

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA TEORETICKÉ ELEKTROTECHNIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

**Časová odezva viskozity magnetoreologických kapalin
na změnu externího magnetického pole**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Tomáš CHARVÁT**
Osobní číslo: **E13N0008P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Komerční elektrotechnika**
Název tématu: **Časová odezva viskozity magnetoreologických kapalin na změnu externího magnetického pole**
Zadávající katedra: **Katedra technologií a měření**

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

1. Uveďte vlastnosti a výčet technických aplikací magnetoreologických kapalin.
2. Shrňte současné názory na reakční dobu viskozity těchto kapalin.
3. Navrhněte a pro různé průběhy magnetické indukce proveďte experiment pro určení doby odezvy magnetoviskózního jevu.
4. Na základě výsledků experimentu sestavte vztah popisující zpoždění odezvy viskozity.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:


1. **ODENBACH, S. Magnetoviscous effects in ferrofluids. Springer, 2002, 151 s. Lecture Notes in Physics. ISBN 3-540-43068-7; ISSN 0940-7677.**
2. **ODENBACH, S. Colloidal magnetic fluids. Springer, 2009, 429 s., Lecture Notes in Physics. ISBN: 978-3-540-85386-2.**
3. **MAYER, D. Magnetické kapaliny a jejich použití (2. Část - dokončení). Elektro. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.**

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

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


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




Doc. Ing. Vlastimil Škočil, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na měření časové odezvy magnetoreologických kapalin. Popisuje magnetoreologický jev, shrnuje současné názory na časovou odezvu těchto kapalin. Část práce je určena pro technický výčet jejich aplikací. Hlavní část práce se zaměřuje na experiment pro změření časové odezvy MR kapalin.

Klíčová slova

Magnetoreologický, MR kapalina, magnetoviskózní jev, doba setrvání, časová odezva.

Abstract

Submitted master theses is focused on measuring the response time of magnetorheological fluids. It describes magnetorheological effect, summarizes current views on the response time of these liquids. Part of the work is directed to enumerate their applications. The main part is focused on the experiment to measure the response time of MR fluids.

Key words

Magnetorheological, MR fluid, magnetoviscous effect, dwell time, response time.

Prohlášení

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

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

.....
podpis

V Plzni dne 5.5.2015

Tomáš Charvát

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu práce Ing. Petrovi Polcarovi Ph.D., Ing. Františku Machovi a ostatním kolegům z Katedry teoretické elektrotechniky FEL ZČU v Plzni za jejich cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost.

Obsah

ÚVOD	10
1 VLASTNOSTI MAGNETOREOLOGICKÝCH KAPALIN.....	11
1.1 POROVNÁNÍ S FEROMAGNETICKOU KAPALINOU.....	11
1.2 MAGNETOVISKÓZNÍ JEV	12
1.3 PROVOZNÍ REŽIMY	12
1.3.1 Průtokový režim	13
1.3.2 Přímý režim smyku.....	13
1.3.3 Režim stlačení	14
1.4 SLOŽENÍ MR KAPALIN.....	14
1.4.1 Magnetické částice.....	14
1.4.2 Aditiva.....	14
1.4.3 Nosné médium.....	16
1.5 FYZIKÁLNÍ POPIS MR KAPALIN.....	16
1.5.1 Definice základních vlastností	16
1.5.2 Doba setrvání.....	17
1.6 SOUČASNÉ NÁZORY NA REAKČNÍ DOBU KAPALIN	18
2 TECHNICKÉ APLIKACE MAGNETOREOLOGICKÝCH KAPALIN	20
2.1 SEISMICKÁ OCHRANA STAVEB	20
2.2 BIOMECHATRONIKA.....	22
2.2.1 Ortéza využívající MR brzdu.....	22
2.2.2 Kolenní protézy	23
2.3 TECHNICKÉ APLIKACE V AUTOMOTIVE	24
2.3.1 Vibrace pohlcující držáky	24
2.4 DALŠÍ PŘÍKLADY VYUŽITÍ.....	25
2.4.1 MR spojka pro snížení rázů při rozběhu asynchronních motorů	25
2.4.2 Leštící zařízení	26
3 EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ DOBY ODEZVY MAGNETOVISKÓZNÍHO JEVU	28
3.1 ÚVOD DO PROBLEMATIKY	28
3.1.1 Možnosti řešení.....	28
3.2 MĚŘENÍ DOBY ZŘETĚZENÍ ČÁSTIC.....	29
3.2.1 Výsledky	32
3.2.2 Odchylky měření	33
3.3 MĚŘENÍ DOBY ZPOŽDĚNÍ ŘETĚZCŮ V ROTUJÍCÍM MAGNETICKÉM POLI.....	34
3.3.1 Výsledky	36
3.3.2 Odchylky měření	38
ZÁVĚR	40
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	41
PŘÍLOHY	1
PŘÍLOHA A SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ	1
PŘÍLOHA B PRÁCE S VYSOKORYCHLOSTNÍ KAMEROU	2
PŘÍLOHA C ZÍSKÁVÁNÍ DAT POMOCÍ PROGRAMU VIRTUALDUBMOD A IMAGEJ	3
PŘÍLOHA D DALŠÍ VÝSLEDKY	4

Seznam symbolů a zkratek

Použitý systém značení

α skalár

$\boldsymbol{\alpha}$ vektor

Seznam symbolů

A	plocha pólů	$[m^2]$
B	magnetická indukce	$[T]$
c	profil rychlosti proudění	$[-]$
F	síla	$[N]$
F_g	gravitační síla	$[N]$
F_η	viskózní složka síly	$[N]$
F_τ	složka síly závislé na napětí na mezi skluzu	$[N]$
g	gravitační zrychlení ($g = 9,823 \text{ m/s}^2$)	$[m/s^2]$
h	výška mezery mezi póly	$[m]$
H	intenzita magnetického pole	$[A/m]$
i_L	proud indukčnosti	$[A]$
k_B	Boltzmannova konstanta ($k_B = 1,3806488 \times 10^{-23} \text{ J/K}$)	$[J/K]$
l	délka mezery mezi póly	$[m]$
L_i	indukce závitů elektromagnetického obvodu	$[H]$
l_{mr}	délka trasy MR kapaliny v zařízení	$[m]$
l_{ret}	délka řetězce mikročástic	$[m]$
m	magnetický moment částic	$[Am^2]$
M_0	spontánní magnetizace	$[A/m]$
m_p	hmotnost částice	$[kg]$
P	tlak	$[Pa]$
P_η	viskózní složka tlaku	$[Pa]$
P_τ	složka tlaku závislého na napětí na mezi skluzu	$[Pa]$
Q	objemový průtok	$[m^3/s]$
r	vzdálenost částice - částice	$[m]$
R	koeficient spolehlivosti	$[\%]$
R_i	odpor závitů elektromagnetického obvodu	$[\Omega]$
R_{sed}	poměr sedimentace	$[\%]$
S	relativní rychlost pólů	$[s^{-1}]$

t	čas	[s]
T	absolutní teplota	[K]
t_d	časová odezva	[s]
t_{dwell}	doba setrvání	[s]
U_0	napětí zdroje	[V]
u_m	průměrná rychlost proudění v průtokovém kanálu	[m/s]
v	rychlost sedimentace	[m/s]
V	objem částice	[m ³]
w	šířka mezery mezi póly	[m]
Seznam řeckých symbolů		
α	úhel disku	[°]
α_d	rozdílový úhel	[°]
α_{mag}	úhel magnetu	[°]
δ_r	délka vzduchové mezery	[m]
η	dynamická viskozita	[kg/ms]
λ	parametr interakce mezi částicemi	[–]
μ_0	permeabilita vakua ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$)	[H/m]
π	Ludolfovo číslo ($\pi = \sim 3,1415926535$)	[–]
ρ	hustota kapaliny	[kg/m ³]
τ	časová konstanta přechodového děje	[s]
τ_y	mez kluzu	[Pa]
χ_p	susceptibilita magnetického materiálu částic	[–]
ω	úhlová rychlost	[ot/min]
Seznam zkratk		
DC	stejnoseměrný proud	
HV	hluk a vibrace	
LED	light emitting diode	
MOSFET	metal oxide semiconductor field effect transistor	
MR	magnetoreologický	
PMMA	polymethylmethakrylát	
PNG	portable network graphics	
PVC	polyvinylchlorid	
VR	vysokorychlostní	

Úvod

Již v devatenáctém století předpovídali slavní fyzici své doby kapaliny s obsahem železných částic, které by reagovaly na přítomnost magnetického pole. První magnetoreologickou (dále jen MR) kapalinu, tedy kapalinu, jež by vykazovala změnu viskozity v magnetickém poli, vytvořil Jacob Rainbow v 50. letech 20. století. Od té doby prošly MR kapaliny dlouhým vývojem, ale v technice se začaly uplatňovat až v poslední době, kdy prožívají největší rozkvět.

Předkládaná práce se zabývá studiem právě těchto kapalin, především měření jejich časové odezvy, která se dle současného mínění pohybuje v jednotkách milisekund. Hlavní cíle práce tvoří návrh a sestavení experimentu, jenž by pro různé průběhy magnetické indukce změřil časovou odezvu kapaliny, a sestavení vztahu popisující zpoždění časové odezvy na základě naměřených výsledků.

Práce je členěna do tří hlavních částí. První část práce popisuje vlastnosti MR kapalin, jejich pracovní módy a základní fyzikální popis. Obsahuje také shrnutí současných názorů o reakční době MR kapalin. Druhá část se věnuje technickému výčtu aplikací využívajících tyto kapaliny. Ve třetí části se nalézají popis vytvořených experimentů a jejich výsledků.

1 Vlastnosti magnetoreologických kapalin

1.1 Porovnání s feromagnetickou kapalinou

V současné době se ještě stále setkáme s publikacemi, ve kterých nejsou feromagnetické a MR kapaliny odlišovány a jsou brány jako totéž, jelikož oba typy kapalin spadají mezi tzv. chytré materiály, což znamená, že dokážou reverzibilně reagovat na vnější podněty, v našem případě na magnetické pole[1]. Proto se tato podkapitola věnuje jejich rozdílům.

Feromagnetické kapaliny, nazývané také jako magnetické nanokapaliny, jsou využívány pro širokou škálu aplikací vyžadujících magneticky ovladatelnou kapalinu. V podstatě se jedná o stabilní koloidní kapaliny. Magnetické vlastnosti kapalina získává díky rozptýleným nanočásticím feromagnetického materiálu. Tyto nanočástice jsou natolik malé, že obsahují pouze jediný dipól, tzn. že jednotlivé částice jsou stále magneticky nasycené. Po přivedení magnetického pole dochází ke zřetězení částic bez významné změny viskozity. Velikost částic se pohybuje od 3 do 15 nm[2]. Nejčastější aplikace těchto kapalin slouží k těsnění hřídelí, odvodu Joulova tepla nebo k jejich dalším aplikacím v lékařství, kde se využívají k cílenému dodání léků v těle nebo k likvidaci nádorů[3].

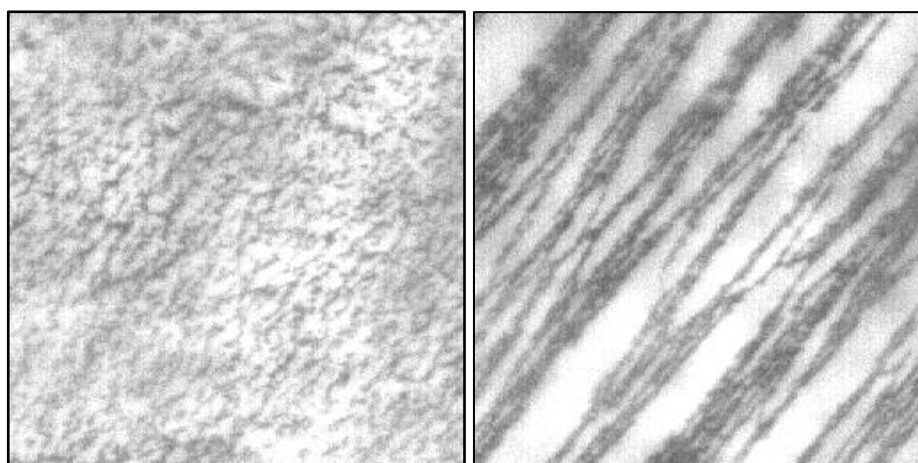
MR kapaliny na rozdíl od feromagnetických kapalin obsahují o tři řády větší částice. Jejich velikost se pohybuje v rozmezí od 0.5 do 10 μm . Právě díky této velikosti se částice stávají multidoménními, čímž kapalina získává schopnost měnit viskozitu v přítomnosti magnetického pole. Tento magnetoviskózní efekt vzniká zřetězením pevných částic podél siločar magnetického pole[4].

Tab. 1.1: Základní rozdíly magnetických kapalin sestavené na základě zdrojů[4][2][5][6]

Vlastnost	Feromagnetická kapalina	Magnetoreologická kapalina
Velikost částic	3-15 nm	0.5-10 μm
Obsahu částic ku celkovému objemu	5%	10-40 %
Hustota	1-2 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$	3-5 $\frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$
Domény jedné částice	1	Multidoménní
Řetězení částic	Ano	Ano
Specifická vlastnost	Magneticky ovladatelné	Změna viskozity

1.2 Magnetoviskózní jev

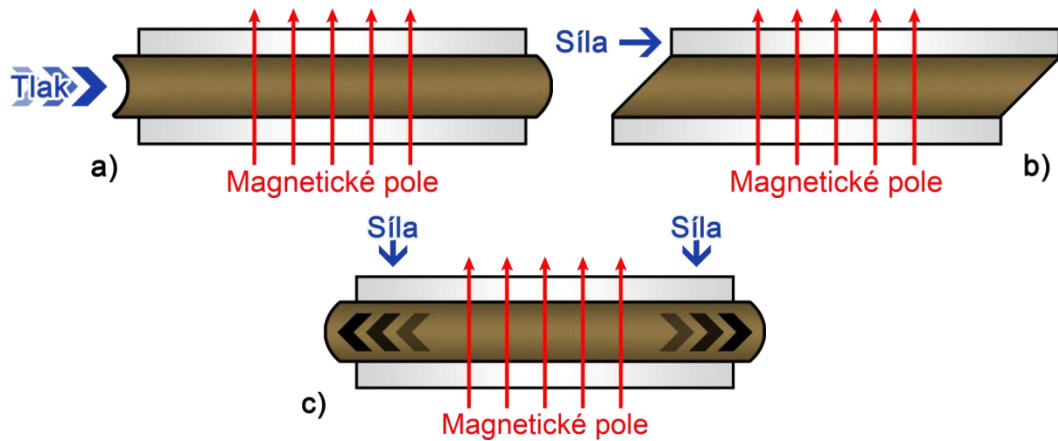
Nejdůležitější rys MR kapalin je jejich schopnost relativní změny viskozity s měnícím se magnetickým polem, označovaný jako magnetoviskózní jev. Tyto kapaliny, suspenze magnetických mikročástic, vykazují výrazný nárůst viskozity v přítomnosti středně silných magnetických polí v řádech desítek mT. Při absenci magnetického pole se pevné částice volně pohybují v kapalině, jak je názorně vidět na Obr. 1.1 vlevo. Po přidání magnetického pole se na multidoménních částicích vytvoří magnetický moment. Magnetické momenty částic se snaží vzájemně přizpůsobit - to má za následek rotaci a pohyb částic. Ve výsledku jsou tedy magnetické momenty částic srovnány se směrem magnetického pole a došlo k tzv. zřetězení částic, Obr. 1.1 vpravo. Změna viskozity nastala právě důsledkem těchto řetězců a její nejvyšší hodnota bude vždy naměřena ve směru kolmém k těmto řetězcům[6][7].



