

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY**

# **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Magnetoreologická spojka**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
Fakulta elektrotechnická  
Akademický rok: 2014/2015

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Václav FUIT**  
Osobní číslo: **E12B0020K**  
Studijní program: **B2644 Aplikovaná elektrotechnika**  
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**  
Název tématu: **Magnetoreologická spojka**  
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Uveďte výčet vlastností a možných aplikací magnetoreologických kapalin. Akcentujte magnetické kapalinové spojky pevných částí a proveďte průzkum současných technických řešení této aplikace.
2. Srovnejte klasická mechanická řešení spojek s řešením magnetoreologickým.
3. Navrhněte a sestrojte demonstrační magnetoreologickou spojku rotujících hřídelí. Experimentálně ověřte vlastnosti zařízení.
4. Zhodnoťte technologii magnetoreologické spojky a Váš návrh řešení.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

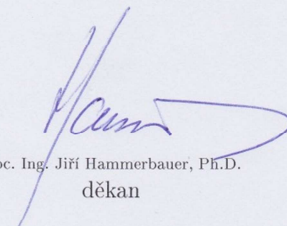
Seznam odborné literatury:

1. MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití. (Elektro. 2007, roč. 17)
2. CARLSON J.D., CATANZARITE D.M., CLAIR, K.A.ST. Commercial magneto-rheological fluid devices. International Journal of Modern Physics B (1996), 10 (23-24), pp. 2857-2865.
3. LEE, U., KIM, D., HUR, N., JEON, D. Design analysis and experimental evaluation of an MR fluid clutch(2000), Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 10 (9), pp. 701-707.

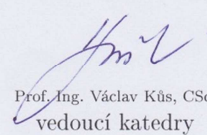
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Polcar, Ph.D.**  
Katedra teoretické elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání bakalářské práce: **8. června 2015**

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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá magnetoviskózním jevem u magnetoreologických kapalin. V úvodu jsou popsány jejich vlastnosti a možné praktické aplikace a konstrukční řešení magnetoreologických spojek. Praktická část pak obsahuje návrh magnetického obvodu pomocí simulace, sestavení MR spojky a samotný experiment.

## **Klíčová slova**

Magnetická kapalina, magnetoreologická kapalina, magnetoviskózní jev, magnetoreologická spojka, magnetoreologická brzda, magnetoreologický tlumič

## **Abstract**

This thesis deals with a research of magnetoviscous effect of magnetic fluids. In the introductory part, properties of magnetic fluids and their possible practical applications and design of the magnetorheological clutch are described. The practical part contains the plan of a magnetic circuit through simulation, construction of MR clutch and the experiment itself.

## **Key words**

Magnetic fluid, magnetorheological fluid, magnetoviscous effect, magnetorheological brake, magnetorheological clutch, magnetorheological damper

## Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 3.6.2015

Václav Fuit

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Petru Polcarovi za vedení a cenné rady.

## Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>9</b>
<b>ÚVOD</b> .....	<b>10</b>
<b>MAGNETOREOLOGICKÉ KAPALINY</b> .....	<b>11</b>
1.1 VLASTNOSTI MR KAPALIN .....	11
1.2 TECHNICKÉ APLIKACE MR KAPALIN .....	12
1.2.1 MR tlumiče v automotive .....	12
1.2.2 MR tlumiče pro seizmickou ochranu .....	13
1.2.3 MR Brzda .....	14
1.2.4 Protézy .....	14
<b>2 SPOJKY</b> .....	<b>15</b>
2.1 KLASICKÉ SPOJKY .....	15
2.2 MAGNETOREOLOGICKÁ SPOJKA .....	16
2.3 SROVNÁNÍ KLASICKÝCH SPOJEK S MR ŘEŠENÍM .....	17
<b>3 NÁVRH MAGNETOREOLOGICKÉ SPOJKY</b> .....	<b>18</b>
3.1 NÁVRH MAGNETICKÉHO OBVODU .....	18
3.1.1 Výpočet budicí cívky s využitím metody magnetických obvodů .....	19
3.1.2 Výpočet budicí cívky s využitím numerické simulace .....	20
3.1.3 Použitá budicí cívka .....	23
3.2 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ SPOJKY .....	23
<b>4 EXPERIMENT</b> .....	<b>25</b>
4.1 MĚŘÍCÍ PŘÍPRAVEK A ZHODNOCENÍ NÁVRHU .....	25
4.2 NAMĚŘENÉ A VYPOČÍTANÉ HODNOTY .....	26
4.3 SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ .....	27
<b>ZÁVĚR</b> .....	<b>28</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>29</b>
<b>PŘÍLOHY</b> .....	<b>30</b>



## Seznam symbolů a zkratek

### Seznam symbolů:

zkratka	název veličiny	rozměr
$A$	magnetický vektorový potenciál	$[\text{Wb}\cdot\text{m}^{-1}]$
$B$	magnetická indukce	$[\text{T}]$
$I$	elektrický proud	$[\text{A}]$
$J$	proudová hustota	$[\text{A}\cdot\text{m}^{-2}]$
$l$	délka	$[\text{m}]$
$l_{\text{Fe}}$	střední délka indukční čáry železe	$[\text{m}]$
$l_{\text{Mez}}$	šířka vzduchové mezery	$[\text{m}]$
$N$	počet závitů	$[-]$
$R_{\text{m}}$	magnetická reluktance	$[\text{H}]$
$R_{\text{mFe}}$	magnetická reluktance železa	$[\text{H}]$
$R_{\text{mMez}}$	magnetická reluktance mezery	$[\text{H}]$
$S$	průřez	$[\text{m}^2]$
$U_{\text{m}}$	magnetické napětí	$[\text{A}]$
$\mu$	permeabilita	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$
$\mu_0$	permeabilita vakua	$[\text{H}\cdot\text{m}^{-1}]$
$\mu_{\text{Fe}}$	relativní permeabilita železa	$[-]$
$\Phi$	magnetický tok	$[\text{Wb}]$

### Seznam zkratek:

MR	magnetoreologický
----	-------------------

## Úvod

Přestože jsou magnetické kapaliny známy již několik desítek let, teprve v posledních letech se s příchodem nanotechnologií zintenzivnil jejich výzkum. Původně byly vyvinuty v NASA pro řízení toku paliva v beztlakovém stavu. Pro tento účel se sice již nepoužívají, avšak díky jejich vlastnostem nacházejí uplatnění v mnoha dalších odvětvích. Magnetická kapalina je suspenze složená z nosné kapaliny (olej, voda) a pevných feromagnetických částic [1].

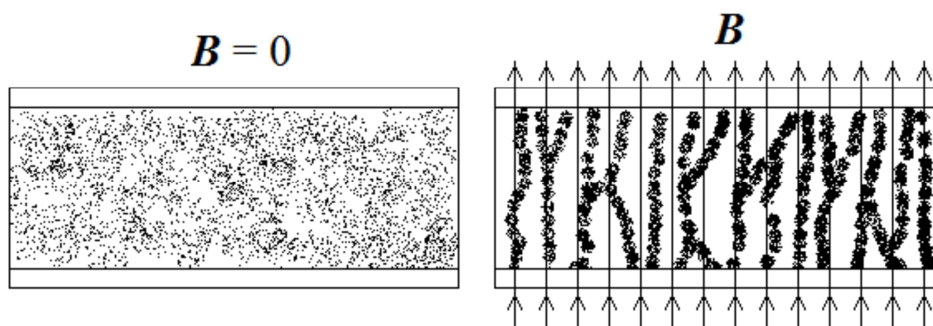
V bakalářské práci se zabývám magnetoreologickou kapalinou, která v magnetickém poli mění viskozitu a může změnit skupenství z kapalného na pevné. Tento jev označujeme jako magnetoreologický, respektive magnetoviskózní jev. Tento jev se nevyskytuje u všech magnetických kapalin, je podmíněn velikostí feromagnetických částic 1-20  $\mu\text{m}$ . Poté následuje průzkum současných technických řešení a nakonec sestavení demonstrační MR spojky rotujících hřídelí a ověření jejích vlastností.

# Magnetoreologické kapaliny

## 1.1 Vlastnosti MR kapalin

Magnetoreologické kapaliny jsou charakteristické svým magnetoviskózním (magnetoreologickým) jevem. Tento nastane při určité intenzitě magnetického pole a dostatečné koncentraci feromagnetických částic. Roli hraje také velikost feromagnetických částic, která se u MR kapalin pohybuje mezi 1 – 20  $\mu\text{m}$ .

Magnetoviskózní jev je znázorněn na obr. 1.1. Bez vnějšího magnetického pole jsou feromagnetické částice volně rozptýleny v nosné kapalině. Po vložení kapaliny do magnetického pole se částice přeskupí dle směru siločar magnetického pole. Při dostatečně silné intenzitě magnetického pole a koncentrace feromagnetických částic dojde ke změně skupenství z kapalného na pevné, nejvyšší viskozita je pak ve směru kolmém na siločáry magnetického pole.



