

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY  
A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Plně elektromagnetický kulový ventil**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	<b>David ŠMUCR</b>
Osobní číslo:	<b>E17B0049P</b>
Studijní program:	<b>B2612 Elektrotechnika a informatika</b>
Studijní obor:	<b>Elektrotechnika a energetika</b>
Téma práce:	<b>Plně elektromagnetický kulový ventil</b>
Zadávací katedra:	<b>Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky</b>

### Zásady pro vypracování

1. Provedte rešerši kulových ventilů ovládaných elektromechanickým aktuátorem.
2. Zhodnoťte současný stav a směr budoucího vývoje. Zaměřte se na vestavěnou inteligenci ventilu.
3. Navrhněte koncepci plně elektromagnetického kulového ventilu a proveďte jeho základní simulaci.
4. Provedte základní experimentální ověření navržené koncepce.
5. Porovnejte navrženou koncepci s tradičním provedením kulových ventilů.


Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**  
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. NESBITT, Brian. Handbook of valves and actuators: valves manual international. Butterworth-Heinemann, 2011.
2. ANGADI, S. V., et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 1: A multi-physics finite element model. Engineering Failure Analysis, 2009, 16.3: 874-887.
3. ANGADI, S. V., et al. Reliability and life study of hydraulic solenoid valve. Part 2: Experimental study. Engineering Failure Analysis, 2009, 16.3: 944-963.
4. MACH, F., et al. Bistable Fully Electromagnetic Valve for High-Speed and Fail-Safe Operations, IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2017.
5. POSPÍŠIL, K., MACH, F.. Numerical Analysis and Experimental Testing of Modular Bistable Electromagnetic Actuator in Valve Operation, Computational Problems of Electrical Engineering, 2017.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Karel Pospíšil**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **4. října 2019**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **11. června 2020**

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



  
**Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.**  
vedoucí katedry

V Plzni dne 4. října 2019

## **Abstrakt**

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh kulového ventilu s plně elektromagnetickým aktuátorem a základní experimentální ověření jeho funkce. V úvodní části je nastíněna konstrukce klasických kulových ventilů, provedení jednotlivých konstrukčních prvků a jejich princip, společně se základními aktuátory umožňujícími jejich pohyb. V další části je popsána myšlenka plně elektromagnetického ovládní kulových ventilů, následována matematickým modelem. V poslední části je popsána výroba prototypu ventilu a jeho experimentální ověření.

## **Klíčová slova**

Kulový ventil, elektromagnetické pole, matematický model, elektromagnetický aktuátor, momentová charakteristika.

## **Abstract**

This Bachelor thesis is focused on the design of a ball valve with a fully electromagnetic actuator and basic experimental verification of its function. The introductory part outlines the construction of classical ball valves, the design of individual structural elements and their principle, together with the basic actuators enabling their movement. The next part describes the idea of fully electromagnetic control of ball valves, followed by a mathematical model. The last part describes the production of the prototype valve and its experimental verification.

## **Key words**

Ball valve, electromagnetic field, mathematical model, electromagnetic actuator, torque characteristics.

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 17.6.2020

David Šmucr

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Karlu Pospíšilovi a panu Ing. Františku Machovi, Ph.D za cenné profesionální rady, připomínky a skvěle zvládnuté vedení práce i v časech koronavirové pandemie.

## Seznam symbolů

<b><i>B</i></b>	T	magnetická indukce
<b><i>Φ</i></b>	Wb	magnetický tok
<b><i>A</i></b>	Wb · m <sup>-1</sup>	magnetický vektorový potenciál
<b><i>H</i></b>	A · m <sup>-1</sup>	intenzita magnetického pole
<b><i>F</i></b>	N	síla
<b><i>J</i></b>	A · m <sup>-2</sup>	proudová hustota
<b><i>φ</i></b>	°	úhel natočení koule
<b><i>N</i></b>	-	počet závitů
<b><i>R<sub>m</sub></i></b>	H <sup>-1</sup>	magnetický odpor
<b><i>ω</i></b>	rad · s <sup>-1</sup>	úhlová rychlost
<b><i>t</i></b>	s	čas
<b><i>R</i></b>	m	vzdálenost (od osy)
<b><i>M</i></b>	N · m	moment
<b><i>J</i></b>	kg · m <sup>2</sup>	moment setrvačnosti
<b><i>S</i></b>	m <sup>2</sup>	plocha / průřez
<b><i>I</i></b>	A	elektrický proud
<b><i>ρ</i></b>	kg · m <sup>3</sup>	hustota
<b><i>T</i></b>	A · T · m <sup>-1</sup>	Maxwellův tenzor
<b><i>n</i></b>	-	normálový vektor
<b><i>I</i></b>	-	jednotková matice



# Obsah

<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY</b> .....	<b>11</b>
1.1 POPIS KULOVÉHO VENTILU .....	11
1.2 KONSTRUKCE KULOVÝCH VENTILŮ.....	12
1.3 AKTUÁTORY .....	14
1.3.1 PNEUMATICKÝ AKTUÁTOR.....	14
1.3.2 HYDRAULICKÝ AKTUÁTOR .....	15
1.3.3 ELEKTROMECHANICKÝ AKTUÁTOR .....	15
1.4 SOUČASNÝ STAV A SMĚR BUDOUCÍHO VÝVOJE.....	17
<b>2 MYŠLENKA A ZÁKLADNÍ OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI</b> .....	<b>19</b>
2.1 ZÁKLADNÍ KONCEPCE PLNĚ ELEKTROMAGNETICKÉHO KULOVÉHO VENTILU .....	21
2.1.1 VINUTÍ ZABUDOVÁNO PŘÍMO DO TĚLESA VENTILU .....	21
2.1.2 VINUTÍ NACHÁZEJÍCÍ SE VNĚ TĚLESA VENTILU.....	22
<b>3 NÁVRH VENTILU UŽITÍM MATEMATICKÉHO MODELU</b> .....	<b>25</b>
3.1 DYNAMIKA POHYBU.....	25
3.2 VÝPOČET SIL.....	25
3.3 VÝPOČET MAGNETICKÉHO POLE.....	26
3.4 TVORBA MODELU.....	27
3.5 VÝSLEDKY SIMULACE .....	28
<b>4 PRAKTICKÝ NÁVRH A VÝROBA VENTILU</b> .....	<b>31</b>
4.1 VÝROBA TESTOVACÍHO TĚLESA VENTILU .....	31
4.2 VÝROBA A DIMENZOVÁNÍ CÍVEK.....	32
4.3 ZÁKLADNÍ EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ KONCEPCE .....	34
4.3.1 POHYBOVÁ STUDIE .....	35
4.3.2 MAGNETICKÁ INDUKCE U POVRCHU KOULE .....	37
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>39</b>
<b>SEZNAM LITERATURY</b> .....	<b>40</b>
<b>SEZNAM OBRÁZKŮ</b> .....	<b>41</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>43</b>

# Úvod

Tato práce je zaměřena na základní návrh plně elektromagnetického kulového ventilu. Kulové ventily s elektromechanickými aktuátory jsou velmi často používány v mnoha odvětvích. Jedná se ovšem o elektromechanické aktuátory, které neovládají přímo polohu koule, ale převádí otáčivý pohyb na kouli pomocí mezistupně – dřívku. Dosud nebyl objasněn koncept řízení kulového ventilu elektromagnetickým polem, a proto je hlavním cílem této práce dojít jak k teoretickému, tak i k praktickému závěru funkčnosti takového zařízení.

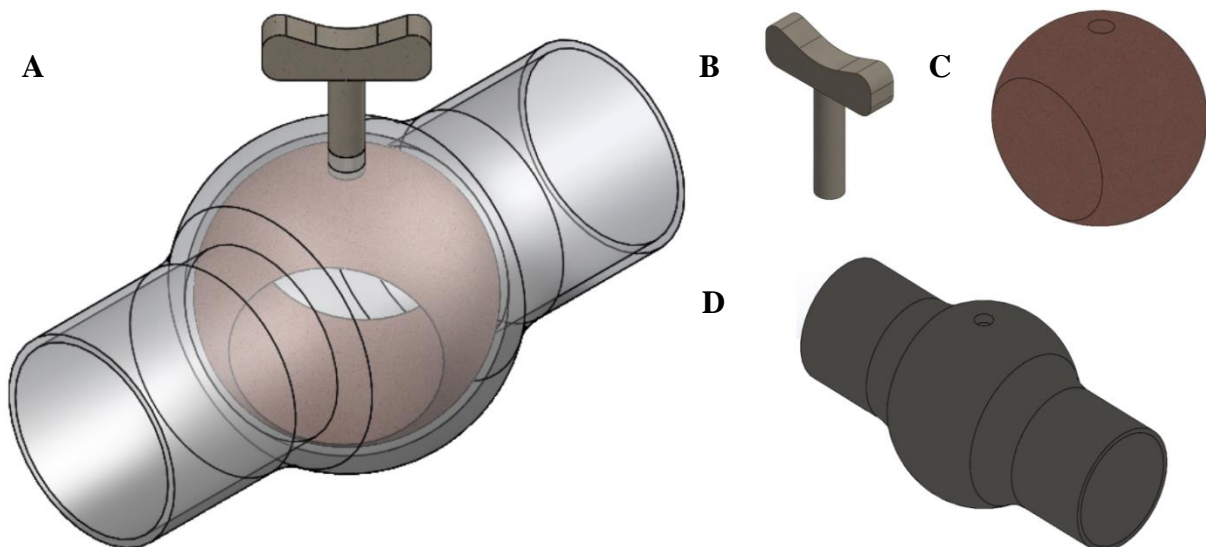
Práce je rozdělena do čtyř kapitol. První část práce seznamuje s klasickými konstrukčními a ovládacími metodami kulových ventilů. Ve druhé části je popsána myšlenka funkce a její základní ověření s následným navržením dvou základních koncepcí. Třetí část je zaměřena na popis tvorby matematického modelu a jeho výsledky. V poslední čtvrté části je popsána samotná výroba ventilu a jeho součástí s příslušnými zkouškami ověření funkčnosti.

# 1 Úvod do problematiky

Kulové ventily lze nalézt v celé škále možných aplikací. Nejjednodušší a nejznámější aplikací je bezesporu ruční (manuálně ovládaný) ventil, používaný k regulaci průtoku vody. Právě na něm bude v následujících kapitolách nastíněna základní funkce kulových ventilů. Vnitřní konstrukce samotného ventilu je v podstatě u většiny variant shodná. Liší se tím, jak jsou jednotlivé ventily ovládaný, tedy, jak lze docílit jejich otáčivého pohybu. Zařízení určená pro ovládání ventilů jsou tzv. aktuátory (pohony). Aktuátorů existuje mnoho, ale nejpoužívanějšími zástupci jsou aktuátory pneumatické, hydraulické a elektromechanické (při odmyšlení manuálního ovládání).

## 1.1 Popis kulového ventilu

Kulový ventil spadá pod skupinu rotačních ventilů. Z názvu je již zřejmé, že je tato skupina charakteristická rotačním pohybem, kterým se reguluje průtok média tělesem ventilu. Základními částmi ventilu je samotná koule, těleso a dřík se stopkou.



Obr. 1.1 - Základní části kulových ventilů, A) Složený kulový ventil (se zprůhledněným tělesem), B) Dřík, C) Koule, D) Těleso ventilu

Charakteristickým konstrukčním prvkem koule je otvor v jejím středu. Tento otvor vytváří průtokový kanál. Různou polohou tohoto prvku vzhledem ke směru průtoku média lze řídit, případně plně uzavřít průtok. Do koule je zasazen dřík. Dřík plní funkci jakéhosi ovladače, kdy pootočením dříku dojde k pootočení celé koule. Na jeho vrchním konci se nachází stopka. Stopka slouží k uchycení dříku k pohonu ventilu. Tyto komponenty jsou zasazeny do tělesa ventilu, které tvoří hlavní průtokový kanál pro médium.

Základní princip kulového ventilu tedy spočívá v tom, že vstupující médium do ventilu je ovlivňováno pozicí koule. Toto médium může být buď plně zaškrveno, částečně zaškrveno nebo může procházet v plném rozsahu. Z toho je patrné, že na poloze koule závisí množství média na výstupu z ventilu.

Výhody konstrukcí kulových ventilů (v podstatě všech rotačních ventilů) částečně vznikají z hydraulické rovnováhy (hydraulický tlak na vstupu a výstupu ventilu jsou obdobné – nevznikají rázy při otevírání či zavírání ventilu), která minimalizuje síly média na konstrukci a částečně z ekonomické stránky věci, a to konkrétně z konstrukčních metod, které lze užít. Vyvážené síly daného média působí malým zatížením rovněž na aktuátory. [1]

Tento typ ventilu se velice často používá k regulaci průtoku a tlaku v systémech pro distribuci plynu a pro snižování tlaku v souvislosti se skladováním plynu. Velice často se užívá také jako izolační (uzavírací) ventil, kvůli tomu, že způsobuje velmi malý pokles tlaku v plně otevřené poloze, jak již bylo zmíněno. [1]

## **1.2 Konstrukce kulových ventilů**

Kulové ventily mohou být děleny z mnoha různých ohledů. Například z hlediska zakončení tělesa přichází v úvahu ventily přírubové, závitové, svařované a mnoho dalších koncepcí. Tělesa bývají vyrobená v mnoha stylech, aby vyhovovala různým aplikacím. Například tělesa ventilů operujících s velmi vysokým, až kritickým tlakem jsou obráběna z pevných výkovků z důvodu ztuhnutí materiálu (ve většině případů ocel). [1]

Je tedy zřejmé, že výběr materiálu je obvykle založen na požadavcích na tlak, s kterým ventil operuje, ale také na teplotu, odolnost proti korozi, oděru a způsobu výroby. V našem případě se jednalo také o to, aby byl materiál nemagnetický, ale na druhou stranu magneticky propustný. [1]

Některá média vyžadují použití speciálních, drahých materiálů, které představují výrobní potíže v souvislosti se zabráněním vážnému poškození ventilu korozí. Většina procesních médií však neklade nadměrné požadavky na výrobu a funkčnost, a proto jsou litina a uhlíková ocel nejčastěji užívanými materiály. [1]

Následující přehled uvádí obecné údaje o základních materiálech, které se používají k výrobě těles ventilů:

- Litina – relativně levný materiál dostupný v různých stupních, používaný na tělesa ventilů pro vodu, plyn a jiné nekorozivní kapaliny. Litina se snadno odlévá a vyrábí se z ní i složité odlitky včetně tenkých profilů. [1]
- Litá ocel – toto je nejoblíbenější materiál pro výrobu těles ventilů. Používá se pro vzduch, nasycenou a přehřátou páru, nekorozivní kapaliny a plyny. Náklady jsou ale asi čtyřikrát vyšší než u litiny. Přidání legujících prvků však může zvýšit maximální možný použitelný tlak a teplotu procházejícího média, čehož litina nikdy nemůže dosáhnout. Není to nejjednodušší materiál k odlévání a při obrábění může být náchylný k trhání. [1]
- Chrom-molybdenová ocel – oblíbená slitina pro teploty až 593 °C používaná pro vysokotlakou páru, olej, plyn, ropné páry, mořskou vodu a další žíravá média. Tento materiál je odolný také vůči erozi. [1]
- Nerezová ocel – tento materiál je zvláště vhodný pro kapaliny se sklony k oxidaci a pro velmi leptavé kapaliny. Používá se pro teploty do asi 800 °C. Náklady na tento materiál jsou asi dva až dva a půl krát vyšší než na chrom-molybdenovou ocel. Je velmi obtížné tento materiál odlévat a obrábět. Správné tepelné zpracování po odlitku je nezbytné. [1]

Ventily jsou standartně sestavovány přes jedno z koncových spojení. Odlitek, popřípadě obrobený výkovek tělesa, ve většině případů není symetrický právě kvůli možnosti snazšího sestavení ventilu. Koule je vložena do tělesa ventilu koncovým spojením o vyšším průměru (vnitřní průměr musí být větší než průměr koule) a následně je do ní skrz vrchní část tělesa zasazen dřík, který ji upevní ve správné poloze a při pozdějším chodu ovládá. [1]

Tento popis je vztažen na ventily s tělesem tvořeným pouze jednou částí. To ale není jediná možná varianta konstrukce těles. Existují také tělesa, která jsou sestavena z více částí. Nejpoužívanější variantou této konstrukce je spoj tvořený dvěma částmi. Tento spoj se nachází ve středu ventilu tam, kam se vkládá koule. Díky tomu lze docílit symetrie tělesa ventilu. [1]

Velký důraz je kladen na konstrukci, případně materiál koule. Z předchozích odstavců vyplývá, že samotná koule je vyměnitelná. Obecně se vyrábí z chromované nerezové oceli nebo karbidu wolframu. V náročnějších aplikacích, kdy například může docházet ke korozi, se preferuje tvrzená nerezová ocel. Koule bývají obaleny jednoduchým těsněním, aby nedocházelo k průsaku média. [1]

Dřík má také své konstrukční prvky, které ho charakterizují, a to zejména jeho zakončení jak na straně uchycení koule, tak na straně uchycení k pohonu. Nejčastější variantou je uchycení koule pomocí tzv. jazýčku – koule má v sobě obrobenou drážku, do které je dřík uchycen. Existují však i pevné spoje těchto dvou prvků, a to ve vysokotlakých aplikacích. [1]

### 1.3 Aktuátory

Na jednom z konců dříku tradiční koncepce kulových ventilů je napojen aktuátor pohánějící ventil. Je to takové zařízení, které převádí vstupní veličinu na veličinu mechanickou. Vstupní veličinou můžeme rozumět spoustu fyzikálních veličin, a to jak elektrickou, tak například teplotní či světelnou. Funkcí aktuátoru je nastavit polohu tak, abychom měli plnou kontrolu nad řízením průtoku procházejícího média. Pro izolační ventily existují jen dvě možné polohy, ve kterých se mohou nacházet, a to otevřeno a zavřeno. Oproti tomu pro plně kontrolované ventily přibývá ještě střední, volně regulovatelná poloha. A právě pohyb do těchto zmíněných poloh má za úkol aktuátor. Mezi hlavní měřítka aktuátorů patří rychlost a přesnost reakce s ohledem na řídicí signál. [1] [2]

Existuje mnoho typů aktuátorů. Nejjednodušší, nejlevnější a nejspíše nejužívanější typ v aplikaci pro kulový ventil je manuální aktuátor. K nejužívanějším dále patří:

- pneumatické aktuátory,
- hydraulické aktuátory,
- elektromechanické aktuátory,
- speciální aktuátory. [1] [2]

Pneumatický a hydraulický aktuátor je v dnešní době také propojen s elektrickou částí, která aktuátor řídí. Mezi hlavní výhody elektrizace těchto koncepcí patří zejména dosažení vyšší rychlosti a přesnosti řízení polohy ventilu. V následujících kapitolách bude shrnuta teorie jednotlivých typů aktuátorů s větším důrazem na elektromechanické aktuátory. [1]

#### 1.3.1 Pneumatický aktuátor

Pneumatické aktuátory využívají k řízení pohybu stlačené plynné médium. Tento typ aktuátoru je velmi jednoduchý a je ideální pro izolační ventily, tedy ventily pouze s dvěma možnými polohami. Ventily, které jsou vybaveny tímto aktuátorem, pak lze jednoduše ovládat na dálku díky vnitřní elektronice aktuátoru. [1]

Stlačené plynné médium je velmi bezpečné a levné ovládací médium, a tak lze tento typ najít takřka ve všech možných odvětvích. Slabinou je však relativně velká poruchovost, a ne zrovna krátká a přesná odezva na řídicí signál (systém musí změnit tlak). [1]

### 1.3.2 Hydraulický aktuátor

Hydraulické aktuátory pracují na podobném principu jako aktuátory pneumatické, ale na rozdíl od pneumatických se zde k řízení pohybu užívá stlačeného kapalného média. Tímto médiem je nejčastěji olej. Již tento fakt napovídá o nevýhodě těchto typů aktuátorů – ekologické závadnosti při poruše. Poruchy navíc bývají většinou rozsáhlejšího charakteru.

