

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK DC A EC MOTORKŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

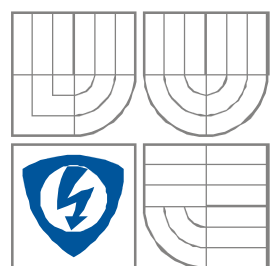
Radek Chlebný

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLÓGIÍ**

**ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY
A ELEKTRONIKY**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC
ENGINEERING

MĚŘENÍ CHARAKTERISTIK DC A EC MOTORKŮ

MEASUREMENT OF DC AND EC MOTORS CHARACTERISTICS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

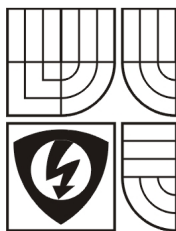
Radek Chlebný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Vondruš

BRNO, 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Chlebný Radek

Ročník: 3

ID: 98621

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Měření charakteristik DC a EC motorků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Navrhněte a proveďte zdokonalovací úpravy stávajícího dynamometru.
2. Ověřte jeho vlastnosti včetně stanovení přesnosti měření.
3. Realizujte experimentální měření charakteristik vybraných vzorků elektromotorů.
4. Výsledky tabelárně uspořádejte a porovnejte s údaji producentů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1.10.2009

Termín odevzdání: 27.05.2010

Vedoucí projektu: Ing. Jiří Vondruš

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.
předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: **Radek Chlebný**

Bytem: **Ochoz 67, Nasavrky**

Narozen/a (datum a místo): **14. 1. 1987 v Chrudimi**

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00

jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:

doc. Ing. Čestmír Ondrušek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá

elektrotechnika a elektroenergetika

(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- disertační práce
 - diplomová práce
 - bakalářská práce
 - jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Měření charakteristik DC a EC motorků

Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jiří Vondruš

Ústav: výkonové elektrotechniky a elektroniky

Datum obhajoby VŠKP: 16.6.2010

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v*:

- tištěné formě – počet exemplářů 2
- elektronické formě – počet exemplářů 3

* hodící se zaškrtněte

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ihned po uzavření této smlouvy
 - 1 rok po uzavření této smlouvy
 - 3 roky po uzavření této smlouvy
 - 5 let po uzavření této smlouvy
 - 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne:

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá stejnosměrnými komutátorovými a elektricky komutovanými motory firmy Maxon motor AG. První část pojednává o jejich základních konstrukčních prvcích a věnuje se také vlastnostem těchto motorů jako je doba života, otáčkové vlastnosti, účinností a způsoby řízení. Práce se dále zabývá vlastnostmi, principem činnosti a konstrukcí vířivé brzdy. Dalším důležitým tématem je provedené vylepšení konstrukce dynamometru. Poslední část práce obsahuje samotné měření zadaných stejnosměrných komutátorových motorů Maxon RE a Maxon S, které jsou zatěžovány vířivou brzdou a závěrečné zhodnocení měření s porovnáním naměřených hodnot s údaji výrobce.

Abstract

The Bachelor thesis deals with commutator direct current motors and electronically commutated motors of company Maxon motor AG. The first part of its deals basic structural elements and focuses on the characteristics of these engines, such as lifetime, revolution properties, efficiency and control methods. The thesis deals with properties, principle of operation and construction of hysteresis brake. Another important theme is improved by the construction of the dynamometer. The last part contains the actual measurement of DC commutator motors assigned Maxon RE and Maxon S, which are loaded with hysteresis brake and final evaluation measurements comparing measured values with the data producer.

Klíčová slova

Maxon RE10, Maxon RE13, Maxon S-č.2322.980-53.235-200, Mobac GMBH HB-3M-2, Mobac GMBH HB-20M-2, momentová charakteristika, proudová charakteristika, strmost, momentová konstanta, otáčková konstanta, mezní odpor vinutí, samonosné vinutí, stejnosměrný komutátorový motor, stejnosměrný elektricky komutovaný motor, vířivá brzda

Keywords

Maxon RE10, Maxon RE13, Maxon S-č.2322.980-53.235-200, Mobac GMBH HB-3M-2, Mobac GMBH HB-20M-2, torque characteristics, current characteristics, speed/torque gradient, torque constant, speed constant, terminal resistance, self-winding, commutator direct current (DC) motor, electronically commutated (EC) motor, hysteresis brake

Bibliografická citace

CHLEBNÝ, R. Měření parametrů DC a EC motorků. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010, 80 stran. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jiří Vondruš.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Měření charakteristik DC a EC motorků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne

Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jiřímu Vondrušovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

Podpis autora



Obsah

1 ÚVOD	15
2 STEJNOSMĚRNÉ KOMUTÁTOROVÉ MOTORY	16
2.1 KONSTRUKCE STEJNOSMĚRNÝCH KOMUTÁTOROVÝCH MOTORŮ MAXON RE	16
2.1.1 SAMONOSNÉ VINUTÍ.....	17
2.1.2 PERMANENTNÍ MAGNETY	18
2.1.3 ROZDĚLENÍ KARTÁČŮ	19
2.2 VLASTNOSTI STEJNOSMĚRNÝCH KOMUTÁTOROVÝCH MOTORŮ MAXON	21
2.2.1 OTÁČKY	21
2.2.2 ŽIVOTNOST	21
2.2.3 ÚČINNOST	22
3 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKY KOMUTOVANÉ MOTORY	23
3.1 KONSTRUKCE ELEKTRICKY KOMUTOVANÝCH MOTORŮ MAXON EC	23
3.2 ŘÍZENÍ ELEKTRICKY KOMUTOVANÝCH MOTORŮ	26
3.2.1 SNÍMAČE STEJNOSMĚRNÝCH EC MOTORŮ	26
3.2.2 ŘÍZENÍ BEZ SNÍMAČE POLOHY ROTORU	29
4 VÍŘIVÁ BRZDA	30
4.1 PRINCIP ČINNOSTI	30
4.2 KONSTRUKCE	30
5 SPECIFIKACE MĚŘENÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ	32
5.1 SPECIFIKACE MOTORŮ MAXON RE	32
5.2 SPECIFIKACE MĚŘENÝCH VÍŘIVÝCH BRZD	35
5.2.1 MOBAC GMBH HB-3M-2	35
5.2.2 MOBAC GMBH HB-20M-2	36
6 KONSTRUKCE DYNAMOMETRU	38
6.1 NÁVRHY ZDOKONALENÍ MĚŘICÍHO MODELU	38
6.1.1 HYSTEREZNÍ BRZDA	38
6.2 NOVÉ ULOŽENÍ TĚLA VÍŘIVÉ BRZDY	38
6.3 SENZORY NEELEKTRICKÝCH VELIČIN	41
6.3.1 INKREMENTÁLNÍ ROTAČNÍ SNÍMAČ POLOHY A OTÁČEK.....	42
6.3.2 SNÍMAČ HEDS-9040	44
7 MĚŘENÍ	46
7.1 MĚŘENÍ PROVEDENÉ V RÁMCI SEMESTRÁLNÍHO PROJEKTU	46
7.1.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	46
7.1.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY	48
7.1.3 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE	55
7.1.4 ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ MĚŘENÍ	55
7.2 MĚŘENÍ V RÁMCI BAKALÁŘSKÉ PRÁCE	56



7.2.1 SCHÉMA ZAPOJENÍ.....	58
7.2.2 NAMĚŘENÉ HODNOTY	60
7.2.3 STANOVENÍ PŘESNOSTI MĚŘENÍ POMOCÍ OPTICKÝCH SNÍMAČŮ:	72
7.2.4 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE.....	73
8 ZÁVĚR.....	74
POUŽITÁ LITERATURA	75
PŘÍLOHY	77



SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obrázek 2-1 Konstrukce stejnosměrného motoru Maxon RE [1].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2-2 Magnetické pole uvnitř motoru [8].....</i>	<i>16</i>
<i>Obrázek 2-3 Vznik mechanického momentu [1].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-4 Patentové měděné samonosné vinutí Maxon s kosočtvernými závity [8].....</i>	<i>17</i>
<i>Obrázek 2-5 Omezení jiskření metodou CLL [8].....</i>	<i>19</i>
<i>Obrázek 2-6 Průběh proudu na kovových kartáčích [1].....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2-7 Průběh proudu na grafitových kartáčích s viditelnými proudovými špičkami [1]....</i>	<i>20</i>
<i>Obrázek 2-8 Vznik jiskření při komutaci [8].....</i>	<i>22</i>
<i>Obrázek 3-1 Konstrukce válcového EC motoru [1].....</i>	<i>23</i>
<i>Obrázek 3-2 Závislost výstupního momentu na úhlu natočení rotoru [1].....</i>	<i>24</i>
<i>Obrázek 3-3 Závislost proudu do vinutí statoru na úhlu natočení rotoru [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3-4 Závislost proudu do vinutí statoru na úhlu natočení rotoru [1].....</i>	<i>25</i>
<i>Obrázek 3-5 Schéma otevřené smyčky [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3-6 Schéma uzavřené smyčky [1].....</i>	<i>26</i>
<i>Obrázek 3-7 Schéma resolveru [19].....</i>	<i>27</i>
<i>Obrázek 3-8 Výstupní signál Halloových sond [1].....</i>	<i>28</i>
<i>Obrázek 3-9 Snímání polohy rotoru bez snímače [1].....</i>	<i>29</i>
<i>Obrázek 4-1 Konstrukce vířivé brzdy [16].....</i>	<i>30</i>
<i>Obrázek 5-1 Rozměrová specifikace motorku Maxon RE 13, č. 118566 [15].....</i>	<i>32</i>
<i>Obrázek 5-2 Rozměrová specifikace motorku Maxon RE 10, č. 118392 [15].....</i>	<i>33</i>
<i>Obrázek 5-3 Rozměrová specifikace motoru Maxon S 2322.980-53.235-200 [20].....</i>	<i>34</i>
<i>Obrázek 5-4 Vířivá brzda Mobac GMBH HB-3M-2 [16].....</i>	<i>35</i>
<i>Obrázek 5-5 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [16].....</i>	<i>36</i>
<i>Obrázek 5-6 Vířivá brzda Mobac GMBH HB-20M-2.....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 5-7 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [16].....</i>	<i>37</i>
<i>Obrázek 6-1 Rozebraná vířivá brzda Mobac GMBH HB-20M-2.....</i>	<i>38</i>
<i>Obrázek 6-2 Výkresová dokumentace k návrhu obalu vířivé brzdy.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-3 Fotografie obalu zepředu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-4 Fotografie obalu zezadu.....</i>	<i>39</i>
<i>Obrázek 6-5 Výkresová dokumentace k přírubě.....</i>	<i>40</i>
<i>Obrázek 6-6 Odleva: uložení kuličkového ložiska Kinex, kluzného ložiska a dvou ložisek SKF... </i>	<i>41</i>
<i>Obrázek 6-7 Vyrobené kódové kolečko.....</i>	<i>41</i>



<i>Obrázek 6-8 Princip činnosti inkrementálního rotačního senzoru [24].....</i>	<i>42</i>
<i>Obrázek 6-9 Nákres tříkanálového kódového kolečka [24].....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 6-10 Princip detekce směru otáčení [24].....</i>	<i>43</i>
<i>Obrázek 6-11 Detekce signálu při různých rozlišeních [23].....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6-12 Rozměry senzoru HEDS-9040 [21].....</i>	<i>44</i>
<i>Obrázek 6-13 Blokové schéma HEDS-9040 [21].....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 6-14 Kódové kolečko HEDS-6140 [22].....</i>	<i>45</i>
<i>Obrázek 7-1 Schéma zapojení.....</i>	<i>46</i>
<i>Obrázek 7-2 Měřicí pracoviště.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-3 Detail spojení vířivé brzdy s motorkem pevnou spojkou.....</i>	<i>47</i>
<i>Obrázek 7-4 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon RE13.....</i>	<i>51</i>
<i>Obrázek 7-5 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon RE10.....</i>	<i>54</i>
<i>Obrázek 7-6 Výpočet úhlu náklonu α.....</i>	<i>56</i>
<i>Obrázek 7-7 Výpočet těžiště soustavy spojovací tyč, závaží, matice.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 7-8 Schéma zapojení.....</i>	<i>58</i>
<i>Obrázek 7-9 Měřicí pracoviště.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 7-10 Detail spojení motorku s hysterezní brzdou pomocí pružné spojky.....</i>	<i>59</i>
<i>Obrázek 7-11 Detail upevnění tělesa dynamometru na stojanu.....</i>	<i>60</i>
<i>Obrázek 7-12 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=1V$.....</i>	<i>61</i>
<i>Obrázek 7-13 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=2V$.....</i>	<i>62</i>
<i>Obrázek 7-14 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=3V$.....</i>	<i>63</i>
<i>Obrázek 7-15 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=4V$.....</i>	<i>64</i>
<i>Obrázek 7-16 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=5V$.....</i>	<i>65</i>
<i>Obrázek 7-17 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=6V$.....</i>	<i>66</i>
<i>Obrázek 7-18 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=7V$.....</i>	<i>67</i>
<i>Obrázek 7-19 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=8V$.....</i>	<i>68</i>
<i>Obrázek 7-20 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=9V$.....</i>	<i>69</i>
<i>Obrázek 7-21 Závislost otáček na napájecím napětí motorku Maxon S.....</i>	<i>70</i>



SEZNAM TABULEK

<i>Tabulka 5-1 Specifikace motoru Maxon RE13, č.118566 [15].....</i>	<i>32</i>
<i>Tabulka 5-2 Specifikace motoru Maxon RE10, č.118392 [15].....</i>	<i>33</i>
<i>Tabulka 5-3 Specifikace motoru Maxon S, č.2322.980-53.235-200 [20]</i>	<i>34</i>
<i>Tabulka 5-4 Specifikace vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [13].....</i>	<i>35</i>
<i>Tabulka 5-5 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [16]</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5-6 Specifikace vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [13].....</i>	<i>36</i>
<i>Tabulka 5-7 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [16].....</i>	<i>37</i>
<i>Tabulka 7-1 Naměřené hodnoty motorku Maxon RE13</i>	<i>48</i>
<i>Tabulka 7-2 Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE13.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabulka 7-3 Porovnání naměřené specifikace motorku Maxon RE13 s hodnotami výrobce.....</i>	<i>50</i>
<i>Tabulka 7-4 Naměřené hodnoty motorku Maxon RE10.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7-5 Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE10.....</i>	<i>52</i>
<i>Tabulka 7-6 Porovnání naměřené specifikace motorku Maxon RE10 s hodnotami výrobce.....</i>	<i>53</i>
<i>Tabulka 7-7 Přehled měřících přístrojů.....</i>	<i>55</i>
<i>Tabulka 7-8 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=1V$.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 7-9 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=2V$.....</i>	<i>61</i>
<i>Tabulka 7-10 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=3V$.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabulka 7-11 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=4V$.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabulka 7-12 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=5V$.....</i>	<i>64</i>
<i>Tabulka 7-13 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=6V$.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabulka 7-14 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=7V$.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabulka 7-15 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=8V$.....</i>	<i>68</i>
<i>Tabulka 7-16 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=9V$.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabulka 7-17 Vypočtené hodnoty otáček naprázdno.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabulka 7-18 Charakteristické hodnoty motorku Maxon S, č.2322.980-53.235-200.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 7-19 Porovnání naměřených hodnot motorku Maxon S s údaji výrobce.....</i>	<i>71</i>
<i>Tabulka 7-20 Výpis měřících přístrojů.....</i>	<i>73</i>



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

symboly	název	jednotka
I_m	Elektrický proud motorkem	[A]
I_b	Elektrický proud vířivé brzdy	[A]
n	otáčky	$[\text{min}^{-1}]$
M	točivý moment	[Nm]
α	počet dílků stupnice	-
k	převodová konstanta	-
U_n	napájecí napětí	[V]
X_S	skutečná hodnota	-
X_M	měřená hodnota	-
Δ	absolutní chyba	-
δ	relativní chyba	[%]
U_m	napětí motoru	[V]
M_{zb}	zbytkový moment bez proudu	[Nm]
g	tíhové zrychlení	$[\text{ms}^{-2}]$
l_x	vzdálenost	[m]
d	přírutek vzdálenosti	[m]
m_x	hmotnost	[kg]
n_0	otáčky naprázdno	$[\text{min}^{-1}]$



1 ÚVOD

Již v roce 1999 uveřejnil časopis Industrial Engineering News studii, podle které tvořily mikromotory na světovém trhu 83 % všech motorů v průmyslu. To znamená, že na jeden výkonný elektromotor připadaly i 3 až 4 malé motory^[1]. Tento trend trvá i nadále a toto odvětví průmyslu prochází dynamickým rozvojem.

Až do nedávné doby měly stejnosměrné motory dominantní postavení na trhu s říditelnými elektrickými pohony. Jejich přednosti spočívají hlavně v nezávislé regulaci momentu a magnetického toku. Konveční konstrukce stejnosměrných motorů má ovšem i své nevýhody, což jsou především vysoké nároky na údržbu, nízká spolehlivost, velká hmotnost a rozměry. A proto se jim stále větším konkurentem stávají s rozvojem mikroelektroniky střídavé asynchronní motory, jejichž řízení je čím dál tím jednodušší a přesnější.

Firma Maxon motor AG, sídlící ve švýcarské oblasti Sachseln, ovšem dokázala zbavit konveční stejnosměrné motory jejich nešvarů tím, že vyvinula a patentovala samonosné vinutí rotoru u jejich výrobků. Tím se zbavila železa v rotoru, jednoho z hlavních strůjců konce života konvenčních stejnosměrných motorů, který je způsoben jiskřením při komutaci. Tato konstrukce výrazně zvýšila životnost těchto typů motorů až na desítky tisíc hodin, rovněž jejich účinnost a otáčkové vlastnosti. Důkazem jejich spolehlivosti a vysoké kvality je i účast této firmy na americkém vesmírném programu NASA, kde stejnosměrné komutátorové motorky Maxon pohánějí vesmírné sondy zkoumající povrch planety Mars.

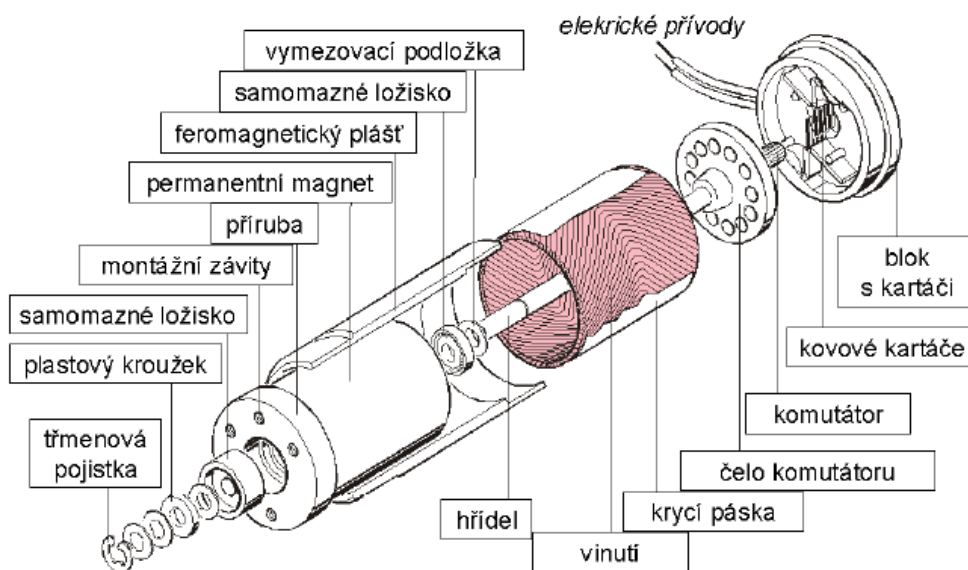
Tato práce se zabývá stejnosměrnými komutátorovými a elektricky komutovanými motorky, které jsou bezvýhradně cize buzené, objasňuje jejich konstrukční filozofii a přednosti. Cílem bakalářské práce je proměřit stejnosměrné komutátorové motorky od firmy Maxon motor AG a srovnat tyto hodnoty s hodnotami, které udává výrobce. Dále také provést změny dynamometru vedoucí ke zdokonalení měření momentových a proudových charakteristik.

Jelikož se jedná o měření malých motorů s malým točivým momentem, jakýkoliv nežádoucí vliv má velké následky na hodnoty měřených veličin. Takovýmto vlivem může být například nepružné spojení motorku s hysterezní brzdou, mechanický odpor napájecích vodičů hysterezní brzdy, nevhodná konstrukce upevnění brzdy na stojanu vedoucí k vyosení a mnoho dalších vlivů. Mým úkolem bylo co nejvíce těchto vlivů vyrušit návrhem zdokonalení dynamometru.

2 STEJNOSMĚRNÉ KOMUTÁTOROVÉ MOTORY

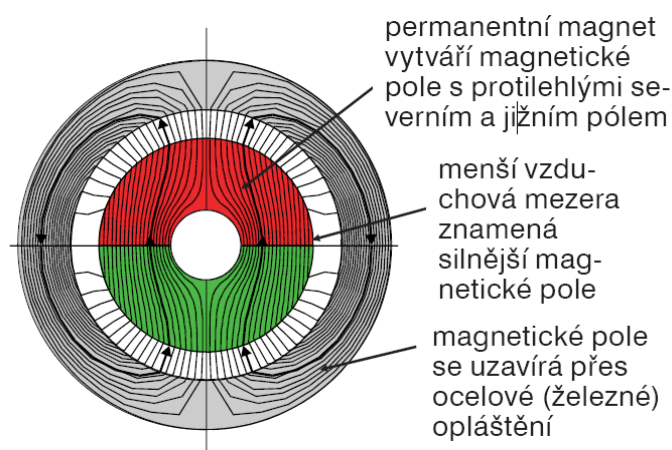
2.1 Konstrukce stejnosměrných komutátorových motorů Maxon RE

Základními konstrukčními prvky stejnosměrných komutátorových motorů firmy Maxon jsou permanentní magnety, kartáče, komutátor a samonosné měděné vinutí rotoru (viz. Obrázek 2-1).



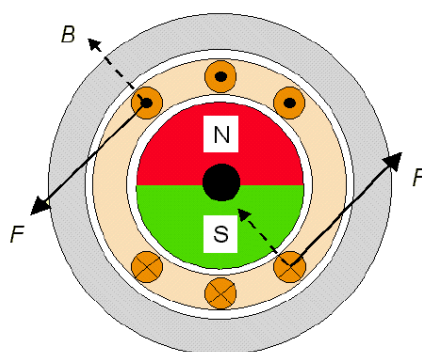
Obrázek 2-1 Konstrukce stejnosměrného motoru Maxon RE [1]

Zdrojem magnetického pole těchto typů motorů jsou permanentní magnety, které jsou umístěny v dutině uvnitř vinutí. Plášť statoru je z feromagnetického materiálu. Magnetické pole statoru se v důsledku nehybně umístěných permanentních magnetů neotáčí a jeho siločáry procházejí obvodovým feromagnetickým pláštěm motoru, dále prostupují vzduchovou mezerou pro samonosné vinutí a následně jádrem v dutině uvnitř vinutí, které je na čele spojeno se státorem (viz. Obrázek 2-2).



Obrázek 2-2 Magnetické pole uvnitř motoru [8]

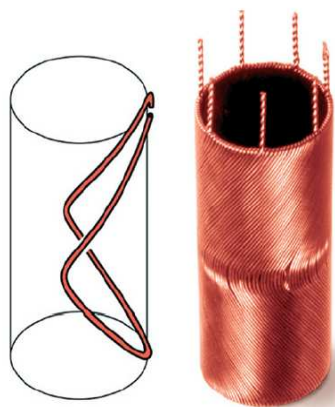
Siločáry magnetického pole permanentních magnetů působí ve vzduchové mezeře pro samonosné vinutí radiálně a interagují s magnetickým polem závitů vinutí protékáných proudem, čímž dochází vlivem Lorentzovy síly ke vzniku mechanického momentu. Výsledná magnetická pole rotoru a statoru jsou proti sobě natočena o 90° a tento úhel natočení si musí zachovat i při otáčení rotoru. K tomu slouží komutace, tedy přepínání proudu do sekcí vinutí, které jsou připojeny k lamelám komutátoru, podle aktuálního natočení rotoru zprostředkované kartáči. Elektrický proud v protilehlých závitěch má opačný směr a výsledná síla působící na vodič je dána součinem magnetické indukce B , délky vodiče l a velikostí protékajícího proudu I (viz. Obrázek 2-3).



Obrázek 2-3 Vznik mechanického momentu [1]

2.1.1 Samonosné vinutí

Ve snaze zdokonalit stejnosměrné motory, zvláště pak omezit opalování kartáčů a lamel komutátoru, vyvinula firma Maxon motor AG vinutí rotoru stejnosměrného motoru ve tvaru trubky z měděných vodičů, které je samonosné (viz. Obrázek 2-4). Tudiž nepotřebuje feromagnetické jádro, které je hlavním zdrojem energie pro vznik jiskření při komutaci. Takovéto vinutí přináší mnoho výhod oproti konvenční koncepci stejnosměrných motorů. Pro určitý výkon motoru jsou motory Maxon menší a lehčí. Příčný rozměr dutiny uvnitř samonosného vinutí je dostačující, aby nehybný permanentní magnet vyvodil potřebnou indukci v mezeře s vinutím. Pro vnější část magnetického obvodu pak stačí tenký feromagnetický plášť motoru, umístěný těsně nad vinutím, kde u klasických motorů jsou umístěny permanentní magnety. Tyto motory mají mnohem delší životnost, a to díky omezení již zmiňovaného jiskření při komutaci. Samonosné vinutí má nízkou indukčnost, čímž se i zkracuje elektrická a mechanická časová konstanta s hodnotami typicky mezi 5 a 10 ms.



Obrázek 2-4 Patentové měděné samonosné vinutí Maxon s kosočtvernými závity [8]



2.1.2 Permanentní magnety

Maxon používá ve svých stejnosměrných komutátorových motorech tři druhy permanentních magnetů. Magneticky tvrdé ferity našli uplatnění v řadě motorů Maxon F. Magnety ze slitiny Alnico se používají v programech motorů Maxon A a A-max. Nejsilnější permanentní magnety na bázi vzácné zeminy obsahující neodým, železo a bor (FeNdB) jsou zdrojem magnetického pole v řadách motorů Maxon RE a RE-max. Permanentní magnety se vyrábějí z magneticky tvrdých materiálů, které mají vysokou hysterizi.

2.1.2.1 Ferity

Feritové (také jinak keramické) permanentní magnety jsou standardní permanentní magnety, které jsou známé třeba jako kancelářské potřeby. Avšak nacházejí uplatnění i v mnoha odvětvích průmyslu, například tedy při výrobě elektromotorů.

Vyrábějí se dva druhy těchto magnetů a to izotropní a anizotropní. Izotropní magnety jsou vyráběny suchou cestou, tj. lisováním a následně jsou zmagnetovány působením magnetického pole. Anizotropní permanentní magnety se vyrábějí mokrou cestou, to znamená vstříkáváním do formy při působení magnetického pole.

Feritové permanentní magnety mají výhodu v tom, že nepodléhají korozi.

2.1.2.2 AlNiCo

Tento druh permanentních magnetů je tvořen směsí hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu. Jejich výroba se uskutečňuje sléváním nebo spékáním. Alnico magnety mají po magnetech ze vzácných zemin největší magnetickou energii, koercivitu i remanenci a jsou velice odolné vůči kyselinám a rozpouštědlům.

2.1.2.3 FeNdB

V nedávné době byly vyvinuty nové permanentní magnety s příměsemi vzácných zemin. Nejčastěji se přidává samarium (Sa) nebo neodým (Nd). V motorech Maxon se používají neodýmové permanentní magnety.

