

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE**

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Využití magnetických kapalin v elektromechanických  
systémech**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2013/2014

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Josef ČESKÝ**  
Osobní číslo: **E12N0113P**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Elektroenergetika**  
Název tématu: **Využití magnetických kapalin v elektromechanických systémech**  
Zadávací katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

### Zásady pro vypracování:

1. Popište fyzikální vlastnosti, složení, členění, způsoby výroby a průmyslové aplikace magnetických kapalin.
2. Zhodnoťte možnosti využití magnetických kapalin pro teoretické zvýšení účinnosti elektromechanických zařízení.
3. Experimentálně ověřte statické a dynamické výstupy elektromechanického zařízení s magnetickou kapalinou a zhodnoťte vliv kapaliny.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah pracovní zprávy: 30 - 40 stran

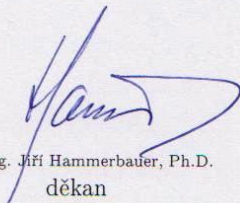
Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:


1. Odenbach, S.: **Ferrofluids - Magnetically Controlled Suspensions, Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 2003, pp. 171,178
2. Mayer, D., Polcar, P.: **Design of a Stepper Transducer with Ferroliquid**, Proc., AMTEE 2011, Pilsen, 2011
3. Další bude předána při konzultaci

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

Datum zadání diplomové práce: **14. října 2013**  
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2014**

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



  
Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

## **Abstrakt**

Práce se zabývá využitím ferokapalin v elektromechanických systémech. V práci jsou uvedeny fyzikální vlastnosti, způsoby výroby a průmyslové aplikace magnetických kapalin. V úvodní části je uveden teoretický rozbor zvýšení účinnosti elektromechanických zařízení s využitím ferokapalin. Popsané experimenty s permanentními magnety ukázaly, jaké je chování ferokapaliny v magnetickém poli. Z experimentů se vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu je patrné zvýšení přitažných sil díky magnetickým vlastnostem kapaliny v závislosti na množství kapaliny, na velikosti vzduchové mezery a na indukci. Magnetická kapalina byla aplikována do univerzálního komutátorového stroje a bylo prokázáno zvýšení účinnosti o 5,9 % do rychlosti 300 ot/min.

## **Klíčová slova**

magnetická kapalina, ferokapalina, magnetická indukce, univerzální komutátorový motor, elektromechanický systém, účinnost, magnetický obvod, elektrický stroj

## **Abstract**

The work deals with the use of ferrofluids in electromechanical systems. The physical properties, production methods and industrial applications of magnetic fluids are presented in the paper. The introduction provides a theoretical analysis of increasing of electro-mechanical equipment efficiency using ferrofluids. The described experiments with permanent magnets showed what is the behavior of ferrofluids in the magnetic field. From the experiments with an air gap in the magnetic circuit there is apparent the increase of attractive powers thanks to magnetic features of the fluid depending on the amount of the fluid, the size of an air gap and the induction. The magnetic fluid was used in a universal commutator electric motor 5,9 % efficiency increase up to the speed of 300 rpm was proved.

## **Key words**

magnetic fluid, ferrofluid, flux density, universal commutator electric motor, electromechanical system, efficiency, magnetic circuit, electric engine

## **Prohlášení**

Čestně prohlašuji, že jsem svoji diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím literatury a zdrojů uvedených v seznamu použité literatury. Veškerý software použitý při vypracování diplomové práce je legální a byl využit s respektováním všech jeho licenčních podmínek.

V Plzni dne 7.5.2014

Jméno příjmení

.....

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Petru Polcarovi, Ph.D. za konzultace a cenné rady při vypracování této práce. Zároveň děkuji své rodině za podporu během studia.

Tato práce vznikla za podpory projektu Západočeské univerzity v Plzni, jmenovitě projektu SGS-2012-039: Pokročilé metody teoretického a aplikovaného výzkumu v elektrotechnice.

# Obsah

<b>OBSAH</b> .....	<b>8</b>
<b>1 ÚVOD</b> .....	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK</b> .....	<b>10</b>
<b>2 PARAMETRY MAGNETICKÝCH KAPALIN</b> .....	<b>12</b>
2.1 FYZIKÁLNÍ VLASTNOSTI.....	12
2.2 SLOŽENÍ.....	13
2.3 ČLENĚNÍ.....	14
2.4 ZPŮSOBY VÝROBY .....	14
2.5 PRŮMYSLOVÉ APLIKACE .....	15
2.5.1 Těsnění rotující hřídele.....	15
2.5.2 Magnetická spojka .....	16
2.5.3 Ferrohydrodynamické tlumiče.....	16
2.5.4 Chlazení reproduktorů .....	17
2.5.5 Elektrické stroje s magnetickou kapalinou.....	18
<b>3 VYUŽITÍ MAGNETICKÝCH KAPALIN PRO TEORETICKÉ ZVÝŠENÍ ÚČINNOSTI ELEKTROMECHANICKÝCH ZAŘÍZENÍ</b> .....	<b>19</b>
3.1 ELEKTRICKÉ PŘÍSTROJE .....	20
3.2 ELEKTRICKÉ STROJE .....	20
<b>4 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ TEORETICKÝCH PŘEDPOKLADŮ</b> .....	<b>22</b>
4.1 MĚŘENÍ Č. 1 – PŘÍTAŽNÁ SÍLA KAPALINY K PM.....	22
4.2 MĚŘENÍ Č. 2 – ZVÝŠENÍ PŘÍTAŽNÝCH SIL.....	24
4.2.1 Pomocí siloměru .....	24
4.2.2 Pomocí váhy.....	25
4.3 MĚŘENÍ Č. 3 – NA MAGNETICKÉM OBVODU .....	27
4.3.1 Měření vlivu indukce v mezeře.....	27
4.3.2 Měření vlivu velikosti vzduchové mezery .....	28
4.3.3 Měření vlivu množství kapaliny.....	29
4.3.4 Zhodnocení chyb při měření .....	30
4.4 MĚŘENÍ Č. 4 – MĚŘENÍ NA MOTORU .....	31
4.4.1 Měření nakrátko.....	31
4.4.2 Měření zrychlení se setrvačником .....	34
4.4.3 Měření při vyšších otáčkách .....	39
4.5 MĚŘENÍ Č. 5 – POUŽITÍ KAPALINY VE VĚTRÁKU .....	46
<b>5 ZÁVĚR</b> .....	<b>47</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ</b> .....	<b>48</b>
<b>6 PŘÍLOHY</b> .....	<b>1</b>
6.1 MĚŘENÍ Č.1 – PŘÍTAŽNÁ SÍLA KAPALINY K PM .....	1
6.2 MĚŘENÍ Č.2 – ZVÝŠENÍ PŘÍTAŽNÝCH SIL .....	3
6.3 MĚŘENÍ Č.3 – NA MAGNETICKÉM OBVODU.....	6
6.4 MĚŘENÍ Č.4 – MĚŘENÍ NA MOTORU .....	12



# 1 Úvod

Spotřeba elektrické energie celosvětově trvale roste. Neobnovitelné zdroje energie začínají pomalu docházet a naším úkolem by mělo být naučit se energii co nejefektivněji využívat. Proto jsem si vybral toto téma a pokusil se ověřit, zda by bylo možné zvýšit účinnost některých elektromechanických zařízení s využitím magnetických kapalin.

Magnetické kapaliny se dělí na magnetoreologické kapaliny a na ferokapaliny, přičemž tato práce se zabývá zejména ferokapalinami. Ferokapaliny jsou tekutá suspenze z magnetických nanočástic, povrchově aktivní látky a rozpouštědla, magnetickou složkou je většinou hematit nebo magnetit. Aby nedocházelo ke shlukování nanočástic, je použito detergent, který tomuto shlukování zabrání. [1] Kapaliny mají relativní permeabilitu přibližně třikrát větší než vzduch a jejich další důležitou vlastností je, že v magnetickém poli nemění svoji viskozitu. [2]

Hlavním cílem práce je experimentálně zjistit, jestli by ferokapalina mohla zvýšit účinnost některých strojů. Aplikováním ferokapaliny do vzduchové mezery motoru teoreticky dojde ke zvýšení magnetické vodivosti této mezery, a tedy i zvýšení momentů stroje při zachování stejného proudu.

Nejprve jsou popsány parametry magnetických kapalin, jejich fyzikální vlastnosti, způsoby výroby, složení a současné průmyslové aplikace. V následující části práce nalezneme teoretický rozbor vlivů ferokapalin v elektrických strojích a přístrojích. Práci, které se zabývají využitím kapalin v elektrických motorech, není mnoho, a proto musely být navrženy jednotlivé experimenty s permanentními magnety, které potvrdily teoretické předpoklady dílčích vlivů kapaliny. Po praktickém zjištění těchto pozitivních vlivů byl vybrán elektrický stroj, na němž se experimentálně prokázalo, zda magnetická kapalina ve vzduchové mezeře může být výhodou a za jakých okolností bude její použití nejvhodnější.

## Seznam symbolů a zkratek

### Zkratky

kap.....	kapalina
MR .....	magnetorheologická kapalina
PM.....	permanentní magnet
zbyt.....	zbytek

### Symboly

$B$ .....	magnetická indukce [T]
$F$ .....	síla [N]
$\Delta F$ .....	zvýšení sil [N], [%]
$\Sigma \Delta F$ .....	součet přírůstků sil [N]
$H$ .....	intenzita magnetického pole [A/m]
$I$ .....	proud [A]
$J$ .....	moment setrvačnosti [kg·m <sup>2</sup> ]
$M$ .....	moment [N·m]
$m$ .....	hmotnost [g]
$N$ .....	počet závitů [-]
$n$ .....	otáčky [1/min]
$P$ .....	činný výkon [W]
$Q$ .....	množství kapaliny [ml]
$R$ .....	elektrický odpor [ $\Omega$ ]
$r$ .....	poloměr [mm]
$t$ .....	čas [s]
$U$ .....	napětí [V]
$U_{mg}$ .....	magnetické napětí [A]
$\gamma$ .....	konduktivita [S·m <sup>-1</sup> ]
$\delta$ .....	velikost vzduchové mezery [mm]
$\eta$ .....	účinnost [-]
$\phi$ .....	magnetický tok [Wb]
$\omega$ .....	úhlový kmitočet [rad·s <sup>-1</sup> ]

*Indexy*

<i>BEZ</i> .....	bez kapaliny
<i>b</i> .....	budící
<i>C</i> .....	celková
<i>el</i> .....	elektrický
<i>G</i> .....	gravitační
<i>j</i> .....	Jouleovy (ztráty)
<i>KOR</i> .....	korekční
<i>k</i> .....	kapaliny
<i>L</i> .....	levá
<i>m</i> .....	mechanický
<i>mech</i> .....	mechanické (ztráty)
<i>mg</i> .....	magnetický
<i>o</i> .....	ohybová
<i>P</i> .....	pravá
<i>p</i> .....	průměrná
<i>R</i> .....	remanence
<i>sK</i> .....	s kapalinou
<i>lml</i> .....	na jeden mililitr kapaliny

## 2 Parametry magnetických kapalin

Ferokapaliny jsou tvořeny malými feromagnetickými částicemi o přibližně kulovém tvaru a s průměrem řádově v nanometrech (převážně 3 až 15 nm). Tyto nanočástice jsou umístěny v nosné kapalině. Magnetoreologické kapaliny obsahují nekoloidní suspenzi feromagnetických mikročástic s rozměry kolem 5  $\mu\text{m}$ . [3]

### 2.1 Fyzikální vlastnosti

Každá nanočástice má svůj magnetický moment, protože tvoří Weissovu doménu se spontánní magnetizací. Díky magnetickému momentu si můžeme nanočástici představit jako miniaturní permanentní magnet. Bez působení magnetického pole se nanočástice pohybují v nosné kapalině tepelným Brownovým pohybem, magnetické momenty nanočástic jsou náhodně orientovány a kapalina se z vnějšího pohledu zdá nemagnetická. Magnetické vlastnosti magnetické kapaliny jsou určeny typem nanočástic a jejich koncentrací, nosná kapalina pak určuje chemické a mechanické vlastnosti. Při působení magnetického pole na kapalinu se budou její nanočástice stáčet do směru magnetického pole, budou se tedy polarizovat. Magnetická kapalina je vtahována do magnetického pole díky působení magnetických sil na nanočástice, tudíž na celou kapalinu. [3]

Některé fyzikální vlastnosti magnetické kapaliny se mění při vložení kapaliny do magnetického pole, například se zvyšuje jejich viskozita s rostoucí intenzitou magnetického pole, což se nazývá magnetoviskózní jev. Díky detergentovým řetězcům může zůstat kapalina tekutá i v silném magnetickém poli. Při zkoumání viskozity je třeba rozlišovat stejnosměrné a střídavé magnetické pole, přičemž každé z těchto polí působí na kapalinu jinak. Odezva viskozity na změnu magnetického pole je řádově v milisekundách. U některých ferokapalin byla zaznamenána i negativní viskozita, to znamená, že ve střídavém poli jisté frekvence s rostoucí intenzitou magnetického pole jejich viskozita klesá. Viskozita ferokapalin je samozřejmě závislá také na teplotě a to tak, že s rostoucí teplotou viskozita přibližně exponenciálně klesá. [1]

Pracovní teploty se pohybují od  $-125$  do  $200$   $^{\circ}\text{C}$ . K saturaci dochází kolem indukce 1,3 T. Závislost magnetické indukce na intenzitě magnetického pole ferokapaliny má podobný průběh jako u feromagnetik. S rostoucí intenzitou a indukcí se asymptoticky blíží k hodnotě

saturace, dále se ferokapaliny vyznačují vysokou magnetickou susceptibilitou, která klesá se zvyšující se teplotou, až při Curieově teplotě ztrácí své magnetické vlastnosti. Feromagnetika mají Curieovu teplotu vždy menší než je jejich teplota tavení. Z tohoto vyplývá, že magnetické domény těchto látek ztratí svou spontánní magnetizaci dříve, než přejdou do kapalného stavu. Oproti tomu jsou ferokapaliny v kapalném stavu stále. Někdy jsou ferokapaliny označovány jako superparamagnetika, z fyzikálního hlediska se totiž chovají přibližně jako paramagnetika. [3]

## 2.2 Složení

Nanočástice v magnetické kapalině mohou být z práškového železa nebo z jiné látky obsahující ionty  $\text{Fe}^{2+}$  nebo  $\text{Fe}^{3+}$  (např. oxid železa – magnetit  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  nebo maghemit). Mohou být také z niklu, feritu či jiných kovů. Nosnou kapalinou pro nanočástice může být voda, minerální či syntetický olej, glykol aj. [3]

Důležitým kritériem pro hodnocení kvality magnetických kapalin je koloidní stabilita. Magnetická kapalina je koloidně stabilní, když v kapalině nedochází ke shlukování (agregaci) magnetických nanočástic. Toto shlukování částic může být způsobeno vlivem přitažlivých van der Walsových a magnetických sil. Koloidní stability je dosahováno díky pokrytí jednotlivých nanočástic ochranným polymerním (makromolekulárním) obalem. Tento obal se nazývá detergentem, surfaktantem či povrchově aktivní látkou. Detergent je tvořen dlouhými řetězci polárních molekul (např. kyseliny mastné) a zabraňuje přímému kontaktu mezi nanočásticemi (díky detergentu se částice odpuzují). Jedním koncem je řetězec vázán na magnetickou nanočástici, tomuto konci říkáme hydrofilní hlava. Druhým koncem je pak volněji přitahován molekulami nosného média, tento konec je nazýván hydrofobním ocasem. Délky řetězců jsou 1 až 2 nm. [3]

Chemické znehodnocování detergentových řetězců na povrchu nanočástic je silně závislé na teplotě. Vlivem vyšší teploty se postupně snižuje reverzibilita změn viskozity. Vyšší teplota a teplotní změny snižují životnost ferokapalin, která je zhruba několik let. Ferokapaliny se obvykle skládají z 5 % pevných magnetických látek, 10 % detergentu a 85 % nosné kapaliny (bráno objemově). [1]

## 2.3 Členění

Magnetické kapaliny dělíme na ferokapaliny a magnetoreologické (MR) kapaliny. [2]

- MR kapaliny
  - MR kapaliny obsahují mikročástice (5  $\mu\text{m}$ ) z feromagnetického materiálu. U těchto kapalin se projevuje magnetoviskózní jev, kdy jejich viskozita je značně závislá na působícím magnetickém poli. [2]
- Ferokapaliny
  - Ferokapaliny obsahují nanočástice (10 nm) z feromagnetického materiálu. Magnetoviskózním jevem se nevyznačují. [2]

## 2.4 Způsoby výroby

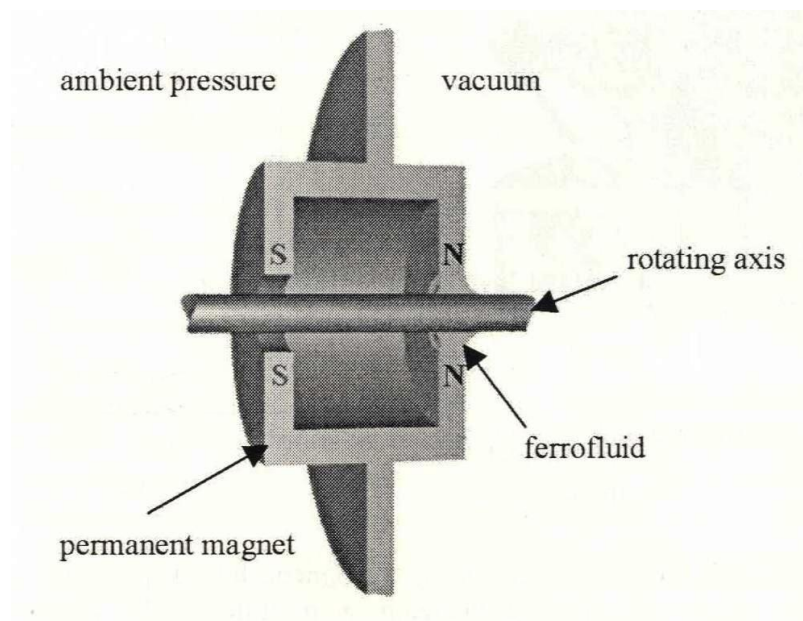
Koloidní ferokapaliny se volně v přírodě nevyskytují a musí se vytvářet synteticky. Jejich výroba může probíhat podle několika technologických postupů. Jednou z nejstarších výrobních metod je fyzikálně chemický postup založený na dlouhodobém mechanickém drcení. Drtí se nejčastěji feromagnetické, magnetitové nebo feritové částice. Drcení probíhá až tisíc hodin za přítomnosti vhodného detergentového roztoku. Tento proces je označován jako mokré mletí. Po drcení následuje odstředivé odseparování hrubších částic. Dalšími výrobními postupy jsou postupy založené na různých fyzikálně chemických procesech. Tyto výrobní technologie bývají rychlejší. Příkladem těchto fyzikálně chemických procesů je chemická precizace (vylučování) magnetických částic z roztoků železitých solí, elektrolýza, odpařování, vločkování apod. Konečnou částí chemické výroby magnetických kapalin je čištění. Sedimentací či odstředováním se musí odstranit větší nanočástice, dále následuje ředění pro dosažení vhodné koncentrace. [3]

## 2.5 Průmyslové aplikace

Vzhledem k pozoruhodným vlastnostem magnetických kapalin je pravděpodobné, že se v budoucnu stanou součástí mnoha elektromechanických zařízení. S využitím magnetických kapalin byly vyvinuty nové přístroje a nové technologie. Mnoho aplikací je zatím ve vývoji. Důvodem k vývoji těchto kapalin bylo řízení toku tekutého paliva kosmických raket v beztlakovém stavu. [3]

### 2.5.1 Těsnění rotující hřídele

Těsnění rotujících hřídelí je asi nejznámější aplikace magnetických kapalin. Jak můžeme vidět na obr. 1, rotující hřídel vyrobená z materiálu s vysokou permeabilitou je obklopená permanentním magnetem. Když je vzduchová mezera mezi hřídelí a magnetem dostatečně malá, tzn. velká několik desetin milimetru, magnetické pole v mezeře může snadno dosáhnout indukce kolem 1 T. Kolem vzduchové mezery je magnetické pole zanedbatelné, to vede k vysokému gradientu pole v oblasti vzduchové mezery. Když je ferrokapalina umístěna do vzduchové mezery, magnetické síly působící na kapalinu mohou být dostatečně vysoké k udržení kapaliny v této pozici, přestože proti této síle působí rozdíl tlaků. [1]



Obr. 1 Těsnění rotující hřídele (převzato z [1])

Při hodnotách magnetické intenzity  $H = 1,5 \cdot 10^4$  kA/m, může být kapalina držena proti tlakovému rozdílu přibližně 1 bar. Tření tohoto těsnění o hřídel je zanedbatelné ve srovnání s konvenčními těsníci technikami, např. olejovým těsněním. Díky této výhodě se toto těsnění používá v mnoha technických aplikacích (těsnění harddisků nebo těsnění v rotujících

rentgenkách). Kombinace této těsnicí techniky s levitací nemagnetických materiálů ve feroKapalině v magnetickém poli umožnila návrh ložisek s magnetickou kapalinou. Samotná magnetická levitace je používána k magnetohydrostatické separaci rud. [1]

