

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Návrh a diagnostika elektromagnetického ventilu pro  
motory automobilů**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš KAMINSKÝ**  
Osobní číslo: **E13N0125P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Dopravní elektroinženýrství a autoelektronika**  
Název tématu: **Návrh a diagnostika elektromagnetického ventilu pro motory automobilů**  
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

Zpracujte komplexní studii využití elektromagnetických aktuátorů ve funkci ventilu pro motory automobilů.

1. Proveďte rešerši možností konstrukčního provedení a praktického využití elektromagnetických aktuátorů pracujících ve funkci ventilu pro vznětové a zážehové motory automobilů.
2. Sestavte matematický model obecného elektromagnetického ventilu a proveďte jeho teoretický rozbor.
3. Na základě řešení sestaveného modelu navrhnete konkrétní systém elektromagnetického ventilu.
4. Zpracujte systém řízení navrženého ventilu pomocí vhodných regulačních prvků.
5. Navržený elektromagnetický ventil zkonstruuje a proveďte jeho diagnostiku.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran


Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Mach F., Karban P., Doležel I.: Design of Novel Bearing-less Electromagnetic Actuator in Valve Operation, International Symposium on Magnetic Bearings, 2014
2. Mach F., Nový I., Karban P., Doležel I.: Shape Optimization of Electromagnetic Actuators, Internation conference ELEKTRO, 2014
3. Posey N. A., Wu T., Wolff M., Zumberge J.: Modeling and Control Scheme Design of a Solenoid-Actuated Fuel Injection System, IEEE National Aerospace and Electronics Conference, 2012
4. Chladny R. R., Koch C. R., Lynch A. F.: Modeling automotive gas-exchange solenoid valve actuators, IEEE Transactions on Magnetics, 2005
5. 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, 2011

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

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**  
Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

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



  
Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Diplomová práce je zaměřena na problematiku elektromagnetických aktuátorů ve funkci vstříkovacích ventilů pro motory automobilů. V práci je popsán matematický model obecného elektromagnetického ventilu a proveden jeho teoretický rozbor. Na základě sestaveného modelu je navržen konkrétní akční člen elektromagnetického ventilu. Dále je zpracován systém řízení společně s diagnostikou operačního režimu a poruchových stavů pomocí platformy Arduino. Následně jsou na zkonstruovaném akčním členu provedeny experimenty, ověřující jeho parametry a funkčnost.

## **Klíčová slova**

elektromagnetický aktuátor, elektromagnetický ventil, vstříkovací ventil, Agros2D

## **Abstract**

Diploma thesis is focused on the issue of electromagnetic actuators used as injection valves for car engines. A mathematical model of general electromagnetic valve is described in the thesis and the theoretical analysis of this model is included. An actuator of the electromagnetic valve is designed on the basis of the mathematical model. Furthermore, both control and operation diagnostic system by Arduino platform are figured out. Experiments that aims to verify the parameters of constructed actuator are performed.

## **Key words**

electromagnetic actuator, electromagnetic valve, injector, Agros2D

## **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 11.5.2015

Tomáš Kaminský

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Františku Machovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Za značnou podporu děkuji také doc. Ing. Pavlu Karbanovi, Ph.D. a kolektivu katedry teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Tato diplomová práce vznikla s podporou Evropského fondu pro regionální rozvoj a Ministerstva školství, mládeže a tělovýchovy ČR v rámci projektu Regionální inovační centrum elektrotechniky (RICE), číslo projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0094 a projektu SGS- 2015- 035.

## Obsah

<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>ÚVOD.....</b>	<b>11</b>
<b>1 SOUČASNÝ STAV ZNALOSTÍ .....</b>	<b>13</b>
1.1 ZÁŽEHOVÉ MOTORY .....	13
1.2 VZNĚTOVÉ MOTORY .....	16
<b>2 KONCEPT NAVRHOVANÉHO VENTILU .....</b>	<b>19</b>
<b>3 VYMEZENÍ CÍLŮ PRÁCE .....</b>	<b>22</b>
<b>4 MATEMATICKÝ MODEL .....</b>	<b>23</b>
4.1 MODEL MAGNETICKÉHO POLE .....	23
4.2 MODEL ELEKTRICKÉHO OBVODU .....	23
4.3 MODEL DYNAMIKY POHYBLIVÉ ČÁSTI .....	24
<b>5 NÁVRH AKČNÍHO ČLENU VENTILU .....</b>	<b>25</b>
5.1 PRŮTOK VENTILU .....	26
5.2 STANOVENÍ DYNAMICKÝCH PARAMETRŮ .....	30
5.3 MAGNETICKÝ OBVOD .....	30
5.4 DYNAMIKA SYSTÉMU .....	33
5.5 OPTIMALIZACE MAGNETICKÉHO OBVODU .....	35
5.6 ELEKTRICKÝ OBVOD.....	38
5.7 TVORBA TECHNICKÉ DOKUMENTACE V PROGRAMU SOLIDWORKS.....	46
<b>6 ŘÍZENÍ ELEKTROMAGNETICKÉHO VENTILU .....</b>	<b>50</b>
6.1 NÁVRH SPÍNACÍHO OBVODU. ....	50
6.2 PROVEDENÍ SPÍNACÍHO OBVODU NA DPS .....	51
6.3 DIAGNOSTIKA ELEKTROMAGNETICKÉHO VENTILU .....	51
<b>7 VÝSLEDNÝ PROTOTYP AKČNÍHO ČLENU VENTILU.....</b>	<b>53</b>
7.1 NAVÍJENÍ CÍVKY .....	53



7.2	ULOŽENÍ NEODYMOVÝCH MAGNETŮ .....	53
7.3	PODOBA VÝSLEDNÉHO PROTOTYPU .....	54
<b>8</b>	<b>EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ.....</b>	<b>56</b>
	<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>59</b>
	<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>60</b>
	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ .....</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM TABULEK.....</b>	<b>62</b>
	<b>PŘÍLOHY .....</b>	<b>1</b>
	PŘÍLOHA A – GRAFICKÉ VYJÁDŘENÍ CITLIVOSTNÍ ANALÝZY .....	1
	PŘÍLOHA B – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE.....	7
	PŘÍLOHA C – FOTOGRAFIE.....	10

## Seznam symbolů a zkratk

$F$	Skalární veličina
$\mathbf{F}$	Vektorová veličina
$F_c$	Celková síla působící na kotvu
$F_{\min}$	Minimální otevírací síla působící na kotvu
$F_{\text{avg}}$	Průměrná otevírací/zavírací síla působící na kotvu
$B$	Magnetická indukce
$B_r$	Remanentní magnetická indukce
$v$	Rychlost pohybu kotvy
$a$	Zrychlení
$A$	Magnetický potenciál
$J_{\text{ext}}$	Externí proudová hustota
$p_1$	Tlak paliva proudícího ze vstřikovače do válce
$p_2$	Tlak ve válci motoru při vstřiku paliva
$R$	Činný odpor
$i$	Časově proměnný proud
$L$	Indukčnost cívky
$\delta$	Poloha kotvy
$\gamma$	Měrná elektrická vodivost
$U$	Napájecí napětí zdroje
$m$	Hmotnost kotvy
$s$	Dráha
$Q_v$	Objemový průtok ventilu
$d$	Průměr průtokové části kotvy
$t_0$	Čas otevření ventilu
$t_{\text{po}}$	Čas plného otevření ventilu
$t_z$	Čas zavření ventilu
$\rho$	Hustota materiálu
$V$	Objem materiálu
$\varepsilon$	Kompresní poměr motoru
$\mu$	Permeabilita
$t$	Čas
$T_{\text{vstřik}}$	Perioda vstřiku
$N$	Počet závitů cívky
$S$	Celková plocha cívky v řezu
$S_{\text{Cu}}$	Efektivní obsah mědi
$I_z$	Elektrický proud závitem cívky
$R_z$	Elektrický činný odpor závitů cívky
$l_z$	Délka závitů
$r$	Vzdálenost závitů od středu ventilu
$k$	Koeficient plnění cívky
$W_m$	Energie magnetického pole
$\tau$	Časová konstanta přechodového děje
ABS	Plast akrylonitrilbutadienstyren
$h_{\text{FE}}$	Proudový zesilovací činitel
NTC	Negativní teplotní koeficient
$T$	Perioda spínacího signálu

## Úvod

Spalovací motory vybavené různými vstřikovacími systémy paliva prošly za více než 100 letou historií značným vývojem. Od nejjednodušších mechanických po dnešní elektronicky řízené systémy. Jejich úkolem je vstřikovat jemně rozprášené palivo do nasávaného vzduchu a vytvářet tak směs paliva odpovídající příslušnému stavu motoru [1].

Princip karburátoru, který byl automobilovým průmyslem hojně využíván ještě počátkem 90. let, byl vynalezen již v roce 1893 firmou Maybach. Rozdíl mezi karburátorem a vstřikováním paliva je způsob, jak je palivo dodáváno do prostoru válců spalovacího motoru. V raných fázích vývoje vstřikovacích systémů šlo primárně o zvýšení výkonu agregátů, které dosavadně používaly karburátory. Teprve časem se díky dokonalejší regulaci dařilo snížit spotřebu paliva. V současné době lze u moderních systémů palivo dodávat individuálně do každého válce motoru a tím zlepšit jeho chod a čistotu výfukových plynů.[2]

Vstřikování nese svůj původ v letectví, kde jej vynalezl v roce 1902 francouzský konstruktér Léon Levavasseur, známý především jako autor osmiválcového motoru V8, který je v automobilové historii proslulý zejména díky americkým výrobcům automobilů, u kterých motor doznal značného pokroku a rozšíření. Do osobních automobilů se však vstřikování dostalo až v roce 1925 s vynálezem švédského inženýra Jonase Hesselmana, který princip využil při konstrukci motoru kombinující zážehový a vznětový princip dohromady.

V roce 1948 se konstruktér Hans Scherenberg, působící tou dobou ve společnosti Gutbrod, zasloužil, na základě svých zkušeností s leteckými motory Daimler Benz, o výrobu prvního sériového automobilu se vstřikováním paliva na světě. V té době však vynález nebyl úspěšný. Přelomovým vozem, jenž využíval mechanické přímé vstřikování do válce a doznal celosvětového úspěchu, byl v roce 1954 německý Mercedes – Benz 300SL.

Američtí výrobci představili své řešení v roce 1956. Jednalo se o kontinuální vícebodové vstřikování paliva, které firma Chevrolet použila do osmiválcového motoru 283 cui. Tehdejší novinkou bylo použití vstřikovacích ventilů instalovaných do sacího potrubí před ventily. [3]

O rok později přišla americká společnost Bendix s elektronicky řízeným systémem Electrojector, který byl bohužel nechvalně známý svou pomalou odezvou. Automobilky tento systém nasadily v roce 1958 do svých modelů, avšak nakonec se většina z nich vrátila díky kritice zpět ke karburátorům a společnost Bendix prodala licenci dosavadnímu leaderovi v této

oblasti firmě Bosch. Ta tento systém zdokonalila a pod názvem D – Jetronic jej využila společnost Volkswagen pro svůj model 1600 LE v roce 1967. Postupem času se stal standardem většiny evropských výrobců vozidel. Mezi významné milníky vývoje vstříkovacích systémů firmy Bosch patří zejména rok 1973, kdy byl uveden hydromechanicky řízený systém K – Jetronic. Dále pak elektronicky řízený L – Jetronic (1973), jednobodové vstříkování Bosch Mono – Jetronic (1988) a například v roce 2006 byla představena kombinace přímého a nepřímého vstříkování Toyota D4–S.[3]

V současné době je motivací pro vývoj efektivnějších řešení nejen zvyšování výkonu agregátů, ale do automobilového průmyslu stále více promlouvá hledisko spotřeby ropy, která jakožto fosilní palivo tvoří základní surovinu pro výrobu nafty a benzínu.

Zejména v posledních letech je důvodem pro vývoj a zdokonalování systémů zajištění hospodárnosti agregátů a dále snižování emisí škodlivých látek obsažených ve výfukových plynech. Výrobci automobilů jsou nuceni plnit emisní normy EURO stanovující limitní hodnoty škodlivých látek ve výfukových plynech, kdy v září roku 2014 začala platit prozatím poslední a nejpřísnější norma EURO VI. Ve Spojených státech amerických platí tzv. CAFE (Corporate Average Fuel Economy) normy [4], které si kladou za cíl snížit spotřebu paliva současně vyráběných vozů. Evropská unie také projednává budoucí limity normy EURO a dále například metriku pro měření reálné spotřeby. [5][6]

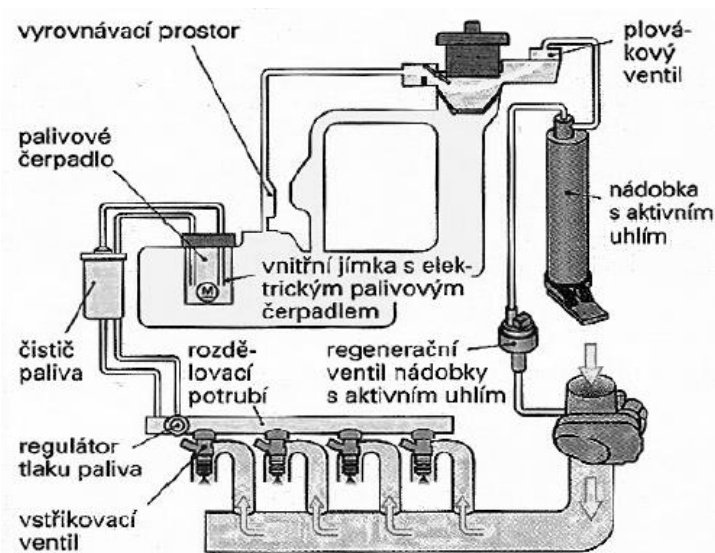
Současné znalosti v oblasti řízení a technologický pokrok umožňují vyvíjet stále nová a efektivnější řešení, jež jsou problematikou univerzit a firem zabývajících se vývojem agregátů po celém světě, neboť čísla poukazující na množství lidstvem spotřebované ropy každým rokem stoupají.[7]

# 1 Současný stav znalostí

Cílem následujících kapitol je vymezení oblasti zájmu diplomové práce, definování stěžejních pojmů a zhodnocení současného stavu poznání.

## 1.1 Zážehové motory

Úkolem palivové soustavy je efektivně zásobovat spalovací prostor zápalnou směsí paliva. Obecně je tvořena palivovou nádrží, palivovými dopravními čerpadly (nizkotlakými), palivovým vedením, palivovými filtry, regulátorem tlaku paliva a vstřikovacími ventily. Palivová soustava zážehového motoru s nepřímým vstřikováním je pro představu vyobrazena na Obr. 1.



Obr. 1 Palivová soustava s nepřímým vícebodovým vstřikováním [1]

Po přivedení paliva do válců se homogenní (stejnorodá) směs paliva a vzduchu při kompresním zdvihu, tj. stlačení, zahřeje na teplotu 400°C až 500°C. Tato teplota je nižší než teplota samovznícení, tudíž je nutné směs zažehnout jiskrou z vnějšího zdroje (svíčky).[1][8]

Rozlišujeme vnější tvorbu směsi, kde je směs paliva a vzduchu vytvářena již v prostoru systému sání vzduchu, tj. mimo válec (karburátor, nepřímé vstřikování) a vnitřní tvorbu směsi, která probíhá přímo ve válci (přímé vstřikování paliva)

Vytvořená směs musí být zápalná, tj. musí být smíšená v určitém hmotnostním poměru paliva a vzduchu. Rozlišujeme dva druhy poměrů. Teoretický směšovací poměr (stechiometrický) je 1:14,8 (hmotnost paliva:hmotnost vzduch). Znamená to, že ke spálení 1 kg

paliva je nutné dodat 14,8 kg vzduchu. Systém regulace nastavuje chod motoru tak, aby směs beze zbytku shořela. Skutečný směšovací poměr se liší v závislosti na teplotě, zatížení a otáčkách motorů. V terminologii je časté užívání pojmů bohatá směs, kde je vyšší podíl paliva (směšovací poměr je např. 1:13), a chudá směs, kde je nižší podíl paliva (směšovací poměr je např. 1:16). Důležité je, že směsi jsou zápalné, pokud je směšovací poměr v rozmezí od 1:7,4 do 1:19:2. Tyto poměry udávají tzv. dolní a horní mez zápalnosti.[8]

Existují 2 základní způsoby tvorby směsi pro zážehové motory. Jedná se o karburátor, kde se vzduch do motoru nasává pohybem pístu motoru. Zúžením sací soustavy v určitém místě se lokálně zvýší rychlost proudícího vzduchu a podtlak. V této části se nachází rozprašovač paliva, ze kterého je vytvořeným podtlakem odsáváno palivo do sací soustavy. Regulace výkonu motoru a otáček probíhá pomocí otevření či přivření škrtecí klapky.[9]

Druhý způsob je použití vstřikovacích systémů, které pracují na principu přesně odměřeného jemně rozprašeného množství paliva, které odpovídá okamžitému množství nasávaného vzduchu. Dnes se většina, ne-li všichni, zabývají vývojem motorů pracujících na principu vstřikování paliva.

### 1.1.1 Vstřikování paliva

Výhody jako přesnější dávkování a snížení měrné spotřeby paliva, redukce obsahu škodlivin ve výfukových plynech jsou argumentem, proč současní výrobci používají tento systém oproti dnes již zastaralým karburátorům.

Podle způsobu tvorby směsi lze systém rozdělit na 2 druhy:

- Přímé vstřikování (přímo do válce)
- Nepřímé vstřikování (do sacího potrubí motoru)
  - Jednobodové SPI (Single Point Injection)
    - Palivo je vstřikováno centrálně z jednoho ventilu pro všechny válce motoru
  - Vícebodové MPI (Multi Point Injection)
    - Palivo je vstřikováno pro každý válec svým ventilem

Tab. 1 Provozní hodnoty tlaku a teploty zážehového motoru [1]

	Tlak ve válci [bar]	Teplota [°C]
<b>Sání</b>	-0,1 – - 0,2	70 – 100
<b>Komprese</b>	až 18	400 – 500
<b>Expanze</b>	30 – 60	2000 – 2500
<b>Výfuk</b>	3– 5	až 900

Vstřikování probíhá buď kontinuálně, kdy je regulace množství paliva daná změnou systémového tlaku nebo přerušovaně, kdy je prováděna změnou doby otevření vstřikovacích ventilů.

### 1.1.2 Porovnání vstřikovacích ventilů zážehových motorů

Úkolem ventilů je vstřikovat jemně rozprášené palivo do prostoru určeného danou aplikací (sací potrubí, válec). Přitom je nutné zachovat směšovací poměr paliva se vzduchem tak, aby byl dodržen optimální stav provozu motoru.

- **Centrální vstřikování**

- Systémy Mono – Jetronic, Mono – Motronic...

Jedná se o nízkotlaký systém (0,1 MPa), kdy je palivo vstřikováno do sacího potrubí před škrticí klapku. Umístění odpovídá původnímu karburátoru. V pouzdře ventilu je vinutí elektromagnetu, které při vybuzeném stavu zdvihá jehlu trysky. Ta se po přivedení elektrického impulzu zvedne asi o 0,06 mm ze svého sedla a umožní průtok palivu do systému. V opačném případě je jehla tlačena vinutou pružinou do svého sedla. Centrální vstřikování je vhodné pro slabší motory (do 80kW)[1,s267]

- **Vícebodové vstřikování**

- Systémy: K(E)–Jetronic, L-Jetronic, LH – Motronic a ME–Motronic...

Elektronicky řízené nepřímé vícebodové vstřikování paliva firmy Bosch, při kterém je palivo vstřikováno před sací ventil. Jednotlivé systémy se se liší hlavními veličinami regulace paliva.(množství vzduchu, objem vzduchu, tlak). Pracovní tlak je ve všech zmiňovaných systémech okolo 0,3MPa. Palivo je dodáváno elektromagnetickými ventily.

Systém tlačí jehlu ventilu do sedla tlačnou pružinou. Jejich konstrukce je v tomto případě

značně závislá na počtu sacích ventilů konkrétního motoru. Ventily se liší počtem vystřikovaných paprsků. Zdvih jehly je 0,05 až 0,1mm. Proudový impulz ovládající cívku elektromagnetu je dlouhý 1,5 až 18ms. Množství paliva závisí na době otevření trysky, průtočnosti trysky, viskozitě paliva a tlaku paliva. Pro jemnější rozprášení paliva se používají ventily s obtékajícím vzduchem[1][10]

- **Přímé vstřikování**

- Systémy: MED – Motronic, NG – Motronic...

Systém pracující s koncepcí přímého vstřikování paliva do válců. Palivovou soustavu lze rozdělit na nízkotlakou část (300–500 kPa) a vysokotlakou část (5 až 12 MPa). Součástí vysokotlakého okruhu je vysokotlaký vstřikovací ventil. Hlavní funkcí ventilu je rozprášení paliva do spalovacího prostoru, stejně jako u předchozích modelů.

Jelikož je požadavkem přímý vstřík, jsou na ventil kladeny vyšší nároky. Vstřikovací tlak 12 MPa a velmi krátké časové intervaly (volnoběh - 0,4 ms, plný výkon 5 ms) vyžadují velkou pevnost, těsnost a tepelnou odolnost. [1][10]

## 1.2 Vznětové motory

Směs paliva ve vznětových motorech vzniká vždy ve válcích motoru. Pracuje tedy s vnitřní tvorbou směsi. Nerozprášené palivo je pod velkým tlakem vstřikováno do spalovacího prostoru, kde dochází ke stlačení. Vlivem zvýšení teploty se palivo v zahřátém a stlačeném vzduchu vznítí.

### 1.2.1 Vstřikování paliva

Vznětový motor se vyznačuje z principu jeho funkce většími nároky na použité materiály. Tlaky působící ve válci demonstruje následující tabulka (Tab. 2)

Tab. 2 Provozní hodnoty tlaku a teploty vznětového motoru [1][12]

	<b>Tlak ve válci [bar]</b>	<b>Teplota[°C]</b>
<b>Sání</b>	-0,1 – - 0,2	70 – 100
<b>Komprese</b>	30 – 55	600 – 900
<b>Expanze</b>	až 160	2000 – 2500
<b>Výfuk</b>	4– 6	550 – 750



Podle způsobu vstřikování paliva lze systém rozdělit na 2 druhy:

- Přímé vstřikování (do neděleného spalovacího prostoru)
  - Vstřikovací tlak až 220 MPa
- Nepřímé vstřikování (do komůrky děleného spalovacího prostoru)
  - Vstřikovací tlak 18 až 45 MPa

### 1.2.2 Porovnání vstřikovacích ventilů vznětových motorů

Vznětové motory ve svých aplikacích používají několik základních typů vstřikovacích ventilů.