Obr. 1.1. Magnetoreologický jev, vlevo bez přiloženého magnetického pole, vpravo uskupení částic ve směru siločar (převzato z [2])

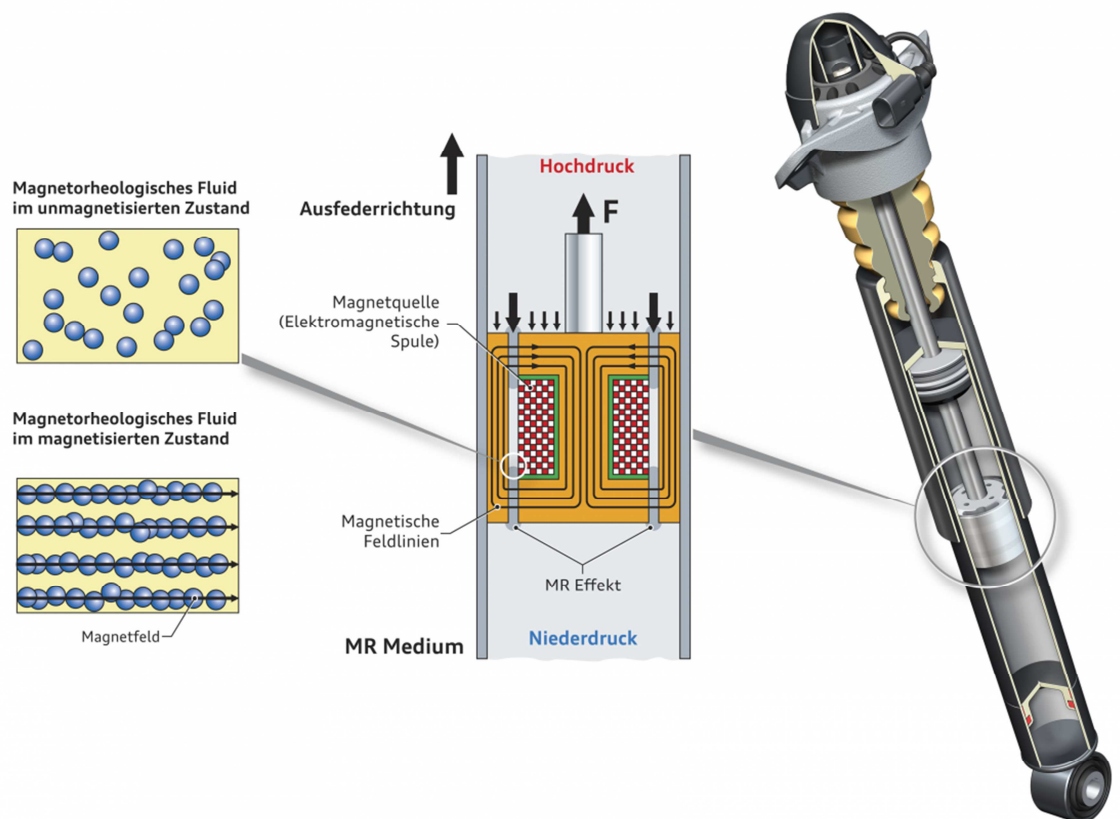
Protože MR kapaliny obsahují feromagnetické částice, má i tato suspenze i hysterezní vlastnosti a teplotní omezení v podobě Curieovy teploty, kdy MR kapalina ztrácí feromagnetické vlastnosti, respektive schopnost magnetoviskózního jevu a je srovnatelná s pevnými feromagnetiky.

Mezi další vlastnosti magnetoreologických kapalin patří elektrická pevnost a vodivost, která je určena elektrickou pevností nosné složky i přes rozptýlené vodivé feromagnetické částice [2].

## 1.2 Technické aplikace MR kapalin

### 1.2.1 MR tlumiče v automotive

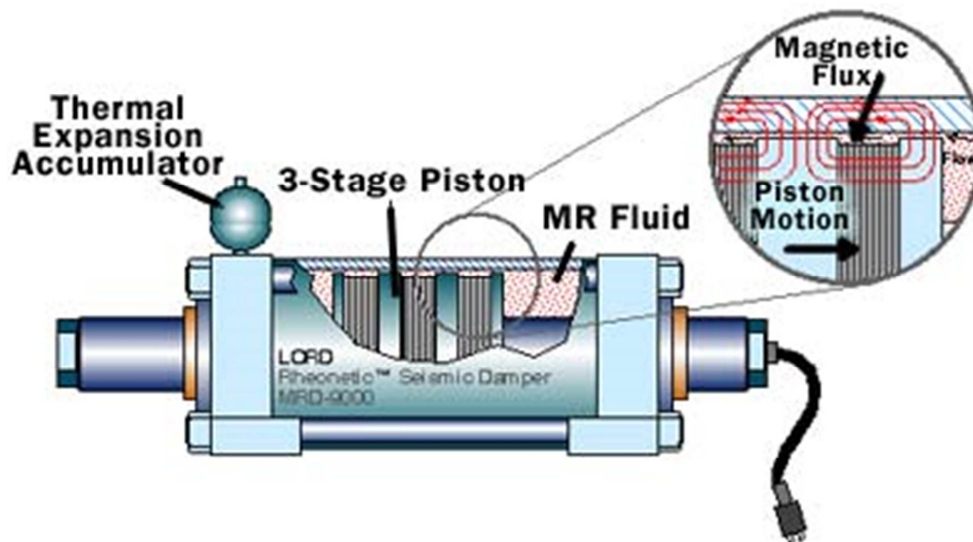
Díky magnetoviskóznímu jevu lze tyto magnetoreologické kapaliny využít jako přímo říditelné elektromechanické převodníky, například řízené MR tlumiče v automotive. Na obrázku je znázorněn princip MR tlumiče Audi magnetic ride, použitý ve vozech Audi (TT, R8, A3), nebo pod označením Magna ride u vozů Ferrari (Fiorano, Scaglietti, California, F430, Italia). Skládá se z těla tlumiče, cívky a magnetoreologické kapaliny. Otvory v pístu proudí MR kapalina, jejíž viskozita resp. tlumící síla je řízena elektronickou řídicí jednotkou EDC. Jednotka komunikuje se všemi systémy ABS, ASR, ESP. Mezi výhody tohoto tlumiče patří velmi rychlá odezva 5ms - oproti 15ms u konvenčních tlumičů, nastavení tvrdosti tlumení při jízdě. Mezi nevýhody patří cena, kvůli které je tento systém dostupný pouze u vyšších tříd a nutnost vlastní řídicí jednotky a senzorů [3, 4, 5].



Obr. 1.2 MR Tlumič v podání Audi (převzato z [3])

## 1.2.2 MR tlumiče pro seizmickou ochranu

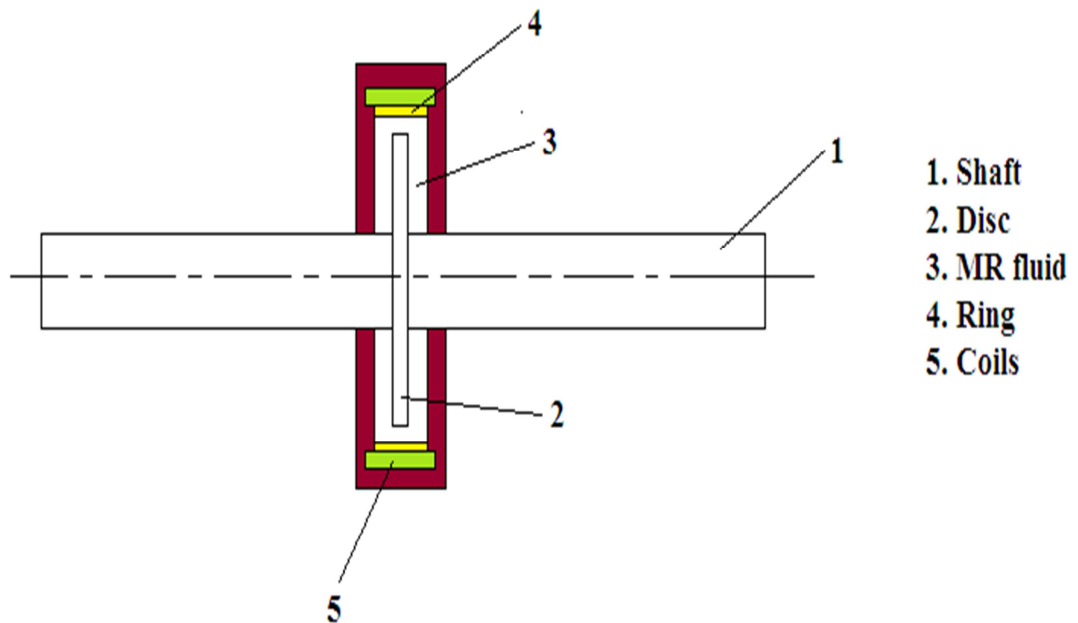
Další perspektivní oblastí využití MR tlumičů je stavebnictví. Mrakodrapy nebo dlouhé mosty jsou náchylné ke vzniku rezonance při silném větru nebo seizmické činnosti. Tlumící systém je navržen tak, aby absorboval otřesy zemětřesení. Velikost tlumiče závisí na velikosti budovy. Rozlišujeme tři systémy: pasivní – neřízený tlumič, jednoduchý a levný, nedokáže se přizpůsobit měnícím se potřebám, aktivní – aktivně působí proti kmitům, vyžadují velké množství síly, poloaktivní – kombinují pasivní a aktivní prvky. Spíše než působení aktivně proti síle, fungují jako brzda, řídí odpor tlumiče. Jako tyto poloaktivní systémy tlumení se používají MR tlumiče, které jsou energeticky nenáročné. Na obrázku 1.3 je zobrazen tlumič od firmy Lord Corp. Tlumič o délce jednoho metru a váze 250 kg obsahuje kolem 5 litrů magnetoreologické kapaliny dokáže vyvinout sílu o velikosti 200 kN a to při výkonu do 50W. Kvůli malým proudům nehrozí destabilizace budovy. Při zemětřesení dokáže reagovat až tisíckrát za vteřinu, díky čemuž vzroste teplota rychle přemagnetovávané kapaliny, proto tlumič obsahuje i zásobník akumulující případné teplo. Dle velikosti může budova obsahovat až stovky MR tlumičů. V případě mrakodrapů je použit zpravidla jeden tlumič na patro [6, 7].



