

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Katedra výkonové elektroniky a strojů

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Plně elektromagnetický kulový ventil s více cívkami

Autor práce: **Bc. David Šmucr**
Vedoucí práce: **Ing. Martin Vítek**
Konzultant práce: **Ing. Jiří Kuthan**

2023

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. David ŠMUCR**
Osobní číslo: **E20N0040P**
Studijní program: **N0713A060013 Výkonové systémy a elektroenergetika**
Specializace: **Elektrické stroje**
Téma práce: **Plně elektromagnetický kulový ventil s více cívkami**
Zadávací katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Proveďte rešerši kapalinových a plynových ventilů s moderním typem aktuace, ovládáním a řízením.
2. Navrhněte koncepci plně elektromagnetického kulového ventilu s více cívkami.
3. Na základě konceptu vytvořte matematický model ventilu a využijte ho pro nalezení optimálních parametrů aktuačních cívek.
4. Zkonstruujte laboratorní prototyp navrženého ventilu.
5. Na prototypu proveďte základní charakterizaci jeho parametrů a porovnejte je s předchozí verzí plně elektromagnetického kulového ventilu.

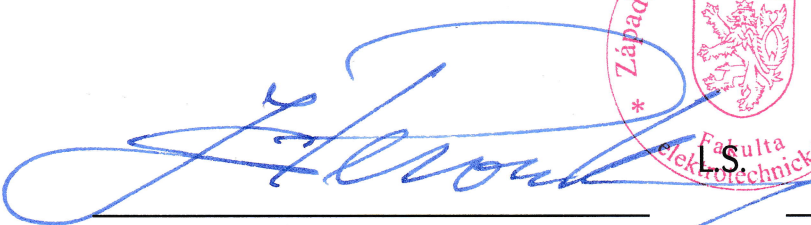

Rozsah diplomové práce: **40 – 60**
Rozsah grafických prací: **dle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **elektronická**

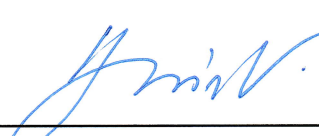
Seznam doporučené literatury:

1. ZHOU, You, et al. Design of A Limited-Angle Torque Motor with Magnetic Zero-Returner for Aviation Fuel Valve. In: 2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM). IEEE, 2020. p. 654-660.
2. SATO, Yasukazu. Development of a 2-degree-of-freedom rotational/linear switched reluctance motor. IEEE Transactions on magnetics, 2007, 43.6: 2564-2566.
3. XUE, Xiangdang, et al. A novel method to minimize force ripple of multimodular linear switched reluctance actuators/motors. IEEE transactions on magnetics, 2012, 48.11: 3859-3862.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Vitek**
Katedra elektrotechniky a počítačového modelování

Datum zadání diplomové práce: **7. října 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **26. května 2023**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan


Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 7. října 2022

Abstrakt

Předložená diplomová práce se zabývá návrhem koncepce plně elektromagnetického aktuátoru pro kulový ventil. Aktuátor je realizován pomocí elektromagnetů rovnoměrně rozložených po obvodu koule kulového ventilu. Podle požadované polohy ventilu jsou pak elektromagnety sekvenčně spínány, přičemž dochází k přímému silovému působení elektromagnetického pole na magnetickou nerezovou kouli a k jejímu postupnému natáčení do žádané pozice. Aktuátor je tedy bezdotykový (neobsahuje mechanické části propojující aktuátor a kouli) a přímo řídí pozici koule. První část se zaměřuje na stručné uvedení do problematiky provedení různých druhů ventilů a způsobu jejich aktuace. Druhá část se zabývá shrnutím dosavadního postupu v oblasti návrhu aktuátoru. Ve třetí části je definován koncept aktuátoru a jeho princip. Čtvrtá část se věnuje tvorbě a výsledkům matematických modelů vycházejících z navržené koncepce. V poslední části je popsána výroba a experimentální ověření navržených prototypů.

Klíčová slova

Aktuátor, Kulový ventil, Magnetické pole, Matematický model, Točivý moment, Bezkontaktní polohování

Abstract

The presented diploma thesis deals with the design of the concept of a fully electromagnetic actuator for a ball valve. The actuator consists of electromagnets evenly distributed around the circumference of the ball of the ball valve. According to the desired position of the valve, the electromagnets are sequentially switched, while the electromagnetic field exerts a direct force on the magnetic stainless steel ball and gradually rotates it to the desired position. The actuator is, therefore, non-contact (does not contain mechanical parts connecting the actuator with the ball) and directly controls the ball's position. The first part focuses on a brief introduction to the design of various types of valves and their actuation method. The second part deals with a summary of the current progress in the actuator design. In the third part, the actuator concept and its principle are defined. The fourth part is devoted to the creation and results of mathematical models based on the proposed concept. The last part describes the production and experimental verification of the designed prototypes.

Keywords

Actuator, Ball valve, Magnetic field, Mathematical model, Torque, Non-contact positioning

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Martinu Vítkovi a celé výzkumné skupině CIMRA působící pod vedením Ing. Františka Macha, Ph.D. na Katedře elektrotechniky a počítačového modelování Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni za vytvoření přátelského produktivního prostředí, jejich přístup, metodické pokyny a cenné profesionální rady, které vedly k vypracování této práce. Dále bych rád poděkoval za podporu a motivaci mé přítelkyni a celé rodině.

Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	vi
Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	ix
1 Teoretický úvod	2
1.1 Druhy ventilů a jejich základní popis	2
1.1.1 Motýlkový ventil	2
1.1.2 Zpětná klapka	3
1.1.3 Sedlový ventil	4
1.1.4 Šoupátkový ventil	4
1.1.5 Kulový ventil	5
1.2 Současné způsoby aktuace ventilů	6
1.2.1 Manuální síla	6
1.2.2 Pneumatické aktuátory	6
1.2.3 Hydraulické aktuátory	8
1.2.4 Elektromechanické aktuátory	9
1.2.5 Elektromagnetické aktuátory	10
2 Výchozí situace	13
2.1 Motivace	13
2.2 Princip pohybu koule	13
2.3 První kroky	14
2.4 Ověření myšlenky	15
3 Návrh koncepce	18
3.1 Funkce ventilu - otáčení o 90 stupňů	18
3.2 Funkce motoru - otáčení o plných 360 stupňů	20
4 Matematický model	22
4.1 Výpočet magnetického pole	23
4.1.1 Matematický popis jednotlivých částí	23
4.2 Výpočet silového působení	25
4.3 Základní model	26
4.3.1 Závislost velikosti a průběhu momentu na parametrech elektromagnetů	28
4.4 Koncepční model	30

4.5	Pokročilý model	31
4.6	Příklad konvergenční analýzy	35
5	Realizace prototypů aktuátoru a laboratorní testy	37
5.1	Koncepční prototyp	37
5.1.1	Realizace koncepčního prototypu	37
5.1.2	Návrh elektromagnetů pro koncepční prototyp a konečná realizace	38
5.1.3	Testování koncepčního prototypu	40
5.2	Pokročilý prototyp	42
5.2.1	Návrh a realizace elektromagnetů pokročilého prototypu	43
5.2.2	Realizace verze 1 pokročilého prototypu	44
5.2.3	Testování verze 1 pokročilého prototypu	45
5.2.4	Realizace verze 2 pokročilého prototypu	48
5.2.5	Testování verze 2 pokročilého prototypu	49
6	Závěr	54
	Seznam použité literatury	56
	Přílohy	A

Seznam použitých symbolů a zkratek

Značka	Popis	Jednotka
∇	Operátor parciálních derivací Nabla	-
\mathbf{A}	Magnetický vektorový potenciál	Wb m^{-1}
α	Úhel natočení/odklonu	$^\circ$
\mathbf{B}	Vektor magnetické indukce	T
$ \mathbf{B} $	Absolutní hodnota vektoru magnetické indukce	T
\mathbf{B}_r	Remanentní magnetická indukce	T
\mathbf{D}	Dielektrická indukce	C m^{-2}
d	Průměr	m
d_{Fe}	Průměr feromagnetického jádra	m
δ	Velikost vzduchové mezery	m
δ_{Fe}	Velikost vzduchové mezery mezi feromagnetickým jádrem a cívkou	m
\mathbf{E}	Intenzita elektrického pole	V m^{-1}
Φ	Magnetický tok	Wb
\mathbf{F}	Síla	N
g	Gravitační zrychlení	m s^{-2}
h	Výška vodního sloupce	m
\mathbf{I}	Elektrický proud	I
\mathbf{J}_{ext}	Externí proudová hustota	A m^{-2}
k_{ks}	Koeficient sítě	-
L	Indukčnost	H
l	Délka	m
\mathbf{M}	Točivý moment	N m
m	Hmotnost	kg
μ	Permeabilita	H m^{-1}
μ_0	Permeabilita vakua	H m^{-1}
\mathbf{n}	Normálový vektor	-
N	Počet závitů	-
p	Hydrostatický tlak	Pa
R	Elektrický odpor	Ω
r	Poloměr	m
r_k	Poloměr koule	m
ρ	Hustota	kg m^{-3}
S	Plocha	m^2
s_v	Šířka vrstvy vinutí	m
\mathbf{T}	Maxwellův tenzor	A T m^{-1}
W_m	Energie magnetického pole	J

Seznam obrázků

1	Konstrukce a princip základních druhů ventilů	3
2	Kuličkový ventil [8]	5
3	Typický příklad a popis pneumatického aktuátoru [9]	7
4	Typický příklad a popis hydraulického aktuátoru [10]	8
5	Šnekový převod [11]	9
6	Elektromechanický aktuátor ve spojení s kulovým ventilem od firmy PEVEKO [13]	10
7	Typický příklad a popis solenoidového aktuátoru [15]	11
8	Porovnání 4 pólového rotoru reluktančního motoru A s feromagnetickou koulí B (lze považovat za dvoupólový rotor)	14
9	Test s permanentním magnetem [7]	15
10	Realizovaná koncepce k ověření myšlenky [7]	16
11	Princip funkce prototypu společně s konečnou realizací [7]	16
12	Počáteční poloha koule vůči páru elektromagnetů [1]	17
13	Polohování ventilu do poloh otevřeno/zavřeno (otáčení o 90°)	19
14	Naznačení motorové funkce otáčení ventilu	20
15	Aktivní části ponechané v matematickém modelu - v tomto případě zvýrazněné na základním matematickém modelu	22
16	Řez modelem sloužící k popsání jednotlivých částí	24
17	Základní matematický model	26
18	Rozložení magnetické indukce v průběhu otáčení koule	27
19	Momentová charakteristika základního modelu	28
20	Základní uvažované parametry	28
21	Závislost maximální velikosti momentu na rozměrových parametrech	29
22	Závislost maximální velikosti momentu na elektrických parametrech	30
23	Koncepční matematický model	31
24	Momentová charakteristika všech elektromagnetů koncepčního modelu	32
25	Společná momentová charakteristika koncepčního modelu	32
26	Pokročilý matematický model	33
27	Porovnání elektromagnetu s trubkovým jádrem a vzduchové cívky	34
28	Momentové charakteristiky pokročilého prototypu	34
29	Vygenerovaná síť povrchu koule	35
30	Závislost magnetické energie na velikosti koeficientu sítě povrchu koule	36

31	Konstrukční části koncepčního prototypu: A) Prototypové těleso, B) Hřídel, C) Feromagnetická koule, D) Čtvrtina podstavce	38
32	Provedení elektromagnetů	39
33	Celková sestava koncepčního prototypu	40
34	Fotografie jednotlivých částí koncepčního prototypu: A) a B) Prototyp z různých pohledů, C) Detail mezery mezi koulí a elektromagnetem, D) Těleso s uloženou koulí, E) Elektromagnet	41
35	Výsledek pohybové analýzy společně se snímkem ze softwaru Tracker	42
36	Nákres a průřez elektromagnetů z trubkovým a plným jádrem	43
37	Konstrukční části verze 1 pokročilého prototypu: A) Těleso ventilu, B) Hřídel, C) Feromagnetická koule, D) Víko	44
38	Celková sestava verze 1 pokročilého prototypu	45
39	Nákres a fotografie sestavy pro měření magnetické indukce	46
40	Grafy naměřených závislostí magnetické indukce	47
41	Konstrukční části verze 2 pokročilého prototypu: A) Polovina tělesa, B) Hřídel, C) Těsnící kroužek z teflonu, D) Feromagnetická koule	48
42	Vizualizace konstrukční úpravy z důvodu přidání těsnění	49
43	Celková sestava verze 2 pokročilého prototypu	49
44	Nákres a fotografie soustavy pro měření síly	50
45	Graf naměřené síly v závislosti na úhlu natočení	52
46	Nákres a fotografie sestavy pro měření těsnosti	52

Seznam tabulek

1	Tabulka naměřených hodnot magnetické indukce v závislosti na napájecím proudu [1]	17
2	Tabulka naměřených hodnot magnetické indukce v závislosti na napájecím proudu elektromagnetů	47
3	Tabulka naměřených hodnot sil pro trubkové elektromagnety v závislosti na úhlu natočení	51
4	Tabulka naměřených hodnot maximálních sil pro elektromagnety s plným jádrem	51

Úvod

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na návrh a experimentální ověření koncepce aktuátoru pro kulový ventil. Volně navazuje na mou bakalářskou práci *Plně elektromagnetický kulový ventil* [1], kde byla ověřena možnost řízení polohy ventilu elektromagnetickým polem. Kulové ventily jsou jedny z nejpoužívanějších druhů ventilů, přičemž jsou ve všech současně vyráběných provedeních ovládány přes mechanickou spojku - hřídel. Tato práce si tak klade za cíl vytvoření bezkontaktního (tzv. direct drive) ovládání právě za pomoci silového působení magnetického pole.

Cílem je zejména definovat podobu aktuátoru k docílení polohování ventilu ve smyslu jeho základní funkce - tedy otevírat a uzavírat průtok tekutin. K ověření koncepce a návrhu parametrů je nutné vytvořit matematický model, ze kterého následně vychází realizace prototypů aktuátoru. Dalšími cíli je definování a provedení příslušných experimentů k základnímu ověření funkčnosti navržených řešení a k jejich základní charakterizaci. Tyto experimenty následně vyhodnotit a stanovit směr budoucího vývoje.

Práce je typologicky rozdělena celkem do šesti kapitol. První kapitola stručně informuje o současných provedeních různých druhů ventilů a způsobu jejich aktuaace a uvádí tak do tématu této práce. Druhá kapitola podává přehled o stavu vývoje aktuátoru předcházejícímu této práci (*state of the art*). Ve třetí kapitole je definován koncept, jeho princip a jeho předpokládaná funkce. Čtvrtá kapitola je zaměřená na tvorbu a využití tří matematických modelů, díky kterým je možné ověřovat parametry a mimo jiné i získat lepší představu o funkci navržených prototypů aktuátorů. Poslední kapitola je věnována realizaci navržených prototypů, jejich experimentálnímu ověření a hledání jejich nedostatků k jejich možnému vylepšení v dalších fázích vývoje.

1 Teoretický úvod

Ventily obecně jsou v celém světě hojně užívány k nejrůznějším aplikacím. Jejich hlavním úkolem je regulace průtoku tekutin. Tekutinami se rozumí jakékoliv látky, které „tečou“ – jsou to tedy kapaliny a plyny nejrůznějších vlastností. Podle typu tekutiny, jejího tlaku, rychlosti průtoku a účelu regulace jsou pak aplikovány nejrůznější druhy ventilů. Ty nejpoužívanější jsou uvedeny na *obrázku 1*.

Základní funkce ventilů jsou:

- Spouštění, zastavování nebo izolování průtoku tekutin. To odpovídá funkci otevření a zavření.
- Řízení nebo změna (škrcení) množství průtoku tekutiny omezením průtoku. To odpovídá funkci řízení objemu.
- Kontrola toku nebo řízení směru toku tekutiny a zabránění zpětnému toku. To odpovídá funkci řízení směrovosti.
- Regulace tlaku v systému nebo procesu.
- Odlehčení součásti nebo potrubí od přetlaku. [2]

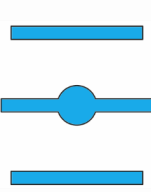
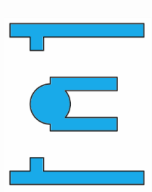
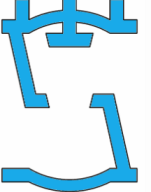
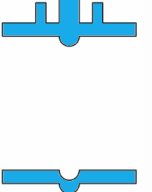
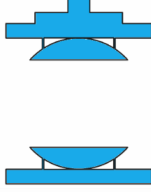
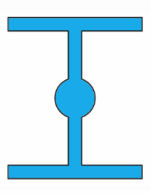
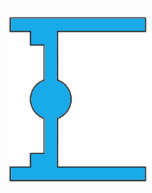
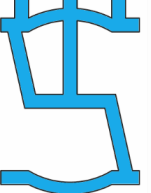

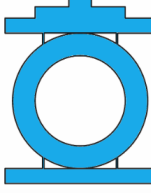
1.1 Druhy ventilů a jejich základní popis

Každý jednotlivý typ ventilů má svůj jedinečný princip, od kterého se následně odvíjí i způsob a metody jeho řízení. Právě proto budou v následujících kapitolách představeny principy, charakteristiky a aplikace základních druhů ventilů.

1.1.1 Motýlkový ventil

Hlavním prvkem motýlkového ventilu je otočný disk, který je uložený uprostřed tělesa. Poloha tohoto disku je řízena otáčením hřídele, která je k němu připojena a je vyvedena ven přes otvor v tělese ventilu. Na stejném principu pracují i kulové ventily. Na hřídel je pak připevněn aktuátor pracující na různých principech podrobněji představených dále v této kapitole. Stejným rysem aktuátorů je však to, že musí být schopny vykonávat otáčivý pohyb. [3]

Mezi výhody motýlkových ventilů se řadí jejich nízká hmotnost, cena a prostorová nenáročnost. To vše je zapříčiněno zejména tím, že hlavním prvkem ovlivňujícím průtok tekutiny je pouze již zmíněný otočný disk. Tento disk funguje se čtvrtinovou otáčkou, což znamená otáčení do poloh otevřeno a zavřeno v rozmezí 90° . [2]

Motýlkový ventil	Zpětná klapka	Sedlový ventil	Šoupátkový ventil	Kulový ventil
Otevřeno	Otevřeno	Otevřeno	Otevřeno	Otevřeno
				
Zavřeno	Zavřeno	Zavřeno	Zavřeno	Zavřeno
				

Obrázek 1: Konstrukce a princip základních druhů ventilů

Podle použití ventilu jsou používána měkká či tvrdá těsnění. Pro nízkotlaké a nízkoteplotní aplikace se používají těsnění měkká mezi která se řadí například pryž nebo plast. Pro vysoce výkonné ventily pro vysokotlaké aplikace se pak používá kovové těsnění, tzv. těsnění kov-kov. [2]

Obecně se tyto typy ventilů využívají ve velkých ventilových aplikacích spojených s vyššími průměry potrubí například v čističkách odpadních vod a elektrárnách. Pod tím si lze představit regulaci velkých průtoků plynů, kapalin a vysoce viskózních kapalin včetně znečištěných médií. Motýlkové ventily by neměly po delší dobu pracovat v režimu škrcení. Pokud se tak stane, může docházet k závažným poruchám těsnosti. [2]

1.1.2 Zpětná klapka

Hlavním úkolem zpětných klapek je hlídání směru průtoku tekutiny. To ve zkratce znamená, že ventily propouští tekutinu pouze jedním směrem. V případě otočení toku se automaticky uzavřou a tekutinu nepropustí. Někdy se používají společně s filtry, kdy mimo hlídání směru toku zajišťují rovněž čištění tekutiny. [4]

Tento typ ventilů nevyžaduje jakékoliv řízení, vše se děje automaticky v důsledku konstrukce. Podle ní se rozeznávají čtyři typy zpětných klapek, a to kulové, sedlové, klapkové a membránové. Na obrázku 1 je uveden typ klapkový. Jako zpětný mechanismus je velice často využívána pružina, kdy k otevření ventilu je nutné překonat sílu této pružiny, což znamená, že tekutina musí disponovat určitým tlakem. [2]

1.1.3 Sedlový ventil

Sedlové ventily vynikají zejména dobrými škrtíciemi charakteristikami, tedy charakteristikami v uzavřeném stavu. Tomu napomáhá menší otvor pro průchod média a také velmi nízká netěsnost sedla. Základním regulačním členem je pohyblivý disk, který je usazen paralelně ke směru toku. [2], [5]

Tyto ventily jsou řízeny přes hřídel, která je pevně připevněna k disku a vykonává pohyb nahoru a dolů. Tohoto pohybu lze docílit dvěma způsoby. Prvním je lineární pohyb hřídele společně s točivým pohybem. Jinými slovy je hřídel vybavena závitem a točivým pohybem se šroubuje do jednotlivých pozic. Druhým způsobem je čistě lineární pohyb, kdy se hřídel pohybuje pouze ve dvou směrech. Tento pohyb hřídele je využíván u speciálního typu těchto ventilů tzv. solenoidových ventilů. [2], [5]

Při změně stavu ventilu je důležité pohybovat hřídelí velice pomalu, mohlo by totiž dojít k rázu tekutiny, který by mohl mít za následek poškození potrubí či samotného ventilu - to ovšem platí více či méně u většiny používaných ventilů. Hlavní nevýhodou je však vysoká tlaková ztráta v otevřeném stavu. Je to zapříčiněno konstrukcí, konkrétně pak vzorem „Z“, který významně omezuje průtok tekutiny a malým průřezem sedla. [2]

1.1.4 Šoupátkový ventil

Šoupátkové ventily jsou svojí funkcí velmi podobné sedlovým ventilům, ale na rozdíl od nich jsou primárně využívány pro provoz v plně otevřeném stavu díky jejich téměř nulové tlakové ztrátě. Podle využití pak rovněž existují tyto ventily pro provoz v plně uzavřeném stavu, nedisponují však takovými škrtíciemi charakteristikami jako ventily sedlové. [2]

Konstrukce je velice jednoduchá. Z anglického názvu „gate valve“, který lze volně přeložit jako bránový ventil je zřejmé, že hlavním regulačním elementem je brána. V některých případech se v souvislosti se šoupátkovými ventily hovoří o tzv. nožových ventilech. Je tomu tak proto, že se brána velice často podobá jakémusi noži přesněji spíše gilotině. Tato brána (nůž) se pak podle požadovaného stavu ventilu vytahuje či zasouvá do tělesa. [6]

Podle zmíněného popisu je zřejmé, že řízení ventilu by mělo být obdobné jako v předchozím případě, tedy jako u sedlových. K tomu je nutné posouvat bránu lineárně přes připojenou hřídel, která je v tomto případě velice často našroubována do samotné brány a točivým pohybem ji lineárně zvedá či ukládá zpět do tělesa. Nicméně existují i varianty s pevně spojenou hřídelí, která je vytahována a zasouvána podle požadované polohy – je tomu tak například při elektrickém ovládní lineárním aktuátorem. Při řízení je na snadě brát zřetel na pomalé otevírání a zavírání ventilu, aby nedocházelo k tlakovým rázům v potrubí jako v předešlém případě. [6]

1.1.5 Kulový ventil

Hlavní zaměření této práce je však na ventily kulové. Jak už název napovídá, hlavním prvkem je v tomto případě koule. Ta má ve svém středu díru, která tvoří jakýsi kanál pro průchod tekutin. Jejím otáčením pak lze libovolně regulovat průtok v potrubním systému.

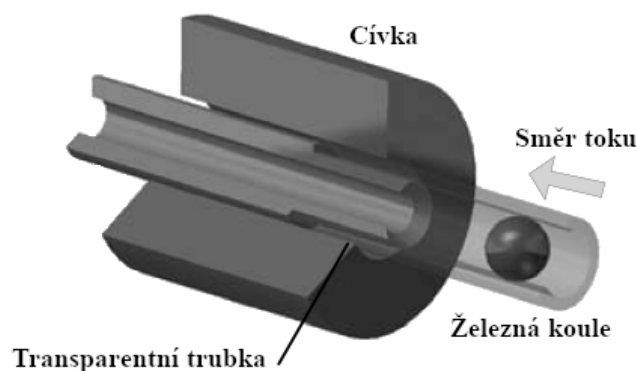
V současnosti používané kulové ventily se skládají z těla (tělesa) ventilu, koule, hřídele vyvedené z těla a v neposlední řadě je důležitým prvkem ventilů také těsnění. Ovládány jsou pak právě přes hřídel, na kterou může být připojena páka (manuální řízení), nebo aktuátory nejrůznějších druhů. V dnešní době jsou nejpoužívanějšími typy aktuátorů elektrické motory, a to konkrétně motory stejnosměrné s vyšším nárůstem podílu stejnosměrných bezkartáčových motorů. [7]

Jednou z největších výhod je možnost relativně rychlého otevření/uzavření ventilu bez nebezpečí rázu tekutiny v potrubí. Samozřejmě v případě velmi rychlé změny stavu se ráz objevit může. Další výhodou je nízká tlaková ztráta v plně otevřeném stavu a relativně dobré škrtící charakteristiky. Proto je kulový ventil velmi univerzální a lze ho využít v široké škále aplikací.

1.1.5.1 Speciální typy kulových ventilů

V zahraničním průmyslu a literatuře jsou výrazem *kulový ventil* označovány nejen klasické, dříve představené kulové ventily, ale rovněž ventily, jejichž princip je naprosto odlišný. Jako ventil kulový bývá velice často označován také ventil sedlový - v překladu *globe valve*. Samozřejmě v této shodě hraje roli hlavně fakt, že anglická slova *ball* a *globe* jsou shodně překládána jako koule.

Dalším zástupcem této skupiny je ventil, jehož název by byl po převedení do češtiny spíše kuličkový - jedná se v podstatě o zpětnou klapku. Základním principem je škrcení průtoku tekutiny kuličkou, která přirozeně ucpává zužující se potrubí. Při malých tlakových rázech však kulička nedokáže sama potrubí dostatečně rychle a spolehlivě zaškrtnit, a je proto využito silového působení elektromagnetismu na feromagnetickou kuličku. Tento ventil je uveden na *obrázku 2* a je do této práce zařazen zejména díky speciálnímu způsobu aktuace. [8]



Obrázek 2: Kuličkový ventil [8]

1.2 Současné způsoby aktuace ventilů

Jak již bylo nastíněno, ventily nedokáží měnit svůj stav samy od sebe (s výjimkou zpětné klapky) - potřebují k této činnosti aktuátor. Způsoby aktuace jednotlivých druhů ventilů jsou velmi úzce spjaty s aplikací, ke které jsou využity. V současné době jsou ventily nejčastěji ovládány:

- manuální silou,
- pneumatickými aktuátory,
- hydraulickými aktuátory,
- elektromechanickými aktuátory
- a elektromagnetickými aktuátory.