- ***Jednoprůžinový vstřikovač***

Do vstřikovače vede vysokotlaké vedení. Tlak paliva, přivedeného k jehle trysky, ji nazdvihne a otevře tak vstřikovací ventil. [1]

- ***Dvouprůžinový vstřikovač***

Je vybaven dvěma pružinami různé tuhosti. Těch lze využít při tzv. předvstřiku, kdy při menším tlaku paliva dojde pouze k pootevření ventilu, což vede k dodávce určitého množství paliva před hlavním vstřikem.[1]

- ***Sdružený vstřikovač PDE (Pumpe – Düse – Element)***

Vstřikovací tlak až 220 MPa. Součástí tohoto vstřikovače je vlastní vysokotlaké pístkové čerpadlo, tudíž není třeba vysokotlaké potrubí a ani samostatné vstřikovací čerpadlo. Agregáty s PDE jsou vybaveny vstřikovacími vačkami, kterými je stlačován píst čerpadla. Součástí je i elektromagnetický ventil, který uzavírá přítok paliva z tzv. vysokotlakého prostoru. Při překonání tlaku 18 MPa je překonána tlačná síla pružiny a začne předvstřik, při tlaku nad 30 MPa (docílený předepnutím pružiny) začne hlavní vstřik.

- ***Common Rail – Elektromagneticky a piezoelektricky řízený vstřikovač***

Palivo je čerpáno vysokotlakým čerpadlem do společného (common) vysokotlakého zásobníku tvaru trubky a z něj je vedeno k jednotlivým vstřikovačům. Vstřikovače jsou řízené elektromagnetické nebo piezoelektrické ventily. Vybuzením elektromagnetického ventilu přitáhne cívka kotvu tzv. ovládacího ventilu z klidové polohy. Sníží se tlak udržující jehlu trysky ve svém sedle a jehlu trysky nadzdvihne. Přestane-li být cívka elektromagnetu buzena,

tak se obnoví tlak na jehlu a vstřikovač se uzavře. Při vícefázovém vstřikování je nutné používat rychlé elektromagneticky řízené vstřikovače buzené velkými proudy (20 A při napětí přibližně 100V). V ovládacím obvodu bývá pro tyto účely kondenzátor s velkou kapacitou. Elektromagnetické ovládání škrtkového ventilu je možné nahradit piezoelektrickým, který je více než 2x až 3x rychlejší a umožňuje rozfázování vstřiku až na sedm samostatných vstříknutí (změkčení chodu motoru a snížení emisí škodlivých látek). [1][11]

## 2 Koncept navrhovaného ventilu

Ventil, jehož studií a návrhem se zabývá tato práce, je ovládán elektromagnetickým aktuátorem. Aktuátor je akční člen, který umožňuje přeměnu vstupní energie na energii mechanickou. Rozlišujeme dva základní typy. Jedním je konvertor, jehož výstupní mechanickou energii je možné řídit energií vstupní, a druhým je kontrolér umožňující řízení na základě jiné veličiny.[13][14]

Aktuátory mohou být rozděleny na základě vstupní veličiny, kterou může být například teplota, tlak kapaliny či elektrický proud nebo napětí.[15] Poslední zmiňované se nazývají elektromechanické aktuátory. Další rozdělení patrné v Tab. 3 je možné podle stupňů volnosti či podle počtu stabilních poloh kotvy.

Tab. 3 Rozdělení aktuátorů

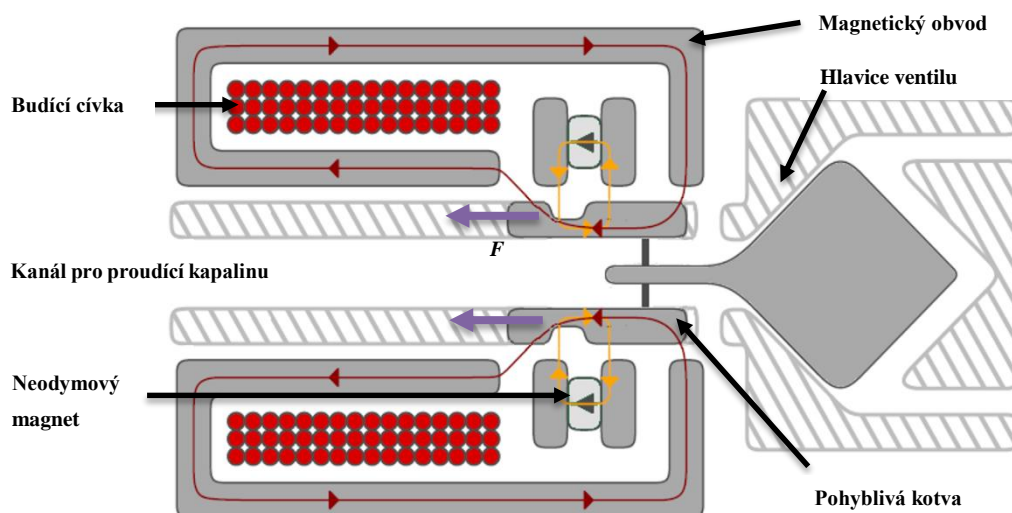
<b>Vstupní energie</b>	hydraulické pneumatické elektromechanické speciální
<b>Počet stabilních poloh</b>	monostabilní bistabilní
<b>Stupně volnosti</b>	lineární rotační planární kulové

Vzhledem k široké definici pojmu elektromechanický aktuátor lze do této skupiny zařadit všechny elektrické motory a další akční členy. Tato práce je však úzce zaměřena na elektromagnetický aktuátor pracující se silovým působením magnetického pole. Vstupní veličinou, která toto pole vyvolává je elektrický proud.

Vlivem značného vývoje v oblasti materiálů založených na bázi vzácných zemin je možné využít jako zdroj magnetického pole také permanentní magnety.

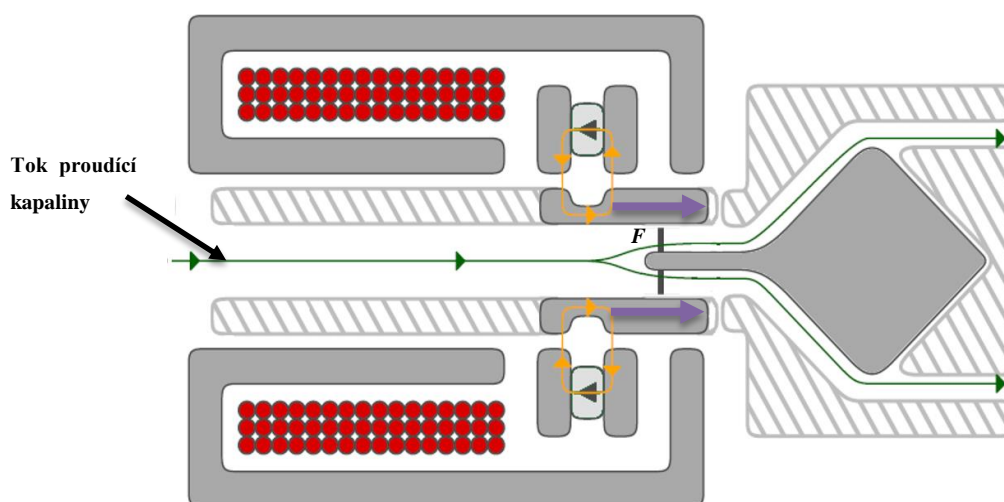
Elektromagnetické aktuátory jsou obecně nedílnou součástí mnoha komplexních systémů. Mezi jejich výhody patří zejména rychlost, jednoduchost, robustnost a snadné řízení. V automobilovém průmyslu najdou využití zejména v pozici vstříkovacích ventilů [1][16][18], elektromagnetické spojky, tlumiče nebo v systému aktivního zavěšení kol[17].

Vlastní koncepce navrhovaného aktuátoru vychází z patentu [19], který byl vydán v roce 1941 ve Spojených státech amerických. Jedná se o válcovitý magnetický obvod tvořený ocelí, ve kterém je navinuta cívka. Ta po vybuzení elektrickým proudem vytváří magnetický indukční tok, který se uzavírá přes pohyblivou ocelovou kotvu umístěnou v centrální části aktuátoru. Vzniklé magnetické pole vytváří sílu, která na takto umístěnou kotvu svými účinky působí (na Obr. 2 a Obr. 3 je působící síla  $F$  znázorněna fialovou šipkou).



Obr. 2 Princip navrženého elektromagnetického ventilu – zavřený stav

Pro okamžik, kdy není cívka vybuzena, je uvnitř celého magnetického obvodu umístěn neodymový magnet, který svými účinky působí jako pružina při zavírání aktuátoru. Na kotvě aktuátoru se nachází drážka, která slouží ke zvýšení tažné síly permanentního magnetu.



Obr. 3 Princip navrženého elektromagnetického ventilu - otevřený stav

Hlavním problémem, se kterým se potýkají současné koncepty elektromagnetických aktuátorů ve funkci ventilu, je jejich konstrukční složitost. Většina systémů používá k zajištění tzv. monostabilního režimu pružiny. Obecně platí, že nadbytečné konstrukční prvky snižují spolehlivost ventilu a komplikují jeho řízení. Základní myšlenka navrženého aktuátoru je eliminace konstrukční složitosti využitím duté tvarované kotvy, která je umístěna přímo v místě svého působení. Ventil je tedy přímo nasazen na potrubí skrz, které protéká kapalina.

Monostabilní ventil pracuje standardně ve dvou základních režimech (otevřeno/zavřeno). Vypnutý stav (zavřeno) je stabilní polohou, která je zajištěna pomocí výše uvedených permanentních magnetů. Při vybuzení cívky elektromagnetu dojde k vytvoření magnetického toku a kotva je vybavena do režimu otevřeno. Princip funkce vyhovuje požadavkům na bezpečnost, kdy je požadováno uzavření ventilu při ztrátě napájení.

Mezi hlavní výhody konceptu patří:

- Nepřítomnost nadbytečných konstrukčních prvků
- Monostabilní režim zajištěn pomocí permanentních magnetů (absence pružin)
- Plně kontrolované řízení ventilu stejnosměrným proudem cívkou
- Permanentní magnet není demagnetován a nehrozí tak riziko jeho poškození

### 3 Vymezení cílů práce

Cílem této práce je formulovat a popsat matematický model obecného elektromagnetického ventilu, provést jeho teoretický rozbor a na základě sestaveného modelu pak navrhnout konkrétní řešení systému elektromagnetického ventilu pro použití v automobilu. Následně pak navrhnout systém řízení a experimentálně ověřit danou technologii porovnáním parametrů modelu s výsledky experimentu provedeném na zkonstruovaném ventilu. Parametry jsou stanoveny na základě požadavků pro automobilový průmysl. Cílem práce není zkonstruovat ventil do konkrétního automobilu. Jejím smyslem je především ověřit možnost využití nového konceptu elektromagnetického ventilu.

Z hlediska modelování se jedná o velmi komplexní úlohu, při které je nutné respektovat důležité fyzikální procesy jako například výpočty zatěžování vlivem procházejícího paliva, které během činnosti v elektromagnetickém ventilu nastávají. Práce tedy popisuje nelineární model fyzikálních polí, elektrických obvodů a dynamických dějů. Vzhledem k náročnosti a množství řešení, které se při návrhu nabízejí, je obtížné nalézt optimální variantu. Vlivem nepřesnosti vstupních parametrů modelu je nutné často uvažovat různé nepřesnosti, kterými jsou například materiálové vlastnosti nebo nevhodně zvolené rozměry jednotlivých částí.

## 4 Matematický model

V této kapitole je formulován matematický model obecného elektromagnetického aktuátoru. Koncept je tvořen modely magnetického pole, elektrického obvodu a modelem dynamiky pohyblivé části (kotvy elektromagnetu).

### 4.1 Model magnetického pole

Rozložení magnetického pole lze v případě obecného elektromagnetického aktuátoru popsat parciální diferenciální rovnicí vycházející z první Maxwellovy rovnice formulované pro vektorový potenciál  $\mathbf{A}$

$$\operatorname{rot} \left( \frac{1}{\mu(B, T)} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) - \gamma \mathbf{v} \times \operatorname{rot} \mathbf{A} + \gamma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (1)$$

kde  $\mu(B, T)$  vyjadřuje permeabilitu, která je nelineárně závislá na velikosti magnetické indukce  $\mathbf{B}$  a teplotě  $T$ .  $\mathbf{B}_r$  vyjadřuje remanentní magnetickou indukci permanentních magnetů,  $\gamma$  měrnou elektrickou vodivost,  $t$  čas a  $\mathbf{J}_{\text{ext}}$  externí proudovou hustotu. [20]

Model magnetického pole lze ve většině případů zjednodušit. Teplotní závislost relativní permeability lze zanedbat, pokud je teplota aktuátoru stálá a nepřesahuje maximální provozní teplotu. Je možné také neuvažovat vznik vířivých proudů vlivem časové změny magnetického pole a při nízkých rychlostech i vznik těchto proudů vlivem pohybu elektricky vodivých těles.

### 4.2 Model elektrického obvodu

Základní model elektrického obvodu aktuátoru je popsán obyčejnou diferenciální rovnicí

$$Ri + L(i, \delta, \mathbf{v}) \frac{di}{dt} = U_0, \quad (2)$$

kde  $R$  je elektrický odpor cívky,  $i$  je časově proměnný proud v obvodu,  $L(i, \delta, \mathbf{v})$  je indukčnost závislá na velikosti budícího proudu, poloze pohyblivé kotvy  $\delta$  a její rychlosti  $\mathbf{v}$ .  $U_0$  je napájecí napětí zdroje.

Model elektrického obvodu je však propojen s modelem magnetického pole pomocí nelineární indukčnosti  $L$  a pomocí budícího proudu  $i$

$$i = \int_S \mathbf{J}_{\text{ext}} dS. \quad (3)$$

### 4.3 Model dynamiky pohyblivé části

Dynamika systému je popsána pohybovými rovnicemi

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_c, \quad (4)$$
$$\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{s}}{dt},$$

kde  $m$  je hmotnost pohyblivé kotvy,  $\mathbf{v}$  její rychlost,  $t$  čas,  $\mathbf{F}_c$  celková síla působící na kotvu a  $\mathbf{s}$  dráha pohybu kotvy

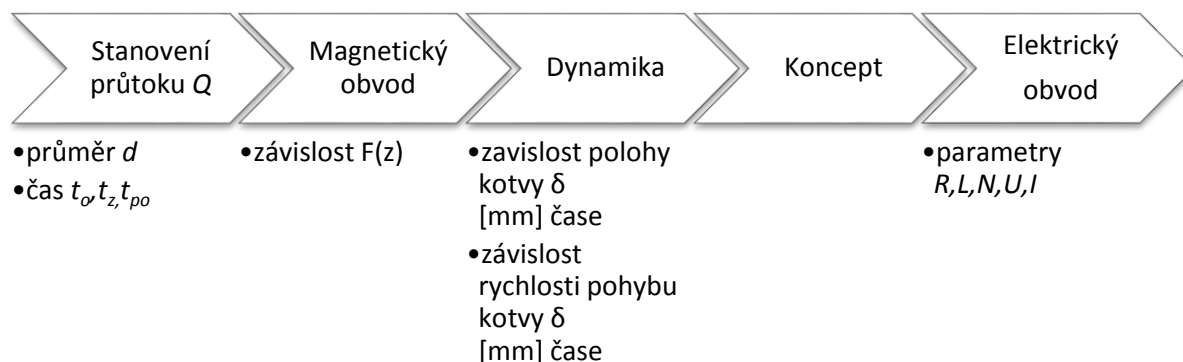
Do celkové síly  $\mathbf{F}_c$  se promítají všechny síly působící na pohyblivou část. Ty jsou pro různé případy aktuátorů rozdílné, ale v každém případě je  $\mathbf{F}_c$  tvořena magnetickou silou a silou zatěžující danou část.



## 5 Návrh akčního členu ventilu

Jedním ze zásadních kritérií ventilu navrženého pro automobilový průmysl je pečlivý návrh. A to jak z hlediska designového, tak z hlediska funkčních parametrů. V první řadě je nutné stanovit fyzikální rozměry daného zařízení. Ty jsou závislé na konkrétní aplikaci. Těchto rozměrů dále konstruktér využije při dimenzování parametrů vstřikovacího ventilu.

Návrh elektromagnetického ventilu pro použití v aplikaci vstřikovače vyžaduje několik zásadních kroků. Lze ho rozdělit na návrh mechanické části a návrh elektrické části. Postup návrhu je patrný z následujícího diagramu.



Obr. 4 Diagram návrhu elektromagnetického aktuátoru

V první řadě se jedná o stanovení průtoku  $Q$  daného ventilu. V této části návrhu je stanoven průměr  $d$  ventilu, ve kterém proudí kapalina. Na základě znalosti o dynamice spalovacích motorů je nutné stanovit čas  $t_o$  nutný k otevření či  $t_z$  nutný k uzavření ventilu. Na základě těchto informací lze sestavit magnetický návrh, pro který je stanoven průběh sil působících na kotvu elektromagnetu v závislosti na poloze pohyblivé části elektromagnetu, a to jak při otevírání, tak při zavírání ventilu. Dále je pro tento návrh zkoumána dynamika, tj. časové závislosti polohy kotvy elektromagnetu a zároveň rychlosti otevírání/zavírání. Na základě těchto dat je stanovena průměrná síla  $F_{avg}$  (minimální síla  $F_{min}$ ), která je nutná pro splnění podmínek daných časem  $t_o$  nebo  $t_z$ . Při nesplnění těchto podmínek je nutné upravit magnetický návrh tak, aby daným limitům vyhověl. Výsledkem tohoto postupu je proudová hustota  $J_{ext}$ , pro kterou je návrh stanovován a koncept, který splňuje dané požadavky. Tyto dva aspekty tvoří základní výchozí podmínky pro podobu realizovaného návrhu.

Dále je vývoj soustředěn na elektrický obvod, který je díky přítomnosti cívky tvořen odporem vinutí  $R$  a indukčností cívky  $L$ . Ze znalosti parametrů navržených vodičů cívky a celkového proudu daným  $J_{\text{ext}}$  je stanoven počet závitů cívky  $N$ . Důležité je také určit napájecí napětí  $U$  a s tím související protékající proud  $i$ . Jelikož se jedná o zátěž s induktivním charakterem, tak při spínání dochází k přechodovému ději. Vhodný návrh by měl zajistit časovou konstantu děje tak, aby negativně neovlivňovala celkovou dynamiku akčního členu.

## 5.1 Průtok ventilu

Účelem navrhovaného zařízení není aplikace do konkrétní zástavby, tudíž nejsou k dispozici technická data, která by v případě návrhu pro konkrétní aplikaci dostupná byla

V případě elektromagnetického ventilu je nutné při stanovení šířky počítat s vinutím cívky, která tento rozměr zvětšuje. Délku ventilu lze díky jeho aplikaci očekávat do 15 centimetrů.

V následujícím textu je demonstrována metoda stanovení průměru ventilu přibližným výpočtem pro motory s různými zdvihovými objemy a dále pak pomocí práce se statistickým souborem hodnot běžně dostupných vstřikovacích ventilů.

### 5.1.1 Stanovení průtoku ventilu na základě výpočtu

Výpočet je založen na stanovení potřebného průtoku ventilu ze znalosti parametrů motorů. Jedná se o zdvihový objem motoru, počet válců a kompresní poměr.

Vycházíme z teoretického stechiometrického poměru (viz 1.1), který udává, kolik kg vzduchu je nutné k dokonalému spálení (všechny uhlíkové atomy a všechny vodíkové atomy paliva se vzdušným kyslíkem zoxidují na oxid uhličitý, popř. vodu. K takovému spálení 1 kg benzínu je třeba 14,8 kg vzduchu.

Pro získání hmotnosti jednotlivých složek palivové směsi je nutný přepočítání na objem podle vzorce:

$$V = \frac{m}{\rho}, \quad (1)$$

kde je  $m$  hmotnost složky hořlavé směsi a  $\rho$  je hustota. Potřebné množství je pak stanoveno ze vztahu pro stechiometrický poměr:

$$14.8 = \frac{m_{\text{vzduchu}}}{m_{\text{benzinu}}} = \frac{\rho_{\text{vzduchu}} \cdot V_{\text{vzduchu}}}{\rho_{\text{benzinu}} \cdot V_{\text{benzinu}}}, \quad (2)$$

Hustota benzínu je přibližně  $750 \text{ kg/m}^3$  a hustota vzduchu je  $1,29 \text{ kg/m}^3$ .

Ze vztahu pro kompresní poměr motoru lze získat celkový objem prostoru, do kterého je směs nasávána.

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{zdvihový}} + V_{\text{kompresní}}}{V_{\text{kompresní}}}, \quad (3)$$

kde  $V_{\text{zdvihový}}$  je objem vypočtený ze zdvihu pístu ve válci a vrtání válce a  $V_{\text{kompresní}}$  je objem spalovacího prostoru. Jinak řečeno je tento vztah poměr směsi nasáté ku směsi stlačené.

Z tohoto vztahu lze získat informaci o celkovém objemovém množství nasávané směsi paliva. Odtud je možné za znalosti výše uvedeného stechiometrického poměru stanovit potřebné množství paliva na jeden sací cyklus, který je u čtyřdobých motorů jednou za 2 otáčky klikové hřídele (motoru). Následující tabulka (Tab. 4) zobrazuje vypočtená data u několika náhodně vybraných nepřepřlňovaných benzinových agregátů.

Tab. 4 Hodnoty objemu vstřikovaného paliva při nejvyšších otáčkách

	V[cm <sup>3</sup> ]	Počet válců	$\varepsilon$	V <sub>1 válec</sub>	V <sub>1 válec</sub> + V <sub>kompresní prostor</sub>
<b>Model 1</b>	999,00	3	10,5	333	368,1
<b>Model 2</b>	1289,00	4	10,5	322,6	356,2
<b>Model 3</b>	1595,00	4	10,5	398,8	440,7
<b>Model 4</b>	1242,00	4	11,1	310,5	341,2
<b>Model 5</b>	4308,00	8	11,3	538,5	590,8

	Nejvyšší pracovní otáčky	V <sub>paliva</sub> [cm <sup>3</sup> /1ot.]	V[cm <sup>3</sup> /1s]	V[cm <sup>3</sup> /1min]
<b>Model 1</b>	5700	0,0428	2,0315	<b>121,89</b>
<b>Model 2</b>	5500	0,0414	1,8970	<b>113,82</b>
<b>Model 3</b>	6000	0,0512	2,5607	<b>153,64</b>
<b>Model 4</b>	5500	0,0397	1,8174	<b>109,05</b>
<b>Model 5</b>	9000	0,0687	5,1488	<b>308,93</b>

Z tabulek je patrné, že průtoky dopočítané touto metodou se pohybují v rozmezí od 109,05 do 308,93 cm<sup>3</sup>/min. Z tohoto údaje je při znalosti vstřikovacích tlaků a vzorců uvedených dále možné zjistit potřebný průměr trysek ventilů k daným aplikacím. Tyto data jsou však pouze vzorkem a demonstrují jeden ze způsobů, jak průměr (popřípadě průměr trysky) navrhovaného ventilu zjistit. Tuto metodu je možné v praxi dále rozšířit o výpočet vycházející z hodnot účinnosti spalovacího motoru, kdy dopočteme energetický příkon při potřebném výkonu na hřídeli motoru. Samozřejmostí je znalost energetická využitelnost paliva. Vhodnějším způsobem pro tuto aplikaci je porovnat dostupné ventily od předních výrobců a stanovit průtok na základě těchto dat.