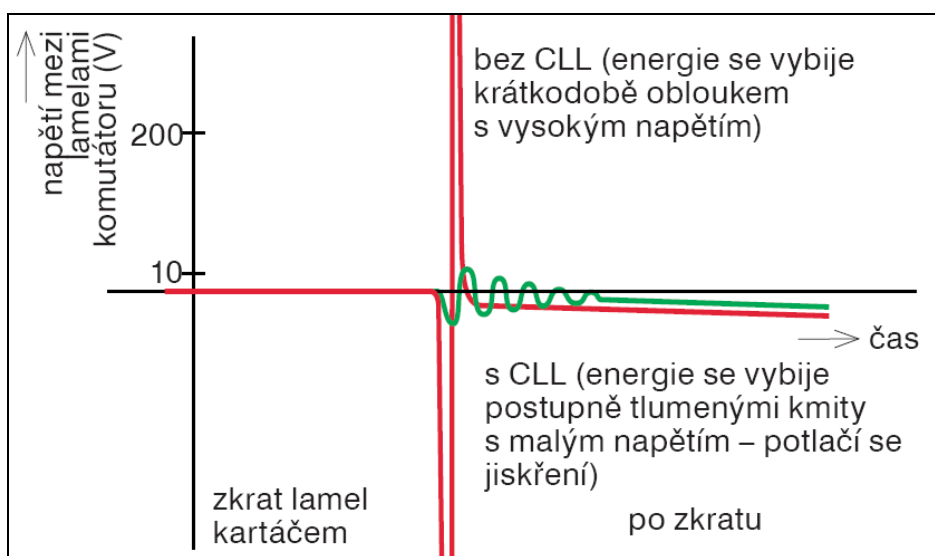
Magnety ze vzácných zemin jsou v dnešní době nejsilnějšími permanentními magnety a mají vynikající magnetické vlastnosti jako je energetická hustota a remanence. Vyrábějí se sintrováním a výsledné tvary magnetů se poté vyřezávají ze získaného materiálu. Magnety jsou tvrdé, ale velmi křehké a náchylné k rozbití. Další nevýhodou je, že podléhají korozi a proto se musí povrchově upravovat. Nanáší se vrstva niklu, zinku nebo epoxidové pryskyřice, anebo jsou povrchově upraveny pasivací.

2.1.3 Rozdělení kartáčů

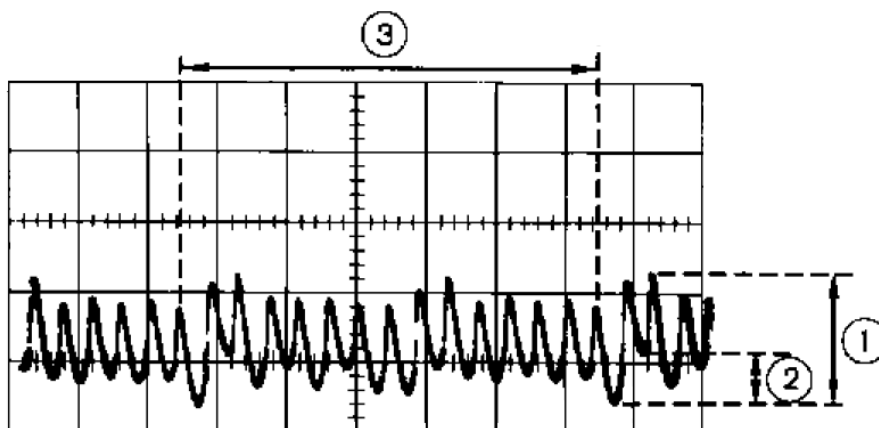
Motory Maxon se vyrábějí buď s kovovými kartáči, nebo s kartáči grafitovými. Pro pohony s rovnoměrným chodem bez častých rozběhů jsou vhodné kovové kartáče s menším přechodovým odporem na komutátor. Naopak pro pohony s častými rozběhy a krátkodobými přetíženími se používají kartáče grafitové.

2.1.3.1 Kovové kartáče

Kovové kartáče doléhají na komutátor vlastní pružností, jelikož malá přítlačná síla stačí pro dokonalý elektrický kontakt. Opalování kartáčů a lamel komutátoru je nepatrné a to díky malé indukčnosti vinutí rotoru bez železa. Pro velmi vysokou životnost kovových kartáčů se mezi přívody segmentů vinutí k lamelám komutátoru umísťují kondenzátory pro další omezení jiskření, to je takzvaná metoda CLL (capacitor long life) firmy Maxon motor AG (viz. Obrázek 2-5). Životnost komutace je pak dána délkou života samomazných ložisek. Z tohoto důvodu se kartáče během provozu nevyměňují, protože při jejich opotřebení je již obvykle opotřebeno i samomazné ložisko a mazivo na jeho povrchu ztrácí své vlastnosti.



Obrázek 2-5 Omezení jiskření metodou CLL [8]

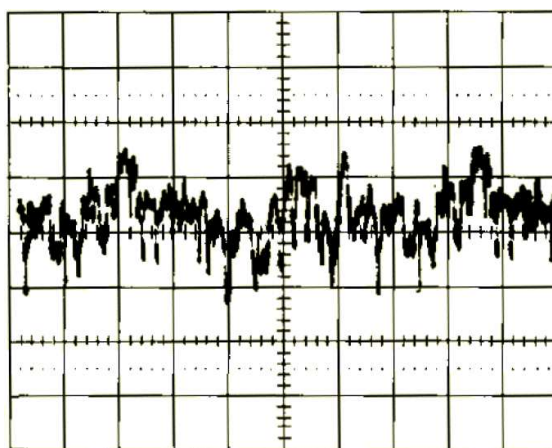


1. zvlnění způsobené otáčením vinutí v magnetickém poli během průchodu jedné lamely
2. modulace asymetrií vinutí
3. jedna otáčka

Obrázek 2-6 Průběh proudu na kovových kartáčích [1]

2.1.3.2 Grafitové kartáče

Grafitové kartáče doléhají na komutátor větší plochou než kartáče kovové, a jsou schopny přenést větší proudy. Za to ale vyžadují větší přitlačnou sílu. Mají tvar písmene L otočného na čepu. V důsledku větší přitlačné síly působí na rotor větší mechanické brzdění a vyšší proud naprázdno. Při provozu se z kartáčů vlivem opotřebování uvolňuje grafitový prach, který má za následek znečištění vnitřního prostoru motoru, ale zároveň působí i jako mazivo komutátoru. Grafitové kartáče nespĺňují mezinárodní limity elektromagnetického rušení, a to kvůli přechodovému odporu kontaktů kartáčů během otáčení rotoru, který je nestejněměrný a při malých prouděch roste. To má za následek ostré proudové špičky v porovnání s kovovými kartáči (viz. Obrázek 2-6 a 2-7). Amplituda zvlnění se snižuje s narůstajícím počtem lamel komutátoru.



Obrázek 2-7 Průběh proudu na grafitových kartáčích s viditelnými proudovými špičkami [1]



2.2 Vlastnosti stejnosměrných komutátorových motorů Maxon

Hlavními vlastnostmi stejnosměrných komutátorových motorů Maxon z hlediska jejich použití v automatizaci jsou dlouhá životnost, velké otáčky, malé rozměry a velká účinnost.

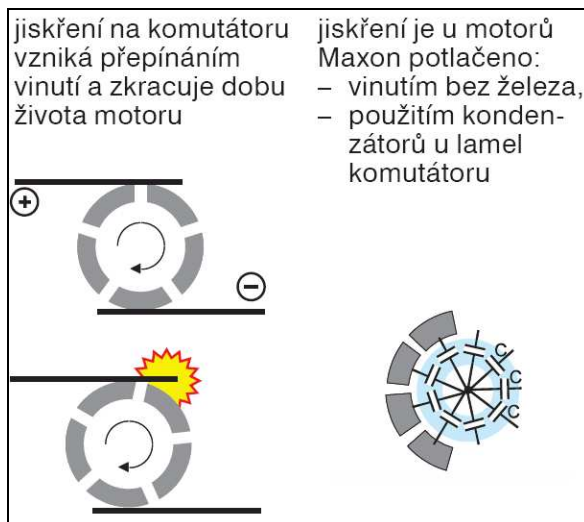
2.2.1 Otáčky

Základní předností stejnosměrných motorů je schopnost práce v širokém rozsahu otáček. Řízení pohybu je zajištěno komutací, tj. přepojováním proudu do částí vinutí a to podle aktuální polohy rotoru. Z toho plyne, že tyto motory nepotřebují pro svoji činnost bezpodmínečně řídicí elektroniku. Jejich otáčky lze řídit jen s pomocí změny napájecího napětí. Při chodu naprázdno, tedy bez zatížení, panuje pak mezi otáčkami a napájecím napětím přímá úměrnost. Při proměnném zatížení motoru, který je napájen konstantním napájecím napětím, se naopak otáčky mění. Vliv zatížení na otáčky je důležitý parametr motoru. Hodnotí se podle strmosti poklesu udávaného v otáčkách za minutu na 1 mNm. Určuje stabilitu otáček při kolísání zatížení v provozu. Další důležitou vlastností motoru, při proměnných otáčkách, je přímá úměra mezi výstupním mechanickým momentem a proudem procházejícím motorem. Všechny tyto lineární závislosti velmi usnadňují řízení těchto typů motorů.

Otáčky komutátorových motorů Maxon středních průměrů do 40 mm jsou omezené na 8000 až 12 000 otáček za minutu. U miniaturních motorů s průměry od 6 mm je tato hranice stanovena na 23 000 otáček za minutu. Tyto meze jsou stanoveny kvůli zajištění dostatečné délky života motorů a také kvůli pevnosti materiálu, na který působí značné odstředivé síly. Takto vysokých otáček se dosahuje díky postupné miniaturizaci průměrů komutátorů a tím i snížení jejich obvodových rychlostí. Nejmenší komutátory jsou nyní tvořeny tak, že jejich lamely spočívají přímo na keramických hřídelích z izolantu ZrO_2 . Takovéto keramické hřídele pak rovnou plní i funkci izolantu a mohou být vyvedeny z těla motoru buď jednostranně, nebo oboustranně, přičemž jednostranné vyvedení hřídele je vůči otáčkám výhodnější. A to proto, že průměr komutátoru může být menší, neboť ho lze umístit k zadnímu čelu motoru bez průchozí hřídele. Motor má pak větší přípustné otáčky a při shodných parametrech i vyšší výkon. Varianta s oboustranným vyvedením hřídele se používá jen v případech, kdy je k motoru namontován snímač.

2.2.2 Životnost

Nejvíce limitujícím prvkem pro dobu života stejnosměrných komutátorových motorů jsou kartáče a komutátor. Život konvenčních komutátorových motorů zpravidla končí opálením kartáčů a hran lamel komutátoru jiskřením (viz Obrázek 3-1). Jiskry je jiné označení pro elektrické oblouky, které vznikají mezi hranou kartáče a hranou lamely, která se od něj vzdaluje. Na sousední lamely jsou přitom připojeny přívody k jedné části vinutí. Při přechodu sousedních lamel pod kartáčem jsou tyto lamely spojeny nakrátko, přičemž se v jejich částech vinutí mění směr elektrického proudu, zaniká původní magnetické pole a mění se v opačné. To má za následek indukci napětí, které udrží proud, i když se lamela od kartáče vzdaluje a vytáhne za ní jiskru. Čím rychleji se komutátor otáčí, tím silnější je i jiskření. Díky konstrukci bez feromagnetického jádra se ovšem v samonosném vinutí motorů Maxon neindukuje tak velké napětí jako u konvenčních motorů a jiskření je mnohem menší.



Obrázek 2-8 Vznik jiskření při komutaci [8]

2.2.3 Účinnost

Díky konstrukci motory Maxon, z kterých bylo oproti konvenčním motorům vyloučeno feromagnetické jádro, dosahují vysoké účinnosti. Byly tak odstraněny ztráty přemagnetováním, ke kterému u běžného dvoupólového motoru dochází dvakrát za otáčku a rovněž se již neuplatňují ztráty hysterezí. Zbývají tak ztráty ve vinutí vznikající při průchodu proudu vinutím následkem jeho odporu, které jsou přímo úměrné odporu vinutí a druhé mocnině procházejícího proudu, dále jsou to ztráty při tření ložisek a kartáčů o komutátor a ztráty vzniklé ventilací.

Účinnost nejmenších motorů se pohybuje v řádech od 50 % do 70 %. S narůstajícím průměrem účinnost roste a u motoru RE40 dosahuje až hodnoty 92 %. Velká účinnost předurčuje tyto motory k použití v mobilních zařízeních, které jsou napájeny bateriově. Zde zlevňují napájecí systém a prodlužují dobu provozu. Další výhodou je větší zatížitelnost motorů daných rozměrů, protože při provozu se odvádí méně ztrátového tepla.

3 STEJNOSMĚRNÉ ELEKTRICKY KOMUTOVANÉ MOTORY

Hlavním důvodem ke vzniku elektricky komutovaných stejnosměrných motorů (tzv. EC motorů) bylo odstranění komutátoru a kartáčů ze stejnosměrných komutátorových motorů. Komutátorový systém má totiž za následek zkrácenou životnost motorů, nižší otáčky a rovněž způsobuje elektromagnetické rušení.

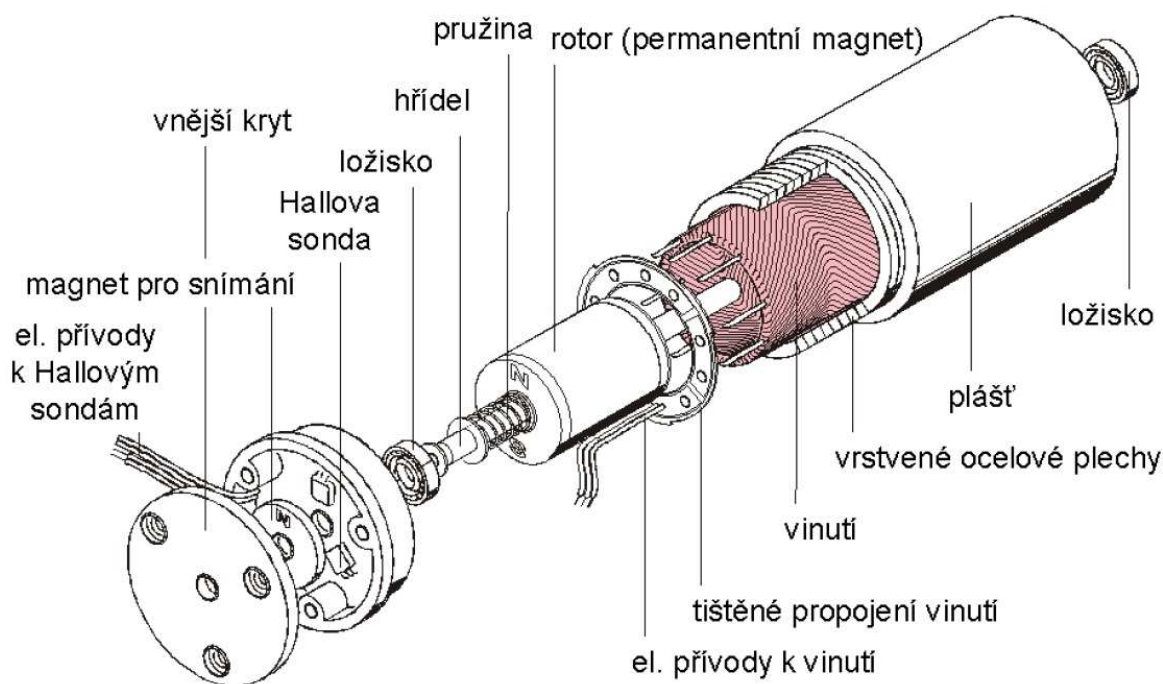
Malé bezkartáčové motory existovaly již v dřívějších dobách. Jednalo se však o motory napájené střídavým sinusovým napětím jako je servomotor, či třífázový AC motor. Elektricky komutované motory se začaly aplikovat jen ve zvláštních případech, například ve videorekordérech s poháněnou magnetickou hlavou.

Moderní EC motory již však pracují v plném rozsahu otáček a mechanických momentů s pozitivními vlastnostmi stejnosměrných komutátorových motorů.

3.1 Konstrukce elektricky komutovaných motorů Maxon EC

Stator válcového motoru je tvořen ložiskovými čely, která jsou propojena nerezovou nemagnetickou trubkou tvořící plášť motoru. Pod pláštěm se nachází další trubka pro uzavření magnetického obvodu. Ta je tvořena vrstvenými navzájem izolovanými ocelovými plechy ve tvaru mezikruží, které mají vysoký měrný ohmický odpor. Tato konstrukce snižuje ztráty hysterezí a vířivými proudy, vznikající v důsledku proměnného magnetického pole. S odstraněním komutátoru bylo nutné přemístit vinutí do statoru, aby se mohlo realizovat připojení jeho přívodů k napájení. Životnost motorů je pak omezena pouze dobou života kuličkových ložisek a dosahuje několika desítek tisíc hodin.

Permanentní magnet ze vzácných zemin FeNdB poté tvoří rotorovou část motoru, může být dvupólový, nebo čtyřpólový s minimálními rozměry, čímž zaručuje malou setrvačnost rotoru.



Obrázek 3-1 Konstrukce válcového EC motoru [1]

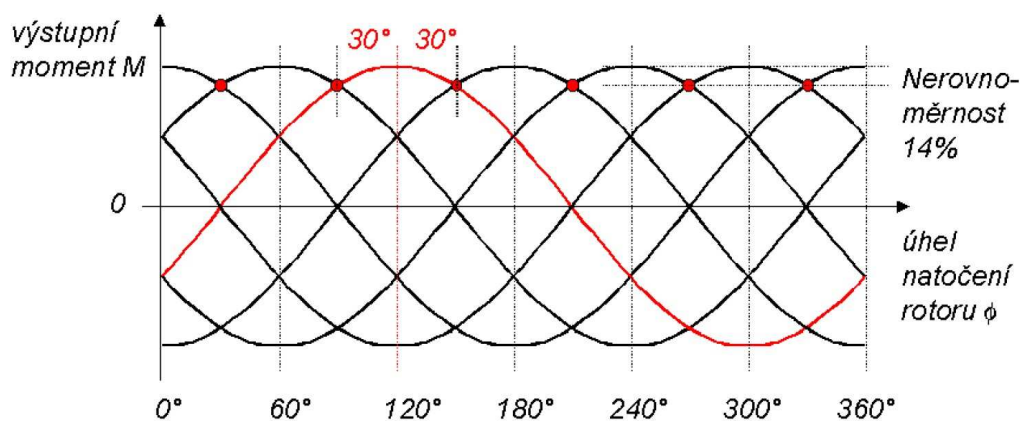
Přepínání napájení jednotlivých sekcí vinutí stejnosměrným proudem je realizováno elektronickým obvodem, který zpracovává informace o úhlu natočení rotoru pocházející nejčastěji ze tří Hallových sond umístěných ve statoru a podle něho tedy spíná jednotlivé části vinutí. Vinutí statoru je rozděleno na tři sekce s šesti vyvedenými vodiči, které jsou postupně napájeny stejnosměrným proudem s kladnou nebo zápornou polaritou.

Napájecí jednotka je připojena ke třem vývodům, zbylé tři vodiče jsou propojeny do trojúhelníku, či hvězdy. Zapojení do trojúhelníku je vhodné pro aplikace s vysokou rychlostí kvůli vyšší rychlostní konstantě, ale je zapotřebí vyšší proud. Zapojení do hvězdy má vyšší momentovou konstantu, nižší proud pro dané zatížení, nižší ztráty v elektronice, ale je potřebné vyšší napětí.

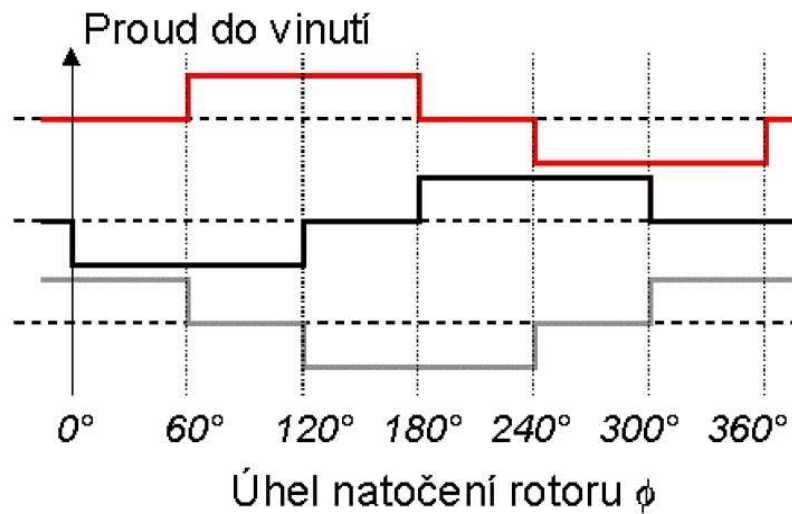
Řídící jednotky mohou generovat proud s obdélníkovým průběhem, což se týká těch levnějších, nebo sinusového průběhu u dražších jednotek.

Obdélníková komutace

Snímání polohy rotoru je uskutečňováno třemi Hallovými sondami. Elektrický proud na výstupu řídicí jednotky je obdélníkového průběhu. Například u dvoupólového stroje dochází ke komutaci 30° před a 30° po kolmé poloze magnetických polí, tedy směr magnetického pole zůstává stejný v rozsahu 60° . V tomto intervalu se mění vzájemné natočení magnetických polí statoru a rotoru za konstantního proudu, rovněž se mění i moment, než dojde k přepnutí na jinou část vinutí. Tím pádem moment kolísá až o 14%. Řídící jednotka zpracovává 6 hran signálů, a to je málo. Proto je regulace rychlosti při otáčkách pod 1000 ot./s nestabilní. U vícepólových motorů je možná regulace i od nižších otáček, například u 16-ti pólového diskového motoru to je od 125 ot./s.



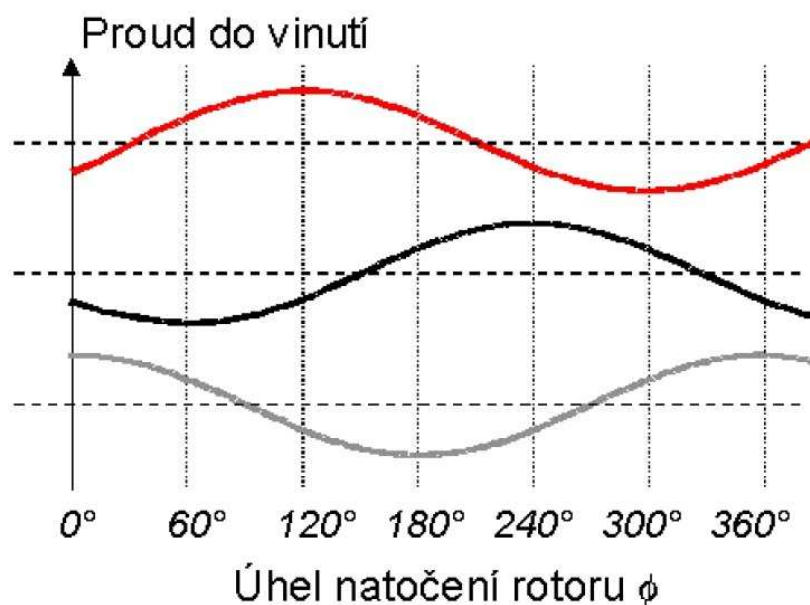
Obrázek 3-2 Závislost výstupního momentu na úhlu natočení rotoru [1]



Obrázek 3-3 Závislost proudu do vinutí statoru na úhlu natočení rotoru [1]

Sinusová komutace

U tohoto typu komutace není možné použít pouhých tří Hallových sond, ale je nutné zavést další měřicí prvek jakým je inkrementální snímač nebo samostatný resolver. Díky kvazisinusovému průběhu proudu nedochází k nerovnoměrnostem v průběhu momentu, jako tomu je u obdélkové komutace. To, jak se kvazisinusový průběh proudu bude blížit sinusovému, záleží čistě na hustotě impulsů z inkrementálního snímače.



Obrázek 3-4 Závislost proudu do vinutí statoru na úhlu natočení rotoru [1]

3.2 Řízení elektricky komutovaných motorů

EC motory nelze napájet pouhým připojením ke stejnosměrnému zdroji energie. Vždy je nutné použít alespoň základní řídicí jednotku. Nejjednodušším způsobem řízení je použití regulační otevřené smyčky, kterou je možné použít pro motory se snímačem, ale i bez snímače. Řídicí jednotka vytváří obdélníkové pulsy, kterými se napájí jednotlivé sekce vinutí. Samotná řídicí jednotka spotřebovává určitou hodnotu napětí k zásobení energií vlastní elektroniky. Rychlost motoru je pak sice dána vstupním napětím, ale otáčky jsou říditelné až od hodnoty napětí pro vlastní spotřebu jednotky. Nižších otáček není možné dosáhnout. Směr otáčení lze jednotkou nastavit.

• otevřená smyčka

- bez zpětné vazby
- výstup se neměří a nehodnotí

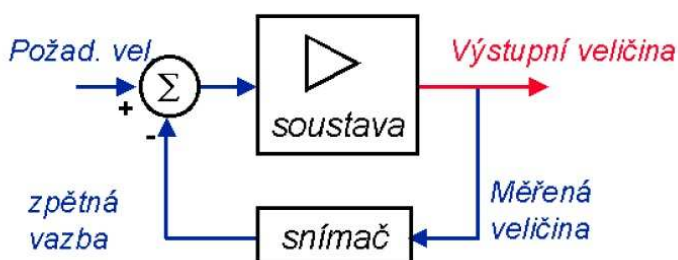


Obrázek 3-5 Schéma otevřené smyčky [1]

Řídicí jednotky využívající řízení pomocí uzavřené smyčky jsou složitější, ale za to umějí řídit jak rychlost motoru, tak i jeho polohu. Na motoru je nejčastěji z jedné strany umístěn snímač rychlosti a polohy a z druhé strany zátěž, buď přímo, nebo přes převodovku.

• uzavřená smyčka

- smyčka zpětné vazby
- výstupní veličina se měří a pak se upraví vstupní veličina do řídicí jednotky



Obrázek 3-6 Schéma uzavřené smyčky [1]

3.2.1 Snímače stejnosměrných EC motorů

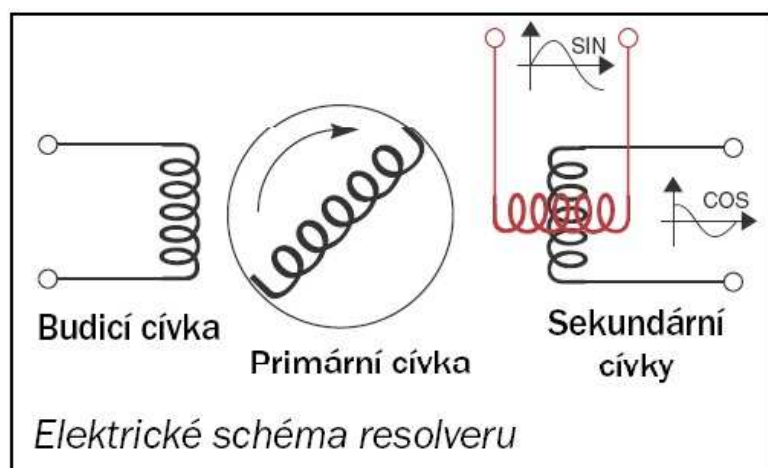
- Rozdělení snímačů:

- Resolvery
- Snímače se třemi Hallovými sondami
- Inkrementální optické snímače
- Snímače s Hallovými sondami a inkrementálními magnetickými snímači
- Inkrementální magnetické snímače s mikroelektronickými odporovými prvky

1) Resolvery

Jedná se o transformátor se dvěma sekundárními cívkami ve statoru navzájem natočenými o 90° . Primární cívka se nachází v rotoru a indukuje se do ní střídavé napětí s frekvencí 10 kHz z budící cívky. Na sekundárních cívkách se poté rovněž indukuje napětí, ale fázově posunuté o 90° elektrických, a to v důsledku otáčení primární cívky v rotoru. Snímač indikuje přesné hodnoty o poloze i rychlosti rotoru.