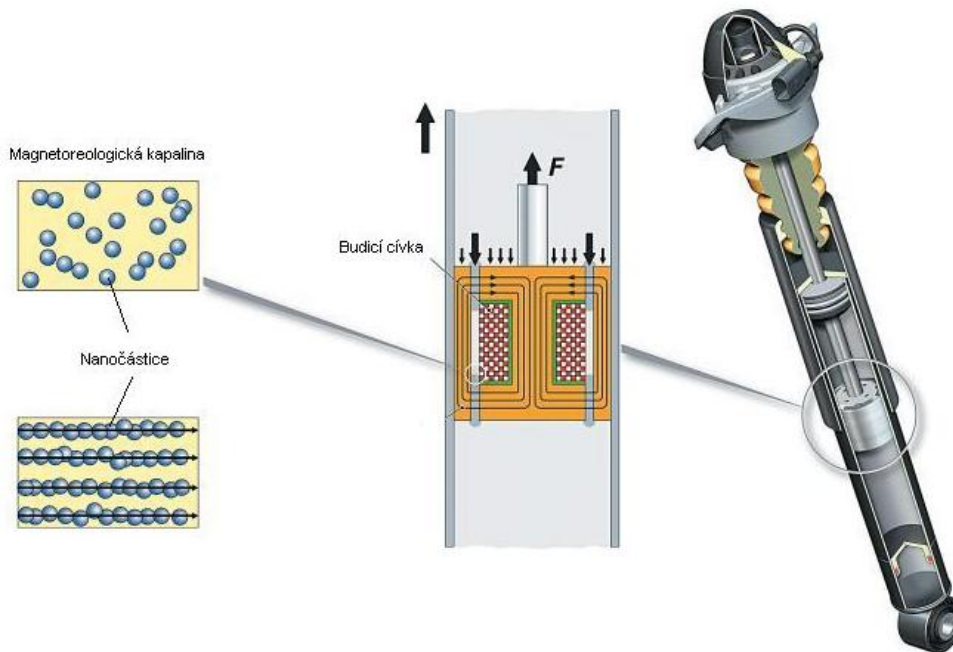
### 2.5.2 Magnetická spojka

Magnetická spojka se skládá z více disků, které jsou střídavě konstrukčně připojeny ke dvěma hřídelím. Disky jsou z magneticky měkkého feromagnetika a jejich množství se pohybuje kolem dvaceti. Prostor mezi disky je vyplněn magnetickou kapalinou. U disků je budící cívka, která vyváří magnetické pole. Jestliže cívku neprochází budící proud, na kapalinu nepůsobí magnetické pole a spojka přenáší pouze velmi malý kroučící moment vzniklý přirozenou viskozitou kapaliny. Je-li do cívky přiveden proud, vzniklé magnetické pole zvýší viskozitu magnetické kapaliny, a tak i přenášený moment. Pro magnetickou spojku je nejlepší použít magnetickou kapalinu se silným viskózním efektem. Vhodnou kapalinou je magnetorheologická kapalina. Na podobném principu může být zkonstruována také magnetická brzda. [16]

### 2.5.3 Ferohydrodynamické tlumiče

Nežádoucí kinetická energie kmitání je ferohydrodynamickými tlumiči přeměněna na tepelnou energii. Tuhost tlumičů s magnetickou kapalinou se reguluje proudovým signálem přivedeným do cívky tlumiče. V cívce se indukují magnetické pole, které zvýší viskozitu MR kapaliny. Čím je vyšší magnetické pole, tím je vyšší tlumení tlumiče. Tyto tlumiče již byly úspěšně použity v některých aplikacích jako například u jemných měřících přístrojů, automatických praček, sedadel nákladních aut, atd. [15]



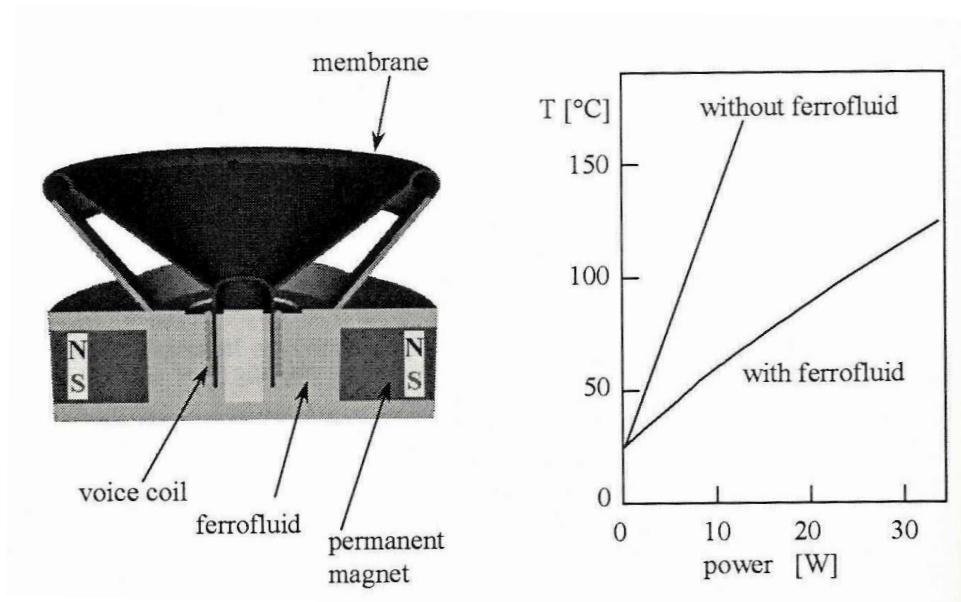


Obr. 2 Magnetorheologický tlumič (převzato [15])

Na obr. 2 je zobrazen magnetorheologický tlumič s pístem, v němž je několik kanálků, jimiž proudí magnetoreologická kapalina. Kanálky mají budící cívku, která vytváří magnetické pole. Působením tohoto pole se vytvoří v kapalině řetězce z feromagnetických částic a dojde ke zvýšení viskozity kapaliny. Velkou výhodou tlumičů s magnetickou kapalinou je jejich velmi rychlá odezva a poměrně jednoduchá konstrukce. [15]

#### 2.5.4 Chlazení reproduktorů

Magnetické kapaliny mohou být použity jako médium k přenosu tepla. To, že mohou být drženy v určité pozici, je značně výhodné. Hlavní teplotní aplikací dnešní doby je chlazení reproduktorů, jež umožňuje významný vzrůst maximálního akustického výkonu bez geometrických změn v reproduktoru. Problémem vysokého výkonu v reproduktorech je odvod ohmického tepla z kmitající cívky do kostry reproduktoru. [1]



Obr. 3 Chlazení reproduktorů (převzato z [1])

### 2.5.5 Elektrické stroje s magnetickou kapalinou

Použití magnetických kapalin v netočivých a v točivých strojích je zatím ve vývoji. U výkonových transformátorů se do budoucna předpokládá využití kapaliny jako chladicího média. Ferokapalina má totiž větší tepelnou kapacitu než transformátorový olej. Její elektrická pevnost je pro střídavé napětí srovnatelná s elektrickou pevností transformátorového oleje, a dokonce je vyšší pro stejnosměrné napětí. [15]

Magnetickou kapalinou ve vzduchové mezeře točivého stroje se již zabývali v [17], [18]. Z uskutečněných experimentů je patrný pozitivní vliv ferokapaliny u točivých strojů do rychlosti 1000 ot/min. [15]

### 3 Využití magnetických kapalin pro teoretické zvýšení účinnosti elektromechanických zařízení

V elektromechanických zařízeních je přeměna energie většinou vyvolána působením sil mezi pevnou a pohyblivou částí měniče, které jsou odděleny vzduchovou mezerou. Pro zavedení magnetického toku do míst, kde dochází k interakci s pohyblivou částí měniče, je potřeba materiál s velkou magnetickou vodivostí. Díky velké vodivosti může mít magnetické napětí relativně nízké hodnoty. [5]

Použijeme-li magnetickou kapalinu ve vzduchové mezeře měniče, snížíme tím magnetický odpor vzduchové mezery. Protože platí

$$\Phi = \frac{U_{mg}}{R_{mg}}, \quad (3.1)$$

bude nám stačit pro zachování stejného magnetického toku nižší magnetické napětí. Když vezmeme v úvahu, že

$$U_{mg} = N i, \quad (3.2)$$

znamená to také zmenšení objemu budícího vinutí a snížení ztrát v tomto vinutí.

Použijeme-li základní fyzikální zákon zachování energie, můžeme psát energetickou bilanci ve tvaru:

$$dW_{el} = dW_j + dW_{mg} + dW_{mech} \quad (3.3)$$

$$dW_{el} = u i dt \quad (3.4)$$

$$dW_j = R i^2 dt \quad (3.5)$$

$$dW_{mech} = F dx \quad (3.6)$$

S magnetickou energií  $W_{mg}$  není nutné v elektromechanické přeměně počítat, neboť je v dostatečně dlouhém časovém intervalu nulová (nabíjí a vybíjí magnetický obvod). Ztráty lze rozepsat, jak je uvedeno v [5]:

$$\sum \Delta P = \Delta P_j + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_d \quad (3.7)$$

V neideálním magnetickém obvodu vznikají ztráty v železe  $\Delta P_{Fe}$ , těmi se však v této práci nebudeme zabývat. Nebudeme řešit ani ztráty přídavné  $\Delta P_d$ , které jsou způsobeny obtížně specifikovatelnými jevy. Pro zajištění vyšší efektivity elektromechanických zařízení bude důležité najít taková zařízení, u nichž se podaří pomocí magnetické kapaliny snížit proud ve vinutí při zachování magnetického toku. Toto snížení Jouleových ztrát  $\Delta P_j$  musí být větší než zvýšení mechanických ztrát  $\Delta P_{mech}$ , které se pravděpodobně zvýší díky tření v magnetické kapalině. Účinnost poté určíme ze vztahu:

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P}{P + \sum \Delta P} \quad (3.8)$$

### 3.1 Elektrické přístroje

Dle [7] je možné rozdělit elektrické přístroje podle funkce:

- Spínací přístroje
  - Na hladinách malého a nízkého napětí: vypínače, přepínače, tlačítka, ovládače, stykače apod.
  - Na hladinách vysokého, velmi vysokého a značně vysokého napětí: vypínače, odpínače, odpojovače, uzemňovače, zkratovače apod.
- Jistící přístroje
  - Pojistky, jističe, svodiče přepětí apod.
- Ochranné přístroje
- Řídící přístroje
- Regulační přístroje

Z předchozího výčtu přístrojů by mohla magnetická kapalina nalézt využití například ve spínacích přístrojích.

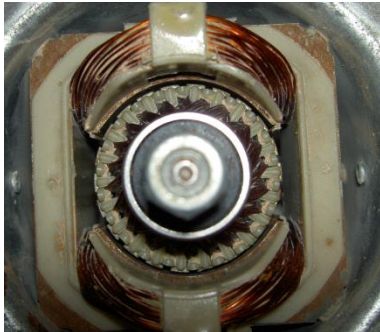
Ovládací mechanismy spínacích přístrojů mají různé pohonné jednotky. U strojního přímého pohonu to může být tlakovzdušný nebo hydraulický systém s tlakovým zásobníkem, elektromagnet nebo elektromotor. [8]

### 3.2 Elektrické stroje

Účinnost elektrických strojů bývá vysoká, například u velkých transformátorů je to více než 99 % a u velkých točivých strojů kolem 98 % [5]. V těchto případech není příliš velký prostor na vylepšování účinnosti. Proto se zaměříme spíše na stroje středních a malých

výkonů. U středně velkých točivých strojů se účinnosti pohybují v rozmezí 75 – 85 % a u strojů v rozsahu jednotek až desítek wattů může být pouze 15 – 30 %. [5]

Pro experimentální použití magnetické kapaliny v elektrických strojích byl vybrán univerzální jednofázový sériový komutátorový motor 1600 W. Tento typ motoru najdeme



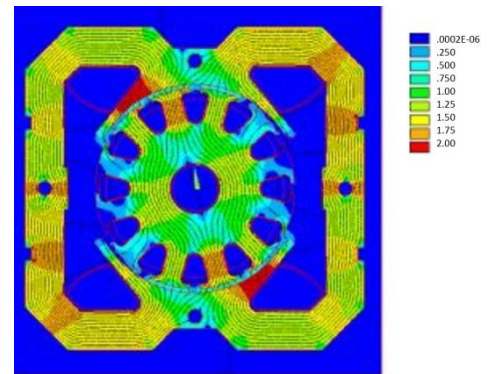
Obr. 4 Univerzální motor

v šicích strojích, holicích strojkách, fénech, v mixérech, vysavačích apod. Stroj pracuje při vysokých otáčkách a má vysoký záběrný moment při malých rozměrech stroje. [9]

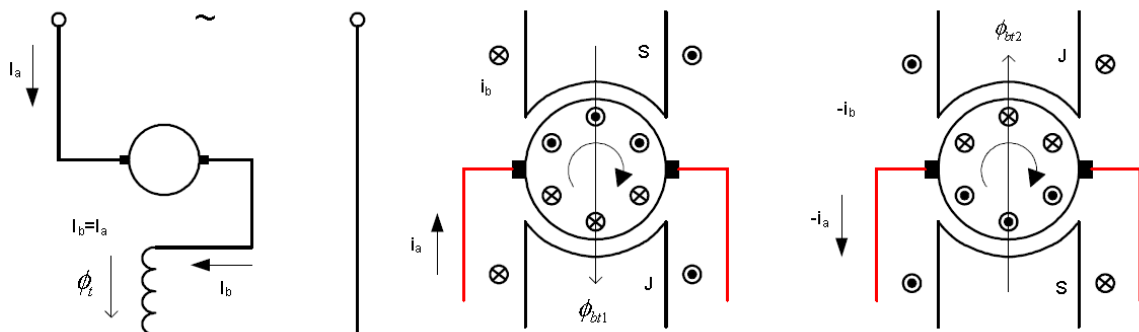
Tento motor byl vybrán díky jeho univerzálnosti. Díky tomu, že motor lze napájet stejnosměrně i střídavě, je vhodný pro zjištění odlišností v chování magnetické kapaliny pro různé typy napájení. Výhodou pro naše měření je i jeho

jednoduchost, velká závislost otáček na zatížení a možnost proměření vlastností kapalin až do vysokých otáček.

Rotor je tvořen normální stejnosměrnou kotvou s komutátorem. U menších strojů má stator vyjádřené póly, větší stroje mají stator s rozloženým vinutím, které je uloženo v drážkách. Stroj obvykle bývá dvoupólový. Na obr. 6 vidíme schéma jednofázového motoru se sériovým zapojením kotvy a budícího vinutí. Buzením a vinutím kotvy prochází (při střídavém napájení) v každém okamžiku proud jiného smyslu. Síla působící na vinutí kotvy je vždy stejného smyslu, protože smysl proudu v kotvě a polarita pólů se mění současně. [10]



Obr. 5 Rozložení magnetické indukce ve stroji, v T, převzato a upraveno z [11]



Obr. 6 Schéma a smysl tažné síly při sériovém zapojení kotvy a buzení komutátorového motoru, převzato z [10]

## 4 Experimentální ověření teoretických předpokladů

### 4.1 Měření č. 1 – Přitažná síla kapaliny k PM

Při tomto měření se zjišťovalo, jakou silou je přitahována ferokapalina k permanentnímu magnetu. Měření bylo prováděno pomocí siloměru, permanentního magnetu a dvou skel k zabránění kontaktu mezi magnetem a kapalinou (viz obr. 7).

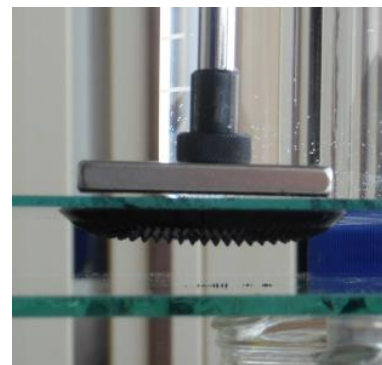


**Obr. 8** Měření siloměrem

faktorech, ale pro základní porovnání postačí. Například je lze porovnat s gravitační silou působící na 1 ml kapaliny. Jeden mililitr ferokapaliny váží 1,155 g, gravitační síla působící na 1 ml je tedy přibližně 0,01 N, což je zhruba stokrát méně. Předchozí srovnání je velmi důležité, neboť ukazuje, že gravitační sílu je možné v některých případech zanedbat.

Na tyčku siloměru byl přichycen magnet, jenž se nacházel těsně nad horním malým sklem obr. 8). Mezi skla byla po mililitrech dávkována ferokapalina. Dle teoretického předpokladu kapalina vtékala do oblasti s nejvyšší indukcí. V tomto případě šlo o indukci o velikosti  $B = 190 \text{ mT}$ . Jednalo se o průměr z pěti změřených indukcí (viz tab. č. 4 v příloze), neboť nevýhodou tohoto měření je nehomogenní magnetické pole kolem magnetu. Oproti tomu velkou výhodou je jednoduchost měření, které nám nastíní základní údaje o možnostech použití magnetických kapalin.

Výsledkem měření jsou dva grafy a zjištění, jež nám říká, že při indukci 190 mT působí na 1 ml kapaliny síla 0,5 – 1 N. Tyto hodnoty sil závisí ještě na mnoha dalších



**Obr. 7** Tyčka s magnetem

Na obr. 9 můžeme vidět nárůst přitažné síly s množstvím kapaliny v magnetickém poli. Zajímavý je i druhý graf, který zobrazuje přitažnou sílu na 1 ml kapaliny.



Obr. 9 Celková přitažná síla

Přitažná síla na 1 ml kapaliny je zde počítána jako poměr celkové přitažné síly k množství kapaliny. Z grafu vyplývá, že se zvyšujícím se množstvím kapaliny klesá přírůstek síly na další mililitr. Zde to může být způsobeno klesajícím magnetickým polem se vzdáleností od magnetu.

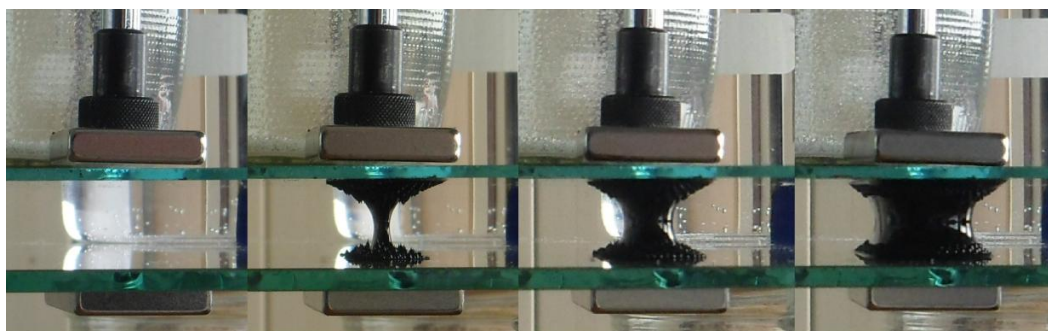


Obr. 10 Přitažná síla na 1 ml kapaliny

## 4.2 Měření č. 2 – Zvýšení přitažných sil

### 4.2.1 Pomocí siloměru

Toto měření mělo ověřit teoretický předpoklad zvýšení magnetické vodivosti vzduchové mezery, která je naplněna magnetickou kapalinou. Měření bylo prováděno obdobným postupem jako měření předchozí, pouze byl přidán magnet i pod spodní sklo (viz obr. 11).



Obr. 11 Různá množství kapaliny v mezeře

Tloušťka skel a vzduchové mezery byla dohromady 16 mm. Průměrná hodnota indukce u spodní hrany horního skla byla  $B = 247$  mT a horní hrana spodního skla měla průměrnou hodnotu indukce  $B = 173$  mT. Z grafu můžeme vyčíst, že přírůstek sil je 2,9 N na 7 ml kapaliny, což odpovídá zesílení sil o přibližně 32 %.



Obr. 12 Závislost přitažné síly na množství kapaliny



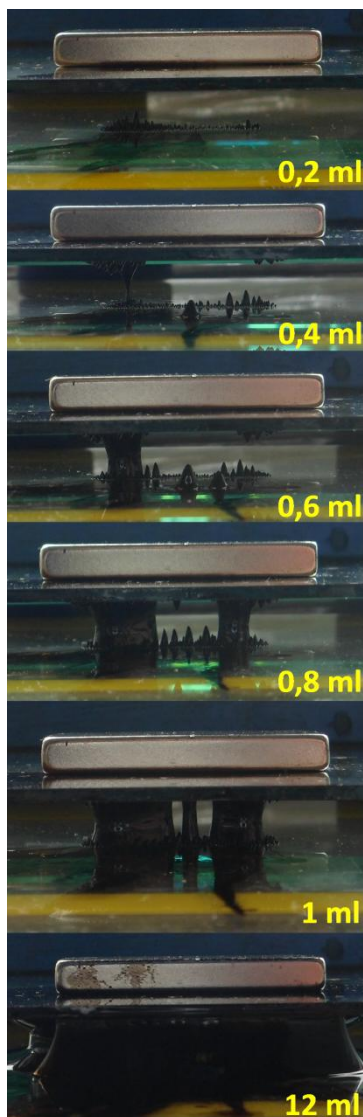
#### 4.2.2 Pomocí váhy

Z důvodů větší přesnosti bylo nutno zaměnit siloměr za digitální váhu, s přesností  $\pm 1$  g, což odpovídá silám  $\pm 0,01$  N. Váha byla zatížena dvěma závažími (položená skla na pravé a levé části váhy). Na skle umístěném nad váhou byl přichycen první magnet, druhý magnet držel pod váhou a váhu nadlehčoval. Při měření vznikala drobná nepřesnost způsobená ohybem



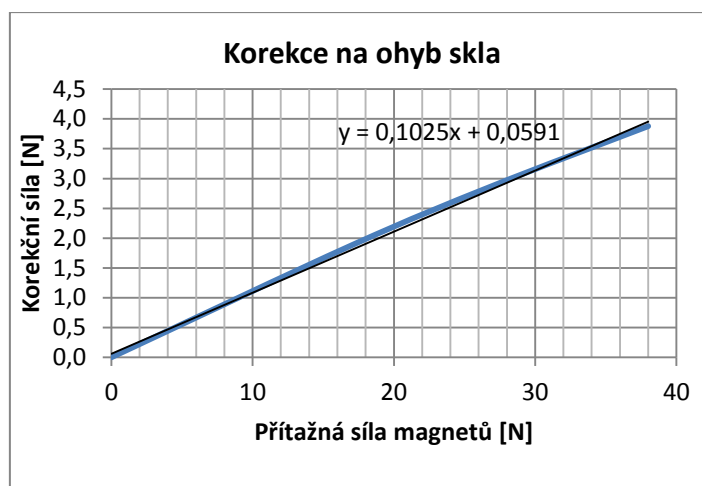
Obr. 13 Měření pomocí váhy

horního skla při zvýšení přitažlivých sil, z tohoto důvodu byla udělána korekční křivka, která nepřesnost odstranila.