Obr. 1.1: Pohled na vzorek MR kapaliny MRHCCS4-B bez magnetického pole (vlevo) a s přiloženým magnetickým polem (vpravo)

1.3 Provozní režimy

Většina zařízení, která ke své funkci využívají MR kapalin, se klasifikují do tří hlavních pracovních režimů, a to průtokový režim, přímý režim smyku a režim stlačení. V některých aplikacích se můžeme setkat i s kombinací dvou režimů k docílení větší efektivity zařízení[8].



Obr. 1.2: Provozní režimy MR kapalin a) Průtokový režim b) Přímý režim smyku
c) Režim stlačení[9]

1.3.1 Průtokový režim

V tomto režimu je kapalina pod tlakem vháněna do průtokového kanálu, viz Obr. 1.2 a. Odolnost vůči proudění kapaliny řídí magnetické pole kolmé ke směru průtoku. Mezi zařízení, využívající tento režim, spadají servoventily, tlumiče a aktuátory. O tlaku vyvinutém v tomto režimu průtoku se předpokládá, že je tvořen součtem viskózní složky ΔP_η a složky pole závislého na napětí na mezi skluzu ΔP_τ :

$$\Delta P = \Delta P_\eta + \Delta P_\tau(H) = \frac{12\eta QL}{h^3 w} + \frac{c\tau_y(H)l}{h} \quad (1.1)$$

kde l , w , h jsou délkou, šířkou a výškou mezery průtokového kanálu mezi póly, η je dynamická viskozita, tj. viskozita bez aplikovaného magnetického pole, Q je objemový průtok a τ_y je mez kluzu vyvinutá v reakci na aplikované pole H . Funkcí profilu rychlosti proudění je pak parametr c , nabývající minimální hodnoty 2 pro $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta < \sim 1$ a maximální hodnoty 3 pro $\Delta P_\tau/\Delta P_\eta > \sim 100$ [9][10].

1.3.2 Přímý režim smyku

V přímém režimu smyku, na Obr. 1.2 b, se kapalina nachází mezi dvojicí pohybujících se rovin. Zpravidla se jedná o rotační pohyb, jenž je s plochou těchto rovin rovnoběžný. Zdánlivá viskozita umožňuje pohybem jedné roviny vyvinout sílu, která rozpohybuje druhou rovinu. Tento režim provozu využívají spojky, brzdy, tlumiče a blokovací zařízení. Obdobně jako u vyjádření tlaku průtokového režimu, i zde lze vyjádřit danou sílu součtem viskózní složky F_η a polem závislým na napětí na mezi skluzu F_τ :

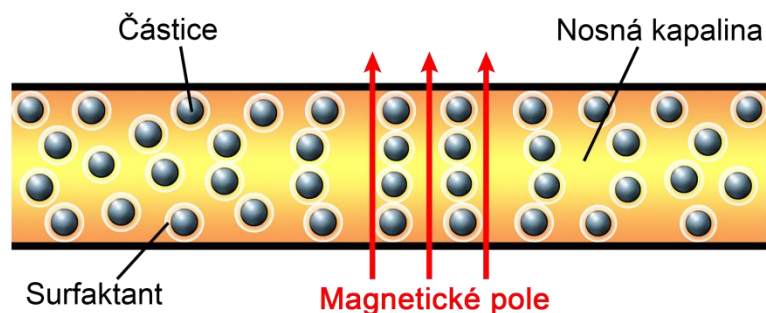
$$F = F_\eta + F_\tau(H) = \frac{\eta SA}{h} + \tau_y(H)A \quad (1.2)$$

kde S je relativní rychlost pólů a $A = lw$ je oblastí smyku (plocha pólu)[9][10].

1.3.3 Režim stlačení

V daném režimu se kapalina opět nachází mezi dvojicí pohybujících se rovin, avšak s tím rozdílem, že nyní je relativní pohyb kolmý k rovinám. Dalším specifikem je délka tohoto pohybu. Ve srovnání s ostatními režimy je velice malá, v řádech milimetrů, avšak jak je patrné z Obr. 1.2 c, odporové síly budou velmi vysoké. Tato síla může být opět řízena velikostí magnetického pole mezi rovinami. Jedná se o nejmladší režim provozu MR kapalin a zatím byl aplikován v zařízeních vyvíjejících periodicky se opakující síly, jako jsou malé amplitudově vibrační a dopadové tlumiče[9].

1.4 Složení MR kapalin



Obr. 1.3: Schematický náhled na složky MR suspenze v kombinaci s řetězením v přímém magnetickém poli[4]

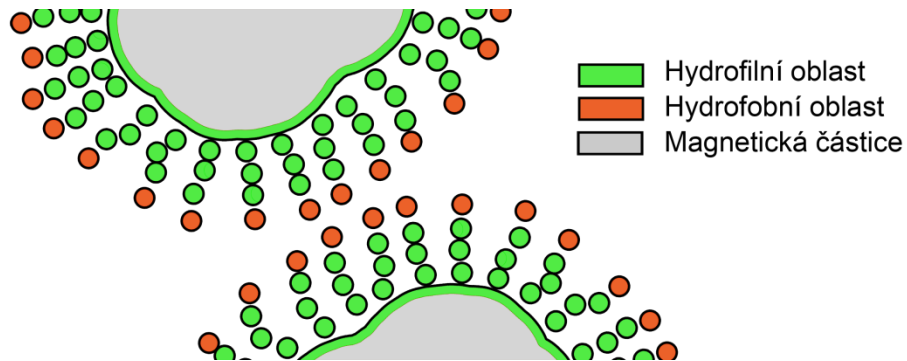
1.4.1 Magnetické částice

Pro výrobu mikročástic se používají magneticky měkké materiály. Nejčastěji se využívá chemických sloučenin na bázi železa v kombinaci s kobaltem, manganem, mědí, niklem, titanem, uhlíkem a zinkem[11]. Mezi nejrozšířenější a nejpoužívanější materiál patří karbonylové železo[12].

1.4.2 Aditiva

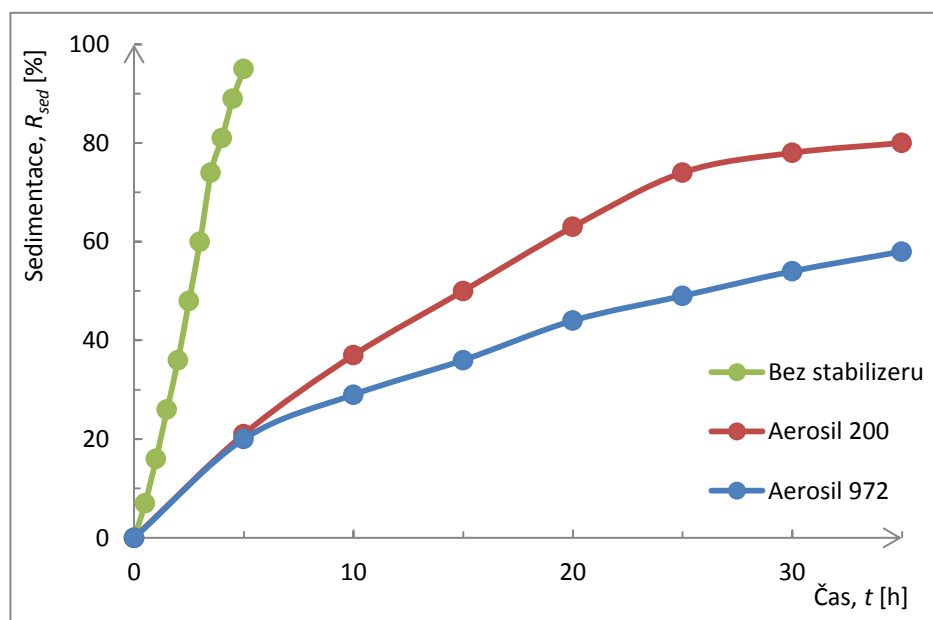
V současné době se používají surfaktanty, neboli stabilizéry, a tixotropní činidla jako aditiva pro zlepšení stability MR kapalin. Jedná se o povrchově aktivní látky. Surfaktanty se skládají z oligomerů, tedy molekul složených až z desítek monomerů[13]. Molekula surfaktantu tvoří povrchově aktivní film na povrchu mikročástic, je nerozpustná ve vodě a obsahuje jak hydrofilní, tak hydrofobní část[14]. Právě tyto dvě rozdílné části jsou důvodem, proč se surfaktanty používají. Samotné magnetické částice mají hydrofilní povrch. Po jejich přidání do nosného média se s ním snadno pojí. Přidáme-li však do nosného média surfaktant, dojde k celkovému pokrytí mikročástic surfaktantem, kdy hydrofilní konec molekuly

surfaktantu se naváže na hydrofilní povrch mikročástice a opačný konec molekuly, hydrofobní, je v přímém kontaktu s nosným médiem, viz Obr. 1.4. Ve výsledku tedy pokrývá mikročástice tenká hydrofobní vrstva, která zabraňuje volnému shlukování částic a do značné míry zpomaluje sedimentaci[13].



Obr. 1.4: Funkce surfaktantu, hydrofobní obal vytváří odpudivé síly mezi částicemi[4]

Vliv surfaktantu na sedimentaci znázorňuje Obr. 1.5. Surfaktanty můžeme rozdělit podle typu do tří základních skupin a to do iontových, neiontových a speciálních surfaktantů. Mezi nejpoužívanější látky, používané jako surfaktaty, patří polyethylenglykol, kyselina olejová, kyselina karboxylová, organické soli, alkylamin fosfátový ester, trionlein, CH-1D hyper dispergační činidlo či silanové spojovací činidlo[13]. Důležité je však také poznamenat, že surfaktant nepříznivě ovlivňuje vlastnosti MR kapalin a zvětšuje průměr částic[4].



Obr.1.5: Zobrazení průběhu sedimentace v čase pro různé stabilizátory, kde sedimentace je vyjádřena procentuelním poměrem výšky sedimentu ku celkové výšce hladiny MR kapaliny[15]

Mezi další aditiva zlepšující parametry MR kapalin patří různé druhy oxidů, např. oxid křemičitý, nanooxid křemičitý či styren. Jako aditivum může být použita i ferokapalina[13].

1.4.3 Nosné médium

Nosné kapaliny tvoří přechodnou kontinuální fázi MR kapalin. Existuje široká škála kapalin, jež mohou být použity jako nosné médium. Mezi tyto kapaliny patří silikonové oleje, minerální oleje, parafinové oleje, silikonové kopolymery, bílé oleje, hydraulické oleje, transformátorové oleje, halogenované organické kapaliny, diestery, polyoxyalkyleny, fluorované silikony, glykoly, voda a syntetické uhlovodíkové oleje[8].

V poslední době se také začalo experimentovat se speciálními iontovými solemi jako s nosným médiem. Tyto soli se za běžné pokojové teploty nachází v kapalném stavu, v němž vynikají velice zajímavými chemickými a fyzikálními vlastnostmi, díky kterým se v budoucnu uplatní ve zcela specifických aplikacích. Nehledě na to, že dokážou tvořit jak hydrofilní tak hydrofobní skupenství, jsou především vysoce odolné proti podtlaku a nehořlavé. Tím jsou předurčeny pro použití v kosmických technologiích. Další, neméně důležitou vlastnost, činí tyto kapaliny významné pro budoucí použití, tvoří jejich ekologická nezávadnost[16].

1.5 Fyzikální popis MR kapalin

1.5.1 Definice základních vlastností

Jak již bylo zmíněno, hlavní rozdíl, kterým se MR kapaliny liší od feromagnetických, spočívá ve velikosti částic, jež jsou o tři řády větší. Od tohoto se tedy odvíjí všechny jejich odlišné vlastnosti. Tím, že jsou částice větší, již obsahují více domén. Z toho důvodu již nemůžeme jednoduše určit magnetický moment částic jen za pomoci jejich objemu V a spontánní magnetizace M_0 , ale musíme ji vypočítat jako funkci síly aplikovaného magnetického pole H . Magnetický moment m je pak dán rovnicí

$$m = \chi_p HV \quad (1.3)$$

kde χ_p je magnetická susceptibilita materiálu mikročástic[6].

Při studiu MR kapalin dále potřebujeme popsat řetězení magnetických částic. Nejdůležitějším parametrem pro popis tohoto jevu se stává parametr interakce mezi částicemi λ . Tento parametr popisuje poměr mezi magnetickou interakcí částic a tepelnou energií částic. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, jejíž velikost je formulována jako

$$\lambda = \frac{\mu_0 \chi_p^2 H^2 V}{12 k_B T} \quad (1.4)$$

kde konstanta μ_0 je permeabilitou vakua, k_B Boltzmannova konstantou a T absolutní teplotou. Jak je patrné, k formování řetězců dojde pouze tehdy, když bude magnetická

interakce vyšší než tepelná energie částic, tedy při $\lambda > 1$. Tento problém se však převážně týká feromagnetických kapalin, jelikož na MR kapaliny, díky svým tisícinásobně větším rozměrům, nemá tepelný pohyb v nosném médiu téměř žádný vliv. U MR kapalin získáme přibližně o 9 řádů větší parametr interakce, tedy $\lambda \gg 1$. Rovnice (1.4) navíc dokazuje, že interakce mezi částicemi zmizí pro $H = 0$, kdy mikročástice nemají téměř žádný magnetický moment. Z toho plyne, že přítomnost magnetického pole dramaticky mění mikrostrukturu MR kapaliny[6].

MR kapaliny jsou suspenzemi relativně velkých částic, které svou interakcí poskytují silné změny viskozity v magnetickém poli. Nicméně je jasné, že takovéto suspenze nebudou odolné proti sedimentaci v gravitačním poli Země. Sedimentaci způsobuje gravitační síla

$$F_g = m_p g \quad (1.5)$$

kde m_p je hmotnost částice a g konstantou gravitační zrychlení. U ferokapalin proti sedimentaci bojuje tepelný, neboli Brownův pohyb, díky kterému suspenze sama sebe míchá a k sedimentaci nedochází. U MR kapalin je však tento jev nevyužitelný, jelikož zvládá pohybovat s částicemi pouze do velikosti 10 nm. Proto potřebujeme určit rychlost sedimentace. Tuto rychlost nám umožňuje vypočítat Stokesův zákon vztahem

$$v = \frac{2r^2 g \rho}{9\eta} \quad (1.6)$$

kde r je vzdálenost částice - částice a ρ hustota kapaliny. Rychlost sedimentace se pohybuje v relativně nízkých hodnotách, zpravidla se udává v jednotkách mm/den. Problém sedimentace se stává velmi významným ve většině aplikací MR kapalin a prozatím se řeší pasivním, či aktivním mechanickým mícháním[6].

