

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

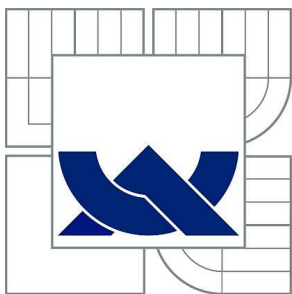
ANALÝZA A INOVACE STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTRICKÝCH
MOTORKŮ

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

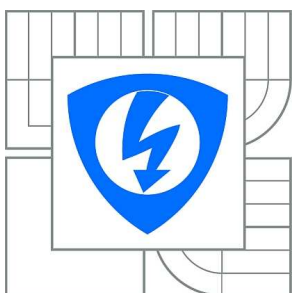
Bc. FRANTIŠEK ŠIMKO

BRNO 2011



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

ANALÝZA A INOVACE STEJNOSMĚRNÝCH ELEKTRICKÝCH MOTORKŮ

DC MOTORS ANALYSIS AND INNOVATION

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

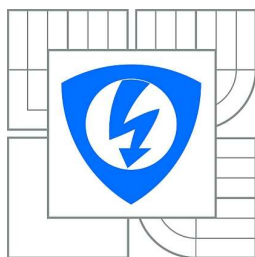
Bc. FRANTIŠEK ŠIMKO

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. VÍTĚZSLAV HÁJEK, CSc.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. František Šimko

ID: 70055

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Analýza a inovace stejnosměrných elektrických motorků

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vyhodnoťte informace získané z přehledu elektrických motorků.
2. Proved'te rozbor vybraného typu motorku.
3. Navrh'něte inovovaný konkrétní funkční vzorek motorku včetně základních výpočtů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího

Termín zadání: 23.9.2010

Termín odevzdání: 23.5.2011

Vedoucí práce: prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Tato práce má za cíl navrhnout funkční vzorek inovovaného motorku. Práce se skládá ze tří hlavních částí.

V první části byla provedena analýza dostupných stejnosměrných motorků malého výkonu na trhu. Náplní druhé části bylo provedení měření, analýzy konstrukce a analýzy ztrát stejnosměrného motorku s permanentními magnety. Poslední část se zabývá návrhem možných inovací motorku s permanentními magnety a následnou realizací některých z nich. Inovace jsou podpořeny výpočty a simulacemi.

Abstract

The thesis aims to explain the design a prototype of an innovated small engine. It is divided into three main parts.

The first part is focused on the analysis of low power DC small engines available on the market. The second part consists of measuring, construction and loss analysis of a DC small engine with permanent magnets. The last part deals with the possible innovations of a small engine with permanent magnets and subsequent implementation of some of them. The innovations are supported by calculations and simulations.

Klíčová slova

Kartáče, komutátor, permanentní magnety, rotor, rotorové plechy, stator, stejnosměrný motor.

Key words

Brushes, commutator, permanent magnets, rotor, rotor sheets, stator, DC motor.

Bibliografická citace

ŠIMKO, F. *Analýza a inovace stejnosměrných elektrických motorků* . Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Vítězslav Hájek, CSc..

Prohlášení

Prohlašuji, že svou semestrální práci na téma Analýza a inovace stejnosměrných elektrických motorků jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální 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 semestrální práce Prof. Ing. Vítězslavu Hájkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé semestrální práce.

V Brně dne

Podpis autora

OBSAH

SEZNAM TABULEK.....	9
1 ÚVOD.....	10
2 PŘEHLED VYRÁBĚNÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ MALÉHO VÝKONU	11
2.1 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK TYP.Č. 443132228820, APS, SVĚTLÁ NAD SÁZAVOU A.S., ČESKÁ REPUBLIKA.....	11
2.2 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK RE 50 370354, MAXON MOTOR GMBH, NĚMECKO	12
2.3 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK AME 1589, ISKRA, SLOVINSKO	13
2.4 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK 1.13.075.214, BÜHLER MOTOR, NĚMECKO	15
2.5 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK M80X80/L, KAG, NĚMECKO	16
2.6 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK P2SZ447, ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S., ČESKÁ REPUBLIKA	18
2.7 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK GNM 5480, ENGEL ELEKTROANTRIEBE GMBH, NĚMECKO.....	19
2.8 STEJNOSMĚRNÝ MOTOREK DPD 24V 170W, BOSH MOTORS AND CONTROLERS, NĚMECKO...20	
2.9 POROVNÁNÍ PARAMETRŮ STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ Z PŘEHLEDU.....	22
3 ANALÝZA MOTORKU P2SZ447 OD FIRMY ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S.	25
3.1 FOTODOKUMENTACE MOTORKU P2SZ447.....	29
3.2 HODNOTY A GRAFY Z MĚŘENÍ NA MOTORKU P2SZ447 PROVEDENÉHO UVEE	32
3.3 HODNOTY A GRAFY Z MNOU PROVEDENÉHO MĚŘENÍ NA MOTORKU P2SZ447.....	34
3.4 VÝPOČET ROZLOŽENÍ ZTRÁT MOTORKU P2SZ447	37
3.4.1 MĚŘENÍ NAPRÁZDNO.....	38
3.4.2 VÝPOČET ROZLOŽENÍ ZTRÁT	41
4 MOŽNOSTI INOVACE STEJNOSMĚRNÉHO MOTORKU S PM	44
4.1 PERMANENTNÍ MAGNETY	44
4.2 PLECHY	46
4.3 KOSTRA.....	46
4.4 KOMUTÁTOR.....	47
5 NÁVRH INOVACE MOTORKU P2SZ447	48
5.1 INOVACE MOTORKU S 12 DRÁŽKAMI	50
5.1.1 PRODLOUŽENÍ O 10 MM (UPRAVENÝ 1).....	52
5.1.2 PRODLOUŽENÍ O 20 MM (UPRAVENÝ 2).....	53
5.1.3 VÝMĚNA MAGNETŮ ZA NdFeB MAGNETY (UPRAVENÝ 3).....	55
5.1.4 VÝMĚNA MAGNETŮ ZA NdFeB MAGNETY LEPENÉ (UPRAVENÝ 4)	61
5.2 POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ NAVRHOVANÝCH ÚPRAV.....	64
6 ZÁVĚR.....	66
LITERATURA	68
PŘÍLOHY	69

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1	Stejnoseměrný motorek Typ.č. 443132228820 [2].....	11
Obrázek 2	Technický náčrt motorku 443132228820 z technické dokumentace výrobce [2]...	12
Obrázek 3	Stejnoseměrný motorek RE 50 370354 [3]	12
Obrázek 4	Technický náčrt motorku RE 50 370354 z technické dokumentace výrobce [3]....	13
Obrázek 5	Stejnoseměrný motorek AME 1589 [4].....	14
Obrázek 6	Části DC motorku AME 1589 z technické dokumentace výrobce [4].....	14
Obrázek 7	Stejnoseměrný motorek 1.13.075.214 [6]	15
Obrázek 8	Technický náčrt motorku 1.13.075.214 z technické dokumentace výrobce [6]	16
Obrázek 9	Stejnoseměrný motorek M80x80/l [7].....	16
Obrázek 10	Technický náčrt motorku M80x80/l z technické dokumentace výrobce [7]	17
Obrázek 11	Charakteristiky motorku M80x80/l z technické dokumentace výrobce [7].....	17
Obrázek 12	Stejnoseměrný motorek P2SZ447 [1]	18
Obrázek 13	Technický náčrt motorku P2SZ447 z technické dokumentace výrobce [1].....	18
Obrázek 14	Stejnoseměrný motorek GNM 5480 [8]	19
Obrázek 15	Technický náčrt motorku GNM 5480 z technické dokumentace výrobce [8].....	19
Obrázek 16	Charakteristiky motorku GNM 5480 z technické dokumentace výrobce [8]	20
Obrázek 17	Stejnoseměrný motorek DPD 24V 170W [6]	20
Obrázek 18	Technický náčrt motorku DPD 24V 170W z technické dokumentace výrobce [5]..	21
Obrázek 19	Charakteristiky motorku DPD 24V 170W z technické dokumentace výrobce [5]..	21
Obrázek 20	Graf porovnání výkonů stejnosměrných motorek malého výkonu.....	22
Obrázek 21	Graf porovnání proudů stejnosměrných motorek malého výkonu.....	23
Obrázek 22	Graf porovnání otáček stejnosměrných motorek malého výkonu.....	23
Obrázek 23	Graf porovnání hmotností stejnosměrných motorek malého výkonu	24
Obrázek 24	Graf porovnání jmenovitých momentů stejnosměrných motorek malého výkonu ..	24
Obrázek 25	Stejnoseměrný motorek P2SZ447 [1]	25
Obrázek 26	Technický náčrt motorku P2SZ447 z technické dokumentace výrobce [1].....	25
Obrázek 27	Výkres segmentu permanentního magnetu motorku P2SZ447 [9]	26
Obrázek 28	Výkres rotorového plechu motorku P2SZ447 a) rotorový plech, b) detail drážky [9]	27
Obrázek 29	Schéma vinutí rotoru motorku P2SZ447 [9]	28
Obrázek 30	Motorek P2SZ447 připojený k dynamometru	29
Obrázek 31	Komutátor motorku P2SZ447	29

Obrázek 32	Rozložený motorek P2SZ447	30
Obrázek 33	Rotor motorku P2SZ447	30
Obrázek 34	Permanentní magnety motorku P2SZ447	31
Obrázek 35	Štít s držáky kartáčů a kartáči motorku P2SZ447	31
Obrázek 36	Graf naměřených hodnot na ústavu UVEE $n=f(M)$ a $I=f(M)$	33
Obrázek 37	Graf naměřených hodnot na ústavu UVEE $P_2=f(M)$ a $\eta=f(M)$	33
Obrázek 38	Graf mnou naměřených hodnot $n=f(M)$ a $I=f(M)$	36
Obrázek 39	Graf mnou naměřených hodnot $P_2=f(M)$ a $\eta=f(M)$	36
Obrázek 40	Graf mnou naměřených hodnot $U_i=f(n)$	37
Obrázek 41	Graf mnou naměřených hodnot $\Delta P_m=f(n)$	40
Obrázek 42	Graf mnou vypočtených hodnot $\Delta P_m=f(n)$	40
Obrázek 43	Graf rozložení ztrát při směru otáčení vpravo	42
Obrázek 44	Graf rozložení ztrát při směru otáčení vlevo	42
Obrázek 45	Rozložení ztrát pro jmenovitý moment při směru otáčení vpravo	43
Obrázek 46	Rozložení ztrát pro jmenovitý moment při směru otáčení vlevo	43
Obrázek 47	Příklady tvarů magnetů ze vzácných zemin a)NdFeB, b)SmCo [14]	44
Obrázek 48	Grafické zobrazení pracovního bodu z katalogu SELOS [16]	45
Obrázek 49	Skládané přesné bezešvé trubky od firmy PARADOX STEEL s.r.o. [17]	46
Obrázek 50	Rozložení magnetické indukce v původním motorku s 12 drážkami na rotoru	50
Obrázek 51	Detail permanentního magnetu v původním motorku s 12 drážkami na rotoru	51
Obrázek 52	Rozložení magnetické indukce v motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm	52
Obrázek 53	Detail permanentního magnetu v motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm	52
Obrázek 54	Rozložení magnetické indukce v motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm	54
Obrázek 55	Detail permanentního magnetu v motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm	54
Obrázek 56	Náhradní schéma magnetického obvodu	56
Obrázek 57	Rozložení magnetické indukce v motorku s magnety NdFeB	58
Obrázek 58	Detail permanentního magnetu v motorku s magnety NdFeB	58
Obrázek 59	Rozložení výkonu a ztrát motorku s magnety NdFeB	60
Obrázek 60	Rozložení magnetické indukce v motorku s lepenými magnety NdFeB	62
Obrázek 61	Detail permanentního magnetu v motorku s lepenými magnety NdFeB	62
Obrázek 62	Rozložení výkonu a ztrát motorku s lepenými magnety NdFeB	63
Obrázek 63	Grafické porovnání vypočtených hodnot momentu a indukci	64
Obrázek 64	Grafické porovnání vypočtených hodnot ztrát	65

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Parametry stejnosměrného motorku 443132228820 z dokumentace výrobce [2]....	11
Tabulka 2	Parametry stejnosměrného motorku RE 50 370354 z dokumentace výrobce [3].....	13
Tabulka 3	Parametry stejnosměrného motorku AME 1589 z dokumentace výrobce [4]	14
Tabulka 4	Parametry stejnosměrného motorku 1.13.075.214 z dokumentace výrobce [6].....	15
Tabulka 5	Parametry stejnosměrného motorku M80x80/l z dokumentace výrobce [7]	17
Tabulka 6	Parametry stejnosměrného motorku P2SZ447 z dokumentace výrobce [1].....	18
Tabulka 7	Parametry stejnosměrného motorku GNM 5480 z dokumentace výrobce [8].....	19
Tabulka 8	Parametry stejnosměrného motorku DPD 24V 170W z dokumentace výrobce [5]	20
Tabulka 9	Tabulka porovnání stejnosměrných motorků malého výkonu.....	22
Tabulka 10	Parametry stejnosměrného motoru P2SZ447 z dokumentace výrobce [1].....	25
Tabulka 11	Hodnoty naměřené na ústavu UVEE na motorku P2SZ447	32
Tabulka 12	Tabulka hodnot z mnou provedeného měření $U_i=f(n)$	34
Tabulka 13	Tabulka hodnot z mnou provedeného měření při směru otáčení vpravo	35
Tabulka 14	Tabulka hodnot z mnou provedeného měření při směru otáčení vlevo	35
Tabulka 15	Tabulka hodnot z mnou provedeného měření nakrátko.....	39
Tabulka 16	Tabulka mnou vypočtených ztrát motorku	41
Tabulka 17	Tabulka vlastností magnetických materiálů od firmy WAMAG [15]	45
Tabulka 18	Tabulka rozměrů a tolerancí od firmy PARADOX STEEL s.r.o. [17]	47
Tabulka 19	Parametry původního motorku s 12 drážkami na rotoru	51
Tabulka 20	Parametry motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm.....	53
Tabulka 21	Parametry motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm.....	55
Tabulka 22	Parametry motorku s magnety NdFeB	60
Tabulka 23	Parametry motorku s lepenými magnety NdFeB.....	63
Tabulka 24	Parametry motorků.....	64

1 ÚVOD

Stejnoseměrný stroj je nejstarším točivým elektrickým strojem vůbec. Jeho principy jsou známy již řadu let. Nejprve se stejnosměrné stroje používaly k výrobě elektrické energie, jako generátory (dynama), ale také jako motory k přeměně elektrické energie na mechanickou. V dnešní době se stejnosměrný stroj používá hlavně jako elektrický motor. Mezi jeho přednosti patří menší rozměry a nižší hmotnost oproti střídavým motorům stejného výkonu, ale také lineární, mechanické a většinou i regulační charakteristiky. Vyznačují se velkým záběrným momentem a poměrně malou časovou konstantou. Stejnoseměrný motor má i nedostatky. Nejvýznamnějším z nich je potřeba kluzného kontaktu. Kluzný kontakt mezi kartáči a komutátorem je zdrojem elektromagnetického rušení a poruch.

Cílem této práce je zhotovit přehled vyráběných stejnosměrných motorků malého výkonu a analyzovat jejich výsledky. Dále pak vybrat jeden určitý typ stejnosměrného motorku a u tohoto motorku provést analýzu a měření. Závěrečná část je zaměřena na možnosti inovace stejnosměrných motorků. Tato část práce bude zahrnovat jak návrh inovací, tak použití některých z nich na konkrétní úpravu motorku. Úpravy budou doloženy výpočty i analýzou ztrát.

[11]

2 PŘEHLED VYRÁBĚNÝCH STEJNOSMĚRNÝCH MOTORKŮ MALÉHO VÝKONU

2.1 Stejnoseměrný motorek Typ.č. 443132228820, APS, Světlá nad Sázavou a.s., Česká Republika

Výrobce tohoto stejnosměrného motoru je česká firma APS Světlá nad Sázavou a.s. Jedná se o elektromotory pro trvalé i krátkodobé zatížení. Elektromotor je stejnosměrný na napětí 24V, dvoupólový s buzením permanentními feritovými magnety.

Vyrábí se v jednorýchlostním provedení s možností změny otáček či elektronickou regulací otáček, s různým stupněm elektromagnetického odrušení.

Používá se pro pohony větrání a klimatizace nákladních vozidel a autobusů, pohony invalidních vozíků, pohony malých dopravníků a podobných podávacích zařízení. Dále pro pohony dětských vozítek a dopravu paliva.

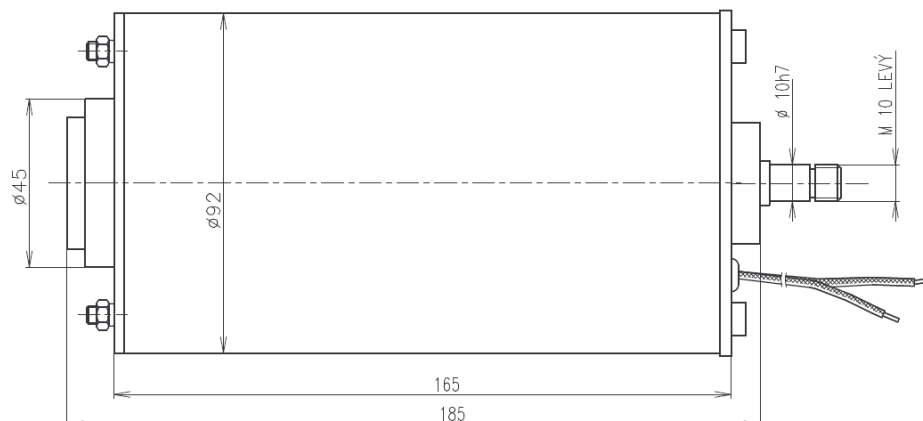
[2]



Obrázek 1 Stejnoseměrný motorek Typ.č. 443132228820 [2]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
443132228820	24	240	10	2700	2,4	0,8

Tabulka 1 Parametry stejnosměrného motoru 443132228820 z dokumentace výrobce [2]



Obrázek 2 Technický nákres motorku 443132228820 z technické dokumentace výrobce [2]

2.2 Stejnosměrný motorek RE 50 370354, Maxon motor GmbH, Německo

Jedná se o stejnosměrný motorek německého výrobce Maxon motor GmbH, u kterého bylo použito již jedno z mnoha navrhovaných vylepšení, viz níže, a to použití permanentních magnetů vyrobených ze vzácných zemin (NdFeB).

Motor RE 50 o výkonu 200 W je novým přírůstkem do řady kartáčových DC motorů RE. Motor RE 50 má tvar válce o průměru 50 mm a délce 108 mm.

Srdcem motoru RE 50 je patentované samonosné vinutí. Motor se vyrábí se čtyřmi typy vinutí. V kombinaci s dvoupólovým magnetem ze směsi NdFeB dosahuje RE 50 trvalého výstupního momentu až 0,38 Nm při jmenovitých rychlostech 2800 až 5700 ot/min.

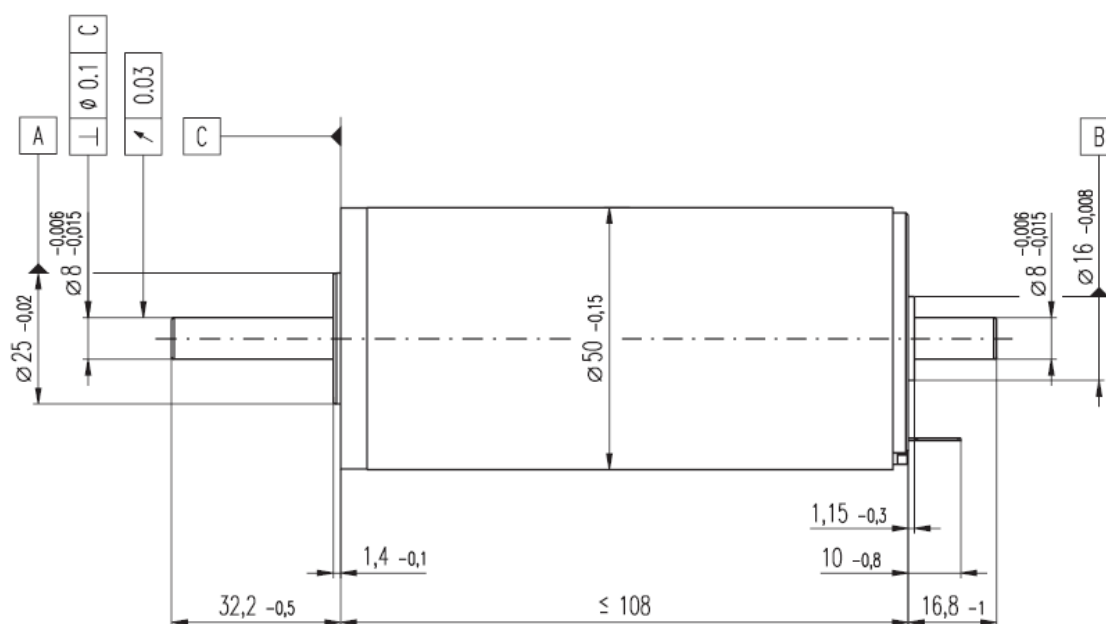
[3]



Obrázek 3 Stejnosměrný motorek RE 50 370354 [3]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
RE 50 370354	24	200	9	5538	1,1	0,35

Tabulka 2 Parametry stejnosměrného motorku RE 50 370354 z dokumentace výrobce [3]



Obrázek 4 Technický náčrt motorku RE 50 370354 z technické dokumentace výrobce [3]

2.3 Stejnosměrný motorek AME 1589, ISKRA, Slovinsko

Tento stejnosměrný motorek s permanentními magnety je výrobkem firmy ISKRA se sídlem ve Slovinsku. Vnější průměr motorku je 80 mm.

Tyto stejnosměrné komutátorové motory mohou být použity jako trakční motory k pohonu hydraulických čerpadel pro různá použití, obzvláště při přepravě materiálu, v automobilovém a dopravním průmyslu a pro další použití, jako např. navijáky, průmyslové čisticí stroje a námořní aplikace.

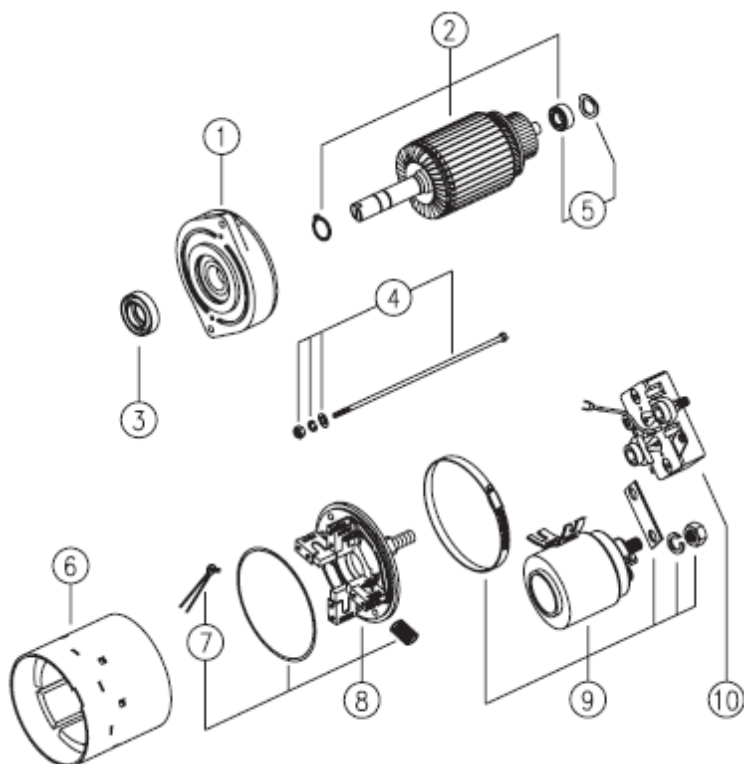
Motory se vyrábí, jak ve standardních verzích, tak i na zakázku dle požadavků zákazníka.