Obr. 14 Dávkování kapaliny

nepřesnost odstranila.

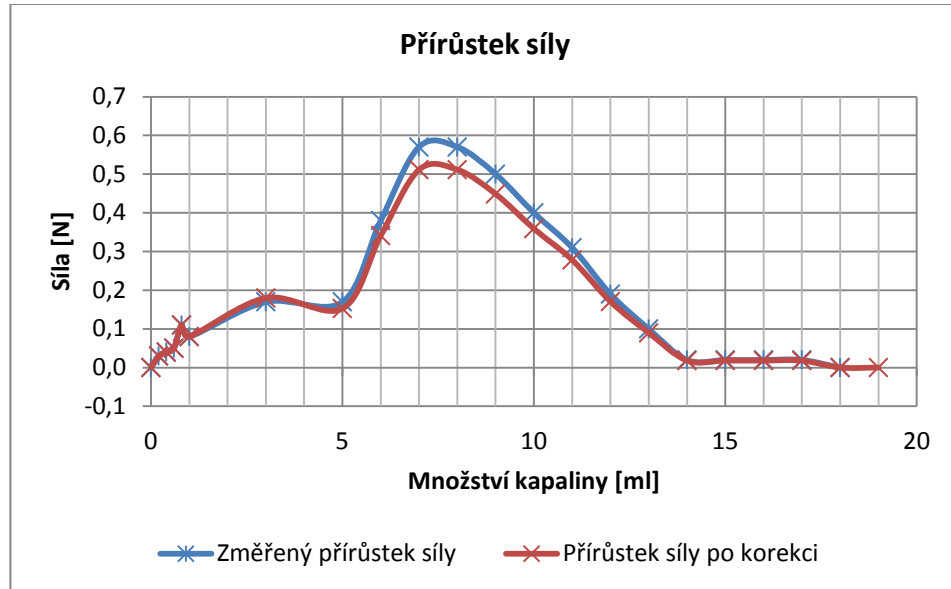


Obr. 15 Korekce na ohyb skla

Díky větší přesnosti váhy mohlo být měření prováděno po 0,2 ml kapaliny, jak je vidět na obr. 14. Vzduchová mezera i se započítáním skla byla 14,3 mm. Indukce v mezeře dosahovala hodnot u spodní hrany horního skla  $B = 269$  mT a u horní hrany spodního skla  $B = 243$  mT.

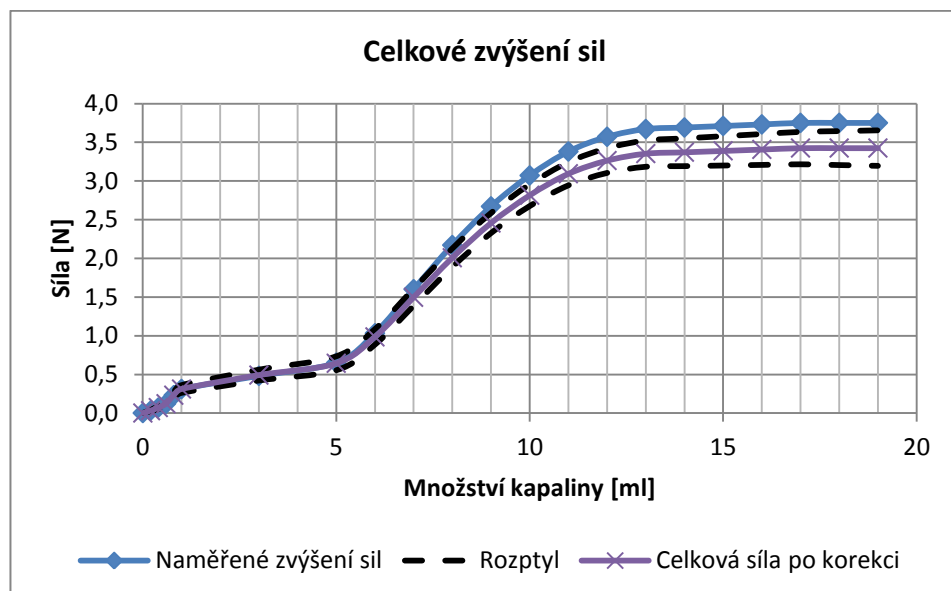
V následujícím grafu (obr. 16) můžeme vidět silové přírůstky po přidání n-tého množství kapaliny. Je patrné, že největší přírůstky jsou při přidání sedmého a osmého mililitru a po překročení třinácti mililitrů se již síla téměř nezvyšuje. Pro efektivní využití magnetických kapalin v některých elektromechanických zařízeních bude klíčové množství kapaliny, které se použije. Například kdybychom chtěli využít magnetickou

kapalinu ve vzduchové mezeře motoru, museli bychom pečlivě volit její množství. Při nedostatku kapaliny bychom plně nevyužili možných přírůstků sil a naopak její nadměrné množství by zbytečně způsobovalo vyšší třecí síly a vyšší rozptylové toky.



Obr. 16 Přírůstek síly

Následující graf (obr. 17) zobrazuje celkové zvýšení sil. Do grafu byl ještě přidán možný rozptyl hodnot způsobený chybou měření.



Obr. 17 Celkové zvýšení sil

### 4.3 Měření č. 3 – Na magnetickém obvodu

Kvůli špatné homogenitě pole a nemožnosti změny indukce se upustilo od permanentních magnetů. Další měření je prováděno na přerušném magnetickém obvodu transformátoru. Na měření byl použit jednofázový transformátor, kterému bylo vyjmuto sekundární vinutí. Jak můžeme vidět na obr. 18, použitý transformátor se skládá ze 3 hlavních částí: spodní část magnetického obvodu, vinutí a horní části magnetického obvodu. Horní část leží na dvou vahách, které nám budou sloužit k měření přitažné síly.

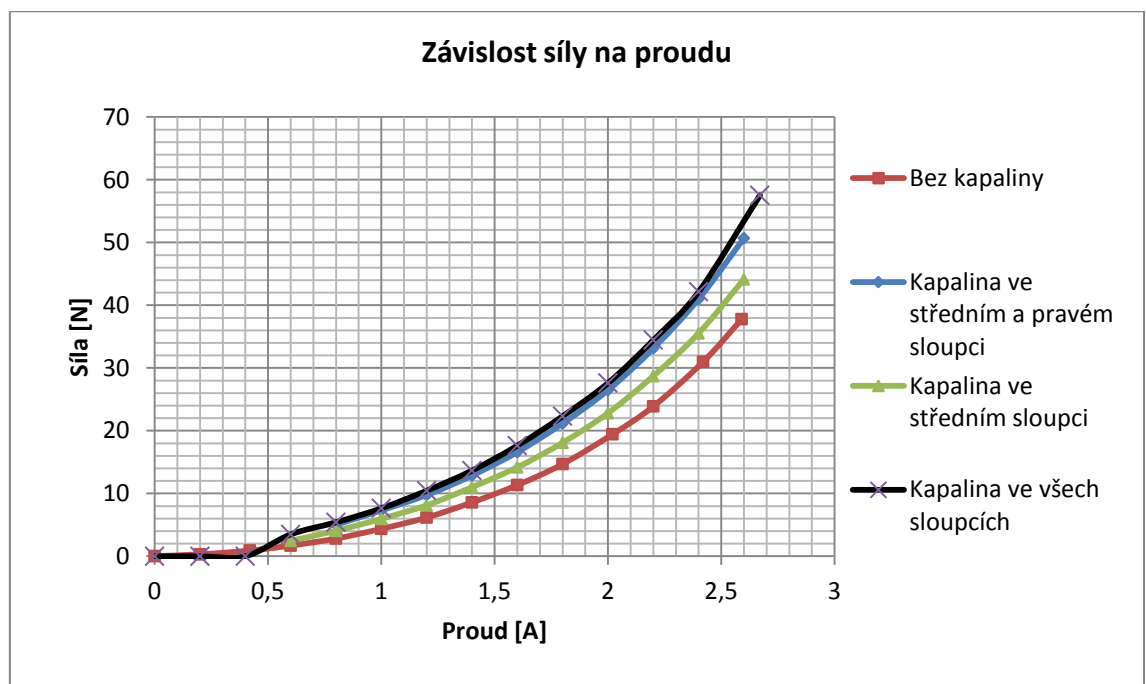


Obr. 18 Magnetický obvod

Přivedením proudu do vinutí vybudíme magnetický tok  $\phi$ , který způsobí silové působení mezi spodní a horní částí. Hlavním cílem tohoto měření je zjistit, o kolik se změní přitažné síly mezi horní a spodní částí magnetického obvodu při aplikaci ferokapaliny do vzduchové mezery.

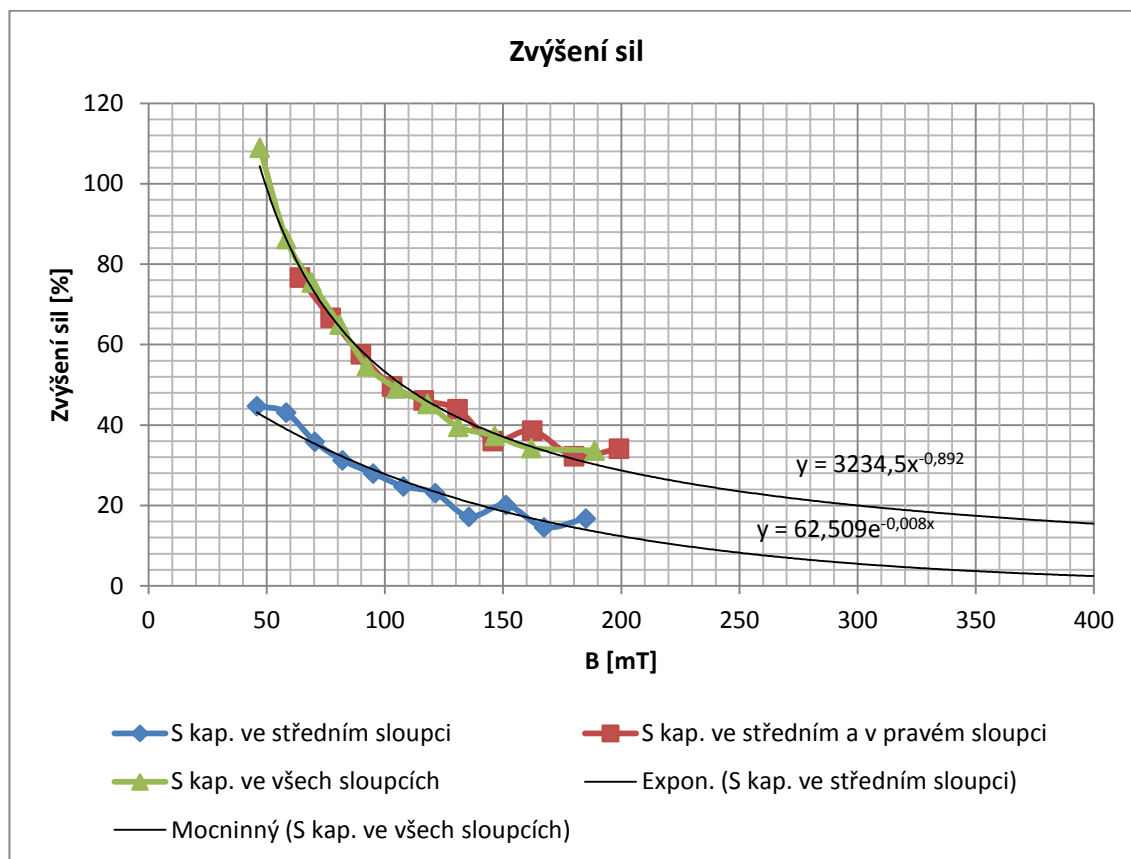
#### 4.3.1 Měření vlivu indukce v mezeře

Měření ukázalo, jak závisí zvýšení sil na magnetické indukci. Měřila se přitažná síla při různých proudech. Následně byly vzduchové mezery magnetického obvodu naplněny kapalinou a měření se opakovalo.



Obr. 19 Závislost síly na proudu

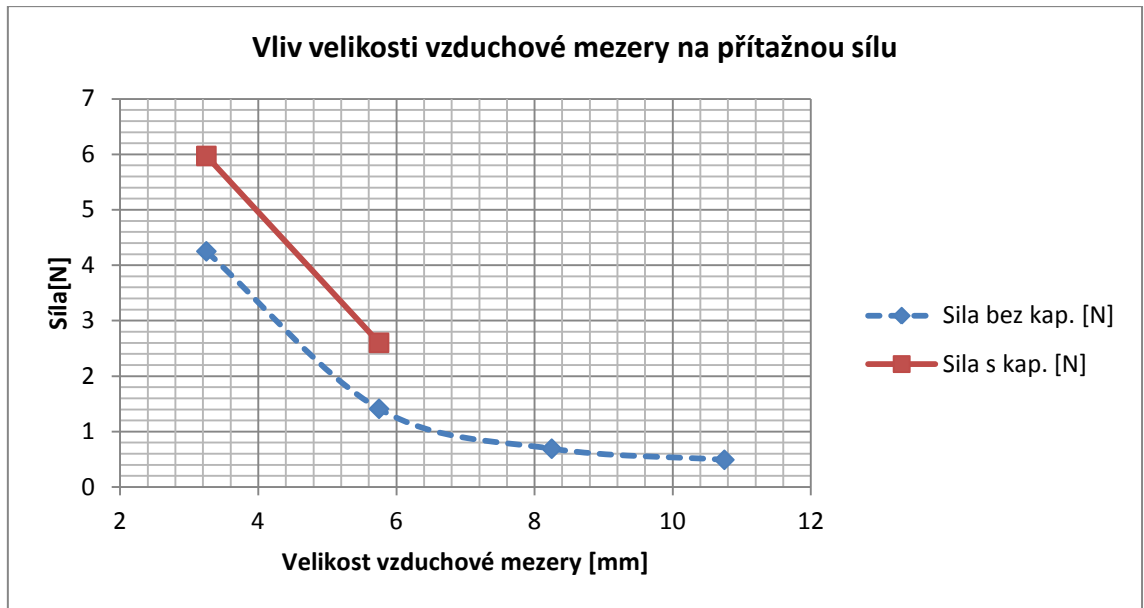
Na obr. 19 můžeme vidět ověření teoretického předpokladu, že potřebujeme menší proud pro vytvoření stejné přitažné síly a díky tomu budou i menší Jouleovy ztráty. Při tomto měření byla nastavena konstantní velikost vzduchové mezery  $\delta = 3,25$  mm. Na následujícím grafu (obr. 20) vidíme, že k nejvyššímu procentnímu zvýšení sil dochází při měřeních s nejnižší indukcí. Z těchto průběhů lze předpokládat nasycení kapaliny. Indukce byla měřena teslametrem v prostřední vzduchové mezeře.



Obr. 20 Zvýšení sil na magnetickém obvodu

#### 4.3.2 Měření vlivu velikosti vzduchové mezery

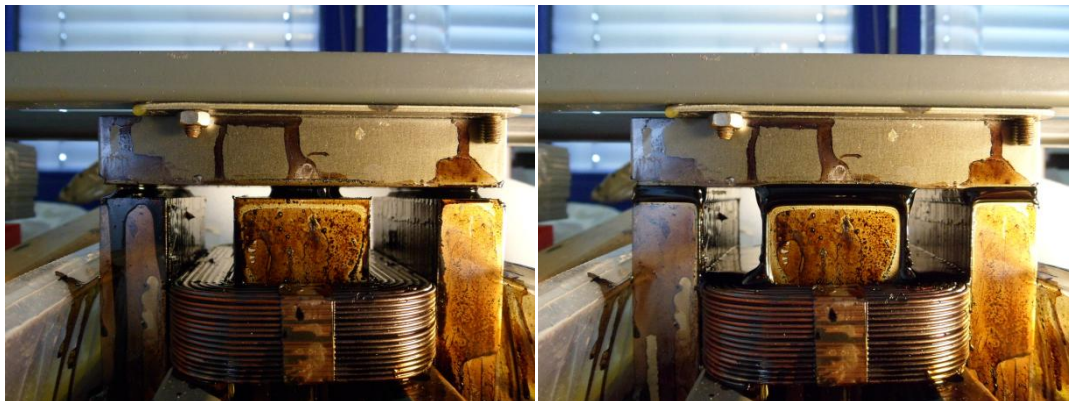
Důležité bylo také zjistit, jaký vliv má velikost vzduchové mezery. Následující graf (obr. 21) ukazuje, jak se měnila přitažná síla se změnou velikosti vzduchové mezery. Na grafu můžeme dle očekávání vidět, že čím je menší vzduchová mezera, tím větší přitažná síla působí. Pro mezeru větší než 6 mm se kapalina již v mezeře neudržela, rozptylový tok převýšil hlavní magnetický tok a kapalina odtekla. Pro vzduchovou mezeru 3,25 mm byly díky kapalině zvýšeny přitažné síly o 40,47 % a pro mezeru 5,75 mm došlo ke zvýšení sil o 84,4 %. Tabulky (tab. č. 16, tab. č. 17) a příklady výpočtu jsou uvedeny v příloze.



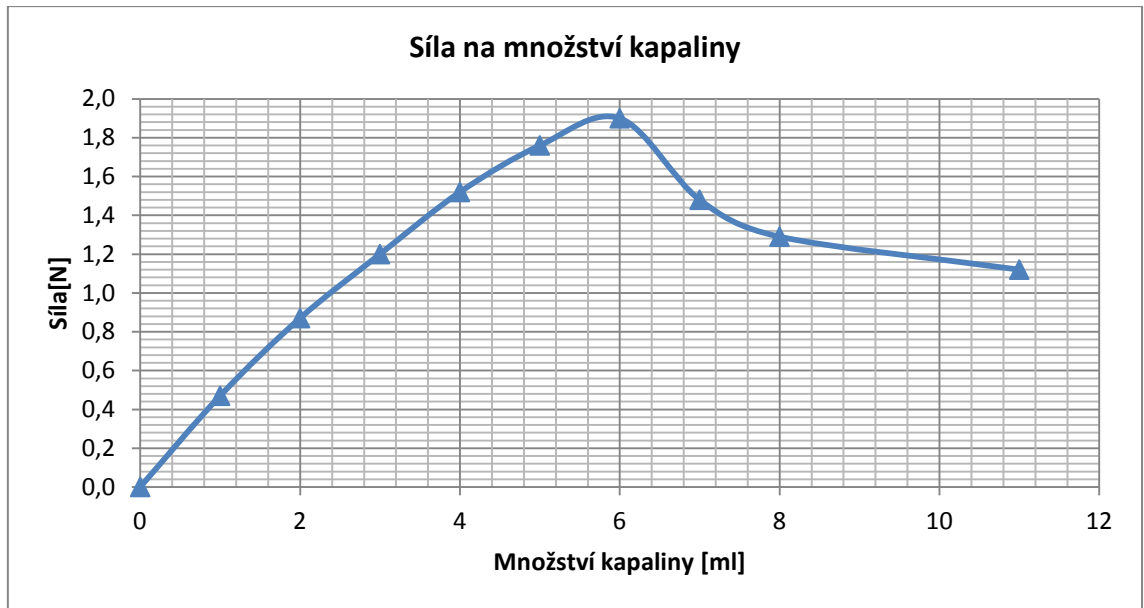
Obr. 21 Vliv velikosti vzduchové mezery na přítažnou sílu

#### 4.3.3 Měření vlivu množství kapaliny

Do vzduchové mezery byla po 1 ml dávkována magnetická kapalina a byla měřena přítažná síla. Nejprve lze pozorovat (obr. 23) nárůst sil až do množství 6 ml a poté pokles sil. Tento pokles může být způsobený zvýšením rozptylového toku a vtahováním kapaliny do nejsilnějšího pole. Kapalina se již do vzduchové mezery nevešla a vyboulila se, jak je patrné z obr. 22. I poté byla vtahována do nejsilnějšího pole, avšak toto vtahování mohlo působit proti přítažné síle.



