

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

VLASTNOSTI STĚRAČOVÉHO MOTORU

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

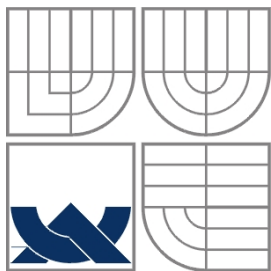
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

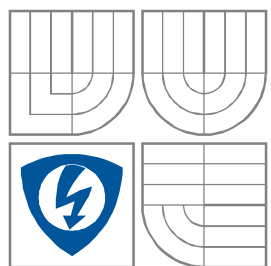
Aleš Kůta

BRNO 2008



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 RADIO ELECTRONICS

VLASTNOSTI STĚRAČOVÉHO MOTORU

PROPERTIES OF WIPER MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

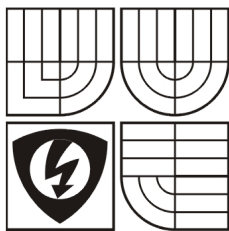
Aleš Kůta

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marcel Janda

BRNO, 2008



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: Kůta Aleš

Ročník: 3

ID: 83539

Akademický rok: 2007/08

NÁZEV TÉMATU:

Vlastnosti střeračového motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se konstrukcí a vlastnostmi střeračových motorů.
2. Proveďte výpočet střeračového motoru za pomoci metody konečných prvků.
3. Vypočítané výsledky porovnejte s naměřenými hodnotami a vyhodnoťte.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Termín zadání: 10.10.2007

Termín odevzdání: 06.06.2008

Vedoucí projektu: Ing. Marcel Janda

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

UPOZORNĚNÍ:

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

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Aleš Kůta
Bytem: Skalice 72
Narozen/a (datum a místo): 24.9.1984 ve Znojmě

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc., předseda oborové rady Silnoproudá
elektrotechnika a elektroenergetika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

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

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

Název VŠKP:

Vedoucí/ školitel VŠKP:

Ústav:

Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v *:

- | | | |
|--|---|-------------------|
| ☒ tištěné formě | – | počet exemplářů 1 |
| ☒ elektronické formě | – | počet exemplářů 1 |

* hodící se zaškrtněte

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

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

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

Článek 3

Závěrečná ustanovení

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

V Brně dne:

.....

Nabyvatel

.....

Autor

Abstrakt

V současné době neustále roste potřeba numerických výpočtů a modelování různých typů úloh nejen v oblasti elektrotechniky. Společným jmenovatelem mezi vysokými nároky kladenými na konstruktéra a hospodárností výroby se stává potřeba efektivity, co nejlépe využít konstrukce i vlastní podstaty funkčnosti a charakterních vlastností tovaru. Aplikování metody konečných prvků je vhodným řešením, které v sobě kombinuje schopnosti a znalosti uživatele v návaznosti na pracnost výpočtu a tak určení co možno neoptimálnějšího návrhu součásti.

Práce popisuje principiálně činnost stejnosměrného stroje, jehož zvláštním případem je komutátorový stejnosměrný motor s cizím buzením (permanentními magnety). Seznamuje čtenáře s činností střechačového motoru v návaznosti na stírací soustavu a splnění technických požadavků kladenými normami. Je zde popsán princip metody konečných prvků v souvislosti s úvodem do simulačního programu FEMM.

Hlavní pozornost je věnována konkrétnímu vytvoření modelu a simulování naměřené úlohy se střechačovým motorkem. Současně probíhá i druhá simulace motorku zaměřená na odlišný typ statorového buzení. Výsledkem je porovnání úloh mezi sebou. Práce obsahuje postup modelování v programovém prostředí, zpracovává naměřenou úlohu a vyhodnocuje jednotlivé úlohy.

Abstract

Nowadays a need of numerical computations of different tasks in the area of electrical engineering is still rising. Common denominator of great demands given on a constructor and econonization of manufacturing is a requirement of efficiency. It's necessary to use a characteristics of construction, own fundamentals and unique attributes of product. Application of Finite Element Method is possible solution which accombines abilities and knowledge of user in consecutive to complexity of computatio. This enables a use of the most optimal solution.