Obrázek 5 Stejnoseměrný motorek AME 1589 [4]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
AME 1589	24	500	20	2800	2,6	1,7

Tabulka 3 Parametry stejnosměrného motorku AME 1589 z dokumentace výrobce [4]



Obrázek 6 Části DC motorku AME 1589 z technické dokumentace výrobce [4]

2.4 Stejnosměrný motorek 1.13.075.214, Bühler motor, Německo

Stejnosměrný motorek s permanentními magnety od německé firmy Bühler, motor o vnějším průměru 76mm a délce 123mm. Jedná se o dvoupólový stroj s grafitovými kartáči a stupněm krytí IP 40.

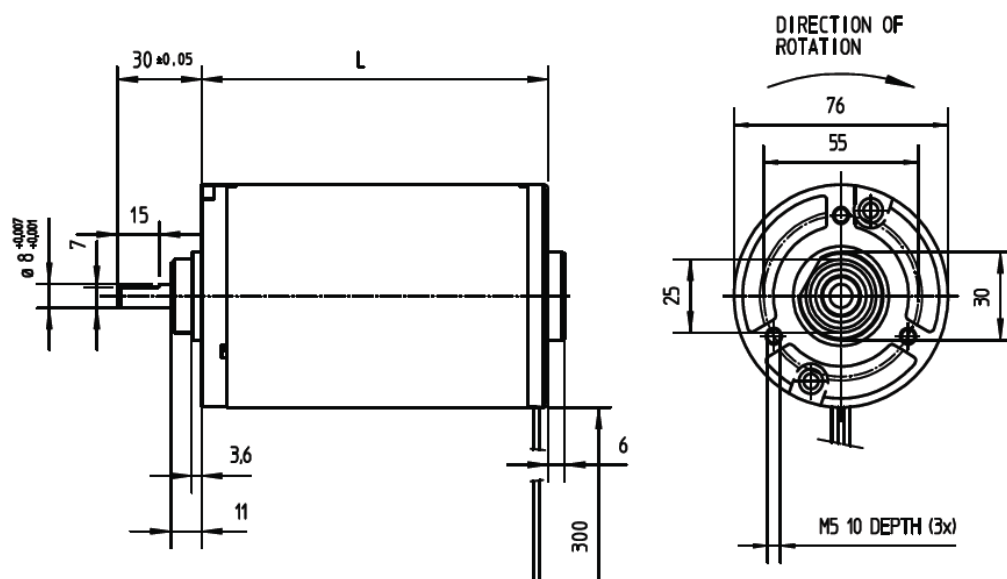
[6]



Obrázek 7 Stejnosměrný motorek 1.13.075.214 [6]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
1.13.075.214	24	200	12	3200	1,8	0,6

Tabulka 4 Parametry stejnosměrného motorku 1.13.075.214 z dokumentace výrobce [6]



Obrázek 8 Technický náčrt motorku 1.13.075.214 z technické dokumentace výrobce [6]

2.5 Stejnosměrný motorek M80x80/l, KAG, Německo

Stejnosměrný motorek od firmy KAG z Německa má na statoru permanentní magnety. Kartáče tohoto motoru jsou grafitové, potažené mědí. Tělo motorku je pozinkované a hřídel je uchycena v kuličkových ložiscích. Stupeň krytí tohoto motorku je IP 40. Jeho jmenovitou účinnost udává výrobce na 84,9%.

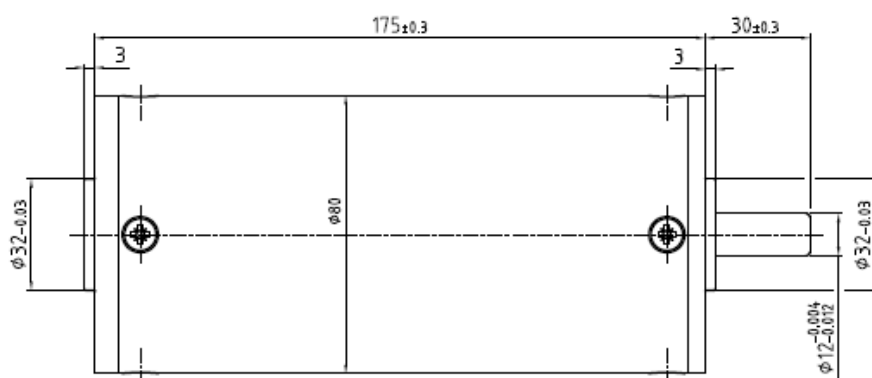
[7]



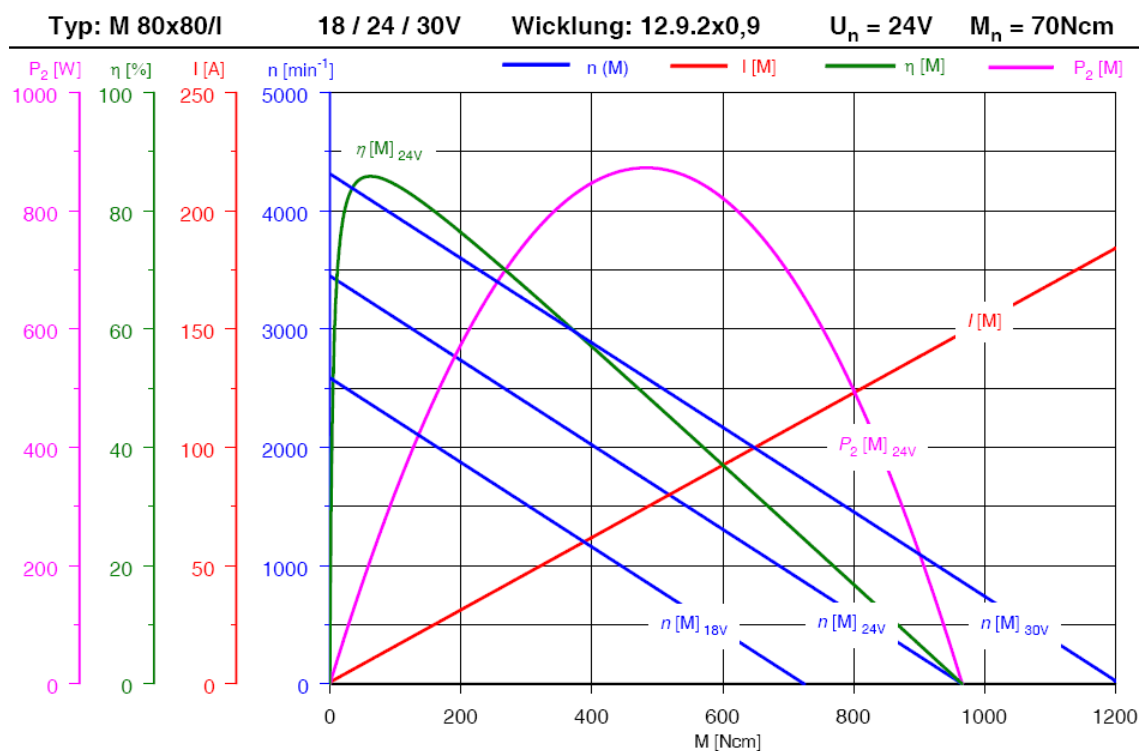
Obrázek 9 Stejnosměrný motorek M80x80/l [7]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
M80x80/l	24	233	11,4	3200	1,8	0,7

Tabulka 5 Parametry stejnosměrného motorku M80x80/l z dokumentace výrobce [7]



Obrázek 10 Technický náčrt motorku M80x80/l z technické dokumentace výrobce [7]



Obrázek 11 Charakteristiky motorku M80x80/l z technické dokumentace výrobce [7]

2.6 Stejnosměrný motorek P2SZ447, ATAS elektromotory Náchod a.s., Česká republika

Jedná se o stejnosměrný motorek s permanentními magnety o vnějším průměru 81 mm. Motory z řady P2SZ se vyrábí v různém stupni krytí, tento konkrétní motorek má stupeň krytí IP54. Motor je napájen stejnosměrnými 24V, má 3000 otáček.

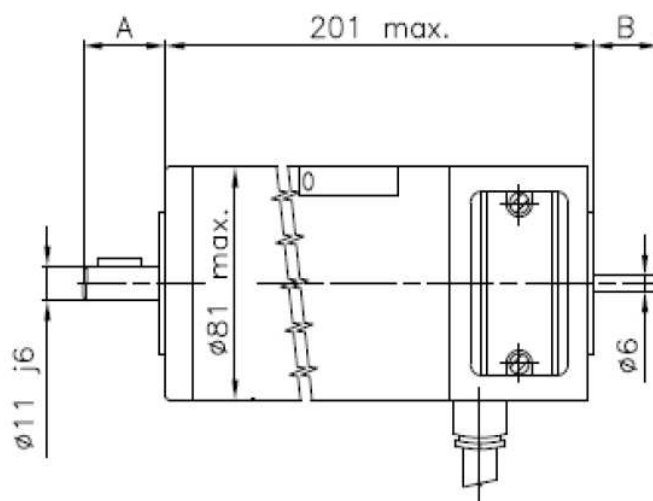
[1]



Obrázek 12 Stejnosměrný motorek P2SZ447 [1]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
P2SZ467	24	252	10,5	3000	3,5	0,8

Tabulka 6 Parametry stejnosměrného motorku P2SZ447 z dokumentace výrobce [1]



Obrázek 13 Technický náčrtes motorku P2SZ447 z technické dokumentace výrobce [1]

2.7 Stejnosměrný motorek GNM 5480, ENGEL Elektroantriebe GmbH, Německo

Stejnosměrné motorky v rozsahu jmenovitého výkonu od 95W do 250W ve dvou stavebních délkách, o vnějším průměru 83 mm. Motorek má výkon 250W a stupeň krytí IP 54.

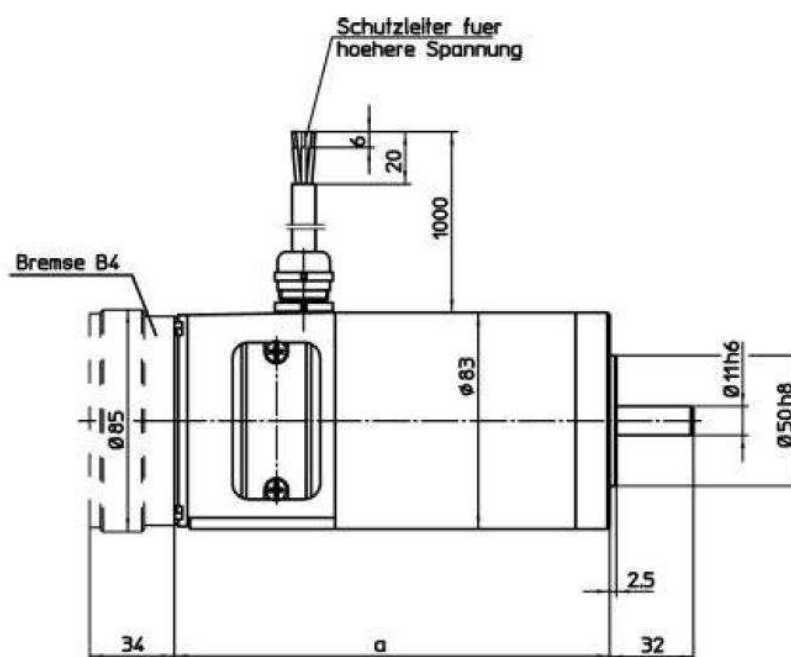
[8]



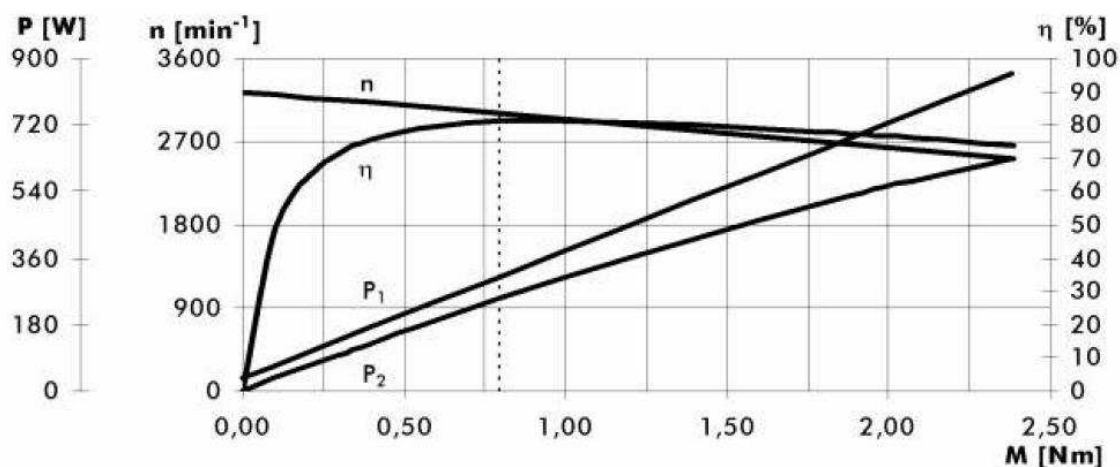
Obrázek 14 Stejnosměrný motorek GNM 5480 [8]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
GNM 5480	24	250	12,9	3000	4,1	0,796

Tabulka 7 Parametry stejnosměrného motorku GNM 5480 z dokumentace výrobce [8]



Obrázek 15 Technický nákres motorku GNM 5480 z technické dokumentace výrobce [8]



Obrázek 16 Charakteristiky motorku GNM 5480 z technické dokumentace výrobce [8]

2.8 Stejnosměrný motorek DPD 24V 170W, BOSH motors and controlers, Německo

Německá firma BOSH vyrábí stejnosměrný motorek s permanentními magnety o výkonu 170W. Tento motorek á vysoké otáčky, ale jeho stupeň krytí je pouze IP 10.

Bosch je z hlediska celosvětového pohledu vedoucím výrobcem motorků DC a souvisejících komponentů. Produkce čítá více než 100 milionů kusů každý rok po celém světě. Pověst těchto výrobků je založena na technických inovacích, což zaručuje kvalitu produktů a jejich spolehlivost.

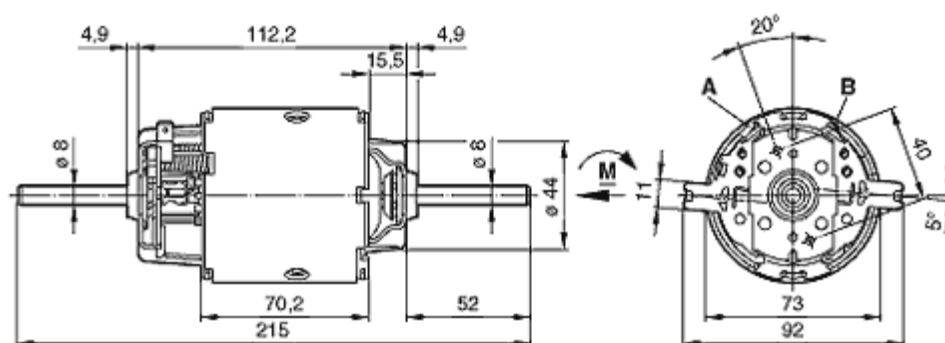
[5]



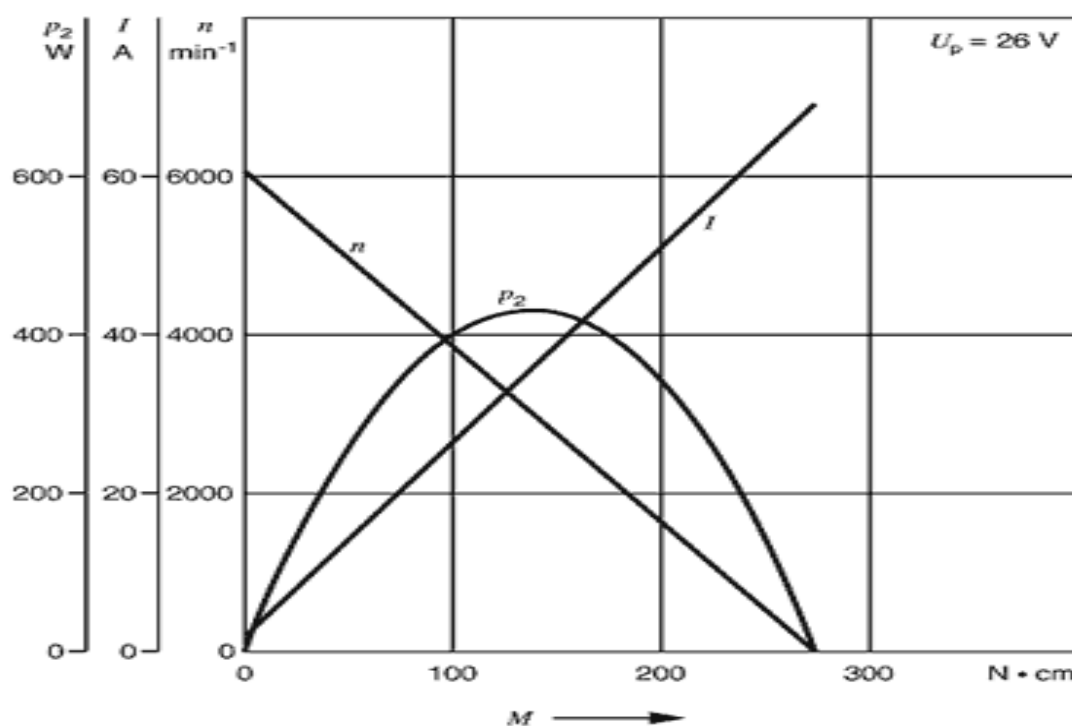
Obrázek 17 Stejnosměrný motorek DPD 24V 170W [6]

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
DPD 24V 170W	24	170	10	5400	1,3	0,3

Tabulka 8 Parametry stejnosměrného motorku DPD 24V 170W z dokumentace výrobce [5]



Obrázek 18 Technický náčrt motorku DPD 24V 170W z technické dokumentace výrobce [5]



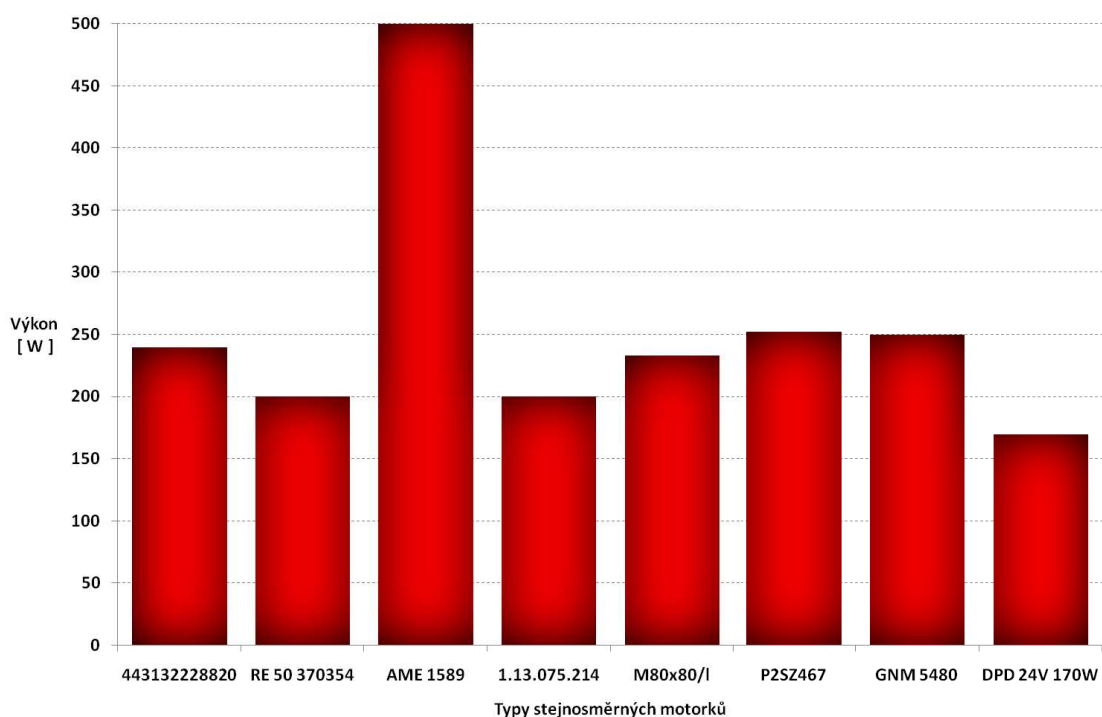
Obrázek 19 Charakteristiky motorku DPD 24V 170W z technické dokumentace výrobce [5]

2.9 Porovnání parametrů stejnosměrných motorků z přehledu

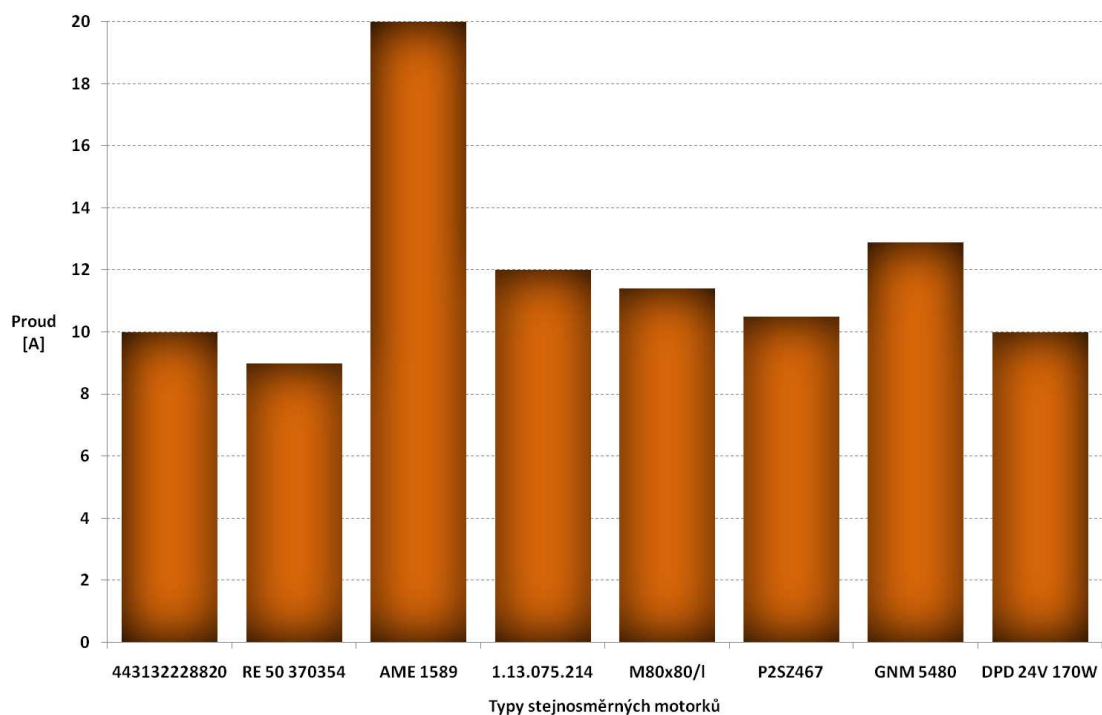
V této části porovnám stejnosměrné motorky malého výkonu a výsledky zanesu do grafů.

Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	Jmenovitý moment [Nm]
443132228820	24	240	10	2700	2,4	0,8
RE 50 370354	24	200	9	5538	1,1	0,35
AME 1589	24	500	20	2800	2,6	1,7
1.13.075.214	24	200	12	3200	1,8	0,6
M80x80/I	24	233	11,4	3200	1,8	0,7
P2SZ467	24	252	10,5	3000	3,5	0,8
GNM 5480	24	250	12,9	3000	4,1	0,796
DPD 24V 170W	24	170	10	5400	1,3	0,3

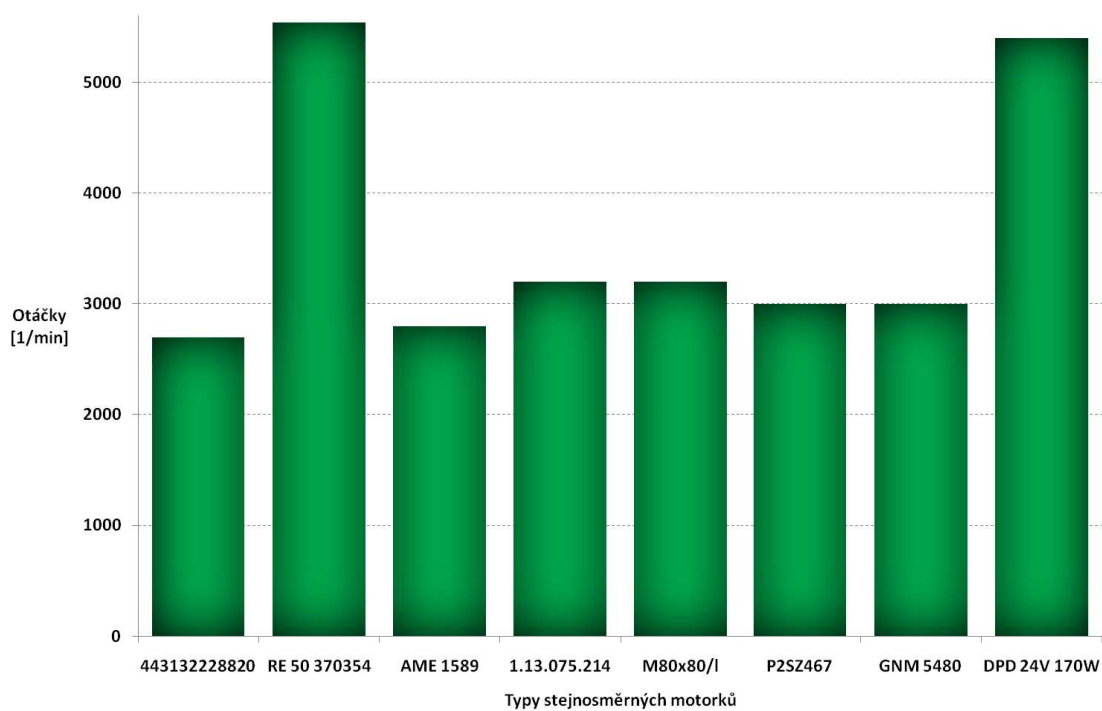
Tabulka 9 Tabulka porovnání stejnosměrných motorků malého výkonu



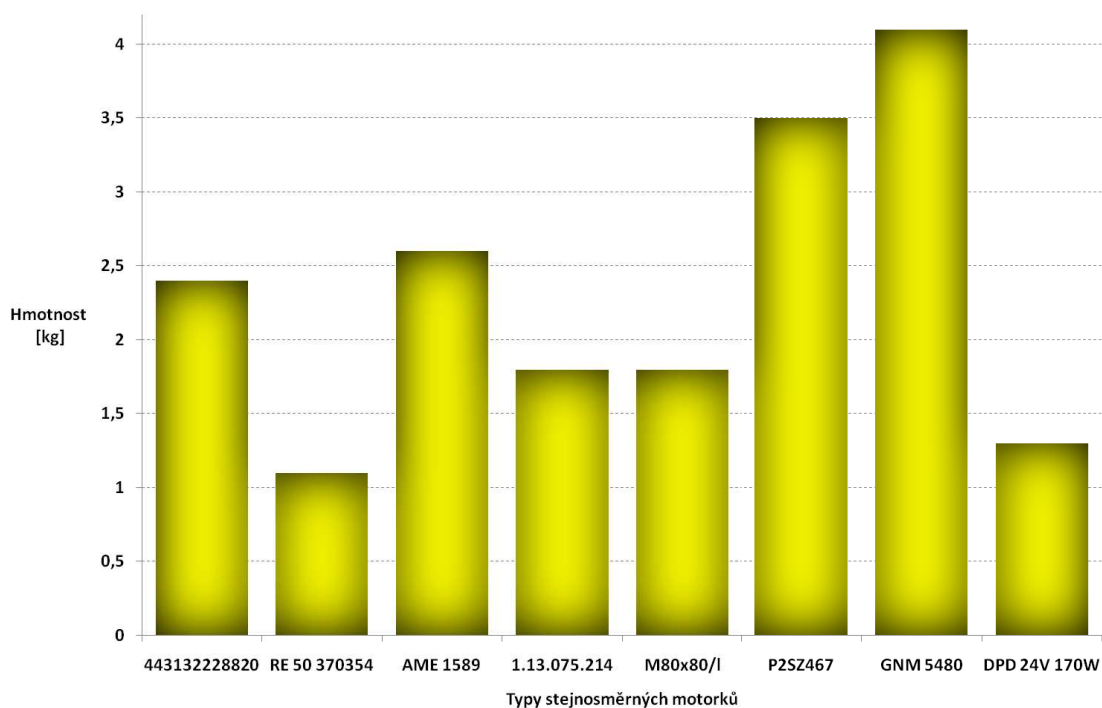
Obrázek 20 Graf porovnání výkonů stejnosměrných motorků malého výkonu



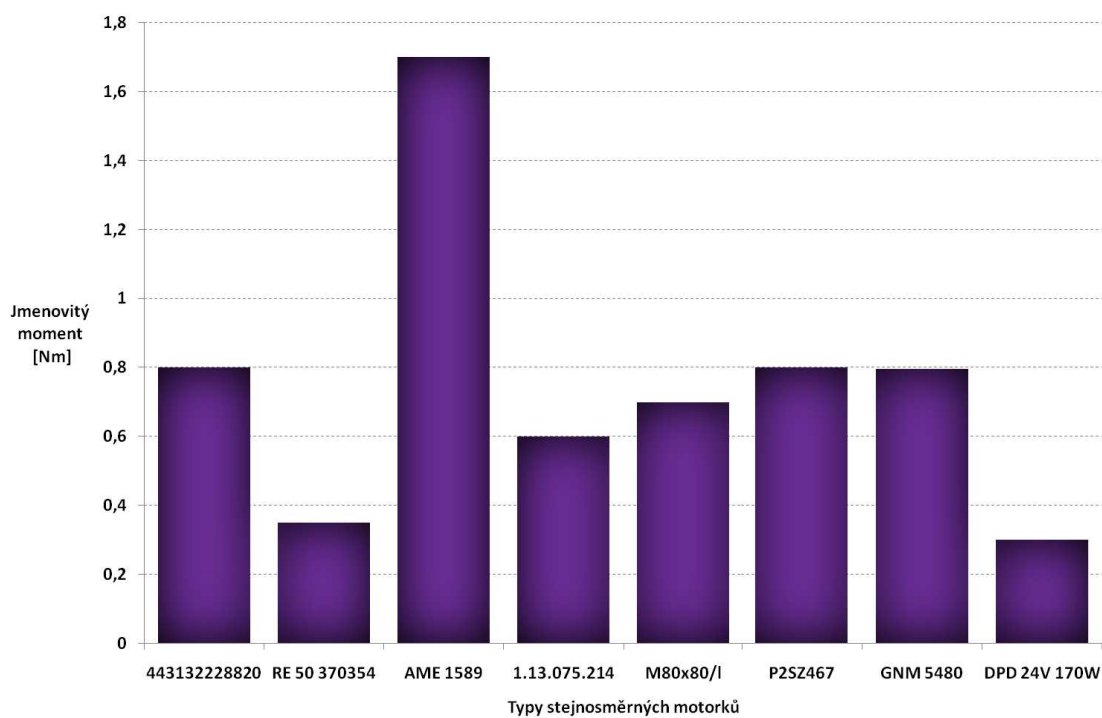
Obrázek 21 Graf porovnání proudů stejnosměrných motorků malého výkonu



Obrázek 22 Graf porovnání otáček stejnosměrných motorků malého výkonu



Obrázek 23 Graf porovnání hmotností stejnosměrných motorků malého výkonu



Obrázek 24 Graf porovnání jmenovitých momentů stejnosměrných motorků malého výkonu

3 ANALÝZA MOTORKU P2SZ447 OD FIRMY ATAS ELEKTROMOTORY NÁCHOD A.S.



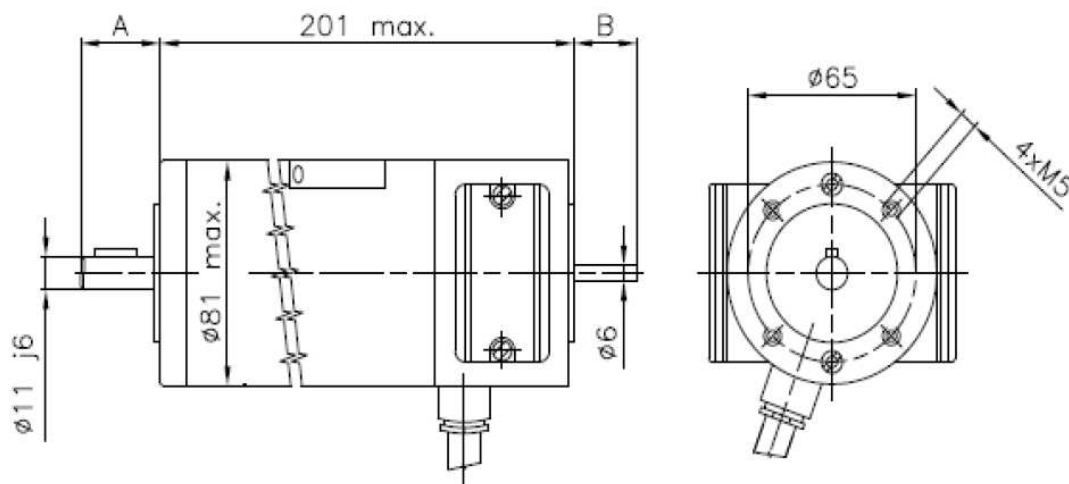
Obrázek 25 Stejnosměrný motorek P2SZ447 [1]

Mým úkolem bylo vybrat jeden určitý motorek a ten analyzovat. Vybral jsem si stejnosměrný motorek s permanentními magnety od firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. z řady P2SZ.

Jako první jsem zjistil údaje poskytované výrobcem z jeho katalogu a ceníku. V dalším kroku jsem požádal o podklady přímo výrobce motorku.

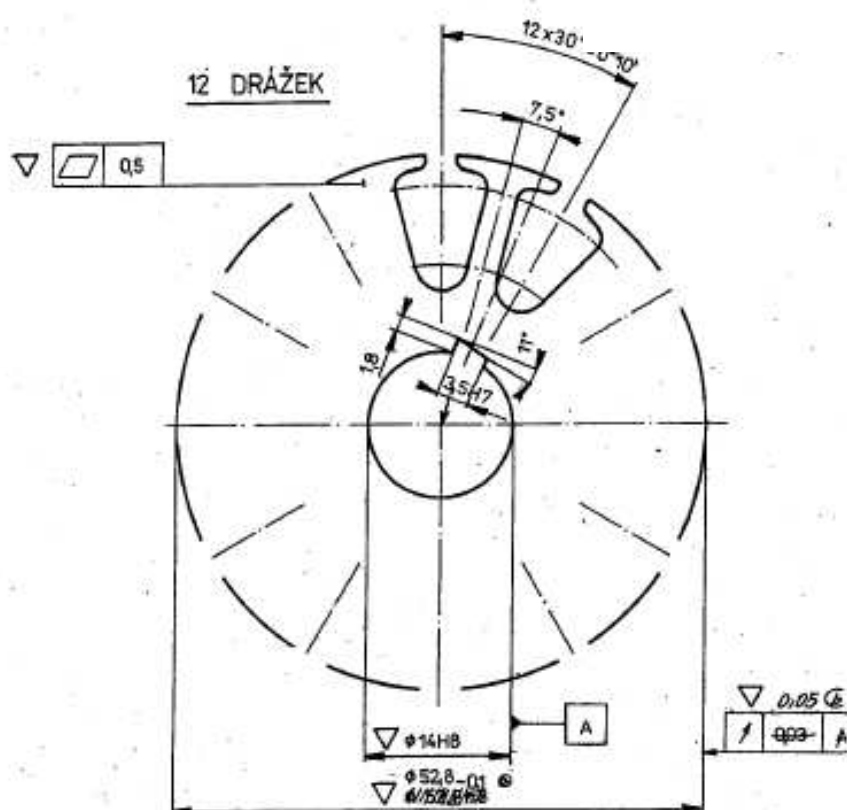
Typ	Napětí [V =]	Výkon [W]	Proud [A]	Otáčky [1/min]	Hmotnost [kg]	IP	Jmenovitý moment [Nm]
P2SZ447	24	250	14	3000	3,5	54	0,8

Tabulka 10 Parametry stejnosměrného motoru P2SZ447 z dokumentace výrobce [1]

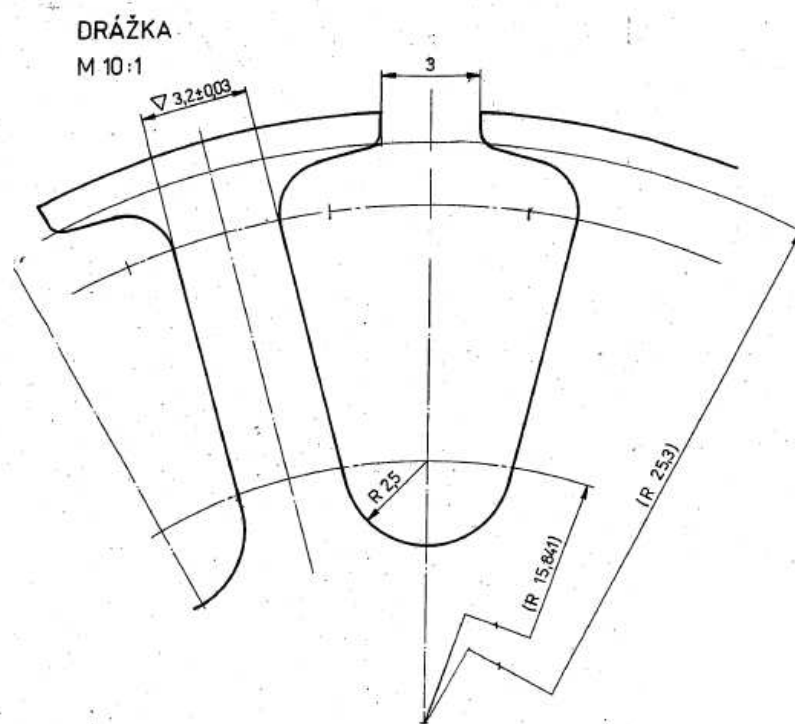


Obrázek 26 Technický náčrtes motorku P2SZ447 z technické dokumentace výrobce [1]

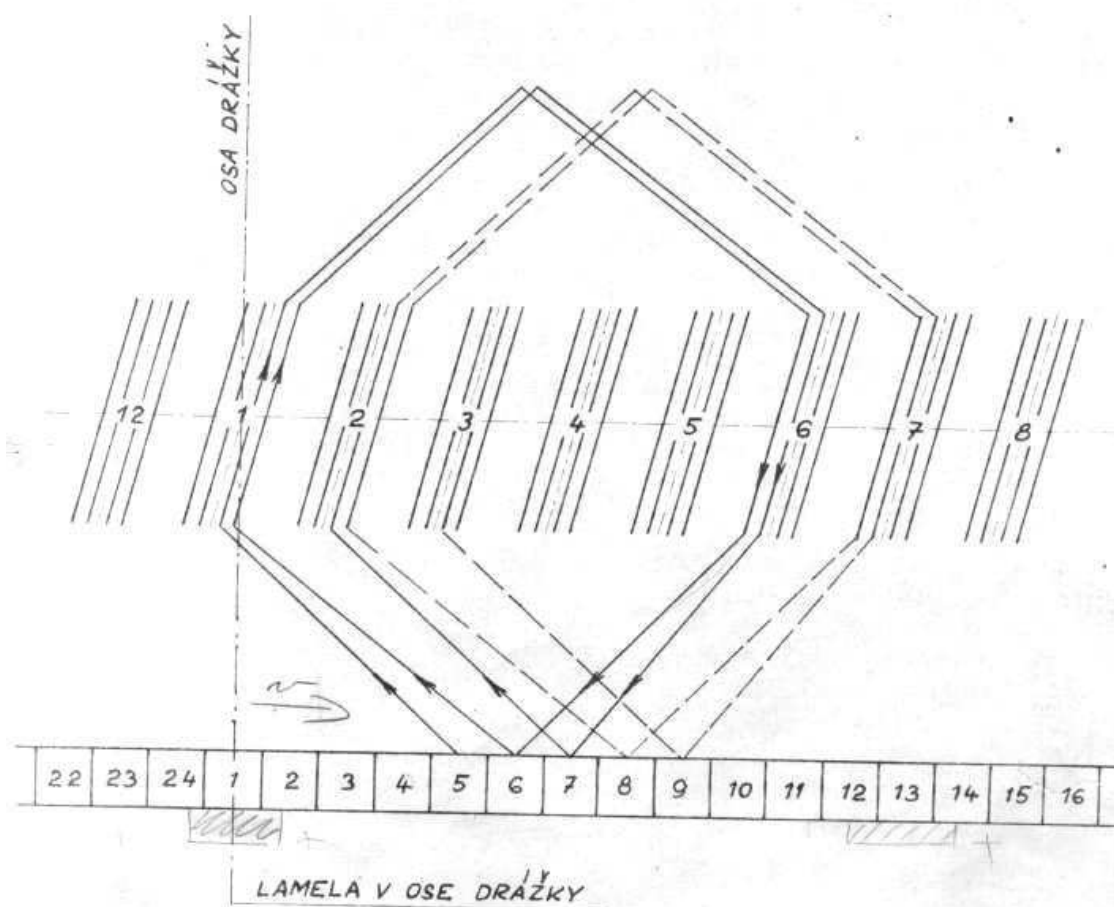
a)



b)



Obrázek 28 Výkres rotorového plechu motorku P2SZ447 a) rotorový plech, b) detail drážky [9]



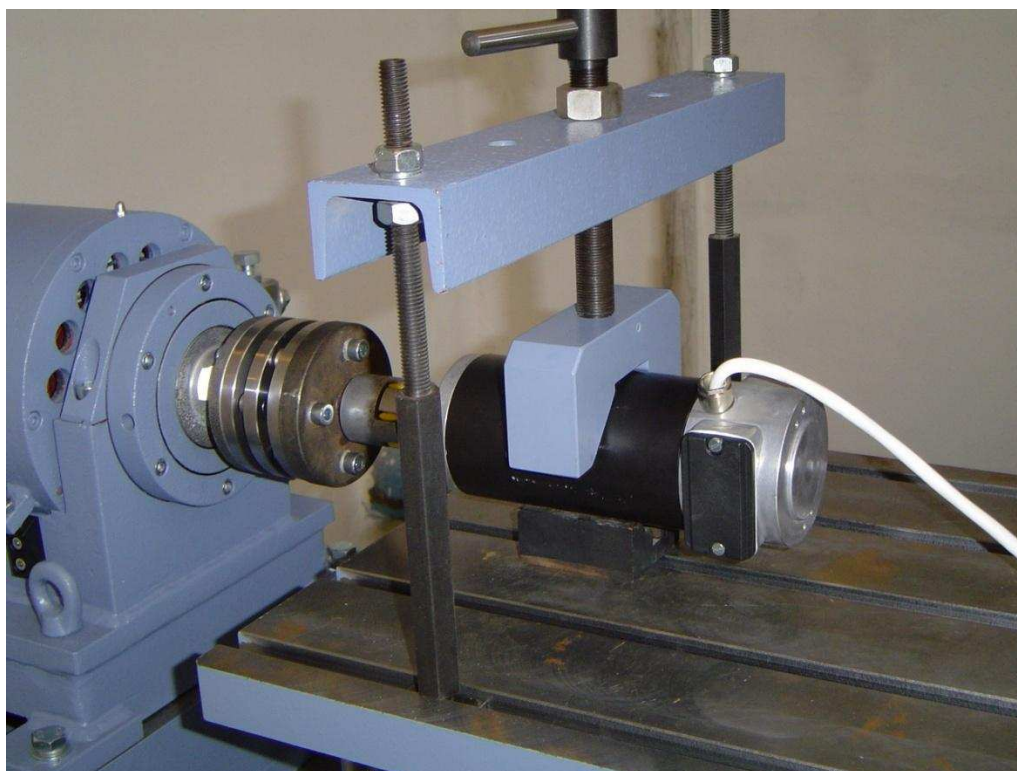
Obrázek 29 Schéma vinutí rotoru motorku P2SZ447 [9]

Na totožném stejnosměrném motorku P2SZ447 bylo již dříve provedeno měření. Toto měření proběhlo na Ústavu výkonové elektrotechniky a elektroniky (VUT FEKT UVEE), jehož výsledky mi byly poskytnuty. Také jsem provedl vlastní měření. Měření jsem provedl pro oba směry otáčení jak vpravo, tak vlevo. Směr otáčení určuji při pohledu na hřídel stejnosměrného motorku.

V měření jsem proměřil závislost otáček, proudu, výkonu a účinnosti na momentu stejnosměrného motorku. Také jsem měřil závislost indukovaného napětí na otáčkách motoru.

Výsledky měření jsem vynesl do grafů. Z grafů je patrné, že motor je navržen velmi dobře, protože největší účinnost jsme naměřili při jmenovitém momentu 0,8Nm. Největší mnou naměřená účinnost byla 81,6 %. Také jsem změřil vnitřní odpor vinutí kotvy, který byl 0,1Ω a proud naprázdno, jenž byl 1,07A.

3.1 Fotodokumentace motorku P2SZ447



Obrázek 30 Motorek P2SZ447 připojený k dynamometru



Obrázek 31 Komutátor motorku P2SZ447



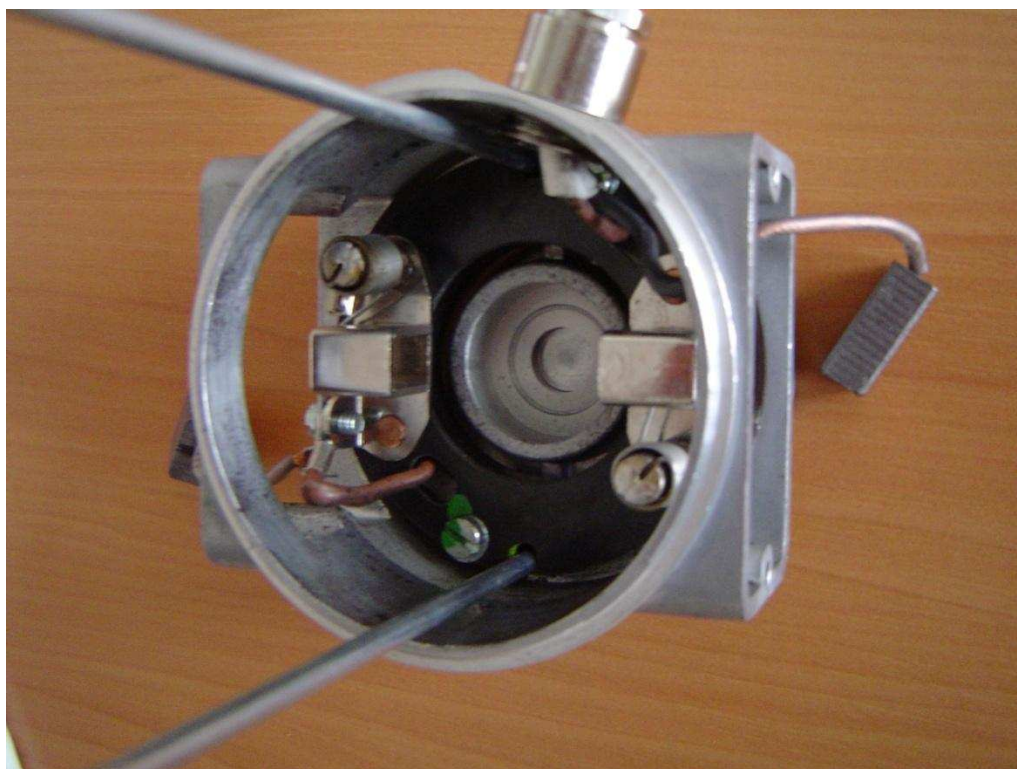
Obrázek 32 Rozložený motorek P2SZ447



Obrázek 33 Rotor motorku P2SZ447



Obrázek 34 *Permanentní magnety motorku P2SZ447*



Obrázek 35 *Štít s držáky kartáčů a kartáči motorku P2SZ447*

Obrázek 30 zobrazuje motorek P2SZ447 upevněný na podstavci. Motorek je přes spojku spojen s dynamometrem. Tuto sestavu jsem použil pro měření na motorku P2SZ447.