### 5.1.2 Stanovení průtoku na základě porovnání dostupných vstřikovačů

Ve výběrovém souboru reprezentující 701 vzorků [21][22][23] dostupných vstřikovacích ventilů jsou zastoupeny jak modely vyhovující svým průtokem výkonným agregátům, tak modely s nízkými hodnotami průtoku, používané zejména u slabších motorizací. Jelikož není dovoleno veřejně publikovat tyto informace.

V následující tabulce (Tab. 5) jsou zobrazena výsledná data charakterizující statistický soubor. Informace o průtoku jsou u výrobců uváděné pro látku N-heptan v jednotkách g/min. Tato látka má hustotu i viskozitu odlišnou od běžného paliva a proto jsou tyto tabulky uváděny spíše pro porovnání jednotlivých ventilů. Hodnoty ve zpracovávaném souboru jsou pro potřeby stanovení průtoku přepočteny na hustotu benzínu a převedeny z g/min na cm<sup>3</sup>/min. Údaje jsou měřené při plně otevřeném ventilu při stálém testovacím tlaku 3 bar [odkaz] Skutečné množství dodávaného paliva do jednotlivých motorů se bude lišit v závislosti na otáčkách a zatížení motoru.

Tab. 5 Výsledky statistické analýzy konvenčních ventilů

<b>Objemový průtok [cm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>270,96</b>
<b>Maximum [cm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>1606,00</b>
<b>Minimum [cm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>80,00</b>
<b>Průměrná absolutní odchylka [cm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>110,60</b>
<b>Směrodatná odchylka [cm<sup>3</sup>/min]</b>	<b>188,32</b>
<b>25% kvantil</b>	<b>191</b>
<b>Medián</b>	<b>204</b>
<b>75% kvantil</b>	<b>277</b>
<b>Průměr navrhovaného ventilu</b>	<b>0,692</b>

Z variačního rozpětí, které je definováno jako rozdíl maximální a minimální hodnoty, je patrné, že v souboru se vyskytují různorodé hodnoty. Směrodatná odchylka jako ukazatel variability to svoji hodnotou dokazuje. Kvantily svými hodnotami vypovídají, že vysoká hodnota maxima je spíše výjimkou, což je dáno tím, že tyto vysokoprůtokové ventily nejsou v automotive aplikacích tak časté, jelikož se často jedná o sportovní automobily, kterých není tak velké množství.

Parametrem nutným pro určení průtoku ventilu touto metodou je plocha, kterou kapalina protéká, tj. otvor trysky, který je zpřístupněn vybavením ventilu. Stanovení plochy ventilu vychází ze vzorce pro objemový průtok kapaliny:

$$Q_v = Sv, \quad (4)$$

kde  $S$  je plocha průřezu ventilu a  $v$  je rychlost proudění kapaliny.

Průměr magnetické části ventilu, tj. před tryskou, lze v prvním přiblížení stanovit na základě úvah z Bernoulliho proudové rovnice platící pro ideální kapalinu [24]

$$\frac{1}{2}\rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 + p_2, \quad (5)$$

kde  $v_1$  je rychlost proudění kapaliny a  $p_1$  je tlak v kapalině v oblasti elektromagnetického aktuátoru a  $v_2$  je rychlost proudění kapaliny a  $p_2$  je tlak v kapalině v oblasti trysky. Z rovnice kontinuity

$$Q_v = S_1 v_1 = S_2 v_2 = konst., \quad (6)$$

kde  $S_1$  je průřez oblasti elektromagnetického aktuátoru a  $S_2$  je průřez trysky, platí, že objemový průtok kapaliny je stejný na obou průřezech zkoumaného vedení. V případě úvah, že  $S_1$  bude mnohem větší než  $S_2$ , lze zanedbat  $v_1$  a vyjádřit  $v_2$  z Bernoulliho rovnice (předpokládáme znalost  $Q_v$  a rozdílu tlaku). Zkoumaná aplikace definuje tlak  $p_2$  jako tlak ve válci motoru nebo tlak v sacím potrubí (přímé či nepřímé vstřikování).

Ze získané rychlosti proudění  $v_2$  lze z následujícího vzorce stanovit průřez trysky.

$$S_2 = \frac{Q_v}{v_2} \quad (7)$$

Při určování průřezu (či průměru) otvoru v elektromagnetickém aktuátoru, tj. bez trysky, je důležité, aby byl dle předchozích úvah mnohem větší než průměr trysky (0,2 – 0,5 mm). Průměr byl v návrhu stanoven na 7mm.

Stanovení průměrů a průtoků ventilu je v reálných aplikacích složitější problém, jelikož je nutné započítat, že kapalina není ideální a dále přizpůsobit člen do konkrétní palivové soustavy.

## 5.2 Stanovení dynamických parametrů

Pro stanovení otevíracího času  $t_o$  a zavíracího času ventilu  $t_z$ , které jsou nutné pro bezproblémový chod motoru, je potřebné vycházet z několika parametrů, které budou voleny na základě reálných použití v motorech automobilů. Pro tento údaj je to zejména rychlost spínání, která je určena otáčkami motoru. Pro určení tohoto parametru je zvoleno 6000 otáček klikového hřídele za minutu (100 otáček za sekundu). Pro standartní čtyřdobý motor platí, že je palivo vstřikováno do válců každou druhou otáčku klikového hřídele. To znamená, že za těchto podmínek platí, že palivo bude vstřikováno 50krát za sekundu ( $f$ ). Z následujícího vzorce je možné dopočítat periodu jednoho vstřiku.

$$T_{\text{vstřik}} = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms} \quad (8)$$

Celková doba vstřiku se však nutně musí rozdělit alespoň na zmiňovanou dobu otevření  $t_o$  a dobu zavření  $t_z$ . Takový ventil by však neměl žádné uplatnění, a proto byl stanoven ještě parametr doby plného otevření  $t_{po}$ , který byl stanoven na minimálně 10 ms. Z toho vyplývá, že akční člen, který je předmětem práce, by měl být schopen dodržet maximální limit 10 ms v součtu pro otevření a zavření. Pokud bude uvažována doba otevření symetrická s dobou zavření, tak parametr  $t_o$  je určen dle následujícího vztahu

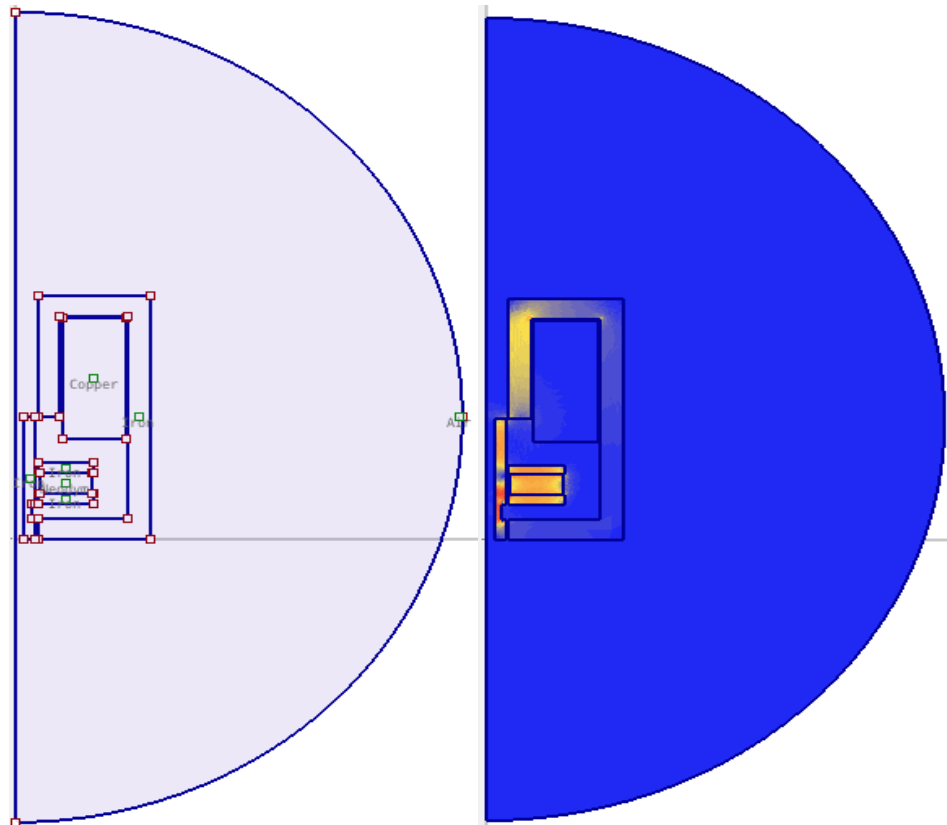
$$t_o + t_z = \frac{T_{\text{vstřik}} - t_{po}}{2} = \frac{20 - 10}{2} = 5 \text{ ms} \quad (9)$$

## 5.3 Magnetický obvod

Celý návrh magnetického obvodu byl realizován pomocí simulačního programu Agros2D, vytvořeným na katedře teoretické elektrotechniky Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Na Obr. 5 exportovaném z výše uvedeného software je patrná konfigurace základního modelu akčního členu v osově symetrickém průřezu. Na obrázku je umístěna hranice řešené oblasti, které byla nastavena Dirichletova podmínka  $A=0$ , tj. nulový magnetický potenciál.

Jednotlivé oblasti modelu jsou definovány svým materiálem, který určuje, jak se budou při simulaci chovat. Již z tohoto obrázku je patrné, že oblast pohyblivé kotvy je přesycena (červená barva) a bude nutné geometrii upravit.



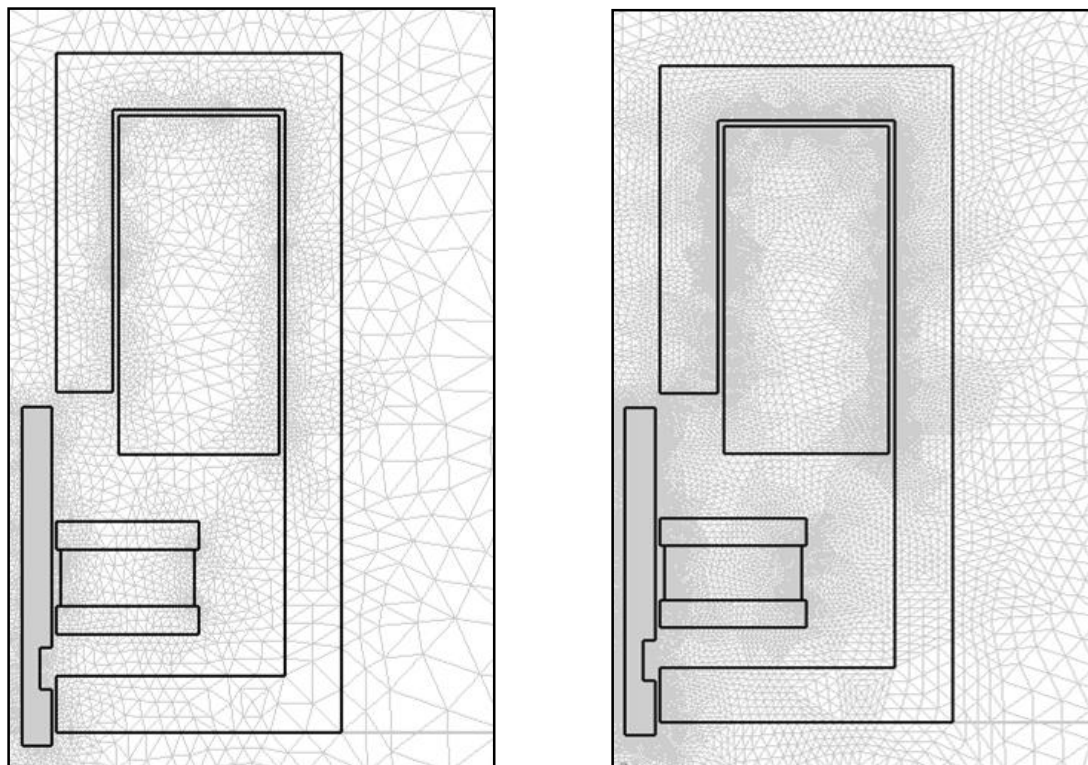
Obr. 5 Definiční oblast problému a zobrazení magnetické indukce v Agros2D

### 5.3.1 Konvergence řešení

Při modelování úlohy je třeba zajistit podmínky, pro co nejpřesnější stanovení výsledků. Je zapotřebí vhodně zvolit definiční oblast a provést její korektní diskretizaci, aby nedocházelo k chybám výsledků daných špatně zvoleným nastavením řešeného problému, a zároveň nebyl algoritmus zbytečně výpočetně náročný. Jelikož nejsme schopni tuto konfiguraci předem stanovit, je nezbytně nutné provést tzv. konvergenci řešení.

Konvergence řešení je založena na zkoumání vlivu různého zjemnění řešené sítě a řádu polynomu, kterým je dané řešení na elementech sítě proloženo. Navýšení zjemnění sítě a zároveň i řádu polynomu může být vhodné pro přesnější řešení dané úlohy za cenu zvýšení výpočetní náročnosti. Vzhledem k tomuto problému je však možné, že pro stanovení výsledků je výkon soudobých výpočetních systémů nedostatečný nebo výpočet trvá velmi dlouho.

K získání, co nejpřesnějších výsledků v odpovídajícím čase nelze tedy pouze nastavit, co nejvyšší počet zjemnění a řád polynomu Obr. 6 porovnává nezjemněnou (počáteční) diskretizační síť se sítí lineárně zjemněnou.



Obr. 6 Porovnání nezjemněné a zjemněné sítě

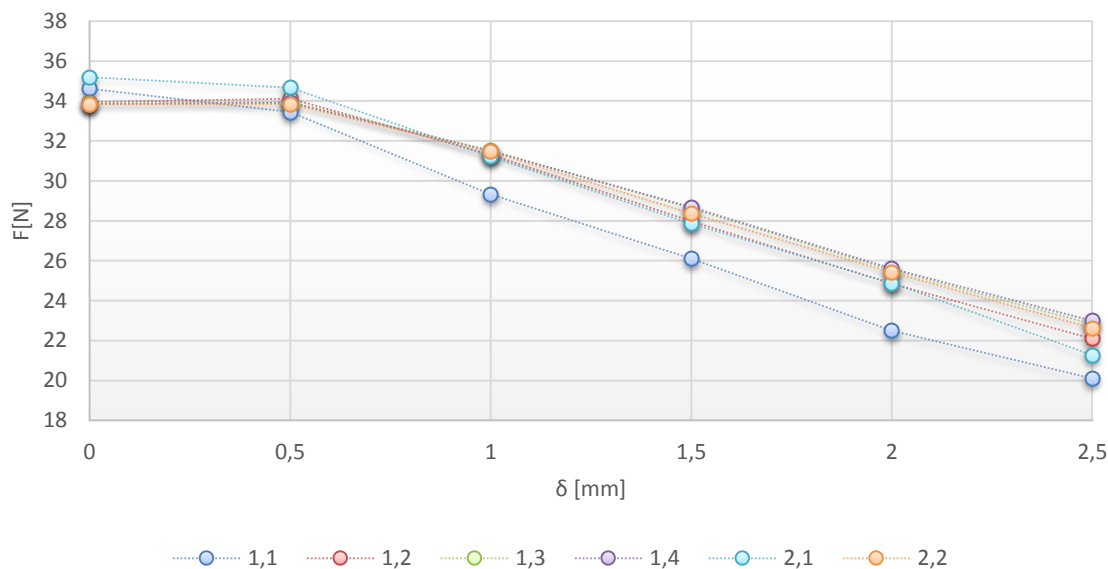
V následující tabulce jsou výsledky konvergence řešení při proložení řešených oblastí polynomy 1. a 2. řádu. Byla zkoumána závislost otevírací síly na poloze pohyblivé kotvy.

Tab. 6 Konvergence při proložení polynomy různých řádů

Počet zjemnění	Řád polynomu	Síla F[N] v závislosti na poloze $\delta$ [mm]					
		0	0,5	1	1,5	2	2,5
1	1	34,61	33,45	29,33	26,11	22,50	20,11
	2	33,94	34,12	31,32	27,98	24,85	22,10
	3	33,87	33,95	31,52	28,62	25,52	22,84
	4	33,85	33,91	31,49	28,68	25,61	22,99
2	1	35,20	34,66	31,21	27,85	24,89	21,28
	2	33,85	33,85	31,45	28,36	25,42	22,63



Z průběhu grafu na Obr. 7 je možné usoudit, že pokud je zvolen 2. řád polynomu a počet zjemnění 1, působící síla se již výrazně nemění, tudíž je výpočetní náročnost a přesnost dostatečná ke stanovení výsledků.



Obr. 7 Výsledek konvergence řešení

Konvergence se týká také umístění fiktivní hranice definiční oblasti (viz Obr. 5, strana 25) do takové vzdálenosti, aby nedocházelo k ovlivnění výsledků. Určení vzdálenosti je analogické s výše uvedeným postupem.

Dle výsledků konvergence postačí vnější (fiktivní) hranici definiční oblasti umístit ve vzdálenosti 0,2 metrů při zachování podmínek odvozených z výpočetní složitosti. Po provedené konvergenci by výsledek již neměl být ovlivněn zvolenými podmínkami modelu.

## 5.4 Dynamika systému

V aplikacích, které jsou náročné na rychlost spínání, je nutné podrobit návrh simulaci dynamiky mechanických částí. Tato analýza se týká pouze pohyblivé části ventilu. Pro správnou činnost spalovacího motoru byly v kapitole 5.2 stanoveny potřebné časy  $t_0$  a  $t_z$  nutné k otevření a zavření navrhovaného akčního členu. Tyto časy jsou mezními hodnotami, které je nutné dodržet a na jejímž základě bude upravován model, tak aby tyto parametry splnil.

K simulacím dynamiky je využíván software MATLAB. Je nutné nejprve stanovit vstupní proměnné, které dynamiku pohyblivé části ovlivňují. Jedná se zejména o hmotnost ocelové kotvy, kterou lze získat ze znalosti hustoty materiálu  $\rho$  a jeho objemu  $V$ . Hustota oceli je  $7855 \text{ kg/m}^3$  a objem  $V$  lze získat dopočtením z návrhu.

V rámci problému je řešena soustava obyčejných diferenciálních rovnic

$$\frac{ds}{dt} = v \quad (10)$$

$$\frac{dv}{dt} = a = \frac{F}{m}$$

Z principu navrhovaného ventilu je určena síla, kterou působí procházející kapalina na plochu sedla ventilu. Návrh sedla (hlavice) ventilu není v tuto chvíli předmětem práce, a proto je stanoven na 1,3 cm. Obsah plochy sedla je spočten dle vztahu

$$S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot 0.0065^2 = 0.00013 \text{ m}^2 \quad (11)$$

Ze znalosti obsahu plochy sedla a tlaku (použijeme tlak 3 Bar, který je referenční při testování vstřikovacích ventilů u výrobců) je podle vzorce (12) dopočtena síla.

$$F = pS \doteq 300000 \cdot 0,00013 \doteq 40 \text{ N} \quad (12)$$

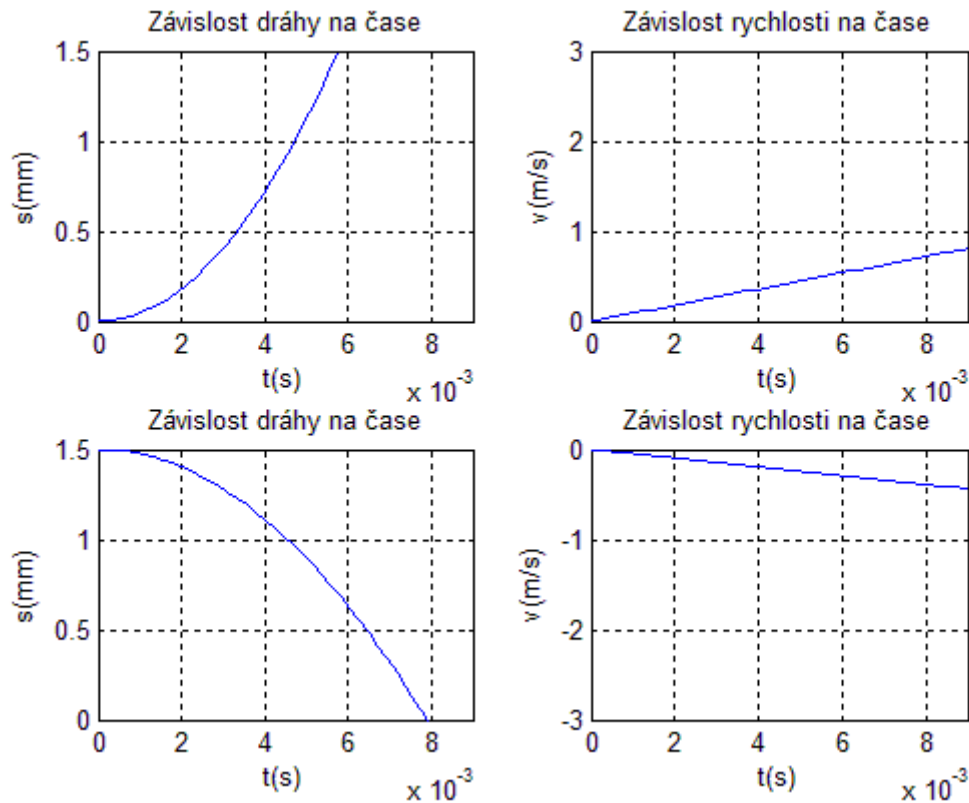
Při provozu ventilu působí stálá síla 40 N uzavírající ventil. Při otevírání je tedy nutné tuto sílu překonávat a při zavírání je síla o tuto hodnotu větší.

Pro stanovení dynamických charakteristik jsou využity výsledky statických charakteristik, ze kterých je možné vidět, jak se mění průběh sil v závislosti na poloze pohyblivé kotvy.

Dynamické vlastnosti jsou nejvíce ohroženy nejkritičtějšími hodnotami působících sil. V rámci otevírací i zavírací charakteristiky je počítáno vždy s nejmenší hodnotou tažných sil.

Dle zdvihu ventilu, který je určen na 1,5 mm, jsou dopočteny dynamické charakteristiky. Díky nízkým hodnotám působících sil není možné v tomto případě uvažovat s výše uvedenou stálou silou 40 N, jelikož by ventil principiálně vůbec nefungoval. Z této skutečnosti vyplývá, že danou konfiguraci bude nutné upravit.

