

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Elektromechanický systém se vzduchovou mezerou
vyplněnou ferrokapalinou**

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

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **František FERCZADI**
Osobní číslo: **E11B0194P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a telekomunikace**
Název tématu: **Elektromechanický systém se vzduchovou mezerou vyplněnou ferokapalinou**
Zadávající katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

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

1. Popište složení, vlastnosti a možné aplikace magnetických kapalin. Akcentujte ferokapaliny a jejich možné využití ke snížení reluktance magnetických obvodů.
2. Výpočtem ověřte vliv ferokapaliny na výstupy elektromechanického systému.
3. Experimentálně ověřte vliv kapaliny ve vzduchové mezeře vybraného elektromechanického zařízení.
4. Zhodnoťte možnosti této technologie.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 20 - 30 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Nethe, A, Scholz, T, Stahlmann, H.: Improving the efficiency of electric machines using ferrofluids, Journal of Physics Condensed Matter, No 18(38), pp. S2985-S2998, 2006.
2. Polcar, P., Mayer, D.: Design of a Stepper Transducer with Ferrofluid. Acta Technica, Institute of Thermomechanics AS CR, 2012, ISSN 0001-7043.57(4), pp. 421-433, 2012.
3. Polcar, P., Kropík, P., Ulrych, B.: Actuator with ferromagnetic plunger working in ferrofluidic liquid. Przegląd Elektrotechniczny, 88(7 B), 2012, s. 214-216.


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




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Anotace

Tato bakalářská práce se zabývá na tzv. ferokapaliny, jejich vlastnosti, strukturu a použití v praxi. Zaměřuje se na inovativní využití ferokapalin do vzduchové mezery elektromechanických systémů k zvýšení jejich účinnosti. Druhá část práce popisuje aplikaci této technologie na stykač, ten je simulován a následně experimentálně ověřen. V závěru práce je zhodnocena zkoumaná technologie a výstupy ferokapalinou modifikovaného stykače.

Klíčová slova

ferokapalina, magnetická kapalina, stykač, Agros 2D, Matlab r2010

Abstract

This bachelor thesis deals with ferrofluids, their properties, structure, manufacturing process and use in practice. It focuses on an innovative application of ferrofluids in the air gap of electromechanical systems to improve their efficiency. The second part describes the application of this technology in electrical contactor, it is simulated and experimentally verified. attempt to use Ferro-fluids on the properties of electromechanical systems. The investigated technology and modified switch are reviewed in the conclusion.

Key words

Ferrofluids, magnetic fluid, contactor, Agros 2D, Matlab r2010b

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Elektromechanický systém se vzduchovou mezerou vyplněnou ferokapalinou* vypracoval samostatně pod vedením Ing. Petrem Polcarem, Ph.D. a uvedl v ní všechny použité literární a jiné odborné zdroje v souladu s právními předpisy.

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

V Plzni dne 7.6.2015

Ferczadi František

.....

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval Ing. Petru Polcarovi, Ph.D za cenné rady, ochotu a trpělivost, s níž se mi věnoval během vzniku této práce.

OBSAH

| | |
|--|-----------|
| OBSAH | 9 |
| ÚVOD | 11 |
| SEZNAM POUŽITÝCH VELIČIN A ZKRATEK | 12 |
| 1 MAGNETICKÉ KAPALINY: | 13 |
| 1.1 SLOŽENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN | 14 |
| 1.1.1 Feromagnetické částice | 14 |
| 1.1.2 Nosná kapalina | 14 |
| 1.1.3 Detergent | 14 |
| 1.2 ROZDĚLENÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN..... | 15 |
| 1.2.1 Magnetoreologické kapaliny: | 15 |
| 1.2.2 Ferokapaliny:..... | 16 |
| 1.3 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN V PRAXI..... | 16 |
| 1.3.1 Magnetoreologický tlumič | 16 |
| 1.3.2 Magnetoreologické brzdy | 17 |
| 1.3.3 Aplikace ferokapalin v reproductorech | 18 |
| 1.3.4 Aplikace ferokapalin v lékařství | 19 |
| 1.3.4.1 Zachování zraku..... | 19 |
| 1.3.4.2 Kurýr..... | 19 |
| 1.3.4.3 Ferokapaliny a hypertermie..... | 19 |
| 1.4 SNÍŽENÍ RELUKTANCE MAGNETICKÝCH OBVODŮ S VYUŽITÍM FEROKAPALIN..... | 20 |
| 2 STYKAČE | 21 |
| 3 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI BP | 22 |
| 4 SIMULACE GENEROVANÝCH SIL V PROGRAMU AGROS 2D | 22 |
| 4.1 MAGNETICKÝ OBVOD STYKAČE BEZ FEROKAPALINY A S FEROKAPALINOU..... | 22 |
| 4.1.1 Simulace v programu Agros 2D..... | 24 |
| 4.1.2 Pozorování konvergence řešení | 25 |
| 4.1.3 Vykreslení intenzity magnetického pole stykače | 26 |
| 4.1.4 Výpočet síly působící na kotvu stykače | 27 |
| 4.1.5 Výpočet indukčnosti cívky..... | 28 |
| 5 SIMULACE DYNAMIKY STYKAČE V PROGRAMU MATLAB | 29 |
| 5.1 MATEMATICKÝ POPIS STYKAČE..... | 29 |
| 5.1.1 Elektrická rovnice:..... | 30 |
| 5.1.2 Mechanická rovnice:..... | 30 |
| 5.1.3 Postup při simulaci:..... | 31 |
| 6 PRAKTICKÁ ČÁST, OVĚŘENÍ SIMULACE MĚŘENÍM. | 33 |
| 6.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ | 34 |
| 6.2 MĚŘENÍ ZÁVISLOSTI DOBY SEPNUTÍ STYKAČE PŘI ZMĚNĚ BUDÍCÍHO NAPĚTÍ. | 34 |
| 6.3 MĚŘENÍ POTŘEBNÉHO VÝKONU K SEPNUTÍ STYKAČE S MĚNÍCÍ SE VZDUCHOVOU MEZEROU..... | 37 |
| 6.4 VLIV TEPLoty NA DOBU SEPNUTÍ | 38 |
| 6.5 CHLADÍCÍ VLASTNOST KAPALINY | 39 |
| 7 ZÁVĚR | 41 |

| | |
|--|-----------|
| 8 PŘÍLOHY | 42 |
| TAB. 8.1 MĚŘENÍ DOBY TSEP PŘI ZMĚNĚ BUDÍCIHO NAPĚTÍ BEZ FEROKAPALINY | 42 |
| TAB. 8.2 MĚŘENÍ DOBY TSEP PŘI ZMĚNĚ BUDÍCIHO NAPĚTÍ S FEROKAPALINY | 43 |
| TAB. 8.3 MĚŘENÍ POTŘEBNÉHO VÝKONU K SEPnutí STYKAČE BEZ FEROKAPALINY | 44 |
| TAB. 8.4 MĚŘENÍ POTŘEBNÉHO VÝKONU K SEPnutí STYKAČE S FEROKAPALINY | 45 |
| TAB. 8.5 ZÁVISLOST DOBY SEPnutí NA VELIKOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY BEZ FEROKAPALINY | 46 |
| TAB. 8.6 ZÁVISLOST DOBY SEPnutí NA VELIKOSTI VZDUCHOVÉ MEZERY S FEROKAPALINY .. | 46 |
| TAB. 8.7 TAŽNÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA KOTVU S FEROKAPALINOU | 47 |
| TAB. 8.8 TAŽNÁ SÍLA PŮSOBÍCÍ NA KOTVU BEZ FEROKAPALINOU | 47 |
| TAB. 8.9 ZAHŘÍVÁNÍ CÍVKY S FEROKAPALINOU | 48 |
| TAB. 8.10 ZAHŘÍVÁNÍ CÍVKY BEZ FEROKAPALINOU | 49 |
| TAB. 8.11 VLIV TEPLoty NA DOBU SEPnutí STYKAČE | 50 |
| TAB 8.12 POUŽITÉ MĚŘÍCÍ PŘÍSTROJE A ZDROJE: | 50 |
| 9 POUŽITÁ LITERATURA | 51 |

Úvod

Tato bakalářská práce se zabývá ferokapalinami a jejich uplatněním v elektromechanických aplikacích, konkrétně momentálně teoreticky zkoumanou možností zvýšení účinnosti elektromechanických systémů aplikací kapaliny do jejich vzduchové mezery. Tato technologie je zkoumána na stykači ponořeném do ferokapaliny. Cílem je zjistit, jaký vliv má ferokapalina na vlastnosti stykače po mechanické a elektrické stránce. Výstupy stykače jsou matematicky modelovány pomocí programů Agros 2D a Matlab r2010b, následně je proveden experiment na reálném stykači

Seznam použitých veličin a zkratk

- μ_{cu} – relativní permeabilita mědi [-]
 μ_{Fe} – relativní permeabilita železa [-]
 μ_{kap} – relativní permeabilita ferokapaliny [-]
 μ_{vz} – relativní permeabilita vzduchu [-]
 B – intenzita magnetického pole [T]
 D – činitel tlumení [$\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$]
 F – působící síla [N]
 H – intenzita magnetického pole [$\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$]
 I – proud procházející vodičem závitu [A]
 J – proudová hustota [$\text{A} \cdot \text{m}^{-2}$]
 K – tuhost pružiny [$\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$]
 L – indukčnost [H]
 L – indukčnost [H]
 M – hmotnost [kg]
 N – počet závitů [-]
 P – činný výkon [W]
 $R_{\text{př}}$ – předřadný odpor [Ω]
 S – průřez vodiče závitu [m^2]
 T – teplota [$^{\circ}\text{C}$]
 $T_{\text{cívky}}$ – pracovní teplota cívky [$^{\circ}\text{C}$]
 t_{rozep} – doba rozepnutí [s]
 t_{sep} – doba sepnutí [s]
 T_{δ} – teplota ve vzduchové mezeře [$^{\circ}\text{C}$]
 δ – velikost vzduchové mezery [m]
 Φ – magnetický tok [Wb]

AC ... střídavé

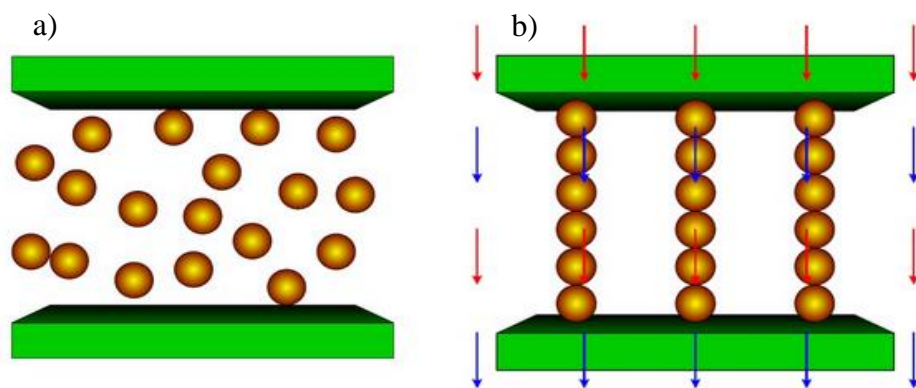
DC ... stejnosměrné

FK ... ferokapalina

MR ... magnetoreologický

1 Magnetické kapaliny:

Mezi magnetické kapaliny se řadí tzv. ferokapaliny a magnetoreologické kapaliny, které byly vyvinuty kolem 60 let dvacátého století v NASA. Používaly se zejména pro vědecké účely a v kosmickém průmyslu. Postupem času se magnetické kapaliny uplatnily i v jiných odvětvích. Jedná se o specifické kapaliny, jejichž vlastnosti jsou ovlivněny feromagnetickými (Feromagnetické látky jsou složeny z paramagnetických atomů v takovém uspořádání, že výrazně zesilují magnetické pole. Magnetické pole ve feromagnetické látce zůstává, i když vnější pole přestane působit. Jdou tedy trvale zmagnetizovat), nebo ferimagnetickými (značně zesilují magnetické pole, a jejich předností je, že ve srovnání s kovovými feromagnetickými materiály mají mnohem větší elektrický odpor) částicemi rozptýlenými v nosné kapalině. Každá nanočástice, která se vyskytuje ve ferokapalině, se chová jako permanentní magnet. Aby nedocházelo ke shlukování částic, musí se zamezit kontaktu mezi nimi. Z tohoto důvodu jsou nanočástice obaleny povrchově aktivní látkou, která vytváří kladně orientovaný elektrický náboj. Díky tomu se všechny nanočástice odpuzují. Tímto způsobem se eliminuje shlukování částic ve větší celky, které by pak nepříznivě ovlivnily vlastnosti kapaliny. Bez působení vnějšího magnetického pole jsou magnetické póly částic náhodně orientované a kapalina tak vykazuje nemagnetický charakter. Působí-li na magnetickou kapalinu vnější magnetické pole, jednotlivé částice se začnou polarizovat a natáčet ve směru magnetického pole. Tím se magnetická kapalina stává aktivní, neboli se začnou projevovat její magnetické vlastnosti [1].



Obrázek 1.1 a) Náhodné uspořádání částic v kapalině, bez působení mag. pole
 b) Uspořádání částic ve směru siločar, působícího vnějšího mag. pole [převzato z 4]

1.1 Složení magnetických kapalin

1.1.1 Feromagnetické částice

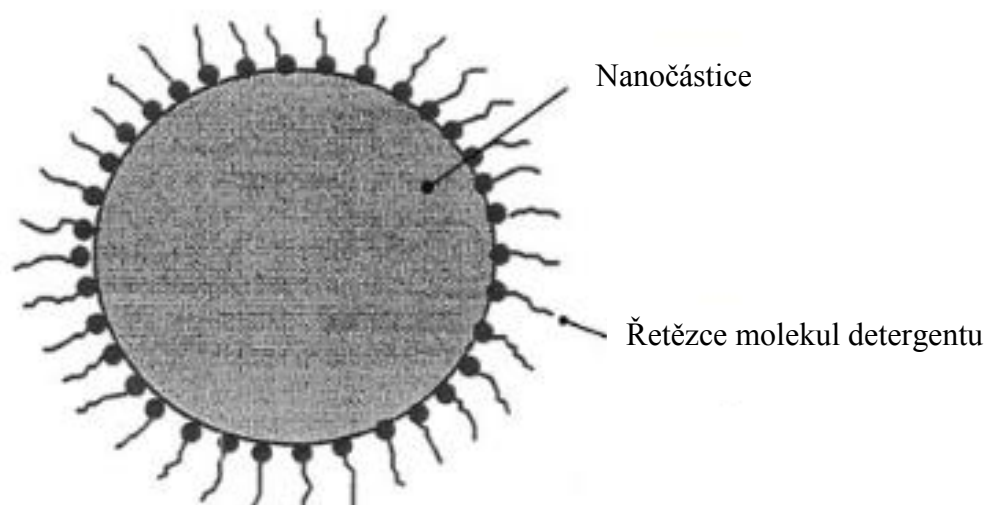
Magnetická kapalina obsahuje částice kovů. Bývají to zejména oxidy železa Fe_2O_3 a Fe_3O_4 , slitiny železa s kobaltem a samotné práškové železo. Dle velikosti částic dělíme magnetické kapaliny na tzv. ferokapaliny (částice velké jednotky až desítky nm) a magnetoreologické kapaliny (částice velké jednotky až desítky μm). Na částice jsou kladeny velké nároky z hlediska magnetizace, nízké koercivity a magnetické měkkosti.