Hlavní nevýhoda je již uvedena. Oproti elektromechanickým aktuátorům však zaostávají i v ostatních parametrech, a to hlavně v rychlosti a přesnosti reakce na řídicí signál. Výhodou však je, že aktuátor tzv. utáhne velkou zátěž, hlavně v porovnání s pneumatickými typy.

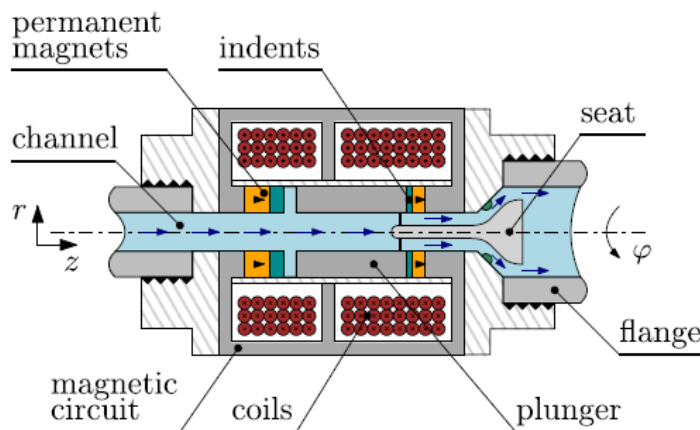
### 1.3.3 Elektromechanický aktuátor

Jedním z nejčastějších vysokorychlostních aktuátorů je aktuátor elektromechanický. Jsou to zařízení převádějící vstupní elektrický signál (napětí, proud) na výstupní akční mechanickou veličinu v tomto případě na točivý moment. Elektromechanické aktuátory jsou velmi univerzální zařízení a mohou produkovat všechny potřebné pohyby pro ovládání ventilu:

- lineární,
- rotační,
- s větším počtem stupňů volnosti. [1] [2]

Lineárními aktuátory se rozumí aktuátory s posuvným pohybem. Síla aktuátoru je nejčastěji generována přímým působením magnetického pole na cívku protékanou proudem nebo na feromagnetikum. Síla ovšem může být generována i nepřímo, a to pomocí indukčního či odporového ohřevu určitého dilatačního elementu. V této souvislosti se tedy jedná o aktuátory termoelastické. [2]

V aplikacích pro kulové ventily lze hovořit o pohybech rotačních. Lineárního pohybu aktuátorů se užívá v jiných typech ventilů a v některých těchto aplikacích se lze setkat i s ventily ovládanými plně elektromagneticky. Příkladem může být bistabilní elektromagnetický ventil na *Obr. 1.2* vyvinutý na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni.



Obr. 1.2 - Bistabilní elektromagnetický ventil [3]

Rotační aktuátory jsou tedy aktuátory umožňující točivý pohyb. V tradičních koncepcích se jedná především o různé elektrické motory. Cílem této bakalářské práce je navržení čistě elektromagnetického aktuátoru ventilu, tedy bez mechanického mezistupně – přímého ovládní přes hřídel (dřík). V principu je ale tento aktuátor velice podobný principu reluktančních motorů, přičemž rotorem je samotná koule. Obecný princip bude přiblížen v následujících kapitolách. [2]

Elektromechanické rotační aktuátory lze snadno přizpůsobit tak, aby vyhovovaly většině typů ventilů (bavíme-li se o klasické koncepci kulových ventilů). To znamená, že zmíněný popis konstrukce ventilů a jejich základní princip přetrvává i za těchto podmínek. Každý takový aktuátor se skládá z několika komponentů. Mezi ně patří:

- elektrický motor – nízká setrvačnost, vysoký točivý moment, stejnosměrný nebo jednofázový, kondenzátorový běh pro malé aktuátory, třífázový pro velké,
- převodovka – pro snížení rychlosti a zvýšení točivého momentu,
- upevnění ventilu
- mechanismus přepínání umožňující lokální ruční provoz – měl by být uzamykatelný, aby se zabránilo současnému řízení oběma metodami,
- vysílač polohy – pro lokální zobrazení polohy ventilu,
- omezovač točivého momentu – zabraňuje poškození motoru nebo ventilu a zabraňuje nadměrnému pohybu. [1]

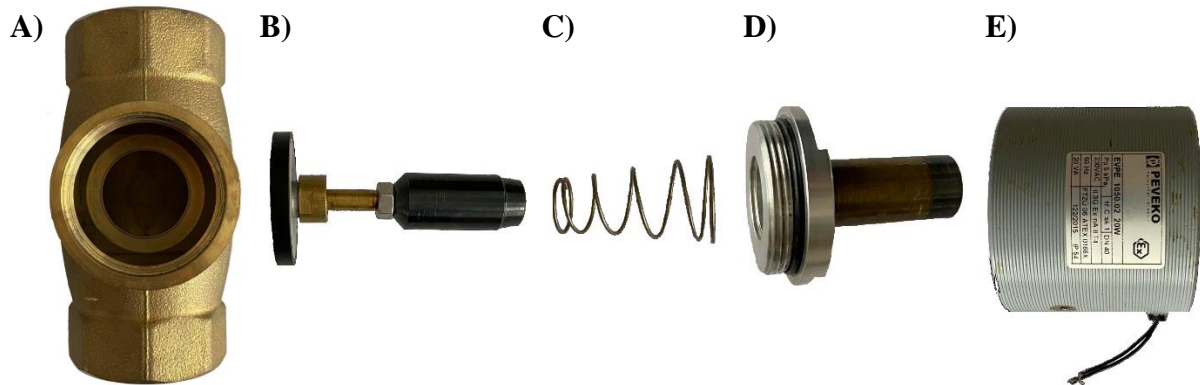
Aktuátor bývá také často vybaven příslušenstvím pro zlepšení chodu či řízení ventilu, jako je například:

- spínač – pro výběr místního nebo dálkového ovládní



- prostřední koncový spínač – umožňuje pohyb ventilu do předem určené polohy,
- elektronický vysílač polohy – umožňuje dálkovou indikaci nebo ovládání polohy ventilu. [1] [2]

Příklad ventilu ovládaného elektromechanickým aktuátorem je uveden na *Obr. 1.3*. V tomto případě je požadován lineární pohyb pístu.



*Obr. 1.3 - Příklad ventilu s elektromechanickým aktuátorem od firmy PEVEKO, A) Těleso ventilu, B) Píst, C) Přítlačná pružina, D) Propojovací díl, E) Cívky s magnetickým obvodem*

#### 1.4 Současný stav a směr budoucího vývoje

V předchozích kapitolách byl stručně nastíněn současný stav kulových ventilů a způsobů jejich ovládání. Co se týče elektromagnetického ovládání pak v současné době neexistuje sériově vyráběný kulový ventil, který je přímo ovládán elektromagnetickým polem. Elektromagnetické pole nyní využívají pouze motory jejichž hřídele jsou spojeny s dříkem a slouží tak k nepřímému pohybu koule. Myšlenka přímého ovládání pohybu koule elektromagnetickým polem je ve své podstatě inovativní.

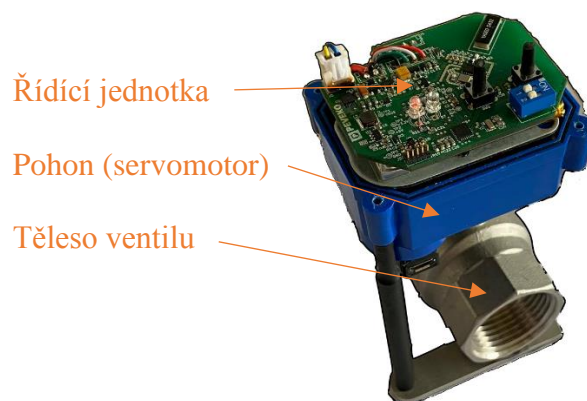
Z pohledu jednoduchosti koncepce a náročnosti na opravy by se takový ventil mohl stát žádaný ve většině průmyslových odvětví. Jeho klady mohou být zejména:

- Rychlost reakce na řídicí signál – díky plně elektrickému ovládání (absence mechanického mezičlánku) je odezva prakticky okamžitá
- Plynulé otevírání ventilu – v závislosti na dodávaném proudu je utvořeno magnetické pole, změnou velikosti proudu a spínáním cívek lze docílit plynulého pohybu
- Přesnost polohy – v závislosti na sepnutí určitých cívek je vždy jasně dáno, v jaké poloze se ventil nachází. S tímto souvisí i možná indikace polohy ventilu za pomoci indukovaných napětí do zbylých neseprtých cívek, jejich vyhodnocením lze docílit dvojího ověření určení polohy

- Řízení tlaku – v pokročilejších stádiích vývoje bude pravděpodobně možné při odebrání dřívku roztočit kouli určitou rychlostí cyklickým spínáním cívek. Toto roztočení by umožňovalo dávkování média – udržování požadovaného tlaku na výstupu ventilu.
- Plná vnitřní uzavřenost – tato vlastnost také souvisí s odebráním dřívku, kdy vynecháním této části dojde k zacelení vnitřního povrchu a odpadne tak teoretická možnost průsaku média. To otevírá možnost užít ventil ve vysokotlakých aplikacích. Bude však nejdříve nutné vyřešit aretaci koule jiným způsobem.

V neposlední řadě bude výhodou ventilu možnost jeho aplikace do SMART technologií a propojení s průmyslem 4.0. Průmyslem 4.0 se rozumí zavádění informačních technologií, kyberneticko-fyzikálních systémů a systémů umělé inteligence do výroby, služeb a všech odvětví hospodářství. S tím souvisí i propojení různých zařízení prostřednictvím internetu, tzv. Internetu věcí (IoT – Internet of Things). Jedná se v podstatě o propojení jednotlivých zařízení prostřednictvím internetu za účelem sběru dat z různých senzorů a čidel. Díky tomu by bylo možné získávat informace o ventilu (poloha, tlak, ...), sdílet tyto informace s ostatními zařízeními v systému a na základě těchto informací buď automaticky, či manuálně na dálku řídit jeho polohu v závislosti na chodu systému. [4][5]

V souvislosti s touto technologií již existuje koncepce kulového ventilu, která je schopna komunikovat s okolním světem pomocí internetu věcí. Jedná se však opět pouze o klasické provedení kulového ventilu ovládaného elektromechanickým aktuátorem v podobě servomotoru. Tomuto servomotoru přiléhá elektronika (řídící jednotka) umožňující komunikaci s okolím a reakci na podněty. Pro příklad se může jednat o komunikaci ventilu se záplavovým čidlem v bytovém domě, kdy po vyslání informace čidlem ventil uzavře přívod vody do daného bytu. Koncepce tohoto ventilu je na *Obr. 1.4*.

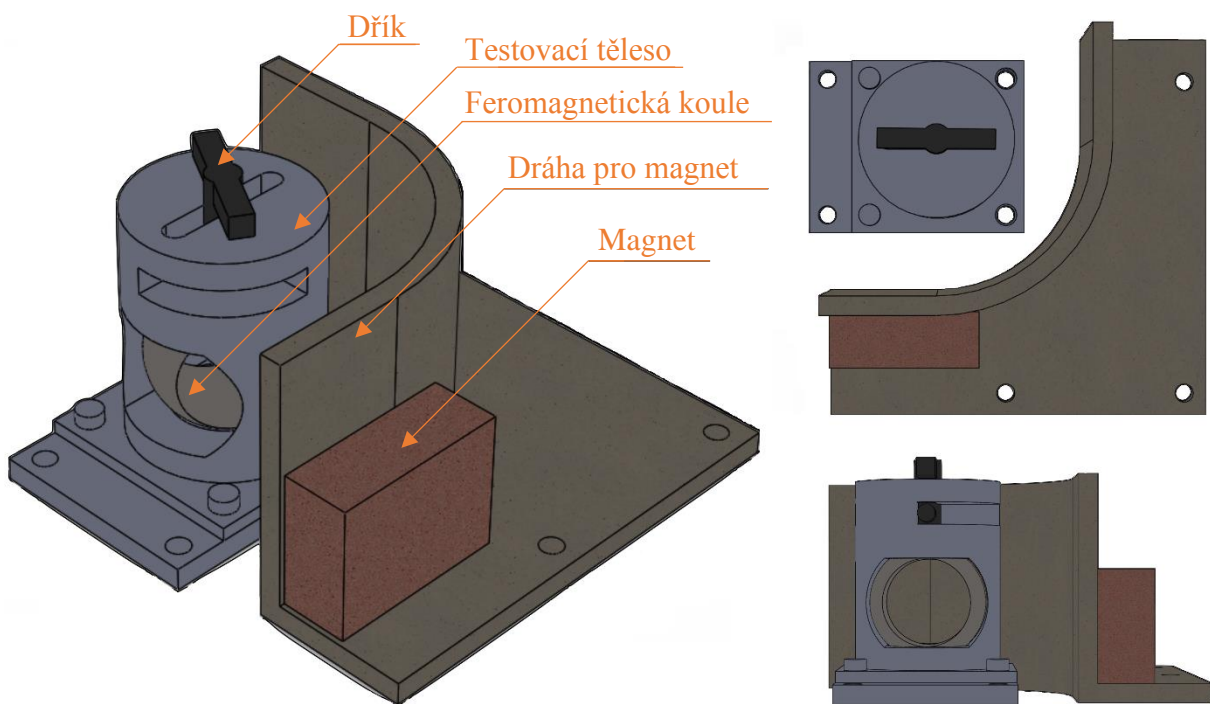


*Obr. 1.4 - Koncepce kulového ventilu s vnitřní inteligencí*

## 2 Myšlenka a základní ověření funkčnosti

Úvodem do praktické části této práce je třeba zmínit myšlenku a představu ovládání pohybu kulového ventilu přímo magnetickým polem. Pro ověření základní myšlenky, zda je vůbec možné působením vnějšího magnetického pole ovládat funkci kulového ventilu (otevírání/zavírání), byla využita feromagnetická koule a neodymový magnet.

Zkouška spočívala v upevnění feromagnetické koule do plastového tělesa, jehož výroba bude popsána v dalších kapitolách, a pohybu neodymového magnetu po předem stanovené dráze, která byla definována plastovým přípravkem. Plastový přípravek byl navržen tak, aby byla dodržena konstantní vzdálenost feromagnetické koule od magnetu. Celá testovací sestava je vyobrazena na *Obr. 2.1*.

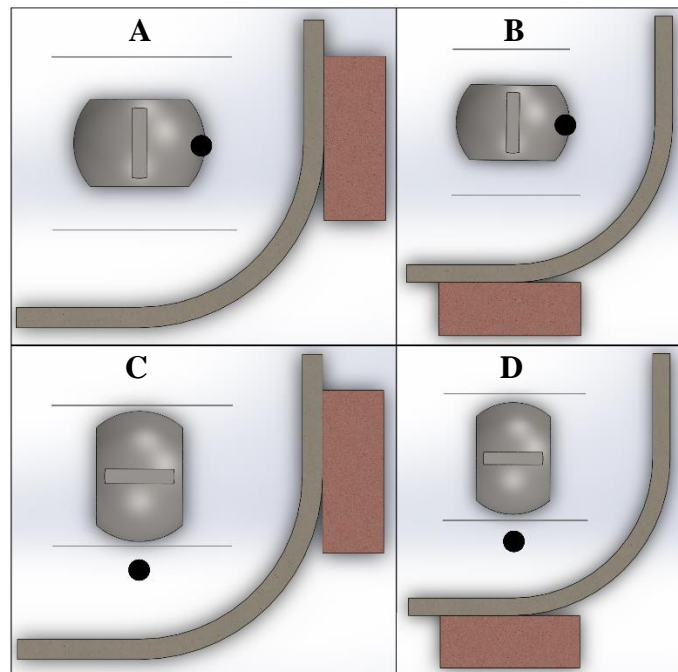


*Obr. 2.1 - Testovací sestava základního ověření funkčnosti v různých pohledech*

Permanentní magnet vytváří sám o sobě velice silné magnetické pole o definovaném magnetickém toku uzavírajícím se od severu k jihu. Magnetický tok utvořený tímto magnetem prochází částečně přes feromagnetickou kouli, která je silovým působením magnetického pole natáčena do polohy, ve které bude klást procházejícímu magnetickému toku nejmenší magnetický odpor, tedy stranou s největší plochou feromagnetického materiálu.

V průběhu zkoušky byla dále měřena magnetická indukce  $B$  (přiložením jednodimenzionální sondy s Hallovým senzorem Teslametru Elimag MP-1 s přesností měření

1 % z rozsahu) na povrchu koule v různých polohách vůči magnetu. Místo indukce vždy znázorňuje černá tečka. Tuto skutečnost reprezentuje *Obr. 2.2*. Naměřené hodnoty později posloužily k základní představě o přibližné hodnotě magnetické indukce potřebné k otočení koule.



*Obr. 2.2 - Zkouška polohováním magnetu vůči kouli*

Hodnoty naměřených magnetických indukcí v jednotlivých polohách A–D jsou uvedeny v tab. 2.1.

Tab. 2.1 Naměřené hodnoty magnetické indukce

Poloha	A	B	C	D
B [mT]	$115 \pm 5$	$95 \pm 5$	$70 \pm 5$	$85 \pm 5$

Můžeme pozorovat, že hodnoty naměřené v polohách C a D jsou nižší oproti hodnotám poloh A a B. Je to zapříčiněno tím, že indukce byla ve stavech C a D měřena na povrchu tělesa ventilu, nikoliv na stěně koule, a to z důvodu konstrukčního uspořádání testovacího tělesa, jak je možné vidět na *Obr 2.1*.

Z těchto hodnot bylo zjištěno, že pro otočení koule je hodnota potřebné působící magnetické indukce rovna přibližně 100 mT. V tomto momentu byla tedy snaha navrhnout odpovídající způsob, jak dosáhnout požadované hodnoty magnetické indukce.

## 2.1 Základní koncepce plně elektromagnetického kulového ventilu

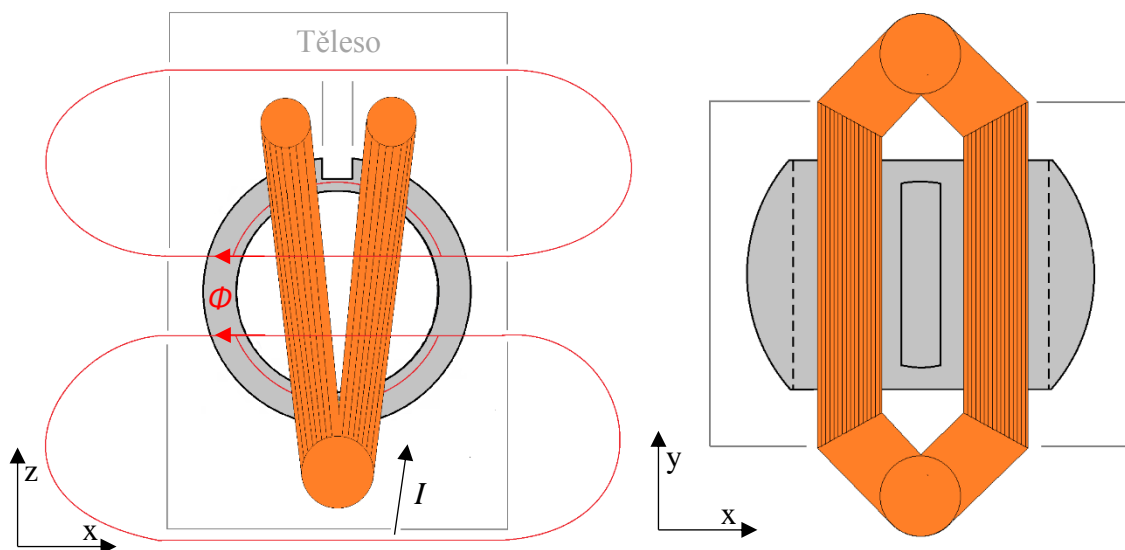
Z předchozího ověření funkčnosti za pomoci neodymového magnetu byla dále vyvozována různá řešení nahrazení tohoto zdroje magnetického pole. Při přechodu na elektromagnetické pole je zřejmé, že zdrojem magnetického toku nemůže být nic jiného než vodič protékající elektrickým proudem. Ze zkoušky neodymovým magnetem vyplývá, že magnetický tok, popřípadě magnetická indukce, musí být dostatečně silný, aby došlo k pootočení koule. Tohoto efektu lze dosáhnout vytvořením několika závitové cívky protékané určitým elektrickým proudem  $I$ .

