

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

NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO LODNÍHO MOTORU PRO POHON ČLUNU

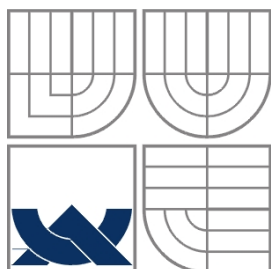
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

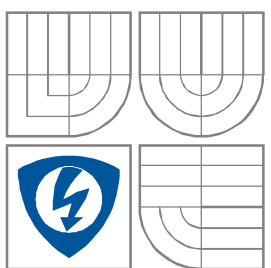
Ondřej Hudák

BRNO 2010



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

NÁVRH STEJNOSMĚRNÉHO LODNÍHO MOTORKU PRO POHON ČLUNU

THE DESIGN OF DC MOTORS FOR TRACTION OF A MOTORBOAT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

ONDŘEJ HUDÁK

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. FRANTIŠEK VESELKA, CSc.

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: Ondřej Hudák

Ročník: 3

ID: 83719

Akademický rok: 2009/10

NÁZEV TÉMATU:

Návrh stejnosměrného lodního motorku pro pohon člunu

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Vypočtete základní parametry stroje.
2. Navrhněte konstrukční úpravy vybraného stroje z běžné produkce.
3. Ověřte jeho parametry a zpracujte posouzení výsledků.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího

Termín zadání: 1. 10. 2009

Termín odevzdání: 27. 5. 2010

Vedoucí projektu: doc. Ing. František Veselka, CSc.

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.

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou návrhu stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Teoreticky seznamuje s problematikou kluzného kontaktu a řeší inovací v této oblasti. se zaměřením na kluzný kontakt stejnosměrného stroje. Součástí práce je praktické ověření teoretických předpokladů na vybraném stroji z běžné produkce.

Abstract

The bachelor thesis deals with the problems of design of Permanent Magnet DC Motor. The theoretical part explains the problems of sliding contact and solves the innovation in this area with specialization on the sliding contact of DC motor. The other part contains practical verification of theoretical assumptions on the selected machine of normal production.

Klíčová slova:

Kartáč; komutátor; kluzný kontakt; motor; magnet; stejnosměrný motor s permanentními magnety.

Keywords:

Brush; commutator; DC motor with a permanent magnet; Motor; magnet; sliding contact.

Bibliografická citace

Hudák, O. Návrh stejnosměrného lodního motorku pro pohon člunu, Brno: FEKT VUT v Brně, 2010. 58 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. František Veselka, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Návrh stejnosměrného motoru pro pohon člunu 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

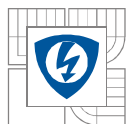
Podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Františku Veselkovi, CSc. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Firmě Hukos s.r.o. za zapůjčení termokamery. Firmě ESPO Rožnov s.r.o. a Ing. Alanu Vaňkovi za poskytnutí podkladů k vybranému stroji.

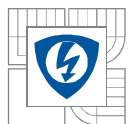
V Brně dne

Podpis autora



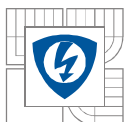
OBSAH:

1 ÚVOD	11
2 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU	12
2.1 POSTUP ŘEŠENÍ MAGNETICKÉHO OBVODU STEJNOSMĚRNÉHO STROJE	12
2.2 VOLBA DRUHU PERMANENTNÍCH MAGNETŮ	14
2.3 VÝPOČET MAGNETICKÉ INDUKCE VE VZDUCHOVÉ MEZEŘE	14
2.4 URČENÍ VODIVOSTI VZDUCHOVÝCH CEST	20
2.5 VÝPOČET MOMENTU ELEKTRICKÉHO STROJE	21
2.6 VÝPOČET INDUKOVANÉHO NAPĚTÍ	23
2.7 SPOTŘEBA PERMANENTNÍCH MAGNETŮ NA JEDNOTKU MOMENTU	25
2.8 INFORMACE O ZÁKLADNÍCH PARAMETRECH ZVOLENÉHO STROJE	27
2.9 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ STROJE	28
3 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY KLUZNÉHO KONTAKTU VYBRANÉHO STROJE Z BĚŽNÉ PRODUKCE	29
3.1 FYZIKÁLNÍ ZÁKLADY	29
3.1.1 POHYB KARTÁČE PO KOMUTÁTORU	29
3.1.2 PATINA	30
3.1.3 PRŮCHOD PROUDU KLUZNÝM KONTAKTEM	31
3.1.4 PODSTATA KOMUTACE	31
3.1.5 REAKCE KOTVY	33
3.1.6 KOMUTACE ELEKTRICKÉHO STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	34
3.2 ELEKTRICKÉ A MECHANICKÉ VLASTNOSTI KARTÁČŮ	35
3.2.1 MĚRNÝ ELEKTRICKÝ ODPOR	35
3.2.2 PŘECHODOVÝ ÚBYTEK NAPĚTÍ	36
3.2.3 SOUČINITEL TŘENÍ	37
3.2.4 TVRDOTA KARTÁČŮ	37
3.2.5 PROUDOVÉ ZATÍŽENÍ KARTÁČŮ	37
3.2.6 OBVODOVÁ RYCHLOST	38
3.2.7 TLAK NA KARTÁČE	39
3.3 INOVOVANÉ PROVEDENÍ KARTÁČŮ PRO STEJNOSMĚRNÝ POHON A JEJICH PŘEDPOKLÁDANÝ PŘÍNOS	39
4 MĚŘENÍ NA VYBRANÉM STROJI A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	42
4.1 MĚŘENÍ VYSTUPOVÁNÍ LAMEL	42
4.2 DLOUHODOBÉ ZKOUŠKY OPOTŘEBENÍ UHLÍKOVÉHO KARTÁČE	43
4.2.1 MĚŘENÍ VELIKOSTI OPOTŘEBENÍ UHLÍKOVÉHO KARTÁČE V PŮVODNÍM PROVEDENÍ	45
4.2.2 MĚŘENÍ OPOTŘEBENÍ UHLÍKOVÉHO KARTÁČE V PROVEDENÍ S „T“	47
4.3 MĚŘENÍ TEPLoty STROJE V USTÁLENÉM CHODU S KLUZNÝM KONTAKTEM V PŮVODNÍM PROVEDENÍ A INOVOVANÝM KLUZNÝM KARTÁČEM „S T“	49
4.4 ZKOUŠKY ZATÍŽENÉHO STROJE	53
4.5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ ZKOUŠEK	55
5 ZÁVĚR	56
LITERATURA	57

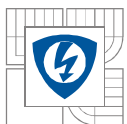


SEZNAM OBRÁZKŮ:

Obr. 2.1.1 - Geometrie vzduchové mezery pod hlavním pólem.....	12
Obr. 2.1.2- Znázornění geometrie magnetického obvodu	13
Obr. 2.1.3-Náhradní schéma magnetického obvodu	13
Obr. 2.3.1-Magnetický obvod stejnosměrného stroje s permanentními magnety	15
Obr. 2.3.2-Náhradní schéma magnetického obvodu	15
Obr. 2.3.3- Grafické určení magnetického toku vzduchovou mezerou, konstrukce pracovní (δ'') a rozptylové (σ) přímků.....	17
Obr. 2.3.4-Idealizovaná demagnetizační křivka magneticky tvrdých materiálů.....	17
Obr. 2.3.5- Analytický výpočet pracovního bodu.	18
Obr. 2.5.1-Rozvinutý obvod kotvy	21
Obr. 2.5.1- Magnetický obvod stroje.....	23
Obr. 2.7.1-Vznik tečného magnetického tahu F a momentu M_i při pootočení rotoru o úhel $d\varphi$...	25
Obr. 2.7.2-Idealizovaný průběh indukce ve vzduchové mezeře stejnosměrného stroje	26
Obr. 3.1.1-Znázornění podmínek vzniku tření a orientace třecí síly.....	29
Obr. 3.1.2-Průběh proudu v jedné cívice v závislosti na čase	31
Obr. 3.1.3-Průběh proudu v jedné cívice v závislosti na čase	32
Obr. 3.1.4-Znázornění principu komutace	32
Obr. 3.1.5- Průběh indukovaného napětí v otáčejícím se závitě.....	32
Obr. 3.1.6-Znázornění průběhu magnetického pole dvupólového stroje	33
Obr. 3.1.7-Porovnání indukčností rotorového obvodu motoru buzených P a PM	34
Obr. 3.3.1-Konstrukční řešení kartáče s aplikovanou vrstvou teflonu na odběhové hraně	39
Obr. 4.2.1-Schéma zapojení zkoušeného stroje.....	43
Obr. 4.2.2-Znázornění měřicího pultu.....	43
Obr. 4.2.3-Uspořádání sběracího ústrojí a znázornění polarita kartáčů	44
Obr. 4.2.4-Měření výšky kartáče	45
Obr. 4.2.5-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů bez úprav na době běhu	46
Obr. 4.2.6-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů bez úprav na době běhu	46
Obr. 4.2.7- Uspořádání inovovaného kartáče.....	47
Obr. 4.2.8-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů v provedení „s T' “ na době běhu	48
Obr. 4.2.9-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů v provedení „s T'' “ na době běhu	48
Obr. 4.3.1-MobIR ® M4.....	49
Obr. 4.3.2-Vnější povrch stroje s třecím uzlem v provedení "s T'' "	50

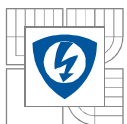


Obr. 4.3.3-Vnější povrch stroje s třecím uzlem bez úprav	50
Obr. 4.3.4-Zadní čelo stroje s třecím uzlem bez úprav	50
Obr. 4.3.5-Zadní čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"	50
Obr. 4.3.6- Přední čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"	51
Obr. 4.3.7-Přední čelo stroje s třecím uzlem bez úprav.....	51
Obr. 4.3.8- Třecí uzel stroje bez úprav.....	51
Obr. 4.3.9- Třecí uzel stroje v provedení "s T"	51
Obr. 4.3.10- Porovnání výsledných teplot.....	52
Obr. 4.4.1-Schematické znázornění uchycení motoru s hřídelí a lodním šroubem na člunu.....	53
Obr. 4.4.2-Lodní šroub.....	53
Obr. 4.4.3- 2. varianta sběrného ústrojí s držáky kartáčů v provedení „s T“	54
Obr. 4.4.4-1. varianta sběrného ústrojí s držáky kartáčů v provedení „s T“	54
Obr. 4.4.5-Kombinace předchozích variant	54



SEZNAM TABULEK:

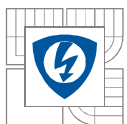
<i>Tab. 2.2.1- Vybrané fyzikální vlastnosti magneticky tvrdých anizotropních materiálů[2]</i>	14
<i>Tab. 2.8.1-Parametry motoru PGN 1510</i>	28
<i>Tab. 4.2.1-Přítlačná síla pružin kartáčů</i>	44
<i>Tab. 4.2.2-Naměřené hodnoty opotřebení kartáčů bez provedených úprav</i>	45
<i>Tab. 4.2.3-Naměřené hodnoty opotřebení kartáčů s T</i>	47
<i>Tab. 4.3.1- MobIR ® M4 - Technická specifikace</i>	49
<i>Tab. 4.3.2- Porovnání výsledných teplot</i>	52



1 ÚVOD

Práce se zabývá problematikou návrhu stejnosměrného motoru s permanentními magnety a ověřování jeho vlastností dlouhodobými zkouškami.

Teoreticky i prakticky je studována problematika kluzného kontaktu, který je nečastější příčinou problémů u komutátorových strojů. Na základě teoretických podkladů, zabývajících se principem a problematikou kluzného kontaktu, byly navrženy a realizovány inovovaná řešení. Součástí práce je také praktickým ověřením teoretických předpokladů na vybraném stroji z běžné produkce.



2 VÝPOČET ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ STEJNOSMĚRNÉHO MOTORU

2.1 Postup řešení magnetického obvodu stejnosměrného stroje

Magnetické vlastnosti popisují Maxvelovy rovnice, které se používají pro řešení magnetického obvodu [1].

Platí:

$$\operatorname{rot} H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2.1.1)$$

$$\operatorname{div} B = 0$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2.1.2)$$

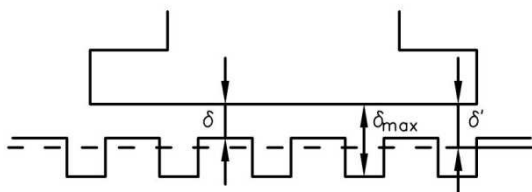
Pro magnetický obvod: $Hdl = \sum i \quad (2.1.3)$

Při návrhu magnetického obvodu zanedbáváme:

- Rozptyl vinutí,
- hysterezi - skutečný pracovní bod je závislý na počátečních podmínkách,
- vířivé proudy – působí proti změně původního magnetického pole,
- předpokládáme rovněž, že celý tok ze vzduchové mezery prochází železem.

Při řešení magnetických obvodů počítáme se vzduchovou mezerou pod pólem zvětšenou Carterovým činitelem ($k_c = f(\delta, t, b_z)$).

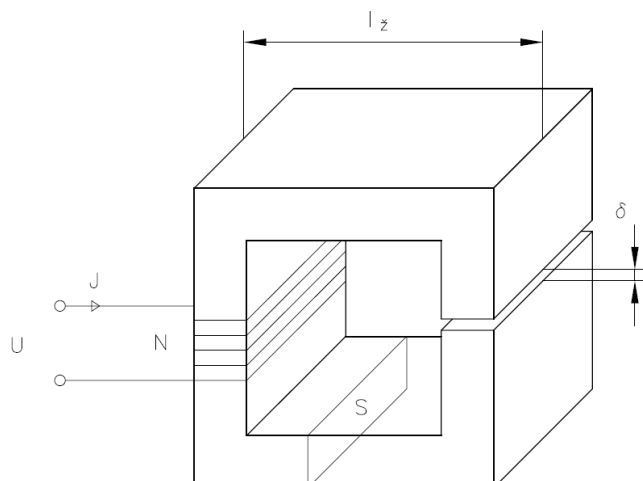
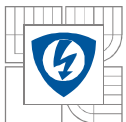
$$\delta' = k_c \delta$$



Obr. 2.1.1 - Geometrie vzduchové mezery pod hlavním pólem

Legenda:

- δ – mechanická velikost vzduchové mezery
 δ_{max} – maximální velikost vzduchové mezery
 δ' – volená velikost vzduchové mezery



Obr. 2.1.2- Znárodnění geometrie magnetického obvodu

Intenzita magnetického pole:

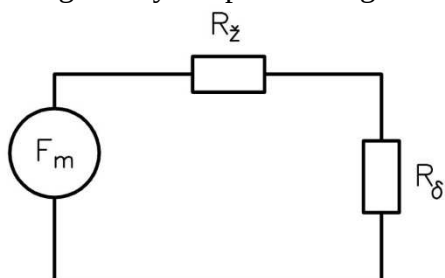
a) pro vzduch
$$B = \mu_0 B \left[\frac{W_s}{m^2}, \frac{H}{m^2} = A \right] \quad (2.1.4)$$

b) pro železo ji určujeme ze závislosti
$$B = f(H) \quad (2.1.5)$$

Magnetomotorická síla:

$$F_m = H_z \cdot l = H \cdot \delta [A, A/m, m] \quad (2.1.6)$$

Pro magnetický tok platí analogie Ohmova zákona:



$$\Phi = \lambda \cdot F_m \left[V_s, \frac{V_s}{A} = \Omega_s, A \right] \quad (2.1.7)$$

$$\text{Kde: } \lambda = \frac{1}{R_m}$$

$$B \cdot S = \mu_0 \mu_r H_s = \mu_0 \mu_r \frac{N \cdot I}{l} S \quad (2.1.8)$$

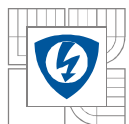
Obr. 2.1.3-Náhradní schéma magnetického obvodu

$$\Phi = F_m \cdot \lambda \quad (2.1.9)$$

Při výpočtu magnetických obvodů platí analogie obvodů magnetických a elektrických (Kirchofovy zákony), ale neplatí však princip superpozice, protože $B = f(H)$ železa je nelineární.

$$\oint H dl = \sum i \quad (2.1.10)$$

$$\int_1^2 H_1 dl + \int_2^3 H_2 dl + \dots = \sum i \quad (2.1.11)$$



2.2 Volba druhu permanentních magnetů

Výrobci permanentních magnetů nabízejí celou škálu různých materiálů, z nichž lze ve stavbě elektrických strojů použít pouze magneticky tvrdé anizotropní materiály. Ty se podle fyzikálních vlastností dělí na tři hlavní typy:

- magnety slitinové (slitiny AlNiCo a Ticonal),
- magnety feritové s přísadou kysličníku BaO nebo SrO,
- a magnety na bázi vzácných zemin typu RCO_5 .

Přehled některých fyzikálních vlastností jednotlivých typů materiálů je uveden v tabulce tab. 2.2.1. Parametry a cena materiálu permanentních magnetů mají rozhodující vliv na konstrukci, uspořádání a vlastnosti stejnosměrného motoru.

Tab. 2.2.1- Vybrané fyzikální vlastnosti magneticky tvrdých anizotropních materiálů[2]

Typ materiálu	Litý magnet	Ferit	RCO_5
Jakostní součinitel $(BH)_{\max}$ [kJ m ⁻³]	60 až 72	min. 26,2	208
Remanentní indukce B_r [T]	1,25 až 1,4	min. 0,38	1,025
Koercitivní síla B_Hc [kA m ⁻¹]	60 až 72	min. 247	760
Měrná hmotnost ρ_m [kg m ⁻³]	7350	4800	8100

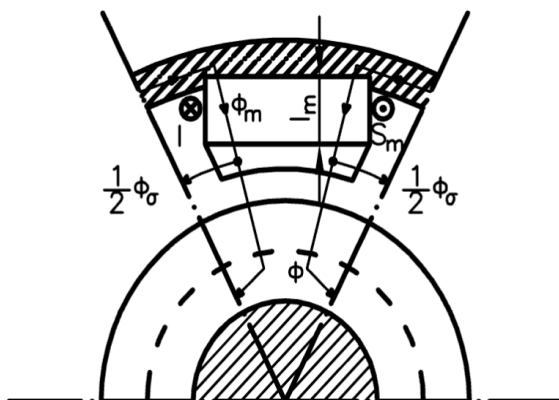
2.3 Výpočet magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Důležitou součástí návrhu stejnosměrného stroje je správné určení velikosti magnetické indukce [2] ve vzduchové mezeře a výpočet magnetického toku při známých rozměrech magnetického obvodu včetně magnetů.