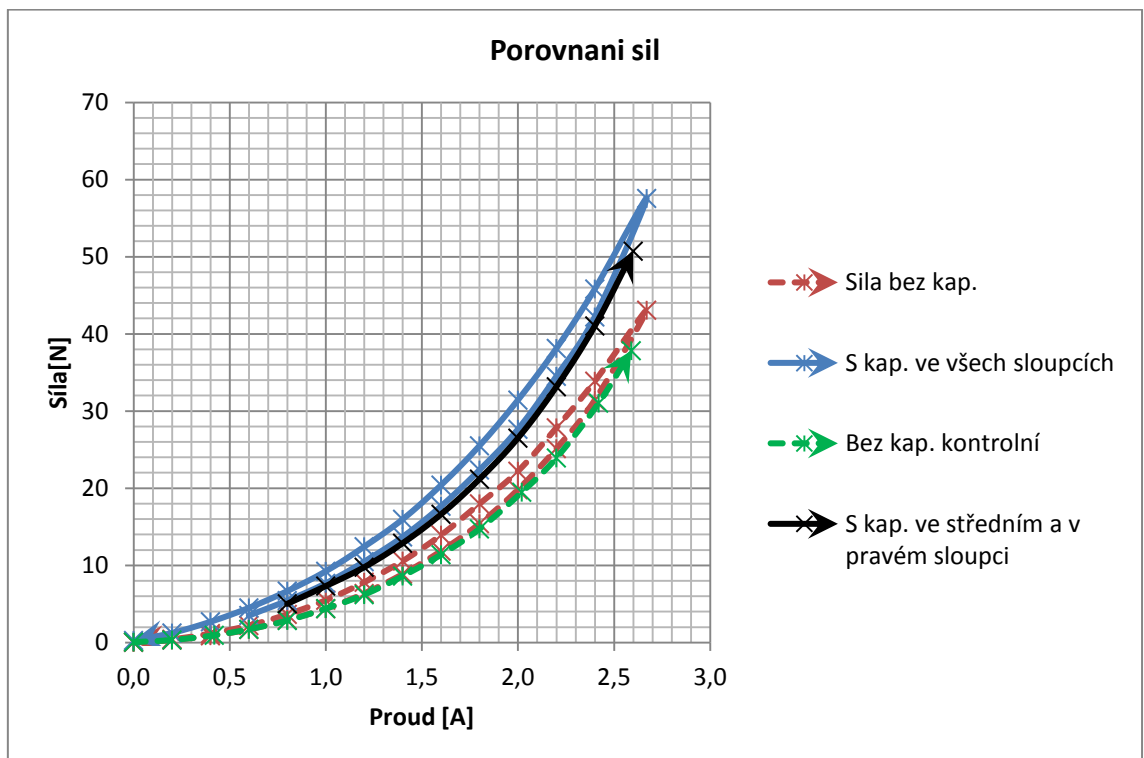
Obr. 22 Magnetická kapalina ve vzduchové mezeře



Obr. 23 Síla na množství kapaliny

#### 4.3.4 Zhodnocení chyb při měření

Na obr. 24 můžeme vidět vliv remanence. Nejprve bylo provedeno kontrolní měření (zelená křivka), poté se proměřily všechny průběhy a po odstranění kapaliny bylo uskutečněno poslední měření bez kapaliny (červená křivka). Odchylka je vzhledem ke zvýšení sil minimální.



Obr. 24 Porovnání sil

## 4.4 Měření č. 4 – Měření na motoru

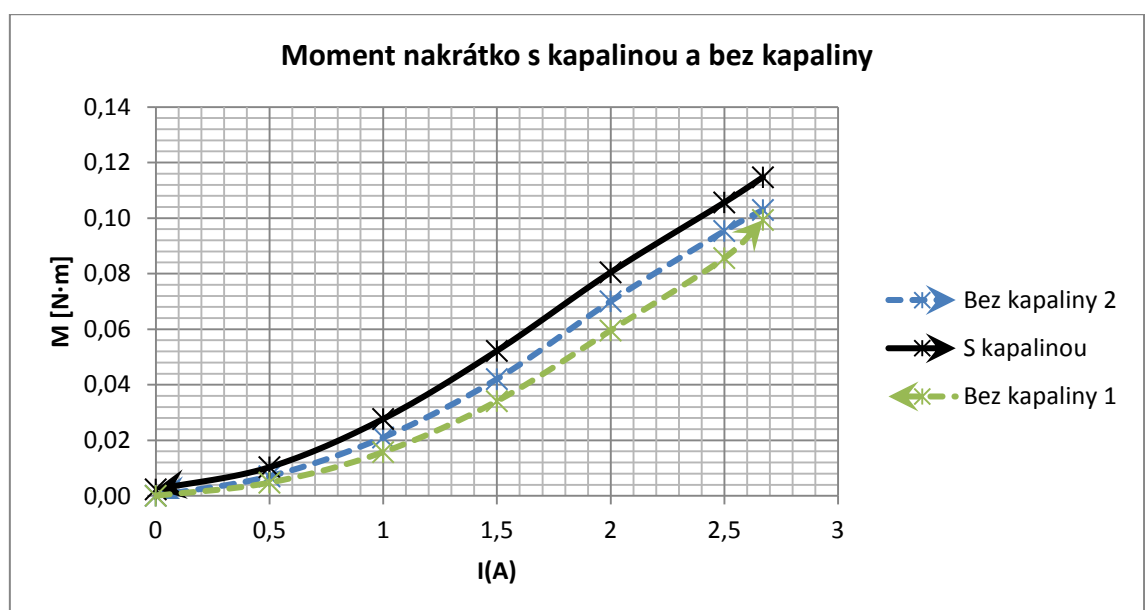
### 4.4.1 Měření nakrátko

Cílem tohoto měření bylo určit moment motoru nakrátko bez kapaliny a s kapalinou ve vzduchové mezeře. Následné porovnání hodnot by mělo ukázat zvýšení momentu díky kapalině, jak naznačuje předchozí kapitola.



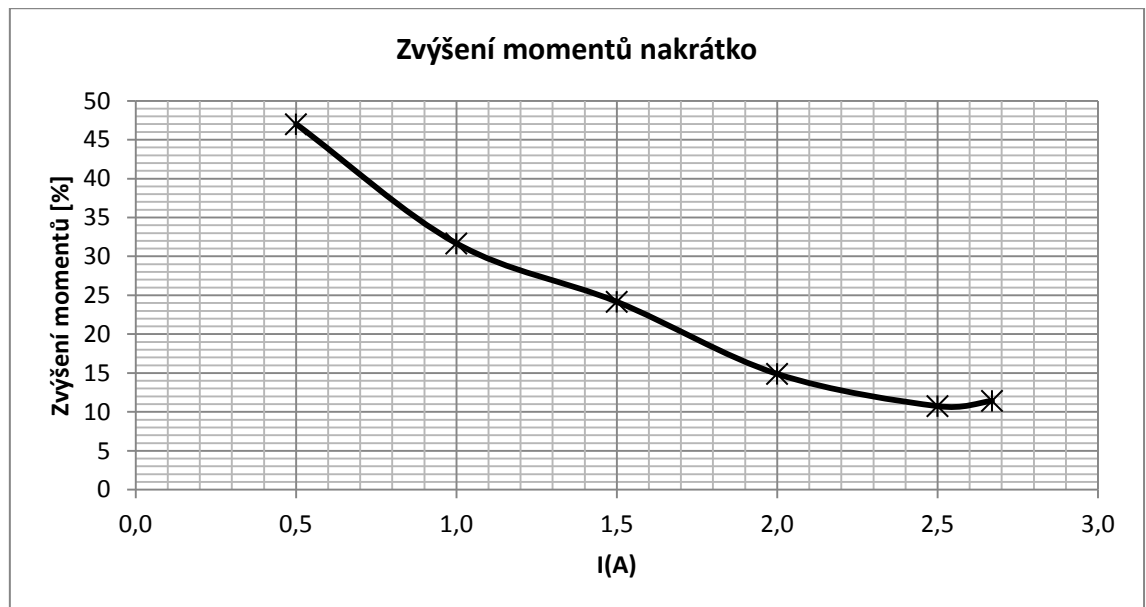
Obr. 25 Měření motoru nakrátko

Motorem protékal stejnosměrný proud. Motor přes rameno působil silou na přesnou váhu. Nejprve byl proud zvyšován až na hodnotu 2,67 A (zelená křivka) a následně snižován až na 0 A (modrá křivka). Tímto jsme zjistili hysterezi motoru. Poté byl motor znovu nabuzen na hodnotu 2,67 A, do vzduchové mezery o velikosti 0,65 mm byla vlita magnetická kapalina a snižováním proudu jsme naměřili černou křivku na obr. 26.



Obr. 26 Moment motoru nakrátko s kapalinou a bez kapaliny

Na dalším grafu (obr. 27) je patrné procentní zvýšení momentů. Toto zvýšení bylo počítáno pro modrou křivku bez kapaliny a černou křivku s kapalinou. Výpočet je uveden v příloze. Na grafu si můžeme všimnout, že předpokládané zvýšení účinnosti je velmi závislé na budícím proudu.



Obr. 27 Zvýšení momentů nakrátko

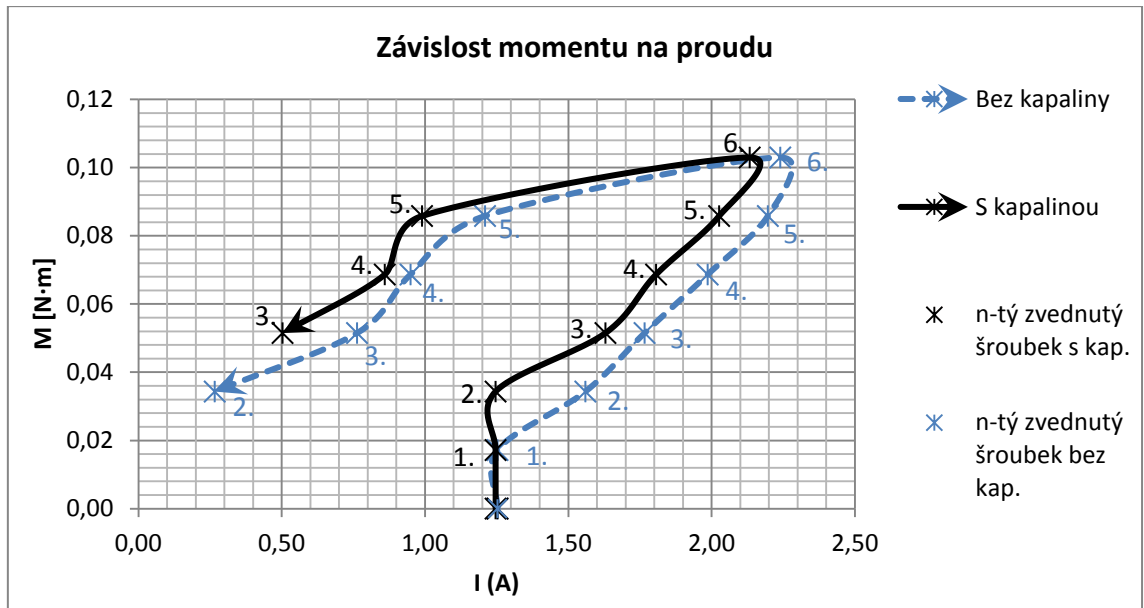
Pro kontrolu předchozích hodnot bylo navrženo další měření. Měření spočívalo ve vytahování závaží (šroubů) na provaze. Pomalým zvyšováním proudu tekoucího do motoru se postupně zvyšoval moment motoru a jednotlivá závaží se zvedala. Po zvednutí všech závaží byl proud snižován a závaží opět klesala. Toto se opakovalo s kapalinou ve vzduchové mezeře. Zaznamenával se proud potřebný pro zvednutí n šroubů. Přes rameno a váhu šroubů byl vypočten moment a na grafu (obr. 29) vidíme průměrný výsledek ze šesti měření (viz tab. č. 22 v příloze).

Zvedání šroubů se oproti předchozímu měření lišilo v tom, že zde se rotor protáčel a měnil se úhel natočení rotoru. Z následujících hodnot můžeme vyvodit, že kapalina ve vzduchové mezeře zůstala i přes pomalé otáčení rotoru. Váha šroubů byla přes rameno přepočtena na moment a ten můžeme vidět na svislé ose grafu (obr. 29).



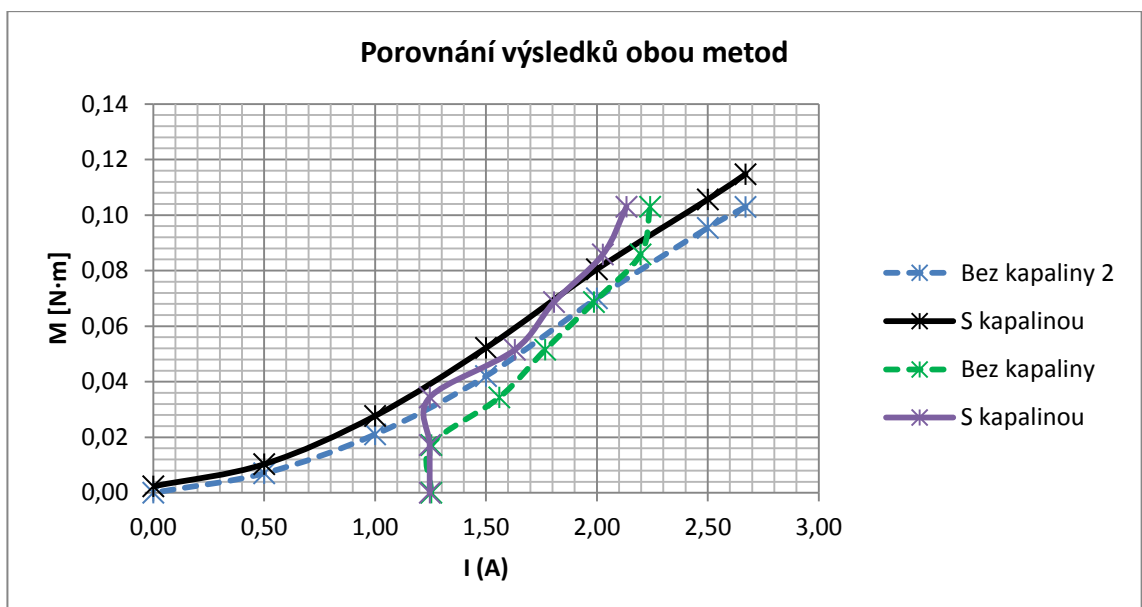
Obr. 28 Zvedání závaží





Obr. 29 Graf pro vytahování šroubů

Graf (obr. 29) ukazuje kolik šroubků dokázal zvednout motor a jaký k tomu potřeboval proud. Z grafu (obr. 29) je zřetelné snížení velikosti proudu potřebného pro zvednutí n-tého závaží (posunutí černé křivky doleva) a to pro zvedání závaží (první polovina křivky až ke kolenu) i pro klesání závaží (druhá polovina křivky). Jak vyplývá z následujícího grafu (obr. 30), obě metody dávají podobné hodnoty.



Obr. 30 Porovnání obou metod

#### 4.4.2 Měření zrychlení se setrvačником

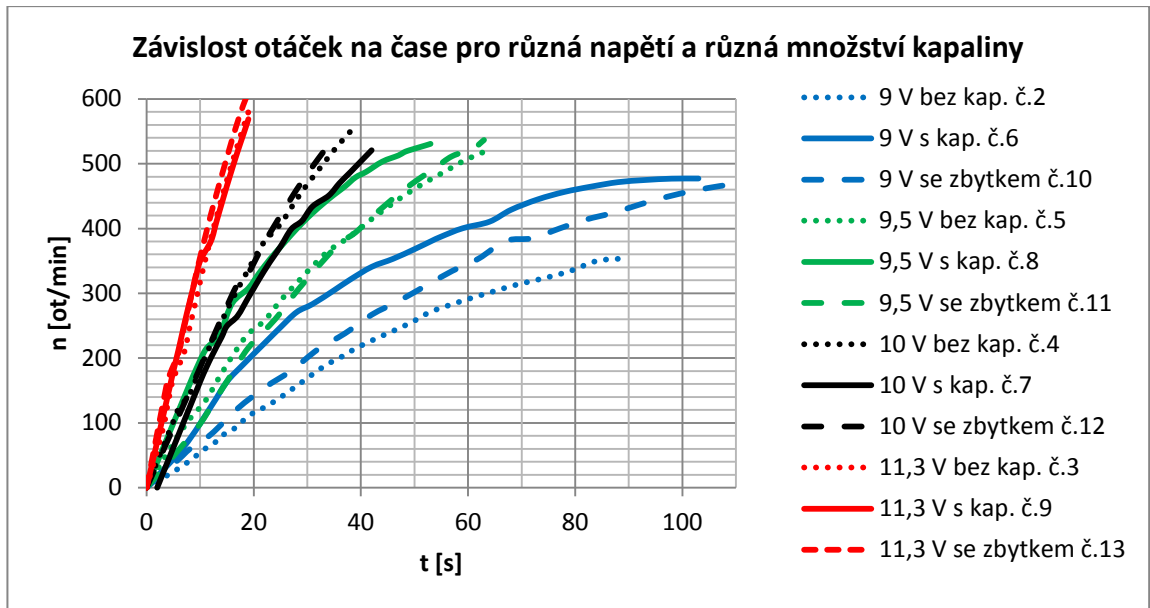
V předchozím měření jsme zjistili zvýšení momentu u zabrzděného motoru. V následujících měřeních chceme zjistit celkový vliv magnetické kapaliny. Celkový vliv bude záviset jak na kladné vlastnosti kapaliny (zvýšení momentu), tak i na negativním vlivu zvýšených třecích ztrát.

Pro uskutečnění měření rozběhu bylo potřeba, aby se časová konstanta rozběhu pohybovala v rozumných hodnotách. Na motor byly tedy připevněny disky pro zvýšení setrvačnosti.



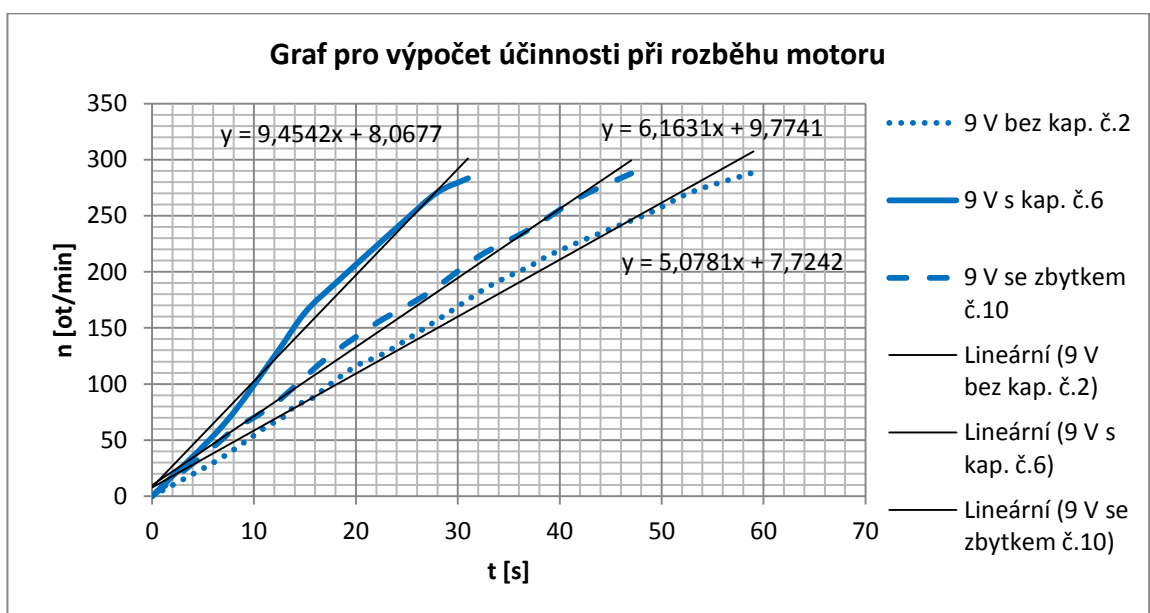
Obr. 31 Měření zrychlení se setrvačником

Do motoru tekla stejnosměrný proud a pomocí otáčkoměru byly zaznamenávány otáčky motoru v čase. Nejprve měření probíhalo bez kapaliny, poté s plnou vzduchovou mezerou. Když bylo vypnuto napájení, většina kapaliny vytekla, ale část zůstala ve stroji díky remanenci a smáčivosti kapaliny. Třetí měření se uskutečnilo s touto zbylou kapalinou, která po nabuzení vtekla zpět do vzduchové mezery stroje.



Obr. 32 Různé rozběhy motoru

Na obr. 32 lze pozorovat nárůst otáček motoru v závislosti na čase. Tečkované průběhy jsou bez kapaliny, plné průběhy ukazují rozběh motoru s kapalinou ve vzduchové mezeře a čárkované průběhy jsou se zbylým množstvím kapaliny. Shodná napájení motoru jsou zobrazená stejnou barvou. Můžeme si všimnout, že rozběh s kapalinou u modré a zelené křivky je mnohem rychlejší než bez kapaliny. U černé křivky vidíme, že celkový vliv kapaliny je již při 500 otáčkách za minutu negativní. U červené křivky vliv kapaliny není patrný. Moment setrvačnosti byl pro měření rozběhu se setrvačником  $J = 5,052 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ . Čísla průběhů ukazují, v jakém sledu byla měření provedena.



Obr. 33 Rozběh motoru pro napětí 9 V

Výpočet urychlujícího momentu pro 9 V s kap č.6

$$M = J \frac{d\omega}{dt} \quad (4.1)$$

$$M = 5,052 \cdot 10^{-3} \cdot 9,454 \quad (4.2)$$

$$M = 47,762 \cdot 10^{-3} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (4.3)$$

Výpočtu mechanického výkonu dle [12]

$$P_m = M \cdot \omega \quad (4.4)$$

$$P_m = 47,762 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot 283,4}{60} \quad (4.5)$$

$$P_m = 1,418 \text{ W} \quad (4.6)$$

Výpočet účinnosti dle [11]

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} \cdot 100 \quad (4.7)$$

$$\eta = \frac{1,4175}{11,6} \cdot 100 \quad (4.8)$$

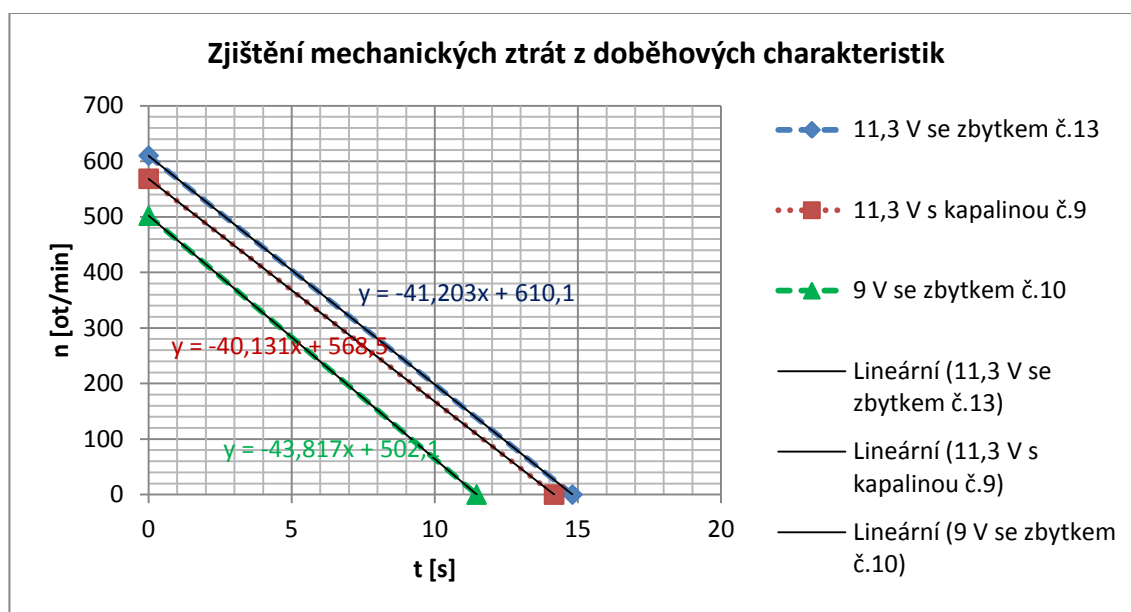
$$\eta = 12,7 \% \quad (4.9)$$

Jak můžeme vidět v tab. č. 1, pro rozběh 9 V s kapalinou vyšla účinnost motoru 12,7 %, pro zbytek kapaliny 8,1 % a pro motor bez kapaliny 6,8 %. Všechny z těchto účinností jsou velice nízké, ale to je dáno tím, že motor provozujeme v nestandardním stavu. Tento motor nemá však ani při jmenovitém provozu vysokou účinnost, podle [13] je jeho účinnost 35 %.

