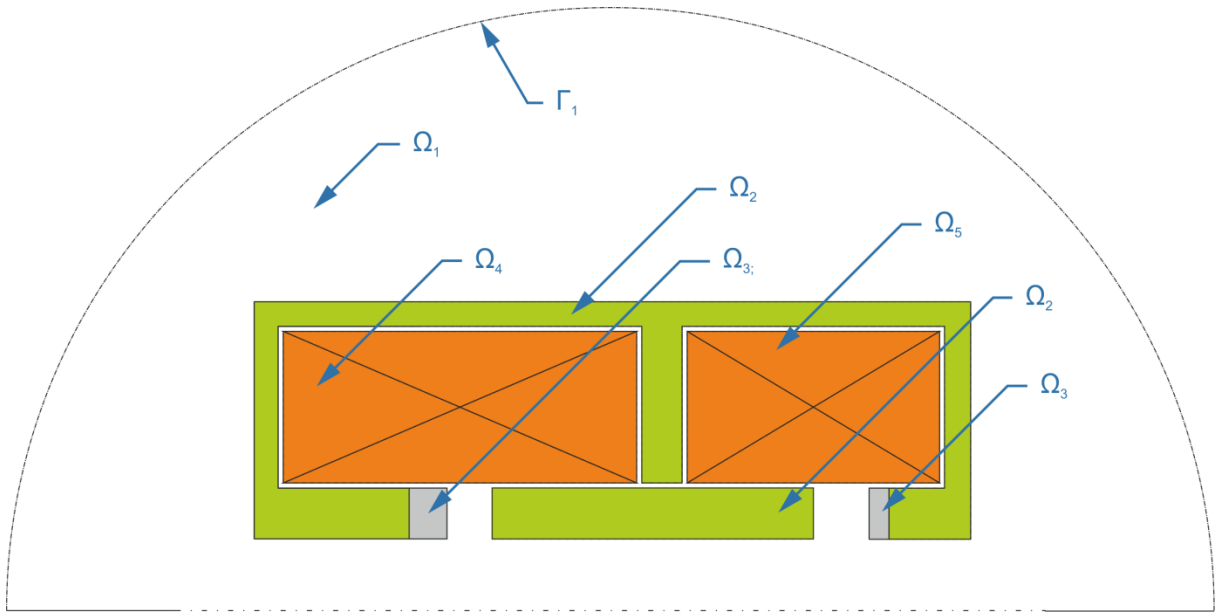


Obrázek 3.1 – Uspořádání akčního členu

Akční člen má dvě stabilní polohy, které jsou zajištěny permanentními magnety. Magnetický tok se uzavírá přes jádro a magnetický plášť. Pokud je požadováno spínání ventilu, je přivedeno napětí na požadovanou cívku (otevřací případně zavírací), magnetický tok cívky posílí tok permanentního magnetu a kluzné jádro se přesune do požadované polohy. Cívky jsou napájeny pouze po dobu, která je potřebná k posunu jádra. [9][10]

### 3.2 Základní studie akčního členu

Pro návrh magnetického obvodu byl použit program Agros2D. Magnetické pole bylo řešeno jako dvoudimenzionální magnetostatická úloha ve válcových souřadnicích  $r, \varphi, z$ . Pro výpočet matematického modelu bylo nutné formulovat definiční oblast modelu a okrajové podmínky. Definiční oblast je patrná z obrázku 3.2, v modelu nejsou zahrnuty nemagnetické části. Rovnice pro jednotlivé oblasti jsou formulovány v tabulce 3.1

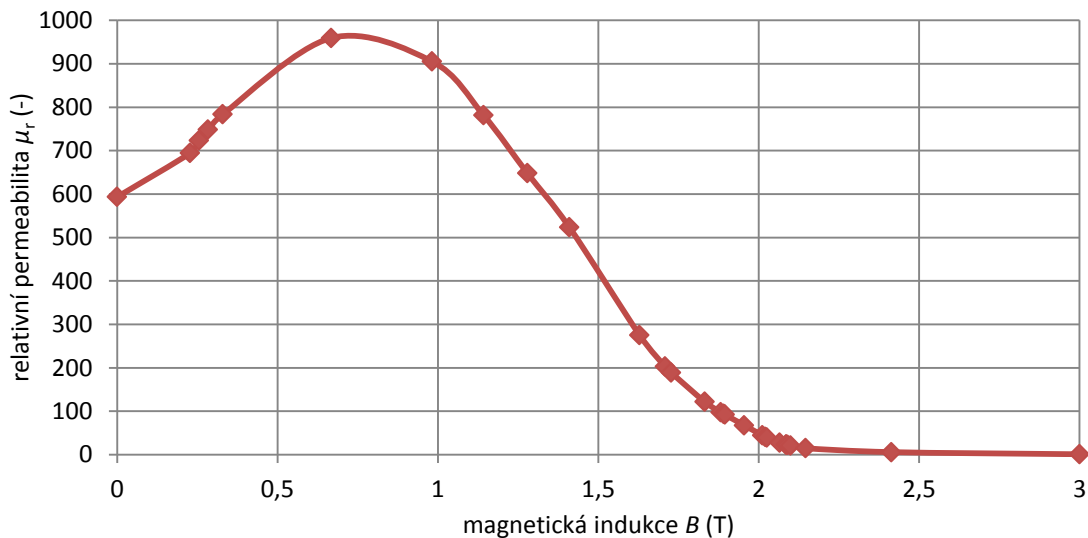


Obr. 3.2 – Definiční oblast modelu akčního členu

vzduch	$\Omega_1$	$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}$
železo	$\Omega_2$	$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_r(B) \cdot \mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}$
magnety	$\Omega_3$	$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot (\text{rot } \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{0}$
cívka pod napětím	$\Omega_4$	$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}$
cívka bez napětí	$\Omega_5$	$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot } \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}$
okrajová podmínka	$\Gamma_1$	$\mathbf{A} = \mathbf{0}$

Tabulka 3.1 – Popis definovaných oblastí

Na grafu 3.1 je definována nelineární závislost relativní permeability železa na velikosti magnetické indukce. Jedná se o charakteristiku běžně používané konstrukční oceli (nejedná se tak o konkrétně použitou ocel).



**Graf 3.1 – Závislost relativní permeability na magnetické indukci**

V průběhu návrhu, docházelo k úpravám rozměrů akčního členu a konstrukčním změnám. Byly stanoveny konečné hodnoty magnetické indukce permanentních magnetů a proudová hustota v použitých cívkách.

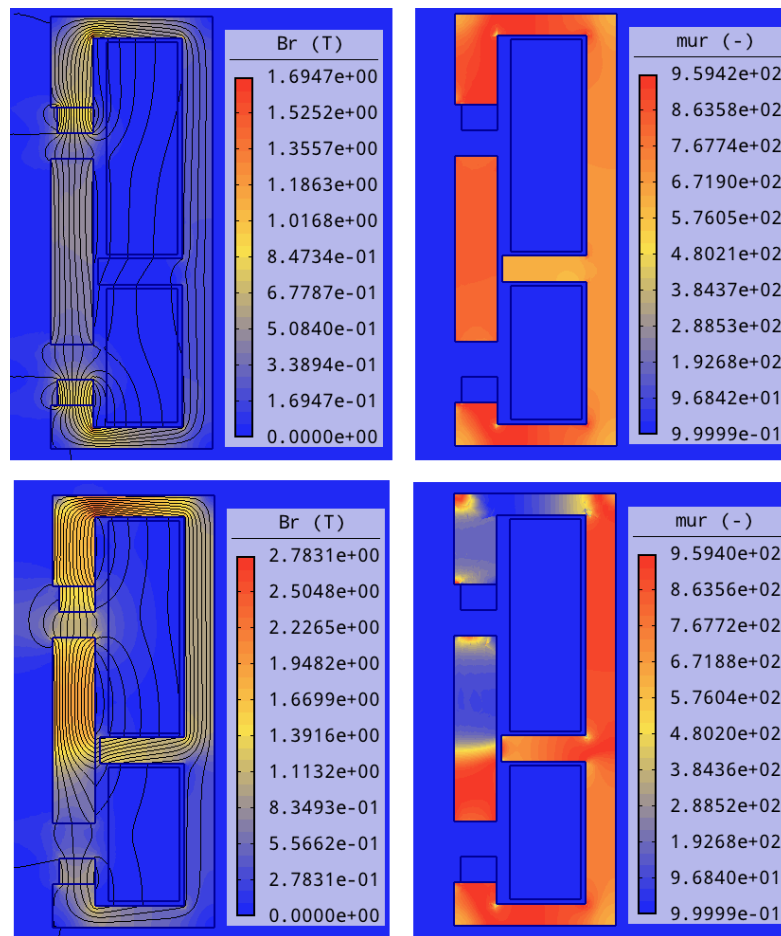
Jako permanentní magnety byly použity dva neodymové magnety (NdFeB) ve tvaru prstence o rozměrech 40x23x6 mm o udávané remanenci 1,18 až 1,28 T. V tabulce 3.2 jsou uvedeny hodnoty parametrů pro použité cívky (hodnoty se od udávaných v bakalářské práci liší, cívky byly znovu navinuty a upravila se i jejich velikost).  $S_{\text{cívky}}$  je průřez cívky (při zobrazení modelu ve válcových souřadnicích),  $N$  je počet závitů,  $R_{\text{cívky}}$  je elektrický odpor a  $U_{\text{cívky}}$  je potřebné napětí na cívce, aby bylo dosaženo požadovaných proudových parametrů. Počet závitů a odpor cívky jsou hodnoty, které udává výrobce cívek.

	$S_{\text{cívky}}$ (cm <sup>2</sup> )	$N$ (-)	$R_{\text{cívky}}$ ( $\Omega$ )	$U_{\text{cívky}}$ (V)
Otevírací cívka	8,085	2300	37,7	94,25
Zavírací cívka	5,115	1400	23	57,5

**Tabulka 3.2 – Parametry cívek**

Na obrázku 3.3 získaného z matematického modelu, je zobrazeno rozložení relativní permeability a magnetické indukce v jádře a magnetickém plášti akčního členu. Model, jak bylo uvedeno, je rotačně symetrický. Cívky jsou navrženy pro proud 2,5 A. Při dodržení této hodnoty a koeficientu plnění cívky 0,9 je dále počítáno s proudovou hustotou  $1,02 \times 10^7$  A/m<sup>2</sup>. První dva obrázky jsou ve stavu, kdy je ventil otevřen a působí tak pouze pole permanentních magnetů (v modelu nejsou uvažovány nemagnetické části a proto pohyblivé jádro nedoléhá na magnet). Druhá dvojice představuje stav, kdy došlo k otevření ventilu a stále působí otevírací cívka společně s permanentními magnety. Obrázky na levé straně znázorňují

rozložení magnetické indukce a siločáry. Obrázky na pravé straně zobrazují hodnotu relativní permeability, pro stejnou situaci. [9][10]

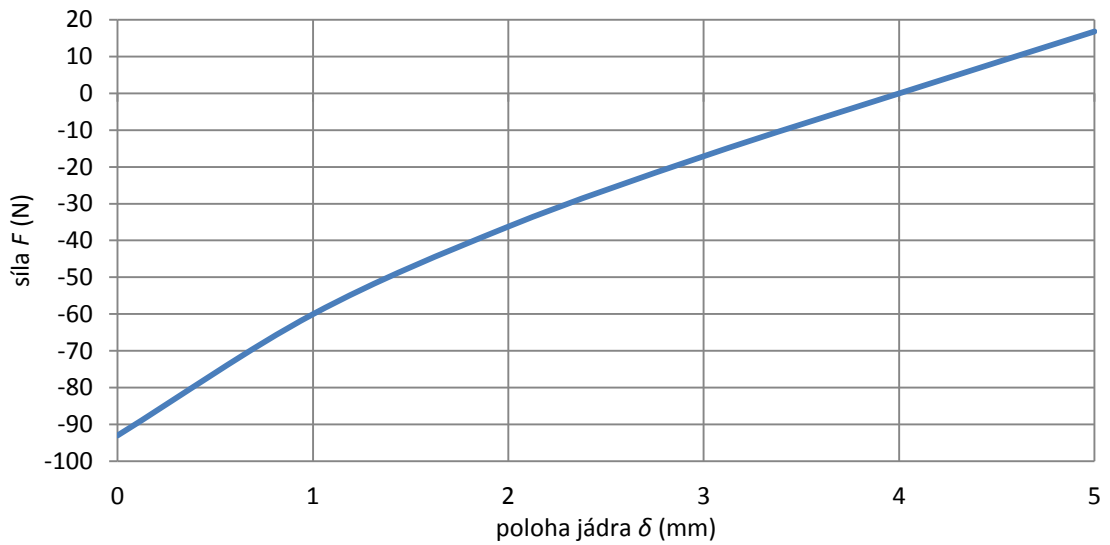


**Obrázek 3.3 – Rozložení  $B_r$  a  $\mu_r$  v magnetickém obvodu**

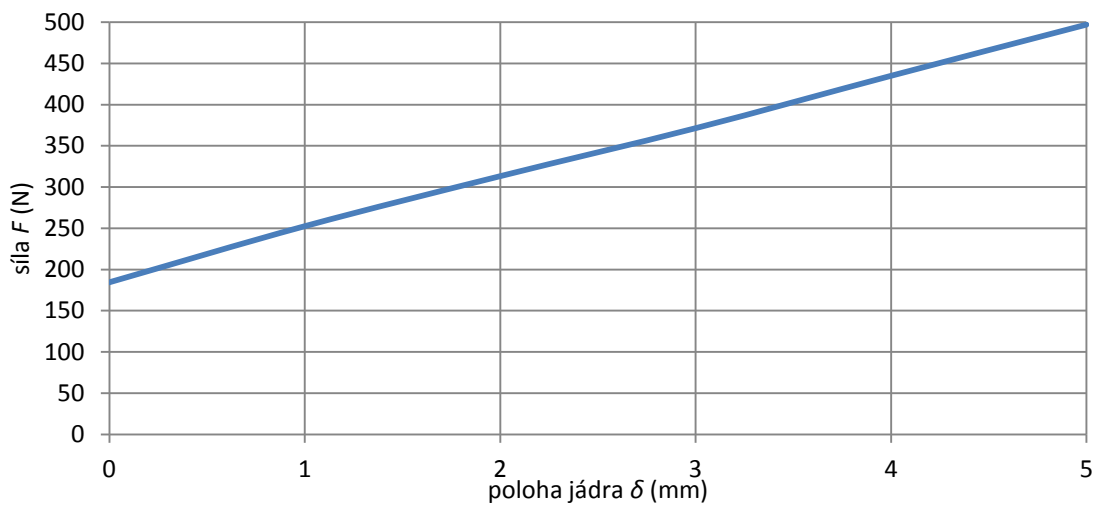
Na obrázcích je patrné, že při působení permanentních magnetů (stabilní polohy) se hodnota magnetické indukce pohybuje v rozmezí 0,1 až 1 T a relativní permeabilita železa z hodnoty okolo 950 klesá vlivem magnetické indukce lokálně až k hodnotě 600. Druhé dva obrázky, kdy je magnetické pole ovlivněno aktivní otevírací cívkou, dosahují vyšší magnetické indukce a to až 2,2 T a relativní permeabilita železa klesá lokálně k hodnotě 30.