1.5.2 Doba setrvání

Svým pohybem se MR kapalina ve většině zařízení postupně dostává do aktivní oblasti, kde interaguje s magnetickým polem. V této části zařízení kapalina mění své vlastnosti a umožňuje regulovat sílu. Tím, jak kapalina vstupuje do aktivní oblasti, přechází její tok z newtonovského stavu kapaliny do Binghamovo plastického tečení[17].

Chceme-li určit reakční dobu kapalin, musíme brát ohled také na její dobu setrvání. Tato doba je definována jako čas, po který kapalina setrvává v přítomnosti magnetického pole. Doba setrvání t_{dwell} se vypočítá ze vzorce

$$t_{dwell} = \frac{l_{mr}}{u_m} \quad (1.7)$$

kde l_{mr} je délkou trasy MR kapaliny v zařízení a u_m průměrnou rychlostí proudění v průtokovém kanálu kapaliny. V extrémních případech, jakými jsou čisté aplikace přímého režimu smyku a režimu stlačení, je MR kapalina po celou svou dobu vystavena magnetickému poli. V takových případech může kapalina plně rozvinout svůj potenciál, tedy na 100 % svého předpokládaného kluzu v poli o dané intenzitě. V ostatních případech, tedy v průtokovém režimu a jeho kombinacích může mít doba setrvání významný vliv na časovou odezvu kapalin, a to v případě, kdy doba setrvání bude kratší než doba odezvy. Kapalina tak nebude moct plně rozvinout svůj potenciál[17].

1.6 Současné názory na reakční dobu kapalin

V dnešní době se odborníci a výrobci shodují na stejném závěru, a to na takovém, že reakční doba samotné MR kapaliny je menší než 1 ms[17][18][19]. Tato obecná informace však není zcela přesná, a proto musí být dořešena. Goncalves (2005) definuje časovou odezvu jako dobu setrvání, při které kapalina dosáhne 63,2 % z předpokládané celkové hodnoty meze kluzu, přičemž vycházel z modelů pro normalizovanou mez kluzu ve svém zařízení využívajícím aplikaci průtokového režimu MR kapaliny. Výsledky, které získal tímto experimentem, jsou obsaženy v Tab. 1.2 [17].

Tab. 1.2: Souhrn výsledků časové odezvy MR kapaliny MRF-132LD (© 2005 Lord Corporation)[17]

Intenzita magnetického pole H [kA/m]	Časová odezva t_d [ms]
100	0.7325
200	0.5303

Výše uvedené hodnoty časové odezvy se týkají pouze samotné kapaliny ve speciálních případech. Ve skutečnosti časová odezva MR kapaliny značně závisí na konstrukci zařízení, především pak na geometrii průtokového kanálu, a dále pak na elektromagnetických parametrech řídicích obvodů, na jejich přechodových dějích, výstupních charakteristikách zdroje proudu (zesilovače) a na vzniklých vířivých proudech v okolních železných materiálech[19][20]. Všechny tyto závislosti několikanásobně prodlužují dobu odezvy.

Jak ve své práci prokázal Sahin (2008), tak při porovnávání radiálního a prstencového ventilu pro stejný nárůst/pokles řídicího signálu nebude časová odezva MR kapaliny vždy stejná. V prstencovém ventilu pro sepnutí naměřil rozsah časové odezvy od 12.5 ms do 22 ms

a od 7.7 ms do 14.2 ms pro vypnutí přechodu. Naměřené hodnoty pro radiální ventil se pohybovaly v rozmezí od 1.4 ms do 5.8 ms pro sepnutí a od 2.5 ms do 8.3 ms pro vypnutí přechodu[20].

2 Technické aplikace magnetoreologických kapalin

2.1 Seismická ochrana staveb

V posledních dvaceti letech se věnuje značná pozornost ochraně civilních staveb před zemětřesením či silným zatížením větrem. Jedná se o řídicí systémy, nazývané protective systems, které umožňují dynamicky měnit odezvu konstrukce tak, aby se zvýšila její bezpečnost a spolehlivost[21]. Obecně se tyto ochranné systémy dělí do tří tříd:

Pasivní systém

Jedná se o nekontrolovaný systém, který nevyžaduje žádný vstupní výkon k provozování. Tvoří jej jednoduchá zařízení s nízkými finančními náklady, ale tyto pasivní systémy nejsou schopny přizpůsobovat se měnícím se podmínkám.

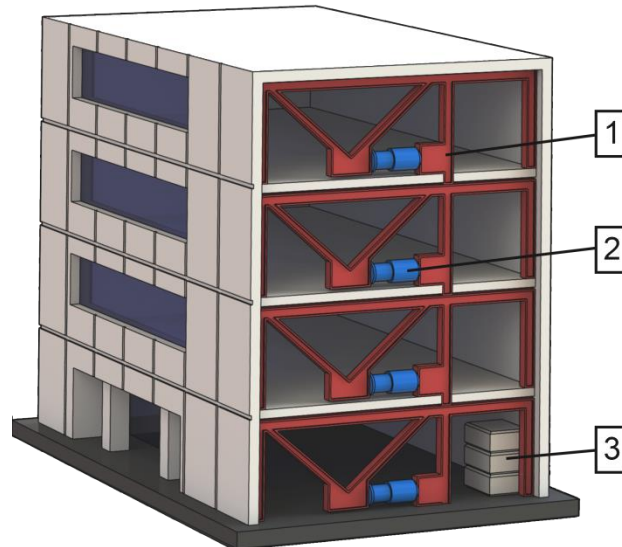
Aktivní systém

Takovýto systém obsahuje aktivní prvek, zpravidla tlumič připojený k silovému generátoru, který vyvíjí tlak na strukturu. Jde o plně ovladatelný systém, avšak vyžadující značné množství energie.

Semi-Aktivní systém

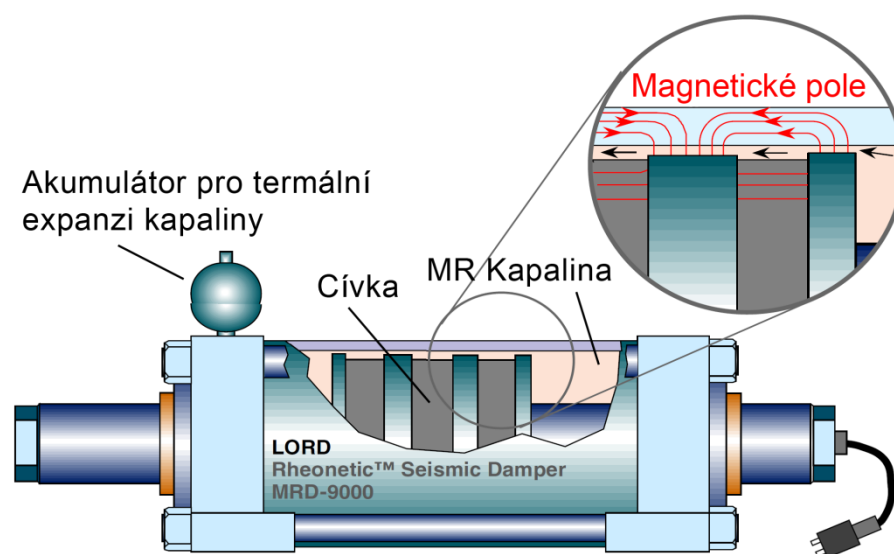
Kombinuje prvky pasivního a aktivního tlumení. Systém vyvíjí tlak proti odporové síle vyvinuté zemětřesením pro snížení pohybu konstrukce. Na rozdíl od aktivních systémů nemají potenciál k destabilizaci struktury stavby. Tento systém je plně ovladatelný a vyžaduje malé množství energie pro řídicí prvky. Přesto tyto systémy dosahují stejných výkonů jako systémy aktivní.

Velmi zajímavým způsobem využití MR kapalin se stává právě jejich aplikace v Semi-Aktivních systémech, které jsou schopny snižovat destruktivní účinky na stavbách. Jedná se o masivní tlumiče vestavěné do nosných částí budov. Vnější část tlumiče je ukotvena do podlahy a táhlo je vzpěrami připevněné ke stropu, aplikaci ilustruje Obr. 2.1. Konstrukce seismické ochrany se tedy sestává z jednoho nebo až ze stovek tlumičů v závislosti na velikosti objektu[22].



Obr. 2.1: Jeden z možných způsobů aplikace Semi-Aktivního systému[23] 1) Nosné prvky 2) MR tlumiče 3) Řídicí systém

Hlavním důvodem pro použití MR tlumičů a největší výhodou oproti ostatním systémům se stává jejich nízká reakční doba, díky které mohou tlumiče včas reagovat na jednotlivé výkyvy tvořící zemětřesení. MR tlumiče dále vynikají nízkou spotřebou energie, vysokou silovou kapacitou, konstrukční jednoduchostí a robustností[21].



Obr. 2.2: Detailní pohled na 20tunový MR tlumič firmy LORD[24]

MR tlumič funguje na principu rychlé změny hustoty MR kapaliny díky rychlým změnám magnetického pole. Pro antiseismické tlumiče takové velikosti je potřeba zhruba 5 litrů této kapaliny. Při zemětřesení může dojít k desítkám změn hustoty v jediné sekundě, což má za následek zahřátí a následnou tepelnou roztažnost kapaliny. Z toho důvodu tlumiče obsahují akumulární nádrž. Kolem pístu je navinuto několik cívek, které obklopuje MR kapalina. Jakmile je do cívek vpuštěn elektrický proud, vzniká kolem nich magnetické pole,

díky kterému kapalina zvýší viskozitu. Jediný píst tak vyvine sílu až 200 000 N, tedy 20 tun (Yang 2001). Tento proud vpouští do cívek řídicí počítač, který tak rozhoduje na základě signálů získaných ze senzorů připojených ke stavbě. V současné době se zvyšuje efektivnost řídicích systémů s využitím fuzzy logiky[24].

2.2 Biomechatronika

Bavíme-li se o biomechatronice, mluvíme o splynutí člověka se strojem. Jedná se o interdisciplinární obor zahrnující biologii, elektroniku, mechaniku, neurovědu a robotiku. Cílem biomechatroniky je vytvářet zařízení interagující s lidskými kostmi, svaly a nervovým systémem. Výsledné zařízení tak zlepšuje lidskou motoriku, která mohla být narušena nebo ztracena traumaty, nemocemi či defekty před narozením[25]. Jakýkoliv takový systém musí obsahovat tyto komponenty:

Biosenzory

Zjišťují záměry uživatele. Informace můžou poskytovat svaly a nervy. Biosenzorem mohou být vodiče detekující elektrickou aktivitu, jehlové elektrody implantované do svalu nebo elektrodové síto propojené s nervem.

Kontrolery

Jedná se o rozhraní mezi uživatelem a zařízením. Interpretují záměry od uživatele do zařízení a naopak. Slouží k monitorování a ovládání zařízení.

Mechanické snímače

Slouží k získávání informací o zařízení. Jedná se o informace polohy, působící síly či zatížení. Následně slouží kontrolerům pro výpočet rychlosti či zatížení zařízení.

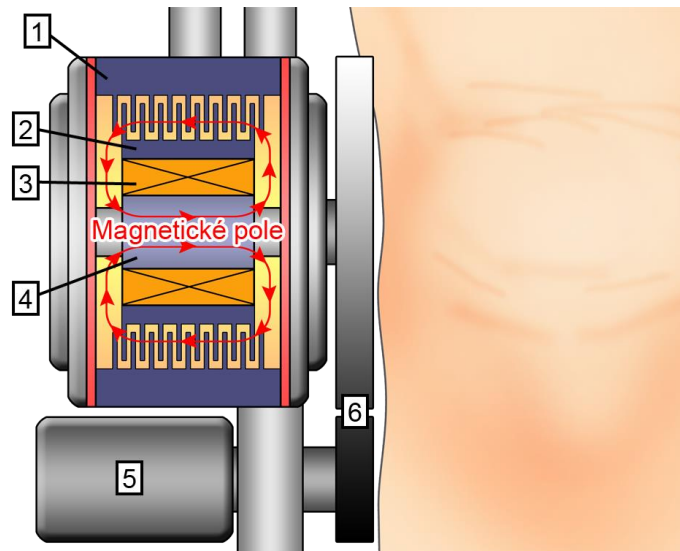
Pohon

Pro nás nejdůležitější část systému. Produkuje sílu či pohyb, zastává tak jakousi funkci umělého svalu. Pohonem můžou být motory a tlumiče nebo jejich kombinace. Ve snaze o co nejpřirozenější pohyb se v současné době u těchto pohonů využívá MR kapalin, které, díky své vlastnosti změnit hustotu, zvládnou realisticky napodobovat mechanický odpor kloubu[25].

2.2.1 Ortéza využívající MR brzdu

Cílem této pomocné ortézy je napomáhat správné funkčnosti kolenního kloubu. Tvoří ji kombinace stejnosměrného motoru a MR brzdy. Je-li při ohybu žádoucí pohyb kloubu, DC

motor je aktivní a MR brzda slouží jako spojka pro přenos krouticího momentu generovaného motorem. Naopak, není-li žádoucí aktivní pohyb kloubu, DC motor se vypne a pomocí tenzometrů a potenciometrů se vypočte poloha ortézy, na jejímž základě se reguluje viskozita MR kapaliny tak, aby byl zpětný pohyb přirozený[26].



Obr. 2.3: Asistenční kolenní ortéza s MR brzdou[26] 1) Vnější válec s disky 2) Vnitřní válec s disky 3) Cívka 4) Jádro 5) Motor 6) Převod

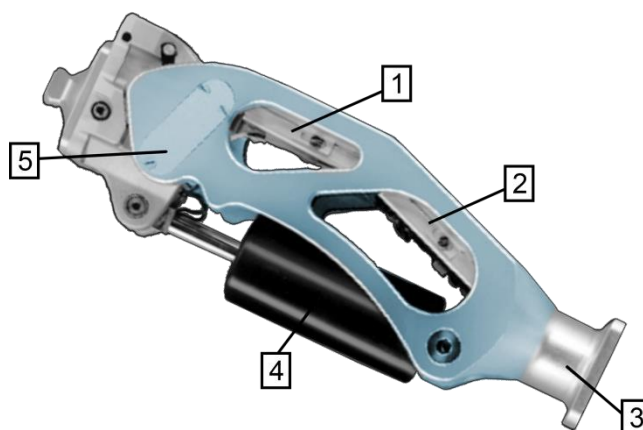
Díky takto navrženým zařízením jsou ortézy velice přizpůsobivé. Konvenční MR brzdy jsou příliš velké, řešení pro zachování kompaktnosti a vysokého výkonu přineslo zvětšení kontaktní plochy aktivní a pasivní části. Obr. 2.3 zobrazuje toto řešení. Vnitřní a vnější válce brzdy obsahují vzájemně se střídající série disků. Mezery mezi těmito disky měří pouhých 50 μm a vyplňuje je MR kapalina. Disky několikanásobně zvětšují plochu, čímž vzrůstá smyková síla[27].

2.2.2 Kolenní protézy

Současným trendem při výrobě protéz se stává aplikace moderních semi-aktivních systémů využívajících MR kapaliny. Nejvíce se uplatňují u kolenních ortéz, kde nahrazují funkci kolenního kloubu. V současné době se vývoj protetických kolen ubírá dvěma směry. První využívá stejného principu jako MR brzda u kolenní ortézy pouze s tím rozdílem, že brzda tvoří přímo kolenní kloub[28]. Druhý směr využívá MR píst, Obr. 2.4 [29].