V průběhu navrhování ventilu bylo diskutováno hlavně provedení a umístění vinutí, tedy zdroje magnetického pole. Takto vznikly dvě základní koncepce, a to vinutí zabudované přímo v tělese ventilu a vinutí nacházející se vně tělesa. V následujících kapitolách je zmíněn základní princip jednotlivých provedení a posuzovány jejich výhody a nevýhody.

### 2.1.1 Vinutí zabudováno přímo do tělesa ventilu

Hlavní výhodou tohoto uspořádání je jeho kompaktnost. Vinutí je zasazeno do otvorů v tělese ventilu, čímž se ušetří mnoho místa. Nevýhodou však je hlavně fakt, že se v horní části testovacího tělesa nachází otvor na dřík, který uchycuje kouli. Z tohoto faktu vyplývá, že vinutí není symetricky obtočeno kolem koule. S tím souvisí velmi složitá konstrukce tělesa. Tato vinutí by musela být v konečné podobě minimálně 3 pro plnou regulaci otáčení. Navíc v případě poruchy v provozu by bylo potřeba vyměnit celý ventil.

Myšlenkou provedení je v podstatě uzpůsobení feromagnetické koule magnetickému toku utvářejícího se cívkou protékanou stejnosměrným proudem. Teoreticky se koule po sepnutí zdroje zdánlivě polarizuje (zmagnetuje) v místech s nejmenším magnetickým odporem a dochází k pootočení ve směru působení magnetického toku  $\Phi$ . Této skutečnosti nebylo v plné míře dosaženo, jelikož by bylo zapotřebí navinutí velkého počtu závitů přes otvory v tělese, které z prostorových i funkčních důvodů nebylo možné.

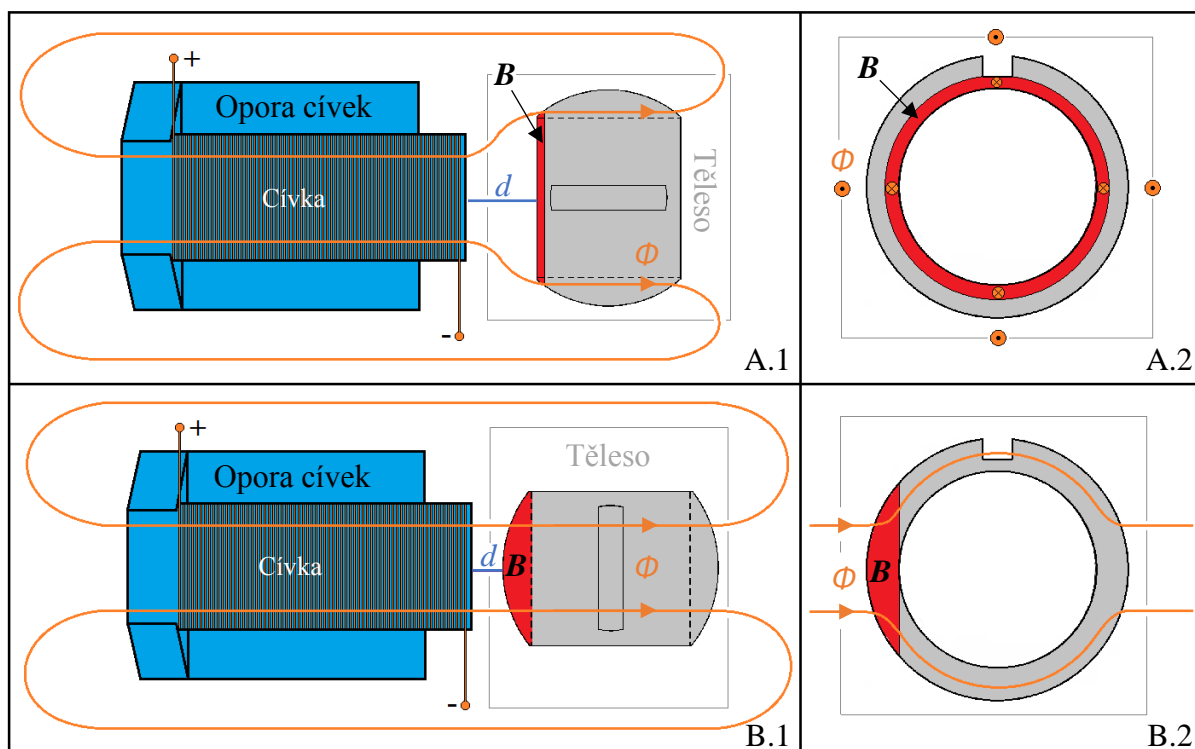


Obr. 2.3 - Koncepte s vestavěným vinutím

Při základním ověření se čtrnácti navinutými závitů cívky (průměr vodiče  $2,5 \text{ mm}^2$ ) a procházejícím proudem  $I = 20 \text{ A}$  se tento teoretický jev projevil pouze minimální silou působící na kouli při naměřené magnetické indukci u plochy koule  $14 \text{ mT}$ . Tento výsledek je ovlivněn především malým počtem závitů a tím malým působícím magnetickým tokem. Zvýšení počtu závitů by s sebou neslo velmi rozsáhlé konstrukční úpravy tělesa s nejistým výsledkem. Při uvážení všech skutečností byl vývoj později zacílen na druhou koncepční variantu zmíněnou v následující podkapitole. Reálná podoba tělesa ventilu je uvedena v příloze A.

### 2.1.2 Vinutí nacházející se vně tělesa ventilu

Tuto koncepci nejlépe vystihuje *Obr. 2.4*. Již na první pohled je viditelná nekompaktnost koncepce a větší nároky na prostor oproti předchozí variantě. Výhodu představuje cílený magnetický tok působící přesně v ose koule a také separace jednotlivých konstrukčních součástí, to umožňuje jednotlivé části ventilu vyvíjet odděleně na rozdíl od předchozí varianty. Při poruše v reálném provozu tato varianta umožňuje vyměnitelnost jednotlivých součástí zcela nezávisle.



Obr. 2.4 - Koncepte s vnějším vinutím,  $B$  – místa s největší magnetickou indukcí,  $d$  – vzdálenost koule od cívky,  $\Phi$  – magnetický tok

V principu se jedná o válcovou cívku (vzduchovou, resp. s feromagnetickým jádrem), která je navinuta na plastovém válci vytištěném na 3D tiskárně z materiálu PET. Tato cívka vytváří magnetický tok  $\Phi$ . Cílem koncepte je donutit kouli k otočení na základě působící magnetické indukce (silového působení magnetického pole). Koule se silovým působením magnetického pole uzpůsobuje magnetickému toku tak, že se natočí ve směru jejího nejmenšího magnetického odporu  $R_m$ . Na Obr. 2.4 je viditelné teoretické rozložení magnetického pole ve dvou základních polohách koule. V poloze A.1, A.2 (totožná poloha) magnetický tok prochází takřka jen hranami koule o malé ploše, zbytek toku se uzavírá v okolním prostředí – magnetická indukce bude malá, navíc je patrné, že vzduchová mezera je také značně velká (velké  $R_m$ ). V poloze B.1, B.2 je koule již natočena magnetickému toku a ten jí může procházet v podstatě v celém objemu, lze dále pozorovat zmenšení vzduchové mezery  $d$  (zmenšení  $R_m$ ). Užití obrázky jsou v podstatě totožné s vykreslením magnetické indukce v kapitole matematického modelu. Červené oblasti znázorňují místa s největší magnetickou indukcí v dané poloze.

Pro první otestování funkčnosti dané koncepce byla užita pouze vzduchová cívka s 28 závity o průřezu vodiče  $2,5 \text{ mm}^2$  protékaná proudem 20 A. V důsledku toho byl výsledný magnetický tok přes kouli velice nízký a naměřená magnetická indukce byla pouze 6 mT. V porovnání s předchozí variantou byla sice naměřená magnetická indukce nižší, ovšem je třeba brát v úvahu, že byla použita pouze jedna, a to vzduchová cívka. Síla působící na kouli byla minimální a tah nebyl v podstatě cítit. V dalších kapitolách je tato koncepce dále rozvíjena, zmíněný popis slouží pouze pro základní představu funkčnosti. Snímky základních dílů ověřovací zkoušky koncepce se nachází v příloze A.



### 3 Návrh ventilu užitím matematického modelu

Pro zjištění působících sil, točivého momentu a rozložení magnetického pole byl vytvořen matematický model. Tento model popisuje matematickými rovnicemi veličiny, které by bylo obtížné reálně změřit a zjednodušuje tak samotný návrh ventilu. V následujících kapitolách jsou postupně uvedeny jednotlivé vztahy vyjadřující danou fyzikální veličinu a výsledky simulace matematického modelu.

#### 3.1 Dynamika pohybu

Dynamika pohybu zkoumá pohybové vlastnosti feromagnetické koule. Moment, neboli moment síly, vyjadřuje její působení na hmotný bod v určité vzdálenosti od osy otáčení. Obecná pohybová rovnice vypadá následovně

$$\mathbf{M} = J \frac{d\boldsymbol{\omega}}{dt}, \quad (3.1)$$

kde  $J$  je moment setrvačnosti pohybu a  $\boldsymbol{\omega}$  je úhlová rychlost. V případě rotace v pouze jedné ose lze psát

$$M_y = J \frac{d\omega_y}{dt}. \quad (3.2)$$

Úhlovou rychlost lze následně dále vyjádřit pomocí úhlu natočení koule  $\varphi$  jako

$$\omega_y = \frac{d\varphi}{dt}. \quad (3.3)$$

Obecná rovnice pro výpočet momentu setrvačnosti je

$$J = \rho \int r^2 dV. \quad (3.4)$$

kde  $\rho$  je hustota materiálu a  $r$  je poloměr otáčení hmotného bodu.

#### 3.2 Výpočet sil

V této podkapitole je popsán výpočet působících sil a momentu modelu navrženého kulového ventilu. Silové účinky magnetického pole jsou popsány rovnicí

$$\mathbf{F}_m = \int_{\partial\Omega} \mathbf{n} \cdot \mathbf{T} \, dS, \quad (3.5)$$

$\mathbf{n}$  v této rovnici vyjadřuje normálový vektor a  $\mathbf{T}$  Maxwellův tenzor. Maxwellův tenzor vyjadřuje tok hybnosti elektromagnetického pole zvolenou plochou, v tomto případě plochou  $\Omega$  a vypočítá se

$$\mathbf{T} = \frac{1}{2} \mathbf{H} \cdot \mathbf{B} \mathbf{I} - \mathbf{H} \otimes \mathbf{B}, \quad (3.6)$$

kde  $\mathbf{H}$  je intenzita magnetického pole,  $\mathbf{B}$  je magnetická indukce a  $\mathbf{I}$  je jednotková matice. [6] Z těchto vztahů se následně přejde na výpočet momentu, jehož obecná rovnice je

$$\mathbf{M}_m = \mathbf{F} \times \mathbf{R} \quad (3.7)$$

a po dosazení

$$\mathbf{M}_m = \int_{\partial\Omega} (\mathbf{r} - \mathbf{r}_0) \times (\mathbf{n} \cdot \mathbf{T}) \, dS. \quad (3.8)$$

K těmto výpočtům je však nejdříve nutné znát rozložení elektromagnetického pole, a to konkrétně hodnoty magnetické indukce a intenzity magnetického pole potřebné k výpočtu Maxwellova tenzoru.

### 3.3 Výpočet magnetického pole

Popis magnetického pole vychází z Ampérova zákona celkového proudu. Obecnou rovnicí popisující toto pole je 1. Maxwellova rovnice, jejími úpravami se dojde k rovnici

$$\text{rot} \left( \frac{1}{\mu(|\mathbf{B}|)} \cdot (\text{rot} \mathbf{A} - \mathbf{B}_r) \right) = \mathbf{J}_{\text{ext}}, \quad (3.9)$$

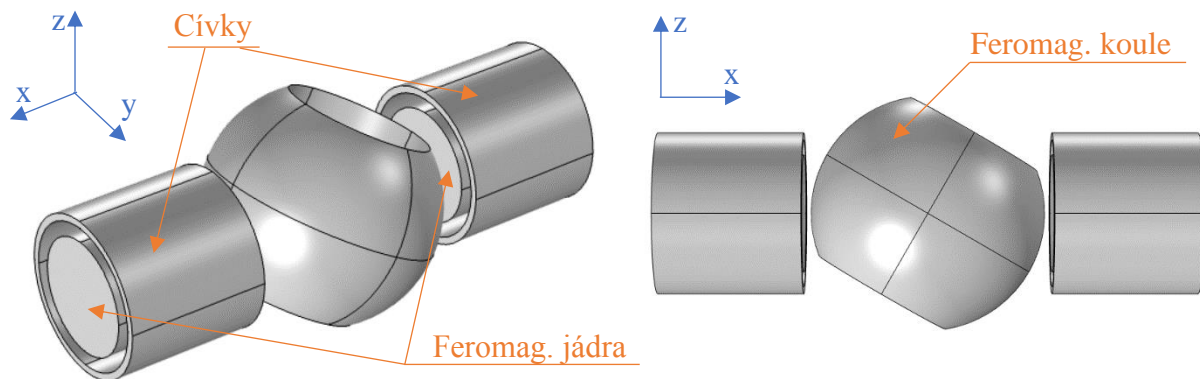
kde  $\mu(|\mathbf{B}|)$  je permeabilita feromagnetického materiálu závislá na velikosti magnetické indukce,  $\mathbf{A}$  je magnetický vektorový potenciál,  $\mathbf{B}_r$  je remanentní indukce potenciálních permanentních magnetů (v tomto případě = 0) a  $\mathbf{J}_{\text{ext}}$  je vnější proudová hustota.

Ze zmíněné rovnice lze určit vektorový magnetický potenciál, ze kterého je dále možné dopočítat magnetickou indukci

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A}. \quad (3.10)$$

### 3.4 Tvorba modelu

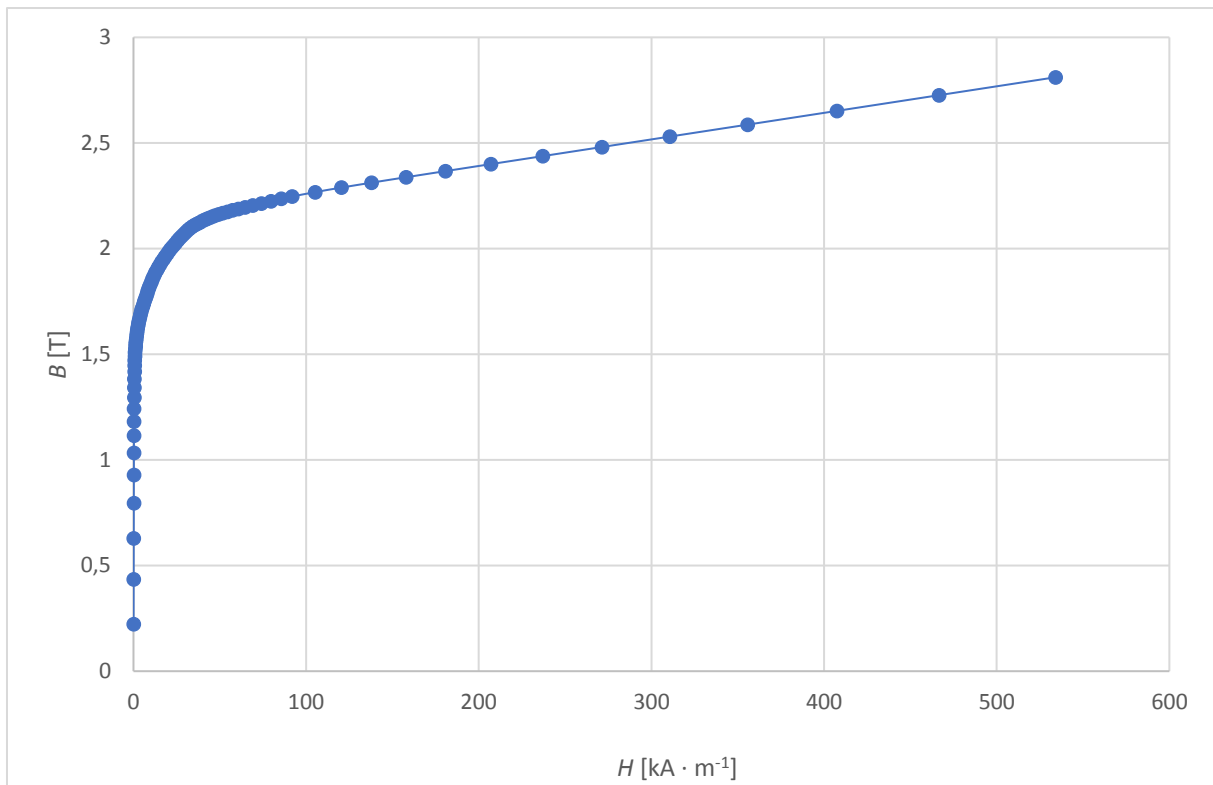
K vytvoření matematického modelu byl užit software COMSOL Multiphysics společně s programovacím jazykem MATLAB, ve kterém byl vytvořen skript užívaný pro vykreslení číselných výstupů matematického modelu. Tyto programy byly užity z důvodu možnosti práce ve 3D, což umožňovalo co nejvěrohodněji nasimulovat podobu a funkci ventilu s adekvátními výsledky výpočtové simulace. Z uvedeného vyplývá, že je model navržen v kartézské soustavě souřadnic  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Podoba navrženého matematického modelu je na *Obr. 3.1*.



*Obr. 3.1 - Podoba modelu v COMSOL*

Tvorba modelu v softwaru COMSOL zahrnuje modelování požadované konstrukce, určení parametrů jednotlivých prvků, definování potřebných výpočtů a v neposlední řadě výběr studie, kterou je v tomto případě studie stacionárního elektromagnetického pole se zaměřením na rozložení magnetické indukce a výpočtu točivého momentu. Konstrukční modelování probíhá podobným způsobem jako například v dále užívaném softwaru SolidWorks. Rozdílem však je, že se zde prvky vytvářejí plně parametricky (zadáváním číselných hodnot vyjadřujících polohu v souřadné soustavě).

Veškerým konstrukčním prvkům užitým v matematickém modelu je třeba definovat jejich specifické parametry a charakteristiky. Feromagnetickým materiálům (koule, feromagnetická jádra cívek) je třeba přiřadit B-H charakteristiku, jejíž tvar definuje míru možného zmagnetování materiálu. Výběr B-H charakteristiky podléhá přiřazení vhodného materiálu z knihovny materiálů. V matematickém modelu byl tento materiál definován jako magneticky měkká nízkouhlíková ocel s magnetizační křivkou uvedenou na *Obr. 3.2*.