Parametrem, který je u akčního členu jedním z hlavních, když zanedbám jeho rozměry, je síla, kterou je schopné jádro vyvinout. Je potřeba, aby síla, kterou je jádro drženo ve stabilních polohách (ventil otevřen a uzavřen), byla co největší, aby nedocházelo k samovolné změně polohy. Tato síla je daná již výrobou ventilu a typem použitých permanentních magnetů. Navazuje na to síla, která je potřebná pro přepnutí ventilu z jedné stabilní polohy do druhé. Velikost této síly je ovlivněna působením magnetického pole cívek, ale i magnetů. Velikost těchto sil je na grafech 3.2 až 3.4. Hodnota polohy jádra v 0 mm je stav, kdy je ventil uzavřen. Poloha 5 mm reprezentuje otevřený ventil. Pokud je velikost síly

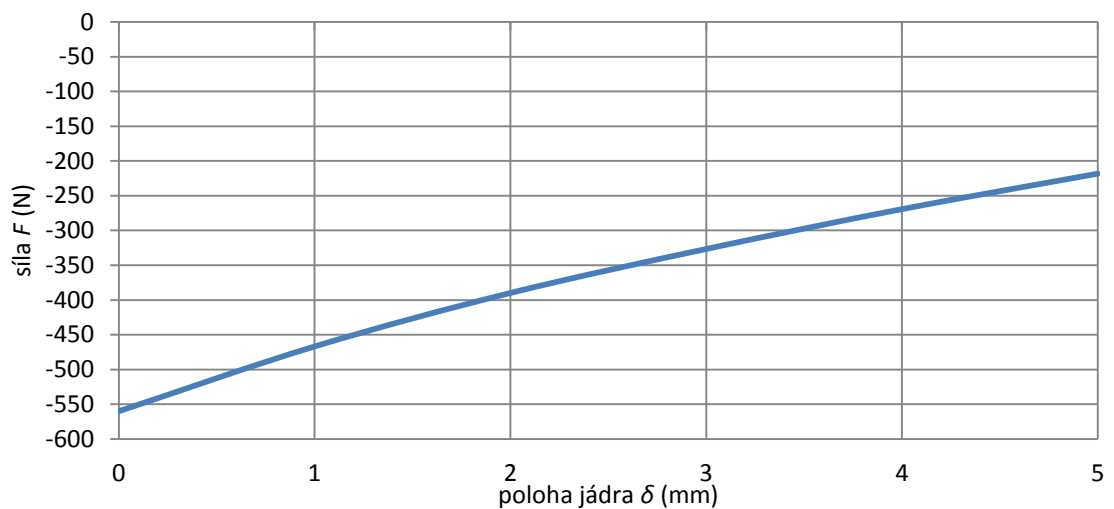
kladná, síla působí ve směru otevírání ventilu (ve směru proudění kapaliny), a záporná působí opačným směrem. [9][10]



Graf 3.2 – Síla na jádro vyvinuta magnety



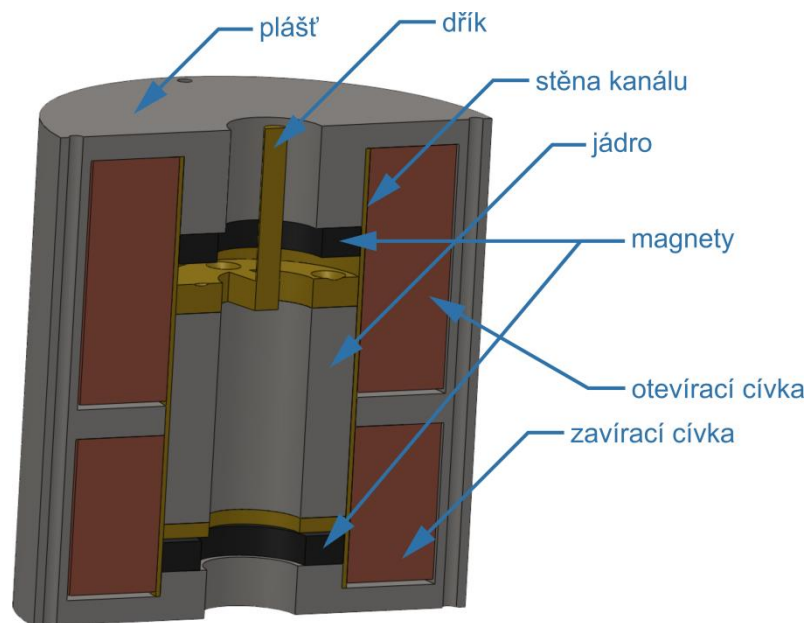
Graf 3.3 – Síla na jádro vyvinuta otevírací cívkou



Graf 3.4 – Síla na jádro vyvinuta zavírací cívkou

### 3.3 Ověření základní funkčnosti

Předlohy z matematického modelu byly překresleny do programu SolidWorks, kde z nich byl vytvořen 3D model. Doplnily se nemagnetické součásti obvodu, které v matematickém modelu nebyly uvažovány, ale bez kterých správná funkce není možná (dorazy mezi jádrem a magnety, dřík, stěna kanálu pro správný pohyb jádra). Dále byly provedeny konstrukční úpravy. Tělo ventilu muselo být rozděleno na několik částí, aby jej bylo možné vyrobit a následně sestavit s vloženým pohyblivým jádrem. Průměr takto vzniklého akčního členu je 95 mm a výška 100 mm.

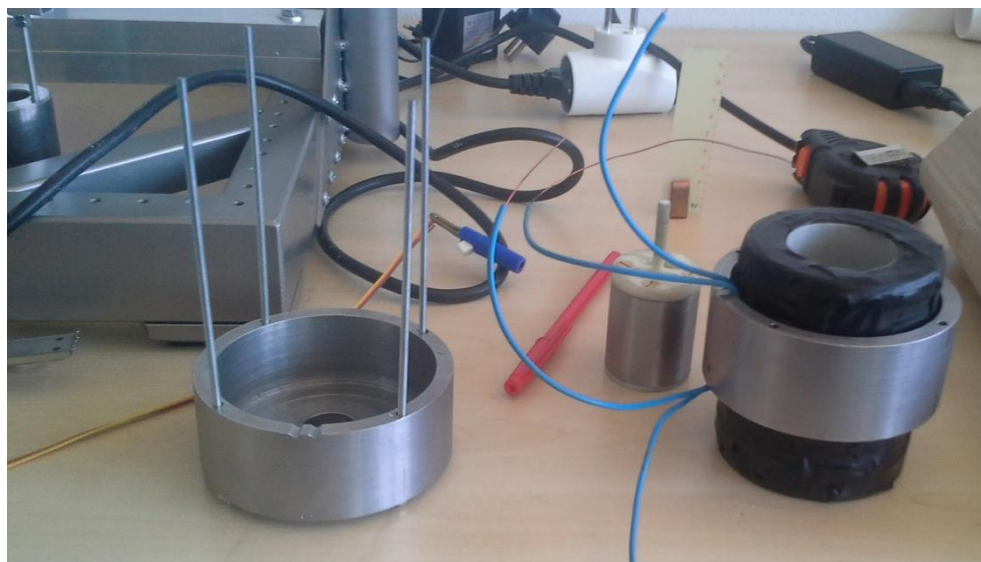


**Obrázek 3.4 – Výsledný model akčního členu**

Ventil se dle technické dokumentace nechal vyrobit v prototypové dílně ZČU. Byly zakoupeny permanentní magnety a navinuty cívky. Vše bylo zkompleťováno a následovaly první testy. Konečná podoba modelu je zobrazena na obrázku 3.4.

První testy pouze ověřily funkčnost akčního členu. Cívky byly připojeny na napěťový zdroj a jejich spínáním bylo jádro přesouváno mezi stabilními polohami. Potvrdilo se tak, že model byl správný a akční člen plní svoji funkci. Vzhled a uspořádání akčního členu v této fázi je patrný z obrázků 3.5 a 3.6. [9][10]





Obrázek 3.5 – Konstrukční uspořádání rozloženého akčního členu [9]



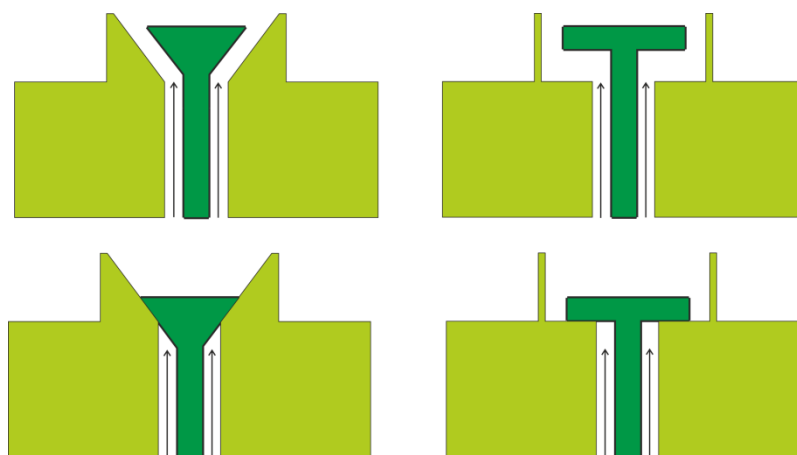
Obrázek 3.6 – Sestavený akční člen [9]

## 4. Konstrukce a stavba prototypu ventilu

Tato kapitola popisuje návrh součástí, o které bylo nezbytné akční člen doplnit, aby plnil funkci elektromagnetického ventilu. Bylo nutné navrhnout sedlo ventilu, způsob jeho uchycení na potrubní systém a utěsnění všech důležitých částí. Pomocí matematického modelu dále simulovat proudění kapaliny uvnitř ventilu a stanovit indukčnosti cívek a dynamiku pohybu jádra. Poslední a nedílnou součástí celého prototypu je jeho napájení a řízení pomocí mikrokontroléru a spínacího obvodu.

### 4.1 Sedlo ventilu

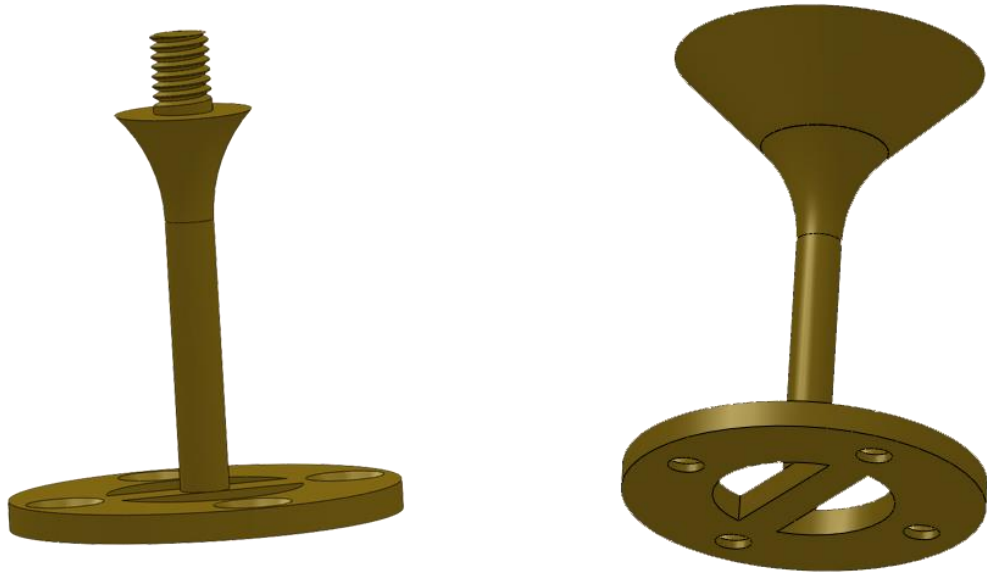
První důležitou úpravou bylo konstrukční upravení sedla ventilu a dřívku, který jej spojuje s pohyblivým jádrem. Bylo potřeba rozhodnout, jaký typ sedla bude použit, zda ploché nebo konické sedlo. Tyto dva typy jsou zobrazeny na obr. 4.1, kde vlevo jsou konická sedla a spodní nákresy zobrazují uzavřený stav. Pro své výhodnější vlastnosti, jako je menší odpor protékající kapaliny, bylo použito konického sedla.



**Obr. 4.1 – Běžně používané typy sedel u ventilů (šipky zobrazují směr toku kapaliny)**

Původní silonový dřívík bylo potřeba nahradit materiálem, který nebude magneticky vodivý, aby neovlivňoval navržený magnetický obvod, ale bude dostatečně pevný, aby dokázal přenést sílu z jádra na sedlo. Za vhodný materiál byla vybrána mosaz, která splňuje obě podmínky.

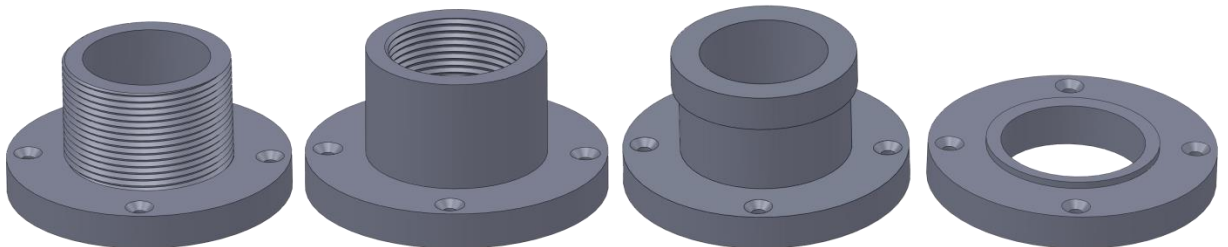
Na obr. 4.2 je zobrazen model dřívku a sedla. Dřívík je přichycen k jádru napevno, pomocí mosazných šroubů. Vrchol dřívku a vnitřní část hlavy jsou opatřeny závitem a sedlo je tak odnímatelné. Je to nezbytné pro kompletaci ventilu. Při zachování možnosti ventil rozebrat, není jiné technické řešení možné. Další výhodou tkví v tom, že je možné při testování nebo měření charakteristik ventilu nechat vyrobit jiné sedlo, které může být optimalizované (aby co nejméně ovlivňovalo tok kapaliny) a snadno původní sedlo nahradit.



Obr. 4.2 – Model dříku a sedla ventilu

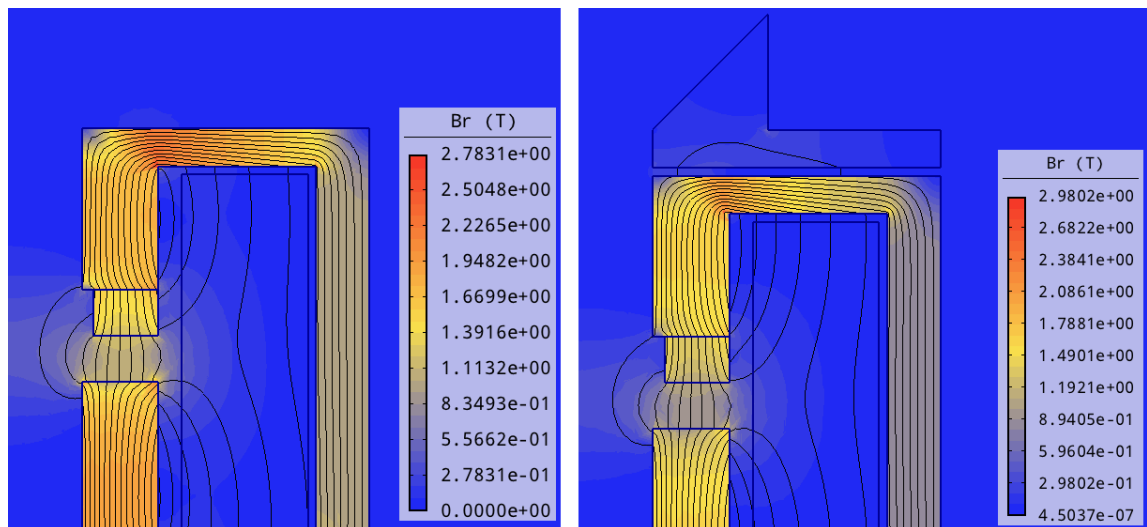
#### 4.2 Uchycení ventilu

Důležitým prvkem ventilu je způsob uchycení do potrubního systému. Pro svoji jednoduchou montáž a variabilitu různých koncovek byla vybrána přírubová montáž. Běžně používané typy přírub jsou popsány na obrázku 4.3, mezi další typy patří zaslepovací či příruba s krkem.



Obrázek 4.3 – Typy přírub (z levé strany: závitová příruba vnější a vnitřní, točivá a plochá příruba)

Osazení ventilu přírubami, které rozšíří tělo magnetického obvodu, mohlo změnit rozložení magnetické indukce v magnetickém obvodu, proto byla příruba doplněna do modelu magnetického pole. Jak je patrné z obr. 4.4, příruby ovlivní magnetické pole jen velmi málo. Dojde ke snížení lokální magnetické indukce dle modelu z hodnoty 2,783 T na 2,715 T a část magnetického indukčního toku se uzavírá přírubou.