Takováto umělá kolena se již zvládají automaticky přizpůsobovat a reagovat v reálném čase na měnící se podmínky tak, aby napodobila co nejpřirozenější chůzi po nadkolenní amputaci. Základem těchto zařízení jsou čidla, kterými se systém snaží zjistit, o co se člověk snaží, např. zrychlovat, zpomalovat, jít po schodech či rozpoznat svah. Poté následuje regulace signálu, jenž ovládá MR kapalinu. Zajímavostí je, že se zde záměrně upravuje doba

zpoždění až na 30 ms, jelikož tato doba odpovídá době odezvy svalových nervů v noze. Ale i pro tuto dobu existují výjimky - když osoba s protézou narazí nebo klopýtne, systém zareaguje s maximální rychlostí[19].



Obr 2.4: Protetické koleno s MR tlumičem vyvinuté firmou Biedermann Motech s použitím tlumiče MotionMaster™ (© 2005 Lord Corporation)[29] 1) Controller 2) Baterie 3) Silový a pohybový senzor 4) MR tlumič 5) Senzor pozice a natočení

Zdrojem energie pro řídicí obvody jsou lithiové baterie o celkovém napětí cca 12 V. Napětí na elektromagnetickém obvodu je řízeno vysokorychlostními MOSFET tranzistory. V provozu vydrží nepřetržitě 2 dny. V současné době se podrobují řadě testů, majících za cíl přesně určit a zvedat limity těchto protéz. Stále nezvládnou pomoci každému, jelikož největší překážku tvoří váha pacienta[28].

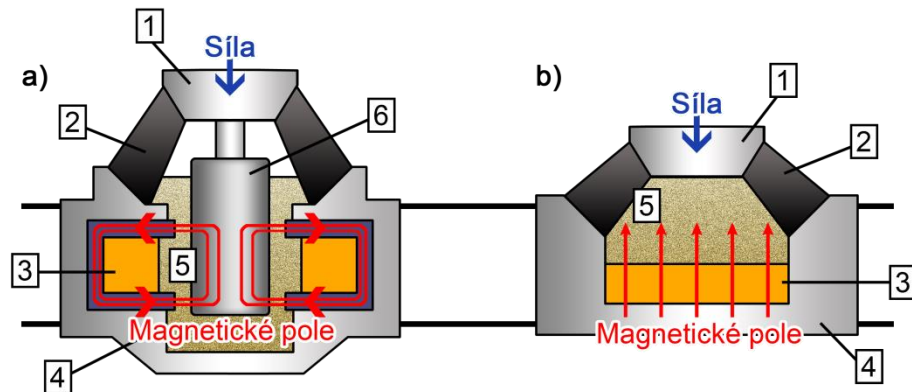
2.3 Technické aplikace v automotive

V tomto technickém odvětví nachází MR kapaliny řadu uplatnění, ať už se jedná o aplikace zajišťující komfort, výkon či bezpečí. V obecném povědomí nejrozšířenější technickou aplikací v automotive už od začátku bylo nahrazení klasických pružinových tlumičů u zavěšení kol tlumiči magnetoreologickými. Písty těchto tlumičů obsahují několik průtokových kanálů, které obklopuje elektromagnetický obvod[30]. Obdobnou aplikací, pracující na stejném principu a zvyšující komfort, je také tlumení sedadel s pomocí aplikace MR tlumičů[3]. V automotive nalezneme ale také vibrace pohlcující držáky, které se již v současnosti používají k ukotvení motorů některých aut[31]. Ve vědeckých centrech a vývojových laboratořích se setkáme s již realizovanými návrhy MR brzd[32] a spojek[33].

2.3.1 Vibrace pohlcující držáky

Tato technologie řeší současný problém spojený s provozem spalovacích motorů, které jsou zdrojem hluku a vibrací (dále jen HV). MR držáky se prozatím aplikují u technologicky vyspělejších vozidel, jejichž běžnou praxí pro ušetření paliva je přepnutí např. z 6 válců na 3

válce při ekonomickém jízdním režimu. Všudypřítomný HV je pak v takovémto režimu mnohem vyšší, jelikož pravidelný šestiválec musí pracovat jen na tři válce a motor je tak nevyvážený. Z tohoto důvodu se vyplatí využít právě semi-aktivních MR držáků, jež se vyznačují rychlou odezvou a vyšší efektivností než konvenční pasivní úchopy[31].



Obr 2.5: Dvě varianty MR držáků a) v průtokovém režimu b) v režimu stlačení[31]

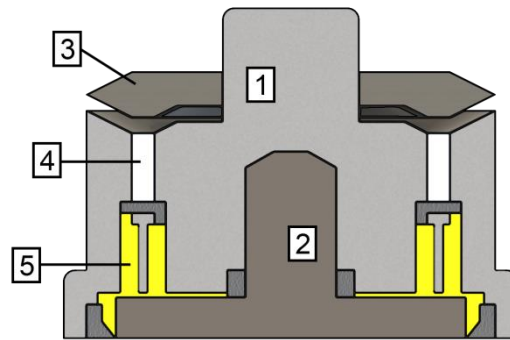
1) Aktivní část 2) Pryž 3) Cívka 4) Pasivní část 5) MR kapalina 6) Píst

Princip těchto držáků je znázorněn na Obr 2.5. Zařízení se skládá z aktivní a pasivní části, které jsou k sobě hermeticky spojeny pryží. Aktivní část je napevno spojena se zdrojem NV. Pasivní část je součástí kostry automobilu. Aktivní část ve variantě s průtokovým režimem Obr. 2.5 a obsahuje vnitřní píst, pohybující se v MR kapalině. V případě režimu stlačení Obr. 2.5 b je vnitřní komora zcela vyplněna MR kapalinou[31].

2.4 Další příklady využití

2.4.1 MR spojka pro snížení rázů při rozběhu asynchronních motorů

Přímé připojení k síti u asynchronních motorů je velmi dynamický proces, který může vést k poškození motoru, zátěže i rozvodné sítě. Mechanické poškození je spojeno s vysokými počátečními proudy (poškození vinutí statoru) a s vysokým dynamickým momentem motoru (poškození hřídele či zátěže). Mezi metody jak tomuto zabránit patří připojení pomocných odporů, nebo právě spojka s MR kapalinou. Jedná se o speciální konstrukci spojky, která umožňuje snížit proudové rázy a točivý moment při startu motoru. Díky svým vlastnostem jsou MR kapaliny užitečné pro ovládání točivého momentu a přenosu sil. Změnou magnetického pole tak spojka může ovlivňovat vnitřní mez kluzu v kapalině, čímž kapalina může různě reagovat na pohyblivé díly uvnitř převodu[34].



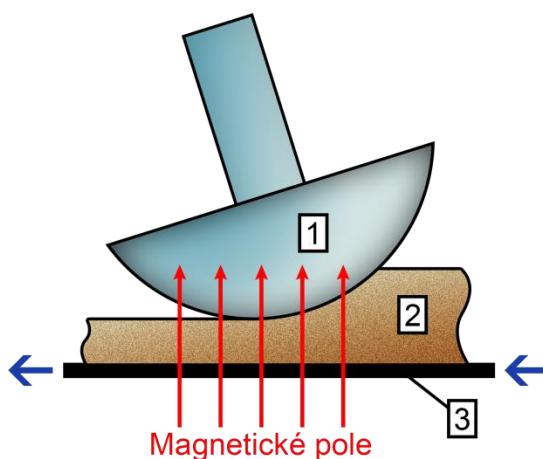
Obr. 4: Řez MR spojkou s permanentním magnetem[34] 1) Rotor 2) Zátěž 3) Nastavitelná kotva ve směru osy rotace 4) Permanentní magnet 5) MR kapalina

Zjednodušenou konstrukci této spojky tvoří dvoudílný převod skládající se z dílu připojeného k motoru a dílu připojeného k zátěži. Právě mezi těmito částmi se nachází mezeře vyplněná MR kapalinou. Díl připojený k zátěži dále obsahuje permanentní magnet nastavující magnetickou indukci. To se provádí pomocí pohyblivé kotvy, jejíž vzdálenost od magnetu δ_r ovlivňuje magnetický tok, čímž mění velikost magnetické indukce v mezeře MR kapaliny[34].

2.4.2 Leštící zařízení

V tomto případě se jedná o zcela jedinečné využití MR kapaliny, jež se neklasifikuje ani do jednoho ze tří obecných režimů aplikace těchto kapalin. Tato hydrodynamicky magneticky asistovaná leštící metoda slouží ke konečné úpravě povrchů, jakými jsou například optická skla, keramika, plasty a jiné nemagnetické materiály. Tato MR metoda umožňuje vytvářet hladké povrchy bez mikrodrsnot a tvorby povrchových a podpovrchových vrstev poškození[35].

Základní princip leštícího procesu popisuje Obr. 2.5. MR suspenze se nanese na pohyblivou plochu, k níž se přiloží obrobek. Speciálně připravená MR kapalina obsahuje navíc jednu důležitou složku - abrazivum. Jako abrazivum se používá oxid ceričitý, nosným médiem je pak voda a mikročástice tvoří magnetické karbonylové železo. Při pohybu desky pak na styku plochy obrobku a MR kapaliny dochází k jeho broušení. Změnou proudu v magnetickém obvodu pak můžeme regulovat viskozitu kapaliny, čímž ovlivníme množství materiálu odstraněného z obrobku[35].



Obr 2.5: Magnetoreologické leštící zařízení[35] 1) Obrobek 2) MR kapalina s abrazivem 3) Pohybující se plocha

Celý proces leštění je svým principem velmi jednoduchý, používá se k leštění, kde se klade vysoký důraz na přesnost. Mezi největší přednosti této metody patří její flexibilita, kdy nepotřebujeme různě drsné materiály použité k leštění, a nízké finanční náklady[35].

3 Experimentální určení doby odezvy magnetoviskózního jevu

3.1 Úvod do problematiky

Jak již bylo psáno, teoretická odezva MR kapaliny je menší než 1 ms. Tím se míní, že v momentě, kdy přijde kapalina do kontaktu s magnetickým polem, toto pole ihned působí na částice v kapalině silou, která se snaží částice buďto přesunout nebo udržet na místě. Zmíněné částice v daném poli tedy ještě nemusí být ani uspořádány a kapalina již bude navenek vykazovat změnu viskozity.

Pro navrhování technických aplikací využívajících MR kapaliny může být v řadě případů důležité znát dobu odezvy pro danou kapalinu, čas potřebný pro zřetězení částic, či dobu zpoždění řetězce při změně natočení magnetického pole. Jedná se však o informace, které výrobci zatím neposkytují.

3.1.1 Možnosti řešení

Časová odezva MR kapaliny se odehrává v rámci jednotek milisekund. Jelikož se jedná o velmi rychlý děj, bylo proto obtížné vytvořit vhodný druh experimentu. Rychlost tohoto děje eliminuje všechny standardní metody a zařízení (digitální viskozimetry a reometry) sloužící k měření viskozity. MR kapalina v magnetickém poli nemění svůj objem, nedochází u ní k rozpínání či smršťování, dochází pouze k přeskupování magnetických částic podél siločar v nosné kapalině, tedy mění svůj tvar při zachování svého objemu, což kupříkladu vylučuje možnost měřit dynamický tlak, kterým by kapalina působila v uzavřené nádobě na její stěny.

Komplikovanost spojená s krátkým časovým intervalem toho děje nakonec vedla k sestavení experimentů na základě optických pozorování. Optické pozorování kapaliny nabízí hned dvě možnosti jak nahlížet na chování kapaliny, a to makroskopicky či mikroskopicky. Makroskopický experiment umožňuje nahlížet na kapalinu jako na celek, je odvozen od poznatku o změně tvaru kapaliny při zachování objemu, kdy časovou odezvu získáme jako rozdílnou dobu mezi maximálním vzedmutím kapaliny a maximální amplitudou přivedeného signálu do elektromagnetického obvodu.

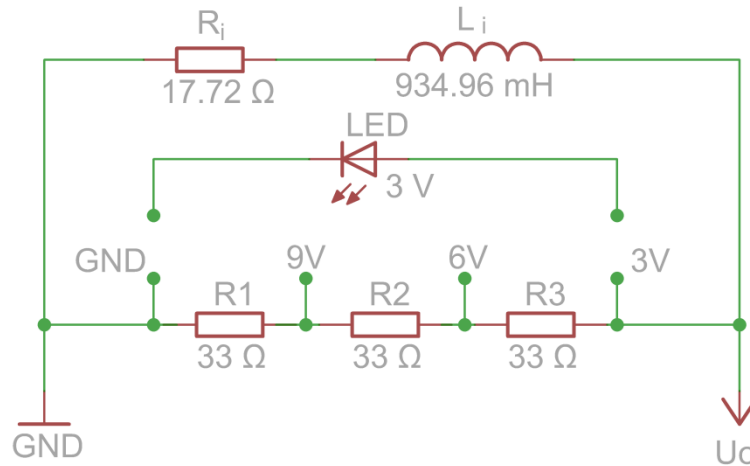
Druhá možnost, mikroskopické studium, otevírá možnost nahlédnout dovnitř kapaliny a sledovat chování částic. Umožňuje jednoduše sledovat řetězení částic a stáčení řetězců v závislosti na čase. A právě tento předpoklad vedl k vytvoření následujících dvou experimentů, vyvozených z mikroskopického pozorování.

3.2 Měření doby zřetězení částic

Tento experiment se zabývá měřením doby, za kterou se magnetické částice v kapalině zřetězí. Princip měření spočívá ve sledování kapaliny, která se nalézá uvnitř vzduchové mezery železného jádra elektromagnetu. Jako vhodný magnetický obvod posloužila již dříve vyrobená cívka s železným jádrem, pro účel měření teplotně-viskózní závislosti MR kapalin[36]. Chování kapaliny zaznamenávala vysokorychlostní (dále jen VR) kamera, viz Příloha B.

Z důvodu konstrukce magnetického obvodu, jehož železné jádro tvoří několik plechů, jejichž tloušťka se blíží jednomu centimetru, se pro buzení cívky použil stejnosměrný zdroj napětí STATRON, viz Příloha A. Touto volbou se zamezilo případným ztrátám vířivými proudy, které by nastaly v případě střídavého buzení.

Klíčovým bodem experimentu bylo určení přesné doby počátku času řetězení částic. K tomu posloužila k cívce paralelně připojená 3V LED dioda. Pro více hodnot vstupního napětí byla zapojována v kombinaci s děličem napětí, viz Obr. 3.2.1. Tato dioda sloužila jako indikátor přechodového jevu cívky elektromagnetu. Byla orientována tak, aby v momentě začátku přechodového jevu nasvítla vzorek MR kapaliny, čímž se zvedl jas ve videozáznamu z VR kamery. Dioda však neměla dostatečný zářivý výkon, aby bylo možné přesně identifikovat počátek přechodového děje na videozáznamu, jelikož její svit přehlušoval interní zdroj světla z mikroskopu. Po vypnutí tohoto zdroje nestačila samotná dioda nasvítit vzorek MR kapaliny tak, aby bylo možné pozorovat zřetězení částic, záznam byl zcela tmavý a nečitelný. Následovala řada neúspěšných pokusů, jak vyřešit tento problém, jako např. přidání dalších diod kolem vzorku, vypodložení vzorku, pod nímž by se nalézala dioda, či nahrazení diody jiným zdrojem světla. Úspěšné a v závěru použité řešení spočívalo ve vypodložení skla vzorku kusem kancelářského papíru. Ačkoliv se toto řešení může zdát amatérské, přineslo kýžený efekt. Po nasvícení vypodloženého vzorku původní diodou se její světlo rozlilo po celé ploše matného povrchu papíru a natolik podsvítilo vzorek MR kapaliny, že již nebylo třeba použít žádného dalšího externího zdroje světla. Vypodložení vzorku papírem je vidět na Obr. 3.2.3. Na hodnoty následně získaných dat neměl žádný vliv, struktura papíru na pozadí videosnímků pouze vytváří slabý efekt oblak, viz Obr. 3.2.4.