This thesis describes a principals of Direct-Current motor and its' special design: Direct Inductor motor with extrinsic excitation (permanent magnets). It presents a operation of wiper motor in consecutive to wiping systém and fulfillment of engeneering standards. It also describes a principles of Finite Element Method in context to basics of simulation program FEMM.

Main attention is given to creation of concrete model and to simulation of gauged exercise with wiper motor. Also there is a second simulation of motor, focused to different type of stator excitation. Findings of thesis is a comparation of theese exercises. Consecution of modeling in software environment is described. It compiles gauged excercise and interprets them.

Klíčová slova

Stejnoseměrný stroj; Stejnoseměrný komutátorový motor; Komutace; Komutátor; Magnetické pole; Magnetická indukce; Metoda konečných prvků; FEMM

Keywords

Direct current machine; Direct inductor motor; Commutation; Commutator; Magnetic field; Magnetic inductance; Finite element method; FEMM

Bibliografická citace

Kůta, A. *Vlastnosti stěračového motoru*, Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 45 s.

Prohlášení

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

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

V Brně dne

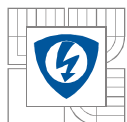
Podpis autora

Poděkování

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

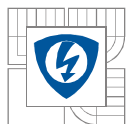
V Brně dne

Podpis autora



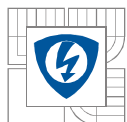
OBSAH

1 ÚVOD	1
1.1 PRINCIP ČINNOSTI STEJNOSMĚRNÉHO STROJE	2
1.2 INDUKOVANÉ NAPĚTÍ A MOMENT STEJNOSMĚRNÉHO STROJE	4
1.3 KOMUTACE	6
2 STĚRAČOVÝ MOTOR A STĚRAČOVÁ SOUSTAVA.....	9
2.1 STĚRAČOVÉ MOTORKY	10
2.1.1 Motorky jednorychlostní	11
2.1.2 Motorky dvourychlostní	12
2.2 STĚRAČOVÁ SOUSTAVA.....	12
3 TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE	14
4 METODIKA ŘEŠENÍ SDRUŽENÝCH ÚLOH.....	16
4.1 ANALYTICKÉ METODY.....	16
4.2 NUMERICKÉ METODY	17
4.2.1 Metoda konečných prvků	17
4.3 KOMBINOVANÉ METODY	19
5 ÚVOD DO PROGRAMU FEMM.....	20
5.1 MAGNETOSTATICKÉ ÚLOHY (MAGNETICS PROBLEMS).....	21
5.2 NESTACIONÁRNÍ MAGNETICKÉ ÚLOHY (MAGNETICS PROBLEM).....	21
5.3 ELEKTROSTATICKÉ ÚLOHY (ELECTROSTATICS PROBLEM).....	21
5.4 ÚLOHY VEDENÍ TEPLA (HEAT FLOW PROBLEM)	22
5.5 ÚLOHY TOKU PROUDU (CURRENT FLOW PROBLEM)	22
6 PRAKTICKÁ ČÁST.....	23
6.1 LABORATORNÍ MĚŘENÍ.....	23
6.1.1 Úkol měření.....	23
6.1.2 Schéma zapojení.....	23
6.1.3 Postup měření	23
6.1.4 Výsledky měření.....	24
6.2 MODEL 2D V PROGRAMU FEMM.....	28
6.2.1 Výpočet magnetického modelu s homogenním magnetováním	31
6.2.2 Výpočet magnetického modelu se směrem magnetizace do středu křivosti	33
6.2.3 Výsledky simulování 2D modelů	36
7 ZÁVĚR.....	39
POUŽITÁ LITERATURA	41
UŽITEČNÉ ODKAZY	43
SEZNAM PŘÍLOH.....	44