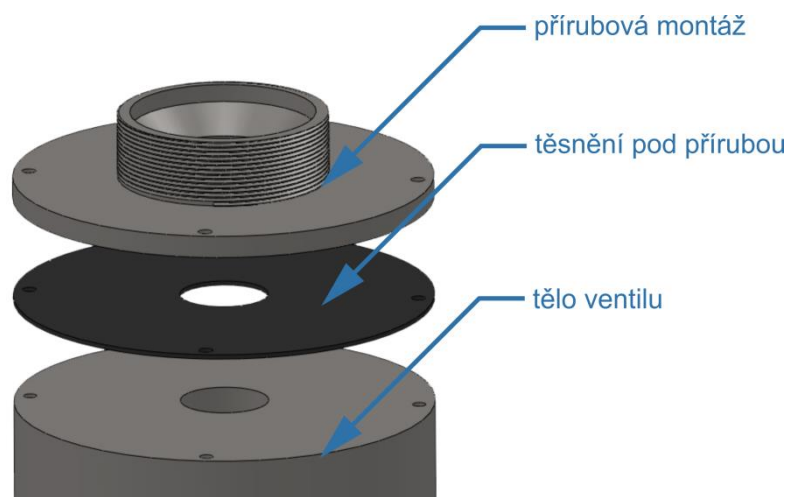


Obrázek 4.4 – Rozložení magnetické indukce v přírubě

### 4.3 Utěsnění

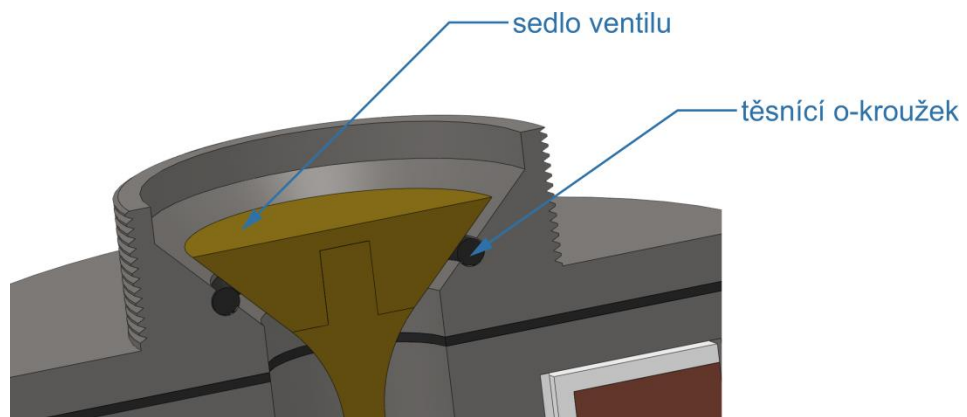
Místa, která jsou pro ventil důležitá a je potřeba provést jejich důkladné těsnění, je celkem tři. První je zamezení vniku kapaliny kolem kluzného jádra do prostoru cívek, další utěsnění mezery mezi tělem ventilu a přírubami a poslední je těsnění pod sedlem ventilu, aby při uzavření kapalina neprosakovala skrze ventil.

Konstrukčně nejjednodušší je provedení těsnění pod přírubou. Způsob provedení těsnění je na obrázku 4.5. Těsnění je vyrobeno z měkké gumy o tloušťce 1 mm. Je zde vyražen otvor, aby mohla protékat kapalina a další čtyři otvory, kterými prochází závitové tyče určené ke spojení jednotlivých dílů magnetického obvodu. K utěsnění pomáhá také tlak, který po dotažení závitových tyčí vyvíjí tělo ventilu na přírubu.



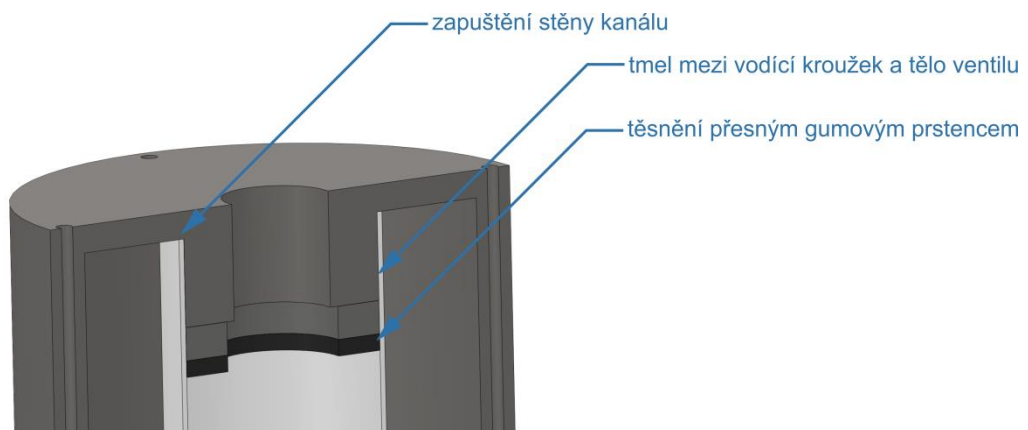
Obrázek 4.5 – Uložení těsní pod přírubou

Druhé řešené místo bylo utěsnění sedla ventilu. Samotné sedlo je tvořeno mosaznou kruhovou kuželkou a dosedová plocha je železný protikus kuželky. Bylo potřeba vybrat takové těsnění, které půjde na jednu z kuželových ploch umístit. Jako ideální řešení připadalo použití gumového o-kroužku, který se částečně zapustí do příruby. Použit je o-kroužek o rozměru 25x3 mm (vnitřní průměr x síla kroužku), který byl umístěn dle obrázku 4.6. Zapuštěn byl z důvodu lepšího uchycení, aby kroužek co nejméně zasahoval do dráhy kapaliny. V praxi by bylo výhodnější větší zapuštění, ale u prototypu by mohl být problém s jeho usazením.



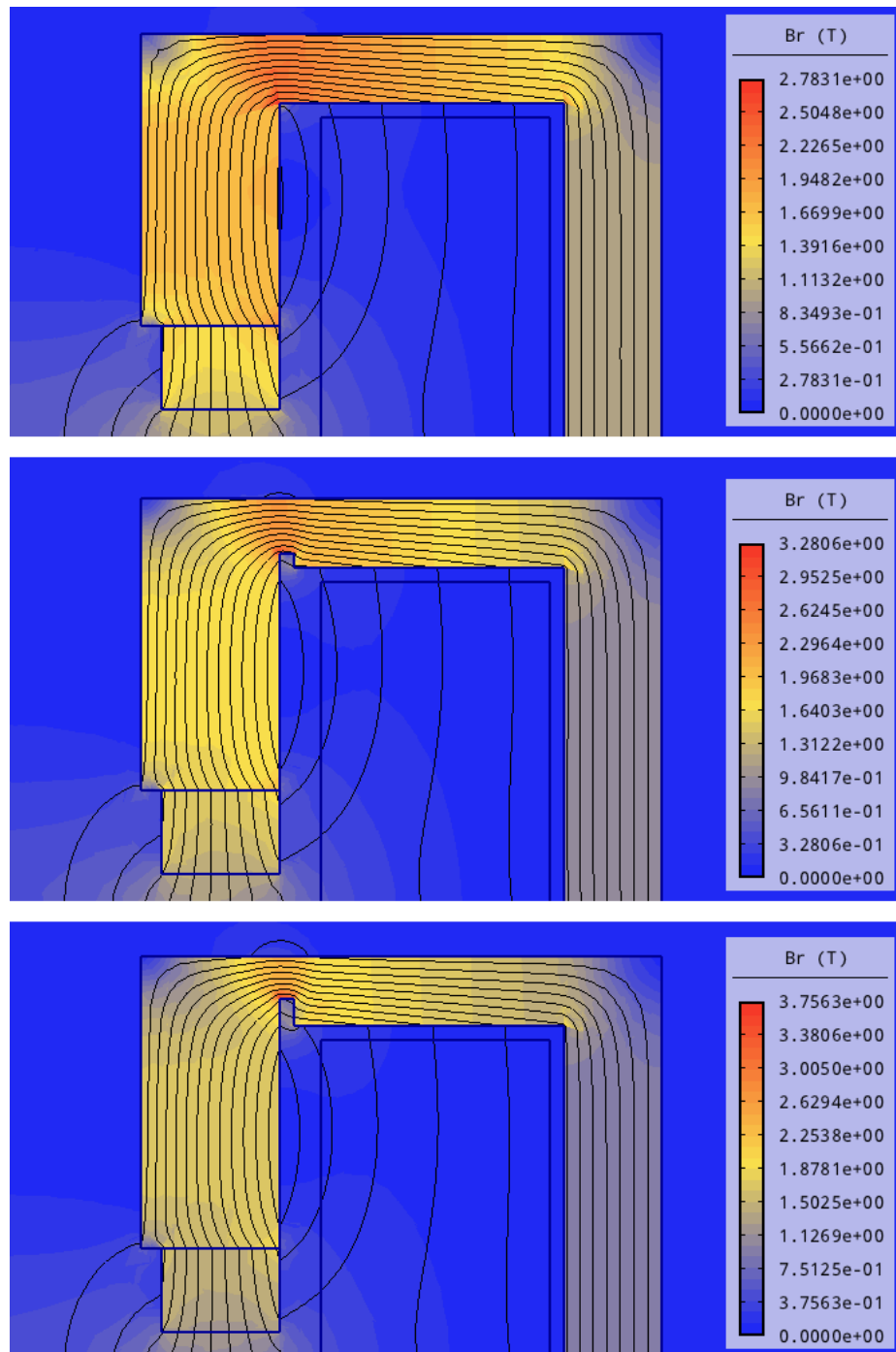
**Obrázek 4.6 – Umístění o-kroužku**

Posledním místem ventilu, kam by se v žádném případě neměla dostat kapalina, jsou prostory, kde jsou uloženy cívky. Místo, kterého se úprava týká, je vidět na obrázku 4.7. K utěsnění dráhy kapaliny se jako možná řešení jevily tři způsoby. První možností je prodloužení stěny kanálu jádra tak, aby zasahoval až do vrchní a dolní části magnetického obvodu, a k utěsnění tak došlo pouze na malé ploše. Druhou volbou bylo vytvoření velice přesného gumového dorazu pro jádro, aby plnilo jak funkci dorazu, tak těsnění zároveň. Poslední možností je nanesení tmelu mezi stěnu kanálu a výstupek těla ventilu, na kterém je umístěn magnet. Stejně výsledné řešení bude použito na obou koncích stěny kanálu ventilu.



**Obrázek 4.7 – Těsnění prostoru cívek**

První řešení, tj. prodloužení vodícího válce, je konstrukčně náročnější, bylo by potřeba nechat vyrobít novou a delší silonovou stěnu kanálu a vytvořit zahloubení do těla ventilu. V případě použití gumového těsnění do zahloubení by byla zachována možnost snadného rozebrání ventilu. Využitím matematického modelu bylo zjištěno, že zúžení materiálu je poměrně velké a dochází k nárůstu magnetické indukce v místě oslabení železného magnetického obvodu. Na obr. 4.8 jsou k porovnání výsledky z matematického modelu. Po vyhodnocení vlivů úpravy tento způsob nebyl využit.



Obrázek 4.8 – Vliv zúžení magnetického obvodu

Druhým způsobem, kdy by doraz plnil i funkci těsnění, je jednoduché řešení. Nechat si vyrobit prstenec z pevné gumy v přesně daném rozměru. Výroba takto malé série velmi přesných těsnění byla u poptávaných společností problematická. S tímto řešením by muselo být počítáno již při konstrukci ventilu, aby tento rozměr odpovídal běžně vyráběnému těsnění. Nebo využít měkkou gumu, která lépe vyplní prostor uvnitř stěny kanálu. Toto řešení nevyhovuje z důvodu deformací gumy při přepínacích rázech ventilu. Změnila by se dráha posunu jádra a také při přepínání by mohlo docházet k nežádoucímu pružení.

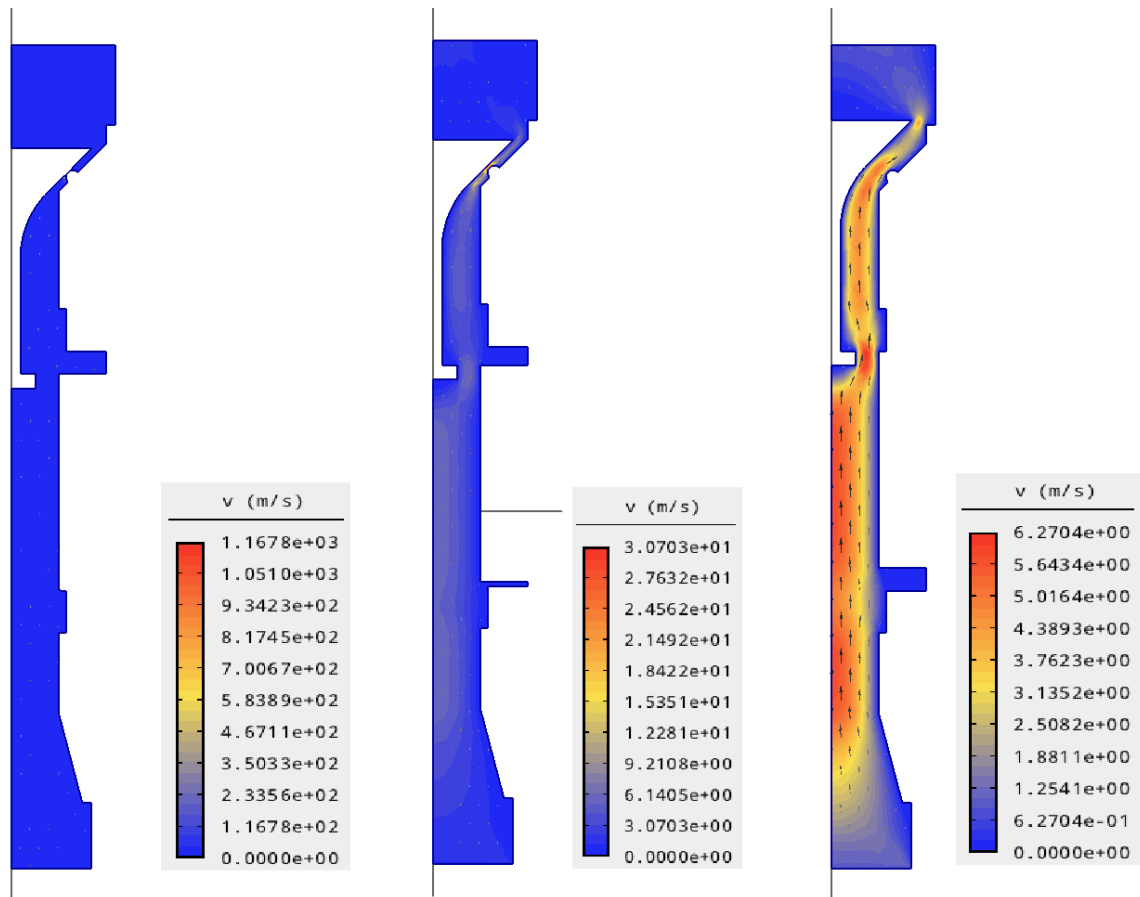
Bylo proto vybráno poslední z navrhovaných řešení, kdy mezi stykovou plochu stěny kanálu a částí magnetického obvodu, na kterém je umístěn magnet, bude nanesen tmel. Bylo jej použito minimální množství, aby byla zajištěna těsnící schopnost, ale v případě potřeby by bylo možné ventil rozložit.

#### 4.4 Simulace proudění kapaliny

V programu Agros2D byl dále vytvořen rotačně symetrický model finálního uspořádání kanálu ventilu. V simulaci je uvažována voda, ve formě ideální nestlačitelné kapaliny. Byly stanoveny čtyři okrajové podmínky:

- rychlost kapaliny na spodní hraně modelu (vstup kapaliny do ventilu), kde byla vstupní rychlost pro modelovou situaci stanovena na 1 m/s ve středu;
- odtok kapaliny na horní hraně modelu (výstup kapaliny z modelu);
- rychlost kapaliny na stěnách (všechna místa, kde dochází kontaktu kapaliny s jiným materiálem) je nulová;
- osa symetrie modelu.

Na obrázku 4.9 jsou zobrazeny tři modelové situace: (zleva) uzavřený ventil, ventil se začíná otevírat a plně otevřený ventil. Je patrné, jak se mění rychlost proudění v závislosti na překážkách, které jsou jí do dráhy umístěny a změně vnitřního průřezu ventilu. Drobné dutiny, které vznikají při přepínání, nijak výrazně neovlivní proudící kapalinu.



Obrázek 4.9 – Rychlost proudění kapaliny uvnitř ventilu

#### 4.5 Stanovení indukčnosti cívek

Pro zjištění indukčnosti cívek, byla využita energetická definice indukčnosti. Hodnota celkové energie  $W_m$  byla stanovena z řešeného modelu magnetického pole a ze vzorce pro výpočet magnetické energie cívky byla určena její indukčnost

$$L = \frac{2W_m}{I^2}, \quad (4.1)$$

kde  $I$  je proud procházející cívku. Takto byly stanoveny hodnoty indukčnosti pro otevírací cívku  $L_o$  i zavírací  $L_z$ . Je nutné podotknout, že výpočet je pouze informativní. Pro přesné určení indukčnosti daných cívek, by bylo potřeba zohlednit přítomnost permanentních magnetů, které indukčnost ovlivňují.