Obr. 3.2.1: Schéma zapojení pro měření zřetězení částic, součástky R_i a L_i reprezentují parametry vinutí, odpory R_1 , R_2 , R_3 slouží jako odporový dělič pro LED diodu

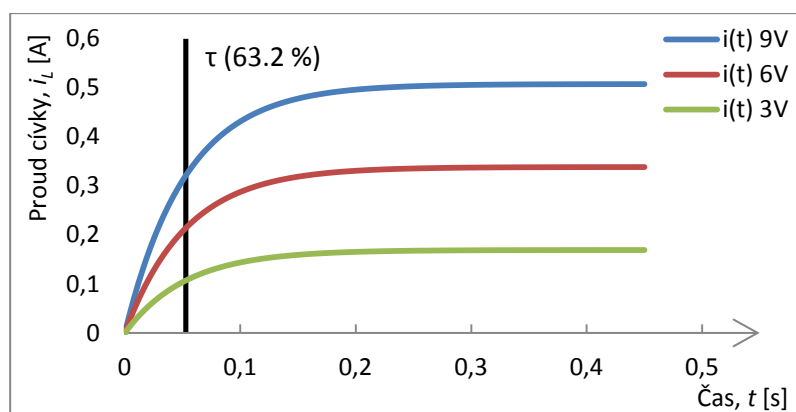
LED dioda umožnila ve videozáznamu určit moment sepnutí obvodu, tedy počátek přechodového děje. Tento okamžik však nemůžeme považovat za počátek měření doby řetězení částic. Magnetické pole v mezeře roste od nuly, úměrně rychle s růstem proudu v závitech cívky. Jak již bylo dříve řečeno v teoretické části této práce, časová odezva MR kapalin se měří od určité úrovně magnetického pole a v případě tohoto experimentu je tomu také tak. Počátek měření doby zřetězení nastává, když magnetické pole v mezeře dosáhne 63.2 % (neboli $1 - e^{-1}$) ze svého celkového potenciálu. Okamžik, při kterém magnetické pole dosahuje této úrovně, označujeme jako τ , tedy časovou konstantu přechodového děje

$$\tau = \frac{L_i}{R_i} \quad (3.1)$$

kde L_i je indukčnost vinutí a R_i jeho odpor. U cívky použité v experimentu byla doba τ spočítána z naměřených hodnot o délce trvání 52.75 ms, Obr. 3.2.2. Pro výpočet okamžitých hodnot proudu platí rovnice

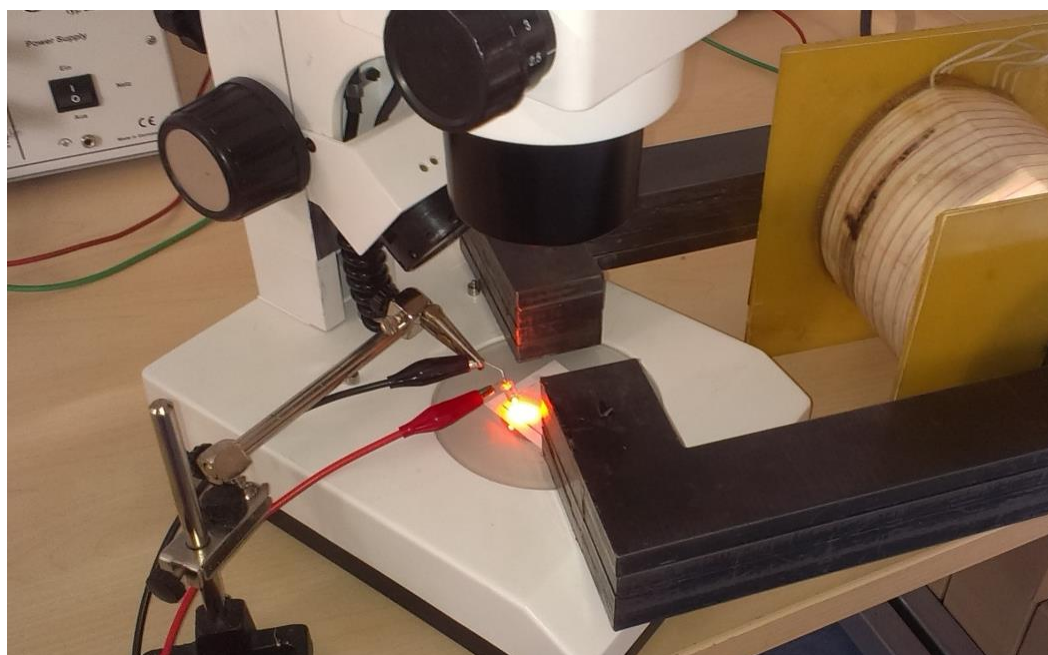
$$i_L(t) = \frac{U_0}{R_i} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (3.2)$$

kde U_0 je hodnotou vstupního napětí. Pro měření se zvolily tři hodnoty tohoto napětí, a to 3 V, 6 V a 9 V, jako násobky napětí LED diody.



Obr. 3.2.2: Vyznačení počátku měření doby zřetězení na časových průbězích proudu pro tři hodnoty vstupního napětí

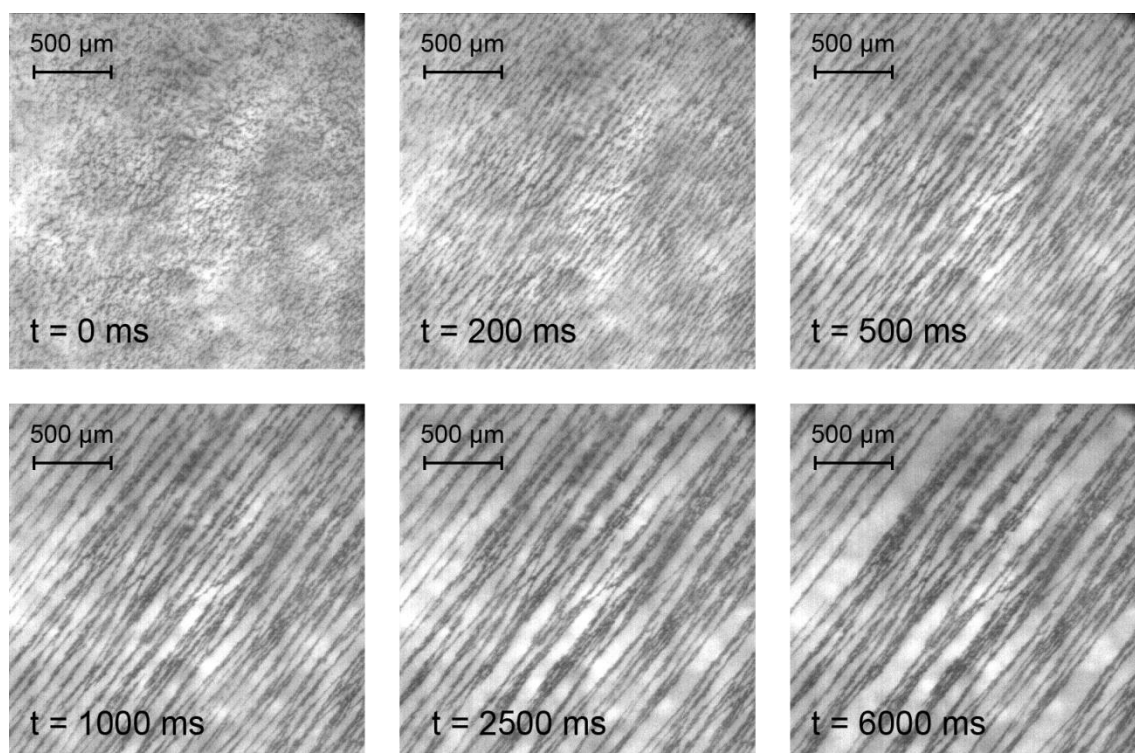
Sestavený experiment zobrazuje Obr. 3.2.3. Rozestavení použitých přístrojů není nahodilé. Přístroje bylo nutné natočit dle potřeby, aby jejich univerzální geometrie nebránila provedení experimentu. Největší překážku tvořil objemný stativ pro VR kameru nalézající se před okulárem mikroskopu. LED dioda musela zaujímat pevnou pozici, kterou zajišťovalo polohovací zařízení pevně upnuté k pracovní desce. Z uvedených důvodů proto nejsou řetězce na následujících videoseznamkách vyrovnány pod pravým úhlem, ale zaujímají sklon 50° .



Obr. 3.2.3: Rozestavení přístrojů pro měření doby zřetězení

3.2.1 Výsledky

Experiment se v rámci konkrétního zaostření daného mikroskopu zkoumal na čtvercové ploše o délce hrany 2.229 mm s plochou 4.97 mm². Měřítka se určilo pomocí vyrobeného etalonu, který byl v tomto případě tvořen měděným drátem o průměru 100 μm. Zkoumaná MR kapalina společnosti Liquids Research Ltd nese označení MRHCCS4-B. Jedná se o kapalinu, jejíž částice tvoří 80% celkové hmotnosti v hydrokarbonovém oleji. Bližší informace o vlastnostech společnost neuvádí. Aby mohl být zkoumaný vzorek kapaliny pozorován, obsahoval větší podíl nosné kapaliny v přibližném poměru 10:1. Následující Obr. 3.2.4 uceluje představu o tom, jak probíhá postupné řetězení této kapaliny.



Obr. 3.2.4: Postupné řetězení magnetických částic při $B = 22.3 \text{ mT}$

Měření doby zřetězení tedy nastalo v době osvětlení LED diodou + časová konstanta τ . Časy se měřily jak pro celkovou dobu, kdy došlo k ustálení pohybu shlukování, tak pro další dvě doby, kdy se měřila délka již utvořených řetězců, a to pro délku 1 mm a 3 mm. Analýza snímků probíhala v programech VirtualDubMOD a ImageJ, viz Příloha C. Teplota během měření činila 24.1 °C. Magnetická indukce byla proměřena ručním teslametrem, viskozita se získala z proložení tabulkových hodnot[36] pro teplotu 25 °C.

Tab. 3.2.1: Naměřené doby pro rychlost zřetězení

Napětí zdroje U_0 [V]	Mag. indukce B [mT]	Viskozita kapaliny η [mPa]	Doba pro $l_{ret}>1$ mm t_1 [s]	Doba pro $l_{ret}>3$ mm t_3 [s]	Doba ustálení t [s]
3	9.1	4000	2.6	8.1	15.0
6	14.4	7000	0.5	1.0	7.2
9	22.3	11000	0.2	0.3	6.4

Naměřené časy vykazují exponenciální/mocninnou závislost. Mocninná však prokládá data lépe, se svým koeficientem spolehlivosti od 0.943 do 1 poukazuje na velmi silnou závislost.

3.2.2 Odchyly měření

Při měření doby zřetězení dochází k součtu dvou hlavních odchylek, a to odchylky pro počátek měření a odchylky pro konec měření dané doby, z nichž odchylka pro měření konce má převládající váhu. Vyladěná VR kamera snímkuje s frekvencí 200 fps, tedy zaznamená snímek každých 5 ms. V případě určení počátku měření dojde z důvodu snímkování k zaokrouhlení času rozsvícení LED diody a zároveň k zaokrouhlení τ , jež při době 52.75 ms bylo tvořeno prvními jedenácti nasvícenými snímky. Počáteční odchylka činí ± 5 ms.

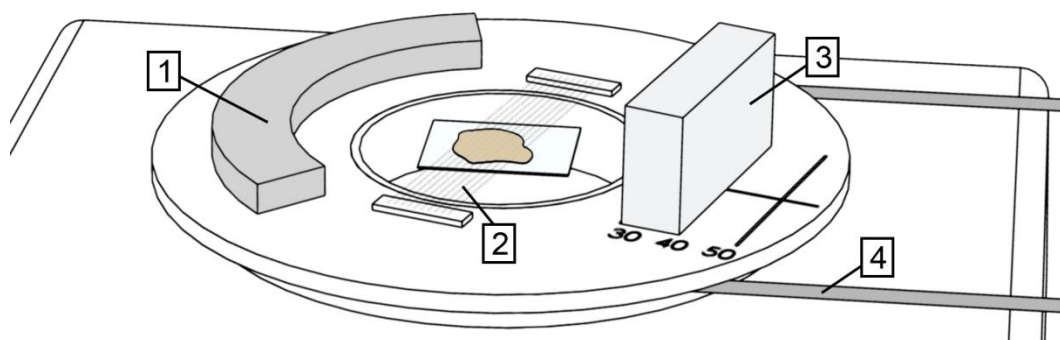
Pokud se jedná o dobu ustálení, lze tuto dobu určit s přesností na desítky snímků, tedy ± 25 ms. Doby tvoření řetězců určitých délek patří mezi orientační, vzhledem k množství pořízených snímků a náročnosti analýzy. Postup spočívá ve vybrání určitého intervalu snímků, a následném hledání jednoho, který již obsahuje správné délky řetězců. Pro kratší časy se intervaly odhadují lépe, pro delší časy, kdy dochází k ustalování, se jedná až o sto snímků. Orientační odchylka se tedy pohybuje od ± 50 ms do ± 250 ms.

3.3 Měření doby zpoždění řetězců v rotujícím magnetickém poli

Předkládaný experiment byl vytvořen pro pozorování MR kapaliny v ose rotace magnetického pole otáčejícího se konstantní rychlostí. Jako zdroj magnetického pole sloužil neodymový magnet o rozměrech 40x20x10 mm. Chování MR kapaliny opět zaznamenávala VR kamera.

Díly zařízení pro měření tohoto experimentu byly vyrobeny z 3mm desek tvrzeného PVC. Sestava obsahuje podstavu, která byla vymodelována podle pracovní plochy mikroskopu a pevně k ní přiléhá. Střed této podstavy byl vyfrézován podle průměru dutého válce, dovnitř kterého se usazovaly vypodložené vzorky MR kapaliny. Tento válec je pevnou součástí podstavy a zároveň slouží jako hřídel pro rotující díl sestavy. Vypodložení vzorků navíc vylučuje jejich tepelné ovlivnění od interního zdroje světla mikroskopu.