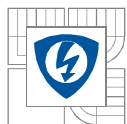
SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1-1: Elementární stejnosměrný stroj s jedním závitem na rotoru	3
Obrázek 1-2: Průběh komutace	7
Obrázek 2-1: Stěračový motorek se šnekovým převodem (odkrytovaný)[15]	10
Obrázek 2-2: Schéma zapojení motorku s trvale připojeným záporným pólem	12
Obrázek 2-3: Schéma zapojení dvourychlostního motorku pro stěrače.....	12
Obrázek 3-1: Vodič v magnetickém poli	14
Obrázek 5-1: Početní výsledek rozvržení magnetické indukce v FEMM (ukázka).....	21
Obrázek 5-2: Rozvržení napětí (ukázka).....	22
Obrázek 6-1: Schéma zapojení měření na stěračovém motorku	23
Obrázek 6-2: Otáčková charakteristika pro kartáč 1 a kartáč 2	27
Obrázek 6-3: Zatěžovací charakteristika pro kartáč 1 a kartáč 2	27
Obrázek 6-4: Geometrický model magnetického obvodu.....	28
Obrázek 6-5: Magnetický model s homogenním namagnetováním.....	30
Obrázek 6-6: Magnetické pole rotorového vinutí (homogenní magnetizace).....	31
Obrázek 6-7: Magnetické pole statoru (homogenní magnetizace).....	32
Obrázek 6-8: Výsledné magnetické pole (reakce kotvy) 2D modelu (homogenní magnetizace)..	33
Obrázek 6-9: Magnetické pole rotorového vinutí (směr magnetizace do středu křivosti).....	34
Obrázek 6-10: Magnetické pole statoru (směr magnetizace do středu křivosti).....	35
Obrázek 6-11: Výsledné magnetické pole 2D modelu (směr magnetizace do středu křivosti)	35
Obrázek 6-12: Průběh magnetické indukce na hraně zubů a vzduchové mezery	37
Obrázek 6-13: Průběh magnetické indukce na hraně zubů a vzduchové mezery	37
Obrázek 6-14: Velikost magnetické indukce v polovině plechů.....	38
Obrázek 6-15: Velikost magnetické indukce v polovině plechů.....	38



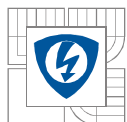
SEZNAM TABULEK

tabulka 6-1: Otáčková charakteristika, kartáč 1	24
tabulka 6-2: Otáčková charakteristika, kartáč 2	25
tabulka 6-3: Zatěžovací charakteristika, kartáč 1	26
tabulka 6-4: Zatěžovací charakteristika, kartáč 2	26
tabulka 6-5: Hodnoty momentů a magnetické indukce 2D modelů	36



SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

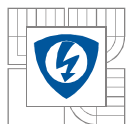
Značka	Jednotka	Význam
B	[T]	magnetická indukce
b_k	[m]	šířka kartáče
B_n	[T]	magnetická indukce motorku při chodu "naprázdno"
B_z	[T]	magnetická indukce motorku při zatížení
c	[-]	integrační křivka
D	[Cm ⁻²]	elektrická indukce
E	[Vm ⁻¹]	intenzita elektrického pole
F	[Wm ⁻²]	tepelná hustota toku
F_e	[N]	síla působící na elektrony
F_{mg}	[N]	magnetická složka Lorenzovy síly
G	[KW ⁻¹]	teplotní gradient
i_1	[A]	proud tekoucí cívkou o indukčnosti L_{11}
i_2	[A]	proud tekoucí cívkou o indukčnosti L_{22}
I_2	[A]	celkový proud kotvou
I_a	[A]	proud vinutím kotvy
I_n	[A]	proud motorkem při chodu "naprázdno"
I_{pz}	[A]	proud motorkem při zatížení
I_{z1}	[A]	zatěžovací proud tekoucí motorkem, kartáč 1
I_{z2}	[A]	zatěžovací proud tekoucí motorkem, kartáč 2
J	[kg.m ²]	moment setrvačnosti
K_M	[-]	momentová konstanta stroje
K_U	[-]	napětíová konstanta stejnosměrného stroje
l	[m]	aktivní délka vodiče
L_{11}	[H]	vlastní indukčnost budící cívky
L_{12m}	[H]	maximální vzájemná indukčnost
L_{22}	[H]	vlastní indukčnost cívky kotvy
L_c	[H]	indukčnost cívky
l_i	[m]	šířka izolace mezi lamelami
M	[Nm]	střední hodnota momentu
M_d	[Nm]	dynamický moment
m_i	[Nm]	maximální okamžitý moment
M_i	[Nm]	vnitřní moment stroje
M_n	[Nm]	moment motorku při chodu "naprázdno"
M_{pz}	[Nm]	moment motorku při zatížení
M_z	[Nm]	zátěžný moment
N	[-]	počet vodičů
n	[-]	počet otáček rotoru za minutu
n_m	[-]	počet otáček mechanického měřidla
n_{z1}	[-]	počet otáček motorku, kartáč 1
n_{z2}	[-]	počet otáček motorku, kartáč 2
p	[-]	počet pólových dvojic
P	[W]	výkon na hřídeli motoru
P_{iel}	[W]	vnitřní elektrický výkon stroje
Q	[C]	elektrický náboj



ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY
Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
Vysoké učení technické v Brně

R_a	$[\Omega]$	odpor vinutí kotvy
R_c	$[\Omega]$	odpor vinutí cívk o indukčnosti L_c
R_k	$[\Omega]$	přechodný odpor mezi kluzným kontaktem kartáče a komutátoru
R_r	$[\Omega]$	regulační odpor
t_k	$[s]$	doba komutace
U_a	$[V]$	úbytek napětí na odporu vinutí kotvy
U_G	$[V]$	napětí na svorkách nezatíženéh dynama
U_i	$[V]$	indukované napětí stroje
U_k	$[V]$	úbytek napětí na kartáčích
u_k	$[V]$	napětí indukované mag. Polem komutačních pólů
U_M	$[V]$	napájecí napětí motoru
u_r	$[V]$	reakční napětí
v	$[ms^{-1}]$	rychlost posouvání
W_m	$[J]$	celková energie cívek o indukčnostech L_{11} a L_{22}
Φ	$[Wb]$	magnetický indukční tok
Φ_1	$[Wb]$	magnetický budící tok
φ	$[\circ]$	úhel svíraný vektorem rychlosti $\mathbf{v}$ a vektorem mag. indukce $\mathbf{B}$ (kap. 3)
φ	$[\%]$	relativní vlhkost (kap.6)
ϑ	$[\circ C]$	teplota
ϑ_m	$[\circ]$	úhel natočení mezi cívkami o indukčnostech L_{11} a L_{22}
μ	$[Hm^{-1}]$	permeabilita
ω	$[rad.s^{-1}]$	úhlová rychlost

A	Dirichletova okrajová podmínka
BEM	boundary element method
CAD	Computer Aided Design
dxf	data exange format
FDM	finite difference method
FEM	finite element method
FEMM	finite element method magnetic
MKD	metoda konečných diferencí
MKP	metoda konečných prvků
MOP	metoda okrajových prvků



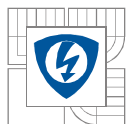
1 ÚVOD

Bakalářská práce seznamuje čtenáře s vlastnostmi, činností a výpočtem magnetického obvodu střeračového motorku jež je speciálním typem stejnosměrného stroje. Stejnosměrný stroj řadíme z hlediska historie k nejstaršímu elektrickému ústrojí na bázi reakce dvou magnetických polí. Sestrojením dynama německého fyzika a vynálezce Ernsta Wernera von Siemens v roce 1866 tak mohl být odstartován nejen inovační proces právě zhotoveného zařízení, ale také technický pokrok jdoucí ruku v ruce se spotřebou elektrické energie.

V současné době se na první pohled může zdát, že stejnosměrné stroje už jsou přežitkem z dob minulých, ale stále nacházejí uplatnění v různých charakteristických provozech, kde se pro své jedinečné vlastnosti jeví z hlediska použití jako neoptimálnější. Menší rozměry a tím i menší hmotnost v porovnání s ostatními typy motorů při zachování stejných elektrických a výkonových parametrů jsou těmi nejsilnějšími argumenty pro volbu jeho instalace do provozu.