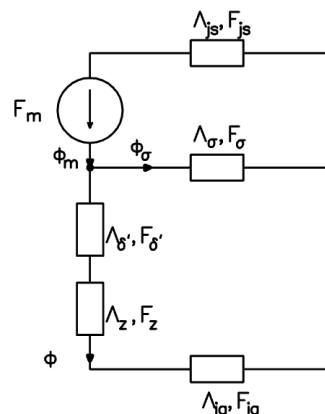
Typické uspořádání magnetického obvodu jedné pólové rozteče stejnosměrného stroje s permanentními magnety je na obr. 2.3.1. Permanentní magnety zde nahrazují budící vinutí.

Pro výpočet magnetického obvodu bylo zvoleno náhradní schéma na obr. 2.3.2, kde byla použita některá zjednodušení:

- Vzhledem k nízké indukci v pólových nástavcích byl jejich magnetický odpor zanedbán.
- Větší část rozptylového toku se uzavírá z pólového nástavce a je buzen téměř plným magnetickým napětím magnetu. Při výpočtu rozptylu z boků magnetů bude přihlédnuto k Částečnému spřažení toku s magnetem a k anizotropii permanentního magnetu.



Obr. 2.3.1-Magnetický obvod
stejnoseměrného stroje s permanentními
magnety



Obr. 2.3.2-Náhradní schéma
magnetického obvodu

Indukční čáry magnetického toku nejsou spřaženy s žádným vnějším budícím proudem I (obr. 2.3.1), oběhové napětí podél uzavřené indukční čáry je nulové $F_m + F_{\delta'} + F_{Fe} = 0$. Definuje-li se velikost nasycení železa k_z jako poměr $k_z = \frac{F_{Fe} + F_{\delta'}}{F_{\delta'}}$, kde $F_{\delta'}$ je magnetické napětí na vzduchovou mezeru δ' s vlivem drážkování a F_{Fe} je magnetické napětí na železnou část obvodu, lze pro magnetické napětí magnetu psát:

$$F_m = H_m l_m = -(F_{\delta'} + F_{Fe}) = -F_{\delta'} \left(1 + \frac{F_{Fe}}{F_{\delta'}} \right) = -k_z F_{\delta'} \quad (2.3.1)$$

Kde H_m je intenzita póle v prostoru magnetu a l_m je délka magnetu ve směru průchodu magnetického toku a kolmo na plochu magnetu $S_m = b_m + l_m$

Celkový magnetický tok Φ_m buzený magnetem zahrnuje rozptylový tok Φ_σ a hlavní tok $\Phi_m = B_m S_m$ jdoucí vzduchovou mezerou $\delta' = k_c \delta$ (k_c je Carterův činitel, δ je mechanická vzduchová mezera). Pro celkový magnetický tok platí:

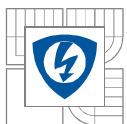
$$\Phi_m = B_m S_m = \Phi + \Phi_\sigma = \Phi \left(1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} \right) = R_\sigma \Phi \quad (2.3.2)$$

Rozptylový tok $\Phi_\sigma = \Lambda_\sigma F_\sigma$ podle (obr. 2.3.2) buzen magnetickým napětím $F_\sigma = F_{\delta'} + F_{Fe} - F_{js}$, Po zanedbání magnetického napětí na jeho statoru F_{js} bude činitel rozptylu

$$k_\sigma = \frac{\Phi_m}{\Phi} = 1 + \frac{\Phi_\sigma}{\Phi} = 1 + \frac{\Lambda_\sigma (F_{\delta'} + F_{Fe} - F_{js})}{\Lambda_{\delta'} F_{\delta'}} \doteq 1 + \frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_{\delta'}} k_z \quad (2.3.3)$$

V praktických výpočtech se často činitel nasycení železa k_z zanedbává, což může vést k velkým chybám, zvláště při vyšším nasycení $k_z > 1,5$.

Zvětšení magnetického odporu obvodu vlivem nasycení železa lze ve výpočtech uvažovat ekvivalentním zvětšením vzduchové mezery na hodnotu $\delta'' = \delta' k_z = k_c \delta k_z$ jejíž magnetická vodivost je $\Lambda_{\delta''} = \mu_o S_\delta / \delta''$



Po zavedení tzv. prostorové vodivosti magnetu $\lambda_m = \frac{S_m}{l_m} [m]$ lze definovat pracovní přímku magnetu se směrnici:

$$tg\alpha = \frac{B_m}{H_m} = -\mu_0 \frac{k_\sigma S_\sigma}{k_z \delta''} \cdot \frac{l_m}{S_m} \doteq -\frac{k_\sigma \Lambda_{\delta''}}{\lambda_m} \quad (2.3.4)$$

a rozptylovou přímku:

$$tg\gamma = \frac{\phi_\sigma}{H_m S_m} = \frac{\Lambda_\sigma}{H_m l_m} \cdot \frac{F_\sigma}{S_m / l_m} = -\frac{\Lambda_\sigma}{\lambda_m} \cdot \frac{F_\sigma}{F_\sigma + F_{js}} \doteq -\frac{\Lambda_\sigma}{\lambda_m} \quad (2.3.5)$$

Záporné znaménko umísťuje obě přímky do druhého kvadrantu, úhly α a γ se v příslušném měřítku $\left[\frac{T}{A/m}\right]$ stanovují vůči kladné poloose H .

Odpovídající hodnoty intenzity pole H_m a indukce B_m v prostoru magnetu jsou vzájemně pevně vázány magnetizační křivkou permanentního magnetu, jejíž část ve druhém kvadrantu bývá označována jako demagnetizační charakteristika.

Průsečík P demagnetizační charakteristiky s pracovní přímkou δ'' udává pracovní bod magnetu a určuje skutečnou hodnotu indukce B_m a intenzity pole H_m v magnetu v závislosti na tvaru magnetického obvodu.

Pomocí rovnic (2.3.4) a (2.3.5) se pro magnetický tok vzduchovou mezerou dá odvodit vztah:

$$\Phi = \Phi_m - \Phi_\sigma = H_m(tg\alpha - tg\gamma)S_m = B'_m S_m \quad (2.3.6)$$

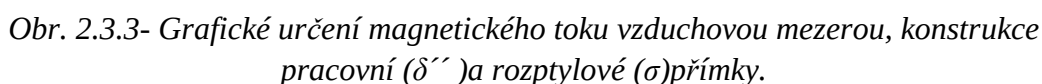
Rovnici (2.3.6) lze matematicky chápat tak, že indukce v magnetu $B_m = H_m tg\alpha$ se rozdělí na fiktivní indukci $B'_m = H_m(tg\alpha - tg\gamma)$, určující tok vzduchovou mezerou $\Phi = B'_m S_m$ a rozptylovou indukci $B_\sigma = H_m tg\gamma$, určující rozptylový tok $\Phi_\sigma = B_\sigma S_m$, čili že platí:

$$B'_m = B_m - B_\sigma \quad (2.3.7)$$

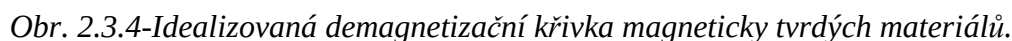
Ve skutečnosti je v magnetu jediná indukce B_m a větší část plochy magnetu S_m budí tok mezerou δ , zatímco zbytek plochy připadá na rozptyl.

Fiktivní indukce B'_m je podle rovnice (2.3.7) a obr. 2.3.3 určena svislou vzdáleností pracovního bodu P od rozptylové přímky σ .

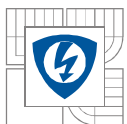
Grafické určování magnetického toku mezerou podle rovnice (2.3.7) a kreslením obr. 2.3.3 je poměrně zdlouhavé a proto se nepoužívá k posuzování jednotlivých variant magnetického obvodu s mírně odlišnými rozměry permanentních magnetů.



Stejného postupu lze použít i u materiálů s nelineární demagnetizační křivkou, kde je předem zvolena poloha pracovního bodu. V tomto případě je demagnetizační křivka nahrazena přímkou procházející pracovním bodem P a bodem remanentní indukce B_r . Hodnota μ_r pak neurčuje relativní permeabilitu materiálu, ale směrnici idealizované demagnetizační přímky obr. 2.3.4b.



Legenda: a, ferit, vzácné zeminy RCo₅
b, lité magnety AlNiCo Ticonal



Podle obr. 2.3.4a je rovnice idealizované demagnetizační přímky ve tvaru:

$$B_m = B_r + \mu_o \mu_r H_m \quad (2.3.8)$$

Pracovní bod je určen průsečíkem pracovní přímky a idealizované demagnetizační křivky (2.3.8):

$$B_r = - \left(\frac{k_\sigma \Lambda_{\delta''}}{\lambda_m} + \mu_o \mu_r \right) H_m \quad (2.3.9)$$

Eliminací H_m pomocí rovnic (2.3.1) a (2.3.19) lze najít velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře:

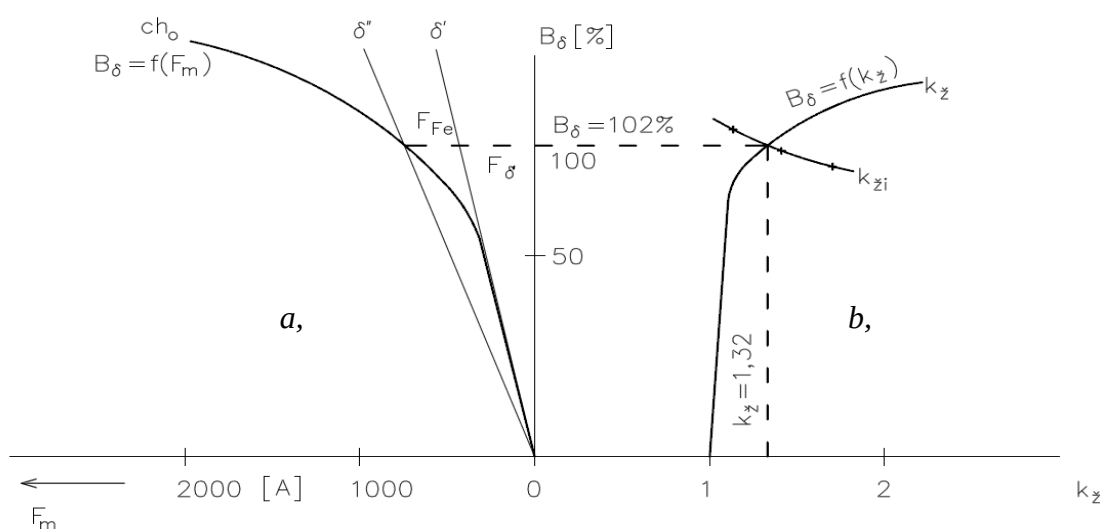
$$B_\delta = \frac{B_r}{\mu_r \frac{\delta''}{l_m} + k_\sigma \frac{S_\delta}{S_m}} = \frac{B_r}{k_z \left(\frac{\mu_r \delta'}{l_m} + \frac{\Lambda_\sigma}{\Lambda_{\delta'}} \cdot \frac{S_\delta}{S_m} \right) + \frac{S_\delta}{S_m}} \quad (2.3.10)$$

Při výpočtu indukce B_δ jsou v rovnici (2.3.10) všechny veličiny předem známé s výjimkou činitele k_z který zpětně závisí na hledané indukci B_δ .

Rovnice (2.3.10) je velmi užitečná tím, že podle ní lze velmi rychle posoudit vliv změny vzduchové mezery δ' , délky magnetů l_m a poměru ploch magnetů a vzduchové mezery S_m/S_δ na velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře.

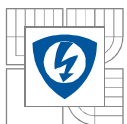
K nalezení skutečné indukce ve vzduchové mezeře je třeba znát magnetizační charakteristiku stroje $ch_o = B_\delta = f(F_m)$ a z ní podle vztahu (2.3.1) vypočítat závislost $B_\delta = f(k_z)$, viz obr. 2.3.3.

Pro několik zkusmo volených hodnot k_{zi} (obvykle 1,2; 1,5 a 2) se dle rovnice (2.3.10) vypočtou příslušné indukce $B_{\delta i}$. Průsečík křivek k_z a k_{zi} (obr. 2.3.5b) udává skutečný pracovní bod se známými hodnotami indukce B_δ a činitele nasycení obvodu k_z .



Obr. 2.3.5- Analytický výpočet pracovního bodu.

Legenda: a, Magnetizační charakteristika stroje.
b, Činitel nasycení železa.



Další charakteristické veličiny magnetického obvodu se stanoví již z dříve definovaných vztahů.

Magnetický tok procházející vzduchovou mezerou:

$$\Phi = B_{\delta} S_{\delta} \quad (2.3.11)$$

Ze vztahů (2.3.19) a (2.3.1) lze stanovit intenzitu magnetického pole v magnetu. Výsledek je záporný (pracovní bod je ve druhém kvadrantu).

$$H_m = - \frac{B_{\delta} k_z \delta'}{\mu_o l_m} \quad (2.3.12)$$

Činitel rozptylu:

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\Lambda_{\sigma}}{\Lambda_{\delta'}} k_z \quad (2.3.13)$$

Magnetický tok magnetu:

$$\Phi_m = k_{\sigma} \Phi \quad (2.3.14)$$

Indukce v magnetu:

$$B_m = \frac{\Phi_m}{S_m} \quad (2.3.15)$$

Magnetické napětí magnetu (záporné číslo):

$$F_m = H_m l_m \quad (2.3.16)$$

Magnetické napětí na vzduchovou mezeru (kladné číslo):

$$F_{\delta'} = - \frac{F_m}{k_z} \quad (2.3.17)$$

Magnetické napětí na železnou část obvodu (kladné číslo):

$$F_{Fe} = -F_m - F_{\delta'} \quad (2.3.18)$$

Při přesném výpočtu musí platit:

$$F_{\delta'} = \frac{B_{\delta}}{\mu_o} \delta' \quad (2.3.19)$$

Vodivost vzduchové mezery s vlivem nasycení:

$$\Lambda_{\delta}'' = \mu_o \frac{S_{\delta}}{k_z \delta'} \quad (2.3.20)$$

Směrnice pracovní přímky (záporné číslo):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_m}{H_m} = - k_{\sigma} \frac{\Lambda_{\delta}''}{\lambda_m} \quad (2.3.21)$$

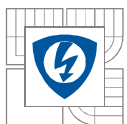
Směrnice rozptylové přímky (kladné číslo):

$$\operatorname{tg} \gamma = - \frac{\Lambda_{\sigma}}{\lambda_m} \quad (2.3.22)$$

Rozptylový magnetický tok

$$\Phi_{\sigma} = \Phi_m - \Phi \quad (2.3.23)$$

Rostoucí teplota se projevuje poklesem remanentní indukce a snížením magnetického toku. V rámci přesnosti uváděné výpočetní metody a v rozsahu oteplení magnetů na skutečných



strojích stačí do rovnice (2.3.10) za remanentní indukce dosazovat její sníženou hodnotu při oteplení magnetu $\Delta\vartheta_m$.

$$B_{r\vartheta} = B_{r20} (1 + \alpha\Delta\vartheta_m) \quad (2.3.24)$$

Činitel α je záporný a do dosahuje těchto hodnot:

$$\alpha = -0,002 \text{ K}^{-1} \quad \text{pro feritové magnety,}$$

$$\alpha = -0,0002 \text{ K}^{-1} \quad \text{pro lité magnety typu AlNiCo,}$$

$$\alpha = -0,0005 \text{ K}^{-1} \quad \text{pro magnety RCO}_5.$$

2.4 Určení vodivosti vzduchových cest

Návrh magnetického obvodu [2] s permanentními magnety může být značně ovlivněn výpočtem rozptylu, který se v praxi jen odhaduje, přičemž správnost odhadu nelze jednoznačně kontrolovat.

Při výpočtu rozptylové vodivosti Λ_σ je vhodné celý rozptylový prostor rozdělit na řadu paralelně a sériově spojených dílčích prostorů, jejichž vodivost lze jednoduše vypočítat. Vlastní výpočet rozptylových vodivostí zde pro značnou rozsáhlost nebude uváděn.

Z důvodů symetrie obvykle stačí počítat rozptylové vodivosti Λ_σ pouze pro prostor jednoho pólu. Rozptylový magnetický tok je dán vztahem:

$$\Phi_\sigma = \Lambda_\sigma F_\sigma \quad (2.4.1)$$

kde za magnetické napětí F_σ , budící rozptylový tok, lze přibližně brát plné magnetické napětí magnetu F_m .

Rozptylový tok je však buzen plným napětím $F_\sigma = F_m$ pouze tehdy, vystupuje-li z ekvipotencionální plochy (např. z pólového nástavce nebo hrany).

Při výstupu toku z boků magnetů magnetické napětí narůstá z nuly na hodnotu F_m , takže jeho průměrná velikost je poloviční. K formálnímu zachování vzorce (2.4.1) se počítá s plným magnetickým napětím, ale tzv. činitel vazby $1/2$ se zahrnuje do příslušných vzorců k výpočtu rozptylové vodivosti. Pro výpočet poměru $\Lambda_\sigma/\Lambda_\delta$ je ještě nutno stanovit náhradní vodivost vzduchové mezery s vlivem drážkování:

$$\Lambda_{\delta'} = \mu_0 \frac{S_\delta}{\delta} \quad (2.4.2)$$

Plocha vzduchové mezery je určena ideálním pólovým krytím α_i , pólovou roztečí a ideální délkou vzduchové mezery l_i :

$$S_\delta = \alpha_i \tau l_i \quad (2.4.3)$$

Velikost poměru $\Lambda_\sigma/\Lambda_{\delta'}$ může dosáhnout i hodnot kolem 0,5, což vede k činiteli rozptylu $R_\sigma > 1,5$.