Ze zjištěných indukčností byla dále vypočtena časová konstanta  $\tau$ , která je jedním z velmi důležitých dynamických parametrů akčního členu. Pro danou polohu cívky lze využít vzorce

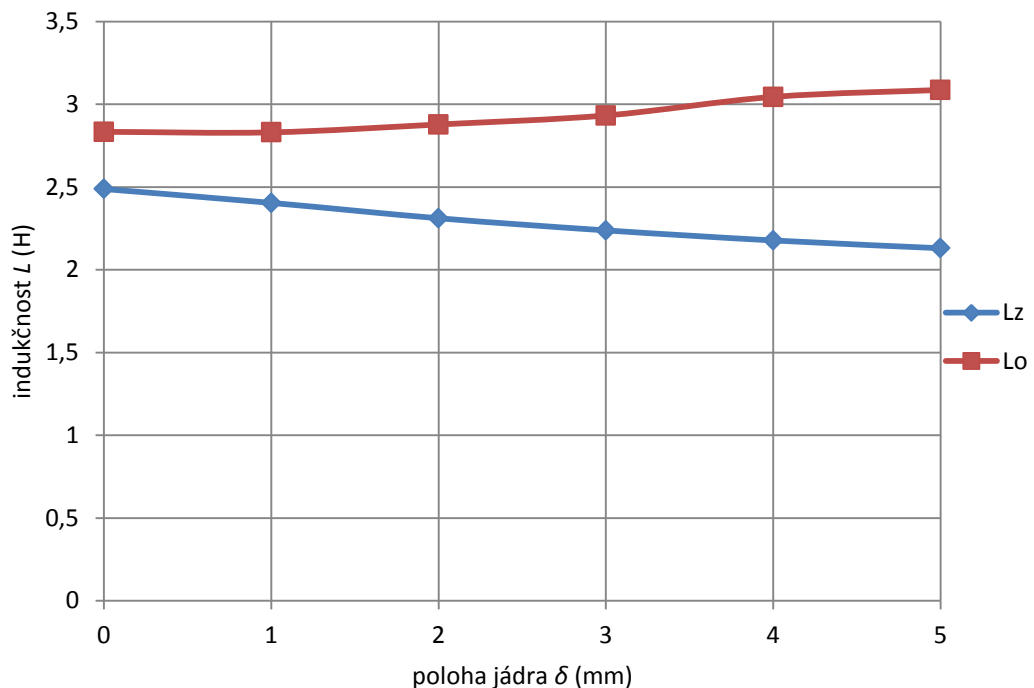
$$\tau = \frac{L}{R}, \quad (4.2)$$

kde  $R$  je odpor cívek. Velikost odporu jednotlivých cívek je přitom  $R_z = 23 \Omega$  (zavírací cívka) a  $R_o = 37,7 \Omega$  (otevírací cívka). Výsledky jsou uvedeny v tabulce 4.1 a grafu 4.1.



$\delta$ (mm)	0	1	2	3	4	5
$W_{mz}$ (J)	7,78	7,51	7,22	6,99	6,80	6,66
$W_{mo}$ (J)	8,86	8,85	8,99	9,16	9,52	9,65
$L_z$ (H)	2,49	2,40	2,31	2,24	2,18	2,13
$L_o$ (H)	2,83	2,83	2,88	2,93	3,04	3,09
$\tau_z$ (ms)	108,17	104,53	100,49	97,31	94,66	92,62
$\tau_o$ (ms)	75,16	75,08	76,34	77,78	80,76	81,87

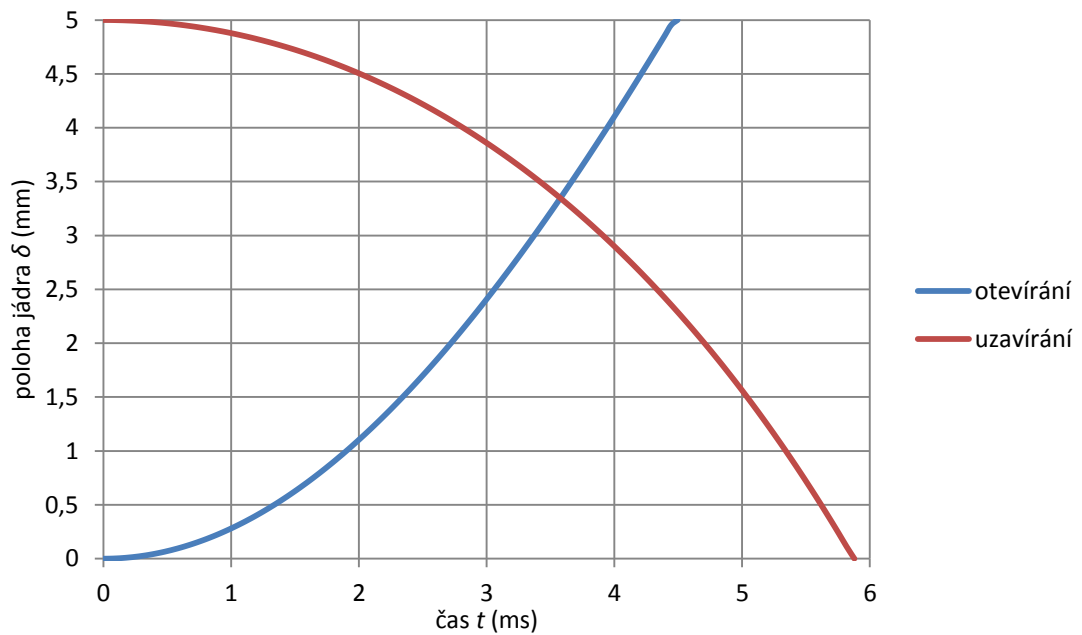
Tabulka 4.1 – Parametry cívek v závislosti na poloze jádra



Graf 4.1 – Závislost indukčnosti cívek na poloze jádra

#### 4.6 Dynamika pohybu jádra

Dynamika pohybu jádra akčního členu byla řešena na základě modelu statických charakteristik uvedených ve třetí kapitole. Z výsledků na grafu 4.2 je patrné, že při zanedbání přechodového děje v elektrickém obvodu (konstantní budící proud cívkou) je pohyblivé jádro přesunuto z polohy uzavřeno do polohy otevřeno za dobu 4,5 ms a proces uzavření trvá 5,8 ms. Lze tedy konstatovat, že dynamika celého ventilu bude závislá především na časové konstantě přechodového jevu vzniklého při spínání jednotlivých cívek.



Graf 4.2 – Průběh pohybu jádra

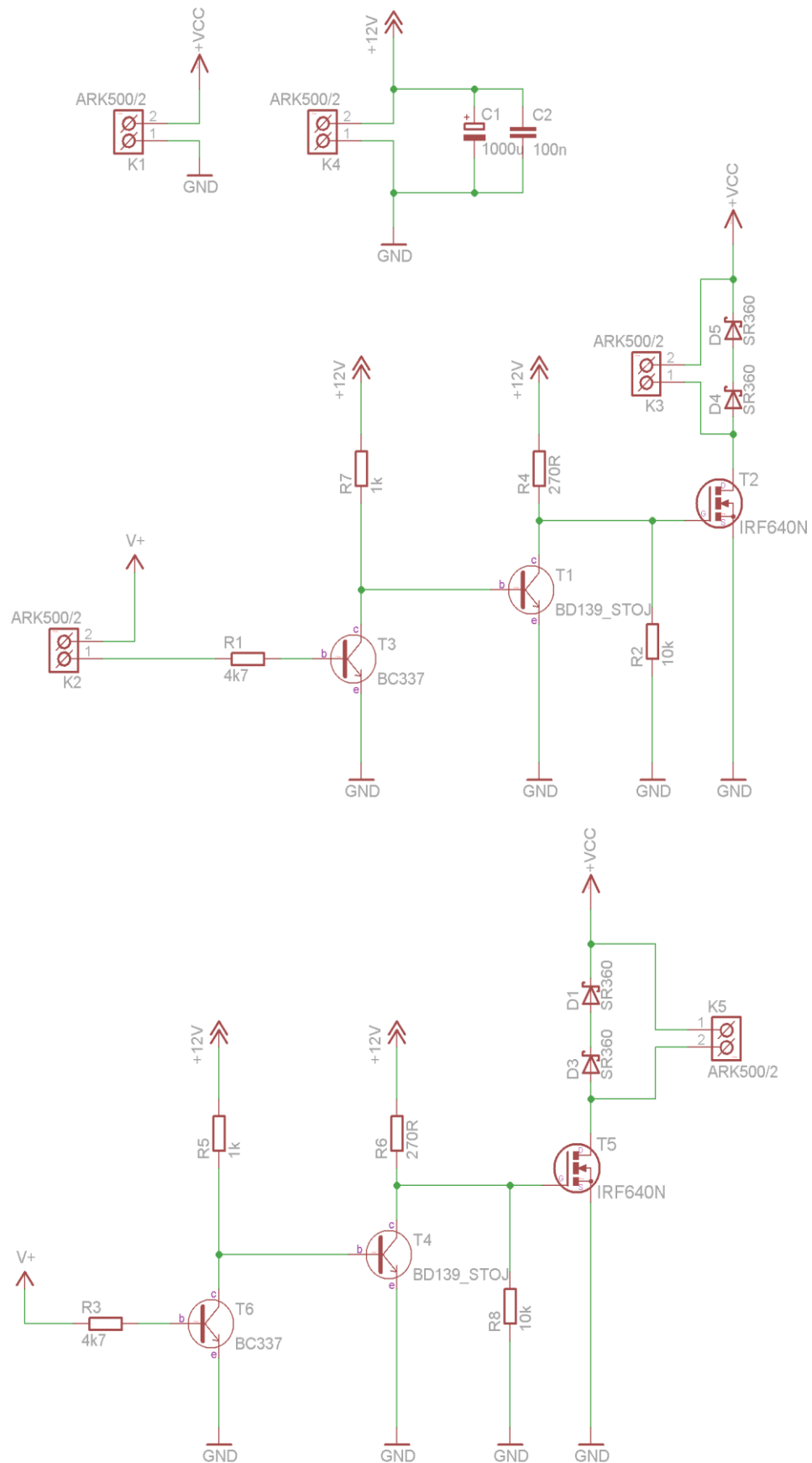
#### 4.7 Spínací obvod

Prototyp ventilu umožňuje po připojení na napájecí napětí snadné ovládání pomocí řídicích signálů. K tomu slouží spínací obvod, který zajišťuje připojení cívek na zdroj napětí.

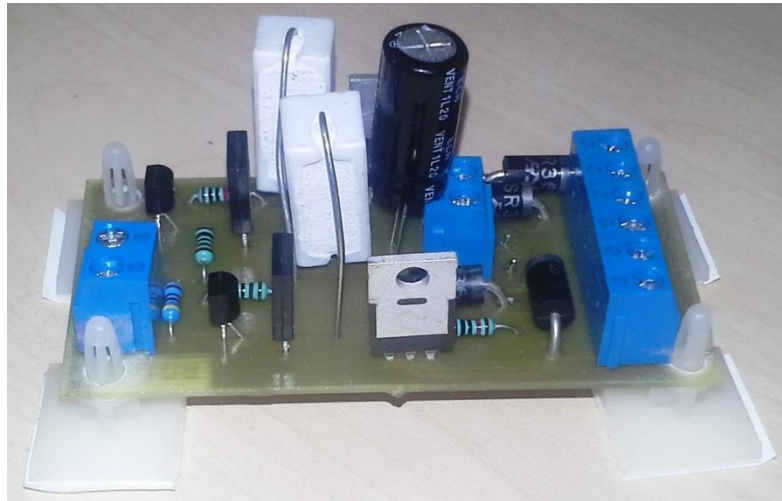
Pro spínací obvod (spínač) byla navržena deska plošných spojů a jako hlavní spínací prvky použity MOSFET tranzistory, které budou zajišťovat napájení cívek. Na obrázku 4.10 je schéma zapojení spínacího obvodu, schéma pro výrobu desky, přesné umístění součástek a jejich popis je dále uveden v příloze A.

Na svorkovnici K2 jsou přivedeny ovládací signály, na K4 je připojeno pomocné napětí 12 V, na K1 je přivedeno hlavní napájecí napětí, na K3 a K5 jsou připojeny cívky.

Při pokynu k sepnutí příslušné cívky se na kontakt svorkovnice K2 přivede ovládací impulz. Pomocí tohoto napětí NPN tranzistor BC337 sepne vyšší pomocné napětí. Tento proces se opakuje ještě jednou na NPN tranzistor BD139. Takto navýšené spínací napětí je přivedeno na N-FET tranzistor IRF640N (opatřený chladičem), kde již dochází ke spínání hlavního napájecího napětí, které je přivedeno na cívku. Při spínání cívek by docházelo k nežádoucímu přepětí v obvodu, a proto je mezi vývody připojena dvojice sériově řazených Schottkyho diod SR360, které případné napěťové špičky odříznou. Jedná se o obecný spínací obvod, který může najít uplatnění i v jiných systémech. V případě použití ručního ovládání, lze spínat při max. napětí 100 V a proudu 2,5 A pomocí min. 1,5 V řídicího napětí.



Obrázek 4.10 – Schéma zapojení spínacího obvodu



Obrázek 4.11 – Výsledný spínací obvod

#### 4.8 Záložní napájení

Aby mohl být ventil používán i v aplikacích, které požadují reakci ventilu v případě výpadku napájení (bezpečnostní rychločinné ventily), je potřeba přidat záložní zdroj napájení. Mezi dva nejčastěji používané záložní zdroje patří akumulátor a kondenzátor.

Použití baterie je nevhodné. Baterie, která bude schopna po určitou dobu napájet ventil napětím 100 V, bude velká, těžká a její cena bude vysoká. Nejde o to zajistit trvalý provoz v beznapěťovém stavu (v tomto případě by baterie byla vhodná), ale pouze potřebnou energii k bezpečnému uzavření ventilu.

Proto byl zvolen kondenzátor o jmenovitém napětí 100 V a kapacitě 10 mF, který je paralelně zařazen ke zdroji hlavního napájecího napětí. Požadovaný proud na výstupu je 2,5 A. Pomocí jednoduchého orientačního výpočtu dle vzorce 4.3, byla stanovena doba, po kterou by daný kondenzátor měl být schopný daný proud dodávat

$$C \cdot U = t \cdot I \rightarrow t = \frac{C \cdot U}{I} = \frac{0,01 \cdot 100}{2,5} = 0,4 \text{ s.} \quad (4.3)$$

Tento čas je vyšší, než očekávaný čas potřebný k uzavření ventilu a tento kondenzátor tedy může sloužit jako záložní zdroj napájení. To by mělo zajistit výše zmíněné uzavření ventilu v případě, že by byl signalizován výpadek hlavního napájecího napětí.

#### 4.9 Řízení ventilu

Řízení elektromagnetických ventilů bývá často složité a komplikované. Pokud nebudeme uvažovat ruční řízení, kdy se ventil na jeden pokyn otevře a na druhý uzavře, je velké množství informací, které musí řízení zpracovat a vyhodnotit. Pokud je řízení správně navrženo, může dojít k vylepšení vlastností nebo dokonce k odstranění problémů, které při

spínání ventilu mohou vznikat. Mezi největší problémy u elektromagnetických ventilů patří rázy, které způsobuje velká rychlost sedla a pohyblivého jádra. Tyto rázy způsobují prudké změny tlaku v celém systému. Proto se často navrhuje řízení, kdy je cívka na plné napětí připojena v počátku přepínání a v jeho průběhu je napětí výrazně omezeno. Dále je nutné mít zpětnou kontrolu toho, v jaké pozici je sedlo ventilu, tedy zda došlo k požadované akci (otevření, uzavření), nebo zda ventil skončil v nějaké nepřírozané poloze (nečistota u těsnění, zkorodování dlouhou dobu nepožívaného ventilu, ztráta plasticity těsnění apod.).

#### 4.9.1 Obecný model řízení ventilu

V této kapitole je ventil představen jako „black box“, kdy nebude řešeno jeho přímé řízení. Jedná se o představení variant, na které lze řízený elektromagnetický ventil použít.

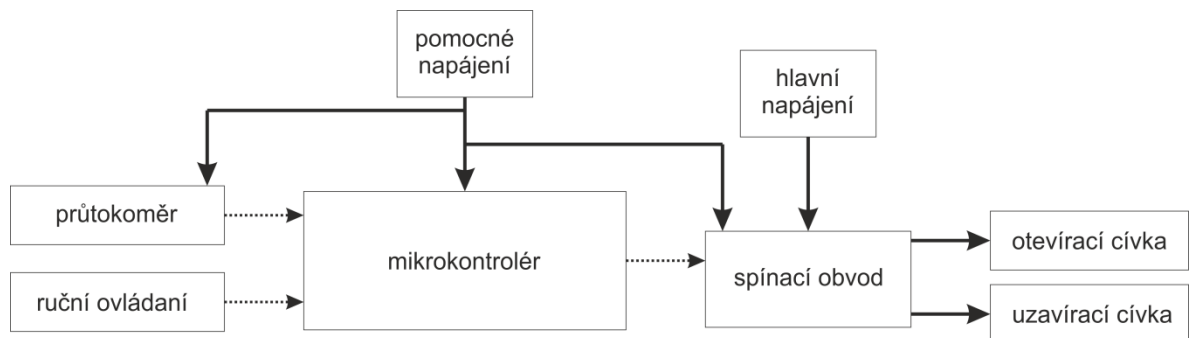
První možností je využití dávkovače požadovaného množství kapaliny. Tento princip najde své uplatnění například v potravinářském průmyslu při plnění lahví. V tomto případě je potřeba odměřit dané množství kapaliny, kterým se lahve plní. Potřebujeme tedy řízení, které otevře ventil a zároveň vyhodnocuje data z průtokoměru (řízení v uzavřené smyčce). Pokud celkový průtok odpovídá již požadovanému množství kapaliny, ventil se uzavře. Na podobném principu funguje i zmíněné automatické zavlažování. Ventil je v tomto případě řízen podle doby sepnutí (řízení v otevřené smyčce).