1.1.2 Nosná kapalina

Nosnou kapalinu nebo tzv. médium tvoří syntetické, polysyntetické, silikonové a minerální oleje, voda a jiné látky. Typ nosné kapaliny se výrazně podílí na vlastnostech magnetické kapaliny, jak v aktivním (částice jsou vystaveny magnet. poli) tak neaktivním stavu, každá kapalina má jinou viskozitu a rozsah pracovních teplot.

1.1.3 Detergent

Detergent je tzv. polymerní (makromolekulární) obal, který zabraňuje přímému kontaktu mezi nanočásticemi. Díky tomu se částice se odpuzují. Detergent je tvořen dlouhými řetězci polárních molekul. Tento řetězec je z jedné strany pevně vázán (hydrofobní hlavou) k magnetické nanočástici a druhým koncem je přitahován nosným médiem. Řetězec bývá zpravidla dlouhý 1 až 2nm. [1]



Obrázek 1.2 Nanočástice obalená detergentem [převzato z 1]

1.2 Rozdělení magnetických kapalin

Magnetické kapaliny se dělí na dva druhy. Důležitým faktorem hraje poměr a velikost použitých částic.

1.2.1 *Magnetoreologické kapaliny:*

Magnetické kapaliny obsahují částice železa o velikosti několika mikronů, zpravidla okolo 5 μm . 70% z celkové hmotnosti tvoří mikročástice feromagnetik nebo ferimagnetik. Částice v kapalině nemohou být rozptýleny Brownovým pohybem díky svým rozměrům. Díky tomu vzniká problém s usazováním. Tento problém se řeší několika způsoby a to buď přidáním nanočástic do kapaliny, kdy nanočástice interferují s mikročásticemi, díky tomu jsou částice schopny vydržet déle ve své poloze, nebo také přidáním tixotropních aditiv do nosné kapaliny. Díky tomu se ale zvyšuje její viskozita [2].

Nosnou kapalinu tvoří podobně jako u ferokapalin oleje na bázi syntetiky. Díky velkému zastoupení částic má magnetoreologická kapalina mnohem větší viskozitu než například ferokapalina. Přiložením vnějšího magnetického pole se viskozita kapaliny velice rychle mění řádově $10^5 - 10^6$ krát. Tím ztratí svoji tekutost a „z tuhne“, to znamená, že disponují silným magnetoviskózním jevem, díky čemu jsou tyto kapaliny velmi využívány. Přestane-li působit na kapalinu vnější magnetické pole, viskozita kapaliny se vrátí do původního stavu [3].



Obrázek 1.3 *Magnetoreologická kapaliny vystavená magnetickému poli [převzato z 8]*

1.2.2 *Ferokapaliny:*

Ferokapaliny jsou složeny z částic o rozměrech jednotek až desítek nanometrů. Díky své hmotnosti jsou částice v kapalině rozptýleny Brownovým pohybem a tím nedochází k usazování částic jako u magnetoreologických kapalin. Aby nedocházelo ke shlukování, je do kapaliny přidán již zmíněný detergent. Díky detergentu se částice neshlukují, čímž nemohou utvářet větší celky, kvůli kterým by jejich hmotnost vzrostla, a částice by mohly začít sedimentovat.

Ferokapaliny jsou tvořeny 5 % pevných magnetických částic. 10 % objemu tvoří detergent a zbývajících 85 % nosná kapalina. Díky malému podílu částic nedochází vlivem magnetismu ke změně viskozity kapaliny.

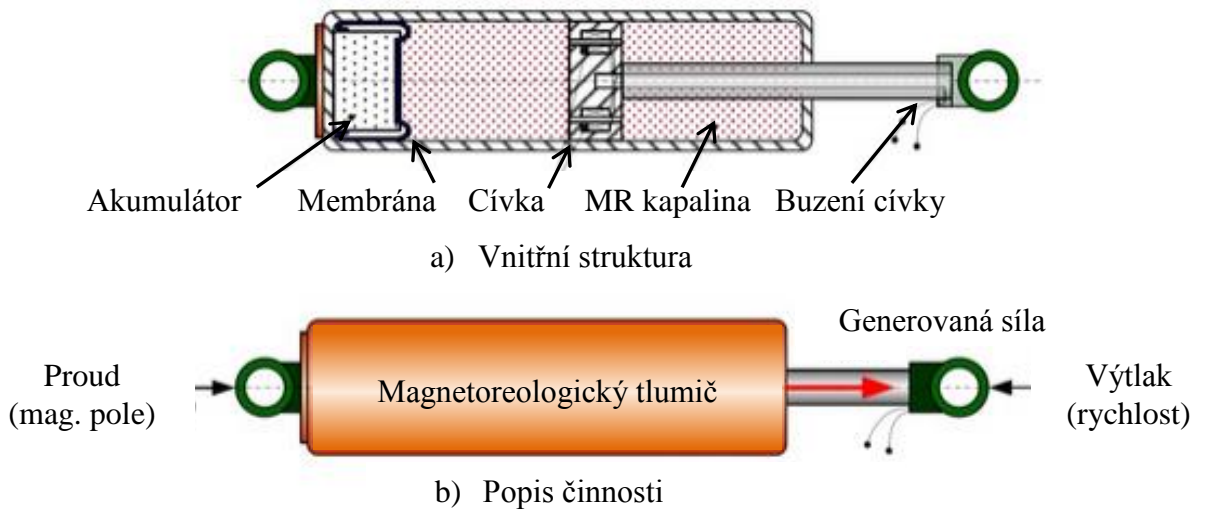
1.3 Využití magnetických kapalin v praxi

Zařízení využívající magnetické kapaliny jsou stále více populární, protože mají mnoho výhod. Nejdůležitějšími z nich jsou: snadné ovládání, nesofistikované konstrukce, životnost, nízká spotřeba energie, plynulé regulace momentu, rychlá reakce, snadná instalace (řídící signál je veden dvěma drátěnými kabely) a téměř lineární charakteristiky [1].

Magnetické kapaliny se používají v mnoha aplikacích, jako jsou: zavěšení vozidel, pneumatické pohony, tlumení vibrační systému, brzdy, tlumiče, protézy, posilovací stroje a mnoho dalších.

1.3.1 *Magnetoreologický tlumič*

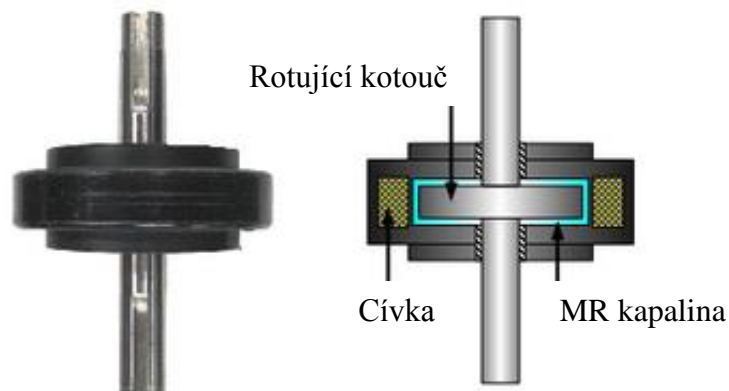
Typický MR tlumič zahrnuje pár drátů pro vybuzení kapaliny, pouzdro, píst, cívky, a akumulátor, jak je znázorněno na obrázku č. 4. MR kapalina je umístěna uvnitř válce. Při pohybu pístem kapalina protéká úzkým otvorem. Na pístu jsou umístěny cívky. Neprotéká-li cívkou proud, tlumič se chová standardním způsobem. Protéká-li cívkou proud, začne na MR kapalinu působit magnetické pole a tím dojde k tomu, že se kapalina změní z tekutého stavu do polotekutého stavu v řádu milisekund. Síla produkovaná MR kapalinou je závislá na magnetickém poli generovaném cívkou [4]. Díky tomu jsme schopni regulovat činnost tlumiče a tím reagovat na aktuální potřebu tlumení. Magnetoreologické tlumiče se používají například v automobilovém průmyslu.



Obrázek 1.4 a) Vnitřní struktura MR tlumiče b) Princip činnosti [převzato 4]

1.3.2 Magnetoreologické brzdy

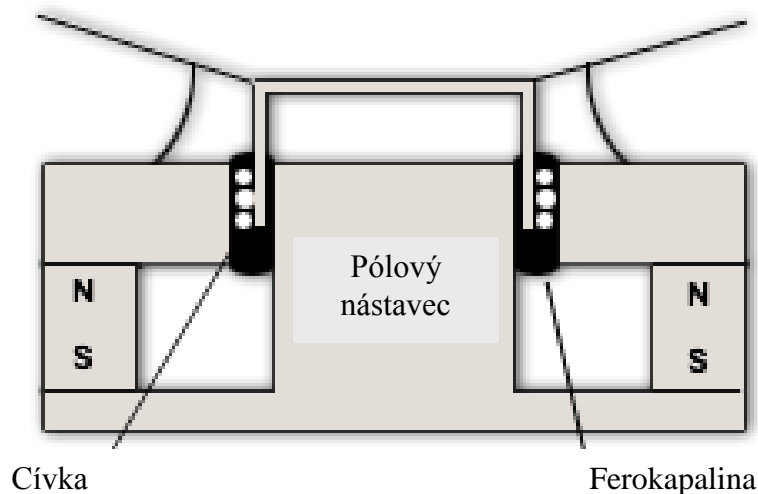
MR kapalina je umístěna na rotující hřídeli s pláštěm. V neaktivním stavu klade minimální mechanický odpor. Přivede-li se do cívek proud, začne na kapalinu působit magnetické pole vyvolané cívkou a kapalina mění svojí viskozitu. Díky tomu vzroste brzdný moment kladený na rotující hřídel s kotoučem a poklesnou otáčky. MR brzdy se používají v mnoha odvětvích, například v automobilovém průmyslu [5].



Obrázek 1.5 Princip magnetoreologické brzdy [převzato z 5]

1.3.3 *Aplikace ferokapalin v reproduktorech*

Použití ferokapalin v reproduktorech zajišťuje efektivnější funkčnost, lepší zvukovou odezvu a vyšší výkon. Všechny reproduktorové ferokapaliny jsou vyráběny z vysoce kvalitních syntetických olejů. Použité ferokapaliny jsou v širokém rozsahu viskozity a magnetizace. Použité oleje mají velmi nízkou těkavost a vysokou tepelnou stabilitu. Ferokapalinu drží ve vzduchové mezeře velmi silné elektrické pole. Kapalina velmi dobře odvádí teplo, velká část energie, která je do reproduktoru přivedena, je převedena právě na toto teplo, které kapalina absorbuje a díky tomu ochladí daný systém. Hromadění tepla uvnitř kmitací cívky může vést v konečném důsledku až ke zničení reproduktoru. Ponoří-li se cívka do ferokapaliny, dochází k odvodu tepla a k chlazení celého systému. Navíc nedochází k volnému kmitání cívky ve vzduchu, ale v kapalině. Díky tomu se sníží akustické vibrace a zvýší kvalita zvuku. Tím roste účinnost reproduktoru a předchází se jeho selhání. [6].



Obrázek 1.6 *Aplikace ferokapaliny v reproduktorech [převzato z 6]*

1.3.4 *Aplikace ferokapalin v lékařství*

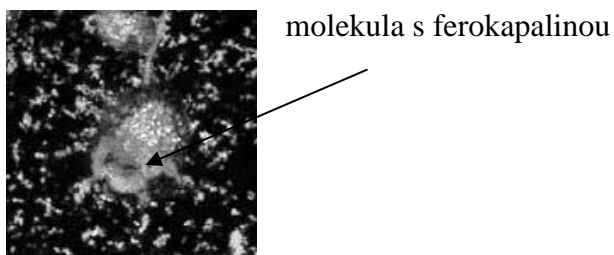
Ferokapaliny stále častěji nalézají využití i v lékařství. Zdravotníci se obracejí na magnetické kapaliny při nejrůznějších, zejména léčebných, úkonech.

1.3.4.1 *Zachování zraku*

U pacientů, kteří mají poškozenou sítnici, může být zabráněno slepotě. Sítnice je velmi tenká fotorezistivní tkáň. Pokud je nějakým způsobem ovlivněna v důsledku traumatu, stáří nebo nemoci, kvalita zraku slábne a člověk může až oslepnout. Pro zachování zraku se obvykle používají silikonové kapaliny pro navrácení sítnice zpět na své místo, nyní to jde ale i za použití ferokapalin. Tato metoda je mnohem přesnější, protože pohyb tekutiny je řízen vnějším magnetickým polem[7].

1.3.4.2 *Kurýr*

Nefarmální farmakoterapie je stále více a více populární díky magnetickému kurýru. Magnetická částice je připojena k molekule a ta stříknuta do lidského těla. Používají se pro dodání léků na určité místo v lidském těle pomocí vnějšího magnetického pole[7].



Obrázek 1.7 Molekula s ferokapalinou [převzato z 7]

1.3.4.3 *Ferokapaliny a hypertermie*

Hypertermie se používá převážně k léčení maligního nádoru mozku. Princip spočívá v tom, že kapalina obsahující částice železa se vstříkne do nádorové tkáně v anestezii. Nádorové buňky jsou citlivé na teplo. Ferokapalina se vnějším magnetickým polem zahřeje na teplotu až kolem 45°C, čímž dojde k rozpadu nádorových buněk. Vyšší teplota také usnadňuje proces regenerace. Ferokapaliny na bázi hypertermie byly zkoumány přes 12 let a úspěšně testovány na zvířatech [7].

1.4 Snížení reluktance magnetických obvodů s využitím ferokapalin

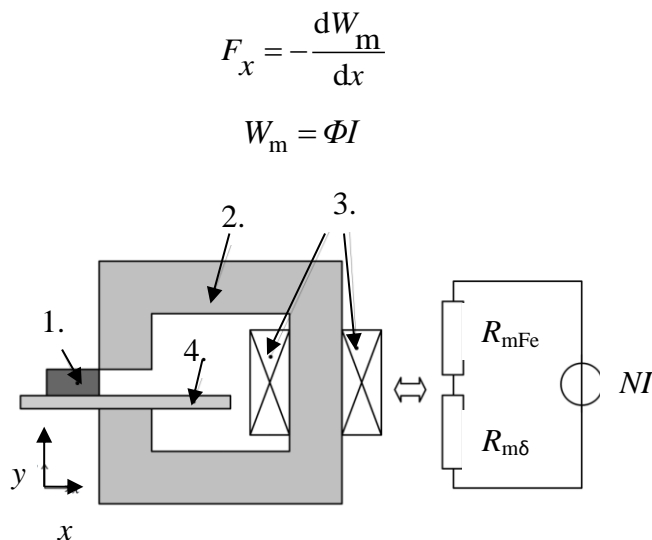
Využití ferokapalin pro snížení reluktance magnetického obvodu je poměrně mladá záležitost, která se ještě téměř nikde prakticky nevyužívá. Výzkum v současné době probíhá v německém Cottbusu a na půdě západočeské univerzity. Ferokapalina svými vlastnosti dokáže zvýšit silové působení magnetického pole. Tento jev zkoumal například Ing. Petr Polcar, Ph.D ve své dizertační práci, kde zjišťoval chování transduktoru za použití ferokapaliny ve vzduchové mezeře.