2.5 Výpočet momentu elektrického stroje

Na vodič délky l protékající proudem i , jenž se nachází v magnetickém poli o indukci B , působí síla:

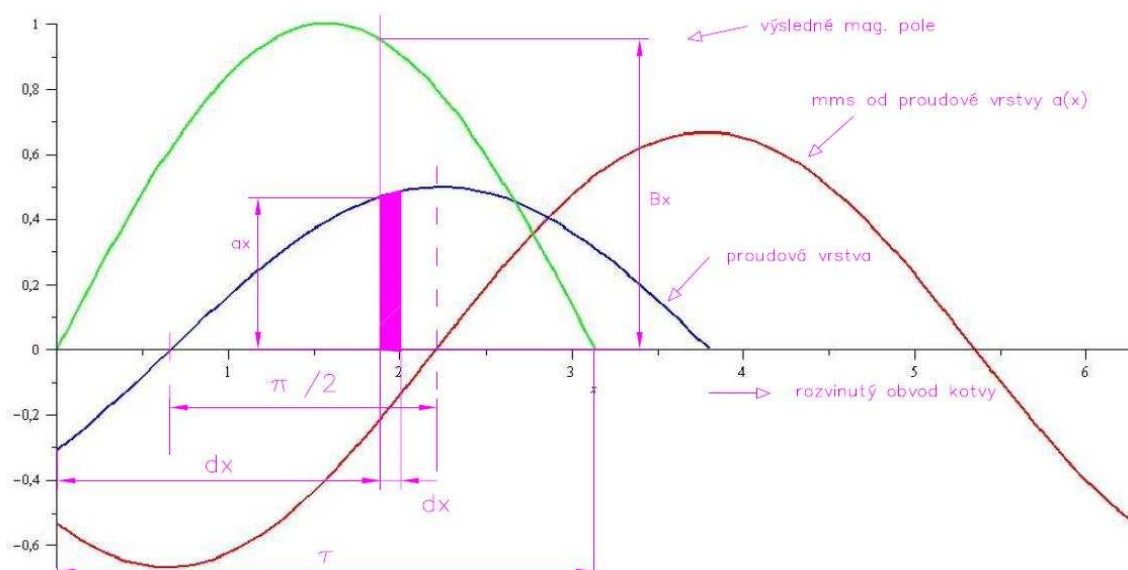
$$F = B \cdot i \cdot l \quad (2.5.1)$$

Je-li uspořádání vodiče takové, že se může otáčet, vzniká točivý moment [1], rovný součinu (síla $\times$ rameno). V elektrických točivých strojích je toto rameno síly rovno poloměru kotvy $D/2$.

Poněvadž obvykle bývá na obvodu kotvy rozloženo mnoho vodičů, musíme jednotlivé síly, eventuelně momenty sčítat, abychom dostali výsledný točivý moment.

Představíme-li si reálné vinutí na kotvě protékané proudem, že je nahrazeno ekvivalentní proudovou vrstvou, dosazujeme místo proudu ve vodiči element lineární proudové vrstvy $a(x)$, který se nachází v místě, kde magnetické pole má indukci $B(x)$. Celkovou sílu (respektive moment) dostaneme integrací podél celého obvodu kotvy.

Ve většině případů stačí však provést integraci pouze podél jedné pólové rozteče a tento výsledek násobit počtem pólů, poněvadž pod každou pólovou roztečí jsou poměry stejné.



Obr. 2.5.1-Rozvinutý obvod kotvy

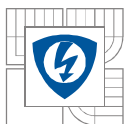
Podle obr. 2.5.1. Působí na element proudu $a(x) dx$, jenž se nachází v místě x , kde mag. pole má indukci $B(x)$, element tažné síly:

$$dF = B(x) \cdot a(x) \cdot d(x) \cdot l \quad (2.5.2)$$

Element momentu je pak:

$$dM = dF \frac{D}{2} \quad (2.5.3)$$

kde D je průměr kotvy (eventuelně vrtání statoru).



Moment působící na jeden pól (tj. pólovou rozteč τ) dostaneme jako integrál:

$$\int_0^\tau B(x) \cdot a(x) \cdot l \cdot \frac{D}{2} dx \quad (2.5.4)$$

Moment podél celého obvodu stroje (2p pólů)

$$M = 2p \cdot l \cdot \frac{D}{2} \int_0^\tau B(x) \cdot a(x) dx \quad (2.5.5)$$

$$M = p \cdot D \cdot l \int_0^\tau a(x) \cdot B(x) dx \quad (2.5.6)$$

Zde značí:

$a(x)$ - intenzita lineární proudové vrstvy [Am^{-1}],

$B(x)$ – indukce,

D - průměr kotvy eventuálně vrtání statoru [m],

l - délka kotvy [m],

p - počet pólových dvojic,

τ - pólová rozteč [m],

(Moment vyjde v Nm).

Je zcela lhostejné, jakým způsobem pole s prostorovým průběhem indukce $B(x)$ vzniklo. Fyzikálním faktem je, že tažná síla (eventuálně moment) vzniká vždy tam, kde v nějakém poli se nacházejí vodiče protékané proudem (pro snadnější výpočet se tyto diskrétně rozložené vodiče nahrazují proudovou vrstvou).

Je nutné si uvědomit, že proudová vrstva se projevuje jako magnetomotorická síla, která má samozřejmě magnetické účinky, tj. dá vznik fiktivnímu magnetickému poli (Φ_2).

Je-li ve stroji již nějaké jiné magnetické pole, (Φ_1) pak se tato pole skládají ve výsledné pole (Φ_m). V tomto magnetickém poli (Φ_m) se pak nacházejí vodiče, které toto pole „pomáhaly spolutvořit“ a toto pole pak na ně působí tak, že vzniká točivý moment.

Je důležité si uvědomit, že moment vzniká působením výsledného pole na vodič, které se samy spolupodílejí na vytváření tohoto pole.

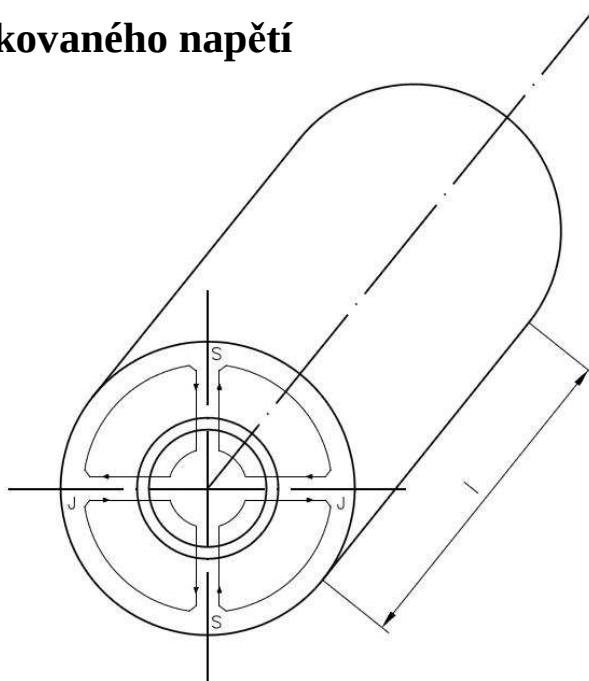
Je zřejmé, že táž vlna „výsledného pole“ působí na proudy v rotoru stejně jako ve statoru. Proto můžeme výsledný moment počítat z výsledného pole a proudové vrstvy buď statoru, nebo rotoru. Výsledek musí být (až na znaménko) stejný, protože stator působí na rotor stejným momentem jako rotor na stator.

Rozložíme nyní proudovou vrstvu i indukci Fourierovým rozvojem na základní harmonickou a vyšší harmonické. Uvážíme-li, že obecně:

$$\int_0^{2\pi} \sin mx \cdot \sin rx \cdot dx = 0 \quad \text{pro } m \neq r \quad (2.5.7)$$

pak točivý mohou vytvářet pouze ty vlny proudové vrstvy a magnetické indukce, které mají stejnou délku vlny.

2.6 Výpočet indukovaného napětí



Obr. 2.5.1- Magnetický obvod stroje.

Předpokládejme sinusový průběh indukce ve vzduchové mezeře [1].

B_m - max. indukce pod pólem [T]

γ - krok závitů [m]

s - vzdálenost osy závitů od osy pólu [m]

1. Indukce v místě x :

$$B_x = B_m \cdot \cos\left(\frac{x}{2\tau} \cdot 2\pi\right) = B_m \cdot \cos\left(\frac{x}{\tau} \cdot \pi\right) \quad (2.6.1)$$

2. Cívka: ($\gamma = \tau, \gamma < \tau$)

poměrný krok: $\beta = \frac{\gamma}{\tau} \leq 1$

3. Obecná poloha cívky: vzdálenost os pólu a cívky = s

Výpočet:

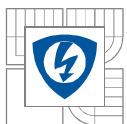
1. Stanovení spřaženého toku:

Magnetický tok:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = l \int_{x_1}^{x_2} B(x) dx \quad (2.6.2)$$

a) Tok jednoho pólu:

$$\begin{aligned} \Phi_1 &= l \int_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} B_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) dx = B_m \cdot l \left[\frac{\tau}{\pi} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \right]_{-\frac{\tau}{2}}^{+\frac{\tau}{2}} = \frac{B_m \cdot l \cdot \tau}{\pi} \left[\sin\frac{\pi}{2} - \right. \\ &\quad \left. \sin\left(\frac{-\pi}{2}\right) \right] = \frac{2}{\pi} \cdot B_m \cdot l \cdot \tau \end{aligned} \quad (2.6.3)$$



b) Tok procházející cívkou v obecné poloze:

Meze integrace budou: dolní $s - \beta \frac{\pi}{2} = a$

horní $s + \beta \frac{\pi}{2} = b$

Tok procházející závitem cívky:

$$\Phi' = l \int_a^b B_m \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) dx = \frac{B_m \cdot l \cdot \tau}{\pi} \left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \right]_a^b \quad (2.6.4)$$

$$\left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \right]_a^b = \sin\left[\frac{\pi}{\tau} \left(s + \beta \frac{\pi}{2}\right)\right] - \sin\left[\frac{\pi}{\tau} \left(s - \beta \frac{\pi}{2}\right)\right]$$

použijeme vztahu: $\sin(x \pm y)$

$$\left[\sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot x\right) \right]_a^b = \sin\left(\frac{\pi}{\tau} s + \beta \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{\tau} s - \beta \frac{\pi}{2}\right) = 2 \cos\left(\frac{\pi}{\tau} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot \beta\right)$$

$$\Phi' = \frac{B_m \cdot l \cdot \tau}{\pi} 2 \cos\left(\frac{\pi}{\tau} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot \beta\right) = \frac{2}{\pi} \cdot B_m \cdot l \cdot \tau \cdot \cos\left(\frac{\pi}{\tau} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot \beta\right)$$

Výraz: $\frac{2}{\pi} \cdot B_m \cdot l \cdot \tau$ - tok jednoho pólu = Φ_1

$$\Phi' = \Phi_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau} s\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau} \cdot \beta\right) \quad (2.6.5)$$

Diskuse:

- $\beta = 1, s = 0, \Phi' = \Phi_1$ (tok jednoho pólu)
- $s = \frac{\tau}{2}, \Phi' = 0$ (ukázat graficky zrušení toku)
- Ukázka, že $\frac{2}{\pi} B_m \cdot l \cdot \tau \cdot \sin\left(\beta \cdot \frac{\pi}{\tau}\right)$ je tok závitem se zkráceným krokem, když závit je v poloze sousedě s pólem ($s = 0$).

c) Má-li cívka N_c závitů, zavádíme pojem spřaženého toku

$$\psi = N_c \cdot \Phi' \quad (2.6.6)$$

fyzikálně neteče větší tok, ale jeho účinky na sériové závity se sečítají

$$\psi = f(B, s) \quad (2.6.7)$$

2. Výpočet indukovaného napětí

$$u_{ic}(t) = N_c \cdot \frac{d\Phi'}{dt} \quad (2.6.8)$$

Výraz:

$$s \cdot \frac{\pi}{\tau} = \frac{\pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \Omega \cdot t}{\frac{\pi D}{2p}} = \Omega \cdot p \cdot t \quad (2.6.9)$$

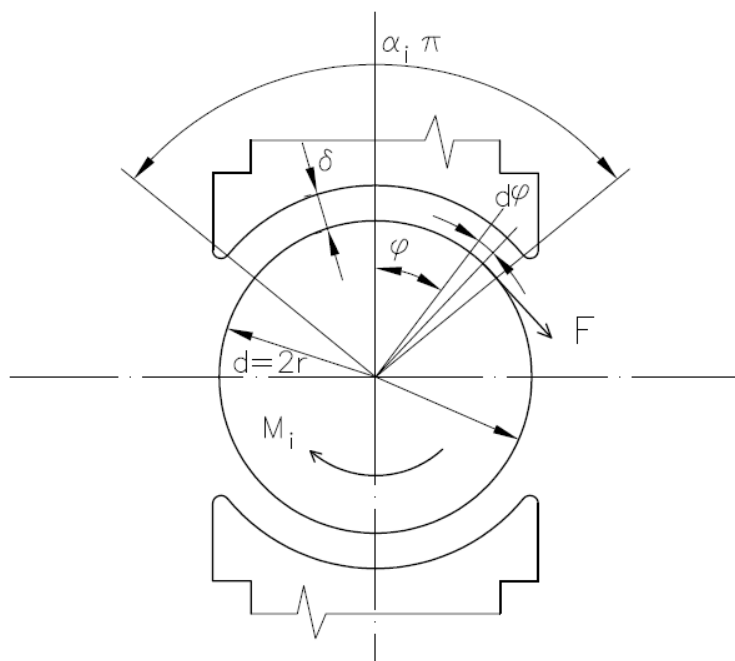
$\omega = \Omega \cdot p$ - kruhový kmitočet elektrický pro p-pólů.

$$\psi(t) = N_c \cdot \Phi_m \cdot \cos(\omega t) \cdot \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \beta\right) \quad (2.6.10)$$

2.7 Spotřeba permanentních magnetů na jednotku momentu

Cena jednotky energie akumulované v magnetickém poli permanentního magnetu dává jistou představu o vhodnosti použitého materiálu. Pro vlastní návrh aktivních rozměrů stroje je však podstatně názornější stanovení spotřeby nebo ceny magnetu na jednotku momentu.

Vztah mezi energií magnetického pole W ve vzduchové mezeře a vnitřním momentem M_i ve vzduchové mezeře lze najít následující úvahou (obr. 2.7.1).



Obr. 2.7.1-Vznik tečného magnetického tahu F a momentu M_i při pootočení rotoru o úhel $d\varphi$

Z teorie strojů je známo, že při natočení rotoru o velice malý úhel $d\varphi$ se povrch rotoru posune o úsek $ds = r d\varphi$, přičemž se vykoná (motor) nebo spotřebuje (generátor) práce $dA = F ds$ která se rovna změně energie magnetického pole ve vzduchové mezeře dW v původní a pootočené poloze.

Mezi rotorem a statorem vzniká tečná tažná síla:

$$F = \frac{dW}{ds} = \frac{dW}{r d\varphi} \quad (2.7.1)$$

která ve vzduchové mezeře na rameni $r = \frac{d}{2}$ vytvoří vnitřní moment:

$$M_i = Fr = \frac{dW}{d\varphi} \quad (2.7.2)$$

Velmi zjednodušeně lze předpokládat, že při chodu naprázdno je podél oblouku $\alpha_i \tau$ indukce B_o ve vzduchové mezeře δ konstantní. Odpovídající energie magnetického pole v mezeře je pro všechny póly (obr. 2.7.2a)

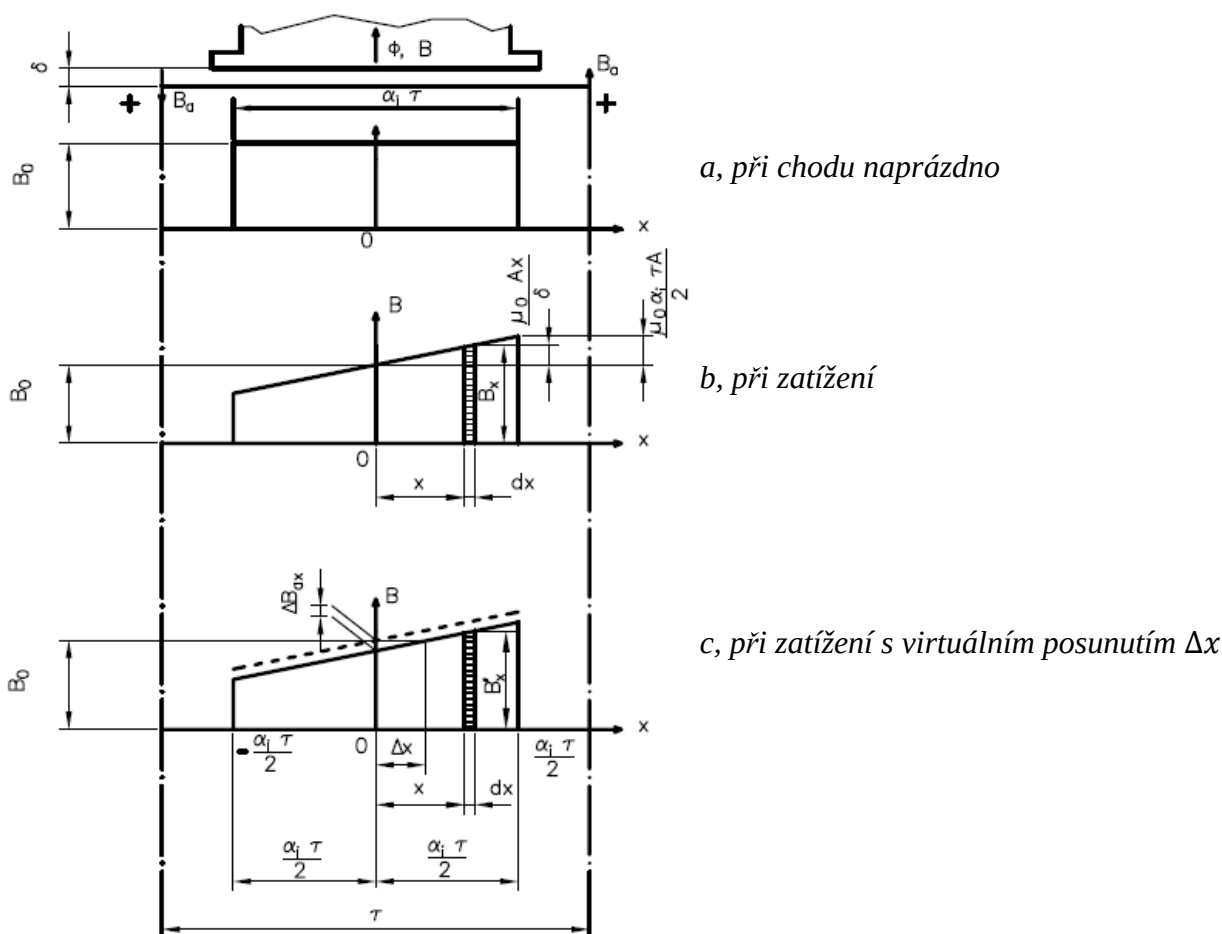
$$W_o = \frac{1}{2} B_o H_o 2p \alpha_i \tau l \delta = \frac{B_o^2}{2\mu_o} 2p \delta \alpha_i \tau l \quad (2.7.3)$$