Stejnosměrné stroje pracují buď jako dynama -vyrábí elektrickou energii, nebo jako motory- dodanou energii mění v mechanickou. Jelikož v posledních desetiletí jsou stejnosměrné generátory (dynama) zatlačovány modernějšími zdroji výkonu, používají se v současné době převážně jako stejnosměrné motory a to pro své výhodné regulační vlastnosti. Zvláště jsou využívány jako elektrické pohony v železniční i městské dopravě, u pohonů válcoven, dolů, v automobilovém průmyslu nebo i letectví, kde se jeví výhodněji (z důvodů uvedených výše) zejména vůči strojům synchronním o stejném výkonu.

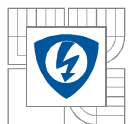
Z uvedeného přehledu použití vyplývá, že ve většině provozních uplatnění se bude jednat o přerušovaný chod stroje, časté reverzace, velké proudové a napěťové změny, tedy o velmi náročné provozní podmínky. Návrh i konstrukce musí pak být pro tyto náročné požadavky přizpůsobeny. Nespornou výhodou kromě snadné regulace otáček je i velký záběrný moment při nízkých otáčkách, oproti tomu nevýhodou je potřeba kluzných kontaktů (kartáčů) doléhajících na komutátor, což má za následek elektromagnetické rušení. S rozvojem elektroniky již dnes dokážeme tuto mechanickou vazbu nahradit – tzv. bezkartáčové stejnosměrné motory s elektronickou komutací.



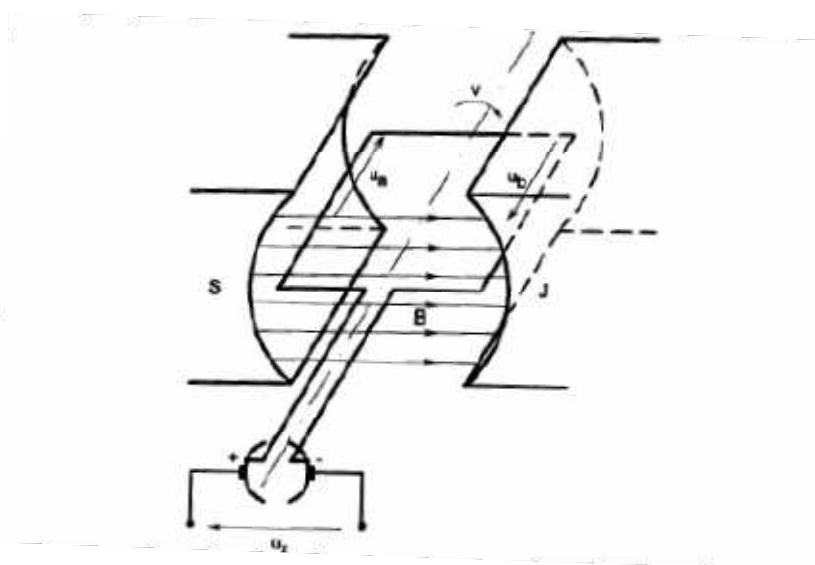
1.1 Princip činnosti stejnosměrného stroje

Základní částí stejnosměrného stroje je rotor a stator. Budící vinutí protékané stejnosměrným proudem je umístěné na pólech statoru. Vinutí kotvy se nachází v drážkách rotoru a jednotlivé cívky vinutí jsou pevně připojeny k komutátoru. Kartáči, které přiléhají k lamelám komutátoru, zajišťujeme přívod nebo odvod elektrického proudu, podle požadované funkce, tedy jestli provozujeme stroj jako dynamo nebo motor.