1.2.1 Manuální síla

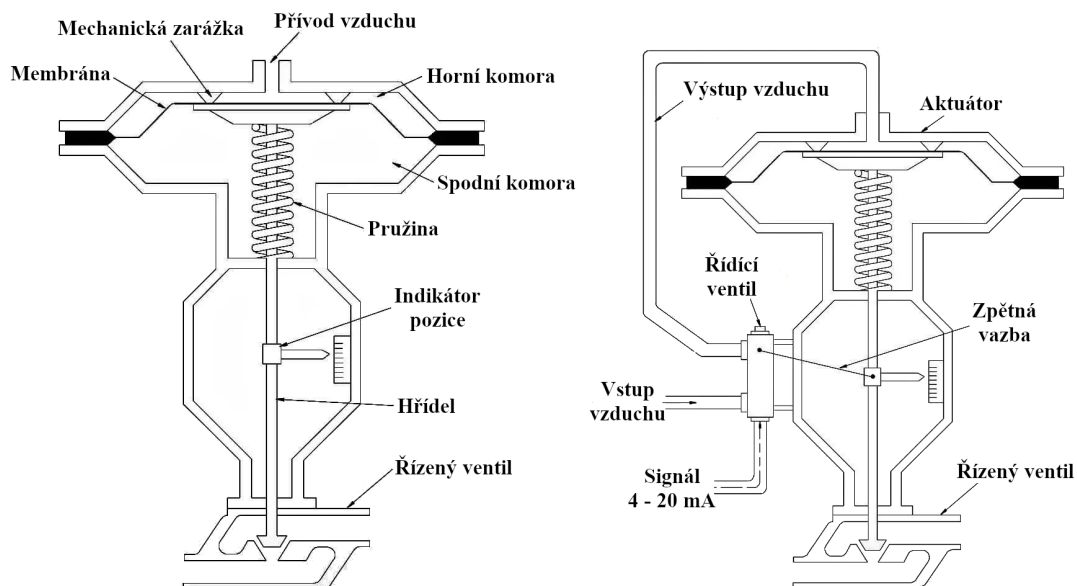
Nejjednodušším a nejlevnějším způsobem ovládní ventilu je manuální síla, která využívá fyzické síly člověka. K tomu musí být rovněž uzpůsobeno zakončení ovládací hřídele připevněné na druhé straně k řídicímu prvku. Dobrým zástupcem této skupiny jsou kulové ventily pro regulaci průtoku vody na zalévání, které jsou v hojném počtu využívány na zahradách, případně ventily pro hlavní přívody vody v domácnostech.

V případě kulových a motýlkových ventilů je to ve většině případů páka, která velmi přehledně indikuje stav ventilu - v případě otevřeného ventilu je páka paralelně s potrubím a v případě uzavřeného kolmo na potrubí. U ventilů sedlových a šoupátkových je pak hřídel nejčastěji zakončena plně otočnou kruhovou kličkou. V tomto případě je indikace poněkud složitější - plně otočná kruhová klička je zde využita protože je nutné otočit hřídel několikrát okolo její osy k zašroubování řídicího prvku na požadovanou pozici.

1.2.2 Pneumatické aktuátory

Pneumatické aktuátory jsou aktuátory ovládané vzduchem - spíše řečeno tlakem vzduchu. Tento tlak vzduchu je velice často generován za užití elektrických prvků (ventilátory, kompresory, ...), proto se o pneumatických aktuátorech v některých publikacích hovoří jako o elektropneumatických aktuátorech.

Příklad takového aktuátoru je uveden na *obrázku 3*. Zde je uvedeno řešení membránového pneumatického aktuátoru spolu se základním schématem řízení. Tento typ využívá sílu vytvářenou tlakem vzduchu a sílu pružiny působící v opačném směru. Poloha ventilu je řízena množstvím vzduchu vpouštěným do horní komory aktuátoru. Ta se po naplnění určitým objemem vzduchu začne rozpínat přes membránu, která je pevně spojena s hřídelí. Postupný pohyb membrány do



Obrázek 3: Typický příklad a popis pneumatického aktuátoru [9]

spodní komory v tomto případě způsobí uzavření ventilu. Po odpuštění vzduchu zapůsobí síla pružiny a posune membránu zpět více do horní komory - to způsobí opětovně otevření ventilu. [9]

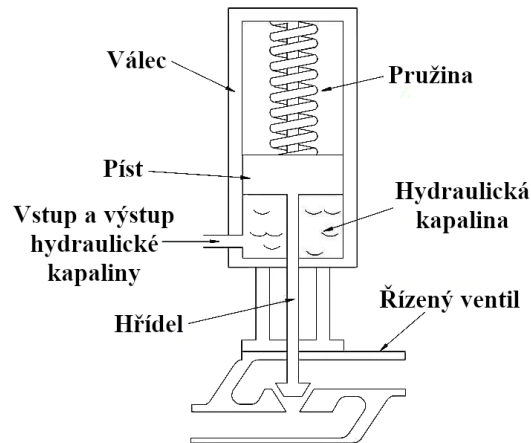
Podle aplikace se pak rozeznávají dva druhy takovýchto aktuátorů. První je v klidovém režimu otevřený - NO (normally opened) a druhý zavřený - NC (normally closed). V tomto příkladě je zřejmé, že se jedná o NO řešení a je tedy nutné k uzavření ventilu překonávat sílu pružiny. [9]

Výhody pneumatických aktuátorů jsou:

- jednoduchý princip,
- nezávadnost životnímu prostředí v případě poruchy, nehořlavost a minimální elektromagnetické rušení (pouze od elektrických částí),
- použitelnost v oblastech s velmi nízkou teplotou
- a nízká hmotnost a poměr cena/výkon. [9]

Nevýhody jsou pak:

- velké tlakové ztráty ve vedení vzduchu,
- neefektivní stlačitelnost vzduchu,
- nutnost vývoje aktuátoru pro téměř každou aplikaci - neuniverzálnost
- a vysoké riziko znečištění vzduchového potrubí například lubrikantem - nutné časté údržby. [9]



Obrázek 4: Typický příklad a popis hydraulického aktuátoru [10]

1.2.3 Hydraulické aktuátory

Hydraulické aktuátory jsou ovládané hydraulickou kapalinou podobným způsobem jako pneumatické aktuátory vzduchem. Hydraulickou kapalinou je v naprosté většině případů minerální olej, ale může jí být například i voda. Stejně tak jako u pneumatických aktuátorů je k pohybu kapaliny využíváno elektrických prvků, a je tak možné narazit rovněž na označení elektrohydraulické aktuátory.

Jak již bylo řečeno, pneumatické a hydraulické aktuátory jsou svým principem velice podobné, jen ke svému chodu užívají rozdílnou tekutinu. Příklad pístového hydraulického aktuátoru je uveden na *obrázku 4*. Toto řešení kombinuje sílu vytvářenou tlakem hydraulické kapaliny a sílu pružiny působící v opačném směru. Poloha ventilu je pak řízena množstvím hydraulické kapaliny vpuštěné do spodní komory - tedy pod píst, který zvětšování svého objemu nadzvedává. Píst je pevně spojen s hřídelí a dojde tedy v tomto případě k otevření ventilu. Pro zavření je třeba opačného procesu - vypuštění hydraulické kapaliny, kdy působící síla pružiny ventil uzavře. Dle obrázku popisovaný aktuátor je v klidovém režimu uzavřený, jde v tom případě o NC provedení. [10]

Rozdíl mezi pneumatickými a hydraulickými aktuátory je především ve způsobu aplikace. Pneumatické jsou obecně rychlejší a přesnější. Uplatnění najdou u ventilů, které jsou nenáročné z hlediska síly potřebné k změně stavu. V náročnějších aplikacích z hlediska síly zastupují pneumatické aktuátory hydraulické, které jsou schopny vyvinout větší tlak a tím větší sílu. [10]

Výhodou hydraulických aktuátorů je:

- velká generovaná síla - až 25x vyšší než u pneumatických aktuátorů,
- nestlačitelnost hydraulické kapaliny - není třeba doplňovat kapalinu
- a minimální ztráty v potrubí - čerpadla mohou být dále od aplikace. [10]

Nevýhodou je pak:

- potenciální únik hydraulické kapaliny do prostředí,
- problémy s čistotou kapaliny a tím vysoká náročnost údržby
- a potřeba mnoha součástí (teplotní výměníky, čerpadla, součásti snižující hluk, atd.) a z toho pramenící vyšší cena spojená i s častou údržbou. [10]

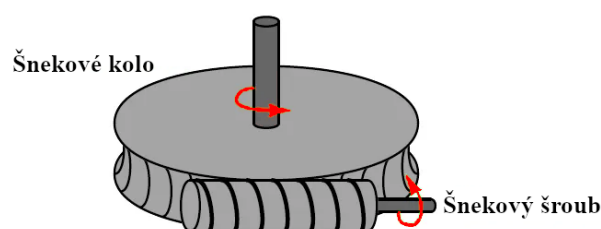
1.2.4 Elektromechanické aktuátory

Elektromechanické aktuátory jsou v podstatě elektrické motory, které jsou přes převodovku připojeny k hřídeli ventilu. Název elektromechanické aktuátory proto, že tyto aktuátory převádějí elektrickou energii na mechanický točivý moment. Pro takto ovládané ventily se vžila zkratka MOV - z anglického *Motor Operated Valve*. Nejčastěji se k převodu vysoké rychlosti otáček motoru na nižší používá šnekového převodu. Ten je uveden na *obrázku 5*. V případě šoupátkových, sedlových a jim podobných typů ventilů je dalším prvkem šnekového převodu závitová hřídel (další šroub), aby bylo možné docílit lineárního pohybu. V menších aplikacích se používá krokových motorů přímo připojených na hřídel. [11]

Příklad takového aktuátoru je uveden na *obrázku 6*, kde je ovládána poloha kulového ventilu. Řídící elektronika k tomuto aktuátoru byla vyvinuta na Katedře elektrotechniky a počítačového modelování působící na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni [12]. Byl navržen pro firmu PEVEKO a je již úspěšně na trhu. Vyznačuje se zejména propracovanou elektronikou, díky níž je možné ho ovládat pomocí mobilní aplikace, popřípadě je možné ho propojit se zabezpečovacím systémem.

Výhodou elektromechanických aktuátorů je:

- kompaktnost,
- robustnost,
- nepřítomnost tlakového potrubí pro ovládání aktuátoru
- a možnost vysokého zatížení. [14]



Obrázek 5: Šnekový převod [11]



Obrázek 6: Elektromechanický aktuátor ve spojení s kulovým ventilem od firmy PEVEKO [13]

Nevýhodou je pak:

- relativně vysoká cena,
- nemožnost automatického uzavření/otevření v případě poruchy,
- pomalá rychlost
- a nutnost údržby po určitém počtu pracovních cyklů. [14]

1.2.5 Elektromagnetické aktuátory

Elektromagnetické aktuátory jsou ve zkratce takové aktuátory, jejichž řídicí prvky (hřídel nebo hlavní řídicí prvek) jsou přímo ovládány elektromagnetickým polem. Díky přímému působení elektromagnetické síly jsou vynechány veškeré mechanické součásti a aktuátor je tak kompaktnější.

Hlavní výhody elektromagnetických aktuátorů mohou být:

- vysoká rychlost řízení,
- jednoduchost instalace,
- přímé řízení regulačních prvků
- a kratší interval údržby. [15]

Jako všechny předešlé typy aktuátorů však mají i své nevýhody:

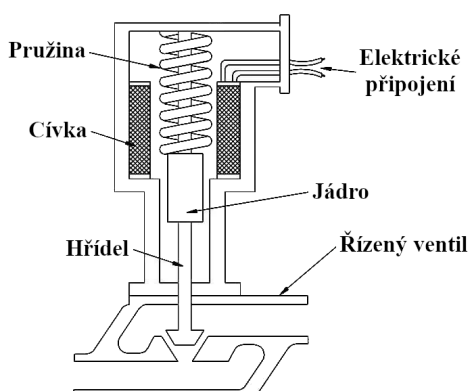
- složitější princip určení polohy ventilu,
- nižší možná zatížitelnost,

- větší rozměry kvůli nutnosti velkých cívek
- a pravděpodobně vyšší elektromagnetické rušení než u ostatních typů. [15]

1.2.5.1 Solenoidový aktuátor

Nejznámějším zástupcem elektromagnetických aktuátorů je solenoidový aktuátor. Pro jím ovládané ventily se rovněž vžil název solenoidový ventil. Jedná se o ventily sedlové, popřípadě šoupátkové, jenž vyžadují k řízení polohy lineární pohyb hřídele, který právě solenoidový aktuátor nabízí.

Jeho princip je nastíněn na *obrázku 7*. V klidové poloze se sedlový ventil nachází v uzavřeném stavu - jedná se tedy o NC provedení. Otevřeného stavu lze docílit sepnutím cívek. Po jejich sepnutí se značně vytvářet magnetické pole působící na magnetické jádro. Síla vytvořená tímto polem musí být vyšší než síla tvořená pružinou, která působí v opačném směru. Výsledek tohoto silového působení je vtažení jádra do prostoru cívek. Protože je jádro součástí hřídele, dochází v tomto okamžiku k otevření ventilu. K jeho uzavření stačí pouze vypnout přívod elektrického proudu. V tomto momentu dojde k uvolnění jádra, na které již silově nepůsobí magnetické pole cívek a převládá tak silové působení pružiny, které má za následek opětovné uzavření ventilu. [15]



Obrázek 7: Typický příklad a popis solenoidového aktuátoru [15]

1.2.5.2 Aktuátor kuličkového ventilu

Elektromagnetickým aktuátorem je rovněž aktuátor již zmíněného kuličkového ventilu uvedeného na *obrázku 2*. Je jím prostá cívka, která v případě detekce zpětného toku média dopomůže k uzavření ventilu a zvýší tak rychlost uzavření. Kulička ventilu je z feromagnetického materiálu a po sepnutí cívky se snaží vtáhnout do jejího středu, ve kterém se nachází zúžené potrubí, jenž kulička ucpe. V případě otočení toku média do příznivého směru cívka vypne a kulička se sama silovým působením média posune zpět do původního místa - nastává tedy otevřený stav kuličkového ventilu. [8]

1.2.5.3 Elektromagnetický aktuátor pro kulový ventil

Hlavní náplní této diplomové práce je však elektromagnetický aktuátor pro kulový ventil. Podle dostupných databází článků, či dokonce vyhledávání v běžných webových prohlížečích, takový aktuátor dosud nebyl vyvinut a možný princip byl dosud popsán pouze v mé bakalářské práci *Plně elektromagnetický kulový ventil* [1], na kterou tato diplomová práce volně navazuje a také v mém článku *Non-contact Electromagnetic Actuator for a Ball Valve* [7] vytvořeném při příležitosti mezinárodní konference Computational Problems of Electrical Engineering 2021 (CPEE), kde byl prezentován princip a koncepce aktuátoru.

Jak již dříve bylo zmíněno, kulový ventil se skládá obecně z těla ventilu, koule (regulační prvek) a hřídele, na kterou je připojený aktuátor. V případě použití plně elektromagnetického aktuátoru by tělo ventilu plnilo stále stejnou funkci, jen by bylo dále konstrukčně upraveno kvůli umístění aktuátoru. Hřídel a na ni připojený aktuátor v tomto případě v podstatě pozbývá funkce a lze ji využít v podstatě jen k fixaci osy rotace. Dále bude princip a konstrukční provedení vysvětlen v dalších kapitolách této práce.

2 Výchozí situace

Cílem bakalářské práce *Plně elektromagnetický kulový ventil* [1] bylo zejména ověřit možnost řízení pohybu koule (její otáčení) pomocí elektromagnetického pole. K tomu byl vytvořen příslušný matematický model a několik prototypů ověřujících zmíněnou hypotézu. Toto ověření proběhlo úspěšně, a bylo tak možné v návaznosti na výsledky rozvíjet plnohodnotný aktuátor pro kulový ventil.

2.1 Motivace

Jak vyplývá z předchozí kapitoly, všechny typy aktuátorů používaných pro řízení ventilů mají své výhody a nevýhody. Posuzování použití určitého druhu pak tedy závisí čistě na aplikaci - konkrétně zda nevýhody určitých typů jsou v konkrétním systému přípustné. Cílem všech návrhářů je v celku jasný, a to odstranit tyto nevýhody a vyrobit dokonalý produkt, popřípadě se alespoň k dokonalosti přiblížit. V tomto případě je produktem aktuátor pro kulový ventil.

Pokud se vezmou v potaz nevýhody pneumatických, hydraulických a elektromechanických aktuátorů, lze vidět jednoho společného zástupce - nutnost relativně časté údržby, případně i výměny jednotlivých součástí. Interval údržby je samozřejmě jiný u různých typů. Patrně nejlépe v této kategorii vycházejí aktuátory elektromechanické. Ty jsou však oproti dvěma předešle zmíněným značně pomalejší. Právě odstranění těchto nevýhod bylo hlavní motivací pro vyvinutí plně bezkontaktního aktuátoru kulového ventilu, který k řízení využívá pouze silové působení elektromagnetického pole vytvořeného elektromagnety na regulační prvek - kouli.

Díky potenciální absenci mechanických částí počínaje hřídelí a části těsnění, se snižuje počet součástí, které by se mohly potenciálně porouchat a vyřadit tak ventil z provozu. Aktuátor by měl být velice kompaktní ve srovnání s pneumatickými či hydraulickými aktuátory, kde navíc nehrozí únik škodlivých kapalin (minerálních olejů) do prostředí. Oproti elektromechanickým aktuátorům by měla zásadně vzrůst rychlost řízení díky přímému působení pole na kouli bez mechanické převodovky. Je však třeba počítat i s nevýhodami, které plynou z podstaty elektromagnetických aktuátorů. Tato práce již počítá s faktem, že pohybu koule lze docílit působením magnetického pole na magnetickou nerezovou kouli kulového ventilu. Následující podkapitoly stručně popíší výchozí situaci na základě zmíněné bakalářské práce.

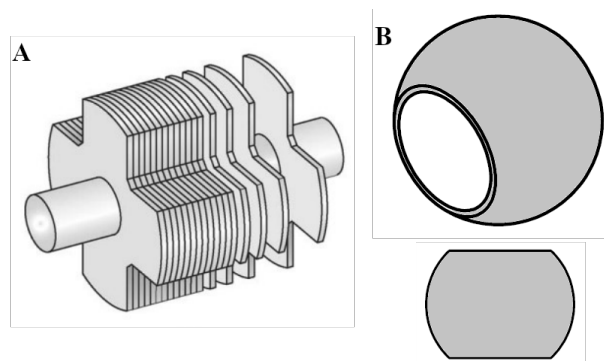
2.2 Princip pohybu koule

Princip samotný by se dal obecně přirovnat k principu, na kterém fungují reluktanční motory. Pro lepší představu lze feromagnetickou kouli označit jako rotor motoru a prvky vytvářející

elektromagnetické pole pohybující s koulí jako stator. Funkce se pak opírá o princip minimální energie, kdy po přivedení magnetického pole dochází k natočení koule do pozice, ve které má vzhledem k tomuto poli nejnižší reluktanci - tedy nejnižší magnetický odpor. Pohyb koule je úspěšný v případě, kdy je dodán dostatek energie potřebný k překonání působících sil na kouli, ať už jde o gravitační sílu, či tření.

Princip je tedy v základu velice jednoduchý. Koule je vyrobená z magnetické nerezové oceli Ergste 1.4016IM AISI 430, což je oproti běžné nerezové oceli feromagnetický materiál (s menší hodnotou permeability než je tomu u čistého železa) a přiložením vnějšího magnetického pole se začnou v materiálu natáčet magnetické domény. První cíl je tedy splněn - koule je svým způsobem magnetická a je možné na ni silově působit vnějším magnetickým polem.

K dosažení točivého pohybu je pak potřeba dalších dvou parametrů. Prvním z nich je, že koule musí být po svém obvodu určitým způsobem vyniklá zrovna tak, jako rotory reluktančních motorů. To je naštěstí u kulových ventilů, konkrétně u koulí pro kulové ventily, splněno díky otvoru vedoucímu středem koule, který udává výsledný tvar - porovnání s rotory reluktančních motorů je uvedeno na *obrázku 8*. Druhým parametrem je pak nutnost fixace osy rotace. Ta je prozatím řešena hřídelí, která, jak bylo uvedeno v *kapitole 1*, slouží u současných provedení ventilů k připojení aktuálního prvku. V budoucnu by se mohlo stát výhodou odstranění hřídele a docílení tak plně uzavřeného tělesa. V tomto případě by fixace mohla být řešena například odlišným tvarem koule či permanentními magnety, které by kouli přidržovaly.

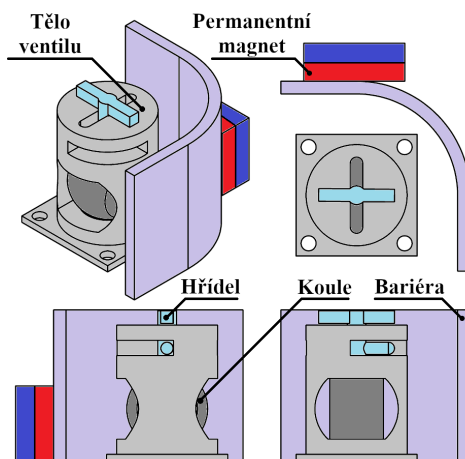


Obrázek 8: Porovnání 4 pólového rotoru reluktančního motoru A s feromagnetickou koulí B (lze považovat za dvoupólový rotor)

2.3 První kroky

Zprvu byl proveden test s permanentním magnetem pro zjištění účinků pole na magnetickou nerezovou kouli a k základní představě o hodnotách magnetické indukce na povrchu koule, která je potřebná k jejímu otočení. K tomu bylo vytvořeno zkušební těleso ventilu společně s fixátorem osy rotace - hřídelí. K ověření otáčení pak byly vyrobeny obloukové zábrany, po kterých se pohyboval permanentní magnet. Nákres sestavy je uvedený na *obrázku 9*.

Při testu bylo za pomoci jednodimenzionální sondy s Hallovým senzorem teslametru Elimag MP-1 zjištěno, že otáčení koule je dosaženo při hodnotě magnetické indukce na povrchu koule přibližně



Obrázek 9: Test s permanentním magnetem [7]

100 mT - řízení polohy koule magnetickým polem je tedy možné. Je však třeba brát na vědomí, že otáčení bylo docíleno v nereálném testovacím tělese, kde chybí těsnění, jenž v normálním stavu doléhá na kouli a klade otáčení odpor. Je tedy zřejmé, že podmínky jsou dosti idealizované a je více než pravděpodobné, že magnetická indukce nutná k otočení by byla u reálných provedení ventilů vyšší. [1]

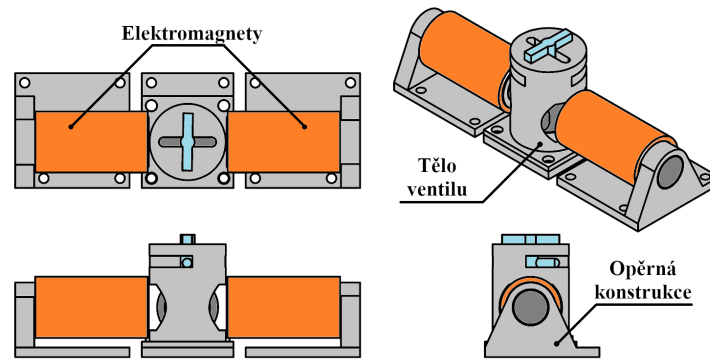
Permanentní magnet však vytváří magnetické pole neustále - není tedy možné pole vypnout. Z tohoto důvodu bylo třeba převést tento konstantní zdroj magnetického pole na regulovatelný, tedy cívku. V prvotních testech posloužila cívka vzduchová, kde jedinou podmínkou bylo, aby byla schopna vytvořit magnetické pole o síle nutné k rozpořívování koule (docílení magnetické indukce 100 mT na povrchu koule). [1]

Byla proto vyrobena vzduchová cívka o přibližně 30 závitěch. K přiblížení se k požadované hodnotě magnetické indukce a tím spojeného pootočení koule bylo nutné napájení značným proudem a přiblížení cívky do minimální vzdálenosti ke kouli. I přes toto úsilí však nebyla zkouška úspěšná a k pohybu koule nedošlo. Při napájení vyšším proudem (přibližně 20 A) však byla cítit jistá síla působící na kouli, která však z důvodu tření nevedla k pootočení. [1]

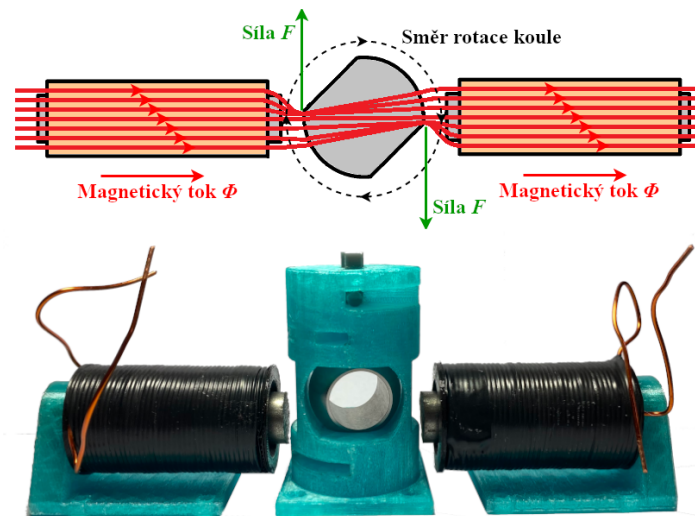
2.4 Ověření myšlenky

Na základě předešlého výsledku vzniklo mnoho koncepcí z nichž pouze jedna se dočkala realizace. Jedná se o koncepci tvořenou dvěma sériově spojenými elektromagnety (cívka, železné jádro) umístěnými vně testovacího tělesa ventilu. Tyto elektromagnety jsou souose uloženy z obou stran tělesa. Jsou takto umístěny z důvodu zesílení celkového magnetického toku protékajícího kouli, a tím zvýšení působící síly. Sestava je vidět na *obrázku 10*.