Obr. 1.3 Tlumič pro seizmickou ochranu (převzato z [6])

### 1.2.3 MR Brzda

Konstrukce brzd pomocí MR kapalin přináší oproti konvenčním brzdám používaným v automotive spoustu výhod. V první řadě je to energetická náročnost, kdy má MR brzda spotřebu 10W (jednotky ampérů), rychlejší odezvu v řádu setin vteřiny, jednoduchost konstrukce, není potřeba hydraulického rozvodu, brzdových destiček. Jednoduchost ovládní, možnost kontrolovat činnost každého kola zvlášť (ve spolupráci s ABS, ESP). [8]



Obr. 1.4. Princip MR brzdy (převzato z [8])

### 1.2.4 Protézy

Oblast strojírenství a stavebnictví není jediný obor, kde se dají MR kapaliny využít. Uplatnění nacházejí i v lékařství, konkrétně v ortopedické protetice viz práce Ketilla Heiðara Guðmundssona - *Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry* [9], kde se autor zabývá mimo jiné i konstrukcí kolenního kloubu pomocí využití MR kapalin a servopohonu pro pacienty těžší než 90kg. Příklad kloubní náhrady na obr.1.5. Napájení servopohonu a MR brzdy má na starosti tříčlánková Lithiová-ION baterie, řízení vysokorychlostní MOSFET tranzistory. Při maximálním odběru 17W je životnost baterií přes 24 hodin. Rotační MR brzda je řízena mikroprocesorem, který vyhodnocuje senzory v noze. Skládá se z rotujících lopatek s mezerou pro MR kapalinu velikou 20 $\mu$ m. Brzda dokáže vyvinout brzdový moment přibližně 40 až 45Nm. Při těchto rozměrech velikosti mezery se nepříznivě projevuje zvýšení maximalizace magnetické

indukce v podobě tuhosti v následném vypnutém stavu, což má příčinu v nastanuvší magnetické remanenci.



*Obr. 1.5 Náhrada kolenního kloubu pomocí MR kapaliny; Ossur Inc., 2011 (převzato z [9])*

## 2 Spojky

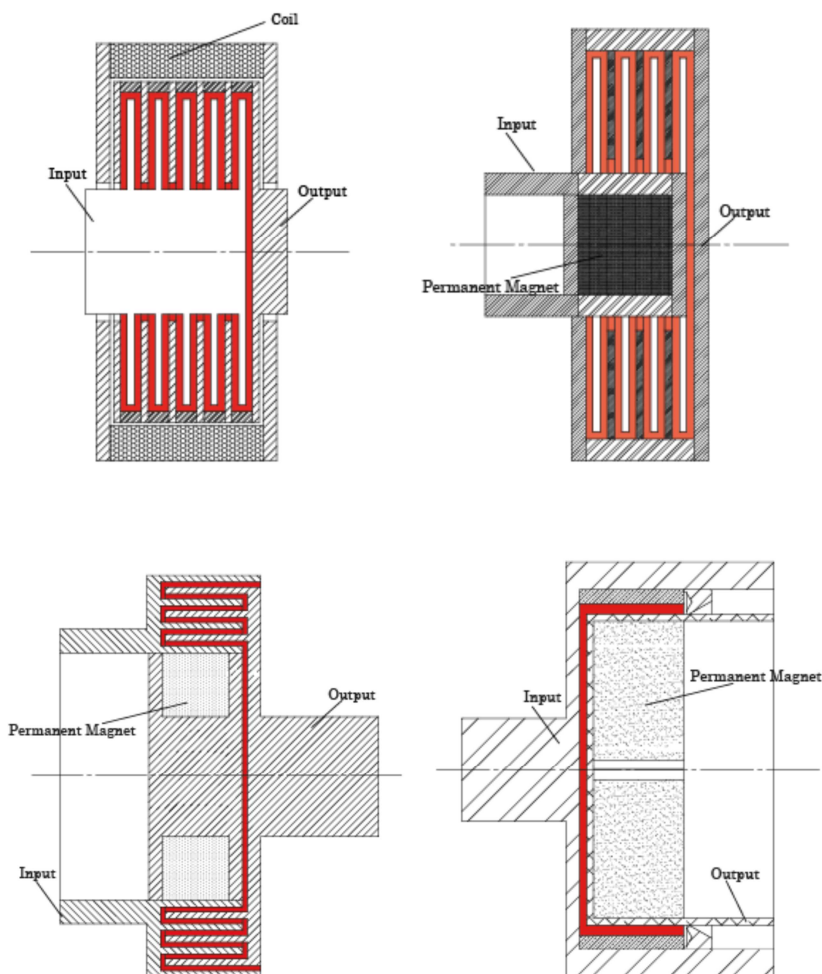
### 2.1 Klasické spojky

U motorových vozidel představuje rozjezdová spojka přenos točivého momentu mezi klikovou hřídelí a převodovkou. Dnes se stále nejčastěji používá suchá třecí spojka, proto uvedu její základní vlastnosti pro pozdější porovnání s MR spojkou. Skládá se ze setrvačníku, hnaného kotouče, přitlačného kotouče, štítu spojky a pružiny. Klasická spojka musí mít několik specifík. Musí být schopna přenést 115 – 130 % maximálního točivého momentu, musí umožňovat plynulý rozjezd a tlumit vznikající rázy, díky čemuž není spojka úplně jednoduché zařízení, vyžaduje použití pružin torzního tlumení, vlnitými segmenty věnce kotouče, respektive pružících planžet, nebo obložení na segmentech z pružného plechu. K vypínání spojky je nutná síla o maximální hodnotě 150 N, což je realizováno lanovodem, nebo u novějších aut hydraulicky, či elektronicky.

## 2.2 Magnetoreologická spojka

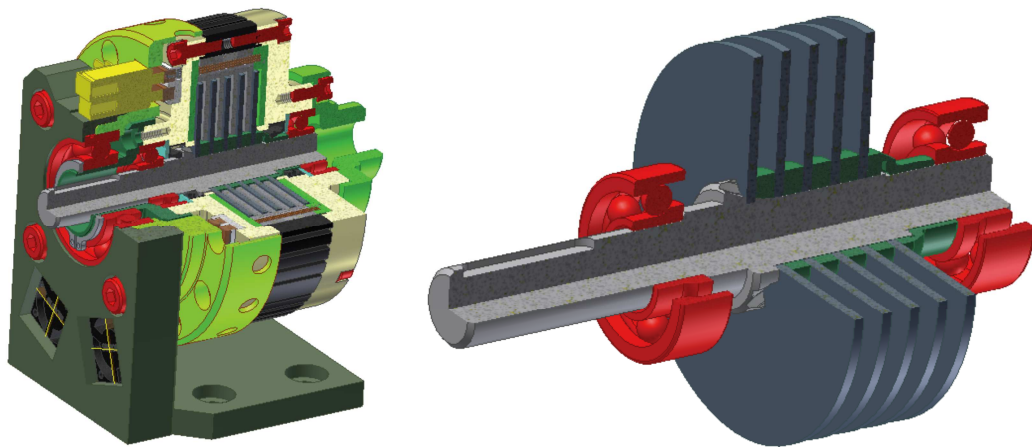
Magnetoreologická spojka je zařízení umožňující řízený přenos točivého momentu pomocí magnetoreologické kapaliny. Díky této vlastnosti má takto řízená spojka i funkci pojistky, kdy můžeme řídit maximální přenášený moment. Další významnou vlastností magnetoreologické spojky je rychlost při spínání i vypínání přenosu momentu, která se pohybuje v řádech jednotek milisekund. Tento čas potřebuje kapalina na zrušení excitovaného stavu při vypnutí zdroje magnetického pole. Tyto vlastnosti mohou v reálném čase ochránit mechanický systém před nečekanými výpadky zátěže, krátkodobému přetížení nebo poruchy.

Vlastní konstrukce spojek může být s permanentními magnety nebo cívkami, tvarovanými hlavy válců nebo hřídelí s disky. Na obrázku Obr. 1.16. můžeme vidět různá konstrukční řešení magnetoreologických spojek. Použití permanentních magnetů má oproti cívkám tu výhodu, že při výpadku zdroje proudu, například vybití baterií, je systém stále funkční. Další výhodou je nízký ztrátový výkon v odmagnetované kapalině díky její nízké viskozitě a žádné axiální zatížení hřídele, které by produkovalo tečné napětí [10, 11, 12].

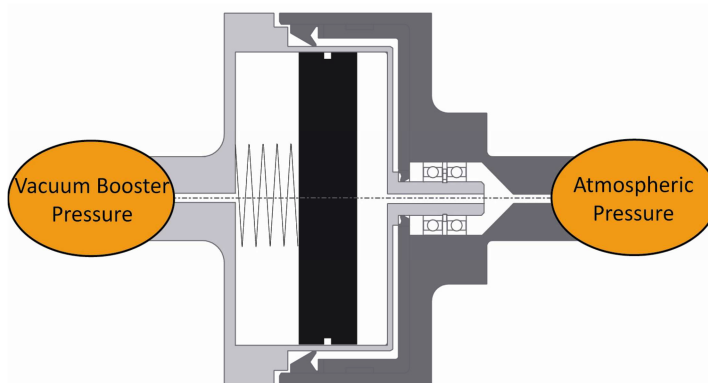


Obr. 1.6 Různá konstrukční řešení MR spojek (převzato z [10])





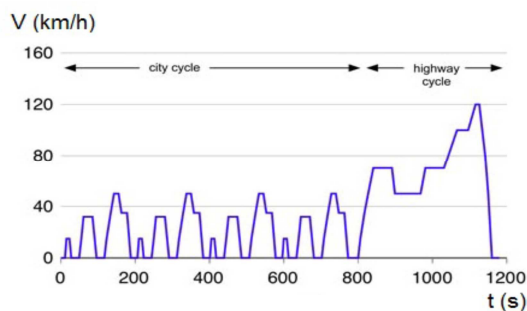
Obr. 1.7 MR spojka s vícekotoučovou hřídelí (převzato z [11])



Obr. 1.8 MR spojka s vakuovým vypínáním (převzato z [10])

### 2.3 Srovnání klasických spojek s MR řešením

Spojka založená na magnetoviskózním jevu má ze své podstaty výhodu v řízení velikosti přenášeného momentu, v tlumení rázů, můžeme u ní řídit plynulost záběru. Další předností vedle jednoduchosti konstrukce je nízká energetická náročnost a velice rychlá odezva. Autoři ve studii *A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation* [10] uvádí, že při testování NEDC, které se používá k měření spotřeby a emisí vozidel, dosahují spojky vakuové pumpy s MR kapalinou v městském cyklu o 29%, resp. o 46% v extra náročném městském cyklu nižší energetickou náročnost. Čili mají tyto spojky veliký potenciál a široké možnosti uplatnění. Zároveň je tu však několik omezení v podobě Curieovy teploty, kdy feromagnetikum ztrácí na magnetické schopnosti, životnosti kapaliny a ceně.