Transduktor je elektromechanické zařízení, které ke své činnosti využívá magnetické pole. Působí-li na transduktor dostatečně velké magnetické pole, dojde k vtažení pohyblivé části. Vyplní-li se vzduchová mezera ferokapalinou o permeabilitě $>$ permeabilita vzduchu, dojde k celkovému poklesu magnetické reluktance obvodu, kde

$$R_{m1} = \frac{l_1}{\mu_1 S}$$

$$R_{m2} = \frac{l_2}{\mu_2 S} = f\left(\frac{1}{\mu_2}\right)$$

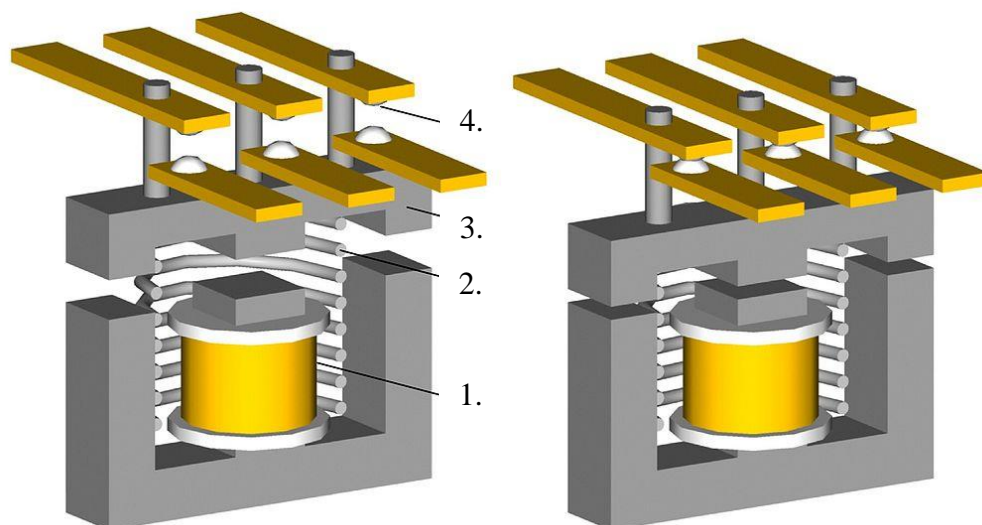
Snížením magnetické reluktance dojde ke zvýšení magnetického toku, díky kterému vzroste i síla působící na pohyblivou část transduktoru [8].



Obrázek 1.8 *Elektromechanický transduktor a jeho náhradní magnetický obvod; 1 - pohyblivá část, 2 - magnetický obvod, 3 - budící vinutí, 4 - vzduchová mezera mezi pevnou a pohyblivou částí, lze ji vyplnit ferokapalinou [převzato z 8]*

2 Stykače

Stykač je elektromechanické zařízení, které ke své činnosti využívá magnetické pole. Skládá se z cívky, železného jádra, pevných a pohyblivých kontaktů. Přivede-li se do cívky proud, začne vznikat magnetické pole, které přitáhne kotvu magnetického obvodu. Kotva je spojena se spínacími kontakty. Přitažením kotvy dojde k vodivému propojení mezi pohyblivými a pevnými kontakty a tím dojde k vodivému propojení. Právě stykač byl vybrán pro aplikaci a ověření technologie popsané v kapitole 1.4.



Obrázek 2.1 *Vnitřní struktura stykače [9]*

1. Cívka
2. Pružina
3. Kotva
4. Pohyblivé kontakty

3 Úvod do praktické části BP

Cílem praktické části této bakalářské práce je zjistit, jaké bude mít použitá ferokapalina vliv na vlastnosti stykače. Jak bylo popsáno v kapitole 2, stykač se skládá z pohyblivé části (kotvy) a z nepohyblivé části. Rychlost, jakou bude kotva přitažena, závisí na velikosti magnetické indukce generující magnetické síly. Ta roste s poklesem magnetické reluktance. Vyplní-li se vzduchová mezera ferokapalinou, která bude mít relativní permeabilitu $\mu_{\text{kap}} > 1$, dojde k poklesu celkové reluktance v obvodu a tím ke zvýšení tažné síly.

4 Simulace generovaných sil v programu Agros 2D

Pro simulaci byl použit program Agros 2D [10]. Jedná se o program, který disponuje uživatelským rozhraním, díky kterému jsme schopni vytvořit jakýkoliv geometrický 2D model. Program je založen na knihovně Hermes, která obsahuje nejmodernější numerické algoritmy pro monolitické a plně adaptivní řešení soustav obecně nelineárních a nestacionárních parciálních diferenciálních rovnic [11]. Naším cílem je získat hodnoty sil působících na pohyblivou část stykače z výsledků simulace magnetického pole. Pro správnou simulaci magnetického pole je zapotřebí znát geometrii problému, materiálové vlastnosti použitých součástí a okrajové podmínky.

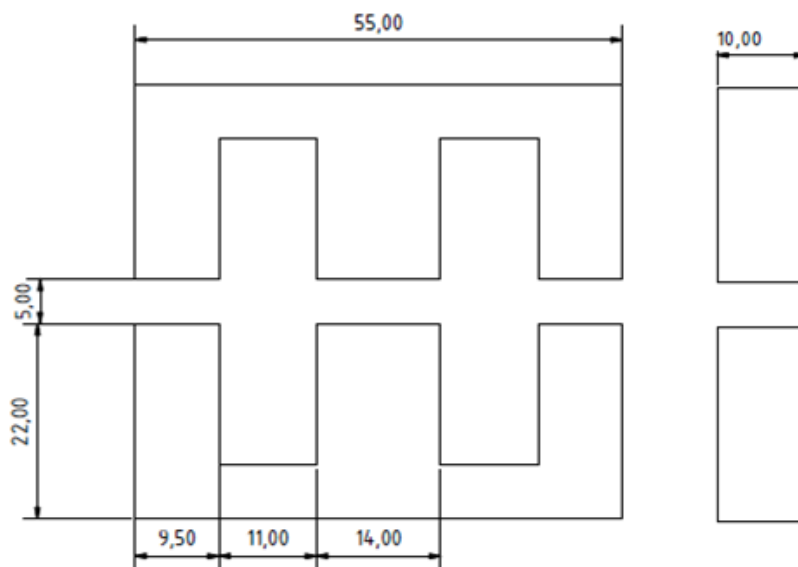
4.1 Magnetický obvod stykače bez ferokapaliny a s ferokapalinou

Magnetický obvod stykače je vyroben z feromagnetických listěných plechů, kvůli eliminaci ztrát vířivými proudy. Relativní permeabilita železa byla zvolena 1000. Proudová hustota byla zvolena $5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$, tato proudová hustota odpovídá maximálnímu proudu, který může vodičem protékat. Cívka je navinuta z měděného vodiče o $\mu_{\text{cu}} = 0,9999$. Okolní prostředí tvoří vzduch s relativní permeabilitou $\mu_{\text{vz}} = 1$.

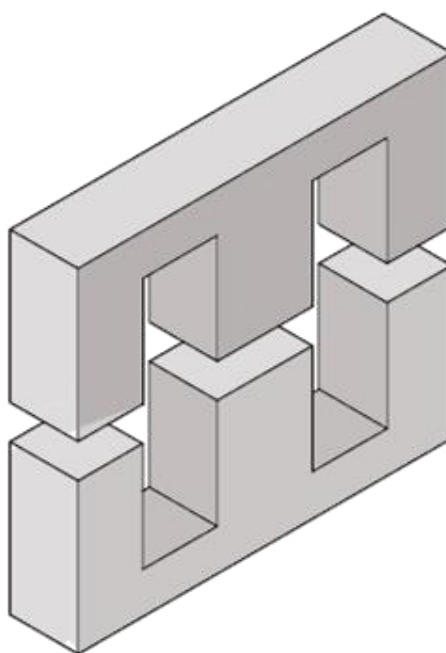
Obecně je možné volit mezi Dirichletovou podmínkou (okrajová podmínka 1. druhu, na hranici je známa hodnota potenciálu) a Neumannovou podmínkou (okrajová podmínka 2. druhu, na hranici je známa hodnota derivace potenciálu podle vnější normály) nebo smíšenou okrajovou podmínkou (tj. jejich vzájemnou kombinací) Hranice použité definiční oblasti je siločárou a platí na ní tedy Dirichletova okrajová podmínka [12].

Je-li obvod vybuzen, dojde k přitažení kotvy a k uzavření magnetického toku obvodem. Simulací tedy určíme sílu, která na kotvu působí ve vertikálním směru neboli sílu F v ose y .

Totéž uděláme pro obvod s ferokapalinou, kde $\mu_{\text{kap}} = 2$.



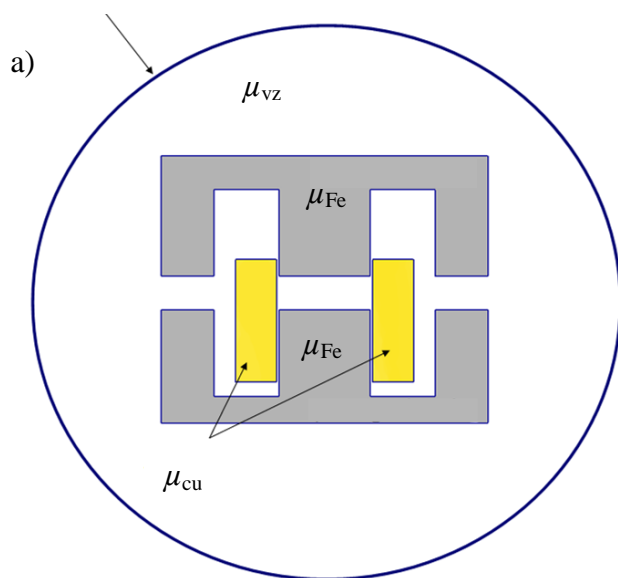
Obrázek 4.1 Geometrické rozměry magnetického obvodu jádra stykač



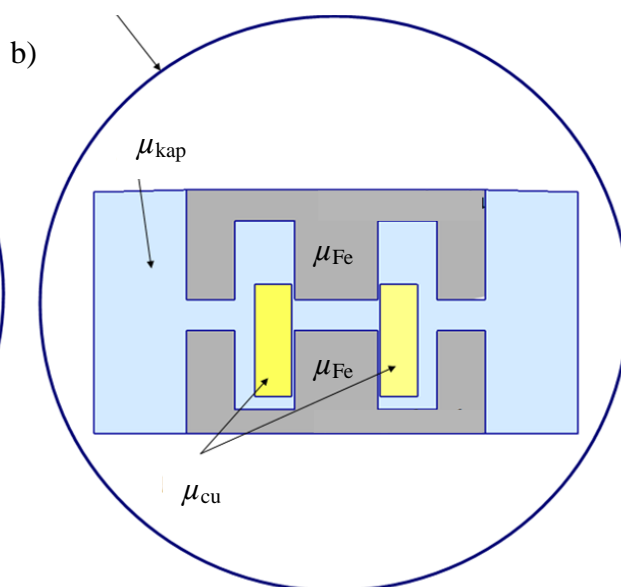
Obrázek 4.2 3D model magnetického obvodu jádra stykače

4.1.1 Simulace v programu Agros 2D

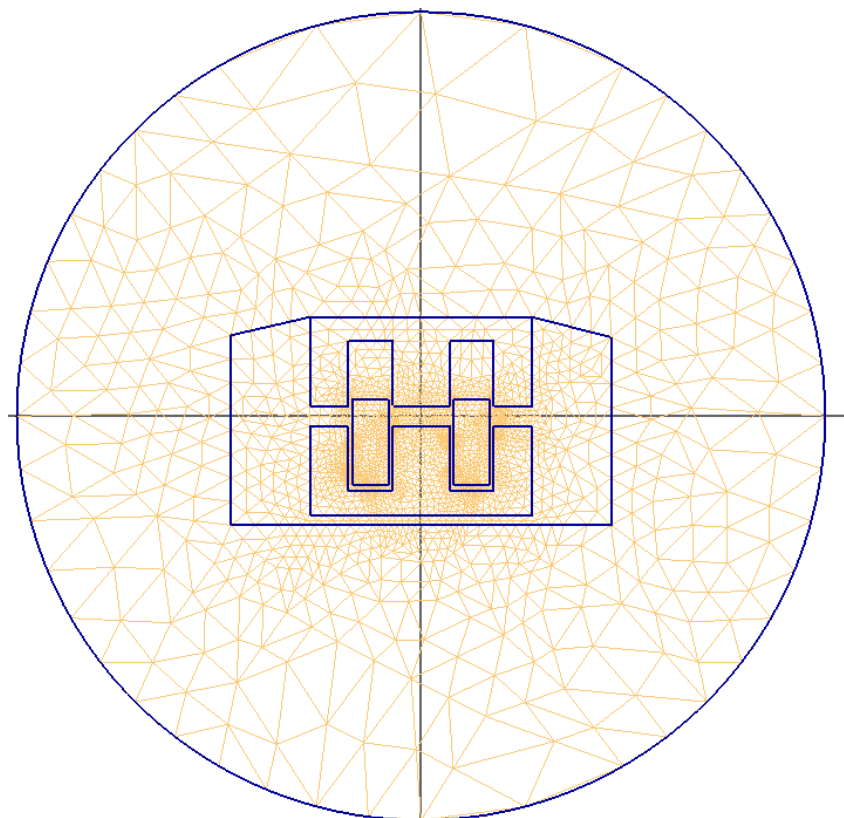
Dirichletova okrajová podmínka



Dirichletova okrajová podmínka



Obrázek 2.3 a) Model magnetického obvodu stykače bez ferokapaliny v programu Agros2D
b) Model magnetického obvodu stykače s ferokapalinou v programu Agros2D



Obrázek 4.4 Výpočtová simulační síť v programu Agros2D

Program Agros2D při simulaci námi zvolené úlohy vychází z první Maxvellovy rovnice, kde A představuje magnetický vektorový potenciál, μ magnetickou permeabilitu a J proudovou hustotu, která protéká vinutím cívky.

Výpočtem pro vektorový potenciál získáme magnetickou indukci B a magnetickou intenzitu H .

$$\mathbf{B} = \text{rot} \mathbf{A} \quad \mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

Síly působící na stykač jsou počítány pomocí Mawellova tenzoru, kde n je jednotkový vektor.

$$\mathbf{F} = \frac{1}{2} \oint_S [\mathbf{H}(\mathbf{nB}) + \mathbf{B}(\mathbf{nH}) - \mathbf{n}(\mathbf{HB})] dS.$$

Výsledná velikost působící síly závisí na aktuální poloze jádra stykače a na budícím proudu ve vinutí.

$$F_{\text{magy}} = F(i, y)$$

4.1.2 *Pozorování konvergence řešení*

Při simulaci byl brán ohled na konvergenci řešení. Nejprve byl nasimulovaný model proložen trojúhelníkovou sítí polynomem 2. řádu a počtem zjemnění 1. Sít' byla složena ze 4229 uzlů a 4796 elementů. Následně byl zvednut stupeň zjemnění na 2. Tentokrát sít' obsahovala 11444 uzlů a 19184 elementů. Cílem bylo zjistit, jak moc jemnost sítě ovlivňuje výpočty simulace. Sledována byla hodnota celkové energie. Poslední výpočet byl pro sít' s polynomem 3. řádu a zjemněním 2. Sít' obsahovala 40262 uzlů a 76736 elementů.