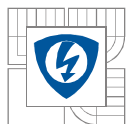
Činnost stroje zobrazuje elementární stroj s jedním závitem na rotoru pohybujícím se v magnetickém poli statoru viz. Obr. 1-1. Vodiče "a" a "b" tvoří závit a jsou navzájem propojeny čely, tak aby byl závit elektricky uzavřen. Závitové vývody jsou pevně připojeny ke dvěma lamelám komutátoru, který se otáčí zároveň s rotorem poháněným poháněcím strojem PS. Na lamely komutátoru přiléhají dva kartáče, které umožňují průtok proudu otáčejícím se závitem.. Pohybem vodičů v magnetickém poli se v nich začne indukovat elektromotorické napětí a v případě, že do obvodu zapojíme zátěž (v našem případě simulovanou odporem R) prochází závitem i zátěží proud i . Směr proudu u dynamu je opačný než u motoru (při zachování polaritý kartáčů) a snadno jej určíme pomocí modifikace Ampérova pravidla pravé ruky: *Jestliže svoji pravou ruku nastavíme tak, aby nám siločáry magnetického pole budícího vinutí (B) vstupovali "do dlaně" a palec zároveň ukazoval směr otáčení poháněcího stroje, ostatní prsty pravé ruky tvořící rovinu s dlaní nám ukazují směr procházejícího proudu.* Tedy ve vodiči "a" je směr proudu "dozadu", ve vodiči "b" je směr proudu "dopředu". U motoru nás zajímá, jakým směrem se bude otáčet rotor, protože závit je protékaný střídavým proudem a vytváří si vlastní magnetické pole jež ovlivňuje magnetické pole statoru. Zde uplatníme modifikaci Flemingova pravidla levé ruky, které nám říká: *Jestliže svoji levou ruku nastavíme tak, aby nám siločáry vstupovali do dlaně a natažené prsty zároveň ukazovali směr proudu, palec označuje směr působení Lorentzovy síly a tedy i směr otáčení.* Vraťme se ale zpět k principu činnosti generátoru. Za polovinu otáčky si vodiče vymění místa a také proud a indukované napětí ve vodičích změni směr. Poněvadž ale lamely komutátoru se otáčejí zároveň s vodiči, je vždy ke kladnému kartáči připojen ten vodič, který je v blízkosti severního pólu a k zápornému kartáči vodič nacházející se v blízkosti jižního pólu. Ve vodiči se indukuje střídavé napětí (a prochází střídavý proud), ale komutátor toto napětí (proud) změni vzhledem k vnějším svorkám (zátěži) na napětí stejnosměrné. Proud tedy teče zátěží stále stejným směrem. Vzhledem k tomu, že se ve vodičích kotvy indukuje střídavé napětí a prochází jimi střídavý proud, zhotovuje se magnetický obvod rotoru z plechů kvůli snížení ztrát výřivými proudy, zatímco pólové nástavce a jeho statoru mohou



být z magneticky vodivého materiálu. Pólové nástavce se z technologických a také provozních důvodů (vodiče vinutí kotvy nejsou rozmístěny spojitě a po celém obvodu rotoru, ale uloženy do drážek - pulzování pole vlivem drážkování kotvy) často skládají z plechů. Při otáčení rotoru se vodiče nepohybují stále v konstantním magnetickém poli, ale též v mezeře mezi póly, kde je nulový magnetický tok statoru. Výstupní napětí má v tomto případě silně pulsující průběh. Ke snížení těchto pulsací i ke zvýšení výsledného napětí na výstupních svorkách je nutno umístit na rotor co největší počet vodičů (cívek) a vhodně je zapojit. Nutnost většího počtu závitů plyne zejména tehdy, uvažujeme-li činnost stroje jako motoru. V takovém případě nebude stroj poháněn od poháněcího stroje a na kartáče se připojí místo rezistoru vnější stejnosměrný zdroj. Připojíme-li kladnou svorku na levý kartáč a zápornou svorku na pravý kartáč, bude proud ve vodičích rotoru procházet opačně než je naznačeno na Obr. 1-1 (podle pravidla levé ruky). Na vodič "a" bude působit mechanická síla magnetického původu (Lorenzova síla) směrem dolů, na vodič "b" nahoru. Tato dvojice sil způsobí otáčení závitů tak dlouho, dokud se budou vodiče pohybovat v magnetickém poli. Jakmile se octnou v mezeře mezi póly (nulové pole), silové působení zanikne a rotor se zastaví. Proto je nutné, aby bylo na rotoru více závitů, protože jedině tak v okamžiku, kdy některé z nich jsou v nulovém magnetickém poli, se jiné nacházejí právě pod póly a otáčení rotoru je plynulé.