Z důvodu návrhu potřebných parametrů elektromagnetů a ověření správnosti koncepce byl vytvořen matematický model. V modelu byly zanedbávány plastové konstrukční části, které zpravidla neovlivňují elektromagnetické pole. Tímto byl ušetřen zejména výpočetní čas. Model bude později uveden v *kapitole 4*, jelikož byl rovněž využit pro hledání závislostí velikosti točivého mo-



Obrázek 10: Realizovaná koncepce k ověření myšlenky [7]



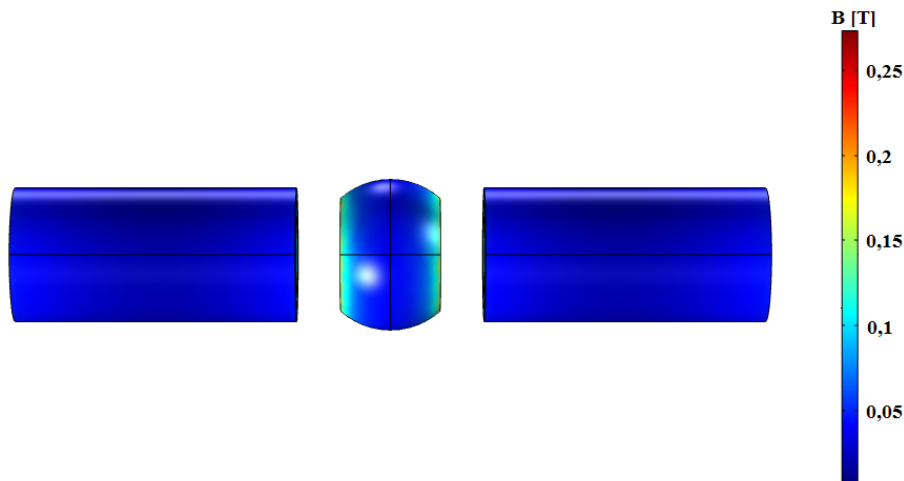
Obrázek 11: Princip funkce prototypu společně s konečnou realizací [7]

mentu na parametrech elektromagnetů využitých pro návrh pokročilejších prototypů aktuátoru. Na rozdíl od předchozího testovacího prototypu (vzduchová cívka) byly navrženy elektromagnety s železným jádrem, což díky snížení magnetického odporu vedlo k navýšení celkového magnetického toku Φ (Wb) protékajícího kouli a celým magnetickým obvodem, což podle vzorce (1) vede rovněž ke zvýšení působící magnetické indukce B (T) při zachování stejné plochy koule S (m²).

$$\Phi = \int_S B dS \quad (1)$$

Z vytvořeného matematického modelu byl stanoven počet závitů na hodnotu 60 závitů. Výsledek byl však poněkud nadhodnocen z důvodu zajištění funkčnosti. Na základě zjištěných skutečností byly vytvořeny elektromagnety s železným jádrem o stanoveném počtu závitů cívky a byly umístěny podle zmíněné koncepce po obou stranách tělesa ventilu. Takovýmto uspořádáním je však možné pootočit kouli pouze do jedné pozice, což je ale pro ověření myšlenky zcela dostačující. Na obrázku 11 se nachází náčrt principu funkce prototypu společně s fotografií testovacího prototypu. [7]

Aby byl magnetický tok přes kouli co nejvyšší, je elektromagnety tvořený magnetický tok ve stej-



Obrázek 12: Počáteční poloha koule vůči páru elektromagnetů [1]

ném směru. Z *obrázku 11* je rovněž patrné, že jsou oba elektromagnety umístěny v relativně malé vzdálenosti od koule (v onu chvíli nebyla měřena přesná vzdálenost) a lze tak docílit vzduchové mezery mezi těmito prvky přibližně 1 až 2 mm. V pozdějších úvahách o konstrukci aktuátoru hraje velikost vzduchové mezery hlavní roli, jelikož právě vzdálenost koule od elektromagnetu nejvíce ovlivňuje silové účinky a celkové rozměry aktuátoru.

Ověření myšlenky bylo následně završeno úspěšným testováním prototypu, kde byl vyhodnocován pohyb koule a měřena magnetická indukce na povrchu koule v závislosti na velikosti napájení proměnným proudem. Z pohybové studie vyplynulo, že není možné docílit otočení koule o 90° při silovém působení pouze jednoho páru elektromagnetů. Vysvětlení nabízí *obrázek 12*, kde je znázorněna počáteční pozice koule vůči elektromagnetu. Jak je vidět, v této pozici je magnetická indukce rovnoměrně rozložena po obvodu koule a dalo by se zjednodušeně říci, že je koule přitahována na obě strany stejnou silou, a tak ve výsledku zůstává na stále stejné pozici. K otočení bylo tedy nutné ji z této pozice pootočit přibližně o 5° .

Druhým bodem bylo tedy zjišťování velikosti magnetické indukce na povrchu koule při napájení různými hodnotami elektrického proudu I (A). Se změnou elektrické indukce přichází rovněž změna síly působící na nerezovou kouli a je tedy zřejmé, že při vyšších proudech bude i působící síla vyšší. V *tabulce 1* jsou uvedeny naměřené hodnoty zmíněné závislosti magnetické indukce B (mT) a elektrického proudu I (A).

I (A)	7,5	10	15	20
B (mT)	80	105	160	190

Tabulka 1: Tabulka naměřených hodnot magnetické indukce v závislosti na napájecím proudu [1]

Těmito testy byla bakalářská práce zakončena, myšlenka úspěšně ověřena a bylo zřejmé, že je možné vytvořit řízený zdroj magnetického pole, kterým lze docílit polohování kulového ventilu. Jedním párem elektromagnetů lze docílit pouze jedné polohy ventilu. Je tedy zřejmé, že k docílení plné funkce (otáčení do poloh otevřeno/zavřeno) je nutné přidat další elektromagnety po obvodu těla ventilu.

3 Návrh koncepce

Při návrhu koncepce aktuátoru se vycházelo z předešle zmíněných výsledků bakalářské práce. Návrh koncepce by rovněž nebyl možný bez úzké spolupráce s výsledky matematických modelů podrobněji představených v samostatné kapitole 4.

Mohlo by se zdát, že k docílení funkce ventilu, tedy otáčení koule o 90° by plně postačily 2 páry elektromagnetů v polohách otevřeno a zavřeno. To však bohužel není možné jelikož, jak bylo uvedeno dříve, není možné za pomoci jednoho páru elektromagnetů otočit kouli o plných 90° - je k tomu třeba určité pootočení o minimálně 5° . Z tohoto důvodu jsou dva páry elektromagnetů zcela nedostačující a je třeba uvažovat alespoň jeden další.

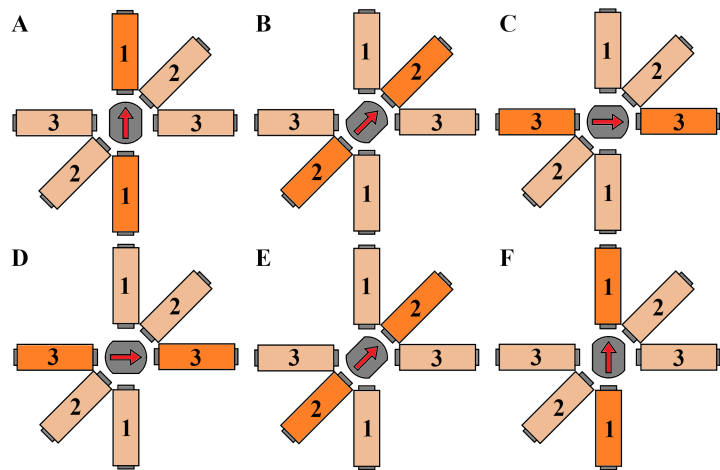
Umístění dalších dvou párů elektromagnetů netvoří žádnou obtíž z hlediska prostorové náročnosti. Co naopak tvoří jistou překážku je umístění kanálu k průchodu média. Je třeba mít stále v paměti fakt, že vyvíjený aktuátor má sloužit k řízení kulového ventilu a v případě obestavení těla ventilu elektromagnety by nebyl k dispozici žádný prostor k přívodu regulované tekutiny. Z principu funkce a rovněž z obrázků 13 a 14 je zřejmá další potíž, a to sice taková, že je koule ventilu v poloze zavřeno (zakrytý celý otvor v kouli vůči kanálu) držena či přitahována elektromagnety nacházejícími se na pozici, kde by se v běžném provedení nacházel právě kanál s tekutinou.

Z výše uvedeného bylo docíleno závěru, že téměř jediným možným řešením vedení kanálu je ho umístit uvnitř jednoho páru elektromagnetů. To lze docílit odebráním železného jádra a vytvořením vzduchové cívky, do které by pak bylo možné umístit kanál z různých materiálů (mosaz, plast, atd.). Ačkoliv je toto řešení konstrukčně velmi jednoduché, není však příliš účinné z důvodu odebrání železného jádra a tím značného ponížení celkového magnetického toku generovaného elektromagnety. Pro vytvoření kanálu a udržení velikosti magnetického toku tak zbývá jediná varianta, a to uzpůsobení feromagnetického jádra k průchodu tekutin. Nejjednodušším možným řešením je místo plného jádra využít **trubku z feromagnetického materiálu**, která vyhovuje z hlediska udržení magnetického toku a zároveň poslouží jako kanál průchozím tekutinám.

V prvotních snahách při ověřování koncepce však byl tento problém zanedbán a bylo pouze testováno polohování koule pomocí více párů klasických elektromagnetů s plným jádrem. Toto polohování pak bylo rozděleno podle možnosti rotace koule na funkci ventilu a funkci motoru. Jedná se pouze o pomyslné pracovní rozdělení, podle kterého bylo následně zařizováno spínání proudů do jednotlivých elektromagnetů.

3.1 Funkce ventilu - otáčení o 90 stupňů

Funkce ventilu je základní funkce, kterou musí elektromagnetický aktuátor splňovat. Jedná se o polohování ventilu do poloh otevřeno a zavřeno. Tuto funkci vystihuje obrázek 13. K pohybu



Obrázek 13: Polohování ventilu do poloh otevřeno/zavřeno (otáčení o 90°)

koule v tomto případě postačují 3 páry elektromagnetů, které jsou rovnoměrně rozloženy v obloku, což znamená, že jsou vzájemně pootočený o úhel 45° . Rovnoměrné rozložení je výhodné nejen z hlediska funkce, ale zároveň z hlediska prostorové náročnosti. Červená šipka uvnitř koule slouží pouze pro indikaci polohy koule při vybuzení daného páru cívek.

Podle aktuálního požadavku na pohyb koule jsou postupně spínány jednotlivé páry elektromagnetů. Pro jednodušší představu funkce si lze představit kanál s tekutinou procházející párem elektromagnetů označeným číslovkou **1**. V poloze **A** se tedy ventil nachází v uzavřeném stavu a je sepnutý pár elektromagnetů (dále jen pár) číslo **1**. V závislosti na vlastnostech a především tlaku tekutiny by bylo teoreticky rovněž možné držet ventil v této poloze bez sepnutých elektromagnetů pouze třením.

Pro přesun do polohy otevřeno je potřeba dodržet následující posloupnost:

1. v případě sepnutého páru **1** v počáteční poloze tento pár odepnout od napájení,
2. v minimální odezvě po předchozím kroku sepnout pár **2**,
3. po dotočení koule do polohy ventilu **B** odepnout pár **2**,
4. opět v minimální odezvě sepnout pár **3**
5. po dotočení koule do polohy **C** pak lze podle charakteru tekutiny odepnout napájecí proud páru **3**, popřípadě snížit či udržovat jeho hodnotu v závislosti na potřebné síle k udržení pozice.

V případě posunu do polohy zavřeno je posloupnost přesně opačná, tedy:

1. v případě sepnutého páru **3** v počáteční poloze **D** tento pár odepnout od napájení,
2. v minimální odezvě po předchozím kroku sepnout pár **2**,
3. po dotočení koule do polohy ventilu **E** odepnout pár **2**,

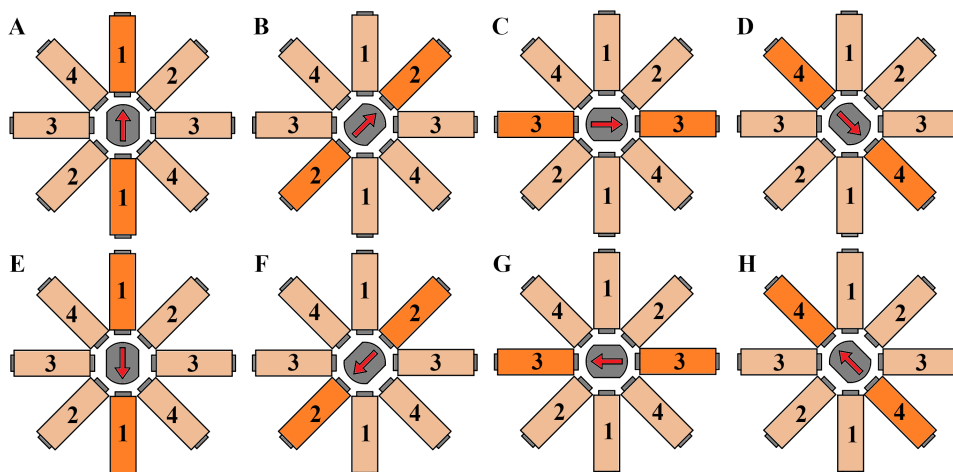
4. opět v minimální odezvě sepnout pár **3**
5. po dotočení koule do polohy **F** pak lze podle charakteru tekutiny odepnout napájecí proud páru **1**, popřípadě snížit či udržovat jeho hodnotu v závislosti na potřebné síle k udržení pozice.

Podle zmíněného popisu by měla tato koncepce splňovat základní požadavky pro funkci ventilu. Rychlost otáčení pak záleží na mnoha parametrech ať už z hlediska návrhu elektromagnetů tak také z hlediska konstrukčního provedení těla ventilu a s tím spojeným třením, které koule při svém pohybu musí překonávat.

3.2 Funkce motoru - otáčení o plných 360 stupňů

Předchozí funkce je tedy z hlediska podstaty polohování ventilu zcela dostačující. Přidáním dalšího páru elektromagnetů se však otevírá další funkce aktuátoru, která může přinášet i jisté výhody z hlediska řízení a uplatnění při specifických aplikacích. Tou funkcí je možnost otáčení koulí ventilu o plných 360°. Z hlediska jednoduchosti názvosloví je tato funkce pojmenována jako funkce motoru z vyplývající se podobnosti principu s klasickými krokovými motory. Rozložení elektromagnetů je v tomto případě rovnoměrné po 45° na celém obvodu 360°.

Princip funkce je naznačen na *obrázku 14*. Je v základu velmi podobný ve srovnání s předchozí funkcí. Hlavní výhodou však je, že se koule pohybuje stále ve stejném směru a je možné udržovat stále stejnou rovnoměrnou rychlost bez nutnosti zastavení v jakékoliv z poloh. To může být výhodou u velmi specifických aplikací, kde je například regulovaná tekutina dávkována ve stále stejném množství.



Obrázek 14: Naznačení motorové funkce otáčení ventilu

Opět lze pro zjednodušení uvažovat kanál v elektromagnetech na pozici **1**. Celý princip polohování ventilu aktuátorem je pak:

1. v případě sepnutého páru **1** v počáteční poloze **A** tento pár odepnout od napájení,

2. v minimální odezvě po předchozím kroku sepnout pár **2**,
3. po dotočení koule do polohy ventilu **B** odepnout pár **2**,
4. v minimální odezvě sepnout pár **3**
5. po dotočení koule do polohy **C** se ventil nachází v poloze otevřeno a pro plynulé otáčení je nutné odepnout napájení páru **3**,
6. v minimální odezvě sepnout pár **4** (tedy nově přidaný pár elektromagnetů),
7. po dotočení do polohy **D** odepnout pár **4**,
8. v minimální odezvě sepnout pár **1**,
9. po dotočení koule do polohy **E** se ventil nachází opět v uzavřeném stavu a v případě plynulého otáčení je nutné odepnout pár **1** - následně lze opakovat posloupnost od bodu 2.

Výše zmíněná posloupnost platí pouze pro otočení o 180° . Nicméně, jak již bylo naznačeno, v případě plynulého otáčení o 360° stačí celou posloupnost pouze zopakovat.

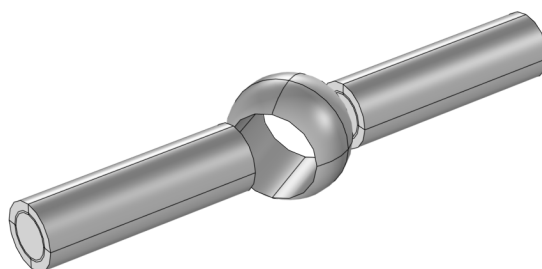
Výhodou druhé zmíněné koncepce, tedy pro motorovou funkci aktuátoru, je rovněž to, že ji lze provozovat i v první zmíněné funkci, tedy funkci ventilu, při nezapojení páru **4**. Tato navržená koncepce tak byla dále rozvíjena pomocí matematického modelu, kde byla samotná funkce ověřována díky známosti přibližných hodnot magnetické indukce nutných pro otáčení koule. Dále byly navrhovány potřebné minimální parametry cívek a zjišťována závislost jednotlivých parametrů na celkové působící síle.

4 Matematický model

Tato kapitola se věnuje tvorbě a využití matematických modelů pro potřeby návrhu, ověření parametrů a vizualizace prototypů aktuátorů. Matematické modely byly vytvořeny v softwaru COMSOL Multiphysics. V souvislosti s matematickým modelováním je třeba hovořit o modelech v množném čísle, jelikož počet vzniklých matematických modelů je za dobu vývoje aktuátoru velice vysoký. Zde však budou představeny pouze ty nejdůležitější, přímo související s finální podobou prototypu:

- Matematický model potřebný k simulaci prototypu sloužícímu k základnímu ověření funkce sestávající z jednoho páru elektromagnetů a feromagnetické koule představeného v *kapitole 2* - dále pro zjednodušení jako *Základní model*.
- Matematický model sloužící k návrhu a ověření parametrů základního prototypu k ověření koncepce představené v předchozí kapitole - dále pro zjednodušení pouze jako *Koncepční model*.
- Matematický model rozšířený o konstrukční řešení nahrazení plných feromagnetických jader elektromagnetů za trubková jádra pro potřeby návrhu a ověření daného prototypu - dále pro zjednodušení jako *Pokročilý model*.

Jednotlivé modely budou podrobněji rozebrány dále v této kapitole. Jak již bylo zmíněno, modely byly tvořeny v softwaru COMSOL Multiphysics. Jejich výpočet pak probíhal ve většině případů na serverech Fakulty elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni z důvodu vyšší rychlosti výpočtu náročného uspořádání. Ačkoliv byla snaha o maximální zjednodušení modelů, nebylo možné z nich vynechat důležité části. Jsou tak vynechané veškeré plastové konstrukční prvky, které nezasahují do velikosti či směru působení magnetického pole. Příklad podoby základního matematického modelu je na *obrázku 15*, kde jsou znázorněny ponechané aktivní části.



Obrázek 15: Aktivní části ponechané v matematickém modelu - v tomto případě zvýrazněné na základním matematickém modelu

4.1 Výpočet magnetického pole

Vzhledem k podobnosti uspořádání, zadaných parametrů a požadavků lze všechny vytvořené matematické modely popsat stejnými rovnicemi. Jejich hlavním výstupem bylo silové působení jednotlivých uspořádání aktuátoru na feromagnetickou kouli. Konkrétněji by se toto silové působení dalo popsat točivým momentem \mathbf{M} (Nm). Jeho výpočet však není možný bez známosti rozložení magnetického pole v celém objemu matematického modelu. Toto rozložení pak vychází z 1. Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru, takzvaného Ampérova zákona celkového proudu a je reprezentováno rovnicí (2).

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|)} (\operatorname{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}} \quad (2)$$

Kde $\mu(|\mathbf{B}|)$ (H m^{-1}) je permeabilita feromagnetického materiálu jader elektromagnetů a koule v závislosti na velikosti magnetické indukce, \mathbf{A} (Wb m^{-1}) je magnetický vektorový potenciál, pomocí kterého je dále možné dopočítat ostatní potřebné hodnoty magnetického pole, \mathbf{B}_r (T) je remanentní indukce možných permanentních magnetů zasazených do koule (v případě absence magnetů = 0) a \mathbf{J}_{ext} (A m^{-2}) je vnější proudová hustota.

Jak již bylo řečeno, nyní je možné díky znalosti magnetického vektorového potenciálu \mathbf{A} (Wb m^{-1}) zjistit další parametry magnetického pole. Jmenovitě například magnetickou indukci \mathbf{B} (T), jejíž rozložení na povrchu koule je klíčovým indikátorem velikosti působící síly na kouli. Rovnice pro zjištění magnetické indukce pak vypadá následovně

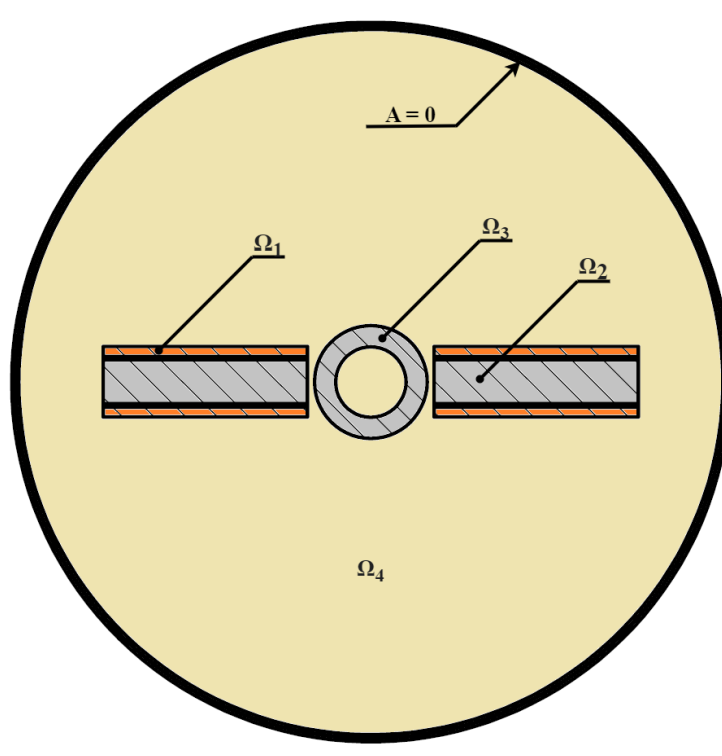
$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}, \quad (3)$$

kde $\nabla (-)$ je operátor nabla, tedy vektor tvořený operátory parciálních derivací.

Díky těmto dvěma rovnicím je tedy možné vypočítat rozložení magnetického pole v celém objemu matematického modelu. Výsledky těchto výpočtů je následně možné aplikovat do rovnic pro výpočet působících sil na feromagnetickou kouli, ze kterých nakonec vychází i výpočet momentu.

4.1.1 Matematický popis jednotlivých částí

Výpočet probíhá v oblastech uvedených na *obrázku 16*, kde jsou uvedeny na příkladu průřezu základního modelu. Model je rozdělen do 4 oblastí řešení. Elektromagnety v principu pokrývají 2 oblasti řešení, a to oblast cívek Ω_1 a oblast feromagnetických jader Ω_2 , dále je to pak oblast feromagnetické koule Ω_3 a nakonec vzduchová obálka Ω_4 . Podle příslušné oblasti je aplikována upravená 1. Maxwellova rovnice reprezentována matematickým zápisem (2). Pro oblast Ω_1 je to rovnice



Obrázek 16: Řez modelem sloužící k popsání jednotlivých částí

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (4)$$

kde jediným nepředstaveným parametrem je permeabilita vakua $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H m}^{-1}$, která je přibližně rovna permeabilitě vzduchu. Kvůli absenci permanentních magnetů v modelech je rovněž zanedbán člen remanentní indukce \mathbf{B}_r .

Oblasti Ω_2 a Ω_3 jsou reprezentovány totožným matematickým zápisem

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|)} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = 0, \quad (5)$$

kde se vnější proudová hustota \mathbf{J}_{ext} rovná nule, jelikož se v těchto oblastech na rozdíl od oblasti cívek nevyskytuje proudová hustota tvořící magnetické pole. V tomto případě je však nutné uvažovat nelineární průběh B-H charakteristiky a tedy závislost permeability μ na velikosti magnetické indukce $\mathbf{B} \rightarrow \mu(|\mathbf{B}|)$.

Poslední oblast Ω_4 , tedy oblast vzduchové obálky je reprezentována rovnicí

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \mathbf{A} \right) = 0, \quad (6)$$

kde je opět jako v případě cívek uvažována permeabilita vakua μ_0 a zároveň se v prostoru nevyskytuje proudová hustota, tedy \mathbf{J}_{ext} je rovna nule. Je nutné podotknout, že velikost vzduchové

obálky je u reálného modelu několikanásobně větší. Na obrázku je zmenšena z důvodu přehlednosti.

Aby byl popis kompletní, je třeba doplnit okrajové podmínky. V tomto případě je okrajová podmínka pouze 1, a to konkrétně rovnost magnetického vektorového potenciálu nule na okraji úlohy $\mathbf{A} = 0$.

4.2 Výpočet silového působení

Síla a moment síly působící na kouli jsou spolu úzce spjatý. Podle rovnice (7) lze tvrdit, že moment je ve své podstatě síla působící na rameni, v tomto případě lze ramenem uvažovat poloměr jakéhokoliv hmotného bodu v objemu koule vůči středu (ose) rotace.

$$\mathbf{M} = \mathbf{F} \times \mathbf{R} \quad (7)$$

Kde \mathbf{F} (N) je celková síla, kterou svým působením tvoří magnetické pole od elektromagnetů a \mathbf{R} (m) je vzdálenost ramena ke středu rotace.

Neznámou je v tomto případě celková magnetická síla, kterou lze zjistit vztahem (8). Celková síla působící na kouli je součtem všech elementárních sil působících na celém jejím povrchu Ω .

$$\mathbf{F} = \int_{\Omega} \mathbf{n} \cdot \mathbf{T} dS \quad (8)$$

V této rovnici \mathbf{n} (-) vyjadřuje normálový vektor a veličina \mathbf{T} (A T m^{-1}) Maxwellův tenzor.

Maxwellův tenzor je definován jako tok hybnosti elektromagnetického pole zvolenou plochou, v tomto případě plochou koule značenou Ω . Za normálních okolností je Maxwellův tenzor tvořen veličinami jak magnetického, tak elektrického pole, konkrétně tedy intenzitou magnetického pole \mathbf{H} (A m^{-1}), magnetickou indukcí \mathbf{B} (T), intenzitou elektrického pole \mathbf{E} (V m^{-1}) a dielektrickou indukcí \mathbf{D} (C m^{-2}). Pro řešení uvedených modelů je však možné uvažovat pouze veličiny magnetického pole a výpočet Maxwellova tenzoru se tak zjednoduší na rovnici (9)

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} \mathbf{I} - \mathbf{H} \otimes \mathbf{B}, \quad (9)$$

kde \mathbf{I} (-) je jednotková matice.

Po dosazení rovnice pro výpočet magnetické síly do rovnice pro výpočet momentu lze získat upravený vztah pro moment, který je uveden v rovnici (10).

$$\mathbf{M} = \int_{\partial\Omega} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}) dS \quad (10)$$

Kde veličiny v první závorce reprezentují rozměr ramena a veličiny ve druhé závorce silové účinky magnetického pole.

Jak již bylo řečeno, tímto způsobem probíhal výpočet u všech dále uvedených matematických modelů. Rozdílem je pak především počet a tvar výpočetních oblastí z důvodu různého uspořádání a podoby elektromagnetů.

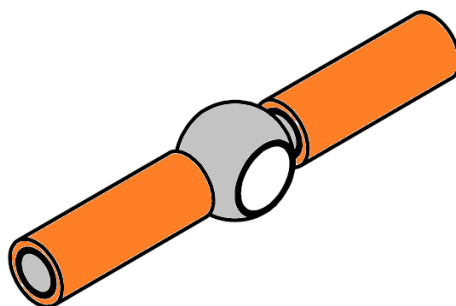
4.3 Základní model

Základní model je nejstarším a zároveň nejvíce používaným matematickým modelem. Jeho základ tvoří jeden pár elektromagnetů a feromagnetická koule, jak je nastíněno na *obrázku 17*. Jediným chybějícím prvkem modelu je vzduchová obálka, která je potřebná zejména k přenosu magnetického pole mezi prvky a tedy výpočtu správného rozložení magnetického pole v prostoru.