Tab. 4 *Pozorování konvergence řešení*

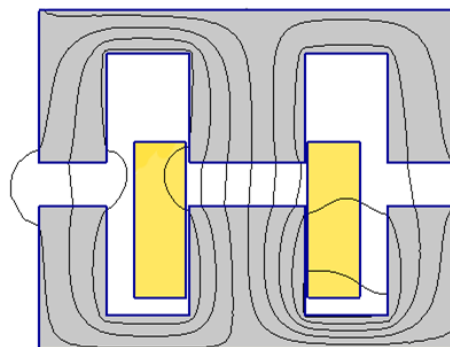
| Řád polynomu | Zjemnění sítě | W [J] |
|--------------|---------------|-------|
| 2 | 1 | 2,822 |
| 2 | 2 | 2,813 |
| 3 | 2 | 2,814 |

Simulací bylo zjištěno, že pro přesnost simulace bude nejvíce vyhovovat síť s polynomem 2. řádu a počtem zjemnění 2. První síť nebyla dostatečně jemná. Při zjemnění sítě jsme zjistili rozdíl energií o 0,009 J. Při větším zjemnění byl už rozdíl zanedbatelný a to 0,001 J.

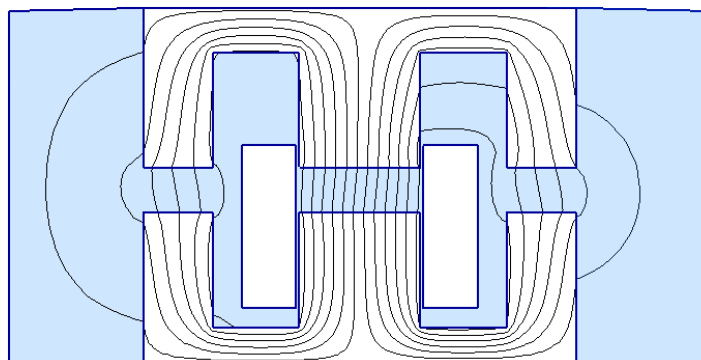
Totožná konvergence byla provedena při návrhu okrajové podmínky, kde byla zvětšována vyšetřovaná oblast tak, aby nedocházelo ke zkreslování výsledků.

4.1.3 *Vykreslení intenzity magnetického pole stykače*

Vyobrazení intenzity magnetického pole uzavírající se v magnetickém obvodu stykače bez ferokapaliny a s ferokapalinou. Z obrázku 4.6 je patrné, že siločáry se částečně uzavírají i přes ferokapalinu.



Obrázek 4.5 *Kontury intenzity mag. pole bez ferokapaliny*

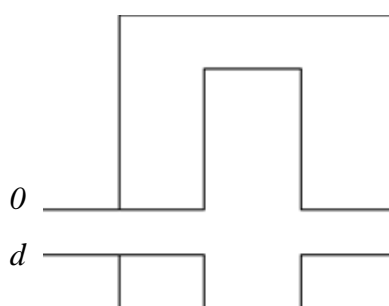


Obrázek 4.6 *Kontury intenzity mag. pole s ferokapalinou*

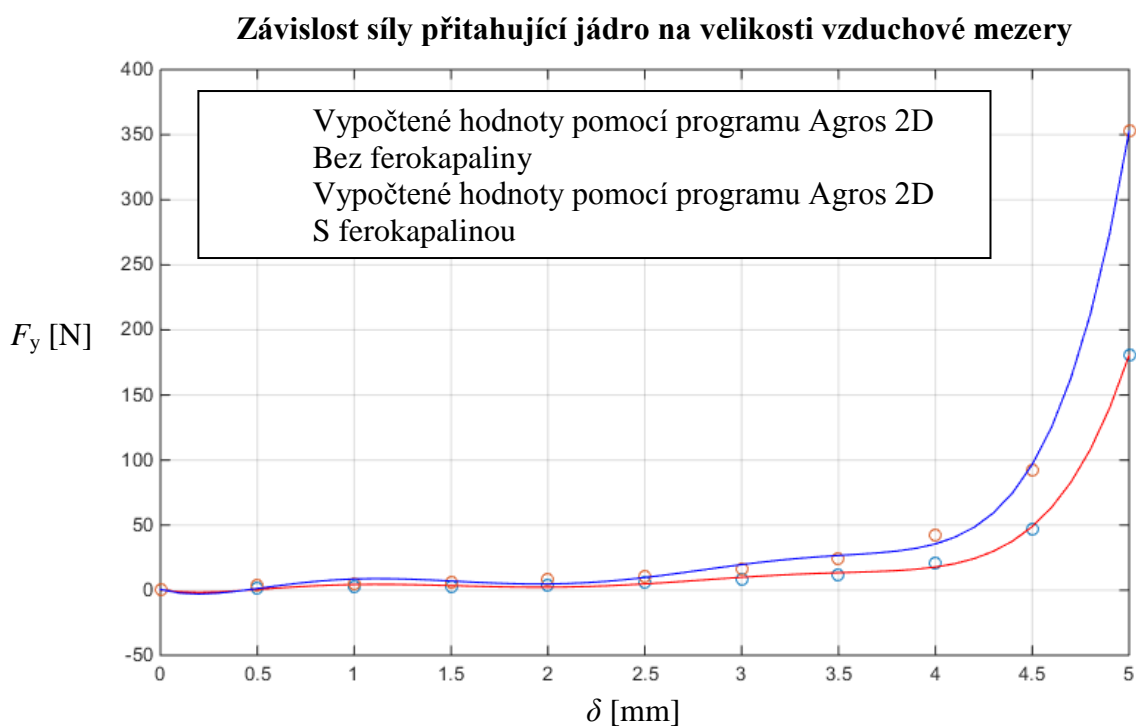
4.1.4 Výpočet síly působící na kotvu stykače

Při simulaci obvodu byla snižována velikost vzduchové mezery δ . Maximální velikost δ je 5 mm. Simulace byla provedena celkem pro 10 hodnot s krokem 0,5 mm. Naměřené hodnoty byly vykresleny programem Matlab r2010b a proloženy příslušným polynomem n -tého stupně, který nejlépe vystihuje charakter děje.

Při simulaci byla zaměněna osa y , v důsledku dalšího počítání a simulování. Hodnota 0 mm odpovídá počáteční poloze, kdy je kotva v klidovém stavu. Vzdálenost 5 mm pak odpovídá uražené vzdálenosti, kdy dojde ke spojení magnetického obvodu.



Obrázek 4.7 určení počátečních podmínek



Obrázek 4.8 Závislost tažné síly na velikosti vzduchové mezery

Z grafu jsou patrné potvrzení teoretického předpokladu, že za použití ferokapaliny roste celková síla působící na kotvu.

4.1.5 Výpočet indukčnosti cívky

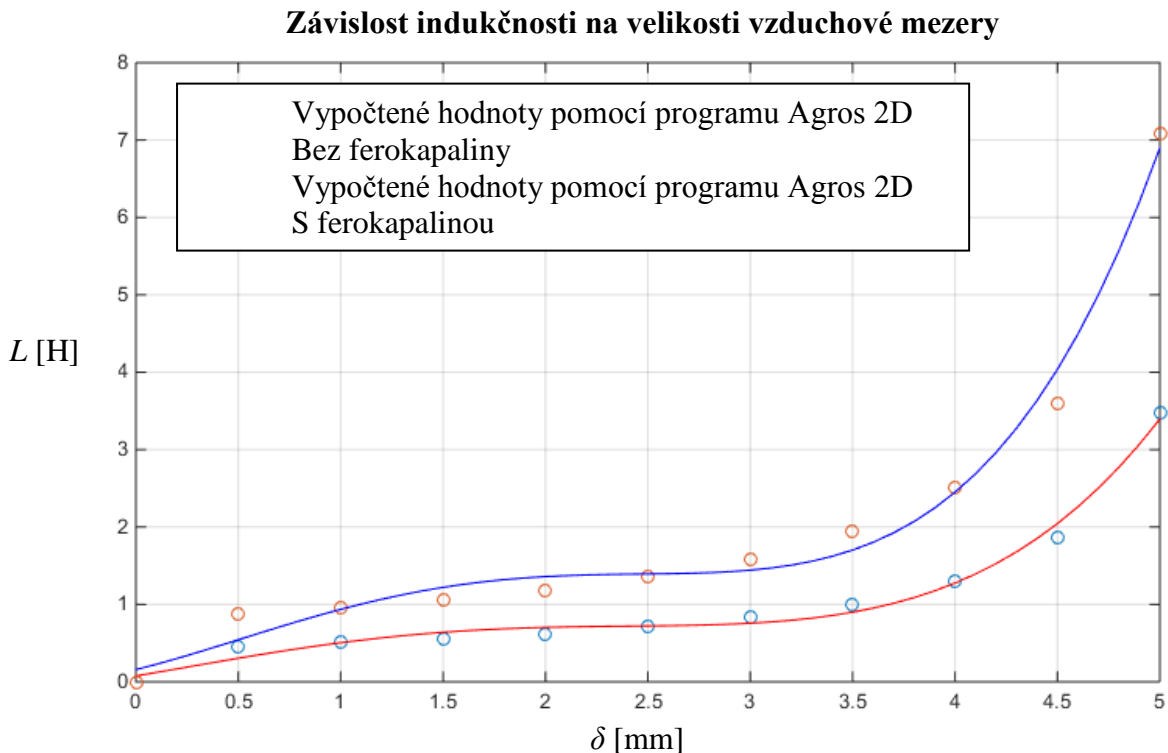
Vlivem pohybu kotvy dochází ke změně indukčnosti. Výsledná indukčnost byla vypočtena pomocí energie, která byla zaznamenávána společně s působící silou

$$W = \frac{1}{2} LI^2 [J].$$

Procházející proud byl vypočten ze vztahu pro proudovou hustotu,

$$J = \frac{I}{S} [A.m^{-2}]$$

kde J je zvolená proudová hustota a S je plocha vodiče. Námi vypočtená indukčnost je v rozmezí $L = 1 \sim 5$ H v závislosti na poloze jádra. Tyto hodnoty bylo posléze ověřeny změřením indukčnosti reálného stykače pomocí RLC metru, byly naměřeny hodnoty $L(\delta = 0) = 1,12$ H a $L(\delta = 5\text{mm}) = 5,20$ H, což ukazuje velmi dobrou shodu modelu a reálného zařízení.



Obrázek 4.9 Závislost indukčnosti na velikosti vzduchové mezery

5 Simulace dynamiky stykače v programu Matlab.

Simulací v programu Agros 2D bylo zjištěno, že ferokapalina pozitivně ovlivňuje velikost indukčnosti a síly, kterou je přitahována kotva. K celkovému posouzení výstupu stykače ovšem nepostačuje statická silová charakteristika, podstatné jsou dynamické výstupy zařízení, tj. chování stykače v čase. Následně byl proto vytvořen matematický model stykače v programu Matlab r2010b [13], ve kterém byla nasimulována dynamika stykače.

5.1 Matematický popis stykače.

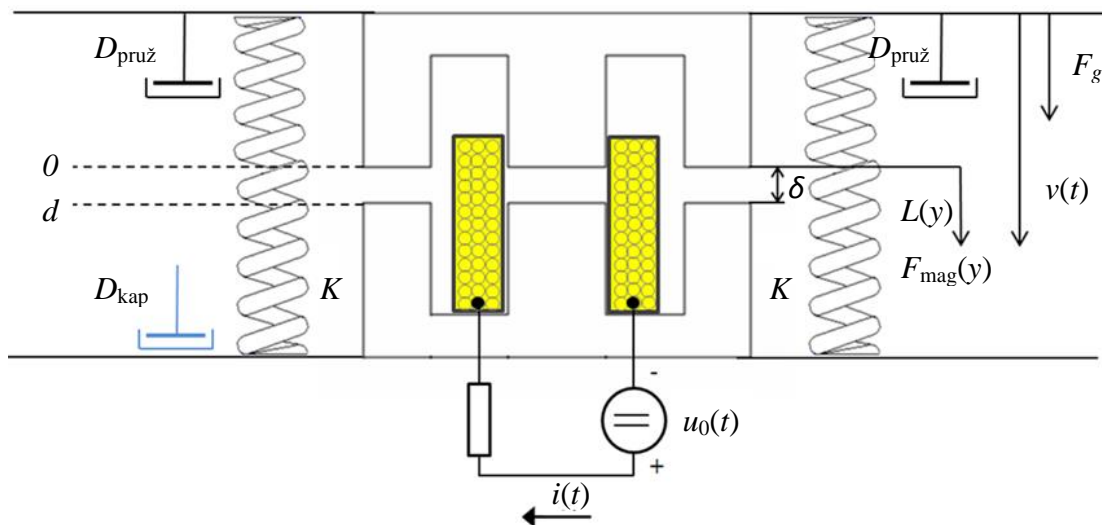
Stykač je elektromechanické zařízení, jeho model lze sestavit s použitím základních elektrických prvků R , L , C a základních mechanických prvků M , D , K , kde R představuje odpor vinutí a L indukčnost cívky. Kapacita C v našem případě nemá uplatnění. Mechanický prvek M představuje hmotnost kotvy, D činitel tlumení a K tuhost pružiny. Model stykače je pak popsán soustavou diferenciálních rovnic 1. řádu pro neznámé stavové veličiny. Pro výpočet elektrických veličin

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

a mechanických veličin [14].

$$v = \frac{dy}{dt}$$

$$a = \frac{dv}{dy}$$



Obrázek 5.1 *Mechanické a elektrické veličiny působící na stykač*

Kotva stykače má hmotnost M . Kotvu drží v poloze 0 dvě pružiny o tuhosti K a tlumení $D_{\text{pruž}}$. Další veličina, která působí na kotvu je gravitační síla F_g .

Bude-li přiveden do vinutí proud, nastává přechodový děj na indukčnosti. Průchodem proudu dochází k vytvoření magnetického pole a ke vzniku tažné síly F_{magy} , která je závislá na aktuální poloze kotvy y . Tato síla působí společně se silou gravitační proti pružinám. Vlivem pohybu kotvy dochází ke změně indukovaného napětí v cívce.

$$u_L = L \frac{di_L}{dt}$$

5.1.1 *Elektrická rovnice:*

Elektrickou rovnici získáme pomocí aplikace Kirchhoffových zákonů.

$$Ri(t) + L(y) \frac{di(t)}{dt} = u_0(t)$$

R v elektrické rovnici zastupuje celkový odpor ($R_L + R_{\text{př}}$).

$L(y)$ znázorňuje proměnnou indukčnost vlivem pohybu jádra.

5.1.2 *Mechanická rovnice:*

Mechanickou rovnici získáme pomocí aplikace pohybových zákonů

$$M \frac{d^2 y}{dt^2} + D_{\text{pruž}} \frac{dy}{dt} + Ky + F_g = F_{\text{magy}}(i, y)$$

$$v = \frac{dy}{dt}$$

Pro samotnou simulaci je nutné upravit rovnice tak, aby byly derivace funkcí na jedné straně a druhá derivaci nahrazena první. Tím se docílí k soustavě obyčejných diferenciálních rovnic 1. řádu, které postačí k numerickému řešení v programu Matlab r2010b.

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{u_o(t) - Ri(t)}{L(y)}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_{\text{magy}}(i, y) - (Fg + D_{\text{pruž}}v)}{M}$$

$$\frac{dy}{dt} = v$$

Při simulaci obvodu s kapalinou je nutné do mechanické rovnice započítat i tlumení v kapalině D , která působí proti tažné síle. Elektrické rovnice a rovnice pro rychlost zůstanou nezměněné.