Průběhy charakteristik působících v závislosti na poloze kotvy nejsou zcela konstantní. Vzhledem k tomu, že zkoumáme, zda navrhované zařízení splní časový limit pro otevření či zavření, je do modelu jako působící síla  $F$  dosazována minimální působící síla  $F_{\min}$  (otevírací/zavírací). Tím je zabezpečeno, že časy, stanovené touto analýzou, by neměly být nikdy delší a navrhovaný ventil by měl tato omezení splnit. Na Obr. 8 jsou zobrazeny průběhy dynamických charakteristik, ze kterých je patrné, že ventil v současné konfiguraci nesplňuje podmínky na něj kladené.



Obr. 8 Průběhy dynamických charakteristik (bez uvažování stálé tažné síly)

Otevírací čas ventilu v dané konfiguraci, bez uvažování stálé síly 40 N, je 5,9 ms a zavírací čas je 7,8 ms.

## 5.5 Optimalizace magnetického obvodu

Jelikož dosažené parametry nesplňují požadavky kladené na aplikaci vstřikovacího ventilu, je nezbytná úprava vlastností magnetického obvodu. Obdobným postupem naznačeným v předchozích kapitolách je docíleno návrhu, jehož parametry jsou v Tab. 7.

Tab. 7 Výsledky modelu po optimalizaci

poloha $\delta$ [mm]	0	0,5	1	1,5
Otevírací síla $F_o$ [N]	97,43	130,63	171,06	214,46
Zavírací síla $F_z$ [N]	-100,182	-95,34	-86,60	-76,34
Čas otevření $t_o$ [ms]	3,1			
Čas uzavření $t_z$ [ms]	3,2			

Tyto výsledky jsou již dostatečné z hlediska vstupních omezení, avšak model je podroben citlivostní analýze z hlediska jednotlivých parametrů magnetického návrhu a jejich vlivu na změnu působících sil.

Citlivostní analýza je způsob určení optimální varianty, tedy takové konfigurace modelu, která podává nejlepší výsledky při zachování stejných či menších rozměrů. Z dat v Tab. 7 je patrná značná polohová závislost těchto sil. Citlivostní analýza může vhodně ovlivnit jak velikost působících sil, tak její konstantní průběh v závislosti na poloze kotvy.

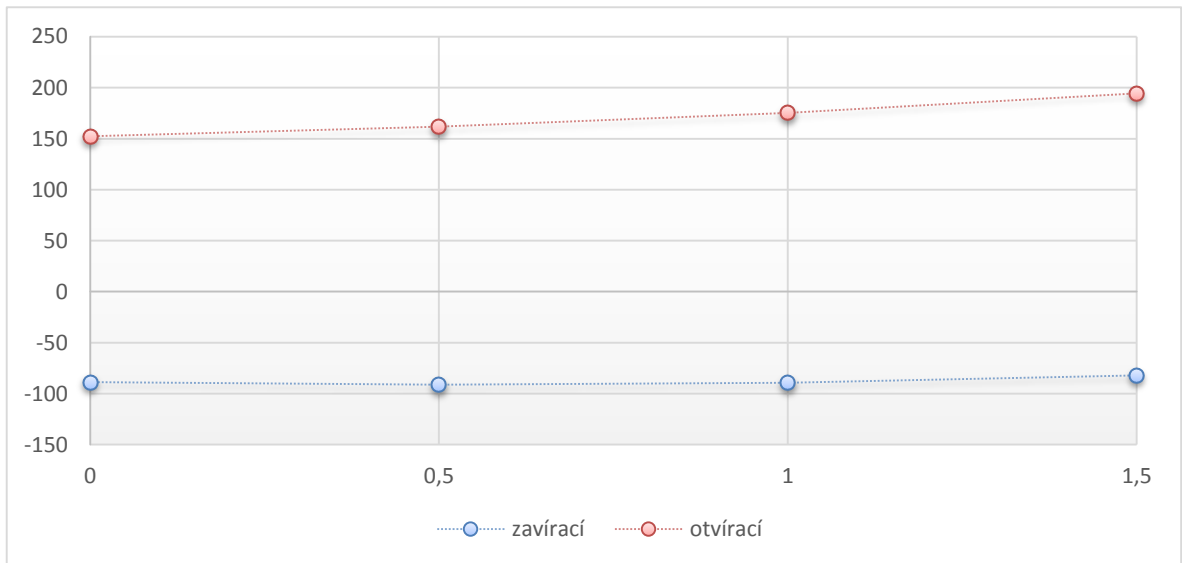
Průběhy zobrazující jednotlivé kroky citlivostní analýzy, kdy je zkoumán vliv šířky, délky a úhlu natočení kotvy magnetického obvodu, dále vliv velikosti magnetické ocelové části umístěné pod neodymovým magnetem a v neposlední řadě parametry drážky umístěné na pohyblivé kotvě, jsou zobrazeny v příloze A.

Konfigurace modelu je z charakteristik vybírána s ohledem na nejvyšší hodnoty obou sil a na konstantní průběh působících sil v závislosti na poloze kotvy. Parametry se díky citlivostní analýze změnily následovně (Tab. 8).

Tab. 8 Výsledky modelu po optimalizaci a citlivostní analýze

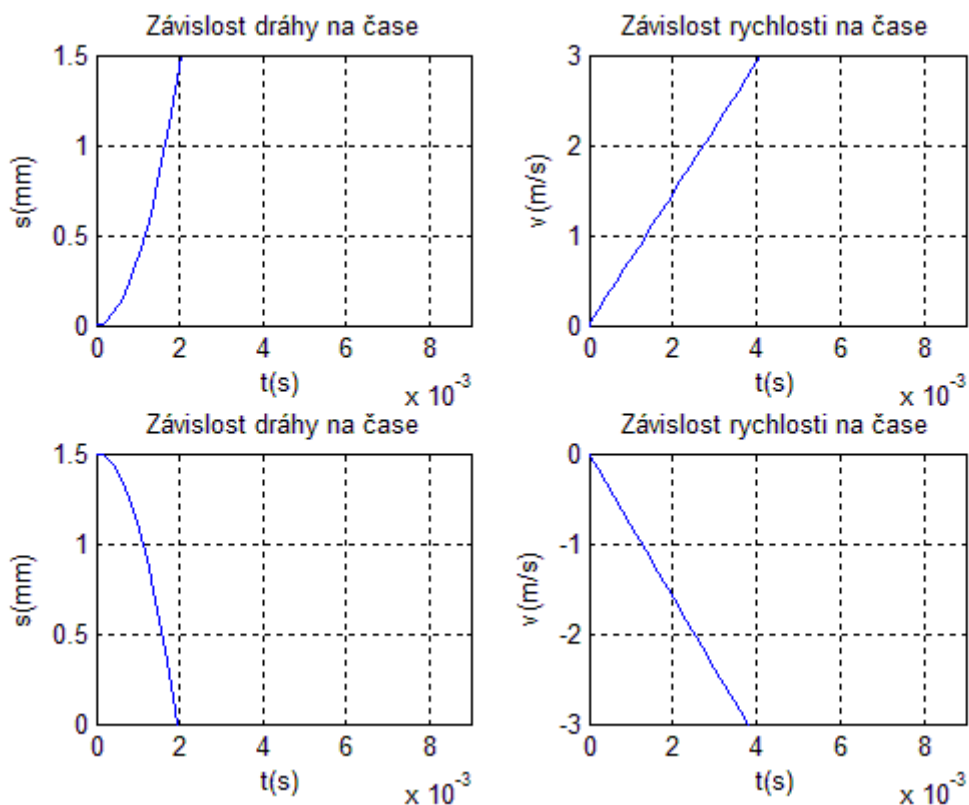
poloha $\delta$ [mm]	0	0,5	1	1,5
Otevírací síla $F_o$ [N]	152,3481	161,734	175,3875	194,5907
Zavírací síla $F_z$ [N]	-88,6608	-91,3245	-89,3628	-82,1909
Čas otevření $t_o$ [ms]	2,2			
Čas uzavření $t_z$ [ms]	2,1			

Z grafického vyjádření působících sil je patrný vliv na jejich konstantní průběh (Obr. 9).



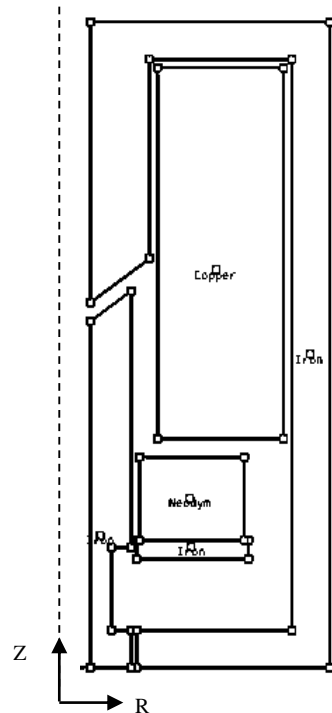
Obr. 9 Výsledný model po optimalizaci a citlivostní analýze

Grafické znázornění dynamiky optimalizovaného modelu po provedení citlivostní analýzy je na Obr. 10.



Obr. 10 Průběhy dynamických charakteristik po optimalizaci a citlivostní analýze

Výsledný model magnetického obvodu s naznačenou osou rotace navrhovaného aktuátoru je na Obr. 11.



Obr. 11 Výsledný model aktuátoru

Jeho rozměry jsou 11,85 cm na výšku a 9,63 na šířku. Je tvořen ocelovým magnetickým obvodem o tloušťce 7 mm. Délka pohyblivé kotvy je 69 mm, šířka 10,95 mm. Úhel zakončení kotvy je přibližně  $36^\circ$  vzhledem k ose R. Drážka v kotvě je 15 mm dlouhá a 3,5 mm hluboká.

## 5.6 Elektrický obvod

Stanovením optimalizovaného modelu je vytvořen funkční koncept řešení dané problematiky z hlediska mechanického návrhu. Daná aplikace však vyžaduje také rychlé spínání a rozepínání elektrického obvodu, který je součástí navrhovaného ventilu. Obvod je tvořen induktivní reaktancí cívky a jejím činným odporem. Jedná se tedy o obvod s přechodovým dějem prvního řádu. Je nezbytné vyšetřit průběh tohoto děje k minimalizaci vlivů na rychlost spínání a zároveň vyšetřit vliv spínání na generaci rušivých napětí.

Rušivá napětí se projevují například jako dočasné selhání různých funkcí elektronických systémů, v horším případě samotnou destrukcí zařízení. Přechodové jevy doprovázející vypínání zátěže induktivního charakteru mohou mít za následek jak poškození spínacího kontaktu (tranzistoru), tak i vysokofrekvenční rušení impulsního charakteru, které se prostřednictvím galvanických, indukčních a kapacitních vazeb šíří systémem.

Cílem je:

- snížení úrovně rušivých napětí, proudů a tím polí
- zvýšení životnosti a ochránění kontaktů

Z hlediska omezení rušení lze dobrých výsledků dosáhnout tehdy, když je útlumový člen rušení umístěn co nejbližší zdroji rušení, tj. u indukční zátěže. Připojení omezujícího prostředku k zátěži poskytne dostatečnou ochranu i samotnému kontaktu (tranzistoru). Čím rychleji je zátěž rozepnuta, tím vyšší je úroveň rušení. Proto je někdy výhodné zpomalit rozpínání kontaktu ochranným RC členem.

### 5.6.1 Model spínaného obvodu akčního členu

Platí obyčejná diferenciální rovnice charakterizující obvod indukční zátěže

$$L \frac{di}{dt} + Ri = U, \quad (13)$$

kde  $L$  je indukčnost zátěže,  $i$  je protékající proud,  $R$  je elektrický odpor zátěže a  $U$  elektrické napětí.

Vyřešením této rovnice je stanoven průběh napětí a proudu na cívce. Proud je pro indukční zátěž stavovou veličinou, tudíž platí, že se proud na zátěži nemůže měnit skokem. Při odepnutí zátěže od zdroje napětí se vlivem energie nahromaděné v magnetickém obvodu zátěž stává zdrojem a dodává do obvodu spojitě elektrický proud. Při tomto přechodovém ději lze na cívce naměřit výše zmiňované záporné napětí. (časová změna proudu, tj.  $\frac{di}{dt}$  bude v tomto okamžiku velmi vysoké)

### 5.6.2 Cívka elektromagnetického ventilu

Spolu s navrženým konceptem magnetického modelu je stanovena proudová hustota  $J_{\text{ext}}$ , pro kterou je celý návrh konfigurován. Tento parametr nám určuje, jaký elektrický proud jsme schopni protlačit jednotkou plochy. Jelikož maximální frekvence spínání je okolo 50Hz, lze předpokládat rovnoměrné rozložení proudu ve vodiči. Platí, že

$$J_{\text{ext}} = \frac{NI_z}{S}, \quad (14)$$

kde  $N$  je počet závitů cívky,  $I_z$  je proud protékající závitěm a  $S$  je celková plocha cívky v řezu.

Při návrhu cívky je zapotřebí vycházet z průměru vodičů, ze kterých je cívka navijena, protože vodiče, které použijeme na navijení cívky, mají různé hodnoty základních parametrů. Průměr vodiče ovlivňuje počet závitů  $N$ , který jsme schopni v dané konfiguraci navinout, a zároveň tedy ovlivňuje proud  $I$  protékající závitem. Vzhledem k dané aplikaci, kde tečou vyšší proudy, přichází v úvahu vodič o průměru 2 mm. (proudová 11,5 A pro dlouhodobé zatížení),

### 5.6.3 Stanovení elektrického odporu vodiče

Výpočet odporu vychází ze vztahu pro odpor jednoho závitu cívky

$$R_z = \rho \frac{l_z}{S_z} [\Omega], \quad (15)$$

kde  $\rho$  je rezistivita vodiče (Cu),  $l_z$  je délka závitu a  $S_z$  je jeho průřez. Rezistivita mědi má hodnotu  $1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot \text{m}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ .

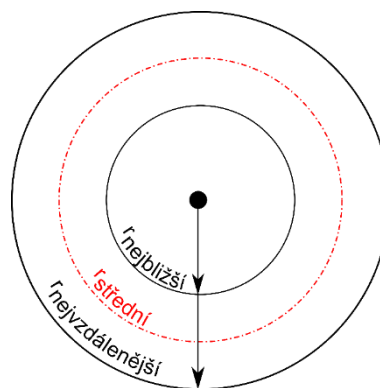
Délka závitu je vypočtena ze vztahu pro obvod kruhu

$$l_z = 2\pi r, \quad (16)$$

kde  $r$  je poloměr, který je dán vzdáleností závitu cívky od středu ventilu. V této aplikaci je zaveden pro zjednodušení pojem  $r_{\text{střední}}$ , což je poloměr, který reprezentuje, proměnlivost tohoto parametru při výpočtu délky závitu cívky.

$$\begin{aligned} r_{\text{střední}} &= \frac{r_{\text{nejvzdálenější}} - r_{\text{nejbližší}}}{2} + r_{\text{nejbližší}} = \\ &= \frac{0,03965 - 0,01595}{2} + 0,01595 = 2,78 \text{ [cm]} \end{aligned} \quad (17)$$

Vztah je graficky naznačen na Obr. 12.



Obr. 12 Délka závitu – určení středního poloměru



Pak ze vztahu (16) pro délku je  $l_z = 17,8$  cm. Dopočtením ze vztahu pro odpor závitů (15) je  $R_z = 0,959$  mΩ.

Koeficient plnění této cívky je uvažován  $k = 0,75$ . Ze znalosti tohoto parametru je možné určit efektivní obsah mědi  $S_{Cu}$  k celkovému obsahu plochy cívky  $S = 1,612 \cdot 10^{-3}$  – dopočteno z rozměrů geometrie modelu.

$$S_{Cu} = S \cdot 0.75 = 1.612 \cdot 10^{-3} \cdot 0.75 = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ [m}^2\text{]} \quad (18)$$

Počet závitů  $N$  pro vodič o průměru 2 mm je tedy určen jako

$$N = \frac{S_{Cu}}{S_z} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3}}{3,141 \cdot 10^{-6}} = 385 \text{ [závitů]} \quad (19)$$

Celkový elektrický odpor všech závitů tohoto vodiče je pak stanoven ze vztahu

$$R = N \cdot R_z = 0,369 \text{ [}\Omega\text{]} \quad (20)$$

Přehled dat pro ostatní uvažované vodiče je v Tab. 9

Tab. 9 Počet závitů a elektrický odpor pro různé vodiče

Průměr drátu[mm]	Počet závitů N[závit]	Celkový činný odpor [Ω]
1,5	685	1,167
1,8	476	0,563
2,0	385	0,369

#### 5.6.4 Stanovení indukčnosti cívky

Ze vztahu pro proudovou hustotu (14), lze získat celkový proud všemi závitů  $I_c = 6,446 \cdot 10^3$  A. Proud jedním závitěm vodiče o průměru 2mm je dán dle vztahu (21).

$$I_z = \frac{I_c}{N} = \frac{6,446 \cdot 10^3}{385} = 16,74 \text{ [A]} \quad (21)$$

Dále je důležitý průběh magnetické energie  $W_m$  v závislosti na poloze kotvy. Z Tab. 10 je patrné, že magnetická energie je na tomto parametru za těchto podmínek téměř nezávislá a její průměrná hodnota je  $W_m = 19,06$  J.

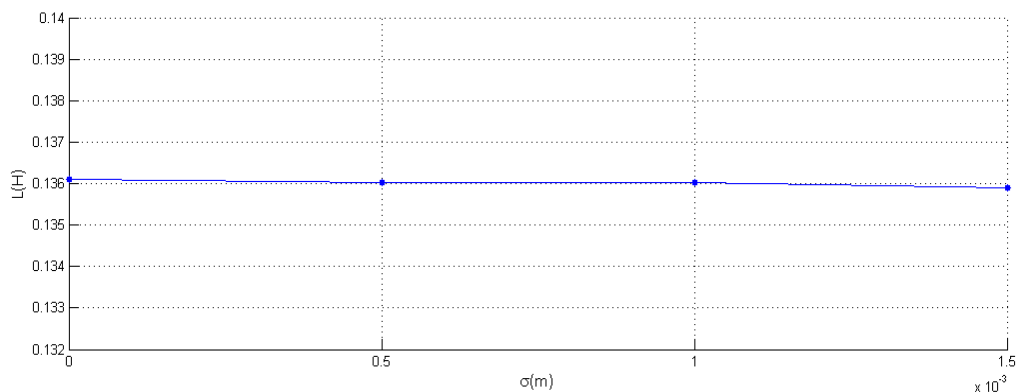
Tab. 10 Magnetická energie v závislosti na poloze kotvy

Poloha $\delta$ [mm]	0	0.5	1	1.5
$W_m$ [J]	19.077	19.066	19.067	19.048

Indukčnost spínací cívky ventilu je pak určena podle vztahu:

$$L = \frac{2W_m}{I_z^2} \text{ [H]} \quad (22)$$

Nezávislost magnetické energie, tudíž indukčnosti na poloze kotvy dokazuje Obr. 13. Průměrná hodnota indukčnosti je pro vodič o průměru 2 mm  $L = 0,136 \text{ H}$ .



Obr. 13 Závislost indukčnosti cívky elektromagnetu na poloze kotvy

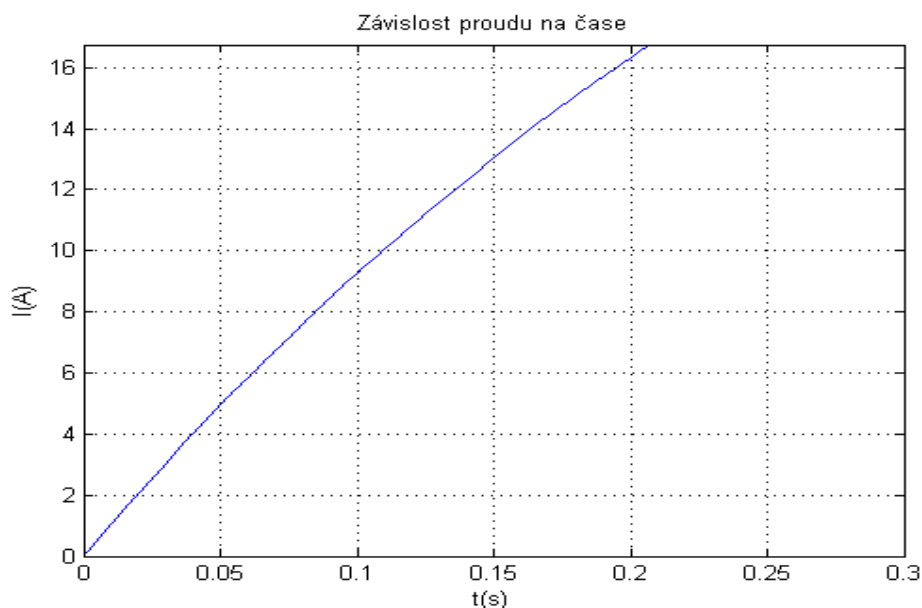
### 5.6.5 Simulace přechodového děje

Ze stanovených parametrů cívky je možné vyšetření přechodového děje vznikající na induktivní zátěži. Vycházíme z rovnice (11), která je pro stanovení průběhu upravena do následujícího tvaru

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L}i + \frac{U}{L},$$

kde za  $R$  a  $L$  dosadíme získaný odpor cívky a indukčnost. Napájecí napětí volíme ze znalosti úrovně napětí v palubní síti automobilu ( $U = 14,4 \text{ V}$ ). Pro řešení formulované rovnice byl využit opět MATLAB.

Pro správnou funkci zařízení je nutné, abychom dosáhli požadované velikosti proudu v co nejkratším časovém okamžiku. Zásadní je pro nás velikost proudu  $I_z$ , tudíž zkoumáme, za jaký dlouho je velikost proudu rovna právě velikosti  $I_z$ . Přechodný děj v podobě závislosti elektrického proudu na čase je zobrazen na Obr. 14



Obr. 14 Přechodný děj v elektrickém obvodu

Čas, kdy je velikost proudu rovna  $I_z$  je 0,202 s. Časové konstanty  $\tau$  vyjadřují dobu, za kterou by bylo dosaženo ustáleného stavu, kdyby přechodný děj probíhal stále stejnou rychlostí jako na svém počátku. [25] přechodových dějů pro všechny zkoumané vodiče jsou dány jako

$$\tau = \frac{L}{R} \text{ [s]} \quad (23)$$

Hodnoty  $\tau$  pro jednotlivé vodiče jsou uvedeny v Tab. 11

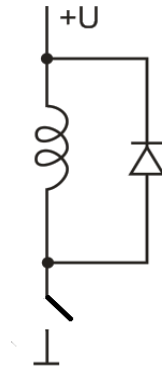
Tab. 11 Hodnoty časových konstant pro uvažované vodiče cívky

Průměr drátu [mm]	$\tau$ [s]
1,5	0,37
1,8	0,37
2,0	0,37

Z výše uvedených hodnot vyplývá, že časové parametry (pozn. 5 ms na otevření ventilu) dané aplikací vstřikovacího ventilu v automobilu nejsou splněny. Pokud bychom chtěli dané parametry v této konfiguraci splnit, bylo by nutné zvolit vyšší napájecí napětí.