Obrázek 31 zobrazuje zadní štít motorku P2SZ447 s odstraněnou krytkou, komutátor a kartáč upevněný na přitlačné pružině. Uvnitř motorku je vidět komutátor s držákem kartáče.

Obrázek 32 zobrazuje hlavní části motorku P2SZ447. Jedná se o kostru s předním štítem, rotor s komutátorem a vinutím, dále zadní štít s držáky kartáčů a kartáči.

Obrázek 33 zobrazuje detail rotoru motorku P2SZ447. Na obrázku je jasně vidět komutátor s připojeným vinutím, zešíkmené drážky rotoru, hřídel s ložisky a zabandážované vinutí.

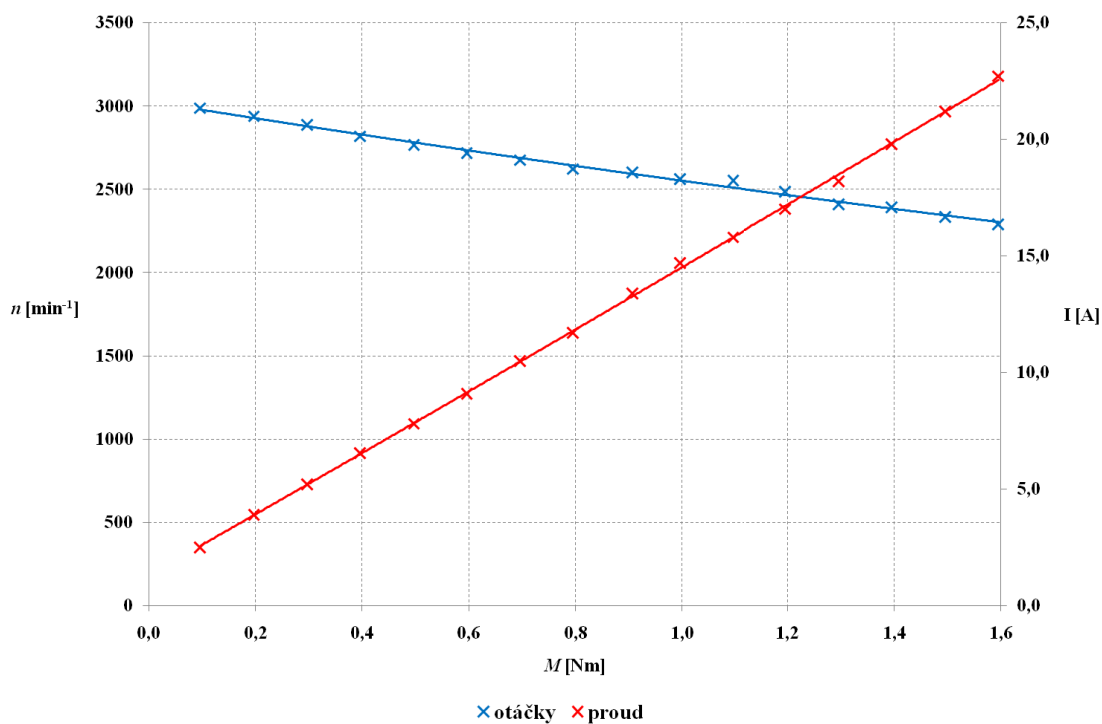
Obrázek 34 zobrazuje detailní rozložení magnetů připevněných ke kostře motorku P2SZ447.

Obrázek 35 zobrazuje detail rozebraného zadního štítu motorku P2SZ447 s držáky kartáčů a kartáči, které jsou připevněny k přitlačným pružinám.

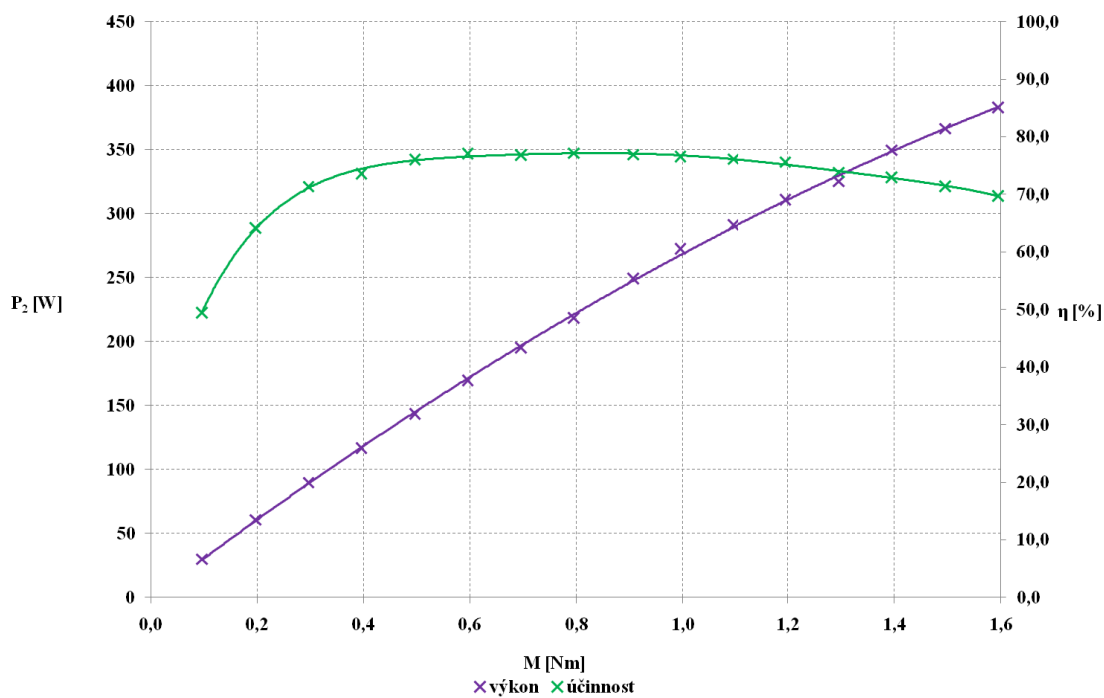
3.2 Hodnoty a grafy z měření na motorku P2SZ447 provedeného UVEE

U	M	n	I			P ₂	P ₁	H
[V]	[Nm]	[min ⁻¹]	[A/dílek]	[dílek]	[A]	[W]	[W]	[%]
24,2	0,096	2988	12/120	25,0	2,5	29,9	60,5	49,4
24,2	0,197	2938	12/120	39,0	3,9	60,6	94,4	64,2
24,2	0,297	2888	12/120	52,0	5,2	89,8	125,8	71,4
24,2	0,396	2818	12/120	65,5	6,6	116,7	158,5	73,6
24,2	0,497	2766	12/120	78,0	7,8	143,6	188,8	76,1
24,2	0,596	2717	12/120	91,0	9,1	169,7	220,2	77,1
24,2	0,696	2675	12/120	105,0	10,5	195,2	254,1	76,8
24,2	0,795	2622	12/120	117,0	11,7	218,5	283,1	77,2
24,2	0,907	2602	24/120	67,0	13,4	249,3	324,3	76,9
24,2	0,996	2561	24/120	73,5	14,7	272,4	355,7	76,6
24,2	1,096	2552	24/120	79,0	15,8	291,0	382,4	76,1
24,2	1,196	2485	24/120	85,0	17,0	311,0	411,4	75,6
24,2	1,296	2411	24/120	91,0	18,2	325,1	440,4	73,8
24,2	1,395	2393	24/120	99,0	19,8	349,5	479,2	72,9
24,2	1,496	2334	24/120	106,0	21,2	366,3	513,0	71,4
24,2	1,595	2290	24/120	113,5	22,7	383,0	549,3	69,7

Tabulka 11 Hodnoty naměřené na ústavu UVEE na motorku P2SZ447



Obrázek 36 Graf naměřených hodnot na ústavu UVEE $n=f(M)$ a $I=f(M)$



Obrázek 37 Graf naměřených hodnot na ústavu UVEE $P_2=f(M)$ a $\eta=f(M)$

3.3 Hodnoty a grafy z mnou provedeného měření na motorku P2SZ447

Doprava				Doleva			
n	U _i			n	U _i		
[min ⁻¹]	[V/dílek]	[dílek]	[V]	[min ⁻¹]	[V/dílek]	[dílek]	[V]
100	2,4/120	37	0,7	100	2,4/120	33	0,7
200	2,4/120	73	1,5	200	2,4/120	67	1,3
300	2,4/120	110	2,2	300	2,4/120	106	2,1
400	12/120	31	3,1	400	12/120	30	3,0
500	12/120	39	3,9	500	12/120	38	3,8
600	12/120	47	4,7	600	12/120	46	4,6
700	12/120	54	5,4	700	12/120	53	5,3
800	12/120	62	6,2	800	12/120	61	6,1
900	12/120	70	7,0	900	12/120	69	6,9
1000	12/120	78	7,8	1000	12/120	76	7,6
1100	12/120	85	8,5	1100	12/120	84	8,4
1200	12/120	93	9,3	1200	12/120	92	9,2
1300	12/120	101	10,1	1300	12/120	100	10,0
1400	12/120	109	10,9	1400	12/120	107	10,7
1500	24/120	58	11,6	1500	24/120	57	11,4
1600	24/120	62	12,4	1600	24/120	61	12,2
1700	24/120	66	13,2	1700	24/120	65	13,0
1800	24/120	70	14,0	1800	24/120	69	13,8
1900	24/120	74	14,8	1900	24/120	73	14,6
2000	24/120	77	15,4	2000	24/120	76	15,2
2100	24/120	81	16,2	2100	24/120	80	16,0
2200	24/120	85	17,0	2200	24/120	84	16,8
2300	24/120	89	17,8	2300	24/120	88	17,6
2400	24/120	93	18,6	2400	24/120	91	18,2
2500	24/120	97	19,4	2500	24/120	95	19,0
2600	24/120	100	20,0	2600	24/120	99	19,8
2700	24/120	105	21,0	2700	24/120	103	20,6
2800	24/120	108	21,6	2800	24/120	107	21,4
2900	24/120	112	22,4	2900	24/120	110	22,0
3000	24/120	116	23,2	3000	24/120	23	23,0
3100	120/120	24	24,0	3100	120/120	24	24,0
3200	120/120	25	25,0	3200	120/120	25	24,5
3300	120/120	26	26,0	3300	120/120	26	25,5

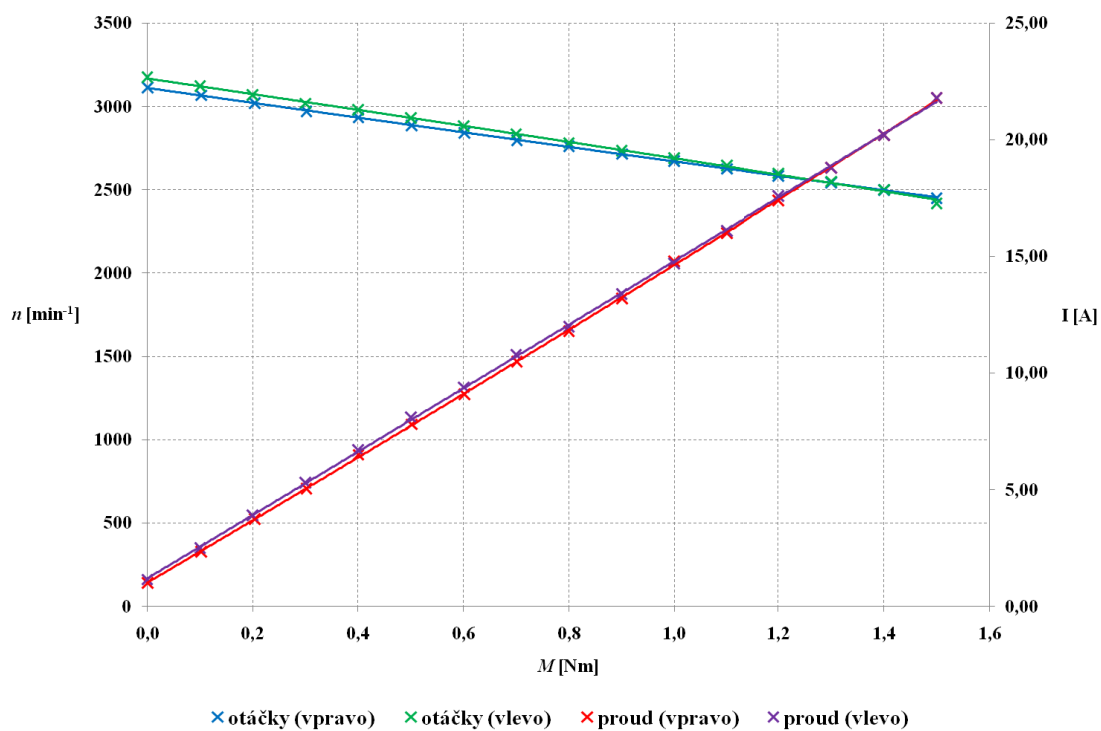
Tabulka 12 Tabulka hodnot z mnou provedeného měření $U_i=f(n)$

U	M	n	I			P ₂	P ₁	η
[V]	[Nm]	[min ⁻¹]	[A/dílek]	[dílek]	[A]	[W]	[W]	[%]
24	0,001	3114	6/120	20	1,00	0,3	24,0	1,3
24	0,102	3068	6/120	47	2,35	32,7	56,4	58,0
24	0,204	3020	6/120	75	3,75	64,5	90,0	71,7
24	0,302	2971	6/120	101	5,05	93,9	121,2	77,5
24	0,401	2934	12/120	65	6,50	123,2	156,0	79,0
24	0,502	2888	12/120	78	7,80	151,0	187,2	80,7
24	0,602	2843	12/120	91	9,10	178,0	218,4	81,5
24	0,701	2798	12/120	105	10,50	205,1	252,0	81,4
24	0,800	2761	24/120	59	11,80	231,2	283,2	81,6
24	0,901	2715	24/120	66	13,20	256,0	316,8	80,8
24	1,000	2673	24/120	74	14,80	289,0	355,2	81,4
24	1,100	2626	24/120	80	16,00	302,0	384,0	78,6
24	1,200	2584	24/120	87	17,40	324,0	417,6	77,6
24	1,300	2545	24/120	94	18,80	346,0	451,2	76,7
24	1,400	2500	24/120	101	20,20	366,0	484,8	75,5
24	1,500	2451	24/120	109	21,80	385,0	523,2	73,6

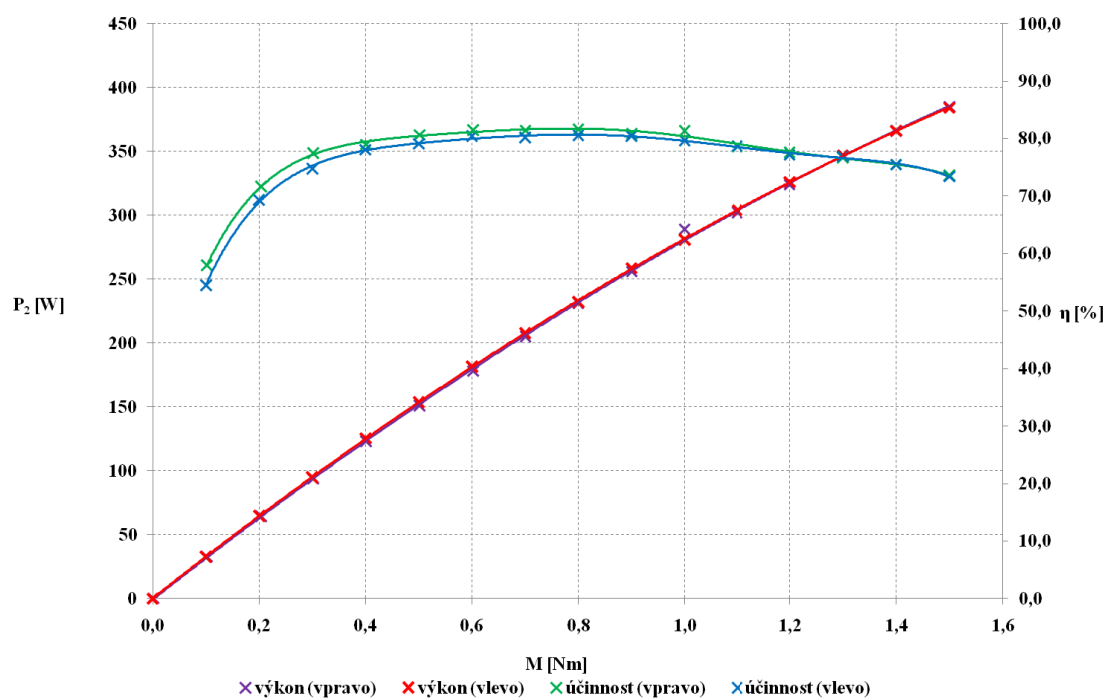
Tabulka 13 Tabulka hodnot z mnou provedeného měření při směru otáčení vpravo

U	M	n	I			P ₂	P ₁	η
[V]	[Nm]	[min ⁻¹]	[A/dílek]	[dílek]	[A]	[W]	[W]	[%]
24	0,000	3178	6/120	23	1,15	0,0	27,6	0,0
24	0,100	3123	6/120	50	2,50	32,7	60,0	54,5
24	0,200	3069	6/120	78	3,90	64,9	93,6	69,3
24	0,300	3019	6/120	106	5,30	95,1	127,2	74,8
24	0,400	2981	12/120	67	6,70	125,5	160,8	78,0
24	0,500	2933	12/120	81	8,10	153,8	194,4	79,1
24	0,600	2883	12/120	94	9,40	181,5	225,6	80,5
24	0,700	2836	12/120	108	10,80	207,8	259,2	80,2
24	0,800	2782	24/120	60	12,00	232,0	288,0	80,6
24	0,900	2736	24/120	67	13,40	258,6	321,6	80,4
24	1,000	2691	24/120	74	14,70	281,0	352,8	79,6
24	1,100	2646	24/120	81	16,10	304,0	386,4	78,7
24	1,200	2599	24/120	88	17,60	326,0	422,4	77,2
24	1,300	2550	24/120	94	18,80	347,0	451,2	76,9
24	1,400	2502	24/120	101	20,20	366,0	484,8	75,5
24	1,500	2420	24/120	109	21,80	384,0	523,2	73,4

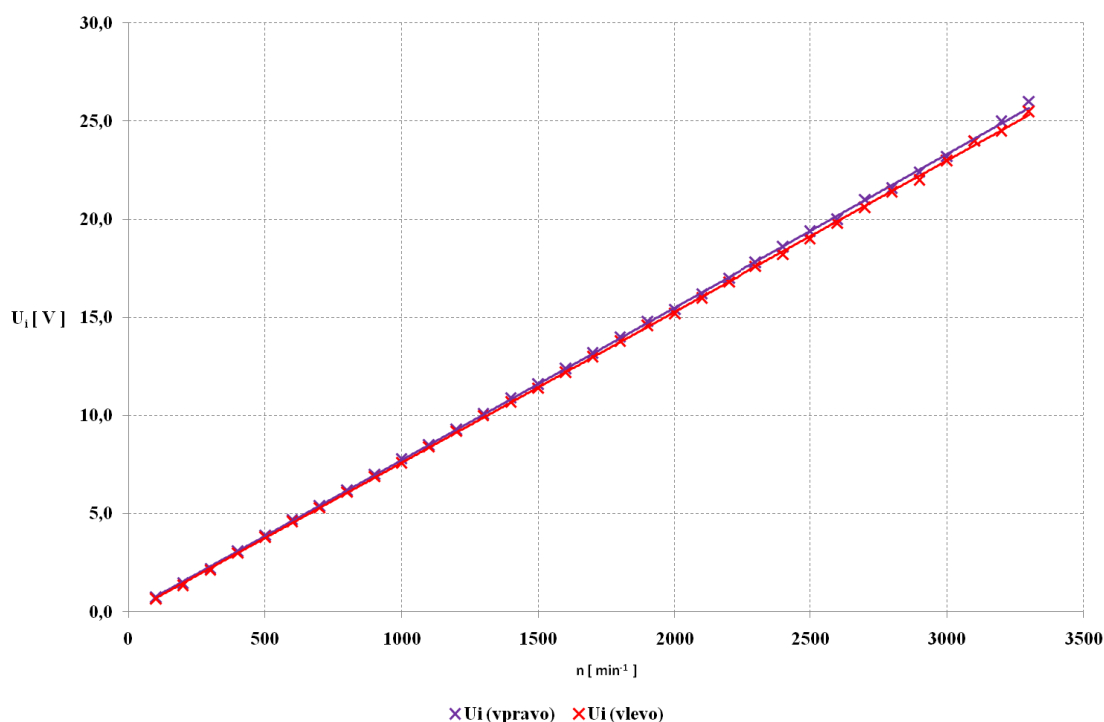
Tabulka 14 Tabulka hodnot z mnou provedeného měření při směru otáčení vlevo



Obrázek 38 Graf mnou naměřených hodnot $n=f(M)$ a $I=f(M)$



Obrázek 39 Graf mnou naměřených hodnot $P_2=f(M)$ a $\eta=f(M)$



Obrázek 40 Graf mnou naměřených hodnot $U_i=f(n)$

3.4 Výpočet rozložení ztrát motorku P2SZ447

Ztráty ΔP stejnosměrného stroje s permanentními magnety lze rozdělit na:

- ztráty mechanické ΔP_m
- ztráty v železe a přídavné ztráty při chodu naprázdno ΔP_{Fe}
- joulovy ztráty v obvodu kotvy ΔP_j
- ztráty na kartáčích ΔP_k
- ztráty přídavné ΔP_d

Celkové ztráty lze tedy vypočítat dle vztahu:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_j + \Delta P_k + \Delta P_d$$

Ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P - (\Delta P_m + \Delta P_j + \Delta P_k + \Delta P_d)$$

Ztráty mechanické ΔP_m jsou závislé na konstrukci stroje. Jedním ze způsobů jak je lze tyto ztráty určit je pomocí měření naprázdno na dynamometru. Při tomto měření je moment změřený na hřídeli roven mechanickým ztrátám ΔP_m stroje.

Joulový ztráty v mědi rotoru:

$$\Delta P_j = R_a \cdot I_a^2$$

Kde R_a reprezentuje odpor vinutí kotvy a I_a je celkový proud procházející tímto vinutím.

Ztráty na kartáčích:

$$\Delta P_k = n \cdot \Delta U_k \cdot I_a$$

Ve vzorci pro výpočet ztrát na kartáčích n udává počet kartáčů a ΔU_k úbytek napětí na kartáčích, který se pohybuje v rozmezí 0,3V – 1V podle materiálu, ze kterého jsou zhotoveny kartáče.

Doplňkové ztráty ΔP_d lze spočítat jako, 1% ze jmenovitého výkonu.

Při výpočtech jsem zanedbal ztráty na kartáčích ΔP_k a ztráty přídatné ΔP_d . Toto zanedbání vedlo ke zjednodušení vztahu pro výpočet celkových ztrát ΔP , potažmo ke zjednodušení vztahu pro výpočet ztrát v železe ΔP_{Fe} .

Celkové ztráty stejnosměrného motorku po zjednodušení:

$$\Delta P = \Delta P_{Fe} + \Delta P_m + \Delta P_j$$

Ztráty v železe po zjednodušení:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P - (\Delta P_m + \Delta P_j)$$

[11]

3.4.1 Měření naprázdno

Vím, že mechanické ztráty ΔP_m u stejnosměrného stroje s permanentními magnety jsou lineárně závislé na otáčkách stroje. Z této závislosti vyplývá, že naměřené hodnoty proložím přímkou a poté použiji směrnici takto vzniklé přímky pro výpočet mechanických ztrát při zatížení.

Při mém měření jsem měřil mechanické ztráty přímo. Také jsem provedl nepřímé měření a to tak, že jsem měřil otáčky a moment stroje a ztráty jsem vypočetl.