Obrázek 1-1: Elementární stejnosměrný stroj s jedním závitem na rotoru



1.2 Indukované napětí a moment stejnosměrného stroje

Pro odvození momentu budeme vycházet z principálního schématu jednoduchého stroje na Obr.1-1, a také pro názornost uvažujme, že budící pole statoru tvoří první cívku a závit v kotvě cívku druhou. Aby se stroj otáčel – vytvářel elektromagnetický moment, musí být splněna podmínka točivého magnetického pole :*cívky jsou konstrukčně uloženy navzájem o 90° a proud v cívkách fázově posunutý taktěž o 90°*. Z průběhu indukovaného napětí je patrné, že stejnosměrný stroj vytváří střední moment a tedy i střední výkon. Pro úvodní vztah vyjádření momentu využijeme celkovou energii soustavy dvou cívek.

$$W_m = \frac{1}{2} L_{11} i_1^2 + \frac{1}{2} L_{22} i_2^2 + i_1 i_2 L_{12m} \cdot \cos v_m \quad (1.2.0)$$

kde L_{11} je vlastní indukčnost budící cívky, L_{22} vlastní indukčnost cívky kotvy, i_1 a i_2 příslušné proudy tekoucí cívkami, L_{12m} je maximální vzájemná indukčnost a v_m úhel natočení mezi cívkami.

Ze vztahu (1.2.0) je patrná závislost energie soustavy na úhlu natočení cívek a tedy i okamžitý moment. Pokud zderivujeme tento vztah podle úhlu natočení cívek, získáme tak maximální okamžitý moment :

$$m_i = \frac{\partial W_m}{\partial v_m} = -i_1 i_2 \cdot L_{12m} \cdot \sin v_m \quad (1.2.1)$$

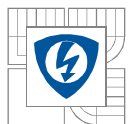
zavedme substituci za výraz $i_1 \cdot L_{12m}$, který považujeme za magnetický budící tok Φ_1 :

$$m_i = -i_2 \cdot \Phi_1 \cdot \sin v_m \quad (1.2.2)$$

Střední hodnotu momentu jednoho závitu získáme, integrujeme-li okamžitou hodnotu momentu v rozmezí jedné poloviny otáčky, tedy:

$$M = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi m_i dv_m = \frac{2i_2 \cdot \Phi_1}{\pi} \quad (1.2.3)$$

S přihlédnutím k faktu, že se na kotvě nachází N vodičů tj. $N/2$ závitů; p počet pólových dvojic; $2a$ všech paralelních větví vinutí rotoru a celkový proud tekoucí vinutím kotvy je $I_2 = i_2 \cdot 2a$ můžeme vztah (1.2.3) upravit:



$$M_i = \frac{p \cdot N \cdot \Phi_1 \cdot I_2}{2\pi a} = K_M \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \quad (1.2.4)$$

kde $K_M = \frac{p \cdot N}{2\pi a}$ je momentová konstanta stroje a M_i celkový vnitřní moment stroje

Výkon na hřídeli motoru je přímo úměrný momentu M_i a úhlové rychlosti ω , tedy:

$$P = M_i \cdot \omega \quad (1.2.5)$$

kde $\omega = 2\pi \cdot n$; n je počet otáček rotoru za sekundu. Vnitřní elektrický výkon označme P_{iel} a je to v podstatě celkový mechanický výkon dodaný poháněcím strojem, oproštěn o celkové mechanické ztráty dynama nebo také výkon vytvořený celkovým proudem kotvy I_2 a indukovaným napětím U_i

$$P_i = U_i \cdot I_2 \quad (1.2.6)$$

Velikost indukovaného napětí U_i si vyjádříme pomocí vztahů (1.2.4), (1.2.5) a (1.2.6):

$$P_i = M_i \cdot \omega = K_M \cdot \Phi_1 \cdot I_2 \cdot 2\pi \cdot n = U_i \cdot I_2 \quad (1.2.7)$$

Podělíme výraz (1.2.7) proudem I_2

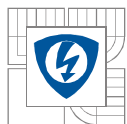
$$U_i = K_M \cdot \Phi_1 \cdot 2\pi \cdot n = \frac{p \cdot N}{a} \cdot \Phi_1 \cdot n = K_U \cdot \Phi_1 \cdot n \quad (1.2.8)$$

kde $K_U = \frac{p \cdot N}{a}$ je napěťová konstanta stroje

Indukované napětí u dynama lze změřit na kartáčích pouze bez zatížení. Je-li stroj zatížen dochází k úbytku napětí U_a na odporu vinutí kotvy R_a a na přechodu kartáčů a komutátoru U_k . Ten se při výpočtu zanedbává, nebo se počítá s konstantní hodnotou úbytku 1V na kartáči.