### 5.6.6 Ochrana obvodů napájených spínaným stejnosměrným napájením

Nejjednodušší ochranou je zapojení ochranné diody paralelně k indukční zátěži. Závěrné napětí diody musí být větší než napájecí napětí obvodu, maximální propustný proud diody musí být větší než proud, který teče při sepnutí zátěži (cívku). Zapojení obvodu je naznačeno na Obr. 15



Obr. 15 Ochrana polovodičovou diodou

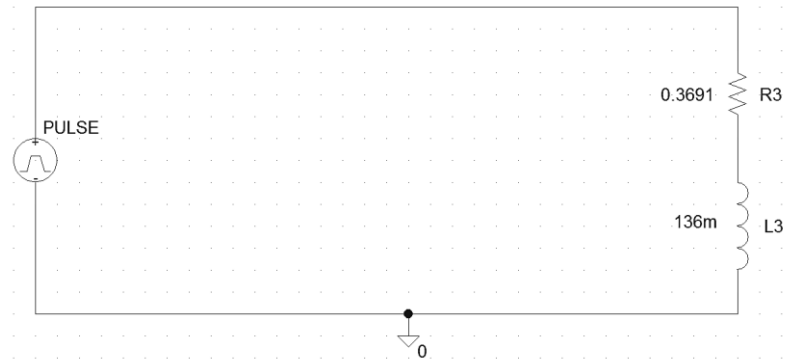
Další možností je připojení RC členu paralelně ke spínacímu kontaktu [26].

Výkonové aplikace, kde je nutné rychlé spínání, vyžadují zapojení, kdy je k polovodičové Schottkyho diodě (kvůli rychlému spínání) sériově připojen transil, který během vysokých napěťových špiček, ochrání zmíněnou diodu.

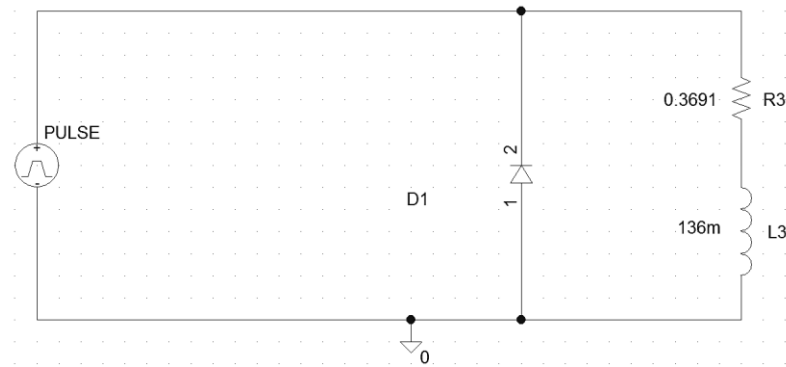
### 5.6.7 Simulace spínání ventilu

Simulace je zaměřena na omezení vlivu záporného napětí generovaného na indukční zátěži elektromagnetického ventilu. Pro provedení simulace v prostředí PSpice je nutné definovat několik vstupních veličin. Především je to elektrický činný odpor a indukčnost cívky protékané proudem.

Obvod simulace je sestaven z pulzního zdroje simulujícího spínání ventilu, z rezistoru odpovídajícího svou velikostí elektrickému odporu cívky a vlastní cívku s indukčností stanovenou v předchozí podkapitole. V prvním schématu je patrný obvod bez jakékoliv ochrany proti přepětí a v druhém je zakreslena omezující Schottkyho dioda zapojená v závěrném směru.

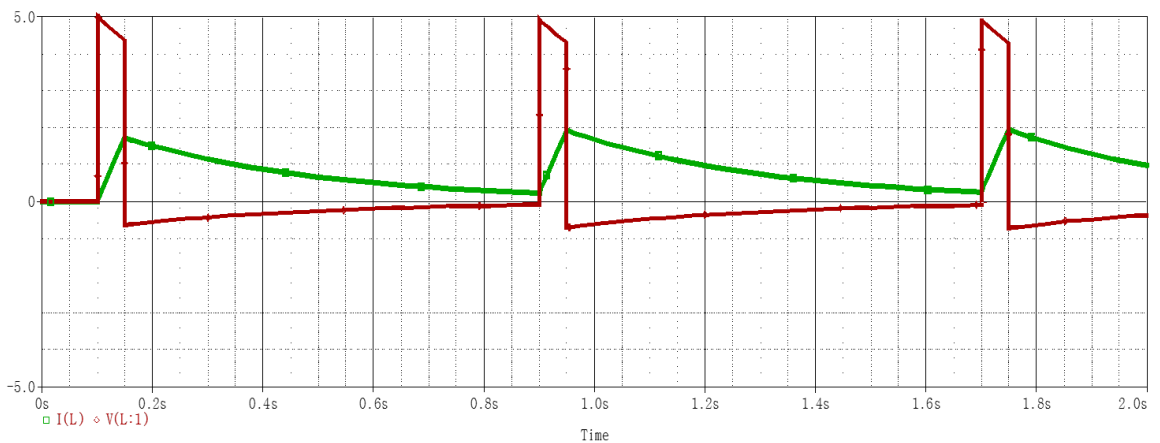


Obr. 16 Testovaný obvod v prostředí PSpice - bez ochran (zdroj: vlastní zprac.)



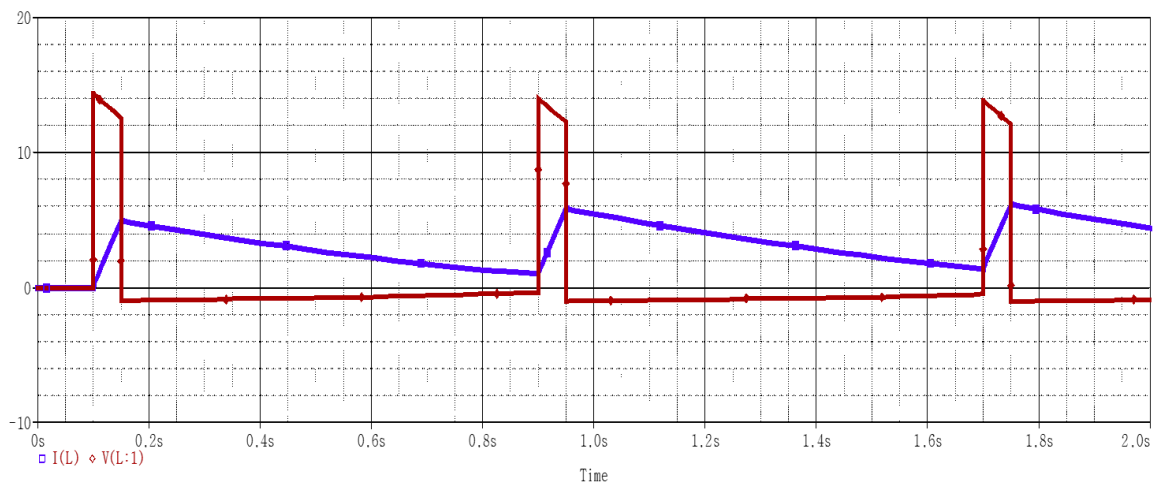
Obr. 17 Testovaný obvod v prostředí PSpice - s diodou (zdroj: vlastní zprac.)

Na následujícím obrázku je simulovaný průběh na cínce ventilu bez použití ochrany záporného přepětí.



Obr. 18 Simulace PSpice – bez ochrany (zdroj: vlastní zprac.)

Na následujícím obrázku je simulovaný průběh napětí a proudu na cívce ventilu s použitím ochrany záporného přepětí v podobě polovodičové diody.



Obr. 19 Simulace PSpice – s diodou (zdroj: vlastní zprac.)

Z obrázků je patrné, že k výrazným překmitům, které vznikají rychlým spínáním ve této aplikaci nedochází. Je to dáno velkou indukčností, která rychlému spínání brání.

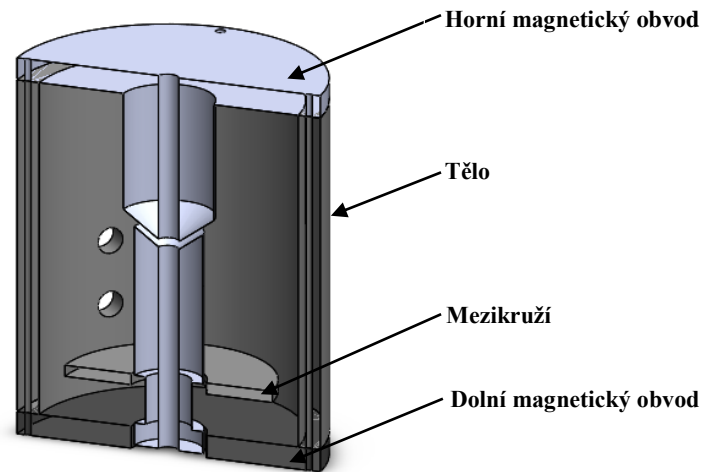
V automobilovém průmyslu ochranné diody v této oblasti svoje opodstatněné místo. Vstřikovací ventily mají nižší indukčnost a vyšší činný odpor. (typicky  $L=8.5$  mH a  $R=16.4$   $\Omega$ ), díky čemuž zde vysoké napěťové špičky vznikají [27]

## 5.7 Tvorba technické dokumentace v programu SolidWorks

Výroba navrženého elektromagnetického aktuátoru je svěřena prototypové dílně při Západočeské univerzitě v Plzni. K vyrobení je zapotřebí dodat technickou dokumentaci obsahující rozměry, tvary a náčrty jednotlivých dílů, ze kterých je zařízení složeno.

Celá technická dokumentace je navrhována v prostředí SolidWorks, které umožňuje modelovat součásti od nejjednodušších dílů po celé sestavy a následně vytvořit technickou zprávu, ze které dílna může čerpat.

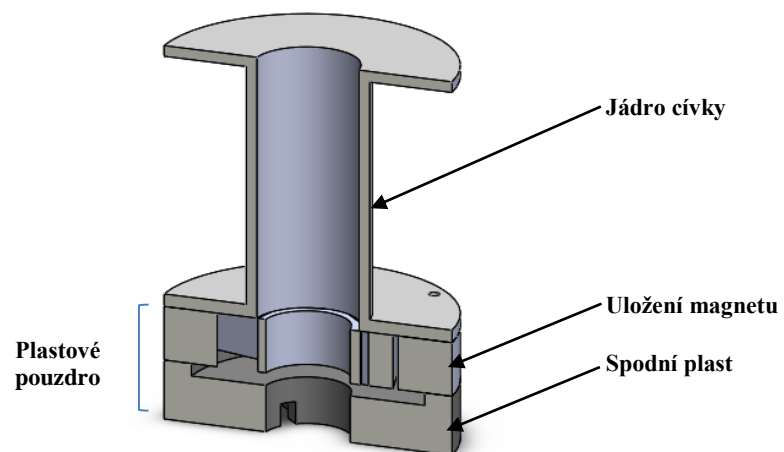
Nejdříve jsou modelovány ocelové díly, které tvoří převážnou část akčního členu. Jedná se o horní část, spodní část, tělo ventilu, ocelové mezikruží pod neodymovým magnetem a kotva ventilu. Díly jsou k sobě připevněny pomocí závitových tyčí, které prochází tělem, horní i dolní částí ventilu. Ocelové díly jsou pro představu vyobrazeny v sestavě na Obr. 20.



Obr. 20 Sestava ocelových dílů ventilu

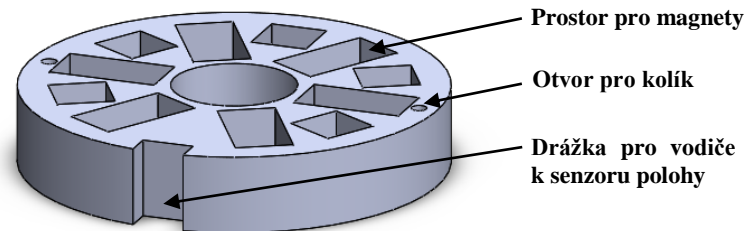
V těle elektromagnetu jsou vyvrtané dva otvory o průměru 8 mm. Vrchní slouží k přivedení vodičů napájení a teplotního senzoru cívky, spodní pak pro přivedení vodičů k dalším instalovaným sensorům. Ty monitorují teplotu magnetu a dále polohu kotvy.

Několik součástí ventilu je tvořeno plastem. Jedná se o jádro cívky, které je ze silonu a plastové (ABS) pouzdro pro neodymový magnet. To je tvořené z uložení magnetu a spodního plastu. Spolu s neodymovým magnetem je v plastovém pouzdře i ocelové mezikruží a senzor polohy kotvy. Jednotlivé plastové díly jsou k sobě připevněny pomocí kovových kolíků, které jsou do jednotlivých dílů zasazeny. Sestava plastových dílů je na Obr. 21.



Obr. 21 Sestava plastových dílů ventilu

Jelikož je původní neodymový magnet v podobě mezikruží v rozměrech definovaných v magnetickém návrhu velmi drahý, je nezbytné přistoupit k náhradnímu řešení, kdy jsou použity menší krychlové a hranolové magnety poskládané do konfigurace na Obr. 22.

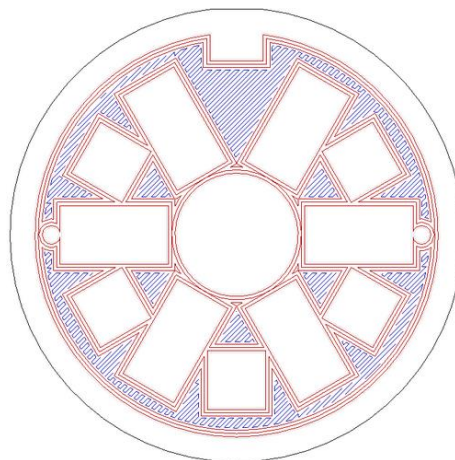


Obr. 22 Upravené uložení neodymového magnetu

Rozmístění a velikost jednotlivých magnetů je uspořádáno na základě analýzy vlivu zmenšení objemu magnetických částí na průběh působících sil. Objem magnetického materiálu byl stanoven součtem dílčích objemů všech magnetů v tomto náhradním uspořádání. Tento součet slouží pro úpravu magnetického modelu v Agros2D. Vlivem této úpravy však nedošlo k zásadním změnám charakteristik, tudíž lze uspořádání v navrhovaném ventilu použít.

Tato topologie dovoluje část magnetů z uložení vyjmout. To přispívá k vyšší adaptivitě zařízení, kdy je možné zkoumat chování akčního členu s menším objemem magnetů.

Plastové pouzdro neodymových magnetů a spodní plast jsou vyráběny technologií 3D tisku na tiskárně Prusa i3 3D printer [28]. Ze souborů jednotlivých dílů je v SolidWorks vytvořen soubor s příponou STL (STereoLitography), který je následně importován do software Slic3r(v 1.2.6), který celý návrh rozloží do vrstev pro tisk. Model z programu Slic3r je na Obr. 23.



Obr. 23 Vrstva tištěného plastu exportovaná z programu Slic3r



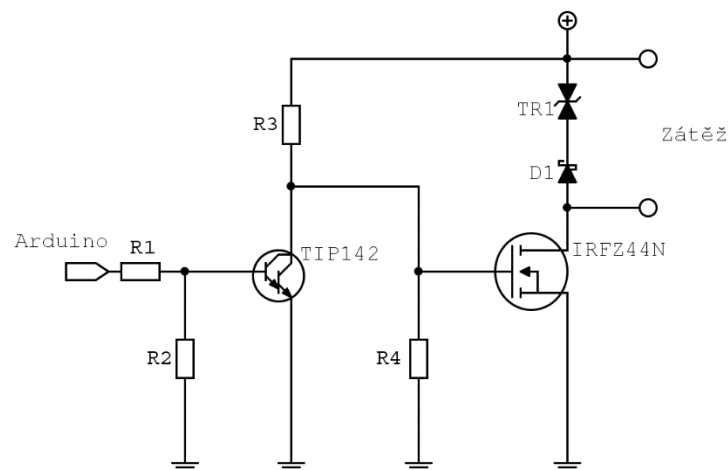
Před tiskem je možné nastavovat tloušťky vrstev, rychlost tisku a další vlastnosti. Následně jsou z programu exportovány tzv. G-kódy, což je programovací jazyk, díky němuž je možné řídit NC a CNC stroje. V této aplikaci však řídí zmíněnou tiskárnu. Kódy jsou importovány do softwaru Pronterface, který je přes komunikační port počítače napojen na 3D tiskárnu a řídí samotný tisk. Výhodou této technologie je absence forem, tisk různých materiálů (ABS, PLA, PET) a dále rychlost výroby, která se u takto velikých dílů pohybuje okolo 2-3 hodin. Kompletní výkresy jsou k nahlédnutí v příloze B.

## 6 Řízení elektromagnetického ventilu

Řídicí obvod navrhovaného ventilu je stanoven ze znalosti parametrů definovaných v předchozích kapitolách. Velká induktivní zátěž, kterou elektromagnetický ventil je, vyžaduje návrh komplexního systému, který dokáže splnit, jak statické tak dynamické vlastnosti dané aplikace.

### 6.1 Návrh spínacího obvodu.

V prvním přiblížení je jako platforma spínacího obvodu zvolena Arduino Uno rev.3[29], která slouží jako zdroj řídicích impulzů. Elektrické napětí a proudy neumožňují řídit induktivní zátěž přímo z výstupních portů platformy, tudíž je nutné navrhnout obvod, který řeší vzájemnou kompatibilitu. Jednotlivé součástky tohoto obvodu jsou vybírány na základě dokumentace k platformě Arduino [29] a na základě požadovaných vlastností (napájecí napětí ventilu, protékající proud – rovnice (19), spínací rychlost). Schéma navrženého obvodu je na Obr. 24.



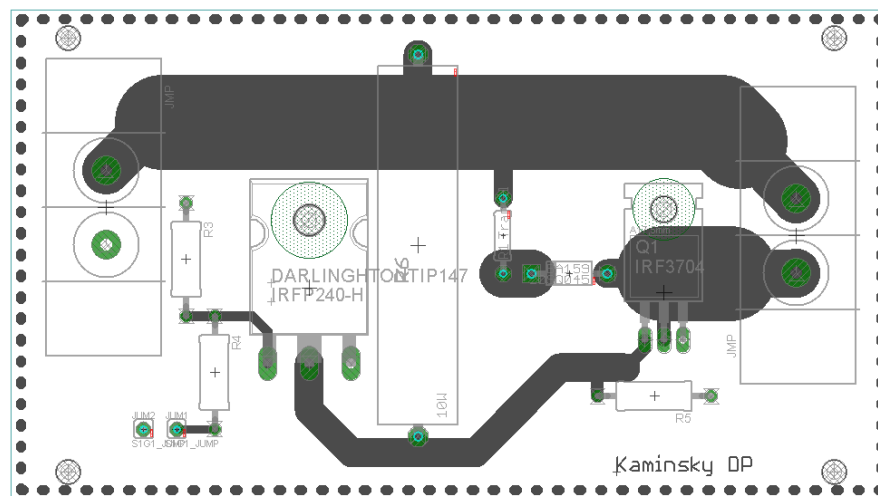
Obr. 24 Schéma řídicího obvodu ventilu

Vstupní část obvodu je tvořena bipolárním NPN tranzistorem v Darlingtonovo zapojení NPN TIP142. Bipolární tranzistor je řízen proudem do báze. Kromě prahových spínacích hodnot uvedených v datovém listě součástky je nutné počítat s hodnotou maximálního elektrického proudu, který může téct z řídicího výstupu platformy Arduino. V datovém listě tranzistoru je nutné vyhledat minimální proudový zesilovací činitel  $h_{FE}$ .(500). Vstupní rezistor R1 je pak stanoven na základě těchto údajů na 330 $\Omega$ . Rezistor mezi bázi a emitorem je v zapojení z důvodu ošetření stavu, kdy může být na výstupech stav vysoké impedance po resetu napájení. V praxi mívá pro jednoduchost zapojení stejnou velikost jako R1. O proud tímto rezistorem je proud do báze při spínání menší. Proud do báze je však v tomto případě stále dostatečně veliký.

V kolektoru TIP142 je výkonový rezistor R3 o velikosti  $33\Omega$ , který umožňuje výkonovou ztrátu až 10W. Je zde umístěn z důvodů nabíjení unipolárního tranzistoru IRFZ44N, který spíná navrhovaný akční člen. Unipolární tranzistor je sice řízen polem (přiloženým napětím) mezi elektrodami GATE a SOURCE. Je však nutné si uvědomit, že mezi těmito elektrodami je nezanedbatelně velká kapacita (1470pF), kterou je nutné, zejména při rychlém spínání nabít v co nejkratším čase. Pokud chceme tranzistor takto sepnout, musíme přivést dostatečně velké množství proudu k nabití této kapacity. Při rozepnutí je zde obdobný problém, kdy je nutné náboj rychle odvést z GATE. Ten je vyřešen rezistorem R4. K zátěži je paralelně připojena rychlá Schottkyho dioda 20SQ045 spolu s bipolárním transilem P6KE33A se spínacím napětím 33V.

## 6.2 Provedení spínacího obvodu na DPS

Pro účely spínání zátěže je vytvořen návrh desky plošných spojů v software Cadsoft Eagle. Jelikož se jedná o desku, kterou protéká velký proud, je nutné tomu přizpůsobit šířku vodičových cest, konektory i velikost. Podoba prvního prototypu desky v měřítku 1:1 je na Obr. 25.

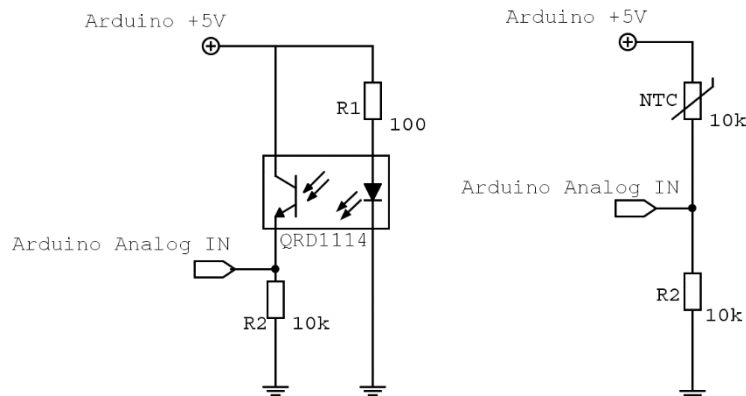


Obr. 25 Návrh DPS řídicí desky

## 6.3 Diagnostika elektromagnetického ventilu

Vstřikovací ventil je vzhledem ke své funkci umístěn tak, že není snadno dostupný. Z tohoto důvodu by mělo být možné detekovat kritické chyby a provozní stav. Pro potřeby tohoto experimentu je ventil vybaven NTC termistorem (10 kΩ) a reflexním optočlenem QRD1114. Termistor je umístěn v cívce, kde sleduje teplotu vinutí a dále v oblasti permanentních magnetů. Reflexní optočlen umožňuje detekovat polohu pohyblivé kotvy. Je umístěn v drážce ve spodní části plastových dílů (Obr. 21).