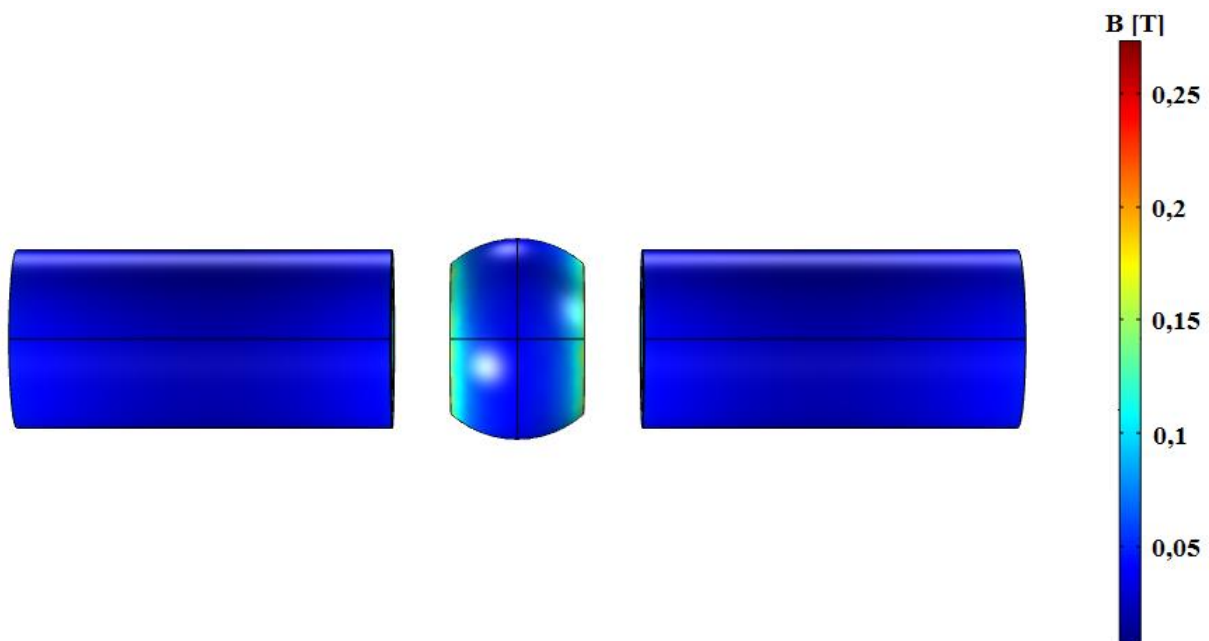


Obr. 3.2 - Magnetizační charakteristika použitého materiálu

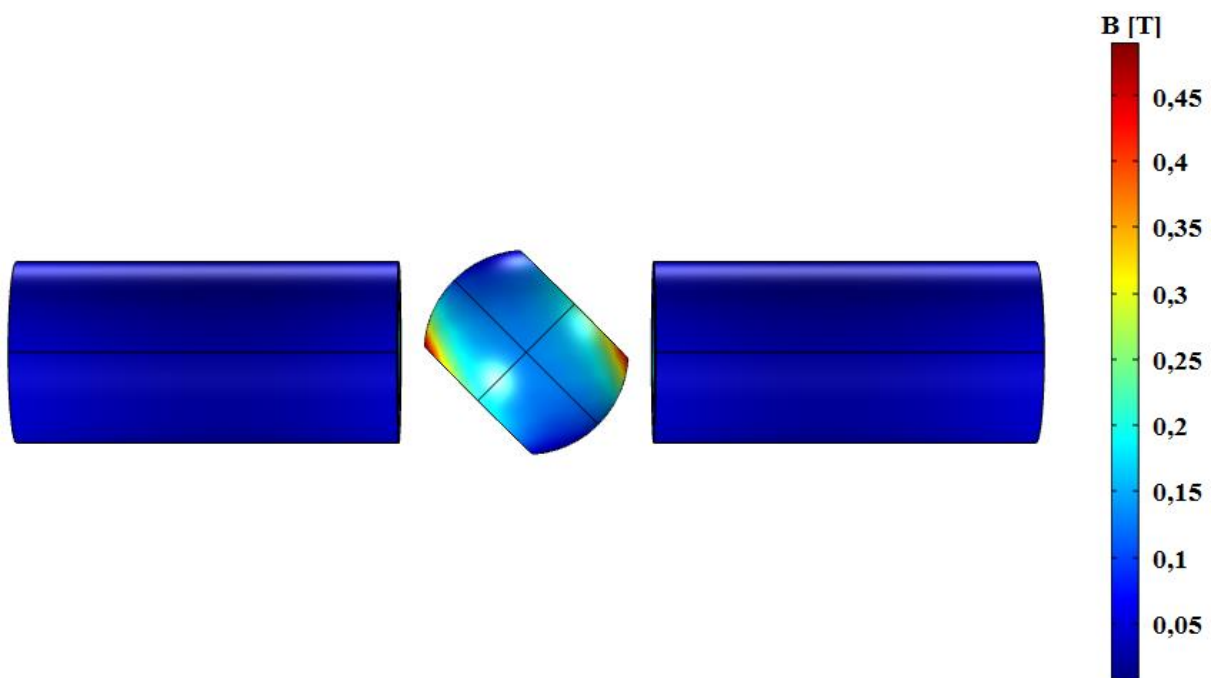
Tímto způsobem je třeba popsat i vinutí cívek, kde je hlavním parametrem procházející proud a počet závitů. Ostatní charakteristiky materiálů jako je například elektrická vodivost jsou zakomponovány v již uvedené knihovně materiálů. Dále je třeba definovat tvar cívky (kruhová, ...) a průřez použitého vodiče. V tomto konkrétním příkladu bylo vinutí navrženo jako kruhová vícezávitová cívka o procházejícím proudem 20 A, průřezu vodiče 1,54 mm<sup>2</sup>, s počtem závitů 78. Jedná se o příklad testovacího prototypu dále zmíněného v následujících kapitolách.

### 3.5 Výsledky simulace

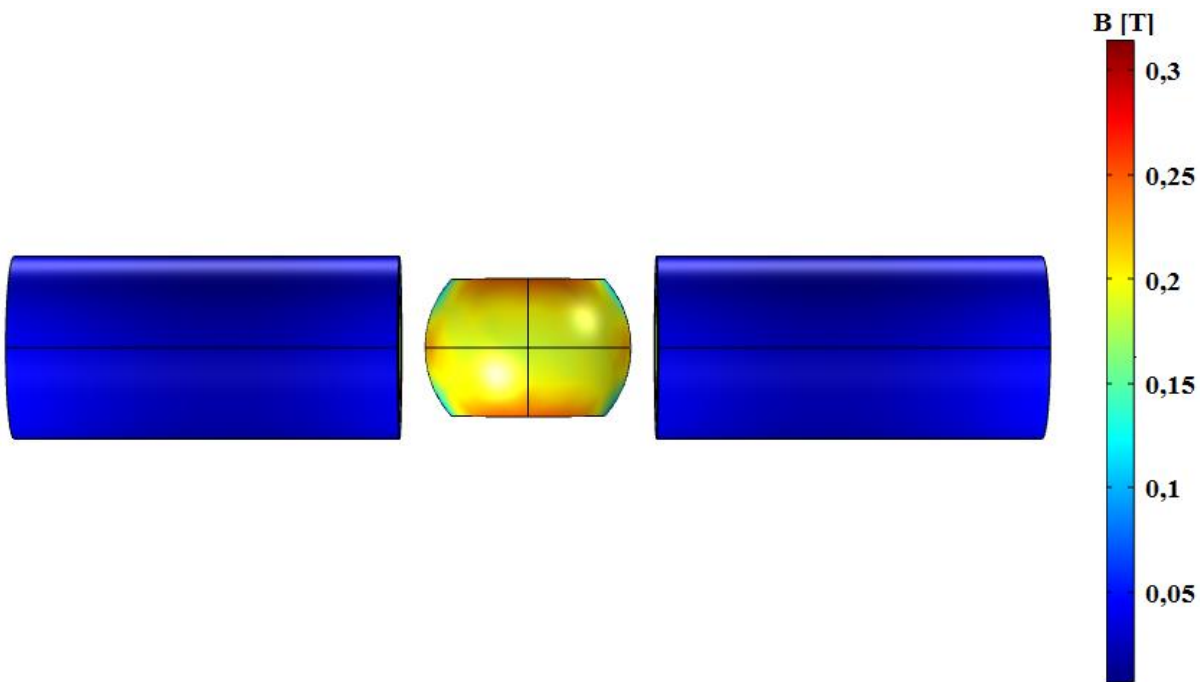
Z výpočtu rozložení elektromagnetického pole pro každý element definované výpočetní sítě bylo následně vykresleno rozložení magnetické indukce na povrchu modelu. Jemnost výpočetní sítě byla v programu nastavena na „Extra fine“ při celkovém počtu 28 661 prostorových elementů. Konvergence sítě byla ověřena. Na následujících obrázcích je uvedeno rozložení magnetické indukce B při stupních natočení koule 0 °, 45 ° a 90 °.



Obr. 3.3 - Rozložení magnetické indukce při  $\varphi = 0^\circ$

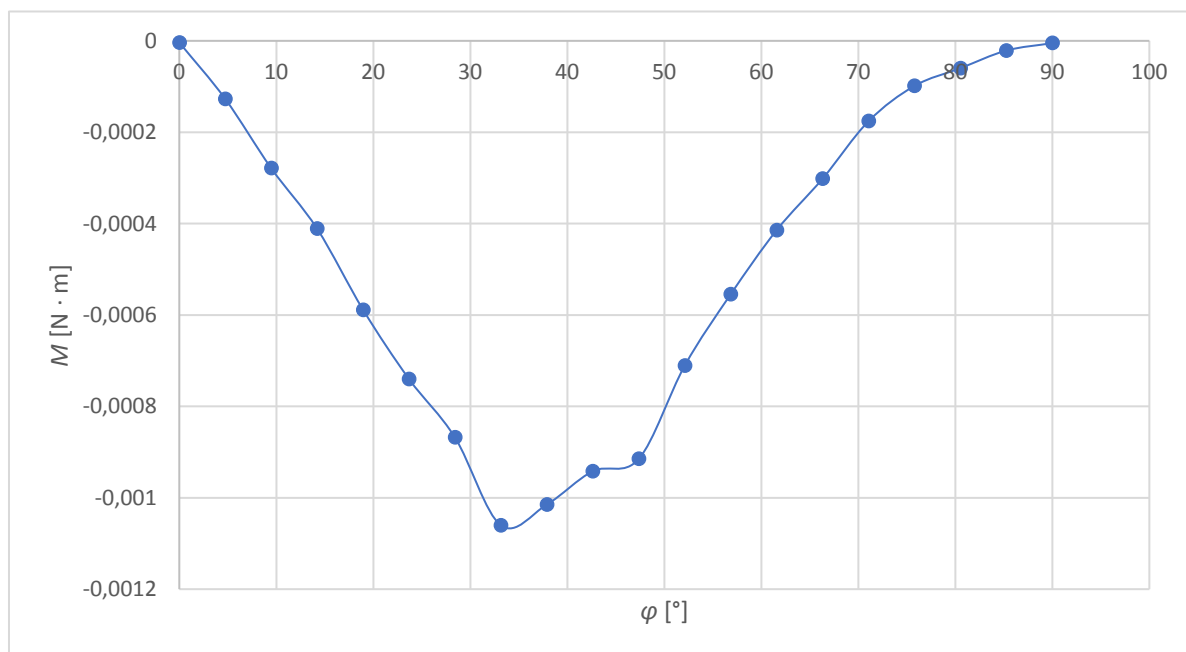


Obr. 3.4 - Rozložení magnetické indukce při  $\varphi = 45^\circ$



Obr. 3.5 - Rozložení magnetické indukce při  $\varphi = 90^\circ$

Všechny výpočty probíhaly na základě rovnic uvedených na začátku této kapitoly. Tímto způsobem byla tedy následně počítána i velikost točivého momentu v průběhu pohybu koule. V programovacím jazyce MATLAB byl vytvořen skript zadávající softwaru COMSOL vstupní úhly natočení koule od  $0^\circ$  do  $90^\circ$  s celkovým počtem 20 kroků. Výsledky této simulace byly za pomoci příslušného skriptu vypisovány zpět do programu MATLAB, kde byly ukládány a následně z nich byla v programu Excel vytvořena momentová charakteristika – závislost momentu na poloze otáčející se koule. Momentová charakteristika je zobrazena na Obr. 3.6.



Obr. 3.6 - Momentová charakteristika

## 4 Praktický návrh a výroba ventilu

Tato kapitola slouží primárně k popisu konstrukčních parametrů jednotlivých prvků. U každého konstrukčního prvku je dále uveden postup jeho návrhu ke konečné podobě užívané následně u zkoušek prototypu ventilu. V závěru kapitoly je prvotní ověření funkce zmíněného prototypu při osazení dvojicí cívek umožňující pouze otevírání nebo uzavírání ventilu.

Ventil byl primárně navrhován touto praktickou cestou a ověřován jednotlivými funkčními zkouškami, ze kterých byl učiněn závěr, jenž pomohl v dalším postupu návrhu. První vyrobený prototyp sloužil k základnímu ověření funkčnosti za pomoci neodymového magnetu. Tato zkouška je zmíněna v kapitole 2.

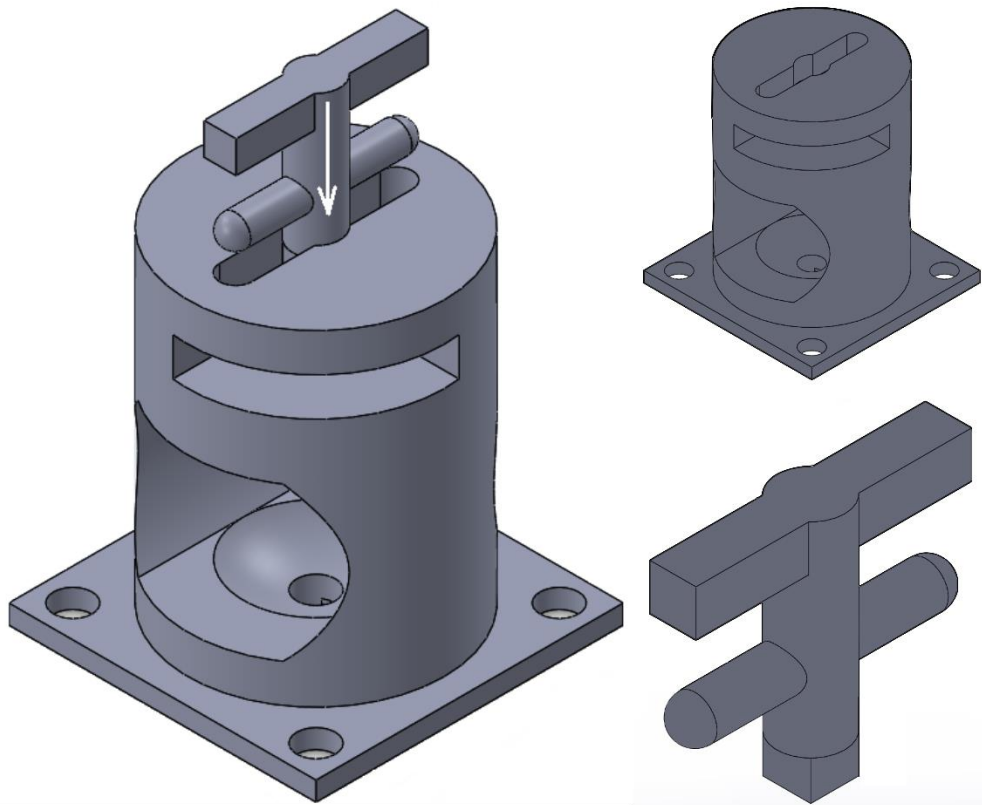
Většina prvků ventilu byla vyráběna pomocí technologie 3D tisku, pouze koule, dodána firmou PEVEKO, byla vyrobena z magnetické nerezové oceli 1.4016. K navržení daných modelů byl využit software SolidWorks, který umožňuje tvorbu 3D těles a sestav a jejich následné převedení na výkres. Výhodou tohoto softwaru je možné ukládání 3D modelů ve formátu STL, jenž využívá i software PrusaSlicer, který převádí navržený model do tzv. G-kódu. G-kód užívají 3D tiskárny jako vstupní data pro tisk. Fotografie komponentů prototypu ventilu jsou k dispozici v příloze B.

### 4.1 Výroba testovacího tělesa ventilu

Základním stavebním prvkem prototypu ventilu je testovací těleso, ve kterém je upevněna koule. Základní požadavky na tento prvek jsou kompaktnost, jednoduchost, možnost odejmutí koule z prvku a v neposlední řadě co nejmenší tření. Tření je velice důležitý parametr, který ovlivňuje jednoduchost otáčení koule v tělese. Při jeho vysoké hodnotě může docházet k zadrhávání koule, a to nejen z důvodu tření v místě uložení, ale i z důvodu tření v místech kontaktu dřívku s tělesem.

Vývoj testovacího tělesa trval zřejmě nejdéle. Byla snaha vytvořit prototyp tělesa s co nejmenším třením a nejlepšími podmínkami pro testování ventilu. V reálných provozních podmínkách však není možné tření zanedbávat z důvodu těsnění přiléhajícího na kouli proti průsaku média. Největším problémem však bylo samotné uchycení koule, kdy dřík neustále vyskakoval z otvoru v kouli, a ta následně ztrácela stabilitu. Tento problém byl vyřešen ‚patrovým‘ uchycením dřívku. Dřík má přibližně ve svém středu oboustranný výstupek, který se zapasuje do mezipatra uchycení a nemá pak tendenci vyskakovat. Navržené těleso s dříkem

je na *Obr 4.1*, zároveň je zde demonstrováno zasazení dříku do tělesa.



*Obr. 4.1 - Dřík s testovacím tělesem*

Základní ověření navržené konstrukce bylo spojeno s již zmíněným testem pomocí neodymového magnetu. Kontrolovaly se hlavně různé výstupky a další místa, kde byla tendence k zadržování koule či dříku. Jediná úprava nastala při navrhování konstrukce k otestování koncepce vinutí navinutého přímo v tělese.

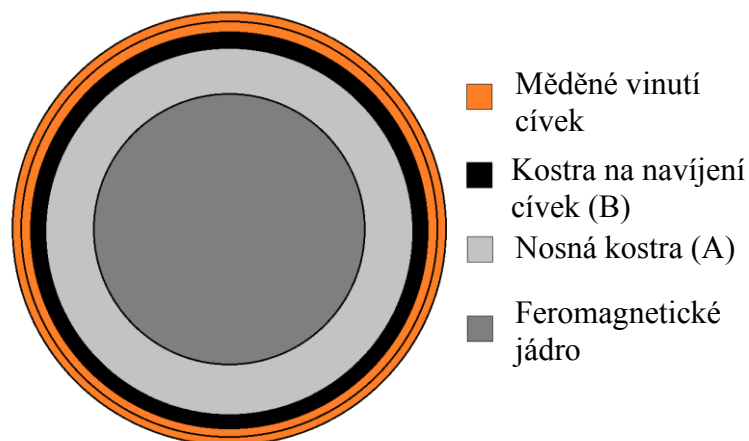
## **4.2 Výroba a dimenzování cívek**

Akčním členem ventilu jsou cívky ať už vzduchové, či s feromagnetickým jádrem. Výroba prvního prototypu tohoto prvku souvisela se zmíněnou zkouškou koncepce vinutí umístěného vně tělesa ventilu. V tomto případě se jednalo o vzduchovou cívku s  $N = 28$  závitů o průřezu vodiče  $S = 2,5 \text{ mm}^2$  navinutou na opěrné plastové kostře, díky níž byla udržována v potřebné poloze vůči kouli v tělese. Opěrná kostra sestává z válce sloužícího nejprve jako kostra cívky (pro pozdější potřeby tuto kostru označme písmenem A) a držáku tohoto válce s podstavou umožňující přichycení prvku na zkušební podložku. Výstupem této zkoušky bylo zjištění, že samotnou vzduchovou cívku v podstatě nelze docílit žádané magnetické indukce pohybující se okolo 100 mT. Délka podpůrného plastového válce byla 6 cm a jeho průměr 2,6 cm.



