

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

Diplomová práce

KOAXIÁLNÍ BISTABILNÍ ELEKTROMAGNETICKÝ
VENTIL S PERMANENTNÍMI MAGNETY

Karel POSPÍŠIL

květen 2017

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2016/2017

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Karel POSPÍŠIL**
Osobní číslo: **E15N0112P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektroenergetika**
Název tématu: **Koaxiální bistabilní elektromagnetický ventil
s permanentními magnety**
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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

1. Popište problematiku elektromagnetických aktuátorů pracujících ve funkci ventilu pro řízení toku tekutiny.
2. Provedte rešerši konstrukčního provedení elektromagnetických ventilů a možností jejich řízení.
3. Navrhňte koaxiální elektromagnetický ventil pracující v bistabilním režimu.
4. Provedte návrh všech dílčích částí ventilu s důrazem na bezpečnost jeho provozu a možnosti jeho řízení.
5. Navržený ventil zkonstruujte a provedte základní ověření jeho funkce.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

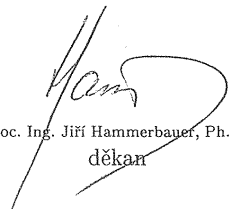
1. NESBITT, Brian. Handbook of valves and actuators: valves manual international. Butterworth-Heinemann, 2011.
2. ANGADI, S. V., et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: A multi-physics finite element model. Engineering Failure Analysis, 2009, 16.3: 874-887.
3. ANGADI, S. V., et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 2: Experimental study. Engineering Failure Analysis, 2009, 16.3: 944-963.
4. KURFÍRT, Martin, et al. Numerical Study and Experimental Verification of Novel Electromagnetic Actuator in Valve Operation, Computational Problems of Electrical Engineering, 2013
5. MACH, František, KAMINSKÝ, Tomáš. Novel Monostable Fail-Safe Electromagnetic Actuator for Straight Valve in High-Speed Operation. ELEKTRO, 2016.

Vedoucí diplomové práce: Ing. František Mach, Ph.D.


Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: 14. října 2016

Termín odevzdání diplomové práce: 19. května 2017


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




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

V Plzni dne 14. října 2016

ANOTACE A KLÍČOVÁ SLOVA

Předkládaná diplomová práce se zabývá návrhem, konstrukcí a ověřením funkčnosti nového prototypu elektromagnetického aktuátoru pracujícího v režimu ventilu. V úvodní části je rozebrán současný stav elektromagnetických ventilů, jejich základní princip, příklady provedení a nové vyvíjené prototypy. V další části jsou popsány matematický model a návrh ventilu. V poslední části pak konstrukce a experimentální ověření základní funkce.

KLÍČOVÁ SLOVA

Magnetické pole, permanentní magnet, ventil, statická charakteristika, dynamická charakteristika

ANOTATION AND KEYWORDS

This thesis is focused on design, construction and experimental verification of a new prototype of electromagnetic actuator in valve operation. Current state of the art in the field of electromagnetic valves is described in the introduction part and main attention is paid to their basic functional principle, examples of their construction and application. Mathematic model and design of a new valve prototype is described in the main part of the thesis. The last part is focused on construction and experimental verification of the prototype basic principle of operation.

KEYWORDS

Magnetic field, permanent magnet, valve, static characteristics, dynamic characteristic

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Františku Machovi, Ph.D. za skvělé vedení, časté podněty a pomoc při jejím vypracování.

PROHLÁŠENÍ

Předkládám tímto k posouzení diplomovou práci, zpracovanou během mého studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, s použitím uvedené odborné literatury, a pramenů a že veškerý software, použitý při jejím řešení a zpracování, byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni, dne 18.5.2017

Karel Pospíšil

SEZNAM SYMBOLŮ

H	$A \cdot m^{-1}$	intenzita magnetického pole
B	T	magnetická indukce
F	N	síla
U	V	elektrické napětí
I	A	elektrický proud
J	$A \cdot m^{-2}$	proudová hustota
τ	s	časová konstanta
R	Ω	elektrický odpor
L	H	indukčnost
Φ	Wb	magnetický indukční tok
w_m	$J \cdot m^{-3}$	objemová hustota energie magnetického pole
A	$Wb \cdot m^{-1}$	magnetický vektorový potenciál
m	kg	hmotnost
v	$m \cdot s^{-1}$	rychlost
z	m	dráha
μ	$H \cdot m^{-1}$	permeabilita
V	m^3	objem
S	m^2	plocha
ρ	$\Omega \cdot m$	elektrická rezistivita
N	–	počet závitů
W_m	J	energie magnetického pole

OBSAH

i ÚVOD DO PROBLEMATIKY	2
I.1 VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ	3
I.2 MOTIVACE PRÁCE	5
I.3 ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY VE FUNKCI VENTILU	8
I.3.1 Současný stav elektromagnetických ventilů	8
I.3.2 Příklad standardního ventilu	10
I.3.3 Příklady vyvíjených prototypů	12
I.3.3.1 Prototyp bistabilního ventilu pro technologii poměrného časování	12
I.3.3.2 Prototyp monostabilního ventilu	14
I.4 NOVÉ KONCEPCE ELEKTROMAGNETICKÝCH VENTILŮ	16
I.4.1 Prototyp monostabilního ventilu - RolyPoly	18
I.4.2 Prototyp bistabilního ventilu - TROMAG	19
I.4.3 Nový prototyp - modulární ventil	20
ii NÁVRH VENTILU	22
II.1 MATEMATICKÝ MODEL	23
II.1.1 Model magnetického pole	23
II.1.2 Elektrický obvod	25
II.1.3 Dynamika pohybu	26
II.2 NÁVRH AKČNÍHO ČLENU	28
II.2.1 Uspořádání akčního členu	28
II.2.2 Analýza magnetického pole akčního členu	30
II.2.2.1 Analýza magnetického pole generovaného pouze magnety	35
II.2.2.2 Studie zvýšení přídržné síly akčního členu	39

Obsah

II.2.3 Optimalizace rozměrů magnetického obvodu	40
II.2.4 Návrh cívky	42
II.2.5 Simulace dynamiky ventilu	44
II.2.6 Návrh magnetů	46
II.2.7 Sestavení ventilu	47
iii KONSTRUKCE VENTILU A OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍ FUNKCE	49
III.1 KONSTRUKCE VENTILU	50
III.2 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE	52
iv ZÁVĚR PRÁCE	56
IV.1 ZÁVĚR A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE	57
Přílohy	63

Část I

ÚVOD DO PROBLEMATIKY

i.1

VYMEZENÍ ZÁKLADNÍCH POJMŮ

Aktuátor, také nazýván jako akční člen, je v regulační technice část soustavy, která převádí vstupní (řídící) veličinu na výstupní veličinu, která je ve formě mechanické energie. Aktuátor pracuje s energií a schopností aktuátoru je měnit míru svého působení podle úrovně vstupní veličiny. Vstupní veličina je u jednotlivých typů aktuátorů různé fyzikální povahy. Nejčastěji se u aktuátorů využívá těchto vstupních veličin

- elektromagnetická (převod elektrické energie na mechanickou),
- pneumatická (převod tlakové potenciální energie plynu na mechanickou) a
- hydraulická (převod tlakové energie nestlačitelné kapaliny na mechanickou).

Existují také speciální typy aktuátorů, které mají jako vstupní veličinu například tepelnou energii nebo energii světla. Aktuátory využívající elektromagnetickou energii se nazývají elektromechanické. Elektromechanické aktuátory převádí elektrické veličiny (napětí a proud) přivedené na vstup aktuátoru na mechanickou veličinu, která je v tomto prvku výstupní veličina. Výstupní mechanická veličina je charakterizována silou, která může způsobovat deformaci, rotaci (pootočení) nebo translaci (posunutí). Působení výstupní veličiny je tedy obecně spjata s pohybem. V tomto aktuátoru tedy dochází k tzv. elektromechanickým přeměnám. Elektromechanické aktuátory se dále dělí podle charakteru silového pole, pole se kterým aktuátor pracuje je buď elektrické nebo magnetické. [1]

Elektromechanické aktuátory využívající magnetické pole dosahují velmi vysokých hustot energie v makroskopickém měřítku díky využití feromagnetických materi-

álů, které se vyznačují vysokou relativní permeabilitou. Aktuátory využívající elektrické pole oproti magnetickým aktuátorům dosahují značně nižších hustot energie. Důvodem je nízká permitivita dielektrických materiálů. To vede k slabšímu silovému působení. Z tohoto důvodu se aktuátory využívající elektrické pole používají velmi málo oproti aktuátorům pracujícím s magnetickým polem.

Existují také elektromechanické aktuátory, které využívají speciální materiály, vyznačující se specifickými vlastnostmi v pevné fázi. Jedná se například o materiály s tepelně dilatačními elastickými vlastnostmi (termoelastické aktuátory), obráceným piezoelektrickým jevem (piezoelektrické aktuátory), magnetostrikcí (magnetostrikční aktuátory) nebo s elektrostrikcí (elektrostrikční aktuátory). [1]

Aktuátory se dále dělí podle druhu mechanického pohybu na:

- **Lineární aktuátory:** Jedná se o aktuátory využívající pro svou činnost translaci (posuvný pohyb). Silové působení u tohoto typu aktuátorů je generováno přímým působením magnetického pole na cívku protékanou proudem nebo na feromagnetický materiál. Mezi lineární aktuátory patří také lineární motory.
- **Rotační aktuátory:** Jedná se o aktuátory využívající pro svou činnost rotační pohyb. Jedná se o točivé elektrické stroje. Točivé stroje jsou nejvyužívanějším typem aktuátorů a v celé historii elektrotechniky byly nejrozšířenějším předmětem výzkumu právě tyto aktuátory. V současné době díky tomu byly vlastnosti těchto aktuátorů značně vylepšovány a dosahují současně velmi dobrých parametrů.
- **Aktuátory s větším počtem stupňů volnosti:** Výsledný pohyb může být například obecný pohyb v rovině (planární aktuátory) nebo po kulové ploše (sférické aktuátory).

Elektromechanické aktuátory se dále dělí podle charakteru vstupního signálu na

- stejnosměrné aktuátory a
- střídavé aktuátory (1f, 3f nebo vícefázové).

i.2

MOTIVACE PRÁCE

Elektromechanické aktuátory nacházejí významné využití jako součásti výrobních a mechatronických soustav. Používají se například u manipulátorů v chemickém a potravinářském průmyslu, při řízení technologických procesů ve strojírenství, u robotických soustav (například v biomedicinském inženýrství k dosažení pohybu protéz a ortéz), v automobilovém, leteckém a železničním průmyslu a nacházejí využití také v dopravních prostředcích. Elektromechanické aktuátory nalézají také využití jako ventily sloužící pro řízení toku kapalin a plynů. Takové ventily mají velmi široké využití v mnoha průmyslových odvětvích.

Ventily jsou velmi důležitou součástí topných soustav budov, v plynárenských sítích, ve vodárenských sítích, v teplárenských sítích a velmi důležitou roli mají také v energetice, v elektrárenství. V tepelných elektrárnách jsou ventily nezbytně nutné pro správnou, efektivní a bezpečnou činnost řady systémů. Využívají se zde jako škrtící regulační ventily průtoku páry, jako bezpečnostní ventily, které jsou schopny v případě poruchy uzavřít přívod páry a také sehrávají velmi důležitou úlohu při najíždění elektrárny, kdy je nesmírně důležité pomocí ventilů postupně otevírat jednotlivé technologické okruhy jako chladicí okruhy, a okruhy páry. U vodních elektráren mají ventily také velmi důležitou roli, slouží zde například k řízení průtoku vody na turbínu. Ventily jsou také základní součástí nezbytně nutnou pro funkci tepelného čerpadla, konkrétně jsou využívány jako expanzní ventily pro chladivo vstříkované do výparníku. Inovace

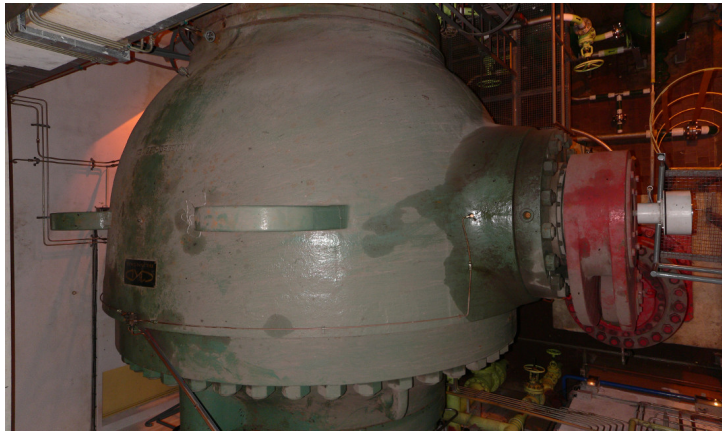
technologie elektromagnetických ventilů má tedy velký dopad na modernizaci mnoha technických a technologických celků, které díky tomu mohou být efektivněji řízeny.

Důležité požadavky na moderní aktuátory jsou

- vysoká rychlost reakce,
- nízká energetická náročnost provozu,
- bezpečnost provozu,
- velká odolnost všech prvků vůči stárnutí a
- vestavěná inteligence.

Ventily ve funkci bezpečnostních prvků musí zajistit při výpadku napájení v každém případě uzavření, dále také je důležitá vysoká odolnost proti tlakovým rázům, které mohou mít vliv na funkci ventilu. Je také nutné, aby spotřeba při provozu byla co nejnižší, optimálně aby ventil potřeboval vnější energii pouze na změnu stavu. Nutná je také časová stálost všech prvků, aby byly během standardní doby životnosti zachovány stejné vlastnosti. Moderní ventily by také měly mít v souladu s nejnovějšími trendy v průmyslu (Průmysl 4.0 [12]) vestavěnou inteligenci, to jest schopnost vyhodnotit aktuální stav, v případě ventilů otevřeno/zavřeno a také kontrola, jestli došlo ke správnému otevření/uzavření, kontrola teploty dílčích částí, aktuální hodnota průtoku, tlaku, atd. Takové moderní zařízení umí také komunikovat s ostatními zařízeními nacházející se v daném průmyslovém okruhu například pomocí internetu (Internet of Things) [13]

MOTIVACE PRÁCE



Obr. 1: Příklady ventilů: kulový ventil použitý v přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé stráně (nahore), sériově vyráběné ventily v průmyslu (dole)

i.3

ELEKTROMAGNETICKÉ AKTUÁTORY VE FUNKCI VENTILU

Elektromagnetické ventily jsou často používány pro dávkování a regulaci toku tekutiny. Řízení toku tekutiny může být dvouhodnotové nebo proporční. V jednodušším případě je pouze dvouhodnotové, konstrukční uspořádání takového ventilu je velmi jednoduché, potřeba je pouze mechanismus pro otevření a prvek, který bude svým působením ventil uzavírat, typicky se pro uzavření využívá pružina. Pokud má ventil schopnost řídit velikost toku tekutiny, jedná se o proporcionální ventil, kde velikostí proudu cívky je ovlivňována poloha uzávěru kontinuálně. Další možností je cyklické spínání cívky, kdy je ventil střídavě v otevřené a uzavřené poloze. Velmi důležitým parametrem u ventilů je tlaková ztráta způsobená průchodem tekutiny přes ventil. U ventilů určených pouze pro řízení směru toku tekutiny je tlaková ztráta menší než u ventilů určených pro regulaci velikosti průtoku tekutiny. [4]

I.3.1 SOUČASNÝ STAV ELEKTROMAGNETICKÝCH VENTILŮ

V současné době jsou v komerční praxi využívány elektromagnetické ventily s pružinami. Pružiny jakožto prvky využívající pružné deformace jsou svými mechanickými vlastnostmi velmi výhodné z důvodu jejich jednoduchosti a lineární silové charakteristiky, ovšem za předpokladu, že pracovní oblast pružiny se nachází v lineární oblasti tahového diagramu. Problémem u pružin je takzvaná únava materiálu, kdy při opakova-

ném zatěžování pružiny dochází mimo elastických deformací také k nevratným plastickým deformacím, které mění mechanické vlastnosti pružin, což vede k degradaci pružiny. Taková degradace pružiny se může projevit pomalejší dobou reakce ventilu nebo v nejhorším případě neschopností uzavřít ventil. Dalším problémem pružin je, že se u mnoha ventilů musí nacházet v pracovní oblasti ventilu, to jest v kanálu, kterým protéká médium. Pružina je tedy vystavována nečistotám, které mohou mít také vliv na životnost a další komplikací jsou průchodky.

Snahou vyřešit problém s degradací pružin a eliminací průchodek je jejich nahrazení permanentními magnety, u kterých je vliv stárnutí značně menší. Další výhodou magnetů je, že se nemusí nacházet v pracovní oblasti, kterou protéká médium, ale mohou být mimo kanál. Záměnou pružin za magnety je dosaženo toho, že pohyb ventilu není řízen mechanickou silou vzniklou působením mechanických prvků, ale čistě elektromagnetickým polem. Díky permanentním magnetům není nutné dávat do pracovní oblasti žádné prvky, které vytvářejí pohyb ventilu. Tím je eliminován vliv protékaného média na prvky řídící pohyb ventilu.

i.3.2 PŘÍKLAD STANDARDNÍHO VENTILU

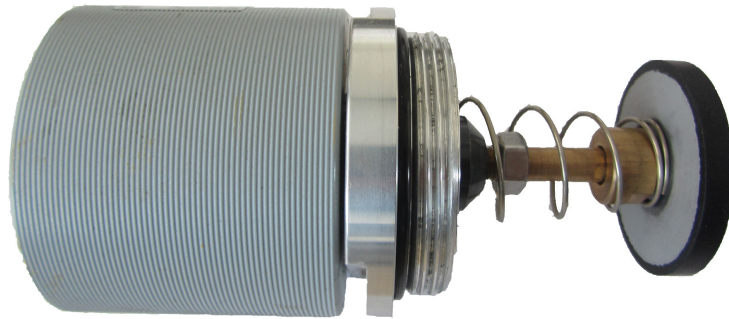
I.3.2 PŘÍKLAD STANDARDNÍHO VENTILU

V současné době se v komerční praxi využívají elektromagnetické ventily například pro ovládání topných plynů, tlakové vody, chladiva a také jako havarijní ventily. Napájení ventilů je jak střídavé, tak stejnosměrné. Ventily pro ovládání toku tlakových médií jsou vyráběny buď v provedení NC (normaly closed), kdy při nulovém proudu je ventil uzavřen nebo NO (normaly opened), který je při nulovém proudu uzavřen. Jako akční členy takové ventily využívají nejčastěji otočné cívky nebo servomotory. Konstrukční uspořádání těchto ventilů je řešeno tak, že cívka nebo servomotor je kolmo vůči kanálu, kterým protéká dané tlakové médium. Jako příklad je použit ventil od společnosti PEVEKO spol. s.r.o určený pro dvupolohové ovládání průtoku plyných paliv. V současnosti společnost PEVEKO spol. s.r.o nemá v nabídce plně elektromagnetické ventily, nýbrž pouze ventily s částečně ručním ovládním.