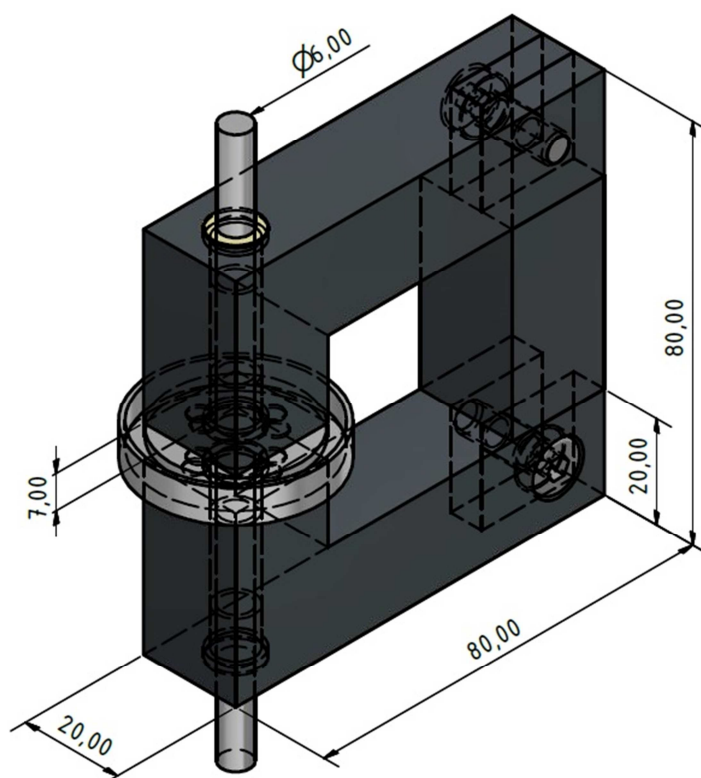


Obr. 1.19 Rychlostní profil při testování NEDC (převzato z [10])

### 3 Návrh magnetoreologické spojky

#### 3.1 Návrh magnetického obvodu

Při návrhu magnetického obvodu jsem vycházel z bakalářské práce *Využití ferokapalin v elektromechanických systémech* [13]. Aby nastal magnetoviskózní jev dostatečný ke spojení hřídelí, měla by být magnetická kapalina vystavena indukci o velikosti  $B = 100$  mT. Pro snadné dosažení této hodnoty jsem se rozhodl umístit pracovní komoru navrhované magnetoreologické spojky mezi póly magnetického obvodu. S ohledem na požadavky na minimální hmotnost a rozměry navrhovaného demonstračního zařízení byly zvoleny rozměry, které lze vidět na obr. 1.20.

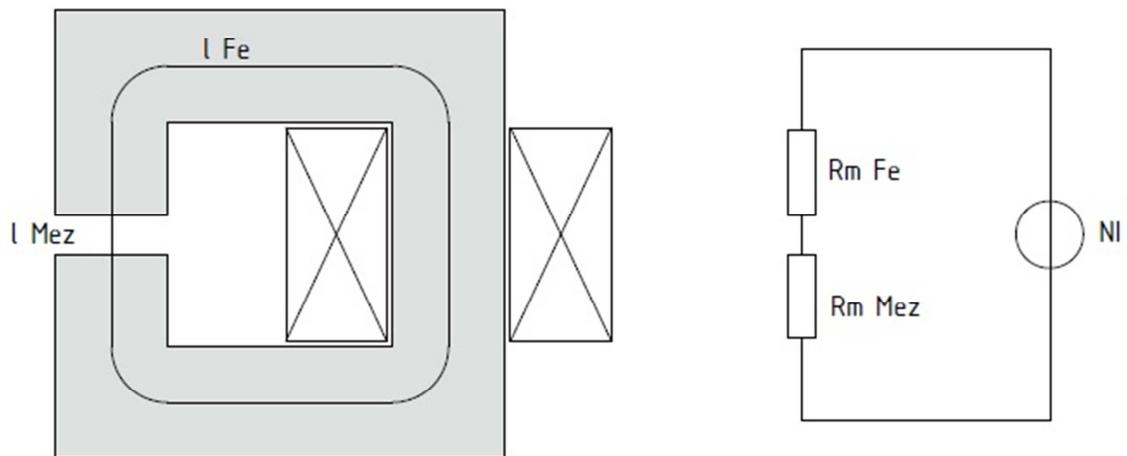


Obr. 1.20 Rozměry navrhovaného magnetického obvodu

Spojka bude buzena stejnosměrně, proto lze magnetický obvod vyrobít z masivu. Použitý materiál by měl mít co nejlepší magnetické vlastnosti. Pro dosažení co nejvyšších hodnot magnetické indukce v mezeře musí být mezera co nejmenší. S ohledem na celkovou velikost magnetického obvodu, velikost cívky a dostatečného prostoru pro hřídele spojky jsem zvolil mezeru 7mm. Dalším krokem bude výpočet parametrů budicí cívky tak, aby byla ve vzduchové mezeře dosažena požadovaná indukce.

### 3.1.1 Výpočet budicí cívky s využitím metody magnetických obvodů

Pro předběžný návrh budicí cívky lze využít teorii magnetických obvodů [14]. Při tomto návrhu zanedbáváme rozptylové toky, uvažujeme, že se magnetický indukční tok uzavírá železem po střední délce indukčních čar.



Obr. 1.21 Model implementovaný s využitím teorie magnetických obvodů

Cílem výpočtu je určit požadované magnetické napětí  $U_m = NI$  k dosažení magnetické indukce v mezeře  $B = 100$  mT. Vzhledem k relativně nízké hodnotě požadované indukce zanedbám případné sycení železa a budu uvažovat lineární magnetickou permeabilitu použitých materiálů. Hodnoty použité v modelu:

průřez železa  $S = 0,0004$  m<sup>2</sup>

velikost vzduchové mezery  $l_{Mez} = 0,007$  m

střední délka indukční čáry v železe  $l_{Fe} = 0,233$  m

relativní permeabilita železa v lineární části magnetizační křivky  $\mu_{Fe} = 450$  [15]

Poté magnetický indukční tok odpovídající požadované indukci je

$$\phi = \int_S B dS = B \cdot S$$

Celková magnetická reluktance obvodu při zanedbání rozptylových toků

$$R_m = R_{mFe} + R_{mMez} = \left( \frac{l_{Fe}}{\mu_{Fe}\mu_0 S} + \frac{l_{Mez}}{\mu_0 S} \right)$$

A požadované magnetické napětí

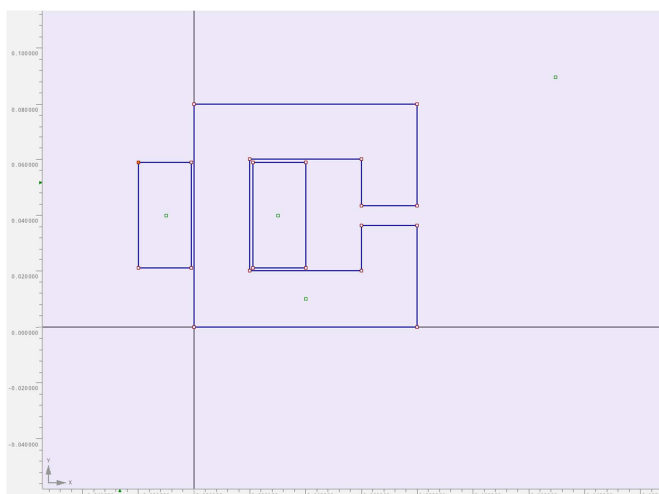
$$U_m = R_m \phi = NI.$$

Na základě výpočtu pomocí teorie magnetických obvodů je požadované magnetické napětí při použití uvedených hodnot  $U_m = NI = 594,24$  A. Tato hodnota je přibližná, reálná hodnota bude vyšší, při výpočtu byly zanedbány rozptylové magnetické toky a uvažována lineární permeabilita železa.

### 3.1.2 Výpočet budicí cívky s využitím numerické simulace

Pro zpřesnění návrhu pomocí teorie magnetických obvodů jsem využil simulaci pomocí programu Agros2D [15]. Program využívá metodu konečných prvků a na rozdíl od použití metody magnetických obvodů počítá s rozptylovými toky. Úkolem simulace bylo spočítat proudovou hustotu v budicím vinutí potřebnou k vybuzení magnetické indukce  $B = 0.1$  mT ve vzduchové mezeře.

Nejprve byla vytvořena geometrie problému. Definiční oblast použitého modelu lze vidět na obr. 1.22.