Pro omezení magnetického odporu a tím navýšení magnetického toku produkovaného tímto uspořádáním bylo do středu vzduchové cívky přidáno feromagnetické jádro. Tímto došlo i k navýšení žádané magnetické indukce, která je přímo úměrná magnetickému toku. Konstrukce se opírala o stejný základ jako v předchozím uvedeném případě s tím rozdílem, že do čela válcové kostry cívky (A) byl navržen otvor pro zasazení feromagnetické tyče o průměru 1,8 cm.

Magnetický tok je dále úměrný součinu napájecího proudu a počtu závitů. Vzhledem k tomuto faktu byl snížen průřez vodiče na 1,54 cm<sup>2</sup>, abychom docílili zvýšení počtu závitů, a to hlavně z důvodu snížení potřebného napájecího proudu. Pro lepší navíjení cívky byla vytvořena nová válcová kostra (pro jednoduchost ozn. B) nasazená na původní kostru (A) se zmíněným otvorem pro feromagnetické jádro. To umožňovalo při navíjení vodiče ukládat závity těsně vedle sebe a zvýšit tím počet možných závitů. Detailní průřez popisované konstrukce je na *Obr. 4.2*, její provedení v praxi je na *Obr. 4.3*, kde vinutí je skryto za rantlem kostry na navíjení.



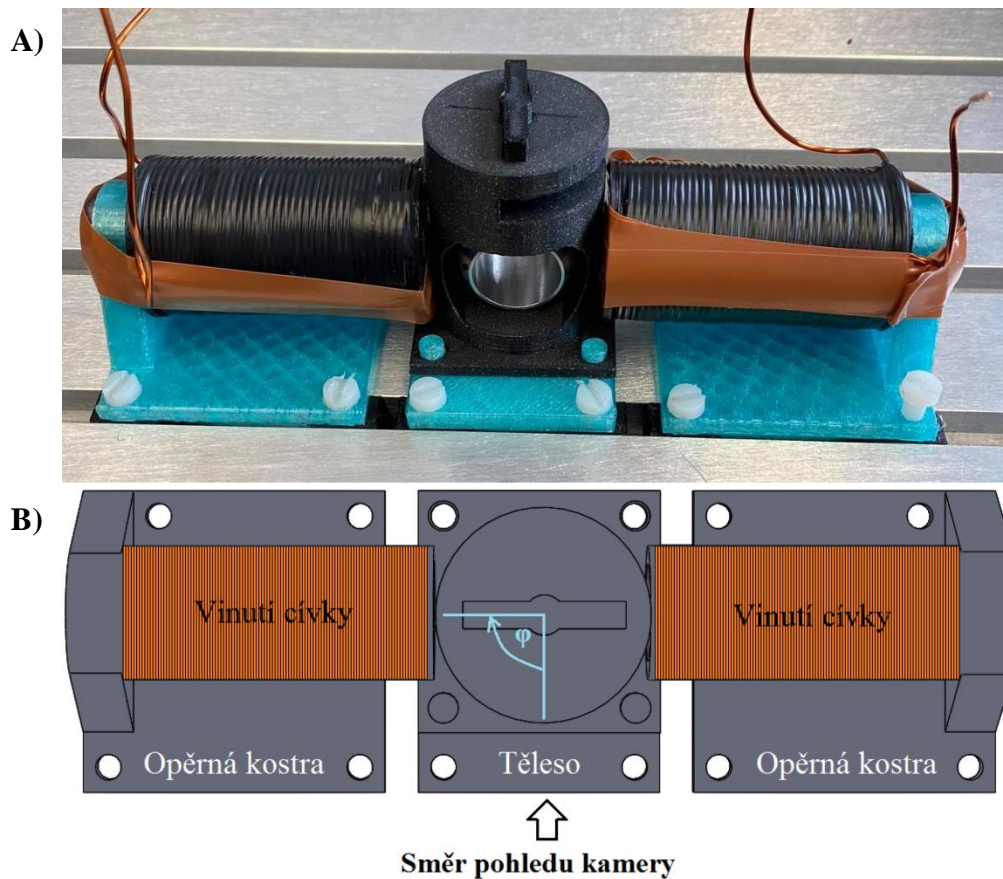
*Obr. 4.2 - Řez cívkou*



*Obr. 4.3 Praktické provedení cívky*

### 4.3 Základní experimentální ověření navržené koncepce

Takto navržené jednotlivé elementy byly užity k pokročilé zkoušce ověření funkčnosti koncepce. Zkouška sestávala z vizuálního ověření funkčnosti, natáčení pohybu koule vysokorychlostní kamerou a měření magnetické indukce u povrchu koule. Uspořádání testovací sestavy je zobrazeno na *Obr. 4.4*.



*Obr. 4.4 - Uspořádání testovací sestavy, A) reálná podoba testovací sestavy v úhlu natočení koule 90°, B) model testovací sestavy zdůrazňující úhel natočení koule*

Při vizuálním ověření funkčnosti byl zvyšován elektrický proud do doby, než došlo k otočení koule. Otočení koule opravdu nastalo, a to při hodnotě napájecího proudu přibližně  $I = 7,5$  A při hodnotě odporu cívek  $0,15 \Omega$ . Rychlost otočení však znemožňuje analýzu pohybu pouhým okem, jedná se přibližně o desítky ms. Z tohoto důvodu bylo potřeba užít zmíněnou vysokorychlostní kameru a následně vyhodnotit pořízené snímky.

### 4.3.1 Pohybová studie

Cílem této studie bylo zanalyzovat pohyb koule v závislosti na velikosti napájecího proudu. Pro snímání pohybu byla použita vysokorychlostní kamera s charakteristickým počtem snímků za vteřinu – 1024 fps. Na *Obr 4.4* je názorně zobrazeno rozložení jednotlivých komponentů s vyznačeným směrem snímání, úhel  $\varphi$  signalizuje úhel natočení koule. Veškeré komponenty sestavy byly připevněny na testovací podložku z hliníku pomocí plastových šroubů, kamera byla upevněna na stativu. Z důvodu nemožnosti otočení koule z úhlu natočení  $\varphi = 0^\circ$  pomocí jediné dvojice cívek (silové účinky jsou na obou stranách koule stejné, viz. rozložení  $\mathbf{B}$  v mat. modelu), byla počáteční poloha měření při  $\varphi = 6^\circ$ , ze které se již koule bezpečně otočila.

Tato studie objevila skutečnosti, které by nebylo možné zpozorovat pouhým okem. Rychlost otočení koule ventilu je velmi vysoká a jediný rozpoznatelný vjem je v podstatě charakteristický zvuk cvaknutí, kdy dřík narazí do dorazu jeho konečné polohy. Vizually jsou rozpoznatelné pouze obě krajní polohy ventilu – otevřeno a zavřeno.

Nejnižší hodnota proudu, při níž bylo dosaženo otočení koule, byla již zmíněných 7,5 A a stala se tak výchozí hodnotou v dané zkoušce. Dále bylo zaznamenáváno otáčení při zvyšování hodnot proudu o 2,5 A až do 22,5 A. Tyto proudy byly na cívky přiváděny skokově přímo z laboratorního stabilizovaného zdroje, aby byla přesně dána jejich hodnota.

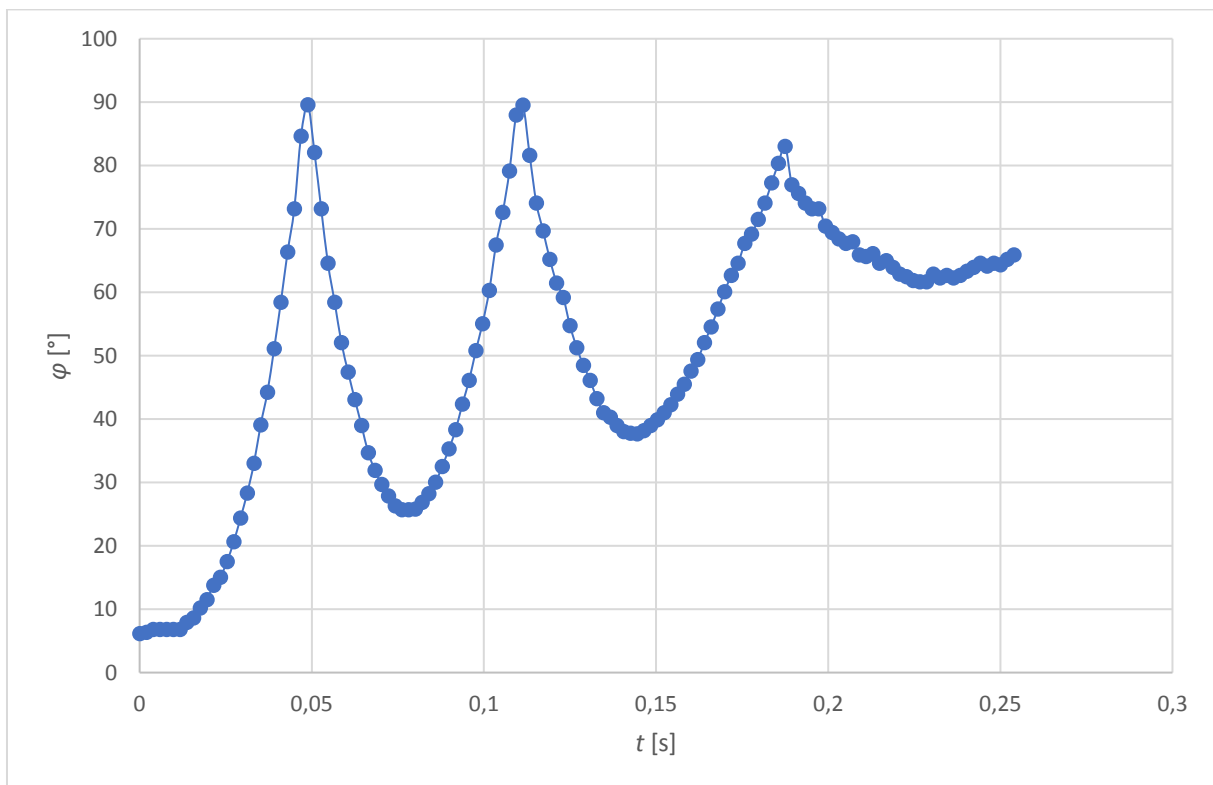
Výstupem měření byly videonahrávky průběhu otáčení koule ve formátu .raw, které bylo nutné komprimovat na formát .mp4. Komprimované soubory již po spuštění poskytly zpomalený záznam zkoušky. Na první pohled byly zřetelné vcelku velké odrazy po prvním naražení do konečné pozice otočení koule při vyšších napájecích prouděch. Při napájecím proudu rovném 7,5 A došlo pouze k minimálnímu odrazu.

Pro bližší prozkoumání záznamů přišla na řadu jejich analýza v softwaru Tracker: Video Analysis and modeling tool. Jedná se o ‚open source‘ software užívaný k fyzikální analýze videonahrávek, jako může být například analýza sledování pohybu hmotného bodu a zaznamenávání jeho polohy v čase užívaná v tomto případě. Z tohoto důvodu byla ještě před samotným měřením na kouli vyznačena značka tmavým fixem. Tato značka posloužila jako hmotný bod, kterou mohl program sledovat. Popis rozhraní softwaru Tracker se nachází v příloze C společně s vybranými snímky z vysokorychlostní kamery.

V tomto softwaru lze zkoumat pouze lineární pohyb v osách x a y, to ovšem v případě kulového ventilu nestačí a bylo nutné tyto hodnoty transformovat tak, aby výsledkem této transformace byl namísto hodnoty lineárního pohybu po ose x úhel otočení koule označený symbolem  $\varphi$  Při známé hodnotě poloměru koule  $R$ . Tato transformace proběhla v tabulkovém procesoru Excel pomocí vzorce

$$\varphi = \arctg \frac{x}{\sqrt{R^2 - x^2}}. \quad (4.1)$$

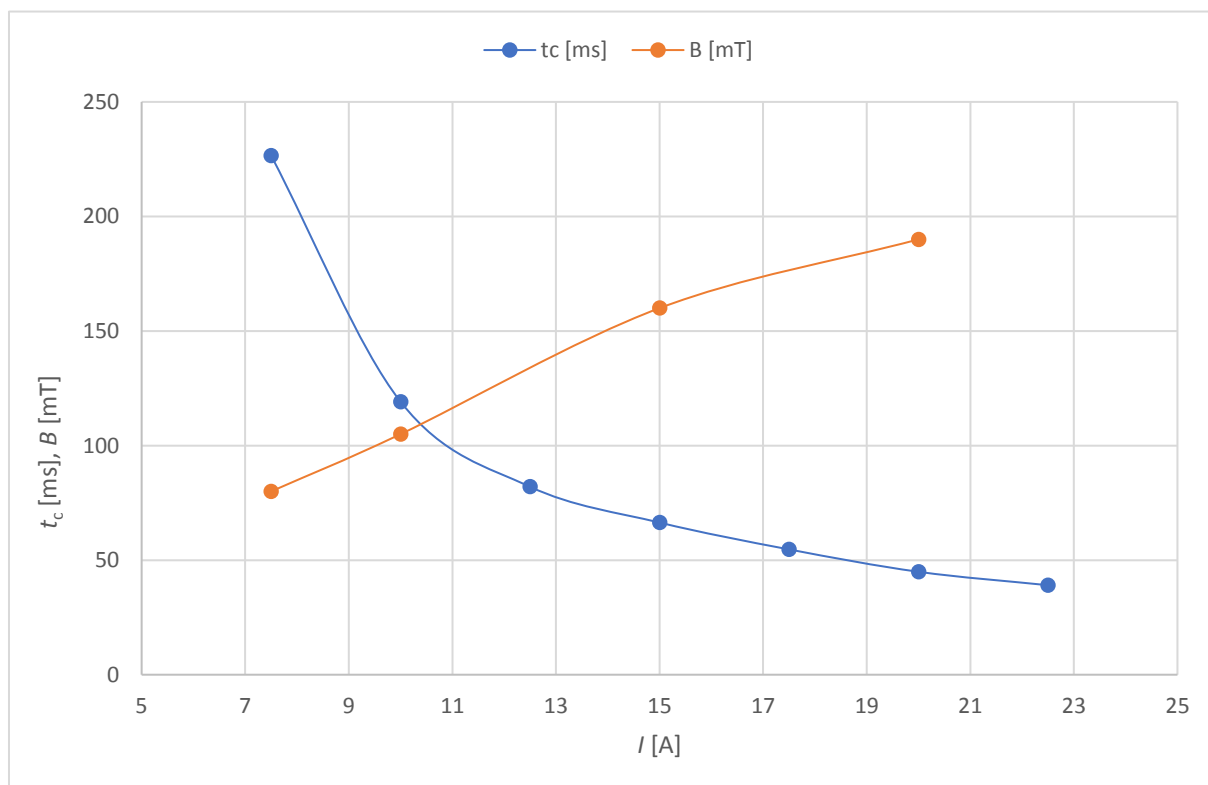
Při znalosti úhlu otočení koule byly vykresleny charakteristiky jeho hodnot v závislosti na čase pro každou hodnotu vstupního proudu  $I$ . Zde jsou velice dobře vykresleny již zmíněné odrazy. Jejich počet a velikost jsou úměrné procházejícímu proudu. Příkladem je na *Obr. 4.5* tato závislost při proudu 22,5 ampér, kde jsou odrazy největší. V grafu se objevuje určitá chybovost, a to vlivem chybovosti softwaru, který nebyl v některých pozicích koule, zejména v blízkosti úhlu otočení  $90^\circ$ , schopen správně lokalizovat hmotný bod (černou značku), pohybující se v zastíněném prostoru.



*Obr. 4.5 - Pohybová studie při napájení  $I = 22,5 A$*

Lze jednoduše zpozorovat jednotlivé odrazy, v tomto případě tedy přesně tři a následně ustalování polohy koule. Koule není ustálená na  $90^\circ$  úhlu otočení, jelikož je moment působící na ni v tomto úhlu natočení již velice slabý (viz. Matematický model) a není schopen překonat tření koule v prostoru. Výsledné grafy pro ostatní hodnoty napájecího proudu se nachází v příloze D.

Další vhodnou charakteristikou je ku příkladu čas otočení koule do koncové polohy v závislosti na napájecím proudu. Z logiky věci vyplývá, že nejkratší čas otočení by měl být při maximálním proudu (při zanedbávání odrazů) a nejdelší naopak při minimálním. Tuto domněnku potvrzuje *Obr. 4.6*. Můžeme pozorovat, že se vrůstajícím napájecím proudem se snižuje čas otočení a v podstatě tak roste rychlost otočení koule, a to exponenciálně. V tomto grafu je zakomponována charakteristika magnetické indukce, která je popsána v následující podkapitole.



*Obr. 4.6 - Závislost času otočení a magnetické indukce na napájecím proudu*

### 4.3.2 Magnetická indukce u povrchu koule

Magnetická indukce byla měřena Teslametrem v úhlu natočení koule  $90^\circ$ , tedy v plně dotočené pozici koule. Vstupní proud nabýval celkem čtyř hodnot – 7,5 A, 10 A, 15 A, 20 A. V ideálním případě by naměřená magnetická indukce při proudu 20 A měla odpovídat zjištěné magnetické indukci vycházející z matematického modelu. Naměřená data jsou v Tab. 4.1.

Tab. 4.1 – Naměřené hodnoty magnetické indukce v závislosti na napájecím proudu

I [A]	7,5	10	15	20
B [mT]	80	105	160	190

Z tabulky lze vyčíst, že naměřená magnetická indukce při proudu 20 A je 190 mT, což tedy přibližně odpovídá indukci zjištěné z matematického modelu, která se pohybovala okolo 200 mT. Zároveň díky znalosti minimálního zjistitelného potřebného proudu k otočení koule byla možnost proměřit minimální potřebnou indukci, která byla stanovena na 80 mT. Na *Obr. 4.6* je krom závislosti času otočení na proudu vykreslena i zmíněná závislost magnetické indukce. Z uvedené charakteristiky lze zjistit, že křivka závislosti magnetické indukce na napájecím proudu roste téměř lineárně tzn., že magnetická indukce je přímo úměrná napájecímu proudu.

Zároveň z tohoto obrázku lze vyčíst, že při stále zvyšující se magnetické indukci klesá čas potřebný k otočení koule. Pro vysoké hodnoty magnetické indukce však tento pokles času bude již minimální (blížící se k nule). Proto je třeba v dalším výzkumu správně dimenzovat parametry ventilu, a to zejména cívek, aby nebyl odebírána příliš vysoký proud pro vytvoření magnetického pole a s tím spojené magnetické indukce, což by snížilo jeho dobu otočení jen minimálně.

## Závěr

Předložená bakalářská práce se zabývá ovládním polohy kulového ventilu čistě elektromagnetickým polem. Toto ovládní ventilu by mělo v budoucnosti nahrazovat technicky složitější, rozměrnější, poruchovější a mnohem pomalejší pneumatické, hydraulické a používané elektromechanické ovládací systémy. Jen pro představu stejně velký elektromechanický ventil z *Obr. 1.4* potřebuje k plnému otevření nebo uzavření čas 4,5 s, zatímco navržený prototyp plně elektromagnetického ventilu toto dokáže zhruba do 200 ms, z čehož vyplývá, že má tento proces přibližně 22,5 krát rychlejší.