Největší výhodou tohoto snímače je možnost jeho použití v radioaktivním prostředí, kde snímače s polovodičovými prvky nefungují.

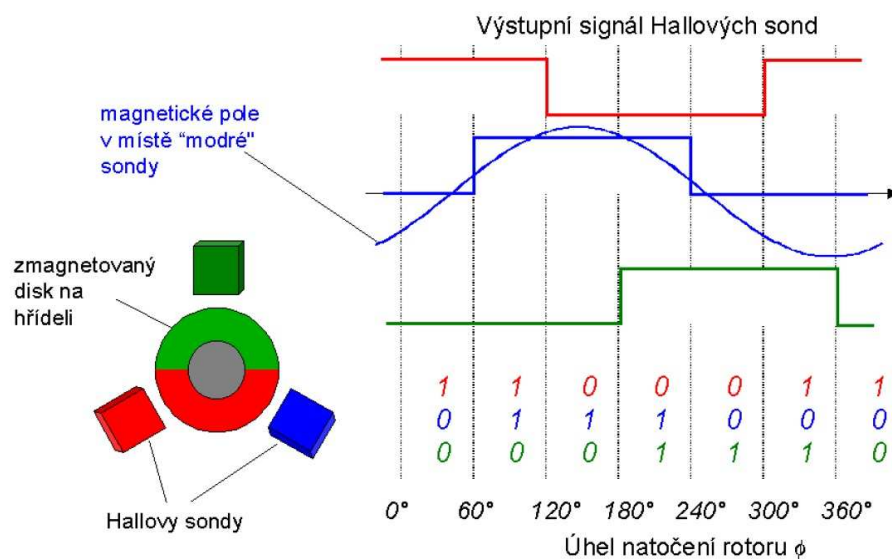


Obrázek 3-7 Schéma resolveru [19]

2) Snímače se třemi Hallovými sondami

Hallové sondy se nacházejí ve většině stejnosměrných EC motorech. Jak již je vidět z názvu, pracují na principu Hallova jevu, při kterém se v plochém, tenkém vodiči nebo polovodiči protékajícím proudem, ke kterému kolmo probíhají siločáry magnetického pole, generuje na jeho okrajích napětí. Velikost tohoto napětí je závislá na intenzitě magnetického pole a velikosti protékajícího elektrického proudu.

Sondy jsou vzájemně posunuty o 120° v tělesu snímače, které je umístěno proti zmagnetovanému kotouči na hřídeli motoru. V sondách vzniká analogový signál, který se zpracovává v elektronice snímače a převádí se na obdélníkový průběh. Řídící jednotka tento výstupní signál zpracovává a určuje podle něho úhel natočení rotoru. Na svém výstupu jednotka generuje obdélníkové napájecí pulsy.



Obrázek 3-8 Výstupní signál Hallových sond [1]

3) Inkrementální snímače

Tento typ snímačů je nejčastěji používaným zdrojem zpětné vazby pro řízení rychlosti a polohy u stejnosměrných komutátorových i elektronicky komutovaných motorů. Na výstupu snímačů se generují dva kanály A a B, které jsou navzájem posunuty o 90° a slouží k určení rychlosti a směru otáčení. Někdy je k dispozici i kanál I dávající jeden puls za otáčku, který je určen pro stanovení polohy rotoru.

- Rozdělení inkrementálních snímačů:

a) Optické inkrementální snímače

- Pracují na principu otáčení kódového kotouče s čárovým rastrem po obvodu, který je prosvětlován fotodiodou. Naproti fotodiodě je umístěn fototranzistor, který zaznamenává střídání světla a tmy na rastru kotouče a převádí je na elektrické impulsy, které se dále elektronicky zpracovávají.

b) Inkrementální magnetické snímače typu MEnc

- Snímač tvoří dvě Hallovy sondy, které zaznamenávají změny v intenzitě magnetického pole na povrchu dvou opačně zmagnetovaných magnetů. Tyto magnety jsou zasunuty do sebe a vytvářejí střídající se póly. Tento snímač je schopen generovat pouze kanály A a B.

c) Inkrementální magnetické snímače typu MR

- Skládají se z mikroskopických anisotropních pásků NiFe, které jsou umístěny na destičce s mikroelektronikou naproti kotouči s magnetickými póly. V závislosti na směru magnetického pole magnetů na kotouči se mění ohmický odpor miniaturních pásků. Jelikož stačí i slabé magnetické pole, může mít kotouč až 64 pólových dvojic. Zpracováním těchto změn odporu pásků lze získat snímač s 16 až 1024 pulsy na otáčku.

3.2.2 Řízení bez snímače polohy rotoru

Řídicí jednotky umějí určovat polohu rotoru i bez použití Hallových sond. Při otáčení permanentního magnetu v rotoru se totiž ve statorovém vinutí indukují proměnná elektromotorická síla EMS. Řídicí jednotka vyhodnocuje velikost této elektromotorické síly a podle ní určuje polohu rotoru. Po vyhodnocení generuje potřebné napájecí pulsy obdélníkového tvaru. Při rozběhu a malých rychlostech nepracuje řídicí jednotka přesně a parametry motoru jsou zhoršeny. Tento způsob měření polohy se uplatňuje u levnějších stejnosměrných motorů.

- *Snímání polohy rotoru bez snímače*

- *měření indukovaného napětí-EMS*

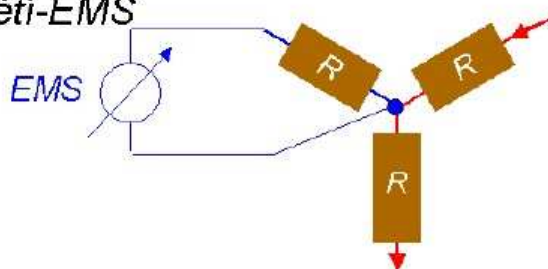
- na přívodu třetí sekce vinutí

- nutný uzel zapojení do Y

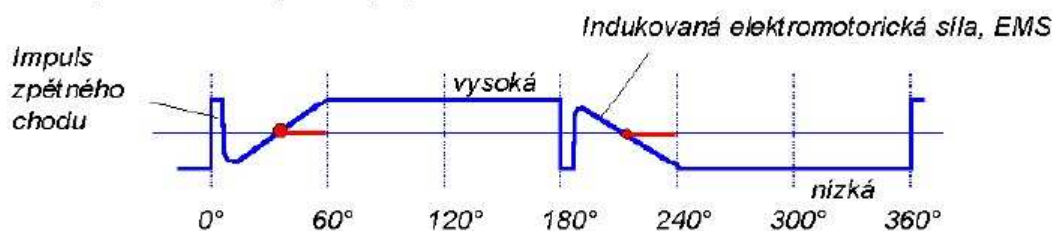
- přechod EMS přes nulu

- časové zpoždění 30°

- potřeba při malé rychlosti



- *nutný zvláštní postup při rozběhu*



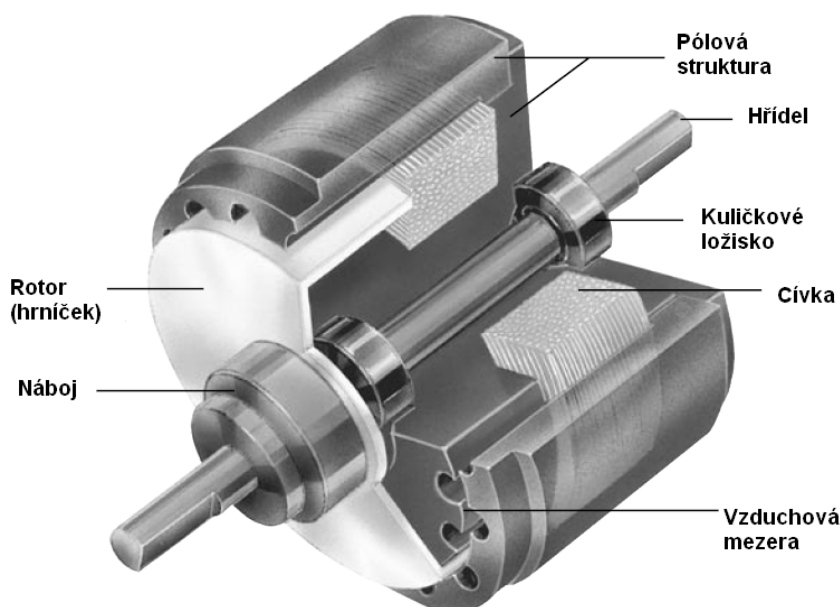
Obrázek 3-9 Snímání polohy rotoru bez snímače [1]

4 VÍŘIVÁ BRZDA

4.1 Princip činnosti

Vířivá brzda je využívána k měření zatěžovacích charakteristik pohonných jednotek. Je to elektrický točivý stroj, jehož brzdné účinky vytvářejí vířivé proudy uzavřené nakrátko v magnetickém obvodu brzdy. Konstrukčně je tvořena rotorem z oceli ve tvaru ozubeného kola a státorem, na němž je budící cívka. Ta, protékána stejnosměrným proudem, vytváří magnetické pole statoru. V tomto poli se otáčí rotor a v důsledku svého tvaru, kdy dochází při rotaci ke střídání zubu a mezery, způsobuje změny magnetického odporu a tím i magnetického toku. To má za následkem indukci napětí v magnetickém obvodu, čímž začnou obvodem téct vířivé proudy. Ty vytvářejí samotný brzdný moment tohoto typu brzdy. Z toho vyplývá, že je tento moment říditelný pouhou změnou velikosti budícího proudu. Vířivé proudy mají energii, která je určena energií dodávanou pohonnou jednotkou. Ta se pak mění v tělese brzdy v teplo, které je nutné odvádět, a proto musí mít vířivá brzda účinné chlazení.

Vířivou brzdou, co se týče elektrické stránky, lze považovat za synchronní stroj. Přičemž počet zubů rotoru se rovná počtu pólů synchronního stroje. Uvažuje se nekonečný počet fází a kotva je spojena nakrátko. V situaci, kdy se rotor neotáčí, nedochází ke změnám magnetického toku, nevytvářejí se tedy vířivé proudy, a tudíž ani nevzniká brzdný moment. Při otáčení rotoru je kmitočet vířivých proudů dán součinem počtu zubů a mechanické rychlosti rotoru.



Obrázek 4-1 Konstrukce vířivé brzdy [16]

4.2 Konstrukce

Vířivé brzdy se vyznačují svojí konstrukční jednoduchostí, malými rozměry vzhledem k výkonům, se kterými pracují a robustností. U starších typů těchto dynamometrů je v ložiskách otočně umístěn i stator, což umožňuje měření momentu například přenosem silové reakce



na ukazatel váhy nebo na tenzometrický snímač momentu. V praxi se však používá jednodušší konfigurace s budící cívkou na statoru, a to hlavně z hlediska konstrukčního.

Podle rozložení geometrického se vířivé brzdy dělí na brzdy s radiální a s axiální vzduchovou mezerou v magnetickém obvodu. Radiální vzduchová mezera má přitom podobné uspořádání jako mají mezery běžných elektrických točivých strojů, zatímco brzdy s axiální vzduchovou mezerou mají kruhový rotor ve tvaru desky s vysokými zuby. V tomto případě vybudí budící cívka magnetický tok, který prochází mezi dvěma polovinami statoru. V této mezeře se při otáčení střídají zuby a mezery a dochází ke změnám magnetické vodivosti a magnetického toku. Konstrukce brzdy s axiální vzduchovou mezerou dovoluje zmenšit její rozměry a tím pádem i hmotnost.



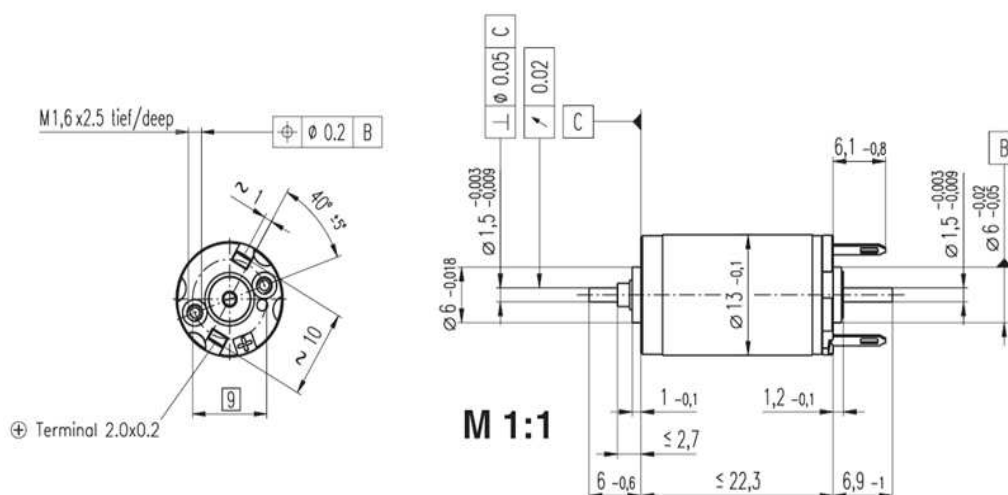
5 SPECIFIKACE MĚŘENÝCH ELEKTRICKÝCH STROJŮ

5.1 Specifikace motorů Maxon RE

Pro měření byly použity stejnosměrné komutátorové motory Maxon RE, a to konkrétně typ Maxon RE 13 s grafitovými kartáči a s výkonem 1,5 W a dalším měřeným motorem byl Maxon RE 10 s kovovými kartáči a rovněž s výkonem 1,5 W. Kromě třídy motorů Maxon RE byl změřen i motor Maxon S, č.2322-53.235-200 s grafitovými kartáči a s výkonem 6 W.

Maxon RE 13, č. 118566	
Hodnoty při jmenovitém napětí	
Jmenovité napětí [V]	20
Otáčky naprázdno [rpm]	13300
Proud naprázdno [mA]	29,6
Jmenovité otáčky [rpm]	8150
Jmenovitý moment (max. spojitý moment) [mNm]	1,22
Jmenovitý proud (max. spojitý proud) [A]	0,121
Rozběhový moment [mNm]	3,35
Proud při startu [A]	0,264
Maximální účinnost [%]	45
Vlastnosti	
Mezní odpor vinutí [Ω]	75,8
Mezní indukance [mH]	1,59
Momentová konstanta [mNm/A]	12,7
Otáčková konstanta [rpm/V]	751
Strmost [rpm/mNm]	4480
Mechanická konstanta [ms]	13,7
Setrvačnost rotoru [gcm ²]	0,292

Tabulka 5-1 Specifikace motoru Maxon RE13, č.118566 [15]

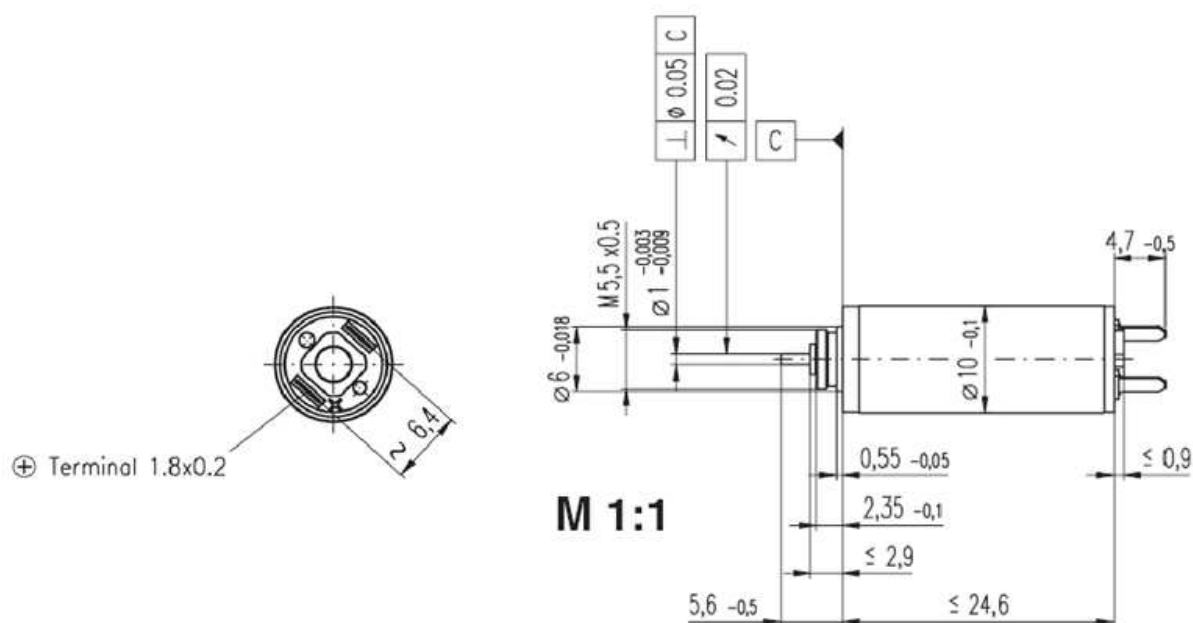


Obrázek 5-1 Rozměrová specifikace motorku Maxon RE 13, č. 118566 [15]



Maxon RE 10, č. 118392	
Hodnoty při jmenovitém napětí	
Jmenovité napětí [V]	3
Otáčky naprázdno [rpm]	13000
Proud naprázdno [mA]	23,9
Jmenovité otáčky [rpm]	6760
Jmenovitý moment (max. spojitý moment) [mNm]	1,48
Jmenovitý proud (max. spojitý proud) [A]	0,705
Rozběhový moment [mNm]	3,12
Proud při startu [A]	1,44
Maximální účinnost [%]	76
Vlastnosti	
Mezní odpor vinutí [Ω]	2,08
Mezní indukance [mH]	0,0173
Momentová konstanta [mNm/A]	2,16
Otáčková konstanta [rpm/V]	4410
Strmost [rpm/mNm]	4240
Mechanická konstanta [ms]	4,6
Setrvačnost rotoru [gcm ²]	0,103

Tabulka 5-2 Specifikace motoru Maxon RE10, č.118392 [15]

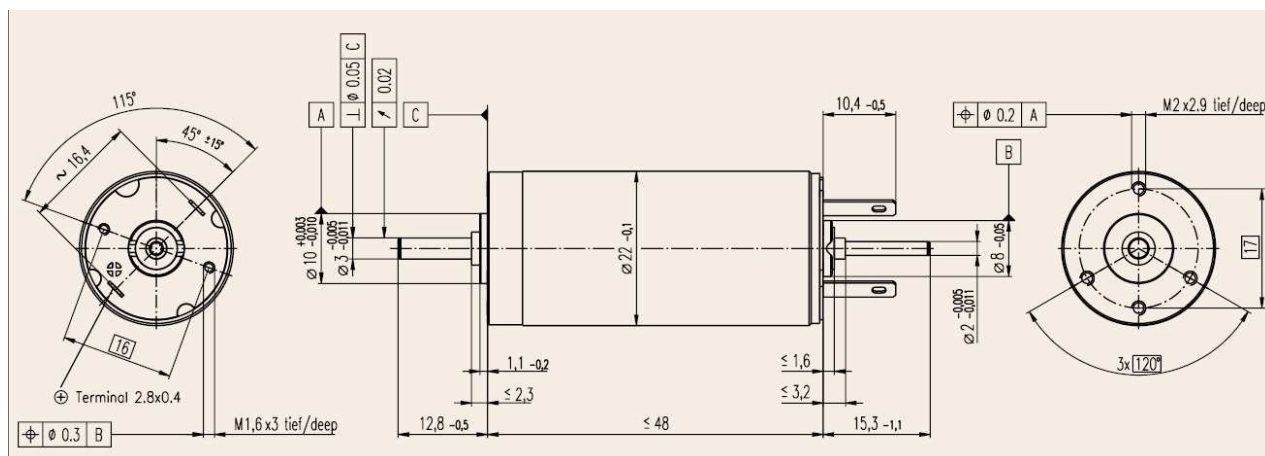


Obrázek 5-2 Rozměrová specifikace motorku Maxon RE 10, č. 118392 [15]



Maxon S, č.2322.980-53.235-200	
Hodnoty při jmenovitém napětí	
Jmenovité napětí [V]	12
Otáčky naprázdno [rpm]	7020
Proud naprázdno [mA]	42
Jmenovitý moment (max. spojitý moment) [mNm]	12,7
Rozběhový moment [mNm]	32,9
Vlastnosti	
Mezní odpor vinutí [Ω]	5,61
Momentová konstanta [mNm/A]	15,3
Otáčková konstanta [rpm/V]	622
Strmost [rpm/mNm]	227
Mechanická konstanta [ms]	13
Setrvačnost rotoru [gcm ²]	5,57

Tabulka 5-3 Specifikace motoru Maxon S, č.2322.980-53.235-200 [20]



Obrázek 5-3 Rozměrová specifikace motoru Maxon S 2322.980-53.235-200 [20]

5.2 Specifikace měřených vířivých brzd

K měření byla použita hysteretzní brzda Mobac GMBH HB-3M-2 s brzdňým momentem 24 mNm. V rámci navrhnutých vylepšení byla následně vyměněna za typ Mobac GMBH HB 20M-2 s brzdňým momentem 150 mNm.

5.2.1 Mobac GMBH HB-3M-2

Mobac GMBH HB-3M-2	
Točivý moment M [Nm]	0,024
Pracovní proud I_1 [mA]	155
Rezistence R při 25 °C ± 10% [Ω]	171
Napětí U při I_1 [V]	25
Otáčky n při 25 °C ± 10% [min^{-1}]	20000
Ztráty-nespojité [W]	20
Ztráty-spojité [W]	5
Zbytkový točivý moment bez proudu [Nm]	3,53E-04
Setrvačnost rotoru [$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$]	0,0043
Hmotnost [kg]	0,103

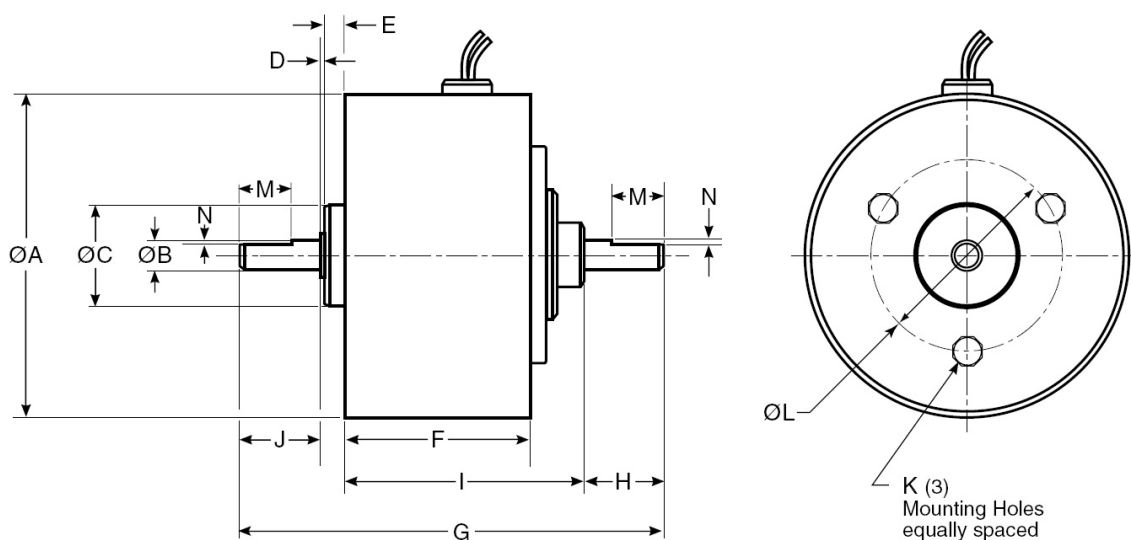
Tabulka 5-4 Specifikace vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [13]



Obrázek 5-4 Vířivá brzda Mobac GMBH HB-3M-2 [16]

Mobac GMBH HB-3M-2						
Rozměry [mm]						
$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$	D	E	F	G
31,8	3,00	10,00	0,6	2,0	18,6	42,0
H	I	J	K	$\varnothing L$	M	N
8,0	23,6	8,0	M2,5 x 4	19,0	-	-

Tabulka 5-5 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [16]

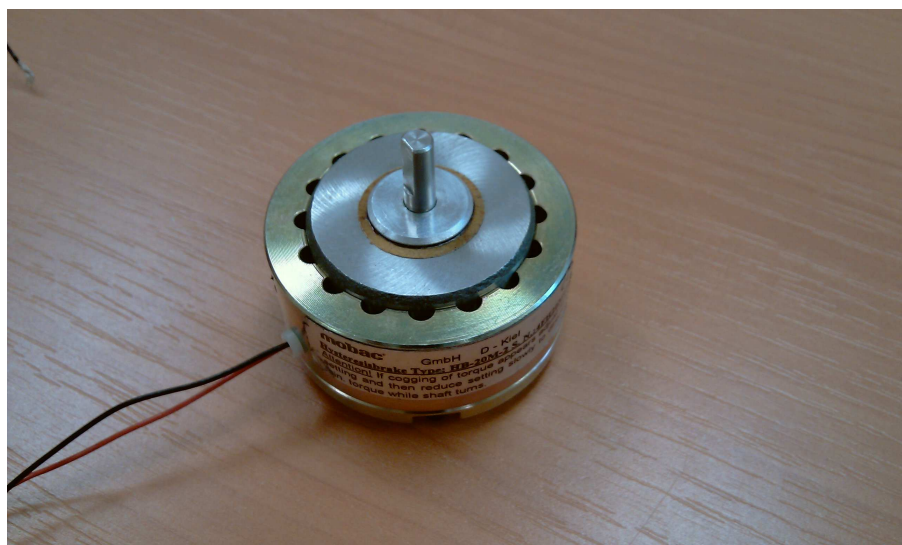


Obrázek 5-5 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2 [16]

5.2.2 Mobac GMBH HB-20M-2

Mobac GMBH HB-20M-2	
Točivý moment M [Nm]	0,15
Pracovní proud I_1 [mA]	232
Rezistence R při 25 °C \pm 10% [Ω]	120
Napětí U při I_1 [V]	24
Otáčky n při 25 °C \pm 10% [min^{-1}]	20000
Rozptyl-nespojité [W]	50
Rozptyl-spojité [W]	12
Zbytkový točivý moment bez proudu [Nm]	7,77E-04
Setrvačnost rotoru [$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$]	0,0458
Hmotnost [kg]	0,324

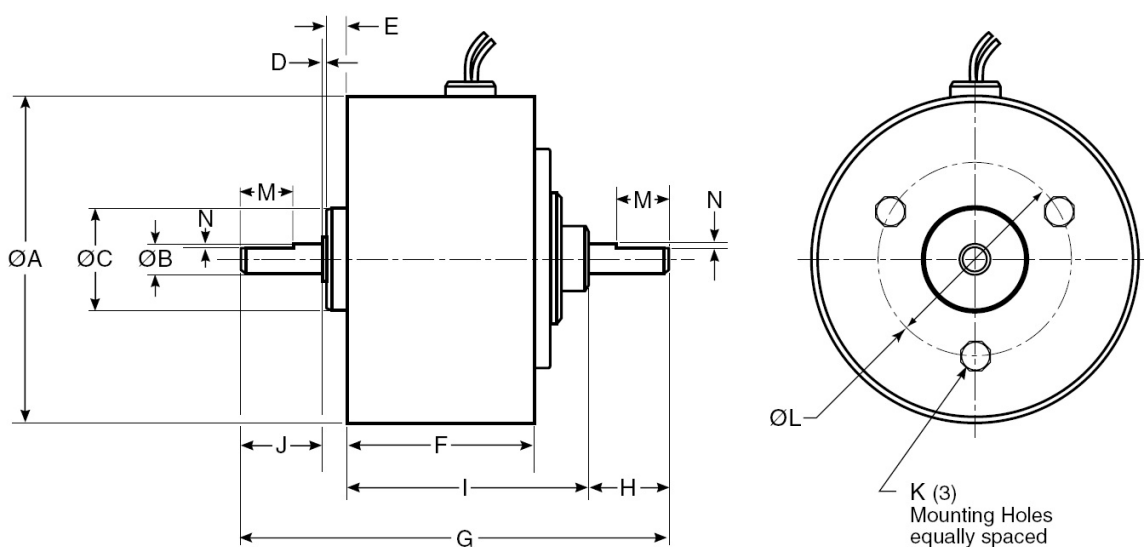
Tabulka 5-6 Specifikace vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [13]



Obrázek 5-6 Vířivá brzda Mobac GMBH HB-20M-2

Mobac GMBH HB-20M-2						
Rozměry [mm]						
$\varnothing A$	$\varnothing B$	$\varnothing C$	D	E	F	G
50	5,00	14,00	0,7	1,8	23,5	55,8
H	I	J	K	$\varnothing L$	M	N
13,0	27,3	13,0	M3 x 6	21,0	9,5	0,7

Tabulka 5-7 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [16]



Obrázek 5-7 Rozměry vířivé brzdy Mobac GMBH HB-20M-2 [16]



6 KONSTRUKCE DYNAMOMETRU

6.1 Návrhy zdokonalení měřicího modelu

Předcházející měření zatížené různými chybami, které měly za následek značné zkreslení výsledků měření, bylo hlavním hybatelem změn vedoucích ke zdokonalovacím návrhům stávajícího měřicího modelu v rámci bakalářské práce.