Z tvrzeného PVC byly dále vyrobeny dva rotační disky složené ze tří 3mm vrstev, kde prostřední vrstva měla menší průměr, čímž se vytvořil kanál pro hnací řemen. Pracovní plocha primárního disku se navrhla o poloměru 60 mm. Střed tohoto disku byl vyfrézován podle vnějšího průměru dutého válce, na který se následně primární disk nasadil. Pracovní plocha obsahovala magnet, protiváhu a vodící linky, viz Obr.3.3.1. Průměr sekundárního disku činil 50 mm. Ten byl připevněn k rotoru DC motoru, který sloužil jako zdroj otáčení. Regulací vstupního napětí motoru, v rozsahu od 0 V do 24 V, se ovládaly otáčky primárního disku. Otáčky se měřily digitálním tachometrem, viz Příloha A. Jako médium pro přenos točivého momentu byl zvolen polyuretanový hnací řemen, jelikož nejefektivněji přenášel rotační sílu a bez prokluzování přiléhal k PVC povrchu disků. Mezi odzkoušené a nepoužité materiály řemenu patří bavlněný, polyesterový, či silikonem potažený provaz.

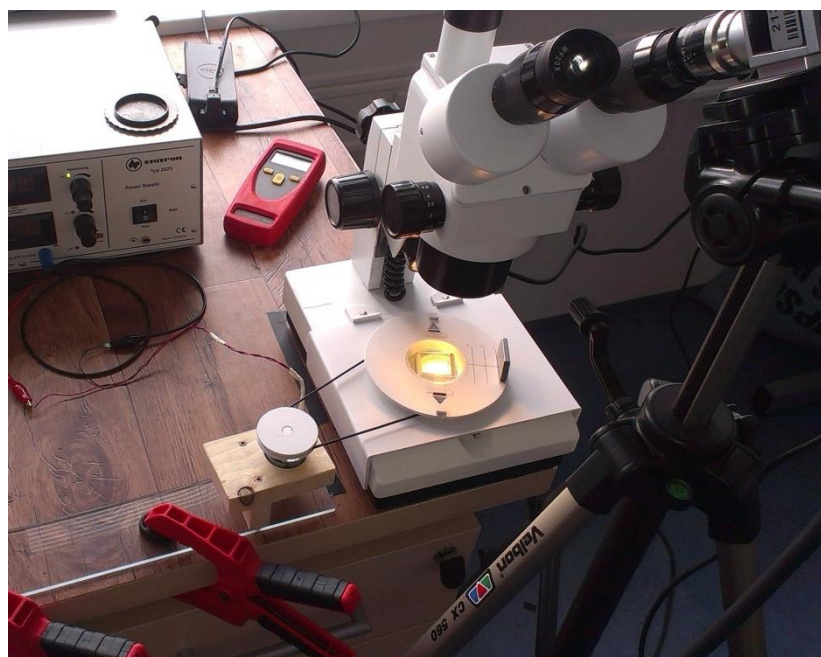


Obr. 3.3.1: Osazení pracovní plochy primárního disku 1) Protiváha magnetu 2) Vodící linky 3) Magnet 4) Hnací řemen

Ve fázi přípravy experimentu bylo důležité vyvrtat co nejpřesnější kruhové otvory pro nasazení na dutou hřídel. Nepřesný průměr, či jiný než kruhový tvar by ve výsledku tvořil velkou nepřesnost měření. Nejdůležitější část experimentu pak tvořilo to, jak zajistit, aby

snímky z VR kamery umožnily zjistit skutečný úhel magnetu, od kterého by se odečetl úhel, jež zaujímají řetězce v MR kapalině a tím by se získal rozdílový úhel α_d . Řešení tohoto problému se sestávalo z řady vodících linek, které by se vypnuly přes střed otáčení, těsně nad hladinou vzorku MR kapaliny a zároveň byly stále součástí primárního disku, tudíž by na snímcích rotovaly stejně jako magnet mimo záběr VR kamery a tím umožnily určit úhel magnetu. Jako neefektivní se ukázala vypnutá tkanina se čtvercovými oky o hraně cca 1.5 mm, jelikož u ní docházelo k prověšení a následným velkým nepřesnostem. Další nevyhovující řešení tvořily nařezávané prazce, do jejichž zářezů se napínal měděný drát a posléze i nylonové vlákno, oba materiály o průměru 100 μm . Vodící linky byly zcela přímé, avšak ne rovnoběžné, kvůli nepravidelnému nařezávání. Nicméně se zde ukázala nesporná výhoda nylonového vlákna pro jeho optické vlastnosti - propouští světlo a ve snímcích tvoří ostřejší linky na rozhraní. Řešení nevyhovujícího hradla přineslo natočení měděného drátu o průměru 0.6 mm. Jedenáct těsných závitů v jedné vrstvě vytvořilo deset žlabů pro vlákno, od sebe vzdálených vždy o stejnou vzdálenost. Dohromady se tedy vytvořily rovnoběžné vodící linky od sebe vzdálené 0.5 mm.

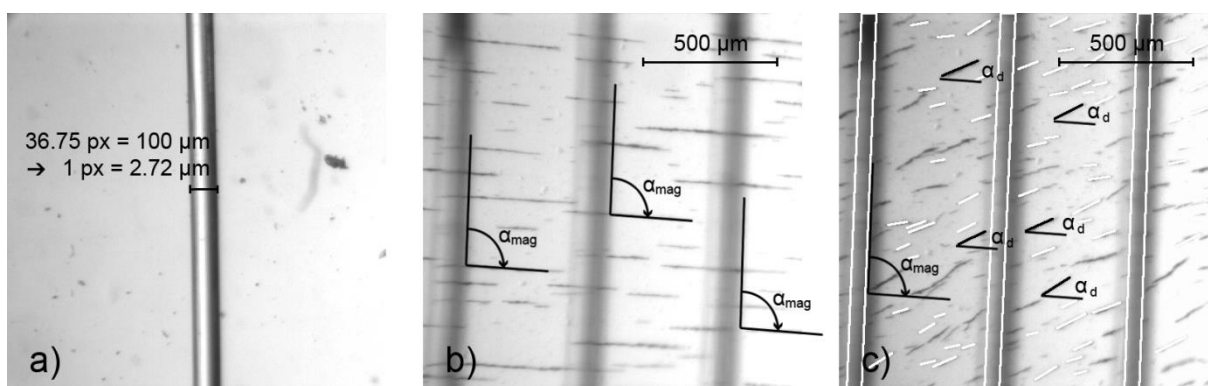
Sestavené pracoviště pro měření doby zpoždění se nalézá na Obr. 3.3.2. Důležité bylo najít stabilní pracovní plochu, která odolá značným vibracím vznikajícím při vysokých otáčkách. Pro ideální vypnutí hnacího řemene se posouval DC motor připevněný k PMMA desce. Fixaci v dané vzdálenosti zajišťovaly upínací svorky.



Obr. 3.3.2: Mikroskop osazený aparátem pro měření doby zpoždění včetně přistavené VR kamery

3.3.1 Výsledky

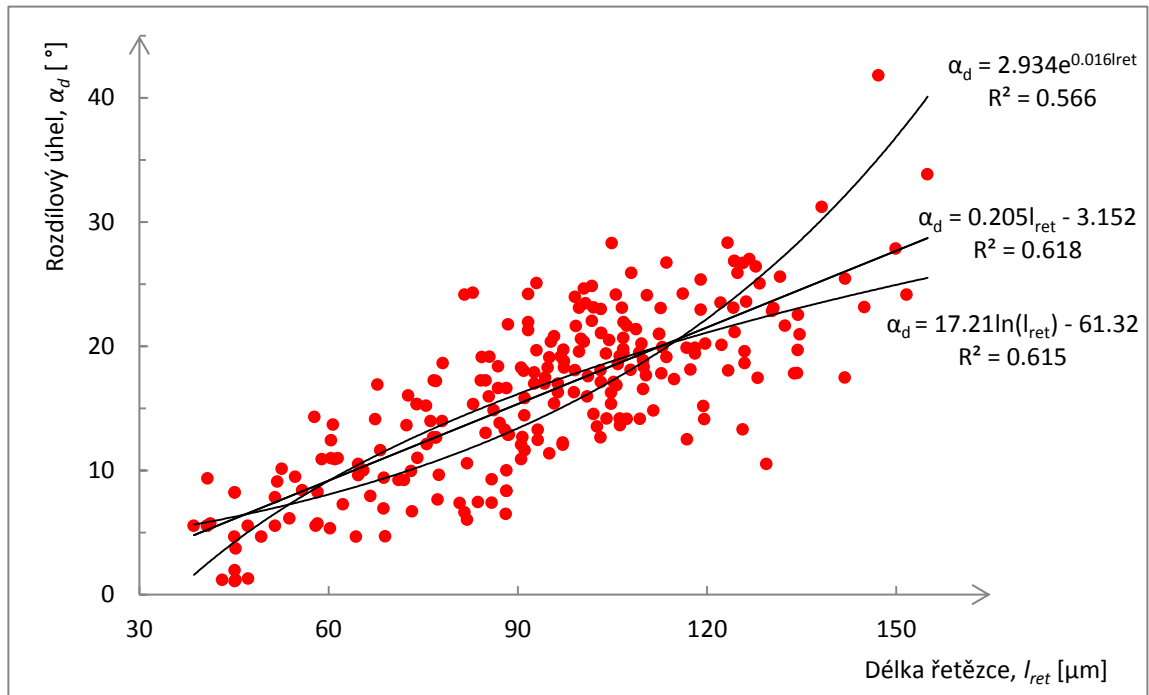
Na začátek měření se se sundaným primárním diskem zaostřil etalon a vyfotil jeden jeho snímek pro určení měřítka, Obr. 3.3.3 a. Následně byl etalon nahrazen vzorkem kapaliny a nasadil se osazený primární disk. Po ustálení magnetoreologického vzorku byl vytvořen druhý snímek, tentokrát pro změření úhlu mezi vodícími linkami a magnetem, Obr. 3.3.3 b. V posledním kroku měření se spustil DC motor a zaznamenala se zhruba jednu sekundu dlouhá videosekvence VR kamerou. Celkem bylo vyhodnoceno 18 videosekvencí, pro 6 různých úhlových rychlostí ve třech různých hodnotách magnetické indukce pro každou. Po rozložení sekvence na jednotlivé snímky programem VirtualDubMOD se vybral interval jedné otáčky a z něj čtyři snímky pro získávání dat programem ImageJ, viz Příloha C. Ze čtyř snímků bylo vytvořeno celkem 249 datových záznamů, tj. 60 pro řetězce mikročastic a 3 pro vodící linky na jeden snímek. Datové záznamy obsahovaly veškeré informace o analýze snímku, hlavně pak délku a úhel. Celkově se tedy zpracovalo 4500 hodnot úhlů a 4500 hodnot délek.



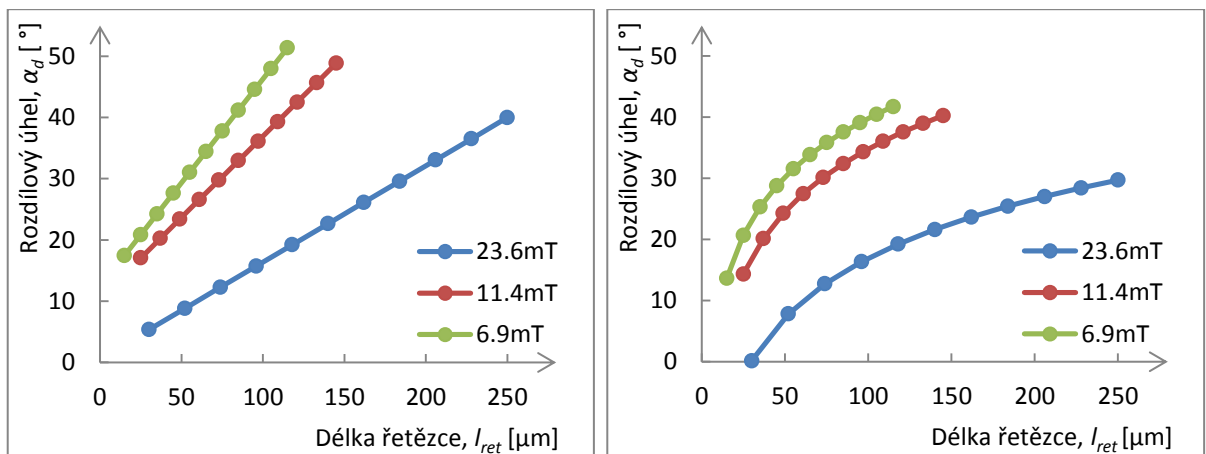
Obr. 3.3.3: Postup při získávání dat: a) tvorba měřítka pomocí etalonu nylonového vlákna b) určení úhlu magnetu v ustáleném stavu vzhledem k vodícím linkám c) získání rozdílových úhlů α_d ; vybírány byly pouze jednoznačné řetězce, kdy se očividně nejednalo o překrývání dvou řetězců nebo shluky

Následně byla provedena korelace takto získaných dat úhlů a přepočítaných délek, ta se pohybovala v rozmezí od 0.5 do 0.8. Pro takto velký soubor hodnot tedy značně přesahují kritické hodnoty pro závislost, z čehož se usuzuje silná závislost mezi úhlem a délkou řetězce mikročastic. V dalším kroku se data vynesla do grafu, kde se prokládáním zjišťoval typ závislosti. Data byla prokládána exponenciální a logaritmickou křivkou a lineární přímkou, viz Obr 3.3.4. Nejhuře dopadlo exponenciální proložení, jeho koeficient spolehlivosti byl o desetiny čísla menší. S velmi podobným a vysokým koeficientem spolehlivosti pak vycházelo lineární a logaritmické proložení, ovšem logaritmické ve většině případů lépe. Grafické zobrazení zprůměrovaných proložení zobrazuje Obr. 3.3.5 pro lineární vztah

závislosti úhlu na délce vlevo a logaritmický vztah vpravo. Matematickou formulaci vztahů pak obsahuje Tab.3.3.1.



Obr. 3.3.4: Množina naměřených dat s hodnotou korelace 0.641 při $B = 11.4 \text{ mT}$, 300 ot/min a teplotou v místnosti během měření $25.8 \text{ }^\circ\text{C}$



Obr. 3.3.5: Závislost úhlu na délce řetězce pro lineární vztah vlevo a logaritmický vpravo

Tab.3.3.1 Matematická formulace vztahů

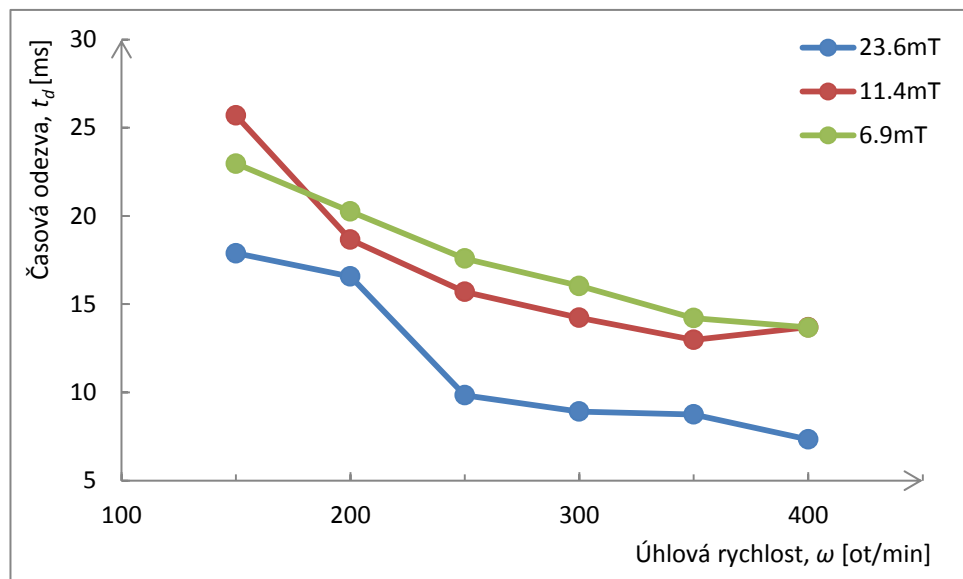
Velikost magnetické indukce $B \text{ [mT]}$	Lineární vztah	Logaritmický vztah
23.6	$\alpha_d = 0.157l_{ret} - 0.638$	$\alpha_d = 13.94\ln(l_{ret}) - 47.29$
11.4	$\alpha_d = 0.264l_{ret} - 10.45$	$\alpha_d = 14.74\ln(l_{ret}) - 33.10$
6.9	$\alpha_d = 0.339l_{ret} - 12.37$	$\alpha_d = 13.97\ln(l_{ret}) - 23.73$

Hodnota časové odezvy byla zjištěna pomocí vzorce (3.3), kdy se vynásobil průměrný úhel zpoždění jednotlivých úhlových rychlostí dobou pro otočení o úhel jednoho stupně

$$t_d = \frac{1}{6} \cdot \frac{\alpha_d}{\omega} \quad (3.3)$$

kde ω je úhlová rychlost primárního disku.