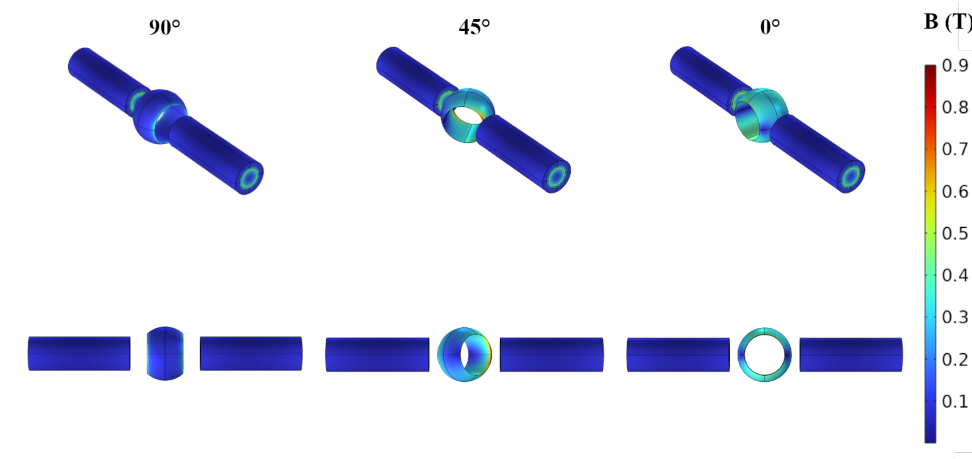
Šedou barvou jsou na obrázku zachyceny feromagnetické části, oranžové jsou pak měděné cívky. Aby chování feromagnetických částí v magnetickém poli odpovídalo co nejvíce realitě, byla těmto prvkům přiřazena magnetizační charakteristika materiálu *Low Carbon Steel Soft Iron* z knihovny COMSOL, tedy ve volném překladu nízkouhlíkové magneticky měkké oceli. Model byl plně parametrizován, aby bylo možné jednoduše měnit hodnoty jednotlivých celků, ať už se jedná o hodnoty rozměrových parametrů, tak parametrů elektrických.

Jak bylo řečeno v úvodních kapitolách této práce, model byl prvotně využit pro návrh a ověření parametrů elektromagnetů k potřebě ověření myšlenky otáčení koule ventilu magnetickým polem - tedy k docílení potřebných 100 mT na povrchu koule. V pozdější fázi vývoje posloužil jako předloha k hledání závislosti velikosti momentu na změně jednotlivých parametrů elektromagnetů z důvodu značně vyšší rychlosti výpočtu, než tomu je u zbylých dvou modelů. Výpočetní čas se logicky navyšuje přidáním více prvků do modelu. U těchto prvků (například právě elektromagnety) je třeba vytvořit jemnou výpočetní oblast, z čehož vyplývá čím více takových prvků, tím více výpočetních bodů → vyšší výpočetní čas.

Z tohoto modelu lze rovněž velmi věrným způsobem ilustrovat rozložení magnetické indukce na povrchu koule. To je uvedeno na *obrázku 18* pro 3 různé polohy koule vůči elektromagnetům. Zde lze vůbec poprvé uvést terminologii z hlediska natočení feromagnetické koule ve stupních.



Obrázek 17: Základní matematický model



Obrázek 18: Rozložení magnetické indukce v průběhu otáčení koule

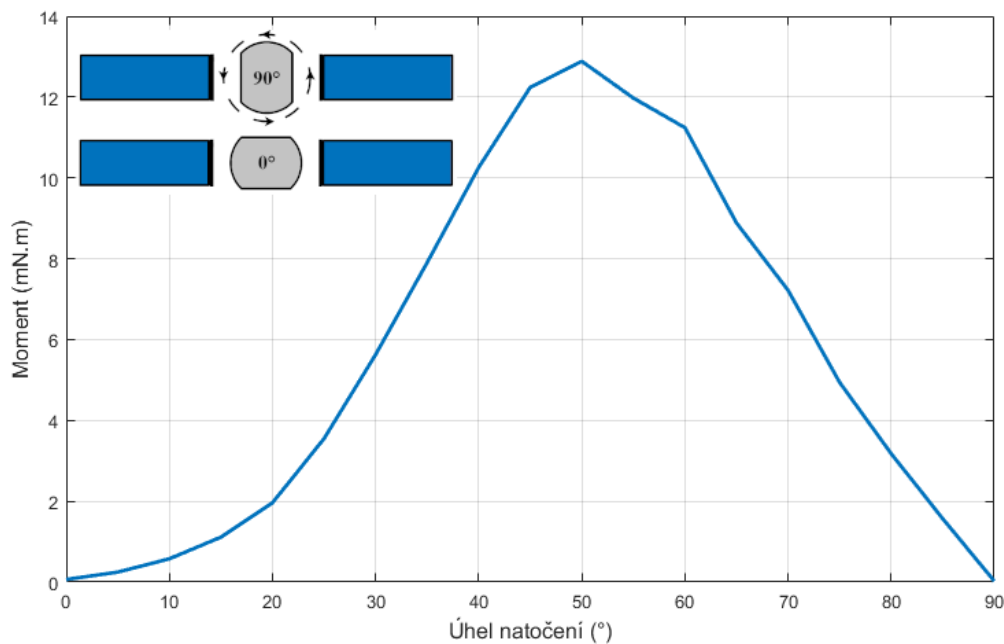
Natočení bude udáváno v závislosti polohy otvoru koule na poloze elektromagnetu (základní model), popřípadě polohy koule na poloze potenciálního kanálu. Natočení koule 0° znamená, že je koule natočena svojí stěnou k páru elektromagnetů, popřípadě kanálu, neboli, ventil se nachází v poloze zavřeno (lze brát jako výchozí polohu ventilu), viz zmíněný obrázek, popřípadě je poloha nastíněna i na *obrázku 19*.

Rozhodujícím ukazatelem správnosti návrhu byla u prvních modelů velikost magnetické indukce, a s tím související působící síla na feromagnetickou kouli. Jelikož se jedná o točivou sílu, je vhodné spíše hovořit o momentu síly M (N m). Ten je v každé pozici koule vůči sepnutému páru elektromagnetů jiný. Je nasnadě znát závislost působícího momentu na úhlu natočení, aby bylo zřejmé, ve kterých pozicích je síla od elektromagnetů nejvyšší a ve kterých nejnižší. Tato znalost pak pomáhá k pochopení pohybu samotné koule - z jaké pozice lze kouli otočit konkrétním párem elektromagnetů, kdy sepnout následující pár elektromagnetů, atp.

Závislost momentu a úhlu natočení lze nazvat *momentovou charakteristikou*. V tuto chvíli je řeč o základním modelu a je tedy zřejmé, že momentová charakteristika bude vynesena pro jeden sepnutý pár elektromagnetů uvedený na *obrázku 17*. Momentová charakteristika je zobrazena na *obrázku 19*. V pozdějších fázích sloužila momentová charakteristika základního modelu k porovnání momentových charakteristik koncepčního a pokročilého modelu při ověřování návrhů.

Je z ní patrná již dříve zmíněná skutečnost - jedním párem elektromagnetů nelze otočit kouli o plných 90° , a to z důvodu velmi malé působící síly zapříčiněné oboustranným tahem. V případě pohybu koule ($90^\circ \rightarrow 0^\circ$) je patrné, že moment lineárně roste až do maximální amplitudy, která nastává při úhlu natočení přibližně 50° . Po překonání maxima pak moment téměř kopíruje exponenciálu. Z toho pramení další obtíž - kouli nelze dotočit, tedy nelze docílit úhlu natočení přesně 0° . Je to opět zapříčiněno malým silovým působením v této poloze.

Velikost síly, a tím spojeného momentu nejvíce ovlivňují elektromagnety. Jejich rozložení, tvar a elektrické parametry tak zcela pochopitelně rovněž podléhaly simulaci, kde bylo zkoumáno, jak se projeví změna jednotlivých parametrů na velikosti momentu. Jak již bylo zmíněno, základní matematický model byl vybrán k tomuto účelu z důvodu podstatně vyšší rychlosti výpočtu, než



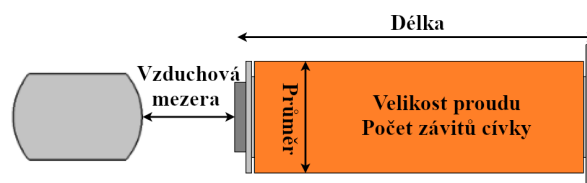
Obrázek 19: Momentová charakteristika základního modelu

tomu je u rozsáhlejších matematických modelů.

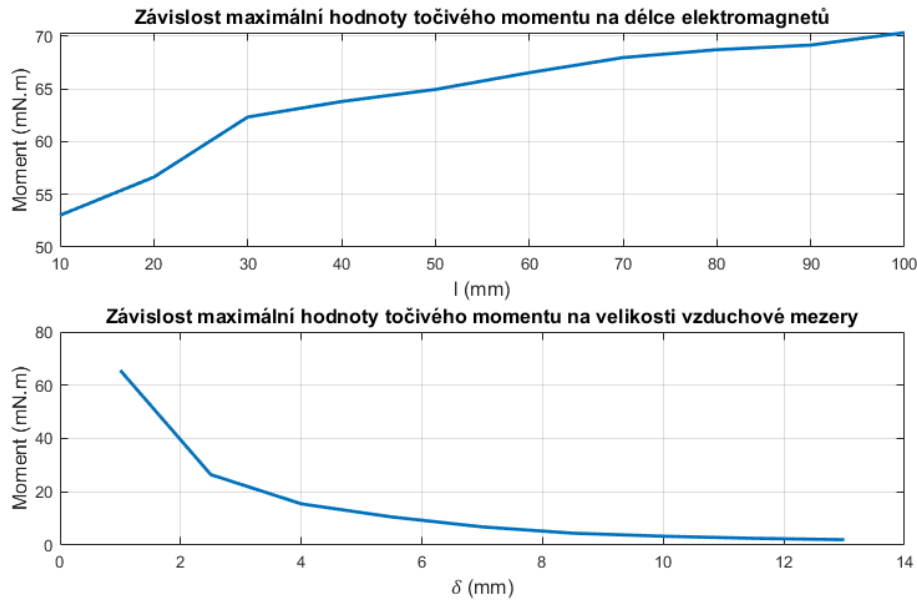
4.3.1 Závislost velikosti a průběhu momentu na parametrech elektromagnetů

Před samotnou simulací je nutné si nejdříve uvědomit, které parametry je možné na elektromagnetech měnit. Ilustruje je *obrázek 20*. Jsou to tedy zejména rozměrové parametry jako délka elektromagnetu, průměr elektromagnetu a v neposlední řadě také velikost vzduchové mezery mezi elektromagnetem a feromagnetickou koulí. Z elektrických parametrů je to pak velikost napájecího proudu a počet závitů cívky elektromagnetu.

K hledání a výpočtu těchto parametrů byl využit programovací jazyk MATLAB, který lze za pomoci programu LiveLink propojit se simulačním softwarem COMSOL Multiphysics. V jazyce MATLAB je pak možné provádět výpočty jednotlivých hodnot vstupních parametrů a pomocí příkazu je nahrát do matematického modelu. Po výpočtu matematického modelu se pak vypočtené hodnoty momentu (popřípadě jiného chtěného parametru) zapíše do definované matice. Tyto výsledky lze vykreslit, porovnat a popřípadě s nimi dále pracovat. Modely byly počítány pro úhel natočení koule odpovídající maximálnímu momentu z důvodu značného urychlení analýzy,



Obrázek 20: Základní uvažované parametry



Obrázek 21: Závislost maximální velikosti momentu na rozměrových parametrech

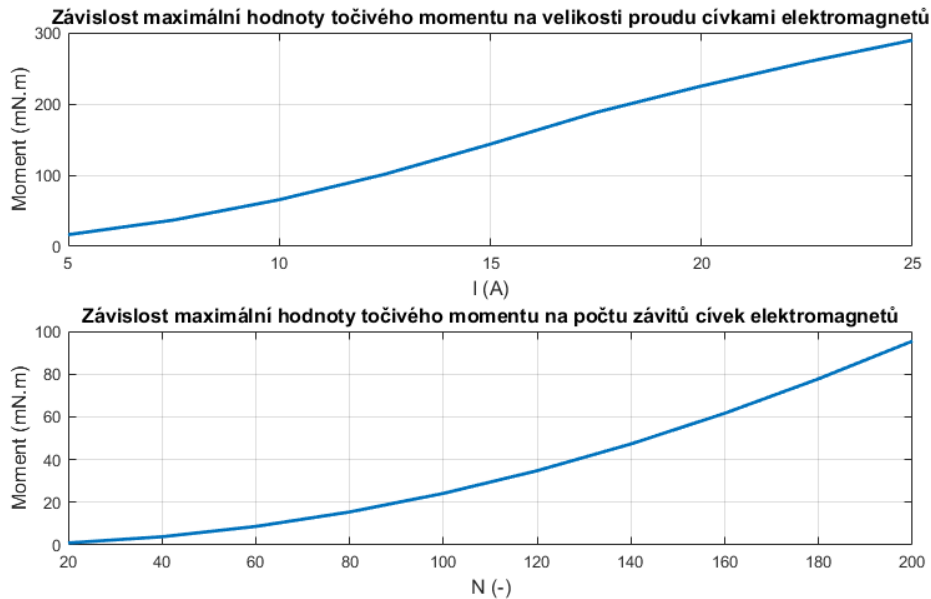
přičemž byl náhodně kontrolován průběh momentové charakteristiky.

Na *obrázcích 21 a 22* jsou uvedeny vybrané výsledky simulací. V každém rozebíraném případě je vynášena závislost maximální velikosti točivého momentu na změně hodnoty daného parametru. Vždy byl měněn pouze jeden parametr a hodnoty ostatních zůstávaly fixní:

- Délka cívek $l = 60$ mm
- Vzduchová mezera mezi elektromagnetem a koulí $\delta = 1$ mm
- Průměr elektromagnetu $d = 18$ mm, z toho je
 - průměr feromagnetického jádra $d_{Fe} = 12$ mm,
 - vzduchová mezera mezi vinutím a jádrem $\delta_{Fe} = 0,5$ mm,
 - šířka vrstvy vinutí $s_v = 2,5$ mm
- Velikost napájecího proudu $I = 10$ A
- Počet závitů cívky elektromagnetů $N = 165$

Chybí zde závislost na průměru elektromagnetu. Průměr je v tomto případě velice specifický parametr. Vzhledem k prostorové náročnosti uložení elektromagnetů vedle sebe (viz. další kapitoly) nelze s jeho hodnotou libovolně hýbat. Proto byla vždy v praktické realizaci hodnota průměru volena v závislosti na individuálním prostorovém uspořádání.

Z grafů je zřejmé, že největší vliv na moment, potažmo sílu působící na kouli, má velikost vzduchové mezery. Z toho lze vyvodit závěr, že je zřejmě nejdůležitější navrhnout aktuátor tak, aby se



Obrázek 22: Závislost maximální velikosti momentu na elektrických parametrech

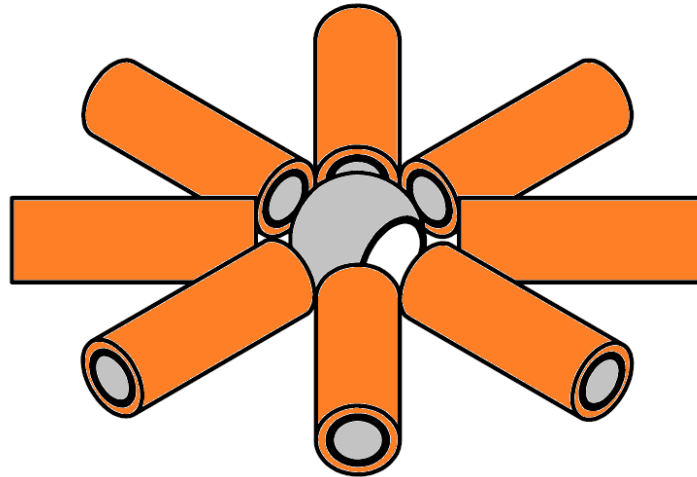
elektromagnety nacházely v co nejtěsnější blízkosti (již zmíněná závislost velikosti průměru) ovládané feromagnetické koule. Minimální zvýšení působícího momentu působí rovněž prodloužení elektromagnetů, kde růst momentu je viditelný hlavně v kratších délkách.

Velikost působícího momentu samozřejmě ovlivňují elektrické parametry. Bez elektrického proudu a závitů cívky by nebylo možné vytvořit působící magnetické pole. Závislost maximálního momentu na velikosti elektrického proudu je téměř lineární. To znamená, že se zvyšujícím se proudem se lineárně zvyšuje i točivý moment. V případě počtu závitů cívek se závislost blíží spíše exponenciálnímu nárůstu, z čehož lze usuzovat, že změna počtu závitů má na silové působení větší dopad. Výhodou v tomto případě může být snížení průřezu vodiče, kdy je pak možné ve stejném prostoru navinout vyšší počet závitů - je však nutné omezit velikost proudu z důvodu nižší proudové zatížitelnosti vodiče menšího průřezu a tato závislost nemá lineární charakter.

Během návrhu byly rovněž uvažovány elektromagnety jiného tvaru (čtvercové, obdélníkové, atd.). Výsledky se však nijak výrazně neodlišovaly od elektromagnetů s kruhovým průřezem, a tak nebyly dále uvažovány. Jednou z výhod by však mohlo být potenciální ušetření prostoru díky lepší skladnosti elektromagnetů s obdélníkovým průřezem.

4.4 Konceptní model

Konceptní model vychází ze zavedené koncepce - tedy rozmístění osmi elektromagnetů rovnoměrně okolo tělesa ventilu. Prvky modelu jsou znázorněny na *obrázku 23*. Skládá se tedy z elektromagnetů složených z osmi cívek se stejnými válcovými feromagnetickými jádry a feromagnetické koule. Právě díky přidání dalších šesti párů elektromagnetů odpovídá rozložení magnetického pole koncepci a konečné realizaci aktuátoru. Parametry jednotlivých komponentů a jejich umístění v příkladech odpovídá konečné realizaci, jež je popsána v *kapitole 5*.



Obrázek 23: Koncepční matematický model

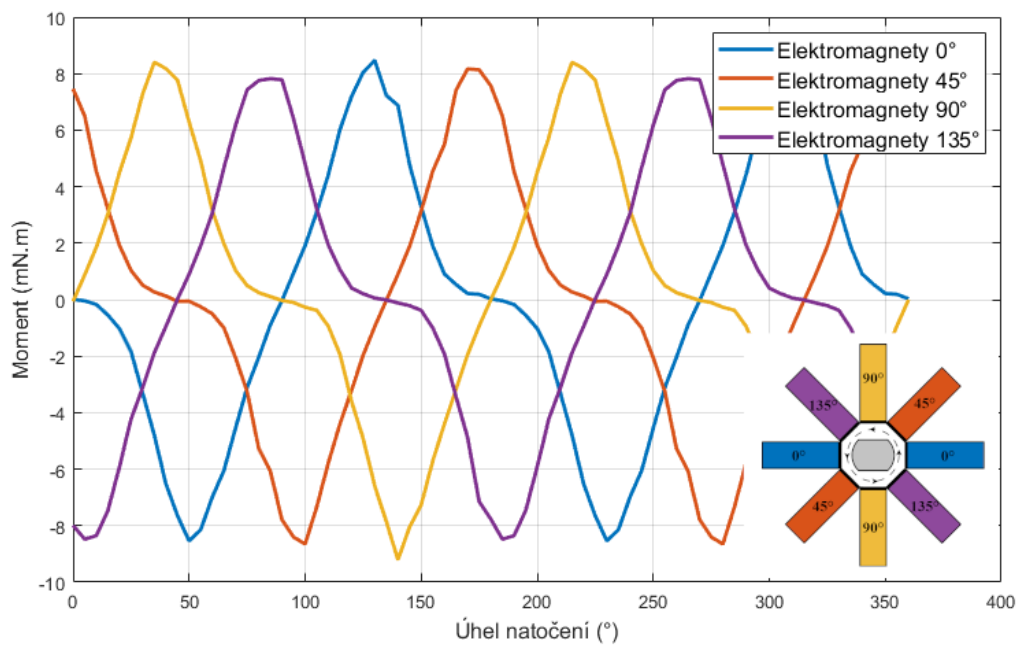
Zahuštění prostoru v blízkosti koule elektromagnety pozmění rozložení magnetického pole oproti předchozímu matematickému modelu vlivem vzájemné interakce elektromagnetů. Ze změny rozložení magnetického pole nutně vychází i změna velikosti momentu působícího na kouli. Z tohoto důvodu je zřejmé, že k finálnímu ověření parametrů cívek je nutné využít právě tento model.

Nejdůležitějším výsledkem je také v tomto případě momentová charakteristika. Ta je zjišťována stejným způsobem jako v případě základního modelu, jen je nutné postup opakovat pro každý pár elektromagnetů. Výsledná charakteristika je uvedena na *obrázku 24*. Poskytuje velmi věrohodný náhled do principu řízení spínání elektromagnetů v případě plného otáčení ventilu - tedy v případě funkce motoru.

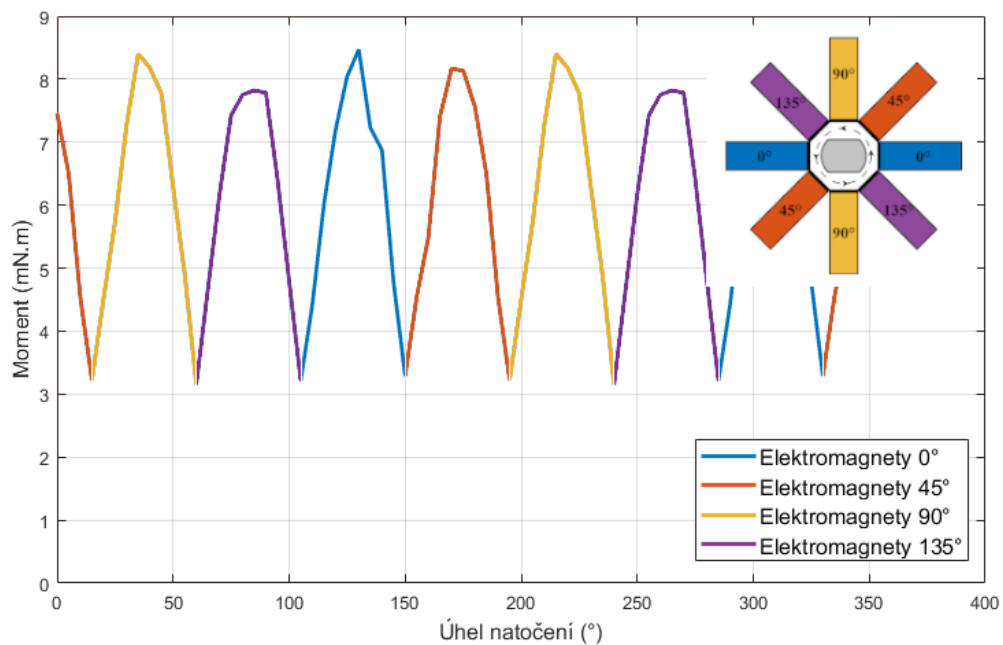
Je možné vidět, že momentová charakteristika každého jednoho páru nabývá kladných i záporných hodnot. To vypovídá o směru, kterým je feromagnetická koule přitahována, tedy, jakým směrem by v případě tohoto aktuálního natočení rotovala. V případě, že by byla požadována jednostranná plynulá rotace koule, je nutné spínat jednotlivé elektromagnety tak, aby se aktuální hodnota momentu pohybovala vždy ve správné polaritě a ideálně kopírovala společnou momentovou charakteristiku vytvořenou propojením individuálních charakteristik (*obrázek 25*). Z jejího průběhu je možné rovněž odečíst jednotlivé úhly, při kterých je vhodné přepínat proud v elektromagnetech.

4.5 Pokročilý model

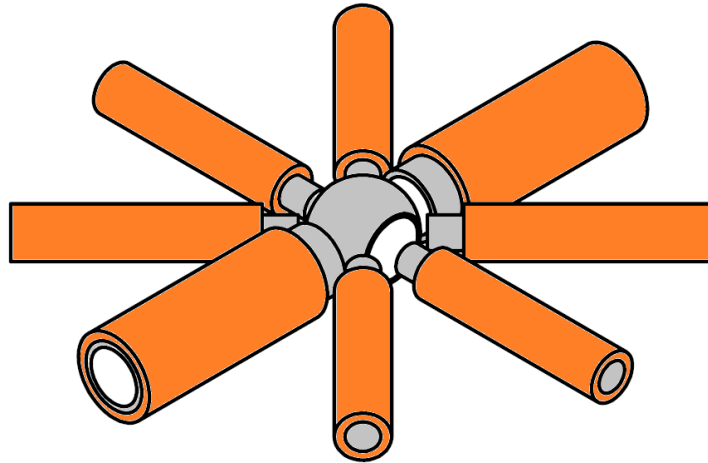
Pokročilý model je posledním z modelů, který byl vytvořen zejména k ověření upraveného konceptu o jeden pár elektromagnetů s trubkovým jádrem, potažmo vzduchovou cívkou. Ten zajišťuje přívod tekutiny do tělesa ventilu. Model se opírá o navržený koncept a je zde upraven pouze jeden pár elektromagnetů. Z důvodu náhrady plného jádra trubkou je však rovněž nutné řešit větší prostorovou náročnost a umístění elektromagnetů do vhodné vzdálenosti oproti předchozímu řešení. Pokročilý model je uveden na *obrázku 26*.



Obrázek 24: Momentová charakteristika všech elektromagnetů koncepčního modelu



Obrázek 25: Společná momentová charakteristika koncepčního modelu



Obrázek 26: Pokročilý matematický model

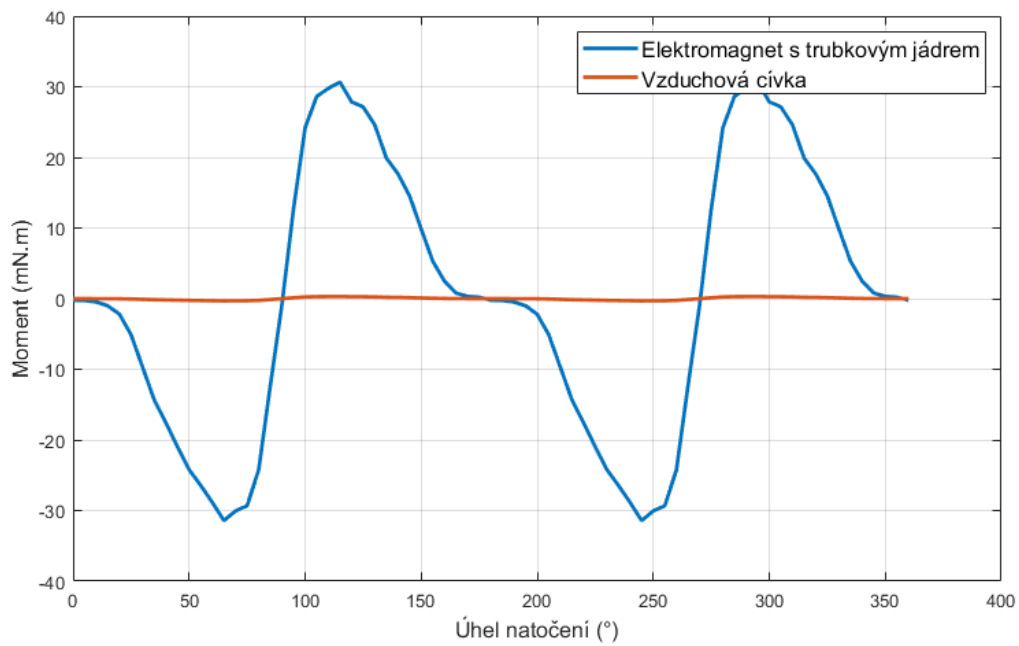
Z výsledků zjištěných při hledání závislosti velikosti momentu na parametrech elektromagnetů vyplývá, že největší roli v silovém působení hraje právě vzdálenost elektromagnetů od feromagnetické koule. V ideálním případě by tato vzdálenost byla rovna nule. To však není možné zajistit z mechanického hlediska, kdy by byly narušeny vnitřní stěny tělesa ventilu, a to by mohlo vést při poruše těsnění až k únikům tekutiny do okolního prostředí.