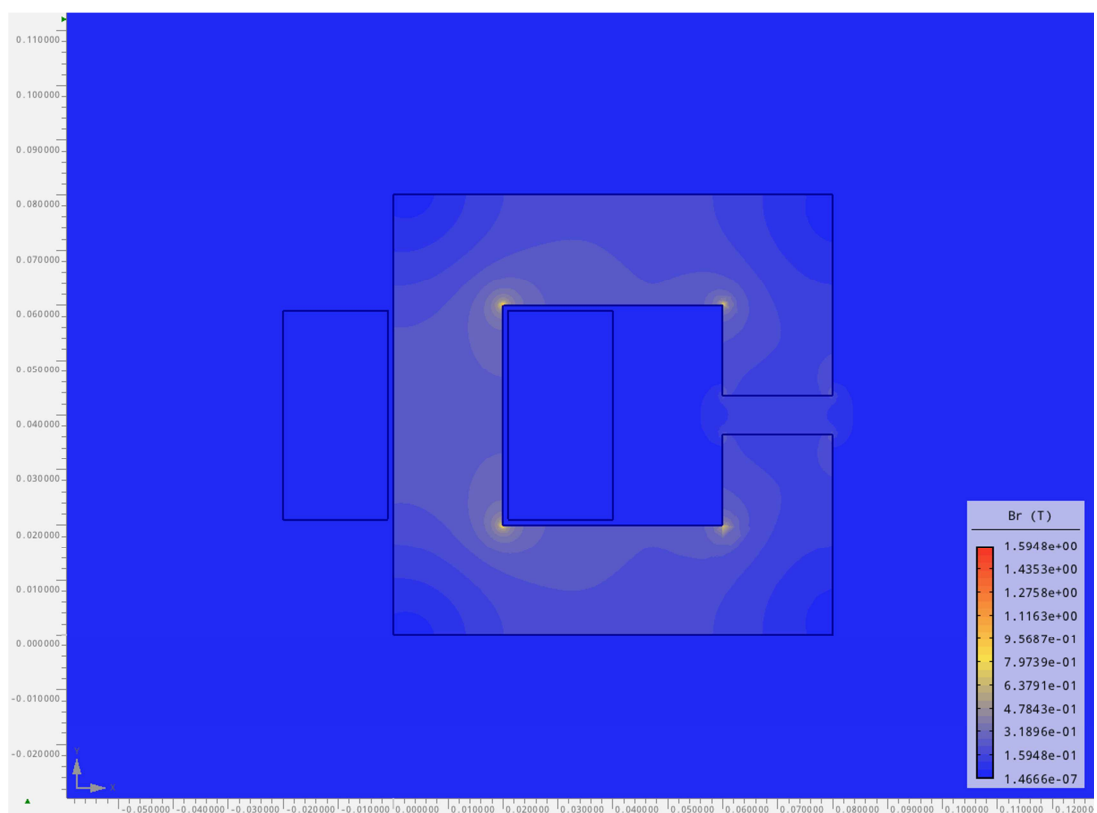


Obr. 1.22 Definiční oblast použitého modelu, není zobrazena hranice s okrajovou podmínkou  $A=0$ ; Agros2D

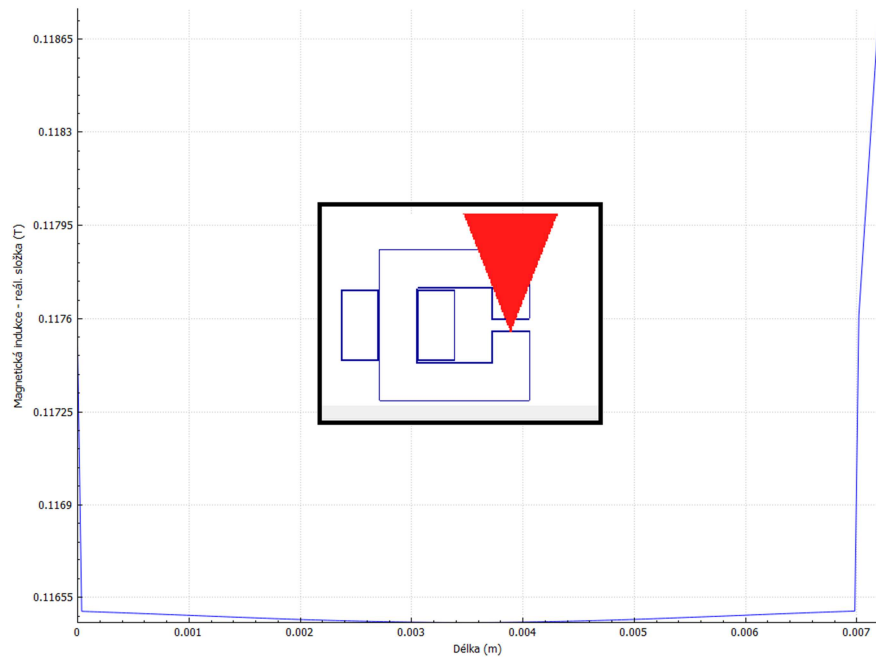
Pro oblast železa byla použita relativní permeabilita  $\mu_{\text{Fe}} = 450$ , pro okolní vzduch  $\mu_{\text{Mez}} = 1$ , řešená oblast byla ohraničena tzv. Dirichletovou okrajovou podmínkou pro magnetický vektorový potenciál  $A = 0$ .

V oblasti vinutí byla měněna proudová hustota  $J$  tak, aby bylo dosaženo požadované velikosti magnetické indukce. Toho bylo dosaženo při proudové hustotě  $J = 1 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$ .

Při výpočtech byla sledována konvergence řešení na základě jemnosti sítě a stupně použitého polynomu. pro řešení byla na základě konvergence použito zjemnění sítě 2 a stupeň polynomu 3. Příklady výsledků simulace pro proudovou hustotu  $J = 1 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  ukazují následující obrázky.

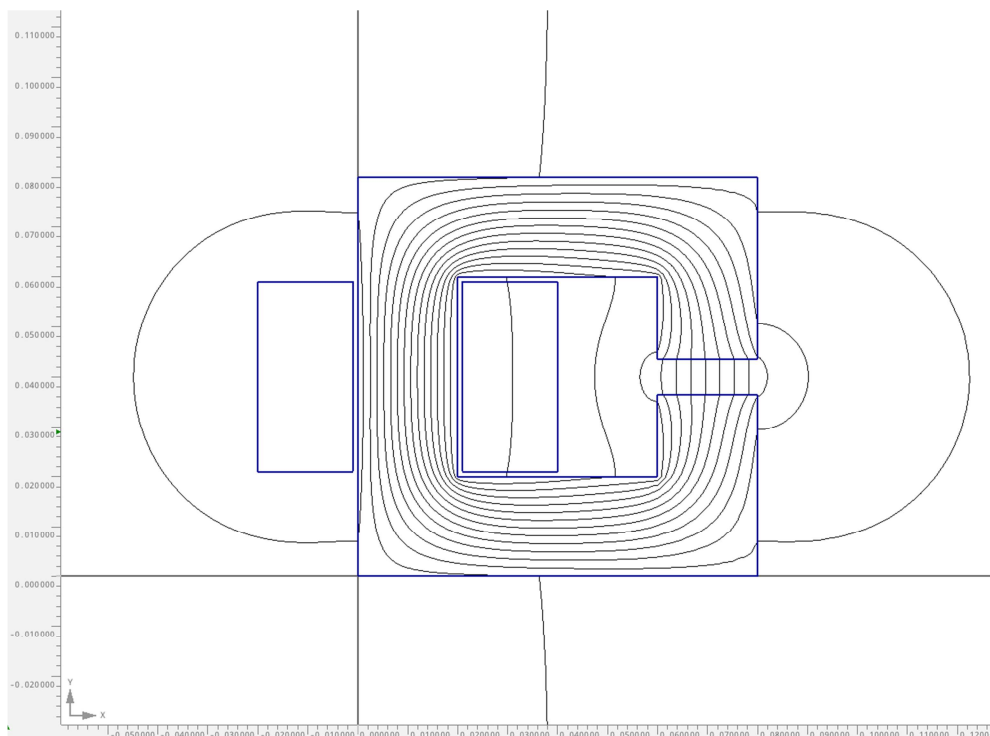


Obr. 1.23 Simulace rozložení magnetické indukce; Agros2D



Obr. 1.24 Graf rozložení magnetické indukce ve vzduchové mezeře s detailem vynesené křivky; Agros2D

Při použití teorie magnetických obvodů byly zanedbány rozptylové toky. Následující obrázek zobrazuje ekvipotenciály magnetického vektorového potenciálu pro ilustraci rozptylových toků.



Obr. 1.25 Ekvipotenciály magnetického vektorového potenciálu pro ilustraci míry rozptylu; Agros2D

### 3.1.3 Použitá budicí cívka

Protože jako zdroj pro buzení spojky bude použit stejnosměrný zdroj s proudovým rozsahem 5 A, cívka byla ručně navinuta lakovaným měděným drátem o průřezu  $1,5 \text{ mm}^2$ . Pro dosažení simulací zjištěné proudové hustoty  $J = 1 \cdot 10^6 \text{ A/m}^2$  tedy postačí dle vztahu  $J = I/S$  proud  $I = 2,25 \text{ A}$ . Vzhledem k dostatečnému průřezu drátu pro tuto hodnotu proudu nebude třeba řešit oteplení cívky.

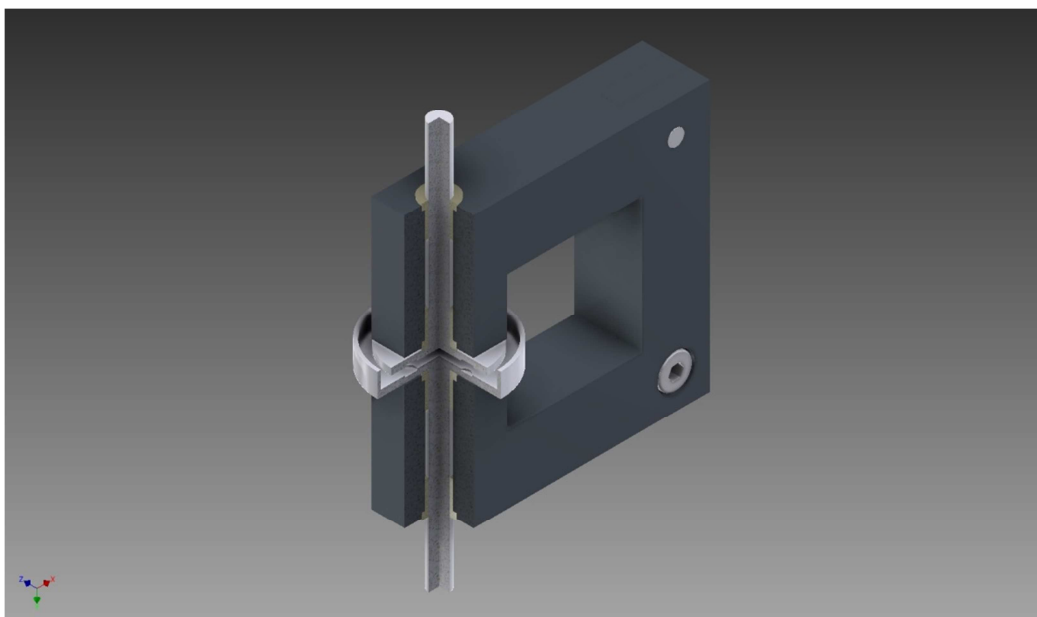
Počet závitů vyrobené cívky je  $N = 1200$ . Při použití proudu  $I = 2,25 \text{ A}$  bude tedy překročeno minimální magnetické napětí odhadnuté pomocí metody magnetických obvodů. Počet závitů jsem raději předimenzoval z důvodu získání rezervy.