Vzniklou závislost časové odezvy znázorňuje Obr. 3.3.6. Jak je na první pohled zřejmé, časová odezva klesá s růstem otáček. To je dáno tím, že s klesajícími otáčkami se také zkracuje délka řetězce. Zkracování délky řetězce má při rostoucích otáčkách větší váhu než zvětšování rozdílového úhlu, a proto má daná závislost klesající charakter. Ostatní závislosti a průměrné hodnoty měření obsahuje Příloha D.

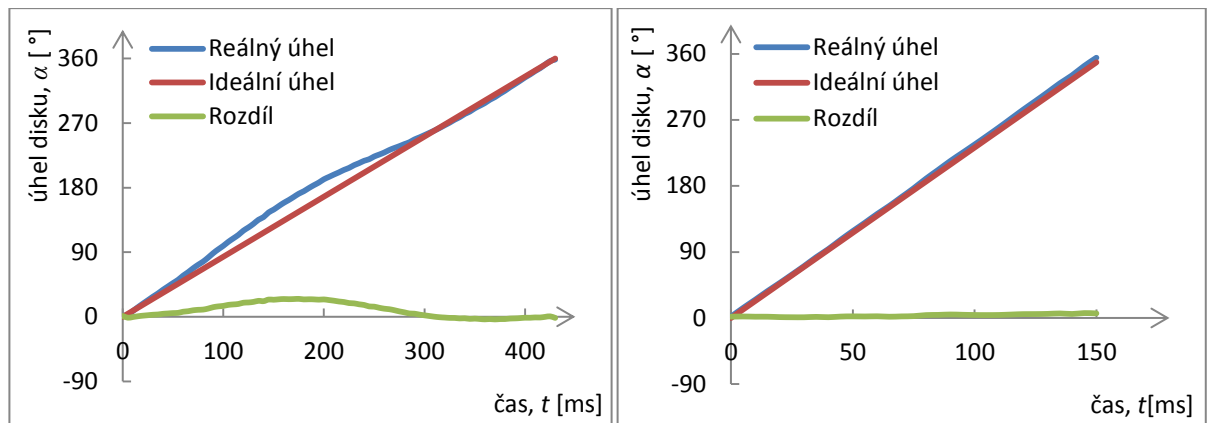


Obr. 3.3.6: Závislost časové odezvy na úhlové rychlosti

Prokládání těchto dat vyšlo velice podobné pro všechny tři závislosti - lineární, exponenciální i logaritmickou. Jejich koeficient spolehlivosti se vždy pohyboval kolem hodnoty 0.85.

3.3.2 Odchytky měření

Mezi nejvýznamnější vlivy, jež mohly ovlivnit naměřené hodnoty, spadá odchytky úhlu zapříčiněná nelineárním otáčením a odchytky úhlu a délky řetězce způsobená digitální kvalitou snímků a manuální identifikací řetězců v programu ImageJ.



Obr.3.3.7: Nelinearita úhlové rychlosti pro 150 ot/min vlevo a 400 ot/min vpravo

Odchylka nelineárního otáčení klesala s rostoucími otáčkami, jak je patrné z Obr.3.3.7. Pro nejnižší otáčky 150 ot/min činila odchylka $\pm 3.98\%$ z úhlu natočení a pro nejvyšší otáčky 400 ot/min $\pm 0.93\%$ z úhlu natočení. Zdrojem této nepřesnosti se stal patrně DC motor, který se při nízkých otáčkách netočil rovnoměrně. Z toho důvodu je průměr sekundárního disku méně než poloviční oproti primárnímu, aby motor pracoval ve vyšších otáčkách. Mezi další jevy, které mohly mít podíl na této nepřesnosti, spadá napínání či možné prokluzování hnacího řemene, či nepřesnost vysoustruženého otvoru pro dutou hřídel.

Další vliv na výsledek měření lze přičítat také třecí síle mezi mikrořetězcí a plochou skla, na kterém se nalézal vzorek MR kapaliny. Tato síla působila proti směru otáčení magnetického pole. Lze předpokládat, že při mnohem vyšších otáčkách magnetického pole by zapříčinila pokles otáček řetězců, kdy by rozdílový úhel α_d pravidelně překračoval 360° , za předpokladu, že by dané otáčky stále ještě umožňovaly shlukování mikročástic do řetězců.

Mezi ostatní vlivy, mající již méně významný efekt na výsledky měření, patří nelineární rozložení siločar magnetického pole v místě pozorování. Siločáry se na pozorované ploše vždy pouze blíží přímce, jelikož jsou zakřiveny. S tím dále souvisí i pozorování ve středu magnetického pole. Se zaostřováním MR kapaliny mikroskopem se zároveň posouval střed pozorování v řádu desetin mm, což bylo nejvíce patrné při přehrávání videosekvencí v reálném čase. Řešením toho problému by bylo vyrobení vycentrované podstavy vždy pro konkrétní zaostření mikroskopu.

Závěr

V praktické části práce se podařilo navrhnout a zrealizovat experiment pro měření časové odezvy MR kapalin a to pro rotující magnetické pole. Na základě jeho výsledků se prokazatelně ukázala závislost časové odezvy na úhlové rychlosti a zároveň se vytvořil vztah pro úhel zpoždění a délku řetězce. V souvislosti s těmito výsledky se navrhnul a vytvořil také experiment pro měření doby zřetězení mikročástic a doby ustálení mikročástic MR kapaliny. Pokusy se však neprováděly pro různé průběhy magnetické indukce. Měření časové odezvy probíhalo při konstantní hodnotě magnetické indukce a měření doby zřetězení pro skokový náběh magnetické indukce, což lze přirovnat k přivedení impulsu. Překážkou pro realizaci měření časové odezvy pro různě se periodicky opakující průběhy magnetické indukce pak tvořila zbytková remanence železného jádra elektromagnetu.

Získané časy odezvy MR kapaliny mohou posloužit jako limitní hodnoty pro odhad doby zpoždění u aplikací, ve kterých kapalina protéká nebo je vystavena vzájemně pootočeným magnetickým polím a především pak jsou určeny pro zařízení, kde se přímo využívá rotujícího magnetické pole. Naměřené časy dob zřetězení lze použít k předpřipravení MR kapaliny, kdy se před začátkem provozu samotného zařízení do elektromagnetického obvodu vpustí impuls o dané době a tak dojde k předzřetězení mikročástic. To zapříčiní maximální efektivnost MR zařízení po celou dobu provozu.

Tato práce slouží jako podklad k dalšímu studiu časové odezvy MR kapalin. Mezi další možnosti jak lépe pochopit chování časové odezvy, je zkoumat ji na konkrétních režimech/zařízeních, například na jednoduchém kanálu v průtokovém režimu. Další směr, kterým se studium může ubírat, tvoří zjištění vlivu koncentrace částic v nosné kapalině na dobu časové odezvy MR kapalin.

V současné době se časová odezva MR technických aplikací pohybuje pod hodnotou 20 ms, i přesto se jedná o dosud nejrychleji reagující mechanická zařízení. Do budoucna bude tato technologie nacházet stále širší uplatnění a dojde i k rozšíření oboru o inteligentní pevné materiály - MR elastomery.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] Dynamics Research Group: What is a smart fluid?. *The University of Sheffield* [online]. 2015 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <https://www.sheffield.ac.uk/drg/smart>
- [2] ODENBACH, Stefan. *Ferrofluids: magnetically controllable fluids and their applications*. New York: Springer, c2002, xi, 251 p. ISBN 35-404-3978-1.
- [3] MAYER, D. *Magnetické kapaliny a jejich použití (2. Část - dokončení)*. *Elektro*. 2007, roč. 17, č. 4, s. 4-8.
- [4] GENÇ, Seval. *SYNTHESIS AND PROPERTIES OF MAGNETORHEOLOGICAL (MR) FLUIDS* [online]. Pittsburgh, 2002 [cit. 2015-03-03]. Dostupné z: <http://d-scholarship.pitt.edu/8924/1/genc12-20.pdf>. Disertační práce. University of Pittsburgh.
- [5] LORD. *LORD MR Products* [online]. 2014 [cit. 2015-03-04]. Dostupné z: <http://www.lordmrstore.com/lord-mr-products/>
- [6] ODENBACH, Stefan. *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin: Springer, c2002, x, 151 p. Lecture notes in physics. ISBN 35-404-3068-7.
- [7] ENGLER, H., A. LANGE, D. BORIN a S. ODENBACH. Hindrance of thermomagnetic convection by the magnetoviscous effect. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* [online]. 2013, s. 499-504 [cit. 2015-03-05]. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.10.049. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931012008150>
- [8] NGUYEN, Quoc-Hung a Seung-Bok CHOI. Optimal Design Methodology of Magnetorheological Fluid Based Mechanisms. In: *Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges* [online]. InTech, 2012-10-17 [cit. 2015-03-15]. ISBN 978-953-51-0798-9. DOI: 10.5772/51078. Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.5772/51078>
- [9] Working modes of magnetorheological fluid. *Actives Structures Laboratory* [online]. 2011 [cit. 2015-03-09]. Dostupné z: http://scmero.ulb.ac.be/project.php?id=9&page=MR_modes.html
- [10] JOLLY, Mark R., Jonathan W. BENDER a J. David CARLSON. Properties and applications of commercial magnetorheological fluids. In: [online]. s. 262-275 [cit. 2015-03-09]. DOI: 10.1117/12.310690. Dostupné z: <http://www.coe.montana.edu/me/faculty/jenkins/Smart%20Structures/prop%20MRF.pdf>
- [11] LIU, Ying Dan, Yong Hui LI, Chul Sung KIM a Hyoung Jin CHOI. Submicron Magnetic Particles of $Mn_{0.25}Fe_{2.75}O_4$ and Their Magnetorheological Characteristics. In: *IEEE Transactions on Magnetics* [online]. 2013, s. 3406-3409 [cit. 2015-03-30]. DOI: 10.1109/tmag.2013.2247981. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6559207>
- [12] CHARLES, Stuart W. *The Preparation of Magnetic Fluids*. Bangor, Velká Británie, 2002. Dostupné z:

- http://pages.csam.montclair.edu/~yecko/ferro/papers/LNP594_Odenbach_Ferrofluids/Charles_Prep.pdf. Materiálová studie. University of Wales.
- [13] FENG, Zhou, Luo YIPING a Ren HONGJUAN. Study of sedimentation stability of magnetorheological fluid. *Advances in materials* [online]. 2015, No. 1 [cit. 2015-03-30]. DOI: 10.11648/j.am.20150401.11. Dostupné z: <http://article.sciencepublishinggroup.com/pdf/10.11648.j.am.20150401.11.pdf>
- [14] Amfifilní molekula. *Vydavatelství VSCHT* [online]. 2012 [cit. 2015-03-30]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/amfifilni_molekula.html
- [15] TURCZYN, R. a M. KCIUK. Preparation and study of model magnetorheological fluids. In: *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* [online]. Gliwice, Poland: International OCSCO World Press, 2008 [cit. 2015-03-30]. ISSN 1734-8412. Dostupné z: http://www.journalamme.org/papers_vol27_2/2724.pdf
- [16] RODRIGUEZ-ARCO, Laura, Ana GOMEZ-RAMIREZ, Juan D.G. a Modesto T. New Perspectives for Magnetic Fluid-Based Devices Using Novel Ionic Liquids as Carriers. In: *Smart Actuation and Sensing Systems - Recent Advances and Future Challenges* [online]. InTech, 2012-10-17 [cit. 2015-03-16]. ISBN 978-953-51-0798-9. DOI: 10.5772/51398. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/smart-actuation-and-sensing-systems-recent-advances-and-future-challenges/new-perspectives-for-magnetic-fluid-based-devices-using-novel-ionic-liquids-as-carriers>
- [17] GONCALVES, F. D. a J. D. CARLSON. *Characterizing the Behavior of Magnetorheological Fluids at High Velocities and High Shear Rates*. Blacksburg, 2005. ISBN 10.1142/9789812702197_0061. Dostupné z: http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02072005-185842/unrestricted/Goncalves_ETD.pdf. Disertační práce. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [18] Lord MR store: Frequently Asked Questions. *LORD. Mid-Atlantic Rubber - MAGNETO-RHEOLOGICAL (MR) STORE* [online]. 2014 [cit. 2015-03-28]. Dostupné z: <http://www.lordmrstore.com/faq>
- [19] JANOCHA, Hartmut. *Adaptronics and smart structures basics, materials, design, and applications*. 2nd, rev. ed. Berlin: Springer, 2007. ISBN 35-407-1967-9.
- [20] SAHIN, Huseyin. *Theoretical and Experimental Studies of Magnetorheological (MR) Fluids and MR Greases/gels: From Rheology to System Application*. Reno: ProQuest, 2008. ISBN 9780549946991.
- [21] SPENCER, B. F., G. YANG, J. D. CARLSON a M. K. SAIN. "Smart" Dampers for Seismic Protection of Structures: A Full-Scale Study [online]. Kyoto, 1998 [cit. 2014-12-06]. Dostupné z: <http://sstl.cee.illinois.edu/papers/BMRD-2WCSC.pdf>
- [22] How Smart Structures Will Work. BONSOR, Kevin. *HowStuffWorks* [online]. 2001 [cit. 2014-10-26]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/engineering/structural/smart-structure.htm>