Příklad výpočtu pro vyznačený řádek tabulky:

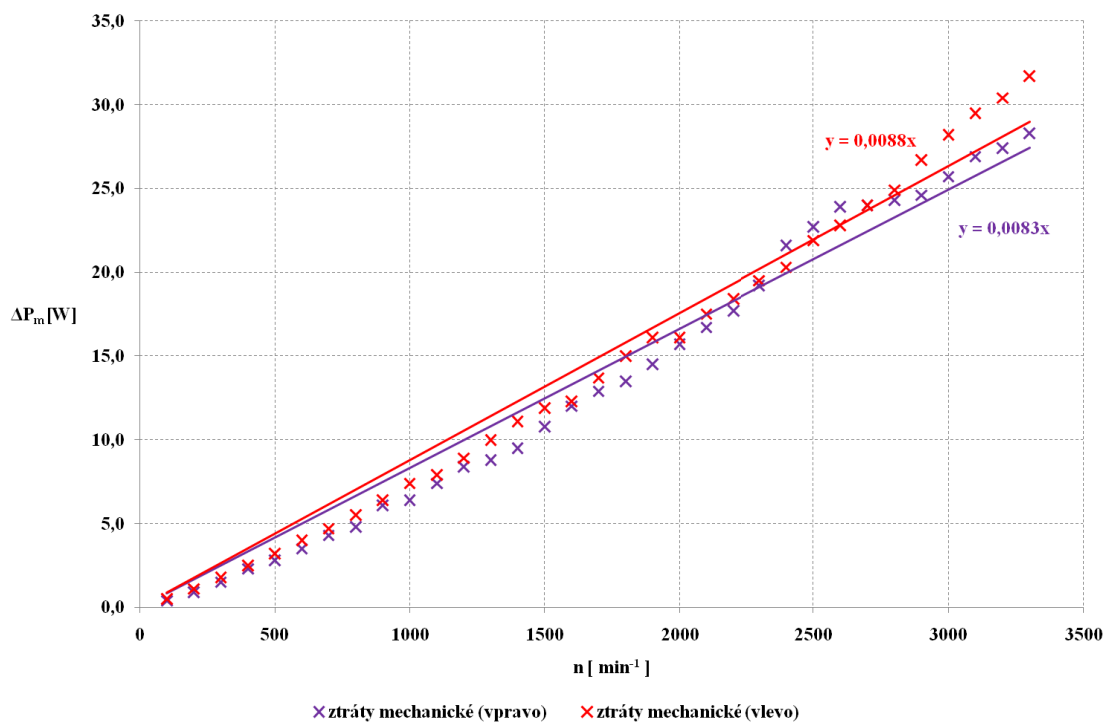
$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} = \frac{2\pi \cdot 3000}{60} = \underline{\underline{314,16 \text{ rad/s}}}$$

$$\Delta P_m = M \cdot \omega = 0,082 \cdot 314,16 = \underline{\underline{25,76 \text{ W}}}$$

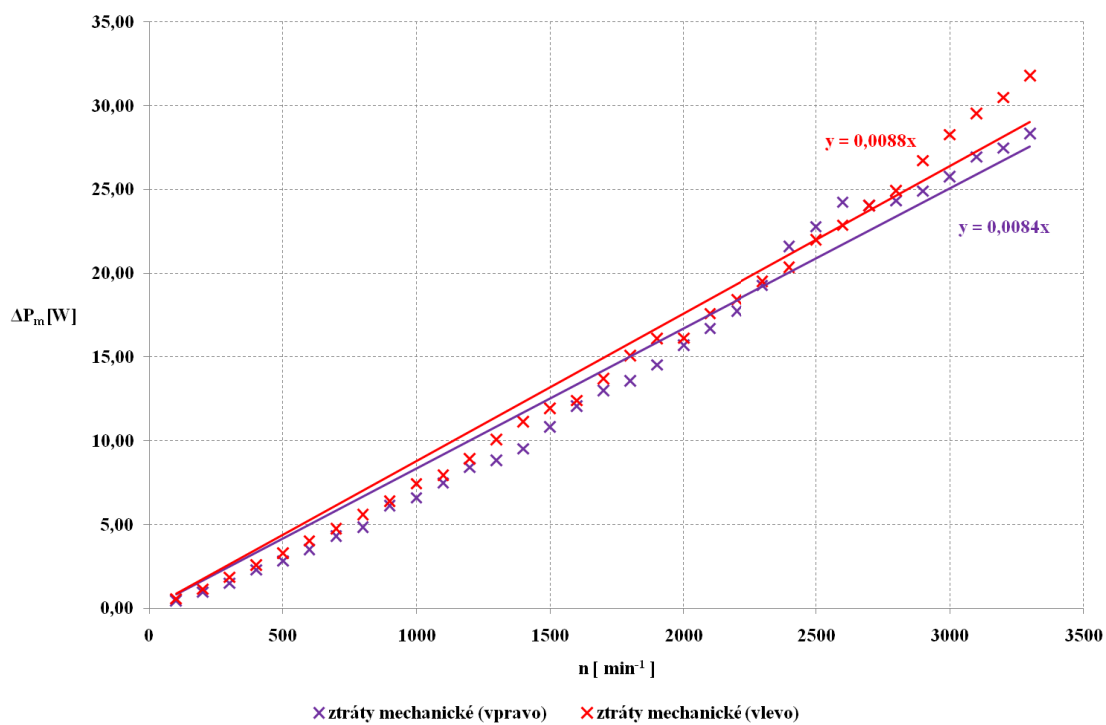
[11]

Doprava					Doleva				
n	M	ω	ΔP_m (vypoč.)	ΔP_m (změř.)	n	M	ω	ΔP_m (vypoč.)	ΔP_m (změř.)
[min ⁻¹]	[Nm]	[rad/s]	[W]	[W]	[min ⁻¹]	[Nm]	[rad/s]	[W]	[W]
100	0,043	10,47	0,45	0,4	100	0,054	10,47	0,57	0,5
200	0,046	20,94	0,96	0,9	200	0,055	20,94	1,15	1,1
300	0,048	31,42	1,51	1,5	300	0,059	31,42	1,85	1,8
400	0,055	41,89	2,30	2,3	400	0,062	41,89	2,60	2,5
500	0,054	52,36	2,83	2,8	500	0,063	52,36	3,30	3,2
600	0,056	62,83	3,52	3,5	600	0,064	62,83	4,02	4,0
700	0,059	73,30	4,32	4,3	700	0,065	73,30	4,76	4,7
800	0,058	83,78	4,86	4,8	800	0,067	83,78	5,61	5,5
900	0,065	94,25	6,13	6,1	900	0,068	94,25	6,41	6,4
1000	0,063	104,72	6,60	6,4	1000	0,071	104,72	7,44	7,4
1100	0,065	115,19	7,49	7,4	1100	0,069	115,19	7,95	7,9
1200	0,067	125,66	8,42	8,4	1200	0,071	125,66	8,92	8,9
1300	0,065	136,14	8,85	8,8	1300	0,074	136,14	10,07	10,0
1400	0,065	146,61	9,53	9,5	1400	0,076	146,61	11,14	11,1
1500	0,069	157,08	10,84	10,8	1500	0,076	157,08	11,94	11,9
1600	0,072	167,55	12,06	12,0	1600	0,074	167,55	12,40	12,3
1700	0,073	178,02	13,00	12,9	1700	0,077	178,02	13,71	13,7
1800	0,072	188,50	13,57	13,5	1800	0,080	188,50	15,08	15,0
1900	0,073	198,97	14,52	14,5	1900	0,081	198,97	16,12	16,1
2000	0,075	209,44	15,71	15,7	2000	0,077	209,44	16,13	16,1
2100	0,076	219,91	16,71	16,7	2100	0,080	219,91	17,59	17,5
2200	0,077	230,38	17,74	17,7	2200	0,080	230,38	18,43	18,4
2300	0,080	240,86	19,27	19,2	2300	0,081	240,86	19,51	19,5
2400	0,086	251,33	21,61	21,6	2400	0,081	251,33	20,36	20,3
2500	0,087	261,80	22,78	22,7	2500	0,084	261,80	21,99	21,9
2600	0,089	272,27	24,23	23,9	2600	0,084	272,27	22,87	22,8
2700	0,085	282,74	24,03	24,0	2700	0,085	282,74	24,03	24,0
2800	0,083	293,22	24,34	24,3	2800	0,085	293,22	24,92	24,9
2900	0,082	303,69	24,90	24,6	2900	0,088	303,69	26,72	26,7
3000	0,082	314,16	25,76	25,7	3000	0,090	314,16	28,27	28,2
3100	0,083	324,63	26,94	26,9	3100	0,091	324,63	29,54	29,5
3200	0,082	335,10	27,48	27,4	3200	0,091	335,10	30,49	30,4
3300	0,082	345,58	28,34	28,3	3300	0,092	345,58	31,79	31,7

Tabulka 15 Tabulka hodnot z mnou provedeného měření nakrátko



Obrázek 41 Graf mnou naměřených hodnot $\Delta P_m = f(n)$



Obrázek 42 Graf mnou vypočtených hodnot $\Delta P_m = f(n)$

3.4.2 Výpočet rozložení ztrát

Mechanické ztráty jsem určil pomocí směrnice přímký z přímého měření mechanických ztrát nakrátko. Jako P_1 je označen příkon motorku a jako P_2 je označen výkon motorku. Tyto hodnoty byly změřeny.

Příklad výpočtu pro vyznačený řádek tabulky:

$$\Delta P = P_1 - P_2 = 283,2 - 231,2 = \underline{\underline{52W}}$$

$$\Delta P_m = 0,0083 \cdot n = 0,0083 \cdot 2761 = \underline{\underline{22,92W}}$$

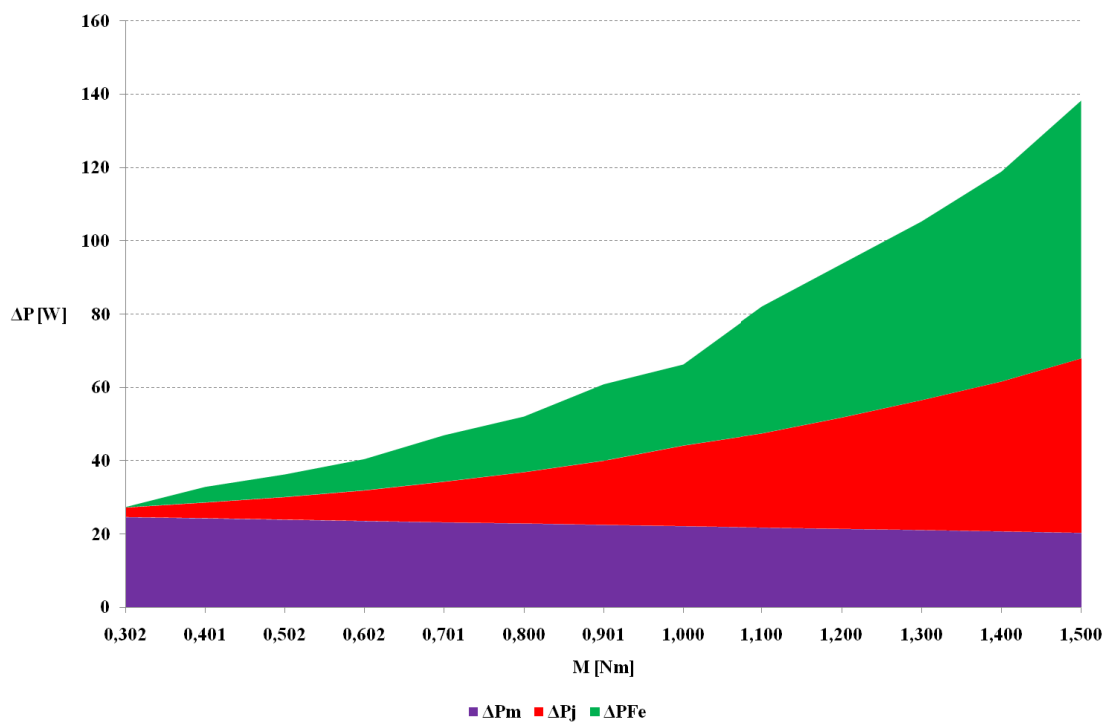
$$\Delta P_j = R_a \cdot I_a^2 = 0,1 \cdot 11,8^2 = \underline{\underline{13,92W}}$$

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P - (\Delta P_m + \Delta P_j) = 52 - (22,92 + 13,92) = \underline{\underline{15,16W}}$$

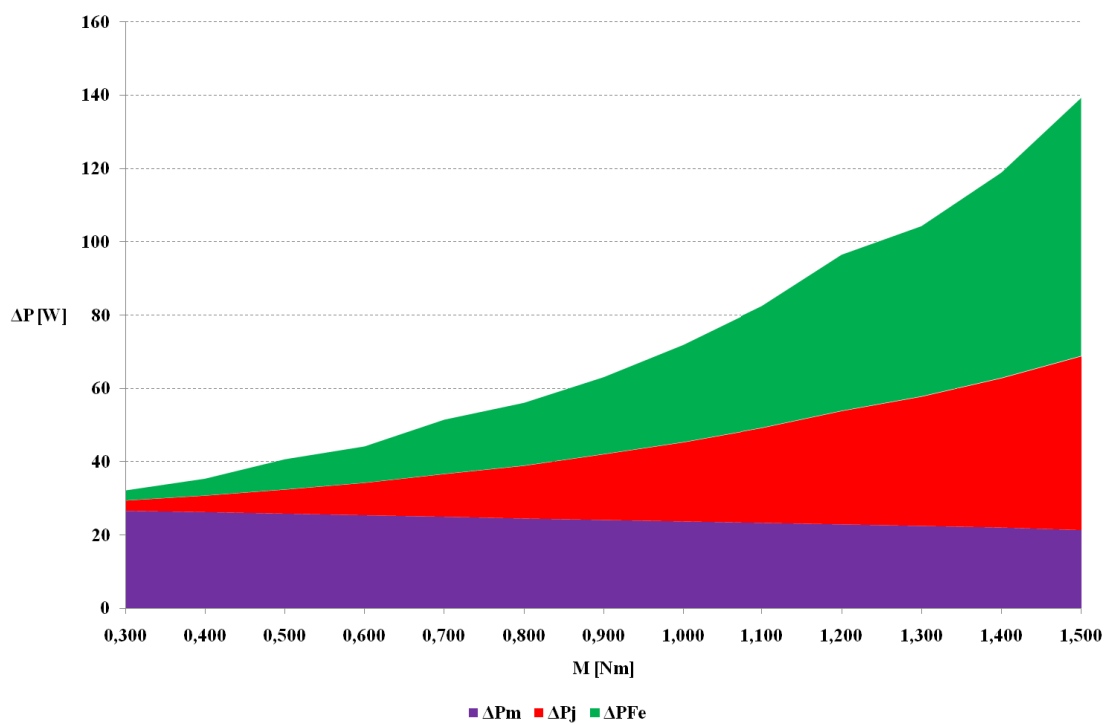
[11]

	Doprava				Doleva			
M	ΔP	ΔP_m	ΔP_j	ΔP_{Fe}	ΔP	ΔP_m	ΔP_j	ΔP_{Fe}
[Nm]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
0,300	27,30	24,66	2,55	0,09	32,10	26,57	2,81	2,72
0,400	32,80	24,35	4,23	4,22	35,30	26,23	4,49	4,58
0,500	36,20	23,97	6,08	6,15	40,60	25,81	6,56	8,23
0,600	40,40	23,60	8,28	8,52	44,10	25,37	8,84	9,89
0,700	46,90	23,22	11,03	12,65	51,40	24,96	11,66	14,78
0,800	52,00	22,92	13,92	15,16	56,00	24,48	14,40	17,12
0,900	60,80	22,53	17,42	20,84	63,00	24,08	17,96	20,97
1,000	66,20	22,19	21,90	22,11	71,80	23,68	21,61	26,51
1,100	82,00	21,80	25,60	34,60	82,40	23,28	25,92	33,19
1,200	93,60	21,45	30,28	41,88	96,40	22,87	30,98	42,55
1,300	105,20	21,12	35,34	48,73	104,20	22,44	35,34	46,42
1,400	118,80	20,75	40,80	57,25	118,80	22,02	40,80	55,98
1,500	138,20	20,34	47,52	70,33	139,20	21,30	47,52	70,38

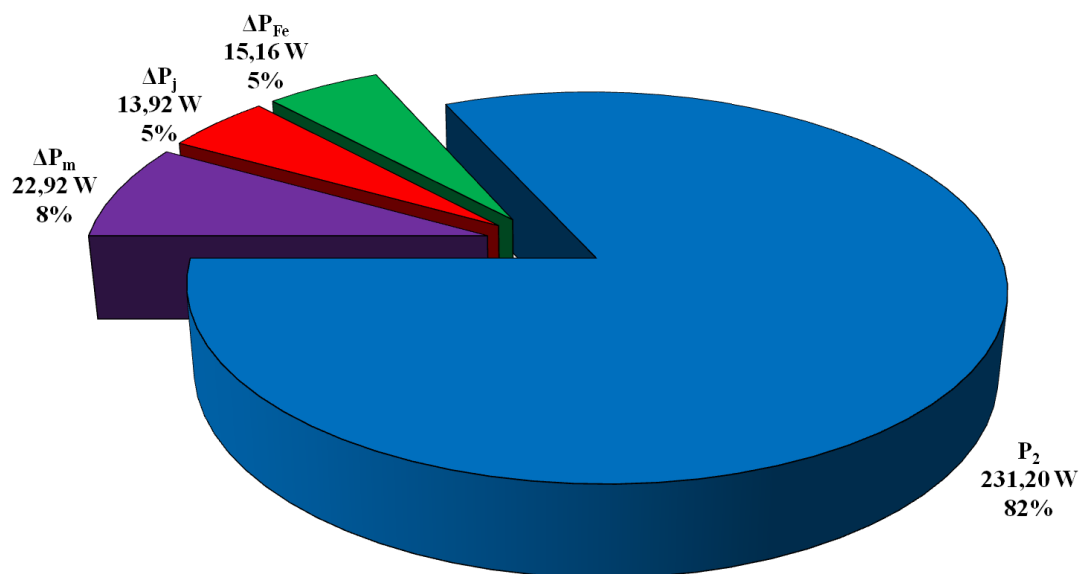
Tabulka 16 Tabulka mnou vypočtených ztrát motorku



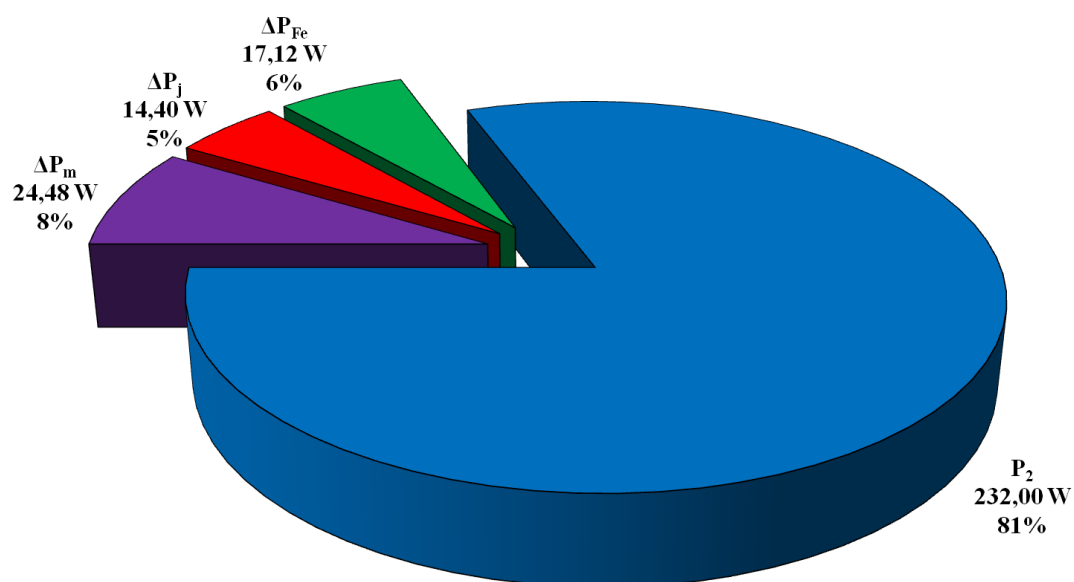
Obrázek 43 Graf rozložení ztrát při směru otáčení vpravo



Obrázek 44 Graf rozložení ztrát při směru otáčení vlevo



Obrázek 45 Rozložení ztrát pro jmenovitý moment při směru otáčení vpravo



Obrázek 46 Rozložení ztrát pro jmenovitý moment při směru otáčení vlevo

4 MOŽNOSTI INOVACE STEJNOSMĚRNÉHO MOTORKU S PM

Jak jsem již uvedl, stejnosměrný stroj a jeho principy jsou nejdéle známými ze všech točivých elektrických strojů. Z tohoto důvodu spočívá inovace stejnosměrných motorů s permanentními magnety ve zvětšování přesnosti části motoru, ve výměně stávajících materiálů za novější s lepšími vlastnostmi a ve zjednodušení výrobních procesů jednotlivých částí. Všechny inovace ovšem závisí na předpokladu, že toto zlepšení nebude mít příliš velký negativní vliv na výslednou cenu výrobku.

Dnes klade Evropská unie vysoké nároky na zvyšování účinnosti motorů nad 700W, ale výrobci očekávají, že tyto nároky se v brzké době začnou klást i na motorky malých výkonů, což jsou motorky o výkonu menším než 700W.

4.1 Permanentní magnety



Obrázek 47 Příklady tvarů magnetů ze vzácných zemin a)NdFeB, b)SmCo [14,19]

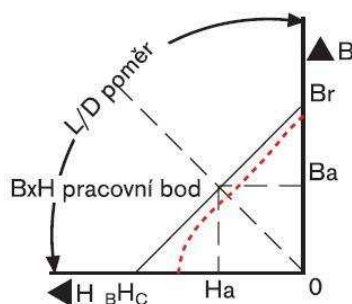
U permanentních magnetů může spočívat inovace v několika možnostech. Jako první se nabízí možnost různých materiálů permanentních magnetů. Dalšími možnostmi jsou tvar magnetů a jejich rozmístění na statoru, s čímž také souvisí množství magnetů po obvodu statoru a délka mezer mezi permanentními magnety. Další možností inovace by mohly spočívat v úpravě magnetů tak, aby se snížily jejich ztráty, které souvisejí s tím, že magnety mají jistý obsah železa což má za následek vznik vířivých ztrát.

Například magneticky tvrdé ferity mají dobré magnetické vlastnosti. Pracovní teplotu v rozsahu -40 až $+250^{\circ}\text{C}$. Z mechanického hlediska jsou křehké a tvrdé. Problém, který vyplývá z jejich tvrdosti, je potřeba specializovaných nástrojů s diamantovým ostřím na jejich opracování.

Permanentní magnety ze vzácných zemin na bázi SmCo a NdFeB jsou velmi výkonné a kvalitativně velmi hodnotné komponenty. Tyto magnety jsou ovšem zase velmi tvrdé, tudíž je zde opět potřeba specializovaných nástrojů s diamantovým ostřím. Pracovní teplota dosahuje až $+350^{\circ}\text{C}$. Mají ovšem i nevýhody. První, vcelku zřejmá, je vyšší cena a druhá je náchylnost ke korozi.

[13, 16]

- B_R – remanence - Zbytková magnetizace po odstranění magnetizujícího pole.
- H_{CJ} – koercitivita vnitřní – Magnetické pole, při kterém je celková polarizace nulová.
- H_{CB} – koercitivita skutečná – Magnetické pole, při kterém je celková indukce v magnetu nulová.
- $(BH)_{MAX}$ – max. energ. produkt - Bod maximálního součinu B a H na demagnetizační křivce, určuje optimální pracovní bod permanentního magnetu. Magnet, který pracuje v tomto bodě, poskytuje největší výkon na jednotku objemu.
- B_A , H_A - Hodnoty magnetické indukce B a koercitivní síly H v pracovním bodě magnetu.