Obr. 2: Ventil pro plyná paliva EVPE 1050

i.3.2 PŘÍKLAD STANDARDNÍHO VENTILU



Obr. 3: Akční člen ventilu pro plynná paliva EVPE 1050

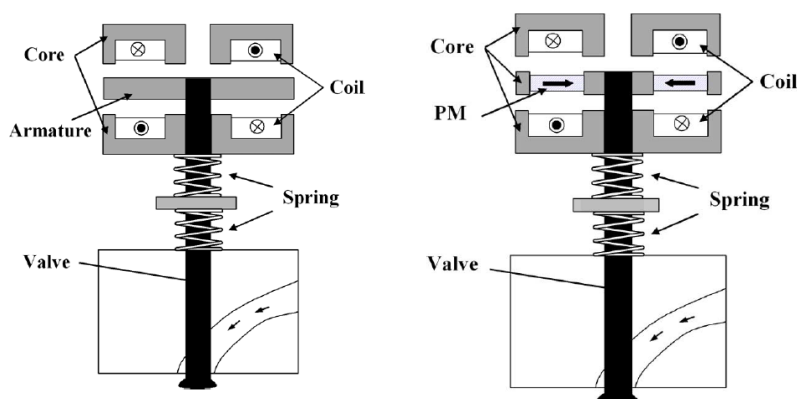
Tab. 1: Parametry ventilů pro plynná paliva [3]

Provedení	sedlový ventil s elastickým těsněním
Funkce	NC (bez proudu uzavřen)
Ovládání	elektricky - cívka
Průtokové médium	plynná paliva
Použitý materiál	těleso - mosaz; vnitřní části - nerez, hliník; těsnění - pryž
Teplota okolí	-20 až + 60 °C
Teplota média	Max 80 °C
Napájecí napětí	230V/50 Hz nebo 24V ss
Spínací čas	Max. 1 s (otevření i zavření)
Příkon	20VA
Krytí	IP 54

I.3.3 PŘÍKLADY VYVÍJENÝCH PROTOTYPŮ

I.3.3.1 Prototyp bistabilního ventilu pro technologii poměrného časování

V automobilovém průmyslu se využívají ventily pro řízení paliva, které pracují s technologií VVT (variable valve timing), jejíž cílem je optimalizace parametrů čtyřtákního motoru. Díky této technologii je možné řídit zdvih, okamžité otevření ventilu a dobu otevření ventilu. Pro takové aplikace se používají například lineární ventily se dvěma cívkami, uvedené na obrázku 3.



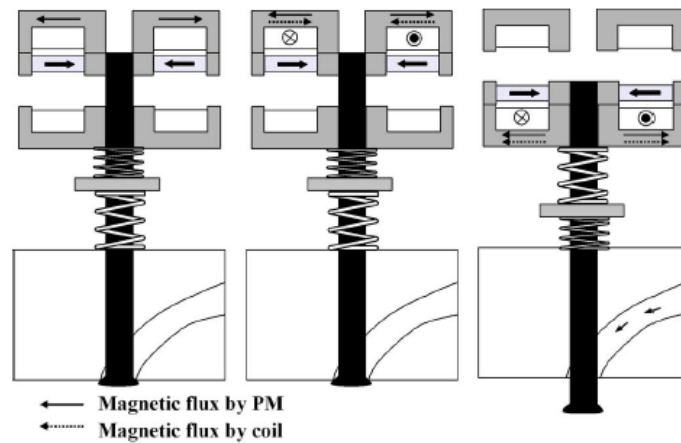
Obr. 4: Prototyp ventilu určený pro VVT (nalevo bez permanentních magnetů, napravo vylepšený prototyp s permanentními magnety) [8]

Tento ventil se skládá ze dvou cívek, dvou pružin a pohyblivého jádra. Cívky v tomto uspořádání při zapnutém proudu drží ventil buď v poloze otevřeno nebo zavřeno. Pro změnu stavu je potřeba vypnout proud v jedné cívce, díky pružinám se jádro začne pohybovat a zapne se proud ve druhé cívce, která bude jádro držet, dokud proud v této cívce nebude vypnut. Nevýhodou zde je, že pro udržení stavu otevřeno/zavřeno je potřeba dodávat do cívky stále proud, a jelikož je potřeba vyvinout sílu, která bude působit proti vratné síle pružin, je zde potřeba velkého proudu. To znamená větší ztráty, tedy horší účinnost. Tento problém se dá vyřešit nahrazením feromagnetického materiálu v

i.3.3 PŘÍKLADY VYVÍJENÝCH PROTOTYPŮ

pohyblivé kotvě permanentními magnety. Magnety jsou schopné udržet jádro ve stabilní poloze v otevřeném nebo uzavřeném stavu aniž by cívkami protékal proud. Na obrázku 5 napravo je znázorněno takové uspořádání.

Princip ventilu je ukázán na obrázku 5. Pro změnu stavu se nejprve musí vybudit horní cívka, která svým magnetickým polem vyruší magnetické pole generované magnetem, tím se vyruší síla vyvíjená magnetem a ventil se vlivem pružin začne pohybovat a sepne se proud ve spodní cívce, která přitáhne ventil do opačné polohy, ve které jej následně udrží permanentní magnet. Tím je rapidně snížena energetická náročnost ventilu. [8]

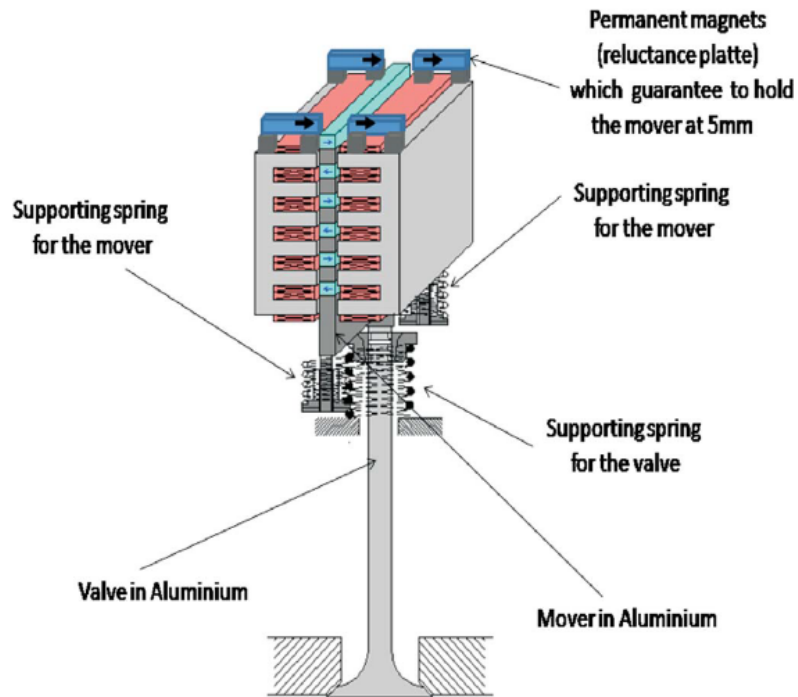


Obr. 5: Princip funkce ventilu v uspořádání s permanentními magnety [8]

1.3.3 PŘÍKLADY VYVÍJENÝCH PROTOTYPŮ

1.3.3.2 Prototyp monostabilního ventilu

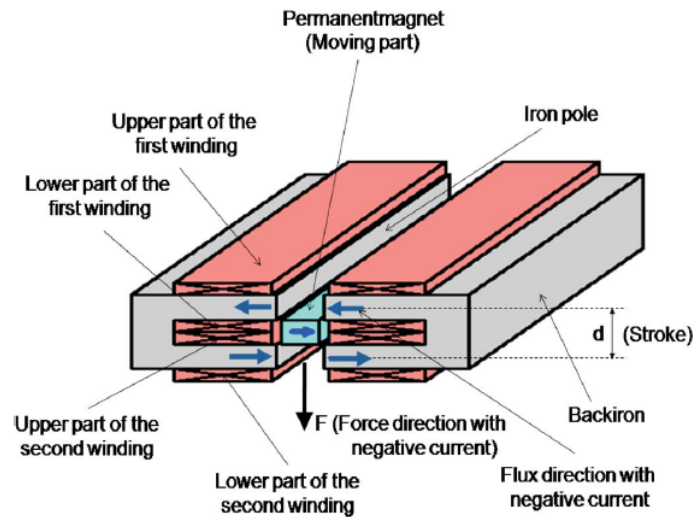
Tento prototyp elektromagnetického ventilu s permanentními magnety je složen z více cívek a permanentních magnetů, stejně jako předešlý prototyp i tento prototyp ke své činnosti využívá pružiny. Uspořádání tohoto ventilu je uvedeno na obrázku 6.



Obr. 6: Prototyp monostabilního ventilu [9]

i.3.3 PŘÍKLADY VYVÍJENÝCH PROTOTYPŮ

Na obrázku 7 je detailněji zobrazen segment magnetického obvodu, ze které je patrné, jak se uzavírají magnetické toky a jaké je výsledné silové působení.

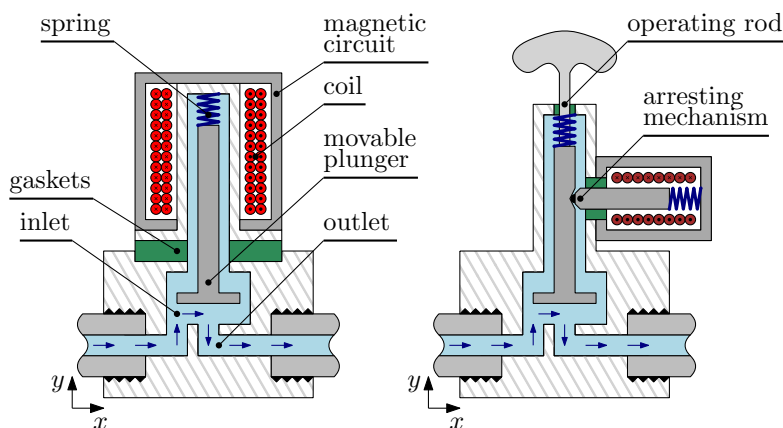


Obr. 7: Detail magnetického obvodu prototypu [9]

V tomto segmentu se nacházejí dvě cívky, generující magnetický tok, který je součtem toků od obou cívek. Uprostřed se nachází permanentní magnet, který má orientaci pole podle obrázku 6. Prochází-li cívkami elektrický proud, cívky generují magnetický tok, který začne interagovat s magnetickým polem permanentního magnetu. Pole cívek a magnetu bude interagovat tak, aby siločáry procházející přes magnetický obvod a permanentní magnet byly co nejkratší. Na magnet tedy působí síla směrem dolů. Takto je zrealizováno otevření ventilu. Pro uzavření ventilu se v prototypu nacházejí pružiny, které svojí silou navracejí ventil do původní polohy. [9]

NOVÉ KONCEPCE ELEKTROMAGNETICKÝCH VENTILŮ

Současné elektromagnetické ventily využívané v komerční praxi jsou díky své jednoduchosti nejvyužívanější regulační prvky pro řízení toku tekutin. Konstrukce a ovládání těchto ventilů je poměrně jednoduché. Současně využívané ventily však nejsou plně elektromagnetické, pro zajištění primární funkce ventilu využívají přídatných funkčních a konstrukčních prvků jako jsou pružiny, táhla, aretační mechanismy, průchodky a těsnění. [10]



Obr. 8: Uspořádání klasických elektromagnetických ventilů: monostabilní (nalevo) a bistabilní (napravo) s manuálním [10]

Na obrázku 8 jsou zobrazena principiální uspořádání klasických současných ventilů. Ventil nalevo je označován jako monostabilní, jelikož má pouze jednu stabilní po-

lohu. Tento ventil se skládá z pružiny, magnetického obvodu, pohyblivé části ventilu a cívky. Pružina zajišťuje, že pokud je cívka vypnuta, na pohyblivou část ventilu působí pouze síla pružiny, která udržuje ventil uzavřený. Pokud je na cívku přiveden proud, cívka vybudí magnetické pole, které svými silovými účinky působí na pohyblivou část proti síle od pružiny, tím přitáhne píst ventilu dovnitř cívky a dojde k otevření kanálu s tlakovým médiem.

Ventil napravo se nazývá bistabilní, má dvě stabilní polohy, v tom případě otevřeno a zavřeno. U klasických provedení elektromagnetických ventilů jsou tyto stabilní polohy zajištěny pomocí pružin a aretačního mechanismu. Otvírání takového ventilu je manuální, to znamená, že pro otevření je potřeba zatáhnout za táhlo, po vytažení táhla aretační mechanismus zajistí ventil ve stabilní otevřené poloze. Pro uzavření ventilu je potřeba přivést na cívku proud, který vytáhne aretační mechanismus druhá pružina vrátí ventil do uzavřené polohy. [10]

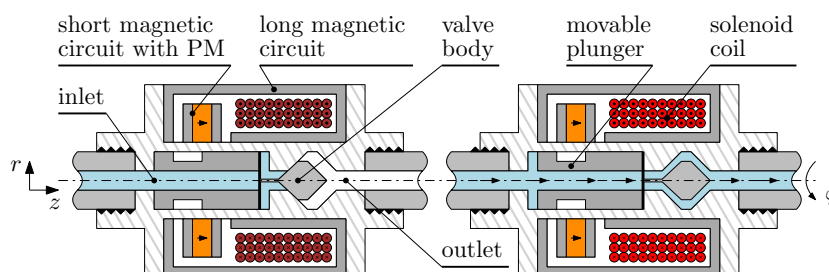
Všechny přídavné mechanické prvky potřebné pro funkci tradičních elektromagnetických ventilů mají negativní vliv na provozní parametry (energetická náročnost, tlakové ztráty a rychlost reakce) a odolnost vůči poruchám a tlakovým rázům. Dále také výrazně snižují pozorovatelnost funkce ventilů a jejich říditelnost. Pro zjištění aktuálního stavu ventilu je potřeba použít senzory průtoku, tlaku nebo polohy. Další nevýhodou také je, že některé přídavné části jako pružiny se z funkčních důvodů musí nacházet v kanálu, ve kterém se nachází tlakové médium. To může vést ke znečištění těchto prvků nebo k degradaci materiálu pružiny. [10]

Cílem současného výzkumu je vyvinout nové koncepce elektromagnetických aktuátorů ve funkci ventilu, které budou plně elektromagnetické, takže budou plně řízeny elektromagnetickým polem a koaxiální, ve kterém tekutina protéká ve stejném směru, v jakém se pohybuje sedlo ventilu. Dále je také kladen důraz na vestavěnou inteligenci a dynamické řízení, které by umožňovalo využívat ventil jako regulátor tlaku.

Hlavní cíle vývoje tedy jsou snížení energetické náročnosti, zvýšení rychlosti reakce, zvýšení odolnosti vůči poruchám a zavedení přesného řízení otevírání a zavírání. [10]

I.4.1 PROTOTYP MONOSTABILNÍHO VENTILU - ROLYPOLY

Koncept plně elektromagnetického monostabilního ventilu využívá děleného magnetického obvodu, který se skládá z primární části, ve které se nachází cívka a sekundární části, ve které je umístěn permanentní magnet. Stabilní poloha je zajištěna permanentním magnetem a vhodným tvarováním povrchu pohyblivé magnetické části. Magnet tedy ve stabilním stavu udržuje ventil uzavřený. Na obrázku 9 je znázorněno principiální uspořádání monostabilního ventilu.

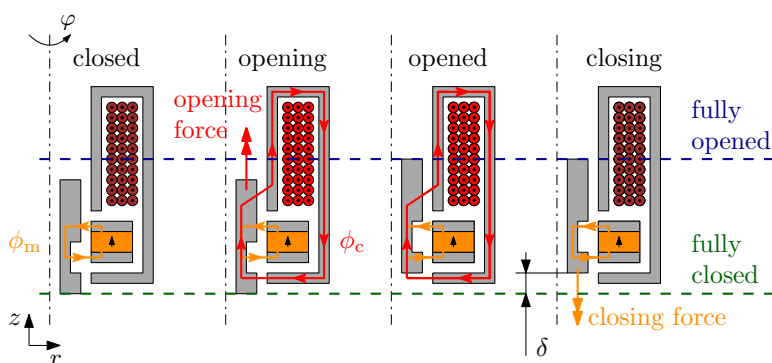


Obr. 9: Uspořádání nového konceptu monostabilního ventilu RolyPoly [5]

Pro otevření ventilu je potřeba přivést na cívku proud, který vybudí magnetické pole, které svým silovými účinky působí proti magnetickému poli generovanému permanentními magnety. Cívka svým magnetickým polem následně přitáhne pohyblivý píst a ventil je tak uveden do otevřeného stavu. Otevřený stav je však nestabilní poloha, to znamená, že pokud bude vypnuta cívka, permanentní magnet svým silovým působením navrátí ventil do stabilní uzavřené polohy. Zavírací síla je způsobena vhodným tvarováním pístu, toto tvarování vytváří stabilní polohu, které je dosaženo, když je ventil v uzavřeném stavu. Na obrázku 10 je znázorněn kompletní cyklus ventilu zahrnující otevření i zavírání, na kterém jsou vyznačené magnetické toky vybudené cívkou i magnetem.

Tento prototyp tedy nahrazuje svojí funkcí tradiční monostabilní elektromagnetický ventil využívající pružinu. Ventil je tedy ovládán pouze prostřednictvím interakce

I.4.2 PROTOTYP BISTABILNÍHO VENTILU - TROMAG

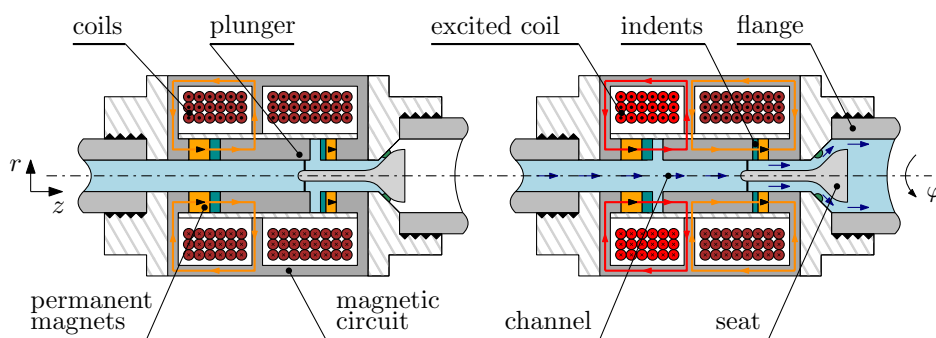


Obr. 10: Princip otevírání a zavírání monostabilního ventilu RolyPoly [5]

magnetického pole s feromagnetickým materiálem pohyblivého pístu. Díky tomu lze permanentní magnet nahrazující pružinu mimo oblast kanálu, kde nebude vystavován nečistotám, které se mohou objevovat v tlakovém médiu. [5]

I.4.2 PROTOTYP BISTABILNÍHO VENTILU - TROMAG

Koncept bistabilního plně elektromagnetického ventilu s permanentními magnety nahrazuje tradiční elektromagnetický bistabilní ventil, který využívá pro svou činnost mechanické prvky jako táhla a pružiny. Principiální uspořádání tohoto prototypu je zobrazeno na obrázku 11.