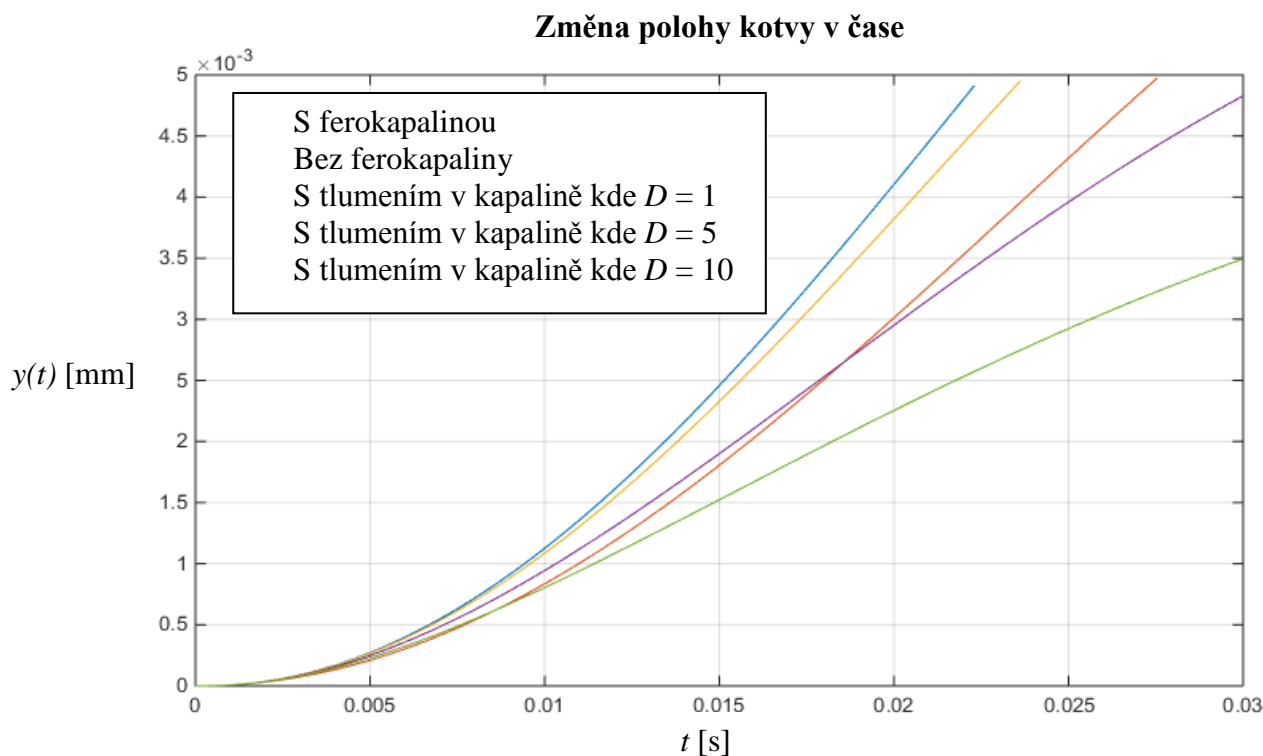
$$\frac{dv}{dt} = \frac{F_{\text{magy}}(i, y) - (Fg + D_{\text{pruž}}v + Dv)}{M}$$

5.1.3 *Postup při simulaci:*

Kotva stykače má hmotnost $M = 0,087$ kg. Jádro je tvořeno z listěných plechů kvůli eliminaci vířivých proudů, proto je při výpočtu neuvažujeme. Cívka je navinuta z měděného drátu o \varnothing 0,14 mm. Počet závitů $N = 4000$. Odpor vinutí $R_L = 412 \Omega$. Později, při praktickém měření, byl před cívku zařazen snímací odpor $R_{\text{př}}$, na kterém byl snímán přechodový děj proudu na indukčnosti. Aby bylo možné porovnat naměřené a vypočtené hodnoty, je třeba tento odpor zahrnout do simulace. Stykač obsahuje celkem dvě pružiny, které působí proti vyvolané síle. Tuhost jedné pružiny $K = 0,35 \text{ N}\cdot\text{mm}^{-1}$. Tlumení pružin $D_{\text{pruž}}$ bylo při výpočtech zanedbáno. Napětí při simulacích bylo $U = 150$ V. Hodnoty $L(y)$ a $F_{\text{magy}}(y)$ byly vypočteny pomocí programu Agros2D. Velikost vzduchové mezery $\delta = 5$ mm. Permeabilita vzduchu $\mu_{\text{vz}}=1$. Při simulaci s kapalinou, je třeba do výpočtu zahrnout i její tlumení,

$$D = 6\eta\pi r v$$

kde $\eta = 6 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ a $r = 5 \text{ mm}$. Permeabilita použité ferokapaliny byla $\mu_{\text{kap}} = 2$.



Obrázek 5.2 Změna polohy kotvy za čas

Graf vypovídá o uražené vzdálenosti kotvy za určitý čas, při různém tlumení v kapalině. Hodnoty tlumení D jsou fiktivní a slouží pouze pro znázornění, jak závisí doba sepnutí stykače na parazitním tlumení v kapalině. Hodnota tlumení je ovlivněna mnoha faktory, jako je například viskozita nosné kapaliny, velikost vzduchové mezery a rozměry částic.

6 Praktická část, ověření simulace měřením.

Pro ověření výsledků simulace byl proveden experiment na reálném stykači. Byl použit stykač na střídavé napětí o efektivní hodnotě $U_N = 230\text{V}$. Napájen byl stejnosměrným napětím v rozmezí od $U = 20 \sim 155 \text{ V}$. Jmenovité napětí 230V nebylo možné použít z důvodu sinusového průběhu napětí. Při měření by pak bylo obtížné odečíst, v jaký okamžik došlo k sepnutí.

Pro zajištění optimálních podmínek a zamezení chyby při měření byl stykač opatřen termočlánkem, aby byly zajištěny stejné pracovní podmínky jak pro provoz bez kapaliny, tak s ferokapalinou.

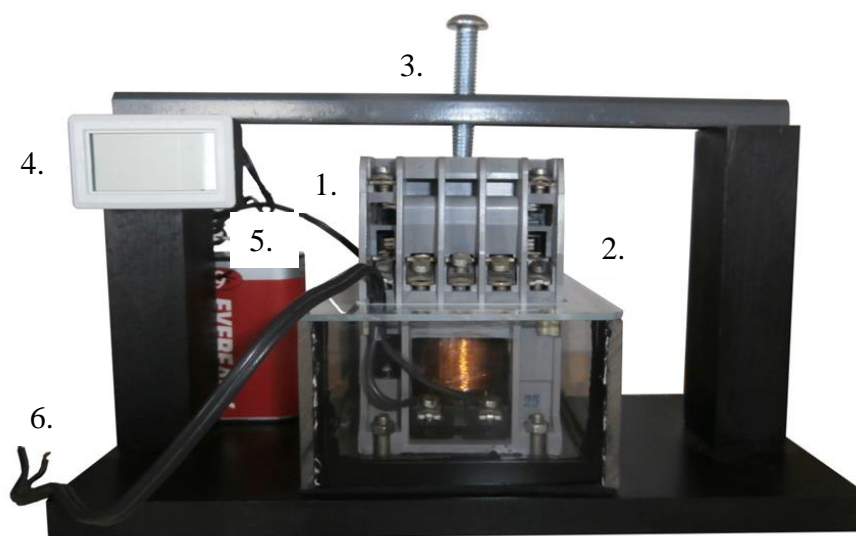
Parametry použitého stykače:

Počet závitů N : 4000

Průmět vodiče cívky \varnothing : 14 mm

Jmenovité napětí U_N : ~230 V

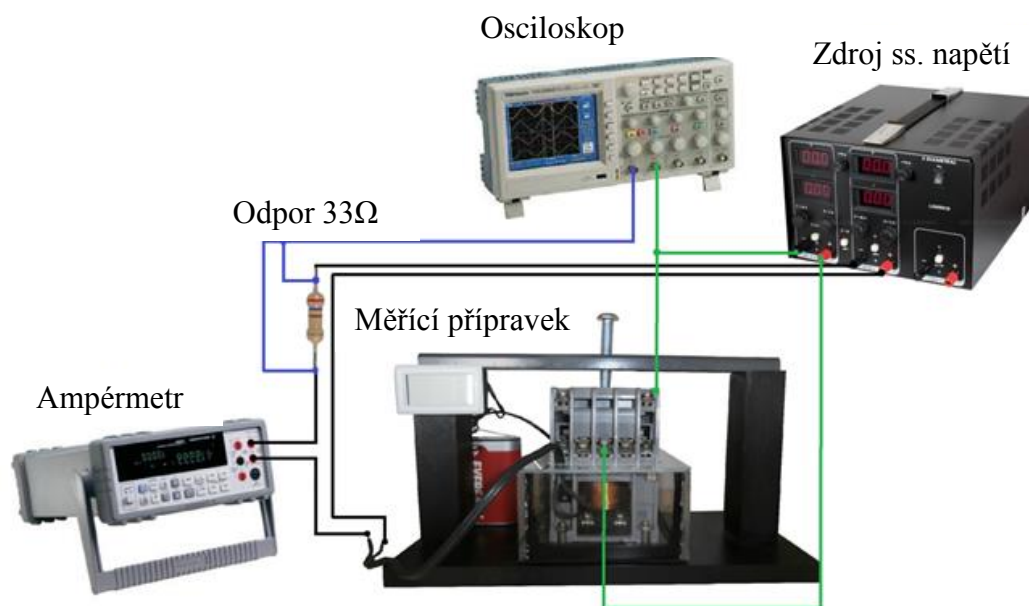
Odpor vinutí R_L : 412 Ω



Obrázek 6.1 Přípravek pro měření na stykači

1. Stykač
2. Nádobu z plexiskla pro kapalinu
3. Šroub regulující velikost vzduchové mezery δ
4. LCD display s termočlánkem – vizualizace teploty
5. Zdroj pro LCD display
6. Kontakty budícího vinutí cívky

6.1 Schéma zapojení

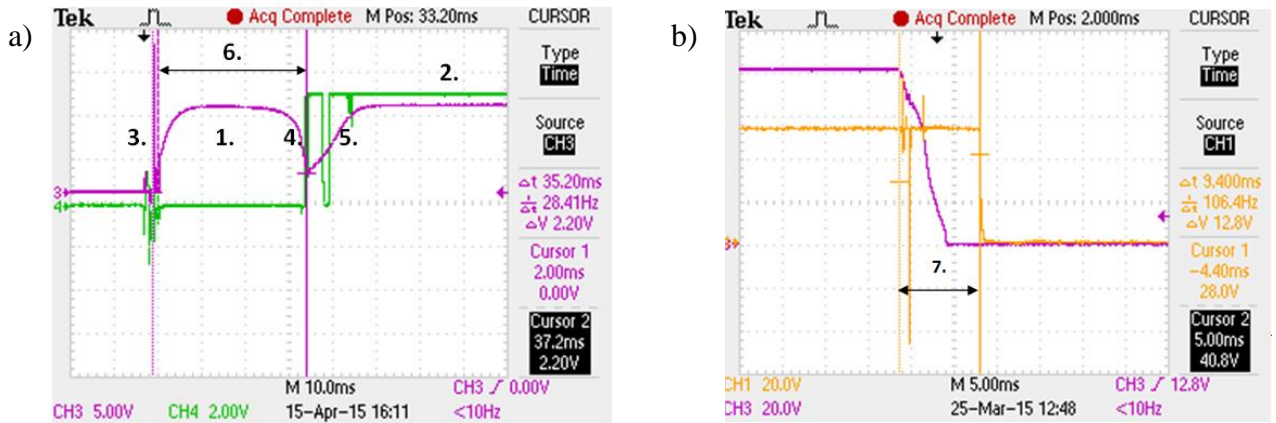


Obrázek 6.2 Schéma zapojení

6.2 Měření závislosti doby sepnutí stykače při změně budícího napětí.

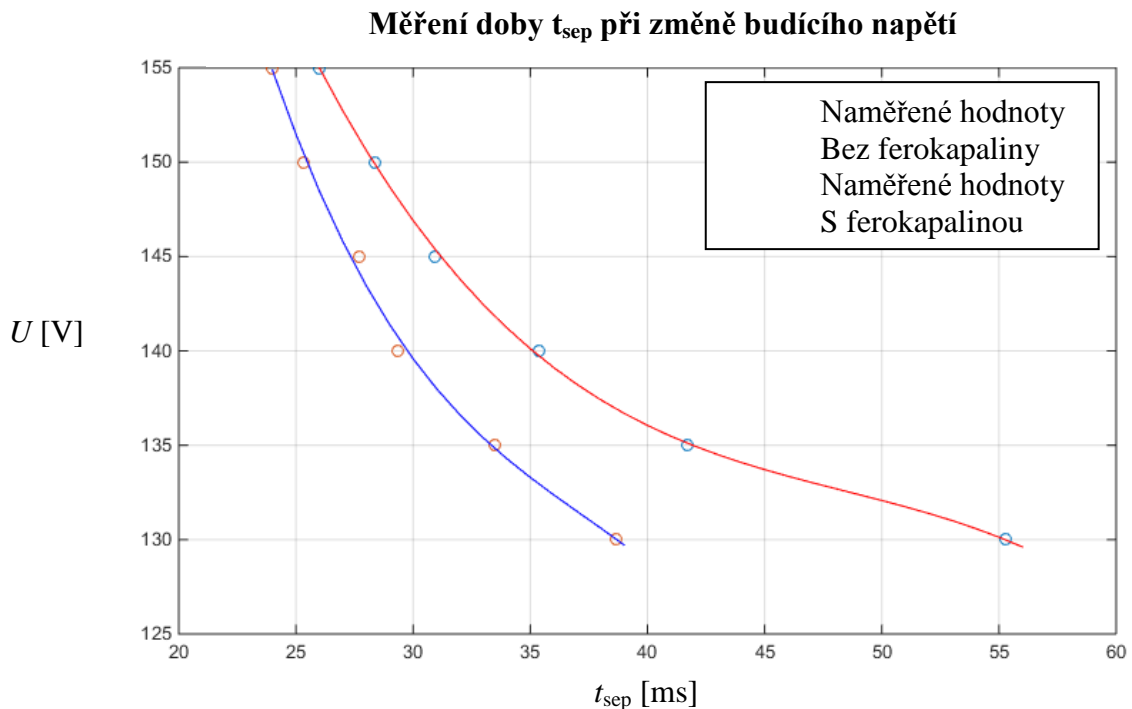
Měření bylo prováděno v rozmezí napětí $U = 130 \sim 155 \text{ V}$ s krokem 5 V . Každé měření bylo opakováno 3x. Z těchto hodnot byl udělán průměr, aby byl eliminován vznik chyby. Provozní teplota cívky byla sledována termočlánkem.

Měření doby sepnutí bylo odečítáno na osciloskopu, ukázky naměřených průběhů viz Obr. 6.3. Procházející proud cívkou byl měřen pomocí předřadného odporu $R_{př}$, na němž bylo sledováno napětí. Záchvěvy spínacího napětí byly způsobeny dosednutím spínacích kontaktů. Grafické zpracování bylo provedeno celkem z 6 hodnot. Naměřené hodnoty pak byly vykresleny programem Matlab r2010b a proloženy příslušným polynomem n -tého stupně, který nejlépe vystihuje charakter děje (Obr.6.4).