Před tvorbou matematického modelu a realizací tedy bylo rozhodnuto o poloze elektromagnetů přibližně 2 mm od feromagnetické koule (rezerva chránící před narušením vnitřní stěny tělesa). Aby se však elektromagnety vešly vedle sebe, tvoří jejich konec pouze feromagnetická jádra a vrstva vinutí začíná až po 1 cm, jak je rovněž možné vidět na *obrázku 26*. Tím je tedy docíleno jistého kompromisu. Elektromagnet jako takový začíná v podstatě až ve vzdálenosti asi 12 mm od feromagnetické koule, zbylých 10 mm je však vyplněno feromagnetickým materiálem, který má oproti vzduchu (potažmo plastu) několikanásobně nižší reluktanci a nedochází tak k tak vysokým ztrátám. Parametry modelu odpovídají reálným parametrům verze 1 pokročilého prototypu a jsou uvedeny v *kapitole 5*.

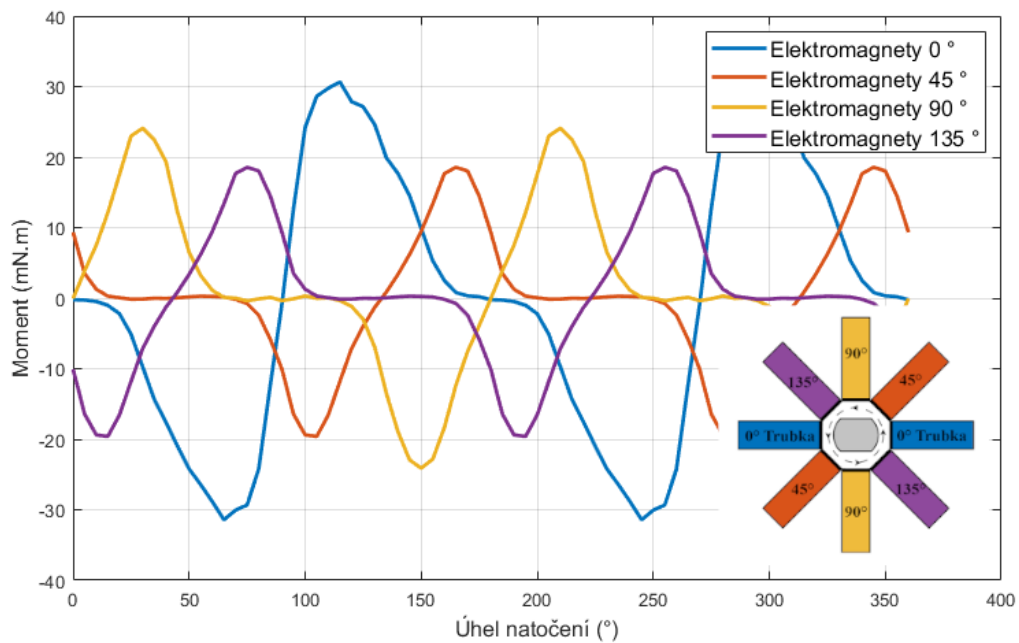
Z uvedeného vyplývá, že v případě využití vzduchové cívky (vynechání feromagnetické trubky) je reluktance v prostoru cívky a mezi cívkou a koulí velmi vysoká. Z tohoto důvodu je působící moment na kouli velmi malý v porovnání s použitím elektromagnetu s trubkovým jádrem. Porovnání je uvedeno na *obrázku 27*. Porovnávány byly výsledky modelů elektromagnetů o stejných parametrech cívek. Jediným rozdílem je přítomnost feromagnetického jádra. Je možné vidět, že tyto dvě situace jsou téměř neporovnatelné. Průběh momentu vzduchové cívky je totožný - hodnoty jsou bohužel příliš malé.

Stejně tak jako v předchozím případě jsou hlavním výstupem tohoto matematického modelu momentové charakteristiky, které definují silové působení na feromagnetickou kouli v různých okamžicích otáčení. Jsou uvedeny na *obrázku 28*. Je z nich patrná odlišnost momentové charakteristiky pro elektromagnet s trubkovým jádrem oproti elektromagnetům s klasickým plným jádrem. Křivka je více plochá - elektromagnet tedy zabírá v širší škále natočení koule.

Momentová charakteristika jako celý model odpovídá provedení pokročilého prototypu verze 1,



Obrázek 27: Porovnání elektromagnetu s trubkovým jádrem a vzduchové cívky



Obrázek 28: Momentové charakteristiky pokročilého prototypu

jenž je uvedený v kapitole 5. Je z ní patrné, že nejsilnějším elektromagnetem je elektromagnet trubkový a dále pak elektromagnet v poloze 90° i přes to, že nabývá stejného počtu závitů při stejné hodnotě proudu jako ostatní klasické plně elektromagnety. Může to být zapříčiněno tím, že siločáry elektromagnetů v polohách 45° a 135° se uzavírají částečně přes trubku (malá vzdálenost jader) a neprostupují tak ve větším počtu do feromagnetické koule. Ve výsledku je však rozdíl charakteristik chtěný, jelikož elektromagnety v polohách 0° a 90° musí být z důvodu dotočení do krajní pozice (otevřeno/zavřeno) silnější - funkce ventilu.

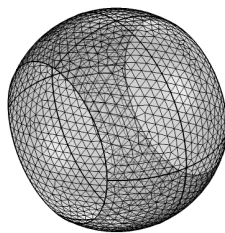
4.6 Příklad konvergenční analýzy

Aby bylo možné považovat výsledky za co nejpřesnější, byla provedena konvergenční analýza. Všechny zmíněné modely byly vytvořeny parametricky z důvodu snazší změny rozměrů jednotlivých komponentů, či elektrických parametrů. Na základě rozměrových parametrů pak byla zhotovena i výpočetní síť. Z tohoto je tedy zřejmé, že síť nebyla zadávána rozměrově či tvořena automaticky, ale byla naparametrizována vždy z příslušných rozměrových parametrů daného komponentu a koeficientu sítě, kterým se tyto parametry dělily.

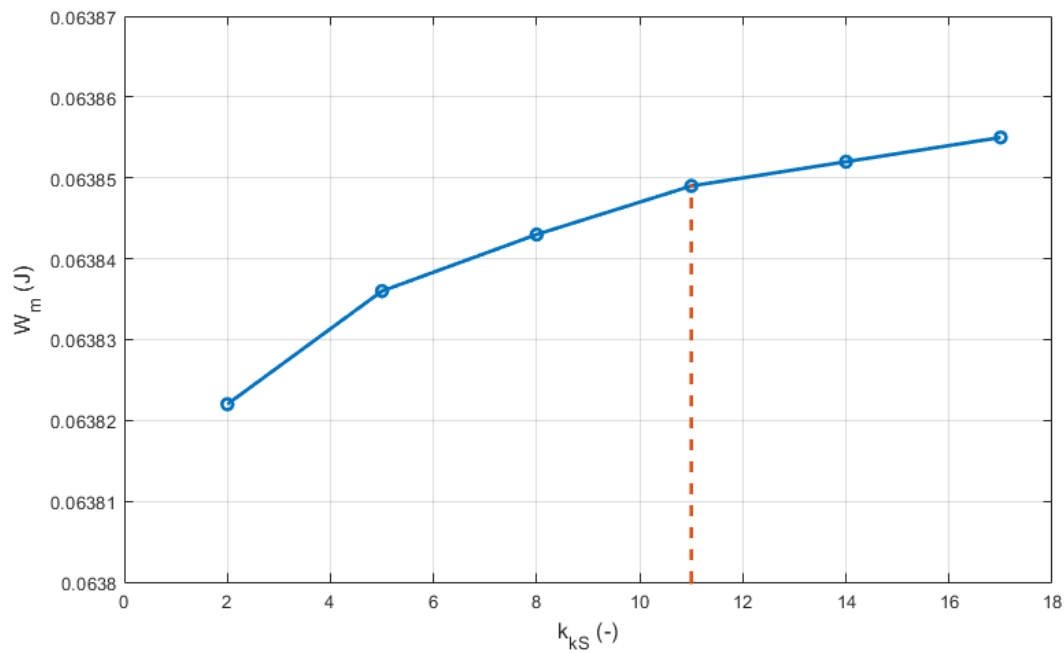
Pro představu zde bude uveden příklad konvergenční analýzy v případě povrchu koule. Konvergence výpočetní sítě na povrchu koule je velmi důležitá zejména z toho důvodu, že je prvním místem vzniku magnetického pole vytvořeného elektromagnety a velmi tak na konvergenci řešení na tomto povrchu závisí hodnota momentu působícího na kouli.

Síť je v tomto případě závislá jen na velikosti koule, tedy konkrétně na jejím poloměru r_k (mm) a k tomuto rozměru bylo nutné zvolit odpovídající hodnotu koeficientu sítě k_{kS} (-). Velikost elementu sítě (11) je tedy dána právě těmito dvěma parametry. Hodnoty koeficientu sítě byly voleny od 2 do 17 s krokem 3. Spodní hranice představuje mez deformace koule vlivem malého počtu elementů a horní mez únosnosti z hlediska času výpočtu modelu. Síť je v případě tohoto povrchu trojúhelníková (v COMSOL Multiphysics: *Triangular*) a lze ji zhlédnout na obrázku 29, kde je vynesena pro poloměr koule 16 mm (koule s touto velikostí používána po celou dobu vývoje) a hodnotu koeficientu k_{kS} rovnou 11.

$$\text{Maximální velikost elementu} = \frac{r_k}{k_{kS}} \quad (11)$$



Obrázek 29: Vygenerovaná síť povrchu koule



Obrázek 30: Závislost magnetické energie na velikosti koeficientu sítě povrchu koule

K určení konvergence modelu byla využívána hodnota celkové magnetické energie, kdy při jejím ustálení na stejné hodnotě lze tvrdit, že je model zkonvergován. Graf závislosti magnetické energie na velikosti koeficientu sítě k_{kS} je tak rozhodujícím z hlediska velikosti tohoto koeficientu. Nakonec byla zvolena hodnota 11 z důvodu již velmi malé změny celkové magnetické energie při vyšších hodnotách, kdy další navyšování by pak vedlo k razantnímu zvýšení výpočetního času.

5 Realizace prototypů aktuátoru a laboratorní testy

Tato kapitola se zabývá realizací a testováním prototypů majících základ v koncepčním a pokročilém matematickém modelu. Koncepční prototyp byl konstruován zejména k ověření principu otáčení feromagnetické koule čistě spínáním odpovídajících párů elektromagnetů. Pokročilý prototyp aktuátoru je již více zaměřený na praktickou funkčnost z hlediska ventilové aplikace, která například zohledňuje přivedení tekutiny do tělesa ventilu a jeho těsnost. Druhý zmíněný prototyp je tak možné podrobit testování pod jistým zatížením.

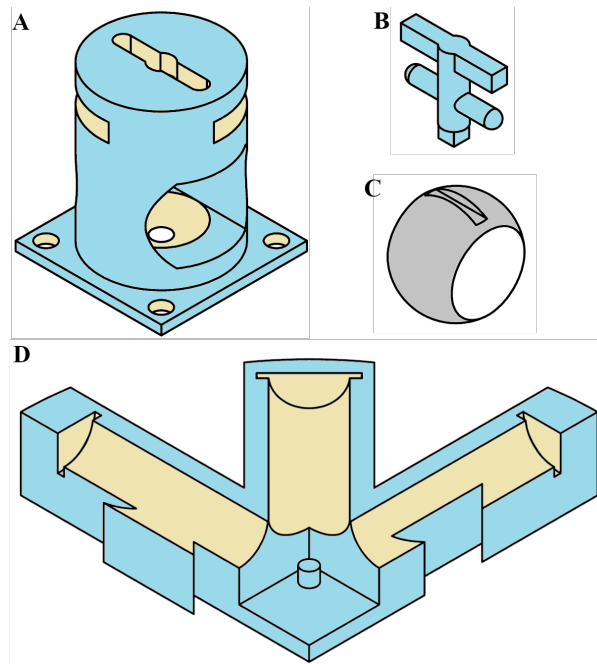
Z předchozí kapitoly může být zřejmá konstrukce elektromagneticky aktivních částí, tedy elektromagnetů a feromagnetické koule. Elektromagnety sestávají z daného feromagnetického jádra (odlišného pro oba prototypy) a cívky z měděného vodiče o určitém počtu závitů. Feromagnetická koule je pak obrobena z magnetické nerezové oceli Ergste 1.4016IM AISI 430 a je dodaná výrobcem ventilů PEVEKO spol. s r. o. se sídlem v Uherském Hradišti. Veškeré další konstrukční části (těleso, hřídel, atd.) jsou vyhotoveny nejčastěji z materiálu PLA metodou 3D tisku. K tvorbě modelů dílů zadaných k pozdějšímu tisku byl využíván software SolidWorks. Detailní výkresy prototypů jsou uvedeny v přílohách společně také s fotografiemi.

5.1 Koncepční prototyp

Realizace koncepčního prototypu se opírá o samotnou koncepci aktuátoru. Základními částmi jsou feromagnetická koule a 8 stejných elektromagnetů rovnoměrně rozložených po jejím obvodu. K funkčnosti prototypu je však potřeba ještě dalších komponentů.

5.1.1 Realizace koncepčního prototypu

Prvním z nich je prototypové těleso ventilu, které slouží k uložení koule a vymezení tak prostoru, ve kterém se pohybuje. V případě absence tohoto dílu (volné uložení koule v prostoru) by rovněž docházelo k fyzickému kontaktu elektromagnetů a koule z důvodu působících magnetických sil. Prototypové těleso není v tomto případě navrhováno tak, aby bylo těsné a plnilo tedy funkci ventilu. V této chvíli jde pouze o ukotvení koule a možnost sledování potenciální rotace. Je vyobrazeno společně s dalšími dále uvedenými komponenty na *obrázku 31*. Je možné si ve středu tělesa všimnout otvorů po obou stranách. Ty slouží ke vkládání koule do vnitřního prostoru a zároveň jako potenciální přístupový bod k měření magnetické indukce. V horní části se nachází otvor k zasazení a uchycení hřídele. Světle modré a světle žluté části indikují plastové prvky vyrobené metodou 3D tisku (dvě barvy použity kvůli kontrastu) a šedá značí feromagnetický



Obrázek 31: Konstrukční části koncepčního prototypu: A) Prototypové těleso, B) Hřídel, C) Feromagnetická koule, D) Čtvrtina podstavce

materiál magnetické nerezové koule.

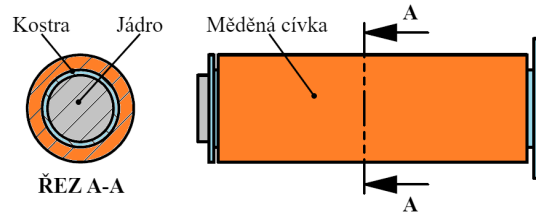
Dalším potřebným prvkem je hřídel, která je rozebíratelně propojena s koulí. Jak již bylo naznačeno v kapitole 1, u klasických provedení kulových ventilů slouží hlavně jako táhlo, přes které je možné kulový ventil ovládat. V tomto případě je zde zejména z důvodu fixace osy rotace. Hřídel rovněž slouží jako názorný indikátor polohy ventilu (koule) díky adekvátní úpravě druhého konce. Lze si z obrázku 31 všimnout válcových výstupků přibližně v polovině hřídele. Jde o konstrukční úpravu, která společně s otvorem v tělesu zabraňuje vypadnutí hřídele z koule

Aby byl aktuátor s vytvořenými prvky ventilu co nejvíce kompaktní, jsou dále vytvořeny plastové konstrukční díly, do kterých je možné zasadit jednotlivé komponenty. Jedná se v podstatě o jeden konstrukční díl (pro pozdější potřeby ho lze označit jako podstavec) tvořený ze čtyř součástí pospojovaných do sebe. Důvodem pro toto řešení jsou zejména relativně velké rozměry dílu s přihlédnutím k výrobě 3D tiskem. Další myšlenkou byla rovněž možnost náhrady jen části dílu v případě jeho zničení, případně nahrazení jinou verzí tohoto dílu.

Mimo tyto konstrukční prvky byly dále navrženy a vyrobeny metodou 3D tisku opěrné kostry určené k navijení cívek. Detailnější parametry elektromagnetů budou uvedeny v následující podkapitole, která pojednává o jejich návrhu.

5.1.2 Návrh elektromagnetů pro koncepční prototyp a konečná realizace

Ze závislosti momentu na parametrech elektromagnetů v kapitole 4 je zřejmé, že bylo nutné navrhnout elektromagnety, které se nacházejí v co nejmenší vzdálenosti od feromagnetické koule, optimálně s co nejvyšším počtem závitů k vytvoření potřebné síly při snesitelné velikosti napá-



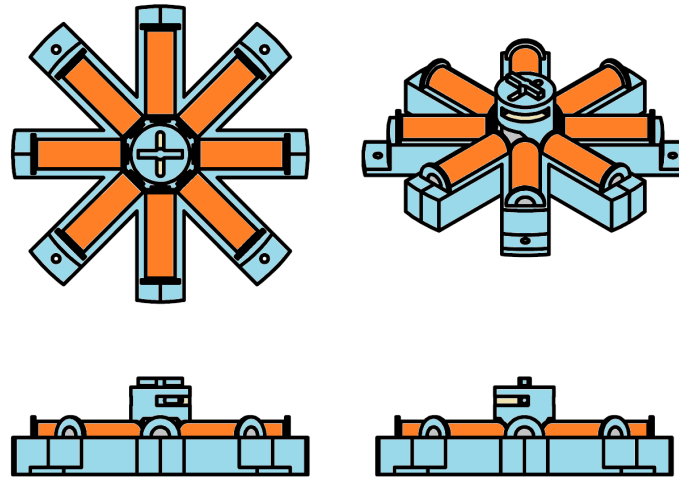
Obrázek 32: Provedení elektromagnetů

jecího proudu. Další rozměrové parametry byly voleny s přihlédnutím k prostorové náročnosti. Vzdálenost elektromagnetu od koule je velmi závislá na průměru elektromagnetu. Z tohoto důvodu bylo nutné zvážit velikost feromagnetického jádra a vrstvy mědi. K těmto dvěma vrstvám je třeba dále připočítat kostru využitou k navíjení cívek, jak již bylo dříve zmíněno. Délka elektromagnetu je pak přizpůsobena tomu, aby cívka obsahovala požadovaný počet závitů - bylo však nutné volit délku rozumně vzhledem k velikosti elektromagnetu. Návrh elektromagnetu a rozložení jeho částí v průřezu je uveden na *obrázku 32*.

Pro tento prototyp bylo vyrobeno 8 totožných elektromagnetů s feromagnetickým jádrem z nízkouhlíkové magnetické oceli o průměru 12 mm a délkou 65 mm. To je zasazeno do kostry vyrobené metodou 3D tisku z materiálu PLA. Na kostře je navinuta měděná cívka s celkovým počtem přibližně 165 závitů ve 3 vrstvách, kde tento počet je limitním kvůli omezenému poloměru elektromagnetů. Aby nedocházelo k posunu či povolení cívky, jsou závity omotány izolační páskou. Pro tyto parametry byl rovněž uveden příklad momentových charakteristik na *obrázku 24* v *kapitole 4*, kde byla ověřena velikost momentu a magnetické indukce na povrchu koule. Parametry byly ověřovány přepočítáním matematického modelu. Cílem bylo přiblížit se momentové charakteristice základního modelu, kde již bylo otáčení koule experimentálně ověřeno. V konečné realizaci je feromagnetické jádro delší než vrstva cívky - je tedy vysunutě. Bylo tak rozhodnuto během sestavování prototypu z důvodu dalšího zmenšení vzduchové mezery mezi elektromagnety a koulí, a tím možného zvýšení působícího momentu.

Samotná výroba elektromagnetů je, jak pro tento prototyp, tak pro pokročilý prototyp, velmi náročná a proces navíjení trvá poměrně dlouhý časový úsek. Je důležité, aby závity vyšších pater cívky co nejvíce pasovaly do mezer vytvořených předešlými vrstvami. Při pečlivém navíjení se tak dá ušetřit mnoho prostoru a je možné navinout více závitů.

Vyrobené elektromagnety jsou následně zasazeny do předpřipraveného podstavce, kde je již předem zasazeno těleso s feromagnetickou koulí a vyvedenou hřídelí. Celková sestava je uvedena na *obrázku 33*. Během prvního sestavení a manuální zkoušky otáčení koule v tělesu bylo zjištěno, že i přes poměrně otevřenou konstrukci tělesa se koule nepohybuje plynule a zasekává se při určitých úhlech natočení. Bylo proto znovu vyjmuta těleso a obroušen jeho vnitřek. Po opětovném složení již bylo otáčení plynulé a bylo možné přejít k testu funkčnosti.



Obrázek 33: Celková sestava koncepčního prototypu

5.1.3 Testování koncepčního prototypu

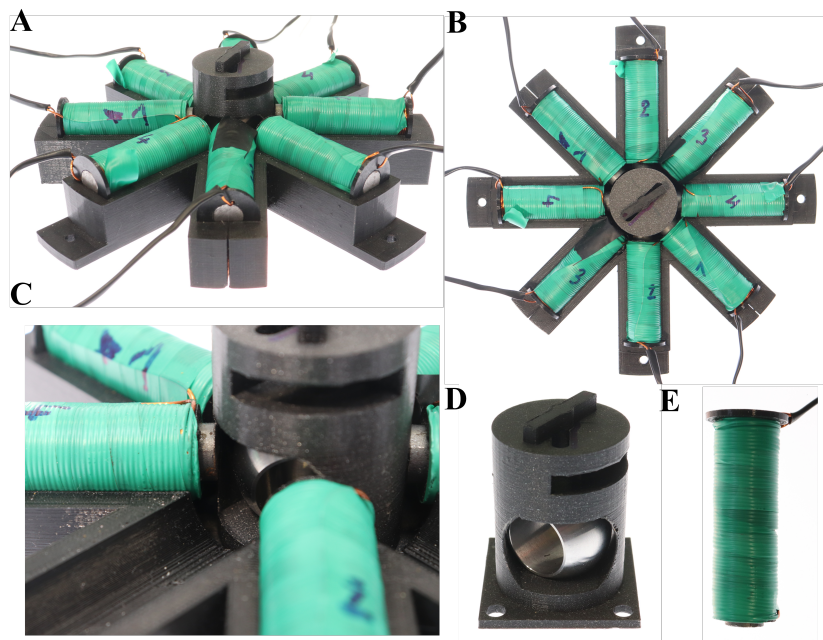
Hlavním kritériem při testování je samozřejmě hledisko funkčnosti. U koncepčního prototypu bylo požadováno otáčení feromagnetické koule při sekvenčním spínání elektromagnetů. Nejprve však byly otestovány elektromagnety jednotlivě, přičemž byla subjektivně pozorována velikost síly a plynulost pohybu koule. Elektromagnety byly napájeny elektrickým proudem o velikosti 5 A, kdy tato hodnota je minimální k dosažení cíleného pohybu. Tím se rovněž ověřila hypotéza, že vysunutí elektromagnetického jádra navýšilo značně působící moment, protože u základního prototypu byla hodnota minimálního proudu přibližně 7 A. Fotografie zkoušeného prototypu jsou uvedeny na *obrázku 34*.

Po úspěšném provedení tohoto prvotního testu bylo možné přejít k ověření funkce ventilu a funkce motoru (představených v *kapitole 3*) příslušným spínáním jednotlivých párů cívek. Pro zajištění předepsaného spínání bylo využito desky Arduino Uno s relé shieldem. Relé shield obsahuje celkem 4 relé (tedy 1 relé na každý pár) s maximálním spínacím proudem 10 A.

Podle požadované funkce byl vytvořen jednoduchý kód pro ovládání jednotlivých relé. Aby bylo zřejmé, které elektromagnety jsou zrovna ovládány konkrétním relé (konkrétní PIN desky Arduino Uno), byly elektromagnety očíslovány, jak je možné rovněž vidět na *obrázku 34*. Lze definovat, že pokud je sepnutý pár elektromagnetů označený číslovkou **1** a koule je vzhledem k tomuto v adekvátní pozici, jedná se otevřený stav ventilu. Z toho vyplývá, že v případě uzavřeného stavu musí být nutně sepnutý pár elektromagnetů **3**.

V případě funkce ventilu je pak k zajištění cíleného pohybu nutné spínat jeden další pár a je v tomto případě jedno, o který ze zbývajících dvou párů se jedná. Jediným rozdílem je směr otáčení koule. Aby byly zřetelně rozpoznány jednotlivé kroky, byla mezi vypnutím aktuálního a sepnutím následujícího páru časová prodleva 3 s. Takto bylo tedy dosaženo funkce ventilu prototypu a bylo úspěšně ověřeno polohování sekvenčním spínáním cívek.

Funkce motoru využívá všech párů cívek sekvenčně spínaných v posloupnosti **1** → **2** → **3** → **4**.



Obrázek 34: Fotografie jednotlivých částí koncepčního prototypu: A) a B) Prototyp z různých pohledů, C) Detail mezery mezi koulí a elektromagnetem, D) Těleso s uloženou koulí, E) Elektromagnet

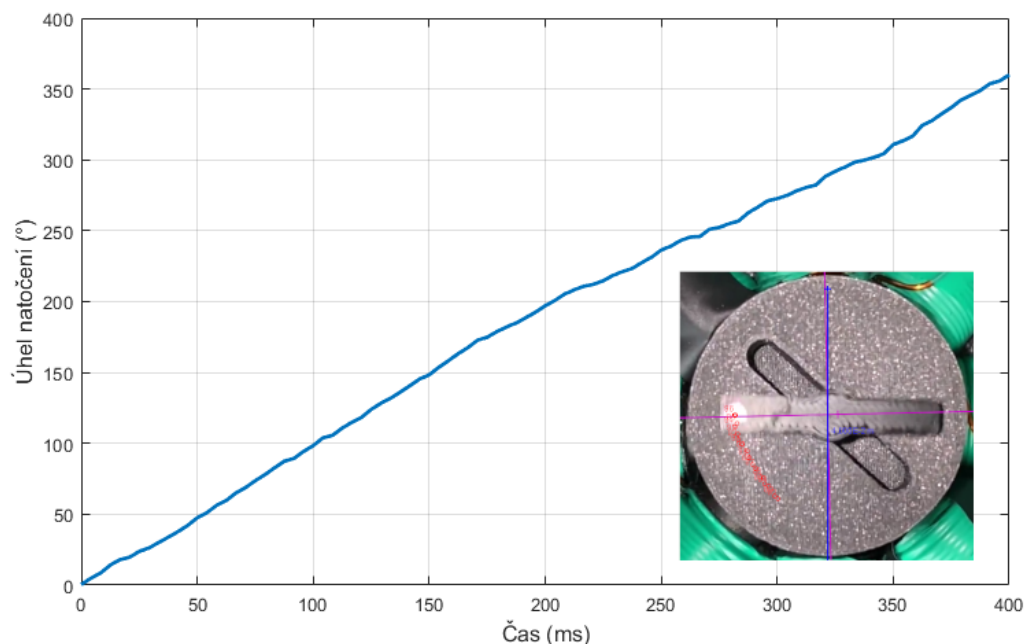
Samozřejmě je možné posloupnost otočit a v tom případě by docházelo k otáčení koule v druhém směru. Zpočátku byla tato funkce testována stejným způsobem jako funkce ventilu → tedy sekvenčním spínáním s časovou prodlevou 3 s, aby byly viditelné jednotlivé kroky v případě, že by docházelo například k nechtěnému zasekávání koule ve vnitřní dutině tělesa.