Obrázek 48 Grafické zobrazení pracovního bodu z katalogu SELOS [16]

Typ	Remanence	Koercitivita vnitřní	Koercitivita normální	Max. energ. Produkt	Max. pracovní teplota
	B_R	H_{CJ}	H_{CB}	$(BH)_{MAX}$	T
	[T]	[kA/m]	[kA/m]	[kJ/m ³]	[°C]
SmCo5					
S-21H	0,92-1,00	1274	597-677	159-175	250
Sm2Co17					
S-23H	1,00-1,06	1433	526-732	175-199	250
S-27H	1,05-1,10	1433	701-780	199-223	250
S-28H	1,03-1,10	1590-2070	720-820	190-225	250
NdFeB					
28EH	1,02-1,08	2388	780	207-231	200
30EH	1,08-1,13	2388	812	223-247	200
33EH	1,13-1,17	2388	851	247-272	200
35EH	1,17-1,21	2388	875	263-295	200

Tabulka 17 Tabulka vlastností magnetických materiálů od firmy WAMAG [15,20]

4.2 Plechy

Jako u všech částí, které budu probírat, i u rotorových plechů se nabízí inovace ve formě změny materiálu plechů. V dnešní době se používají převážně ocelové plechy, které se pak skládají s izolačními vrstvami na rotor. Ocelové plechy nemají zrovna ideální parametry, ale jejich obrovskou výhodou je pevnost a nízká cena. Pro lepší vlastnosti by se nám hodily spíše transformátorové plechy, které bohužel zase postrádají dostatečnou pevnost pro rotující části. Možností by mohl být kompromis ve formě oceli s vyšším obsahem křemíku, která by musela mít dostatečnou pevnost a měla i lepší magnetické vlastnosti než normální ocel. Ovšem zásadní věc, která mne zase omezuje, je cena.

Od výrobce motorku P2SZ447 firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. jsem dostal podnět na ještě jednu inovaci. Tato inovace by měla spočívat v přepočítání plechů motoru ze stávajících 12 drážek na 16 drážek. Důvodem tohoto přepočtu je to, že 12 drážek se nedá navíjet strojově oproti 16. Jedná se o finanční důvod, protože veškeré nástroje a nástavce na navíjení jsou značně nákladná záležitost, je pro firmu přijatelnější přepočet na 16 drážek, jelikož vybavení na navíjení 16 drážek firma již vlastní.

[9]

4.3 Kostra

Jak jsem již zmínil na začátku kapitoly, jednou z možností inovace je nalezení vhodnějšího způsobu výroby, tak aby výsledný výrobek byl přesnější. Tento způsob by se dal aplikovat například na výrobu kostry motoru. Důvod je zřejmý, nepřesnosti mohou mít vliv například na velikost vzduchové mezery, která pak nemusí být po celém obvodu motorku stejná, a tím pádem vznikají ztráty. Také mohou vznikat parazitní vzduchové mezery mezi kostrou motorku a permanentními magnety.

V dnešní době se kostra převážně vyrábí z plechů, které se stočí a pomocí mechanického zámku se připevní a svaří. Lepším a dnes použitelným způsobem pro menší stroje by byla možnost výroby kostry z přesných trubek.



Obrázek 49 Skladované přesné bezešvé trubky od firmy PARADOX STEEL s.r.o. [21]

ČSN 426711															
Vnější průměr [mm]	Tloušťka stěny [mm]														
	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10
Vnitřní průměr a tolerance [mm]															
60			2,164	2,861	3,545	4,217	4,877	5,524	6,159	6,782	7,990	9,149	10,260	11,320	12,330
62			2,238	2,959	3,668	4,365	5,049	5,721	6,381	7,028	8,286	9,495	10,650	11,760	12,820
65			2,349	3,107	3,853	4,587	5,308	6,017	6,714	7,398	8,730	10,010	11,250	12,430	13,560
70			2,534	3,354	4,162	4,957	5,740	6,511	7,269	8,015	9,470	10,880	12,230	13,540	14,800
75				3,601	4,470	5,327	6,172	7,004	7,824	8,632	10,210	11,740	13,220	14,650	16,030
80				3,874	4,778	5,697	6,603	7,497	8,379	9,248	10,950	12,600	14,210	15,760	17,260

Tabulka 18 Tabulka rozměrů a tolerancí od firmy PARADOX STEEL s.r.o. [17]

4.4 Komutátor

Komutátor je jednou z nejdůležitějších částí stejnosměrného motoru. Vyrábí se různé typy, například válcové, radiální (čelní, hřebenové) apod. Na lamely komutátoru se používá měď nebo mikanit.

Kartáče jsou taktéž vyráběny z několika materiálů. Např. grafit s 50 % obsahem mědi. Měď má za účel snížit odpor kartáčů a přechodový odpor. Dalším materiálem je bronz s povlakem stříbra v místě dotyku. Má nízký odpor kartáčů a delší životnost.

Další možností je elektronická komutace. V této variantě je komutátor nahrazen polovodičovým měničem.

[10, 12]

5 NÁVRH INOVACE MOTORKU P2SZ447

V návaznosti na předchozí kapitole, kde jsem uvedl možnosti inovací stejnosměrného motorku s permanentními magnety, se v této kapitole zabývám konkrétními úpravami motorku P2SZ447 od firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. Už dříve byl na ústavu UVEE proveden přepočet stávajícího rotoru motorku P2SZ447 s 12 drážkami na rotor s 16 drážkami. Prototyp s 16 drážkami nám byl poskytnut k měření, ale zatím se nevyrábí sériově. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl, zpracoval návrhy jak pro motorek s 12 drážkami na rotoru tak i pro motorek s 16 drážkami na rotoru.

Pro zpracování návrhu a výpočet jsem použil program FEMM. Program FEMM je (*Finite Element Method Magnetics*) je program pro simulaci a vyšetřování magnetických a elektrostatických polí a tepelných a proudových toků. Program FEMM řeší magnetické obvody matematickou metodou konečných prvků.

[18]

Aby bylo možné upravené motorky s něčím porovnat, provedl jsem nejprve simulaci stávajícího motorku P2SZ447 s 12 drážkami na rotoru. Při mých výpočtech vycházím z předpokladu, že kostra motorku bude vyrobena z přesných bezešvých trubek, aby, jak už jsem zmiňoval, nedocházelo ke vzniku parazitní vzduchové mezery.

Některé úpravy, které navrhuji, vedou k prodloužení motorku a tudíž i ke zvětšení plochy vzduchové mezery. Ve vzduchové mezeře je vyžadován stejně velký magnetický tok, z toho plyne, že si můžu dovolit zmenšit magnetickou indukci ve vzduchové mezeře a tím i ztráty v železe, což dokazují níže uvedené vzorce.

$$\Phi = B \cdot S \Rightarrow B = \frac{\Phi}{S}$$

[11]

Kde B je magnetická indukce, Φ magnetický tok a S plocha vzduchové mezery, přes kterou magnetický tok prochází.

Ztráty v železe ΔP_{Fe} se rozdělují na ztráty vířivými proudy ΔP_v a na ztráty hysterezní.

Hysterezní ztráty ΔP_h a ztráty vířivými proudy se vypočítají podle vzorců:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v$$

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B^2 \cdot m$$

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot m$$

[11]

Kde B je magnetická indukce, m hmotnost magnetického materiálu, f frekvence, k_h a k_v jsou koeficienty závislé na materiálu.

Z uvedených vzorců vyplývá, že ztráty v železe jsou závislé na kvadrátu magnetické indukce. To znamená, že snížením magnetické indukce snížím ztráty v železe.

Další úpravou, kterou zde uvedu, je výměna stávajících permanentních magnetů za magnety ze vzácných zemin, v našem případě NdFeB.

U všech motorků předpokládám, že mechanické ztráty ΔP_m budou totožné se ztrátami původního motorku. Výpočty provedu jen pro jmenovitý moment motorků. Pro výpočty použiju hodnoty zjištěné měřením při směru otáčení vpravo.

Úpravy vzorců pro moje potřeby:

$$\Delta P_j = R \cdot I^2 = \rho \cdot \frac{l_p}{S} \cdot I^2 = k_{cu} \cdot l_p$$

$$k_{cu} = \frac{\Delta P_j}{l_p}$$

$$l_X = l_p + \Delta l$$

$$\Delta P_{jX} = k_{cu} \cdot l_X = \frac{\Delta P_j}{l_p} \cdot (l_p + \Delta l) = \frac{\Delta P_j \cdot l_p}{l_p} + \frac{\Delta P_j \cdot \Delta l}{l_p} = \Delta P_j \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_p}\right)$$

Pro výpočet ztrát v mědi upravených motorků jsem použil tyto vzorce. ΔP_j ve vzorcích jsou ztráty, které jsem naměřil na původním motorku. Zavedl jsem konstantu k_{cu} , protože předpokládám, že parametry ρ , S a I zůstanou stejné jako u původního motorku. Velikost l_p reprezentuje délku vodičů původního motorku a Δl je potřebné prodloužení vodičů, z toho plyne, že l_X reprezentuje délku vodičů prodlouženého motorku.

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_h + \Delta P_v$$

$$\Delta P_h = k_h \cdot f \cdot B^2 \cdot m$$

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot m$$

$$\Delta P_{Fe} = k_h \cdot f \cdot B^2 \cdot m + k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot m = B^2 \cdot (k_h \cdot f \cdot m + k_v \cdot f^2 \cdot m) = B^2 \cdot k_{Fe}$$

$$k_{Fe} = \frac{\Delta P_{Fe}}{B^2}$$

$$\Delta P_{FeX} = k_{Fe} \cdot B_X^2 = \frac{\Delta P_{Fe}}{B^2} \cdot B_X^2 = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{B_X^2}{B^2}$$

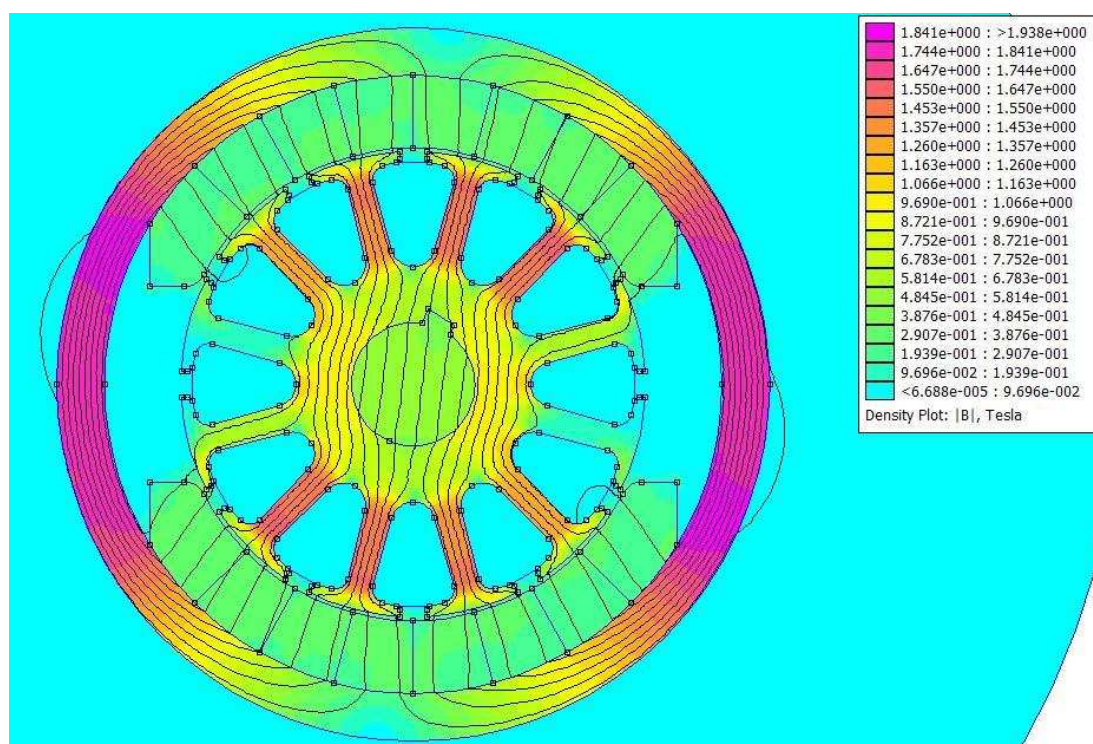
Pro ztráty v železe jsem opět zavedl konstantu k_{Fe} , protože předpokládám, že parametry k_h , k_v , f a m zůstanou stejné jako u původního motorku. B reprezentuje magnetickou indukci původního motorku a B_X reprezentuje magnetickou indukci upraveného motorku.

Použité zkratky v tabulkách:

- B_δ – magnetická indukce ve vzduchové mezeře
- B_{max} – maximální indukce
- M – moment
- v_m – výška magnetu
- d_r – průměr rotoru
- l – délka rotoru

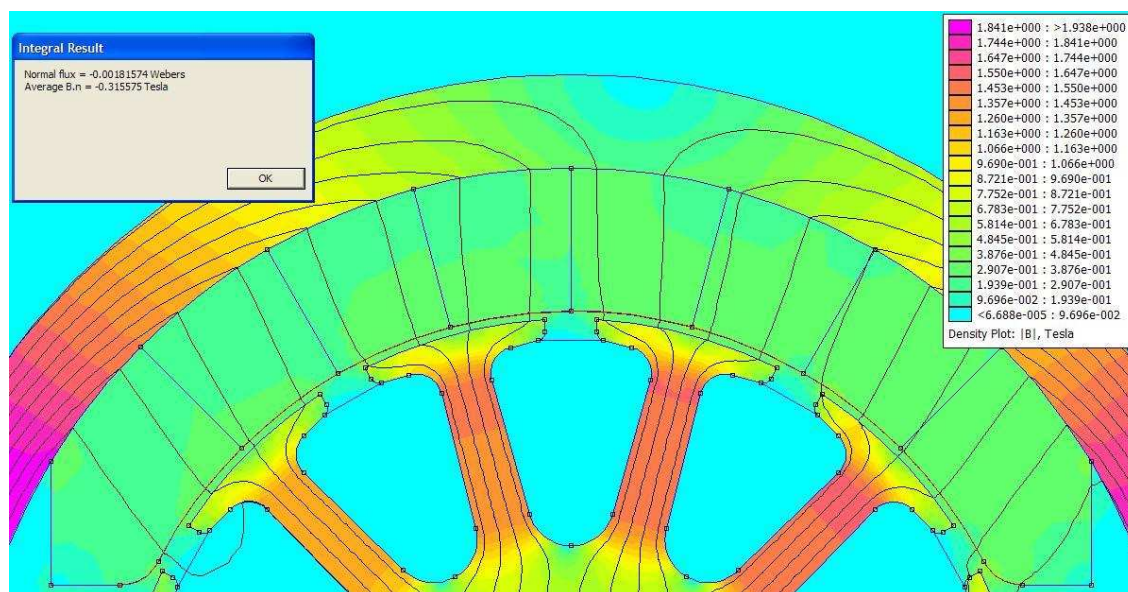
5.1 Inovace motorku s 12 drážkami

Jak jsem již dříve řekl, nejprve jsem nasimuloval původní motorek P2SZ447. Na následujících obrázcích jsou výsledky výpočtů pomocí programu FEMM. Dále uvádím pro orientaci rozměry, které měním při simulacích. Těmito rozměry jsou délka rotoru, průměr rotorových plechů a výška permanentních magnetů. Ostatní rozměry, jako například celkový průměr motorku nebo průměr hřídele, zůstávají nezměněny.



Obrázek 50 Rozložení magnetické indukce v původním motorku s 12 drážkami na rotoru

Na obrázku 50 vidíme rozložení magnetické indukce v rotorových plesích, vzduchové mezeře, permanentních magnetech a kostře motorku. Nejvyšší hodnotu magnetické indukce na obrázku znázorňuje fialová barva, v našem případě se jedná o hodnotu 1,94 T.



Obrázek 51 Detail permanentního magnetu v původním motorku s 12 drážkami na rotoru

Všechny důležité parametry jsou shrnuty v následující tabulce. Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře byla vypočtena na 0,316 T. Moment byl vypočten na 0,78 Nm. Tento moment odpovídá přibližně jmenovitému momentu motorku, který má hodnotu 0,8 Nm. Použité hodnoty ztrát jsou hodnoty z měření na motorku P2SZ447.

Výpočet:

$$l_p = 1,5 \cdot l = 1,5 \cdot 90 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{135 \text{ mm}}}$$

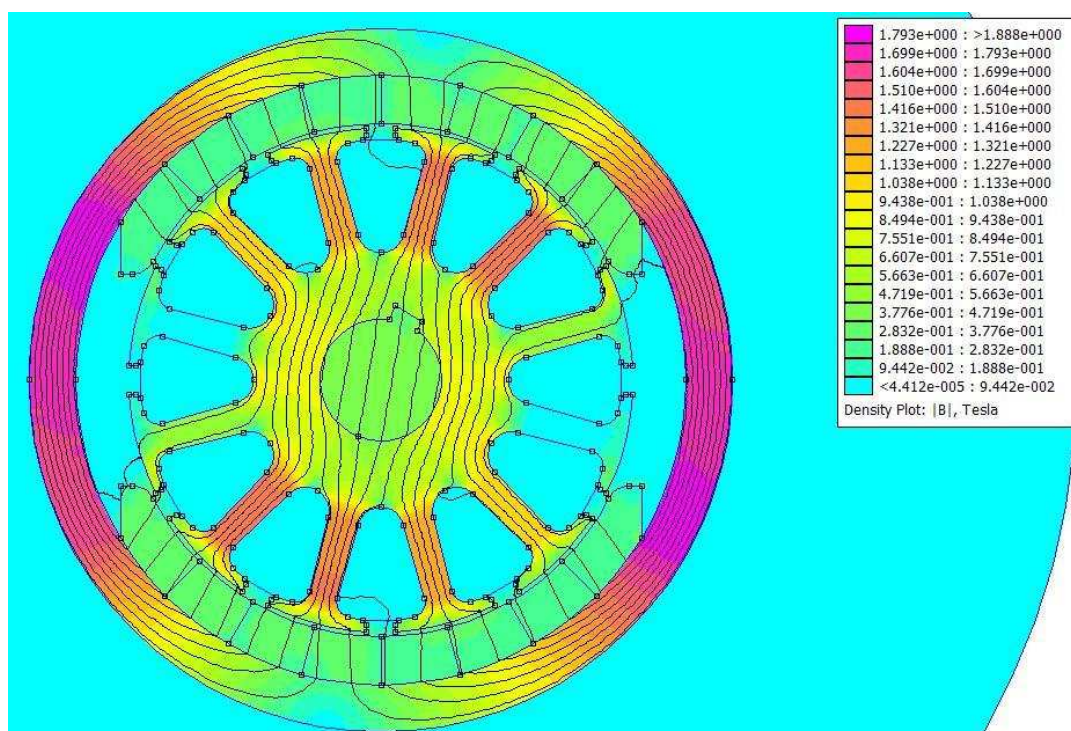
Velikost l udává délku rotoru, což ovšem nezahrnuje čela vinutí. Z tohoto důvodu násobíme délku vinutí koeficientem 1,5. Touto operací zahrneme do výpočtu celou délku vinutí včetně čel.

Motorek	B_δ [T]	$B_{\max}$ [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
původní, 12 drážek	0,316	1,94	0,78	8,3	52,8	90,0	52,00	13,92	15,16

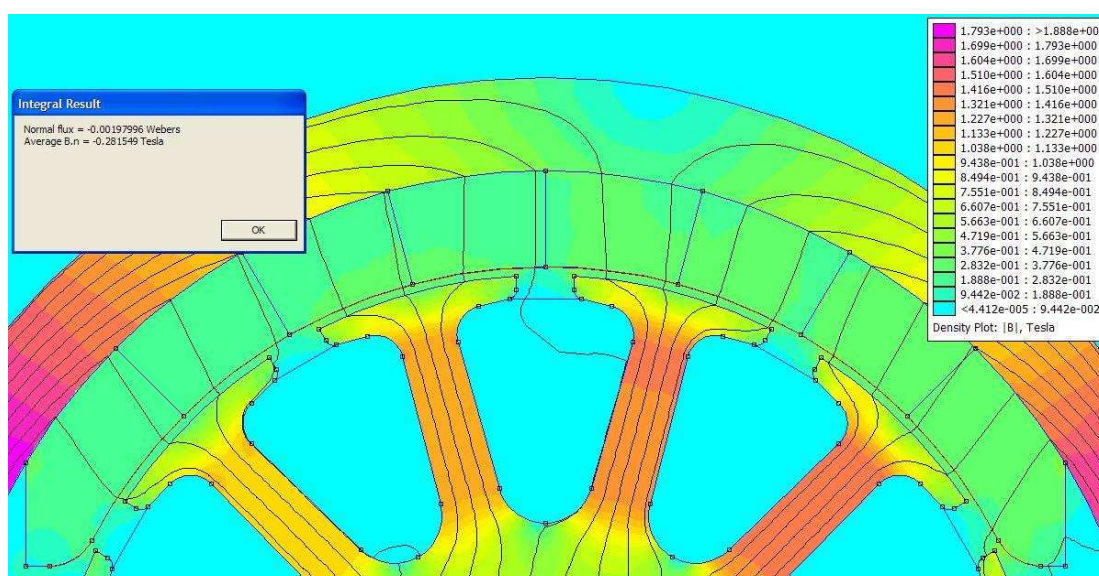
Tabulka 19 Parametry původního motorku s 12 drážkami na rotoru

5.1.1 Prodloužení o 10 mm (upravený 1)

Jako první úpravu motorku s 12 drážkami na rotoru jsem provedl prodloužení rotoru o 10 mm. Výpočty jsem provedl pomocí programu FEMM.



Obrázek 52 Rozložení magnetické indukce v motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm



Obrázek 53 Detail permanentního magnetu v motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm

Výpočet ztrát:

$$\Delta P_{j10} = \Delta P_j \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_p}\right) = 13,92 \cdot \left(1 + \frac{10 \cdot 10^{-3}}{135 \cdot 10^{-3}}\right) = \underline{\underline{14,95 W}}$$

$$\Delta P_{Fe10} = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{B_{\delta10}^2}{B_{\delta}^2} = 15,16 \cdot \frac{0,282^2}{0,316^2} = \underline{\underline{12,07 W}}$$

$$\Delta P_{m10} = \Delta P_m = \underline{\underline{22,92 W}}$$

$$\Delta P_{10} = \Delta P_{j10} + \Delta P_{Fe10} + \Delta P_{m10} = 14,95 + 12,07 + 22,92 = \underline{\underline{49,94 W}}$$

Při výpočtu ztrát v železe jsem počítal s magnetickou indukcí ve vzduchové mezeře, protože předpokládám, že tento poměr platí i pro indukci v rotoru, šířku zubů zůstává nezměněna.