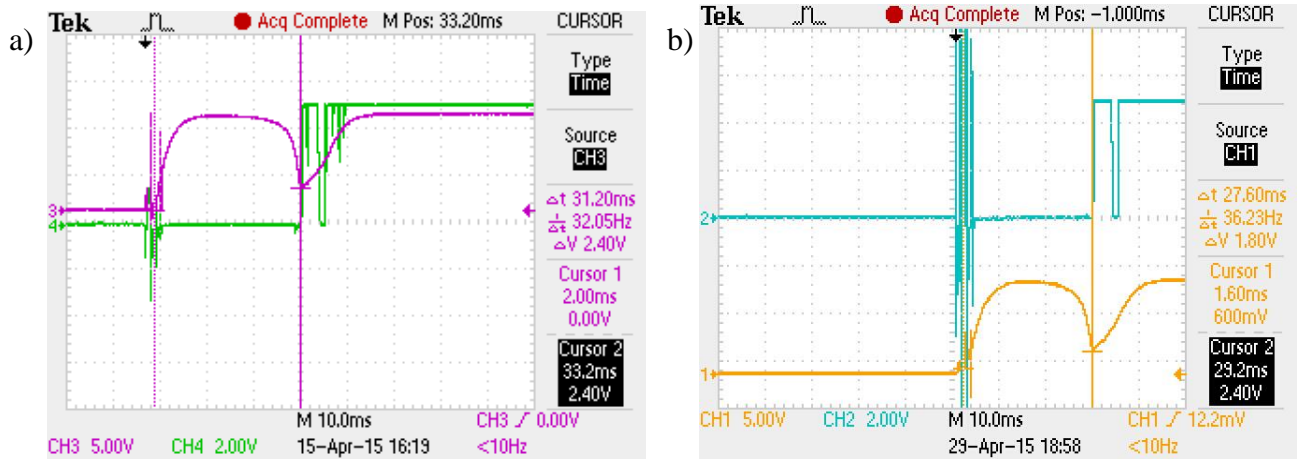


Obrázek 6.3 a) Popis průběhu měření doby sepnutí t_{sep} na osciloskopu
 b) Popis průběhu měření doby rozepnutí t_{rozep} na osciloskopu

1. Průběh napětí na předřadném odporu, odpovídá proudu cívkou dle $U = R_{př} \cdot I$.
2. Sepnutí spínacího obvodu stykače – propojení magnetického obvodu
3. Vznik přechodového děje na cívce po sepnutí spínače
4. Pokles proudu vlivem pohybující se kotvy
5. Nárůst indukovaného proudu – kotva v klidu
6. Doba sepnutí t_{sep}
7. Doba tozepnutí t_{rozep}



Obrázek 6.4 Měření doby sepnutí při změně budícího napětí



Obrázek 6.5 a) Měření t_{sep} stykače bez ferokapaliny

b) Měření t_{sep} stykače s ferokapalinou

Měření bylo zjištěno, že za použití ferokapaliny bylo sepnutí stykače rychlejší, než za běžných podmínek, podrobnosti měření viz Tab. 8.1. v příloze práce.

Nejmenší rozdíl spínacích časů byl zaznamenán při budicím napětí $U = 155\text{ V}$, kde rozdíl doby sepnutí byl $\Delta t_{sep} = 2\text{ ms}$. Naopak největší změna byla zaznamenána pro napětí $U = 130\text{ V}$, kde rozdíl činil $\Delta t_{sep} = 15,6\text{ ms}$.

Tento rozdíl si vysvětlují potřebným výkonem, který je třeba pro sepnutí stykače. S rostoucím napětím roste proud, díky tomu je sepnutí stykače snazší a rozdíl doby sepnutí není tak patrný. Dalším krokem tedy bylo změření charakteristiky potřebného výkonu pro sepnutí stykače. Při měření t_{rozep} bylo zjištěno, že doba rozepnutí závisí pouze na vlastnostech použitých pružin. Většina odměřených hodnot byla totožná. Doba t_{rozep} se pohybovala v rozmezí $t_{rozep} = 10 \pm 1,2\text{ ms}$.

Tab. 6 Porovnání matematického modelu a naměřených hodnot

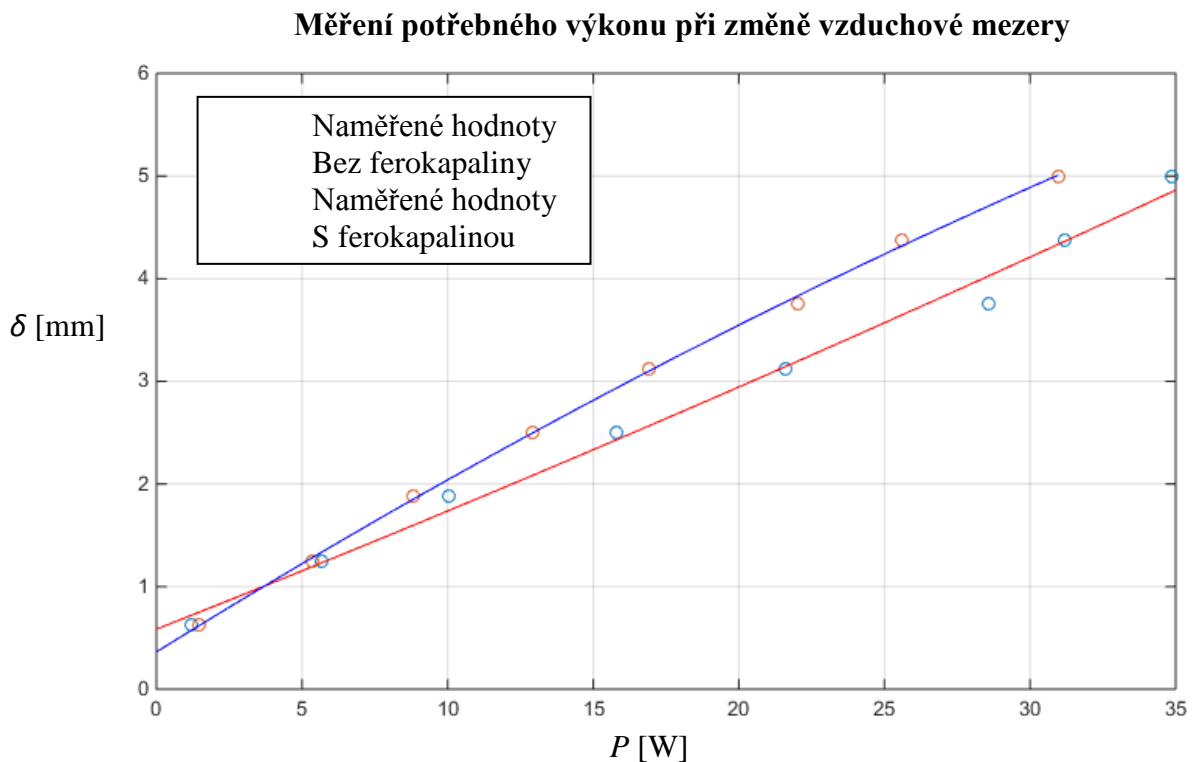
| Simulace v programu Matlab r2010b | | Měření | | Odchylka |
|-----------------------------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| Porovnání hodnot | t_{sep} [ms] | Porovnání hodnot | t_{sep} [ms] | t_{sep} [ms] |
| Bez kapaliny | 28 | Bez kapaliny | 28,4 | 0,4 |
| S kapalinou | 23 | S kapalinou | 25,33 | 2,33 |

Simulací bylo zjištěno, jak rychle dojde k sepnutí stykače. Nasimulované a odměřené hodnoty se téměř shodují. Nejvyšší odchylku jsme zaznamenali s použitím ferokapaliny a to 2,3 ms. Při simulaci bylo sledováno i tlumení v kapalině. Výsledek je takový, že čím větší částice bude ferokapalina obsahovat a čím méně viskózní bude nosná kapalina, tím pomalejší bude sepnutí.

Použité tlumení je pouze orientační, slouží pouze pro znázornění.

6.3 Měření potřebného výkonu k sepnutí stykače s měnicí se vzduchovou mezerou

Měřením byl zjištěn průměrný výkon potřebný k sepnutí stykače pro různou šířku vzduchové mezery. Ta byla regulovaná pomocí šroubu. Použitý šroub byl M8, na jednu otáčku tedy připadá $\Delta\delta = 1,250$ mm. Měření bylo tedy provedeno pro celkem 8 hodnot s krokem 0,5 otáčky, to je $\Delta\delta = 0,625$ mm. Měření bylo znovu provedeno pro několik hodnot, pro větší přesnost měření.



Obrázek 6.6 Graf měření potřebného výkonu při změně vzduchové mezery

Čím širší vzduchová mezera, tím větší bylo zapotřebí spínací napětí. Měřením bylo ověřeno, že za použití ferokapaliny klesne odebíraný výkon, který je potřeba k sepnutí stykače. Největší výkonovou změnu byl zaznamenán pro nejvyšší vzduchovou mezeru, kde rozdíl činil $\Delta P = 3,874$ W.

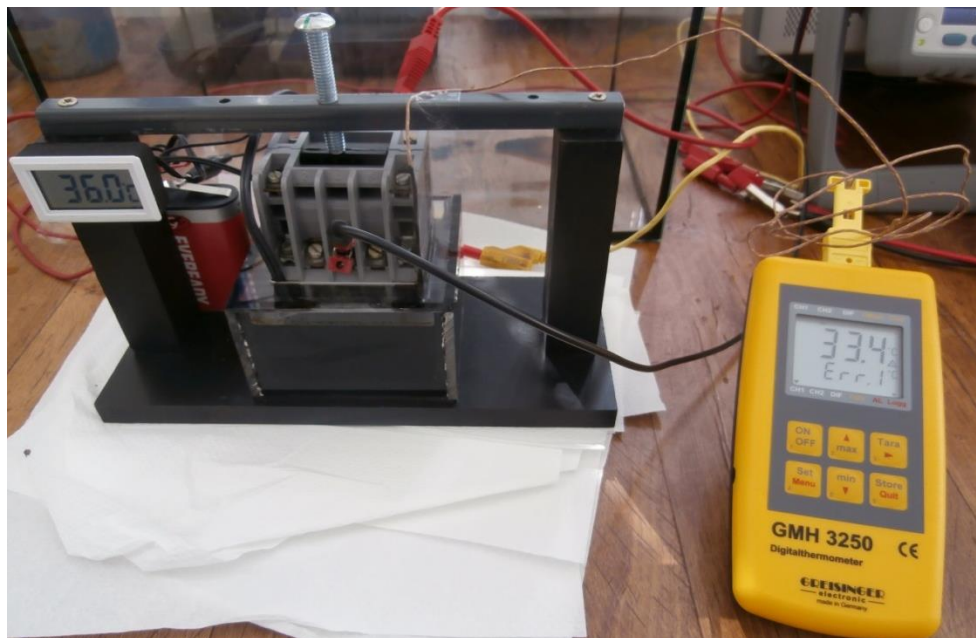
Při nejnižší změřitelné vzduchové mezeře, která činila $\delta = 0,625$ mm byl naměřen nižší výkon potřebný pro sepnutí stykače bez použití ferokapaliny. Dle mého názoru se jedná o chybu měření, která je způsobena nepřesnou regulací při nastavení vzduchové mezery. Při tak malých vzdálenostech není možné zajistit přesnos obyčejným šroubem.

6.4 Vliv teploty na dobu sepnutí

Při tomto měření bylo nastaveno konstantní budící napětí na hodnotu $U = 140 \text{ V}$.

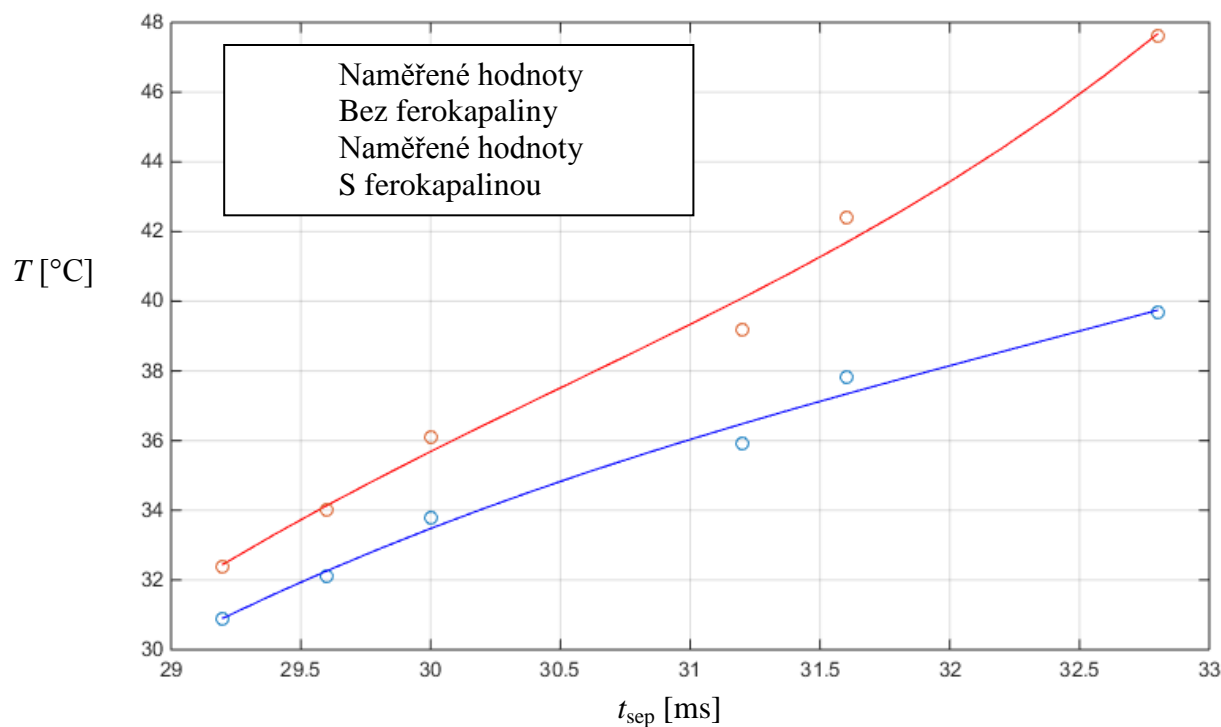
Počáteční pracovní teplota kapaliny byla $T = 39,7^\circ \text{ C}$ a pracovní teplota vinutí $T = 47,6^\circ \text{ C}$.

Při poklesu teploty byly zaznamenávány hodnoty doby sepnutí stykače.