Po ověření funkčnosti bylo možné modifikovat řídicí kód tak, že se zkrátily časy jednotlivých prodlev, aby byl pohyb koule co nejvíce plynulý a tedy, aby spínání bylo v úhlu natočení, kdy se přechází z momentové charakteristiky jednoho elektromagnetu na druhý. Připomenutí poskytuje *obrázek 25*. Postupnou experimentální analýzou bylo zjištěno, že čas prodlevy mezi spínáním jednotlivých párů elektromagnetů k docílení žádaného pohybu je přibližně 50 ms.

Následně byl prototyp podroben pohybové analýze koule v průběhu jejího otáčení o plných 360° . V horní části hřídele byl fixem vyznačen bod, aby bylo možné pohyb sledovat. K zaznamenávání pohybu byla využita vysokorychlostní kamera, která zachycuje vysoký počet snímků za sekundu - konkrétně 1024 fps. Následná analýza záběrů probíhala v softwaru Tracker [16], kde je možné definovat hmotný bod (v tomto případě bod vyznačený fixem), který software sleduje a zapisuje jeho polohu v čase. Konkrétně zaznamenává polohu v osách x a y, což znamená, že výsledný úhel natočení je potřeba dopočítat pomocí goniometrických funkcí. Výsledek analýzy je uveden na *obrázku 35*.

Z obrázku je patrné, že průběh otáčení v čase je téměř lineární, což značí, že nastavený čas spínání přibližně odpovídá plynulé rotaci koule. Rovněž je možné odečíst, že jedna celá otočka (tedy 360°) trvá ± 400 ms. To v principu znamená, že pohyb do polohy otevřeno/zavřeno - tedy pohyb o 90° je teoreticky možný za čtvrtinu tohoto času, tedy za 100 ms.

Tímto byl úspěšně otestován koncepční prototyp a bylo třeba začít přemýšlet o jeho nedostatcích,



Obrázek 35: Výsledek pohybové analýzy společně se snímkem ze softwaru Tracker

a ty odstranit při návrhu následujícího prototypu. Hlavním nedostatkem je především to, že prototyp rozhodně nemůže v tomto provedení fungovat jako ventil. Těleso slouží pouze jako opěrná konstrukce pro feromagnetickou kouli a není přizpůsobeno k těsnění. Dále není možné přivést k tělesu tekutinu, jelikož je obestavěno plnými elektromagnety, jak již bylo několikrát zmiňováno. Další postup byl tedy takový: Navrhnout prototyp aktuátoru společně s dalšími konstrukčními částmi, aby se tento prototyp jako celek co nejvíce přiblížil plnohodnotnému ventilu.

5.2 Pokročilý prototyp

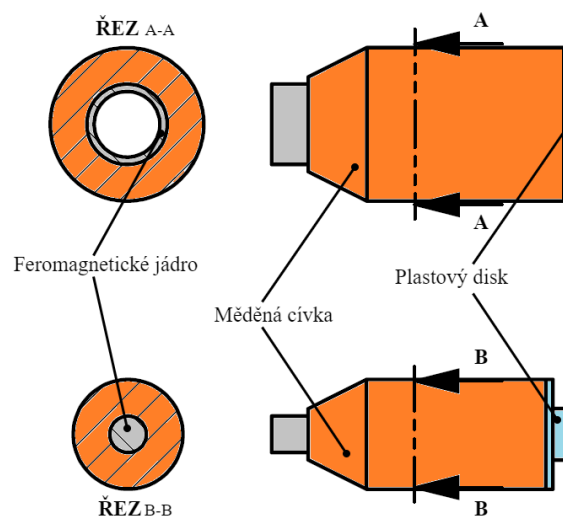
U koncepčního prototypu bylo uvedeno, že se jeho realizace opírá o samotnou koncepci aktuátoru. To samé je však možné tvrdit i o pokročilém prototypu, který přebírá základní myšlenku koncepce a pouze modifikuje tvar a provedení elektromagnetů. Při návrhu pokročilého prototypu byla opět nutná provázanost se zmíněným matematickým modelem, pomocí kterého byly ověřovány navržené parametry a potenciální funkčnost celého prototypu. Na rozdíl od prototypu koncepčního však vznikly rovnou dvě verze. První z nich odpovídá uspořádáním matematickému modelu a lze ho pro přehlednost označit **verzí 1** pokročilého prototypu. Druhá verze, tedy pro přehlednost **verze 2** pokročilého prototypu se vyznačuje tím, že v poloze 90° jsou nahrazeny klasické plné elektromagnety trubkovými elektromagnety. To znamená, že se v polohách 0° a 90° nacházejí elektromagnety trubkové a v polohách 45° a 135° elektromagnety klasické s plným jádrem. Toto konstrukční řešení neodpovídá rozložení matematického modelu, jelikož bylo spontánně navrženo až po testování verze 1.

Prvky, jejichž provedení je v obou verzích společné je samozřejmě feromagnetická koule, ale také elektromagnety, kde se mění pouze jejich počet. Proto bude v tomto případě nejprve popsáno

právě provedení těchto komponent. V dalších kapitolách pak budou obě verze představeny společně s důvodem přechodu z verze 1 na verzi 2.

5.2.1 Návrh a realizace elektromagnetů pokročilého prototypu

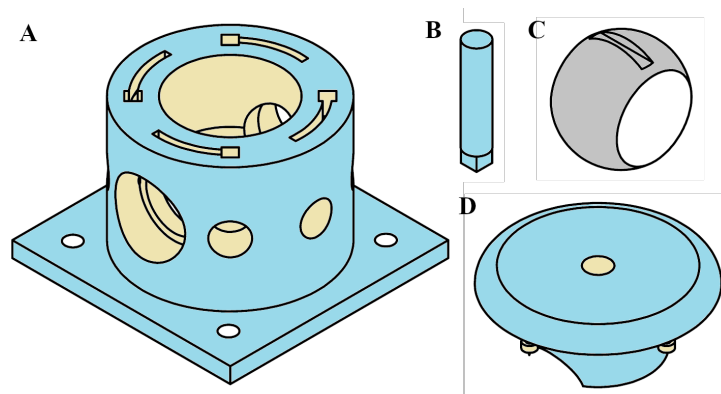
Nákres elektromagnetů společně s průřezem je uveden na *obrázku 36*. Trubkové elektromagnety se oproti klasickým odlišují trubkovým jádrem, díky němuž je možné do tělesa přivádět tekutiny, a tak lze v jejich průřezu nalézt jednu vrstvu navíc - dutinu. Jádra jak klasických elektromagnetů, tak trubkových jsou vyrobeny z nízkouhlíkové magnetické oceli, která disponuje nízkou reluktancí. Vinutí je opět měděné z vodiče o průřezu 1 mm².



Obrázek 36: Nákres a průřez elektromagnetů z trubkovým a plným jádrem

Oproti koncepčnímu prototypu nebyla vytvářena kostra určená pro navíjení cívek jako taková (ušetření prostoru v průměru) a cívka je navinuta přímo na feromagnetických jádrech. Aby však navíjení bylo možné, byly navrženy nasazovací kotouče na obě strany daného jádra, přičemž kotouč na jedné straně vymezoval rovněž část jádra, na kterém cívka nebyla navinuta z důvodu ušetření prostoru a možnosti přisunout elektromagnet co nejbližší k feromagnetické kouli. Na druhém z konců byl disk ponechán z důvodu fixace cívky. Aby se vedle sebe elektromagnety vešly, je zakončení provedené do kužele.

Parametry elektromagnetů byly ověřovány matematickým modelem v *kapitole 4*, kde byla požadována momentová charakteristika s přibližně 2x vyšší amplitudou, než kterou disponuje momentová charakteristika základního prototypu - zejména kvůli reálnějšímu provedení tělesa s nezanedbatelnou velikostí tření. Délka jader elektromagnetů je v tomto případě 80 mm při průměru 10 mm u plného jádra a u trubkového jádra je vnitřní průměr 18 mm a vnější 22 mm. Vnitřní průměr byl takto volen, aby co nejvíce odpovídal průměru otvoru v kouli (20 mm). Závity jsou kuželově navinuty v 8 vrstvách s celkovým počtem přibližně 480 závitů u trubkových elektro-



Obrázek 37: Konstrukční části verze 1 pokročilého prototypu: A) Těleso ventilu, B) Hřídel, C) Feromagnetická koule, D) Víko

magnetů a 430 závitů u elektromagnetů s plným jádrem.

Proces navíjení cívek byl složitější než tomu bylo u koncepčního prototypu, kde byly cívky navíjeny odděleně na vytištěných kostrách. U pokročilých prototypů navíjení probíhalo následujícím způsobem:

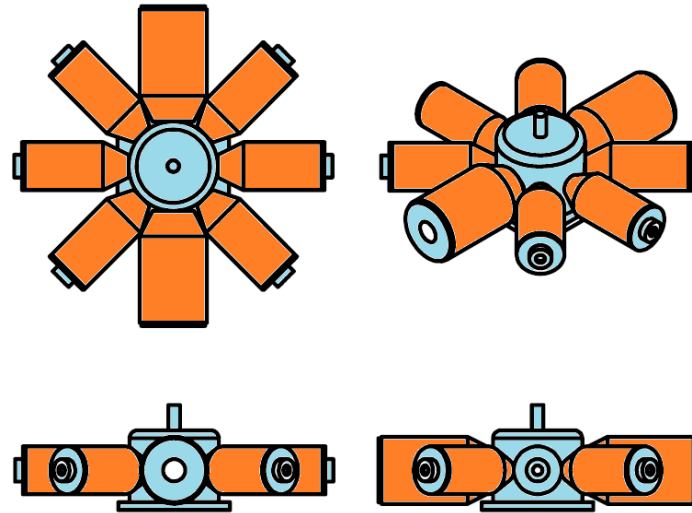
1. Nasunutí koncových disků na feromagnetická jádra.
2. Vyvrtání otvorů do jednoho z disků k uchycení vodiče.
3. Nanesení lepidla na feromagnetické jádro, které drží cívku pevně na jádře.
4. Navinutí cívky s důrazem na kuželové provedení.

Tímto procesem prošel každý elektromagnet. Jak již bylo řečeno, tyto elektromagnety byly využity jak v první, tak ve druhé verzi prototypu a byly tak jediným společným komponentem. Dále budou popsány specifika jednotlivých verzí.

5.2.2 Realizace verze 1 pokročilého prototypu

Stejně tak jako koncepční prototyp, tak i obě varianty pokročilého prototypu mají doplňující konstrukční prvky. Jedním z nejdůležitějších, ne-li nejdůležitější je těleso ventilu. To zde již neslouží pouze jako opěrná konstrukce pro feromagnetickou kouli, ale má za úkol zejména také těsnit, jako je tomu u klasických provedení kulových ventilů.

Díky plnému uzavření je dále také možné uzpůsobit vnější plochy tělesa. Primárně bylo uvažováno o tom, že by se elektromagnet s trubkovým jádrem zasadil přímo do tělesa a zvýšila se tak jeho těsnost. Takto lze ale principiálně připravit otvory pro všechny elektromagnety a zvýšit tím celkovou kompaktnost uspořádání, kdy jsou všechny elektromagnety zasunuty do tělesa a není tak potřeba dalšího konstrukčního prvku. Těleso je společně s dalšími komponenty uvedeno na *obrázku 37*.



Obrázek 38: Celková sestava verze 1 pokročilého prototypu

Kouli je však nutné do tělesa nejprve nějakým způsobem umístit. Proto bylo těleso vyrobeno ze dvou kusů - víka a tělesa samotného. Víko je uzpůsobeno tak, aby kopírovalo tvar koule. Zároveň je možné jím vést hřídel nutnou k fixaci osy rotace. Ze spodní strany má pak výstupky, které přesně zapadají do otvorů v tělese ventilu a je tak jednoduché těleso uzavřít.

Dalším prvkem je již zmíněná hřídel, ta má za úkol pouze fixaci osy rotace. V tomto případě byla využita hřídel která nemá upravený vyvedený konec k vizualizaci polohy ventilu (čistě válcová). To bylo shledáno jako nedostatek, a proto byla ve verzi 2 náležitě upravena. Samozřejmě je pak koule, do které je hřídel zasazena

Všechny zmíněné komponenty pak byly seskládány do jednoho celku a vznikla tak verze 1 pokročilého prototypu. Do otvorů v tělese bylo zasazeno 6 klasických plných elektromagnetů v polohách 45° , 90° a 135° a dva trubkové elektromagnety do polohy 0° . Celkem tedy 4 páry elektromagnetů, tak jako u koncepčního prototypu. Model celkové sestavy je uvedený na *obrázku 38*.

5.2.3 Testování verze 1 pokročilého prototypu

Během testování prototypu bylo nejdůležitější opět hledisko funkčnosti, tedy, zda prototyp funguje tak, jak má. Páry elektromagnetů byly nejprve připojeny jednotlivě ke zdroji stejnosměrného proudu a byla ověřována schopnost pohnout kouli každého z nich. Zde je situace poněkud složitější než tomu bylo u koncepčního prototypu. Vzhledem k různým parametrům a uspořádání cívek (nakonec i vzhledem k momentovým charakteristikám viz. *kapitola 4* není síla od jednotlivých elektromagnetů totožná a elektrický proud k vytvoření stejného silového působení je odlišný.

Vzhledem k větší těsnosti tělesa a tím spojeného vyššího tření je rovněž značně obtížnější docílit požadovaného pohybu. Bylo zjištěno, že kouli lze pohnout při velikosti elektrického proudu 5 až 6 A (matematický model byl tvořen pro napájení při 8 A) při napájení slabších elektromagnetů, tedy elektromagnetů s plným jádrem. Tato hodnota se tedy brala jako referenční při dalším

pokusu sekvenčním spínáním jednotlivých párů elektromagnetů.

K tomu byla znovu využita deska Arduino Uno s nadstavbou v podobě relé shieldu stejně tak, jako tomu bylo u koncepčního prototypu. Díky podobnosti obou provedení bylo možné použít totožný řídicí kód, tedy pro funkci ventilu při spínání 3 párů cívek s prodlevou 3s a pro funkci motoru rovněž s touto prodlevou.

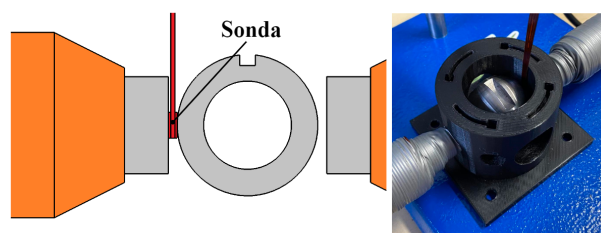
Během zkoušky funkce ventilu byla sestava napájena proudem 8 A tak, jak byl navržen matematický model. Zkouška byla úspěšná, kdy bylo docíleno žádaného pohybu. Během ní bylo rovněž učiněno několik závěrů. Prvním je, že velikost síly od trubkových elektromagnetů je vyšší, jak se předpokládalo. Nicméně má elektromagnet s trubkovým jádrem i další výhodu, a tou je, že dokáže kouli lépe dotočit a držet ji na správné pozici, neboli, koule se dotáčí téměř přesně do pozice 0° . Klasické elektromagnety s plným jádrem tuto schopnost postrádají. Z toho byl odvozen tedy další závěr, a to ten, že při zmíněných výhodách trubkových elektromagnetů by bylo výhodné umístit další pár do polohy 90° . V tom případě by aktuátor dokázal s jistotou udržet dvě nejdůležitější polohy ventilu, tedy otevřeno a zavřeno. Z tohoto faktu pramení rovněž provedení verze 2 pokročilého prototypu.

Byl rovněž proveden test pro funkci motoru. Kouli je opět možno rotovat, tak jako u koncepčního prototypu, nicméně vlivem rozdílných parametrů elektromagnetů je rotace méně hladká a časování spínání jednotlivých elektromagnetů je složitější. Z důvodu zaměření práce na aktuátor pro kulový ventil byla další pozornost zaměřena pouze na funkci ventilu.

Na verzi 1 pokročilého prototypu byla provedena zkouška, při které se měřila hodnota magnetické indukce na povrchu koule, a to z důvodu značně jednoduššího přístupu ke kouli, než je tomu u verze 2. Magnetická indukce byla měřena za pomoci jednodimenzionální sondy s Halloovým senzorem teslametru Elimag MP-1 přiložené ve středu koule k jejímu povrchu. Nákres situace a fotografie prováděného experimentu je na *obrázku 39*. Nákres je pouze ilustrativní, sonda je v realitě velice tenká a bylo možné ji vložit do tělesa - v nákresu je sonda znázorněna červenou barvou.

Proměřováno bylo jak působení páru trubkových elektromagnetů, tak působení páru klasických elektromagnetů s plným jádrem, a to při napájecím proudu od 2 do 12 A. Výsledky měření jsou uvedeny v *tabulce 2*. Výsledky jsou rovněž vykresleny v grafu na *obrázku 40*.

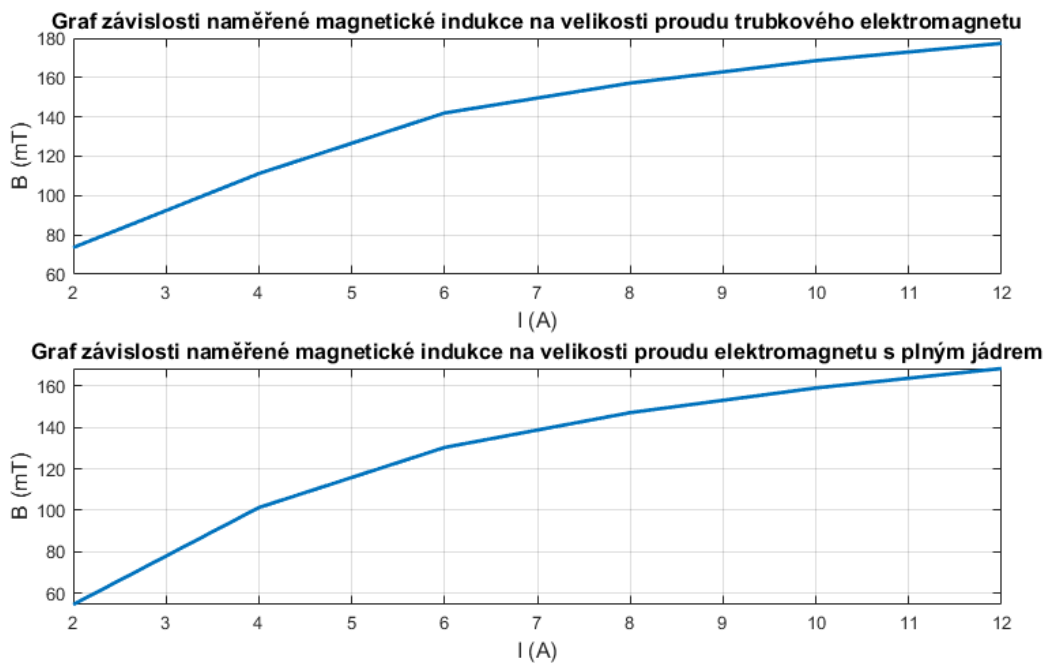
Z grafu je patrné, že se jedná přibližně o logaritmickou závislost, což by mohlo značit postupné přesycování materiálů feromagnetických jader. Nicméně je zřejmé, že s vyšším proudem roste



Obrázek 39: Nákres a fotografie sestavy pro měření magnetické indukce

I (A)	2	4	6	8	10	12
B (mT) - trubkové	73,6	111,2	142	157,2	168,6	177,4
B (mT) - plné	54,5	101,3	130,3	147,1	159	168,4

Tabulka 2: Tabulka naměřených hodnot magnetické indukce v závislosti na napájecím proudu elektromagnetů



Obrázek 40: Grafy naměřených závislostí magnetické indukce

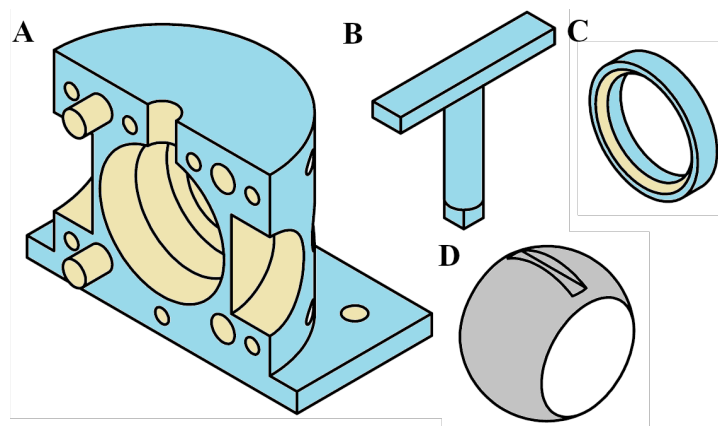
magnetická indukce na povrchu koule a s ním by s největší pravděpodobností měla růst i působící síla. To je ověřeno experimentem v následujících kapitolách testování 2. verze prototypu.

5.2.4 Realizace verze 2 pokročilého prototypu

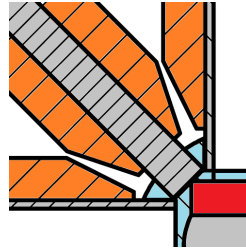
Jak již bylo zmíněno, verze 2 je oproti verzi 1 odlišná uspořádáním elektromagnetů. To je výhodné zejména díky silovému působení trubkového elektromagnetu. Další výhodou, kterou toto uspořádání nabízí je potenciální možnost regulace průtoku dvou tekutin, přičemž první tekutina teče kanálem napojeným na elektromagnety v poloze 0° a druhá tekutina teče kanálem napojeným na elektromagnety v poloze 90° . V praxi to znamená, že při otevření jednoho kanálu je druhý zavřený a naopak. Použití by se pak nabízelo například v dávkovačích dvou různých tekutin.

Rozložení elektromagnetů však není jediný rozdíl. Aby bylo těleso co nejvíce těsné a bylo možné provést test těsnosti prototypu, bylo nutné vymyslet způsob, jak do tělesa přidat těsnění používaná u klasických kulových ventilů. Jedná se o teflonové kroužky, které přiléhají na kouli na vstupu a výstupu z tělesa ventilu. Kroužky jsou uvedeny na *obrázku 41* společně s dalšími konstrukčními díly.

Aby byla operace s kroužky co nejjednodušší, bylo upraveno těleso ventilu tak, že se nyní skládá ze dvou půlek, přičemž odpadá nutnost použití víka. Kroužky je nutné zasadit do části, odkud se přivádí tekutina a odkud se odvádí tekutina - je nutné v těchto částech odebrat materiál, aby se na tato konkrétní místa kroužky vtěsnaly. To však způsobuje problém s elektromagnety na pozicích 45° a 135° , tedy v místech, kde jsou do tělesa zasazeny páry elektromagnetů s plným jádrem. Z důvodu umístění těsnění tak bylo vynuceno vysunutí elektromagnetů o 1 až 1,5 mm dále z otvoru v tělese a tedy zvýšení vzduchové mezery na 3 až 3,5 mm, jak je rovněž patrné z řezu na *obrázku 42*, kde je odebraný prostor pro umístění těsnění označen červenou barvou. To by však nemělo působit větší problémy z hlediska funkčnosti, jelikož elektromagnety jsou na těchto místech zejména z důvodu pomoci pohybu z poloh 0° (zavřeno) a 90° (otevřeno) a není tak od nich vyžadováno takové silové působení jako od trubkových elektromagnetů.



Obrázek 41: Konstrukční části verze 2 pokročilého prototypu: A) Polovina tělesa, B) Hřídel, C) Těsnící kroužek z teflonu, D) Feromagnetická koule



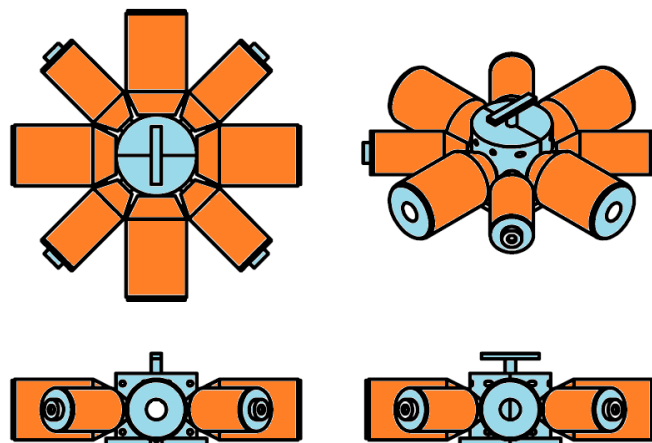
Obrázek 42: Vizualizace konstrukční úpravy z důvodu přidání těsnění

V tělese jsou pak dále udělány otvory, kterými je možné vést závitové tyče a sešroubovat tak dvě poloviny tělesa k sobě. Dalšími prvky jsou samozřejmě feromagnetická koule a hřídel. Ta je nyní provedena s upraveným koncem, aby bylo možné detekovat stav ventilu.

Všechny komponenty byly sestaveny do tělesa, kdy nejprve byla zasazena těsnění do obou půlek tělesa, následně byla uložena koule a až poté bylo možné sešroubovat obě půlky tělesa pomocí závitových tyčí a matek. Příslušné elektromagnety byly umístěny do otvorů po obvodu tělesa - tedy ještě jednou: Dva páry trubkových elektromagnetů v polohách 0° a 90° a dva klasické páry elektromagnetů s plným jádrem v polohách 45° a 135° . Celková sestava je znázorněna na obrázku 43.

5.2.5 Testování verze 2 pokročilého prototypu

Prvotní testování verze 2 pokročilého prototypu probíhalo velice podobným způsobem jako testování verze 1. V tomto případě nebyla ověřována funkce motoru, ale bylo zacíleno čistě na funkci ventilu. Nejprve však byly znovu nejprve otestovány jednotlivé elektromagnety samostatně připojením na regulovatelný stejnosměrný zdroj z důvodu subjektivního posouzení působící síly na feromagnetickou kouli. Zejména byly testovány páry elektromagnetů s plnými jádry v na pozicích 45° a 135° a byly sledovány následky drobného vysunutí elektromagnetů z důvodu konstrukční úpravy tělesa. Vzhledem k větší hodnotě tření kvůli přidanému těsnění a oddálení elektromagnetů byl minimální napájecí proud potřebný k funkci stanoven na 8 A.