Obr. 11: Uspořádání nového konceptu bistabilního ventilu TROMAG [6]

I.4.3 NOVÝ PROTOTYP - MODULÁRNÍ VENTIL

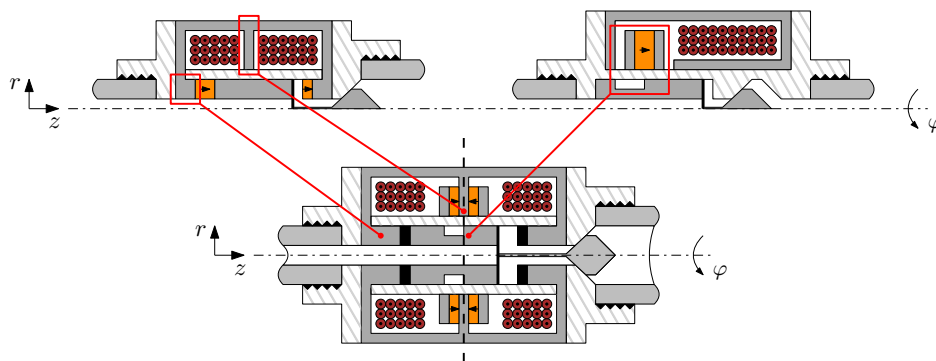
Ventil je oproti klasickému ventilu koaxiální. Tento prototyp se skládá ze dvou cívek, jedna má funkci otevírací cívky, druhá zavírací. Cívky odděluje sloupek z magnetického materiálu. Permanentní magnety jsou zde umístěny v dráze pohyblivého pístu. Aby nedošlo k mechanickému poškození magnetů vlivem srážek s pístem, je nutné dát mezi tyto dvě části těsnění z pružného materiálu, které tlumí nárazy. Ventil je nesymetrický, magnet, který drží ventil uzavřen je navržen tak, aby jeho energie byla větší než energie magnetu určeného pro otevírání. Tento požadavek pro větší rozměry uzavíracího magnetu je dán z důvodu protitlaku, který v uzavřené poloze působí proti přídržné síle vyvíjené magnetem. Magnetický tok vybuzený jednou cívkou vždy posiluje tok magnetu, nacházející se blíže k cívce a zeslabuje tok vzdálenějšího magnetu. Problematické u tohoto prototypu může být umístění magnetů, na které doráží píst ventilu. Principiální uspořádání tohoto prototypu je znázorněno na obrázku 8. [6]

I.4.3 NOVÝ PROTOTYP - MODULÁRNÍ VENTIL

Předešlé prototypy již jsou fyzicky vyrobeny a probíhá na nich testování. V současné době je předmětem výzkumu nový prototyp, kterým se dále zabývá tato diplomová práce. Základní myšlenkou pro vznik nového konceptu bylo zkombinování funkčních a konstrukčních prvků využitých v předchozích prototypch nových elektromagnetických ventilů. Koncept je zobrazen na obrázku 12.

Tento koncept je bistabilní, stejně jako předešlý TROMAG, změnou je zde však přemístění permanentních magnetů, které již nejsou umístěny v dráze pohyblivého pístu, ale nyní se nachází na středním sloupku magnetického obvodu, který dělí cívky. Z monostabilního ventilu RolyPoly bylo využito tvarování povrchu pohyblivého jádra, které je nezbytně nutné pro vytvoření přídržné síly, která bude držet ventil buď otevřený nebo uzavřený. Výhodou těchto bistabilních ventilů oproti monostabilnímu je menší energetická náročnost, jelikož bistabilní ventily potřebují proud pouze k vytvoření síly potřebné ke změně stavu ventily, ve stabilních polohách působí permanentní magnety, naproti

i.4.3 NOVÝ PROTOTYP - MODULÁRNÍ VENTIL



Obr. 12: Schématické znázornění nově vyvíjeného prototypu elektromagnetického bista-
bilního ventilu [10]

tomu monostabilní ventil vyžaduje pro udržení ventilu v otevřeném stavu neustálý pří-
vod elektrického proudu do cívky. [10]

Část II

NÁVRH VENTILU

ii.1

MATEMATICKÝ MODEL

V této kapitole je uveden obecný fyzikální model, který je dále uvažován při řešení návrhu elektromagnetického ventilu.

II.1.1 MODEL MAGNETICKÉHO POLE

Magnetické pole je popsáno 1. Maxwellovou rovnicí, jinak také nazývanou Ampérův zákon celkového proudu

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}, \quad (1)$$

kde \mathbf{H} je intenzita magnetického pole a \mathbf{J} je proudová hustota. Pro výpočty je výhodnější si zavést magnetický vektorový potenciál \mathbf{A} , díky kterému se zredukuje počet rovnic a zároveň je vektorový potenciál spojitý ve všech oblastech. Vektorový potenciál je definován jako

$$\mathbf{B} = \operatorname{rot} \mathbf{A}, \quad (2)$$

kde $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ je magnetická indukce a μ je permeabilita.

Dosazením a následnými úpravami rovnice (1) dostaneme pro magnetické pole parciální diferenciální rovnici ve tvaru:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|, T)} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3)$$

kde $\mu(|\mathbf{B}|, T)$ je permeabilita jako funkce teploty T a magnetické indukce \mathbf{B} , \mathbf{B}_r je remanentní indukce, která reprezentuje magnetické pole permanentních magnetů, \mathbf{A} je

magnetický vektorový potenciál a J_{ext} je vnější proudová hustota, která je dodávána zdrojem. Lze zanedbat závislost permeability na teplotě za předpokladu, že není dosaženo vysokých teplot nebo velkých teplotních rozdílů.

Silové účinky magnetického pole lze vyjádřit pomocí vztahu

$$\mathbf{F}_m = -\nabla W_m. \quad (4)$$

Jelikož se jádro ventilu může pohybovat pouze v jednom směru, vhodnou volbou souřadného systému se vztah pro sílu zjednoduší na

$$F_m = -\frac{\partial W_m}{\partial z}, \quad (5)$$

kde W_m je energie magnetického pole a z je osa, ve které se může jádro ventilu pohybovat.

Energie magnetického pole W_m je definována

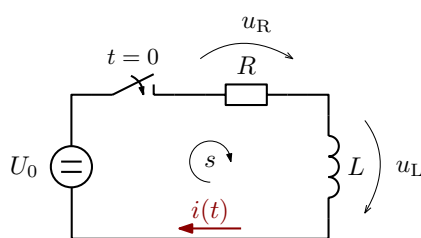
$$W_m = \int_V w_m dV = \int_V \int_0^{\mathbf{B}} \mathbf{H} d\mathbf{B} dV \quad (6)$$

kde w_m je objemová hustota energie. Celková energie magnetického pole je dána objemovým integrálem z hustoty energie magnetického pole.

Z modelu magnetického pole lze vyšetřit statickou silovou charakteristiku, což je závislost síly na poloze jádra $F_{(z)}$. Tato charakteristika je potřebná pro vyšetření dynamiky ventilu.

II.1.2 ELEKTRICKÝ OBVOD

Schéma zapojení obvodu je znázorněno na obrázku 13. Obvod se sestává ze stejnosměrného zdroje o napájecím napětí U_0 a cívky, která je zde reprezentována parametry R , což je elektrický odpor cívky a parametrem L , který je indukčnost cívky. Indukčnost cívky je nelineární. Nelinearita cívky je způsobena feromagnetickým materiálem, jehož permeabilita je závislá na vnějším magnetickém poli, v tomto případě na magnetickém poli generovaném elektrickým proudem i protékajícím cívkou. Jelikož se jádro ventilu pohybuje, dochází ke změně polohy magnetického jádra v magnetickém obvodu ventilu, tím se změní rozložení magnetického a pole a také magnetická energie tohoto pole. Jelikož je indukčnost svázána s energií pole, je závislá také na poloze magnetického jádra. Je vidět, že díky těmto závislostem na poloze pístu a proudu cívkou se řešení tohoto obvodu značně zkomplikuje.



Obr. 13: Náhradní schéma budícího obvodu aktuátoru

Rovnici pro tento obvod lze vyjádřit z 2. Kirchhoffova zákona

$$U_0 = u_{R(t)} + u_{L(t)}. \quad (7)$$

Dosazením za u_R z Ohmova zákona a u_L z Faradayova indukčního zákona dostaneme rovnici pro tento obvod ve tvaru

$$U_0 = Ri_{(t)} + \frac{d\Phi_{(t)}}{dt}, \quad (8)$$

ii.1.3 DYNAMIKA POHYBU

kde Φ je magnetický tok vybuzený cívkou. Jelikož magnetický tok je funkcí nejen proudu, ale také polohy pístu ventilu $\Phi = f(i, z)$, můžeme výraz $\frac{d\Phi}{dt}$ rozepsat pomocí totální derivace

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} = \frac{\partial\Phi}{\partial i} \frac{\partial i}{\partial t} + \frac{\partial\Phi}{\partial z} \frac{dz}{dt} = L_{(i)} \frac{\partial i}{\partial t} + v \frac{\partial\Phi}{\partial z}. \quad (9)$$

Člen $\frac{\partial\Phi}{\partial t}$ představuje dynamickou indukčnost a člen $\frac{dz}{dt}$ představuje rychlost pohybu jádra. Dosazením do rovnice (8) získáme

$$U_0 = Ri_{(t)} + L_{(i)} \frac{\partial i_{(t)}}{\partial t} + v_{(t)} \frac{\partial\Phi}{\partial z}. \quad (10)$$

Řešení rovnice pro tento přechodový jev již rozhodně není triviální. Je zde potřeba počítat se závislostí indukčnosti na proudu a dále také se závislostí magnetického toku na poloze pístu a rychlosti pístu. Poslední člen rovnice tedy představuje indukované napětí vytvářené pohybem pístu v nehomogenním magnetickém poli, nazývané také pohybové napětí. Důsledkem tohoto přechodového jevu je, že hodnota proudu v cívce není v okamžiku sepnutí maximální, ale narůstá spojitě do maximální hodnoty určené napětím zdroje U_0 a odporem R dle vztahu

$$I_{(max)} = \frac{U_0}{R}. \quad (11)$$

Jelikož je síla funkcí proudu, způsobuje tento přechodový jev časové zpoždění reakce ventilu.

II.1.3 DYNAMIKA POHYBU

Dynamika zkoumá pohybové vlastnosti jádra ventilu. Pohyb pístu je popsán Newtonovými pohybovými rovnicemi, které tvoří soustavu diferenciálních rovnic

$$\frac{dv}{dt} = \sum F, \quad (12)$$

$$v = \frac{dr}{dt}. \quad (13)$$

Rovnice (12) představuje 2. Newtonův zákon, ve které m značí hmotnost, v případě ventilu se jedná o hmotnost jádra. Veličina v představuje rychlost pohybu a člen na pravé straně představuje výslednici sil působící na jádro. V případě ventilu se počítá s gravitační silou, magnetickou silou a tlakovou silou od tlakového média. Rovnice (13) je z kinematiky definice rychlosti jakožto obecně změna polohy v daném souřadném systému, kde r je obecně poloha tělesa v daném souřadném systému. V případě ventilu se však jádro pohybuje pouze ve směru osy z , proto lze popis pohybu jádra zjednodušit na soustavu rovnic

$$m \frac{dv_z}{dt} = m \frac{d^2z}{dt^2} = \sum F_z, \quad (14)$$

$$v = \frac{dz}{dt}. \quad (15)$$

Díky tomuto zjednodušení není potřeba řešit pohybovou rovnici pro všechny složky vektorů, ale pouze pro z -tovou složku, jelikož pohyb se odehrává pouze v této ose.

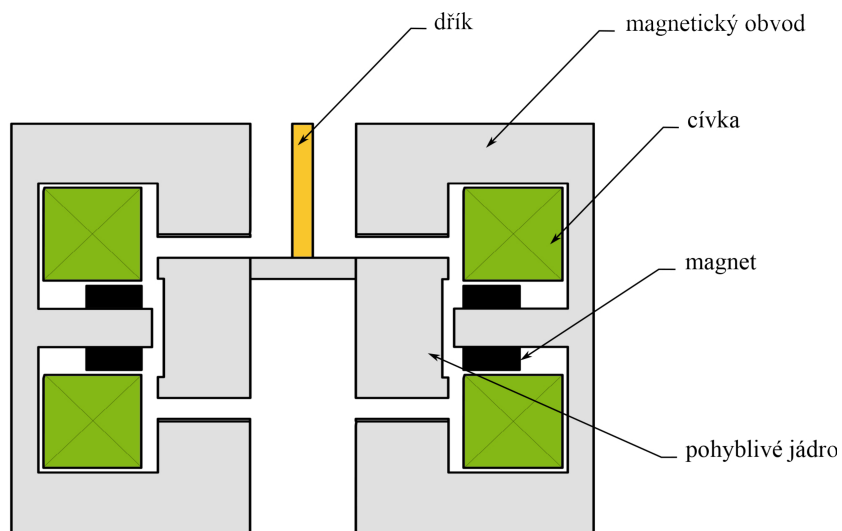
Vyšetření dynamiky ventilu je potřeba ke zjištění doby pohybu ventilu, která je potřebná k určení celkové reakční doby ventilu, která se skládá z doby přechodového děje a doby pohybu jádra.

ii.2

NÁVRH AKČNÍHO ČLENU

II.2.1 USPOŘÁDÁNÍ AKČNÍHO ČLENU

Uspořádání akčního členu ventilu bylo navrženo tak, aby byla dosažena maximální možná úspora prostoru potřebného pro sestavení. To bylo dosaženo tím, že ventil je koaxiální, tedy že osa pohybu jádra je shodná se směrem toku tekutiny. Jednoduchý náčrt je zobrazen na obrázku 14.



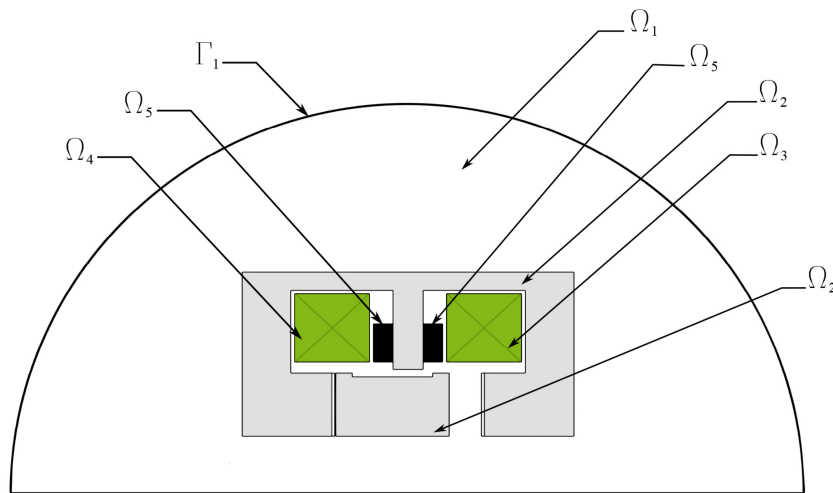
Obr. 14: Schématické uspořádání akčního členu

ii.2.1 USPOŘÁDÁNÍ AKČNÍHO ČLENU

Pohyblivá část je zde pouze jádro a dřík, který propojuje jádro s uzávěrem ventilu. Tento akční člen má 2 stabilní polohy, které jsou zajištěny permanentními magnety. Magnetický tok prochází přes magnetický plášť a jádro, které dohromady tvoří magnetický obvod. Když je ventil uzavřený, jádro se nachází ve spodní pozici a přídržnou sílu vytváří horní magnet. Pokud má být ventil otevřen, je na otevírací cívku přiveden proud, který vybudí magnetické pole, které svými silovými účinky přitáhne jádro do horní pozice, kde je udržováno spodním permanentním magnetem. Magnety se nachází na střední část magnetického pláště mezi cívkami. Takovéto uspořádání potřebuje napájení cívek pouze pro změnu stavu, stabilní pozice zajišťují permanentní magnety.

II.2.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE AKČNÍHO ČLENU

Analýza magnetického pole byla provedena v programu Agros2D. Díky osově symetrickému uspořádání ventilu bylo možné úlohu řešit jako osově symetrickou ve válcovém souřadném systému r, z, ϕ . Díky osové symetrii se řešení rozložení magnetického pole zjednoduší na dvoudimenzionální úlohu. Jelikož je napájení ventilu stejnosměrné, magnetické pole je možné řešit jako stacionární. Pro řešení matematického modelu magnetického pole je dále potřeba nadefinovat oblast, ve které bude řešeno rozložení magnetického pole a okrajové podmínky na okraji definiční oblasti. Na obrázku 15 je zobrazena definiční oblast.



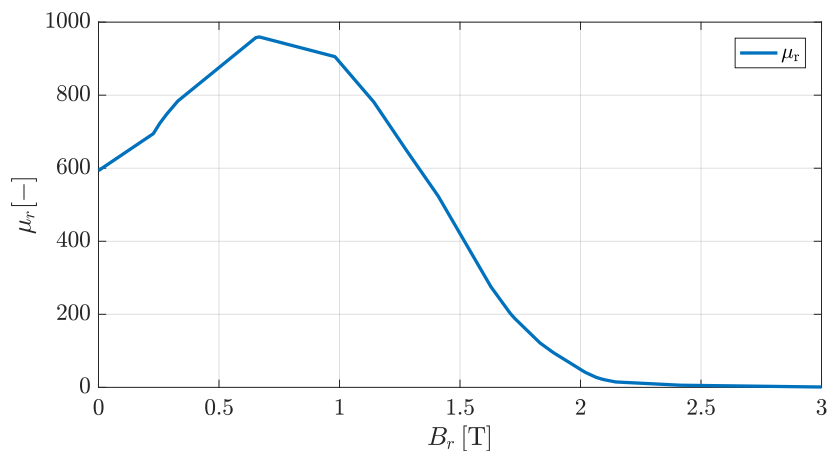
Obr. 15: Oblast řešení rozložení magnetického pole

Popis jednotlivých oblastí a jejich rovnice:

- Ω_1 - vzduch: $\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}$
- Ω_2 - železo: $\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_r(\mathbf{B})} \cdot \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{0}$
- Ω_3 - cívka pod napětím: $\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}$

- Ω_4 - cívka bez napětí: $\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot} A \right) = \mathbf{0}$
- Ω_5 - magnet: $\text{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \cdot \text{rot} (A - B_r) \right) = \mathbf{0}$
- Γ_1 - okrajová podmínka: $A = \mathbf{0}$

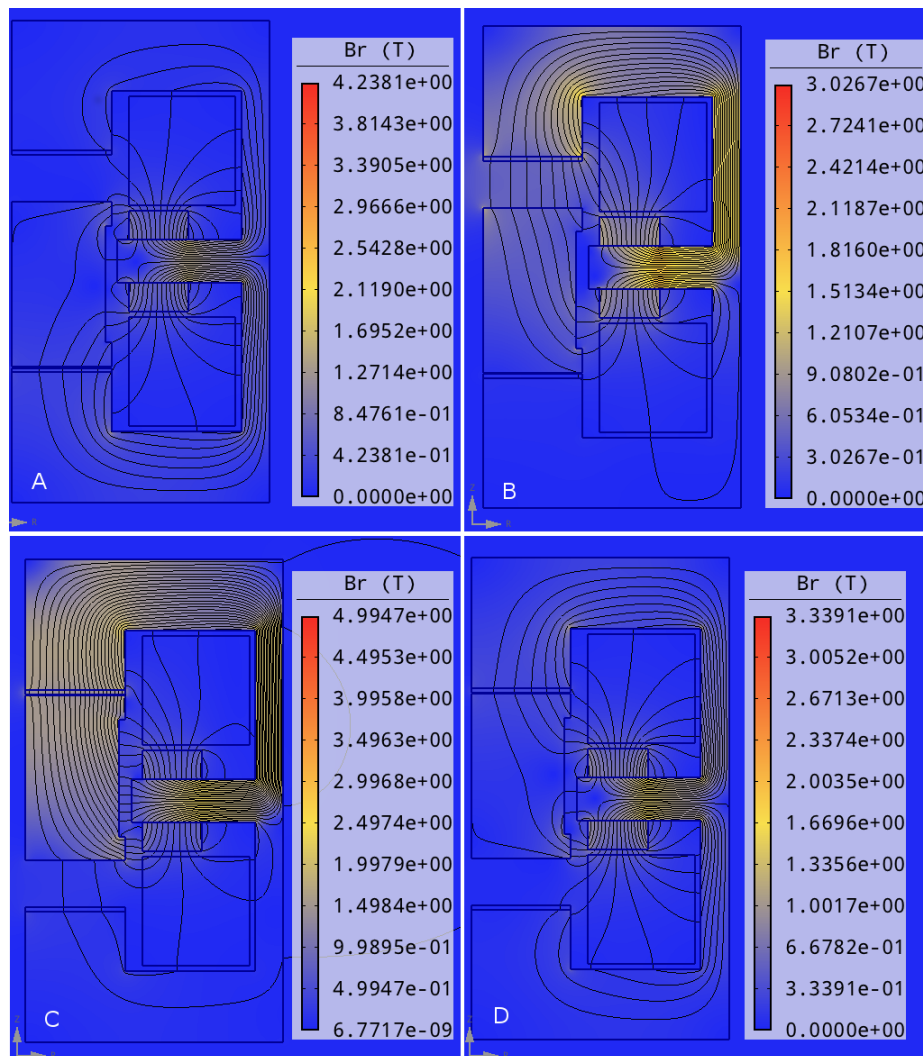
Na hranici řešené oblasti byla definována Dirichletova okrajová podmínka $A = \mathbf{0}$, která říká, že magnetické pole nezasahuje dále než za definovanou oblast. Je nutné volit dostatečně velkou oblast tak, aby rozložení magnetického pole odpovídalo fyzikální realitě a nedocházelo ke zkreslení vlivem volby malé oblasti. Ideální by bylo volit oblast nekonečně, to ale numerické metody neumožňují. Hodnota relativní permeability materiálů, kromě feromagnetického železa, byla volena 1, jelikož vzduch, měď, ale i permanentní magnety jsou nemagnetické, to znamená, že jejich permeabilita je shodná s permeabilitou vakua. Jelikož železo je feromagnetický materiál a jeho magnetizační charakteristika je nelineární, pro výpočet byla použita magnetizační charakteristika konstrukční oceli, která je běžně používána. Tato charakteristika je uvedena na obrázku 16.