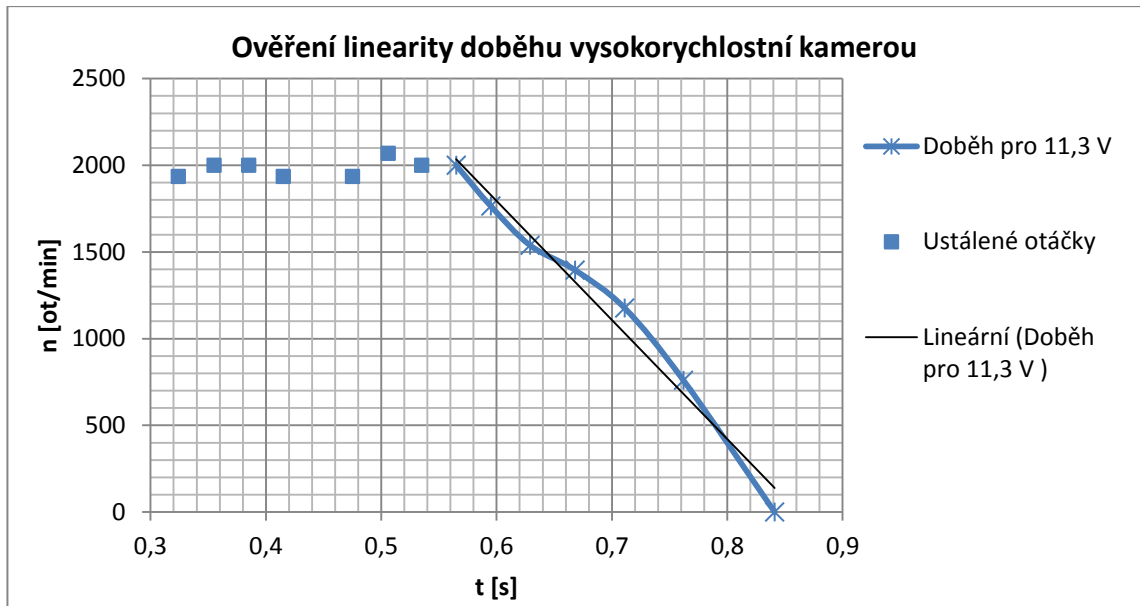
Byly vypočteny rozběhové momenty s kapalinou, se zbytkem kapaliny a bez kapaliny. Všechny hodnoty jsou pro rychlosti do 300 ot/min. Tyto momenty jsou uvedeny v tab. č. 1 a můžeme je porovnat s momenty nakrátko, které byly pro odpovídající proudy: s kapalinou  $M = 0,039 \text{ N} \cdot \text{m}$  a bez kapaliny  $M = 0,031 \text{ N} \cdot \text{m}$  (obr. 26).

Tab. č. 1 Účinnost motoru pro rozběh při napětí 9 V

	n [ot/min]	d $\omega$ /dt	I [A]	M [N m]	P <sub>m</sub> [W]	P <sub>el</sub> [W]	$\eta$ [%]
S kap.	283,4	9,454	1,24	0,0478	1,4175	11,16	12,70
Zbytek	287,8	6,163	1,29	0,0311	0,9384	11,61	8,08
Bez kap.	288,4	5,078	1,26	0,0257	0,7748	11,34	6,83



Po vypnutí motoru byly naměřeny doběhové charakteristiky. Protože otáčkoměr nereagoval na změnu otáček dostatečně rychle, byly pro určení doběhových charakteristik použity pouze dva body. Okamžik vypnutí při ustálených otáčkách a doba poklesu otáček na nulu. Jelikož motor pracoval bez ventilátoru, můžeme předpokládat, že ztráty v ložiskách jsou mnohem větší než ztráty ventilační. „Ztráty třením v ložiskách jsou u zaběhaného motoru a při stálé teplotě prakticky lineárně závislé na otáčkách, zatímco ztráty ventilační závisí na vyšší mocnině otáček.“ [14] Z tohoto důvodu byly oba body lineárně spojeny, což, jak se později (již bez setrvačnicku) při měření vysokorychlostní kamerou ukázalo, bylo dostatečně přesné.



Obr. 35 Ověření linearity doběhu vysokorychlostní kamerou

Z těchto doběhových charakteristik můžeme zjistit mechanické ztráty dle [12]:

$$M = J \frac{d\omega}{dt} \tag{4.10}$$

$$P_m = M \omega \tag{4.11}$$

Za moment setrvačnosti dosadíme součet momentů setrvačností všech tří použitých setrvačnicků a setrvačnosti rotoru (viz příloha tab. č. 27). Pro porovnání průběhů rychlostí jednotlivých měření je třeba zajistit, aby mechanické parametry motoru byly stále stejné. Aby se kupříkladu nestalo, že motor má zpočátku větší tření komutátoru, následně se po aplikaci kapaliny komutátor namaže a otáčky vzrostou.

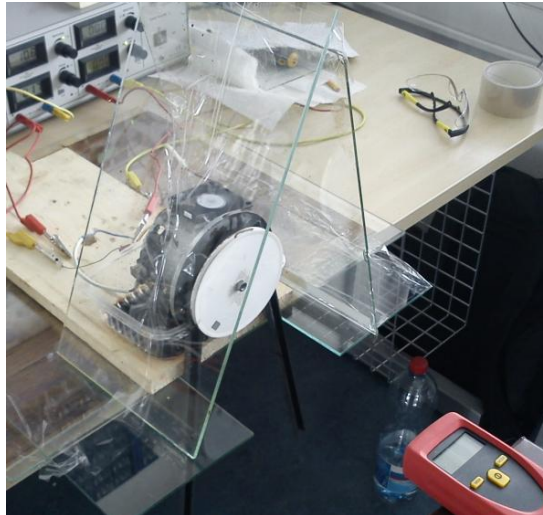
Tab. č. 2 Výpočet ztrát

	n [ot/min]	$\omega$ [rad/s]	$d\omega/dt$	M [N m]	I [A]	U [V]	P <sub>m</sub> [W]	P <sub>el</sub> [W]
č.13	610,1	63,89	-41,203	-0,21	1,58	11,3	-13,30	17,85
č.9	568,5	59,53	-40,131	-0,20	1,62	11,3	-12,07	18,31
č.10	498,4	52,19	-43,817	-0,22	1,24	9	-11,55	11,16

Z tabulky můžeme zjistit, jaký je rozdíl mezi výkonem mechanickým (mechanické ztráty v okamžiku vypnutí) a výkonem elektrickým. U č. 10 se výkony již vyrovnaly a nemělo by docházet k dalšímu nárůstu otáček (po ustálení překmitu). Na první pohled nás může zarazit, že mechanický výkon je vyšší než elektrický výkon. Je třeba si uvědomit, že motor měl obrovskou setrvačnost a vyšší mechanický výkon může být tedy způsoben naakumulovanou energií (právě v tento okamžik může docházet k překmitnutí).

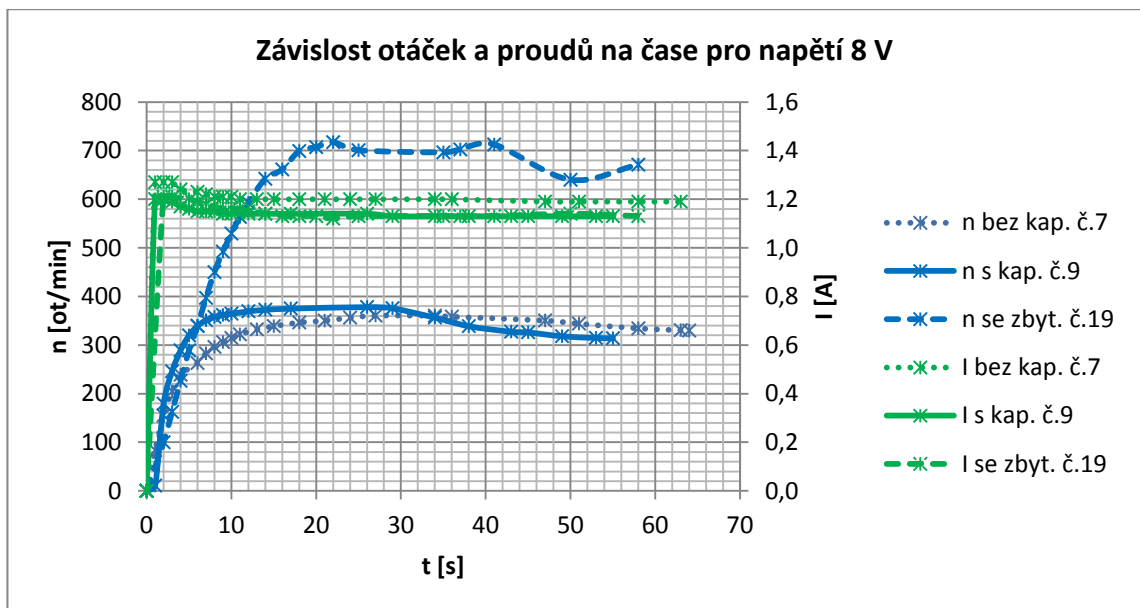
### 4.4.3 Měření při vyšších otáčkách

Při předchozím měření byl naměřen kladný vliv magnetické kapaliny na rychlejší rozběh motoru. Abychom mohli k tomuto udělat relevantní závěr, potřebujeme více měření, která by zmenšila riziko pochybení nebo odhalila závislost na dalších faktorech. Také by bylo vhodné zjistit chování motoru nejen při rozběhu, ale i při ustálených stavech. Tato měření již byla provedena do vyšších otáček a můžeme je vidět na následujících grafech.



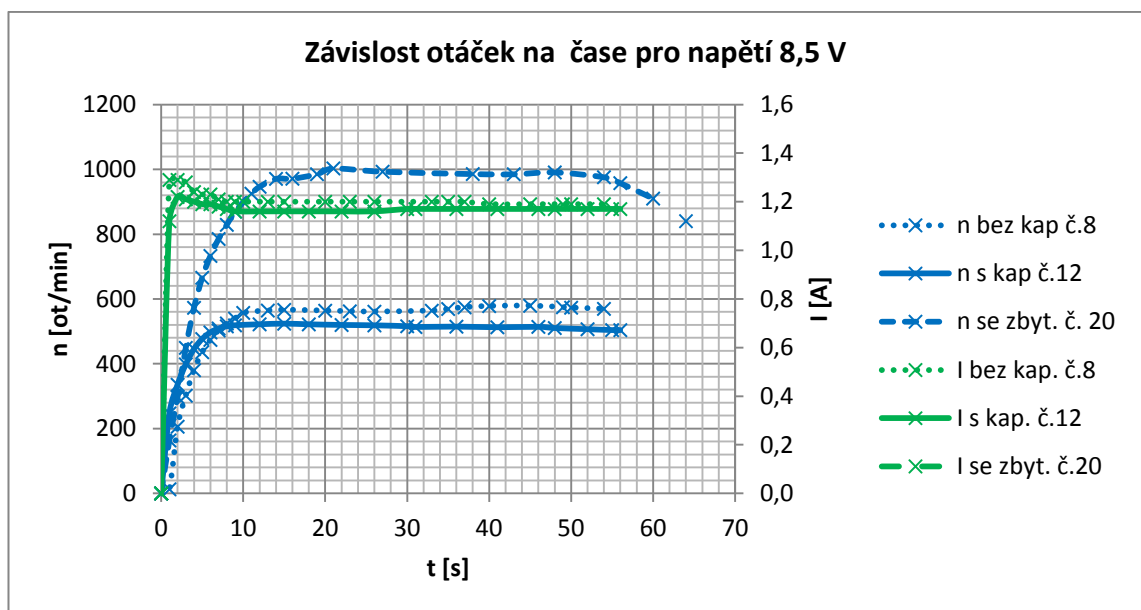
Obr. 36 Měření při vyšších otáčkách

Dále uvidíme závislosti otáček a proudů na čase pro různá napětí na motoru. Zelenými křivkami jsou znázorněny proudy tekoucí do motoru a modré křivky ukazují rychlost otáčení.



Obr. 37 Závislost otáček a proudů na čase pro napětí 8 V

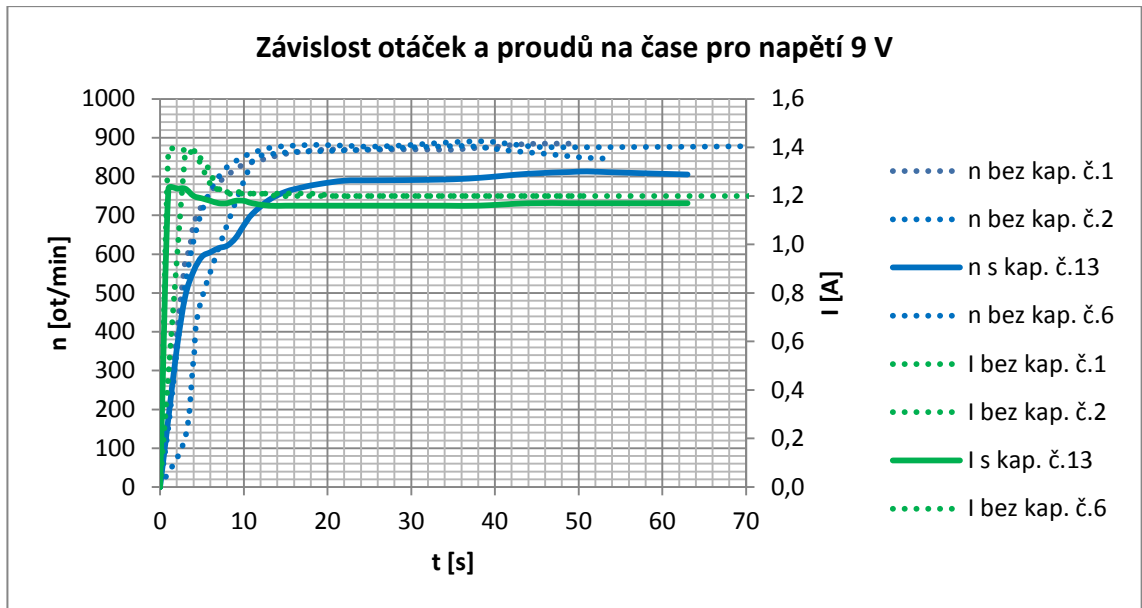
Na obr. 37 vidíme naměřený rychlejší rozběh s kapalinou oproti měření bez kapaliny. Avšak postupem času se průběh s kapalinou trochu zbrzdil. Čárkovaný průběh (se zbyt.) je průběh se správným množstvím kapaliny, tedy s množstvím, které by zabezpečovalo lepší magnetickou vodivost vzduchové mezery a přitom by nezpůsobilo moc velké tření. To je takové množství, které by lehce smáčelo povrch statoru i rotoru. Tento průběh byl téměř o 100 % lepší, předchozí graf a samozřejmě i ten následující by znamenal revoluci v použití magnetických kapalin v elektrických strojích. Abychom však mohli zabezpečit shodné parametry motoru při všech měřeních, musíme změřit pro každé měření mechanické ztráty (jak je uvedeno níže).



Obr. 38 Závislost otáček a proudů na čase pro napětí 8,5 V

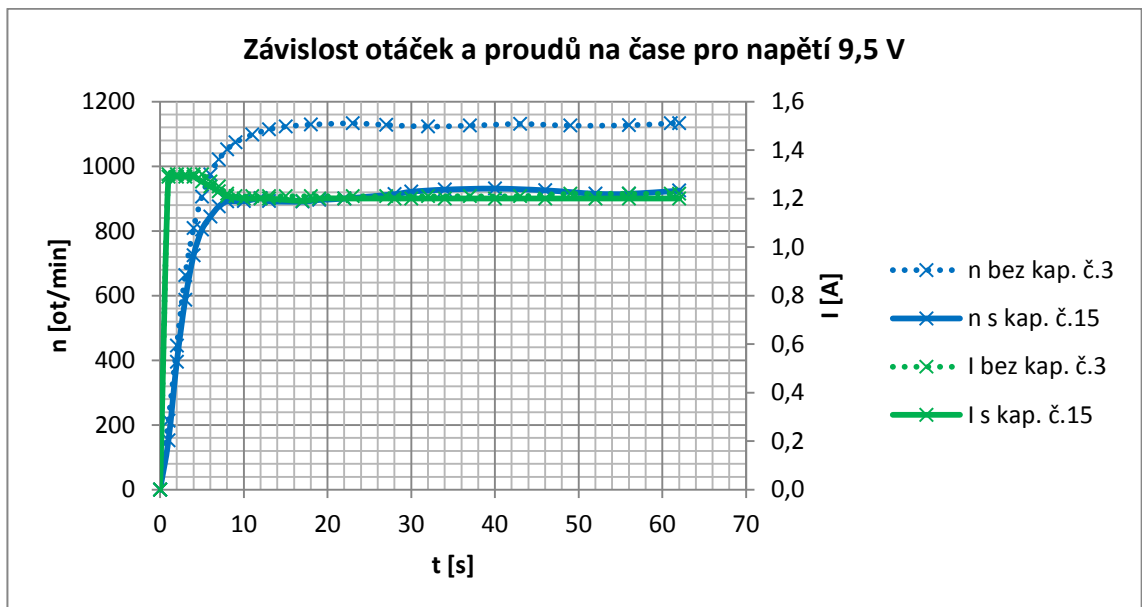
Pro 8,5 V (obr. 38) je znovu vidět rychlejší rozběh, ale je patrné, že se dostáváme s otáčkami nad hranici kladného vlivu magnetické kapaliny. Z tohoto grafu se dá tato hranice určit přibližně kolem 400 ot/min pro tento typ stroje.



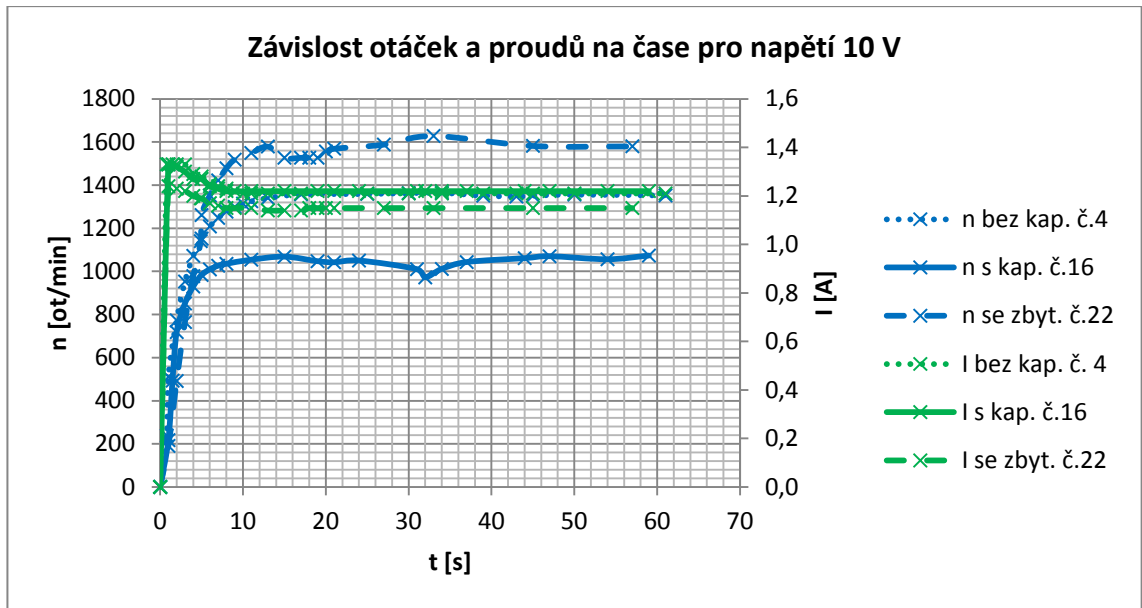


Obr. 39 Závislost otáček na čase pro napětí 9 V

Pro 9 V (obr. 39) je již vidět ztelně horší průběh díky kapalině. Toto měření je pro nás důležité ještě z jiného hlediska. Je v něm změřeno více průběhů při stejných parametrech a z toho můžeme usuzovat na opakovatelnost měření (změnu parametrů motoru s časem) například zahřátí stroje, změnu mechanických vlastností, apod.