Další aplikací může být udržování požadované hladiny v nádobě. Kdy hladina je udržována v mezích mezi minimální a maximální stanovenou výškou. Řízený ventil je umístěn na vstupu do nádoby. Pokyn k otevření je dán v okamžiku, kdy hladina dosáhne svého minima a je potřeba dopustit vodu. Když hladina naopak dosáhne maxima, ventil se uzavře. Zde je více možností, jak snímat hladinu v nádrži. Můžeme použít plovák s mechanickým spínačem nebo kalorimetrické hlavice, které řeší rozdílnou tepelnou vodivost vzduchu a vody. Případně ultrazvukové spínače, které porovnávají rychlost šíření zvuku ve vzduchu a vodě. Řídící jednotka tak na základě informací otevírá a zavírá ventil.

Aplikací, kde by šel elektromagneticky řízený ventil využít, je mnoho. Posledním uvedeným je příklad, kdy ventil po dlouhý časový úsek zůstává v jedné z poloh otevřeno, nebo uzavřeno (např. pojistný ventil). V tento okamžik je využívána výhoda bistabilního ventilu, který v krajních polohách není závislý na napájecím napětí. Pouze čeká na signál, který zajistí jeho přepnutí. Není tak zbytečně spotřebována elektrická energie.

#### 4.9.2 Řízení prototypu ventilu

Ovládání prototypu bude možné dvojím způsobem. Ručně pomocí přepínače dle předem nastaveného programu nebo v automatickém režimu, kde bude program získávat informace z průtokoměru a vyhodnocovat je. Po vyhodnocení vstupů bude mikrokontrolérem dán signál spínacímu obvodu, který zajistí přivedení napětí na příslušnou cívku. Základní náčrt funkčního ovládání je na obrázku 4.12. Tečkovaně jsou znázorněny datové signály, plnou čarou napájecí napětí, a to jak hlavní napájení cívek, tak pomocné napájení pro mikrokontrolér, spínací obvod a průtokoměr.



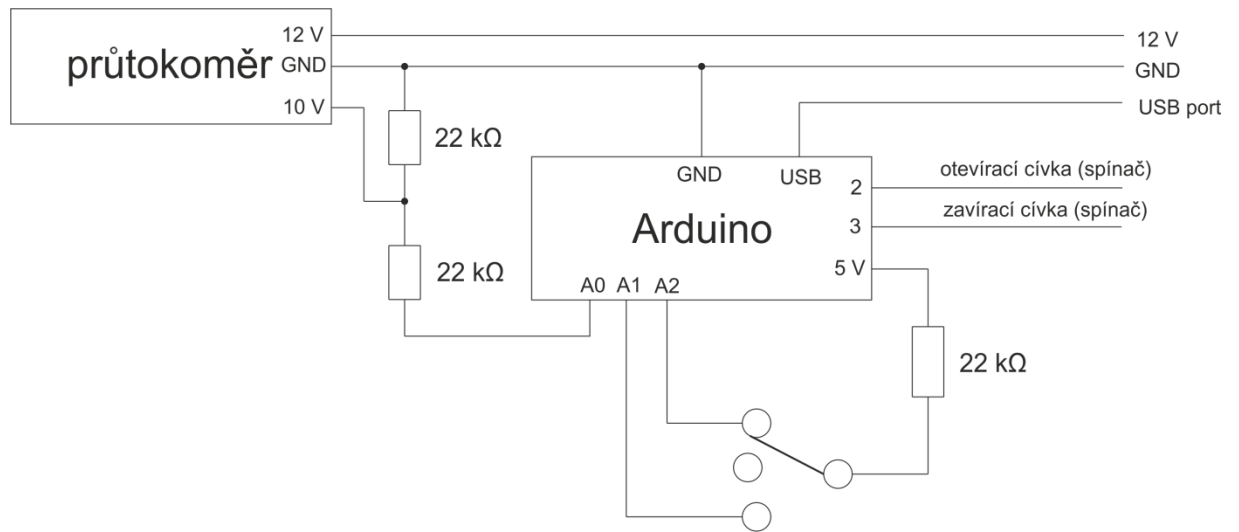
**Obrázek 4.12 – Schéma řízení ventilu**

Ruční ovládaní zajišťuje tří polohový přepínač (ON – OFF – ON), kdy po jeho přepnutí do jedné krajní polohy dojde k otevření a případně druhé polohy uzavření ventilu. Bude tedy fungovat v režimu OTEVŘÍT – MEZIPLOHA (automatické řízení) – UZAVŘÍT.

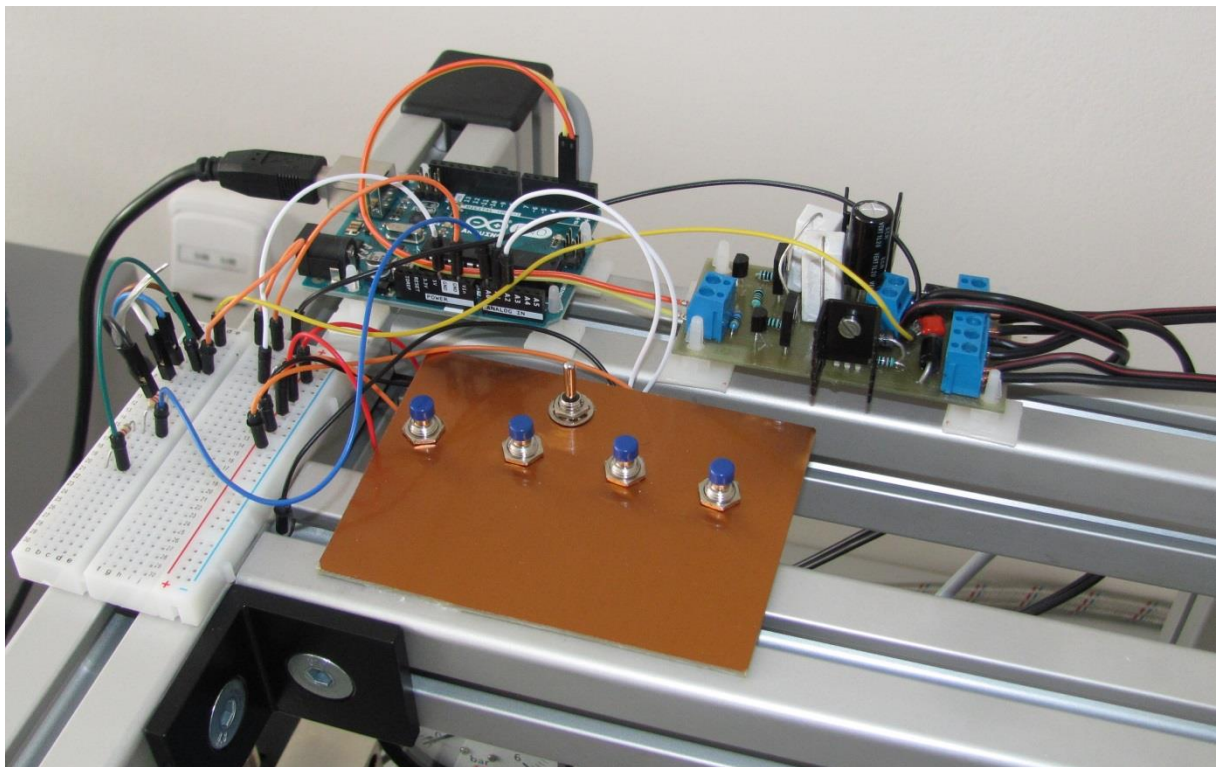
Jako hlavní řídicí prvek je použita platforma Arduino Uno. I tato základní platforma má dostatečný výpočetní výkon pro řízení ventilu. Schéma připojení vstupů a výstupů z Arduino, včetně dalších připojených komponent je na obrázku 4.13.

Napájení a programování Arduino probíhá přes USB port z připojeného počítače. V případě požadavku na samostatné řízení je možné použít pomocné napětí 12 V (napětí využitě pro napájení spínače) a Arduino se stane nezávislé a bude pracovat s uloženým programem. Řídicí program je uveden v příloze B. Napájení průtokoměru je také zajištěno pomocným napětím 12 V. Výstup průtokoměru je v rozmezí 0 až 10 V (odpovídá průtoku 0 až 100 l/min). Arduino je schopné zpracovat signál pouze do 5 V, a tak je použit odporový napěťový dělič z dvojice rezistorů 22 kΩ. Pro manuální přepínání ventilu je použit již zmíněný přepínač. Na prostřední kontakt je přivedeno přes 22kΩ rezistor napětí z výstupního portu Arduino a výsledný signál je vyhodnocován na analogových portech. Když je na jednom z nich detekováno napětí, je vyslán pokyn k otevření (uzavření) ventilu. Pokyn k otevření je vydán

opět přivedením napětí na jeden z dvojice portů 2 a 3, které jsou připojeny již na spínací desku přes sérii tranzistorů a MOSFET tranzistory.



Obrázek 4.13 – Schéma připojení platformy Arduino ke spínacímu obvodu

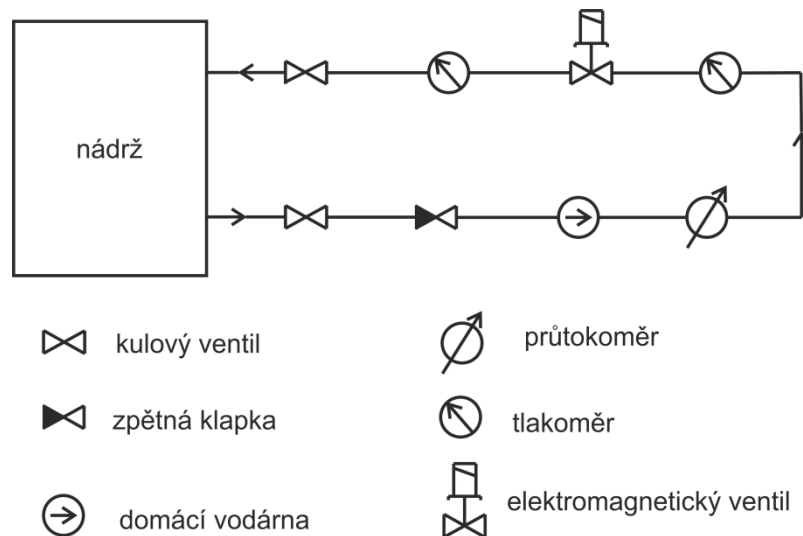


Obrázek 4.14 – Fotografie zapojení celého řízení ventilu

## 5. Verifikace a testování

Tato kapitola obsahuje veškeré testy a měření, které byly na ventilu provedeny. První částí bylo testování bez kapaliny – jednalo se o statické a dynamické charakteristiky ventilu. Měření statických charakteristik bylo provedeno pomocí siloměru a k zjištění dynamiky ventilu byla použita vysokorychlostní kamera. Bylo také provedeno měření pro ověření časové konstanty přechodného děje.

Pro měření a testování ostatních parametrů, pro které bylo nutné provádět již testy s kapalinou, byl navržen testovací systém. Jeho schématické značení je na obrázku 5.1. Soustava se skládá z 30 litrové plastové nádrže, na kterou jsou pomocí průchodek připojeny dva kulové ventily. Ve směru proudění kapaliny (vyznačena šipkami) je dále umístěna zpětná klapka (pro zajištění správné funkčnosti domácí vodárny). Na ní připojena domácí vodárna s frekvenčním měničem, typ Economy Control Maxi od společnosti Aquacup. Následuje průtokoměr, typ LABO-XF-U. Jedná se o průtokoměr s pružnou clonkou s napětovým výstupem. Před i za testovaným elektromagnetickým ventilem jsou umístěny tlakoměry (pro vyhodnocení tlakové ztráty na ventilu). A voda se vrací zpět do nádrže.



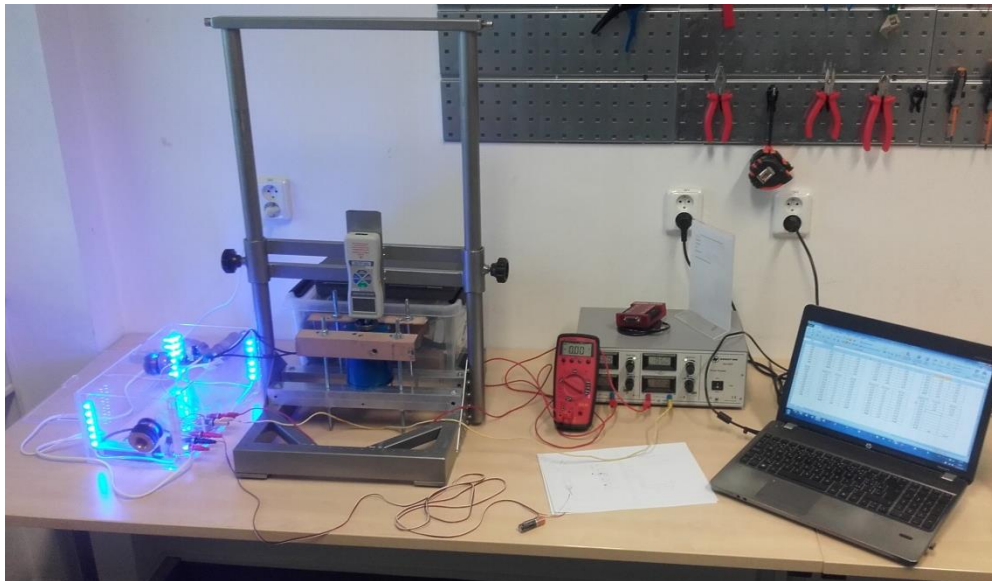
Obrázek 5.1 – Schéma zapojení testovaného ventilu

### 5.1 Statické charakteristiky

Při měření statických charakteristik byl použit siloměr Omega FS-1000N, zdroj napětí Statron 2225 a multimetr Aprobe 30XR-A. Zobrazení uchycení ventilu na měřícím stojanu je vidět na obrázku 5.2. Měření, z důvodu vyloučení nahodilých chyb, probíhalo vždy v deseti opakováních a všechny udávané hodnoty v této podkapitole jsou jejich výsledným průměrem. Dále ve všech následujících měřeních byla zanedbána gravitační síla působící na jádro. Hmotnost jádra včetně táhla a sedla je 390 g, tomu odpovídá gravitační síla 3,823 N.

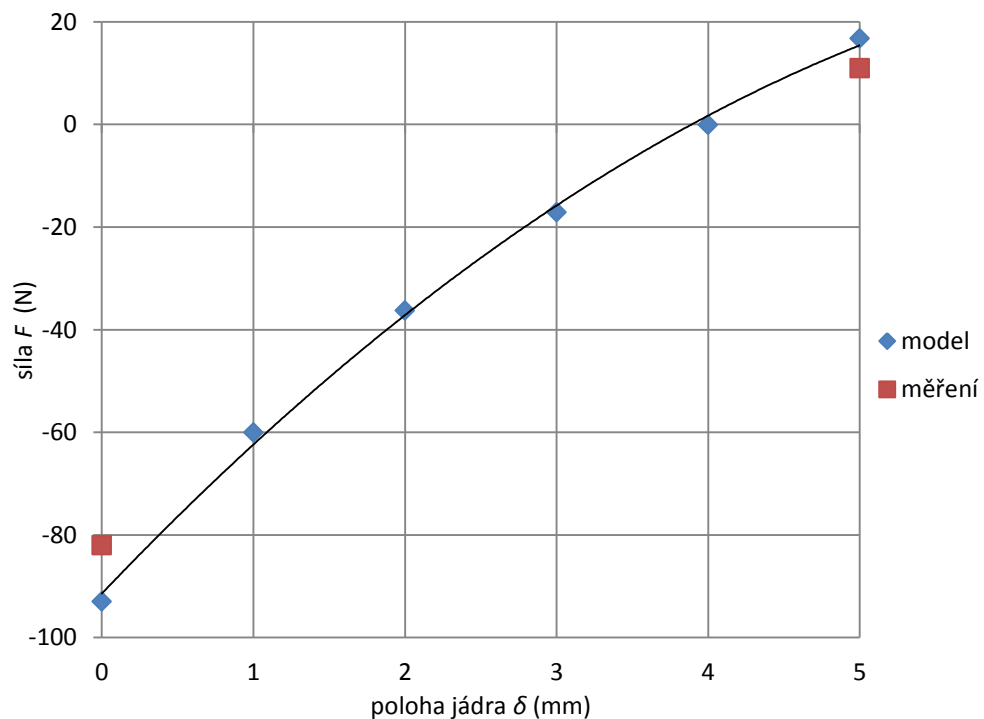


Část měření byla provedena v horizontální poloze a zbytek ve vertikální. Ve ventilu působí dále třecí síly, které v matematickém modelu nejsou zahrnuty, a tak nepřesnost vlivem gravitační síly lze zanedbat.