Při zatížení se vlivem reakce kotvy zdeformuje průběh pole v mezeře (obr. 2.7.2b), na jedné polovině pólu ve vzdálenosti x k nárůstu indukce o hodnotu $\Delta B = \mu_o \frac{A x}{\delta}$. Na druhé polovině se pole zeslabí. Při zanedbání nasycení železa se bude indukce pod pólem měnit lineárně podle vztahu

$$B_x = B_o + \frac{\mu_o A}{\delta} x \quad (2.7.4)$$

Odpovídající energie magnetického pole ve vzduchové mezeře pod všemi póly dosáhne hodnoty:

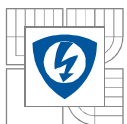
$$W = \int \frac{1}{2} B_x H_x dV = \int_{-\frac{\alpha_i \tau}{2}}^{\frac{\alpha_i \tau}{2}} \frac{1}{2} \frac{B_x^2}{\mu_o} 2p l \delta dx = \frac{2p \delta \alpha_i \tau l}{2 \mu_o} \left[B_o^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\mu_o \alpha_i \tau A}{2 \delta} \right)^2 \right] \quad (2.7.5)$$



Obr. 2.7.2-Idealizovaný průběh indukce ve vzduchové mezeře stejnosměrného stroje

Při myšleném a velice malém (tj. virtuálním) natočení rotoru o úsek Δx se také posune průběh magnetické indukce vybuzené reakcí kotvy (obr. 2.7.2c). Vůči původní poloze dojde podél celého oblouku k poklesu indukce o hodnotu:

$$\Delta B_{ax} = \mu_o \frac{A \Delta x}{\delta} \quad (2.7.6)$$



Průběh indukce pod pólem bude zjednodušeně opět lineární:

$$B'_x = B_x - \Delta B_{ax} = B_o - \frac{\mu_o A \Delta x}{\delta} + \frac{\mu_o A}{\delta} x \quad (2.7.7)$$

Po virtuálním pootočení rotoru se energie ve vzduchové mezeře pod všemi póly změní na hodnotu:

$$W' = \frac{2p \delta \alpha_i \tau l}{2 \mu_o} \left[B_o^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{\mu_o \alpha_i \tau A}{2 \delta} \right)^2 - \frac{2 B_o \mu_o A}{\delta} \cdot \Delta x + \left(\frac{\mu_o A}{\delta} \right)^2 \Delta x^2 \right] \quad (2.7.8)$$

Virtuálním pootočením rotoru o úsek $\Delta x = r \Delta \varphi$ došlo k virtuální změně (poklesu) energie ve vzduchové mezeře o hodnotu:

$$\Delta W = W - W' = \frac{2p \delta \alpha_i \tau l}{2 \mu_o} \left[\frac{2 B_o \mu_o A}{\delta} \Delta x - \left(\frac{\mu_o A}{\delta} \right)^2 \Delta x^2 \right] \quad (2.7.9)$$

Je-li virtuální posuv velice malý, lze v rovnici (2.7.9) hodnotu Δx^2 zanedbat jako nekonečně malou veličinu druhého řádu.

Nekonečně malé změny energie dW a úhlu natočení $d\varphi$ lze nahradit konečnými virtuálními změnami ΔW a $\Delta\varphi$. Pro vnitřní moment stroje pak platí:

$$M_i = \frac{dW}{d\varphi} = \frac{\Delta W}{\Delta\varphi} = \frac{r \Delta W}{\Delta x} = \frac{d}{2} \cdot \frac{2p \delta \alpha_i \tau l}{2 \mu_o} \cdot \frac{2 B_o \mu_o A}{\delta} \quad (2.7.10)$$

Což po vykrácení dá známý vztah odvozený běžně z výkonové rovnice stejnosměrného stroje $\tau = \pi d / 2p$

$$M_i = \alpha_i \cdot \frac{\pi}{2} A \cdot B_o \cdot d^2 \cdot l \quad (2.7.11)$$

Vztah mezi spotřebou permanentního magnetu o hmotnosti m_m a odpovídajícím vnitřním momentem stroje M_i lze uvést ve tvaru:

$$\frac{m_m}{M_i} = \frac{2 R_\sigma R_z \rho_m}{\mu_o \cdot d / 2 \delta} \cdot \frac{B_o}{A B_m H_m} = K \cdot \frac{B_o}{A B_m H_m} \quad (2.7.12)$$

Činitel K závisí výrazně na měrné hmotnosti permanentního magnetu Q_m ostatní veličiny nelze příliš ovlivnit konstrukčním uspořádáním stroje nebo volbou materiálu permanentních magnetů.

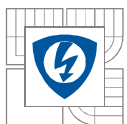
Z rovnice (2.7.12) lze tedy orientačně vypočítat spotřebu materiálu permanentních magnetů na jednotku momentu stroje s pracovním bodem např. v místě maximálního jakostního součinu $(BH)_{max}$.

Pracovní bod se obvykle volí mimo optimální hodnotu $(BH)_{max}$, indukce v permanentním magnetu se více blíží remanentní indukci B_m , což se projevuje větší spotřebou materiálu.

Skutečné hodnoty poměru m_m / M_i budou poněkud vyšší (u správně navržených strojů asi o 25 až 50 %).

2.8 Informace o základních parametrech zvoleného stroje

S ohledem na cíle bakalářské práce a momentální možnosti ÚVEE FEKT VUT v Brně byl nakonec na doporučení vedoucího práce vybrán z katalogu firmy ESPO s.r.o. již vyrobený stejnosměrný motor s permanentními magnety typ: PGN 1510



Tab. 2.8.1-Parametry motoru PGN 1510

PGN 1510			
Výkon [kW]	1,1	Odpor [Ω]	0,27
Jmen. otáčky	2000	Počet lamel	75
Napětí kotvy [V]	80	Počet pólů	4
Proud kotvy [A]	16,1	Druh vinutí	vlnité
Krytí	IP:20	Drážek	25
Počet drážek	25	Průměr	94,6mm
Délka železa [mm]	95	Délka železa	95mm
Počet cívek	25	Počet cívek	25
Cívek v drážce	3	Počet závitů	3/3/3
Cu hmotnost [kg]	1,4	Cívek v drážce	3

Díky vstřícnému přístupu této firmy byly ÚVEE poskytnuty i některé části technické dokumentace.

2.9 Výpočet základních parametrů stroje

Výpočet momentu M na hřídeli stroje z daného výkonu a jmenovitých otáček stroje:

$$M = \frac{P_n}{\omega} = \frac{P_n \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot n} = \frac{1100 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 2000} = \underline{5,2521 \text{ Nm}}$$

Při výpočtu síly F působící na hřídel, vycházíme ze základního vztahu pro výpočet momentu. Délka ramene l je rovna poloměru kotvy $d/2$ v našem případě $d = 94,6\text{mm}$.

Výpočet magnetické indukce B_δ ve vzduchové mezeře pro kotvu, s délkou železa $l = 95\text{mm}$ a počtem aktivních vodičů 112,5.

$$F = B \cdot i \cdot l$$
$$B_\delta = \frac{F}{i \cdot l} = \frac{111,0381}{16,1 \cdot 0,095 \cdot 112,5} = \underline{0,6453 \text{ T}}$$

Výpočet celkového magnetického toku Φ stroje:

$$\Phi = B_\delta \cdot S [\text{Wb}]$$
$$\Phi = B_\delta \cdot l \cdot l_v = B_\delta \cdot l \cdot \pi \cdot D \cdot \frac{\alpha}{360}$$
$$\Phi = 0,6453 \cdot 0,095 \cdot \pi \cdot 0,096 \cdot \frac{65^\circ}{360} = 0,0033 \text{ Wb}$$

3 KONSTRUKČNÍ ÚPRAVY KLIZNÉHO KONTAKTU VYBRANÉHO STROJE Z BĚŽNÉ PRODUKCE

Táto kapitola, se zabývá problematikou kluzného kontaktu a na základě teoretických poznatků se posuzují možnosti kluzného kontaktu stejnosměrného motoru s permanentními magnety. Úpravy budou probíhat v rámci technických možností podle doporučení vedoucího práce. Předpokládá se postupná aplikace jednotlivých komponentů „s T“.

3.1 Fyzikální základy

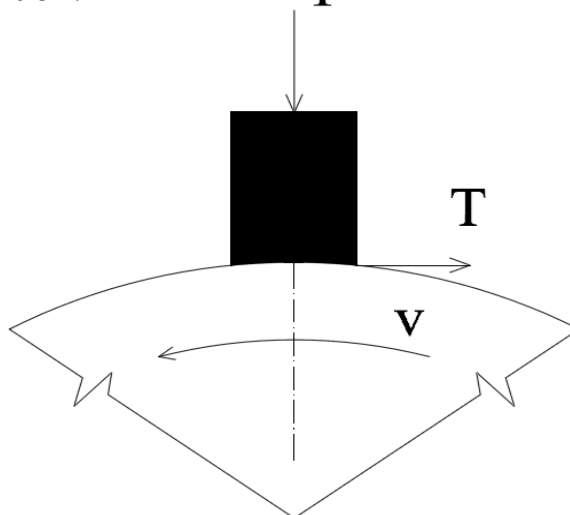
3.1.1 Pohyb kartáče po komutátoru

Pohybují-li se po sobě dvě tělesa, vždycky na styku obou těles vzniká odpor proti pohybu [3]. Tento odpor představuje síla, nazývaná třecí síla, která je vždy orientována proti pohybu. Tření je tedy odpor proti pohybu, vznikající mezi dvěma tělesy v oblasti dotyku jejich povrchů, v tečném směru k nim. Rozlišujeme tření valivé, kluzné a kombinace obou. Obr. 3.1.1. znázorňuje tření dvou těles, z nichž stojící těleso působí na otáčející se těleso silou F . Experiment ukazuje, že třecí síla je přímo úměrná kolmému tlaku, kterým stojící těleso působí na těleso otáčející se.

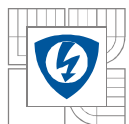
Tedy:

$$T = f \cdot F \quad (3.1.1.1)$$

Kde: f se nazývá součinitel tření.



Obr. 3.1.1-Znázornění podmínek vzniku tření a orientace třecí síly



Součinitel tření je bezrozměrné číslo mající tyto vlastnosti:

- Nezávisí na velikosti třecích ploch, které se třou,
- Závisí na materiálu ploch,
- Závisí na drsnosti ploch,
- Je větší když se těleso má dostat z klidu do pohybu, než když je těleso v pohybu,
- Je závislý na čistotě třecích ploch.

Tření nelze odstranit, lze je pouze zmenšit různými mazadly, nebo použitím jednoho z těles jiného skupenství.

Tření u kluzného kontaktu kartáč – komutátor je do jisté míry odlišné od běžného tření, známého z mechaniky. Tato odlišnost je dána zvláště přítomností a působením elektrického proudu na kluzné plochy kartáčů komutátoru. Další zvláštnosti vyplývají z následujících podmínek:

- Třou se po sobě dvě různé látky, uhlík – měď nebo její slitiny, případně i železo, které mají různou tvrdost, tepelnou vodivost, teplotu tavení, atd.
- Nastává opotřebení těchto látek, jednak vlivem vlastního tření, jednak působením elektrického proudu a někdy i různými chemickými vlivy.
- Hmota kartáčů je velmi malá.
- Tlak působící na kluzný kontakt je malý.
- V kontaktní zóně se vytváří tenká vrstva mazacího materiálu, která se však značně mění v závislosti na mnoha faktorech (proudovém zatížení, vlhkosti, teplotě kontaktu, rychlosti, apod.), takže za velmi nepříznivých podmínek dochází i k přímému klouzání po komutátoru, tj. k suchému tření.
- Teplota kluzných částí je v mezích 20° - 150°C.
- Povrch komutátoru není souvislá plocha, ale skládá se z lamel a mezer mezi nimi.
- Mechanické, elektrické i tepelné zatížení jednotlivých bodů kluzných ploch se neustále mění a je značně nerovnoměrné.

3.1.2 Patina

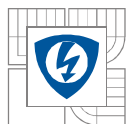
Patinou [3] nazýváme povrchovou vrstvičku, která se postupně tvoří na komutátorech a která určuje vzhled povrchové kovové plochy, po níž se pohybují kartáče. Jedná se tedy v podstatě o rozlišení vzhledu plochy komutátoru, po níž se pohybují kartáče, nezávisle na zbarvení povrchu mimo tyto oběžné plochy.

Patina se skládá ze dvou hlavních složek:

- a) vrstvičky kysličníku kovů těsně související s příslušným kovovým podkladem,
- b) z nánosu velmi jemných částíček uhlíku, které různě silně lpí na kluzné ploše.

Existuje tedy kovová patina, doplněna uhlíkovou patinou, a obě tyto složky ovlivňují chování kartáčů. Patina svými mazacími vlastnostmi přispívá ke klidné práci kartáčů, zmenšuje ztráty třením a snižuje opotřebení kartáčů.

Patina se nevytváří ihned po uvedení stroje do provozu. Osoustružený nebo obroušený komutátor ztrácí svojí měděnou barvu postupně. Podle provozních podmínek, proudového



zatížení a způsobu zatěžování, okolní ovzduší, kvality kartáčů, apod. dostane komutátor po několika hodinách, nebo i dnech, určité zabarvení.

Patina má stejnoměrně se lesknoucí světlé měděné anebo černé zabarvení, které může obsahovat různé tónování šedé, hnědé, červené, modré, atd. Toto zabarvení je závislé na mnoha faktorech.

Rovnoměrné pokrytí komutátoru patinou je známkou bezproblémového chodu kartáčů.

3.1.3 Průchod proudu kluzným kontaktem

Patina svými vlastnostmi ovlivňuje ve značné míře přenos proudu mezi kartáčem a komutátorem. Mezi kontaktními plochami vznikají mikroskopické kovové můstky tzv. fritování, které jediné způsobuje pokles úbytku napětí na kluzném kontaktu. Tyto mikroskopické kovové můstky vznikají zpravidla průrazem přechodové vrstvy, pokud napětí mezi kontakty je dostatečně vysoké.

Při teplotách kluzného kontaktu nad 30°C a při normálním proudovém zatížení, vznikají v patině místa s polovodičovým efektem. Je prokázáno, že kartáčový kontakt má vlastnosti polovodičové diody s oblastmi vlastní i nevlastní vodivosti.

Mimo míst přímého styku kartáče s komutátorem může být převod proudu uskutečňován prostřednictvím uvolněných částic kartáčů nebo i komutátoru, které se dostanou mezi kartáče a komutátor. Tyto částice mohou být i součástí přechodové vrstvy. Další možnost převodu proudu je prostřednictvím jiskrových nebo obloukových výbojů. Takový přenos proudu je obvykle jev více méně poruchový [3].

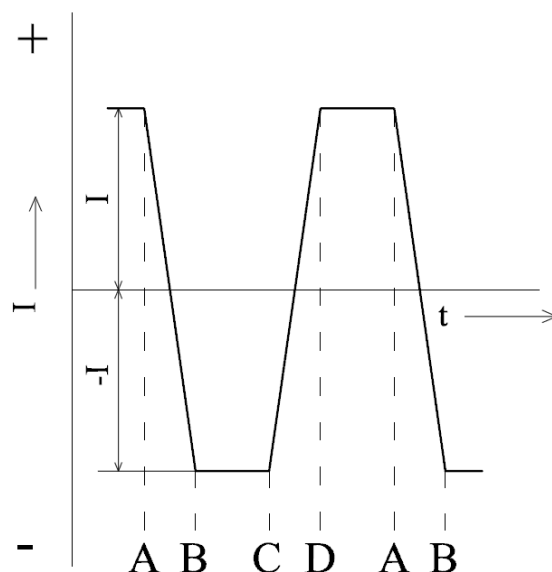
3.1.4 Podstata komutace

Kluzný kontakt u stejnosměrných strojů komutátorových strojů je součástí komutačního obvodu a svými vlastnostmi ovlivňuje rozhodující mírou komutační proces.

Vinutí kotvy stejnosměrného stroje je obvodově uzavřené a kartáče, umístěné na obvodu komutátoru v řadách s pravidelnou roztečí, danou počtem pólů, dělí toto uzavřené vinutí kotvy na paralelní větve. Jednotlivé cívky vinutí jsou připojeny k lamelám komutátoru. Při otáčení kotvy procházejí cívky z jedné paralelní větve do druhé. Tento přechodový děj se děje v tzv. neutrálním pásmu, tj. v pásmu v magnetického pole, v němž se nemá indukovat žádné napětí.

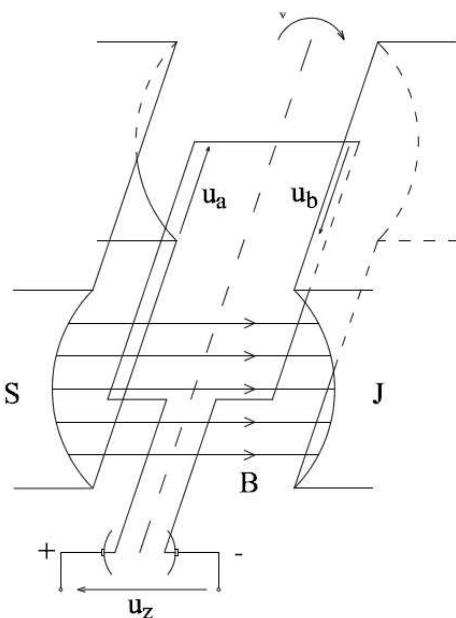
U nezatíženého stroje je neutrální pásmo uprostřed mezi póly. Při zatížení se vlivem reakce kotvy neutrální pásmo posune a to u dynama ve směru otáčení a u motoru proti směru otáčení.