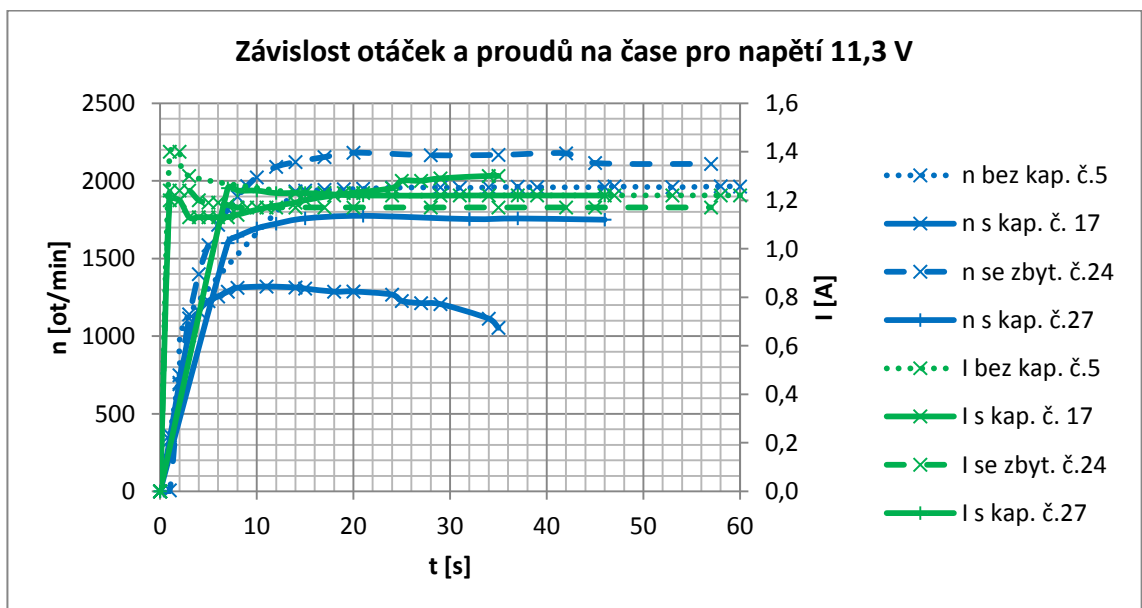


Obr. 40 Závislost otáček a proudů na čase pro napětí 9,5 V

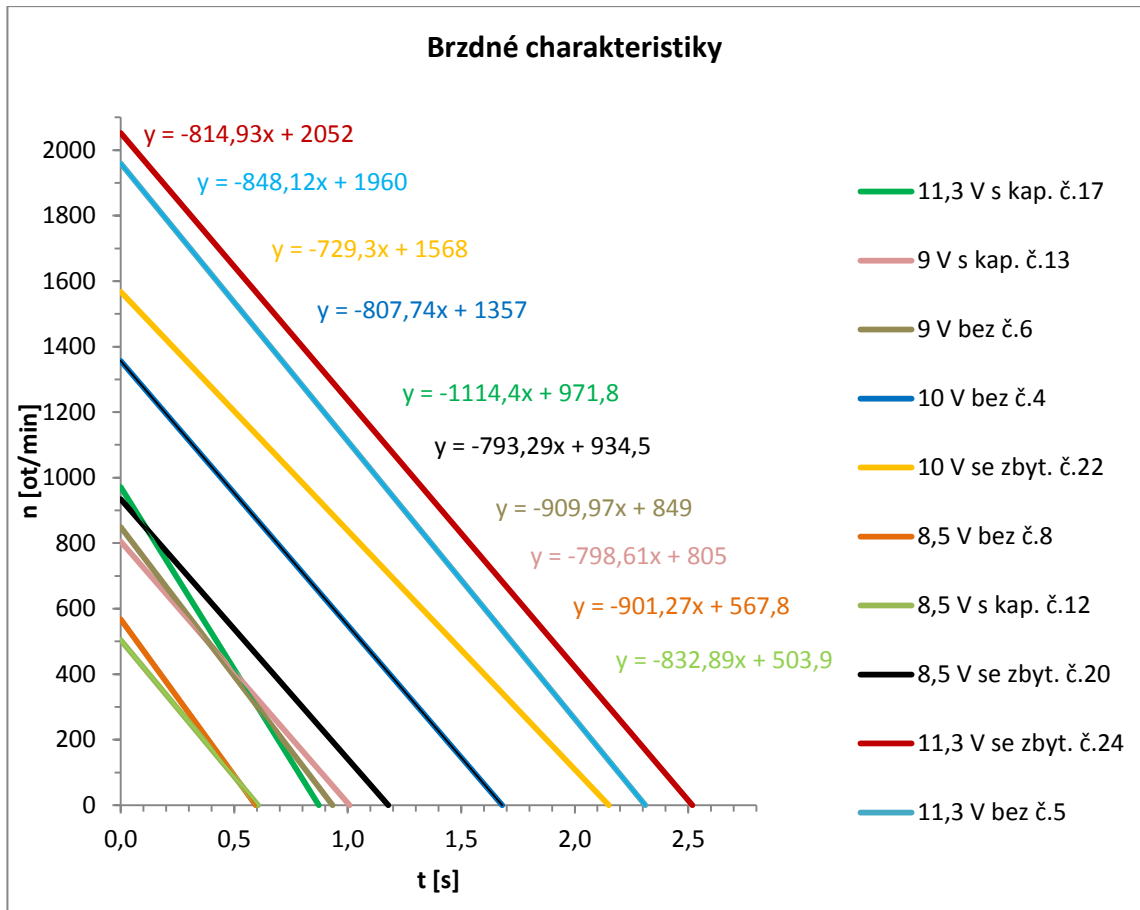


Obr. 41 Závislost otáček a proudů na čase pro napětí 10 V

Průběh č. 17 na obr. 42 měl vyšší mechanické ztráty, a tak nezrychlil na vyšší otáčky jako průběh č. 27. Jeho brzdný moment můžeme porovnat s ostatními průběhy pro doběhy motoru v tab. č. 3.



Obr. 42 Závislost otáček a proudů na čase pro napětí 11,3 V



Obr. 43 Brzdné charakteristiky

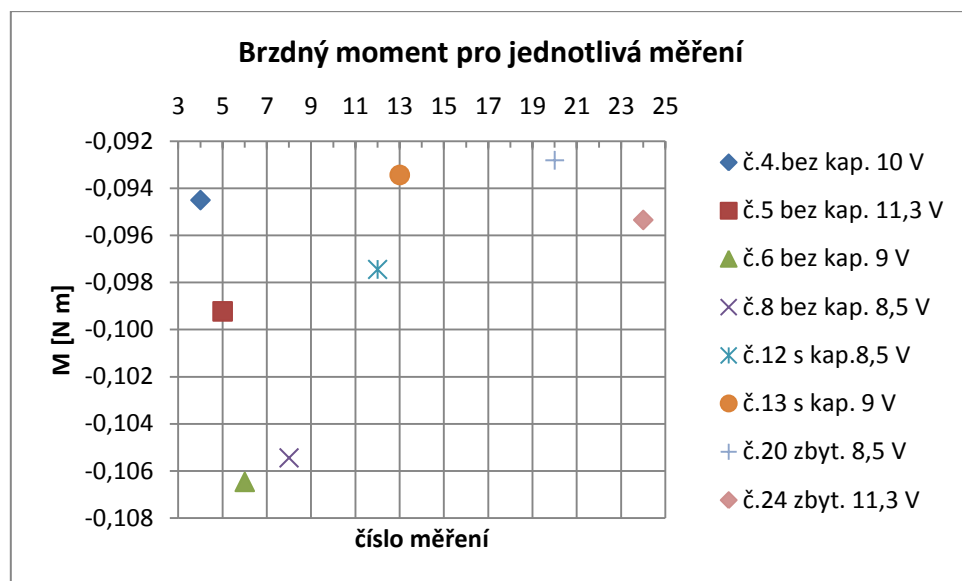
Pro doběhy motoru na obr. 43 jsou důležité dva body: okamžik vypnutí stroje a jeho ustálené otáčky v tomto okamžiku a doba poklesu otáček na nulu. Z těchto doběhů určíme zpomalení stroje a následné brzdné momenty. Naskytá se otázka, zda kapalina ve vzduchové mezeře bude brzdit tyto doběhy. Dle tab. č. 3 se nezdá, že by kapalina působila větší ztráty třením při doběhu. Pro další úvahy budeme předpokládat, že kapalina po vypnutí napájení ze vzduchové mezery vyteče a nepodílí se na vypočtených brzdných momentech.

Tab. č. 3 Parametry jednotlivých průběhů

	$n$ [ot/min]	$\omega$ [rad/s]	$J$ [kg m <sup>2</sup> ]	$d\omega/dt$	$M$ [N m]	$I$ [A]	$U$ [V]
č.4.bez kap.	1357	142,11	1,17E-04	-807,74	-0,0945	1,21	10
č.5 bez kap.	1960	205,25	1,17E-04	-848,12	-0,0992	1,22	11,3
č.6 bez kap.	849	88,91	1,17E-04	-909,97	-0,1065	1,20	9
č.8 bez kap.	567,8	59,46	1,17E-04	-901,27	<b>-0,1054</b>	1,19	8,5
č.12 s kap.	503,9	52,77	1,17E-04	-832,89	<b>-0,0974</b>	1,17	8,5
č.13 s kap.	805	84,30	1,17E-04	-798,61	-0,0934	1,17	9
č.17 s kap.	971,8	101,77	1,17E-04	-1114,40	-0,1304	1,30	11,3
č.20 zbyt.	934,5	97,86	1,17E-04	-793,29	<b>-0,0928</b>	1,12	8,5
č.24 zbyt.	2052	214,89	1,17E-04	-814,93	-0,0953	1,19	11,3

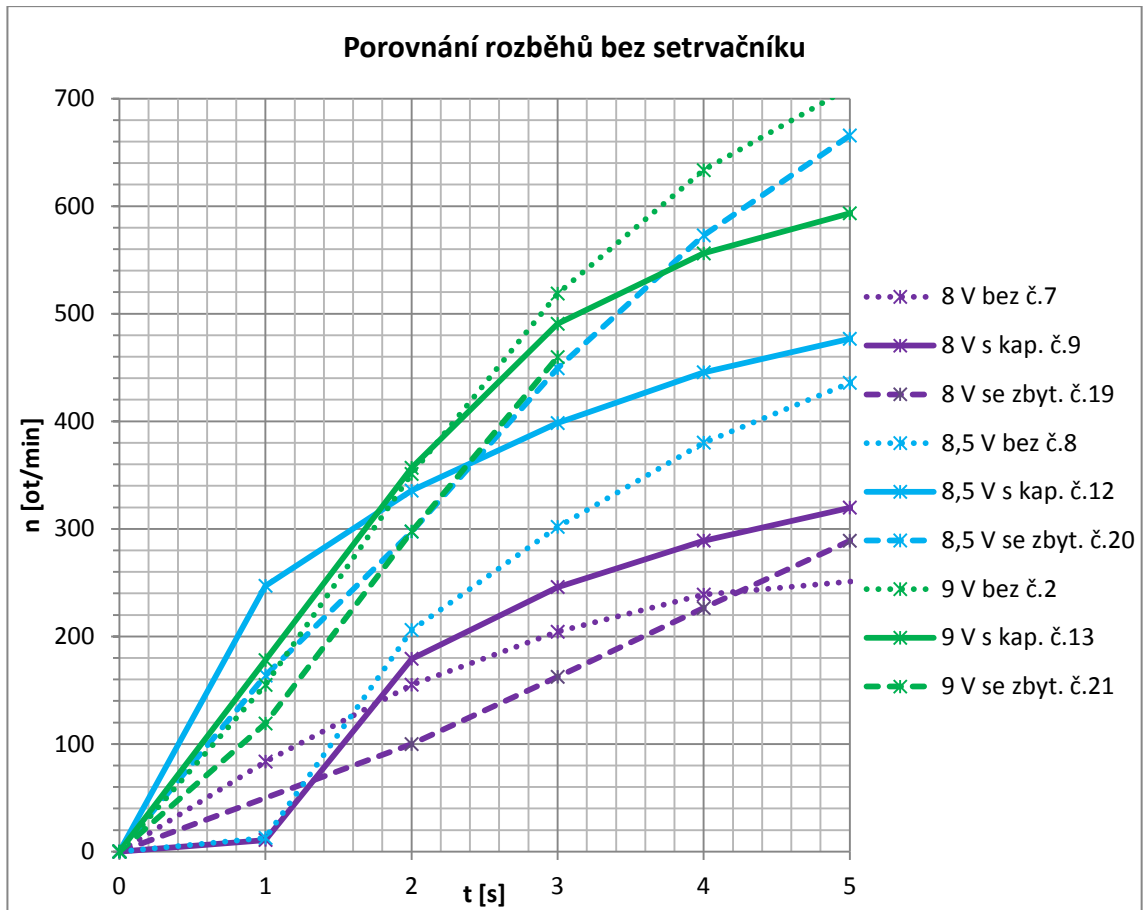
Je škoda, že se mechanické parametry motoru při měření tak zásadně měnily. Snad se nám i přes zmíněnou negativní skutečnost podaří udělat nějaký odpovídající závěr. Graf na (obr. 44) ukazuje, že od měření č. 4 do měření č. 6 narůstaly brzdné momenty. Jakmile byla v motoru použita kapalina (č. 12), brzdné momenty opět poklesly. Z grafu vidíme, že pro napětí 8,5 V nejvíce brzdil průběh č. 8 bez kapaliny, méně pak s kapalinou č. 12. Když se podíváme zpět na graf pro 8,5 V (obr. 38), zjistíme, že kapalina je ještě více negativním faktorem, než jsme původně očekávali. Motor po vypnutí brzdil méně, ale při chodu pracoval na nižší otáčky. Z tohoto bychom mohli usuzovat, že pokles otáček je kvůli kapalině.

Průběh č. 20 se zbytkem kapaliny ze stejného grafu brzdil naprosto nejméně a měl nejvyšší otáčky z těchto tří porovnávaných průběhů. Bohužel ze změřených údajů nelze zjistit, na kolik je zvýšení otáček způsobené magnetickými vlastnostmi kapaliny a na kolik jejími mazacími vlastnostmi. Při obdobném srovnání průběhů pro 9 V (obr. 39) a pro 11,3 V (obr. 42) dojdeme ke stejnému závěru.



Obr. 44 Brzdny moment pro jednotlivá měření

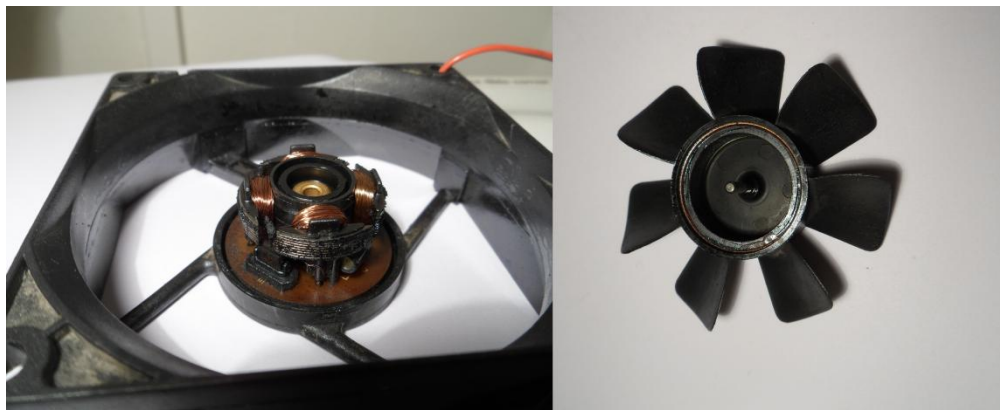
Přestože při měření 8,5 V s kap. č. 12 (obr. 45) byly mechanické ztráty u motoru větší než u č. 20 se zbytkem, motor s kapalinou zrychloval do zhruba 350 ot/min rychleji. Pro 8 V a 9 V se také motor rozběhl rychleji s kapalinou. Jedná se tak již o druhou skupinu měření, která tento lepší rozběh potvrdila.



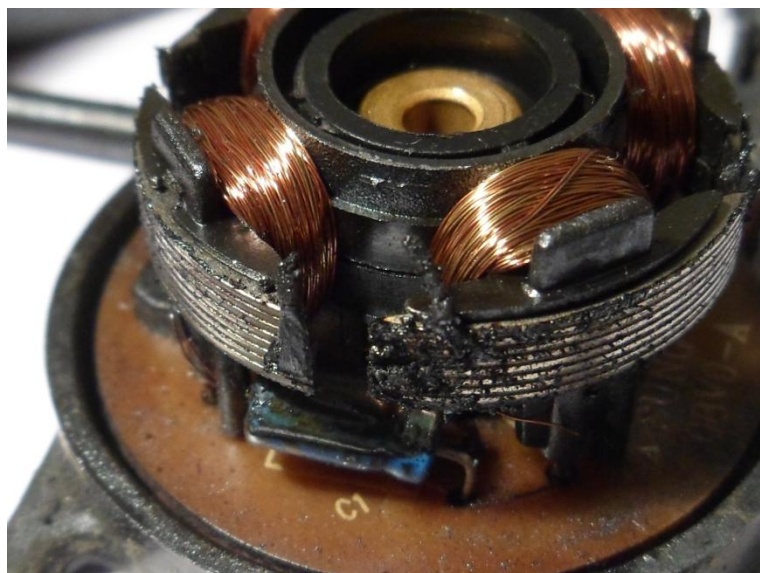
Obr. 45 Porovnání rozběhů bez setrvačnicku

#### 4.5 Měření č. 5 – Použití kapaliny ve větráku

Kapalina byla aplikována také do větráku. Protože rotor tohoto typu stroje je tvořen permanentním magnetem, kapalina ve vzduchové mezeře zůstala a nevytekla. Při chodu větráku bylo slyšet šplouchání kapaliny. Po měsíci používání větráku s kapalinou přestala kapalina šplouchat. Po dvou měsících se větrák zastavil. Rozebrání ukázalo, že kapalina uvnitř vyschla a mezi rotorem a statorem zůstaly shluky feromagnetických částic, které bránily rozběhu motoru. Z tohoto experimentu vyplývá, že před použitím ferokapalin v motorech bude nutné zlepšit jejich koloidní stabilitu.



Obr. 46 Větrák s kapalinou



Obr. 47 Shluky feromagnetických částic na statoru

## 5 Závěr

V práci byly popsány parametry magnetických kapalin, jejich fyzikální vlastnosti, způsoby výroby, složení a současné průmyslové aplikace. Zabývala se také teoretickým rozbor vlivů fero kapalin v elektrických strojích a přístrojích. Na základě tohoto byly navrženy jednotlivé experimenty.

Z měření s magnety bylo zjištěno, že při vtahování kapaliny do vzduchové mezery o indukci 190 mT působí na 1 ml kapaliny magnetická síla o velikosti přibližně 1 N. Gravitační síla působící na kapalinu je stokrát menší, kapalina se v takové vzduchové mezeře udrží a gravitační sílu lze zanedbat. Mezi dvěma magnety se podařilo kapalinou zvýšit přitažnou sílu z 9 N na 11,9 N, tedy přibližně o 32 %. Dále bylo ověřeno, že existuje efektivní množství magnetické kapaliny ve vzduchové mezeře, které nejvíce zvyšuje přenášené síly. Takové množství bude potřeba nalézt pro každou aplikaci zvlášť.

Na magnetickém obvodu se vzduchovou mezerou bylo naměřeno zvýšení sil o 35 % až 100 % v závislosti na indukci. Byl také změřen vliv velikosti vzduchové mezery. Pro mezeru o velikosti 3,25 mm s kapalinou bylo zvýšení sil o 40,5 % a pro mezeru o velikosti 5,75 mm došlo ke zvýšení sil o 84,4 %.

Při měření na univerzálním komutátorovém motoru bylo naměřeno zvýšení momentů o 11,4 % až 47 % v závislosti na napájecím proudu. Také se podařilo snížit proud (o 12,4 %) potřebný pro vyzvednutí závaží motorem. Díky magnetické kapalině byl zrychlen rozběh motoru. Byla zvýšena účinnost motoru o 5,9 % do rychlosti 300 ot/min. Pomocí vysokorychlostní kamery byla změřena linearita dobohových charakteristik. Z dobohových charakteristik byly vypočteny brzdící momenty motoru a mechanické ztráty. Na motoru bylo měřeno až do 2000 ot/min a bylo zjištěno, že pro tento typ motoru zlepšuje kapalina jeho parametry do rychlosti 350 ot/min. Použití kapaliny ve větráku ukázalo, že kapalina není koloidně stabilní.