**Obrázek 5.3 - Měření statických charakteristik ventilu**

Při prvním měření bylo cílem ověřit přídržné síly magnetů, tedy jakou sílu je potřeba vyvinout na jádro, aby došlo k samovolnému přepnutí polohy jádra. Měření se provádělo v horizontální poloze, kdy tahem či tlakem na siloměr byl ventil přepnut a siloměr zaznamenal max. vyvinutou sílu. Porovnání s hodnotami ze simulace je na grafu 5.1.



**Graf 5.1 – Porovnání výsledků z měření**

Při uzavření ventilu, je potřebná síla k překonání silového působení magnetu dle matematického modelu 93 N a změřená hodnota činí 82 N. Při otevření je simulací stanovena hodnota silového působení na 17 N a změřeno bylo 11 N. Odchylka změřených hodnot je 12 % (při uzavřeném stavu) a 35% (v otevřeném stavu).

Při následném měření bylo cílem proměřit síly působící na jádro ventilu v různých polohách jádra při různém proudu. Pro měření byly na 3D tiskárně vytištěny zářezky, kterými se jádro znehybnilo v dané poloze. Celé měření ale obsahovalo jednu chybu. Měření probíhalo pouze ve směru tlaku ventilu (při otevírání působil na siloměr). Tah na siloměr byl vždy eliminován podložením jádra plastovou zářezkou nebo opřením o gumové dorazy. Výsledná změřená síla tak vždy vycházela pouze do jednoho směru.

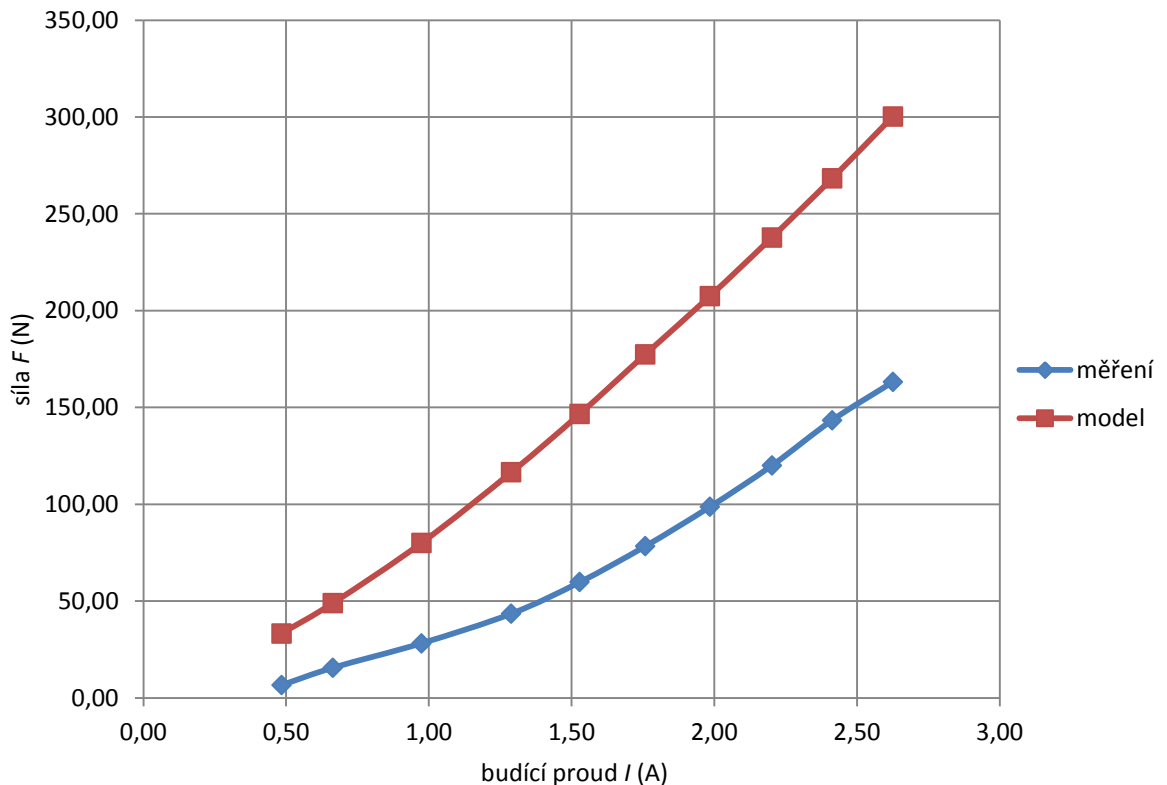
Zde je uveden a popsán pouze graf výsledných sil a jejich tabulka (číslo 5.1) pro polohu jádra  $\delta = 4,3$  mm a sepnutí otevírací cívky.

síla změřená (N)	proud cívkou (A)	proudová hustota cívkou ( $A/m^2$ )	vypočtená síla (N)
6,60	0,48	1,89E+06	33,27
15,60	0,66	2,60E+06	49,01
28,20	0,97	3,81E+06	80,00
43,50	1,29	5,04E+06	116,50
59,80	1,53	5,98E+06	146,70
78,30	1,76	6,87E+06	177,40
98,70	1,99	7,76E+06	207,50
120,00	2,20	8,61E+06	237,80
143,40	2,41	9,43E+06	268,30
163,20	2,63	1,03E+07	300,30

**Tabulka 5.1 – Porovnání sil, sepnuta otevírací cívka, poloha 4,3 mm**

Změřená síla udává hodnotu, která byla odečtena na siloměru. Proud byl měřen pomocí multimetru a z něj se následně dopočítala proudová hustota pro matematický model. Ta se následně dosadila do modelu a získala se síla, které by mělo být teoreticky dosaženo. Přehledněji je možné hodnoty porovnat na grafu 5.2, kde je patrné, že naměřené hodnoty jsou poloviční vzhledem k hodnotám modelu. Výsledná velikost a poměrně značný rozdíl výsledků jsou způsobeny především nedokonalostí postupu využitého v měření, nepřesným navinutím cívek (v modelu jsou uvažovány ideální cívky), zanedbáním tření a nezanedbatelný vliv mají konstrukční nepřesnosti reálného ventilu od modelu. V modelu je vše dokonale symetrické, jádro je umístěno soustředně a tak na něj působí jen axiální síla. V reálném ventilu, z důvodů zachování pohyblivosti jádra, je nutné ponechat určité mezery mezi

součástmi, to umožní jejich vychýlení a vzniku velkých radiálních sil, které pak ovlivní potřebnou axiální sílu zmenšením její velikosti.



**Graf 5.2 – Porovnání sil, sepnuta otevírací cívka, poloha 4,3 mm**

Měření probíhalo ještě v dalších 3 polohách jádra. Ve stavu, kdy je ventil plně otevřen a je aktivována zavírací cívka. Další když je ventil uzavřen (poloha 0 mm) a 2,3 mm, v obou případech je aktivována otevírací cívka. Všechna tyto další měření, která obsahují rovnice a grafy, jsou v příloze C.

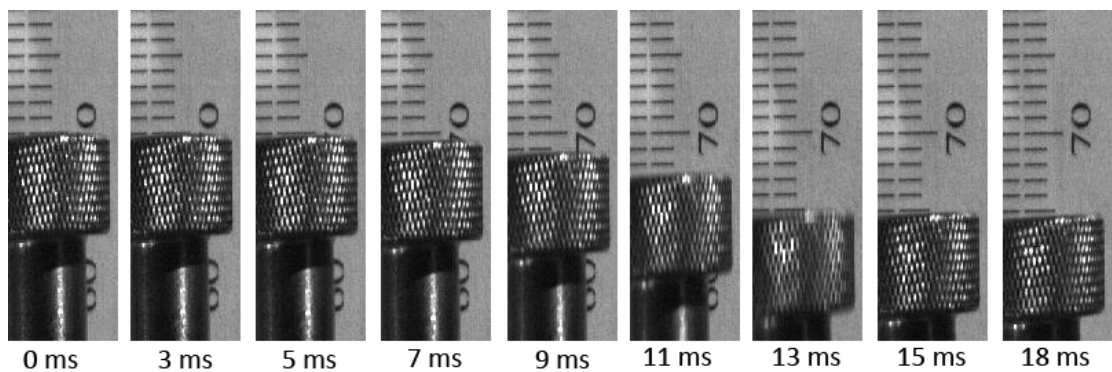
## 5.2 Dynamické charakteristiky

Pro měření byla použita vysokorychlostní kamera Basler acA2000-340km. Data byla zaznamenána pomocí karty Imperx Framelink Express a následně zpracována programem FrameLink Express. Bylo dosaženo mezní hodnoty zaznamenávací soustavy kolem 470 fps a kontinuálního snímání kamery.

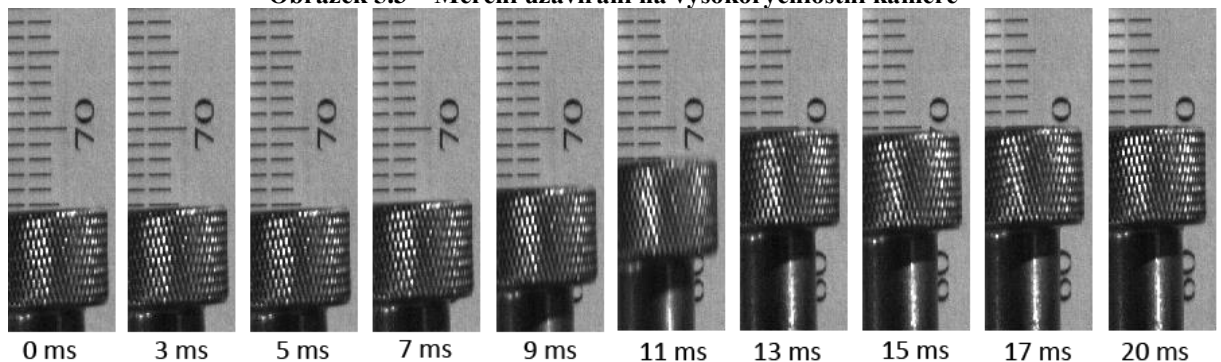
Samotné měření probíhalo na stejném stojanu jako měření statických charakteristik. Pouze bylo za ventil umístěno měřítko s milimetrovou stupnicí. Měření bylo provedeno 3x pro každou situaci – otevírání a uzavírání ventilu. Při měření byl ventil nezátížen, napájen stanoveným napětím a umístěn ve vertikální poloze.

První bylo provedeno měření při uzavírání ventilu. V tento okamžik pomáhá gravitační zrychlení při procesu uzavírání. Záznam snímků z vysokorychlostní kamery v oblasti procesu

přepnutí je vidět na obrázku 5.3. Snímky jsou v časovém rozmezí 2 až 3 ms za sebou. I tak proces samotného přepnutí je zobrazen na devíti snímcích. Dle odhadu podle snímků proces uzavírání trvá 18 ms. Následující obrázek 5.4. popisuje za stejných podmínek proces otevírání. Měření bylo provedeno na jmenovitém napětí, kdy cívkou protéká proud 2,5 A. Doba otevření ventilu je odhadnuta na 20 ms. Rozdíl výsledků experimentu a výsledků získaných výpočtem dynamiky jádra (viz kapitola 4.6) je způsoben přechodovým jevem, který nastane v otevírací a zavírací cívce (v použitém modelu není tento jev respektován), a dále také již zmíněným třením jádra o stěnu kanálu ventilu.



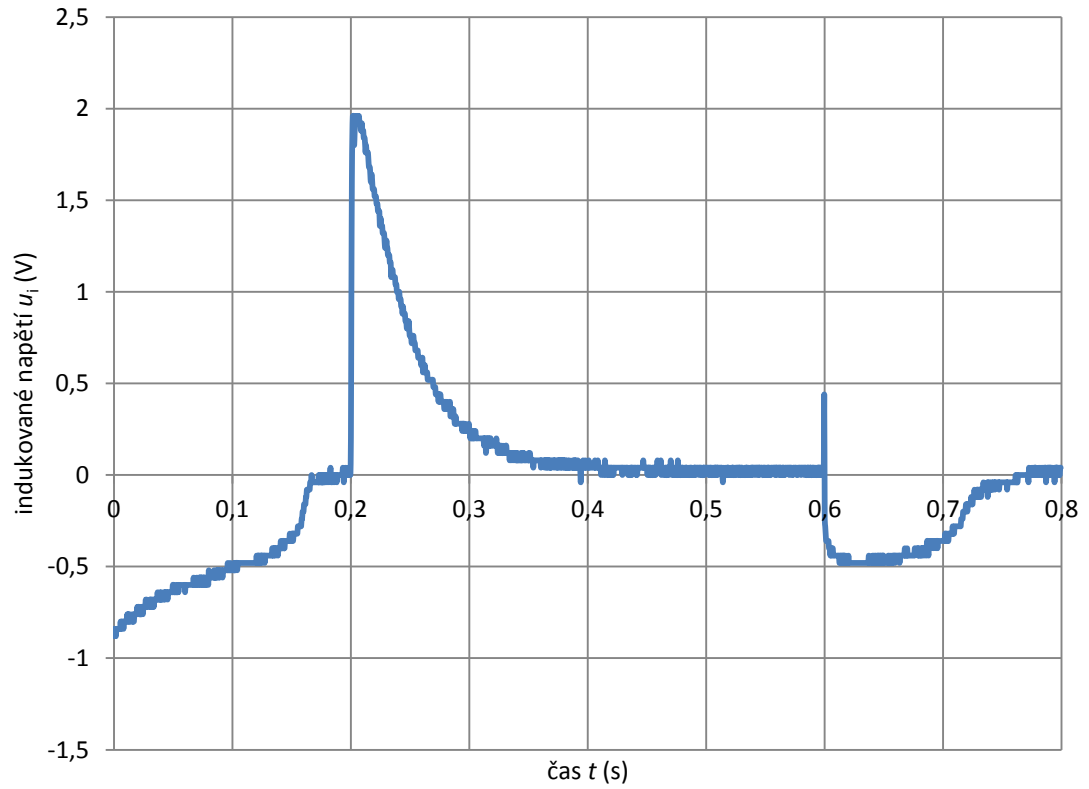
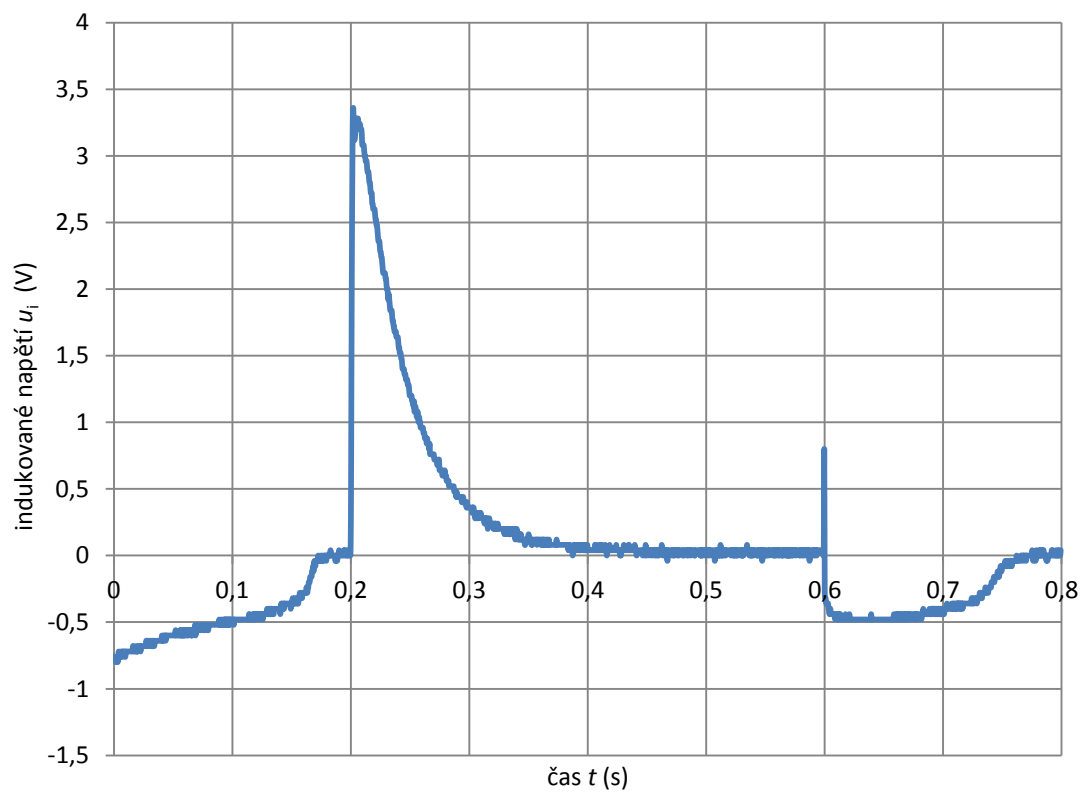
Obrázek 5.3 – Měření uzavírání na vysokorychlostní kameře