6.1.1 Hysterezní brzda

Hysterezní brzda Mobac GMBH HB-3M-2 použitá při minulém měření byla vyměněna za typ Mobac GMBH HB-20M-2 s větším brzdícím momentem. Došlo tak k nárůstu hodnoty brzdícího momentu z 24 mNm až na 150 mNm. K výměně došlo proto, aby nedocházelo k přetěžování vířivé brzdy při případném připojení motorku s větším točivým momentem a dlouhodobějším provozu v brzdícím režimu. To by vedlo k větší produkci odpadního tepla, a jelikož je brzda uzavřena v neprodyšném obalu, mohlo by dojít k jejímu přehřátí.

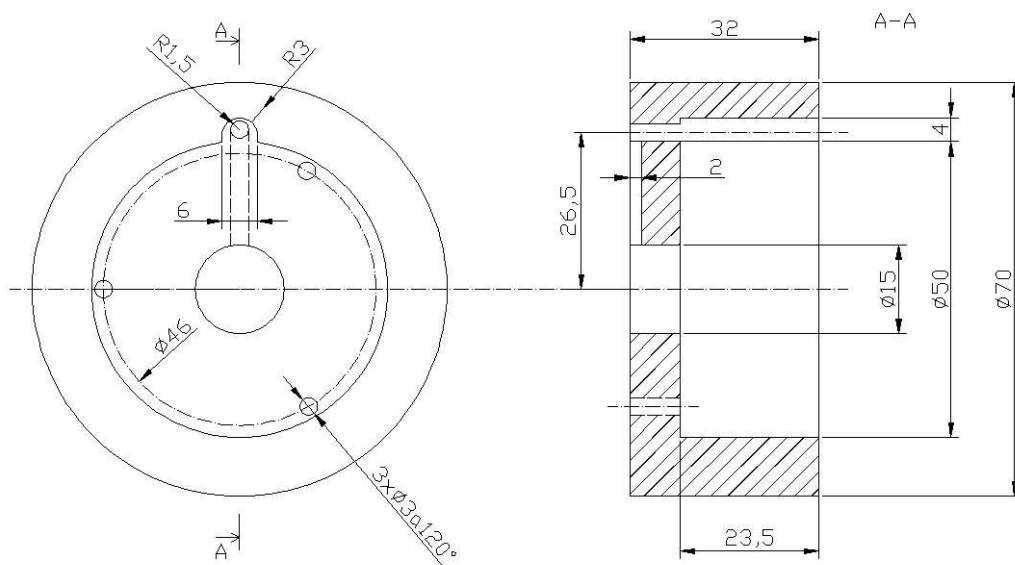
V rámci úprav měřicího modelu došlo k rozebrání těla vířivé brzdy a k jejímu důkladnému vyčištění tak, aby se zabránilo ovlivnění výsledků měření případnými nečistotami uvnitř brzdy (viz. Obrázek 6-1).



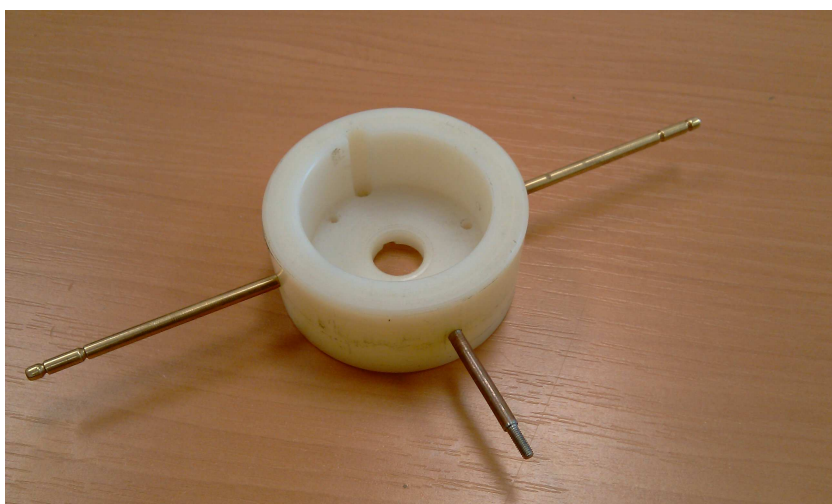
Obrázek 6-1 Rozebraná vířivá brzda Mobac GMBH HB-20M-2

6.2 Nové uložení těla vířivé brzdy

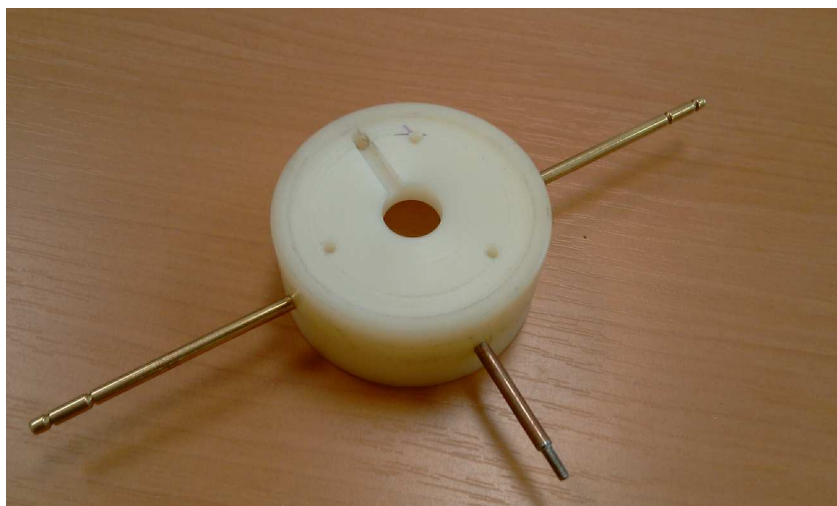
S výměnou hysterezní brzdy samozřejmě úzce souvisí i nutnost zkonstruovat nový obal, který bude brzdu udržovat v dané pozici. Tento obal byl nakonec vyroben z vysoce mechanicky pevného průmyslového plastu silonu. Uložení bylo zkonstruováno tak, aby se hysterezní brzda nasouvala do obalu svou zadní částí, přičemž do obalu byla vyfrézována drážka pro vedení napájecích kabelů, které se dále provlékají vyvrtanou dírou skrz celé těleso.



Obrázek 6-2 Výkresová dokumentace k návrhu obalu vířivé brzdy



Obrázek 6-3 Fotografie obalu zepředu



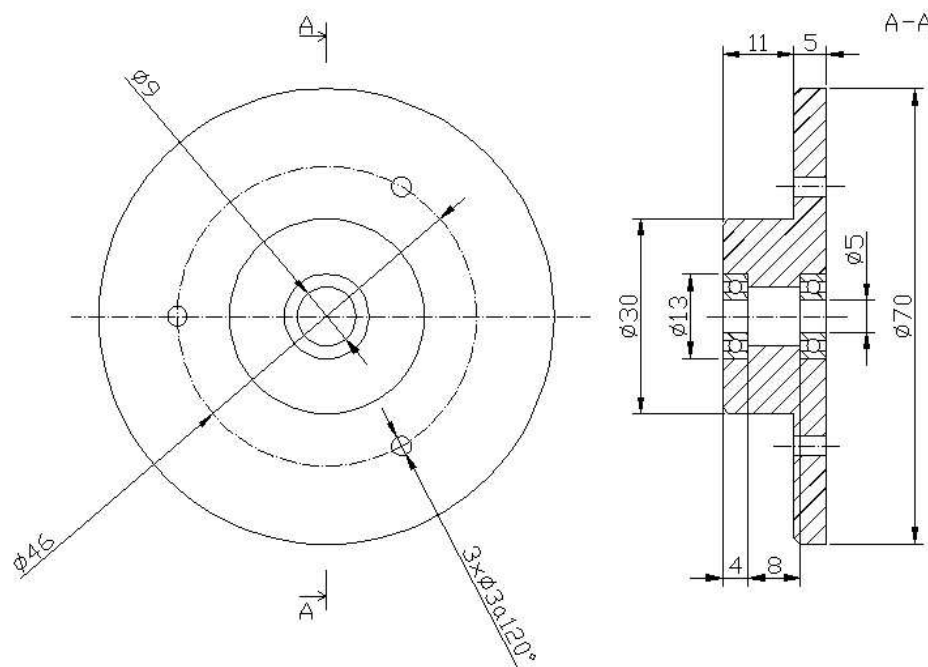
Obrázek 6-4 Fotografie obalu zezadu



Také příruba byla zhotovena z pevného silonu. Tato část uložení působila největší problémy, hlavně výběr vhodného ložiska s co nejmenší vůlí. Působíště síly totiž leží mimo osu ložiska, takže na něj působí určitý klopný moment. A pokud má ložisko velkou vůli mezi vnitřním a vnějším kroužkem, dochází v našem případě, kdy je vnitřní kroužek pevně usazen na trubce, k vyklápění vnějšího kroužku vůči vnitřnímu. To má za následek vibrace celého uložení hysterezní brzdy.

Nejdříve tedy do příruby bylo vloženo jednořadé kuličkové ložisko od firmy Kinex s vnitřním průměrem 10 mm, vnějším průměrem 26 mm a šířkou 8 mm, které bylo upevněno na tlustostěnné trubce s průměrem 10 mm. To ovšem po sestrojení měřicího modelu a jeho spuštění značně vibrovalo, tudíž jsme od něj museli upustit. Rovněž nebylo vhodné z důvodu následného objednání inkrementálního rotačního snímače, který byl dostupný pouze s kódovým kolečkem s vnitřním průměrem 6 mm.

Muselo tedy dojít k výměně 10 mm trubky za 5 mm uhlíkovou trubičku, která měla dostatečnou mechanickou pevnost. Poté bylo vyrobeno kluzné ložisko, které ovšem také nevyhovovalo, a to z důvodu velkého tření na styčných plochách ložiska při plném zatížení. Po konzultaci s technologem byly rovněž vyřazeny varianty speciálních ložisek, jako například kuličkového ložiska s kosouhlým stykem, kuželíkového ložiska nebo jehličkového ložiska. Bylo mi doporučeno ponechat konstrukci s kuličkovým ložiskem, ovšem v případě zakoupení velmi kvalitních výběrových ložisek. Nejlépe ještě ve dvojici za sebou, co nejdál od sebe. Zde jsme byli ovšem limitováni zbývající šířkou silonu, která činila 16 mm. Nakonec byla tedy zakoupena ložiska od firmy SKF 619/5 s průměrem díry 5 mm, vnějším průměrem 13 mm a šířkou 4 mm. Díky tomu bylo možné umístit ložiska 8 mm od sebe. Tato konstrukce se osvědčila a došlo k velikému vyrušení vibrací způsobených vůlí ložisek v přírubě.



Obrázek 6-5 Výkresová dokumentace k přírubě

Z dalších důležitých požadavků při návrhu bylo odstranění mechanického odporu vodičů sloužících k napájení hysterezní brzdy. To bylo vyřešeno vyvedením těchto kabelů vyvrtaným otvorem skrz tělo obalu brzdy a jejich následným provlečením tlustostěnnou trubkou umístěnou v ose s hřídelí brzdy. Tím se odstranila vada předchozího modelu.

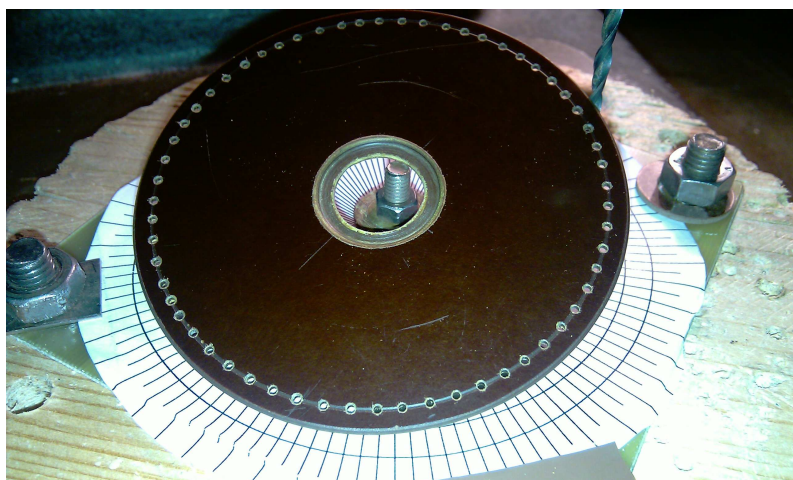


Obrázek 6-6 Odleva: uložení kuličkového ložiska Kinex, klzného ložiska a dvou ložisek SKF

6.3 Senzory neelektrických veličin

Další velká změna byla zamýšlena i v procesu snímání potřebných parametrů motorků a brzdy, nutných k sestavení daných zatěžovacích charakteristik a určení charakteristických hodnot vlastností motorků k porovnání s údaji od výrobce.

Místo ručního měření otáček digitálním otáčkoměrem jsme směřovali k celkové automatizaci tohoto procesu. Toho by bylo docíleno snímačem otáček, založeném na principu optické závory s jednonálovým kódovým kolečkem. Ovšem kódové kolečko s rozměry, které byly potřebné pro náš model, se bohužel na trhu nevyskytuje. Proto ho bylo nutné vyrobit, což se stalo dalším obtížným úkolem. Nakonec došlo k vyrobení kolečka z materiálu s názvem pertinax, jenž se používá na plošné spoje. Vyvrtáním 60-ti děr po 6-ti stupních tak vzniklo jednonálové kódové kolečko s rozlišením 60-ti nebo 120-ti pulsů na otáčku při detekci náběžné i sestupné hrany signálu. Kvůli časové tísní, ale došlo jen na realizaci pouze tohoto stupně návrhu.



Obrázek 6-7 Vyrobené kódové kolečko

Vylepšením prošlo i měření točivého momentu vířivé brzdy, kdy bylo zavrženo odečítání momentu na základě závislosti $M=f(I_b)$ vířivé brzdy, která nám byla zaslána samotným výrobcem. Místo toho byl zakoupen snímač polohy natočení tělesa brzdy HEDS-9040, opět pracující na principu optické závory s jedinou změnou, a to nutností použít tříkanálové kódové kolečko řady HEDS-6140.



Problém ale nastal s časovou dostupností jednotlivých součástek. Snímač HEDS-9040 s kódovým kolečkem HEDS-6140 byl dostupný pouze mimo území České republiky, čímž se značně prodloužila jeho dodací lhůta. To mělo za následek nedokončení potřebných úprav na dynamometru. Úhel natočení jsme tedy byli nuceni měřit pouze pomocí odečítání délkové odchylky ramene dynamometru od základní polohy a jejím následným přepočtením na úhlovou hodnotu α .

6.3.1 Inkrementální rotační snímač polohy a otáček

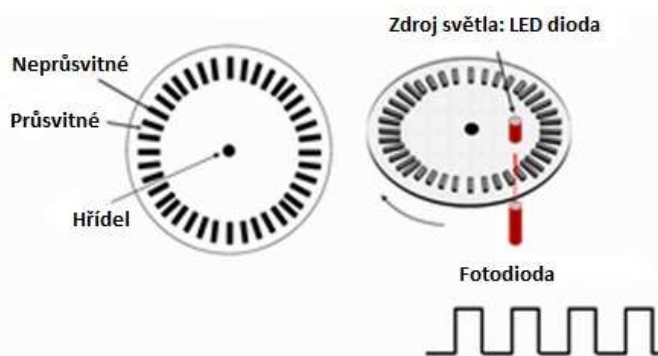
Inkrementální rotační snímač sestává obecně z těchto částí:

- Rotující kódové kolečko
- Optický vysílač – obvykle LED dioda
- Optický přijímač - obvykle fototranzistor nebo fotodioda

V našem případě slouží k měření rychlosti otáčení motorku a k určení úhlu natočení vířivé brzdy. Toho je dosaženo přeměnou mechanického pohybu na elektrické signály.

6.3.1.1 Princip činnosti

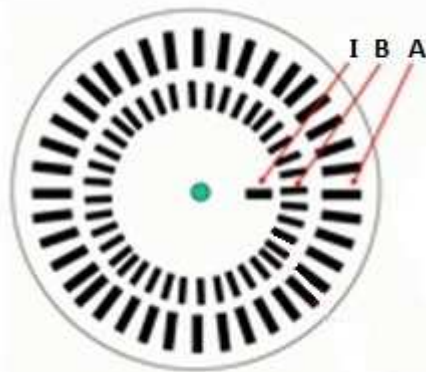
Inkrementální rotační snímač pracuje na principu optické závory. Rotující kódové kolečko s pravidelně se opakujícími průhlednými a neprůhlednými místy, které je pevně spojeno s hřídelí měřeného stroje, přerušuje světelný paprsek emitovaný LED diodou. Protilehlá fotodioda, či fototranzistor poté tyto změny světelného toku zaznamenává a převádí je na elektrické harmonické signály, které jsou poté pomocí komparátoru zesíleny a převedeny na signály obdélníkového průběhu.



Obrázek 6-8 Princip činnosti inkrementálního rotačního senzoru [24]

Podle počtu signálů, které jsou na výstupu senzoru, se snímače dělí:

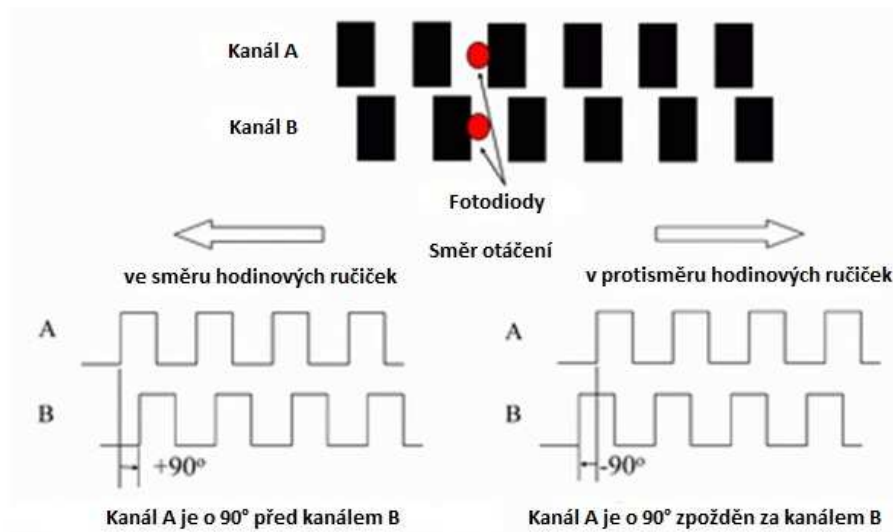
- Jednakanálové (kanál A) – na výstupu je k dispozici pouze jeden signál, umožňuje měření rychlosti.
- Dvoukanálové (kanál A+B) – na výstupu jsou k dispozici dva signály, umožňuje měření rychlosti a určení smyslu otáčení.
- Tříkanálové (kanál A+B+I) – na výstupu jsou k dispozici tři signály, umožňuje měření rychlosti, určení smyslu otáčení a určení úhlu natočení.



Obrázek 6-9 Návrh tříkanálového kódového kolečka [24]

6.3.1.2 Zpracování signálu z inkrementálního snímače

Inkrementální rotační snímače obvykle generují dva základní výstupní signály (kanál A+B). Ty jsou vzájemně oproti sobě posunuty o 90° elektrických, v závislosti na směru otáčení kotouče (viz. Obrázek 6-13). Jde o tzv. kvadrurní zakódování výstupního signálu snímače.

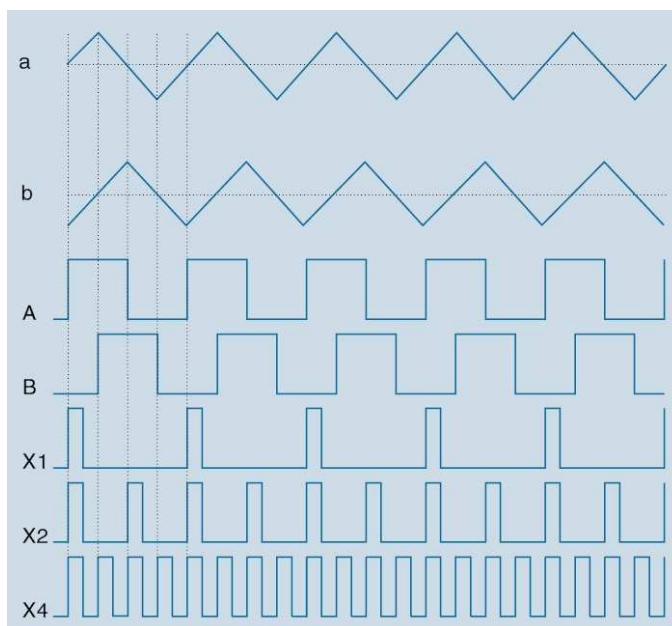


Obrázek 6-10 Princip detekce směru otáčení [24]

Někdy je ještě kódové kolečko doplněno o jednu průsvitnou rysku, se svým vlastním zdrojem světla a fotosenzorem. Tento senzor detekuje jeden impuls na otáčku, jde o tzv. kanál I (= nulový kanál, index puls), který udává nulovou (referenční) polohu hřídele a je ve fázi s kanálem A. Pomocí něho lze v našem případě určit úhel natočení tělesa vířivé brzdy.

Dekódování elektrických signálů z kanálů A, B inkrementálního snímače probíhá několika způsoby, a to v závislosti na rozlišení s jakým chceme signály čítat. Máme tři druhy rozlišení:

- Rozlišení X1 – detekuje se nástupná, nebo sestupná hrana pouze jednoho signálu.
- Rozlišení X2 – detekuje se nástupná a sestupná hrana pouze jednoho signálu.
- Rozlišení X4 – detekuje se nástupná a sestupná hrana obou signálů.



Obrázek 6-11 Detekce signálu při různých rozlišeních [23]

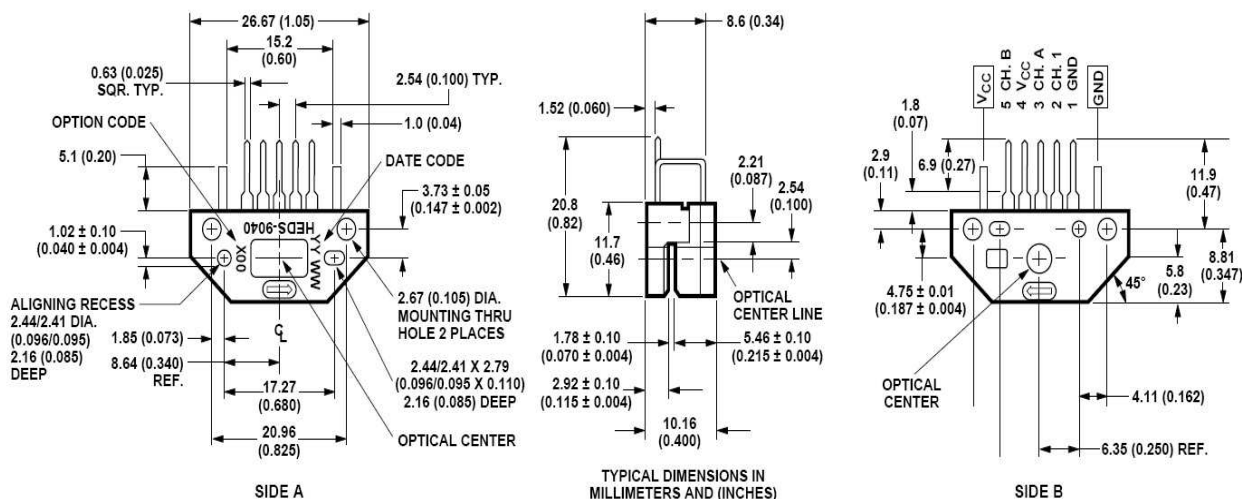
Příklad výpočtu frekvence signálu snímače:

- Otáčeli-li se hřídel motoru rychlostí 15 000 ot./min. a kódové kolečko má 1000 dílků je potom frekvence signálu jednoho kanálu dána vzorcem:

$$f = \frac{15000}{60} \cdot 1000 = 250000 \text{ Hz} = 250 \text{ kHz}$$

6.3.2 Snímač HEDS-9040

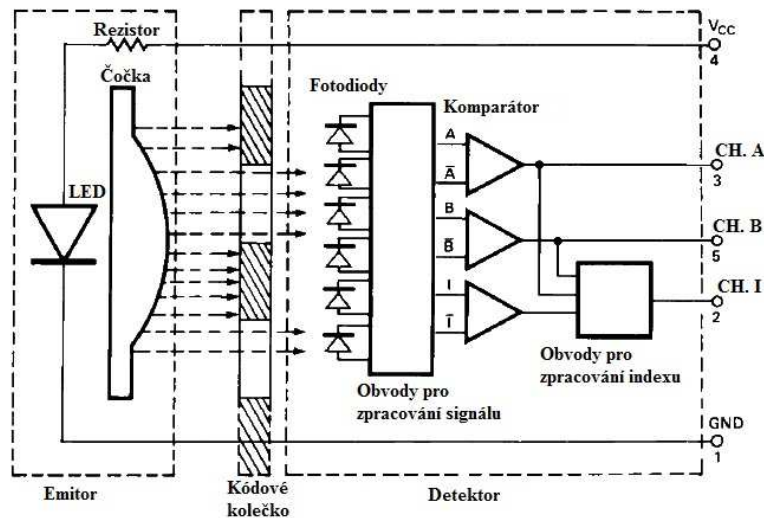
Pro toto měření byl vybrán inkrementální snímač HEDS-9040 od firmy Agilent Technologies. Jedná se o tříkanálový optický enkodér, který je určen k použití s kódovými kolečky řady HEDS-6140..