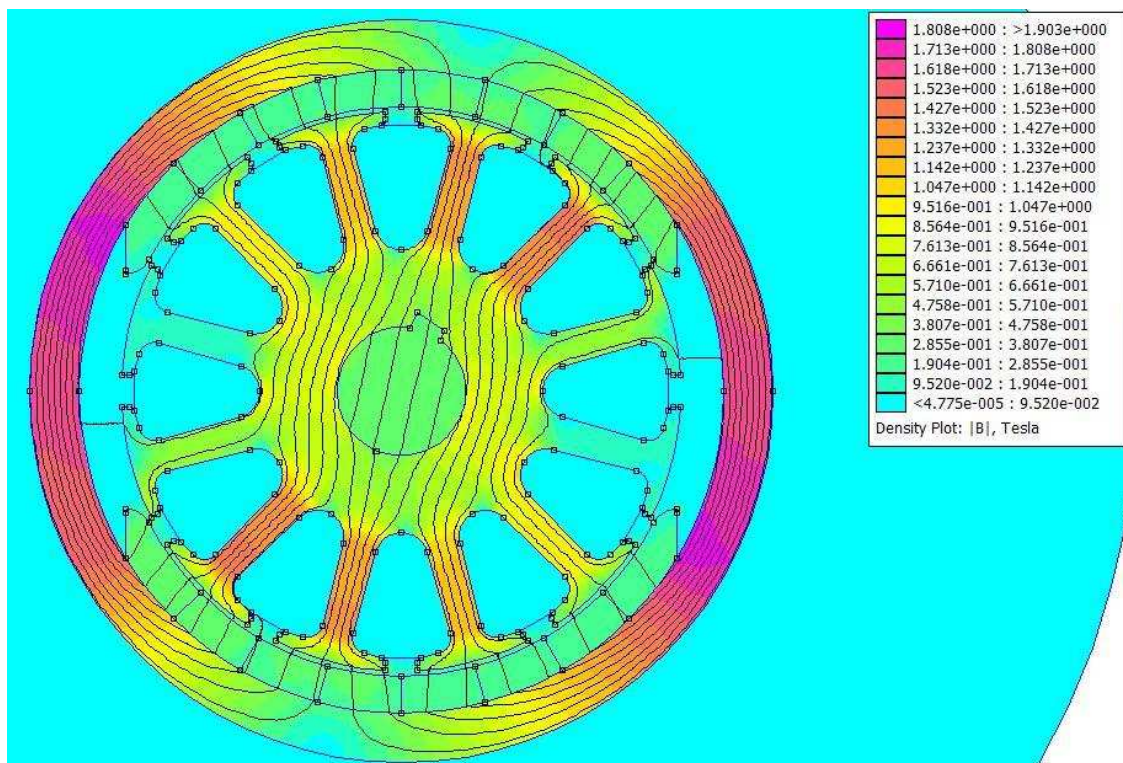
Motorek	B_{δ} [T]	$B_{\max}$ [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
upravený 1, 12 drážek	0,282	1,89	0,84	5,6	57,9	100,0	49,94	14,95	12,07

Tabulka 20 Parametry motorku s prodlouženým rotorem o 10 mm

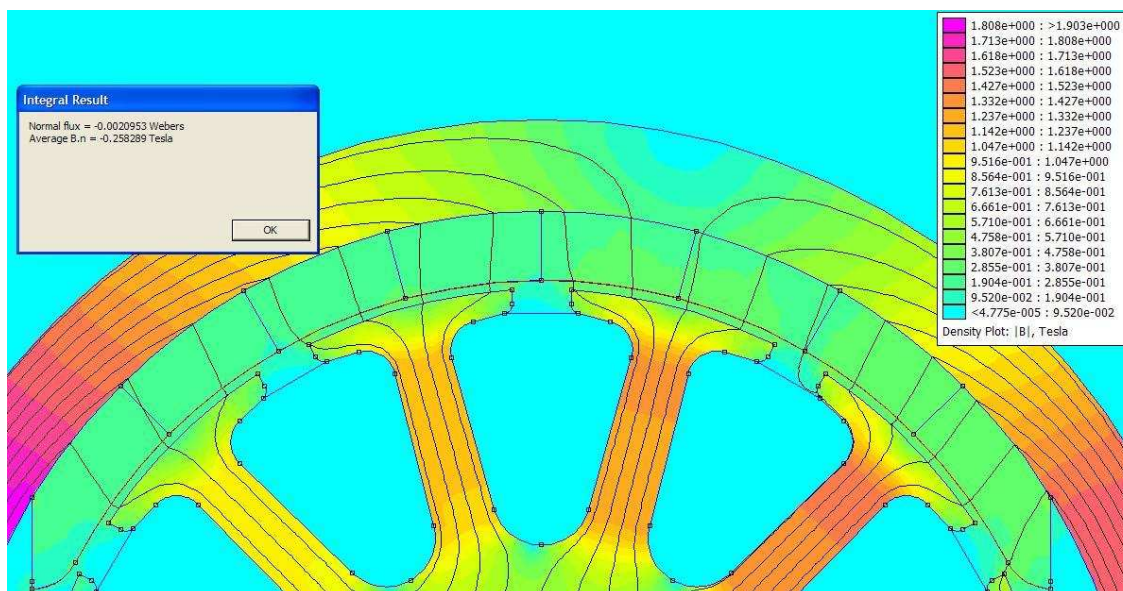
Prodloužení motorku o 10 mm mi umožnilo snížit výšku magnetů na 5,6 mm. Snížením výšky magnetu se snížila magnetická indukce ve vzduchové mezeře na hodnotu 0,282 T. Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře se snížila o 9 % z původní hodnoty.

5.1.2 Prodloužení o 20 mm (upravený 2)

Jako další krok jsem prodloužil motorek o dalších 10 mm, což je celkové prodloužení o 20 mm. Mým cílem bylo ještě více snížit magnetickou indukci a tím ještě více snížit ztráty v železe.



Obrázek 54 Rozložení magnetické indukce v motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm



Obrázek 55 Detail permanentního magnetu v motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm

Výpočet ztrát:

$$\Delta P_{j20} = \Delta P_j \cdot \left(1 + \frac{\Delta l}{l_p}\right) = 13,92 \cdot \left(1 + \frac{20 \cdot 10^{-3}}{135 \cdot 10^{-3}}\right) = \underline{\underline{15,98 W}}$$

$$\Delta P_{Fe20} = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{B_{\delta 10}^2}{B_{\delta}^2} = 15,16 \cdot \frac{0,258^2}{0,316^2} = \underline{\underline{10,11 W}}$$

$$\Delta P_{m20} = \Delta P_m = \underline{\underline{22,92 W}}$$

$$\Delta P_{20} = \Delta P_{j20} + \Delta P_{Fe20} + \Delta P_{m20} = 15,98 + 10,11 + 22,92 = \underline{\underline{49,01 W}}$$

Motorek	B_{δ} [T]	B_{max} [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
upravený 2, 12 drážek	0,258	1,90	0,87	4,1	61,0	110,0	49,01	15,98	10,11

Tabulka 21 Parametry motorku s prodlouženým rotorem o 20 mm

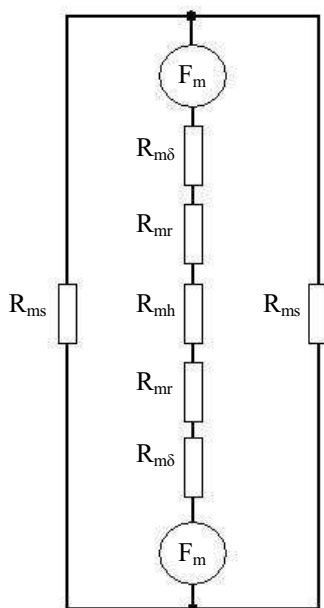
Prodloužení motorku o dalších 10 mm mi umožnilo snížit výšku magnetů na 4,1 mm. Dalším snížením magnetů se snížila magnetická indukce ve vzduchové mezeře na hodnotu 0,258 T. Hodnota magnetické indukce ve vzduchové mezeře se snížila o 18 % z původní hodnoty.

5.1.3 Výměna magnetů za NdFeB magnety (upravený 3)

Další úprava, kterou jsem provedl, byla výměna stávajících magnetů za magnety ze vzácných zemin, konkrétně NdFeB. Nejprve jsem provedl návrh motorku pro magnetickou indukci ve vzduchové mezeře $B_{\delta} = 0,316$ T.

Prvotní návrh motorku:

$B_{\delta} = 0,316$ T	- indukce ve vzduchové mezeře
$B_{maxr} = 1,5$ T	- maximální indukce v rotoru
$B_{maxs} = 1.9$ T	- maximální indukce ve statoru (kostře)
$H_c = 883310$ A/m	- koercitivní síla magnetů NdFeB
$\mu_{rr} = 1730$	- relativní permeabilita materiálu rotorových plechů
$\mu_{rs} = 902,6$	- relativní permeabilita materiálu statoru (kostry)
$\mu_{rh} = 760$	- relativní permeabilita materiálu hřídele
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m	- permeabilita vakua



Hodnoty značené h reprezentují délky siločar, které jsem změřil a vypočetl z výkresové dokumentace motorku P2SZ447.

$h_\delta = 0,5 \text{ mm}$	- výška vzduchové mezery
$h_r = 19 \text{ mm}$	- výška plechů rotoru
$h_s = 118 \text{ mm}$	- střední délka siločáry ve statoru
$h_h = 13,8 \text{ mm}$	- průměr hřídele
h_m	- výška jednoho magnetu

Obrázek 56 Náhradní schéma magnetického obvodu

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \Rightarrow H = \frac{B}{\mu_0 \cdot \mu_r}$$

$$F_m = H \cdot h \Rightarrow h = \frac{F_m}{H}$$

$$\Delta F_{m\delta} = H_\delta \cdot h_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} \cdot h_\delta = \frac{0,316}{4\pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,5 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{126A}}$$

$$\Delta F_{mr} = H_r \cdot h_r = \frac{B_{r\max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rr}} \cdot h_r = \frac{1,5}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1730} \cdot 19 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{13A}}$$

$$\Delta F_{mh} = H_h \cdot h_h = \frac{B_{r\max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rh}} \cdot h_h = \frac{1,5}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 760} \cdot 13,8 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{22A}}$$

$$\Delta F_{ms} = H_s \cdot h_s = \frac{B_{s\max}}{\mu_0 \cdot \mu_{rs}} \cdot h_s = \frac{1,9}{4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 902,6} \cdot 118 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{198A}}$$

$$F_{mc} = 2 \cdot \Delta F_{m\delta} + 2 \cdot \Delta F_{mr} + \Delta F_{mh} + \frac{1}{2} \cdot \Delta F_{ms} = 2 \cdot 126 + 2 \cdot 13 + 22 + \frac{1}{2} \cdot 198 = \underline{\underline{399A}}$$

$$2 \cdot h_m = \frac{F_{mc}}{H_c} = \frac{399}{883310} = 0,5mm \Rightarrow h_m = \underline{\underline{0,25mm}}$$

Ve vzorci pro výpočet výšky magnetu používám $2 \cdot h_m$, protože motorek P2SZ447 má dva permanentní magnety na statoru. Z výsledku výpočtu jsem usoudil, že zvolím výšku jednoho magnetu na 1 mm. Výška magnetu 1 mm by měla být ještě průmyslově vyrobitelná.

V dalším kroku jsem si upravil model v programu FEMM a nahradil magnety stávající magnety NdFeB o výšce 1 mm. Pomocí programu jsem vypočetl hodnotu magnetické indukce ve vzduchové mezeře $B_{\delta m} = 0,36$ T. Dále jsem pomocí programu odečetl upravenou délku magnetu h_{dm} . Zvolil jsem i menší maximální magnetickou indukci ve statoru B_{maxs} . Zvětšil jsem i výšku vzduchové mezery na 1,5 mm.

Výpočet upravených rozměrů:

$B_{\delta} = 0,36$ T - indukce ve vzduchové mezeře

$B_{maxr} = 1,5$ T - maximální indukce v rotoru

$B_{maxs} = 1,6$ T - maximální indukce ve statoru

$d = 80$ mm - vnější průměr statoru

$h_{dm} = 70$ mm - délka magnetu

$h_h = 13,8$ mm - průměr hřídele

$h_{\delta} = 1,5$ mm - výška vzduchové mezery

h_{tz} - šířka těla zubu

h_k - výška statoru (kostry)

h_r - výška plechů rotoru

h_m - výška jednoho magnetu

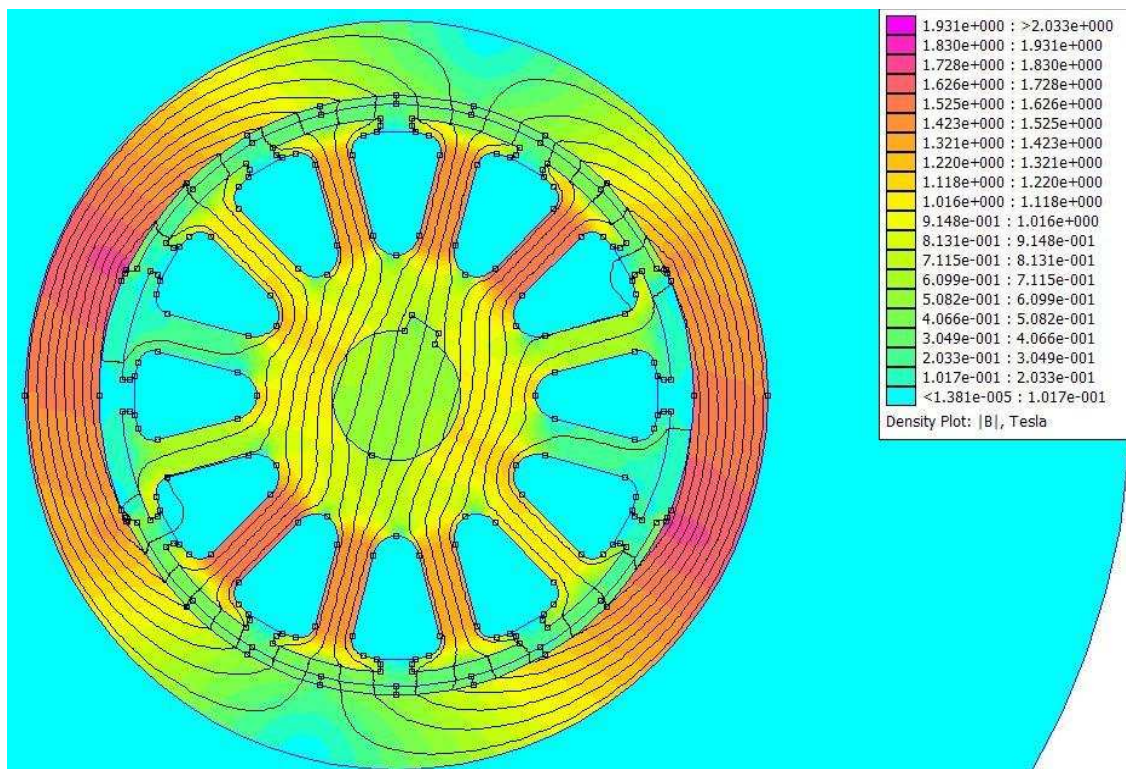
$$\Phi = B \cdot S = B \cdot l \cdot h$$

$$B_{\delta} \cdot l \cdot h_{dm} = B_{r \max} \cdot l \cdot 4 \cdot h_{tz} \Rightarrow h_{tz} = \frac{B_{\delta} \cdot l \cdot h_{dm}}{4 \cdot B_{r \max} \cdot l} = \frac{B_{\delta}}{4 \cdot B_{r \max}} \cdot h_{dm} = \frac{0,36}{4 \cdot 1,5} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{4,2 \text{ mm}}}$$

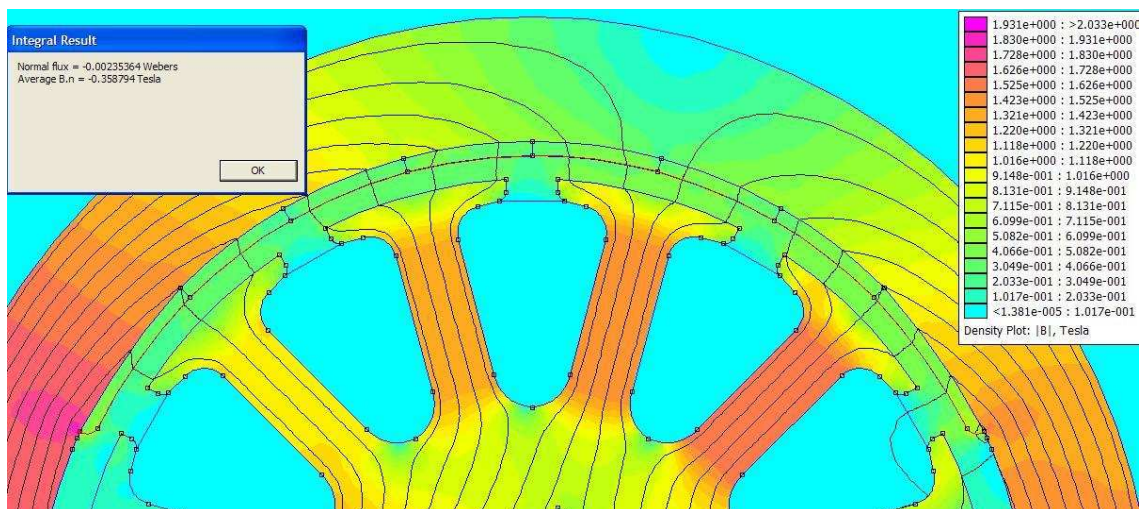
$$B_{\delta} \cdot l \cdot h_{dm} = B_{s \max} \cdot l \cdot 2 \cdot h_k \Rightarrow h_k = \frac{B_{\delta} \cdot l \cdot h_{dm}}{2 \cdot B_{s \max} \cdot l} = \frac{B_{\delta}}{2 \cdot B_{s \max}} \cdot h_{dm} = \frac{0,36}{2 \cdot 1,6} \cdot 70 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{7,9 \text{ mm}}}$$

$$h_r = \frac{d}{2} - (h_k + h_m + h_{\delta} + \frac{h_k}{2}) = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{2} - (7,9 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3} + \frac{13,8 \cdot 10^{-3}}{2}) = \underline{\underline{22,7 \text{ mm}}}$$

Po upravení modelu dle vypočtených rozměrů jsem provedl opět celkový výpočet rozložení magnetické indukce v programu FEMM a výpočet ztrát.



Obrázek 57 Rozložení magnetické indukce v motorku s magnety NdFeB



Obrázek 58 Detail permanentního magnetu v motorku s magnety NdFeB

Výpočet ztrát:

$$\Delta P_{jN1} = \Delta P_j = \underline{\underline{13,92W}}$$

$$\Delta P_{FeN1} = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{B_{N1}^2}{B^2} = 15,16 \cdot \frac{1,57^2}{1,57^2} = \underline{\underline{15,16W}}$$

$$\Delta P_{mN1} = \Delta P_m = \underline{\underline{22,92W}}$$

$$\Delta P_{N1} = \Delta P_{jN1} + \Delta P_{FeN1} + \Delta P_{mN1} = 13,92 + 15,16 + 22,92 = \underline{\underline{52W}}$$

Pro výpočet ztrát v železe jsem musel na rozdíl od předchozích výpočtů počítat s magnetickou indukcí v zubech, protože u této varianty jsem upravoval šířku zubů.

Ztráty v mědi i ztráty mechanické budou stejné jako u původního motorku, protože se nezměnily parametry vinutí ani proud jím protékající.

Jelikož uvažuji, že upravený motorek bude pracovat při stejných otáčkách, jako původní motorek, vypočetl jsem výkon a účinnost podle následujících vztahů:

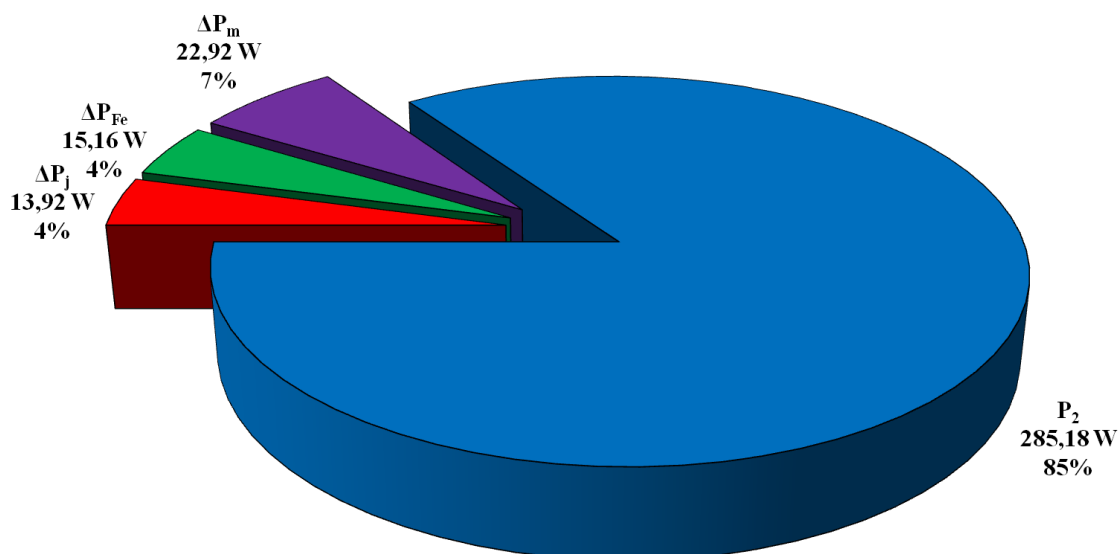
$$P = M \cdot \omega \Rightarrow \omega = \frac{P}{M}$$

$$\omega = \omega_{N1} \Rightarrow \frac{P_2}{M} = \frac{P_{2N1}}{M_{N1}} \Rightarrow P_{2N1} = P_2 \cdot \frac{M_{N1}}{M} = 232,8 \cdot \frac{0,98}{0,8} = \underline{\underline{285,18W}}$$

$$P_{1N1} = P_{2N1} + \Delta P_{N1} = 285,18 + 52 = \underline{\underline{337,18W}}$$

$$\eta_{N1} = \frac{P_{2N1}}{P_{1N1}} \cdot 100 = \frac{285,18}{337,18} \cdot 100 = \underline{\underline{84,6\%}}$$

Hodnoty bez indexu *NI* jsou naměřené hodnoty původního motorku a hodnoty s indexem *NI* hodnoty upraveného motorku.



Obrázek 59 Rozložení výkonu a ztrát motorku s magnety NdFeB

Motorek	B_δ [T]	B_{max} [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
upravený 3, 12 drážek	0,360	2,03	0,98	1,0	60,0	90,0	52,00	13,92	15,16

Tabulka 22 Parametry motorku s magnety NdFeB

Nahrazením stávajících magnetů magnety ze vzácných zemin NdFeB jsem zvýšil moment a ve výsledku i účinnost motorku. Můj názor ale je, že tento motor není vhodný pro výrobu, protože je těžký, jelikož obsahuje velké množství železa. Největším problémem je velká výška statoru. Z tohoto vyplývá i zvýšení nákladů na materiál. Mým doporučením je přepočítat tento upravený dvoupólový motorek na čtyřpólovou verzi.

5.1.4 Výměna magnetů za NdFeB magnety lepené (upravený 4)

Dnešní technologie je schopna vyrobit i takzvané lepené magnety NdFeB, mají nižší koercitivní sílu než klasické magnety NdFeB, ale i tak je podstatně větší než u magnetů feritových. Jedná se o magnetický prášek ze vzácných zemin, spojený pojivem. Z toho plyne, že pro použití v točivých elektrických strojích bude rozhodující teplotní odolnost pojiva. Při mém hledání u různých výrobců jsem narazil na různé názvy těchto magnetů, jako například lepené magnety, plastové magnety atd. Výrobní postupy lepených magnetů se uvádí dva, vstřikování a lisování. Vstřikované jsou pro mé účely nevhodné kvůli malé teplotní odolnosti. Oproti tomu lisované magnety by mělo být možné použít, proto jsem ještě provedl další návrh úpravy s lepenými lisovanými magnety NdFeB, u kterých výrobci uvádí teplotní odolnost mezi 120°C a 140°C, což se liší podle druhů magnetů.

Jelikož koercitivní síla lepených magnetů NdFeB H_c je zhruba poloviční oproti klasickým magnetům NdFeB zvolil jsem pro prvotní model výšku magnetů 2 mm. Provedl jsem výpočet v programu FEMM. Výsledná indukce ve vzduchové mezeře B_δ měla velikost 0,34 T. Pro tuto hodnotu magnetické indukce jsem provedl návrh magnetického obvodu. Také jsem nepatrně zvětšil výšku vzduchové mezery na 0,6 mm.