Senzory jsou stejně jako řídicí obvod připojené k platformě Arduino. Zapojení těchto senzorů je na Obr. 26.



Obr. 26 Schéma zapojení senzorů

Na základě dat, které Arduino získá z výše uvedených senzorů, lze upravovat spínání, či detekovat vadný stav ventilu. Senzor polohy (reflexní optočlen) je schopný detekovat stav, kdy ventil z určitých důvodů nepracuje, tj. kotva se nepohybuje. Spínací obvody se v tomto případě mohou pokusit opakovat spínací sekvenci. Po celou dobu činnosti je sledována teplota cívky, díky níž lze při nefunkčním ventilu detekovat průchod velkého proudu, který vinutí cívky ohřívá.

Reflexní optočlen umožňuje detekovat nejen, zda byl ventil plně vybaven, ale i na jak dlouho. S tím souvisí možnost řízení síly působící na jádro proudem (napětím). Vlivem nedostatečně velkých sil může docházet k odskokům kotvy v krajních polohách svého pohybu. Tyto odskoky lze na základě dat z optočlenu eliminovat. Z šířky jednotlivých napěťových pulzů je možné určit rychlost pohybu kotvy.

## 7 Výsledný prototyp akčního členu ventilu

Výsledný výrobek se skládá ze součástí, které je nutné před samotným testováním zkompletovat. Jedná se o kovové magnetické obvody dodané z prototypové dílny, neodymové magnety od firmy MAGSY s.r.o. plastové díly vytištěné 3D tiskem a navinutou cívkou.

### 7.1 Navíjení cívky

V kapitole 5.6.5 je demonstrován výběr vodiče, který tvoří vinutí cívky elektromagnetického ventilu. Tento lakovaný vodič o průměru 2,0 mm je nutné navinout na silonové jádro cívky, které bylo spolu s magnetickými obvody dodáno z prototypové dílny. Na jádro by mělo být navinuto 385 závitů.

Při navíjení je vhodné počítat s uchycením těla cívky a zároveň s problematickým navíjením. Počet závitů, který je nutný navinout sice není velký, avšak díky vyššímu průměru vodiče je samotná technika navíjení obtížnější. Je nezbytně nutné dodržovat opatrnost, aby nedošlo k poškození lakovaných vodičů. Mezi jednotlivými závity by mohlo dojít ke zkratu.

Technika je realizována navinutím první vrstvy o celkovém počtu cca 30 závitů, dále je aplikována izolační páska a pokračuje se další vrstvou. Výpočet celkové délky vodiče je realizován dle následujícího vztahu.

$$N \cdot r_{\text{střední}} = 385 \cdot 2,78 = 1070,3 \text{ cm} \quad (24)$$

Vinutí je rozděleno na dvě části, kdy je možné v rámci testování zapojit pouze část vinutí. Vnitřní vinutí  $L_1$  a vnější vinutí  $L_2$  tvoří dohromady výsledný celkový počet závitů.

Dvojitě vinutí by mohlo být spínáno zvlášť, což by mohlo být výhodné vzhledem k velikosti indukčností, proudu i přepětí.

Vzhledem k ručnímu navíjení vodičů byl nakonec celkový počet závitů redukován na 211.

### 7.2 Uložení neodymových magnetů

Po vytištění plastového pouzdra je nutné magnety do pouzdra uložit. Jelikož se jedná o velmi křehké magnety s vysokou odtrhovou silou [30], je vhodné při manipulaci dbát zvýšené opatrnosti. V pouzdru je uloženo také ocelové mezikruží, přes které se uzavírá magnetický tok. Tato součást však při samotném uložení způsobuje v součinnosti s ostatními uloženými magnety problematickou instalaci, při níž je nutné síly magnetů překonávat.

Dalším bodem je dodržení orientace magnetů. Ta je kontrolována pomocí teslametru. V Tab. 12 jsou patrné hodnoty magnetické indukce na různých místech uložení magnetů.

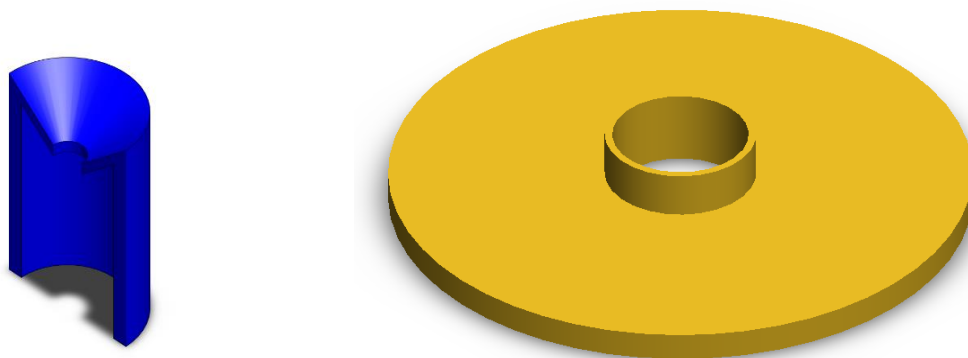
Tab. 12 Hodnoty magnetické indukce v pouzdře magnetů

	B[mT]
Povrch magnetu	500
Spodní strana ocelového mezikruží	90
Vnitřní hrana (průchod pro kotvu)	200

### 7.3 Podoba výsledného prototypu

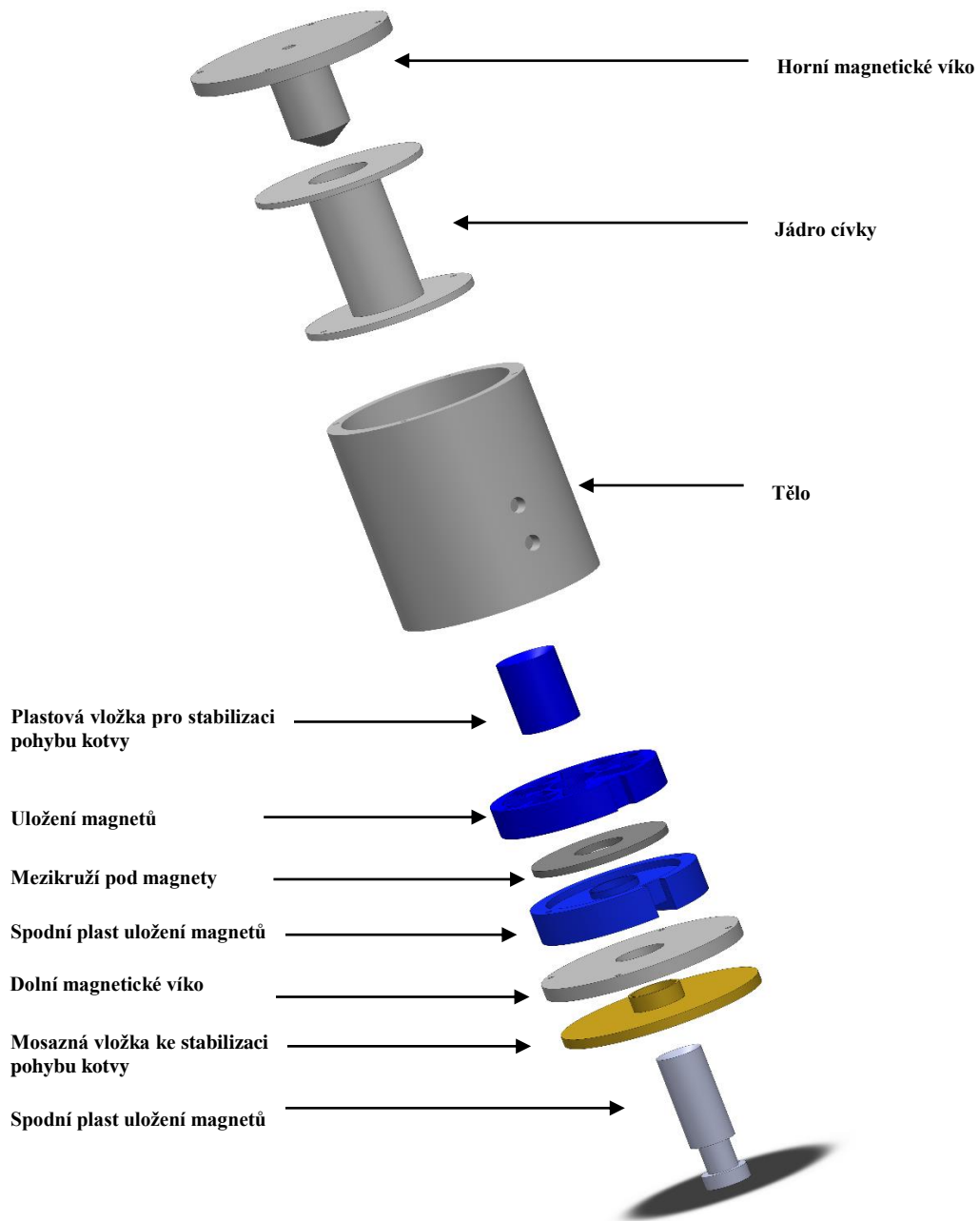
Z důvodu omezení možnosti radiálního pohybu kotvy, který je v tomto případě nežádoucí, je nutné, aby mezera mezi ventilem a jeho pohyblivou částí byla co nejmenší. S tím souvisí zabezpečení ploch magnetických materiálů proti vzájemnému kontaktu, jelikož při styku těchto ploch na sebe působí silami, které mohou způsobit nežádané vychýlení kotvy do stran a tím znemožnit ventilu jeho funkci.

Pro zkompletování celého elektromagnetického ventilu je zapotřebí dotisknout plastové sedlo, na které po vybuzení cívky dosedne pohyblivá kotva a dále vyrobit vložku, která je umístěna na spodní magnetický obvod a svým tvarem zabrání kotvě v pohybu nežádaným radiálním směrem. Tato vložka je vyrobena z nemagnetického materiálu, mosazi. Podoba jednotlivých dílů je na Obr. 27. Řez sedla pohyblivé části ventilu a mosazný díl ke stabilizaci polohy kotvy.



Obr. 27 Řez sedla pohyblivé části ventilu a mosazný díl ke stabilizaci polohy kotvy

Výsledná podoba prototypu elektromagnetického akčního členu bez jeho elektrických částí je na Obr. 28.



Obr. 28 Sestava všech dílů vyráběných dílů výsledného prototypu

Fotografie kompletně zkonstruovaného zařízení jsou v příloze C.

## 8 Experimentální ověření

Principem experimentu je ověření funkce akčního členu elektromagnetického ventilu a jeho vlastností definovaných v předchozích kapitolách práce.

Základním metodou při ověřování funkce navrhovaného zařízení je měření činného odporu vinutí budící cívky. Ten je měřen pomocí laboratorního multimetru Agilent 34460A. Pro toto měření byla zvolena dvou vodičová, kdy není kompenzován odpor přívodních kabelů. Hodnoty činného odporu jednotlivých vinutí jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13 Hodnoty činného odporu výsledného prototypu

Činný odpor R [ $\Omega$ ]	
Vnitřní vinutí L <sub>1</sub>	0,157
Vnější vinutí L <sub>2</sub>	0,136
Celkový odpor	0,293

K dalším měřením je nutné kalibrovat polohu kotvy v akčním členu. Jelikož v současné době ventil nemá sedlo s tryskou, tak je nutné polohu nastavit pomocí nástavce vytvořeného ze šroubu a hliníkového profilu. (viz příloha D). Výsledný prototyp je připojen k řídicí desce, kdy je zkoumán vliv velikosti průchozího proudu, který je omezován napájecím zdrojem. Ten je nastaven na napájecí napětí 14,4V. Spínání je v prvním přiblížení realizováno pomocí signálového generátoru, kdy jsou vysílány pulzy obdélníkového tvaru. Experimenty byly provedeny pro několik variant. Údaje charakterizující nejrychlejší variantu jsou v Tab. 14.

Tab. 14 Naměřené údaje při spínání akčního členu

Doba sepnutí [ms]	3
Perioda T [ms]	50
Elektrický proud I [A]	0,8

Přesto, že doba sepnutí má přijatelnou hodnotu, je nutné poznamenat, že se jedná o měření bez zatížení. To znamená, že síly působící na kotvu zdaleka nedosahují hodnot, které by měly být splněny z hlediska stanovených parametrů. Při zatížení je potřeba dodat větší proud, který



způsobí zvětšení tažné síly. Při zvyšování proudů je nezbytné myslet na zvětšení celkové periody řídicího signálu. Vzhledem k velké hodnotě indukčnosti je přechodový děj poměrně dlouhý, což nepříznivě promlouvá do výsledů měření. V automobilních aplikacích se často využívá principu tzv. boost supply, kdy je při spínání na vstřikovač, kvůli zrychlení přechodového děje, přivedeno vyšší napětí (řádově 40 – 130V) [31]

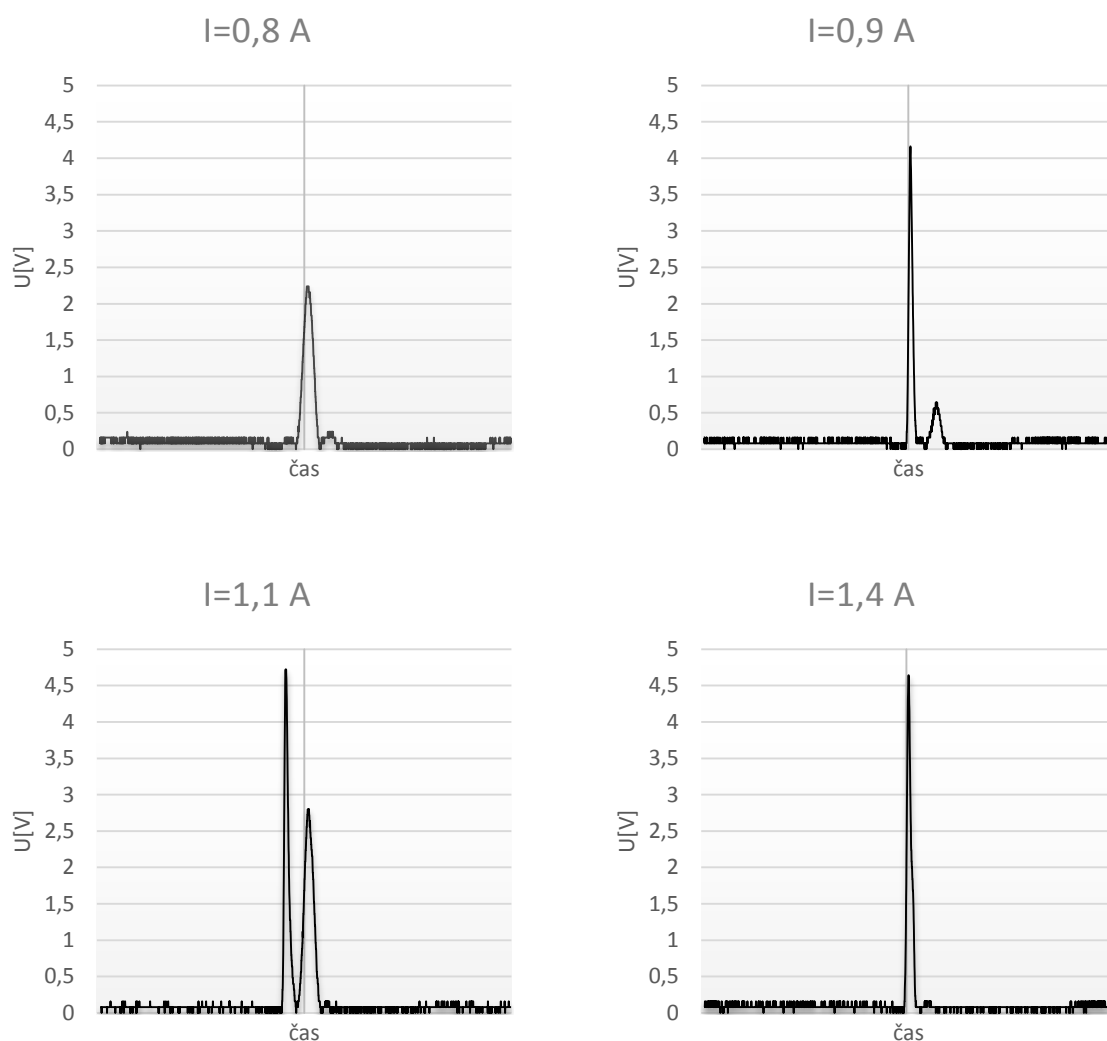
Při experimentech je využíváno diagnostických čidel. Pomocí termistorů je měřena teplota v okolí magnetů a cívk. Obě dvě teploty, vzhledem k nízkým proudům, při kterých jsou daná měření prováděna, zůstávají téměř konstantní. (+- 2°C během 2 hodin měření). Teplota je sledována i na kontrolní desce, kde je důležité kontrolovat výkonový MOSFET IRFZ44N s instalovaným chladičem. Zde se projevuje výkonová ztráta při spínacích procesech. Teploty tranzistoru jsou při měření do 4A (50 ms šířka pulzu) na přípustných hodnotách (do 80°C). Velmi záleží na délce spínacích pulzů, které jsou v této konkrétní aplikaci poměrně dlouhé, což může způsobit vysoké zahřátí tranzistoru a nakonec jeho zničení.

Pomocí čidla polohy je možné diagnostikovat nedokonalé otevření, dokonalé otevření nebo odskoky kotvy. Současná verze aktuátoru má vlivem mírné vůle pohybu kotvy problémy s konstantními hodnotami napětí, které lze ze senzoru získat. Čidlo je také citlivé na změnu světla, což při testování způsobuje nepřesnosti. Podmínky analýzy chování navrženého ventilu při různých hodnotách proudu jsou v Tab. 15.

Tab. 15 Podmínky měření pomocí čidla polohy

Perioda T [ms]	Doba sepnutí [ms]	Elektrický proud I [A]
100	20	0,9
		1,4
		1,1
		0,8

Z osciloskopu byla exportována data, která byla převedena do následující grafické podoby. Na Obr. 29 je demonstrováno analyzovatelné chování ventilu za pomoci reflexního optočlenu.



Obr. 29 Měření pomocí čidla polohy

Proud 0,8A vytvoří svým průchodem sílu, která není schopná pohybovat kotvou ventilu v plném rozsahu. To lze pozorovat z hodnot napětí, které nedosahují, tak vysokých špiček. Při proudu 0,9A je ventil již téměř plně vybaven, avšak vlivem tažných sil neodymových magnetů, která nedokáže kotvu udržet ve stabilní poloze, dochází k menšímu odskoku, který je v grafu patrný jako druhá vlna. Při proudu 1,1A je ventil již plně vybaven a projevuje se značný odskok, který způsobuje občasné výpadky ventilu ze synchronismu se signálovým generátorem. Proud 1,4A je tak velký, že vytvoří magnetické pole, které během periody T nestihne zeslábnout natolik, aby vznikl zmíněný odskok (zbrzdí dopad kotvy na kalibrovací nástavec). Na průbězích je vidět i změna délky spínacích dějů v závislosti na velikosti proudu.

## Závěr

Obsahem této práce byl teoretický rozbor a popis problematiky vstřikování paliva ve spalovacích motorech pomocí elektromagnetického ventilu. V práci byl formulován obecný matematický model elektromagnetického aktuátoru. V rámci práce bylo navrženo experimentální zařízení, které bylo tvořeno elektromagnetickým akčním členem a řídicí deskou, která slouží ke spínání ventilu pomocí 5V logiky řídicí platformy Arduino. Akční člen byl pro potřeby diagnostiky osazen NTC termistory pro měření teploty a senzorem polohy, díky němuž je možné během činnosti určit chování pohyblivé kotvy navrženého aktuátoru.

Práce je pojata jako první přiblížení široké problematiky. Jejím úkolem je zejména ověřit princip spínání elektromagnetického ventilu vybaveného neodymovými magnety, které zde slouží podobně jako vratné pružiny v konvenčních průmyslových řešeních. Na základě výsledků této práce bude zařízení upraveno a vylepšeno. Provedené experimenty dokazují, že uvedený princip funguje. Pokud nejsou kladeny na navržený akční člen vysoké nároky na vybavovací sílu, je možné ventil sepnout během 3ms, což dokazuje, že elektromagnetický princip je velice rychlý. Experimenty dále potvrdily možnost využití reflexního optočlenu pro sledování pohybu pohyblivé kotvy, kdy je možné detekovat nesprávné chování, jakým jsou odskoky kotvy při spínání. Ty mohou vést ke špatnému množství dávkovaného paliva

Vzhledem ke složitosti problematiky se nabízí prostor pro zlepšování dosavadního návrhu, kdy je nutné zařízení minimalizovat. S tím souvisí úprava návrhu, která upraví velikost činného odporu a indukčnosti cívky k dosažení kratšího času přechodového děje. Další problematickou oblastí jsou tisknuté plastové díly, které nemají v těchto aplikacích dlouhou životnost.

Co se týče řídicí desky, je možné aplikovat některý z principů boost supply, kdy je při otevírání ventilu přivedeno vyšší napájecí napětí, či použít inteligentní budiče v součinnosti s automotivními MOSFETy[32].