Cílem práce bylo navrhnout základní koncepci plně elektromagnetického kulového ventilu. Tuto koncepci a princip funkce se podařilo formulovat a experimentálně ověřit. Cíl práce se podařilo splnit.

Použití tohoto typu ventilu by se mohlo uplatnit v široké škále odvětví. Oproti klasickým elektromechanickým aktuátorům odpadají nároky na údržbu mechanických částí (ložiska motoru, promazávání, ...). S tím souvisí i teoretická možnost odebrání dřívku a využití jiného možného způsobu fixace koule, ale to bude ověřováno až při dalším vývoji ventilu.

Vzhledem k přímému užití elektromagnetického pole bude v praxi potřeba využít jiné materiály k výrobě tělesa ventilu, než které jsou běžně užívány u současných konstrukcí ventilů. Zkoumání a správný výběr těchto materiálů se naskytá jako další podnět pro budoucí výzkum. S použitými materiály na těleso souvisí i izolace v okolí koule. Výzkum byl prozatím cílen na ventil s koulí pohybující se v prostoru s minimalizovaným třením, což v reálu právě díky izolaci není možné.

V dalším postupu výzkumu je třeba zaměřit se na dimenzování prototypu ventilu vzhledem k reálným provozním vlastnostem (doplnění kanálu, ...). S tím souvisí úprava testovacího tělesa s možností přivedení média a plného otestování funkce. Dalším krokem bude rozšíření koncepce o další dva páry cívek (docílení plné kontroly nad otevíráním a uzavíráním ventilu + možnost docílení střední polohy), omezování napájecího proudu a celková úprava konstrukce cívek spojená s volbou materiálu a rozměrů feromagnetického jádra a volbou průřezu vodiče a počtu závitů s požadavky na co nejmenší možnou konstrukci při zachování plné funkčnosti. V neposlední řadě je třeba vyvinout ovládací systém, který bude spínat dané cívky v závislosti na vstupním požadavku na polohu ventilu.

## Seznam literatury

- [1] NESBITT, Brian. *Handbook of Valves and Actuators: Valves Manual International*. Elsevier Science & Technology Books, 2007. ISBN 1856174948.
- [2] MAYER, Daniel a ULRYCH, Bohuš. *Elektromagnetické aktuátory*. Praha: BEN – technická literatura, 2008. ISBN 978-80-7300-2.
- [3] MACH, František, KURFIŘT, Martin a DOLEŽEL, Ivo, 2019. *Bistable Fully Electromagnetic Valve for High-Speed and Fail-Safe Operations*. IEEE Transaction on Industrial Electronics. **66**(1), 349-357. ISSN 0278-0046
- [4] *Průmysl 4.0 má v Česku své místo* [online]. MPOČR: ©2016 [cit. 4.6.2020]. Dostupné z: <https://www.mpo.cz/assets/dokumenty/53723/64358/658713/priloha001.pdf>
- [5] GERSHENFELD, Neil, KRIKORIAN, Raffi a COHEN, Danny, 2004. *The Internet of Things*. Scientific American. **291**(4), 76-81. ISSN 0036-8733
- [6] KULHÁNEK, Petr. *Teoretická fyzika 4: Teorie elektromagnetického pole*. Praha: Aldebaran Group of Astrophysics, 2020.



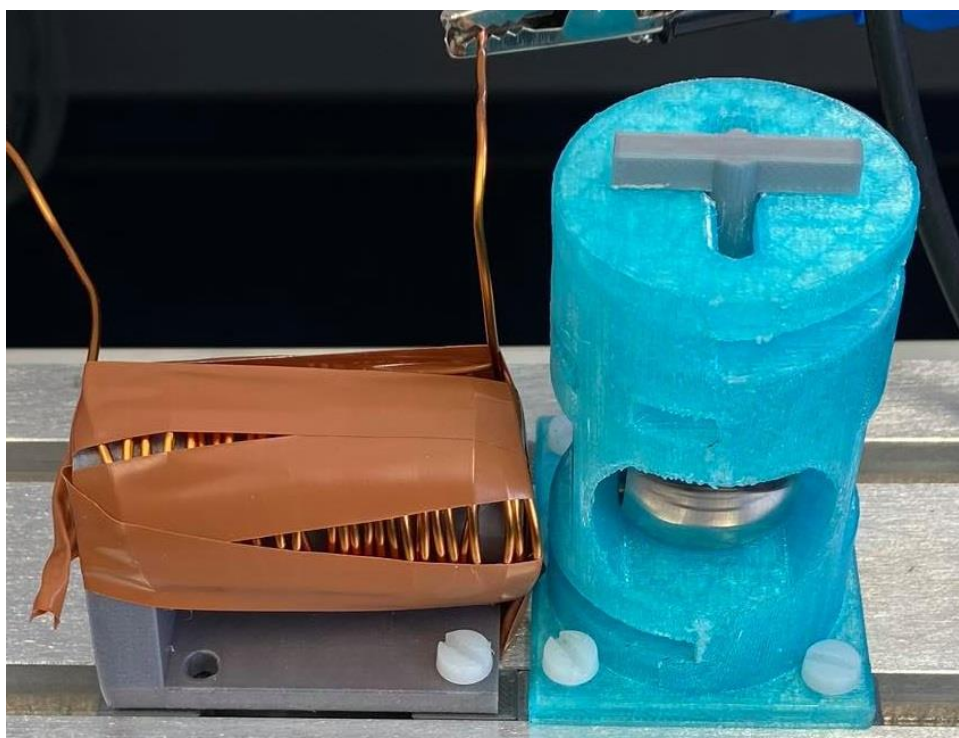
## Seznam obrázků

Obr. 1.1 - Základní části kulových ventilů, A) Složený kulový ventil (se zprůhledněným tělesem), B) Dřík, C) Koule, D) Těleso ventilu .....	11
Obr. 1.2 - Bistabilní elektromagnetický ventil [3] .....	16
Obr. 1.3 - Příklad ventilu s elektromechanickým aktuátorem od firmy PEVEKO, A) Těleso ventilu, B) Píst, C) Přítlačná pružina, D) Propojovací díl, E) Cívky s magnetickým obvodem .....	17
Obr. 1.4 - Koncepce kulového ventilu s vnitřní inteligencí .....	18
Obr. 2.1 - Testovací sestava základního ověření funkčnosti v různých pohledech.....	19
Obr. 2.2 - Zkouška polohováním magnetu vůči kouli.....	20
Obr. 2.3 - Koncepce s vestavěným vinutím .....	22
Obr. 2.4 - Koncepce s vnějším vinutím, $B$ – místa s největší magnetickou indukcí, $d$ – vzdálenost koule od cívky, $\Phi$ – magnetický tok .....	23
Obr. 3.1 - Podoba modelu v COMSOL.....	27
Obr. 3.2 - Magnetizační charakteristika použitého materiálu .....	28
Obr. 3.3 - Rozložení magnetické indukce při $\varphi = 0^\circ$ .....	29
Obr. 3.4 - Rozložení magnetické indukce při $\varphi = 45^\circ$ .....	29
Obr. 3.5 - Rozložení magnetické indukce při $\varphi = 90^\circ$ .....	30
Obr. 3.6 - Momentová charakteristika .....	30
Obr. 4.1 - Dřík s testovacím tělesem .....	32
Obr. 4.2 - Řez cívkou .....	33
Obr. 4.3 Praktické provedení cívky.....	33
Obr. 4.4 - Uspořádání testovací sestavy, A) reálná podoba testovací sestavy v úhlu natočení koule $90^\circ$ , B) model testovací sestavy zdůrazňující úhel natočení koule .....	34
Obr. 4.5 - Pohybová studie při napájení $I = 22,5$ A .....	36
Obr. 4.6 - Závislost času otočení a magnetické indukce na napájecím proudu .....	37
Obr. P.1 - Koncepce s vnějším vinutím .....	43
Obr. P.2 - Koncepce se zabudovaným vinutím .....	43
Obr. P.3 - Feromagnetická koule pohled 1 .....	44
Obr. P.4 - Feromagnetická koule pohled 2.....	44
Obr. P.5 - Dřík.....	44
Obr. P.6 - Prototypové těleso .....	44
Obr. P.7 - Sestavené cívky s jádrem pohled 2.....	44
Obr. P.8 - Sestavené cívky s jádrem pohled 1 .....	44
Obr. P.9 - Opora pro cívky .....	45
Obr. P.10 - Kostra cívek (již navinutá cívka).....	45

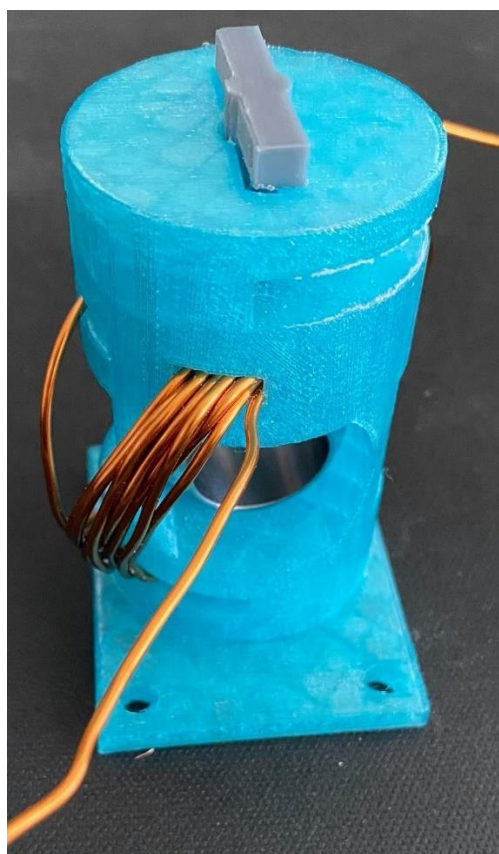
Obr. P.11 - Navíjení cívek.....	45
Obr. P.12 - Popis rozhraní programu Tracker .....	46
Obr. P.13 - Snímky pohybové studie - zleva: $t = 0$ ms, $t = 33$ ms, $t = 49$ ms .....	46
Obr. P.14 - Pohybová studie při napájení $I = 20$ A .....	47
Obr. P.15 - Pohybová studie při napájení $I = 17,5$ A .....	47
Obr. P.16 - Pohybová studie při napájení $I = 15$ A .....	48
Obr. P.17 - Pohybová studie při napájení $I = 12,5$ A .....	48
Obr. P.18 - Pohybová studie při napájení $I = 10$ A .....	49
Obr. P.19 - Pohybová studie při napájení $I = 7,5$ A .....	49

## Přílohy

### Příloha A – ověřování koncepcí – základní díly, zkouška



*Obr. P.1 - Koncepce s vnějším vinutím*



*Obr. P.2 - Koncepce se zabudovaným vinutím*

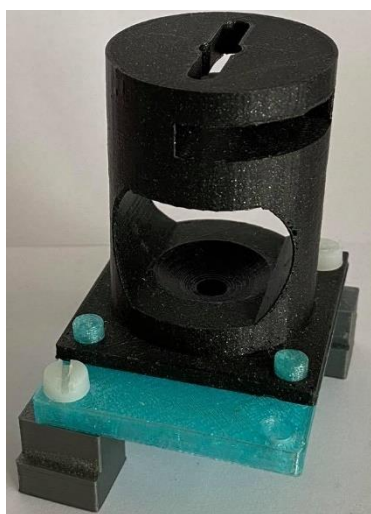
## Příloha B – komponenty finálního prototypu ventilu



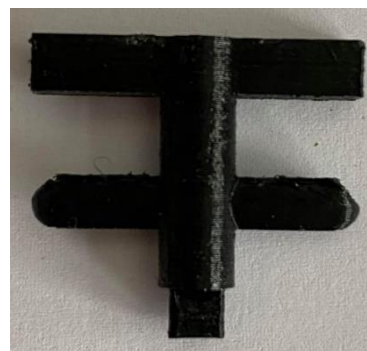
Obr. P.3 - Feromagnetická koule pohled 1



Obr. P.4 - Feromagnetická koule pohled 2



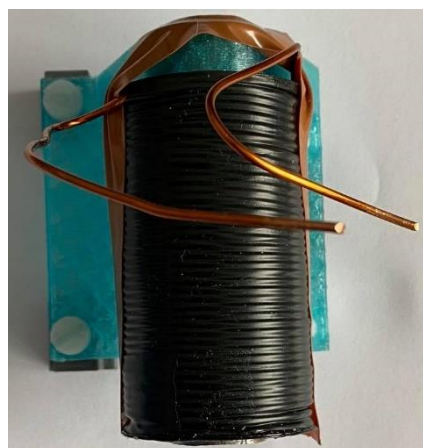
Obr. P.6 - Prototypové těleso



Obr. P.5 - Dřík



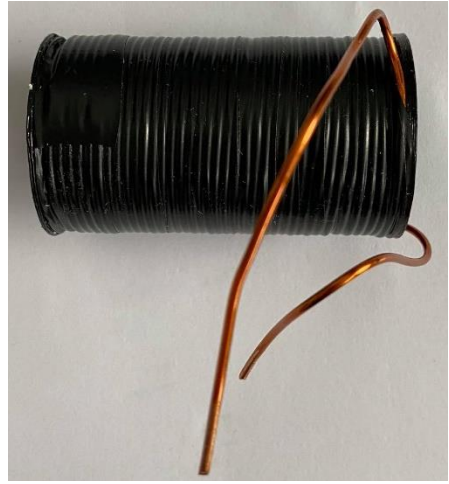
Obr. P.8 - Sestavené cívky s jádrem pohled 1



Obr. P.7 - Sestavené cívky s jádrem pohled 2



*Obr. P.9 - Opora pro cívky*



*Obr. P.10 - Kostra cívek (již navinutá cívka)*



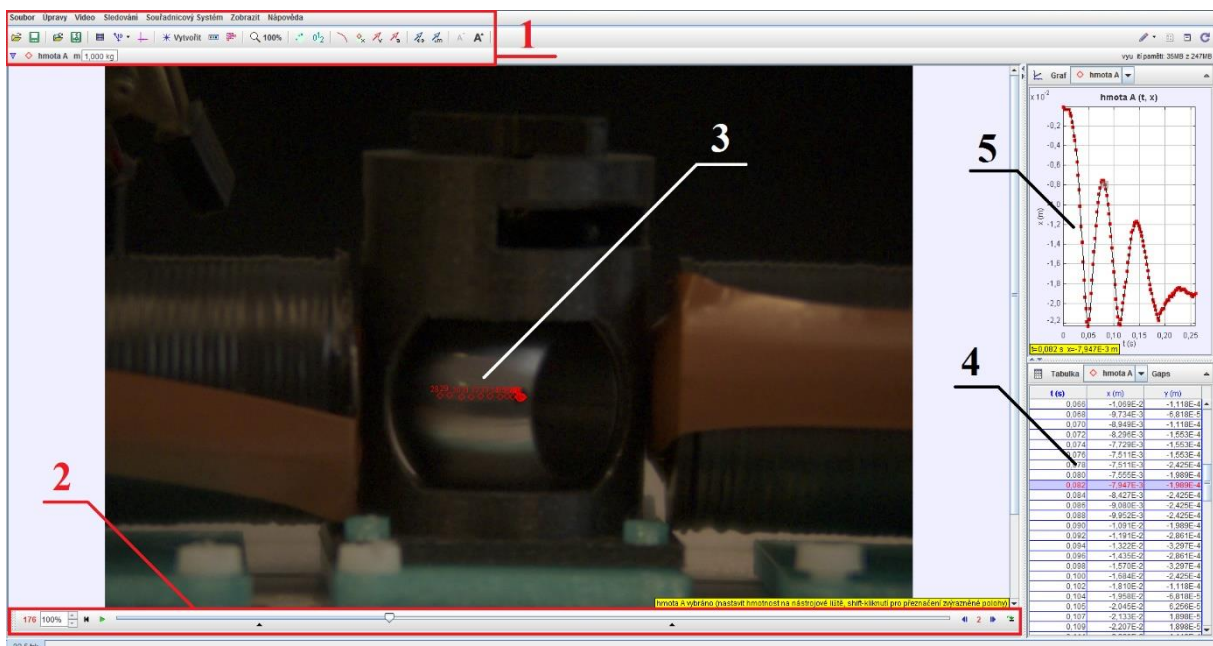
*Obr. P.11 - Navíjení cívek*



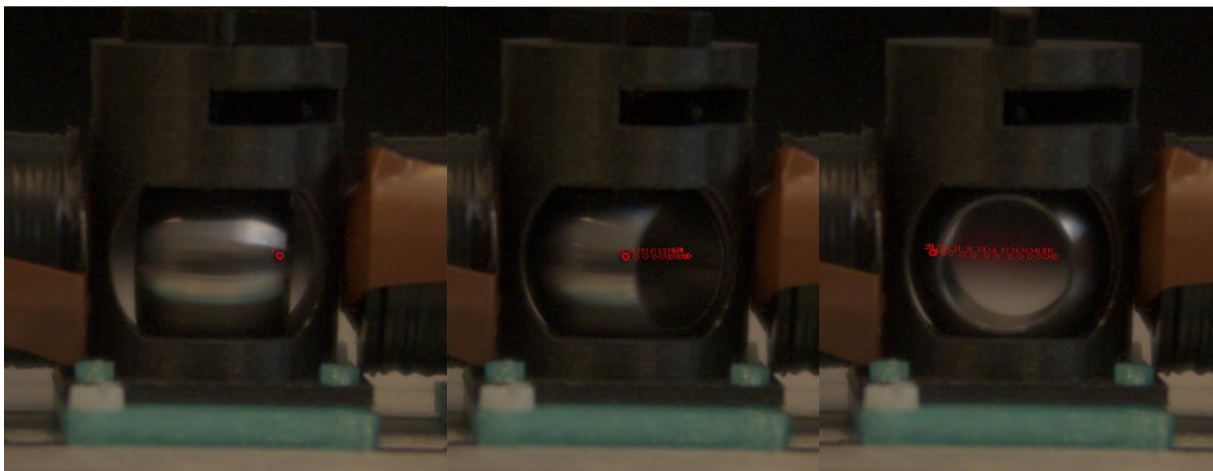
## Příloha C – Popis rozhraní programu Tracker a vybrané snímky

Průběh analýzy v softwaru Tracker je znázorněn na *obr. P.10*. Jednotlivá čísla popisují základní pracovní plochy:

- 1 – panel nástrojů, kde se definují jednotlivé parametry analýzy,
- 2 – panel pro ovládání videa – určení prvního snímku analýzy, atd ...,
- 3 – červené tečky zaznamenávající pohyb hmotného bodu (černé značky),
- 4 – vypisování poloh hmotného bodu v osách x, y v závislosti na čase,
- 5 – vykreslování grafu polohy hmotného bodu v ose x v závislosti na čase.