Výpočet upravených rozměrů:

$B_\delta = 0,34 \text{ T}$ - indukce ve vzduchové mezeře

$B_{maxr} = 1,5 \text{ T}$ - maximální indukce v rotoru

$B_{maxs} = 1,9 \text{ T}$ - maximální indukce ve statoru

$d = 80 \text{ mm}$ - vnější průměr statoru

$h_{dm} = 78 \text{ mm}$ - délka magnetu

$h_h = 13,8 \text{ mm}$ - průměr hřídele

$h_\delta = 0,6 \text{ mm}$ - výška vzduchové mezery

h_{tz} - šířka těla zubu

h_k - výška statoru (kostry)

h_r - výška plechů rotoru

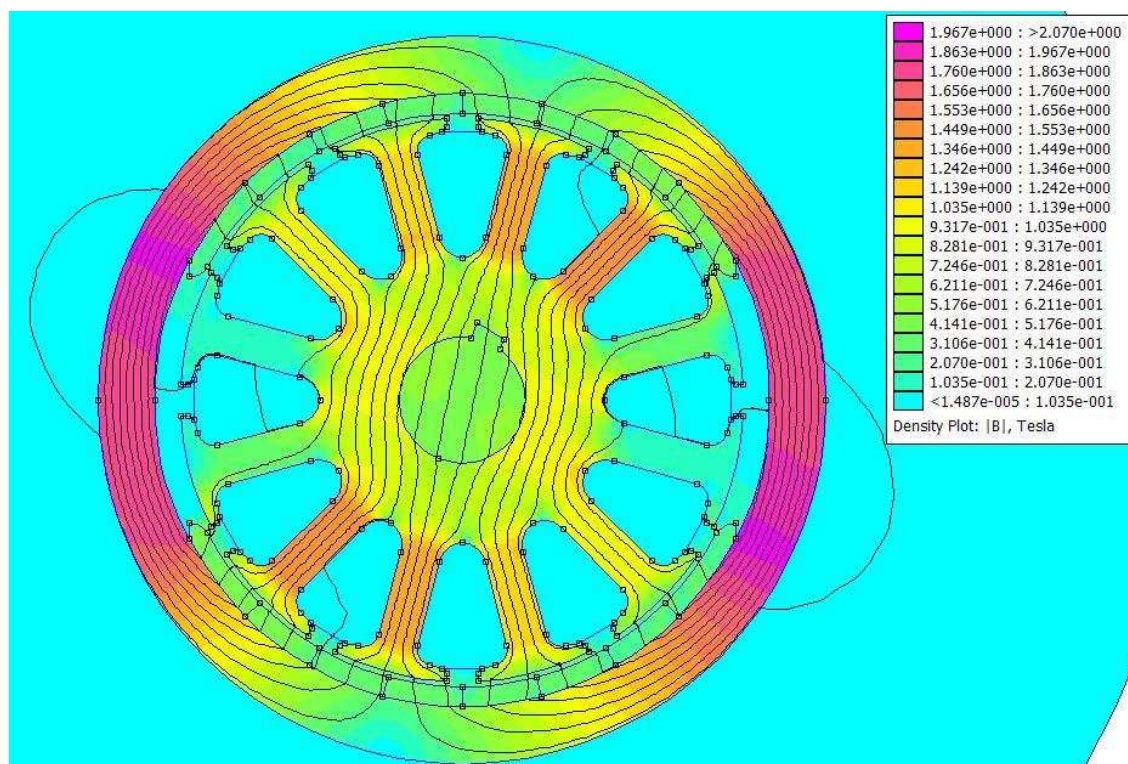
h_m - výška jednoho magnetu

$$B_\delta \cdot l \cdot h_{dm} = B_{r\max} \cdot l \cdot 4 \cdot h_{tz} \Rightarrow h_{tz} = \frac{B_\delta \cdot l \cdot h_{dm}}{4 \cdot B_{r\max} \cdot l} = \frac{B_\delta}{4 \cdot B_{r\max}} \cdot h_{dm} = \frac{0,34}{4 \cdot 1,5} \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{4,5 \text{ mm}}}$$

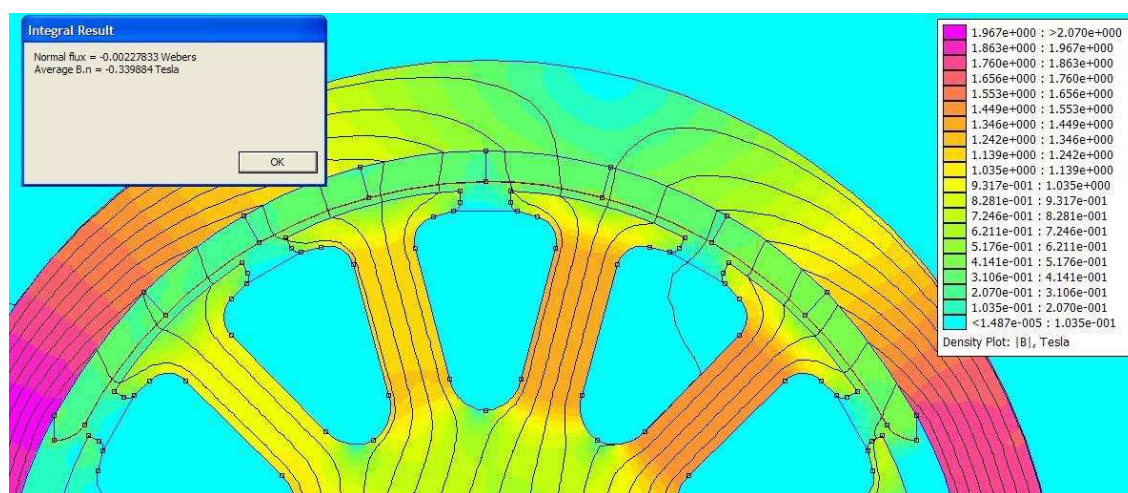
$$B_\delta \cdot l \cdot h_{dm} = B_{s\max} \cdot l \cdot 2 \cdot h_k \Rightarrow h_k = \frac{B_\delta \cdot l \cdot h_{dm}}{2 \cdot B_{s\max} \cdot l} = \frac{B_\delta}{2 \cdot B_{s\max}} \cdot h_{dm} = \frac{0,34}{2 \cdot 1,9} \cdot 78 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{6,6 \text{ mm}}}$$

$$h_r = \frac{d}{2} - (h_k + h_m + h_\delta + \frac{h_k}{2}) = \frac{80 \cdot 10^{-3}}{2} - (6,6 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 10^{-3} + 0,6 \cdot 10^{-3} + \frac{13,8 \cdot 10^{-3}}{2}) = \underline{\underline{23,9 \text{ mm}}}$$

Po upravení modelu dle vypočtených rozměrů jsem opět provedl celkový výpočet rozložení magnetické indukce v programu FEMM a výpočet ztrát.



Obrázek 60 Rozložení magnetické indukce v motorku s lepenými magnety NdFeB



Obrázek 61 Detail permanentního magnetu v motorku s lepenými magnety NdFeB

Výpočet ztrát:

$$\Delta P_{jN2} = \Delta P_j = \underline{\underline{13,92W}}$$

$$\Delta P_{FeN2} = \Delta P_{Fe} \cdot \frac{B_{N2}^2}{B^2} = 15,16 \cdot \frac{1,48^2}{1,57^2} = \underline{\underline{13,47W}}$$

$$\Delta P_{mN2} = \Delta P_m = \underline{\underline{22,92W}}$$

$$\Delta P_{N2} = \Delta P_{jN2} + \Delta P_{FeN2} + \Delta P_{mN2} = 13,92 + 13,47 + 22,92 = \underline{\underline{50,31W}}$$

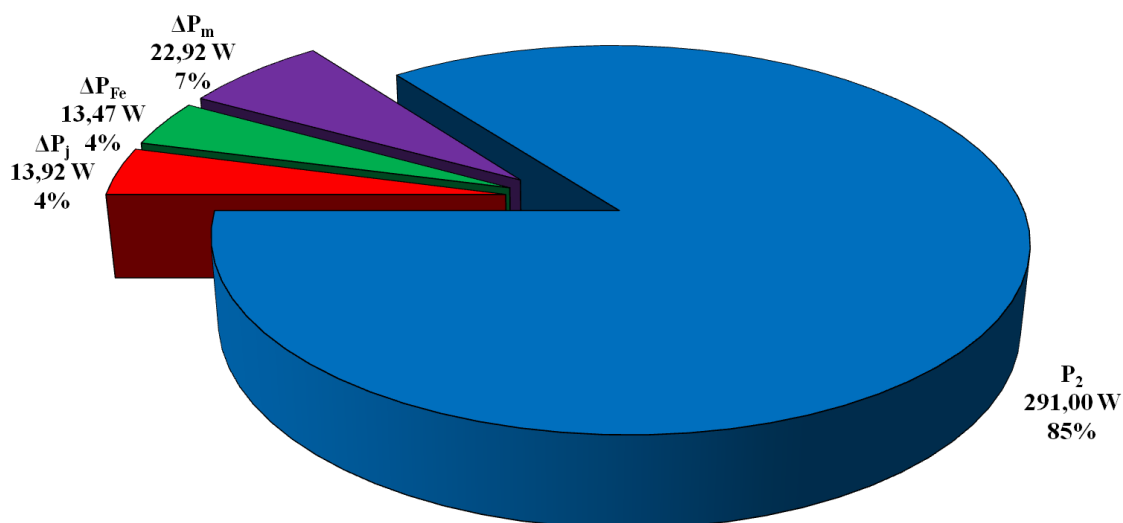
Opět platí, že ztráty v mědi i ztráty mechanické budou stejné jako u původního motorku.

$$\omega = \omega_{N2} \Rightarrow \frac{P_2}{M} = \frac{P_{2N2}}{M_{N2}} \Rightarrow P_{2N2} = P_2 \cdot \frac{M_{N2}}{M} = 232,8 \cdot \frac{1}{0,8} = \underline{\underline{291W}}$$

$$P_{1N2} = P_{2N2} + \Delta P_{N2} = 291 + 50,31 = \underline{\underline{341,31W}}$$

$$\eta_{N1} = \frac{P_{2N2}}{P_{1N2}} \cdot 100 = \frac{291}{341,31} \cdot 100 = \underline{\underline{85,3\%}}$$

Hodnoty bez indexu $N2$ jsou naměřené hodnoty původního motorku a hodnoty s indexem $N2$ jsou hodnoty upraveného motorku s lepenými magnety.



Obrázek 62 Rozložení výkonu a ztrát motorku s lepenými magnety NdFeB

Motorek	B_δ [T]	B_{max} [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
upravený 4, 12 drážek	0,340	2,07	1,00	2,0	62,0	90,0	50,31	13,92	13,47

Tabulka 23 Parametry motorku s lepenými magnety NdFeB

Použitím lepených magnetů NdFeB jsem dosáhl zvýšení výkonu, ale s menším nárůstem výšky statoru, tudíž i hmotnosti, oproti klasickým magnetům NdFeB.

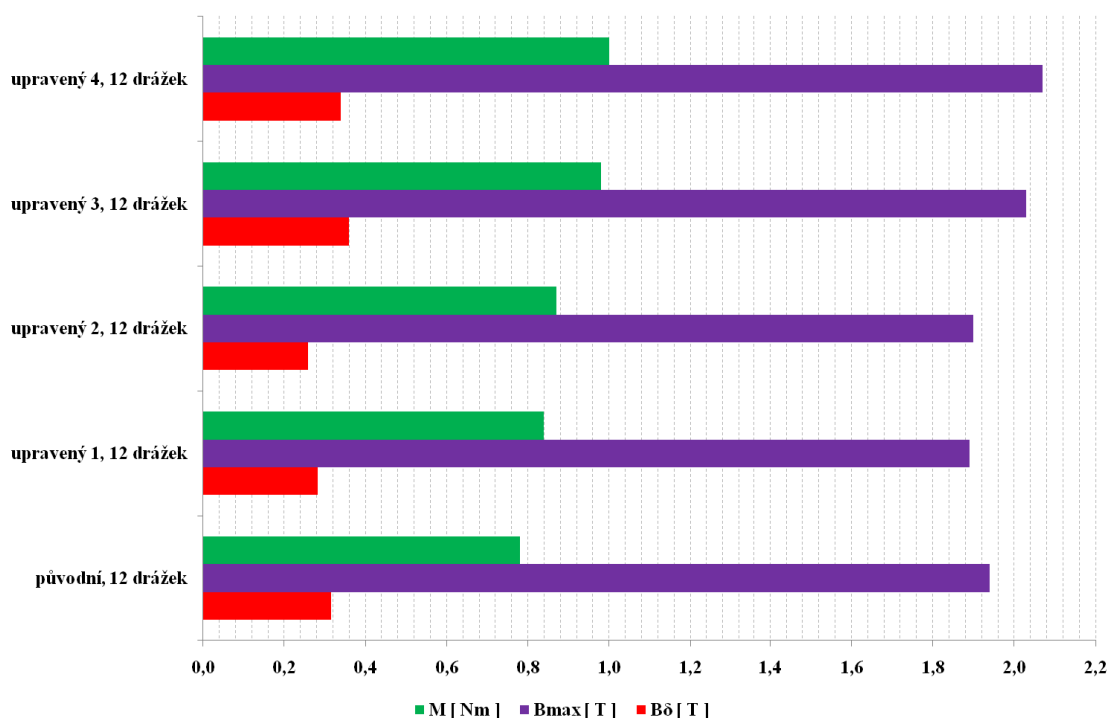
5.2 Porovnání výsledků navrhovaných úprav

V této kapitole porovnám a graficky zobrazím výsledky mých výpočtů. Nejprve provedu přehled pomocí tabulky.

Motorek	B_{δ} [T]	$B_{\max}$ [T]	M [Nm]	v_m [mm]	d_r [mm]	l [mm]	ΔP [W]	ΔP_j [W]	ΔP_{Fe} [W]
původní, 12 drážek	0,316	1,94	0,78	8,3	52,8	90,0	52,00	13,92	15,16
upravený 1, 12 drážek	0,282	1,89	0,84	5,6	57,9	100,0	49,94	14,95	12,07
upravený 2, 12 drážek	0,258	1,90	0,87	4,1	61,0	110,0	49,01	15,98	10,11
upravený 3, 12 drážek	0,360	2,03	0,98	1,0	60,0	90,0	52,00	13,92	15,16
upravený 4, 12 drážek	0,340	2,07	1,00	2,0	62,0	90,0	50,31	13,92	13,47

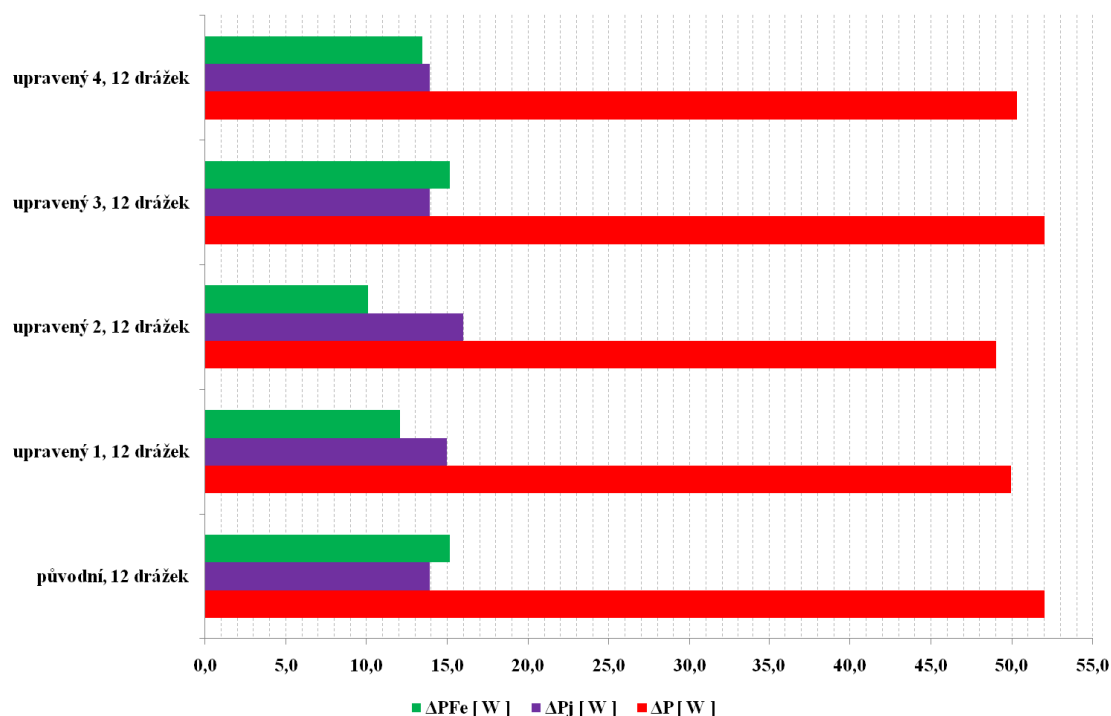
Tabulka 24 Parametry motorků

První graf zobrazuje porovnání magnetických indukcí a momentů všech upravených motorků i původního motoru P2SZ447.



Obrázek 63 Grafické porovnání vypočtených hodnot momentu a indukce

Na druhém grafu je znázorněno porovnání ztrát v motorech.



Obrázek 64 Grafické porovnání vypočtených hodnot ztrát

Z výsledků mých výpočtů jsem usoudil, že nejlepší motorek pro realizaci je upravený motorek 4, ve kterém byly nahrazeny stávající magnety za lepené magnety z NdFeB. Tento motorek, jak jsem dříve vypočetl, má největší moment tudíž i výkon a pracuje s největší účinností. Z grafů je vidět že má i největší hodnotu maximální magnetické indukce B_{max} což ovšem nevadí, protože tato velká magnetická indukce se nachází jen ve velmi malé části statoru. Celkové rozložení magnetické indukce ve statoru je velmi podobné jako u původního motorku.

6 ZÁVĚR

V této práci jsem sestavil přehled stejnosměrných motorků malého výkonu. Porovnal jsem parametry těchto stejnosměrných motorků. Dále jsem podrobně rozebral stejnosměrný motorek s permanentními magnety P2SZ447 vyráběný firmou ATAS elektromotory Náchod a.s. Také jsem navrhl možné inovace tohoto motorku a některé použil pro inovaci motorku s permanentními magnety P2SZ447.

První část je zaměřena na průzkum a porovnání stejnosměrných motorků s permanentními magnety malého výkonu, které jsou dostupné na trhu jak u nás tak v zahraničí. Porovnával jsem několik parametrů, kterými byli napájecí napětí, napájecí proud, výkon, jmenovitý moment, otáčky a hmotnost stejnosměrných motorků. Mnou zkoumané parametry jsem vynesl do grafů.

Ve druhé části jsem se zabýval analýzou stejnosměrného motoru. Vybral jsem si stejnosměrný komutátorový motor s permanentními magnety od firmy ATAS elektromotory Náchod a.s. typ P2SZ447. Pro analýzu mi poskytla firma části své technické dokumentace k tomuto stejnosměrnému motorku s permanentními magnety. Také mi byly poskytnuty podklady z měření tohoto motorku P2SZ447, které již dříve proběhlo na ústavu UVEE VUT Brno. Provedl jsem také své vlastní měření na motorku P2SZ447. Z výsledků obou měření, které jsem vynesl do grafů, vyplívá, že motor je dobře navržen, protože největší účinnost má při jmenovitém momentu. Dále jsem také provedl analýzu ztrát motorku P2SZ447. Při jmenovitém momentu jsem vypočetl rozložení ztrát. Ztráty v železe tvořili 5 %, ztráty ve vinutí 5 % a mechanické ztráty 8 % z příkonu motorku. Účinnost motorku P2SZ447 byla přibližně 82 %.

Dále jsem zkoumal možnosti inovace stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Zaměřil jsem se na kostru, magnety, a plechy rotoru. Navrhl jsem výměnu permanentních magnetů za magnety ze vzácných zemin NdFeB nebo SmCo. Také jsem navrhl přepočítat plechy rotoru z 12 drážek na 16, na podnět firmy ATAS elektromotory Náchod a.s., aby bylo možno navíjet rotorové vinutí strojově. Jako poslední významnější úpravu jsem navrhnul vyrábět kostru z přesných bezešvých trubek, které mají přesnější vnitřní průměr, z čehož plyne přesnější šířka vzduchové mezery a snižuje se pravděpodobnost vzniku parazitní vzduchové mezery mezi kostrou a permanentním magnetem.

Poslední část mé práce obsahuje výpočty a návrhy konkrétních inovací motorku P2SZ447. Propočítal jsem několik variant. Pro výpočty jsem používal program FEMM, který používá pro výpočet metodu konečných prvků. Některé výpočty jsem prováděl ručně.

Jako nejrealizovatelnější variantu jsem vybral motorek označený jako *upravený 4*. V tomto motorku jsem nahradil původní permanentní magnety permanentními magnety ze vzácných zemin NdFeB. Také předpokládám výrobu statoru (kostry) z přesných bezešvých trubek. Materiál rotorových plechů jsem použil totožný s původním motorkem P2SZ447. Jelikož jsem použil lisované magnety NdFeB, které mají větší koerzivní sílu než původní magnety, musel jsem zvětšit výšku statoru a šířku zubů rotorových plechů. Vinutí jsem ponechal původní bez úprav. Mými úpravami jsem zvýšil moment motorku a tím i posléze výkon motorku. Provedl jsem rozbor ztrát v motorku. Rozložení ztrát upraveného motorku bylo následující: ztráty v železe tvořili 4 %, ztráty ve vinutí 4% a mechanické ztráty 7 % z příkonu motorku při zvýšeném jmenovitém momentu na 1 Nm. Celková účinnost upraveného motorku při jmenovitém momentu byla 85 %.

Stejné rozložení ztrát měl i motorek, u kterého jsem počítal s klasickými permanentními magnety NdFeB. Ten měl však menší výkon a značnou nevýhodou byla vyšší hmotnost oproti motorku s lepenými magnety. Větší hmotnost vyplývá z nutnosti použít stator o značné výšce, aby nedocházelo k přesycování statoru. Také výška klasických magnetů z NdFeB by byla značně malá a složitě vyrobitelná.

U motorků, které jsem prodloužil, jako jednu z možností inovace, jsem sice přišel ke kladným výsledkům, ale ve vzorci pro výpočet ztrát v železe uvažuji konstantní hmotnost rotorových plechů. Dle mého názoru tato podmínka bude při prodloužení rotoru těžce splnitelná a domnívám se, že ztráty v železe budou ve výsledku vyšší. Zvýšení ztrát v železe je negativní efekt, který ve výsledku může vést k ještě nižší účinnosti upravených motorků, než měl původní motorek P2SZ447. U motorků, u kterých nezvětšuji délku rotoru, je toto zjednodušení přípustné, protože rozšíření rotoru je možno vykompenzovat hlubšími drážkami rotoru.

Z důvodů, které jsem uvedl výše, se domnívám, že nejvýhodnějším motorkem, z mnou upravených motorků, je motorek označený v práci jako *upravený 4*. Domnívám se, že do budoucna by bylo velmi dobré provést tepelnou analýzu motorku a zhotovit prototyp, na kterém by se provedlo měření, které by více či méně potvrdilo mé výpočty.

LITERATURA

- [1] <http://www.atas.cz/files/P2SZ.PDF>
- [2] <http://www.aps-svet.cz/index.php?menu=16>
- [3] <http://www.uzimex.cz/Vyrobce/maxon-motor-ag/Motory-DC/Rada-RE.html>
- [4] http://www.iskra-ae.com/alba_cat/php/kframe.php?lang=E
- [5] <http://www.boschmotorsandcontrols.co.uk/elektromotoren/produkt/0130111042/index.htm>
- [6] [http://www.buehlermotor.com/C12572D40025EAF8/vwContentByKey/W274AHF5391WEBREN/\\$FILE/DC-motor-1_13_075_en.pdf](http://www.buehlermotor.com/C12572D40025EAF8/vwContentByKey/W274AHF5391WEBREN/$FILE/DC-motor-1_13_075_en.pdf)
- [7] http://www.kag-hannover.com/fileadmin/benutzerdaten/pdf_datenblaetter/buerstenbehaftet/motoren/m80/M80x80-24V-211011.pdf
- [8] <http://www.engel-elektromotoren.de/produkte/gnm/gnm-5480e/>
- [9] ATAS elektromotory Náchod a.s. – podklady od výrobce
- [10] http://dce.felk.cvut.cz/ip/prednasky/IP_elektropohony.pdf
- [11] https://www.feec.vutbr.cz/et/skripta/uvee/Elektricke_stroje_L.pdf
- [12] www.martin.feld.cvut.cz/~petr/VSZ.ppt
- [13] http://www.promag.cz/Permanentni_magnety.pdf
- [14] <http://www.stanfordmagnets.com/nd-fe-b.html>
- [15] <http://www.wamag.cz/smco.php>
- [16] <http://www.magnety.sk/public/media/3284/KATALOG%20MAGNETY%200809.pdf>
- [17] http://www.trubky.eu/trubky_bezesve_presne.php
- [18] <http://sites.google.com/site/karelmls/simulan-program-femm>
- [19] <http://www.stanfordmagnets.com/smco-magnets.html>
- [20] <http://www.wamag.cz/ndfeb.php>
- [21] <http://www.trubky.eu/galerie.php>

PŘÍLOHY