Obrázek 6-12 Rozměry senzoru HEDS-9040 [21]

6.3.2.1 Blokové schéma

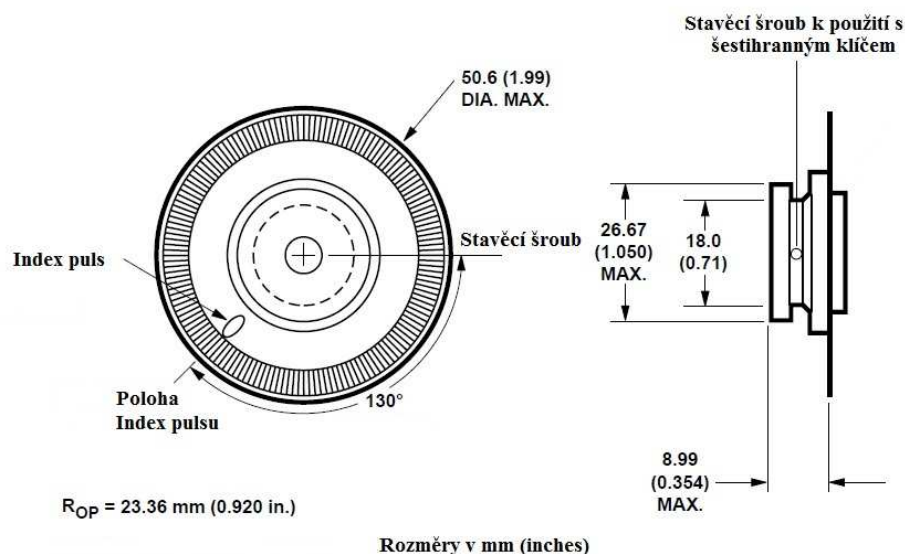
Snímač ve spojení s kódovým kolečkem převádí jeho rotační pohyb na tříkanálový digitální výstup. Z nákresu blokového schématu je vidět, že za zdroj světla je použita LED dioda. Světlo emitované diodou se poté dělí do paralelních paprsků pomocí polykarbonátové čočky umístěné před diodou. Přímo naproti zdroji světla je umístěn fotodetektor složený ze soustavy fotodiod. Tím jak mezi emitorem světla a detektorem rotuje neustále kódové kolečko, dochází ke střídání průsvitných míst s neprůsvitnými, což zaznamenávají fotodiody. Vzniklé harmonické signály se poté pomocí komparátoru přeměňují na průběhy obdélníkového tvaru. Kanál A a kanál B jsou oproti sobě posunuty o 90° elektrických. Signál z kanálu I je poslán do procesní jednotky mezi kanály A a B. Finální signál kanálu I se nazývá index puls P_0 a je generován jednou za otáčku.



Obrázek 6-13 Blokové schéma HEDS-9040 [21]

6.3.2.2 Kódové kolečko HEDS-6140

Jedná se o tříkanálové kódové kolečko vyrobené z tenké plastové fólie. Největší rozlišení kódového kolečka má kanál A s 1024 pulsy na otáčku, při snímání náběžné a sestupné hrany signálu to činí 2048 pulsů na otáčku.



Obrázek 6-14 Kódové kolečko HEDS-6140 [22]

7 MĚŘENÍ

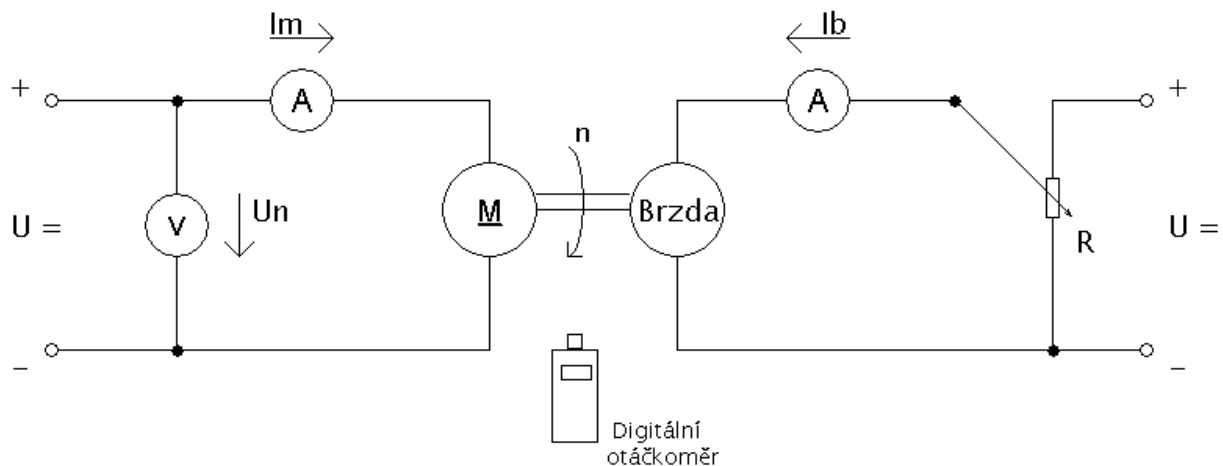
7.1 Měření provedené v rámci semestrálního projektu

Cílem tohoto měření bylo stanovit proudové a momentové charakteristiky zadaných typů stejnosměrných komutátorových motorků Maxon RE a porovnat tyto charakteristiky s údaji, které uvádí výrobce. Pro toto měření byly k dispozici již zmiňované přístroje, a to tedy stejnosměrné motorky Maxon RE13 a Maxon RE10, a jako zatěžovací stroj se použila vířivá brzda Mobac GMBH HB-3M-2. Oba dva motorky byly postupně spojeny s vířivou brzdou spojkou, která zajišťovala souběžný chod tohoto soustrojí.

Měření probíhalo postupně pro oba motorky. Nejdříve byl zapojen měřený obvod podle schématu, načež se na jednotlivých měřicích přístrojích nastavily vhodné měřicí rozsahy. Na zdroji stejnosměrného napětí se plynule nastavilo jmenovité napětí jednotlivých motorků a změřily se hodnoty motorků naprázdno. Poté se začala nabuzovat podle vhodně zvoleného kroku přírůstků vířivá brzda, která začala na motorek působit brzdícím momentem. Při každém kroku byly změřeny hodnoty proudů, a to proudu motorku I_m a budícího proudu brzdy I_b a digitálním měřičem otáček byly změřeny otáčky motoru n .

Podle změřeného budícího proudu se pak z grafu závislosti brzdného momentu na budícím proudu pro vířivou brzdu zasláném výrobcem (viz. Příloha C) určoval točivý moment M motorku. Následně se do grafů vynesly charakteristiky $n = f(M)$ a $I_m = f(M)$ a byly spočítány charakteristické hodnoty vlastností motorků a porovnány s údaji od výrobce.

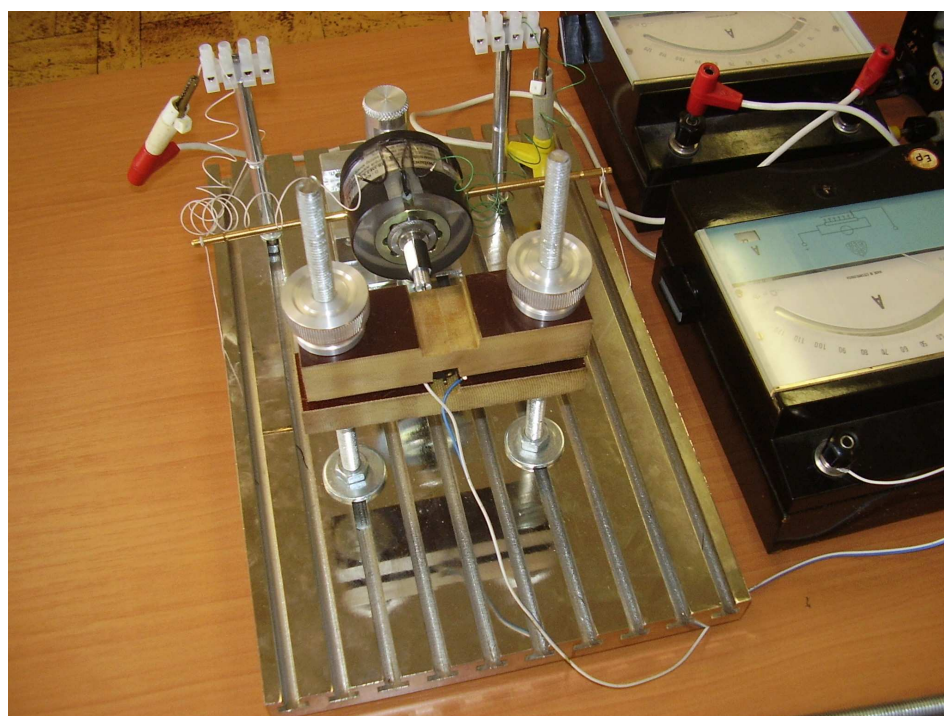
7.1.1 Schéma zapojení



Obrázek 7-1 Schéma zapojení



Obrázek 7-2 Měřící pracoviště



Obrázek 7-3 Detail spojení vířivé brzdy s motorkem pevnou spojkou



7.1.2 Naměřené hodnoty

V tabulkách 7-1 a 7-4 jsou naměřené hodnoty při měření zatěžovacích charakteristik obou typů motorků. Máme zde proud tekoucí motorkem I_m , dále budící proud brzdy I_b , otáčky n , které se měřily digitálním snímačem otáček a poslední hodnotou je točivý moment M . Tento moment byl odečítán z grafu pro vířivou brzdu, který nám byl zaslán přímo od výrobce této vířivé brzdy (viz příloha C).

V tabulkách jsou hodnoty označené barevně, a to z důvodu, že pro ně byla počítána strmost pádu otáček na 1 mNm. Jsou vybrány jen tyto hodnoty, protože mají takřka lineární průběh a jejich strmost se dá srovnávat s hodnotami výrobce (viz. Přílohy A,B). Ostatní hodnoty vykazují již veliké odchylky od charakteristických hodnot výrobce, tudíž nejsou do výpočtu zařazeny.

Momentová konstanta, tedy počet mNm na 1A, se bohužel nedala spočítat. Naměřené hodnoty totiž vykazují velkou nelinearitu a její hodnota je proměnná v řádu desítek, aniž by byla na některém úseku konstantní.

7.1.2.1 Hodnoty motorku Maxon RE13

Maxon RE 13, $U_n = 20$ V							
I_m			I_b			n [min^{-1}]	M [mNm]
α [dílký]	k	I_m [A]	α [dílký]	k	I_b [A]		
34	0,06/120	0,0170	0	0,024/120	0,0000	6241	0,000
35		0,0175	25		0,0050	6221	0,075
38		0,0190	50		0,0100	6191	0,130
44		0,0220	60		0,0120	6142	0,160
54		0,0270	65		0,0130	6073	0,180
75		0,0375	28		0,0140	5980	0,190
96		0,0480	32		0,0160	5840	0,210
111		0,0555	34		0,0170	5710	0,225
34	0,24/120	0,0680	37	0,06/120	0,0185	5532	0,250
45		0,0900	41		0,0205	5240	0,280
58		0,1160	45		0,0225	4969	0,300
62		0,1240	46		0,0230	4874	0,310
70		0,1400	48		0,0240	4686	0,320
75		0,1500	49		0,0245	4488	0,325
82		0,1640	50		0,0250	4346	0,340
90		0,1800	52		0,0260	4134	0,350
97		0,1940	53		0,0265	3972	0,365
106		0,2120	54		0,0270	3733	0,370
26	1,2/120	0,2600	55	0,0275	3056	0,380	
28		0,2800	56	0,0280	1824	0,390	
49		0,4900	57	0,0285	0	0,400	

Tabulka 7-1 Naměřené hodnoty motorku Maxon RE13



V další tabulce 7-2 jsou naměřené hodnoty pro rozběh motorku. Motorek byl postupně více zatěžován zvyšováním budícího proudu ve vířivé brzdě a měřil se proud motorkem, tedy proud při startu. Motorek se nakonec roztáčel až do hodnoty budícího proudu brzdy $I_b = 0,028 \text{ A}$, což odpovídá hodnotě rozběhového momentu $M = 0,4 \text{ mNm}$ a proudu při startu motorku $I_m = 0,28 \text{ A}$. Tyto hodnoty jsou označeny barevně. Při dalším zvýšení budícího proudu se motorek už neotáčel.

Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE13, $U_n = 20 \text{ V}$							
$I_m \text{ [A]}$			$I_b \text{ [A]}$			M [mNm]	stav
α	k	$I_m \text{ [A]}$	α	k	$I_b \text{ [A]}$		
17	1,2/120	0,17	51	0,06/120	0,0255	0,34	otáčí se
19		0,19	52		0,0260	0,35	
22		0,22	53		0,0265	0,36	
24		0,24	54		0,0270	0,37	
25		0,25	55		0,0275	0,38	
28		0,28	56		0,0280	0,39	
49		0,49	57		0,0285	0,40	neotáčí se

Tabulka 7-2 Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE13

- Příklady výpočtu pro tabulku 7-3:

$$\text{Strmost} = \frac{1}{(0,32 - 0) \text{ mNm}} \cdot (6241 - 4686) \text{ min}^{-1} = 4859 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mNm}^{-1}$$

$$\text{Mezní odpor vinutí} = \frac{U_n}{I_{start}} = \frac{20 \text{ V}}{0,28 \text{ A}} = 71,4 \Omega$$

$$\text{Otáč. konstanta} = \frac{1}{20 \text{ V}} \cdot 6241 \text{ min}^{-1} = 312 \text{ min}^{-1} \text{ V}^{-1}$$

$$\text{absolutní chyba } \Delta = X_m - X_s = 6241 \text{ min}^{-1} - 13300 \text{ min}^{-1} = -7059 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{relativní chyba } \delta = \frac{\Delta}{X_s} \cdot 100 = \frac{-7059 \text{ min}^{-1}}{13300 \text{ min}^{-1}} \cdot 100 = -53,1 \%$$

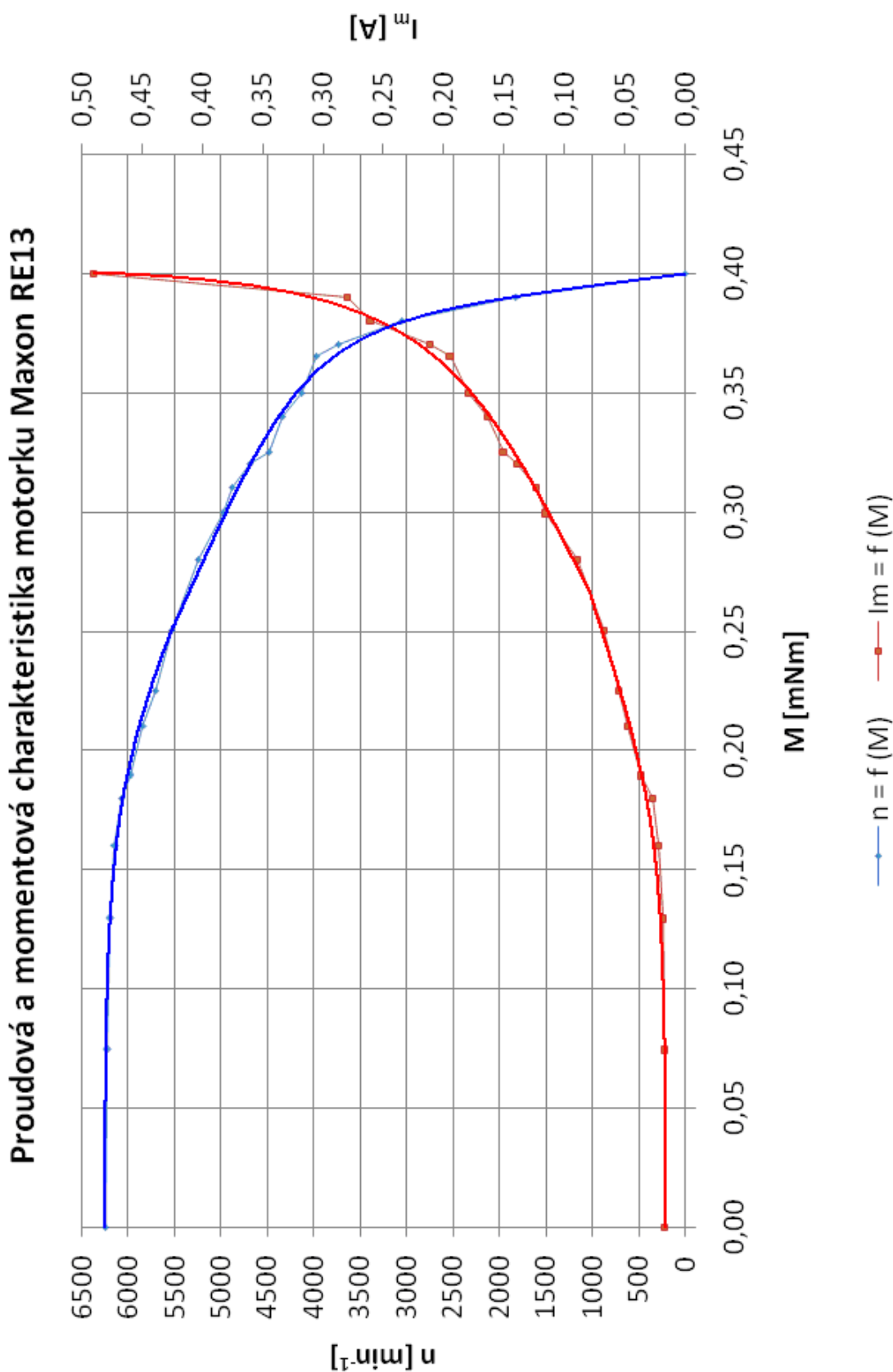


Maxon RE 13, č. 118566

Hodnoty při jmenovitém napětí

	X_s (hodnoty od výrobce)	X_m (měřené hodnoty)	Δ (rozdíl hodnot)	δ [%]
Jmenovité napětí [V]	20	20	0	0,0
Otáčky naprázdno [rpm]	13300	6241	-7059	-53,1
Proud naprázdno [mA]	29,6	17	-12,6	-2,6
Rozběhový moment [mNm]	3,35	0,39	-2,96	-88,4
Proud při startu [A]	0,264	0,28	0,016	6,1
Vlastnosti				
Mezní odpor vinutí [Ω]	75,8	71,4	-4,4	-5,8
Otáčková konstanta [rpm/V]	751	312	-439	-58,5
Strmost [rpm/mNm]	4480	4859	379	8,5

Tabulka 7-3 Porovnání naměřené specifikace motoru Maxon RE13 s hodnotami výrobce



Obrázek 7-4 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon RE13



7.1.2.2 Hodnoty motorku Maxon RE10

Maxon RE 10, $U_n = 3 \text{ V}$							
I_m			I_b			$n \text{ [min}^{-1}\text{]}$	$M \text{ [mNm]}$
$\alpha \text{ [dílky]}$	k	$I_m \text{ [A]}$	$\alpha \text{ [dílky]}$	k	$I_b \text{ [A]}$		
21	1,2/120	0,21	0	0,024/120	0,0000	8774	0,000
22		0,22	25		0,0050	8748	0,075
23		0,23	50		0,0100	8488	0,130
25		0,25	55		0,0110	8285	0,145
29		0,29	60		0,0120	7964	0,160
33		0,33	25		0,06/120	0,0125	7578
39		0,39	26	0,0130		7041	0,180
42		0,42	28	0,0140		6678	0,190
47		0,47	31	0,0155		6152	0,200
50		0,50	32	0,0160		4869	0,210
54		0,54	33	0,0165		4353	0,215
60		0,60	34	0,0170		3616	0,220
63		0,63	35	0,0175		2773	0,225
79		0,79	36	0,0180		0	0,235

Tabulka 7-4 Naměřené hodnoty motorku Maxon RE10

Rozběhový moment a proud při startu motorku odpovídají barevně označeným hodnotám v tabulce 7-5. Měření probíhalo stejně jako u předešlého motorku Maxon RE13 (viz. popis k tabulce 7-2).

Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE10, $U_n = 3 \text{ V}$							
$I_m \text{ [A]}$			$I_b \text{ [A]}$			$M \text{ [mNm]}$	stav
α	k	$I_m \text{ [A]}$	α	k	$I_b \text{ [A]}$		
50	1,2/120	0,50	32	0,06/120	0,0160	0,210	otáčí se
54		0,54	33		0,0165	0,215	
60		0,60	34		0,0170	0,220	
63		0,63	35		0,0175	0,225	
79		0,79	36		0,0180	0,235	neotáčí se

Tabulka 7-5 Měření rozběhového momentu a proudu motorku Maxon RE10



- **Příklady výpočtu pro tabulku 7-6:**

$$\text{Strmost} = \frac{1}{(0,16 - 0) \text{ mNm}} \cdot (8774 - 7964) \text{ min}^{-1} = 5063 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mNm}^{-1}$$

$$\text{Mezní odpor vinutí} = \frac{U_n}{I_{start}} = \frac{3 \text{ V}}{0,63 \text{ A}} = 4,76 \Omega$$

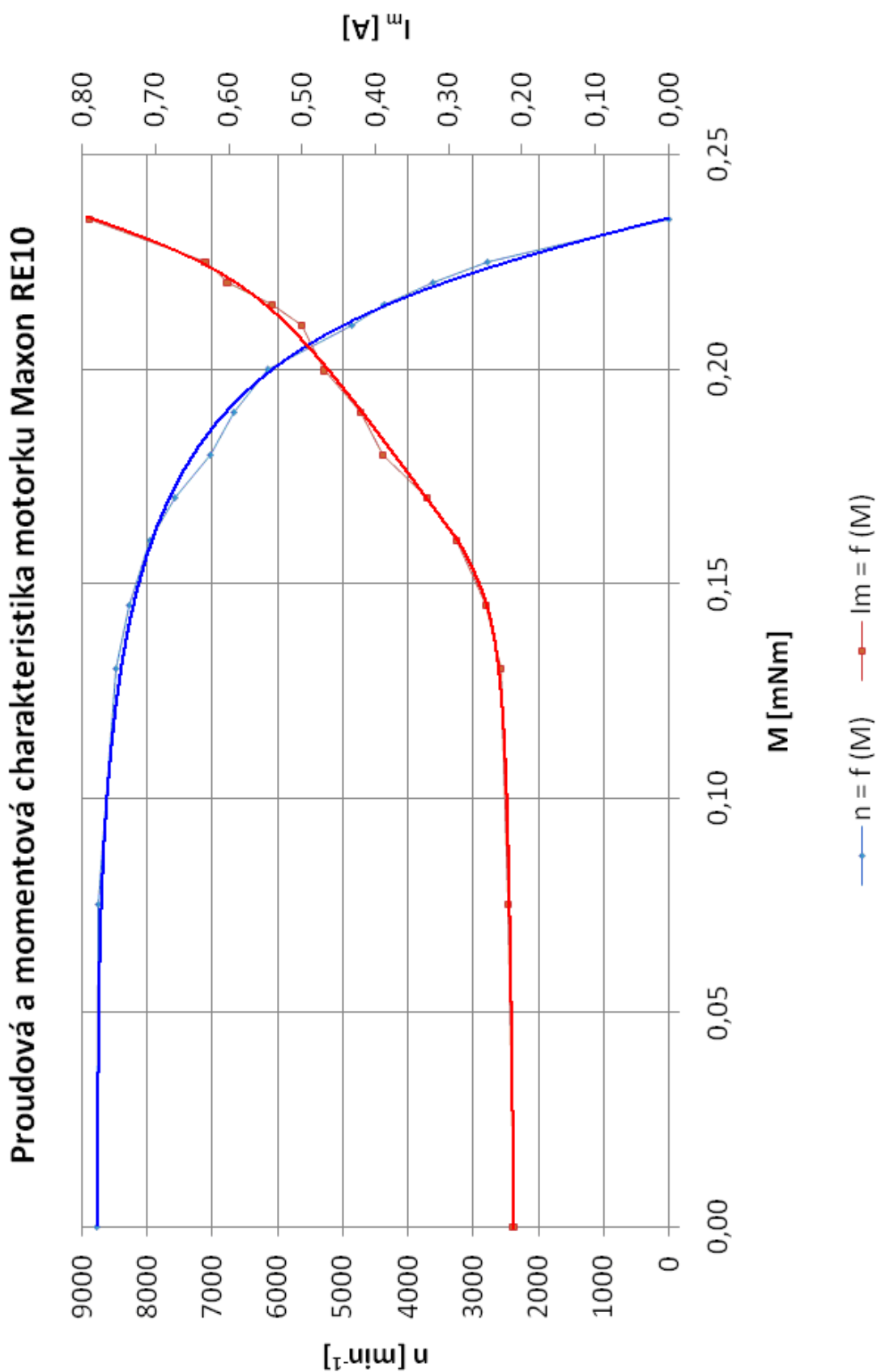
$$\text{Otáč. konstanta} = \frac{1}{3 \text{ V}} \cdot 8774 \text{ min}^{-1} = 2925 \text{ min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$\text{absolutní chyba } \Delta = X_m - X_s = 8774 \text{ min}^{-1} - 13000 \text{ min}^{-1} = -4226 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{relativní chyba } \delta = \frac{\Delta}{X_s} \cdot 100 = \frac{-4226 \text{ min}^{-1}}{13000 \text{ min}^{-1}} \cdot 100 = -32,5 \%$$

Maxon RE 10, č. 118392				
Hodnoty při jmenovitém napětí				
	X_s (hodnoty od výrobce)	X_m (měřené hodnoty)	Δ (rozdíl hodnot)	δ [%]
Jmenovité napětí [V]	3	3	0	0,0
Otáčky naprázdno [rpm]	13000	8774	-4226	-32,5
Proud naprázdno [mA]	23,9	21	-2,9	-12,1
Rozběhový moment [mNm]	3,12	0,225	-2,895	-92,8
Proud při startu [A]	1,44	0,63	-0,81	-56,3
Vlastnosti				
Mezní odpor vinutí [Ω]	2,08	4,76	2,68	128,8
Otáčková konstanta [rpm/V]	4410	2925	-1485	-33,7
Strmost [rpm/mNm]	4240	5062	822	19,4

Tabulka 7-6 Porovnání naměřené specifikace motorku Maxon RE10 s hodnotami výrobce



Obrázek 7-5 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon RE10



7.1.3 Měřicí přístroje

Měřicí přístroje		
Typ přístroje	Značka výrobce	Popis
ss motor	Maxon	třída RE10, č. 118392
ss motor	Maxon	třída RE13, č. 118566
vířivá brzda	Mobac	typ GMBH HB-3M-2
potenciometr	Metra	v.č. 2187339
zdroj	AT	typ TSZ 75, v.č. 83 547 4152
ampérmetr	Metra	v.č. 119768, magnetoelektrický, TP 0.5/120 dílků
ampérmetr	Metra	v.č. 119876, magnetoelektrický, TP 0.5/120 dílků
voltmetr	Metra	v.č. 38605, magnetoelektrický, TP 0.5/120 dílků

Tabulka 7-7 Přehled měřicích přístrojů

7.1.4 Zhodnocení výsledků měření

Cílem tohoto měření bylo proměřit zatěžovací charakteristiky daných stejnosměrných komutátorových motorů Maxon třídy RE. Motorky Maxon RE10 a Maxon RE13 už jsou ale nějakou dobu používané a vykazují již jisté opotřebení a zhoršení svých vlastností. Na zkreslení výsledných charakteristik se zřejmě nejvíce podepsal zvýšený koeficient tření motorků. Motorek Maxon RE13 místo oficiální katalogové hodnoty otáček naprázdno, která činí 13300 min^{-1} , točil při jmenovitém napětí jen 6241 min^{-1} . A druhý měřený motorek Maxon RE10 místo 13000 min^{-1} opět jen 8774 min^{-1} . Rovněž točivé momenty obou motorků byly o několik řádů pod hodnotami výrobců. Dalším faktorem způsobujícím tento pokles bude pravděpodobně i nepružné spojení motorků s vířivou brzdou, které má za následek vychylování rotoru (hrníčku) vířivé brzdy z optimální polohy, nutné pro dobrý přenos točivého momentu z motorku. Hrníček se otáčí ve velmi malé vzduchové mezeře a případné vychýlení může způsobit drhnutí hrníčku o těleso brzdy, čímž se vytváří brzdový moment, který nejsme schopni měřit. Tento jev se zřejmě i přes snahu nastavit přesné spojení nepovedlo vyrušit. Motorek Maxon RE 10 rovněž při vysokých otáčkách způsoboval velké vibrace, které ho i přes pevné uchycení vychylovaly z optimální polohy a tedy opět negativně působily na přenos točivého momentu.