Obr. 16: Magnetizační charakteristika konstrukční oceli

Proud cívkou byl zvolen $I = 4 \text{ A}$, s počtem závitů $N = 893$, tomu odpovídá proudová hustota $J_{\text{ext}} = 1 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Magnetická indukce magnetů byla zvolena $B_r = 1.23 \text{ T}$. Na obrázku 17 je zobrazeno rozložení magnetické indukce.

ii.2.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE AKČNÍHO ČLENU



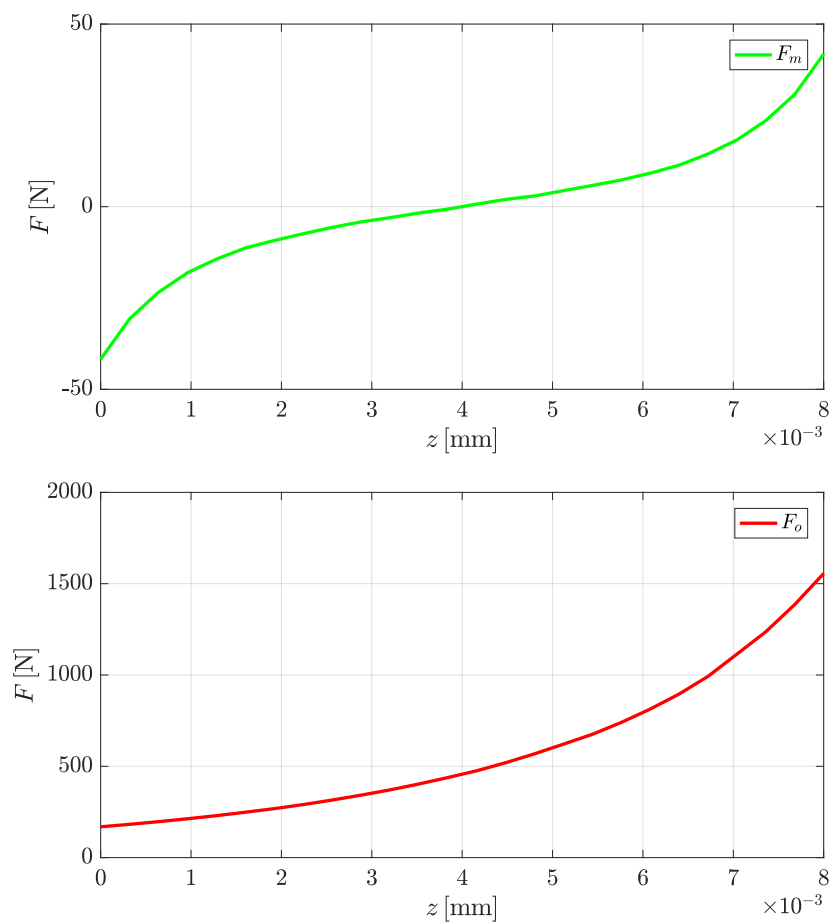
Obr. 17: A - rozložení B při vypnutých cívkách ($z = 0$), B - rozložení B při zapnuté horní cívce ($z = 0$), C - rozložení B při zapnuté horní cívce ($z = 8$ mm), D - rozložení B při vypnutých cívkách ($z = 8$ mm)

Z rozložení magnetické indukce na obrázku 16 je patrné, kudy se uzavírá tok vybuzený otevírací cívkou (horní) v uzavřené a otevřené poloze. Je patrné, že na počátku otevírání (B) je magnetické pole slabší v oblasti jádra, než v plně otevřeném stavu, při zapnuté cívce (C). Z toho lze odhadnout, že magnetická síla bude větší na konci procesu otevírání než na počátku. Rozložení magnetického pole při vypnutých cívkách je rozebráno podrobněji dále.

Z analýzy magnetického pole lze určit sílu, která působí na pohyblivé jádro. Tato síla je nejdůležitějším parametrem, který má stěžejní vliv na funkčnost ventilu. Potřeba je znát síly, kterými působí permanentní magnety na jádro. Tyto síly musí být co největší, aby nedocházelo k samovolné změně polohy jádra. Dále také přídržné síly rozhodují, jaké tlaky je schopen ventil udržet. Další síly, které je potřeba znát, jsou síly působící na jádro, když jsou zapnuté cívky. Jelikož se se změnou polohy jádra mění i síla působící na jádro, je potřeba vyšetřit silovou charakteristiku, která udává závislost přitažné síly, kterou působí cívky na jádro, v závislosti na poloze jádra. Čím větší jsou tyto síly, tím je proces otevírání ventilu rychlejší.

Silová charakteristika byla vypočtena pro několik poloh, výpočet byl uskutečněn tak, že vždy byla nastavena poloha jádra a pro ní byl proveden výpočet rozložení magnetického pole, ze kterého byla vždy určena síla. Takové to silové charakteristice se říká statická. Síla působící na jádro byla vypočtena z objemového integrálu (Maxwellův tenzor pnutí), kde se integrovalo přes objem jádra. Při výpočtu byla použita metoda Eggshell. Na obrázku 18 jsou zobrazeny silové charakteristiky ventilu, na pozici $z = 0$ mm je ventil v plně uzavřené poloze. Jelikož je ventil symetrický, statická charakteristika zavírací cívky je shodná s otevírací cívkou.

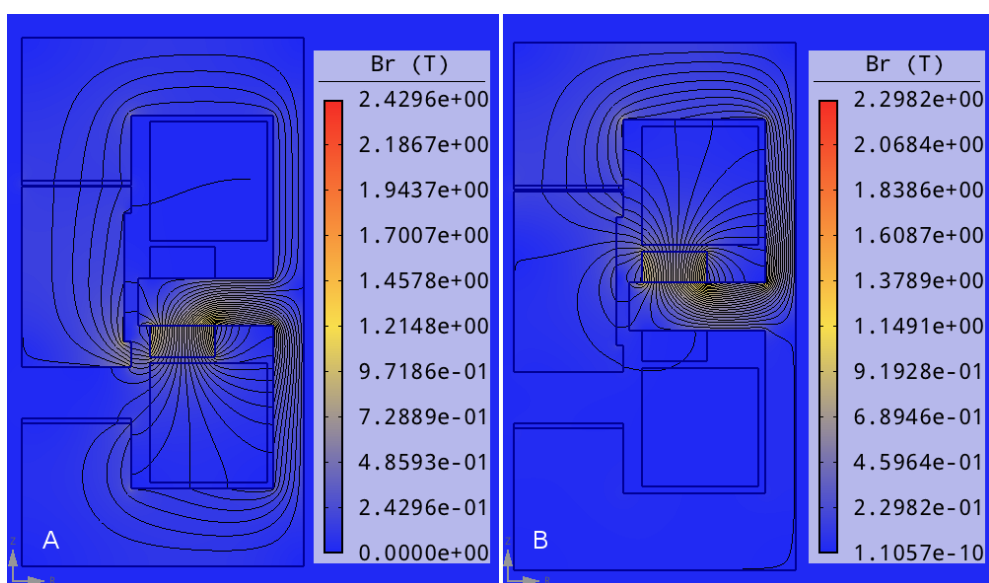
ii.2.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE AKČNÍHO ČLENU



Obr. 18: Síla vyvinutá permanentními magnety, při vypnutých cívkách (nahore) a statická charakteristika pro sílu vyvinutou otevírací cívkou (dole)

II.2.2.1 *Analýza magnetického pole generovaného pouze magnety*

Pro správné porozumění vzniku přídržné síly, kterou působí magnety na jádro při vypnutých cívkách je potřeba podrobněji analyzovat rozložení magnetického pole v případě, že proud protékající cívkami je nulový. Rozložení magnetického pole v tomto případě je znázorněno na obrázku 17-D. Dále byla provedena analýza rozložení magnetického pole generovaného vždy pouze jedním magnetem. Rozložení magnetického pole generovaného od obou magnetů je zobrazeno na obrázku 19.



Obr. 19: A - rozložení magnetické pole od spodního magnetu, B - rozložení magnetického pole od horního magnetu

Síla působící na jádro od spodního magnetu je velmi malá a záporná, její hodnota byla vypočtena -2 N . Síla od horního magnetu již byla kladného směru, tento směr je v horní poloze jádra správný, protože udržuje jádro v horní stabilní poloze, hodnota síly od horního magnetu vyšla 11 N . Výsledná síla od obou magnetů vyšla 41 N . Nyní je otázka, proč je vlivem působení obou magnetů síla značně vyšší. Byl dále proveden výpočet magnetického toku v horní části magnetického obvodu v případě působení obou

magnetů, dále při působení vždy pouze jednoho magnetu. Magnetický tok se vypočte jako tok vektoru \mathbf{B} orientovanou plochou S v polárním systému se souřadnicemi r a ϕ , jelikož se jedná o osově symetrický problém, nebude \mathbf{B} závislé na ϕ , ale pouze na r

$$\Phi = \int_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = \int_{r_1}^{r_2} \int_0^{2\pi} \mathbf{B} \cdot \mathbf{r} d\phi dr = 2\pi \int_{r_1}^{r_2} \mathbf{B} \cdot \mathbf{r} dr. \quad (16)$$

Výpočet magnetického toku byl proveden pomocí numerické integrace s využitím obdélníkového pravidla. Aplikace principu superpozice zde není z důvodu nelinearity feromagnetického materiálu možná, nicméně při působení pouze permanentních magnetů není pole natolik silné, aby způsobovalo lokální přesycení, proto je možno tvrdit, že je systém lineární pro výpočet magnetického toku. Byly provedeny kontrolní výpočty pro uvažování lineárního feromagnetika a pro výpočty nelineárního feromagnetika, které jsou v tabulce 2.

Tab. 2: Porovnání výpočtů magnetických toků pro lineární a nelineární variantu

materiál	spodní magnet	horní magnet	oba magnety
Φ [mWb] (lineární)	0.2612	0.3045	0.5657
Φ [mWb] (nelineární)	0.2607	0.3067	0.5695

Z výpočtů magnetických toků lze uvažovat, že výsledný magnetický tok pro nelineární variantu je součtem magnetických toků od obou magnetů. Nyní je potřeba odvodit výraz pro výpočet síly působící na plošnou jednotku povrchu lineárního magnetika. Pro zjednodušení je uvažováno dokonalé feromagnetikum, neboli $\mu \rightarrow \infty$ a uvnitř magnetika je tedy $\mathbf{H} \rightarrow 0$. Energie se nachází pouze ve vzduchových mezerách magnetického obvodu. Uvažujeme posuv elementární plochy dS ve směru normály $d\mathbf{n}$. Tím dojde ke změně energie

$$dW = \frac{1}{2} \mathbf{B} \mathbf{H} dV = \frac{1}{2} \mathbf{B} \mathbf{H} dS dn = dF dn, \quad (17)$$

takže plošná hustota síly

$$\frac{dF}{dS} = \frac{1}{2} \mathbf{B} \mathbf{H} \quad (18)$$

je rovna hustotě energie nacházející se na povrchu magnetika. Orientace síly má směr vnější normály. Celková síla působící na pohyblivé jádro v magnetickém obvodu je

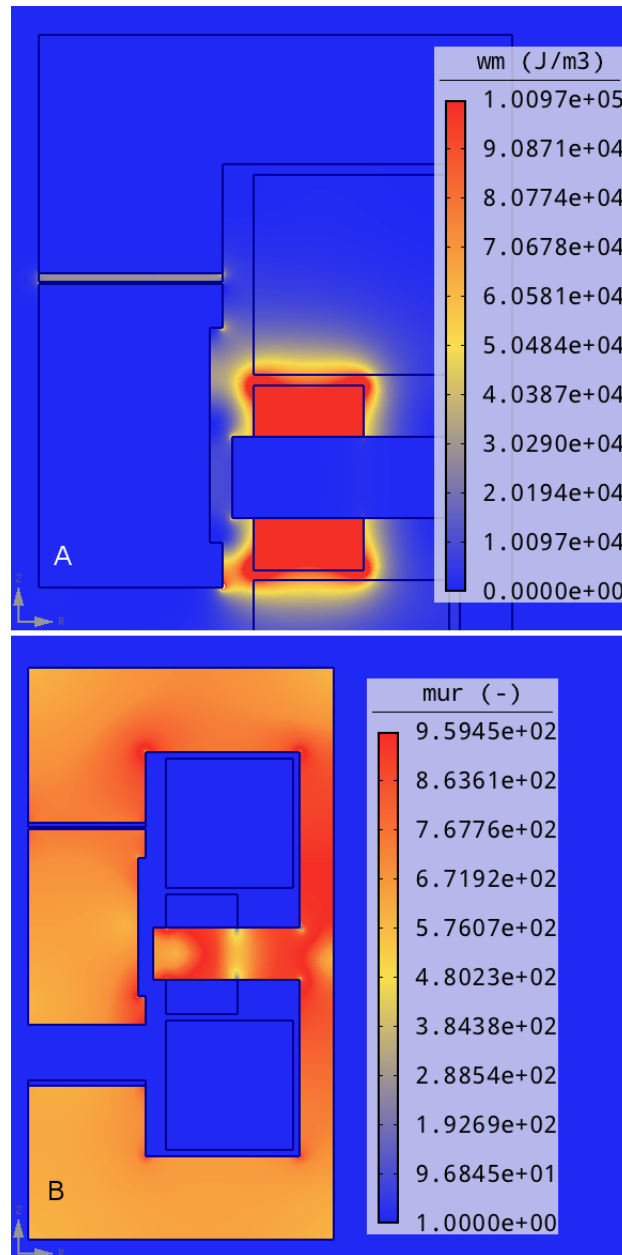
$$|\mathbf{F}| = \int_S w_m dS = \int_S \frac{1}{2} \frac{\mathbf{B}^2}{\mu_0} dS. \quad (19)$$

Určením střední hodnoty magnetické indukce se přejde z integrace na prosté násobení, střední hodnota magnetické indukce vyšla $B_s = 0.2763$ T. Síla se vypočte jako

$$|\mathbf{F}| = \frac{1}{2} \frac{B_s^2}{\mu_0} \pi(r_2^2 - r_1^2) = \frac{1}{2} \frac{0.2763^2}{\mu_0} \pi(0.0276^2 - 0.01^2) = 62.2 \text{ N}. \quad (20)$$

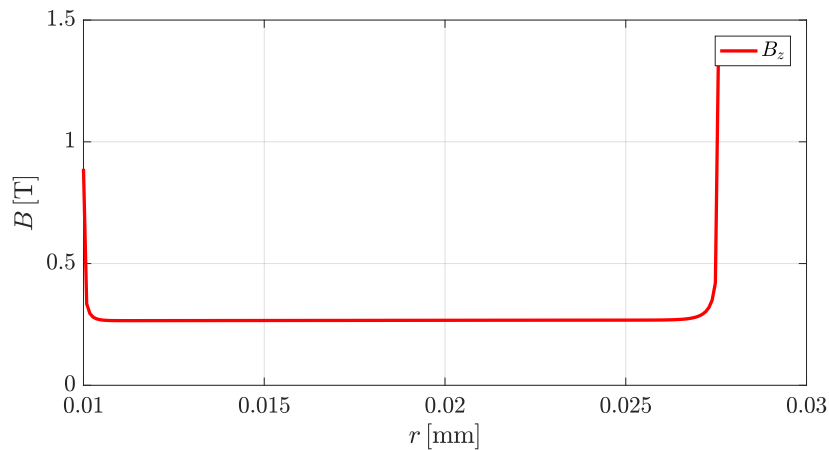
Výsledná síla tímto výpočtem vyšla 62.2 N, síla vypočtená v programu Agros2D vyšla 42 N. Řádově vychází síly od permanentních magnetů vypočtené oběma metodami shodně, chyba 20 N u zjednodušeného výpočtu je způsobena tím, že energie je akumulována i v dalších vzduchových mezerách nacházejících se mezi jádrem a magnetickým obvodem. Na obrázku 20 je zobrazeno rozložení hustoty energie v oblasti jádra a rozložení permeability při vypnutých cívkách. Tato akumulovaná energie způsobuje sílu působící proti síle na povrch jádra v horní vzduchové mezeře. Tím je výsledná síla působící na jádro nižší, tato skutečnost je započtena ve výpočtu síly v Agros2D. Tímto výpočtem bylo ověřeno, že sílu generovanou magnety způsobuje magnetický tok uzavírající se přes jádro, část magnetického obvodu, která je blíže u kotvy a střední sloupek, na kterém jsou umístěny magnety. [2]

ii.2.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE AKČNÍHO ČLENU



Obr. 20: Rozložení hustoty energie při vypnutých cívkách (nahore) a rozložení permeability při vypnutých cívkách (dole)

ii.2.2 ANALÝZA MAGNETICKÉHO POLE AKČNÍHO ČLENU



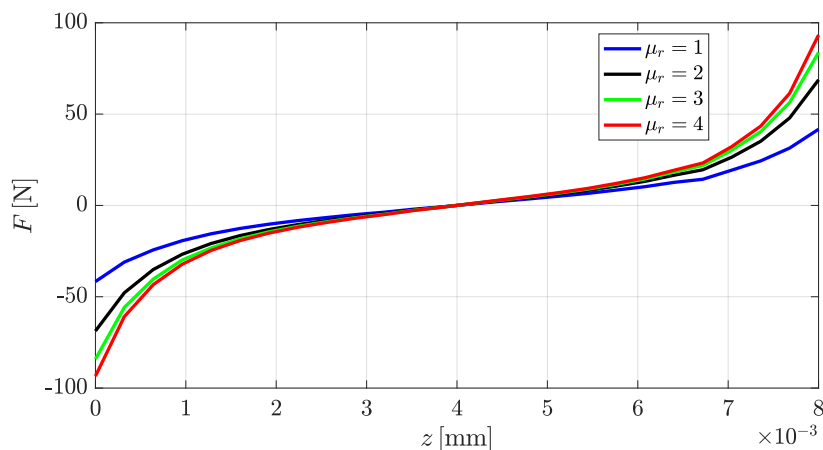
Obr. 21: Rozložení magnetické indukce v horním sloupku magnetického obvodu ve kterém byl počítán magnetický tok

ii.2.2.2 Studie zvýšení přídržné síly akčního členu

Jelikož se část magnetického pole generovaného magnety uzavírá přes oblasti mimo jádro, je tedy tok od permanentních magnetů uzavírající se přes jádro nižší než například u TROMAGu, kde díky svému umístění a orientaci permanentních magnetů a tok jimi generovaný uzavírá více přes jádro. Magnety jsou v tomto případě efektivněji využity. Nicméně v případě ventilu zkoumaném v této práci bude potřeba vylepšit silové poměry u přídržných sil, protože tyto síly určují, jaký maximální tlak může tekutina mít, aby nedošlo k samovolnému otevření ventilu. Jednou z možností je zkrátit vzduchovou mezeru mezi jádrem a magnetickým obvodem ve stabilní pozici. Zde nastává problém, že mezi jádrem a magnetickým obvodem musí být umístěn pružný materiál, který bude tlumit nárazy způsobené dopadem jádra na pevnou část magnetického obvodu.