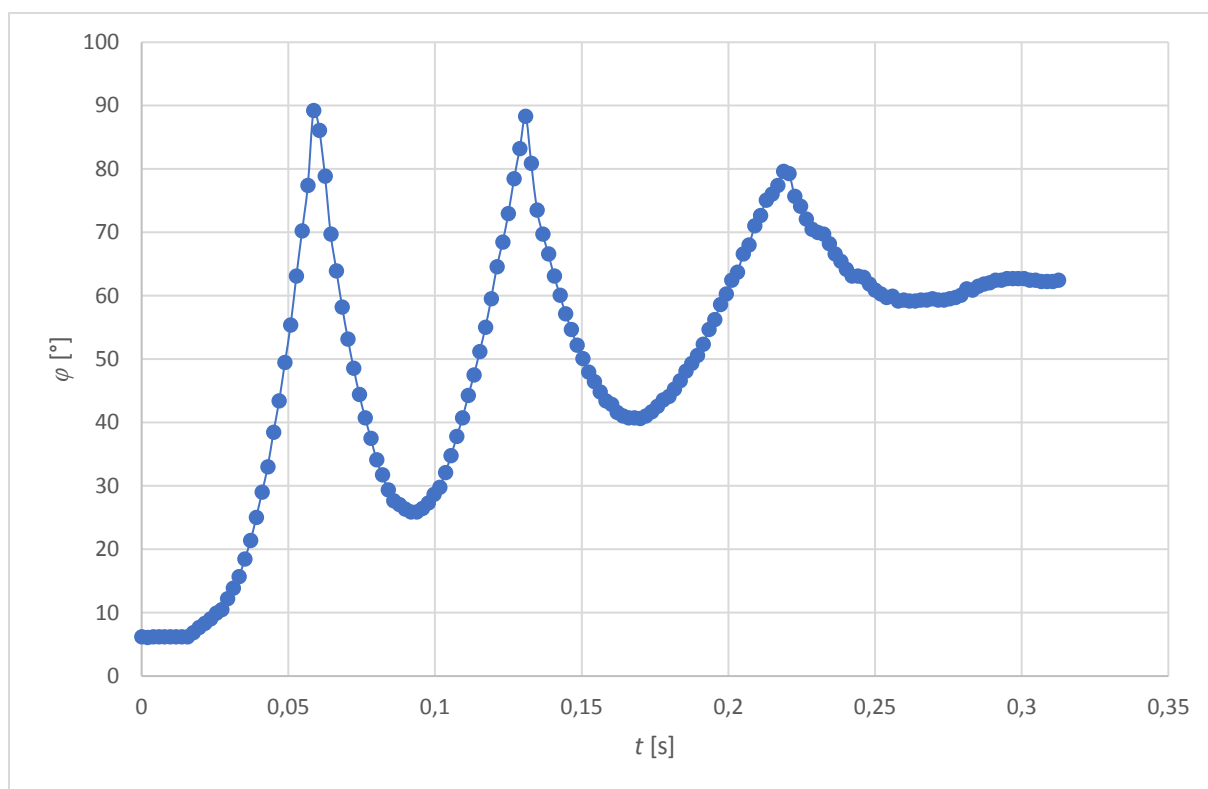


Obr. P.12 - Popis rozhraní programu Tracker

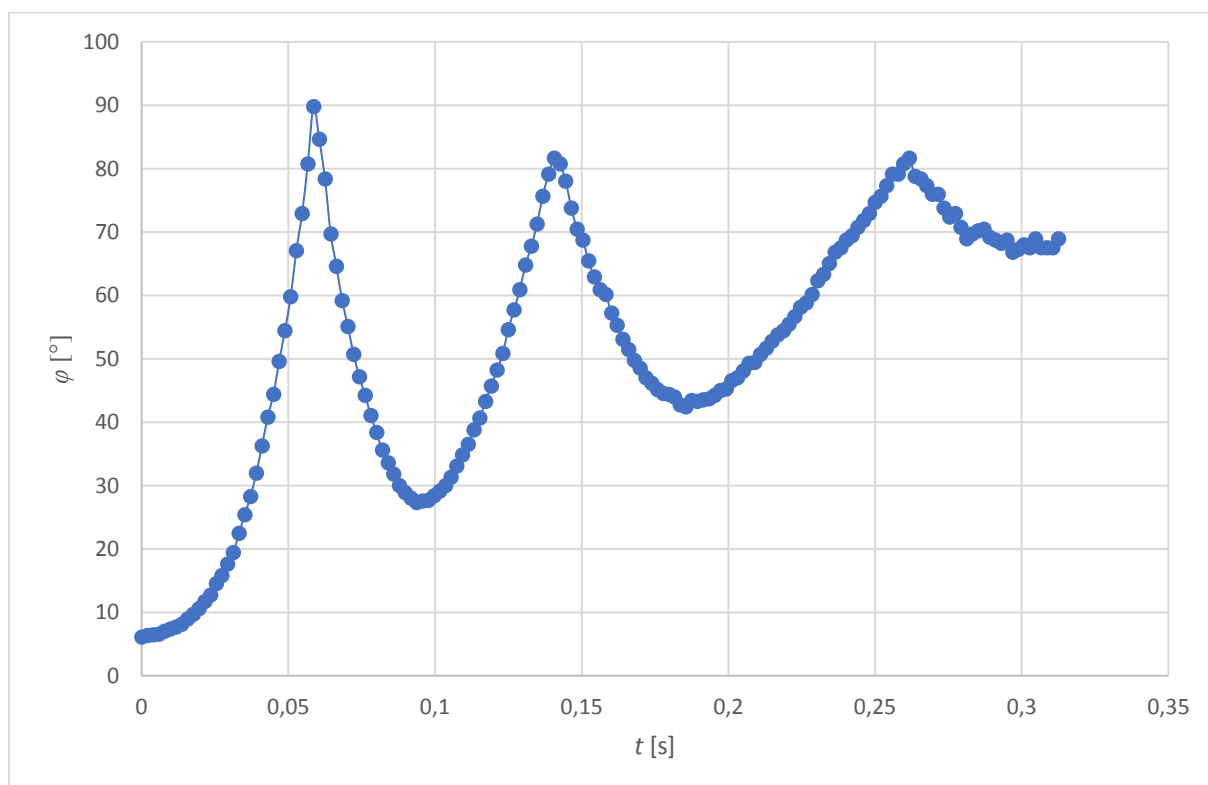


Obr. P.13 - Snímky pohybové studie - zleva:  $t = 0$  ms,  $t = 33$  ms,  $t = 49$  ms

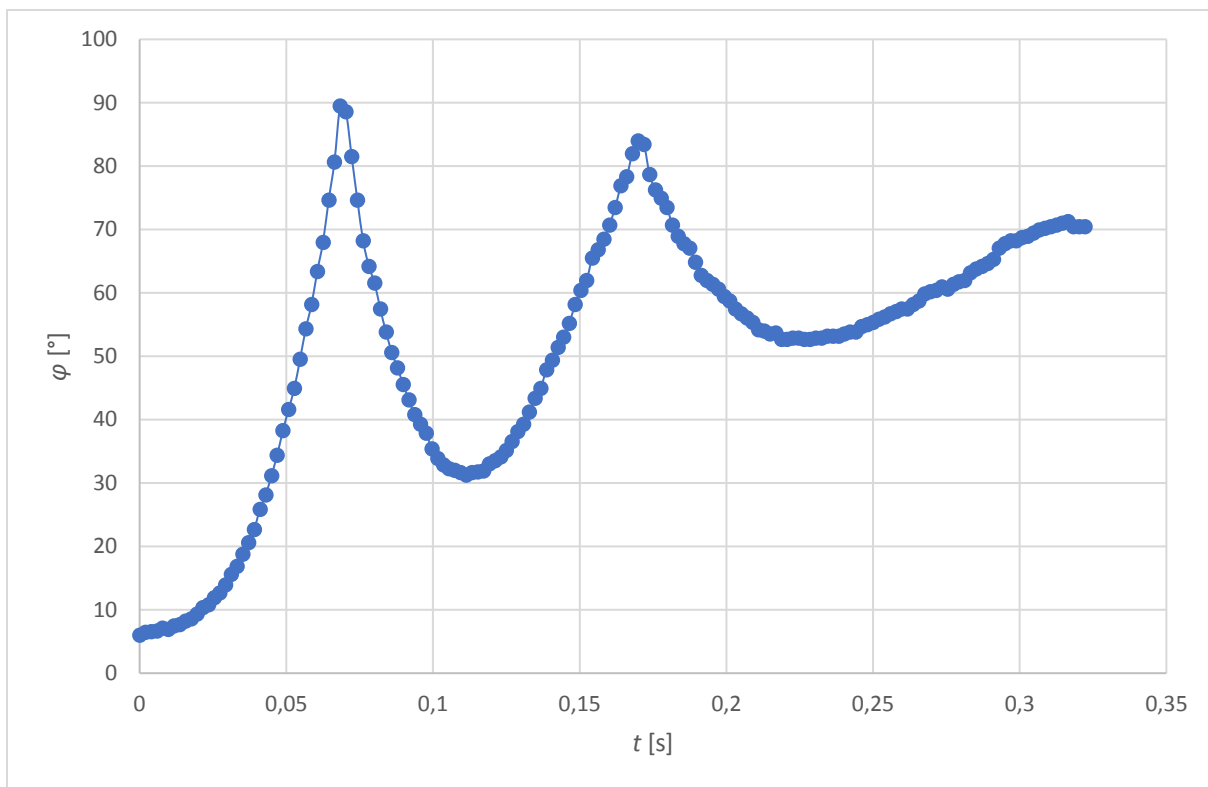
## Příloha D – Grafy výsledků pohybové studie



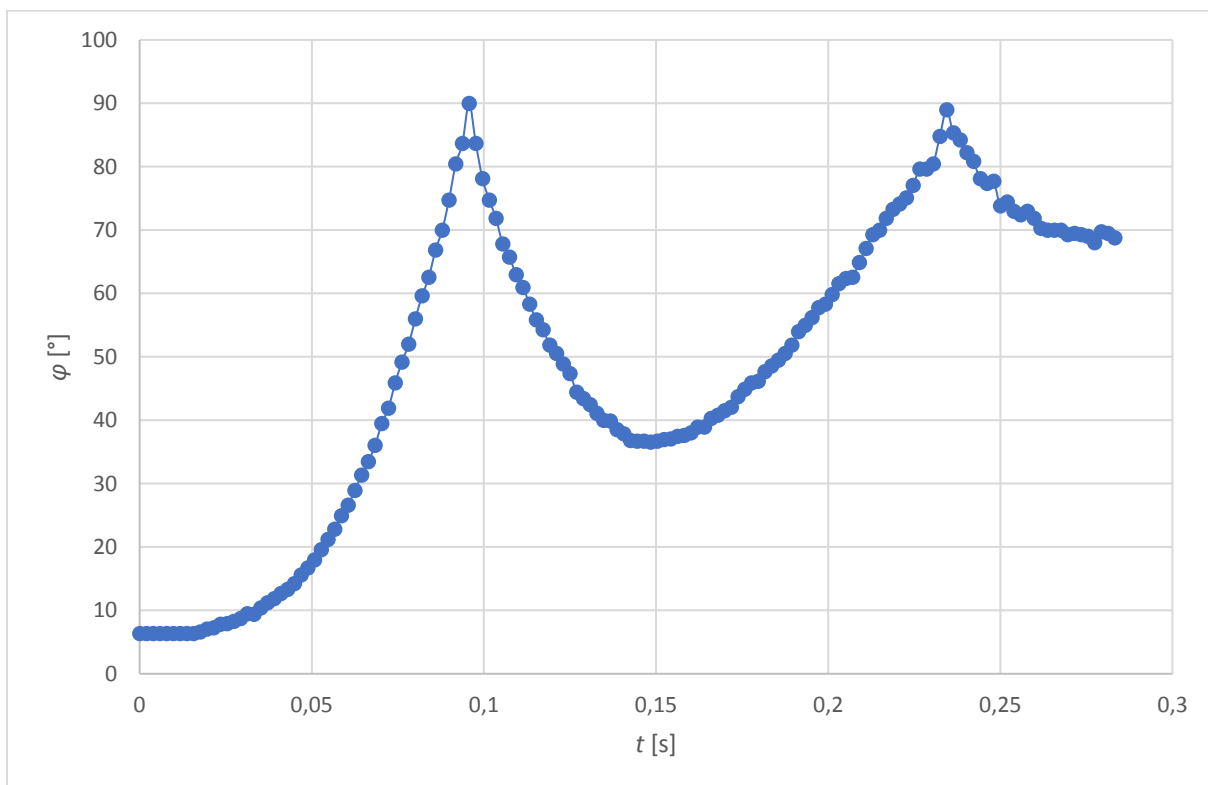
Obr. P.14 - Pohybová studie při napájení  $I = 20\text{ A}$