Obrázek 6.7 Měření pracovní teploty cívky a ferokapaliny

Měření potřebného výkonu při změně vzduchové mezery



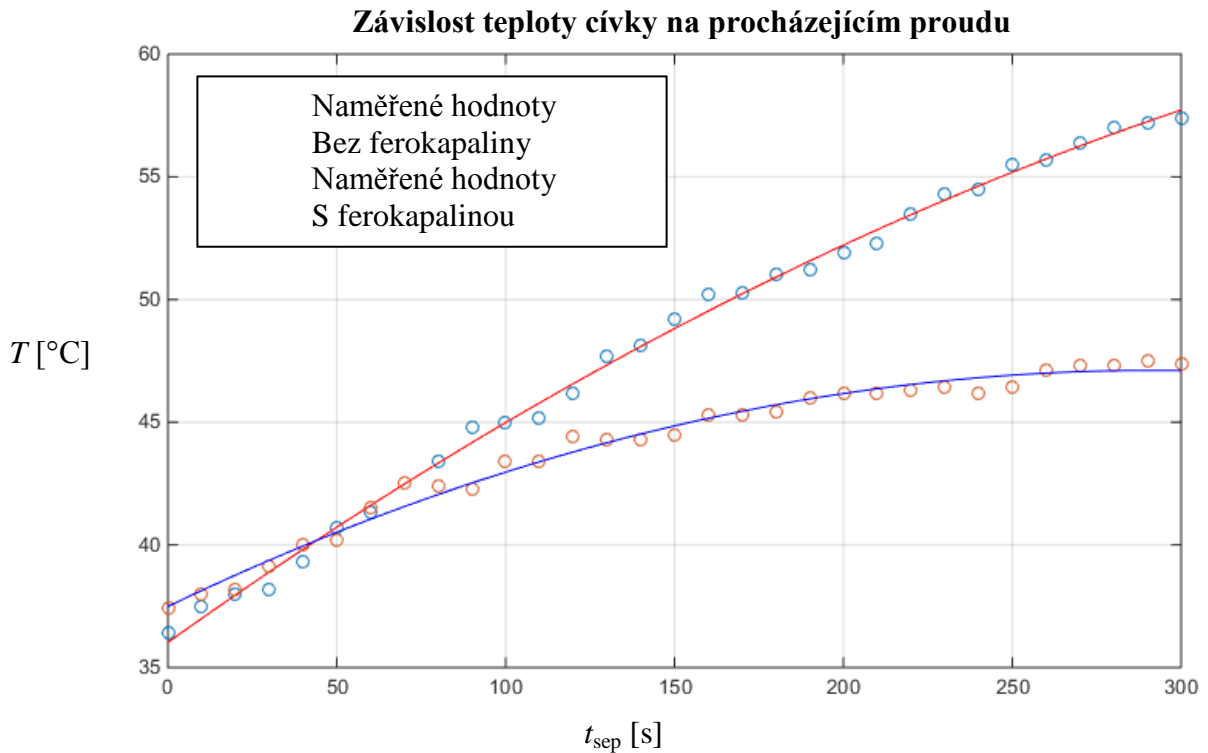
Obrázek 6.8 Graf doby sepnutí stykače za snižování teploty

Z grafu na Obr. 6.8 je patrné, že rostoucí teplota má negativní vliv na dobu sepnutí. Zároveň graf poukazuje na schopnosti ferokapaliny odvést teplo od vinutí. Linearizací závislosti můžeme konstatovat, že změna doby sepnutí závislosti na teplotě ferokapaliny je $\Delta t_{\text{sep}} = 0,41 \text{ ms} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

6.5 Chladicí vlastnost kapaliny

Cílem bylo zjistit, zda má ferokapalina chladicí účinky a dokáže snížit teplotu cívky.

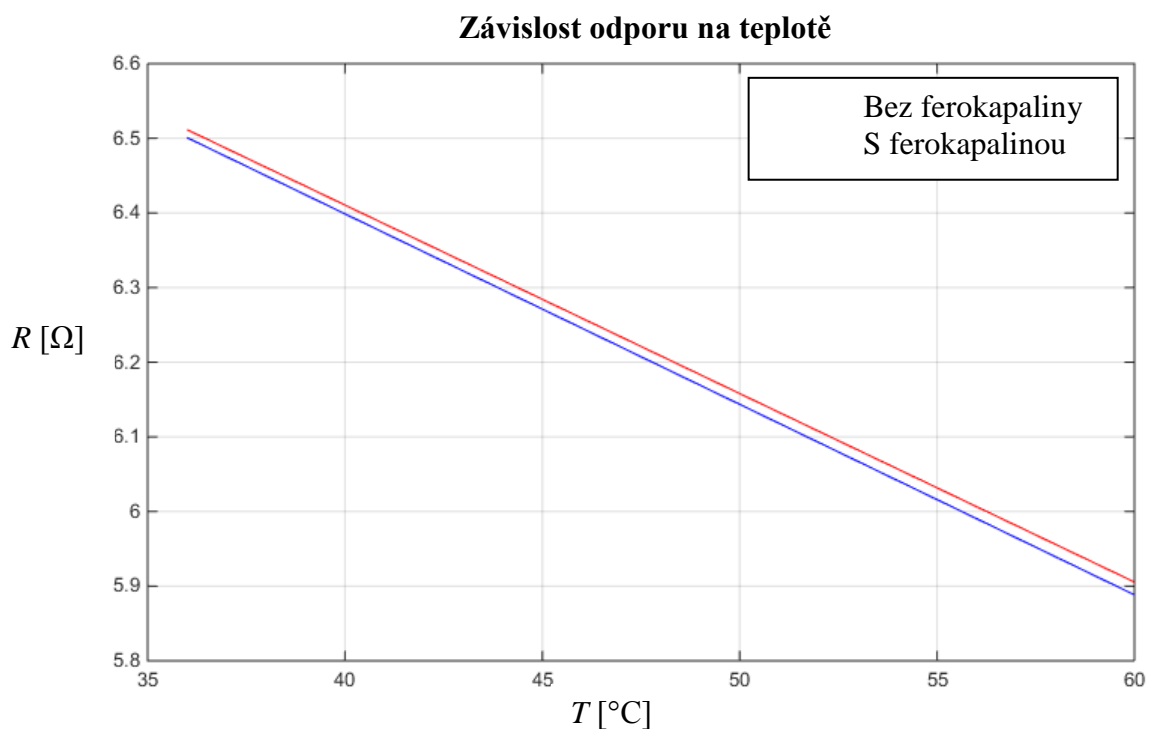
Cívka byla buzena po dobu 5 minut stejným napětím o velikosti $U = 55 \text{ V}$. Měření bylo provedeno pro stykač s ferokapalinou a bez ferokapaliny.



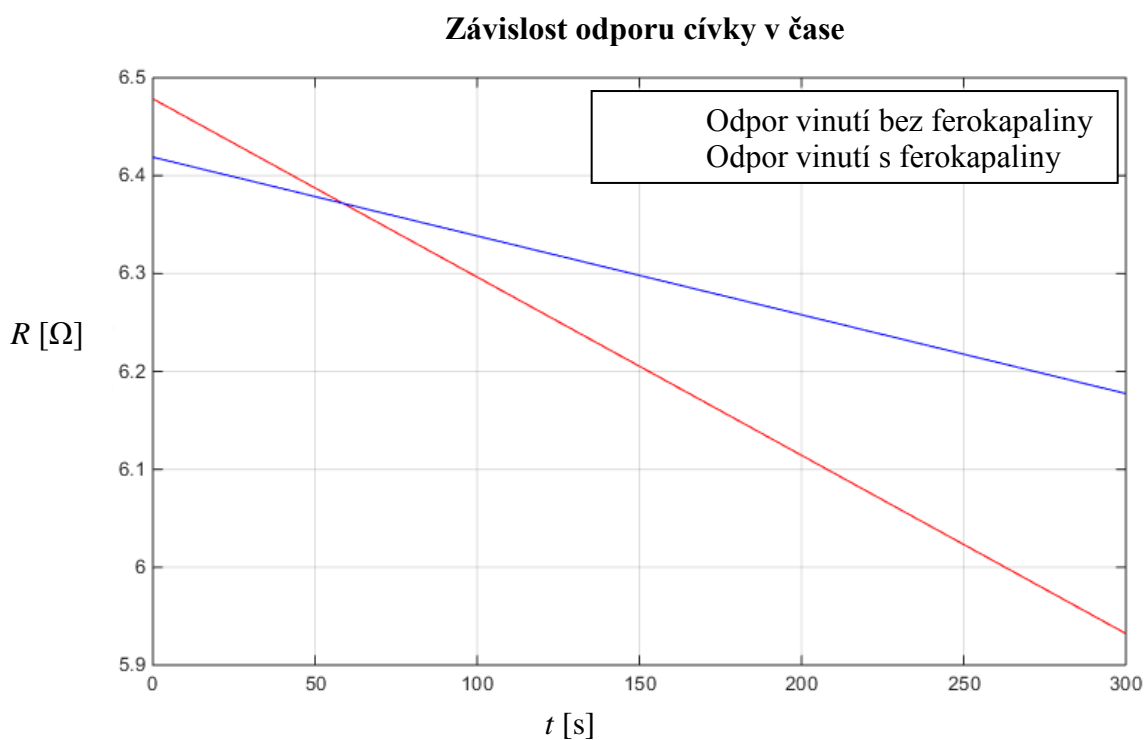
Obrázek 6.9 Závislost teploty cívky na procházejícím proudu

Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že s ferokapalinou se cívka zahřívá pomaleji. To je způsobeno dobrou tepelnou vodivostí ferokapaliny.

S rostoucí teplotou dochází ke snížení elektrického odporu, protože odpor je teplotně závislá veličina. Chlazení má tedy velký vliv jak na dobu sepnutí, tak na odpor vinutí.



Obrázek 6.10 Závislost odporu na teplotě při $U = 55 V$



Obrázek 6.11 Závislost zahřívání odporu na čase při $U = 55 V$

7 Závěr

Předkládaná práce zkoumala výstupy stykače s ferokapalinou aplikovanou do jeho vzduchové mezery.

Simulace stykače s využitím výpočetních programů Agros2D a Matlab r2010b ukázaly pozitivní vliv kapaliny na generované síly a indukčnost zařízení. Následné simulace dynamiky ukázaly vliv jednotlivých veličin na dobu sepnutí. Největší negativní vliv má viskozita použité kapaliny, při vyšších hodnotách viskozity může tento vliv znegovat zvýšení sil.

Následně byly proměřeny vlastnosti reálného stykače. Měření ukázalo velmi dobrou shodu reálných hodnot s výsledky zjištěnými pomocí matematického modelu.

Experimentálně byl verifikován pokles doby sepnutí stykače při použití ferokapaliny. Tento pokles závisí na hodnotě jmenovitého napětí stykače. Nejvyššího snížení doby sepnutí bylo dosaženo při minimální hodnotě jmenovitého napětí. Na základě zkušeností z výsledků simulací lze konstatovat, že toto je způsobeno vyšší rychlostí jádra, přičemž se více uplatní viskózní ztráty. Zároveň bylo zjištěno, že při použití ferokapaliny klesá minimální výkon potřebný k sepnutí spínače. Bylo také ověřeno, že ferokapalina dobře odvádí teplo, její přítomnost má pozitivní vliv na chlazení vinutí a jeho odpor.

Každé měření prokázalo zlepšení daných vlastností stykače s využitím ferokapaliny. Díky tomu se zkoumaná technologie jeví jako velmi perspektivní pro další výzkum.

Přestože jsou ferokapaliny poměrně mladé, již se hojně využívají pro různé aplikace a jistě si najdou uplatnění i v mnoha dalších oborech.

8 Přílohy

Tab. 8.1 Měření doby tsep při změně budícího napětí bez ferokapaliny

| Měření doby tsep při změně budícího napětí bez ferokapaliny | | | | | |
|---|---------|----------|----------------|------------------|----------|
| | U [V] | I [mA] | t_{sep} [ms] | t_{ropez} [ms] | T [°C] |
| | 130 | 278,10 | 55,00 | 10 | 39,10 |
| | | 279,30 | 52,40 | 10 | 37,50 |
| | | 276,20 | 58,40 | 10 | 39,00 |
| Průměr | 130 | 277,87 | 55,27 | 10 | 38,53 |
| | 135 | 283,10 | 40,00 | 10 | 37,40 |
| | | 281,60 | 43,60 | 10 | 40,20 |
| | | 283,00 | 41,60 | 10 | 41,10 |
| Průměr | 135 | 282,57 | 41,73 | 10 | 39,57 |
| | 140 | 283,00 | 35,00 | 11 | 41,40 |
| | | 283,70 | 35,60 | 10 | 41,80 |
| | | 283,60 | 35,60 | 10 | 42,00 |
| Průměr | 140 | 283,43 | 35,40 | 10 | 41,73 |
| | 145 | 283,80 | 30,80 | 10 | 42,80 |
| | | 283,00 | 31,20 | 10 | 42,40 |
| | | 283,80 | 30,80 | 10 | 41,50 |
| Průměr | 145 | 283,53 | 30,93 | 10 | 42,23 |
| | 150 | 284,20 | 28,80 | 10 | 42,60 |
| | | 284,10 | 27,60 | 10 | 42,50 |
| | | 284,10 | 28,80 | 10 | 42,10 |
| Průměr | 150 | 284,13 | 28,40 | 10 | 42,40 |
| | 155 | 284,60 | 26,00 | 10 | 41,80 |
| | | 284,40 | 25,60 | 10 | 42,70 |
| | | 284,50 | 26,40 | 10 | 42,60 |
| Průměr | 155 | 284,50 | 26,00 | 10 | 42,37 |

Tab. 8.2 Měření doby tsep při změně budícího napětí s ferokapalinou

| Měření doby tsep při změně budícího napětí s ferokapalinou | | | | | |
|---|------------|---------------|----------------|------------------|--------------|
| | U [V] | I [mA] | t_{sep} [ms] | t_{ropez} [ms] | T [°C] |
| | 130 | 276,50 | 37,60 | 10 | 37,20 |
| | | 272,10 | 40,00 | 10 | 40,10 |
| | | 274,50 | 38,40 | 10 | 41,20 |
| Průměr | 130 | 274,37 | 38,67 | 10 | 39,50 |
| | 135 | 284,20 | 32,80 | 10 | 39,60 |
| | | 284,00 | 34,00 | 10 | 39,10 |
| | | 284,00 | 33,60 | 11 | 40,20 |
| Průměr | 135 | 284,07 | 33,47 | 10 | 39,63 |
| | 140 | 284,70 | 28,80 | 10 | 37,60 |
| | | 284,60 | 29,20 | 10 | 38,00 |
| | | 284,60 | 30,00 | 10 | 38,00 |
| Průměr | 140 | 284,63 | 29,33 | 10 | 37,87 |
| | 145 | 285,40 | 27,60 | 10 | 42,50 |
| | | 284,90 | 27,60 | 10 | 40,60 |
| | | 285,00 | 28,00 | 10 | 40,10 |
| Průměr | 145 | 285,10 | 27,73 | 10 | 41,07 |
| | 150 | 285,10 | 25,20 | 11 | 39,50 |
| | | 284,90 | 25,60 | 10 | 40,20 |
| | | 284,90 | 25,20 | 10 | 40,10 |
| Průměr | 150 | 284,97 | 25,33 | 10 | 39,93 |
| | 155 | 284,90 | 23,20 | 10 | 40,30 |
| | | 284,80 | 24,40 | 10 | 40,10 |
| | | 284,80 | 24,40 | 10 | 40,60 |
| Průměr | 155 | 284,83 | 24,00 | 10 | 40,33 |