Jednou z možností, která se nabízí je využít jako materiál pro doraz silikon, který se při výrobě smíchá s magnetickými nanočásticemi. Relativní permeabilita takového dorazu by byla v řádech jednotek, nicméně síla vypočtená při započtení zvýšené perme-

ability dorazů vyšla při $\mu_r = 4$ dvojnásobku původní síly. Proto může být předmětem dalšího výzkumu tvorba takového dorazu, jež by při vhodných mechanických vlastnostech dosahoval co největší možné permeability. Na obrázku 22 jsou silové charakteristiky v závislosti na relativní permeabilitě dorazů.



Obr. 22: Závislost přídržné síly na permeabilitě dorazů

II.2.3 OPTIMALIZACE ROZMĚRŮ MAGNETICKÉHO OBVODU

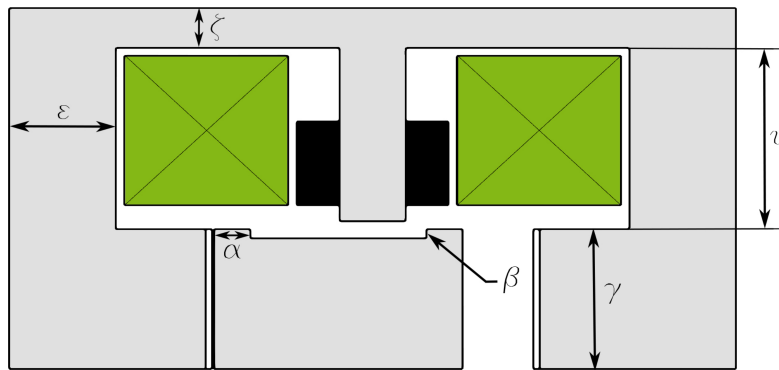
Další důležitou částí návrhu je optimalizace rozměrů. Cílem optimalizace v tomto případě bylo zjistit, při kterých rozměrech magnetického obvodu je co nejvyšší přídržná síla vyvinutá magnety a zároveň co nejvyšší střední síla vyvinutá cívkami. Nejprve byla použita jednoduchá citlivostní analýza metodou *One Factor At a Time*, při které je vždy změněn jeden parametr a zjišťuje se, jak tato změna ovlivní výsledné parametry. To lze zapsat rovnicí

$$EE_i^j = \frac{F_j(x_1, \dots, x_i + \delta, \dots, x_n) - F_j(x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\delta} \quad (21)$$

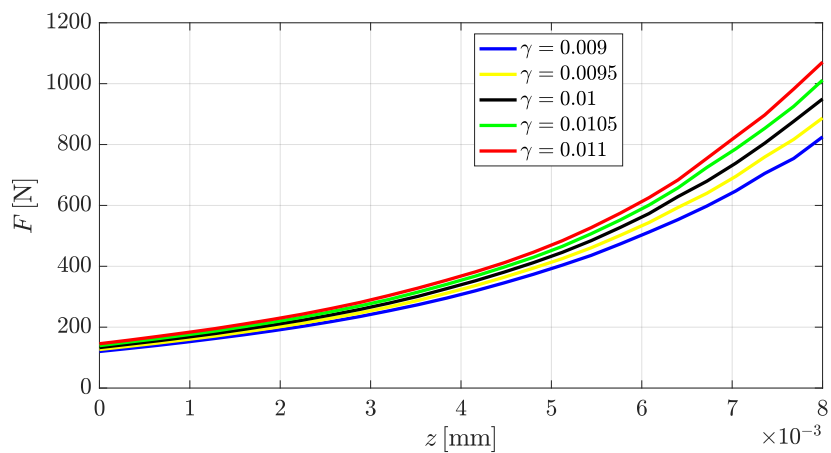
kde EE_i^j je elementární vliv (elementary effect) rozměru x_i na funkcional F_j , δ poměrový krok, o který je vždy změněn zkoumaný rozměr. Byly určeny nominální hodnoty, které byly změněny o $\pm 5\%$ z jejich velikosti. Na obrázku 22 jsou vyznačeny parametry,

ii.2.3 OPTIMALIZACE ROZMĚRŮ MAGNETICKÉHO OBVODU

kteřé byly podrobeny optimalizačnímu procesu. Podle těchto rozměrů byl navržen výsledný magnetický obvod ventilu a silové charakteristiky v závislosti na velikost parametru γ . Metodou Monte Carlo byl dále proveden rozsáhlejší výpočet optimalizace (viz. příloha C). [11]



Obr. 23: Geometrie magnetického obvodu s vyznačenými zkoumanými parametry



Obr. 24: Statická charakteristika v závislosti na parametru γ

II.2.4 NÁVRH CÍVKY

Průměr vodiče cívky byl zvolen $d = 0.75$ mm, čemuž odpovídá průřez

$$S = \pi \frac{d^2}{4} = \pi \frac{0.75^2}{4} = 0.4418 \text{ mm}^2. \quad (22)$$

Vnitřní poloměr cívky byl zvolen $r_i = 28.5$ mm, vnější poloměr byl zvolen $r_o = 49.2$ mm, výška cívky byla zvolena $h = 15.1$ mm. Do cívky o těchto rozměrech je možno umístit počet závitů $N = 893$. Materiál vodiče cívky je měď, jejíž rezistivita je $\rho = 0.0169 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$. Odpor cívky lze vypočíst ze vzorce

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (23)$$

kde ρ je rezistivita materiálu vodiče, l je délka vodiče a S jeho průřez. Rezistivitu a průřez známe, je pouze potřeba si vyjádřit délku vodiče cívky. Nejjednodušší způsob je určit střední poloměr vodiče cívky jako

$$r_s = r_i + \frac{r_o - r_i}{2} = 28.5 + \frac{49.2 - 28.5}{2} = 38.85 \text{ mm}. \quad (24)$$

Ze středního poloměru lze vypočíst střední délku jednoho závitu

$$l_s = 2\pi r_s = 2\pi \cdot 38.85 = 244.1 \text{ mm}. \quad (25)$$

Nyní lze určit odpor cívky jako:

$$R = \rho \frac{l}{S} = \rho \frac{N 2\pi r_s}{S} = 0.0169 \cdot 10^{-6} \frac{893 \cdot 2\pi \cdot 38.5 \cdot 10^{-3}}{0.4418 \cdot 10^{-6}} = 8.3387 \Omega. \quad (26)$$

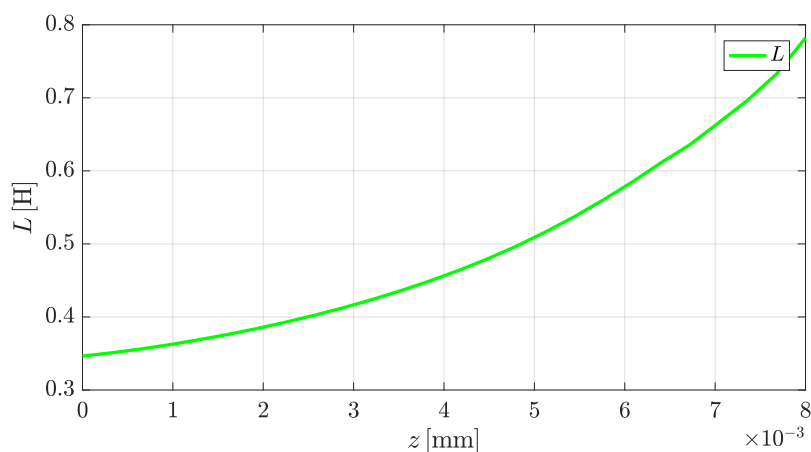
Další parametr cívky, který je potřeba určit je indukčnost cívky. Indukčnost byla určena z energetické definice, která je dána vztahem

$$L = \frac{2W_m}{I^2}, \quad (27)$$

kde W_m je celková energie magnetického v celé oblasti, kterou dodává cívka do definiční oblasti a I je elektrický proud, který danou cívku protéká. Energie magnetického pole se vypočte z matematického modelu magnetického pole v celé oblasti výpočtu. Je důležité brát na zřetel, že v modelu není cívka jediným zdrojem, který generuje magnetické

ii.2.4 NÁVRH CÍVKY

pole, ale dalšími zdroji magnetického pole jsou zde magnety, které přispívají do celkové energie magnetického pole. To ale není energie, kterou dodává cívka. Proto pro výpočet energie pole od cívky je potřeba vyřadit z výpočtu energii magnetů. Tento předpoklad lze však použít pouze pro lineární systém, kde se může aplikovat princip superpozice. Jelikož však z analýzy magnetického pole bylo zjištěno, že magnetický obvod byl přesycen velmi málo a oblasti s lokálním přesycením byly velmi malé, proto můžeme přibližně považovat magnetický obvod za lineární a můžeme z výpočtu vyřadit magnety a počítat pouze energii od cívky. Dalším důležitým faktem při výpočtu indukčnosti je závislost polohy jádra na energii pole, celková energie se vlivem změny konfigurace magnetického obvodu mění, tudíž indukčnost vypočtená z energetické definice se bude měnit se změnou polohy jádra. Na obrázku 25 je zobrazena závislost vypočtené indukčnosti na poloze jádra. Krajiní hodnoty indukčnosti jsou: $L_{(z=0\text{ mm})} = 0.347\text{ H}$, $L_{(z=8\text{ mm})} = 0.782\text{ H}$.



Obr. 25: Závislost indukčnosti na poloze jádra

II.2.5 SIMULACE DYNAMIKY VENTILU

Pro výpočet dynamiky ventily byly použity Newtonovy rovnice, které jsou blíže popsány v kapitole II.1.3. Do těchto rovnic se dosadí síly vypočtené z matematického modelu magnetického pole. Ve výpočtu dynamiky je také započteno řešení přechodového děje, který nastane při sepnutí cívky. Přechodový jev je detailně popsán v kapitola II.1.2. V modelu dynamiky je použit zjednodušený model RL obvodu, ve kterém je indukčnost brána jako konstantní a je zanedbán vliv pohybového napětí. Hodnota indukčnosti cívky byla stanovena jako střední hodnota z funkce, která udává závislost indukčnosti na poloze jádra ze vztahu

$$L_{avg} = \frac{1}{0.008} \int_0^{0.008} L dz = 0.4903 \text{ H.} \quad (28)$$

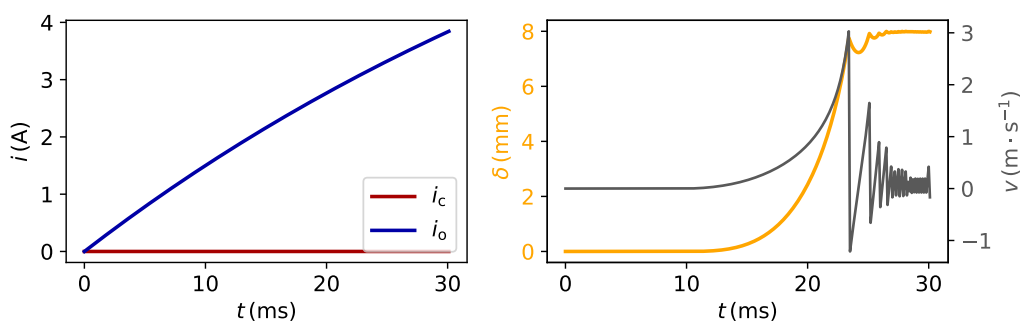
Odpor cívky byl stanoven v předchozí kapitole jako $R = 8.3387 \Omega$. Z těchto dvou údajů lze nyní určit časovou konstantu zjednodušeného RL přechodového děje. Časová konstanta přechodového jevu se vypočte ze vztahu

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.4903}{8.3387} = 58.8 \text{ ms.} \quad (29)$$

Jelikož proud cívkou není během otevírání konstantní, bylo potřeba vypočíst velikosti sil nejen jako funkce polohy jádra, ale také jako funkce proudu. Model dále také zahrnuje výpočet odrazu jádra, odraz je simulován tak, že po dopadu jádra na hranu má rychlost záporný směr a velikost odražené rychlosti je $v_{odr} = -k \cdot v_{dop}$, kde $k = 0.4$ je koeficient odrazu. Další důležitý parametr pro výpočet dynamiky je hmotnost jádra, která se určí ze vzorce

$$m = \rho \cdot V = 7850 \cdot 5.602 \cdot 10^{-5} = 0.4398 \text{ kg.} \quad (30)$$

Na obrázku 26 je zobrazen výpočet dynamiky ventilu. Z grafu dynamiky je vidět, že přibližně 14 ms trvá, než proud dosáhne takové velikosti, při které převládne síla od cívky a jádro se začne pohybovat a samotný proces otevírání probíhá přibližně 10 ms. Lze tedy říci, že elektromagnetický přechodový jev na cívce trvá déle, než samotné otevírání. Na rychlost reakce ventilu má tedy stěžejní vliv přechodový jev probíhající na cívce. Možností snížení doby trvání přechodového jevu je dočasné navýšení napájecího napětí ventilu, tím naroste hodnota proudu cívkou v ustáleném a stavu a jelikož přechodový jev probíhá stále se stejnou časovou konstantou, při zvýšeném napětí proud cívkou naroste na jmenovitou hodnotu rychleji. [7]



Obr. 26: Výpočet dynamiky ventilu při jeho otevírání - průběh proudu na otevírací cívce (nalevo) a průběh polohy jádra a jeho rychlosti (napravo)

II.2.6 NÁVRH MAGNETŮ

Jako materiál magnetů byla zvolena směs neodym, železo, bór (NdFeB magnety). Jelikož se nepodařilo sehnat prstencové magnety, které by měly požadované rozměry, byla vytvořena pomocí technologie 3D tisku šablona, do které se naskládaly kvádrové magnety o rozměrech 10x10x5 mm. Koeficient plnění takového uspořádání se určí z poměru objemu součtu kvádrových magnetů a objemu prstencového magnetu, objem prstence se spočte

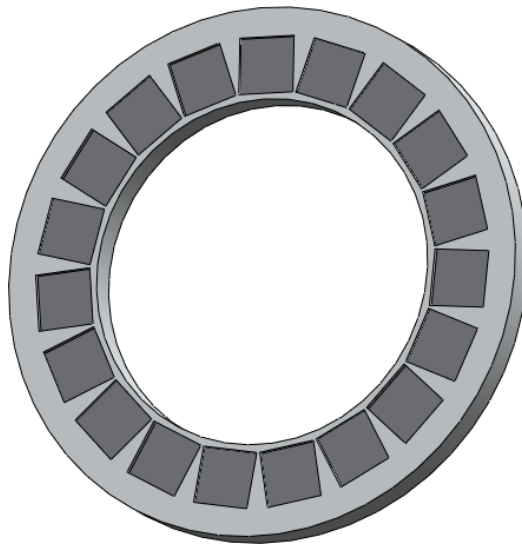
$$V_{prstenc} = h \cdot \pi(R_o^2 - R_i^2) = 0.005 \cdot \pi(0.0411^2 - 0.0306^2) = 1.1826 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3. \quad (31)$$

Celkový objem kvádrových magnetů se pak spočte

$$\sum V_{kvadr} = 19 \cdot a \cdot b \cdot c = 19 \cdot 0.01 \cdot 0.01 \cdot 0.005 = 9.5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ a} \quad (32)$$

činitel plnění je potom dán vztahem

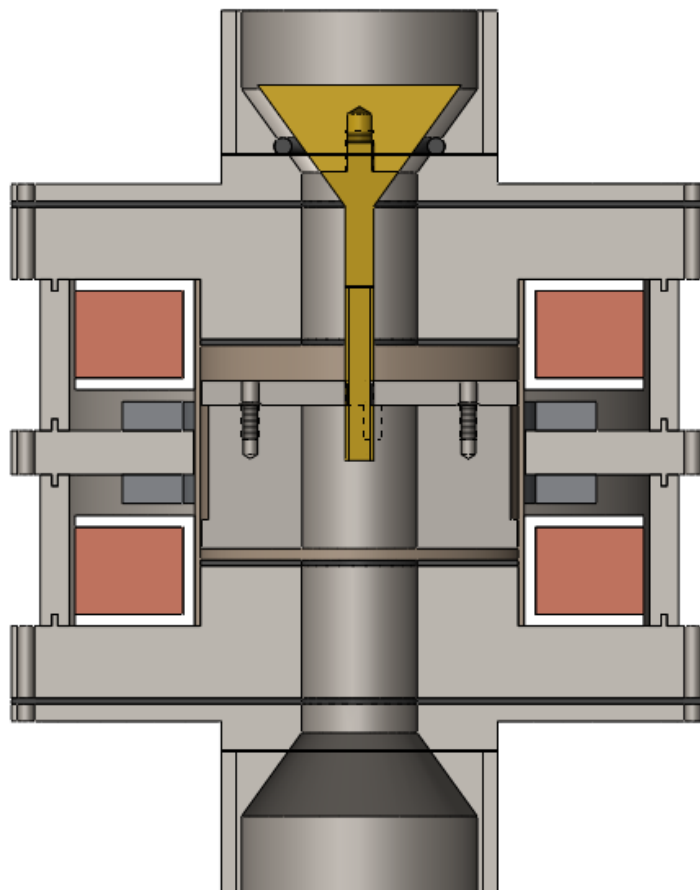
$$k = \frac{\sum V_{kvadr}}{V_{prstenc}} = 0.8033. \quad (33)$$



Obr. 27: Model šablony pro uložení magnetů

II.2.7 SESTAVENÍ VENTILU

Kromě návrhu akčního členu, který se skládá z magnetického obvodu, cívek a magnetů, bylo potřeba dalších částí, aby aktuátor měl funkci ventilu pro řízení toku tekutin. Na obrázku 28 je zobrazen celý 3D model ventilu.

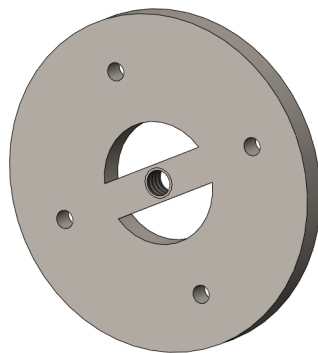


Obr. 28: Model sestaveného ventilu

Pro aplikaci aktuátoru jako ventilu bylo potřeba přidat sedlo ventilu. Sedlo ventilu bylo pro svou jednoduchost zvoleno jako kónické, toto uspořádání má oproti například plochému sedlu lepší vlastnosti pro průtok kapaliny, například má toto uspořádání menší tlakovou ztrátu. Uzávěr ventilu je vyroben z nemagnetického materiálu, konkrétně z

ii.2.7 SESTAVENÍ VENTILU

mosazi, aby tato komponenta neovlivňovala rozložení magnetického pole v magnetickém obvodu. Další důležitou částí je stěna kanálu, která odděluje cívky a magnety od kanálu, kterým protéká tekutina. Tato stěna zajišťuje, že tekutina nepronikne do oblasti, kde se nacházejí cívky. Únik tekutiny do této oblasti by mohl způsobit poškození cívek. Vstupní a výstupní příruby byly navrženy tak, aby jejich závit byl kompatibilní s potrubím, které se našroubuje na ventil. Byl zvolen trubkový závit $G 1\frac{1}{2}$. Pohyblivé jádro ventilu bylo rozděleno na 2 části. Na obrázku 29 je zobrazena horní část jádra, která má tvar kotouče.