Před plošným využitím magnetických kapalin bude potřeba vyřešit ekologické dopady na životní prostředí a na člověka. Jejich použití bude nejspíše omezeno na speciální stroje, krokové motory, manipulátory používané v robotice apod. Fero kapalinou naleznou využití tam, kde jsou relativně nízké hodnoty indukce (kvůli saturaci) a kde není potřeba dosahovat vysokých rychlostí. Bude však nutné zlepšit jejich koloidní stabilitu.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] ODENBACH, Stefan. *Magnetoviscous effects in ferrofluids*. Berlin: Springer, c2002, x, 151 p. Lecture notes in physics, m71. ISBN 35-404-3068-7.
- [2] ODENBACH, Stefan. *Ferrofluids: magnetically controllable fluids and their applications*. New York: Springer, c2002, xi, 251 p. ISBN 35-404-3978-1.
- [3] MAYER, Daniel. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. Magnetické kapaliny a jejich použití (1. část)* [online]. 3/2007 [cit. 2013-09-25]. ISSN: 1210-0889. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/vyhledavani-vysledek/magneticke-kapaliny-a-jejich-pouziti-1-cast-34814.html>
- [4] MAYER, Daniel. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku. Magnetické kapaliny a jejich použití (2. část – dokončení)* [online]. 4/2007 [cit. 2013-09-25]. ISSN: 1210-0889. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=34590](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34590)
- [5] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006, 139 s. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [6] HRABCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: EDIS - vydavateľstvo, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [7] RUSŇÁK, Štěpán a Petr ŘEZÁČEK. *Elektrické přístroje 1. 2.*, přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Katedra elektrických strojů, 155 s. ISBN 80-708-2825-0
- [8] HODLOVÁ, Miluše, Pavel KOLOUCH a Konstantin SCHEJBAL. *Elektrické přístroje*. Plzeň: VYSOKÁ ŠKOLA STROJNÍ A ELEKTROTECHNICKÁ V PLZNI, 1979, 252 s.
- [9] HRABOVCOVÁ, Valéria, Ladislav JANOUŠEK, Pavol RAJFAJDUS a Miroslav LIČKO. *Moderné elektrické stroje*. Žilina: Žilinská univerzita, 2001. ISBN 80-7100-809-5.
- [10] KATEDRA ELEKTRONIKY, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. *STEJNOSMĚRNÉ STROJE (MOTORY): DC SÉRIOVÉ MOTORY [PDF]*. [cit. 7.2.2014]. Dostupné z: [http://www.fe1.vsb.cz/kat430/data/epo/EP\\_motory%20DC.pdf](http://www.fe1.vsb.cz/kat430/data/epo/EP_motory%20DC.pdf)
- [11] JARMARA, Martin a Čestmír ONDRUŠEK. *Výpočet ztrát univerzálního motoru metodou konečných prvků*. *Elektrorevue* [online]. 2004 [cit. 2014-02-07]. Dostupné z: <http://www.elektrorevue.cz/clanky/04026/index.html>
- [12] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-704-3509-7.
- [13] X82 Series Vacuum Cleaner Motor. Weiku: Integrating Global Trade Leads [online]. [cit. 2014-02-20]. Dostupné z: [http://www.weiku.com/products/6535027/universal\\_vacuum\\_cleaner\\_motor.htm](http://www.weiku.com/products/6535027/universal_vacuum_cleaner_motor.htm)
- [14] PAVELKOVÁ, Naděžda. Účinnost elektrických motorů a snižování spotřeby elektrické energie: Ztráty v elektrickém motoru. *Elektro: odborný časopis pro elektrotechniku*. 2008, č. 10. Dostupné z: [http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id\\_document=37850](http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=37850)
- [15] NOVÁ, Martina. *Magnetické kapaliny: teorie, experimenty a jejich použití*. Plzeň, 2009. Bakalářská práce. ZČU.
- [16] MAYER, Daniel. Magnetické kapaliny - nový perspektivní elektrotechnický materiál. *Ročenka Elektro 2008: elektrotechnická příručka*. Praha: FCC Public, 2008.
- [17] Engelmann, S. et al.: *Concept of a new type of electric machines using ferrofluids*. *Journ. of Mag. and Mag. Material*, 2005, 293, p. 685-689.
- [18] NETHE, A. et al.: *Magneto hydrodynamics*. 2001, p. 312-317.



## 6 Přílohy

### 6.1 Měření č.1 – Přitažná síla kapaliny k PM

**Tab. č. 4 Měření indukce magnetu**

Magnet o rozměrech 40 x 19 x 4 mm		
Měření č.	B [mT]	$B_p$ [mT]
1	368	281,2
2	230	
3	200	
4	240	
5	368	

**Tab. č. 5 Indukce ve vzduchové mezeře**

Indukce ve vzduchové mezeře		
Měření č.	B [mT]	$B_p$ [mT]
1	170	190
2	180	
3	190	
4	180	
5	230	

Horní sklo mělo tloušťku 1,5 mm.

**Tab. č. 6 Přitažlivá a gravitační síla působící na kapalinu**

Q [ml]	F [N]	$F_{lmi}$ [N]	Váha kap. [g]	$F_G$ na kap. [N]
0	0,00	0,00	0,00	0,000
1	1,10	1,10	1,16	0,012
2	1,30	0,65	2,31	0,023
3	2,00	0,67	3,47	0,035
4	2,60	0,65	4,62	0,046
5	3,10	0,62	5,78	0,058
6	3,60	0,60	6,93	0,069
7	3,80	0,54	8,09	0,081
8	4,20	0,53	9,24	0,092
9	4,70	0,52	10,40	0,104
10	5,00	0,50	11,55	0,116

Dle tab. č. 4 měření indukce magnetu

$$B_p = \frac{B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + B_5}{5} \quad (6.1)$$

$$B_p = \frac{368 + 230 + 200 + 240 + 368}{5} \quad (6.2)$$

$$B_p = 281,2 \text{ mT} \quad (6.3)$$

Dle tab. č. 6 výpočet přitažné síly na jeden ml kapaliny  $F_{1ml}$  pro poslední řádek tabulky

$$F_{1ml} = \frac{F}{Q} \quad (6.4)$$

$$F_{1ml} = \frac{5}{10} \quad (6.5)$$

$$F_{1ml} = 0,5 \text{ N} \quad (6.6)$$

Dle tab. č. 6 výpočet gravitační síly působící na kapalinu  $F_G$  pro poslední řádek tabulky

$$F_G = \frac{m_k \cdot 10}{1000} \quad (6.7)$$

$$F_G = \frac{11,55 \cdot 10}{1000} \quad (6.8)$$

$$F_G = 0,116 \text{ N} \quad (6.9)$$

## 6.2 Měření č.2 – Zvýšení přitažných sil

### Pomocí siloměru

**Tab. č. 7 Indukce v mezeře**

Indukce v mezeře		
Spodní strana horního skla		
Měření č.	B [mT]	B <sub>p</sub> [mT]
1	230	246,67
2	280	
3	230	
Horní strana spodního skla		
Měření č.	B [mT]	B <sub>p</sub> [mT]
1	240	230
2	250	
3	200	

**Tab. č. 8 Přitažná síla mezi magnety**

Q [ml]	F [N]	F <sub>1ml</sub> [N]
0	9	0
1	9,8	9,8
2	9,8	4,9
3	10,2	3,4
4	10,3	2,6
5	10,9	2,2
6	11,4	1,9
7	11,9	1,7

### Pomocí váhy

**Tab. č. 9 Indukce v mezeře (měření s váhou)**

Indukce v mezeře		
Spodní strana horního skla		
Měření č.	B [mT]	B <sub>p</sub> [mT]
1	290	269,40
2	277	
3	250	
4	280	
5	250	
Horní strana spodního skla		
Měření č.	B [mT]	B <sub>p</sub> [mT]
1	230	242,80
2	250	
3	253	
4	244	
5	237	

**Tab. č. 10** Tabulka pro graf korekce na ohyb skla

Korekce na ohyb			
Váha závaží* [g]	$F_o$ [N]	Váha <sub>KOR</sub> [g]	$F_{KOR}$ [N]
0	0	0	0
188	1,88	17	0,17
288	2,88	27	0,27
388	3,88	38	0,38
488	4,88	47	0,47
588	5,88	55	0,55
788	7,88	80	0,8

\* Závaží položené na sklo, které způsobovalo ohyb skla podobně jako zvýšení sil díky magnetické kapalině.

Tab. č. 11 Zvýšení sil pomocí váhy

měření č.	Q [ml]	$\Delta F$ [N]	$\Sigma \Delta F$ [N]	Chyba [N]	$F_{KOR}$ [N]	$F_C$ po korekci [N]	Rozptyl + [N]	Rozptyl - [N]	$\Delta F$ po korekci [N]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0,2	0,03	0,03	0,01	0	0,03	0,04	0,02	0,03
2	0,4	0,04	0,07	0,02	0	0,07	0,09	0,05	0,04
3	0,6	0,05	0,12	0,03	0	0,12	0,15	0,09	0,05
4	0,8	0,11	0,23	0,04	0	0,23	0,27	0,19	0,11
5	1	0,08	0,31	0,05	0	0,31	0,36	0,26	0,08
7	3	0,17	0,48	0,07	0	0,48	0,56	0,42	0,18
9	5	0,17	0,65	0,09	0,01	0,64	0,73	0,55	0,15
10	6	0,38	1,03	0,10	0,05	0,98	1,08	0,88	0,34
11	7	0,57	1,60	0,11	0,10	1,50	1,61	1,39	0,51
12	8	0,57	2,17	0,12	0,16	2,01	2,13	1,89	0,51
13	9	0,50	2,67	0,13	0,21	2,46	2,59	2,33	0,45
14	10	0,40	3,07	0,14	0,26	2,81	2,95	2,67	0,36
15	11	0,31	3,38	0,15	0,29	3,09	3,24	2,94	0,28
16	12	0,19	3,57	0,16	0,31	3,26	3,42	3,10	0,17
17	13	0,10	3,67	0,17	0,32	3,35	3,52	3,18	0,09
18	14	0,02	3,69	0,18	0,32	3,37	3,55	3,19	0,02
19	15	0,02	3,71	0,19	0,32	3,39	3,58	3,20	0,02
20	16	0,02	3,73	0,20	0,32	3,41	3,61	3,21	0,02
21	17	0,02	3,75	0,21	0,33	3,42	3,63	3,21	0,02
22	18	0,00	3,75	0,22	0,33	3,42	3,64	3,20	0,00
23	19	0,00	3,75	0,23	0,33	3,42	3,65	3,19	0,00

Výpočet korekční síly pro poslední řádek tab. č. 11

$$F_{KOR} = 0,1025 \cdot \Delta F - 0,0591 \quad (6.10)$$

$$F_{KOR} = 0,1025 \cdot 3,75 - 0,0591 \quad (6.11)$$

$$F_{KOR} = 0,33 \text{ N} \quad (6.12)$$

Výpočet celkové síly po korekci pro poslední řádek tab. č. 11

$$F_C = \Sigma \Delta F - F_{KOR} \quad (6.13)$$

$$F_C = 3,75 - 0,33 \quad (6.14)$$

$$F_C = 3,42 \text{ N} \quad (6.15)$$

Výpočet kladného rozptylu pro poslední řádek tab. č. 11

$$\text{Rozptyl} = F_C + \text{Chyba} \quad (6.16)$$

$$\text{Rozptyl} = 3,42 - 0,23 \quad (6.17)$$

$$\text{Rozptyl} = 3,19 \text{ N} \quad (6.18)$$

### 6.3 Měření č.3 – Na magnetickém obvodu

#### Měření vlivu indukce v mezeře

Měření vlivu indukce v mezeře bylo realizováno pro velikost vzduchové mezery  $\delta_L = 3,5$  mm,  $\delta_P = 3$  mm, váha horní části magnetického obvodu byla 1142 g. Při výpočtu celkové váhy je důležité, kdy byla váha nulována. Proto se v některých tabulkách od součtu pravé a levé váhy musí odečíst 1142 g a v ostatních se nic neodečítá.

Tab. č. 12 Bez kapaliny

Bez kapaliny					
$I_b$ [A]	B [mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	F [N]
0,00	7,8	609	536	3	0,03
0,20	17,8	624	549	31	0,31
0,42	28,9	657	577	92	0,92
0,60	38,7	700	612	170	1,70
0,80	49,5	761	664	283	2,83
1,00	61,0	845	735	438	4,38
1,20	72,1	944	816	618	6,18
1,40	84,6	1076	925	859	8,59
1,60	96,9	1226	1052	1136	11,36
1,80	110	1408	1204	1470	14,70
2,02	125	1664	1424	1946	19,46
2,20	139	1906	1626	2390	23,90
2,42	157	2293	1950	3101	31,01
2,59	173	2661	2261	3780	37,80

Tab. č. 13 S kapalinou ve střední a v pravé mezeře

S kapalinou ve střední a v pravé mezeře							
$I_b$ [mA]	B [mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	F [N]	$\Delta F$ [N]	$\Delta F$ [%]
0	9	602	537	-3	-0,03	x	x
0,8	64	884	758	500	5,00	2,17	76,68
1	77	993	879	730	7,30	2,92	66,67
1,2	89,8	1124	992	974	9,74	3,56	57,61
1,4	103	1292	1135	1285	12,85	4,26	49,59
1,6	116,4	1495	1307	1660	16,60	5,24	46,13
1,8	130,7	1740	1518	2116	21,16	6,46	43,95
2	145,6	2026	1763	2647	26,47	7,01	36,02
2,2	162,3	2385	2070	3313	33,13	9,23	38,62
2,4	180	2813	2430	4101	41,01	10,00	32,25
2,6	199	3336	2876	5070	50,70	12,90	34,13

Tab. č. 14 S kapalinou pouze ve středním sloupci

S kapalinou pouze ve středním sloupci							
$I_b$ [A]	B[mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	$F_{sK}$ [N]	$\Delta F$ [N]	$\Delta F$ [%]
0,6	45,8	735	653	246	2,46	0,76	44,71
0,8	58,2	821	726	405	4,05	1,22	43,11
1,0	70,3	925	812	595	5,95	1,57	35,84
1,2	82,0	1042	911	811	8,11	1,93	31,23
1,4	95,0	1199	1042	1099	10,99	2,40	27,94
1,6	107,8	1373	1186	1417	14,17	2,81	24,74
1,8	121,3	1587	1364	1809	18,09	3,39	23,06
2,0	135,5	1840	1582	2280	22,80	3,34	17,16
2,2	151,2	2157	1856	2871	28,71	4,81	20,13
2,4	167,3	2524	2170	3552	35,52	4,51	14,54
2,6	185,0	2988	2567	4413	44,13	6,33	16,75

Příklad výpočtu pro 1 A tab. č. 14 s kapalinou pouze ve střední sloupci.

$$váha_c = váha_L + váha_P - váha \text{ horní části} \quad (6.19)$$

$$váha_c = 925 + 812 - 1142 \quad (6.20)$$

$$váha_c = 595 \text{ g (bez kap)} \quad (6.21)$$

$$\Delta F = F_{sK} - F_{BEZ} \quad (6.22)$$

$$\Delta F = 5,95 - 4,38 \quad (6.23)$$

$$\Delta F = 1,57 \text{ N} \quad (6.24)$$

$$\Delta F = \frac{F_{sK} \cdot 100}{F_{BEZ}} - 100 \quad (6.25)$$

$$\Delta F = \frac{5,95 \cdot 100}{4,38} - 100 \quad (6.26)$$

$$\Delta F = 35,84 \% \quad (6.27)$$

Tab. č. 15 S kap. ve všech sloupcích

S kap. ve všech sloupcích							
I <sub>b</sub> [A]	B [mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub>	F <sub>C</sub> [N]	ΔF [N]	ΔF [%]
0,00	0	0	0	0	0	0	0
0,60	47,0	187	162	349	3,49	1,82	108,98
0,80	58,3	291	251	542	5,42	2,51	86,25
1,00	69,0	412	353	765	7,65	3,29	75,46
1,20	80,8	565	481	1046	10,46	4,12	64,98
1,40	92,3	740	627	1367	13,67	4,83	54,64
1,60	104,9	957	807	1764	17,64	5,81	49,11
1,80	118,0	1214	1020	2234	22,34	6,96	45,25
2,00	131,0	1502	1260	2762	27,62	7,83	39,57
2,20	146,4	1876	1572	3448	34,48	9,37	37,32
2,40	161,9	2294	1924	4218	42,18	10,77	34,29
2,67	188,7	3126	2628	5754	57,54	14,49	33,66
2,40	168,4	2488	2092	4580	45,80	11,95	35,30
2,20	153,0	2070	1740	3810	38,10	10,29	37,00
2,00	138,4	1704	1436	3140	31,40	9,22	41,57
1,80	123,8	1380	1168	2548	25,48	7,52	41,87
1,60	110,1	1101	937	2038	20,38	6,47	46,51
1,40	96,7	860	735	1595	15,95	5,41	51,33
1,20	84,8	666	574	1240	12,40	4,61	59,18
1,00	72,2	493	428	921	9,21	3,75	68,68
0,80	60,4	355	310	665	6,65	3,02	83,20
0,60	48,3	237	210	447	4,47	2,29	105,05
0,40	36,4	141	126	267	2,67	1,53	134,21
0,20	23,5	64	58	122	1,22	0,81	197,56
0,00	10,0	13	12	25	0,25	0,22	733,33



**Měření vlivu velikosti vzduchové mezery****Tab. č. 16 Bez kapaliny**

Bez kapaliny								
Množství kapaliny = 0 ml U = 2,3 [V] I = 1 [A]								
$\delta_L$ [mm]	$\delta_P$ [mm]	$\delta_C$ [mm]	B [mT]	$B_R$ [mm]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	$F_{BEZ}$ [N]
3,5	3,0	3,25	59,5	8,7	849	718	1567	4,25
6,0	5,5	5,75	36,5	5,2	700	583	1283	1,41
8,5	8,0	8,25	26,8	3,8	663	548	1211	0,69
11,0	10,5	10,75	21,5	2,9	641	550	1191	0,49

**Tab. č. 17 S kapalinou ve středním sloupci**

S kapalinou ve středním sloupci								
U = 2,3 [V] I = 1 [A]								
$\delta_L$ [mm]	$\delta_P$ [mm]	B [mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	$F_{SK}$ [N]	$\Delta F$ [N]	$\Delta F$ [%]
3,5	3,0	68,0	929	810	1739	5,97	1,72	40,47
6,0	5,5	48,4	736	666	1402	2,60	1,19	84,40

Příklad výpočtu pro první řádek tab. č. 17 s kapalinou ve středním sloupci

$$váha_C = váha_L + váha_P \quad (6.28)$$

$$váha_C = 929 + 810 \quad (6.29)$$

$$váha_C = 1739 \text{ g} \quad (6.30)$$

$$\Delta F = F_{SK} - F_{BEZ} \quad (6.31)$$

$$\Delta F = 5,97 - 4,25 \quad (6.32)$$

$$\Delta F = 1,72 \text{ N} \quad (6.33)$$

$$\Delta F = \frac{F_{SK} \cdot 100}{F_{BEZ}} - 100 \quad (6.34)$$

$$\Delta F = \frac{5,97 \cdot 100}{4,25} - 100 \quad (6.35)$$

$$\Delta F = 40,47 \% \quad (6.36)$$

## Měření vlivu množství kapaliny

Toto měření bylo provedeno pro průměrnou velikost vzduchové mezery 5,75 mm.

**Tab. č. 18 Síla na množství kapaliny**

Síla na množství kapaliny					
Kapalina ve středním sloupci, $I = 1$ [A]					
Q [ml]	$\Delta$ váhy <sub>L</sub> [g]	$\Delta$ váhy <sub>P</sub> [g]	$\Delta$ váhy <sub>C</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	$F_C$ [N]
0	0	0	0	0	0
1	24	23	47	47	0,47
2	21	19	40	87	0,87
3	18	15	33	120	1,2
4	18	14	32	152	1,52
5	14	10	24	176	1,76
6	8	6	14	190	1,9
7	-23	-19	-42	148	1,48
8	-11	-8	-19	129	1,29
11	-9	-8	-17	112	1,12

## Zhodnocení chyb při měření

Tab. č. 19 Bez kapaliny

Bez kapaliny					
$I_b$ [A]	B [mT]	Váha <sub>L</sub> [g]	Váha <sub>P</sub> [g]	Váha <sub>C</sub> [g]	$F_{BEZ}$ [N]
0	6,3	0	0	0	0
0,2	15,5	16	14	30	0,3
0,4	24,3	46	40	86	0,86
0,6	33	90	77	167	1,67
0,8	43,3	156	135	291	2,91
1	52,5	234	202	436	4,36
1,2	62,9	341	293	634	6,34
1,4	74,1	476	408	884	8,84
1,6	85,3	639	544	1183	11,83
1,8	97,1	832	706	1538	15,38
2	110	1073	906	1979	19,79
2,2	123,7	1363	1148	2511	25,11
2,4	138,3	1707	1434	3141	31,41
2,67	162	2336	1969	4305	43,05
2,4	144	1836	1549	3385	33,85
2,2	130,4	1506	1275	2781	27,81
2	116,3	1198	1020	2218	22,18
1,8	105	968	828	1796	17,96
1,6	92,4	747	644	1391	13,91
1,4	80,6	564	490	1054	10,54
1,2	69,5	415	364	779	7,79
1	58,4	290	256	546	5,46
0,8	47,9	191	172	363	3,63
0,6	37,4	114	104	218	2,18
0,4	27,5	59	55	114	1,14
0,2	17,3	20	21	41	0,41
0	7,5	0	3	3	0,03

## 6.4 Měření č.4 – Měření na motoru

### Měření nakrátko

Tab. č. 20 Bez kapaliny a s kapalinou

Bez kapaliny 2						S kapalinou								
U [V]	I [A]	Váha [g]	P <sub>el</sub> [W]	F [N]	M [Nm]	U [V]	I [A]	Váha [g]	P <sub>el</sub> [W]	F [N]	M [Nm]	Δ M [Nm]	Δ M [%]	
15,0	2,7	29,4	40,1	0,29	0,103	15,0	2,7	32,8	40,1	0,328	0,115	0,034	11,42	
14,0	2,5	27,2	35,0	0,27	0,095	14,1	2,5	30,2	35,3	0,302	0,106	0,029	10,75	
11,4	2,0	20,0	22,8	0,20	0,070	11,6	2,0	23,0	23,2	0,230	0,080	0,030	14,90	
8,7	1,5	12,0	13,1	0,12	0,042	9,0	1,5	14,9	13,5	0,149	0,052	0,029	24,16	
5,8	1,0	6,0	5,8	0,06	0,021	5,9	1,0	7,9	5,9	0,079	0,028	0,019	31,66	
3,9	0,5	2,0	2,0	0,02	0,007	3,0	0,5	2,9	1,5	0,029	0,010	0,009	47,00	
0	0	0	0	0	0	0	0	0,66	0	0,007	0,002	0,000	0,000	

Výpočet je proveden pro první řádek tab. č. 20, délka ramena byla 350 mm.

$$M = F \cdot r \quad (6.37)$$

$$M = 0,294 \cdot 0,35 \quad (6.38)$$

$$M = 0,103 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (6.39)$$

$$\Delta M = \frac{M_{SKAP} \cdot 100}{M_{BEZ}} - 100 \quad (6.40)$$

$$\Delta M = \frac{0,11466 \cdot 100}{0,1029} - 100 \quad (6.41)$$

$$\Delta F = 11,42 \% \quad (6.42)$$

Tab. č. 21 Bez kapaliny 1

Bez kapaliny 1					
U [V]	I [A]	Váha [g]	P <sub>el</sub> [W]	F [N]	M [N·m]
14,9	2,7	28,4	39,8	0,284	0,099
14,5	2,5	24,5	36,3	0,245	0,086
12,0	2,0	17,0	24,0	0,170	0,060
9,0	1,5	9,7	13,5	0,097	0,034
6,0	1,0	4,5	6,0	0,045	0,016
3,0	0,5	1,4	1,5	0,014	0,005
0	0	0	0	0	0

**Tab. č. 22 Zvedání šroubků**

Šroubků ve vzduchu	Bez kapaliny			S kapalinou		
	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]	I [A]
0	1,26	1,25	1,25	1,26	1,23	1,25
1	1,26	1,25	1,25	1,26	1,23	1,25
2	1,55	1,58	1,55	1,26	1,23	1,25
3	1,77	1,79	1,74	1,60	1,67	1,62
4	2,00	2,00	1,96	1,82	1,68	1,92
5	2,24	2,11	2,24	2,09	2,07	1,92
6	2,24	x	x	2,13	2,07	2,20
5	1,21	x	x	1,06	0,99	0,92
4	1,00	0,90	x	0,67	0,99	0,92
3	0,78	0,64	0,87	0,23	0,63	0,65
2	0,37	0,12	0,31	x	x	x

**Tab. č. 23 Snížení velikosti proudů při zvedání závaží**

Průměr bez kap.	Průměr s kap.	Váha šroubů	Síla tahová	Celkový moment	Snížení proudů	Snížení proudů *
I [A]	I [A]	m [g]	F [N]	M [N·m]	$\Delta I$ [A]	$\Delta I$ [%]
0	0	0,00	0,00	0,000	0	0
1,25	1,25	15,60	0,16	0,017	0,007	0,532
1,56	1,25	31,20	0,31	0,034	0,313	20,085
1,77	1,63	46,80	0,47	0,051	0,137	7,736
1,99	1,81	62,40	0,62	0,069	0,180	9,060
2,20	2,03	78,00	0,78	0,086	0,170	7,739
2,24	2,13	93,60	0,94	0,103	0,107	4,762
1,21	0,99	78,00	0,78	0,086	0,220	18,182
0,95	0,86	62,40	0,62	0,069	0,090	9,474
0,76	0,50	46,80	0,47	0,051	0,260	34,061
0,27	x	31,20	0,31	0,034	x	x

\* Průměr z hodnot snížení proudů je 12,4 %.