Cívky vinutí musí v neutrálním pásmu změnit svůj smysl zapojení, aby při dalším pohybu z neutrálního pásma dodávaly do vnějšího obvodu napětí téhož směru jako před vstupem do neutrálního pásma. Kartáči na komutátoru jsou tyto cívky při tomto procesu, tzn. v době komutace, spojovány na krátko a směr proudu, procházejícího cívkami, se mění na opačný viz obr. 3.1.3 znázorňující změnu polaritu v úsecích AB a CD.

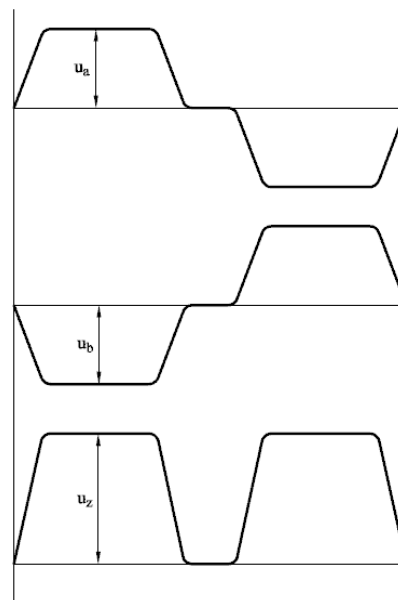


Obr. 3.1.3-Průběh proudu v jedné cívce v závislosti na čase

Otáčí-li se závit, umístěný na rotoru, stejnou rychlostí mezi dvěma póly, indukuje se v něm střídavé napětí. Připojíme-li konce závitů ke dvěma půlkruhům, na něž jsou připojeny nepohyblivé kartáče, pak na jeden kartáč je trvale připojován vodič nacházející pod severním pólem a na druhý vodič nacházející se pod jižním pólem.



Obr. 3.1.4-Znázornění principu komutace

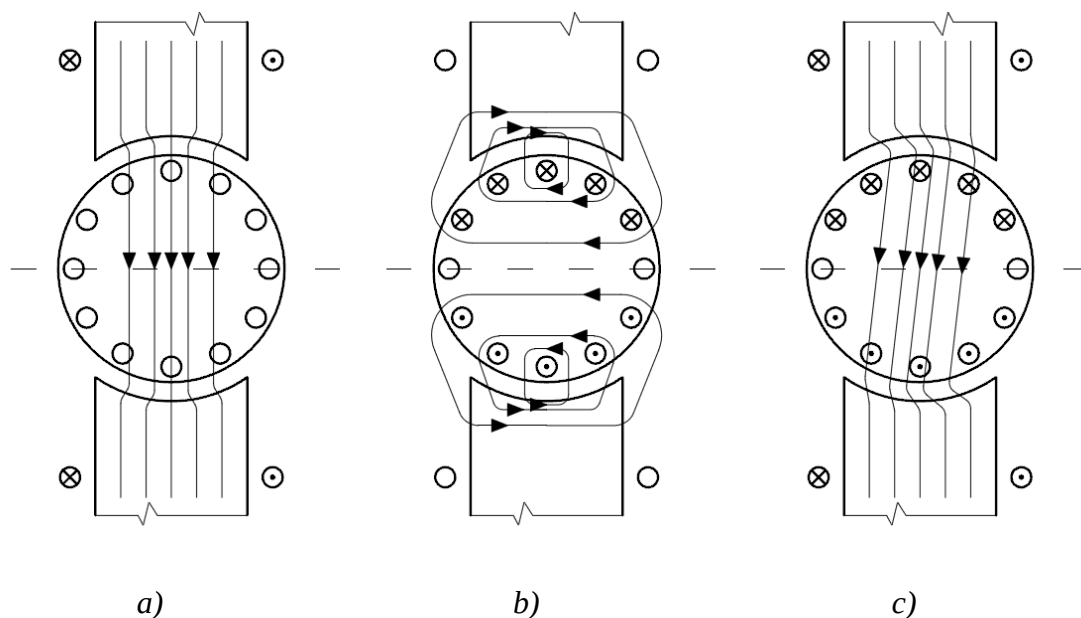


Obr. 3.1.5- Průběh indukovaného napětí v otáčejícím se závitě

Na kartáčích bude tedy pulsující stejnosměrné napětí $u_z = u_a + u_b$. Komutátor působí jako usměrňovač. Jestliže vinutí kotvy se bude skládat z mnoha cívek zapojených v sérii (připojených na stejný počet lamel kolik je cívek), dostáváme napětí prakticky nezvlněné [3].

3.1.5 Reakce kotvy

Při zatížení protéká vinutím kotvy proud, který vytváří vlastní magnetické pole. Toto pole se nazývá polem reakce kotvy. Magnetické poměry ve stroji je zná zorněno na jednoduchém dvoupólovém stroji. Na obr. 3.1.6- a je stroj při chodu naprázdno, kdy má hlavní pole buzené proudem hlavních pólů. Pole hlavních pólů má svislý směr, shora dolů. Na obr.3.1.6-b je znázorněno pole reakce kotvy, tj. za předpokladu, že kotvou protéká proud a hlavní póly nejsou buzeny. Pole reakce kotvy je kolmé na osu hlavních pólů, má směr vodorovný a při naznačené polaritě proudu v kotvě probíhá zprava nalevo. Jeho osa je v ose kotvy. Indukční čáry reakčního pole probíhají napříč kotvou a uzavírají se přes vzduchovou mezeru a pólové nástavce, případně přes pomocné póly. Ve skutečném stroji existuje pouze jediné pole složené z obou polí viz obr. 3.1.6-c.



Obr. 3.1.6-Znázornění průběhu magnetického pole dvoupólového stroje

Legenda: a) Znázornění průběhu magnetického pole dvoupólového stroje při chodu naprázdno

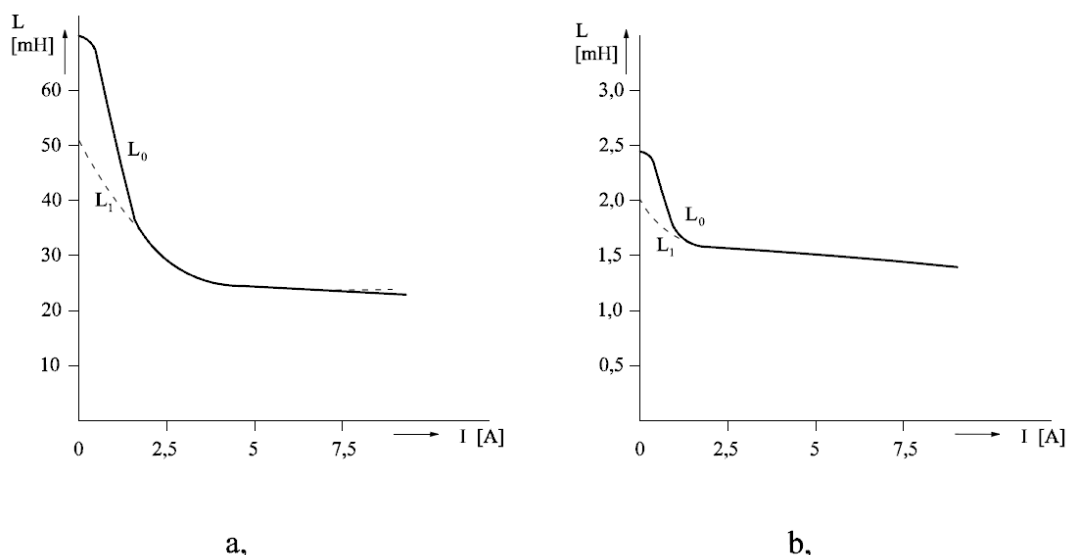
b) Znázornění průběhu magnetického pole reakce kotvy dvoupólového stroje při chodu naprázdno

c) Znázornění průběhů výsledného magnetického pole dvoupólového stroje při chodu naprázdno

Výsledné pole je deformováno a to u dynama ve směru otáčení kotvy a u motoru proti směru otáčení, to vyplývá z obr. 3.1.6-c , uvědomíme-li si, že magnetické pole je ve stavu mechanického napětí a snaží se zkrátit délku indukčních čar.

3.1.6 Komutace elektrického stroje s permanentními magnety

Např. v článku [5] jsou uvedeny porovnání experimentálně zjištěných indukčností rotorového obvodu stejnosměrných motorů, z nichž jeden je buzen klasickým způsobem (P) a druhý je buzen permanentními magnety (PM). Obě charakteristiky jsou v závislosti na zatížení viz obr. 3.1.7.



Obr. 3.1.7-Porovnání indukčností rotorového obvodu motoru buzených P a PM

Legenda: a, buzení P,

b, buzení PM.

Rozdíl mezi velikostmi indukčností obou strojů je způsoben změnou celkového konstrukčního stroje při buzení s PM. Následkem zmenšení indukčností rotorového obvodu probíhají všechny přechodové děje u strojů s PM mnohem rychleji.

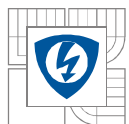
$$L_a = 2pN_1^2 \frac{\alpha_i^2}{3} \Lambda_{\delta''} [H] \quad (3.1.6.1)$$

Použijeme-li kotvu s vinutím uloženým ve vzduchové mezeře, jak je obvyklé u strojů s PM, pak velikost vzduchové mezery značně ovlivňuje tvar magnetizační charakteristiky, koleno se zplošťuje a posouvá se do oblasti vyšších intenzit. Takto deformovaná magnetizační charakteristika se pak pro výpočet obvykle nahrazuje v pracovní oblasti přímkou případně dvěma přímkami (při rozdělení pracovní oblasti na dvě části).

Pro takto linearizovanou část charakteristiky je pak indukčnost nepřímo úměrná velikosti náhradní vzduchové mezery resp. Je přímo úměrná vodivosti náhradní vzduchové mezery:

$$L_a = \frac{k_1}{\delta''} = k_2 \Lambda_{\delta''} [H] \quad (3.1.6.2)$$

Přemístěním vinutí do vzduchové mezery příznivě ovlivňuje dynamické vlastnosti stroje.



3.2 Elektrické a mechanické vlastnosti kartáčů

Původní kartáče, používané u prvních elektrických strojů, byly tvořeny svazkem drátů, anebo měděnou sítí stočenou do svitku. Odtud také pochází dnešní název kartáč. Tyto kartáče značně jiskřily. Původně se předpokládalo, že stejnosměrný stroj, čím je „silnější“, tím intenzivnější je jiskření kartáčů.

Dnešní uhlíkový kartáč byl vyroben v Anglii v r. 1885 a vyrábí se prakticky od počátků minulého století. Materiálem pro výrobu kartáčů byla v tomto období směs mědi a grafitu. S vývojem stejnosměrných strojů musely být kovografitové kartáče postupně nahrazeny kartáči grafitovými a elektrografitovými.

Předností uhlíku jako suroviny pro výrobu kartáčů [3], jsou jeho příznivé elektrické, termické a chemické vlastnosti. Uhlík má:

- dobrou elektrickou vodivost,
- výborné kluzné vlastnosti,
- je netavitelný za normálního tlaku a při teplotě kolem 3700°C přechází ze stavu pevného do plynného,
- má malou tepelnou roztažnost,
- neztrácí svou mechanickou pevnost ani při teplotách kolem 2000°C .

Existuje šest základních druhů kartáčů:

- uhlografit – směs amorfního uhlíku a grafitu,
- přírodní grafit – čistý přírodní grafit a pojivo,
- elektrografit – amorfní uhlík z těchto surovin jako uhlografit (koks, saze, grafit) zpracovaný vypalováním při teplotě 2500°C ,
- kovografit – směs kovů a grafitu,
- speciální materiály jako bakelitový uhlografit, grafit impregnovaný kovem pro speciální účely,
- inovované kartáče, např. v provedení „s T“.

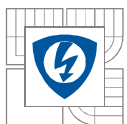
Uhlografitové se používají pro málo zatížené malé stroje a malou obvodovou rychlost komutátoru – do $15\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, univerzální motorky a automobilové dynama.

Kartáče z přírodního grafitu jsou vhodné pro stroje menších výkonů s větší obvodovou rychlostí komutátoru do $40\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, pro svářecí agregáty a pro ocelové kroužky s nižším proudovým zatížením.

Kovografitové kartáče jsou vhodné pro stroje s nízkým napětím – do 80 V a pro kroužky střídavých strojů s obvodovou rychlostí do $30\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, galvanizační dynama, automobilové dynama.

3.2.1 Měrný elektrický odpor

Měrný elektrický odpor [3] je pro uhlíkové kartáče charakteristická hodnota, podle níž je možno určit přibližně jakost materiálu. Je dán chemickým složením materiálu, jeho strukturou a technologií výroby. Hodnota měrného odporu se udává buď v $\Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ nebo také v $\mu\Omega\text{cm}$, řidčeji pak v Ωcm .



Rozsah možných měrných odporů je značný – 5 až $50000 \mu\Omega\text{cm}$. Vlastní uhlík je v porovnání s ostatními nekovovými materiály dobrý vodič elektrického proudu. Ve srovnání s kovy je však špatným vodičem. Měrný odpor elektrografitu je průměrně $50 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$, hodnota měrného odporu mědi je $0,0178 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$. Tedy odpor elektrografitu je zhruba 2500 krát vyšší než u mědi. Se stoupající teplotou měrný odpor u kovografitu nepatrně roste. U ostatních odpor s teplotou klesá. To je dáno záporným tepelným součinitelem uhlíku.

Jednotlivé skupiny uhlíkových materiálů mají následující hodnoty měrného odporu:

uhlografit	$25,00 - 60,00 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,
grafit	$10,00 - 35,00 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,
elektrografit	$15,00 - 70,00 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,
kovografit	$0,05 - 10,00 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$,
bakelitový uhlografit	$60,00 - 250,00 \Omega\text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$.

3.2.2 Přejchodový úbytek napětí

Při průchodu proudu přes kluzný kontakt tzn. od kartáče ke komutátoru nebo od komutátoru ke kartáči, naměříme mezi kartáčem a komutátorem určitou velikost napětí. Toto napětí je úbytek napětí na přechodovém odporu [3] mezi kartáčem a komutátorem.

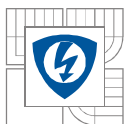
Velikost tohoto napětí závisí na řadě činitelů. Je přímo závislé na procházejícím proudu a na velikosti přechodového odporu mezi kartáčem a komutátorem. Přechodový odpor je však rovněž závislý na proudovém zatížení, při nárůstu proudového zatížení přechodový odpor klesá a se zmenšováním proudového zatížení roste.

Přejchodové napětí je jednou z charakteristických hodnot kartáčů, je definováno jako úbytek napětí mezi přechodem kartáč – komutátor, spojených v sérii, při jmenovitém proudu a určité obvodové rychlosti.

Na přechodový úbytek napětí má značný vliv teplota. Při stálém proudovém zatížení kartáče se přechodový úbytek napětí snižuje s růstem teploty. Tento jev je možné vysvětlit tím, že uhlíková složka patiny má záporný teplotní součinitel odporu a dále tím, že při vyšších teplotách je k dispozici větší počet kontaktních bodů, které mohou vznikat i tepelným průrazem přechodové vrstvy a měknutím grafitu.

Dalším činitelem působícím na velikost přechodového úbytku napětí je velikost tlaku na kartáče. S rostoucím tlakem přechodové napětí klesá, z počátku rychleji, pak pomaleji. Pokud nedochází k vibraci kartáčů, pak přechodový úbytek napětí málo závisí na obvodové rychlosti komutátoru.

Přejchodový odpor je rovněž závislý na tlaku vzduchu. Odpor se zmenšuje, když tlak vzduchu klesá a atmosféra se stává méně oxidační. S růstem vlhkosti přechodový odpor roste.



3.2.3 Součinitel tření

Součinitel tření [3] se udává vždy pro určitou obvodovou rychlost, jmenovitou proudovou hustotu kartáčů a předepsaný tlak na kartáč. Měří se na zkratovaném komutátoru. V tabulkách a materiálových listech výrobců mají být udávány maximální hodnoty součinitele tření.

Příklady udávaných hodnot součinitele tření výrobcem:

V	vysoký	je-li součinitel tření vyšší než 0,20,
S	střední	je-li součinitel tření v mezích 0,15 - 0,20,
N	nízký	je-li součinitel tření v mezích 0,10 - 0,15,
VN	velmi nízký	je-li součinitel tření pod 0,10.

3.2.4 Tvrdost kartáčů

Tvrdostí označujeme odpor, který klade jedno těleso proti vnikání druhého tělesa [3]. Určování tvrdosti kartáčů je značně problematické v důsledku jejich vícesložkové struktury. Tvrdost jednotlivých složek, z nichž se kartáč skládá, je různá a proto značně závisí na použité měřící metodě, místě měření, pórovitosti materiálu, atd. Pro určování tvrdosti kartáčů se používají běžné způsoby měření tvrdosti, jako u kovových materiálů a to tvrdost podle Brinella nebo Rockwella.

Hodnotě tvrdosti kartáčů se často připisuje velký význam, zvláště při poruchách v kluzném kontaktu, při nadměrném opotřebením kroužků nebo komutátoru, při jejich rýhování, eventuálně i při nadměrném opotřebením kartáčů. Ve skutečnosti je význam tvrdosti kartáčů nepatrný. Slouží pouze jako informativní údaj při určování vhodné náhradní kvality kartáčů.

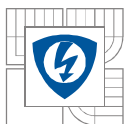
3.2.5 Proudové zatížení kartáčů

Rozhodující pro elektrické zatížení uhlíkových kartáčů v elektrických strojích, je jejich proudové zatížení [3]. Proudové zatížení, tzn. velikost proudu procházejícího jednotkou plochy kartáče, se udává v ampérech na cm^2 a je dáno vztahem:

$$\sigma = \frac{I}{S} \quad [\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}]$$

Kde: I proud procházející kartáčem,
 S plocha kartáče.

Velikost proudového zatížení ovlivňuje přechodový úbytek napětí mezi kartáčem a komutátorem, tzn. elektrické ztráty v kluzném kontaktu a má tedy rozhodující roli v oteplení kluzného kontaktu. Velikost proudového zatížení je dále ovlivňováno opotřebením kartáčů a součinitelem tření.