Obr. 29: Model horní části jádra

Magnetický obvod byl rozdělen na několik částí tak, aby bylo co nejjednodušší jejich sestavení dohromady. Aby ventil držel pohromadě, byly do některých částí magnetického obvodu vyvrtány otvory pro závitové tyče, které budou držet jednotlivé části magnetického obvodu dohromady. Do částí magnetického obvodu, které obepínají cívky byly udělány drážky, které drží zbylé části magnetického obvodu bez vyvrtaných děr společně s ostatními částmi.

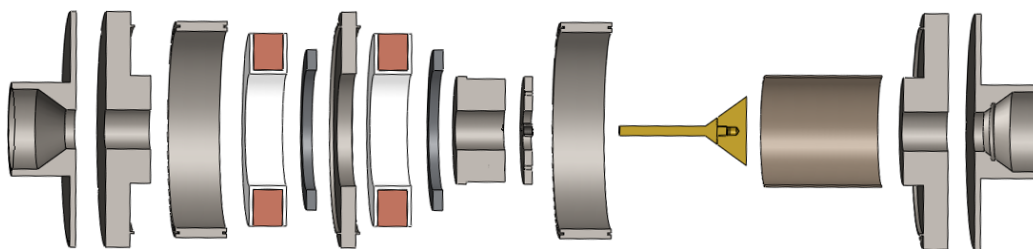
Část III

KONSTRUKCE VENTILU A OVĚŘENÍ ZÁKLADNÍ FUNKCE

iii.1

KONSTRUKCE VENTILU

Po provedení návrhu všech dílčích částí elektromagnetického bistabilního koaxiálního ventilu s permanentními magnety byla vytvořena technická dokumentace, která byla následně předána Prototypové dílně ZČU, ve které byl ventil vyroben dle požadavků technické dokumentace. V dílně byly vyrobeny všechny železné části, mosazná hlava ventilu, silonové kostry na cívku a kryt na kanál. Cívky byly navinuty v dílně KTE FEL ZČU vodičem o průměru 0.5 mm. Toto navinutí však není definitivní, cívky budou znovu převinuty pro dosažení vyššího koeficientu plnění (počet závitů současný cívek je pouze $N = 350$ závitů). Šablony na magnety byly vytištěny na 3D tiskárně, do které byly vloženy kvádrové magnety koupené od společnosti MAGSY, s.r.o. Na obrázku 31 jsou zobrazeny 3D modely všech dílů a na ostatních obrázcích jsou fotografie ze sestavování ventilu.



Obr. 30: Rozložený 3D model všech dílů prototypu nového ventilu

KONSTRUKCE VENTILU



Obr. 31: Fotografie postupného skládání prototypu ventilu

iii.2

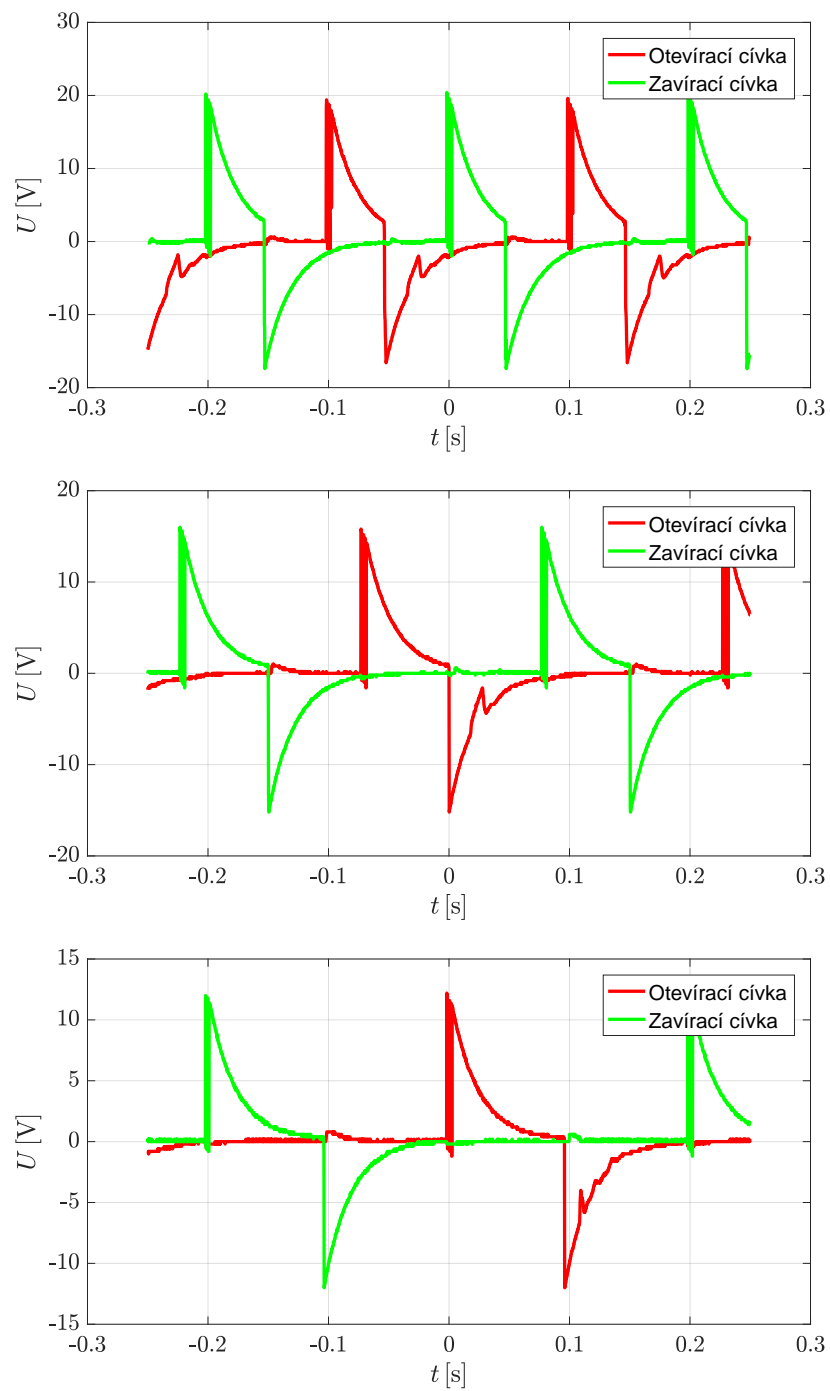
EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE

Po sestavení ventilu bylo nejprve ověřeno, zda nedošlo k porušení vodičů cívek a měřením byl zjištěn odpor $R \approx 7 \Omega$. Odpor se od výpočtu lišil, jelikož při navíjení nebyl k dispozici vhodný vodič o průměru 0.75 mm. Délka vodiče u obou cívek je 67 m.

Po ověření funkce cívek, bylo následně otestováno, zda vybavením příslušné cívky dochází k vybavení jádra, a tedy zda síla působící na jádro je dostatečná, a to nejprve bez uložených permanentních magnetů. Po ověření správné funkce byly přidány do ventilu permanentní magnety a bylo ověřeno, zda bezpečně drží jádro ventilu ve stabilních polohách. Následně bylo otestováno již vlastní spínání ventilu, a to za působení permanentních magnetů. Nejnižší napětí při kterém ve ventilu došlo k vybavení jádra bylo 15 V, kterému odpovídá proud 2 A.

Dále bylo provedeno osciloskopické měření průběhu napětí na jednotlivých cívkách. K tomu bylo využito cyklické spínání řízené mikrokontrolerem Arduino UNO a relé modul. Měření bylo provedeno pro spínací cyklus s dobou otevírání a uzavírání 50, 75 a 100 ms. Po stejnou dobu byl vždy ventil také otevřen nebo uzavřen. Na obrázku 32 jsou zobrazeny průběhy zaznamenaných napětí.

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE



Obr. 32: Časové průběhy napětí na jednotlivých cívkách ventilu při jeho cyklickém spínání - doba sepnutí 50 ms (nahore), 75 ms (uprostřed) a 100 ms (dole)

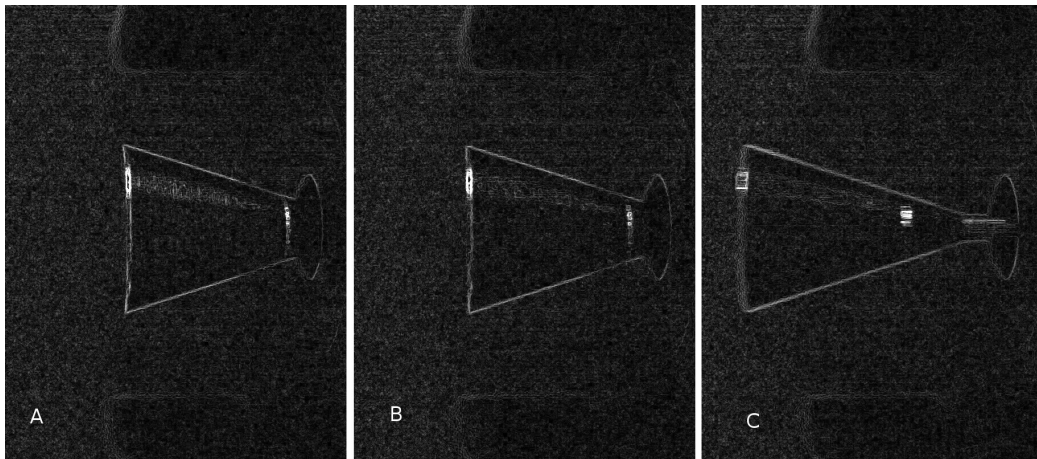
Dále bylo provedeno měření závislosti napětí potřebného pro úspěšné otevření a uzavření ventilu v závislosti na době sepnutí jednotlivých cívek. V tabulce 3 jsou naměřené hodnoty napětí. Z výsledků je patrné, že při snižující se době napětí je nutné zvýšit napětí cívek, a to z důvodu dosažení dostatečného otevíracího proudu za požadovanou dobu otevření/uzavření ventilu.

Tab. 3: Závislost potřebného napájecího napětí na době otevírání/uzavírání ventilu

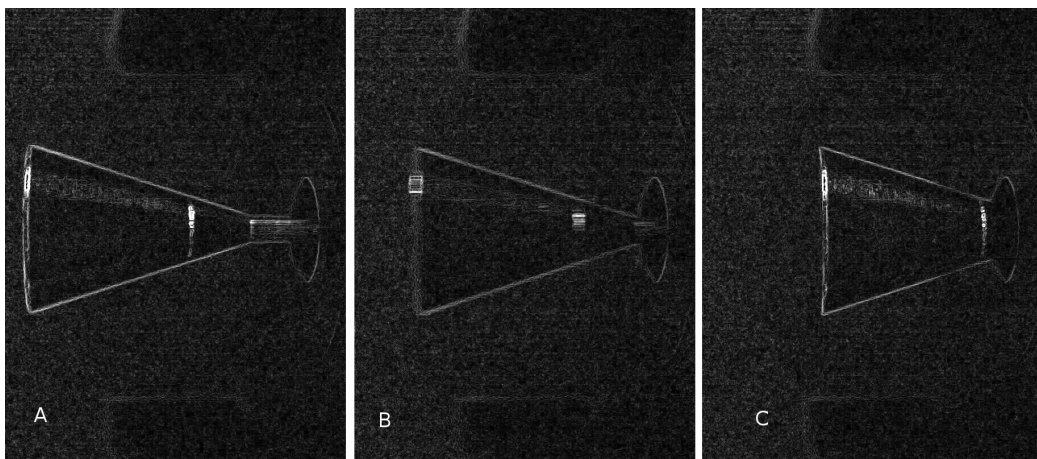
doba sepnutí [ms]	50	75	100
potřebné napětí [V]	20	16	15

Poslední měření, které bylo v počátečním testování ventilu provedeno, byl záznam dynamiky ventilu provedený pomocí vysokorychlostní kamery. Pro měření byla využita kamera Basler acA2000-340km. Na obrázcích 33 a 34 jsou uvedeny snímky pro proces otevírání a uzavírání ventilu. Pořízené snímky, byly pro přehlednost po jejich záznamu upraveny pomocí Sobelova operatoru pro detekci hran. Originální snímky jsou uvedeny v příloze D.

EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ FUNKCE



Obr. 33: Záznam otevírání pořízený pomocí vysokorychlostní kamery, A - čas $t = 7$ ms, B - čas $t = 27$ ms, C - čas $t = 47$ ms



Obr. 34: Záznam zavírání z vysokorychlostní kamery, A - $t = 9$ ms, B - $t = 28$ ms, C - $t = 45$ ms

Část IV

ZÁVĚR PRÁCE

iv.1

ZÁVĚR A SMĚRY POKRAČOVÁNÍ PRÁCE

V předložené práci, zabývající se elektromagnetickými aktuátory ve funkci ventilu byla přiblížena daná problematika a byl proveden kompletní návrh nového prototypu, který byl následně sestaven a experimentálně otestován. Úvodní část práce je zaměřena na seznámení s problematikou elektromagnetických aktuátorů, byly nastíněny principy funkce aktuátorů a uvedeny základní příklady současných ventilů a nových prototypů vyvíjených na zahraničních univerzitách a na Katedře teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni. V další části zabývající se návrhem elektromagnetického ventilu byly formulovány matematické modely popisující základní funkci ventilu. V navazující kapitole byl pomocí formulovaného modelu podrobně analyzována nová koncepce ventilu s permanentními magnety, který pracuje v bistabilním režimu. Poslední kapitola se zabývá realizací všech dílčích částí nového prototypu ventilu, popisem jeho výroby a následně také experimentálním ověřením jeho základní funkce.

Vývoj nových koncepcí elektromagnetických aktuátorů je v současné době velmi aktuální problematika, neboť elektromagnetické aktuátory jsou velmi často využívány, a to v mnoha průmyslových odvětvích jako například energetika, automobilový průmysl, potravinářský průmysl a v mnoha dalších oborech jako je například zdravotnictví. V souladu s požadavky moderních technologií na vestavěnou inteligenci bude dále nutné zaměřit vývoj také na inteligentní řízení ventilů a možnosti jeho komunikaci s ostatními zařízeními v daném technologickém okruhu.

LITERATURA

- [1] D. Mayer, B. Ulrych: *Elektromagnetické aktuátory*. BEN - technická literatura Praha, 2008. ISBN 978-80-7300-216-9.
- [2] L. Haňka: *Teorie elektromagnetického pole: učebnice pro elektrotechn. fakulty*. SNTL Praha, 1975. Teoretická knižnice inženýra.
- [3] PEVEKO spol. s.r.o: *Parametry ventilu EVPE 1050*.
http://www.peveko.cz/data/evpe_1050.pdf, 1.5.2017.
- [4] M. Kurfířt: *Bistabilní elektromagnetický ventil*. Diplomová práce (Ing.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická. Plzeň, 2016.
- [5] F. Mach, T. Kaminský: *Novel monostable fail-safe electromagnetic actuator for straight valve in high-speed operation*. 2016 ELEKTRO, Strbske Pleso.
- [6] F. Mach, M. Kurfířt: *Bistable electromagnetic valve with sensorless controller*. 2016. Západočeská univerzita v Plzni.
- [7] F. Mach, I. Doležel: *Efficient Algorithm for Coupled Problem Simulation of High Dynamic Electromagnetic Actuators*. Západočeská univerzita v Plzni, 2016.
- [8] J. Kim, J. Chang: *A New Electromagnetic Linear Actuator for Quick Latching*. IEEE Transactions on Magnetics, 43.4, 2007.
- [9] P. Mercorelli: *A Two-Stage Sliding-Mode High-Gain Observer to Reduce Uncertainties and Disturbances Effects for Sensorless Control in Automotive Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 62.9, 2015.
- [10] F. Mach: *Nové koncepce elektromagnetických ventilů*. Západočeská univerzita v Plzni, 2017.

Literatura

- [11] F. Mach: *Pokročilé metody a algoritmy pro analýzu sdružených úloh v elektromagnetismu*. Disertační práce (Ph.D.). Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2015.
- [12] Průmysl 4.0 má v Česku své místo:
<https://www.mpo.cz/cz/prumysl/zpracovatelsky-prumysl/prumysl-4-0-ma-v-cesku-sve-misto--176055/>},
10.5.2017
- [13] Internet of Things:
<https://www.forbes.com/sites/jacobmorgan/2014/05/13/simple-explanation-internet-things-that-anyone-can-understand/#494b2afd1d09>, 10.5.2017

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Příklady ventilů: kulový ventil použitý v přečerpávací vodní elektrárně Dlouhé stráně (nahore), sériově vyráběné ventily v průmyslu (dole)	7
Obrázek 2	Ventil pro plynná paliva EVPE 1050	10
Obrázek 3	Akční člen ventilu pro plynná paliva EVPE 1050	11
Obrázek 4	Prototyp ventilu určený pro VVT (nalevo bez permanentních magnetů, napravo vylepšený prototyp s permanentními magnety) [8]	12
Obrázek 5	Princip funkce ventilu v uspořádání s permanentními magnety [8]	13
Obrázek 6	Prototyp monostabilního ventilu [9]	14
Obrázek 7	Detail magnetického obvodu prototypu [9]	15
Obrázek 8	Uspořádání klasických elektromagnetických ventilů: monostabilní (nalevo) a bistabilní (napravo) s manuálním [10]	16
Obrázek 9	Uspořádání nového konceptu monostabilního ventilu RolyPoly [5]	18
Obrázek 10	Princip otevírání a zavírání monostabilního ventilu RolyPoly [5]	19
Obrázek 11	Uspořádání nového konceptu bistabilního ventilu TROMAG [6]	19
Obrázek 12	Schématické znázornění nově vyvíjeného prototypu elektromagnetického bistabilního ventilu [10]	21
Obrázek 13	Náhradní schéma budicího obvodu aktuátoru	25
Obrázek 14	Schématické uspořádání akčního členu	28
Obrázek 15	Oblast řešení rozložení magnetického pole	30
Obrázek 16	Magnetizační charakteristika konstrukční oceli	31