## Měření zrychlení se setrvačником

Tab. č. 24 Setrvačnik 9 V

9 V bez kapaliny			9 V s kapalinou			9 V se zbytkem		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0,00
6	29,74	1,35	7	63,58	1,30	6	43,80	1,33
9	47,59	1,35	12	124,80	1,30	8	59,20	1,33
11	60,59	1,35	15	163,60	1,30	12	82,18	1,33
13	71,22	1,35	18	189,80	1,27	17	122,20	1,33
14	80,16	1,33	22	222,90	1,27	22	154,20	1,33
16	88,66	1,31	25	247,50	1,26	27	180,60	1,33
17	96,47	1,30	28	270,80	1,25	32	213,60	1,32
20	115,90	1,30	31	283,40	1,24	37	237,90	1,31
23	128,50	1,29	35	304,60	1,24	42	266,80	1,30
28	157,00	1,29	38	321,10	1,23	47	287,80	1,29
33	186,70	1,28	42	340,70	1,23	52	311,10	1,28
37	204,70	1,28	46	353,10	1,23	57	334,20	1,28
39	214,80	1,28	50	368,00	1,23	62	353,60	1,27
43	230,80	1,27	53	379,90	1,23	67	380,70	1,27
49	253,20	1,27	55	387,50	1,23	72	384,80	1,26
53	271,30	1,27	59	400,30	1,22	82	413,60	1,26
59	288,40	1,26	64	410,40	1,22	87	423,90	1,26
64	301,00	1,26	68	428,70	1,22	92	436,80	1,25
69	313,10	1,26	73	444,80	1,22	97	448,50	1,25
74	322,90	1,26	78	456,40	1,21	107	465,40	1,24
79	334,20	1,26	83	464,60	1,21	112	470,70	1,24
84	349,80	1,26	88	471,40	1,21	123	485,00	1,24
89	353,70	1,26	93	474,70	1,20	133	497,40	1,24

Příklad výpočtu setrvačnosti setrvačníků.

U černého disku byly naměřeny tyto hodnoty  $m = 0,672 \text{ kg}$ ,  $r = 117 \text{ mm}$ .

$$J = \frac{1}{2} m r^2 \quad (6.43)$$

$$J = \frac{1}{2} \cdot 0,672 \cdot 0,117^2 \quad (6.44)$$

$$J = 4,6 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (6.45)$$

Tab. č. 25 Setrvačnick 9,5 V

9,5 V bez kapaliny			9,5 V s kapalinou			9,5 V se zbytkem		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0		0	0	0
5	68,4	1,41	8	159,2	1,33	7	68,19	1,41
8	105,5	1,41	9	178,4	1,33	10	98,56	1,41
11	134,3	1,41	11	212,8	1,33	13	138	1,41
14	176,5	1,4	13	228,9	1,33	16	177	1,39
17	215,5	1,38	14	243,2	1,33	19	215,8	1,36
19	237,6	1,38	16	284,9	1,33	24	259,8	1,35
22	257,7	1,37	19	307,7	1,32	27	292,5	1,35
25	288,7	1,36	21	331	1,3	30	322,2	1,35
28	315,5	1,35	23	352,4	1,3	33	350,4	1,34
31	341,9	1,34	25	371,5	1,3	36	376,8	1,33
34	365,4	1,34	27	390,2	1,3	39	393,7	1,33
38	387,8	1,33	31	424	1,28	42	417	1,32
42	414,3	1,33	35	452,1	1,26	45	438,9	1,32
45	432,6	1,32	39	478,9	1,26	48	459,3	1,31
47	444,7	1,32	41	487,5	1,25	51	477,3	1,3
50	460,9	1,32	44	503,2	1,25	54	494	1,3
53	475,6	1,32	47	512,7	1,24	57	511,2	1,3
56	489,1	1,31	49	520,6	1,23	61	523,6	1,29
59	503,5	1,3	52	528	1,23	62	529,6	1,29
63	518,2	1,3	53	530,6	1,23	63	536,4	1,29

Tab. č. 26 Setrvačnick 10 V

10 V bez kapaliny			10 V s kapalinou			10 V se zbytkem		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0		2	0	0	0	0	0
5	102,3	1,46	10	163,4	1,44	9	166,8	1,44
6	122,9	1,46	12	200	1,44	11	205,2	1,44
8	143,4	1,46	14	232	1,44	12	225,1	1,44
10	183,4	1,46	15	249,3	1,44	13	243,3	1,44
12	221,5	1,46	17	265,1	1,44	14	261,7	1,44
14	256,5	1,45	19	293,5	1,43	15	280,3	1,44
16	290,9	1,44	20	307,3	1,42	17	314,5	1,44
18	321,3	1,43	21	321,5	1,41	19	331,7	1,44
20	352,1	1,43	23	347,9	1,4	20	347,7	1,43
22	379,7	1,42	25	372	1,4	21	362,6	1,43
25	406,9	1,41	27	398,9	1,4	23	392,7	1,42
28	444,7	1,4	29	411,7	1,4	26	433,5	1,41
30	468	1,39	31	434,2	1,4	28	460,1	1,4
32	489,2	1,39	34	450,7	1,4	29	472	1,4
34	510,5	1,39	36	469,9	1,4	30	484,3	1,39
36	530,7	1,39	38	486,6	1,4	32	507,4	1,38
38	549,2	1,39	42	520,7	1,4	34	529,4	1,38

Tab. č. 27 Setrvačníky

	r [mm]	m [kg]	J [kg · m <sup>2</sup> ]
Disk černý	117	0,672	$4,6 \cdot 10^{-3}$
Disk bílý	56,5	0,169	$0,27 \cdot 10^{-3}$
Disk stříbrný	35	0,106	$0,065 \cdot 10^{-3}$
Rotor			$0,117 \cdot 10^{-3}$
Celkový moment setrvačnosti			$5,052 \cdot 10^{-3}$



Tab. č. 28 Ověření doběhu pro 11,3 V bez kapaliny

Ověření doběhu pro 11,3 V bez kapaliny				
č. otáčky	Začátek otáčky [s]	Konec otáčky [s]	Čas jedné otáčky [s]	n [ot/min]
1	0,028	0,056	0,028	2142,857
2	0,056	0,086	0,030	2000,000
3	0,086	0,116	0,030	2000,000
4	0,116	0,147	0,031	1935,484
5	0,147	0,178	0,031	1935,484
6	0,178	0,206	0,028	2142,857
7	0,206	0,235	0,029	2068,966
8	0,235	0,265	0,030	2000,000
9	0,265	0,294	0,029	2068,966
10	0,294	0,324	0,030	2000,000
11	0,324	0,355	0,031	1935,484
12	0,355	0,385	0,030	2000,000
13	0,385	0,415	0,030	2000,000
14	0,415	0,446	0,031	1935,484
15	0,475	0,506	0,031	1935,484
16	0,506	0,535	0,029	2068,966
17	0,535	0,565	0,030	2000,000
18	0,565	0,595	0,030	2000,000
19	0,595	0,629	0,034	1764,706
20	0,629	0,668	0,039	1538,462
21	0,668	0,711	0,043	1395,349
22	0,711	0,762	0,051	1176,471
23	0,762	0,841	0,079	759,494
x	0,841	0,841	x	0

## Měření při vyšších otáčkách

Tab. č. 29 Pro 8 V

8 V bez kapaliny č.7			8 V s kapalinou č.9			8 V se zbytkem č.19		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	83,59	1,27	1	10,78	1,20	2	99,86	1,21
2	155,1	1,27	2	179,2	1,20	3	162,4	1,21
3	204,3	1,27	3	245,9	1,19	4	226,3	1,20
4	238,8	1,24	4	289,0	1,17	5	288,9	1,20
6	262,9	1,23	5	319,7	1,16	6	339,0	1,19
7	282,8	1,22	6	339,6	1,15	7	396,9	1,18
8	296,0	1,21	7	350,9	1,15	8	449,9	1,17
9	306,0	1,21	8	357,7	1,15	9	492,0	1,16
10	314,4	1,21	9	361,7	1,14	10	529,3	1,16
11	321,9	1,20	10	364,6	1,14	11	563,4	1,16
13	332,2	1,20	12	369,4	1,14	12	592,2	1,15
15	338,8	1,20	14	372,6	1,14	14	641,9	1,14
18	346,4	1,20	17	375,2	1,14	16	661,2	1,13
21	350,1	1,20	26	378,2	1,14	18	699,0	1,13
24	356,3	1,20	29	375,7	1,13	20	707,0	1,13
27	360,5	1,20	34	356,5	1,13	22	717,2	1,12
34	360,3	1,20	38	338,8	1,13	25	700,7	1,13
36	358,3	1,20	43	327,5	1,13	35	696,2	1,13
47	350,4	1,19	45	326,1	1,13	37	702,3	1,13
51	344,0	1,19	49	318,1	1,13	41	712,4	1,13
58	334,2	1,19	53	314,7	1,13	50	639,9	1,14
63	330,5	1,19	55	314,0	1,13	58	670,9	1,13

Tab. č. 30 Pro 8,5 V

8,5 V bez kapaliny č.8			8,5 V s kapalinou č.12			8,5 V se zbytkem č.20		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	12,7	1,29	1	247,0	1,12	1	163,6	x
2	206,0	1,29	2	335,5	1,22	2	297,3	x
3	301,8	1,28	3	398,3	1,21	3	449,2	x
4	380,1	1,24	4	445,5	1,20	4	572,8	x
5	435,7	1,23	5	476,6	1,19	5	665,6	x
6	473,8	1,23	6	496,9	1,19	6	732,9	x
7	503,0	1,21	7	509,1	1,18	7	785,2	x
8	524,5	1,20	8	515,7	1,17	8	828,9	x
9	539,5	1,20	9	518,8	1,16	9	869,7	x
10	557,2	1,20	12	521,9	1,16	11	925,1	x
13	564,3	1,20	15	523,8	1,16	12	946,3	x
15	566,5	1,20	18	521,8	1,16	14	970,8	x
20	563,9	1,20	22	519,8	1,16	16	971,3	x
23	561,9	1,20	26	518,6	1,16	19	985,1	x
26	560,9	1,20	30	515,9	1,17	21	1003,0	x
33	563,9	1,20	31	513,5	1,17	27	992,9	x
35	569,2	1,20	36	514,7	1,17	38	985,7	x
37	574,3	1,20	41	512,7	1,17	43	985,1	x
40	578,1	1,19	46	514,0	1,17	48	990,7	x
45	579,1	1,19	48	510,4	1,17	54	975,8	x
49	574,5	1,19	52	506,7	1,17	56	957,6	x
50	573,1	1,19	55	504,0	1,17	60	909,9	x
54	569,6	1,19	56	503,9	1,17	64	928,8	1,12

Tab. č. 31 Pro 9 V

9 V bez kapaliny č.1			9 V bez kapaliny č.2			9 V s kapalinou č.13		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0,0	0,00	0	0,0	0,00	0	0,0	0,00
3	583,8	1,38	1	154,9	1,39	1	177,9	1,23
3,5	609,1	1,38	2	351,0	1,39	2	356,7	1,23
4	676,6	1,38	3	518,7	1,39	3	490,6	1,23
5	726,0	1,35	4	633,4	1,39	4	556,0	1,20
6	760,0	1,30	5	710,4	1,32	5	593,3	1,19
7	785,0	1,22	6	762,4	1,25	6	604,6	1,18
9	819,0	1,22	7	798,8	1,23	7	615,4	1,17
10	831,0	1,21	8	824,2	1,21	8	621,5	1,17
12	842,6	1,21	10	851,4	1,21	9	640,8	1,18
14	854,4	1,20	12	867,4	1,21	10	673,8	1,18
16	862,2	1,20	14	876,4	1,21	11	702,9	1,17
19	868,8	1,20	18	881,0	1,21	13	739,3	1,16
21	870,4	1,20	21	879,9	1,20	15	760,7	1,16
23	868,6	1,20	24	877,3	1,20	17	772,0	1,16
28	869,9	1,20	25	876,4	1,20	19	780,5	1,16
31	870,1	1,20	29	879,7	1,20	22	789,1	1,16
35	869,1	1,20	31	882,7	1,20	25	790,0	1,16
36	871,0	1,20	35	888,2	1,20	29	790,6	1,16
38	874,1	1,20	39	890,0	1,20	34	792,1	1,16
40	876,2	1,20	43	880,4	1,20	38	796,2	1,16
42	881,8	1,20	46	875,2	1,20	44	807,1	1,17
44	884,2	1,20	66	876,8	1,20	49	811,5	1,17
46	885,3	1,20	86	881,3	1,20	51	813,0	1,17
50	885,0	1,20	94	870,8	1,20	54	810,7	1,17
51	885,0	1,20	103	878,0	1,20	63	805,0	1,17

**Tab. č. 32 Pro 9 V bez kapaliny**

9 V bez kapaliny č. 6		
t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0,0	0
3	127,4	X
4	328,2	X
5	487,3	X
11	838,8	X
13	855,9	X
15	862,2	X
18	865,0	1,2
22	867,3	X
25	870,1	X
28	873,2	X
33	877,3	X
37	878,4	X
42	866,2	X
46	858,8	X
50	850,0	X
53	846,6	X

**Tab. č. 33 Pro 9,5 V**

9,5 V bez kapaliny č. 3			9,5 V s kapalinou č. 15		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0	0
1	213,2	1,30	1	152,4	1,29
2	445,4	1,30	2	395,4	1,29
3	663,2	1,30	3	587,0	1,29
4	808,8	1,30	4	724,4	1,29
5	906,0	1,30	5	804,3	1,27
6	974,3	1,27	6	844,2	1,25
7	1021,0	1,25	7	875,8	1,23
8	1052,0	1,22	8	891,3	1,21
9	1074,0	1,21	10	892,3	1,20
11	1098,0	1,21	12	901,5	1,20
13	1114,0	1,21	13	892,4	1,20
15	1123,0	1,21	17	890,9	1,19
18	1129,0	1,21	19	896,1	1,20
23	1133,0	1,21	22	900,4	1,20
27	1128,0	1,21	28	913,9	1,20
32	1123,0	1,21	30	921,6	1,20
37	1126,0	1,21	34	928,1	1,20
43	1131,0	1,21	40	931,3	1,20
49	1126,0	1,22	46	925,9	1,20
56	1127,0	1,22	52	915,3	1,20
61	1133,0	1,22	56	915,0	1,20
62	1133,0	1,22	62	925,1	1,20

Tab. č. 34 Pro 10 V

10 V bez kapaliny č. 4			10 V s kapalinou č. 16			10 V se zbytkem č. 22		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,8	237,9	1,33	1	217,2	1,33	1	190,5	1,24
1	510,9	1,33	1,5	493,1	1,33	2	491,4	1,23
2	772,7	1,33	2	718,1	1,32	3	764,8	1,22
3	952,8	1,33	3	850,9	1,30	4	977,8	1,20
4	1072,0	1,29	4	929,7	1,27	4,9	1140,0	1,19
5	1152,0	1,28	5	983,1	1,27	5	1261,0	1,19
6	1208,0	1,25	6	1009,0	1,24	6	1352,0	1,17
7	1248,0	1,24	7	1026,0	1,23	7	1422,0	1,16
8	1277,0	1,23	8	1035,0	1,22	8	1478,0	1,15
9	1299,0	1,22	11	1054,0	1,22	9	1518,0	1,15
10	1314,0	1,21	15	1068,0	1,22	11	1549,0	1,15
11	1325,0	1,21	19	1047,0	1,22	13	1579,0	1,14
13	1340,0	1,21	21	1042,0	1,22	15	1527,0	1,14
17	1357,0	1,21	24	1050,0	1,22	17	1527,0	1,14
25	1359,0	1,21	31	1010,0	1,22	18	1527,0	1,15
30	1363,0	1,21	32	971,9	1,22	19	1527,0	1,15
34	1364,0	1,21	34	1011,0	1,22	20	1556,0	1,15
39	1351,0	1,21	37	1043,0	1,22	21	1569,0	1,15
43	1347,0	1,21	44	1061,0	1,22	27	1588,0	1,15
45	1351,0	1,21	47	1070,0	1,22	33	1628,0	1,15
50	1356,0	1,21	54	1056,0	1,22	45	1582,0	1,15
61	1352,0	1,21	59	1073,0	1,22	57	1580,0	1,15

**Tab. č. 35 Pro 11,3 V**

11,3 V bez kapaliny č. 5			11,3 V s kapalinou č. 17			11,3 V se zbytkem č. 24		
t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]	t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	361,2	1,40	1	331,5	1,20	1	6,6	1,24
2	747,7	1,40	2	699,6	1,20	2	689,7	1,24
3	1140,0	1,30	3	1005,0	1,13	3	1114,0	1,24
14	1932,0	1,23	4	1159,0	1,13	4	1399,0	1,20
15	1937,0	1,23	5	1225,0	1,13	5	1586,0	1,19
17	1942,0	1,23	6	1255,0	1,13	6	1717,0	1,19
19	1946,0	1,23	7	1286,0	1,13	7	1816,0	1,18
21	1949,0	1,23	8	1311,0	1,14	8	1898,0	1,17
24	1956,0	1,22	11	1319,0	1,17	9	1966,0	1,17
29	1958,0	1,22	14	1313,0	1,19	10	2022,0	1,17
31	1955,0	1,22	15	1306,0	1,20	12	2090,0	1,17
34	1958,0	1,22	18	1286,0	1,22	14	2121,0	1,17
37	1962,0	1,22	20	1287,0	1,23	17	2153,0	1,17
39	1959,0	1,22	24	1267,0	1,25	20	2181,0	1,17
46	1960,0	1,22	25	1226,0	1,28	28	2165,0	1,17
47	1964,0	1,22	27	1212,0	1,28	35	2167,0	1,17
53	1959,0	1,22	29	1206,0	1,29	42	2177,0	1,17
58	1965,0	1,22	34	1112,0	1,30	45	2115,0	1,17
60	1963,0	1,22	35	1053,0	1,30	57	2109,0	1,17

**Tab. č. 36 Pro 11,3 V s kapalinou**

11,3 V s kapalinou č. 27		
t [s]	n [ot/min]	I [A]
0	0	0
7	1599	1,25
8	1642	1,24
10	1694	1,24
12	1724	1,23
15	1758	1,23
21	1775	1,22
32	1754	1,22
37	1758	1,22
46	1750	1,22

**Tab. č. 37 Doběhy 1**

11,3 V s kap. č. 17		9 V s kap. č. 13		9 V bez. č. 6		10 V bez č. 4		11,3 V bez č. 5	
t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]
0	971,8	0	805	0	849	0	1357	0	1960
0,872	0	1,008	0	0,933	0	1,68	0	2,311	0

**Tab. č. 38 Doběhy 2**

10 V zbytl. č. 22		8,5 V bez č. 8		8,5 V s kap. č. 12		8,5 V zbytl. č. 20		11,3 V zbytl. č. 24	
t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]	t [s]	n [ot/min]
0	1568	0	567,8	0	503,9	0	934,5	0	2052
2,15	0	0,595	0	0,605	0	1,178	0	2,518	0