## 3.2 Konstrukční řešení spojky

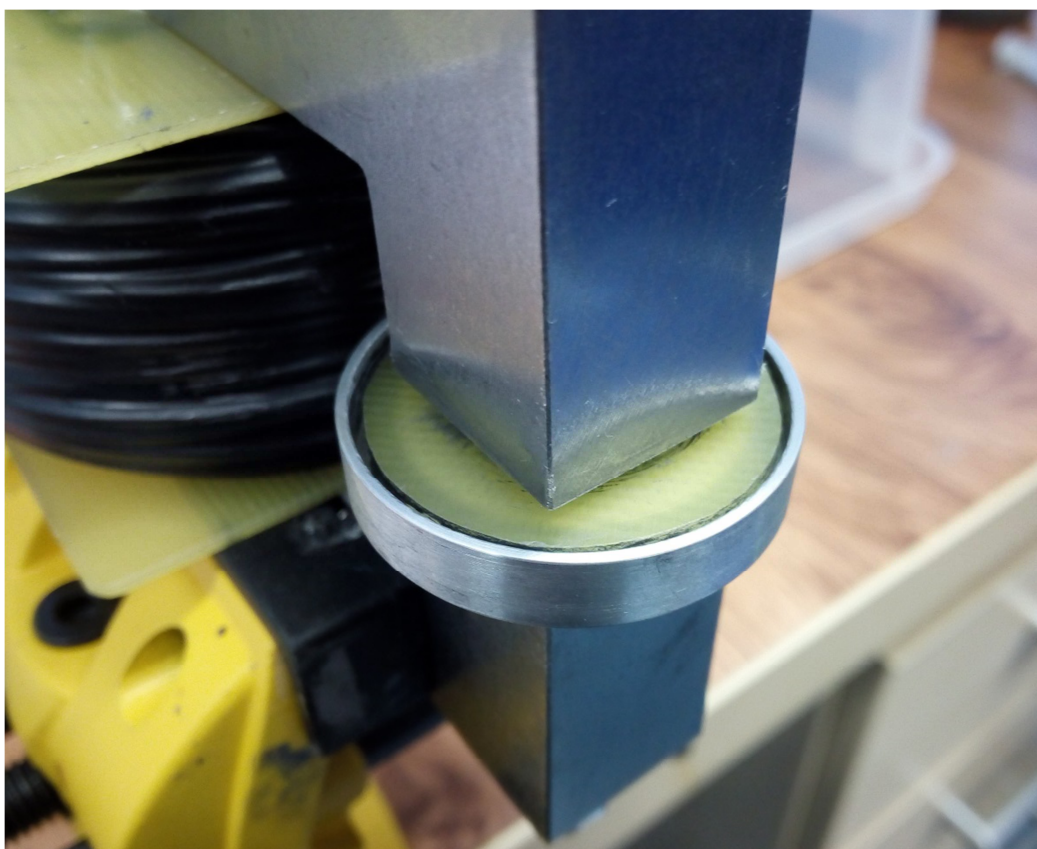
Hřídele procházejí vertikálně samotným tělem magnetického obvodu a jejich pohyblivost je zajištěna kluznými ložisky a jsou opatřeny kontejnery pro magnetickou kapalinu. Hřídele jsou vyrobeny z nemagnetického materiálu, aby na ně nepůsobily magnetické síly, a to konkrétně z hliníku, který má dobré mechanické vlastnosti.



Obr. 1.26 Komponenty magnetického obvodu



Obr. 1.27 Model ve čtvrtinovém řezu



Obr. 1.28 Detail vzduchové mezery a talířků hřídelek s krytem



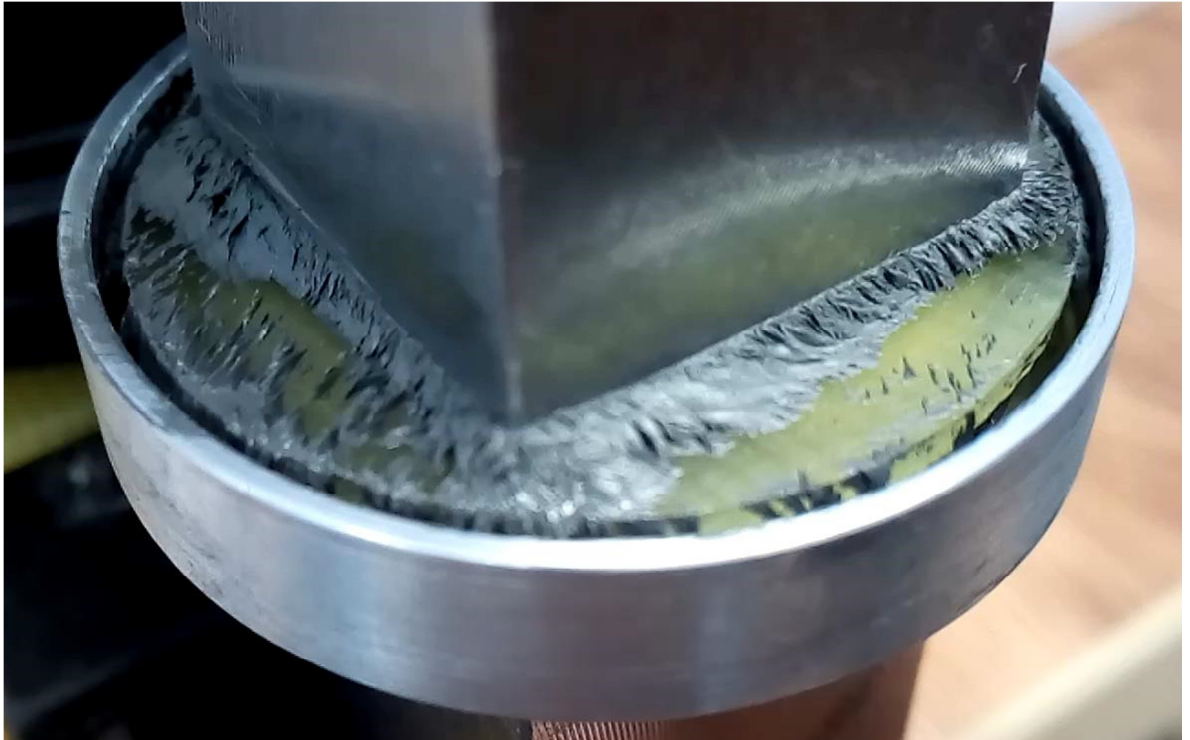
## 4 Experiment

### 4.1 Měřicí přípravek a zhodnocení návrhu

Návrh magnetického obvodu je funkční, při dosažení magnetické indukce  $B = 100\text{mT}$  nastává magnetoviskózní jev a spojka sepne. Při odeznění magnetické pole je spojka rozpojena. Avšak při experimentu jsem zjistil, že při rychlejší rotaci hřídelí se magnetoreologická kapalina snaží dostat do místa s největší magnetickou indukcí, respektive z prostoru mezery k pólům magnetického obvodu i přes dodatečné krytí. Z tohoto důvodu by měl být prostor s kapalinou utěsněn.



Obr. 1.29 Měřicí přípravek



Obr. 1.30 Detail kapaliny přitahované k pólům

## 4.2 Naměřené a vypočítané hodnoty

Tab. 4.1 naměřené a vypočítané hodnoty

$U$ [V]	$I$ [A]	$P$ [W]	$B$ [mT]
0	0	0	6,4
0,4	0,25	0,1	14,6
0,8	0,5	0,4	23,8
1,2	0,75	0,9	34,6
1,6	1	1,6	46,1
2	1,25	2,5	57,4
2,4	1,5	3,6	68,9
2,7	1,75	4,73	79,8
3,2	2	6,4	90,5
3,5	2,25	7,88	100,4
3,9	2,5	9,75	109,5
4,1	2,75	11,28	113,1

Magnetoviskózní jev nastal při hodnotě proudu  $I = 2,5$  A. Na konci experimentu byla v mezeře naměřena magnetická remanence  $B = 13,3$  mT.

### 4.3 Seznam použitých přístrojů

SS zdroj Statron Typ 2225,  $U = 4,1\text{V} / I = 2,6\text{A}$

Multimetr Metex M-3850, evidenční číslo - 45011

Demagnetizér Walmag HD2, servisní číslo – 5421, evidenční číslo 215123

Ruční Teslametr Elimag MP1, výrobní číslo – 33/ 4P106, evidenční číslo 500665

Hallova sonda, výrobní číslo – 3D019

Magnetická kapalina MRH CC S4-B, výrobce Liquids research

## Závěr

V této bakalářské práci jsem se zabýval vlastnostmi magnetoreologických kapalin, jejich možným využitím v praxi, které má díky jejich unikátním vlastnostem velký potenciál. Jejich použití se neomezuje pouze na oblast strojírenství nebo stavebnictví, ale najde uplatnění i v dalších oborech. Oproti ostatním stávajícím řešením tlumičů, brzd a spojek, vynikají ve své konstrukční jednoduchosti, možnosti řízení a velice rychlé odezvě.