Všechny tyto faktory tedy zřejmě působily během měření a způsobily jeho nepřesnost. Proto se do výsledných výpočtů vlastností motorků, jako je například strmost, zahrnuly jen naměřené hodnoty, které měly částečně lineární průběh a svým spádem relativně odpovídaly poklesům charakteristik zaslaných výrobcí (viz. Přílohy A, B). Hodnoty, které vykazovaly nelinearitu a strmý pokles, se do výpočtů nezahrnuly.

Porovnání naměřených charakteristik s charakteristikami výrobců lze tedy obtížně realizovat. Chyby měření vycházejí v desítkách procent, jak je patrné z odpovídajících tabulek (viz. Tabulka 7-3 a 7-6). Například momentová konstanta se u naměřených průběhů značně měnila a to i pro částečně lineární úseky. U motorku Maxon RE13 se měnila až v řádech desítek, tudíž její určení nebylo možné. U motorku Maxon RE10 se to také nepodařilo.

7.2 Měření v rámci bakalářské práce

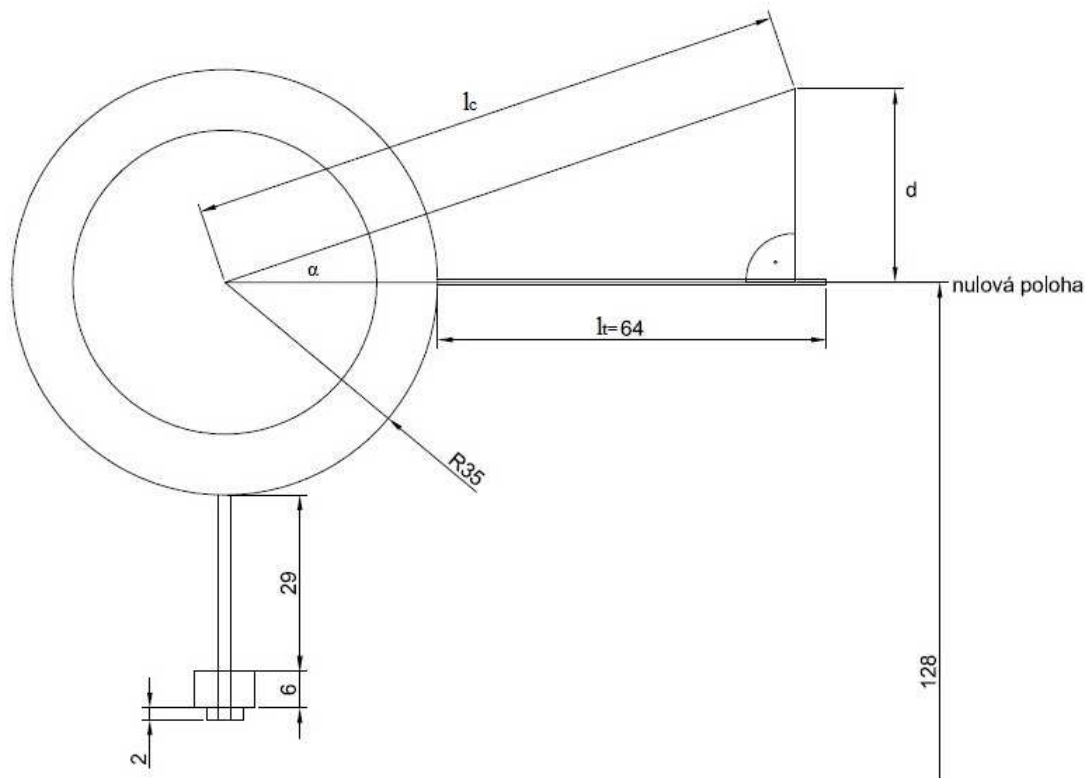
Po zhotovení všech potřebných vylepšení jsme přistoupili k samotnému měření. Úkolem bylo proměřit proudové a momentové charakteristiky stejnosměrných komutátorových motorků. Bohužel motorky použité v předchozím měření již nebyly na fakultě dostupné, takže se musel použít stejnosměrný komutátorový motor Maxon S, č.2322.980-53.235-200. Z tohoto důvodu nemohlo dojít k přímému porovnání naměřených hodnot. Rovněž měření pomocí optických snímačů nebylo realizováno, a to z důvodu časové nedostupnosti součástek.

Nejdříve došlo k sestavení měřicího pracoviště podle schématu zapojení a k zapnutí všech digitálních měřicích přístrojů. Nastavila se určitá hodnota napájecího napětí U_m na motorku a změřily se hodnoty motorku naprázdno. Následovně se začala pomalu nabuzovat hysterezní brzda a při přírůstku hodnoty úhlu natočení α se přestalo nabuzovat. Odečetly se hodnoty proudu motorku I_m , otáček n a hodnota přírůstku délky d oproti základní (=nulové) poloze. Tato nulová poloha se nacházela ve výšce 128 mm nad základnou. Pomocí pravoúhlého trojúhelníku a funkce sinus se poté určil úhel natočení α :

$$l_c = r + l_t = 35 + 64 = 99 \text{ mm}$$

$$\sin \alpha = \frac{d}{l_c}$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{d}{l_c}\right)$$



Obrázek 7-6 Výpočet úhlu náklonu α



Tento postup se opakoval pro jednotlivá napětí U_m , která se nastavovaly od hodnoty 1V do 9V, vždy až po zastavení otáčení motorku. Hodnoty jmenovitého napětí motorku $U_m = 12V$ se nepodařilo dosáhnout, protože i přes všechna vylepšení docházelo k velkým vibračním celým konstrukce. Ta nebyla schopna při takto velkých otáčkách ani udržet motorek v upínacím zařízení a ten prokluzoval. Proto bylo měření ukončeno při hodnotě napětí $U_m = 9V$.

K výpočtu točivého momentu M motorku bylo nutné ještě spočítat polohu těžiště x_T soustavy spojovací tyč, závaží a matička. Z dokumentace hysterezní brzdy bylo dále zapotřebí získat údaj o zbytkovém točivém momentu bez proudu M_{zb} a mohlo se přistoupit k výpočtu momentu měřeného motorku M .

Výpočet polohy těžiště soustavy x_T a výsledného momentu M :

- *Známé hodnoty:*

Poloha těžiště závaží	$x_1 = 32 \text{ mm}$
Poloha těžiště spojovací tyče	$x_2 = 18,5 \text{ mm}$
Poloha těžiště matice	$x_3 = 36 \text{ mm}$
Hmotnost závaží	$m_1 = 44 \text{ g}$
Hmotnost spojovací tyče	$m_2 = 3,5 \text{ g}$
Hmotnost matice	$m_3 = 0,5 \text{ g}$
Tíhové zrychlení	$g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Zbytkový točivý moment	$M_{zb} = 0,777 \text{ mNm}$

- *Postup výpočtu polohy těžiště vycházející z rovnosti momentů (viz. Obrázek 7-7):*

$$x_T \cdot F_T = x_1 \cdot F_1 + x_2 \cdot F_2 + x_3 \cdot F_3$$

$$x_T \cdot (m_1 + m_2 + m_3) \cdot g = x_1 \cdot m_1 \cdot g + x_2 \cdot m_2 \cdot g + x_3 \cdot m_3 \cdot g \quad / \cdot \frac{1}{g}$$

$$x_T \cdot (m_1 + m_2 + m_3) = x_1 \cdot m_1 + x_2 \cdot m_2 + x_3 \cdot m_3$$

$$x_T = \frac{x_1 \cdot m_1 + x_2 \cdot m_2 + x_3 \cdot m_3}{m_1 + m_2 + m_3}$$

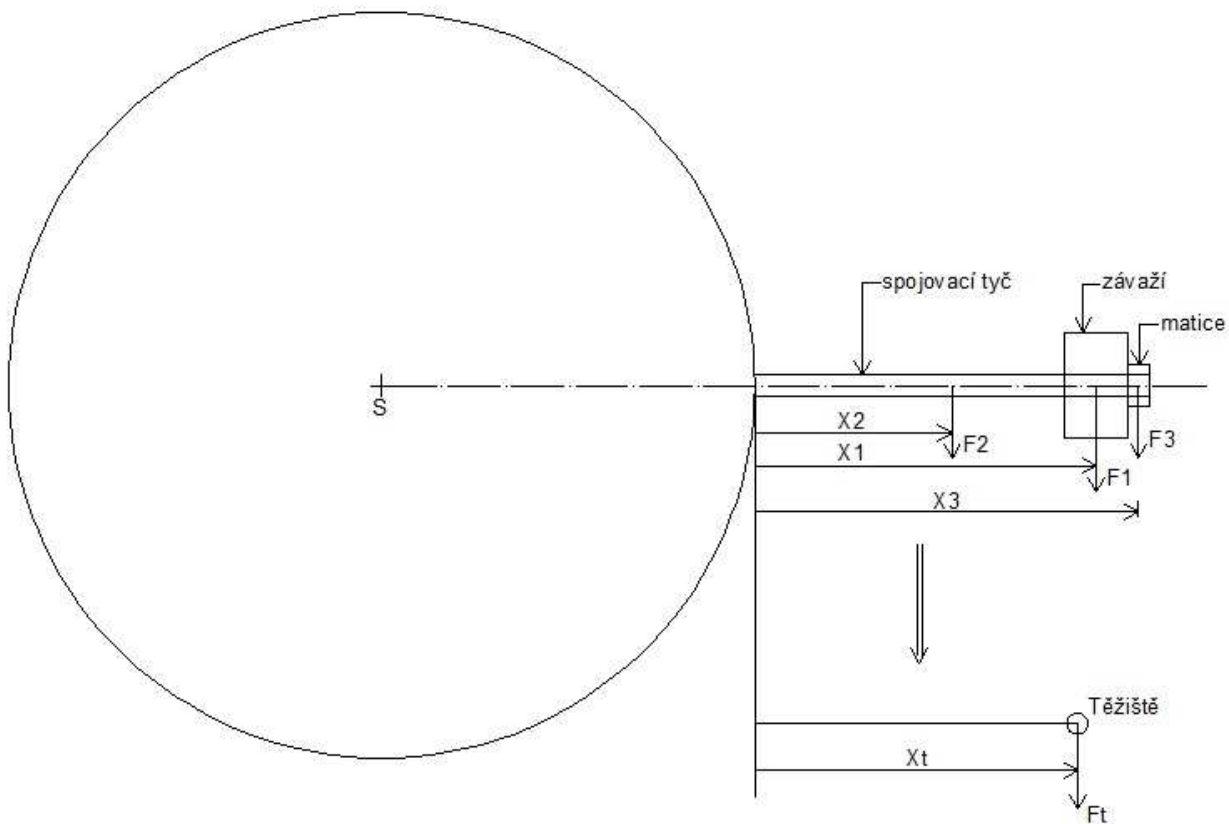
$$x_T = \frac{32 \cdot 44 + 18,5 \cdot 3,5 + 36 \cdot 0,5}{44 + 3,5 + 0,5} = 31,057 \text{ mm}$$

- Vzorec pro výpočet momentu M :

$$M = M_{zb} + m \cdot g \cdot l \cdot \sin \alpha$$

$$\text{Celková hmotnost soustavy} - m = (m_1 + m_2 + m_3) = (44 + 3,5 + 0,5) = 48 \text{ g}$$

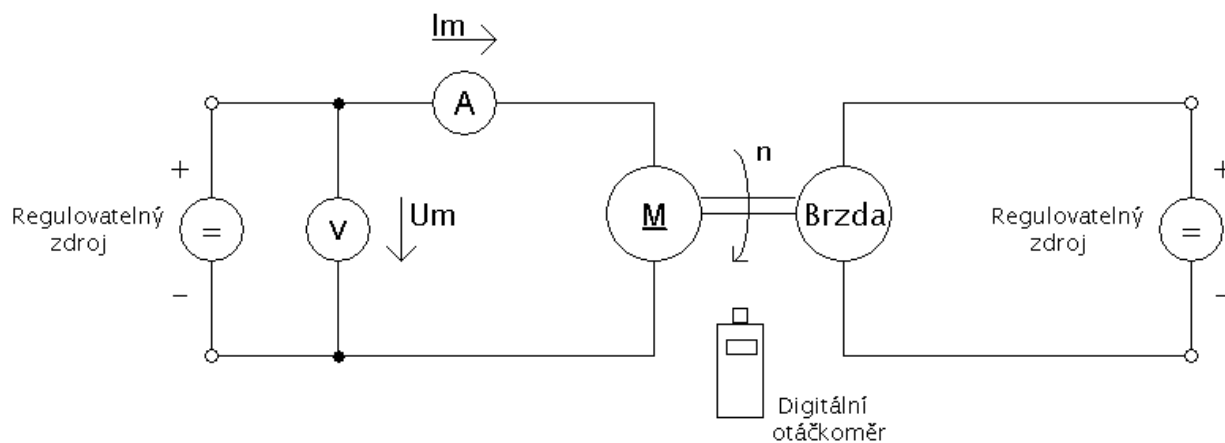
$$\text{Celková délka ramena síly} - l = r + x_T = 35 + 31,057 = 66,057 \text{ mm}$$



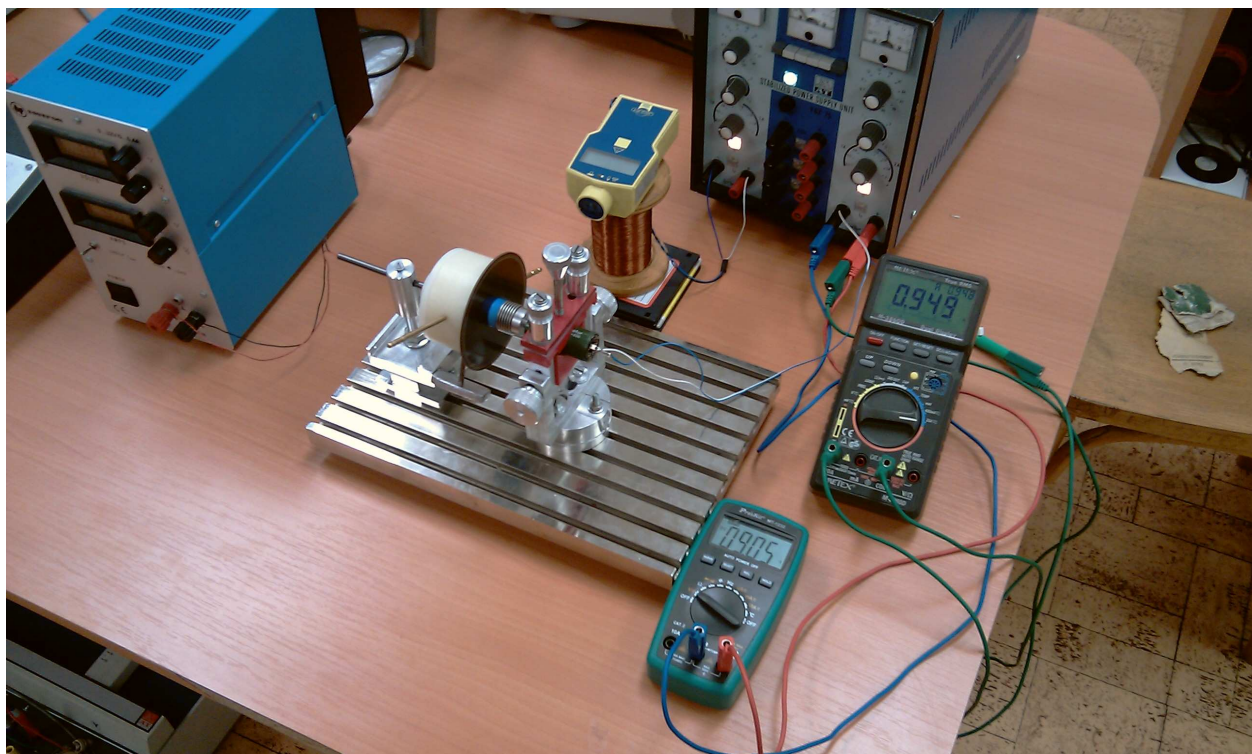
Obrázek 7-7 Výpočet těžiště soustavy spojovací tyč, závaží, matice

Po určení všech hodnot se vypracovaly momentové a proudové charakteristiky pro vybraná napětí U_m .

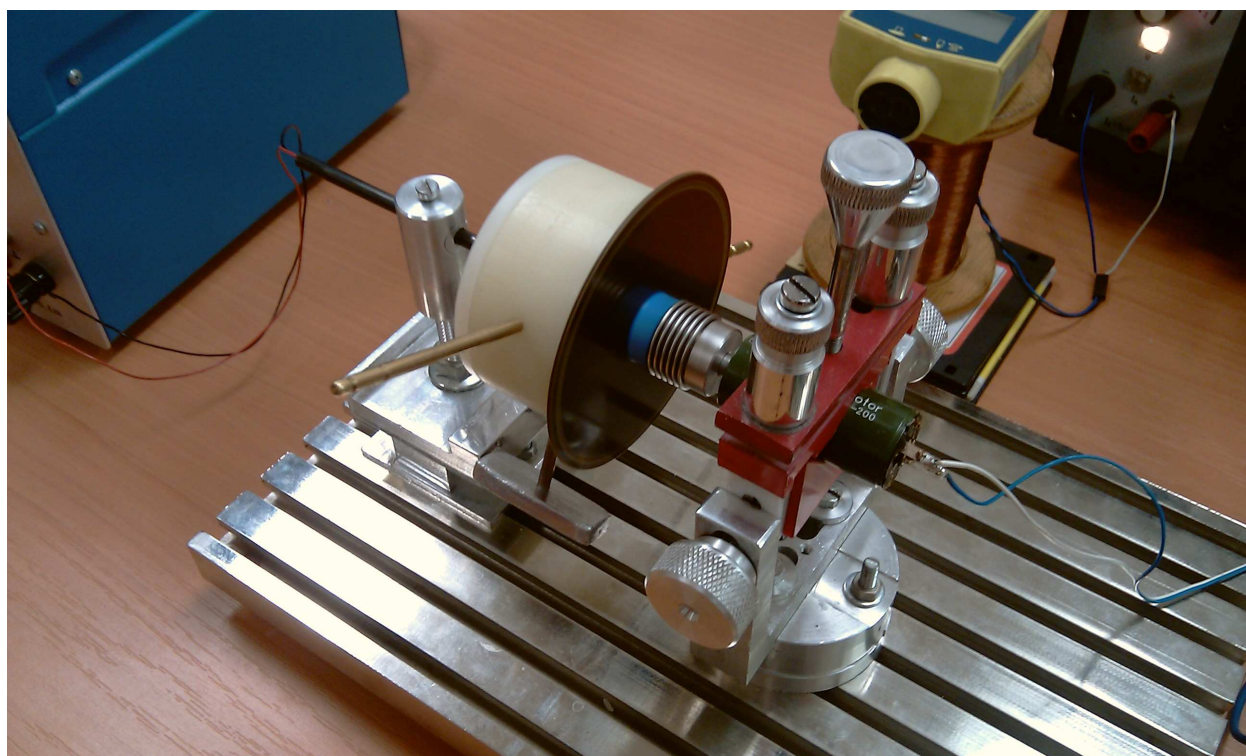
7.2.1 Schéma zapojení



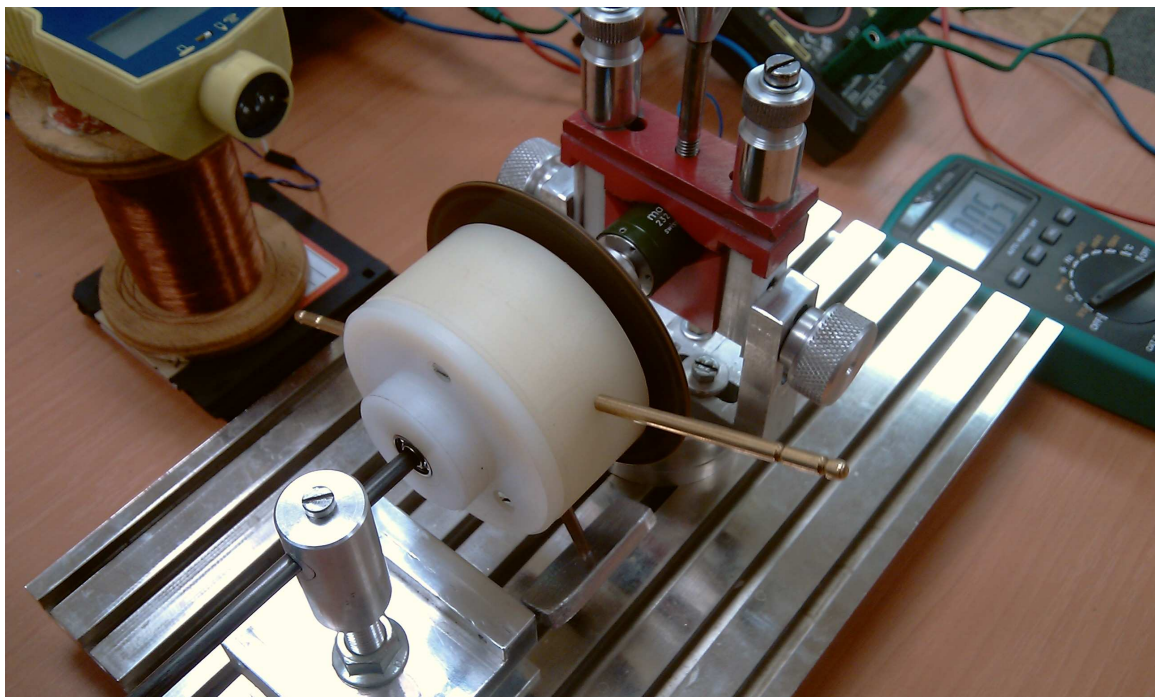
Obrázek 7-8 Schéma zapojení



Obrázek 7-9 Měřící pracoviště



Obrázek 7-10 Detail spojení motorku s hysterezní brzdou pomocí pružné spojky



Obrázek 7-11 Detail upevnění tělesa dynamometru na stojanu

7.2.2 Naměřené hodnoty

V tabulkách naměřených hodnot se nachází napájecí napětí motorku U_m , elektrický proud motorku I_m , otáčky motorku n , přírůstek vzdálenosti od nulové polohy d , z něho odvozený úhel náklonu těžiště α a točivý moment motorku M . Z těchto hodnot se dále určili charakteristické hodnoty motorku k porovnání s oficiálními hodnotami od výrobce jako je strmost, otáčková konstanta, momentová konstanta a mezní odpor vinutí. Charakteristické hodnoty motorku byly následovně zprůměrovány, a to pro hodnoty napětí $U_m = 4-9V$. Důvodem pro toto vymezení bylo málo změřených hodnot pro napájecí napětí $U_m = 1-3V$, což způsobovalo velké výkyvy spočtených charakteristických veličin. Takto vypočítané průměry se poté porovnaly s údaji od výrobce a spočítala se jejich absolutní a relativní chyba.

Momentové a proudové charakteristiky pro jednotlivá napájecí napětí jsem vynesl jako bodové grafy. Lineárních průběhů jsem dosáhl pomocí lineární spojnice trendu. Z její rovnice regrese jsem dopočítal otáčky naprázdno pro jednotlivá napětí U_m . Momentovou charakteristiku jsem poté čárkovaně prodloužil k hodnotě otáček naprázdno.

Pomocí vypočtených hodnot otáček naprázdno n_0 jsem sestrojil graf jejich závislosti na napájecím napětí U_m . Opět pomocí lineární spojnice trendu a její rovnice regrese jsem stanovil teoretické jmenovité otáčky naprázdno n_0 při jmenovitém napětí $U_m = 12V$.



1) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m = 1V$

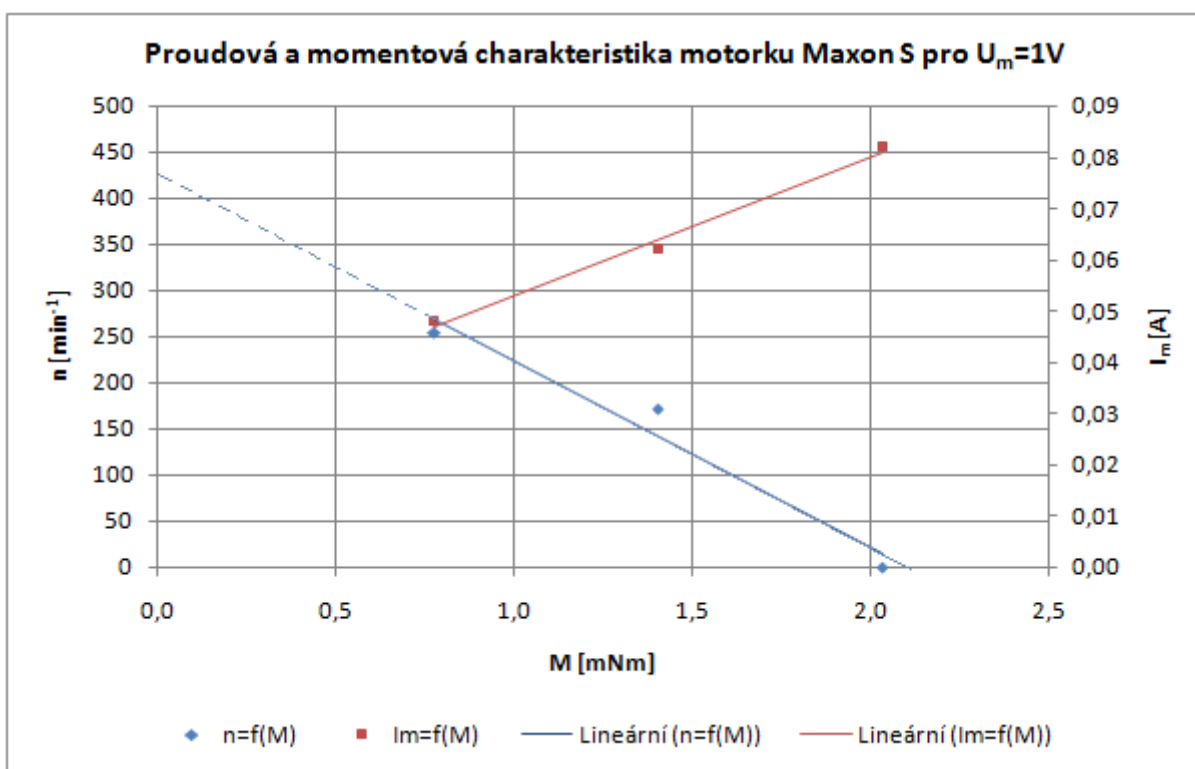
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
1	0,048	255	0	0,000	0,777
1	0,062	172	2	1,158	1,405
1	0,082	0	4	2,316	2,034

Tabulka 7-8 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m = 1V$

Hodnota rozběhového momentu je 2,034 mNm

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -202,9 \cdot x + 427,4$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -202,9 \cdot 0 + 427,4 = 427,4 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-12 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m = 1V$

2) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m = 2V$

U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
2	0,053	769	2	1,158	1,405
2	0,123	445	4	2,316	2,034
2	0,208	101	6	3,475	2,662
2	0,285	0	7	4,055	2,976

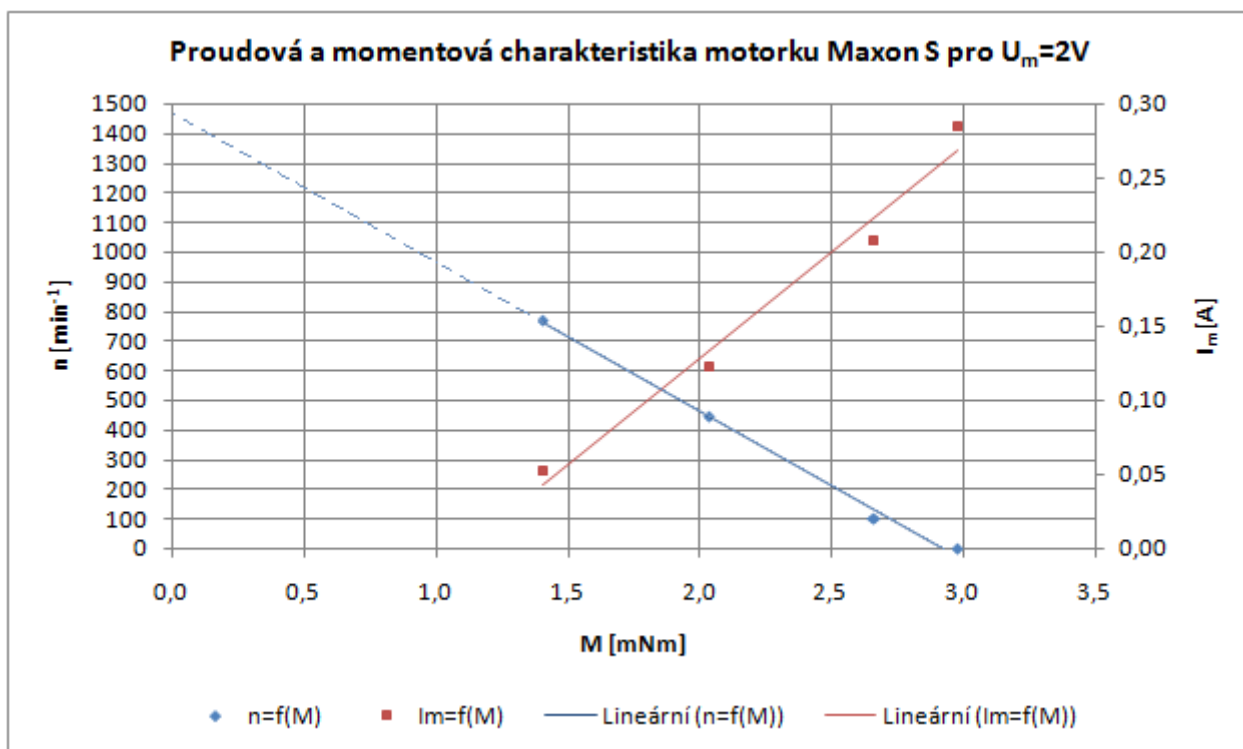
Tabulka 7-9 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m = 2V$

Hodnota rozběhového momentu je 2,976 mNm.



Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -501,1 \cdot x + 1465$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -501,1 \cdot 0 + 1465 = 1465 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-13 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=2V$

3) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m=3V$

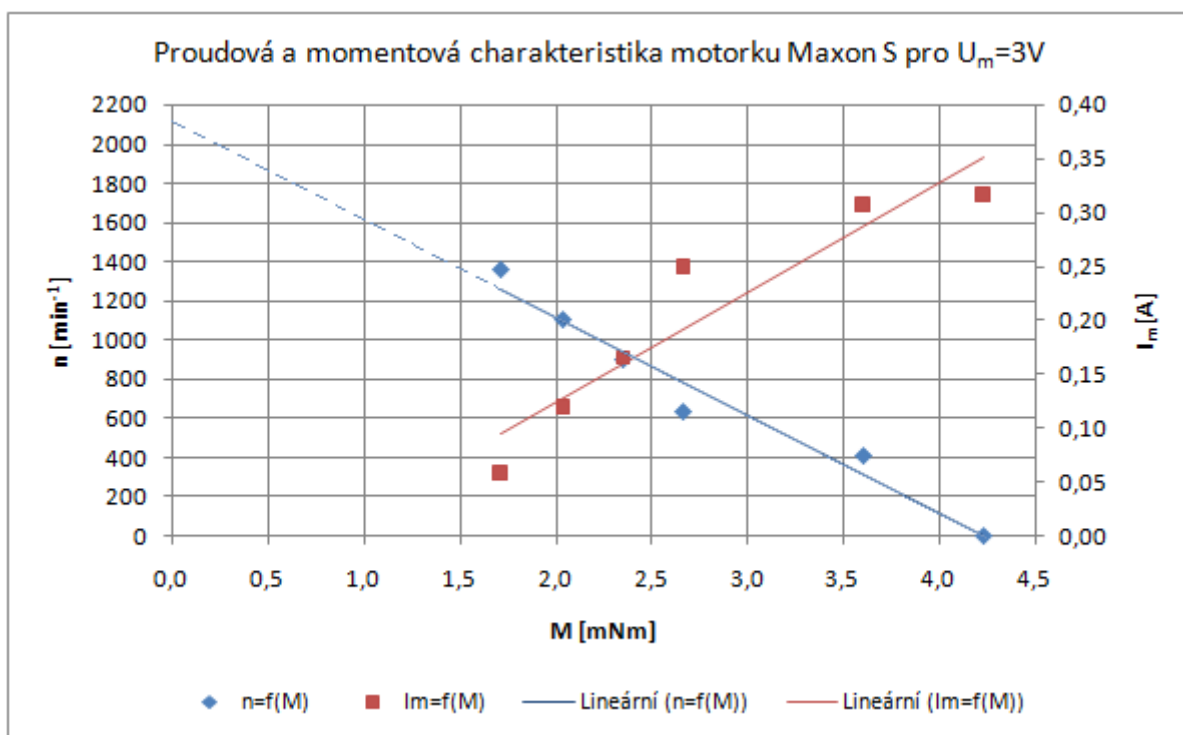
U_m [V]	I_m [A]	n [min ⁻¹]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
3	0,058	1363	3	1,737	1,720
3	0,119	1109	4	2,316	2,034
3	0,166	902	5	2,895	2,348
3	0,249	636	6	3,475	2,662
3	0,306	413	9	5,216	3,605
3	0,316	0	11	6,379	4,233

Tabulka 7-10 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=3V$

Hodnota rozběhového momentu je 4,233 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -500,5 \cdot x + 2122$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -500,5 \cdot 0 + 2122 = 2122 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-14 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=3V$

4) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m= 4V$

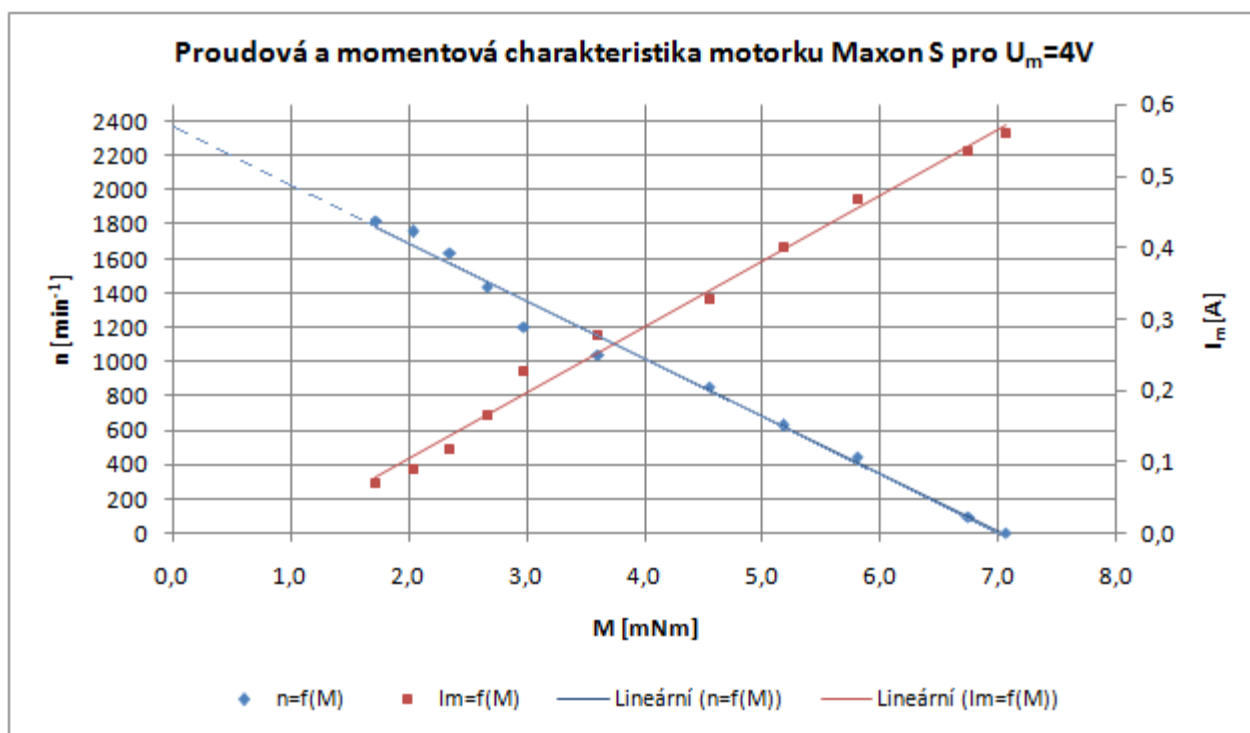
U_m [V]	I_m [A]	n [min ⁻¹]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
4	0,071	1823	3	1,737	1,720
4	0,089	1760	4	2,316	2,034
4	0,117	1637	5	2,895	2,348
4	0,165	1441	6	3,475	2,662
4	0,227	1205	7	4,055	2,976
4	0,277	1041	9	5,216	3,605
4	0,327	853	12	6,962	4,547
4	0,400	626	14	8,130	5,176
4	0,467	447	16	9,301	5,804
4	0,535	95	19	11,065	6,747
4	0,559	0	20	11,655	7,061

Tabulka 7-11 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=4V$

Hodnota rozběhového momentu je 7,061 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -336,0 \cdot x + 2358$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -336,0 \cdot 0 + 2358 = 2358 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-15 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=4V$

5) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m=5V$

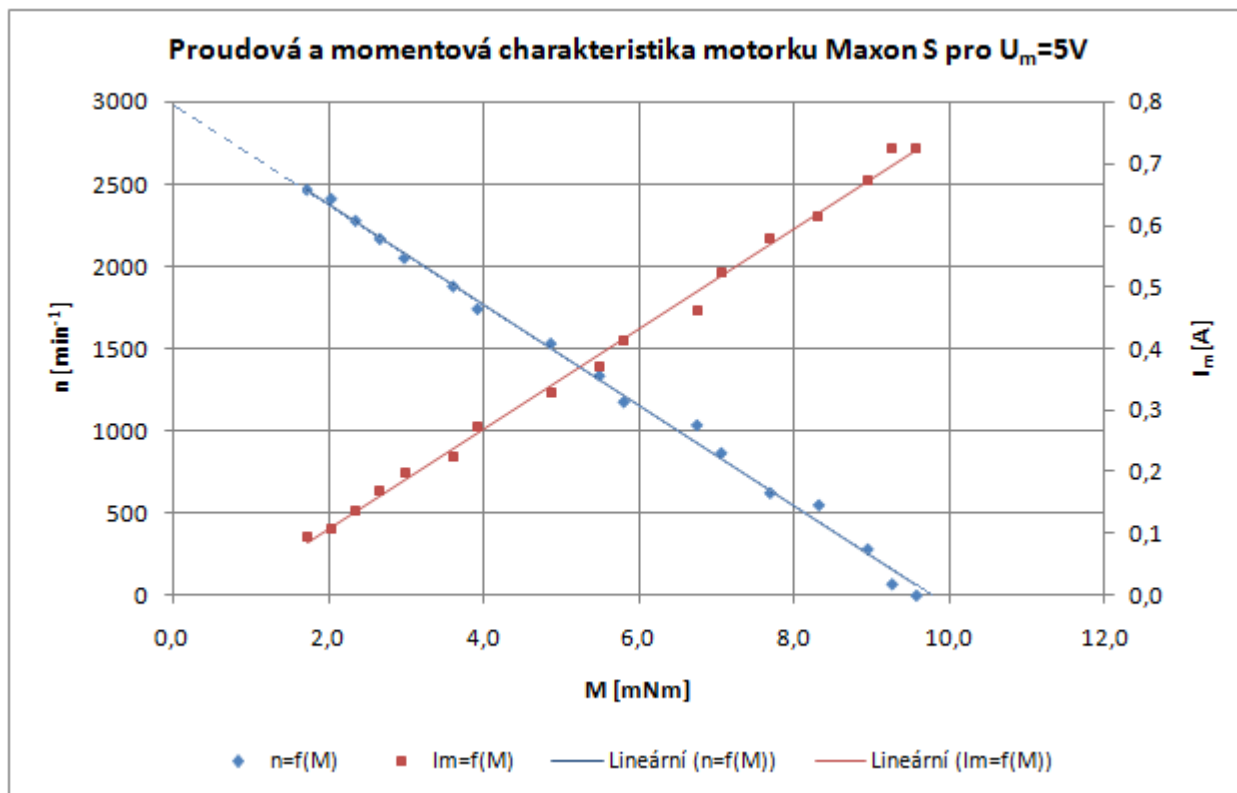
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
5	0,096	2463	3	1,737	1,720
5	0,108	2408	4	2,316	2,034
5	0,139	2275	5	2,895	2,348
5	0,170	2165	6	3,475	2,662
5	0,200	2048	7	4,055	2,976
5	0,225	1877	9	5,216	3,605
5	0,275	1739	10	5,797	3,919
5	0,329	1529	13	7,545	4,861
5	0,370	1334	15	8,715	5,490
5	0,413	1175	16	9,301	5,804
5	0,462	1034	19	11,065	6,747
5	0,523	865	20	11,655	7,061
5	0,578	623	22	12,840	7,689
5	0,614	549	24	14,030	8,318
5	0,672	281	26	15,226	8,946
5	0,723	69	27	15,827	9,260
5	0,724	0	28	16,429	9,574

Tabulka 7-12 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=5V$

Hodnota rozběhového momentu je 9,574 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -305,9 \cdot x + 2993$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -305,9 \cdot 0 + 2993 = 2993 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-16 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=5V$

6) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m=6V$

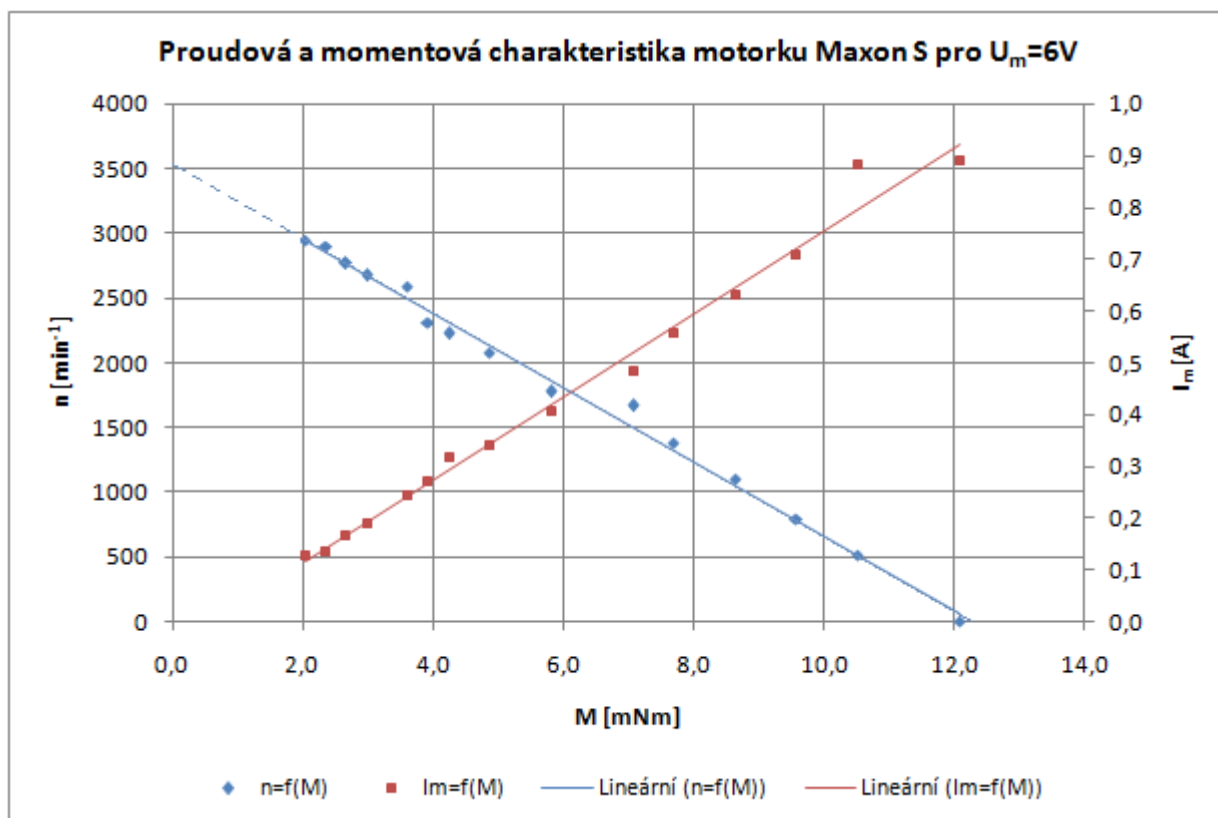
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
6	0,128	2945	4	2,316	2,034
6	0,134	2902	5	2,895	2,348
6	0,167	2770	6	3,475	2,662
6	0,191	2676	7	4,055	2,976
6	0,244	2592	9	5,216	3,605
6	0,270	2316	10	5,797	3,919
6	0,318	2226	11	6,379	4,233
6	0,340	2075	13	7,545	4,861
6	0,406	1780	16	9,301	5,804
6	0,483	1668	20	11,655	7,061
6	0,558	1381	22	12,840	7,689
6	0,633	1108	25	14,627	8,632
6	0,710	789	28	16,429	9,574
6	0,883	514	31	18,248	10,517
6	0,890	0	36	21,324	12,088

Tabulka 7-13 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m=6V$

Hodnota rozběhového momentu je 12,088 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -286,2 \cdot x + 3528$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -286,2 \cdot 0 + 3528 = 3528 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-17 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m=6V$

7) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m = 7V$

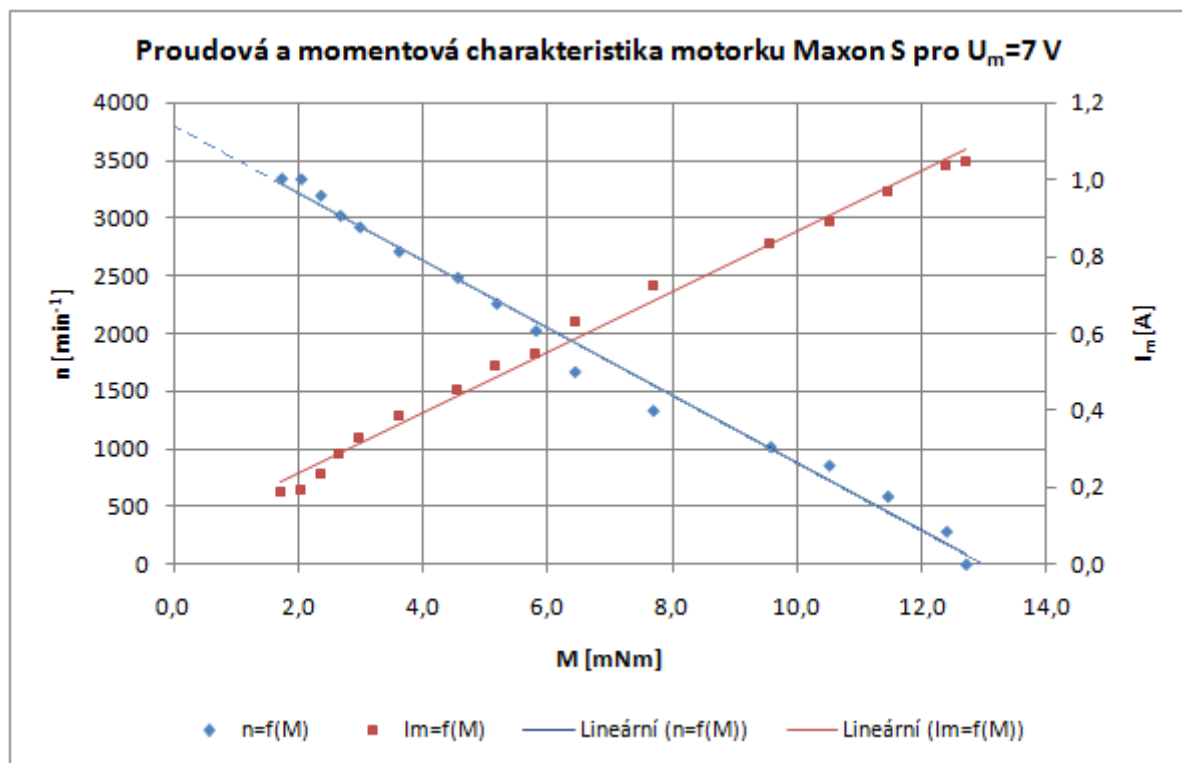
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
7	0,187	3350	3	1,737	1,720
7	0,193	3346	4	2,316	2,034
7	0,234	3203	5	2,895	2,348
7	0,287	3029	6	3,475	2,662
7	0,326	2929	7	4,055	2,976
7	0,386	2718	9	5,216	3,605
7	0,453	2490	12	6,962	4,547
7	0,518	2265	14	8,130	5,176
7	0,550	2029	16	9,301	5,804
7	0,632	1672	18	10,476	6,432
7	0,726	1335	22	12,840	7,689
7	0,838	1020	28	16,429	9,574
7	0,891	859	31	18,248	10,517
7	0,969	590	34	20,086	11,459
7	1,042	285	37	21,946	12,402
7	1,050	0	38	22,572	12,716

Tabulka 7-14 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m = 7V$

Hodnota rozběhového momentu je 12,716 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -292,1 \cdot x + 3801$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -292,1 \cdot 0 + 3801 = 427,4 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-18 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m = 7V$

8) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m = 8V$

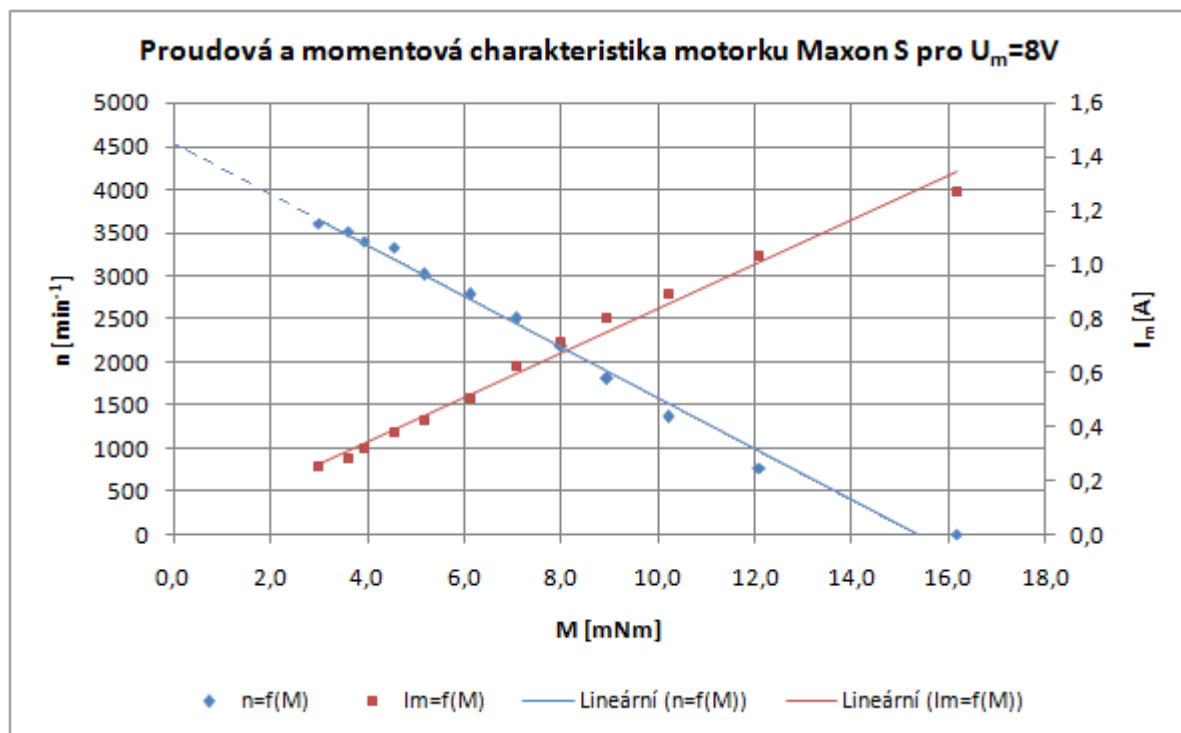
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
8	0,250	3604	7	4,055	2,976
8	0,280	3506	9	5,216	3,605
8	0,317	3398	10	5,797	3,919
8	0,380	3325	12	6,962	4,547
8	0,427	3014	14	8,130	5,176
8	0,508	2783	17	9,888	6,118
8	0,627	2506	20	11,655	7,061
8	0,711	2186	23	13,434	8,003
8	0,801	1807	26	15,226	8,946
8	0,896	1367	30	17,640	10,203
8	1,037	777	36	21,324	12,088
8	1,270	0	49	29,666	16,172

Tabulka 7-15 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m = 8V$

Hodnota rozběhového momentu je 16,172 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -294,0 \cdot x + 4532$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -294,0 \cdot 0 + 4532 = 4532 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-19 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m = 8V$



9) Naměřené hodnoty pro napájecí napětí motorku $U_m = 9V$

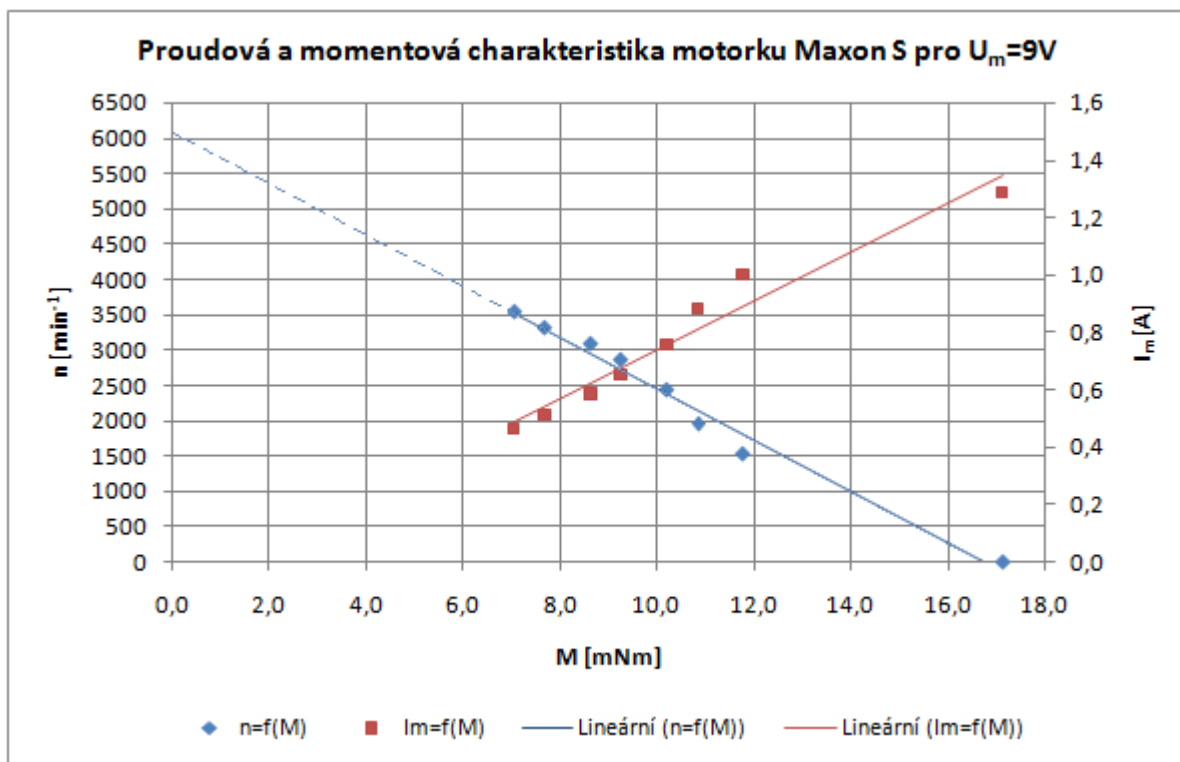
U_m [V]	I_m [A]	n [min^{-1}]	d [mm]	α [°]	M [mNm]
9	0,464	3540	20	11,655	7,061
9	0,513	3321	22	12,840	7,689
9	0,585	3082	25	14,627	8,632
9	0,651	2856	27	15,827	9,260
9	0,756	2443	30	17,640	10,203
9	0,880	1950	32	18,859	10,831
9	1,000	1524	35	20,704	11,774
9	1,285	0	52	31,685	17,115

Tabulka 7-16 Naměřené hodnoty motorku Maxon S pro $U_m = 9V$

Hodnota rozběhového momentu je 17,115 mNm.