Skutečná proudová hustota u jednotlivých kartáčů se bude lišit od střední hodnoty. Skutečné proudové zatížení, respektive skutečná velikost plochy, která se v jistém okamžiku podílí na přenosu proudu je značně proměnná. Proto proudové zatížení kartáčů, pracujících na témže stroji i ve stejných řadách, je různé. Stejně i v důsledku komutačních jevů je proudové zatížení plochy kartáče různé. U reálných elektrických strojů v provozu se konstantní proudové zatížení vyskytuje jen zřídka. Většina elektrických strojů má zatížení proměnné s časem. Zatížení stroje je určeno poháněným, či napájeným zařízením. Časové průběhy zatížení jsou pro práci kluzného kontaktu velmi důležité. Z hlediska dobré funkce kluzného kontaktu a elektrické i mechanické životnosti stroje, je nejvhodnější trvalé zatížení. Pokud se týká velikosti zatěžovacího proudu, je nutné, aby tento nepřesáhl jmenovitou hodnotu, protože jedině tak je zaručena dostatečná životnost stroje. Není na závadu, pokud je skutečný zatěžovací proud menší než proud jmenovitý. Z hlediska kluzného kontaktu je však nutné, aby zatěžovací proud nebyl nižší, než proud jmenovitý.

Způsob proudového zatížení je jedním z důležitých činitelů při výběru vhodné kvality kartáčů. Některé kartáče nejsou vhodné pro chod s krátkodobým přetížením, jiné pracují velmi špatně při chodu naprázdno.

Výrobci kartáčů udávají hodnoty proudového zatížení kartáčů, tyto hodnoty jsou voleny i s ohledem na možný výskyt nerovnoměrného proudového zatížení kartáčů. Jde o střední hodnoty proudového zatížení, tato hodnota platí nepřetržitý chod s občasným přetížením o cca, 20% po dobu 2 hod a o 50% po dobu 2min.

Proudové zatížení kartáčů podle jednotlivých skupin:

uhlografit	$6 - 8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,
grafit	$7 - 11 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,
elektrografit	$10 - 12 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$,
kovografit	$12 - 25 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

3.2.6 Obvodová rychlost

Rotační části elektrického stroje vykazují v provozu určité mechanické nedostatky. Komutátor vlivem vlastní neokrouhlosti, způsobené nepřesností výroby, odstředivou silou, tepelným namáháním a opotřebením kluzné plochy se stává mechanicky nestabilní. Důležitou roli zde hraje obvodová rychlost, která musí být z těchto důvodů ohraničena [3].

Maximální obvodovou rychlost, při níž mohou kartáče pracovat, udávají výrobci:

uhlografit	$10 - 25 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
grafit	$30 - 70 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
elektrografit	$30 - 50(80) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,
kovografit	$20 - 30 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

3.2.7 Tlak na kartáče

Kartáč musí být ke komutátoru přitlačován určitou silou zajišťující kontakt mezi kartáčem a komutátorem. Velikost přitlačné síly [3] je dána přechodovým odporem a mechanickými podmínkami. Velikost přitlačné síly se udává v jednotkách síly, působící na jednotku plochy kartáče v Pascalech (kPa).

Celkový ztrátový výkon v kluzném kontaktu je dán součtem mechanických a elektrických ztrát. Při malých se prudce zvyšují elektrické ztráty a při velkých tlacích zase rostou mechanické ztráty. Doporučené tlaky na kartáče se budou pohybovat v oblasti celkových ztrát. Nejčastěji se u všech druhů uhlíkových kartáčů pohybují doporučené hodnoty přitlačné síly v mezích 15-22kPa.

3.3 Inovované provedení kartáčů pro stejnosměrný pohon a jejich předpokládaný přínos

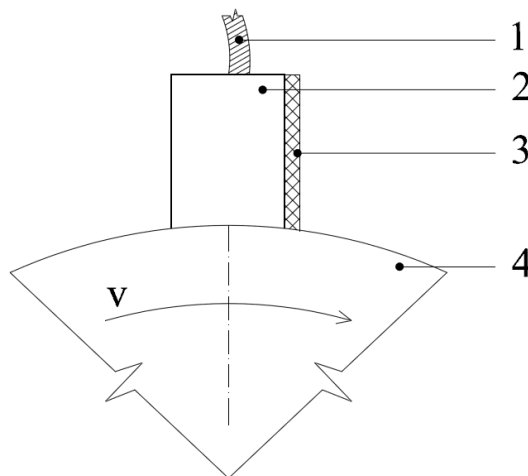
Inovace kluzného kontaktu byla realizována podle pokynů vedoucího práce.

Inovací pro elektrické stroje s komutátorem je možné provést dvěma možnými způsoby:

- změnou struktury materiálu kartáče,
- změnou konstrukčního provedení sběracího ústrojí a držáků kartáče.

Změnu struktury materiálu kartáče provádějí výrobci kartáčů.

V našem případě byla inovace provedena změnou konstrukčního provedení kartáčů. Bylo využito principu aplikace teflonu, kdy na odběhovou hranu kartáče byla aplikována teflonová destička o tloušťce 0,5mm. Takto provedené konstrukční uspořádání je znázorněno na obr. 3.3.1.



Obr. 3.3.1-Konstrukční řešení kartáče s aplikovanou vrstvou teflonu na odběhové hraně

Legenda: 1- přívodní lanko,
2- vlastní tělo kartáče,
3- teflonová destička,
4- komutátor.



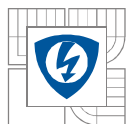
Obr. 3.3.2-Uhlíkový kartáč stroje v původním provedení



Obr. 3.3.3-Inovovaný kartáč v provedení „s T“

Legenda: 1- teflonová destička,
2- vlastní tělo kartáče.

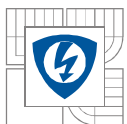
Před použitím takto upraveného kartáče, je potřeba připravit pracovní plochu kartáče. Pro tyto účely nám poslouží vhodná kulatina o stejném průměru, jako má komutátor. Pomocí smirkového papíru je postupně obrušována kluzná plocha do potřebného zaoblení. Takto provedenou přípravou se podstatně zkrátí doba, potřebná k zaběhání kartáče.



Podle literatury [3] lze přínosy inovovaných kartáčů v provedení „s T“ definovat takto:

- Snižují úroveň ionizace nárazem (mění strukturu a množství plynu mezi elektrodami) a tím snižují pravděpodobnost vzniku oblouku.
- Způsobují převahu klasické vodivosti a proto i komutace se bude více blížit klasické.
- Mění vlastnosti kluzného kontaktu. Není narušována plynulost styku kartáče s komutátorem. Díky nižšímu opotřebení vzniká méně uhlíkového prachu a stabilita kontaktu snižuje pravděpodobnost vzniku oblouku a jisker. Nesnižuje se velikost izolačního odporu.
- Nedochozí k tepelnému rozrušování katody (k jejímu roztavování, odpařování) potlačením obloukového výboje a k přenosu materiálu z anody na katodu.
- Teflon odpuzuje H_2O a proto na povrchu dráhy kartáče nevzniká stabilní vrstvička H_2O (při případném přerušení kontaktu kartáče s komutátorem proud nesmí protékat vodním povlakem, tj. neuplatní se v takovém rozsahu elektrolýza).
- Teflon brání destruktivnímu působení kyslíku na uhlík, který jej neoxiduje, minimalizuje vznik oxidu uhličitého. Vytvářením povlaku z teflonu na pracovní ploše kartáčů zabraňuje strukturálním změnám v uhlíku. Snižuje opotřebení kartáčů.
- Aplikace teflonu pravděpodobně způsobuje i snížení dynamiky pochodů při tvorbě filmu.
- Snížení vlivu vlhkosti na komutaci – což příznivé pro aplikaci v atmosféře ve velkých nadmořských výškách a za nízkých teplot.
- Teflon nahrazuje mazací účinek grafitu ve spojitosti s H_2O .
- Zlepšuje mechanické vlastnosti třecího uzlu, čímž se snižuje velikost oteplení komutátoru. Přechodový napětí zůstává konstantní, případně je jeho změna minimální, nebo menší (neuplatní se záporný teplotní součinitel odporu u uhlíku a oxidu)
- Na kartáčích se neobjevují opálené hrany, a proto lze soudit, že komutace všech cívek je rovnoměrná, nedochází ke vzniku napěťových špiček a jiskření ve střední části kartáče.
- Umožňují dosažení teplot ($80 \div 120^\circ C$), při kterých je součinitel tření minimální.
- Snižují působení kontaktních jedů a tím také zabraňují zvýšení součinitele tření, třeba i krátkodobému.
- Kartáče v provedení „s T“ zabraňují působení chemických příměsí a popela z kartáčů vstupovat do chemických reakcí a působit tak jako katalyzátor těchto pochodů (tím lze vysvětlit i univerzálnost pozitivních účinku kartáčů v provedení „s T“ u různých druhů kartáčů, kterými za normálních podmínek může být film komutátoru narušován).
- Inovované kartáče prakticky ovlivňují 3 ze 4 základních charakteristik kartáče, tj.:
přechodový úbytek napětí v kartáčovém dotyku, součinitel tření, opotřebení kartáče (neovlivňují tvrdost kartáče)
- Eliminují a případně minimalizují:
 - do jisté míry nevycentrování komutátoru
 - vliv oleje
 - leptání a opalování lamel komutátoru

V následující kapitole se pokusíme některé z těchto přínosů ověřit pomocí dlouhodobých zkoušek na vybraném motoru.



4 MĚŘENÍ NA VYBRANÉM STROJI A ZHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

V této části jsou zpracovány postupy při měření a dlouhodobých zkouškách na motoru PGN 1510 a jejich následné zhodnocení. Měření bylo určeno k ověření předpokládaného přínosu inovovaného kontaktu, zpracovaného v kapitole 3.3 a parametrů stroje.

Dlouhodobé zkoušky na vybraném stroji probíhali v laboratořích elektrických pohonů.

4.1 Měření vystupování lamel

Měření vystupování lamel lze provádět statickými metodami nebo dynamickými metodami. Mezi statické metody patří měření kontaktní metodou, sledování povrchu komutátoru pomocí zvukových vln a optické snímání povrchu komutátoru. Dynamické měření se provádí pomocí zařízení, které vyhodnocuje signál z indukčního oscilátorového čidla vzdálenosti a převádí ho na vzdálenost.

Vystupování lamel bylo měřeno pomocí kontaktní metody [4], při níž je využito dvoubodového měřicího můstku se středním měřícím dotykem, kdy základna je tvořena lamelami sousedícími zleva a zprava s lamelou kontrolovanou. Chyba měření je určena vztahem:

$$\delta_R = \frac{b}{4 \cdot H} \delta_b + \left[1 - \left(\frac{b}{8 \cdot H} \right) \right]^2 \cdot \delta_H \quad (4.1.1)$$

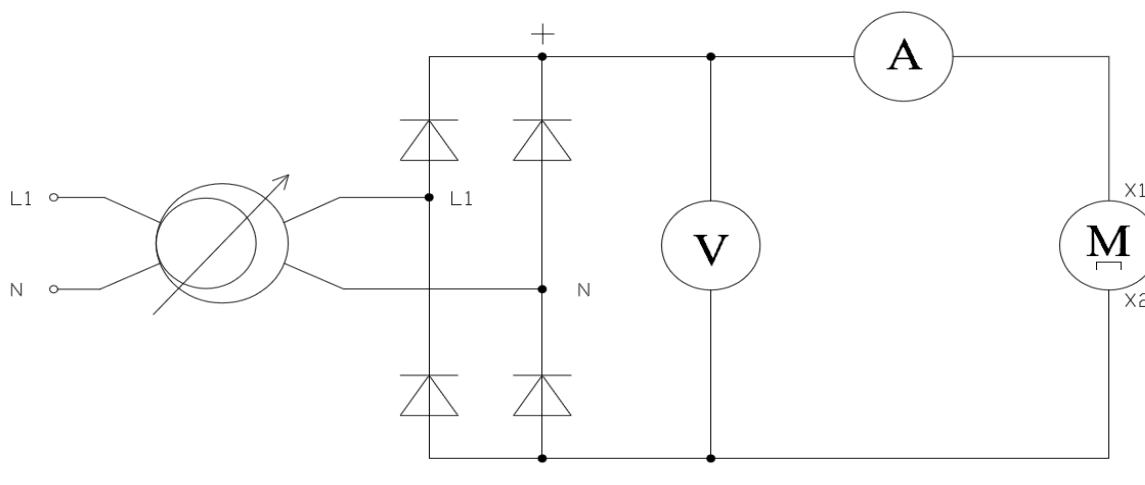
Otáčení lze provést krokově případně rovnoměrným a plynulým otáčením rotoru.

Měření vystupování lamel na vybraném stroji však nebylo z důvodu konstrukčního uspořádání vybraného stroje možné provést, proto jsme měření prováděli na komutátorech jiných stojů. Měření sloužilo pouze k ověření teoretických předpokladů a získání praktických zkušeností při měření.

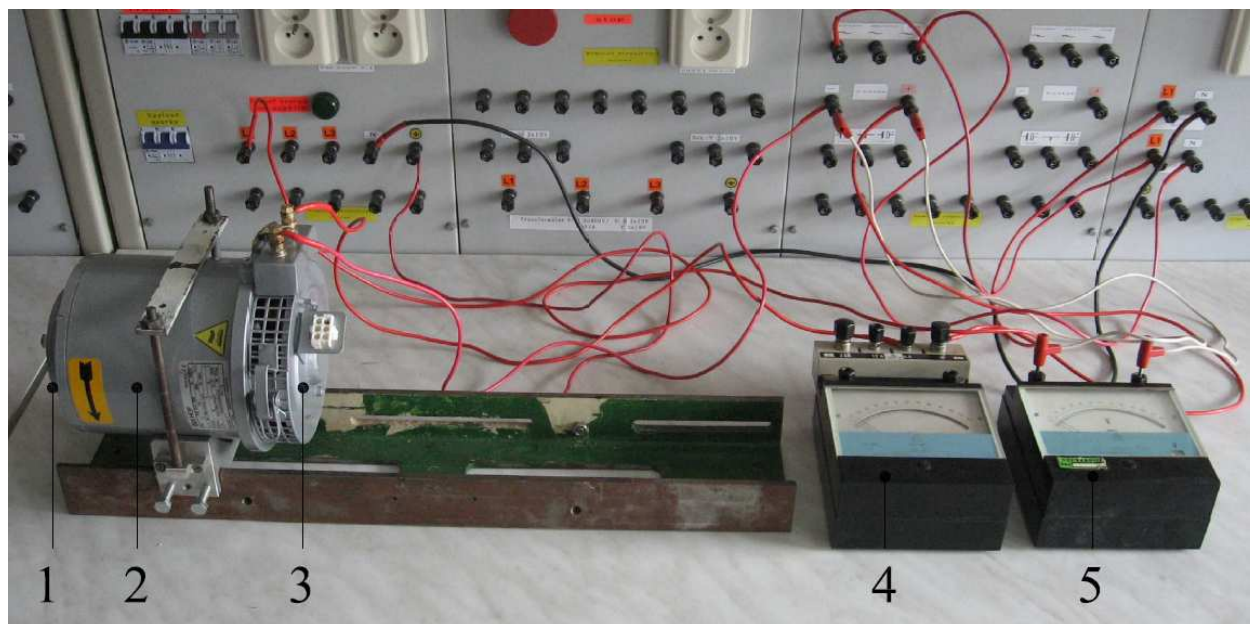
4.2 Dlouhodobé zkoušky opotřebení uhlíkového kartáče

Dlouhodobé zkoušky na motoru PGN 1510 probíhaly dle pokynů vedoucího práce. Pro tyto účely byl motor umístěn v laboratoři elektrických pohonů.

Motor byl uchycen na připravený přípravek profilu „U“ a zapojen podle schématu viz obr. 4.2.1. Celkový pohled na měřicí pult je zobrazen na obr. 4.2.2.

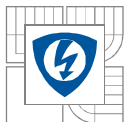


Obr. 4.2.1-Schéma zapojení zkoušeného stroje



Obr. 4.2.2-Znázornění měřicího pultu

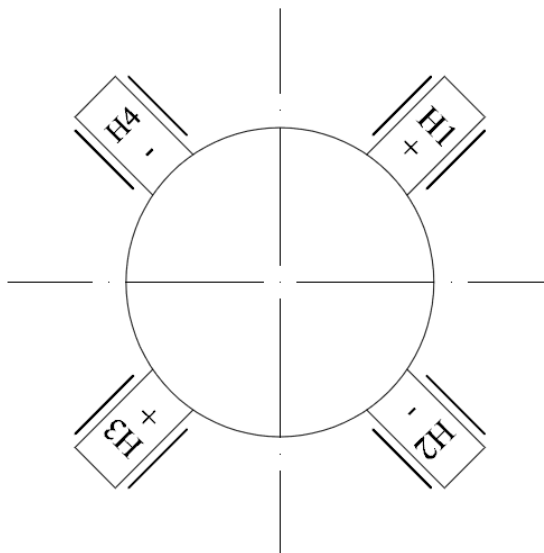
- Legenda: 1- zadní čelo,
2- PGN 1510,
3- přední čelo,
4- ampérmetr,
5- voltmetr.



Napájení bylo provedeno za střídavé sítě 230V přes dvoucestný usměrňovač. Plynulé spouštění motoru bylo realizováno změnou napětí kotvy, tuto funkci v zapojení zajišťuje autotransfornátor zapojený před dvoucestný usměrňovač.

Zkoušky byly prováděny ve stavu naprázdno, bez zatížení motoru, neboť v současné době nebylo možné stroj provozovat v přerušovaném chodu, kdy hodnota zatěživatel motoru udávaná výrobcem je S3 - 60%.

Před spuštěním motoru byly označeny jednotlivé kartáče a zjištěna jejich příslušná polarita. Uspořádání kartáčů a jejich polarita je znázorněna na obr. 4.2.3, pohled je orientován na zadní čelo motoru.

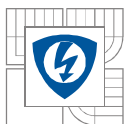


Obr. 4.2.3-Uspořádání sběracího ústrojí a znázornění polarita kartáčů

Následně byla změřena přítlačná síla jednotlivých pružin kartáčů viz tab.4.2.1 tlakovým siloměrem.