Mým úkolem bylo sestrojít zařízení, na kterém by se dalo demonstrativně ověřit funkci spojky rotujících hřídelí s využitím magnetoreologické kapaliny a jejího magnetoviskózního jevu. Při experimentu se ukázalo, že při rychlejším otáčení se kapalina snažila dostat do míst s vyšší magnetickou indukcí, tj. k pólům obvodu. Toto jsem řešil přidáním zábrany, která zmenšila mezeru mezi talířky, kde se kapalina nachází. I přesto se však kapalina postupně dostávala vně prostor talířků. Proto by měl být prostor s magnetoreologickou kapalinou u spojek vždy utěsněn, aby se tomuto jevu předcházelo.

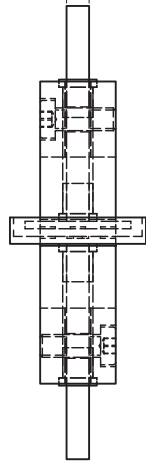
## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití (2. Část - dokončení). *Elektro*. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.
- [2] POLCAR, P. Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou. Plzeň, 2013. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni..
- [3] *Audi technology Portal* [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://www.audi-technology-portal.de/de/fahrwerk/fahrwerksregelsysteme/audi-magnetic-ride2865>
- [4] Audi Electronic Venture [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: [http://www.audi-electronics-venture.de/aev/brand/de/tools/advice/glossary/audi\\_magnetic\\_ridebrowser.html](http://www.audi-electronics-venture.de/aev/brand/de/tools/advice/glossary/audi_magnetic_ridebrowser.html)
- [5] *Autopriemysel.sk*: Magnetoreologický tlumič – novinka v dopravních systémech [online]. ROZENBERG, Jaromír. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: [http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com\\_content](http://www.autopriemysel.sk/index.php?option=com_content)
- [6] *How smart structure works* [online]. [cit. 2015-06-03]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/smart-structure2.htm>
- [7] YANG, G., et al. Large-scale MR fluid dampers: modeling and dynamic performance considerations. *Engineering structures*, 2002, 24.3: s. 309-323.
- [8] HUDHA, K. Magnetorheological (MR) Brake System. [online]. 2009 [cit. 2015-6-2]. Dostupné z: <http://enlightenments.files.wordpress.com>
- [9] GUÐMUNDSSON, Ketill Heiðar. Design of a magnetorheological fluid for an MR prosthetic knee actuator with an optimal geometry. 2011.
- [10] BUCCHI, F., et al. A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation. *Fracture and Structural Integrity*, 2012, 23: s. 62-74.
- [11] KIELAN, Paweł; KOWOL, Paweł; PILCH, Zbigniew. Conception of the electronic controlled magnetorheological clutch. *Przegląd Elektrotechniczny*, 2011, 87.3: s. 93-95.
- [12] KAVLICOGLU, Barkan, et al. Magneto rheological Fluid Limited Slip Differential Clutch. *Composite and Intelligent Materials Laboratory*, 2006.
- [13] KUČHTA, J. Využití fero kapalin v elektromechanických systémech. Plzeň, 2012. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [14] MAYER, D. Aplikovaný elektromagnetismus. 1. vyd. České Budějovice : Kopp nakladatelství, 2012, 531 s. ISBN: 978-80-7232-424-8.
- [15] Agros 2D [online]. [cit. 2015-05-20] Dostupné z: <http://www.agros2d.org>

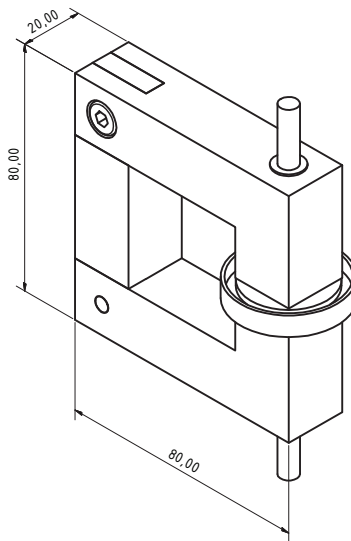
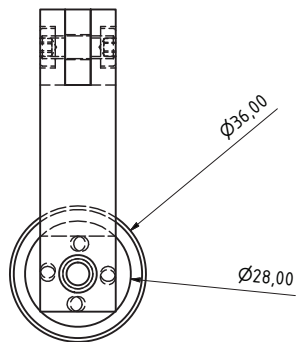
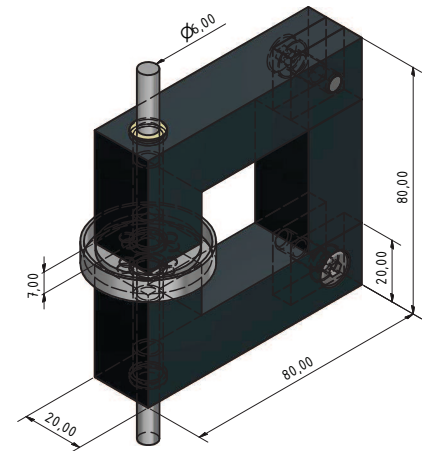
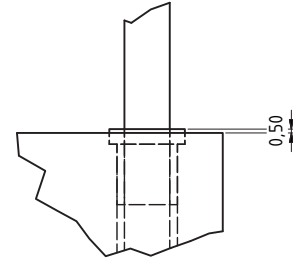
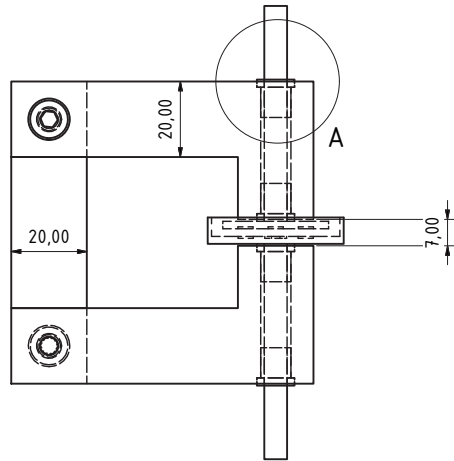
## **Přílohy**

**Příloha A -**

6,00 e8  $\begin{matrix} (-0,02 \\ -0,04) \end{matrix}$



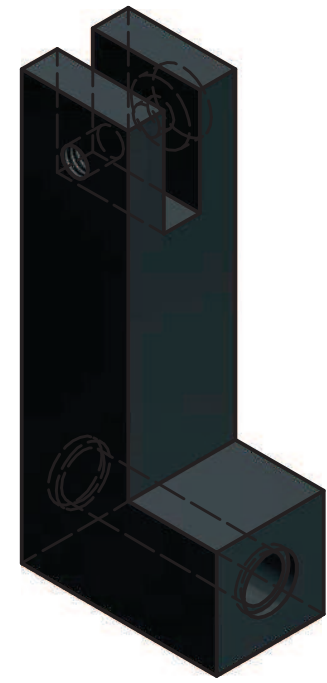
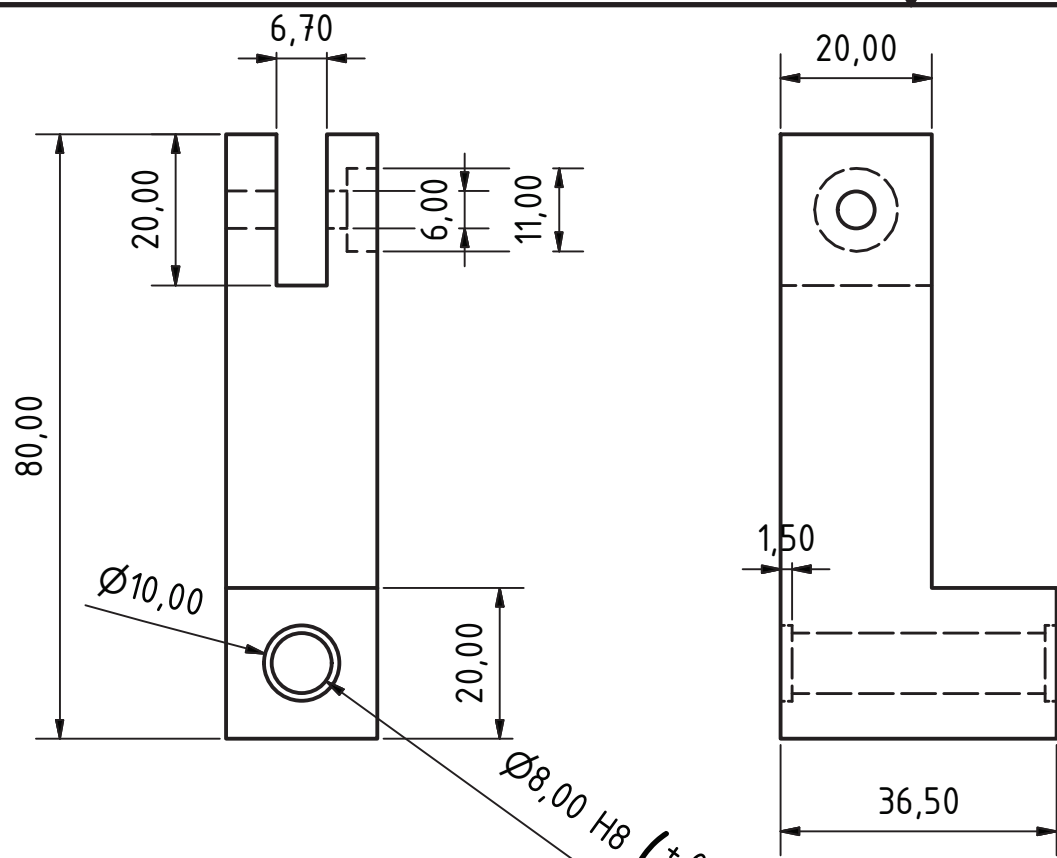
A (2 : 1)