Obr. P.15 - Pohybová studie při napájení  $I = 17,5\text{ A}$

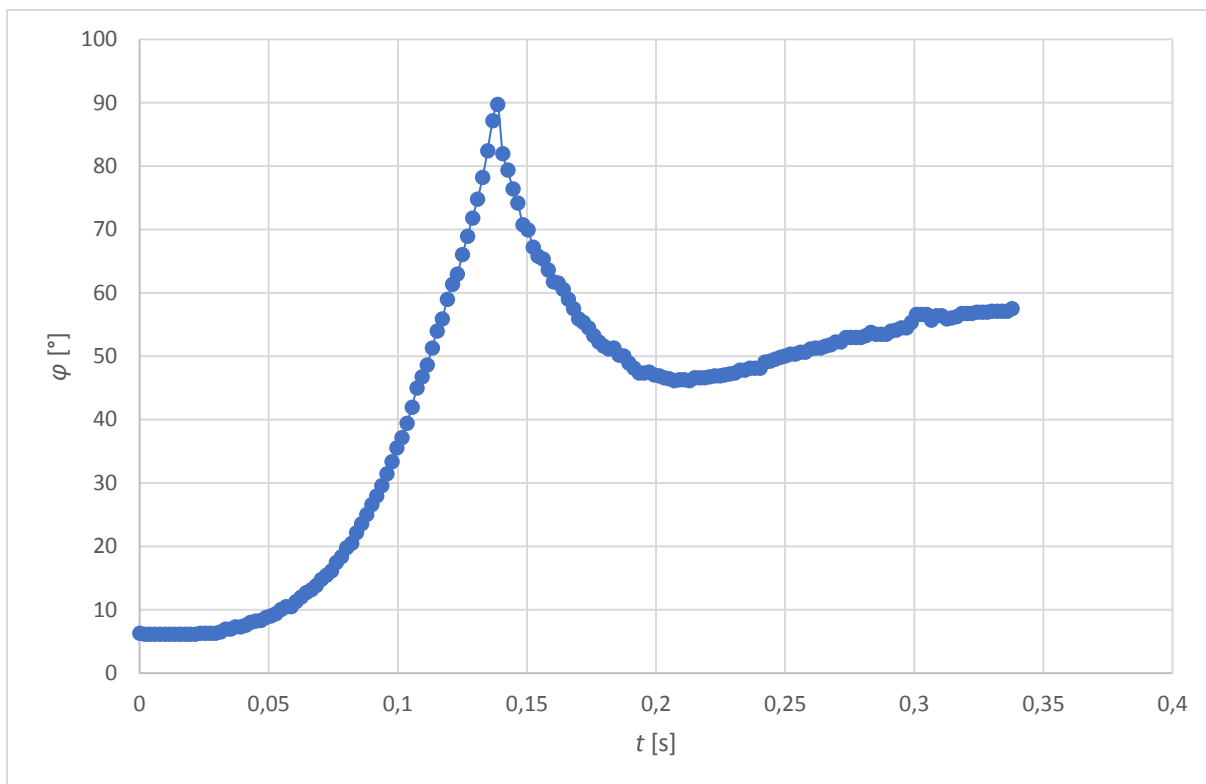


Obr. P.16 - Pohybová studie při napájení  $I = 15\text{ A}$

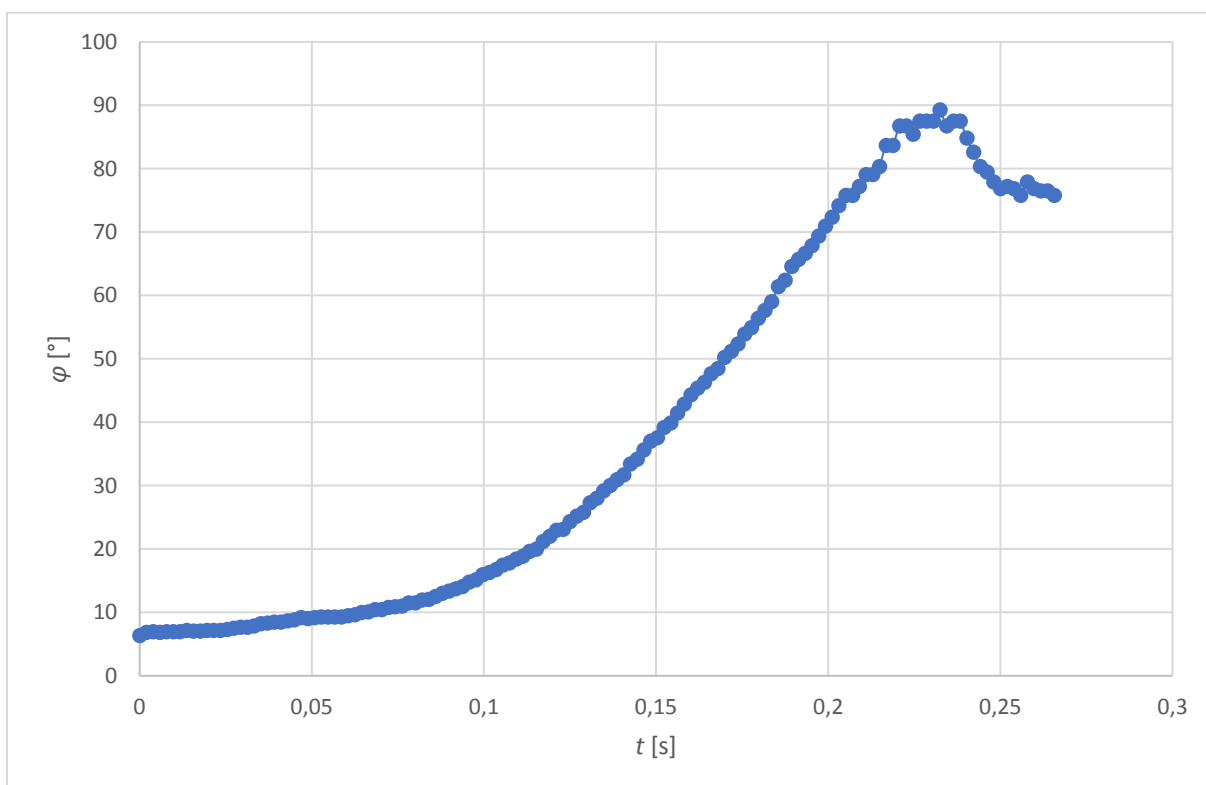


Obr. P.17 - Pohybová studie při napájení  $I = 12,5\text{ A}$



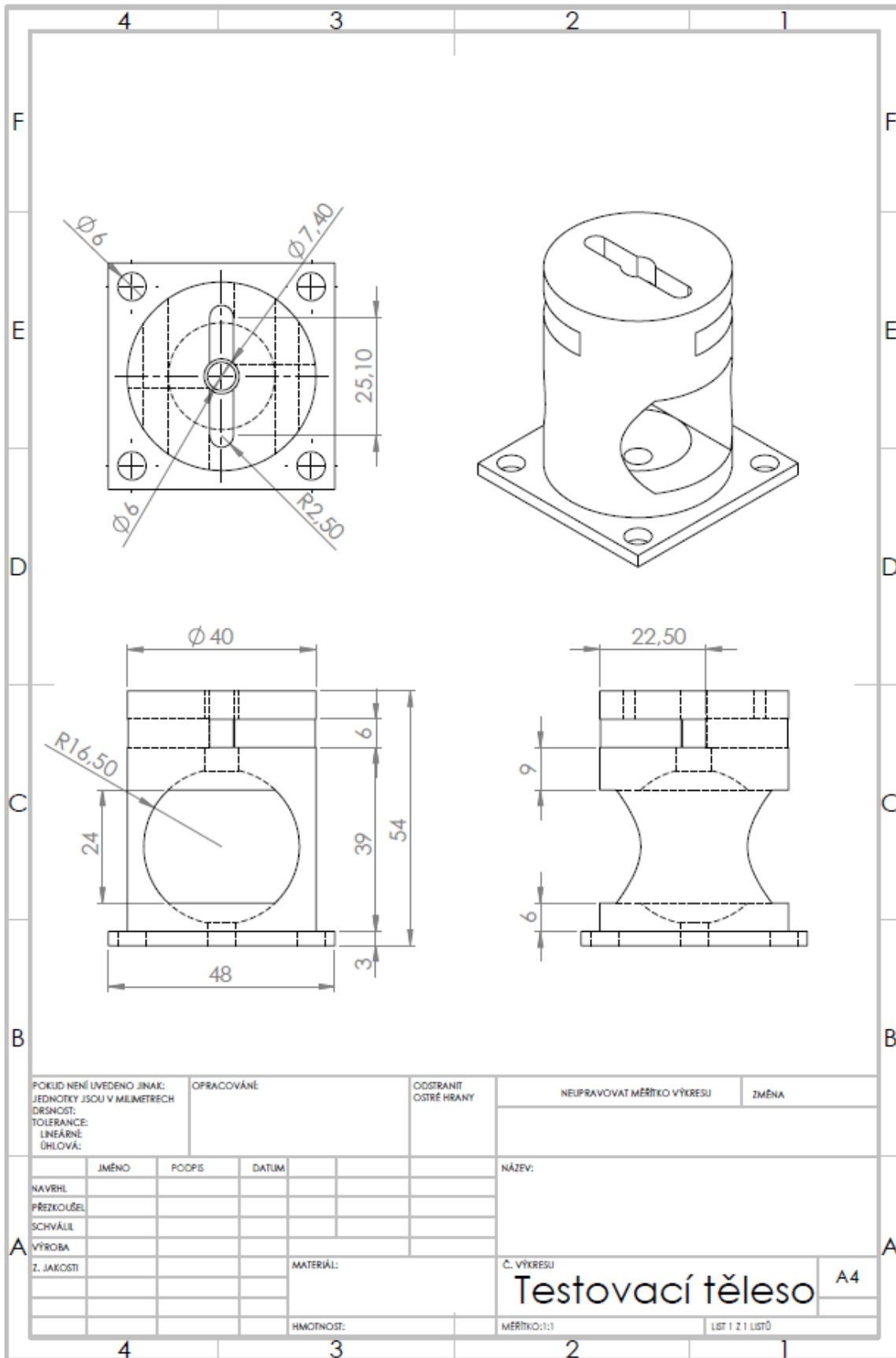


*Obr. P.18 - Pohybová studie při napájení  $I = 10\text{ A}$*



*Obr. P.19 - Pohybová studie při napájení  $I = 7,5\text{ A}$*

# Příloha E – Technická dokumentace prototypu ventilu



POKUD NEJÍ UVEDENO JINAK:  
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
DRSNOST:  
TOLERANCE:  
LINEÁRNĚ  
ÚHLOVĚ:

OPRACOVÁNĚ

ODSTRANIT  
OSTRÉ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	POPSIS	DATUM
NAVRHL			
PŘEZKOUEL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:

Č. VÝKRESU

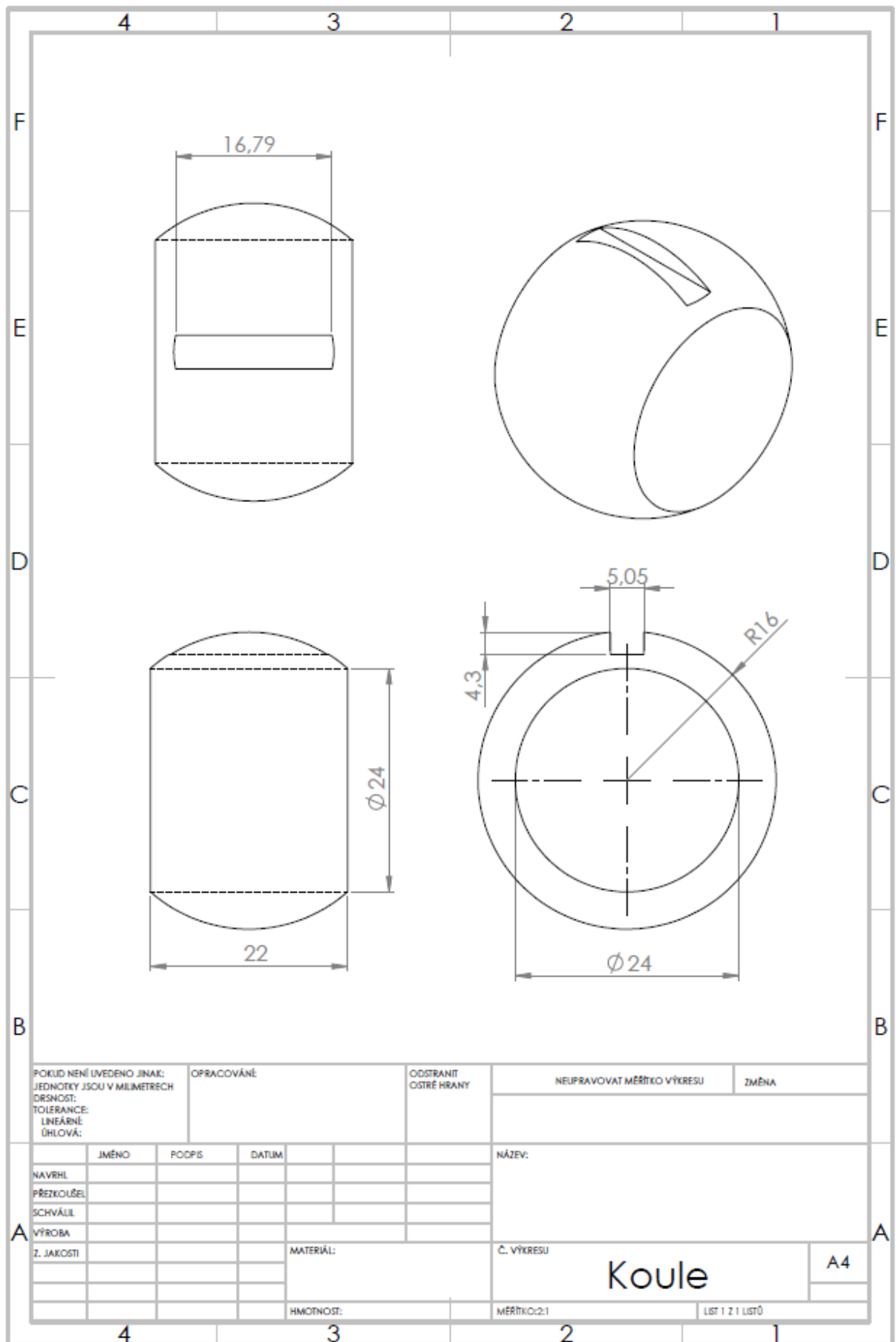
**Testovací těleso**

A4

MĚŘITKO: 1:1

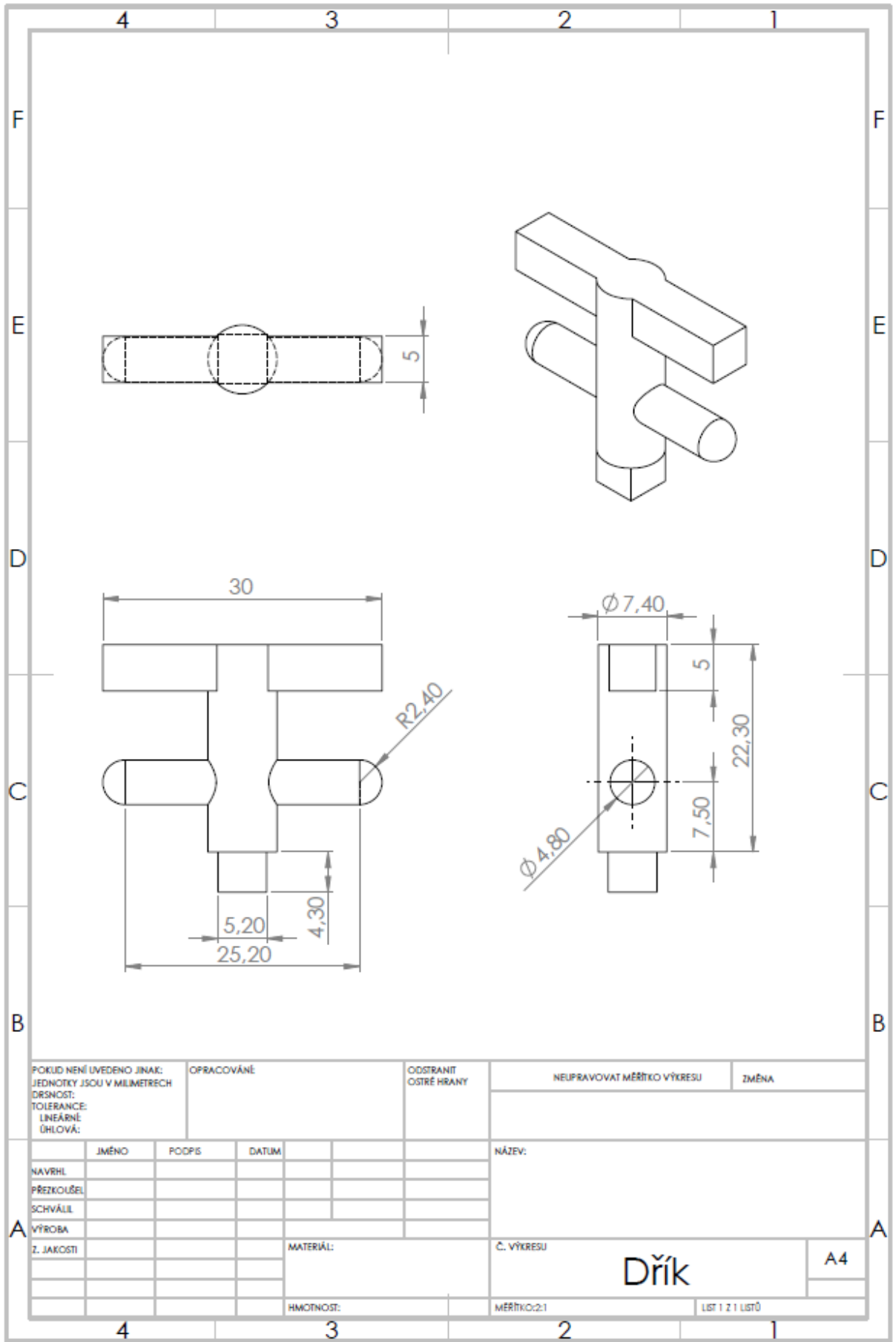
LIST 1 Z 1 LISTŮ

HMOTNOST:



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

Koule



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:  
 JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH  
 DRSNOST:  
 TOLERANCE:  
 LINEÁRNĚ:  
 ÚHLOVĚ:

OPRACOVÁNĚ

ODSTRANIT  
 OSTRÉ HRANY

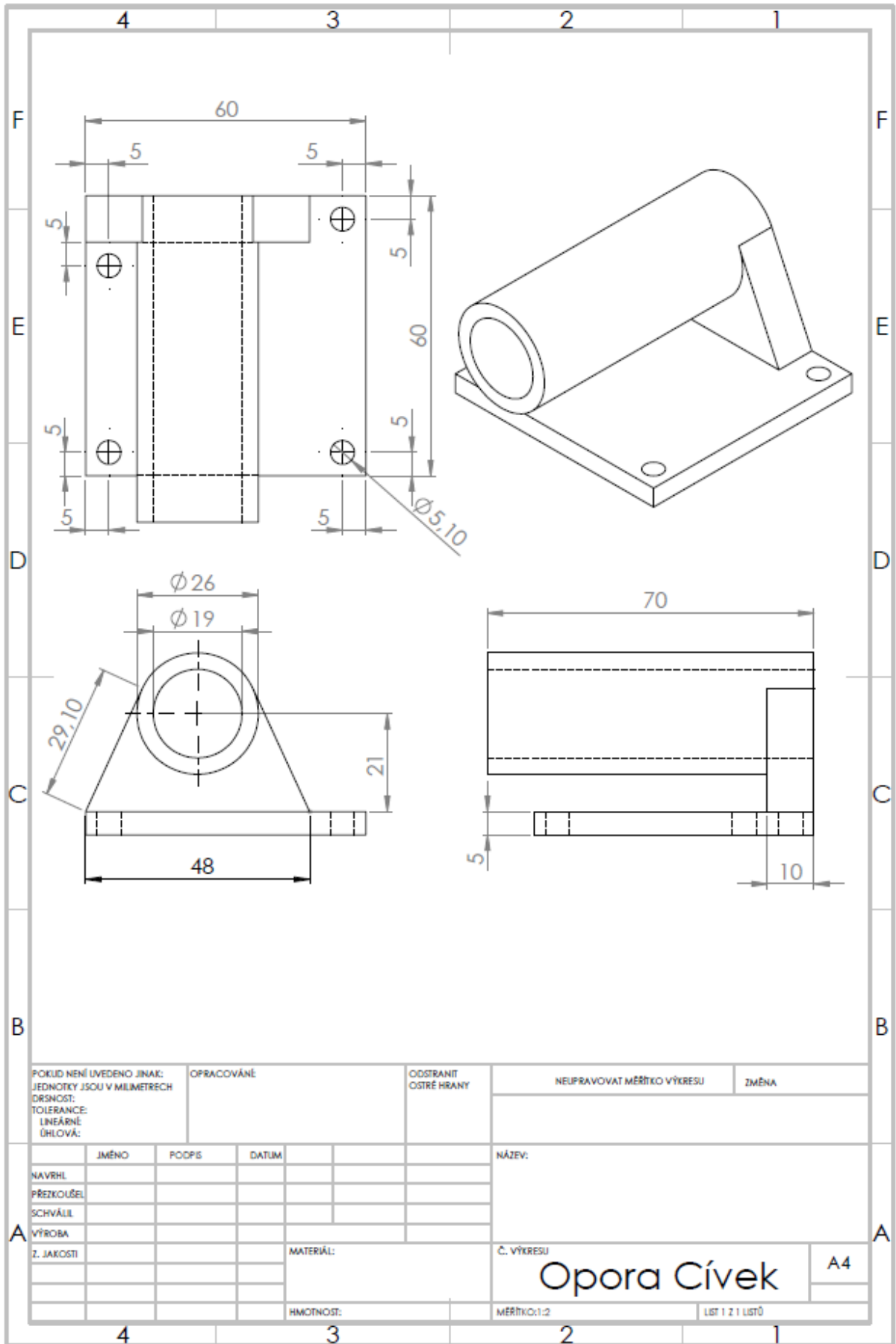
NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

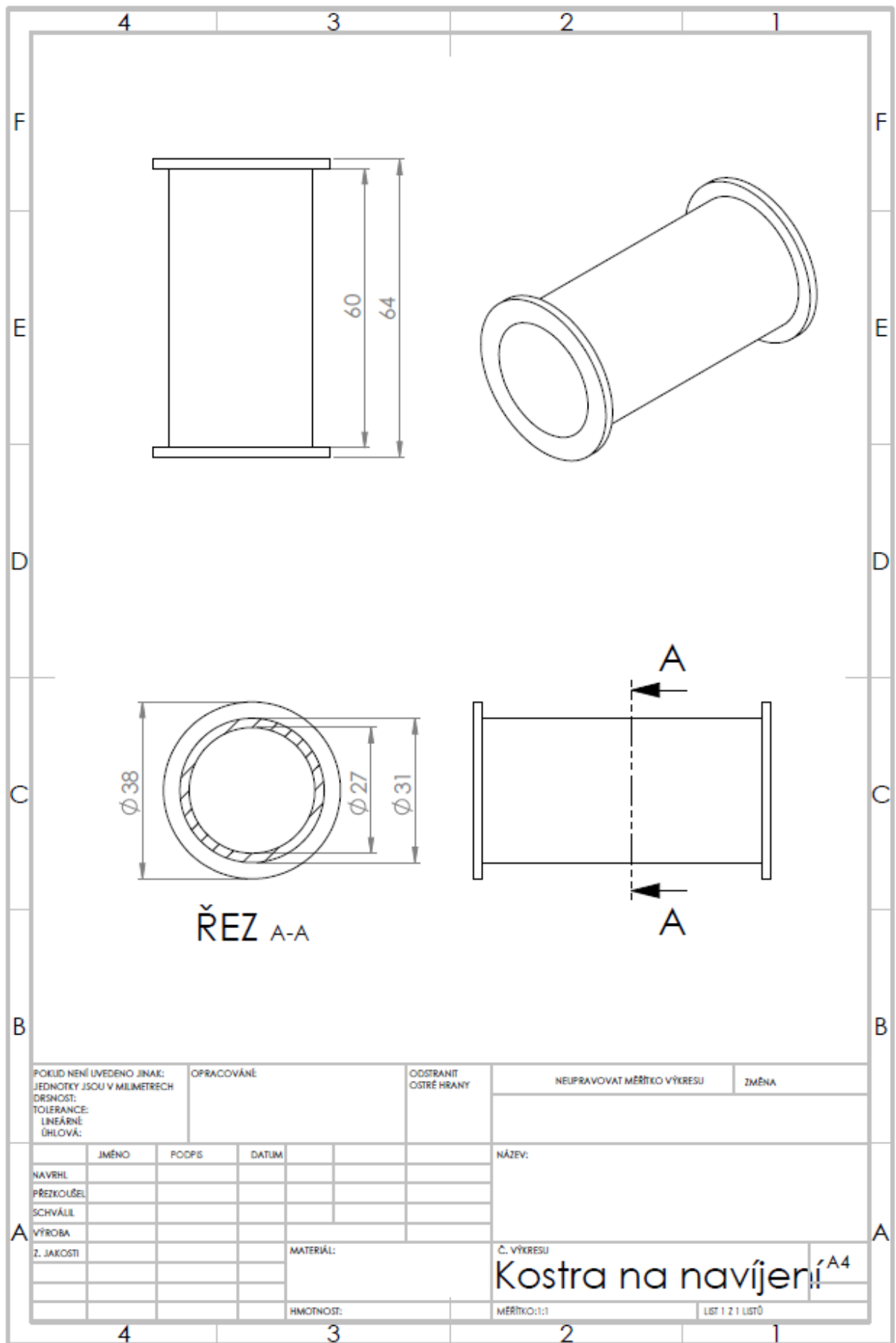
ZMĚNA

	JMÉNO	PODPS	DATUM
NAVRHL			
PŘEZKOUEŠL			
SCHVÁLIL			
VÝROBA			
Z. JAKOSTI			

NÁZEV:  
  
  
 Č. VÝKRESU  
**Dřík**  
 A4

MATERIÁL:  
 HMOTNOST:  
 MĚŘÍTKO:2:1  
 LIST 1 Z 1 LISTŮ





POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH		OPRACOVÁNÉ		ODSTRANIT OSTŘÉ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘITKO VÝKRESU		ZMĚNA	
DRSNOST:									
TOLERANCE:									
LINEÁRNĚ:									
ÚHLOVĚ:									
JMÉNO		PODPIS		DATUM		NÁZEV:			
NAVRHL						Kostra na navíjení <sup>A4</sup>			
PŘEZKOŮŠEL									
SCHVÁLIL									
VÝROBA									
Z. JAKOSTI				MATERIÁL:		Č. VÝKRESU		MĚŘITKO: 1:1	
								LIST 1 Z 1 LISTŮ	
				HMOTNOST:					