Seznam obrázků

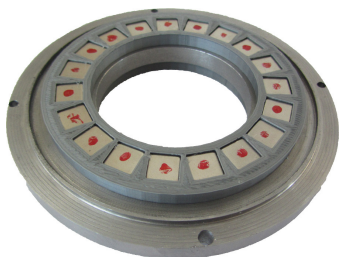
Obrázek 17	A - rozložení \mathbf{B} při vypnutých cívkách ($z = 0$), B - rozložení \mathbf{B} při zapnuté horní cívce ($z = 0$), C - rozložení \mathbf{B} při zapnuté horní cívce ($z = 8$ mm), D - rozložení \mathbf{B} při vypnutých cívkách ($z = 8$ mm)	32
Obrázek 18	Síla vyvinutá permanentními magnety, při vypnutých cívkách (nahore) a statická charakteristika pro sílu vyvinutou otevírací cívkou (dole)	34
Obrázek 19	A - rozložení magnetické pole od spodního magnetu, B - rozložení magnetického pole od horního magnetu	35
Obrázek 20	Rozložení hustoty energie při vypnutých cívkách (nahore) a rozložení permeability při vypnutých cívkách (dole)	38
Obrázek 21	Rozložení magnetické indukce v horním sloupku magnetického obvodu ve kterém byl počítán magnetický tok	39
Obrázek 22	Závislost přídržné síly na permeabilitě dorazů	40
Obrázek 23	Geometrie magnetického obvodu s vyznačenými zkoumanými parametry	41
Obrázek 24	Statická charakteristika v závislosti na parametru γ	41
Obrázek 25	Závislost indukčnosti na poloze jádra	43
Obrázek 26	Výpočet dynamiky ventilu při jeho otevírání - průběh proudu na otevírací cívce (nalevo) a průběh polohy jádra a jeho rychlosti (napravo)	45
Obrázek 27	Model šablony pro uložení magnetů	46
Obrázek 28	Model sestaveného ventilu	47
Obrázek 29	Model horní části jádra	48
Obrázek 30	Rozložený 3D model všech dílů prototypu nového ventilu	50
Obrázek 31	Fotografie postupného skládání prototypu ventilu	51
Obrázek 32	Časové průběhy napětí na jednotlivých cívkách ventilu při jeho cyklickém spínání - doba sepnutí 50 ms (nahore), 75 ms (uprostřed) a 100 ms (dole)	53

Seznam obrázků

Obrázek 33	Záznam otevírání pořízený pomocí vysokorychlostní kamery, A - čas $t = 7$ ms, B - čas $t = 27$ ms, C - čas $t = 47$ ms	55
Obrázek 34	Záznam zavírání z vysokorychlostní kamery, A - $t = 9$ ms, B - $t = 28$ ms, C - $t = 45$ ms	55
Obrázek 35	Magnetický obvod s permanentními magnety	64
Obrázek 36	Plášť magnetického obvodu pro uložení cívek	64
Obrázek 37	Uzavírací díl magnetického obvodu	64
Obrázek 38	Rozložené jádro	64
Obrázek 39	Příruba	64
Obrázek 40	Dřík a hlava ventilu	64
Obrázek 41	Výsledky optimalizace geometrie magnetického obvodu zob- razené pomocí korelačních diagramů pro jednotlivé optimali- zované parametry	65
Obrázek 42	Geometrie neoptimalizovaného (vlevo) a geometrie optimalizo- vaného akčního členu (vpravo) ventilu	66
Obrázek 43	Záznam otevírání pořízený pomocí vysokorychlostní kamery, A - čas $t = 7$ ms, B - čas $t = 27$ ms, C - čas $t = 47$ ms (origi- nální snímky)	67
Obrázek 44	Záznam zavírání z vysokorychlostní kamery, A - $t = 9$ ms, B - $t = 28$ ms, C - $t = 45$ ms (originální snímky)	67

PŘÍLOHY

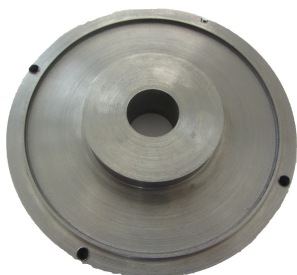
A - FOTOGRAFIE JEDNOTLIVÝCH ČÁSTÍ PROTOTYPU VENTILU



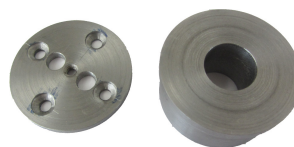
Obr. 35: Magnetický obvod s permanentními magnety



Obr. 36: Plášť magnetického obvodu pro uložení cívek



Obr. 37: Uzavírací díl magnetického obvodu



Obr. 38: Rozložené jádro

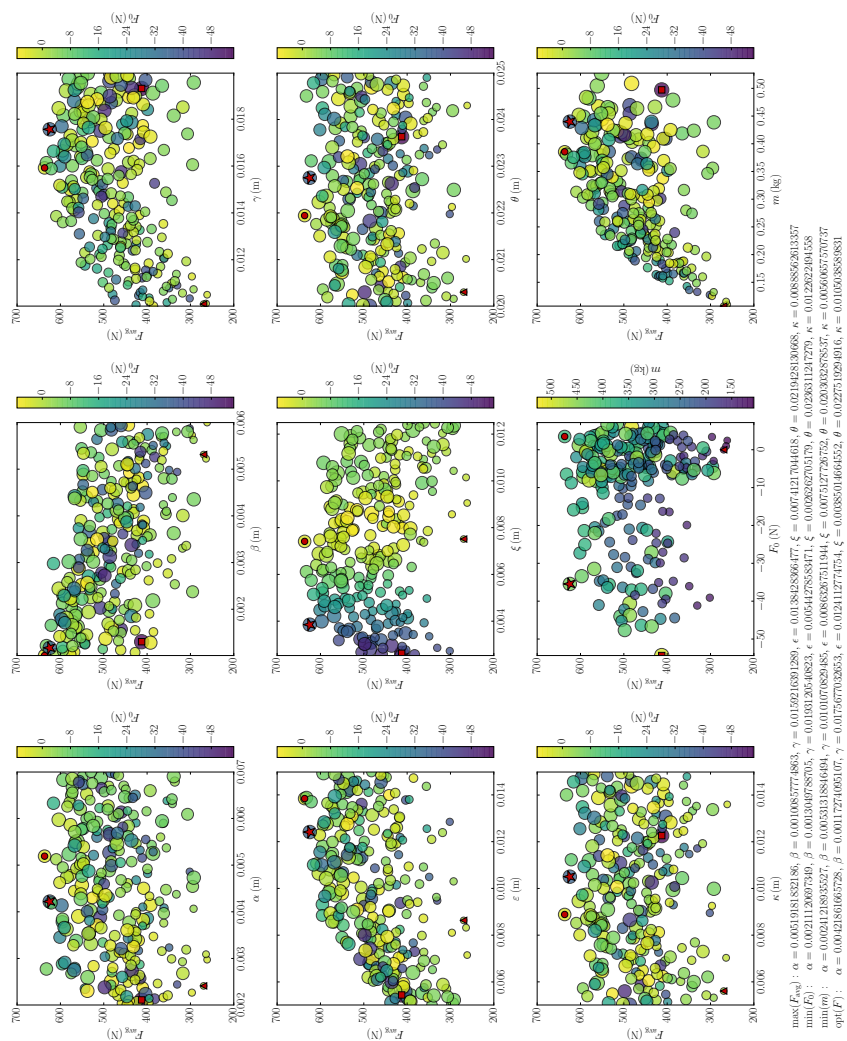


Obr. 39: Příruba



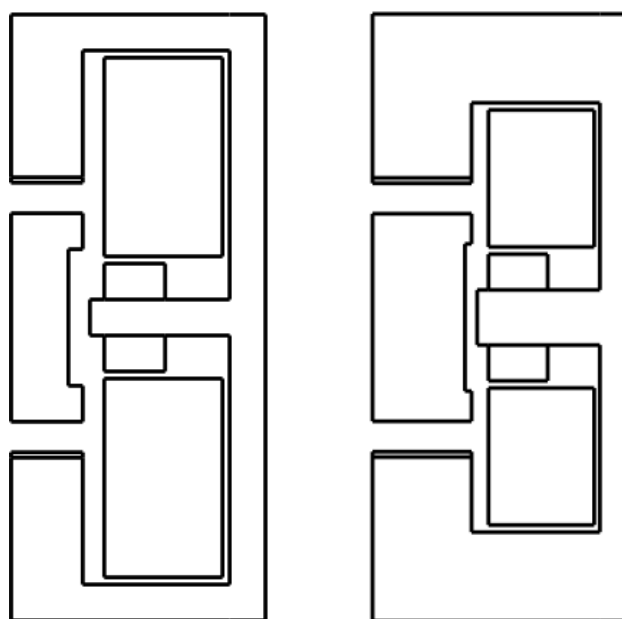
Obr. 40: Dřík a hlava ventilu

B - ZOBRAZENÍ VÝSLEDKŮ PROVEDENÉ OPTIMALIZACE



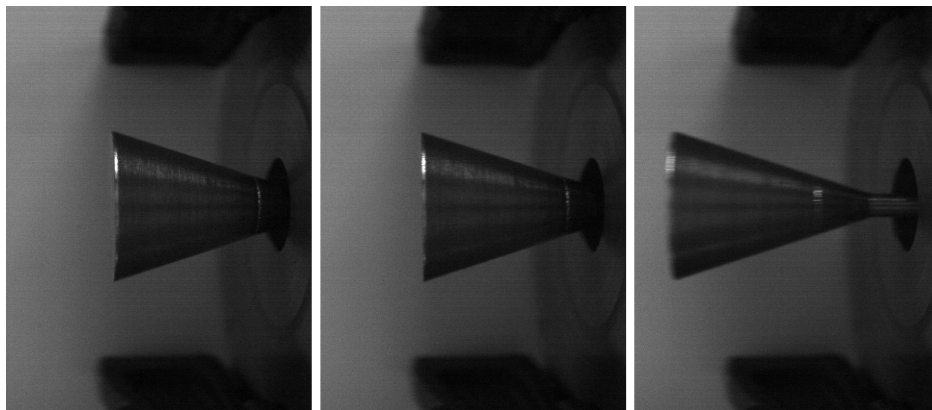
Obr. 41: Výsledky optimalizace geometrie magnetického obvodu zobrazené pomocí korelačních diagramů pro jednotlivé optimalizované parametry

C - POROVNÁNÍ GEOMETRIE NEOPTIMALIZOVANÉHO A
OPTIMALIZOVANÉHO VENTILU

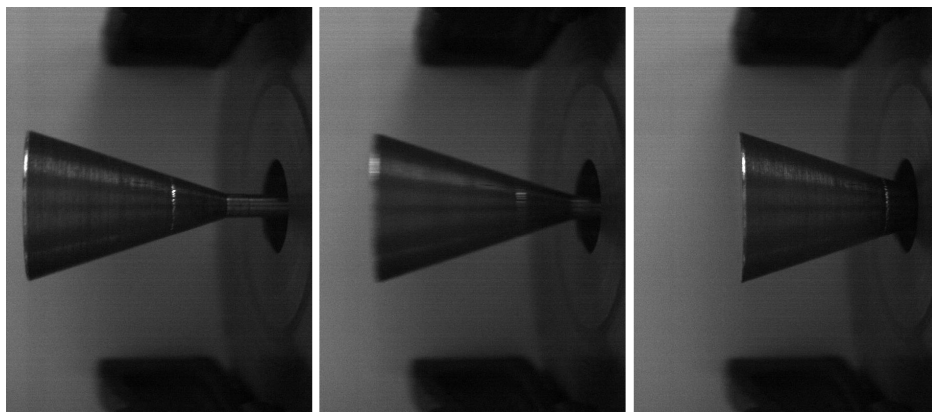


Obr. 42: Geometrie neoptimalizovaného (vlevo) a geometrie optimalizovaného akčního členu (vpravo) ventilu

D - SNÍMKY POŘÍZENÉ VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU

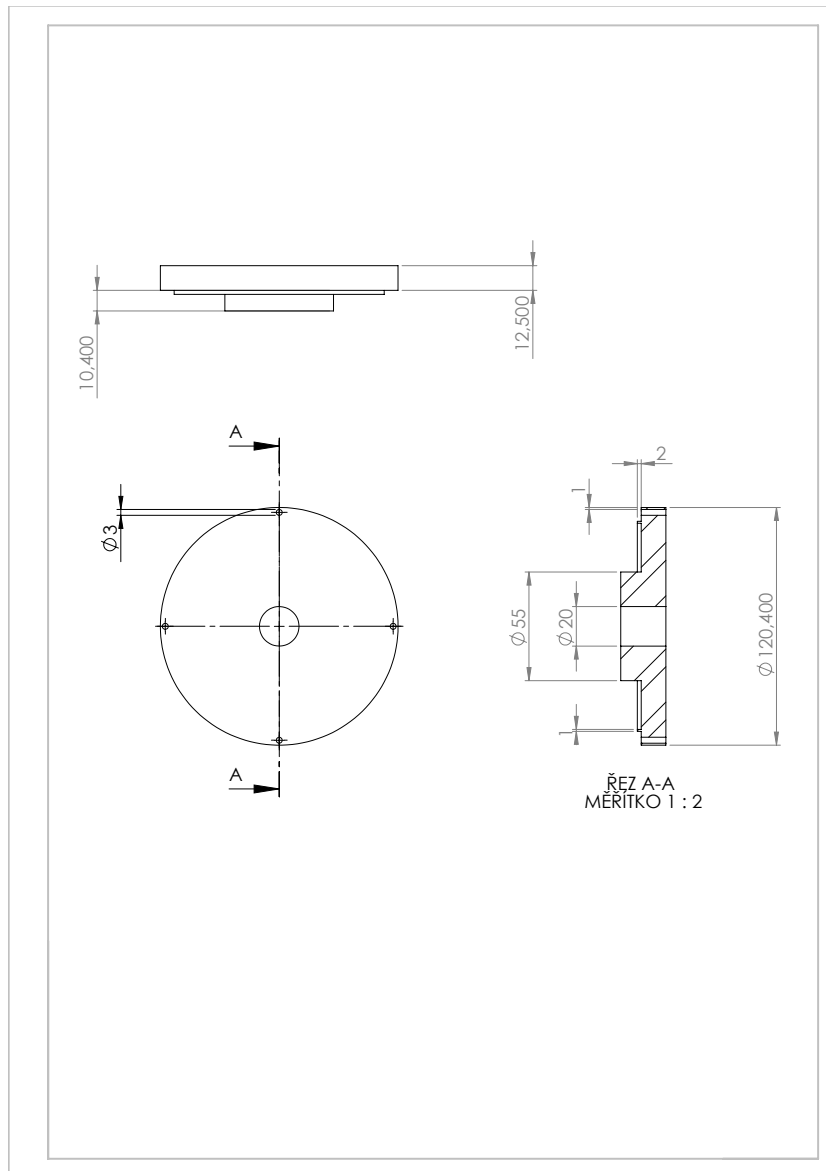


Obr. 43: Záznam otevírání pořízený pomocí vysokorychlostní kamery, A - čas $t = 7$ ms, B - čas $t = 27$ ms, C - čas $t = 47$ ms (originální snímky)

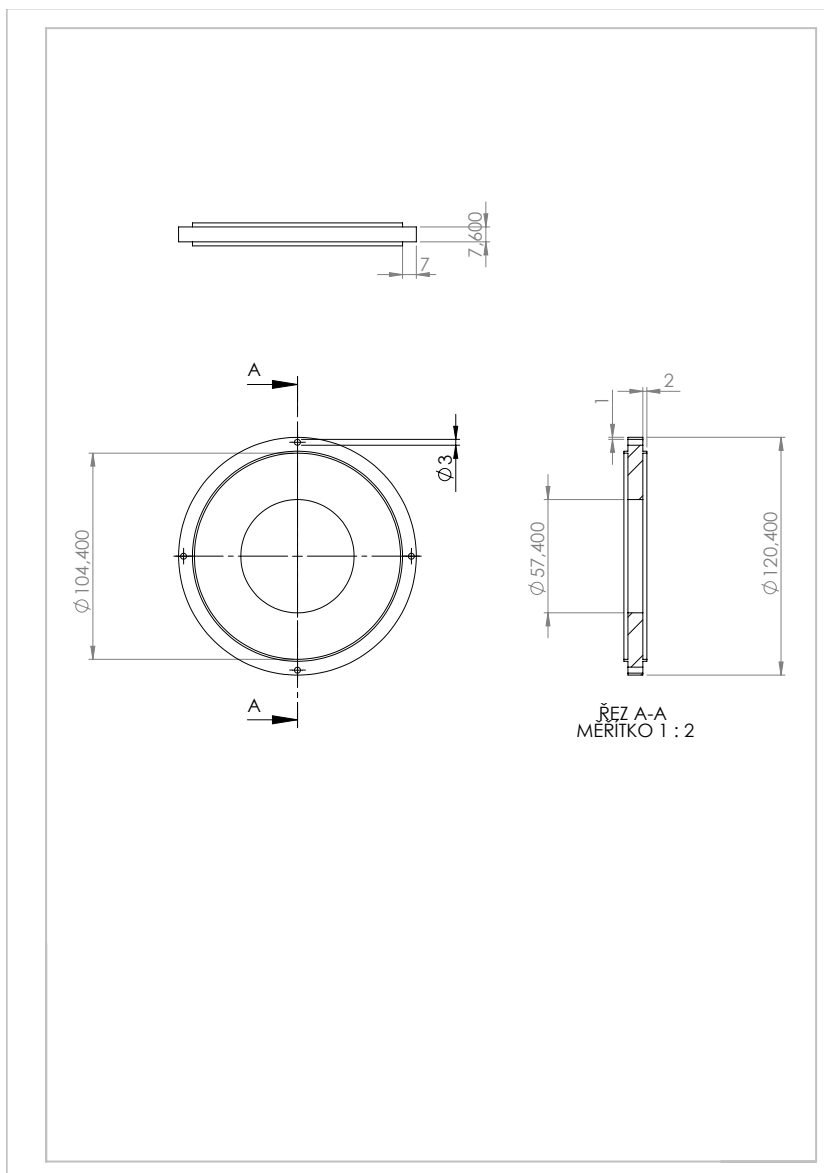


Obr. 44: Záznam zavírání z vysokorychlostní kamery, A - $t = 9$ ms, B - $t = 28$ ms, C - $t = 45$ ms (originální snímky)

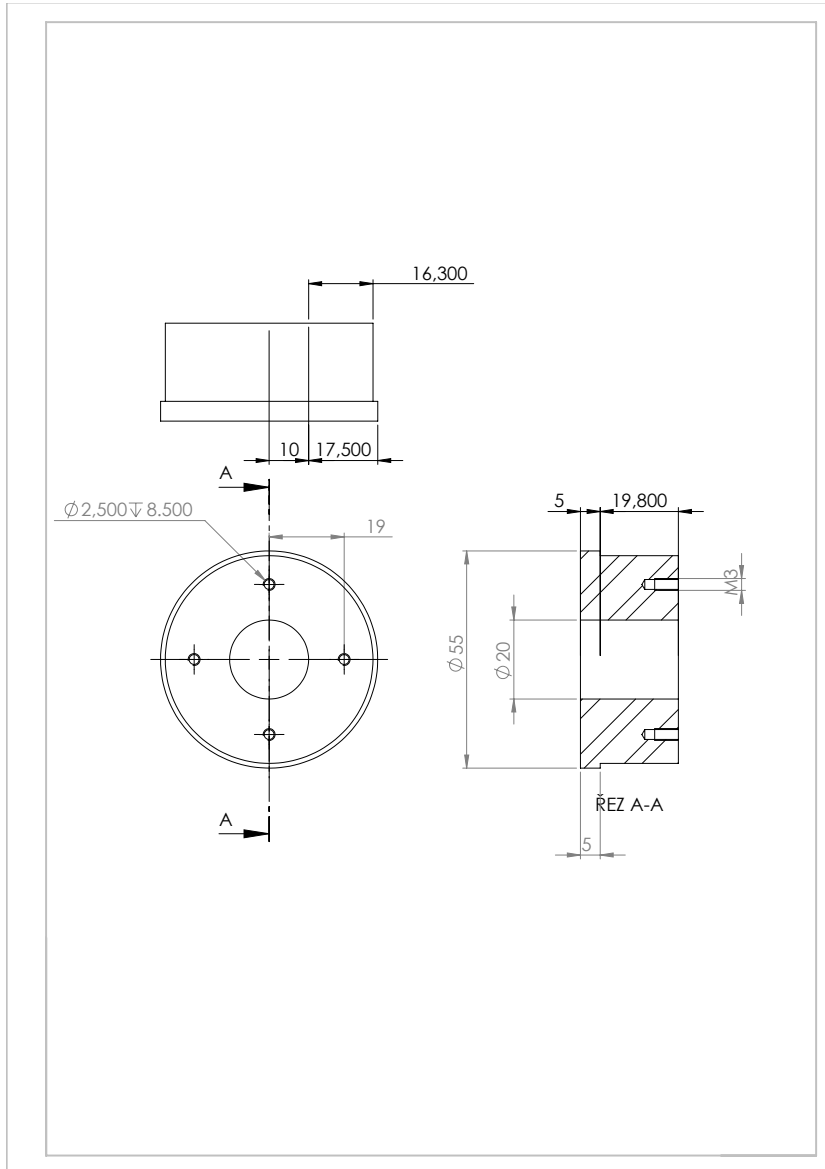
E - TECHNICKÁ DOKUMENTACE PROTOTYPU VENTILU