Obrázek 43: Celková sestava verze 2 pokročilého prototypu

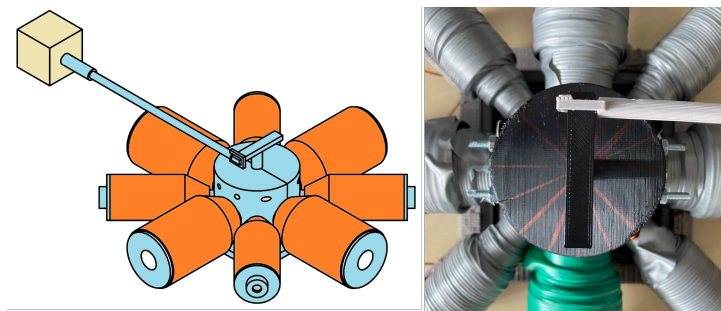
Prvotní ověření proběhlo úspěšně přičemž bylo zjištěno, že síla tvořená zmíněnými páry elektromagnetů by měla být dostatečná k minimálnímu natočení koule. Dále bylo možné přejít k testu funkce ventilu. K tomu byla znovu využita deska Arduino Uno s příslušným relé shieldem. Byl použit původní kód s prodlevami mezi sepnutím následujícího páru elektromagnetů 3 s. V průběhu testu bylo patrné, že páry elektromagnetů na pozicích 45° a 135° plní pouze funkci drobného natočení a elektromagnety na pozicích 0° a 90° jsou pak působící silou schopny kouli dotočit do příslušné polohy a v ní ji držet. Test byl tedy proveden úspěšně, nicméně při dalším testování došlo k vyhoření jednoho z relé relé shieldu (max proud 10 A nebyl překročen), a to zřejmě vlivem přepětí zapříčiněného vysokou indukčností trubkových elektromagnetů.

Indukčnost elektromagnetů je v případě řízení velice nepříjemnou vlastností, jelikož může dojít právě k poškození součástek. Řízení bude muset být v budoucím vývoji aktuátoru zařízeno příslušnou navrženou elektronikou, která bude na tyto jevy konstruována. Další nabízející se zkouškou je tedy měření indukčnosti L (H) a odporu R (Ω) elektromagnetů. Měření probíhalo pomocí RLC metru, přičemž bylo vždy proměřováno sériové zapojení dvou elektromagnetů - tedy provozní uspořádání. Pro pár trubkových elektromagnetů je naměřená indukčnost 20,94 mH a odpor 4,18 Ω a pro pár klasických elektromagnetů s plným jádrem je indukčnost 4,7 mH a odpor 1,2 Ω . Z výsledků je zřejmá 4 až 5x vyšší indukčnost elektromagnetů s trubkovým jádrem. To lze odůvodnit vyšším počtem závitů a větším průměrem induktoru, kdy je známo, že s větším průměrem roste indukčnost. Jak již bylo zmíněno, na tyto parametry bude nutné brát zřetel při budoucím návrhu elektroniky.

Dalším provedeným testem na tomto prototypu bylo měření působící síly. K měření byl využit siloměr Omega DFG60-110 měřící sílu v kilogramech, které se následně přepočítávají na sílu F (N) vynásobením hmotnosti m (kg) gravitačním zrychlením g (m s^{-2}) podle vzorce (12). Siloměr má měřící hrot, který obsahuje závit, a proto bylo nutné navrhnout mezistupeň (táhlo), aby byl na jednom ze svých konců připojitelný na siloměr a na druhém konci připojitelný k hřídeli ventilu. Připojení k ventilu je provedeno čistě zaháknutím táhla za hřídel. Nákres a fotografie soustavy jsou uvedeny na obrázku 44. Žlutý box v nákresu znázorňuje siloměr.

$$F = m \cdot g \quad (12)$$

Na fotografii si lze rovněž všimnout narýsovaných čar fixem na vrchní straně tělesa, které sloužily



Obrázek 44: Nákres a fotografie soustavy pro měření síly

$\alpha(^{\circ})$	F (N) pro $I = 8$ A	F (N) pro $I = 10$ A	F(N) pro $I = 12$ A
90	0	0	0
67,5	-0,6 až -0,8	-0,8 až -0,9	-0,9 až -1
45	-0,5 až -0,6	-0,6 až -0,7	-0,8 až -0,9
22,5	-0,2	-0,2 až -0,3	-0,2 až -0,3
0	0	0	0
-22,5	0,1 až 0,2	0,1 až 0,3	0,2 až 0,4
-45	0,5	0,5 až 0,7	0,7 až 0,9
-67,5	0,6 až 0,7	0,8 až 0,9	0,8 až 1,1
-90	0	0	0

Tabulka 3: Tabulka naměřených hodnot sil pro trubkové elektromagnety v závislosti na úhlu natočení

F (N) pro $I = 8$ A	F (N) pro $I = 10$ A	F(N) pro $I = 12$ A
0,1 až 0,2	0,2 až 0,3	0,2 až 0,4

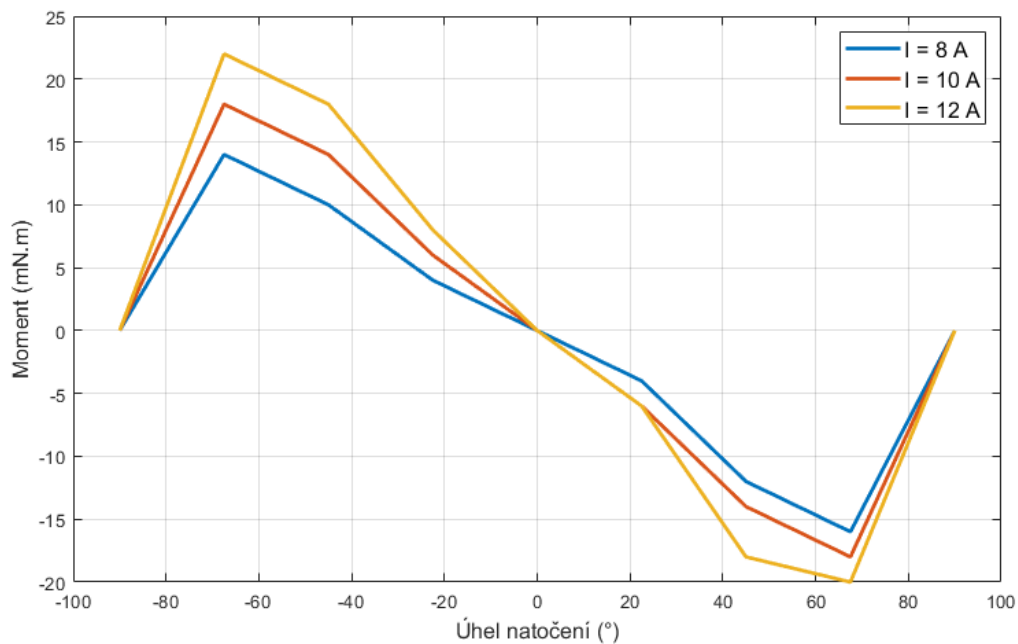
Tabulka 4: Tabulka naměřených hodnot maximálních sil pro elektromagnety s plným jádrem

jako indikace polohy ventilu. U trubkových elektromagnetů měření probíhalo v úhlech natočení -90° až 90° s krokem $22,5^{\circ}$, přičemž 0° značí polohu ventilu uzavřeno tak, jak bylo definováno v kapitole 4. Pro elektromagnety s plným jádrem byla měřena pouze maximální síla, která přibližně odpovídá úhlům natočení koule, ze kterých musí elektromagnety kouli minimálně pohnout - tedy polohám otevřeno/zavřeno. Měření bylo 3x opakováno pro hodnoty proudu 8 A, 10 A a 12 A. Hodnoty síly při působení trubkových elektromagnetů jsou uvedeny v tabulce 3 a hodnoty síly pro elektromagnety s plným jádrem v tabulce 4.

Z výsledků je zřejmý rozptyl naměřených hodnot. To je zapříčiněno možnou nepřesností měření, jelikož použitý siloměr je až na rozsah 1 kN a není tak přímo stavěn na měření nízké hodnoty působící síly. Bohužel nebyl k dispozici citlivější přístroj, a tak lze tyto výsledky považovat alespoň za orientační, přičemž při jejich vykreslení v hodnotách působícího momentu M na obrázku 45 je patrná podobnost s momentovými charakteristikami uvedenými v kapitole 4. Pro výpočet a vykreslení působícího momentu byly vybrány maximální hodnoty sil z naměřeného rozsahu.

Velikost momentu M (Nm) se z naměřené síly F (N) dostane vynásobením právě hodnoty síly velikostí ramena r (m) - tedy vzdáleností od středu rotace, jak je definováno rovnicí (13). V tomto případě je siloměr uchycen pomocí táhla na hřídeli ve vzdálenosti 2 cm od středu rotace, proto hodnota $r = 0,02$ m. Při dosažení maximální naměřené síly při úhlu natočení $\alpha = -67,5^{\circ}$ a napájecím proudem 8 A, tedy $F = 0,8$ N, lze dostat hodnotu momentu $M = 16$ mNm. Při porovnání této hodnoty s hodnotou získanou matematickým modelem (28 mNm) je patrné, že naměřená hodnota je nižší oproti teoretické. To může být zapříčiněno již zmíněnou nepřesností měření, třením, které v modelu není uvažováno a případně i magnetickými charakteristikami reálných materiálů, které byly použity jak pro feromagnetická jádra, tak pro kouli. V dalším postupu se tedy nabízí vylepšit matematické modely reálnými charakteristikami materiálů.

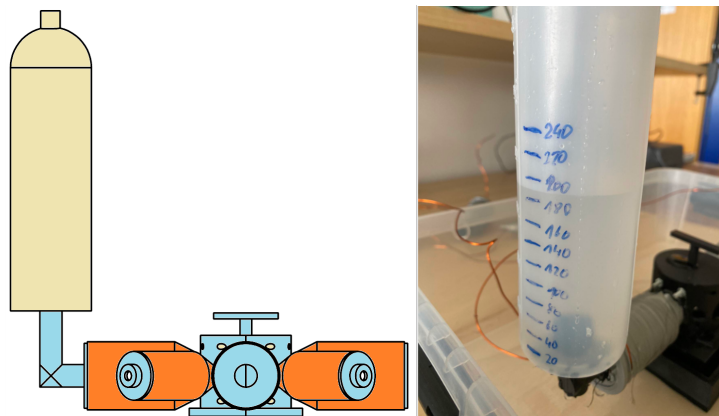
$$M = F \cdot r \quad (13)$$



Obrázek 45: Graf naměřené síly v závislosti na úhlu natočení

Tímto způsobem byla proměřena velikost síly, která se blíží momentové charakteristice zjištěné matematickým modelováním. Posledním provedeným testem na tomto prototypu byl test těsnosti testovací soustavy a zejména pak tělesa. Těsnost je předpoklad k tomu, aby bylo možné dále v budoucnu provádět experimenty pod zatížením. Aby byl prototyp co nejvíce těsný, byl k tělesu epoxidovým lepidlem přilepen pár trubkových elektromagnetů tvořící kanál.

Aby bylo dále možné vytvořit tlak v kanálu, musel se navrhnout přípravek, ve kterém by se dal vytvořit vodní sloupec tlačící kapalinu směrem k tělesu. Pro tyto účely byla navržena trubka tvořící koleno, na kterou lze následně připojit nádobu zadržující kapalinu - v tomto případě vodu. Nákres uskupení a fotografie vytvořeného přípravku v průběhu měření je uvedena na *obrázku 46*. Na nádobě jsou nakresleny rysky sloužící ke zjištění objemu kapaliny, která se v ní nachází. V konečném důsledku je však nutné znát zejména výšku vodního sloupce, a tak rysky sloužily zároveň jako vodící čáry k měření výšky.



Obrázek 46: Nákres a fotografie sestavy pro měření těsnosti

Měření probíhalo tak, že se ventil uvedl do polohy zavřeno a následně se začala pomalu plnit nádoba vodou do doby, dokud nedošlo k porušení těsnosti. Při prvním otestování byla porušena těsnost při výšce vodního sloupce 5 cm, přičemž byla porušena v místě připojení přípravku k trubkovému elektromagnetu. Bylo tedy nutné toto spojení znovu a lépe zatěsnit.

Při druhém pokusu již bylo vše těsné až na drobné prosakování v totožném místě. Drobné prosakování však bylo tolerováno, jelikož byla snaha zjistit zejména těsnost prototypového tělesa. To vydrželo až do výšky vodního sloupce 12 cm, kdy při překročení této hodnoty začala voda vytékat otvorem pro hřídel - stále se však nedostala k výstupnímu otvoru. Z toho lze učinit závěr, že by mohlo být v budoucím vývoji výhodou vytvořit těleso zcela uzavřené, přičemž se zvýší těsnost soustavy.

Díky znalosti velikosti vodního sloupce h (m) lze dopočítat podle vzorce (14) hodnotu hydrostatického tlaku p (Pa). Zbylé parametry rovnice jsou hustota vody ρ (kg m^{-3}), která je rovna 997 kg m^{-3} a gravitační zrychlení g (m s^{-2}) jehož uznaná hodnota v České republice je $9,81 \text{ m s}^{-2}$. Dosazením do rovnice se získá velikost hydrostatického tlaku $p = 1,173 \text{ kPa}$.

$$p = h \cdot \rho \cdot g \quad (14)$$

Jedná se o velmi nízkou hodnotu tlaku, přičemž je třeba mít stále na paměti, že se jedná pouze o prototypové těleso vyrobené metodou 3D tisku a není tak materiál zcela vyhlazen a utěsněn. Kvůli tomuto faktu pak těsnění nepřiléhá celé na těleso (plast na plast) a tvoří se mikrokanály, kterými může tekutina protékat. Proto bylo předpokládáno, že těsnost bude velice malá, případně vůbec žádná. Výsledek byl tedy považován za úspěch stejně jako celé testování verze 2 pokročilého prototypu a po vytvoření nové řídicí elektroniky je prototyp připraven na základní test pod zatížením.

6 Závěr

Hlavním cílem předkládané diplomové práce byl návrh prototypu plně elektromagnetického aktuátoru pro kulový ventil. V jejím textu byly nejprve představeny různé druhy ventilů a jejich současné způsoby aktuace. Následně byl představen výchozí stav vývoje aktuátoru. V další části byla definována jeho koncepce společně s principem. V předposlední části byly popsány matematické modely využívané pro návrh a ověřování parametrů prototypů. Poslední část nabízí popis jejich výroby a základního experimentálního ověření funkčnosti.

V průběhu práce byly splněny všechny kladené dílčí cíle počínaje návrhem podoby aktuátoru a konče úspěšným experimentálním ověřením s určením vybraných parametrů a charakteristik prototypů. Konkrétněji byla definována podoba, princip a způsob řízení aktuátoru, nebo představeny 2 funkční módy aktuátoru, a to funkce ventilu a funkce motoru. Matematický model byl v jednotlivých oblastech popsán rovnicemi ze kterých je možné vycházet v každých dalších matematických modelech případných navazujících prototypů. Jejich výsledkem byly momentové charakteristiky, které upřesňují silové působení v průběhu otáčení koule. Na základě koncepce a výsledků matematických modelů byly navrženy a vyrobeny prototypy aktuátorů a odpovídajících konstrukčních částí. Tyto prototypy byly následně podrobeny experimentům, které měly ověřit jejich funkčnost a definovat jejich parametry. Například lze uvést pohybovou studii koncepčního prototypu či měření působící síly u pokročilého prototypu.

V průběhu návrhu a výroby byly diskutovány nedostatky prototypů, na které je nutné se v budoucím vývoji zaměřit. Navržená koncepce prokázala, že je možné řídit polohu ventilu daným uspořádáním elektromagnetů. Nicméně by bylo vhodné se v budoucím vývoji aktuátoru zaměřit na rozložení a počet elektromagnetů po obvodu koule, kdy by se přidáním určitého počtu dalších párů mohl vyhladit průběh otáčení a bylo by tak možné otáčení více kontrolovat. To by v konečném důsledku mohlo znamenat i nárůst počtu poloh ventilu (ne jen otevřeno/zavřeno).

Dále je nutné se zaměřit na zdokonalení matematických modelů a optimalizaci elektromagnetů. U modelů by zdokonalení přineslo přidání reálných charakteristik materiálů feromagnetických jader elektromagnetů a koule, kdy nyní bylo využíváno materiálu z knihovny simulačního softwaru COMSOL *Low Carbon Steel Soft Iron*. Při zadání těchto charakteristik by následně bylo možné zpětně navrhnout aktuální elektromagnety a jejich návrh optimalizovat.

Prostor na zlepšení je rovněž u fyzických prototypů aktuátoru a konstrukčních částí. Těsnost prototypového tělesa je hlavním kritériem správné funkce ventilu. Z experimentu vyplývá, že těleso dokáže utěsnit tlak vody rovný přibližně 1,2 kPa. To je velmi malá hodnota, avšak vzhledem k okolnostem a způsobu výroby tělesa je vcelku uspokojivá. Ke zvýšení těsnosti by v budoucnu mohla přispět plně uzavřená konstrukce tělesa, přičemž by hřídel byla zabudovaná v tělese, nebo by případně byla řešena fixace osy rotace jiným způsobem - například konstrukcí koule či fixací permanentními magnety. Další možností je samozřejmě možná externí výroba prototypového

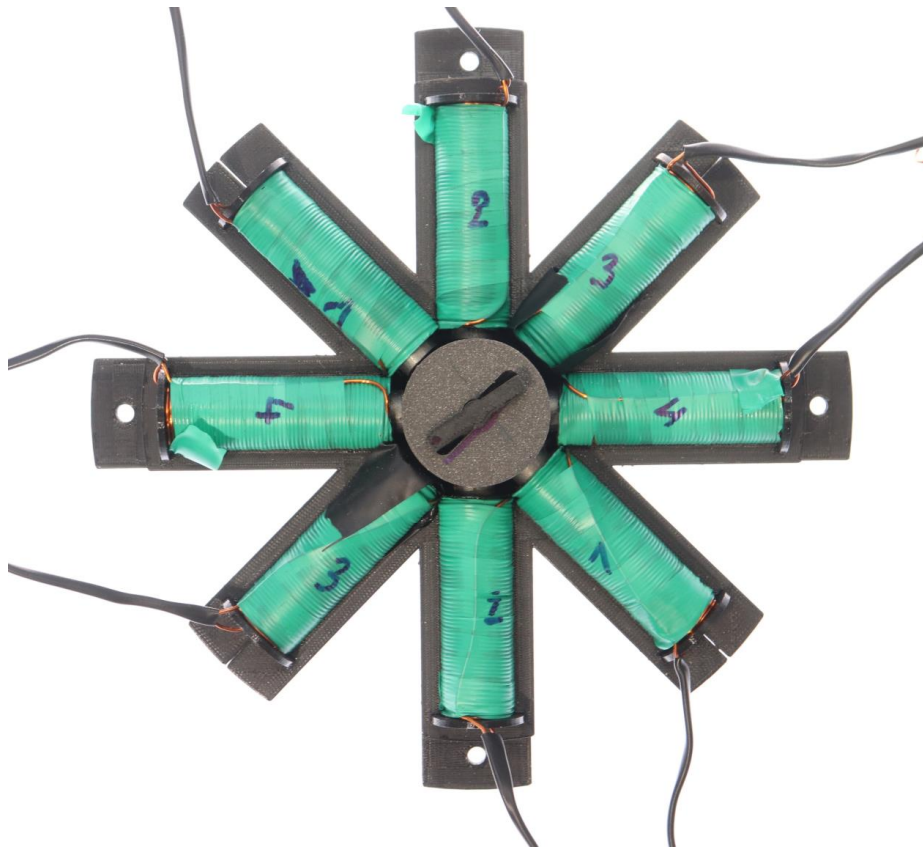
tělesa z nemagnetického kovu, kde by bylo docíleno vyhlazenosti povrchů, na které doléhá těsnění ventilu a zamezilo by se tak tvorbě mikrokanálů.

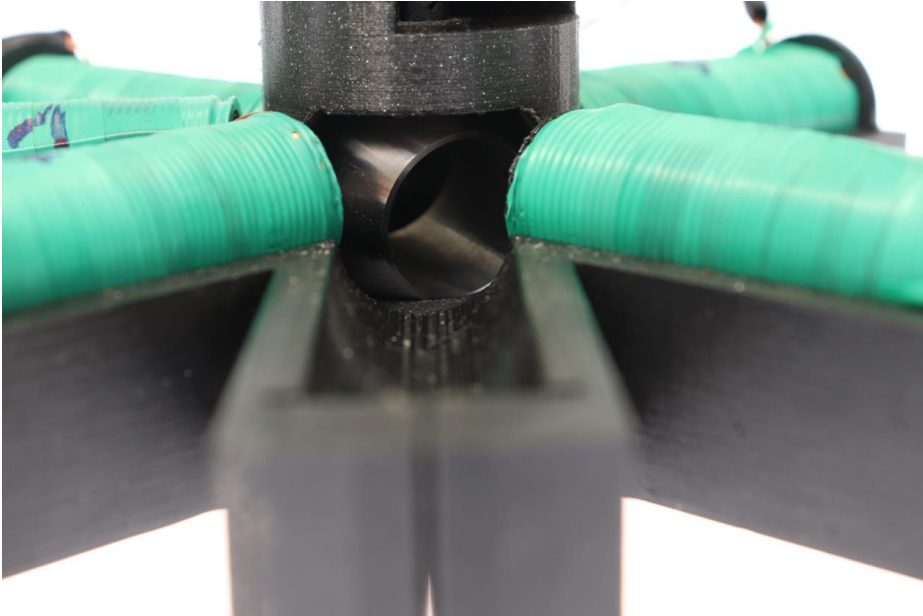
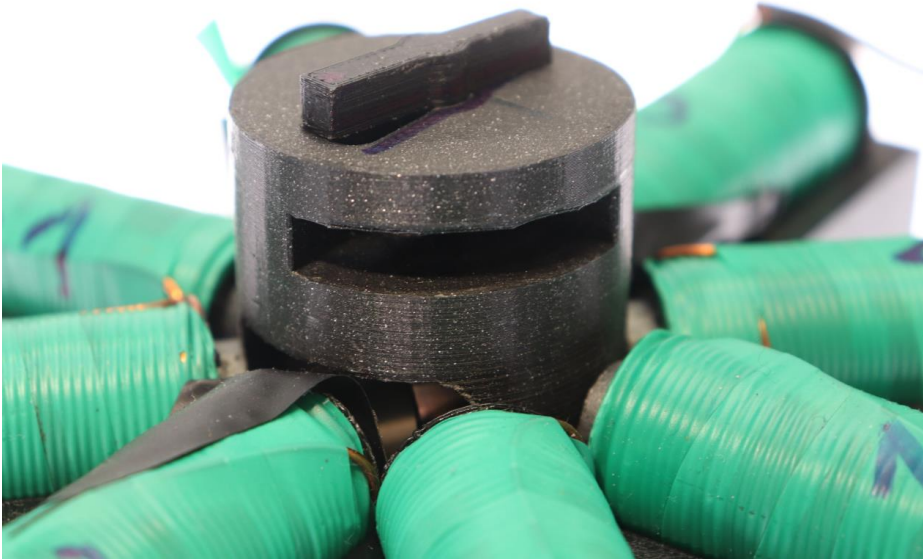
Těmito (a ne jen těmito) výzvami by se měl tedy ubírat směr budoucího vývoje. Cesta k nasazení aktuátoru v reálných aplikacích je dlouhá, avšak postupnými kroky je možné docílit daného cíle. Navržený koncept a prototypy aktuátoru prokázaly, že je možné řídit polohu kulového ventilu bezkontaktně magnetickým polem a má tak smysl se tímto řešením dále zabývat, cíl diplomové práce byl tak splněn. Aktuátor by se mohl uplatnit například v aplikacích, kde je požadována rychlá odezva na řídicí signál, či v aplikacích, kde je podmínka zamezení úniku regulované tekutiny do okolního prostředí.

Seznam použité literatury

- [1] D. Šmucr, *Plně elektromagnetický kulový ventil*. Západočeská Univerzita v Plzni, 2020. URL: <http://hdl.handle.net/11025/41730> (cit. 28.02.2021).
- [2] *Introduction to Globe Valve*. URL: <https://www.theprocesspipng.com/introduction-to-globe-valve/> (cit. 12.01.2023).
- [3] *Zpětné ventily a filtry*. URL: <https://www.tubes-international.cz/produkty/prumyslove-armatury/prumyslove-ventily/zpetne-ventily-a-filtry/> (cit. 10.01.2023).
- [4] *Zpětné ventily a filtry*. URL: <https://www.tubes-international.cz/produkty/prumyslove-armatury/prumyslove-ventily/zpetne-ventily-a-filtry/> (cit. 10.01.2023).
- [5] *Introduction to Globe Valve*. URL: <https://www.theprocesspipng.com/introduction-to-globe-valve/> (cit. 12.01.2023).
- [6] *What is a gate valve used for?* URL: <https://www.hawle.com/en/hawle-knowledge/basics/what-is-a-gate-valve/> (cit. 15.01.2023).
- [7] D. Šmucr, M. Vítek, F. Mach a K. Pospíšil, „Non-contact Electromagnetic Actuator for a Ball Valve,“ in *2021 22nd International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering (CPEE)*, 2021, s. 1–5. DOI: [10.1109/CPEE54040.2021.9585201](https://doi.org/10.1109/CPEE54040.2021.9585201).
- [8] C. Wen-zhi, Z. Tian-yang, J. Dan a Y. Ping, „Analysis of magnetic force of electromagnet ball valve during pipeline hydraulic transients,“ in *2015 International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM)*, 2015, s. 1113–1117. DOI: [10.1109/FPM.2015.7337285](https://doi.org/10.1109/FPM.2015.7337285).
- [9] *What is a Pneumatic Actuator?* URL: <https://instrumentationtools.com/what-is-a-pneumatic-actuator/> (cit. 10.02.2021).
- [10] *What is a Hydraulic Actuator?* URL: <https://instrumentationtools.com/what-is-a-hydraulic-actuator/> (cit. 10.02.2021).
- [11] *Electrical Actuators*. URL: <https://instrumentationtools.com/electrical-actuators/> (cit. 12.02.2021).
- [12] M. Vítek, „Řídící jednotka kulového ventilu,“ *Elektrotechnika a informatika*, s. 153–156, 2019.
- [13] *Chytrý ventil*. URL: <https://www.chytryventil.cz> (cit. 15.02.2021).
- [14] *Advantages and Disadvantages of Valve Actuators*. URL: <https://instrumentationtools.com/advantages-and-disadvantages-of-valve-actuators/> (cit. 15.02.2021).
- [15] *What is a Electric Solenoid Actuator?* URL: <https://instrumentationtools.com/electric-solenoid-actuator/> (cit. 10.02.2021).
- [16] *Tracker Video Analysis and Modeling Tool*. URL: <https://physlets.org/tracker/> (cit. 25.05.2021).