Tab. 8.3 Měření potřebného výkonu k sepnutí stykače bez ferokapaliny

| Měření potřebného výkonu k sepnutí stykače bez ferokapaliny | | | | | |
|--|---------|----------|---------------|----------|---------|
| | U [V] | I [mA] | δ [mm] | T [°C] | P [W] |
| | 128,00 | 266,00 | 5,000 | 52,00 | 34,048 |
| | 133,00 | 268,00 | | 54,00 | 35,644 |
| Průměr | 130,50 | 267,00 | | 53,00 | 34,844 |
| | 124,00 | 250,00 | 4,375 | 52,20 | 31,000 |
| | 126,60 | 248,00 | | 53,20 | 31,397 |
| Průměr | 125,30 | 249,00 | | 52,70 | 31,200 |
| | 120,00 | 243,00 | 3,750 | 51,00 | 29,160 |
| | 118,00 | 237,00 | | 53,80 | 27,966 |
| Průměr | 119,00 | 240,00 | | 52,40 | 28,560 |
| | 104,30 | 213,00 | 3,125 | 51,60 | 22,216 |
| | 102,50 | 205,00 | | 52,80 | 21,013 |
| Průměr | 103,40 | 209,00 | | 52,20 | 21,611 |
| | 88,00 | 179,00 | 2,500 | 51,80 | 15,752 |
| | 88,80 | 178,00 | | 51,60 | 15,806 |
| Průměr | 88,40 | 178,50 | | 51,70 | 15,779 |
| | 70,70 | 142,00 | 1,875 | 52,20 | 10,039 |
| | 70,30 | 143,00 | | 51,50 | 10,053 |
| Průměr | 70,50 | 142,50 | | 51,85 | 10,046 |
| | 53,10 | 108,00 | 1,250 | 51,50 | 5,735 |
| | 52,90 | 107,00 | | 51,30 | 5,660 |
| Průměr | 53,00 | 107,50 | | 51,40 | 5,698 |
| | 24,60 | 50,00 | 0,625 | 50,30 | 1,230 |
| | 23,70 | 48,99 | | 50,20 | 1,161 |
| Průměr | 24,15 | 49,50 | | 50,25 | 1,195 |

Tab. 8.4 Měření potřebného výkonu k sepnutí stykače s ferokapalinou

| Měření potřebného výkonu k sepnutí stykače s ferokapalinou | | | | | |
|---|---------|----------|---------------|----------|---------|
| | U [V] | I [mA] | δ [mm] | T [°C] | P [W] |
| | 124,00 | 248,30 | 5,000 | 51,00 | 30,789 |
| | 124,60 | 250,00 | | 51,20 | 31,150 |
| Průměr | 124,30 | 249,15 | | 51,10 | 30,969 |
| | 113,30 | 226,80 | 4,375 | 50,10 | 25,696 |
| | 112,30 | 226,60 | | 50,80 | 25,447 |
| Průměr | 112,80 | 226,70 | | 50,45 | 25,572 |
| | 104,20 | 213,00 | 3,750 | 51,20 | 22,195 |
| | 103,90 | 210,00 | | 51,70 | 21,819 |
| Průměr | 104,05 | 211,50 | | 51,45 | 22,007 |
| | 91,00 | 185,60 | 3,125 | 50,90 | 16,890 |
| | 91,00 | 186,30 | | 50,10 | 16,953 |
| Průměr | 91,00 | 185,95 | | 50,50 | 16,921 |
| | 79,00 | 162,80 | 2,500 | 51,40 | 12,861 |
| | 79,30 | 163,80 | | 50,30 | 12,989 |
| Průměr | 79,15 | 163,30 | | 50,85 | 12,925 |
| | 65,80 | 135,20 | 1,875 | 50,30 | 8,896 |
| | 65,20 | 133,50 | | 50,00 | 8,704 |
| Průměr | 65,50 | 134,35 | | 50,15 | 8,800 |
| | 50,80 | 105,10 | 1,250 | 48,00 | 5,339 |
| | 50,90 | 105,20 | | 48,30 | 5,355 |
| Průměr | 50,85 | 105,15 | | 48,15 | 5,347 |
| | 26,60 | 55,50 | 0,625 | 50,10 | 1,476 |
| | 26,10 | 55,01 | | 49,70 | 1,436 |
| Průměr | 26,35 | 55,26 | | 49,90 | 1,456 |

Tab. 8.5 Závislost doby sepnutí na velikosti vzduchové mezery bez ferokapaliny

| Závislost doby sepnutí na velikosti vzduchové mezery bez ferokapaliny | | | | |
|--|----------|-----------------------|---------------|----------|
| U [V] | I [mA] | t_{sep} [ms] | δ [mm] | T [°C] |
| 130 | 275 | 57,20 | 5,000 | 40,20 |
| | | 34,00 | 4,375 | 41,30 |
| | | 24,00 | 3,750 | 41,70 |
| | | 18,40 | 3,125 | 41,90 |
| | | 14,20 | 2,500 | 41,80 |
| | | 11,20 | 1,875 | 41,60 |
| | | 9,00 | 1,250 | 41,40 |
| | | 6,40 | 0,625 | 39,60 |

Tab. 8.6 Závislost doby sepnutí na velikosti vzduchové mezery s ferokapalinou

| Závislost doby sepnutí na velikosti vzduchové mezery s ferokapalinou | | | | |
|---|----------|-----------------------|---------------|----------|
| U [V] | I [mA] | t_{sep} [ms] | δ [mm] | T [°C] |
| 130 | 275 | 38,00 | 5,000 | 41,20 |
| | | 30,00 | 4,375 | 39,80 |
| | | 26,00 | 3,750 | 42,30 |
| | | 20,80 | 3,125 | 41,30 |
| | | 17,20 | 2,500 | 41,40 |
| | | 13,60 | 1,875 | 41,10 |
| | | 12,00 | 1,250 | 39,70 |
| | | 9,20 | 0,625 | 40,50 |

Tab. 8.7 Tažná síla působící na kotvu s ferokapalinou

| Tažná síla působící na kotvu s ferokapalinou | | | |
|---|-----------|-----------|---------|
| δ [mm] | F_x [N] | F_y [N] | W [J] |
| 5,00 | 4,11 | 410,80 | 2,42 |
| 4,50 | 5,08 | 508,00 | 2,65 |
| 4,00 | 6,39 | 639,40 | 2,93 |
| 3,50 | 8,29 | 828,80 | 3,30 |
| 3,00 | 11,15 | 1115,00 | 3,78 |
| 2,50 | 15,85 | 1585,00 | 4,44 |
| 2,00 | 24,34 | 2434,00 | 5,42 |
| 1,50 | 42,32 | 4232,00 | 7,00 |
| 1,00 | 92,44 | 9244,00 | 10,06 |
| 0,50 | 353,30 | 35330,00 | 18,79 |

Tab. 8.8 Tažná síla působící na kotvu bez ferokapalinou

| Tažná síla působící na kotvu bez ferokapalinou | | | |
|---|-----------|-----------|---------|
| δ [mm] | F_x [N] | F_y [N] | W [J] |
| 5,00 | 2,036 | 203,60 | 1,29 |
| 4,50 | 2,523 | 252,30 | 1,41 |
| 4,00 | 3,186 | 318,60 | 1,55 |
| 3,50 | 4,14 | 414,00 | 1,74 |
| 3,00 | 5,586 | 558,60 | 1,98 |
| 2,50 | 7,948 | 794,80 | 2,31 |
| 2,00 | 12,23 | 1223,00 | 2,81 |
| 1,50 | 21,31 | 2131,00 | 3,61 |
| 1,00 | 46,77 | 4677,00 | 5,18 |
| 0,50 | 180,9 | 18090,00 | 9,71 |

Tab. 8.9 Zahřívání cívky s ferokapalinou

| Zahřívání cívky s ferokapalinou | | | | |
|--|---------|----------|-------------------------|------------------|
| U [V] | t [s] | I [mA] | $T_{\text{cívky}}$ [°C] | R [Ω] |
| 55 | 0 | 118,1 | 37,4 | 6,4955 |
| | 10 | 117,6 | 38 | 6,468 |
| | 20 | 117,13 | 38,2 | 6,4422 |
| | 30 | 116,6 | 39,1 | 6,413 |
| | 40 | 116,26 | 40 | 6,3943 |
| | 50 | 115,93 | 40,2 | 6,3762 |
| | 60 | 115,63 | 41,5 | 6,3597 |
| | 70 | 115,36 | 42,5 | 6,3448 |
| | 80 | 115,12 | 42,4 | 6,3316 |
| | 90 | 114,92 | 42,3 | 6,3206 |
| | 100 | 114,73 | 43,4 | 6,3102 |
| | 110 | 114,56 | 43,4 | 6,3008 |
| | 120 | 114,39 | 44,4 | 6,2915 |
| | 130 | 114,25 | 44,3 | 6,2838 |
| | 140 | 114,12 | 44,3 | 6,2766 |
| | 150 | 114,02 | 44,5 | 6,2711 |
| | 160 | 113,91 | 45,3 | 6,2651 |
| | 170 | 113,82 | 45,3 | 6,2601 |
| | 180 | 113,73 | 45,4 | 6,2552 |
| | 190 | 113,64 | 46 | 6,2502 |
| | 200 | 113,57 | 46,2 | 6,2464 |
| | 210 | 113,5 | 46,2 | 6,2425 |
| | 220 | 113,43 | 46,3 | 6,2387 |
| | 230 | 113,38 | 46,4 | 6,2357 |
| | 240 | 113,31 | 46,2 | 6,2321 |
| | 250 | 113,26 | 46,4 | 6,2293 |
| | 260 | 113,21 | 47,1 | 6,2266 |
| | 270 | 113,16 | 47,3 | 6,2238 |
| 280 | 113,1 | 47,3 | 6,2205 | |
| 290 | 113,07 | 47,5 | 6,2189 | |
| 300 | 113,03 | 47,4 | 6,2167 | |

Tab. 8.10 Zahřívání cívky bez ferokapalinou

| Zahřívání cívky bez ferokapalinou | | | | |
|--|---------|----------|-------------------------|---------|
| U [V] | t [s] | I [mA] | $T_{\text{cívky}}$ [°C] | R [Ω] |
| 55 | 0 | 118,8 | 36,4 | 6,534 |
| | 10 | 118,41 | 37,5 | 6,5126 |
| | 20 | 117,75 | 38 | 6,4763 |
| | 30 | 117,25 | 38,2 | 6,4488 |
| | 40 | 116,72 | 39,3 | 6,4196 |
| | 50 | 116,25 | 40,7 | 6,3938 |
| | 60 | 115,7 | 41,3 | 6,3635 |
| | 70 | 115,29 | 42,5 | 6,341 |
| | 80 | 114,83 | 43,4 | 6,3157 |
| | 90 | 114,41 | 44,8 | 6,2926 |
| | 100 | 114,03 | 45 | 6,2717 |
| | 110 | 113,64 | 45,2 | 6,2502 |
| | 120 | 113,29 | 46,2 | 6,231 |
| | 130 | 112,92 | 47,7 | 6,2106 |
| | 140 | 112,58 | 48,1 | 6,1919 |
| | 150 | 112,25 | 49,2 | 6,1738 |
| | 160 | 111,96 | 50,2 | 6,1578 |
| | 170 | 111,68 | 50,3 | 6,1424 |
| | 180 | 111,41 | 51 | 6,1276 |
| | 190 | 111,13 | 51,2 | 6,1122 |
| | 200 | 111,05 | 51,9 | 6,1078 |
| | 210 | 110,87 | 52,3 | 6,0979 |
| | 220 | 110,46 | 53,5 | 6,0753 |
| | 230 | 110,09 | 54,3 | 6,055 |
| | 240 | 109,89 | 54,5 | 6,044 |
| | 250 | 109,65 | 55,5 | 6,0308 |
| | 260 | 109,44 | 55,7 | 6,0192 |
| | 270 | 109,23 | 56,4 | 6,0077 |
| | 280 | 109,04 | 57 | 5,9972 |
| | 290 | 108,85 | 57,2 | 5,9868 |
| 300 | 108,65 | 57,4 | 5,9758 | |

Tab. 8.11 Vliv teploty na dobu sepnutí stykače

| Vliv teploty na dobu sepnutí | | | | |
|------------------------------|----------|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| U [V] | I [mA] | $T_{\text{cívky}}$ [°C] | T_{δ} [°C] | t_{sep} [ms] |
| 140 | 283,4 | 47,6 | 39,7 | 32,8 |
| | | 42,4 | 37,8 | 31,6 |
| | | 39,2 | 35,9 | 31,2 |
| | | 36,1 | 33,8 | 30,0 |
| | | 34,0 | 32,1 | 29,6 |
| | | 32,4 | 30,9 | 29,2 |

Tab 8.12 Použité měřicí přístroje a zdroje:

| Název | Typ | ID |
|------------------------------------|---------------------|------------|
| LCR metr | Keysight | 226872 |
| Osciloskop | Tektronix TDS 2014B | 500532 |
| SS zdroj | STATRON 225 | / |
| SS zdroj | STATRON 225 | 500531.002 |
| Digitální multimetr | AGILENT 34460A | 215126 |
| Digitální multimetr s termočlánkem | METEX M-3850 | 45011 |

9 Použitá literatura

[1] MAYER, D., Západočeská univerzita v Plzni. *Magnetické kapaliny a jejich použití* [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_40/e1030778.pdf

[2] KÚREČKA, J. *Magnetické kapaliny používané ve fluidním inženýrství* [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=85891

[3] CINGROŠ, F. *Magnetické kapaliny a jejich uplatnění v tepelných systémech* [online].[cit. 2015-05-20] Dostupné z: <http://www.3pol.cz/cz/rubriky/fyzika-a-klasicka-energetika/664-magneticke-kapaliny-a-jejich-uplatneni-v-tepelnych-systemech>

[4] BERSELLI, G., VARTECHY, R., VASSARA, V. *MR Fluid Damper and Its Application to Force Sensorless Damping Control System*, ISBN 978-953-51-0798-9, Published: October 17, 2012 under CC BY 3.0 license. [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/smart-actuation-and-sensing-systems-recent-advances-and-future-challenges/mr-fluid-damper-and-its-application-to-force-sensorless-damping-control-system>

[5] *Artificial Muscle Manipulator* [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: <http://www.mech.chuo-u.ac.jp/~nakalab/study/sr/emr.html>

[6] *Role of a Ferrofluid in a Loudspeaker System* [online].[cit. 2015-05-20] Dostupné z: http://www.liquidsresearch.com/en-GB/for_loudspeaker_applications-53.aspx

[7] *Ferrofluids for Medicine* [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: <http://www.ferrolabs.com/en/information/33>

[8] POLCAR, P. *Elektromechanický systém s magnetickou kapalinou*, západočeská univerzita v Plzni 2013 [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: [http://www.fel.zcu.cz/urednidesky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autor eferaty/130924_autoreferat_Polcar_Petr.pdf](http://www.fel.zcu.cz/urednidesky/UD_PhD/Probihajici_SDZ_a_obhajoby/Autor_eferaty/130924_autoreferat_Polcar_Petr.pdf)

[9] Stykač. Wikipedia: the free encyklopedia [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: http://www.cs.wikipedia.org/wiki/Stykač#/media/File:Threephase_contactor_principle_horizontal_numbered.jpg

[10] Agros 2D [online].[cit. 2015-05-20] Dostupné z: <http://www.agros2d.org/>

[11] Agros 2D. Wikipedia: the free encyklopedia [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/Agros2D>

[12] Okrajové podmínky [online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z: http://www.urel.feec.vutbr.cz/~raida/multimedia/index.php?nav=def&src=okrajove_podminky&bck=2-5-B

[13] Matlab[online].[cit. 2015-05-20]

Dostupné z:<http://www.mathworks.com/products/matlab/>

[14] MAYER, D. *Elektronika v energetice* 1. Vydání, Praha 2005. ISBN 80-7300-164-0