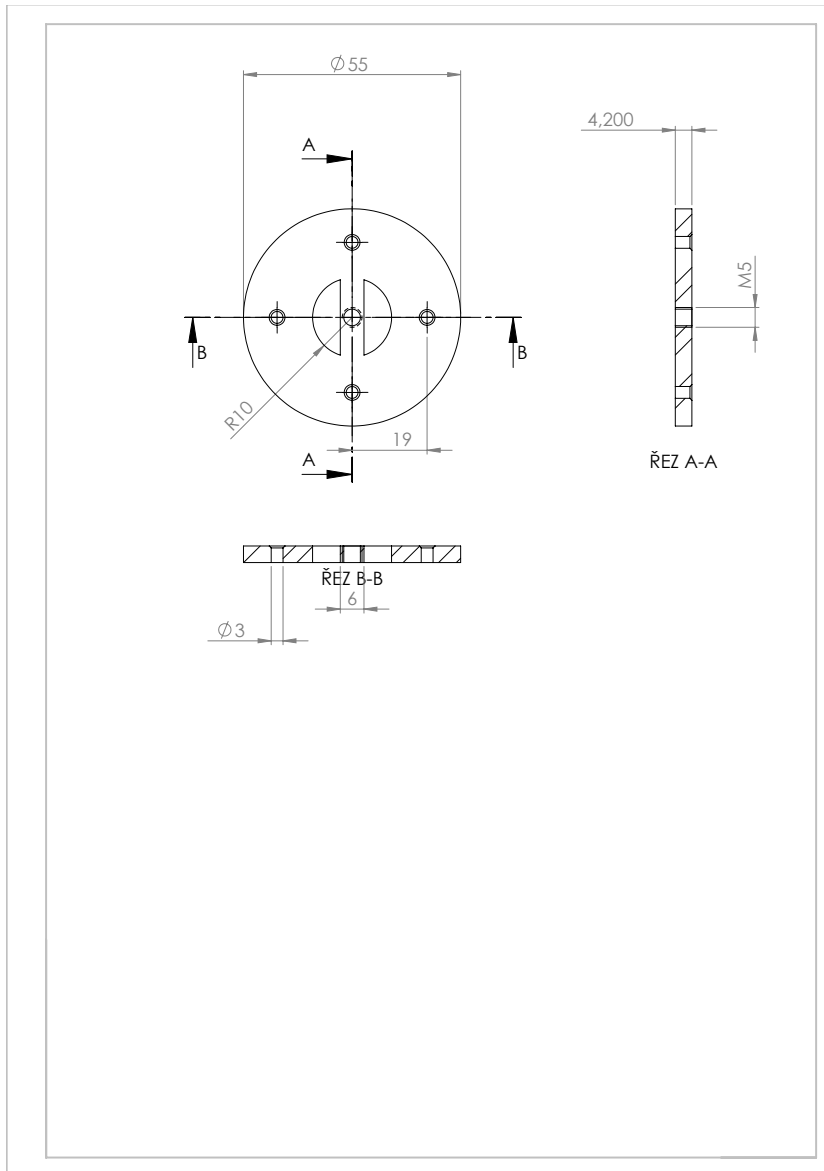
Seznam obrázků



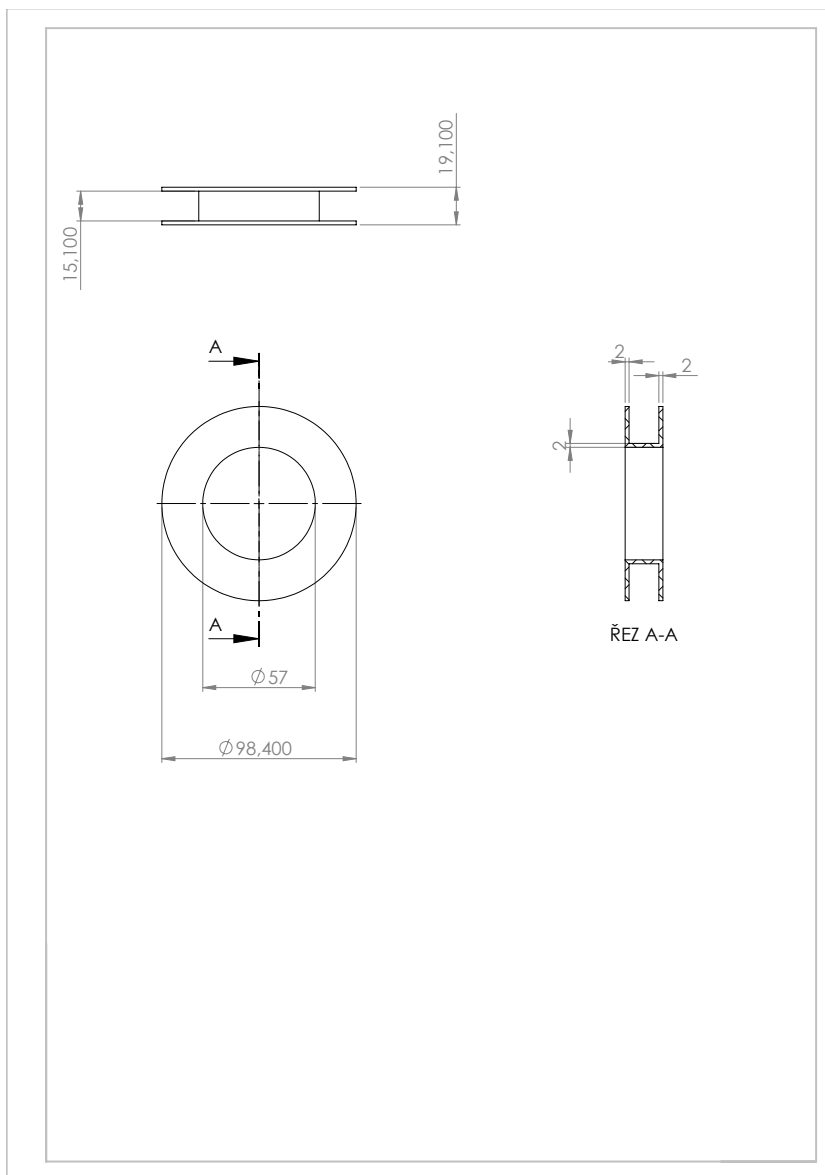
Seznam obrázků



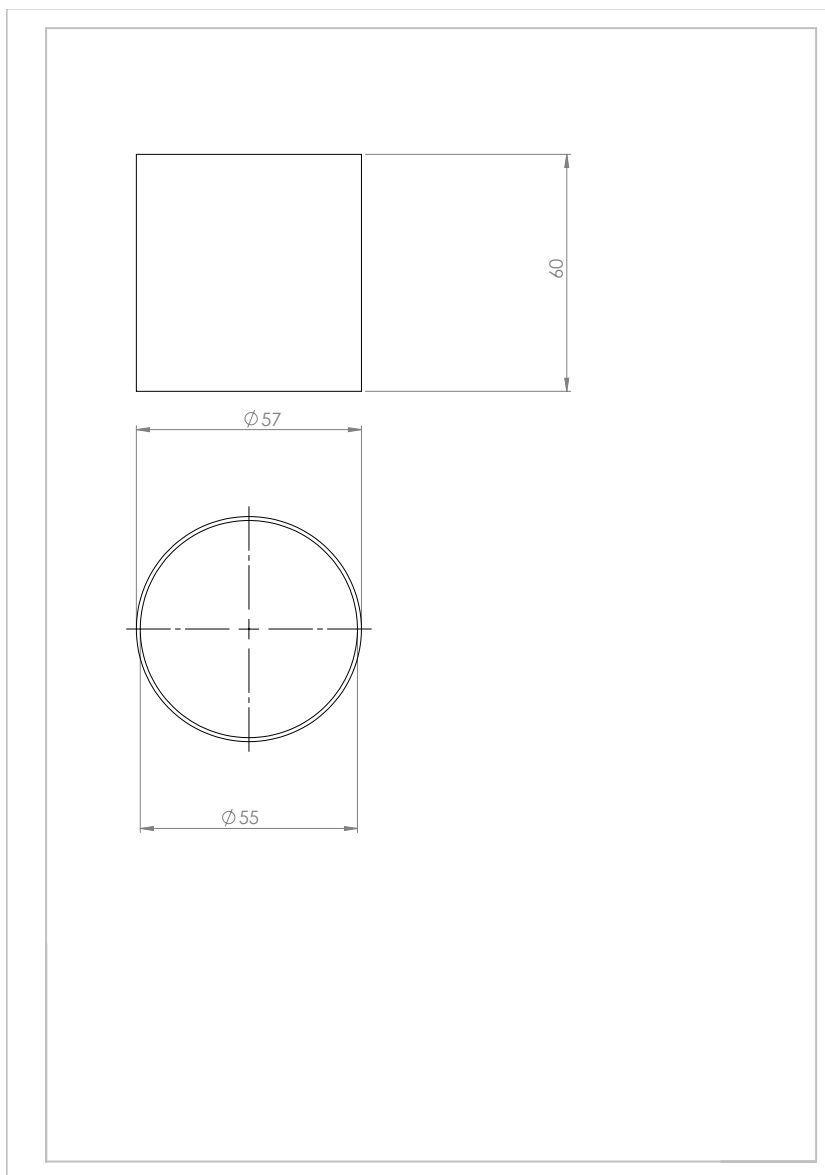
Seznam obrázků



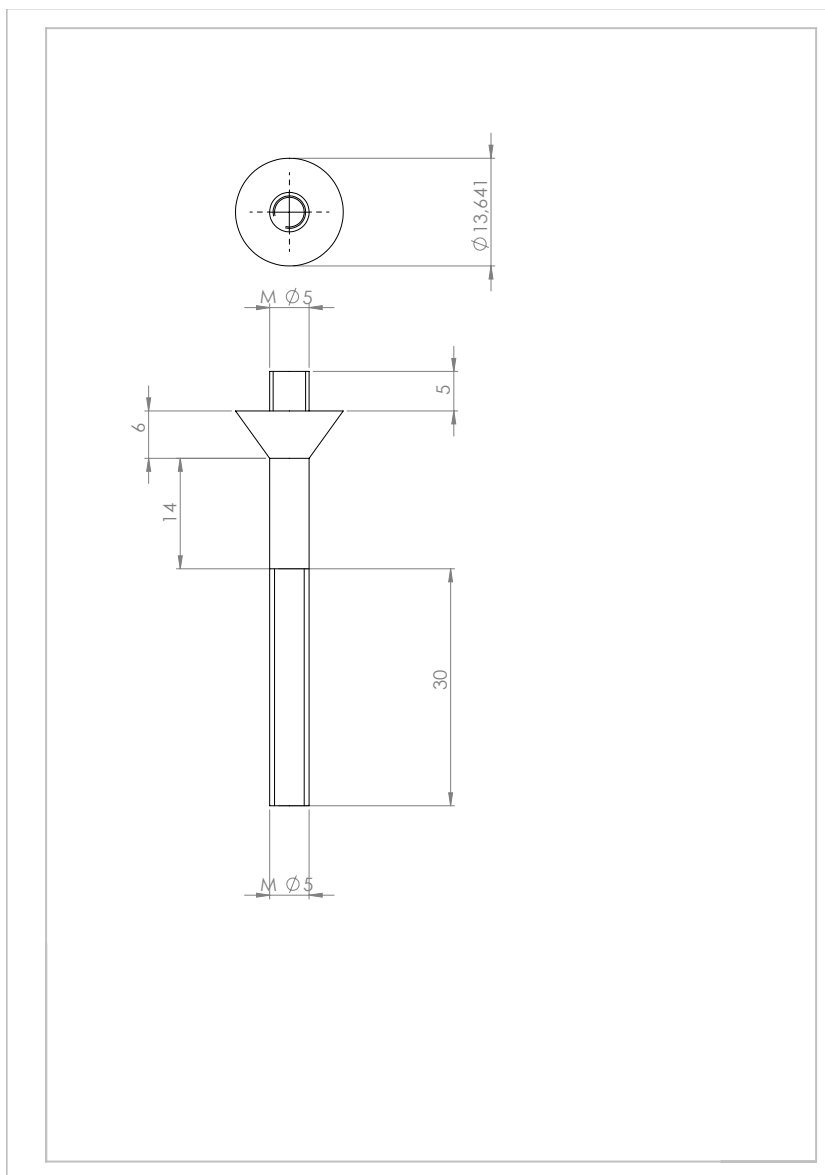
Seznam obrázků



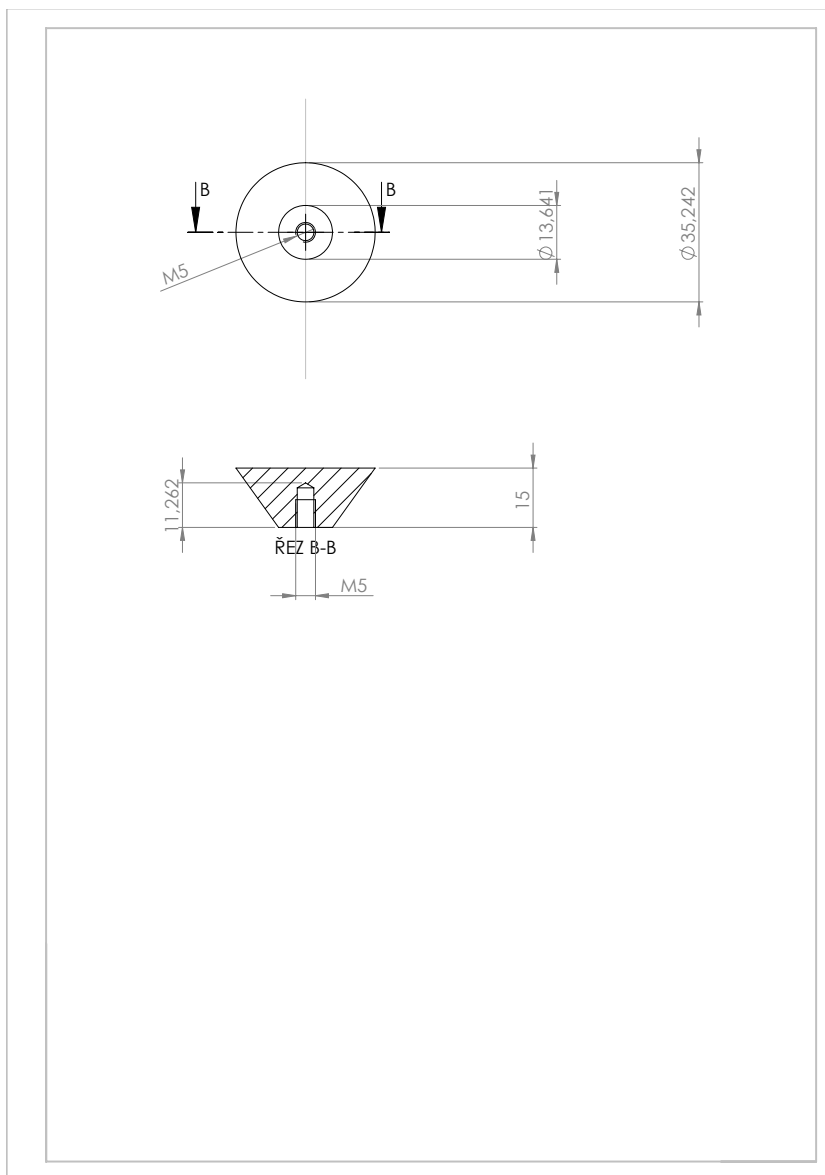
Seznam obrázků



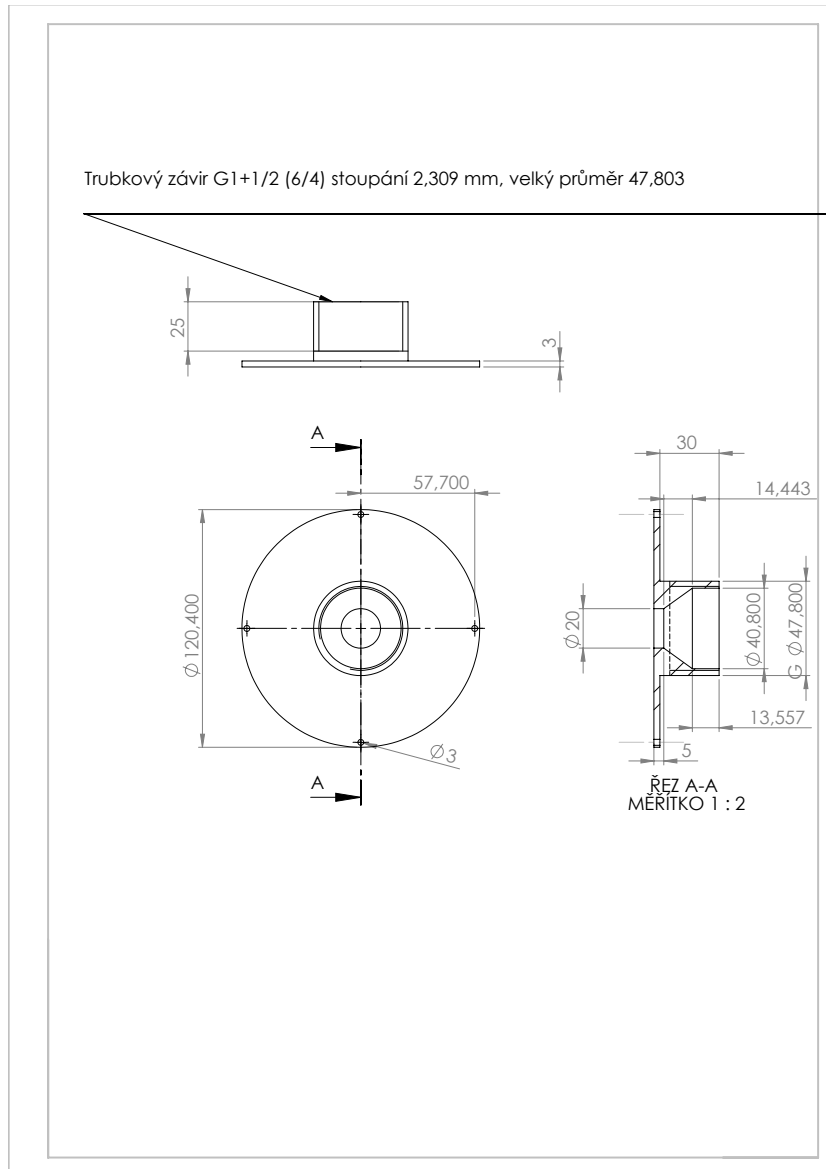
Seznam obrázků



Seznam obrázků



Seznam obrázků



Seznam obrázků