Obrázek 5.4 – Měření otevírání ventilu na vysokorychlostní kameře

### 5.3 Ověření konstanty přechodného děje

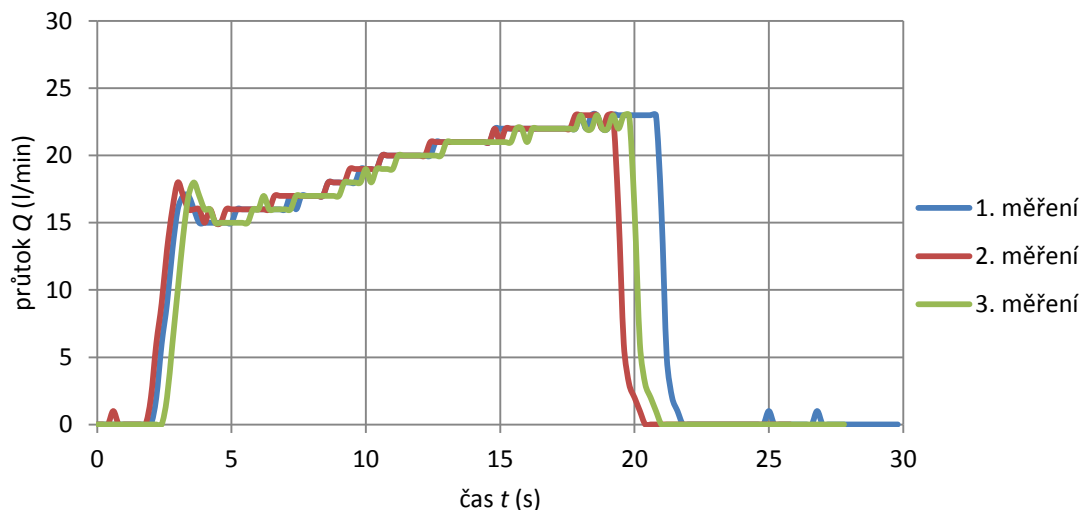
Měření bylo prováděno pro obě cívky. Vždy na jednu cívku bylo přivedeno napětí a na druhé cívce pomocí osciloskopu byl měřen pokles indukovaného napětí po odpojení ventilu od napájení. Při měření bylo jako napájecí napětí zvoleno 30 V (přepnutí ventilu je nežádoucí). Průběhy měření indukovaných napětí jsou zobrazeny na grafech 5.3 a 5.4. Pro určení konstanty  $\tau$  je rozhodující oblast grafu od času 0,2 s do ustálení hodnoty na 0 V. V čase 0,2 s je do cívky naindukováno napětí, které začíná klesat. Časová konstanta  $\tau$  byla určena jako tečna počátku klesající exponenciály. Určení této hodnoty je přibližné jejím přímým odečtením z grafu. Měření probíhalo v poloze, kdy je ventil uzavřen.

Graf 5.3 – Měření indukovaného napětí  $u_i$  na otevírací cívceGraf 5.4 – Měření indukovaného napětí  $u_i$  na zavírací cívce

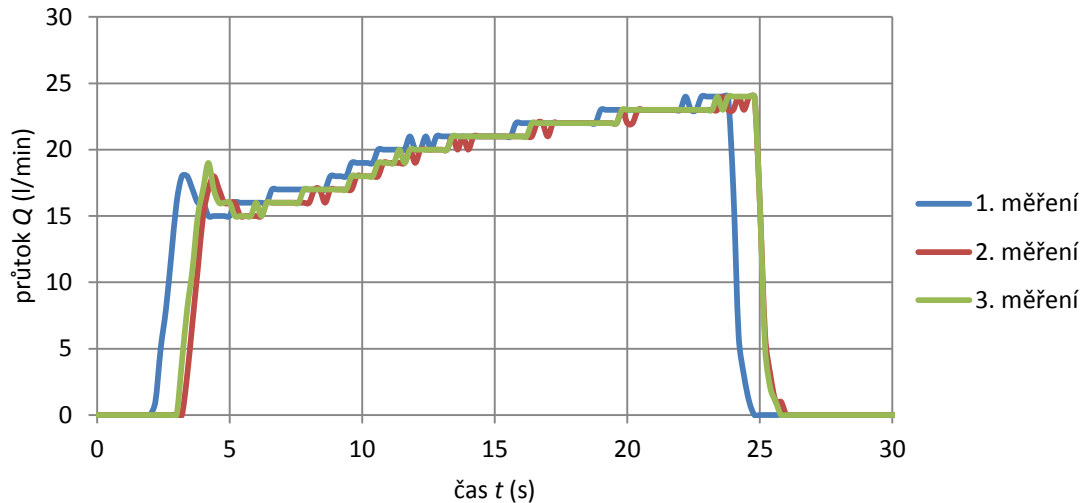
Pro otevírací cívku bylo změřeno  $\tau = 70$  ms, z výpočtu z matematického modelu je  $\tau = 108$  ms. Pro zavírací cívku bylo změřeno  $\tau = 60$  ms, z výpočtu z matematického modelu je  $\tau = 75$  ms. Měření se s modelem shoduje v tom, že delší hodnota  $\tau$  je u otevírací cívky, ale rozdíl výsledků měření a simulace je u otevírací cívky 20% a zavírací 35% (viz výpočet indukčnosti).

#### 5.4 Měření tlaků a tlakové ztráty

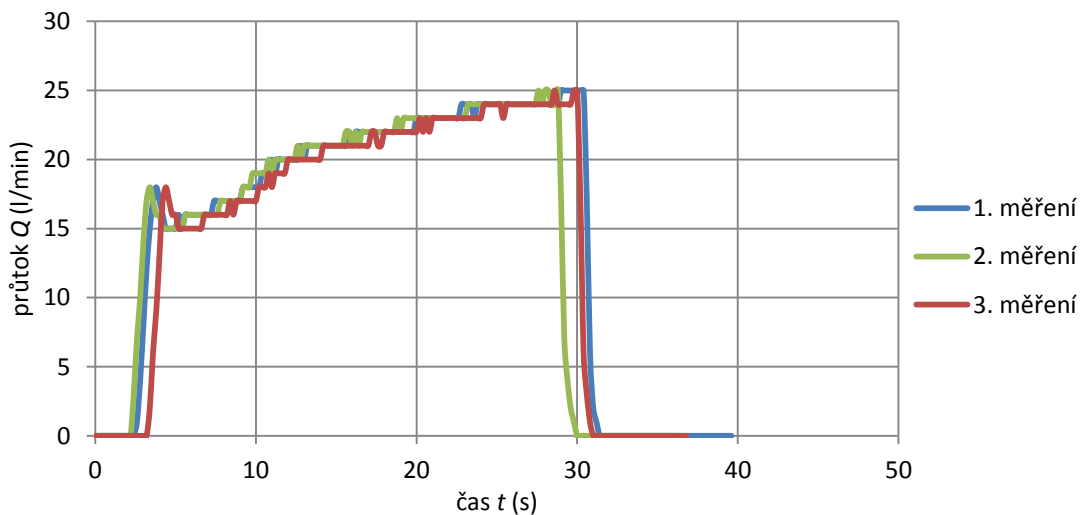
Poslední částí měření, která byla na ventilu provedena, jsou testy s kapalinou. Ventil byl zapojen do testovací smyčky dle obrázku 5.1. Měření průtoků s vypnutím vodárny probíhalo tak, že se nechala hodnota průtoku vystoupat až na danou hodnotu (zjištěno pomocí zobrazení hodnot z Arduina na monitoru počítače), následně byla vypnuta vodárna a ve stejný okamžik dán povel k uzavření ventilu. Hodnota průtoku 23 až 25 l/min odpovídá provoznímu tlaku před ventilem 0,5 baru. V době uzavření vodárny, pokud tlak nedosáhne hodnotu 1,5 baru (před ventilem), dojde k úspěšnému zavření. Tomuto stavu odpovídají grafy 5.5, 5.6 a 5.7.



Graf 5.5 – Měření funkčnosti ventilu na průtoku 23 l/min

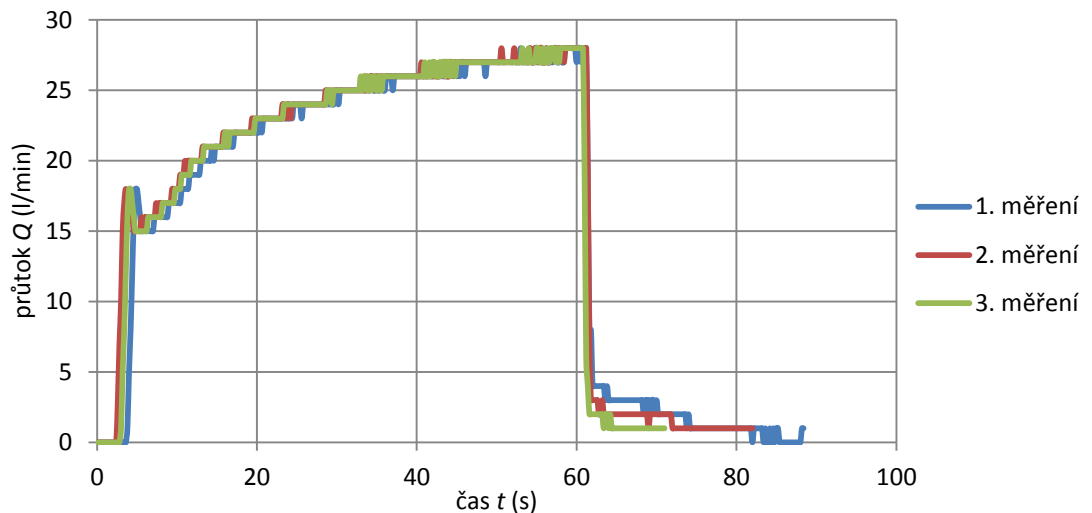


**Graf 5.6 – Měření funkčnosti ventilu na průtoku 24 l/min**



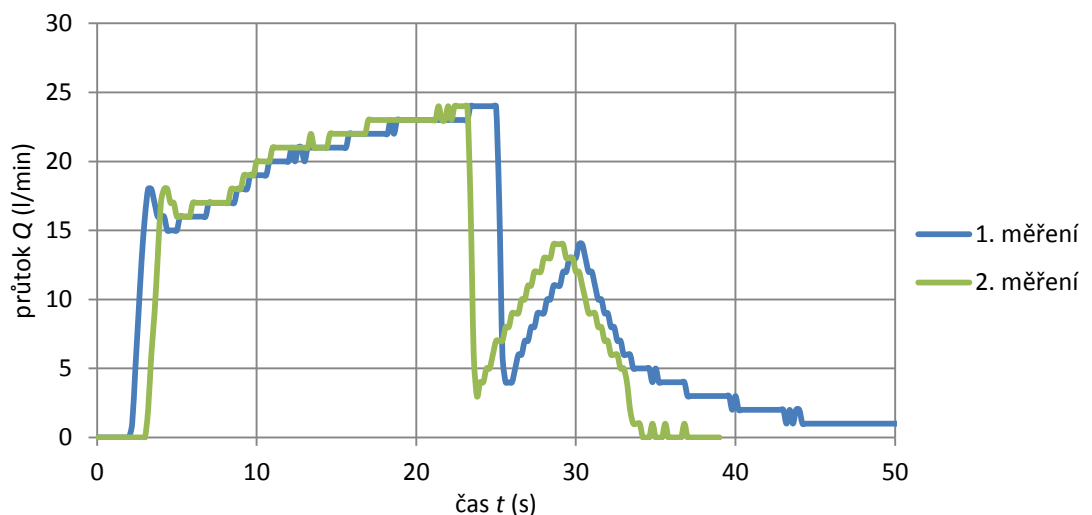
**Graf 5.7 – Měření funkčnosti ventilu na průtoku 25 l/min**

Měření na grafu 5.8 probíhalo za stejných podmínek, jen již bylo uzavření provedeno za takového tlaku, za kterého ventil není schopen uzavřít. Po vypnutí vodárny byl tlak větší, než dokáže ventil zvládnout, a docházelo tak k částečnému průtoku kapaliny. Po chvíli proudění kapaliny došlo ale k poklesu tlaku a samovolnému uzavření ventilu. K uzavření došlo pomocí působení sil permanentního magnetu. Ventil se tedy sám dokáže uzavřít, pokud dojde k poklesu tlaku pod maximální hodnotu.



**Graf 5.8 – Měření funkčnosti ventilu na průtoku 28 l/min**

Poslední měření bylo provedeno za situace, kdy vodárna před uzavřením ventilu nebyla vypnuta, ale dále navyšovala tlak v potrubí. Kolem času 25 s je patrné, že se ventil pokusil o nepovedené uzavření, ale průtok se nadále zvyšuje působením vodárny. V čase kolem 30 s již vodárna dosáhne svého max. nastaveného tlaku a sama se vypne. Dojde opět k průtoku kapaliny skrze ventil a postupnému samovolnému uzavření ventilu. V případě prvního měření (modrá křivka) je ventil ponechán se samovolně uzavřít, v druhém případě je provedeno opakované vypnutí ventilu při tlaku kolem hodnoty 1,3 baru, který je ventil již schopen uzavřít.



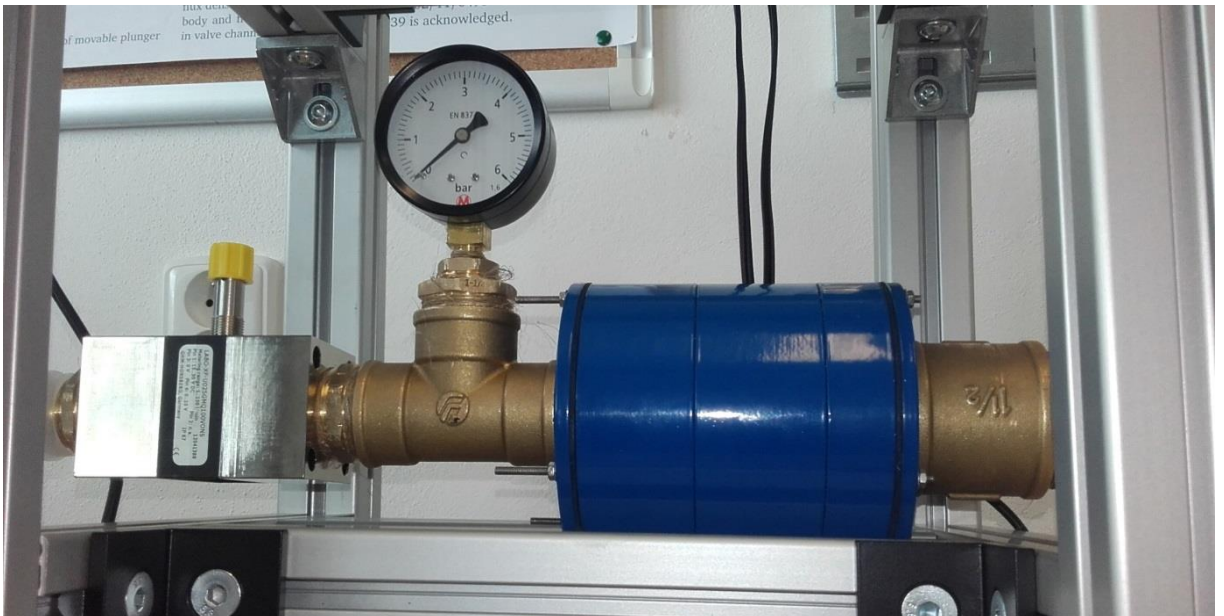
**Graf 5.9 – Měření funkčnosti ventilu na průtoku 24 l/min**

Z měření lze vyvodit tyto závěry. Ventil dokáže bezpečně uzavřít při tlaku do 1 baru. Mezní hodnota tlaku pro uzavření ventilu se pohybuje v rozmezí 1,3 až 1,5 baru. Tlaková ztráta na ventilu je 0,15 baru. Měření probíhalo odečtením hodnoty tlaku před a za ventilem z mechanických barometrů.





Obrázek 5.5 – Fotografie z měření tlakové ztráty



Obrázek 5.6 – Připojení průtokoměru na ventil

### 5.5 Ověření záložního napájení

Experimentálně se podařilo ověřit, že záložní napájení pomocí vloženého kondenzátoru do přívodních vodičů funguje. Po nabití kondenzátoru byl napájecí zdroj vypnut a na energii uloženou v kondenzátoru se opakovaně podařilo ventil vypnout, otevřít a vypnout. Nahromaděná energie tak stačí k provedení tří spínacích cyklů. V případě bezpečnostního vypnutí, ovšem stačí pouze cyklus uzavření.