Tab. 4.2.1-Přítlačná síla pružin kartáčů

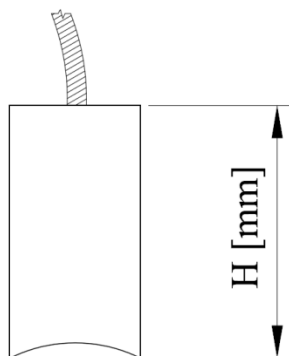
Číslo měření	H1	H2	H3	H4
	[N]	[N]	[N]	[N]
1.	2,40	2,50	2,30	2,40
2.	2,60	2,20	2,50	2,50
3.	2,30	2,40	2,40	2,60
Průměrná hodnota:	2,43	2,37	2,40	2,50
Rozdíl v %:	102,53	100,00	101,27	105,49



4.2.1 Měření velikosti opotřebení uhlíkového kartáče v původním provedení

V první etapě zkoušek bylo prováděno studium velikosti opotřebení uhlíkových kartáčů dodaných výrobcem v původním provedení. Před realizací prvního referenčního měření byl motor provozován po dobu cca 10h, čímž došlo k zaběhání uhlíkových kartáčů.

Po jejich zaběhání bylo možné odečítat hodnoty jednotlivých délek a stanovovat velikost opotřebení kartáčů. K tomu bylo použito posuvného měřítka. Odečítání výšky kartáče bylo prováděno od horní hrany kartáče po náběžnou a odběžnou hranu. Postu je patrný na obr. 4.2.4.



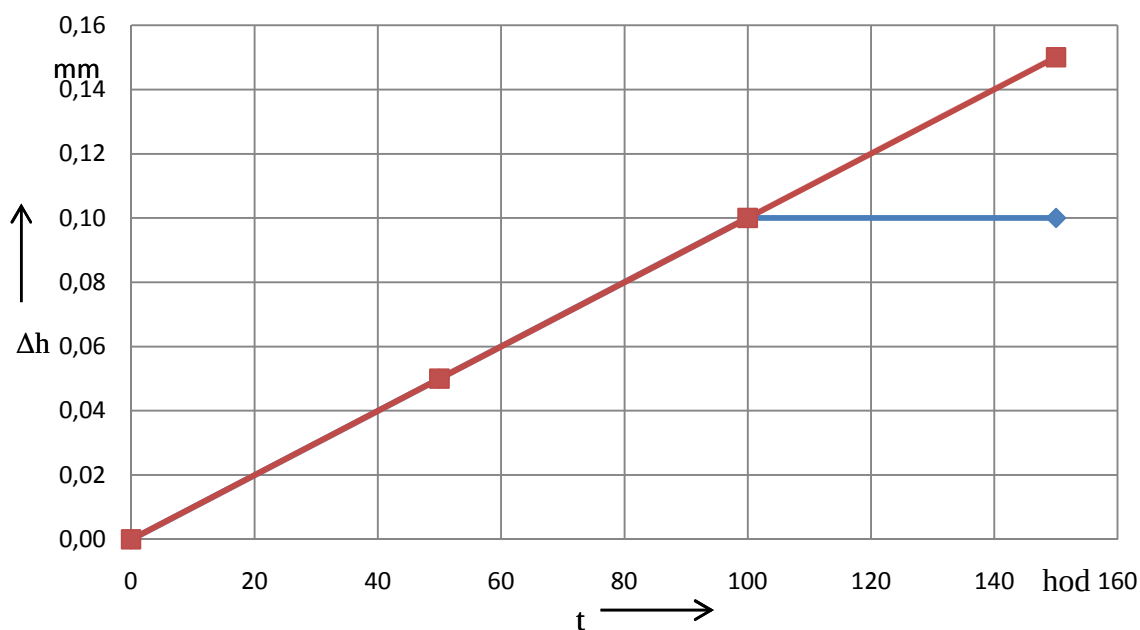
Obr. 4.2.4-Měření výšky kartáče

Zkoušky jedné sady kartáčů probíhaly po dobu 200hod a jednotlivé délky byly odečítány v rozmezí 50hod. Měřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce tab.4.2.2.

Grafy jsou vyneseny zvlášť pro kartáče kladné polarity a zvlášť pro kartáče záporné polarity.

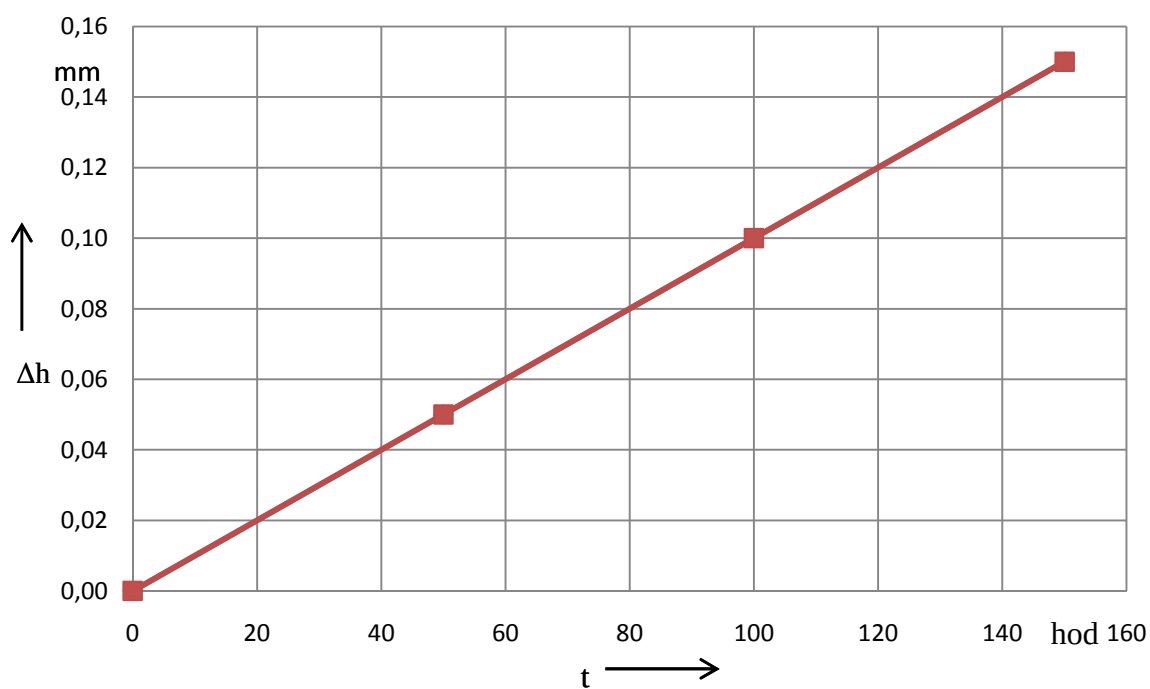
Tab. 4.2.2-Naměřené hodnoty opotřebení kartáčů bez provedených úprav

Polarita	t [h]	0	50	100	150	t [h]	0	50	100	150
+	H1 [mm]	20,30	20,25	20,20	20,20	$\Delta h1$ [mm]	0,00	0,05	0,10	0,10
-	H2 [mm]	20,05	20,00	19,95	19,90	$\Delta h2$ [mm]	0,00	0,05	0,10	0,15
+	H3 [mm]	20,00	19,95	19,90	19,85	$\Delta h3$ [mm]	0,00	0,05	0,10	0,15
-	H4 [mm]	20,00	19,95	19,90	19,85	$\Delta h4$ [mm]	0,00	0,05	0,10	0,15



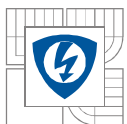
Legenda: ◆ Δh1 ■ Δh3

Obr. 4.2.5-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů bez úprav na době běhu



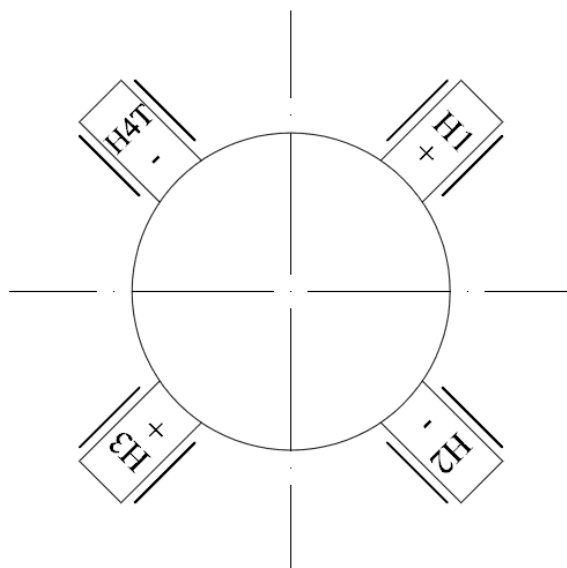
Legenda: ◆ Δh2 ■ Δh4

Obr. 4.2.6-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů bez úprav na době běhu



4.2.2 Měření opotřebení uhlíkového kartáče v provedení s „T“

Ve druhém případě byla měřena sada kartáčů, ze které byl kartáč H4 nahrazen inovovaným kartáčem s označením H4T. Úpravy byly provedeny dle kapitoly 3.3. Postup měření je stejný jako v předchozím případě.

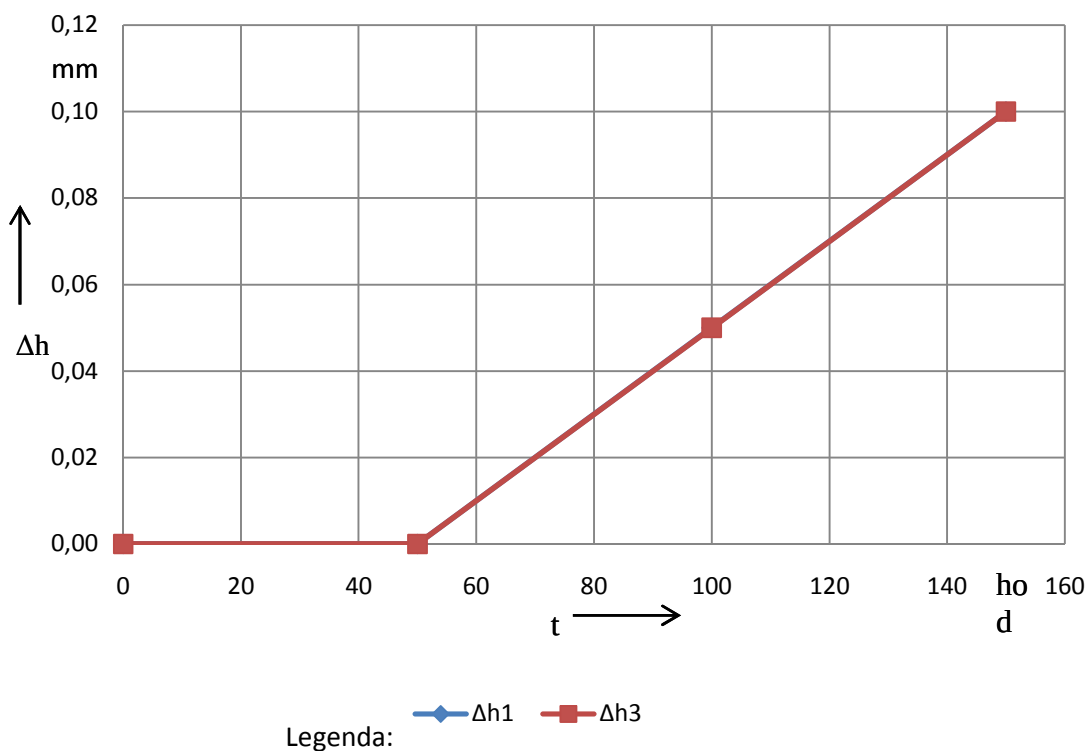


Obr. 4.2.7- Uspořádání inovovaného kartáče

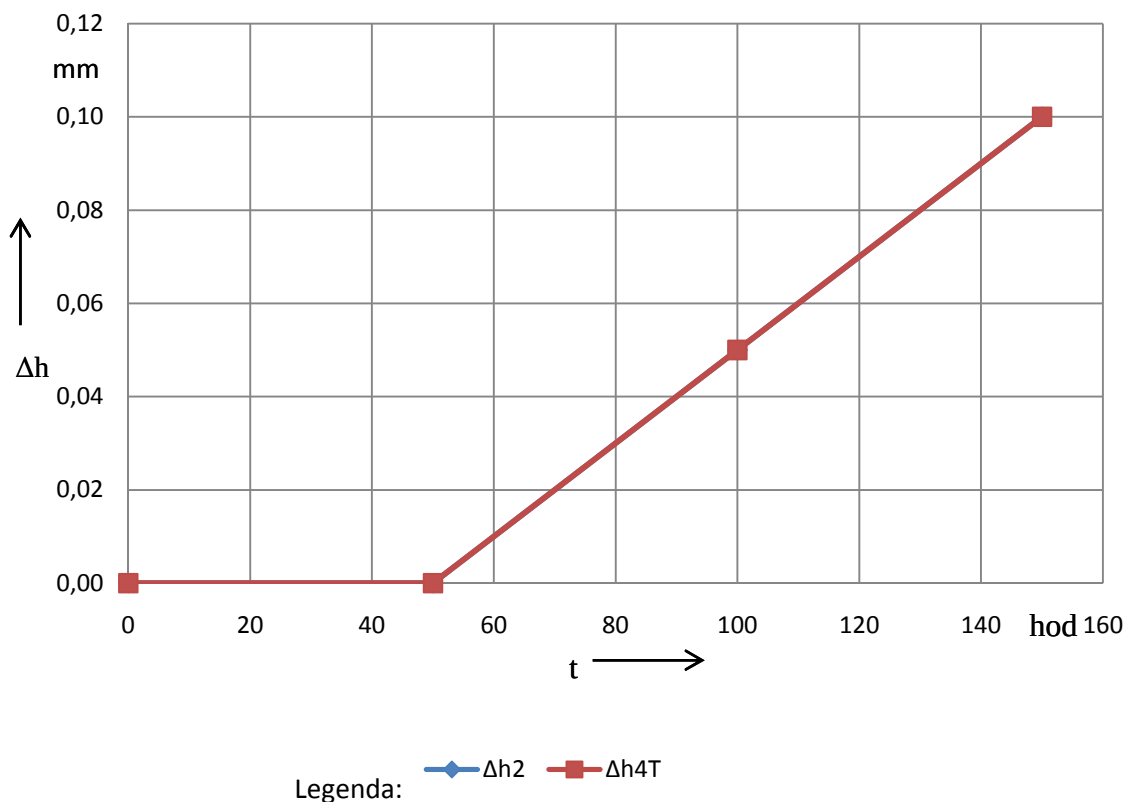
Naměřené hodnoty:

Tab. 4.2.3-Naměřené hodnoty opotřebení kartáčů s T

	t [h]	0	50	100	150	t [h]	0	50	100	150
+	H1 [mm]	20,20	20,20	20,15	20,10	$\Delta h1$ [mm]	0,00	0,00	0,05	0,10
-	H2 [mm]	19,90	19,90	19,85	19,80	$\Delta h2$ [mm]	0,00	0,00	0,05	0,10
+	H3 [mm]	19,85	19,85	19,80	19,75	$\Delta h3$ [mm]	0,00	0,00	0,05	0,10
-	H4T [mm]	19,70	19,70	19,65	19,60	$\Delta h4T$ [mm]	0,00	0,00	0,05	0,10



Obr. 4.2.8-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů v provedení „s T“ na době běhu



Obr. 4.2.9-Znázornění závislosti opotřebení kartáčů v provedení „s T“ na době běhu

4.3 Měření teploty stroje v ustáleném chodu s kluzným kontaktem v původním provedení a inovovaným kluzným kartáčem „s T“

K těmto účelům byla použita termokamera MobIR[®] M4 zapůjčena firmou Hukos s.r.o.. Základní technické parametry, udávané výrobcem jsou uvedeny v tabulce tab. 4.3.1.

Tab. 4.3.1- MobIR[®] M4 - Technická specifikace

MobIR [®] M4 - Technická specifikace	
Typ detektoru:	mikrobolometr UFPA (160 x 120 pixelů, 35μm)
Spektrální rozsah:	8-14μm
Zorné pole / Ohnisko:	25 ° x 19 ° / 12,6 mm
Teplotní rozsah:	-20 °C - +250 °C
Přesnost:	± 2 °C nebo ± 2% udávaných hodnot

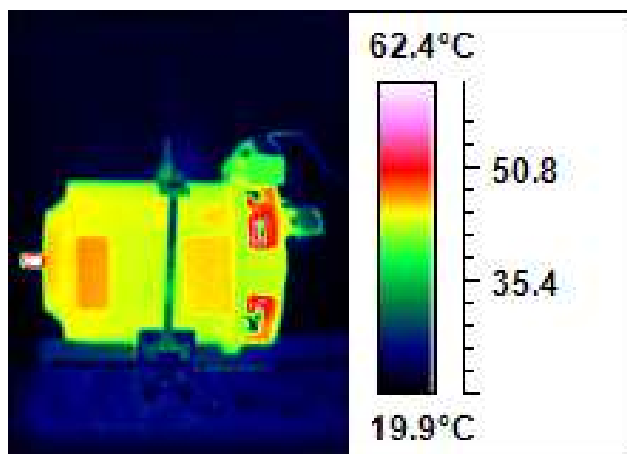


Obr. 4.3.1-MobIR[®] M4

Kalibrace přístroje probíhá automaticky po zapnutí s nasazenou krytkou objektivu. Pro ověření přesnosti měření udávané výrobcem bylo uděláno několik kontrolních měření. Porovnávala se teplota vody v nádobě měřena lihovým teploměrem a naměřené hodnoty termokamery. Zjištěné hodnoty byly v rozsahu přesnosti měření (± 2 °C nebo ± 2% udávaných hodnot) uváděných výrobcem.

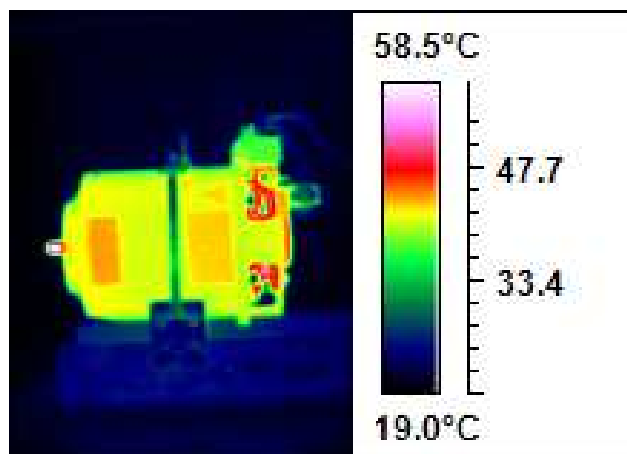
Teplotu stroje byla měřena během chodu naprázdno, v ustáleném stavu. Z praxe na stroji PGN 1510 je známo, že tento stav nastane minimálně po čtyřech hodinách nepřerušovaného chodu, v místnosti bez výkyvů okolní teploty. Byly porovnávány dva případy oteplení stroje. S kluzným kontaktem v původním provedení a s inovovaným kluzným kontaktem „s T“.