- [23] SPENCER, B.F. *Autoadaptive Control Systems for Civil Infrastructure Applications*. 2000. Dostupné z: <http://www.ce.utexas.edu/prof/rathje/autoadaptive/presentations/spencer.pdf>
- [24] YANG, Guangqiang. *LARGE-SCALE MAGNETORHEOLOGICAL FLUID DAMPER FOR VIBRATION MITIGATION: MODELING, TESTING AND CONTROL*. Patna, 2001. Dostupné z: http://sstl.cee.illinois.edu/papers/gyang2_thesis.pdf. Disertační práce. The University of Notre Dame.
- [25] How Biomechanics Works. FREUDENRICH, Craig. *HowStuffWorks* [online]. 2007 [cit. 2014-12-09]. Dostupné z: <http://science.howstuffworks.com/biomechanics.htm>
- [26] CHEN, J. a W. LIAO. *Design and Testing of Assistive Knee Brace with Magnetorheological Actuator*. Bankok: I E E E, 2009. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4913055>. The Chinese University of Hong Kong.
- [27] FURUSHO, J., T. KIKUCHI, M. TOKUDA, T. KAKEHASHI, K. IKEDA, S. MORIMOTO, Y. HASHIMOTO, H. TOMIYAMA, A. NAKAGAWA a Y. AKAZAWA. *Development of Shear Type Compact MR Brake for the Intelligent Ankle-Foot Orthosis and Its Control* [online]. 2007 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4428411>
- [28] GUÐMUNDSSON, Ketill Heiðar. *Design of a Magnetorheological Fluid for an MR Prosthetic Knee Actuator with an Optimal Geometry* [online]. Island, 2011 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: <http://skemman.is/stream/get/1946/10137/25284/2/Thesis.pdf>. Disertační práce. University of Iceland.
- [29] CARLSON, J. D. *Magnetorheological fluids – ready for real-time motion control* [online]. North Carolina: Lord Corporation, 2000 [cit. 2015-04-05]. Dostupné z: http://sstl.cee.illinois.edu/Beijing_Symposium/p-38/III-3.Carlson.pdf
- [30] ROZENBERG, Jaromír. *Magnetoreologické tlumiče*. Plzeň, 2011. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=32048>. Dizertační práce. Západočeská univerzita v Plzni.
- [31] ELAHINIA, Mohammad, Constantin CIOCANEL, The M. NGUYEN a Shuo WANG. MR- and ER-Based Semiactive Engine Mounts: A Review. In: *Smart Materials Research* [online]. 2013, s. 1-21 [cit. 2015-04-06]. ISSN 2090-3561. DOI: 10.1155/2013/831017. Dostupné z: <http://www.hindawi.com/journals/smr/2013/831017/>
- [32] MARANNANO, G. V., G. VIRZÌ MARIOTTI a Č. DUBOKA. Preliminary design of a magnetorheological brake for automotive use. In: VIRZÌ MARIOTTI. *Science and motor vehicles* [online]. 2011 [cit. 2015-04-06]. Dostupné z: http://www.academia.edu/5979536/Preliminary_design_of_a_magnetorheological_brake_for_automotive_use
- [33] BUCCHI, F., P. FORTE a F. FRENDI. A magnetorheological clutch for efficient automotive auxiliary device actuation. In: *The Italian research on smart materials and*

- MEMS* [online]. 2013 [cit. 2015-04-06]. DOI: 10.3221/IGF-ESIS.23.07. Dostupné z: http://www.gruppofrattura.it/pdf/rivista/numero23/numero_23_art_7.pdf
- [34] JEDRYCZKA, Cezary. Adjustable permanent magnet magnetorheological clutch for reducing surges during startup of asynchronous motors. In: DOLEŽEL, Ivo. *XXIII Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits: July 2-4, 2014, Pilsen, Czech Republic : proceedings*. 1st ed. Poznaň: PTETiS Publishers, 2014, s. 63-64. ISBN 978-83-62712-00-7.
- [35] WANG, J a G MENG. Magnetorheological fluid devices: principles, characteristics and applications in mechanical engineering. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*[online]. 2001, vol. 215, issue 3, s. 165-174 [cit. 2015-04-05]. DOI: 10.1243/1464420011545012. Dostupné z: https://community.dur.ac.uk/ian.terry/teaching/Level4Projects/Proc_Inst_Mech_Eng_L215_165.pdf
- [36] LAŠTOVIČKA, Jakub. *Magneto-viskózní a teplotně-viskózní vlastnosti magnetických kapalin*. Plzeň, 2014. Dostupné z: <https://portal.zcu.cz/StagPortletsJSR168/KvalifPraceDownloadServlet?typ=1&adipidno=58657>. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni.

Přílohy

Příloha A Seznam použitých přístrojů

Tab.1: Označení použitých přístrojů použitých při experimentech

Přístroj	Inventární číslo	Sériové číslo
Multimetr BST BS3703	-	ET2370269
Notebook DELL Precision M4300	192479	DTCLT3J
Okulární kamera DinoEye AM-423U	-	0A2743
Optický mikroskop	201257	-
Ruční demagnetizér WALMAG HD 2	-	5421
Ruční teslametr Elimag MP-1 s Halloovou sondou	500665	33MP106
Stejnoseměrný zdroj napětí STATRON Typ 2225.9	-	707003
Tachometr AMPROBE TACH20	202585	-
VR kamera Basler acA2000-340km	213992	21333022

Příloha B práce s vysokorychlostní kamerou

První testovaná kamera, která se měla využít k pozorování MR kapalin, nese označení DinoEye. Jedná se o okulární kameru, se kterou se nahrazuje okluzor mikroskopu, a tak k němu dokonale přiléhá. Její další výhodou tvoří pořizování barevných snímků. Avšak pro záznam videosekvence, jež by zároveň sloužila jako časová osa, je naprosto nevyhovující. Její teoretická snímkovací frekvence se udává 15 fps, tu ale tvoří i duplicitní snímky, reálná snímkovací frekvence se po odečtení duplicit pohybovala mezi 9 fps až 11 fps. Tato frekvence je nedostačující a navíc jednotlivé snímky od sebe nejsou vzdáleny o stejný časový interval.

Druhou možností, jak sledovat MR kapalinu, bylo použití VR kamery Basler. Na rozdíl od DinoEye tato kamera není přizpůsobena k přímému pozorování v mikroskopu. Proto byla pomocí stativu umístěna těsně před okluzor do stejné pozice, jakou zaujímá lidské oko při pozorování. Řadou pokusů se ověřilo, že světlo kolem rozhraní VR kamera - mikroskop, nijak neovlivňuje kvalitu záznamu, a proto nebylo potřeba vytvářet žádnou clonu. VR kamera umožnila nahrávat černobílou videosekvenci o pevné snímkovací frekvenci 200 fps. Ovládání kamery zprostředkoval program StreamPix. Nastavení programu pro ideální záznam obsahuje Tab. 2.

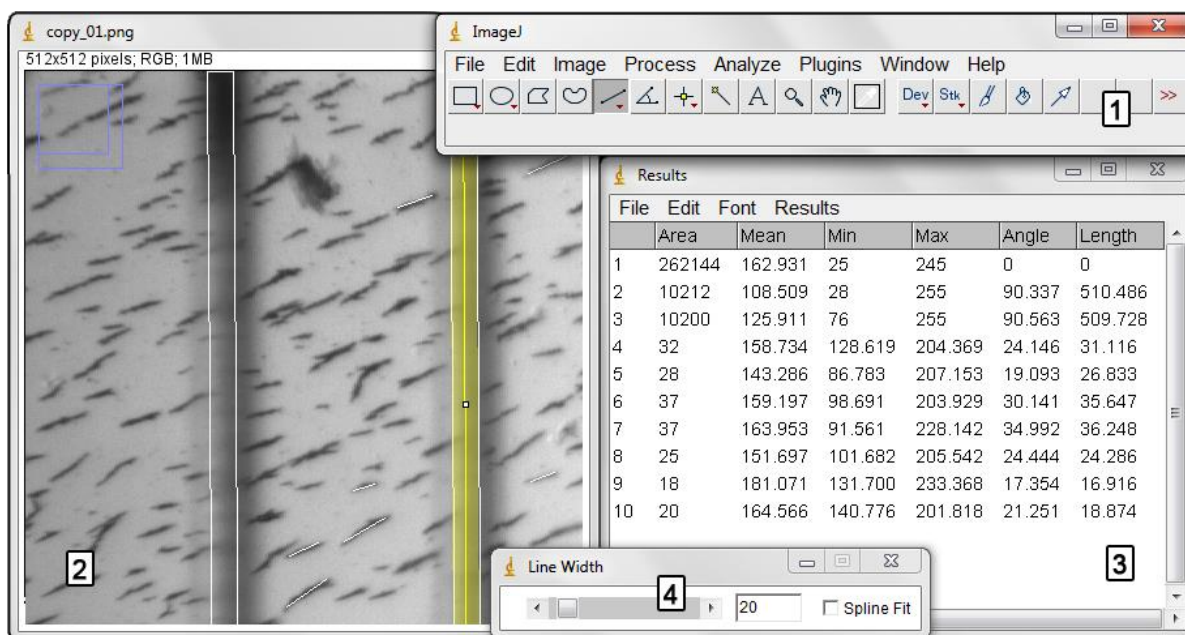
Tab. 2: Nastavení parametrů VR kamery pro záznam MR kapaliny v programu StreamPix

Vlastnost	Hodnota
Gain Auto	Off
Gain (Raw)	50
Exposure Auto	Off
Exposure Time [μ s]	2500
Enable Frame Rate [fps]	200
Trigger Mode	Off
X Offset/Y Offset/Width/Height [px]	0/0/1024/1024
Image Rotation	-90 °

Příloha C získávání dat pomocí programu VirtualDubMOD a ImageJ

Pro extrahování snímků z videosekvencí byl použit program VirtualDubMOD, který umožňuje zpracovávat videozáznamy o vysokých datových tocích. V dané videosekvenci umožňuje vybrat přesný interval pro převod snímků do .PNG souborů.

Rozbor snímků pak probíhal v Open Source programu ImageJ. Jedná se o vědecký nástroj, disponující řadou funkcí a zásuvných modulů sloužících pro analýzu obrazových souborů. Rozhraní programu zobrazuje Obr. 1.



Obr. 1: Uživatelské rozhraní programu ImageJ 1) panel s nástroji, 2) analýza fotografie, 3) tabulka s výsledky, 4) nastavení šířky čar

Program umožňuje měřit délky, úhly, vypočítávat plochy, zaznamenávat pozice, rozpoznávat hrany a oblasti, počítat logické operace mezi fotografiemi, zostřovat obraz, odečítat šum a další. Největší výhodou programu pro tuto diplomovou práci pak spočívala v ukládání získaných dat do souboru .XLS, což značně zrychlilo získávání dat¹.

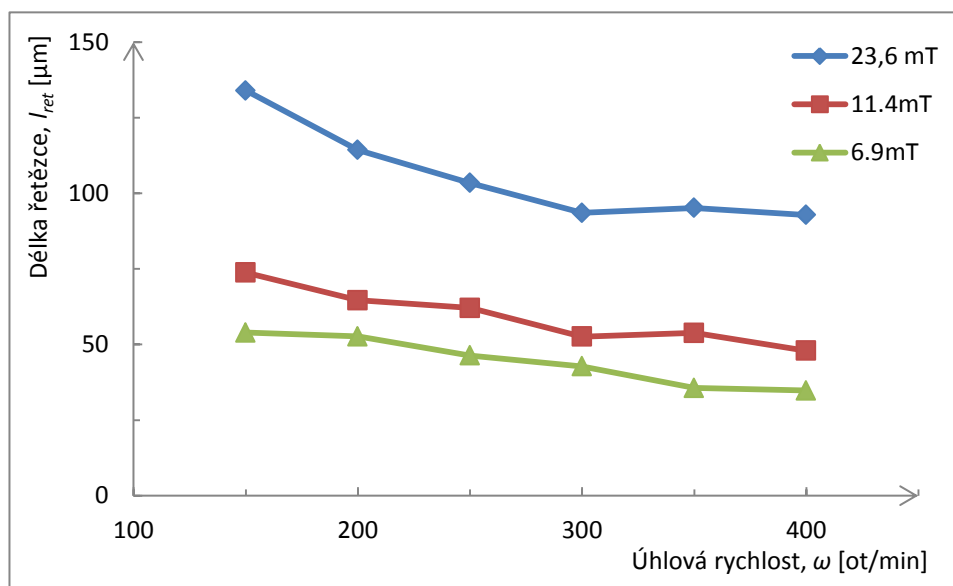
Pro co nejpřesnější výběr se řetězce označovaly při dvojnásobném přiblížení, v kombinaci s upraveným kurzorem, jehož zaměřování tvořil jeden černý pixel. Při měření úhlů vodících linek se pro větší přesnost nastavila šířka čáry na 20 px.

¹ ImageJ [online]. 1997 [cit. 2015-04-26]. Dostupné z: <http://imagej.nih.gov/ij/>

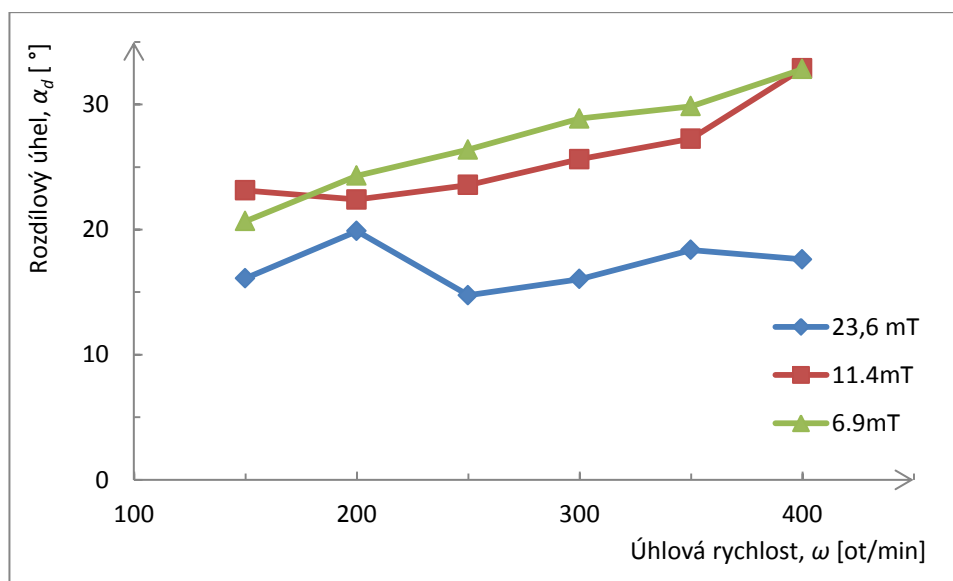
Příloha D Další výsledky

Tab. 3: Vypočítané průměrné hodnoty délek a rozdílových úhlů z jednotlivých videosekvencí

ω [ot/min]	$B = 23.6 \text{ mT}$		$B = 11.4 \text{ mT}$		$B = 6.9 \text{ mT}$	
	l_{ret} [μm]	α_d [$^\circ$]	l_{ret} [μm]	α_d [$^\circ$]	l_{ret} [μm]	α_d [$^\circ$]
150	133.9227	16.09997	73.7739	23.1279	53.9416	20.67068
200	114.2857	19.88448	64.60614	22.39389	52.6732	24.30022
250	103.4086	14.75485	62.07584	23.55646	46.37834	26.38164
300	93.50377	16.04043	52.6158	25.62032	42.76811	28.86454
350	95.12495	18.3721	53.83806	27.25726	35.63981	29.85482
400	92.79792	17.61133	47.95171	32.86917	34.77902	32.81596



Obr. 2: Klesající závislost délky řetězců na zvyšujících se otáčkách



Obr. 3: Rostoucí závislost rozdílového úhlu řetězců na zvyšujících se otáčkách