## Závěr

Tato práce se zabývá návrhem, modelováním, simulacemi, konstrukcí a výrobou nového elektromagnetického ventilu. Tyto ventily se dnes stávají nedílnou součástí kapalinových a plynových rozvodů pro svoji rychlost, výkonnost, účinnost, konstrukční jednoduchost, kompaktní provedení a dostupný zdroj elektrické energie.

V úvodu práce je provedena základní rešerše elektromagnetických ventilů, které jsou v dnešní době využívány. Dále teoretický rozbor fyzikálních jevů, které je při návrhu elektromagnetického ventilu nutné uvažovat. Při jejich respektování byl navržen prototyp bistabilního elektromagnetického ventilu v koaxiálním provedení, který využívá permanentních magnetů pro zajištění stabilních poloh. Pomocí matematického modelu byla provedena simulace statických i dynamických vlastností prototypu a byly navrženy jeho základní parametry.

Na základě modelu byla zpracována technická dokumentace, ventil byl vyroben a následně sestaven. Prototyp byl dále doplněn o řízení založené na platformě Arduino a také speciálně navržený spínač, který ovládá hlavní napájecí napětí otevírací a uzavírací cívky.

Velmi důležitou částí práce byly funkční testy a měření parametrů prototypu. Nejprve byla změřena statická charakteristika pomocí siloměru. Zde došlo hlavně k ověření síly působení permanentních magnetů ve stabilních polohách. Uzavřený ventil působí na sedlo silou 82 N, otevřený ventil pak silou 11 N. Dále byly měřeny dynamické charakteristiky za pomoci vysokorychlostní kamery. Při dosažené snímkovací frekvence 470 fps byla změřena doba uzavírání nezatíženého ventilu 18 ms a doba otevírání 20 ms. Poslední měřením nezatíženého ventilu bylo určení časové konstanty přechodného děje při napájení cívek. Zde byla při jmenovitém napájení změřena časová konstanta pro otevírací cívku 60 ms a 70 ms pro cívku zavírací.

Následně byl ventil zapojen do sestaveného potrubního systému s nádrží, domácí vodárnou, průtokoměrem a barometry. Bylo ověřeno, že samotný ventil i jeho sedlo jsou těsné a kapalina nikde neprosakuje. Mezní hodnota, kdy je ventil schopný uzavřít kanál, je 1,5 baru. Při zanechání rezervy byl jmenovitý tlak ventilu určen na 1 bar. Tlaková ztráta kapaliny při průchodu ventilem byla změřena na 0,15 baru. Testování ventilu při vysokém tlaku byla dále ověřena jeho schopnost uzavřít kanál při poklesu tlaku pod mezní hodnotu 1,5 baru, a to ve stavu bez hlavního napájecího napětí, pouze vlivem působení permanentních magnetů. Ventil byl dále opatřen záložním zdrojem napájení v podobě

vhodně zvoleného kondenzátoru. S jeho pomocí je ventil i bez připojeného napájení vždy schopen bezpečného vypnutí. V tomto stavu je však prozatím nutno zajistit pomocné napájení spínače.

Byl tedy navržen, sestaven a experimentálně ověřen prototyp nového elektromagnetického ventilu, jehož statické i dynamické vlastnosti mohou být velmi vhodné pro řadu aplikací, a to nejen v průmyslu. Na základě získaných zkušeností je možné usoudit, že se jedná o koncept ventilu, který je velmi rychlý, účinný a energeticky nenáročný. Po doplnění záložním zdrojem napájení je možné jej také využívat jako bezpečností ventil, protože po výpadku hlavního napájení je stále schopen bezpečného uzavření. Jeho spotřeba při provozu je téměř nulová, a tím může být navržený koncept výrazněji výhodnější než jiné bezpečnostní ventily, které je nutné v otevřeném stavu neustále napájet.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

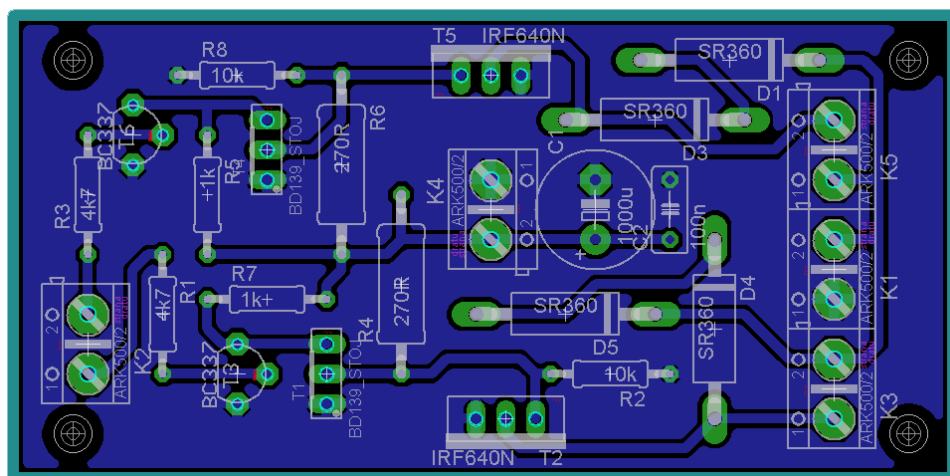
- [1] MAYER, D. a ULRYCH, B. *Elektromagnetické aktuátory*. 1. české vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [2] WARBERGER, B., FELLER, J., GUNTERMANN, C., NUSSBAUMER, T., KOLAR, J.W. *High-dynamics low-cost flow control with solenoid actuator for ultrahigh purity applications*. IEEE Transactions on Industry Applications, 47(5):2268-2273, 2011
- [3] JANOCHA, H. *Actuators: basics and applications*. Berlin: Springer, 2004. ISBN 9783642082665.
- [4] NESBITT, B. *Handbook of Valves and Actuators: Valves Manual International*. Elsevier Science, 2011
- [5] MACH, F. *Pokročilé metody a algoritmy pro analýzu sdružených úloh v elektromagnetismu*. Plzeň, 2015. Disertační práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra teoretické elektrotechniky.
- [6] CHLADNY, R.R., KOCH, C.R., LYNCH, A.F. *Modeling automotive gas-exchange solenoid valve actuators*. IEEE Transactions on Magnetics, 41(3):1155-1162, 2005.
- [7] Hydrodynamika. Poslední změna neuvvedena. [Cit. 12. 2. 2016]. Dostupné z: <http://radek.jandora.sweb.cz/f06.htm>
- [8] BURIANOVÁ, E. *Simulace dynamických modelů s využitím metod systémové dynamiky* [online], vytvořeno 28. 9. 2007, [Cit. 12. 2. 2016]. Dostupné z: [https://www.ki.fpv.ufk.sk/projekty/kega\\_3\\_4029\\_06/iski2007](https://www.ki.fpv.ufk.sk/projekty/kega_3_4029_06/iski2007)
- [9] KURFIŘT, M. *Návrh aktuátoru s permanentním magnetem*. Plzeň, 2014. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky.
- [10] KURFIŘT, M., MACH, F., KARBAN, P., DOLEŽEL, I. *Numerical Study and Experimental Verification of Novel Electromagnetic Actuator in Valve Operation*. Computational Problems of Electrical Engineering, 2014

## Přílohy

### Příloha A – Popis použitých součástek a nákres osazení spínacího obvodu

Seznam použitých součástek a jejich základní parametry:

- MOSFET N-FET tranzistor IRF640N – 2 ks, provedení TO220, max. napětí 200 V, max. proud 18 A, max. spínaný výkon 125 W
- NPN tranzistor BD139 – 2 ks, provedení TO126, max. napětí 80 V, max. proud 1,5A, max. spínaný výkon 12,5 W
- NPN tranzistor BC337-25-TAP – 2 ks, provedení TO92, max. napětí 45 V, max. proud 0,5 A, max. spínaný výkon 0,625 W
- CMM 5/2BU – 5 ks, svorkovnice do PCB, 2 kontakty, max. napětí 250 V, max. proud 16 A, materiál plast, vodiče do průřezu 2 mm<sup>2</sup>
- Schottky dioda SR360-TAP – 4 ks, provedení DO27, materiál plast, max. napětí 60 V, max. proud 3 A
- Elektrolytický kondenzátor RAD 1000/25 RM5 – 1 ks, kapacita 1000 uF, max. napětí 25 V, radiální provedení
- Svitkový kondenzátor FOIL 100N/100V/10% MKT RM5 – 1 ks, kapacita 100 nF, max. napětí 100 V, radiální provedení
- AX5W 270R – 2 ks, odpor 270 Ω, max. výkon 5 W, provedení keramické tělísko
- RM0207 1K00 1% - 2 ks, rezistor s kovovou vrstvou, odpor 1 kΩ
- RM0207 4K70 1% - 2 ks, rezistor s kovovou vrstvou, odpor 4,7 kΩ
- RM0207 10K0 1% - 2 ks, rezistor s kovovou vrstvou, odpor 10 kΩ



Obrázek A.1 - Schéma pro výrobu desky plošných spojů

**Příloha B – Základní program pro řízení ventilu**

```
#define COIL1 2 // opening coil
#define COIL2 3 // closing coil

int otevrit;
int uzavrit;
int prutok;
byte proces = 0;

void setup(){
  pinMode(COIL1, OUTPUT);
  pinMode(COIL2, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
  analogReference(DEFAULT);
}

void loop(){
  digitalWrite(COIL1,LOW);
  digitalWrite(COIL2,LOW);

  otevrit = analogRead(A2);
  uzavrit = analogRead(A1);
  prutok = analogRead(A0)*100/1023;

  Serial.println(prutok);
  delay(200);

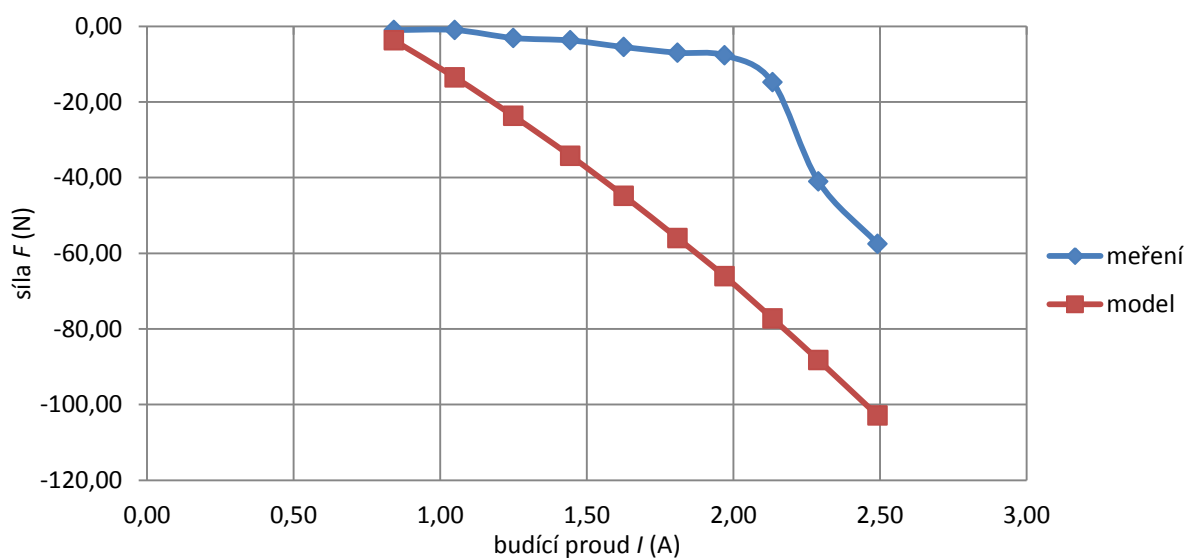
  if(otevrit > 1000 && proces == 0){
    digitalWrite(COIL1,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(COIL1,LOW);
    proces = 1;
  }

  if(uzavrit > 1000 && proces == 0){
    digitalWrite(COIL2,HIGH);
    delay(100);
    digitalWrite(COIL2,LOW);
    proces = 1;
  }

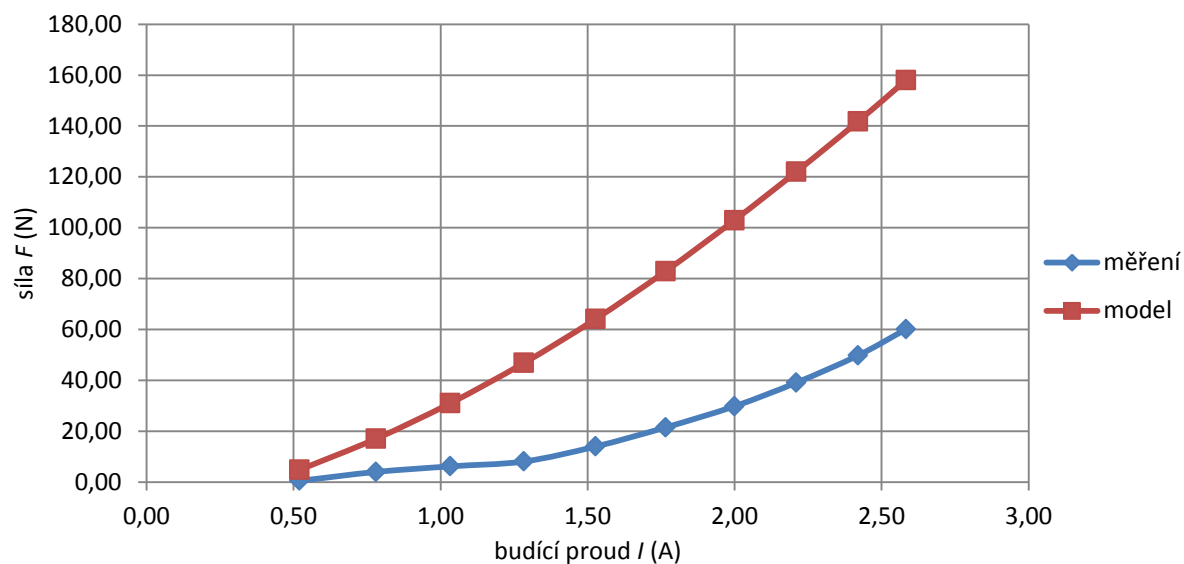
  if(uzavrit < 1000 && otevrit < 1000){
    proces = 0;
  }

}
```

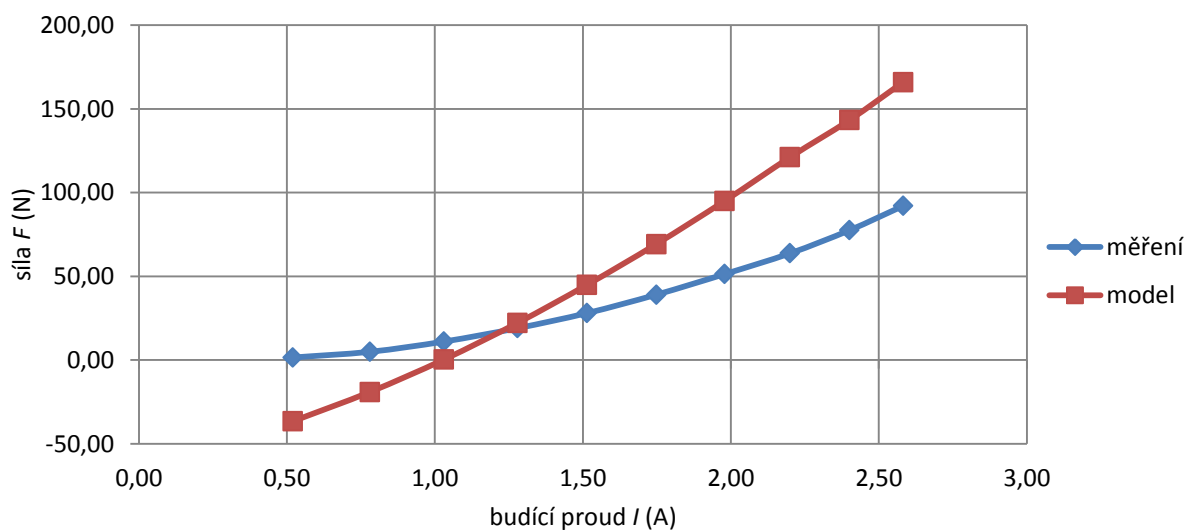
## Příloha C – Měření a porovnání statických charakteristik ventilu



Graf C.1 – Ventil otevřen (5 mm) – sepnuta zavírací cívka



Graf C.2 – Ventil uzavřen (0 mm) – sepnuta otevírací cívka



Graf C.3 – Poloha ventilu v 2,3 mm – sepnuta otevírací cívka

**Příloha D – Fotografie z měření ventilu pod kapalinou**