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] GSCHIEDLE, Rolf. *Příručka pro automechanika*. 3., přeprac. vyd. Překlad Iva Michňová, Zdeněk Michňa, Jirí Handlíř. Praha: Europa-Sobotáles, 2007, 685 s. ISBN 978-80-86706-17-7.
- [2] REMEK, Branko. 2012. *Automobil a spalovací motor: historický vývoj*. 1. vyd. Praha: Grada, 159 s. ISBN 978-80-247-3538-2.
- [3] ČERMÁK, Ladislav. AUTO.CZ. Vstřikování benzínu: Historie stará 112 let. [online]. 19.8. 2014 [cit. 2015-01-05]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/vstrikovani-benzinu-historie-stara-112-let-82693>
- [4] EPA: United States Environmental Protection Agency. 2014. *Regulations and Standards* [online]. [cit. 2015-01-20]. Dostupné z: <http://www.epa.gov/fueleconomy/regulations.htm>
- [5] European Commission: Climate Action. *Reducing CO2 emission from passenger cars* [online]. 2015,30.4.2015 [cit.2015-01-20]. Dostupné z: [http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index\\_en.htm](http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/cars/index_en.htm)
- [6] DUSIL, Tomáš. Emisní norma Euro 6: Co přinese řidičům?. AUTO.CZ. [online]. 10.10.2014 [cit. 2015-01-22]. Dostupné z: <http://www.auto.cz/emisni-norma-euro-6-co-prinese-ridicum-83503>
- [7] BP Statistical Review of World Energy June 2014. [online]. 2014, s. 48 [cit. 2015-05-04]. Dostupné z: <http://www.bp.com/content/dam/bp/pdf/Energy-economics/statistical-review-2014/BP-statistical-review-of-world-energy-2014-full-report.pdf>
- [8] Palivové soustavy zážehových motorů. [online]. s. 51 [cit. 2015-02-04]. Dostupné z: [www.ssamp-krnov.cz/upload/soubory/00182.pdf](http://www.ssamp-krnov.cz/upload/soubory/00182.pdf)
- [9] BENEŠ, Petr. *Automobil pod lupou*. 1. vyd. Praha: Práce, 1981, 337 s. Kamarád (Práce).
- [10] Informace o automobilové technice: Benzínové systémy BOSCH. [online]. s. 60 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: [http://www.autodarebnik.cz/pdf/Bosch\\_broz++Benzin\\_nahl.pdf](http://www.autodarebnik.cz/pdf/Bosch_broz++Benzin_nahl.pdf)
- [11] Vstřikovače Common rail: šmejdy nebo high-tech produkty?. [online]. 2011-05-27 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.agat.sk/post/vstrikovace-common-rail-smejdy-nebo-high-tech-produkty-36/>
- [12] PÍSTOVÉ STROJE. *Učíme se v prostoru: Encyklopedie - Drtič kamene* [online]. [cit. 2015-02-30] Dostupné z: [http://uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2267](http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2267)
- [13] JANOCHA, Hartmut (ed.). *Actuators: basics and applications*. Springer Berlin Heidelberg, 2004
- [14] MAYER, Daniel; ULRYCH, Bohuš. *Elektromagnetické aktuátory*. BEN-technická literatura, 2008
- [15] BRAUER, John R. *Magnetic actuators and sensors*. John Wiley & Sons, 2006
- [16] CHLADNÝ, Ryan R.; KOCH, Charles Robert; LYNCH, Alan F. Modeling automotive gas-exchange solenoid valve actuators. *Magnetics, IEEE Transactions on*, 2005, 41.3: 1155-1162
- [17] GYSEN, Bart LJ, et al. Active electromagnetic suspension system for improved vehicle dynamics. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, 2010, 59.3: 1156-1163.
- [18] POSEY, Nathaniel A., Thomas WU, Mitch WOLFF a Jon ZUMBERGE. Modeling and control scheme design of a solenoid-actuated fuel injection system. In: *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)* [online]. 2012 [cit. 2015-05-05]. DOI: 10.1109/naecon.2012.6531035
- [19] *Solenoid valve*. U.S. Patent No 2,241,747, 1941
- [20] MACH, Frantisek, Vaclav STARMAN, Pavel KARBAN, Ivo DOLEZEL a Pavel KUS. Finite-Element 2-D Model of Induction Heating of Rotating Billets in System of Permanent Magnets and its Experimental Verification. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2014, vol. 61, issue 5, s. 2584-2591 [cit. 2015-05-05]. DOI: 10.1109/tie.2013.2276025.
- [21] WEISS, Stan. *World Wide Enterprises* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: <http://users.erols.com/srweiss/tableifc.htm>
- [22] *Bosch Fuel Injectors, flow rates & injector connectors* [online]. [cit. 2014-11-15]. Dostupné z: <https://www.injectorrx.com/bosch-fuel-injectors/>
- [23] *Motor man Fuel Injection Supply* [online]. [cit. 2014-11-25]. Dostupné z: [http://www.fuelinjector.citymaker.com/Fuel\\_Injector\\_Flow\\_Rates.html](http://www.fuelinjector.citymaker.com/Fuel_Injector_Flow_Rates.html)
- [24] JANALÍK, Jaroslav; ŠTÁVA, Pavel. *Mechanika tekutin*. Vysoká škola báňská-Technická univerzita Ostrava, 2002.
- [25] *Časová konstanta* [online]. [cit. 2015-04-22]. Dostupné z: [http://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/petr/04X31EO2/malyp/index\\_soubory/pojmy\\_soubory/tau.html](http://hippo.feld.cvut.cz/vyuka/petr/04X31EO2/malyp/index_soubory/pojmy_soubory/tau.html)
- [26] SPELZA, SPOL. S R. O. *Spínání zátěže bezpotenciálovými výstupy: Spínání indukivní zátěže* [online]. [cit. 2015-02-05]. Dostupné z: <http://www.spelza.cz/services.html>
- [27] TEXAS INSTRUMENTS. *Linear Products: Automotive fuel injector control usin Power+ Control with Power Arrays Devices* [online]. : 9 [cit. 2015-05-09]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slit112/slit112.pdf>
- [28] PRUSA RESEARCH. *3D TISKÁRNA PRUSA I3 PLUS* [online]. [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: <http://www.prusa3d.cz/>
- [29] *Arduino Uno* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>
- [30] MAGSY, S.R.O. *Testování magnetů* [online]. [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://www.magsy.cz/24740-testovani-magnetu-zkousky>
- [31] MAHDAVIKHAH, Behzad; PERETZ, Mor; PRODIC, Aleksandar. Low-volume power supply for vehicular fuel injection systems. In: *IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*. IEEE, 2012, p. 531-536.
- [32] *An Infineon Technologies Company: Injection* [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: [http://www.irf.com/application-solution/\\_N~1njclw#tab3](http://www.irf.com/application-solution/_N~1njclw#tab3)

## Seznam obrázků

OBR. 1 PALIVOVÁ SOUSTAVA S NEPŘÍMÝM VÍCEBODOVÝM VSTŘIKOVÁNÍM [1] .....	13
OBR. 2 PRINCIP NAVRŽENÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VENTILU – ZAVŘENÝ STAV .....	20
OBR. 3 PRINCIP NAVRŽENÉHO ELEKTROMAGNETICKÉHO VENTILU - OTEVŘENÝ STAV .....	20
OBR. 4 DIAGRAM NÁVRHU ELEKTROMAGNETICKÉHO AKTUÁTORU .....	25
OBR. 5 DEFINIČNÍ OBLAST PROBLÉMU A ZOBRAZENÍ MAGNETICKÉ INDUKCE V AGROS2D.....	31
OBR. 6 POROVNÁNÍ NEZJEMNĚNÉ A ZJEMNĚNÉ SÍTĚ .....	32
OBR. 7 VÝSLEDEK KONVERGENCE ŘEŠENÍ.....	33
OBR. 8 PRŮBĚHY DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK (BEZ UVAŽOVÁNÍ STÁLÉ TAŽNÉ SÍLY) .....	35
OBR. 9 VÝSLEDNÝ MODEL PO OPTIMALIZACI A CITLIVOSTNÍ ANALÝZE .....	37
OBR. 10 PRŮBĚHY DYNAMICKÝCH CHARAKTERISTIK PO OPTIMALIZACI A CITLIVOSTNÍ ANALÝZE .....	37
OBR. 11 VÝSLEDNÝ MODEL AKTUÁTORU .....	38
OBR. 12 DÉLKA ZÁVITU – URČENÍ STŘEDNÍHO POLOMĚRU .....	40
OBR. 13 ZÁVISLOST INDUKČNOSTI CÍVKY ELEKTROMAGNETU NA POLOZE KOTVY .....	42
OBR. 14 PŘECHODNÝ DĚJ V ELEKTRICKÉM OBVODU.....	43
OBR. 15 OCHRANA POLOVODIČOVOU DIODOU.....	44
OBR. 16 TESTOVANÝ OBVOD V PROSTŘEDÍ PSpICE - BEZ OCHRAN (ZDROJ: VLASTNÍ ZPRAC.).....	45
OBR. 17 TESTOVANÝ OBVOD V PROSTŘEDÍ PSpICE - S DIODOU (ZDROJ: VLASTNÍ ZPRAC.) .....	45
OBR. 18 SIMULACE PSpICE – BEZ OCHRANY (ZDROJ: VLASTNÍ ZPRAC.) .....	45
OBR. 19 SIMULACE PSpICE – S DIODOU (ZDROJ: VLASTNÍ ZPRAC.) .....	46
OBR. 20 SESTAVA OCELOVÝCH DÍLŮ VENTILU .....	47
OBR. 21 SESTAVA PLASTOVÝCH DÍLŮ VENTILU .....	47
OBR. 22 UPRAVENÉ ULOŽENÍ NEODYMOVÉHO MAGNETU .....	48
OBR. 23 VRSTVA TIŠTENÉHO PLASTU EXPORTOVANÁ Z PROGRAMU SLIC3R.....	48
OBR. 24 SCHÉMA ŘÍDÍCÍHO OBVODU VENTILU .....	50
OBR. 25 NÁVRH DPS ŘÍDÍCÍ DESKY .....	51
OBR. 26 SCHÉMA ZAPOJENÍ SENZORŮ .....	52
OBR. 27 ŘEZ SEDLA POHYBLIVÉ ČÁSTI VENTILU A MOSAZNÝ DÍL KE STABILIZACI POLOHY KOTVY.....	54
OBR. 28 SESTAVA VŠECH DÍLŮ VYRÁBĚNÝCH DÍLŮ VÝSLEDNÉHO PROTOTYPU .....	55
OBR. 29 MĚŘENÍ POMOCÍ ČIDLA POLOHY .....	58

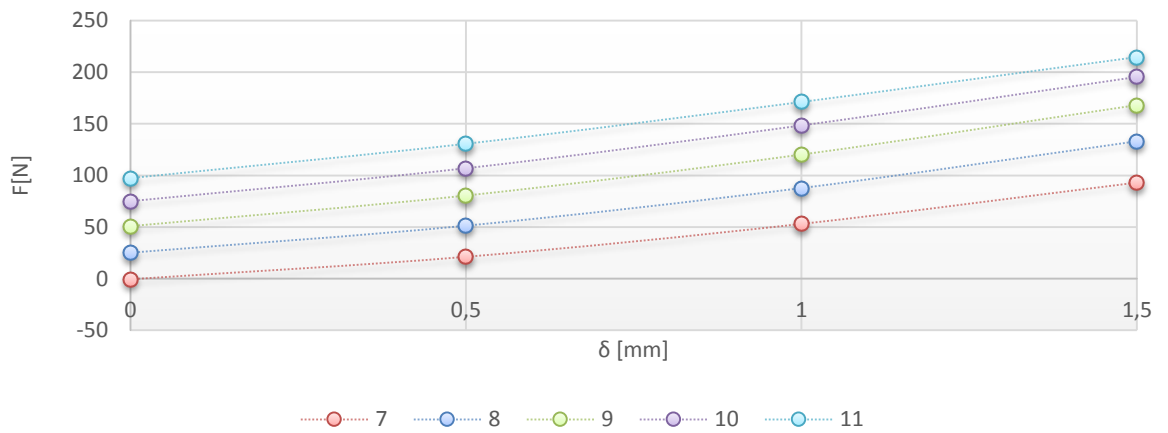
## Seznam tabulek

TAB. 1 PROVOZNÍ HODNOTY TLAKU A TEPLoty ZÁŽEHOVÉHO MOTORU [1].....	15
TAB. 2 PROVOZNÍ HODNOTY TLAKU A TEPLoty VZNĚTOVÉHO MOTORU [1][12] .....	16
TAB. 3 ROZDĚLENÍ AKTUÁTORŮ .....	19
TAB. 4 HODNOTY OBJEMU VSTRÍKOVANÉHO PALIVA PŘI NEJVYŠŠÍCH OTÁČKÁCH.....	27
TAB. 5 VÝSLEDKY STATISTICKÉ ANALÝZY KONVENČNÍCH VENTILŮ .....	28
TAB. 6 KONVERGENCE PŘI PROLOŽENÍ POLYNOMY RŮZNÝCH ŘÁDŮ .....	32
TAB. 7 VÝSLEDKY MODELU PO OPTIMALIZACI .....	35
TAB. 8 VÝSLEDKY MODELU PO OPTIMALIZACI A CITLIVOSTNÍ ANALÝZE .....	36
TAB. 9 POČET ZÁVITŮ A ELEKTRICKÝ ODPOR PRO RŮZNÉ VODIČE .....	41
TAB. 10 MAGNETICKÁ ENERGIE V ZÁVISLOSTI NA POLOZE KOTVY .....	42
TAB. 11 HODNOTY ČASOVÝCH KONSTANT PRO UVAŽOVANÉ VODIČE CÍVKY .....	43
TAB. 12 HODNOTY MAGNETICKÉ INDUKCE V POUZDRÉ MAGNETŮ .....	54
TAB. 13 HODNOTY ČINNÉHO ODPORU VÝSLEDNÉHO PROTOTYPU .....	56
TAB. 14 NAMĚŘENÉ ÚDAJE PŘI SPÍNÁNÍ AKČNÍHO ČLENU .....	56
TAB. 15 PODMÍNKY MĚŘENÍ POMOCÍ ČIDLA POLOHY .....	57

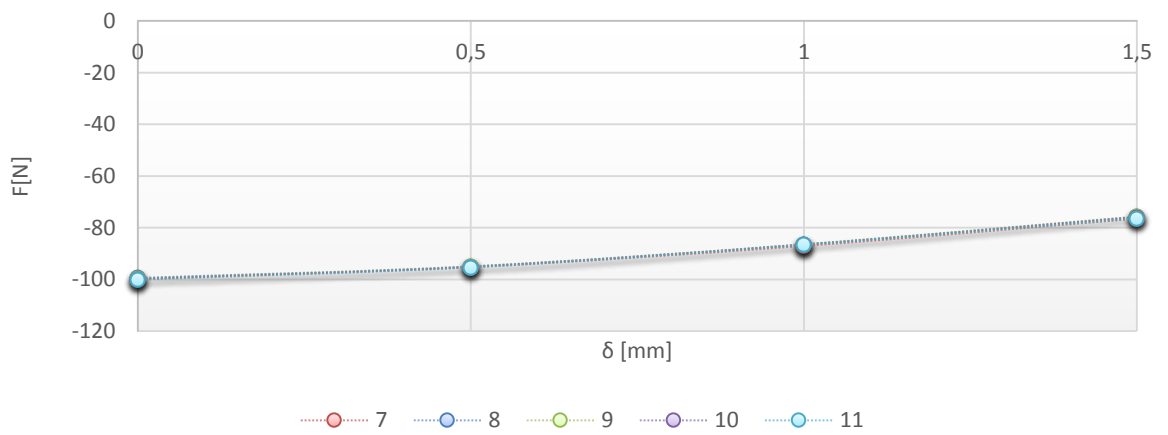
## Přílohy

### Příloha A – Grafické vyjádření citlivostní analýzy

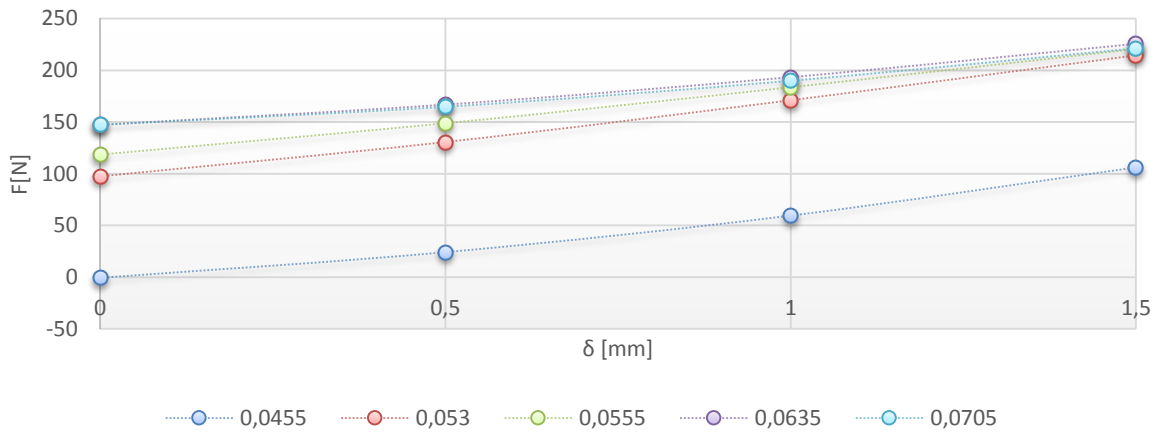
Vliv změny šířky jádra  
Otevírací charakteristika



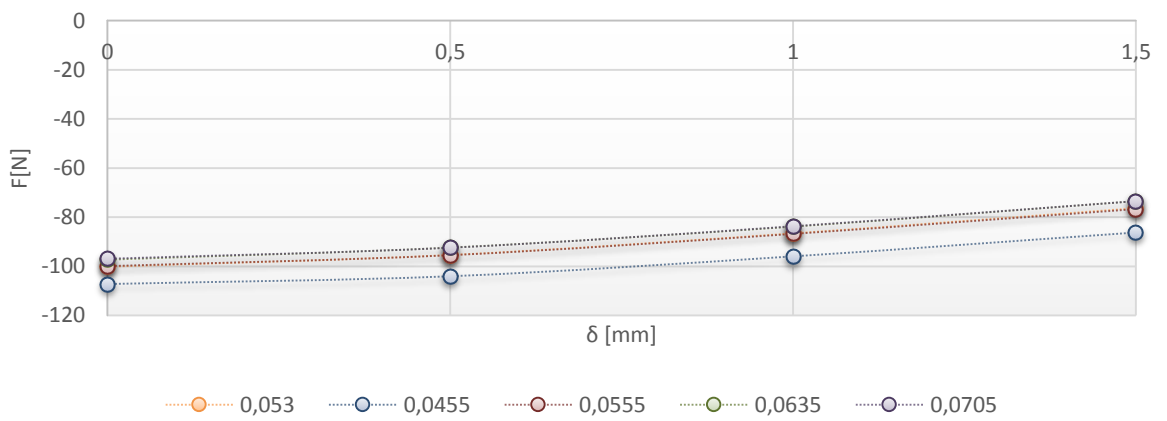
Vliv změny šířky jádra  
Zavírací charakteristika



### Vliv změny délky kotvy Otevírací charakteristika

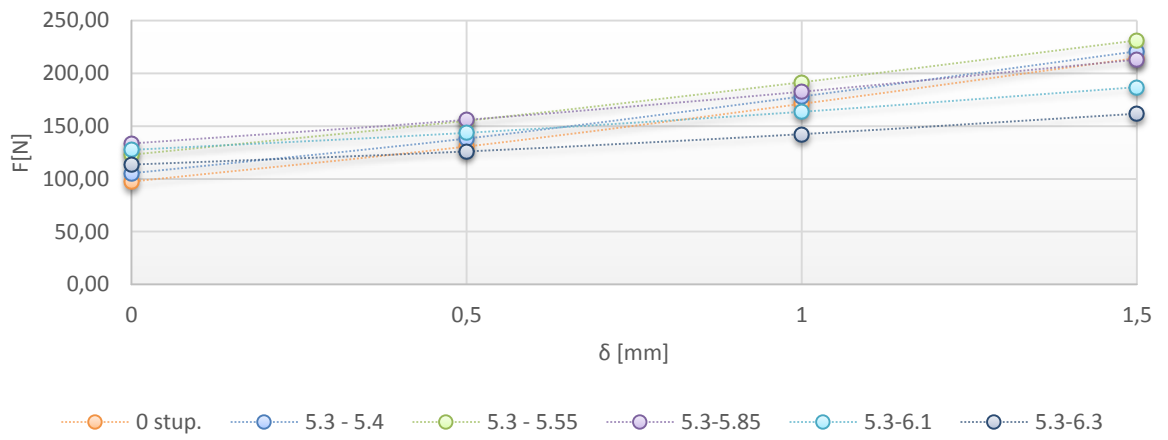


### Vliv změny délky kotvy Zavírací charakteristika

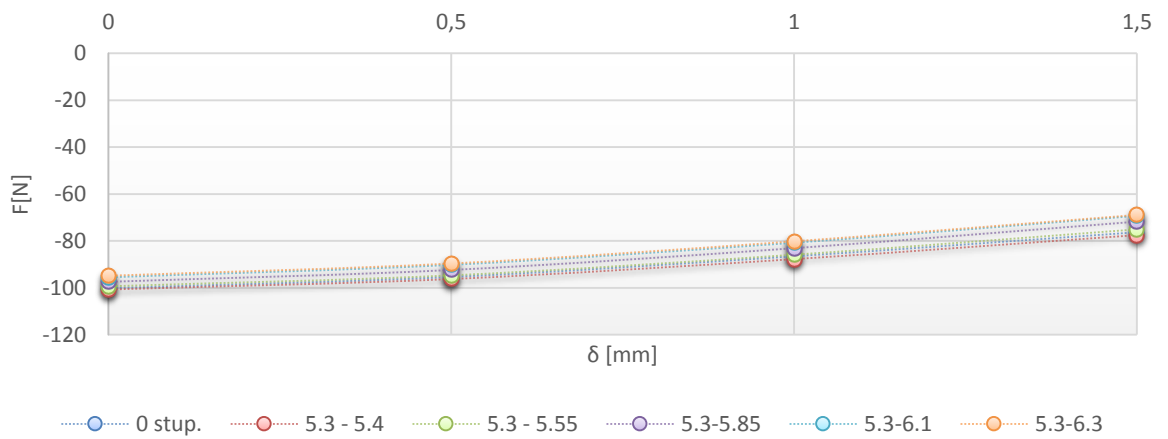




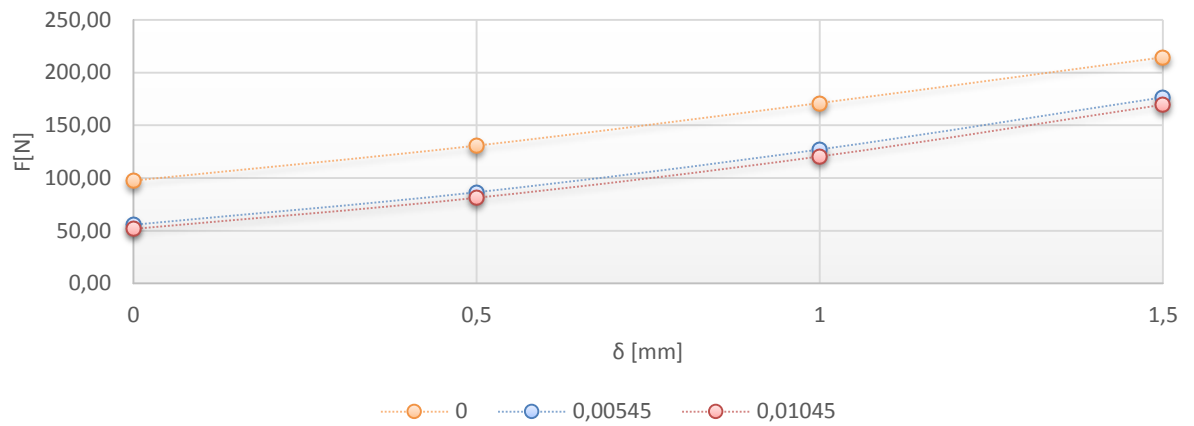
### Vliv změny úhlu kotvy Otevírací charakteristika