Rovnice regrese pro $n=f(M)$: $y = -365,1 \cdot x + 6108$

Otáčky naprázdno z rovnice regrese: $n_0 = -365,1 \cdot 0 + 6108 = 6108 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-20 Graf proudové a momentové charakteristiky motorku Maxon S pro $U_m = 9V$



- **Souhrn vypočítaných hodnot otáček naprázdno:**

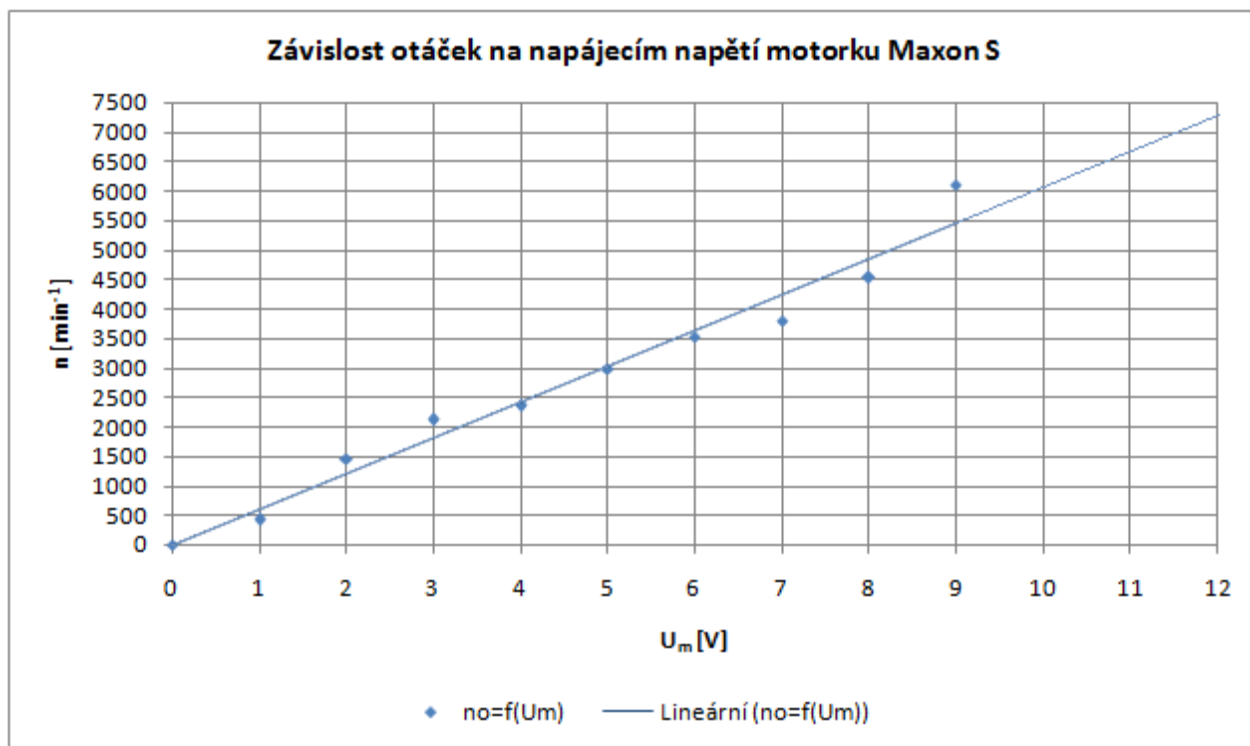
Tabulka vypočtených otáček naprázdno n_0 v závislosti na napájecím napětí U_m										
U_m [V]	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_0 [min^{-1}]	0	427,4	1465	2122	2358	2993	3528	3801	4532	6108

Tabulka 7-17 Vypočtené hodnoty otáček naprázdno

Opět pomocí rovnice regrese lineární spojnice trendu pro závislost $n=f(M)$ jsem určil teoretické otáčky naprázdno n_0 pro jmenovité napětí motorku $U_m=12\text{V}$:

Rovnice regrese: $y = 607,5 \cdot x - 0,301$

Otáčky naprázdno: $n_0 = 607,5 \cdot 12 - 0,301 = 7289,7 \text{ min}^{-1}$



Obrázek 7-21 Závislost otáček na napájecím napětí motorku Maxon S



- **Souhrn charakteristických hodnot motoru Maxon S, č. 2322.980-53.235-200:**

Charakteristické hodnoty motoru Maxon S, č. 2322.980-53.235-200				
U_m [V]	Strmost [$\text{min}^{-1}\text{mNm}^{-1}$]	Mezní odpor vinutí [Ω]	Otáčková konstanta [$\text{min}^{-1}\text{V}^{-1}$]	Momentová konstanta [mNm/A]
1	202,86	12,20	255,00	36,97
2	489,50	7,02	384,50	6,77
3	542,40	9,49	454,33	9,74
4	341,32	7,16	455,75	10,95
5	313,60	6,91	492,60	12,51
6	292,92	6,74	490,80	13,20
7	304,66	6,67	478,57	12,74
8	273,11	6,30	450,50	12,94
9	352,10	7,00	393,30	12,25
průměr pro $U_m = 4-9\text{V}$	312,95	6,80	460,25	12,43

Tabulka 7-18 Charakteristické hodnoty motorku Maxon S, č.2322.980-53.235-200

- **Ukázka výpočtu hodnot pro tabulku 7-12:**

$$\text{Strmost} = \frac{1}{(9,574 - 1,720) \text{ mNm}} \cdot 2463 \text{ min}^{-1} = 313,6 \text{ min}^{-1} \cdot \text{mNm}^{-1}$$

$$\text{Mezní odpor vinutí} = \frac{U_m}{I_{start}} = \frac{5 \text{ V}}{0,724 \text{ A}} = 6,91 \Omega$$

$$\text{Otáč. konstanta} = \frac{1}{5 \text{ V}} \cdot 2463 \text{ min}^{-1} = 492,6 \text{ min}^{-1} \cdot \text{V}^{-1}$$

$$\text{Momentová konstanta} = \frac{1}{(0,724 - 0,096) \text{ A}} \cdot (9,574 - 1,720) \text{ mNm} = 12,51 \text{ mNm} / \text{A}$$

- **Porovnání naměřených a vypočtených hodnot s údaji výrobce:**

Maxon S, č.2322.980-53.235-200				
Hodnoty při jmenovitém napětí $U_m=12\text{V}$				
	X_m - naměřené hodnoty	X_S -hodnoty od výrobce	Δ (rozdíl hodnot)	δ [%]
Otáčky naprázdno [rpm]	7289,70	7020,00	269,70	3,84
Mezní odpor vinutí [Ω]	6,80	5,61	1,19	21,21
Otáčková konstanta [rpm/V]	460,25	622,00	-161,75	-26,00
Strmost [rpm/mNm]	312,95	227,00	85,95	37,86
Momentová konstanta [mNm/A]	12,43	15,30	-2,87	-18,76

Tabulka 7-19 Porovnání naměřených hodnot motorku Maxon S s údaji výrobce



- Ukázka výpočtu pro první řádek tabulky 7-19:

$$\text{absolutní chyba } \Delta = X_m - X_s = 7289,7 \text{ min}^{-1} - 7020 \text{ min}^{-1} = 269,7 \text{ min}^{-1}$$

$$\text{relativní chyba } \delta = \frac{\Delta}{X_s} \cdot 100 = \frac{269,7 \text{ min}^{-1}}{7020 \text{ min}^{-1}} \cdot 100 = 3,84 \%$$

7.2.3 Stanovení přesnosti měření pomocí optických snímačů:

a) Přesnost při měření momentu

Kódové kolečko HEDS-6140 je tříkanálové a na kanálu A má 1024 dílků. Měření momentu probíhá v rozsahu 0-90°, tudíž je počet dílků na tuto úhlovou rozteč 256. V praxi je ale měřicí rozsah 0-85°, jelikož je to dáno mechanickou zarážkou.

Moment soustavy spojovací tyč, závaží a matice je největší při úhlu 90°:

$$M = m \cdot g \cdot l \cdot \sin 90^\circ = 48 \cdot 10^{-3} \cdot 9,81 \cdot 66,057 \cdot 10^{-3} \cdot \sin 90^\circ = 31,105 \text{ mNm}$$

Potom na jeden dílek připadá 0,1215 mNm a z toho trojčlenkou vypočteme chybu měření:

$$\delta = \frac{0,1215 \text{ mNm}}{31,105 \text{ mNm}} \cdot 100 = 0,391 \%$$

Pro rozlišení X2, kdy snímáme náběžnou i sestupnou hranu signálu, se počet impulsů na úhlovou rozteč zvýší na 512. Potom na 1 dílek připadá 0,06075 mNm a chyba měření je:

$$\delta = \frac{0,06075 \text{ mNm}}{31,105 \text{ mNm}} \cdot 100 = 0,195 \%$$

Pro rozlišení X4, kdy snímáme náběžnou i sestupnou hranu obou signálů, se počet impulsů na úhlovou rozteč zvýší na 1024. Potom na 1 dílek připadá 0,03038 mNm a chyba měření je:

$$\delta = \frac{0,03038 \text{ mNm}}{31,105 \text{ mNm}} \cdot 100 = 0,098 \%$$

b) Přesnost měření rychlosti

Kódové kolečko pro měření rychlosti je jednocanálové a na 360° má 60 děr. To znamená, že na 1 dílek připadá 6°. Chyba měření se opět vypočte trojčlenkou:

$$\delta = \frac{6^\circ}{360^\circ} \cdot 100 = 1,667 \%$$

Pro rozlišení X2, kdy snímáme náběžnou i sestupnou hranu signálu, se počet impulsů na otáčku zvýší na 120. Potom na 1 dílek připadají 3°.

$$\delta = \frac{3^\circ}{360^\circ} \cdot 100 = 0,833 \%$$



7.2.4 Měřicí přístroje

Měřicí přístroje		
Typ přístroje	Značka výrobce	Popis
ss motor	Maxon	třída S, č.2322.980-53.235-200
vířivá brzda	Mobac	typ GMBH HB-20M-2
zdroj	AT	typ TSZ 75, 0-33V, 0-2A
zdroj	Statron	0-32V, 0-6,4A
multimetr	Pro'skit	typ MT-1232
multimetr	Metex	typ M-3860D
otáčkoměr	Jaquet	typ DHO 907, digitální

Tabulka 7-20 Výpis měřících přístrojů



8 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo provést zdokonalovací návrhy na vylepšení stávajícího dynamometru. Ten se v předchozích měřeních neosvědčil, hodnoty na něm naměřené se ani vzdáleně neblížily hodnotám udaných výrobcem, proudové a momentové charakteristiky motorů Maxon RE měly místo lineárního průběhu tvar exponenciály. Proto byla stávající hysterezní brzda nahrazena novou a tím pádem i celé uložení brzdy muselo být navrženo nové.

Po sestrojení nové konstrukce dynamometru se přešlo k jeho provozním zkouškám. Motoriky Maxon RE10 a Maxon RE13 již ale nebyly dostupné a nemohlo tudíž dojít k jejich proměření na novém dynamometru. Proto byl důkladně proměřen stejnosměrný komutátorový motor Maxon S, č.2322.980-53.235-200, který byl s hysterezní brzdou Mobac GMBH HB-20M-2 spojen pružnou spojkou. K tomu bylo zamýšleno celkové zautomatizování měření rychlosti otáčení motoru a měření úhlu natočení tělesa vířivé brzdy realizované pomocí snímačů, pracujících na principu optické závory. Bohužel z důvodu časové nedostupnosti součástek nebyly všechny navržené úpravy dokončeny včas a tudíž nebylo možné ověřit vliv navržených zdokonalení na přesnost měření.

Výsledkem měření mělo být sestrojení proudových a momentových charakteristik pro jednotlivá napájecí napětí motorku U_m . Jmenovité napětí motorku je dle tabulkové hodnoty $U_m=12V$. Této hodnoty napětí se nepodařilo dosáhnout, a to z důvodu vibrací způsobených motorkem. Ani upínací zařízení na motorek ho nebylo schopné při vysokých otáčkách udržet a ten se v něm protácel. Proto jsme měření ukončili při hodnotě napětí $U_m=9V$. Z naměřených hodnot jsem poté sestrojil jednotlivé charakteristiky, které měly takřka lineární průběhy. Čistě lineárního průběhu jsem dosáhl proložením bodů lineární spojnicí trendu. Jelikož motorek prakticky nepracoval naprázdno, a to z důvodu zbytkového točivého momentu brzdy $M_{zb}=0,777 \text{ mNm}$, bylo nutné spočítat podle rovnice regrese otáčky motoru naprázdno n_0 pro jednotlivá napětí U_m . Takto vypočtené hodnoty n_0 jsem opět převedl do grafu a stejným postupem, tedy linearizací průběhu a výpočtem rovnice regrese jsem získal jmenovité otáčky motorku naprázdno ($U_m=12 \text{ V}$, $M=0 \text{ mNm}$). Ty vyšly jen s chybou 3,84 %, což je velké zlepšení oproti minulému dynamometru, u kterého vycházela relativní chyba u motorku Maxon RE10 -32,5% a u motorku Maxon RE13 to bylo -53,1%. I přes lineární průběhy proudových a momentových charakteristik však charakteristické hodnoty motorku Maxon S jako je strmost, otáčková konstanta a mezní odpor vinutí vycházely se značnou relativní chybou v řádech desítek procent.

Nově zkonstruovaný dynamometr je určitě přínosem danému měření. To je vidět z téměř lineárních průběhů, které byly změřeny. Jediným negativním faktorem, který se bohužel nepovedlo zcela vyrušit, jsou vibrace způsobené motorky. K tomu by bylo zřejmě zapotřebí tužší konstrukce přídržného zařízení motorku. Rovněž spojení motorku s hysterezní brzdou pomocí pružné spojky způsobuje vychylování dynamometru z optimální polohy.

V této práci jsem se seznámil s problematikou malých stejnosměrných komutátorových a elektricky komutovaných motorů. Poté, co byl zkonstruován nový dynamometr, se provedlo několik experimentálních měření. V čase mezi nimi docházelo k vylepšování návrhu, hlavně zkoušením různých druhů ložisek. Takto se nakonec dospělo k řešení se dvěma ložisky umístěnými za sebou, což nejvíce omezovalo vibrace v uložení tělesa hysterezní brzdy. Následovně se provedlo konečné měření, z kterého jsem vycházel v této práci.



POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Malé stejnosměrné motory MAXON verze 1.1, 18. 7. 2002, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070103_maxon_serial.pdf>.
- [2] Cigánek, L. - Bauer, M. Elektrické stroje a přístroje. Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha 2, 1955, 636 stran, typ. číslo L25-C2-5-2
- [3] Krejčí, V. – Kábele, J. Elektrotechnické měřicí přístroje a měření 2. Státní nakladatelství technické literatury, n. p., Spálená 51, Praha 2, 1961, 322 stran
- [4] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Mikromotory pro mechatronické aplikace, Technika č.9/2008, s. 26-29, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20080910_te_2008-09.pdf>.
- [5] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Jaký elektrický pohon do 400 W, Automa č.8-9/2007, s. 53-55, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070930_au_2007-08_09.pdf>.
- [6] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Možnosti řízení stejnosměrných motorů do 400 W, Technika č.9/2007, s. 48-50, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070905_te_2007-09.pdf>.
- [7] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Oblíbené aplikace motorů Maxon, Technika č.5/2007, s. 18-20, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20070529_tat_2007-05.pdf>.
- [8] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Komutátorové motory do 400 W, Automa č.8-9/2006, s. 50-51, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20060812_au_2006-08_09.pdf>.
- [9] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Pokroky stejnosměrných pohonů malého výkonu, Automa č.5/2006, s. 22, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20060601_au_2006-05.pdf>.
- [10] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Stejnosměrné motory do 400 W ...možnosti řízení, Technika a trh č.3/2006, s. 12-14, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20060401_tat_2006-03.pdf>.
- [11] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Životnost moderních malých stejnosměrných motorů, Průmyslové spektrum č.9/2001, s. 54-55, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20011001_mm_2001-09.pdf>.
- [12] Mobac GMBH: katalog Hysteresis brakes and couplings, URL: <<http://www.mobac.de/pdf/mobac-permanentbremsen.pdf>>.
- [13] Mobac GMBH: katalog Current controlled hysteresis brakes, URL: <<http://www.mobac.de/pdf/mobac-strombremsen.pdf>>.
- [14] Novák, J. Dynamometr na vířivé proudy a jeho regulace, Elektro č.6/2002, URL: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=25051>.



- [15] Maxon motor AG: katalog 2008/2009
- [16] Magtrol inc.: HD and ED series hysteresis dynamometers, User's manual, URL: <<http://www.magtrol.com/manuals/hdmanual.pdf>>.
- [17] Kadaník, P. Řízení asynchronního motoru bez použití snímače rychlosti, Disertační práce, 2004, URL: <http://pohony.kadanik.cz/PDFs/disertace/kap_02_uvod_disertace_kadanik.pdf>.
- [18] Selos Bohemia, s.r.o., Katalog magnetických materiálů, URL: <<http://magnety.selos.cz/index.php>>.
- [19] Uzimex Praha, spol. s.r.o.: Snímače stejnosměrných motorů do 400 W, Technika č.4/2008, s. 34-35, URL: <http://www.uzimex.cz/soubory/20080311_te_2008-04.pdf>.
- [20] Maxon motor AG: Katalog motorů, URL: <https://info.enstb.org/projets/em6/s3/2004-2005/Carte_alimentation/Moteur_2322.980-52.235-200.pdf>.
- [21] Agilent technologies, Inc.: Three channel optical incremental encoder modules, URL: <<http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/134447/HP/HEDS-9040.html>>.
- [22] Agilent technologies, Inc.: Two and free channel codewheels for use with Agilent optical encoder modules, URL: <<http://www.chipcatalog.com/Agilent/HEDS-6140.htm>>.
- [23] Novák, P. Rotační inkrementální senzory, Automa č.10/2002, URL: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au100232.pdf>>.
- [24] Vojáček, A. Princip optických enkodérů polohy pro řízení motorů, URL: <<http://automatizace.hw.cz/el-pohony/ART222-princip-optickyh-enkoderu-polohy-pro-rizeni-motoru.html>>.



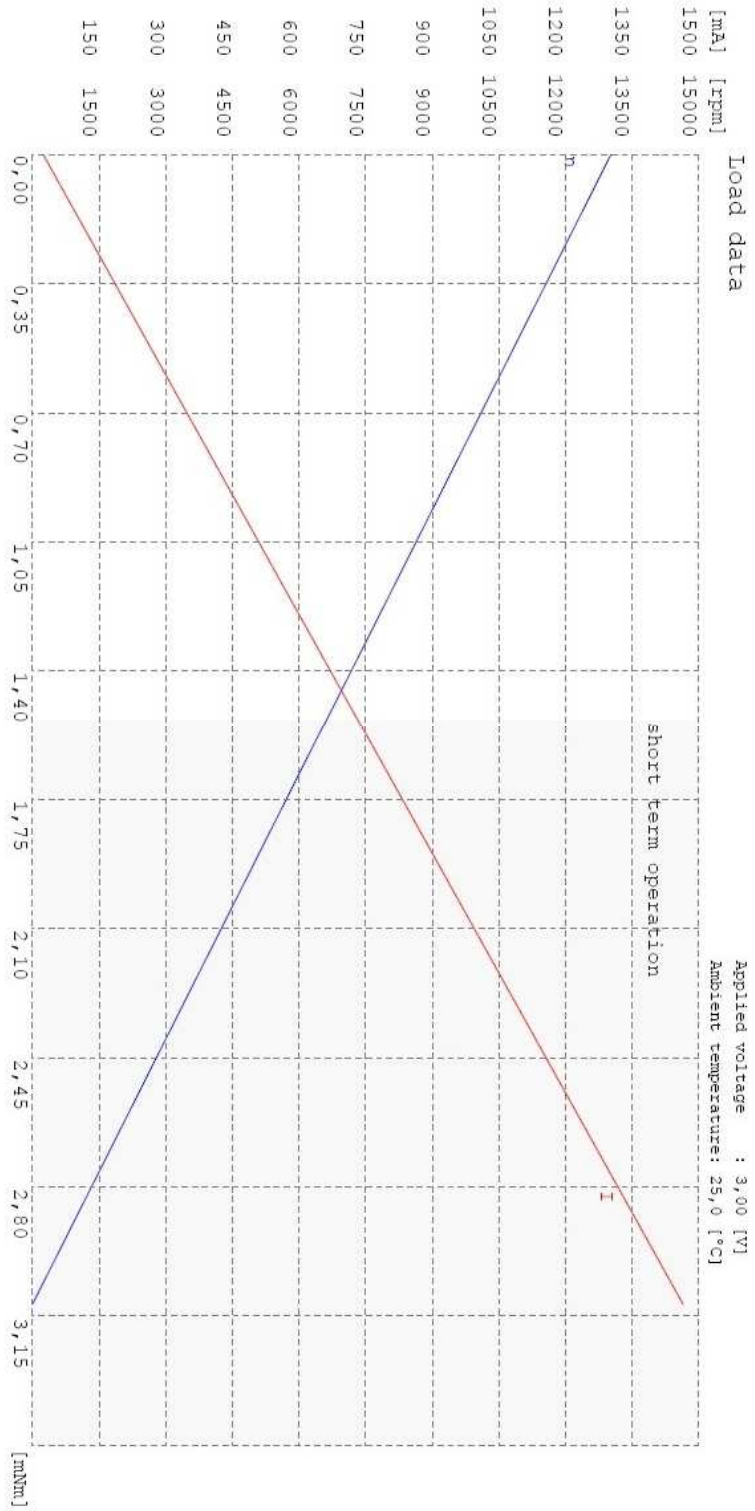
PŘÍLOHY

- A. Proudová a momentová charakteristika motorku Maxon RE10, č. 118392, originál od výrobce
- B. Proudová a momentová charakteristika motorku Maxon RE13, č. 118566, originál od výrobce
- C. Závislost budícího proudu na momentu vířivé brzdy Mobac GMBH HB-3M-2, originál od výrobce



maxon motor

Drive: 118392 RE010-025-00EAA100A /
With 118392 RE010-025-00EAA100A /



Data sheets: 118392 / RE010-025-00EAA100A

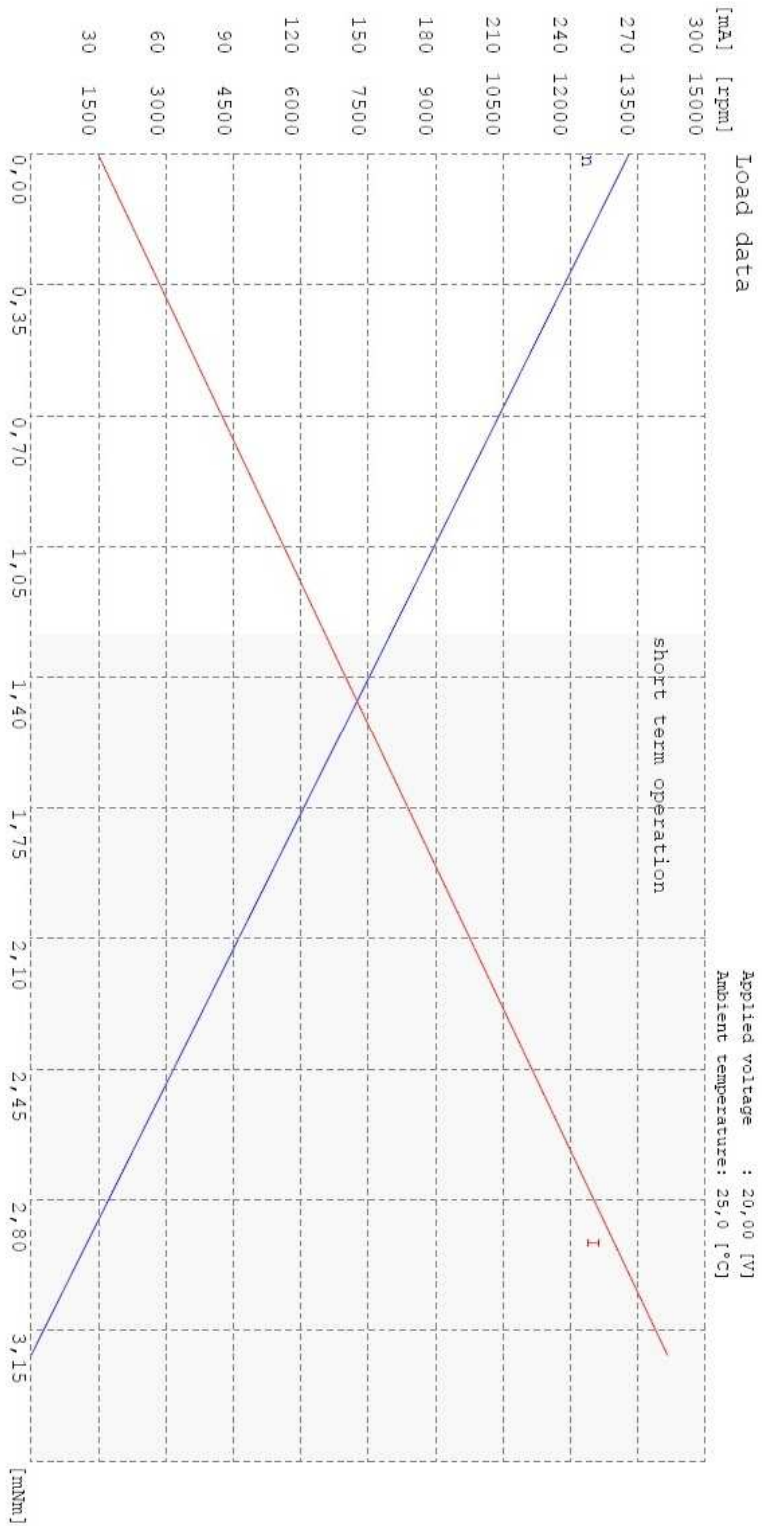
1

28.11.2008 / WINMSP V3.0



maxon motor

Drive: -
with 118566 RE013-023-16EAB101A /



Data sheets: 118566 / RE013-023-16EAB101A

1

28.11.2008 / WINMSP V3.0