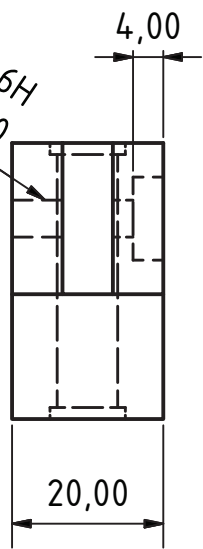
KUSOVNÍK			
POZICE	KS	ČÍSLO SOUČÁSTI	POPIS
1	1	Stredni_cast_civka	
2	2	Koncova_cast	
3	4	Kluzne_lozisko_EMICO80601	
4	1	Hridelka_spodni	
5	1	Hridelka_horni	
6	2	DIN 7984 - M6 x 16	Šroub s válcovou hlavou

Stav		Změny		Datum		Jméno	

Magnetický obvod 1 A2



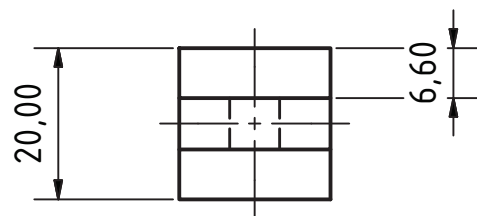
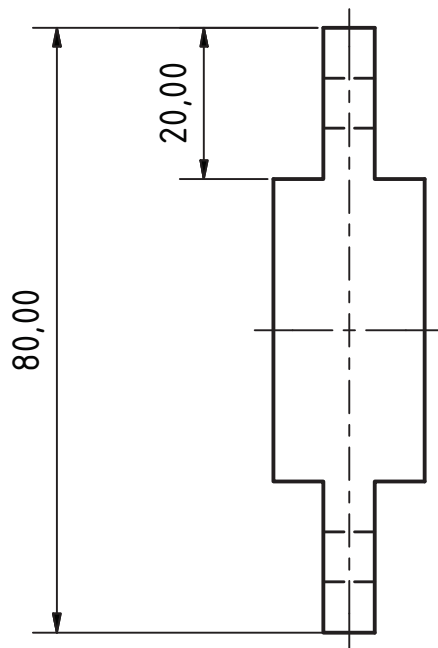
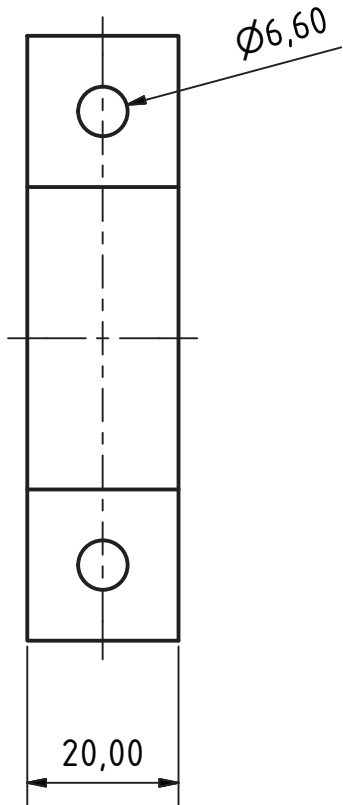
DIN 974 -  $\phi 11,00 \times 4,00$   
 M6x1 - 6H



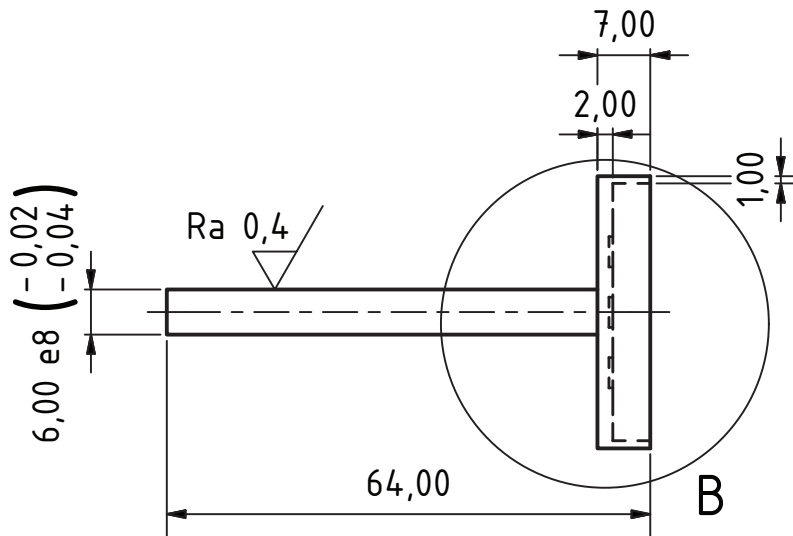
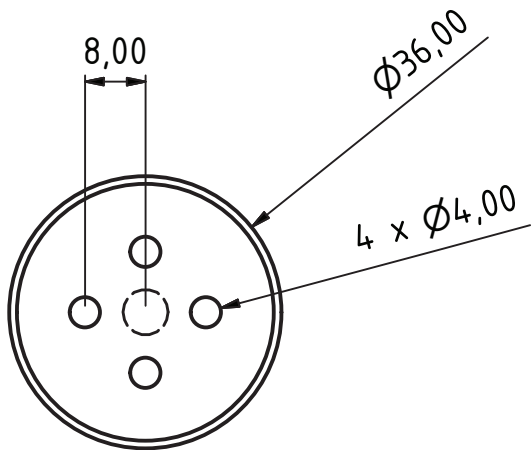
$\phi 8,00 \text{ H8 } (+0,02 / -0,00)$

				Datum	Jméno	Materiál - železo Koncová část		
				Nakreslen	20.4.2015			Pan F
				Zkontrolován				
				Norma				
						Magnetický obvod		
Stav	Změny	Datum	Jméno			3	A4	

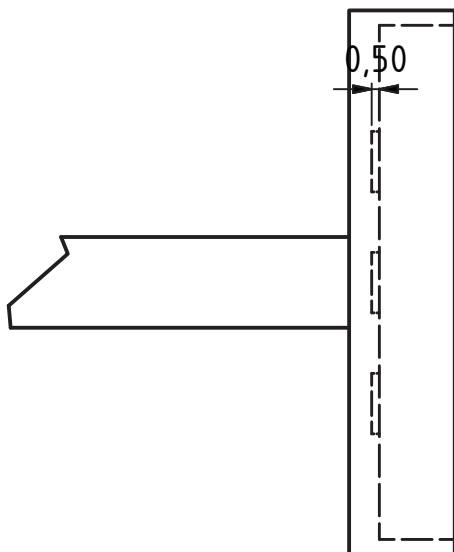




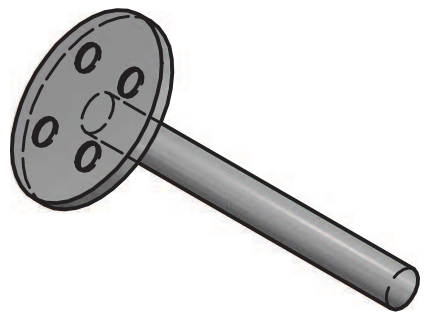
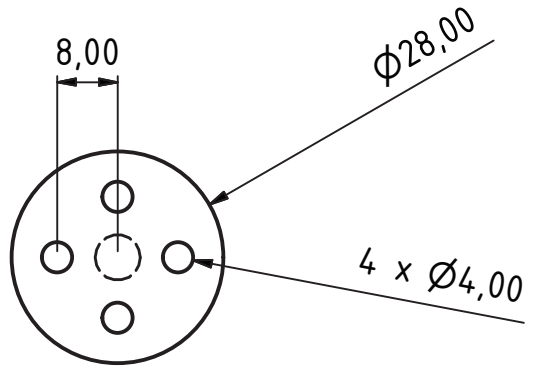
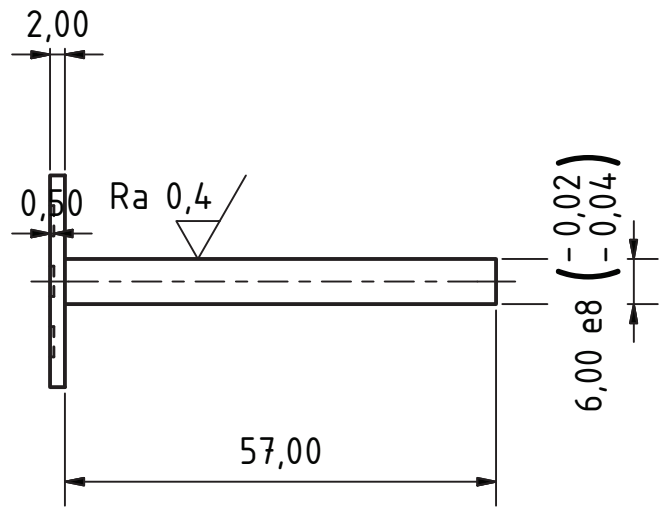
				Datum	Jméno	Materiál - železo Střední část		
				Nakreslen	20.4.2015			Pan F
				Zkontrolován				
				Norma				
						Magnetický obvod		
								2
						A4		
Stav	Změny	Datum	Jméno					



B ( 2 : 1 )



				Datum	Jméno	Materiál - hliník		
				Nakreslen	20.4.2015			Pan F
				Zkontrolován				
				Norma				
						Magnetický obvod		
Stav	Změny	Datum	Jméno			4	A4	



				Datum	Jméno	Materiál - hliník		
				Nakreslen	20.4.2015			Pan F
				Zkontrolován				
				Norma				
						Magnetický obvod		
						5		
						A4		
Stav	Změny	Datum	Jméno					