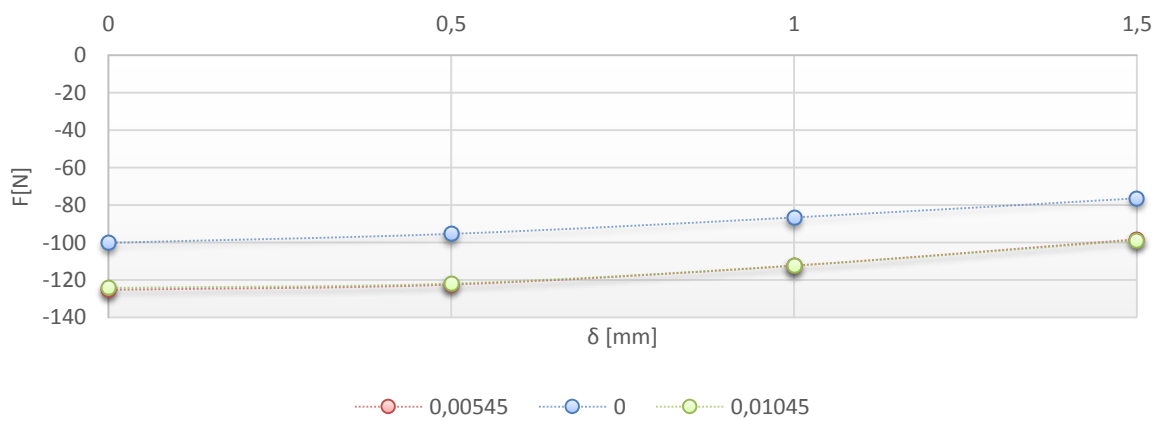
### Vliv změny úhlu kotvy Zavírací charakteristika



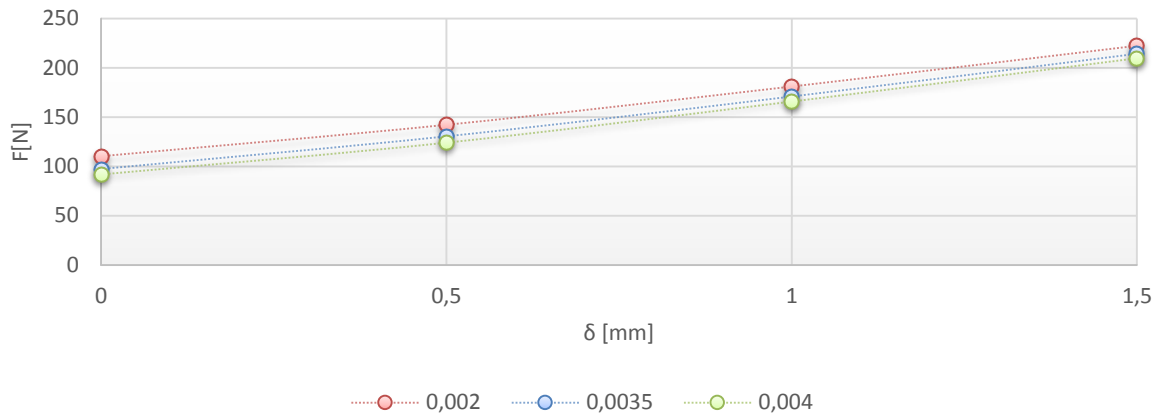
### Vliv změny velikosti ocelového mezikruží pod magnety Otevírací charakteristika



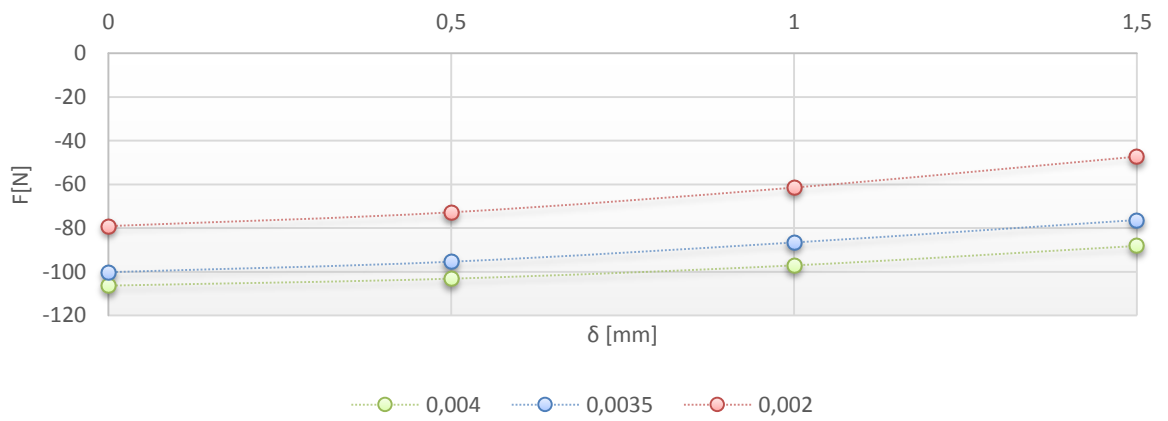
### Vliv změny velikosti ocelového mezikruží pod magnety Zavírací charakteristika



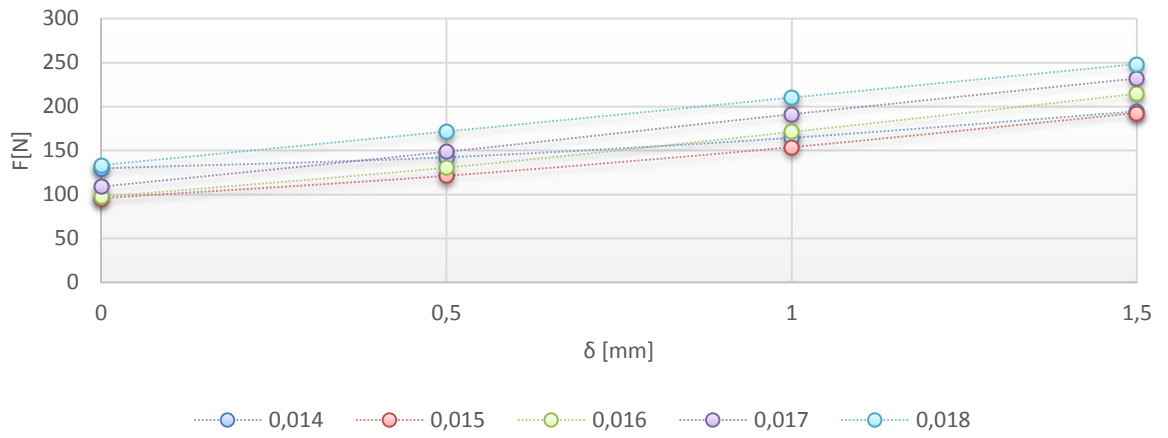
### Vliv změny hloubky zubu $\delta$ kotvě Otevírací charakteristika



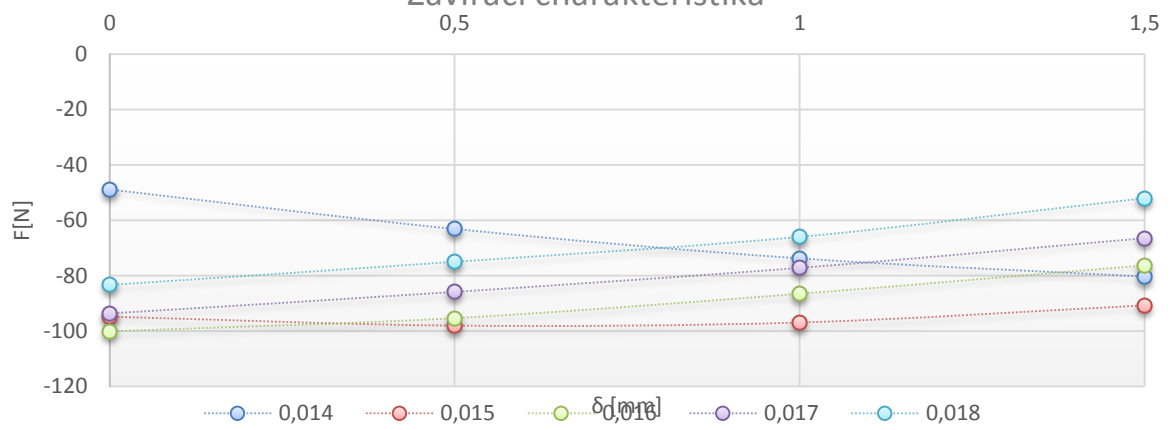
### Vliv změny hloubky zubu $\delta$ kotvě Zavírací charakteristika



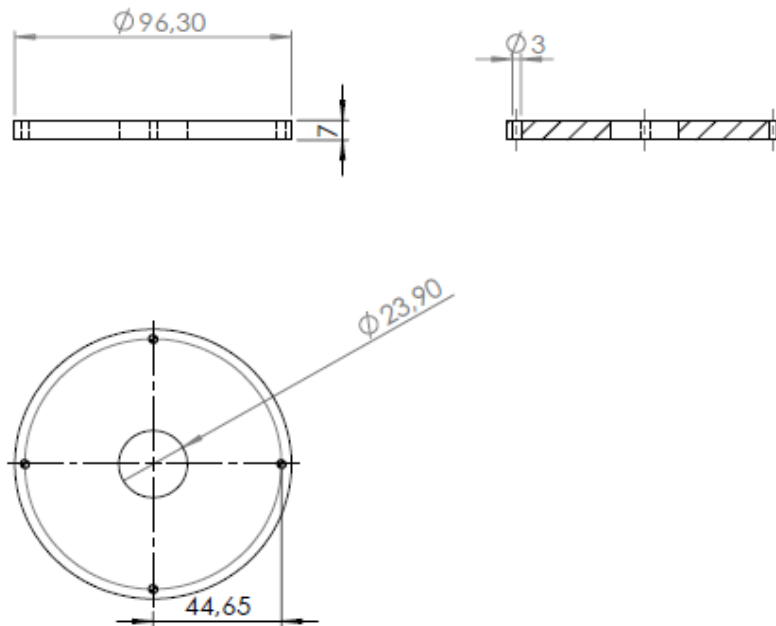
### Vliv změny výšky zubu $\delta$ kotvě Otevírací charakteristika



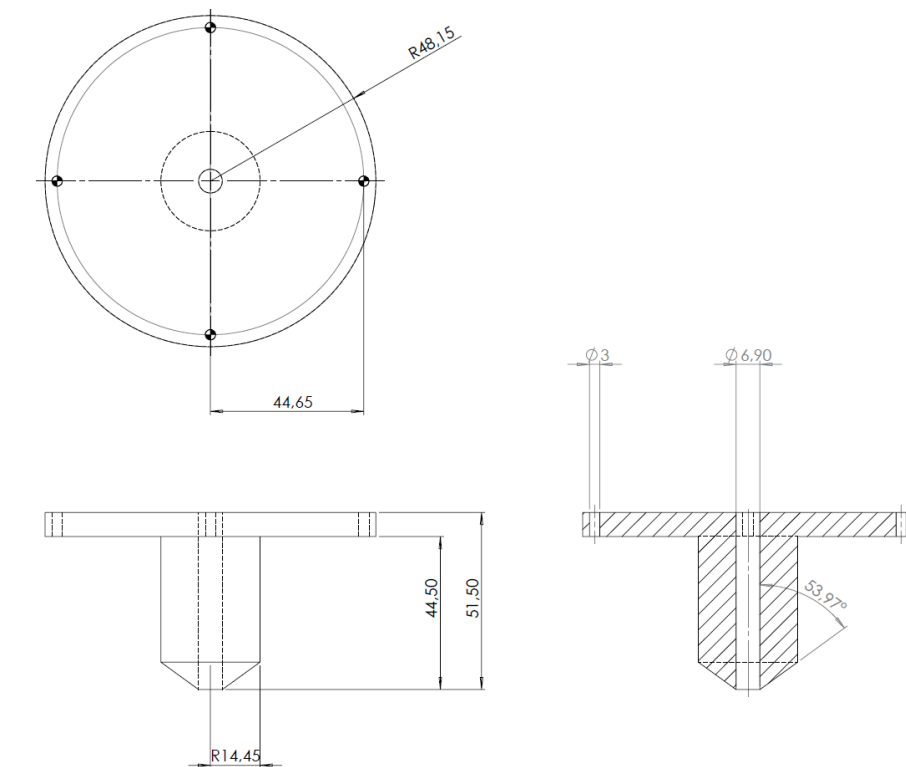
### Vliv změny výšky zubu $\delta$ kotvě Zavírací charakteristika



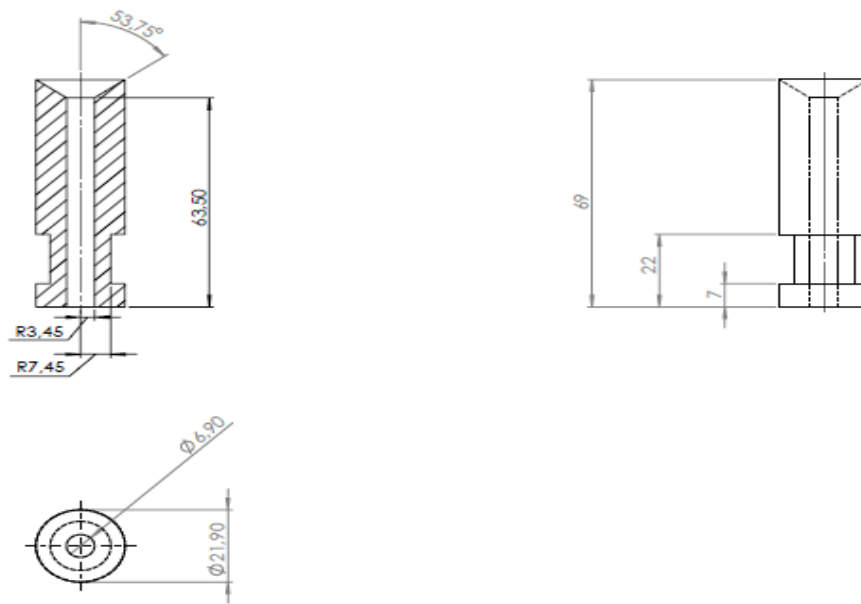
**Příloha B – Výkresová dokumentace**



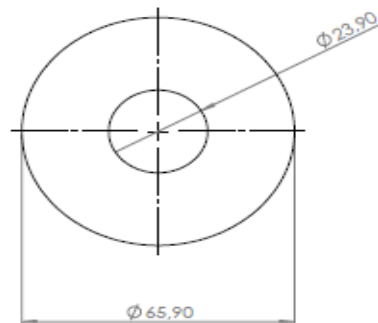
*Výkresová dokumentace dolního magnetického obvodu*



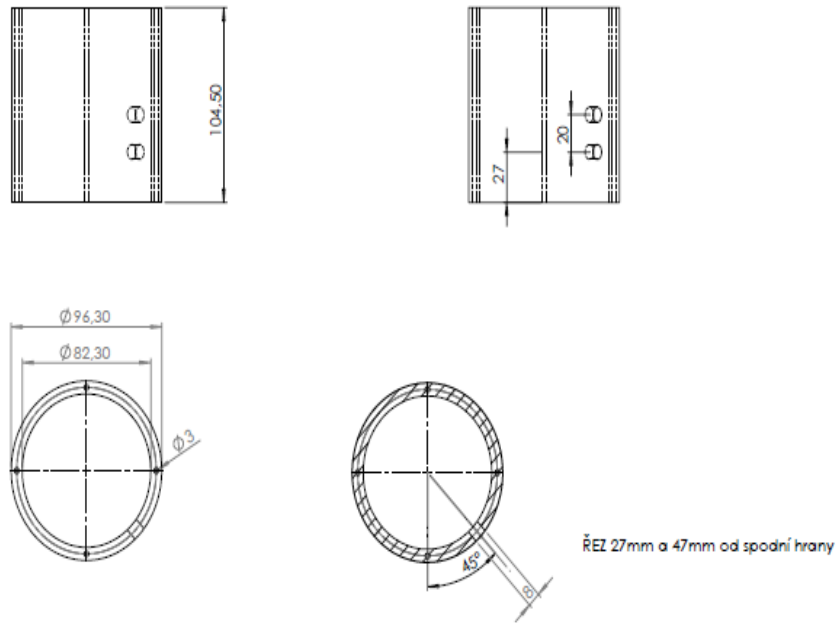
*Výkresová dokumentace horního magnetického obvodu*



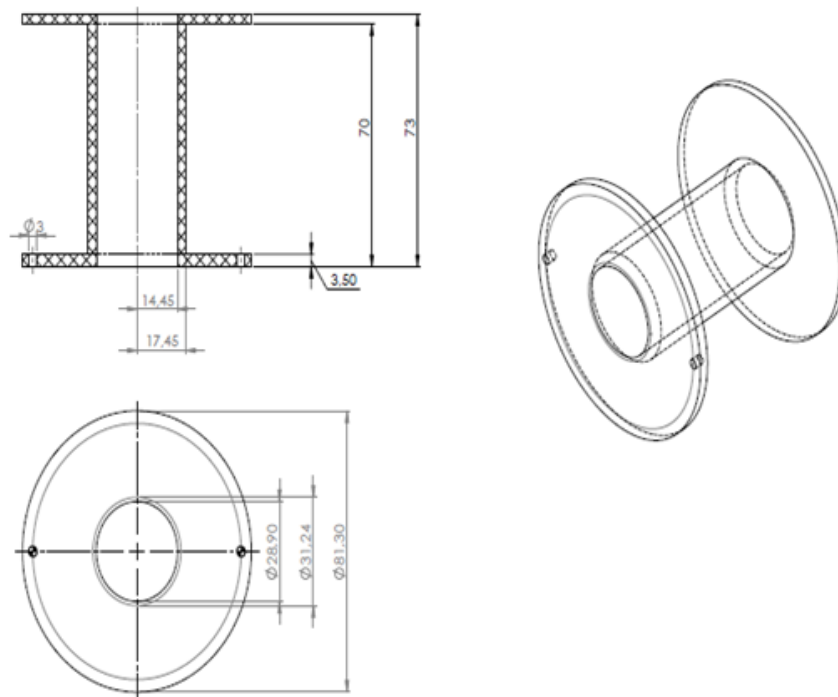
Výkresová dokumentace kotvy



Výkresová dokumentace magnetického obvodu pod neodymem

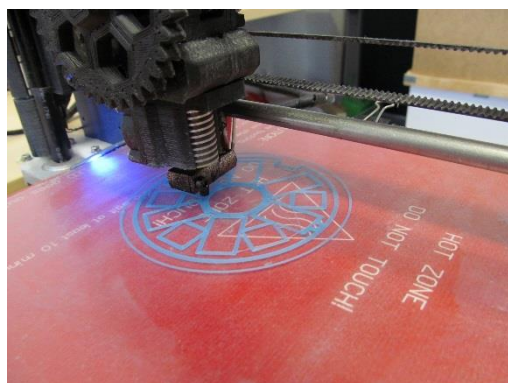


Výkresová dokumentace jádra cívky

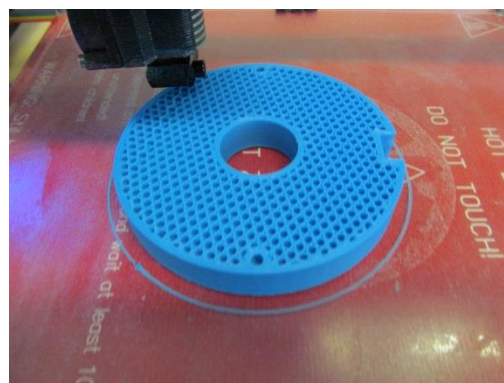


Výkresová dokumentace těla elektromagnetického ventilu

## Příloha C – Fotografie



*Tisk uložení magnetů*



*Tisk spodního plastu pouzdra*



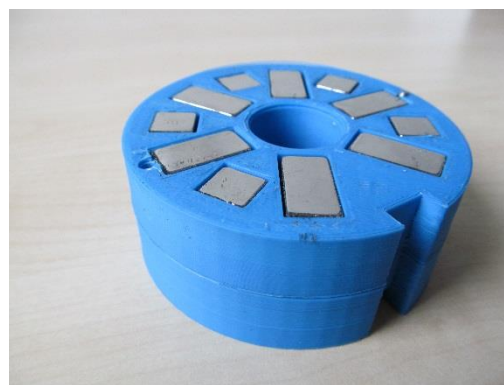
*Uložení s vloženými magnety*



*Uložení s ocelovým mezikružím*



*Kotva akčního členu*



*Složené plastové pouzdro s magnety*





*Navíjení cívky*



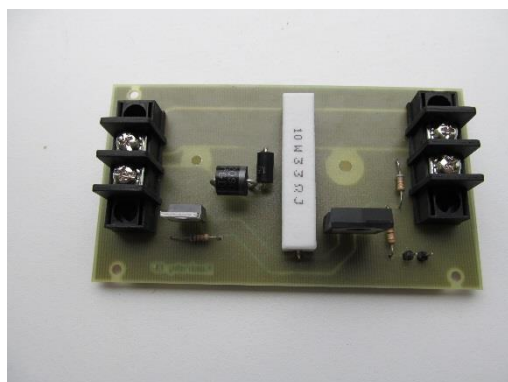
*Skládání ventilu*



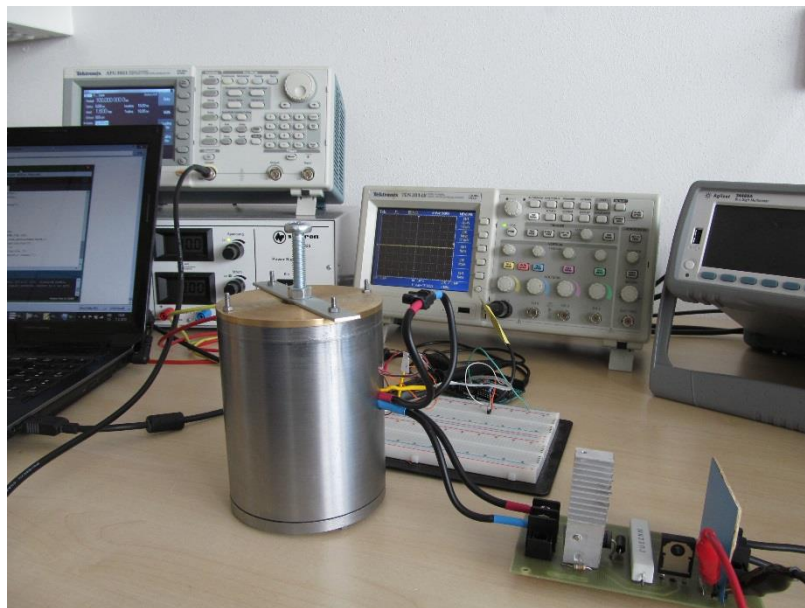
*Spodní magnetický obvod*



*Horní magnetický obvod*



*DPS s osazenými součástkami*



*Experimentální stanoviště*