Odečtení teploty z infračervených snímků a následné grafické zpracování bylo provedeno v programu „IrAnalyser“ které je dodáván výrobcem. Infračervené snímky a odečtené hodnoty pro oba případy jsou porovnány v následující práci. V levém sloupci je zobrazen stroj bez konstrukčních úprav a v pravém sloupci provedení „s T“.



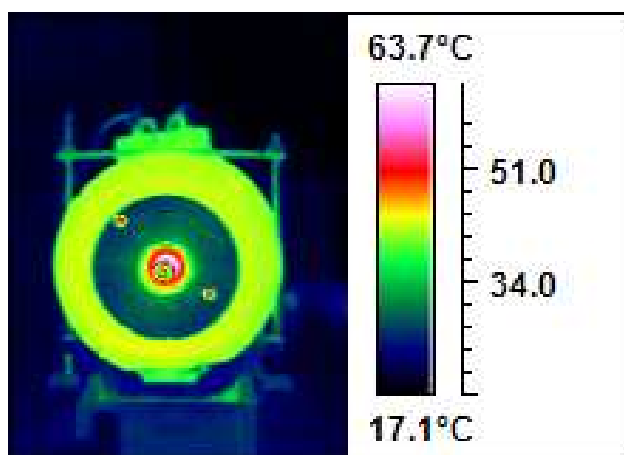
Obr. 4.3.3-Vnější povrch stroje s třecím uzlem bez úprav

Okolní teplota	23.5°C
Max. Teplota	62.4°C
Min. Teplota	19.9°C



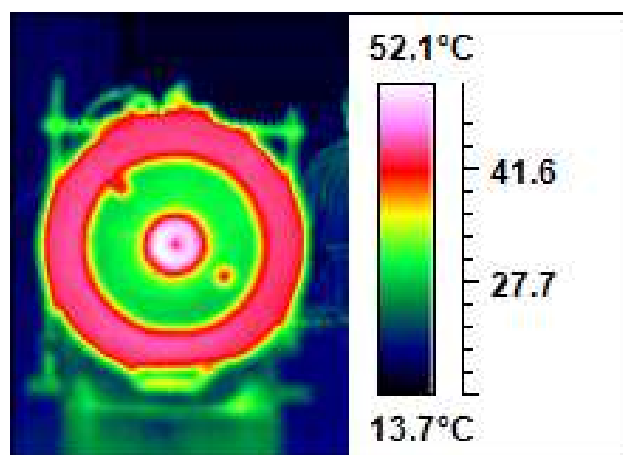
Obr. 4.3.2-Vnější povrch stroje s třecím uzlem v provedení "s T"

Okolní teplota	24.3°C
Max. Teplota	58.5°C
Min. Teplota	19.0°C



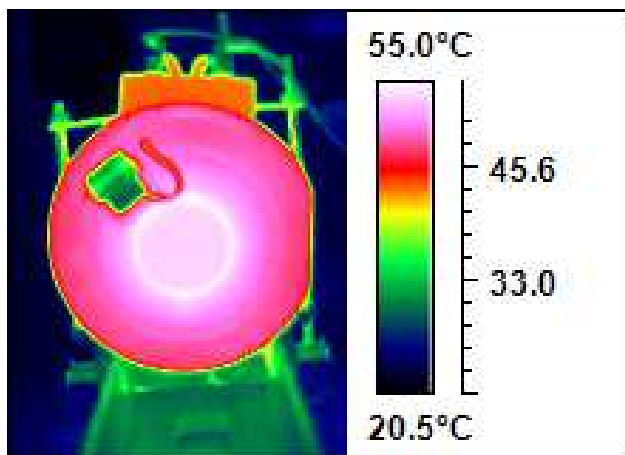
Obr. 4.3.4-Zadní čelo stroje s třecím uzlem bez úprav

Okolní teplota	28.5°C
Max. Teplota	63.7°C
Min. Teplota	17.1°C



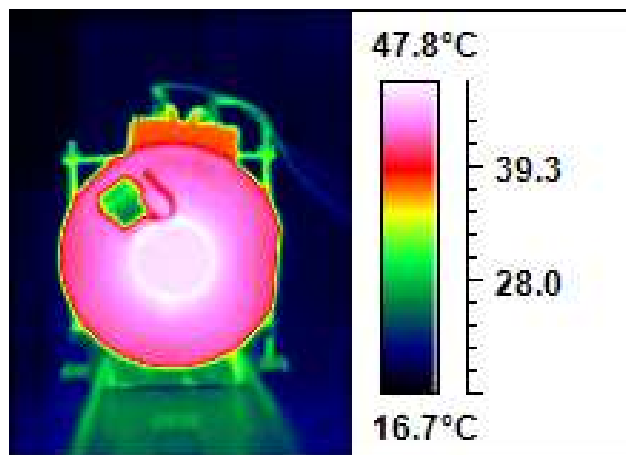
Obr. 4.3.5-Zadní čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"

Okolní teplota	22.3°C
Max. Teplota	52.1°C
Min. Teplota	13.7°C



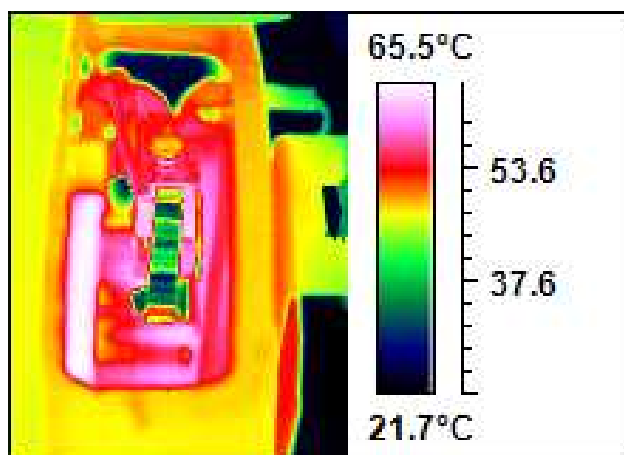
Obr. 4.3.7-Přední čelo stroje s třecím uzlem bez úprav

Okolní teplota	28.5°C
Max. Teplota	55.0°C
Min. Teplota	20.5°C



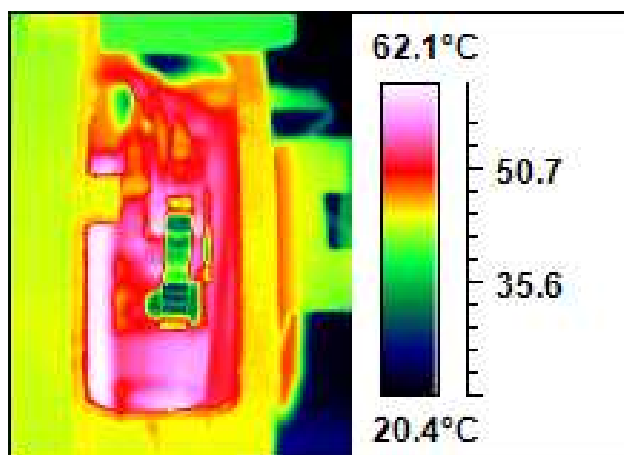
Obr. 4.3.6- Přední čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"

Okolní teplota	23.3°C
Max. Teplota	47.8°C
Min. Teplota	16.7°C



Obr. 4.3.8- Třecí uzel stroje bez úprav

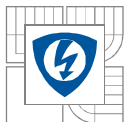
Okolní teplota	23.5°C
Max. Teplota	65.5°C
Min. Teplota	21.7°C



Obr. 4.3.9- Třecí uzel stroje v provedení "s T"

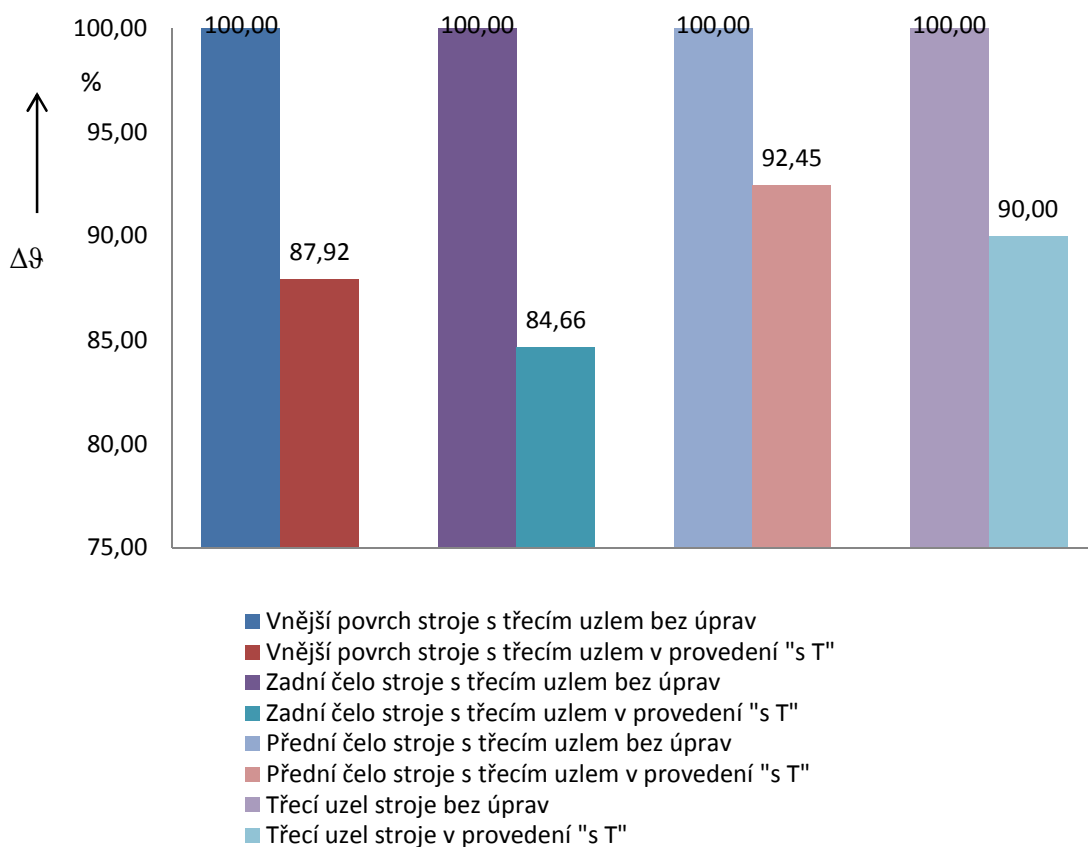
Okolní teplota	24.3°C
Max. Teplota	62.1°C
Min. Teplota	20.4°C

Pro znázornění rozdílů teplot, odečetli jsme od maximální hodnoty $\vartheta_{\max}$ teplotu okolí ϑ_0 . Výsledné hodnoty jsou zaznamenány v tab. 4.3.1 a pro přehlednost vyneseny do sloupcového grafu viz obr. 4.3.10. Z výsledných hodnot je patrné, že po úpravě uhlíkového kartáče došlo ke snížení teploty. Nejvýznamnější rozdíl teplot je v oblasti předního čela stroje a třecího uzlu kde dosahují rozdíly teplot až 5,4°C.



Tab. 4.3.2- Porovnání výsledných teplot

	$\vartheta_{\max}$				Poměr v %:
	ϑ_0 [°C]	[°C]	$\vartheta_{\min}$ [°C]	$\Delta\vartheta$ [°C]	
Vnější povrch stroje s třecím uzlem bez úprav	23,50	62,40	19,90	38,90	100,00
Vnější povrch stroje s třecím uzlem v provedení "s T"	24,30	58,50	19,00	34,20	87,92
Zadní čelo stroje s třecím uzlem bez úprav	28,50	63,70	17,10	35,20	100,00
Zadní čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"	22,30	52,10	13,70	29,80	84,66
Přední čelo stroje s třecím uzlem bez úprav	28,50	55,00	20,50	26,50	100,00
Přední čelo stroje s třecím uzlem v provedení "s T"	23,30	47,80	16,70	24,50	92,45
Třecí uzel stroje bez úprav	23,50	65,50	21,70	42,00	100,00
Třecí uzel stroje v provedení "s T"	24,30	62,10	20,40	37,80	90,00

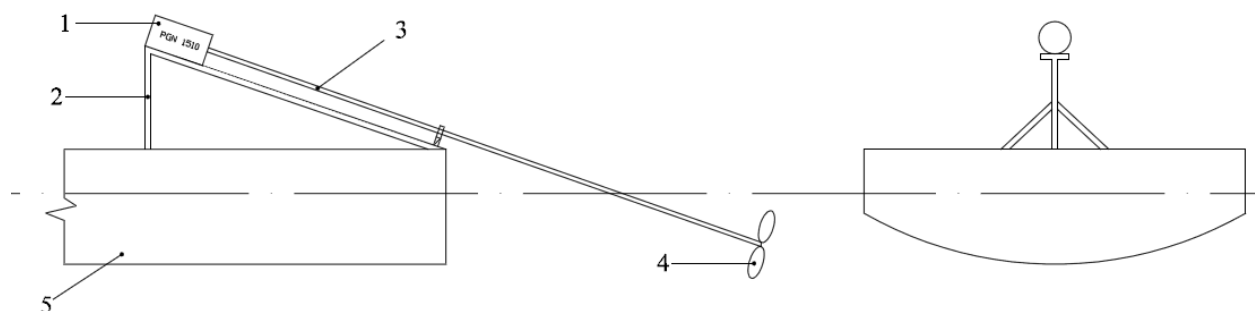


Obr. 4.3.10- Porovnání výsledných teplot

4.4 Zkoušky zatíženého stroje

V programu zkoušek bylo také ověření provozních vlastností elektrického pohonu člunu v reálných podmínkách. Tuto etapu zkoušek nebylo možné realizovat z provozních důvodů ÚVEE a z důvodu omezení práce v laboratoři elektrických strojů.

Pro zjednodušení celé sestavy bylo připraveno spojení motoru s hřídelí lodního šroubu bez případného převodování viz obr. 39 a plynulou regulaci otáček realizovat změnou napětí kotvy.



Obr. 4.4.1-Schematické znázornění uchycení motoru s hřídelí a lodním šroubem na člunu

Legenda: 1- motor PGN 1510

2- nosná konstrukce

3- hřídel

4- lodní šroub

5- člun



Obr. 4.4.2-Lodní šroub

Dále byly připraveny tři varianty sběracího ústrojí osazeného držáky kartáčů v provedení „s T“ odlišující se strukturou jednotlivých vrstev a použitých materiálů [6].



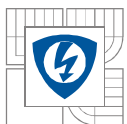
Obr. 4.4.4-1. varianta sběrného ústrojí s držáky kartáčů v provedení „s T“



Obr. 4.4.3- 2. varianta sběrného ústrojí s držáky kartáčů v provedení „s T“



Obr. 4.4.5-Kombinace předchozích variant

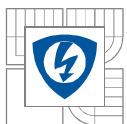


4.5 Vyhodnocení výsledků zkoušek

Z průběhu dlouhodobých zkoušek je možno konstatovat, že realizace alternativy běhu naprázdno stroje byla ekvivalentní k provoznímu režimu S3. S ohledem na rozměry kartáče stroje byla aplikována tloušťka teflonové vrstvy na kartáči o velikosti 0,5mm. Z průběžného pozorování plyne, že byla stabilní, mechanicky nepoškozená a ani v pracovní oblasti nedošlo k její degradaci. Vzhledem k tomu, že laboratoř elektrických strojů a přístrojů byla mimo provoz, nebylo možné v náhradních podmínkách realizovat ještě navazující dvě zkoušky s připravenými inovacemi kluzného kontaktu.

Rozdíl velikostí přitlaků činí cca 5%. V průběhu zkoušek byl chod stroje stabilní, prakticky bez jiskření. Závislost $\Delta h = f(t)$ je u původního provedení kluzného kontaktu prakticky lineární s rozptylem hodnot u kartáče H1 v případě kladné polarity. Aplikace inovovaných kartáčů v provedení „s T“ vedla ke snížení velikosti opotřebení kartáčů o cca 30%. Patrný je rovněž vliv kvality filmu na velikost opotřebení kartáčů.

Zlepšení poměrů v kluzném kontaktu při aplikaci kartáčů v provedení „s T“ se promítla i do snížení velikosti oteplení různých částí stroje o cca 6%.

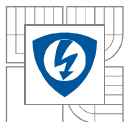


5 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se seznámil s metodikou výpočtu stejnosměrných strojů s permanentními magnety, problematikou PM, kluzného kontaktu a realizací dlouhodobých zkoušek.

Seznámil jsem se rovněž s metodikou přípravy experimentu, práce s inovovaným třecím uzlem a jeho reálným působením ve stroji. Zvládl jsem rovněž praktickou obsluhu moderní termokamery.

V závěru je možné konstatovat, že inovovaný kluzný kontakt měl příznivý dopad i na provoz elektrického stroje s permanentními magnety.



LITERATURA

- [1] Veselka, F.: Poskytnuté podklady ze stavby strojů. Brno 2010
- [2] Žák, Z.: Stejnosměrné stroje s permanentními magnety. VÚES Brno
- [3] Chmelík, K., Veselka, F.: Kluzný kontakt v elektrických strojích. KEY Publishing s.r.o., Ostrava 2007
- [4] Veselka, F., Valouch, V.: Laboratoře elektrických strojů a přístrojů, Návodů pro laboratorní cvičení. ÚVEE FEKT VUT v Brně, Brno 2006 ISBN 80-214-3333-7
- [5] Matuška, F., Pokorný, K., Horná, M.: Rozbor důsledků použití permanentních magnetů u stejnosměrných motorů s ohledem na komutaci. Technika elektrických strojů- teoretické číslo, Brno 1981
- [6] Veselka, F.: Ústní informace, Brno 2010