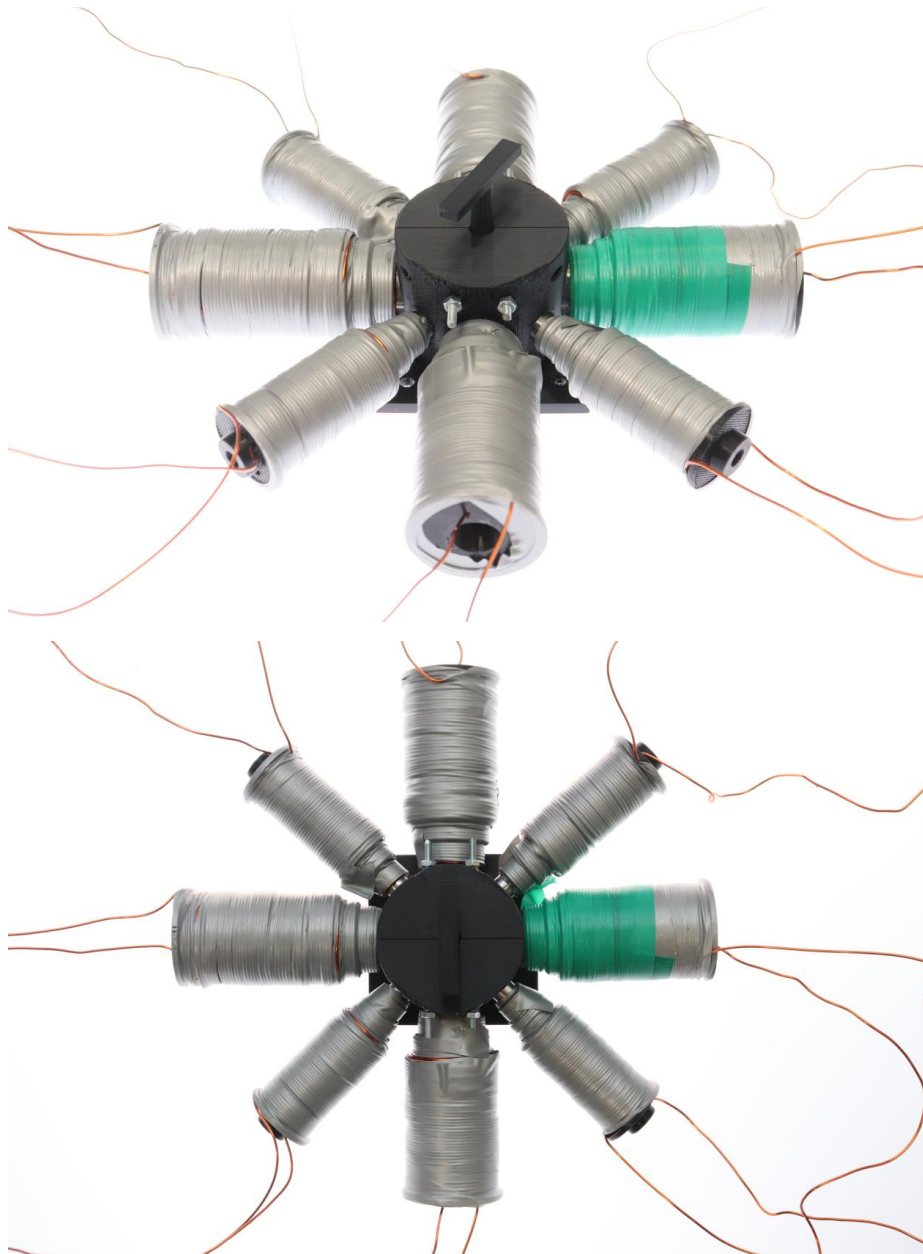
Příloha A - Fotografie koncepčního prototypu



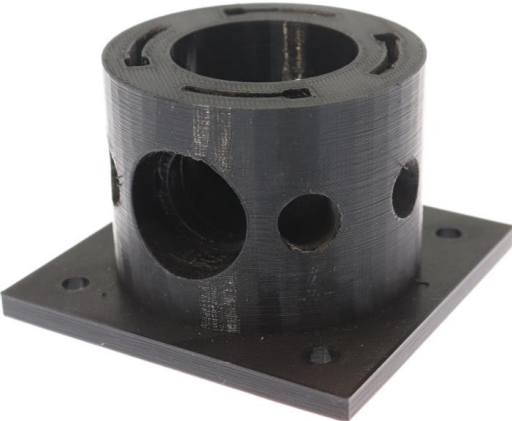




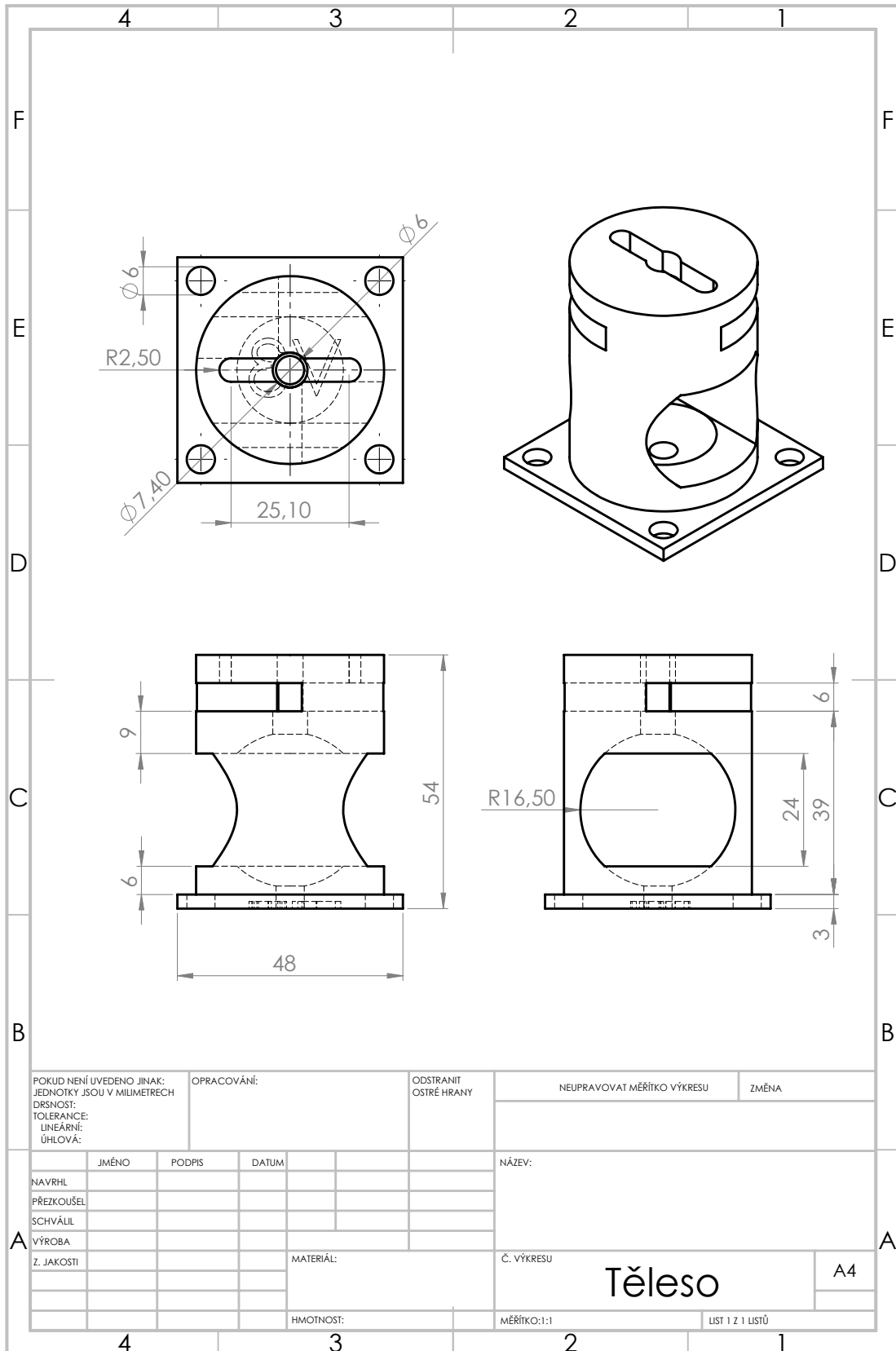
Příloha B - Fotografie pokročilého prototypu

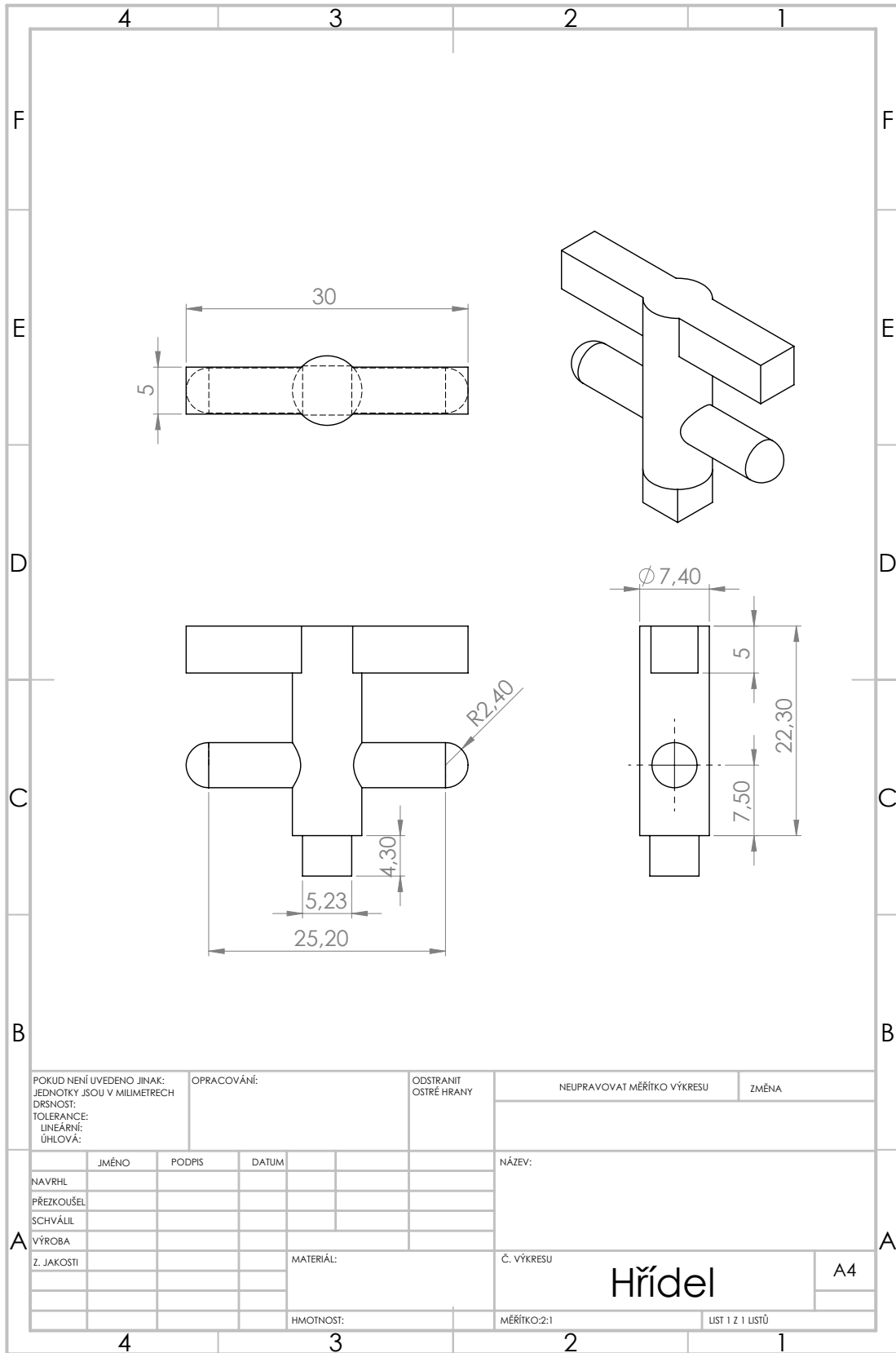


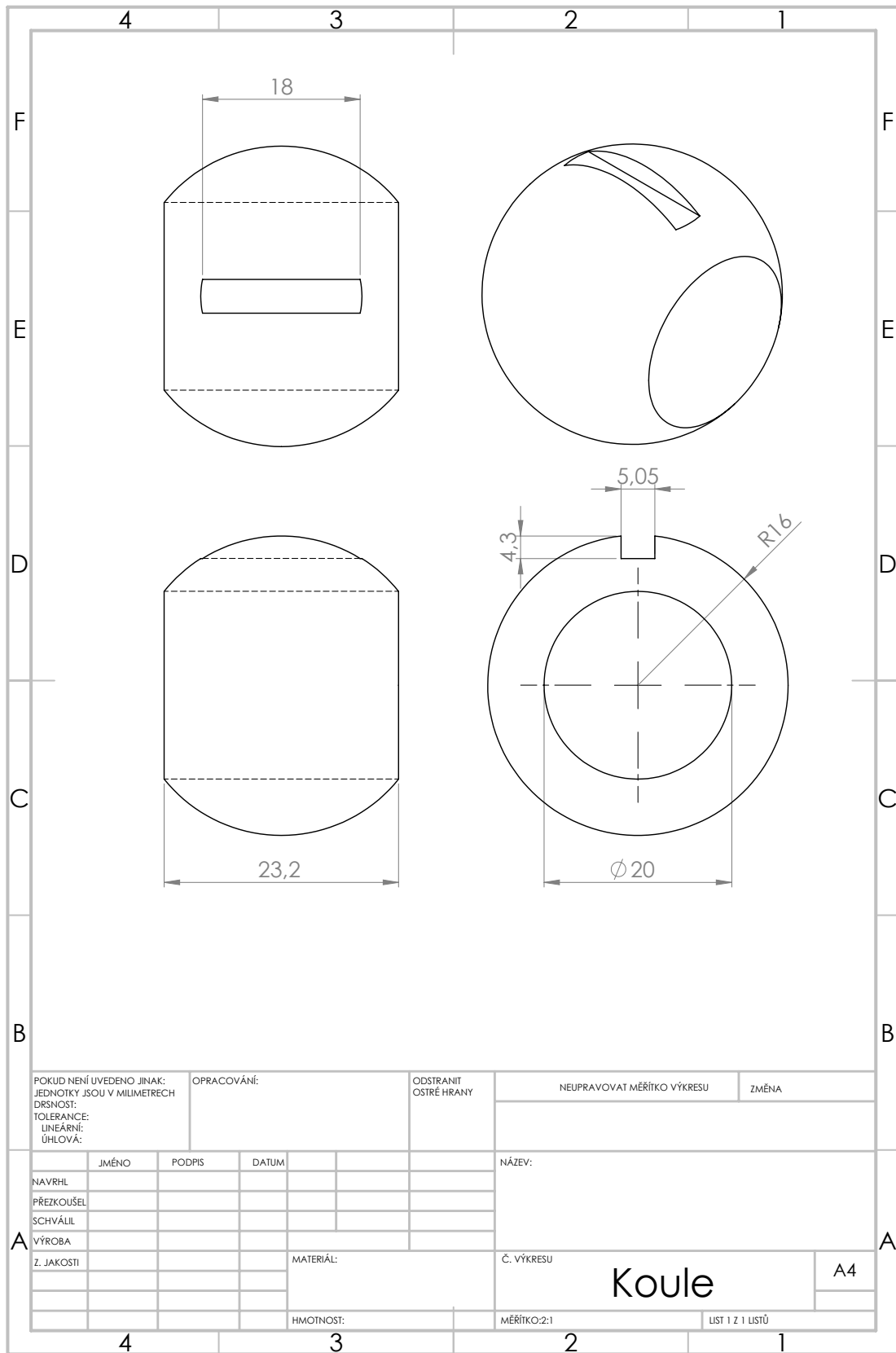




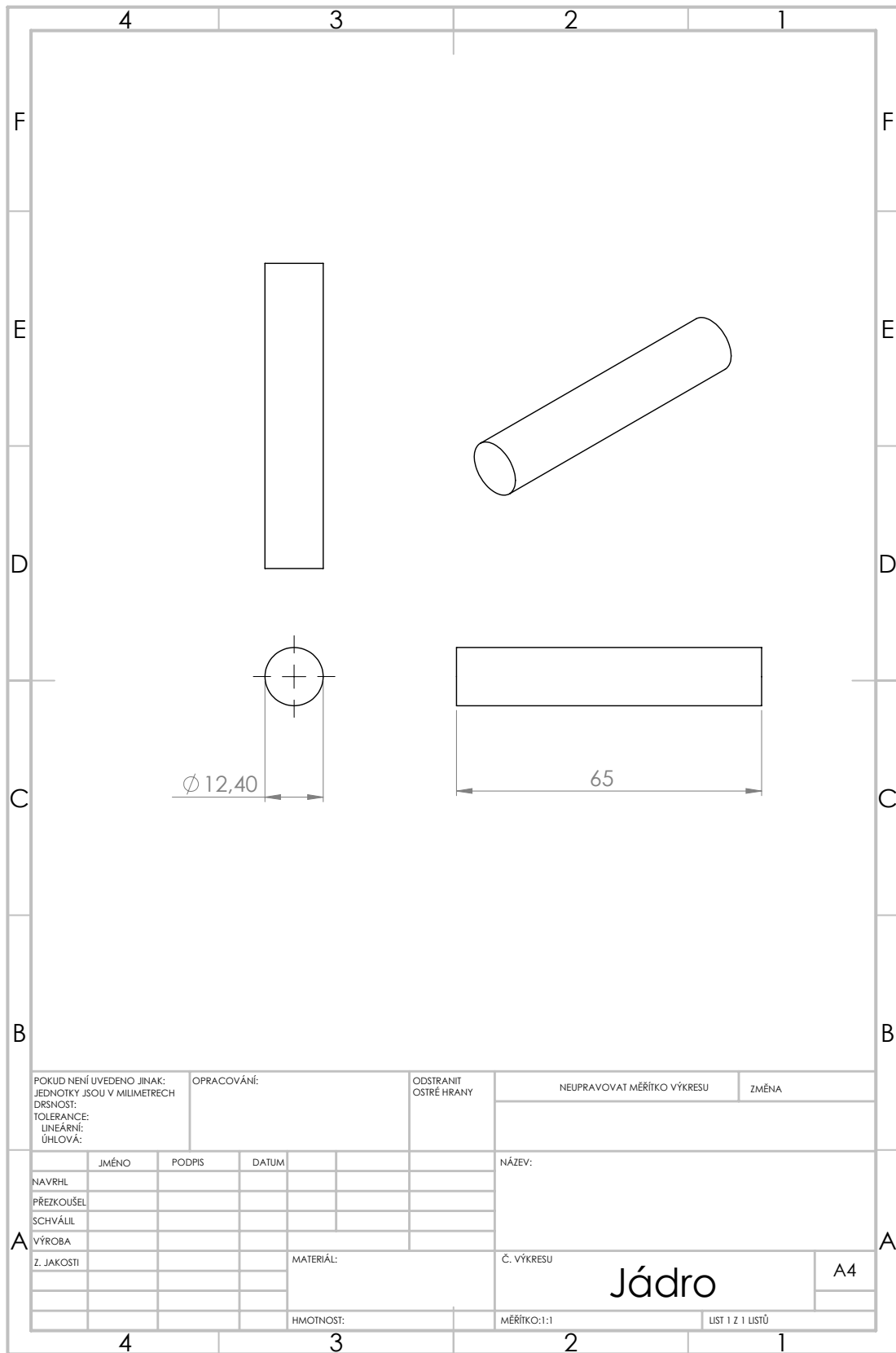
Příloha C - Výkresy koncepčního prototypu

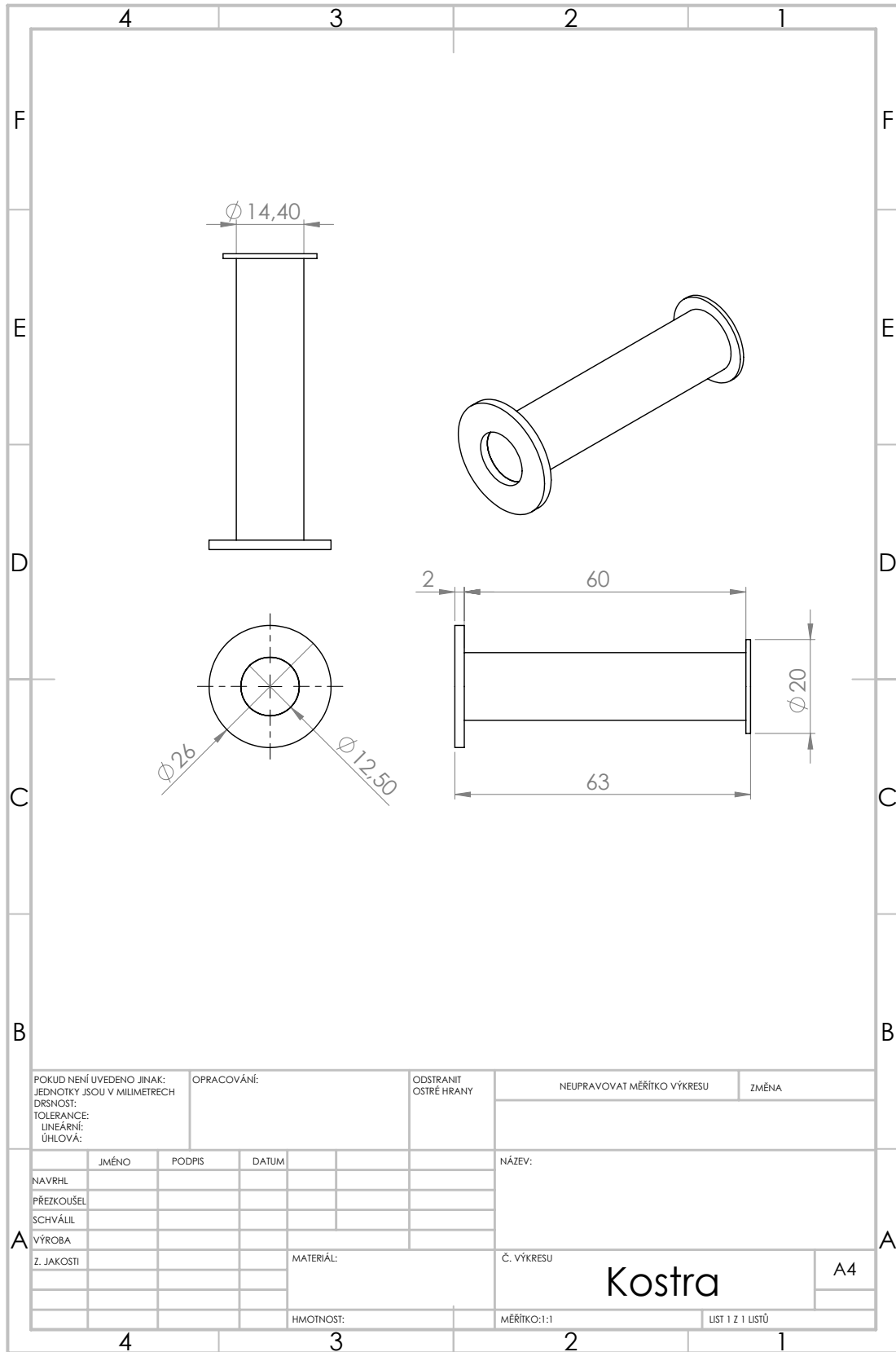


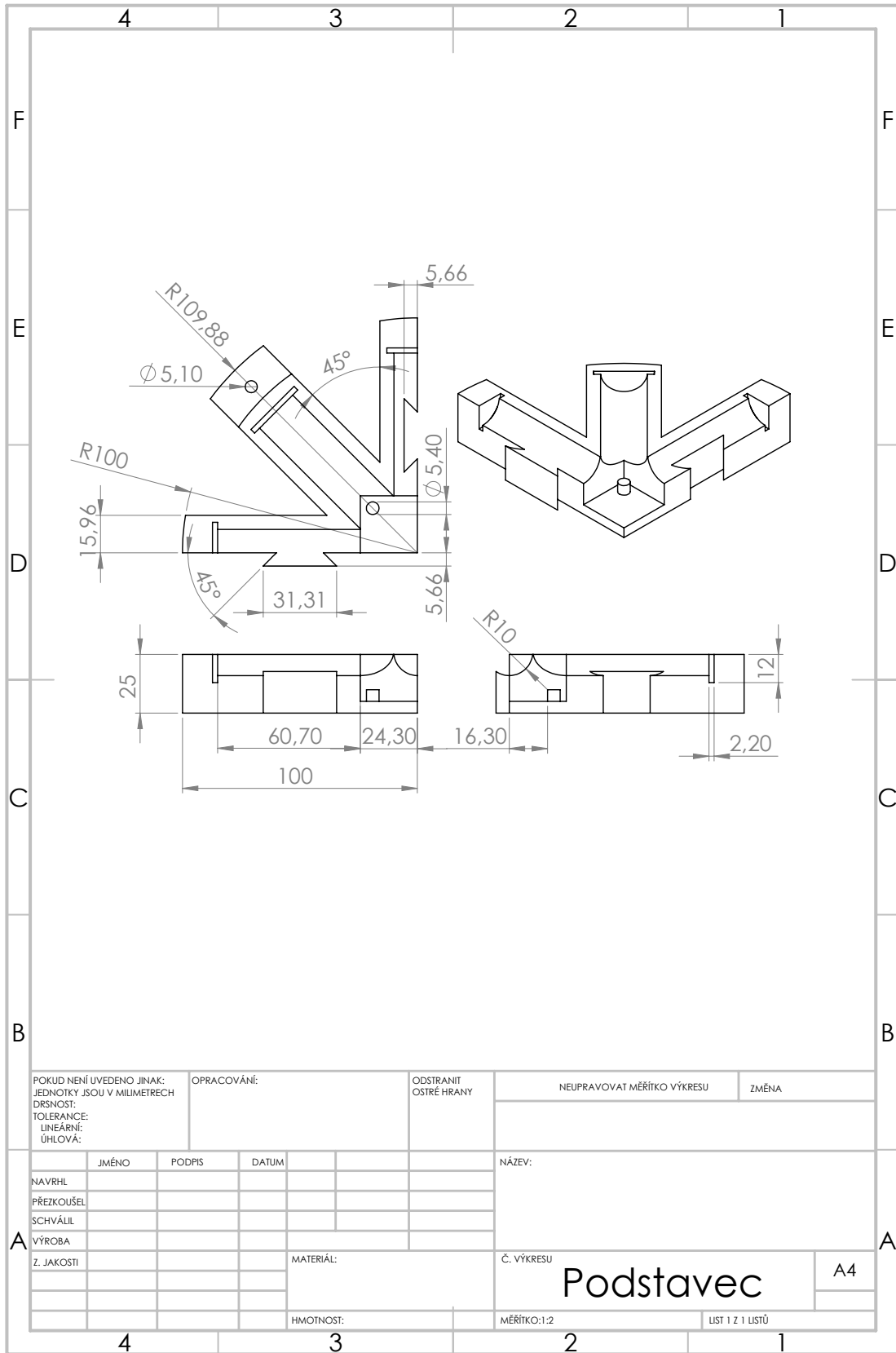




POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY	NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU	ZMĚNA
DRSNOST:						
TOLERANCE:						
LINEÁRNÍ:						
ÚHLOVÁ:						
	JMÉNO	PODPIS	DATUM		NÁZEV:	
NAVRHL						
PŘEZKOUŠEL						
SCHVÁLIL						
VÝROBA					Č. VÝKRESU	
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:	Koule	
				HMOTNOST:	MĚŘÍTKO:2:1	LIST 1 Z 1 LISTŮ







POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÍ:		ODSTRANIT OSTRÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:									
TOLERANCE:									
LINEÁRNÍ:									
ÚHLOVÁ:									
NAVRHL		JMÉNO	PODPIS	DATUM	NÁZEV:				
PŘEZKOUSEL					Podstavec				
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI		MATERIÁL:			Č. VÝKRESU		A4		
		HMOTNOST:			MĚŘÍTKO:1:2		LIST 1 Z 1 LISTŮ		

Příloha D - Výkresy pokročilého prototypu