Uvedme teď současně v činnost dva stejnosměrné stroje, ovšem tak, aby první pracoval v generátorickém režimu a druhý v motorovém. Necht' se oba rotory otáčejí ve stejném smyslu. Tím pádem indukované napětí U_i má taktéž v obou případech stejnou orientaci. Generátorem ale prochází proud opačně než motorem. To znamená, že i úbytky napětí U_a a U_k mají opačnou orientaci. Podle 2. Kirchhoffova zákona můžeme napsat pro uzavřenou smyčku vztahy:

$$U_G = U_i - R_a I_a - U_k \quad (1.2.9)$$



$$U_M = U_i + R_a I_a + U_k \quad (1.2.10)$$

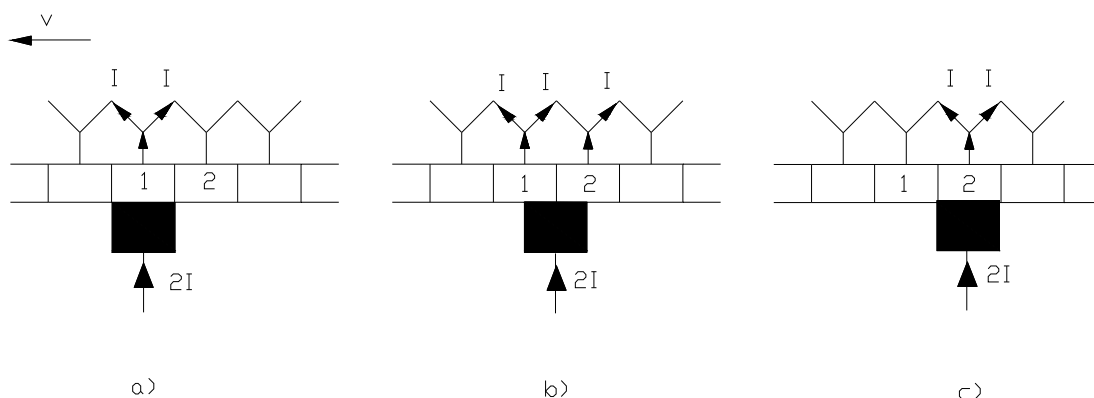
kde U_G je napětí na svorkách nezatíženého dynama, U_M napájecí napětí motoru a I_a je proud vinutím kotvy.[1]

1.3 Komutace

Komutací rozumíme změnu smyslu proudu v právě komutující cívce. Funkce komutátoru pak je usměrňování střídavého elektrického napětí a proudu na stejnosměrné. Je to přechodový děj, který je realizován soustavou kartáč – komutátor. Přesněji řečeno děj, při kterém se navzájem ovlivňuje hned několik problémů mechanické vazby. U kluzného kontaktu řešíme problém elektrický, mechanický (tření), elektrochemický (tvorba patiny). Jak bylo nastíněno v úvodu, dnes už umíme realizovat komutaci elektronickou, kde odpadá vliv tření a tvorby patiny.

Otáčením rotoru v magnetickém poli se indukuje ve vodičích kotvy střídavé napětí (odvozeno v kapitole 1.1). Ovšem na výstupních svorkách je napětí stejnosměrné - téměř nezvlněné. Usměrnění napětí i proudu provádí komutátor vhodným zapojením cívek k lamelám a konstrukčním uspořádáním uložení kartáčů vzhledem k hlavním pólům statoru. Podélné osy kartáčů a hl. pólů statoru jsou rovnoběžné. Nejvhodnější okamžik kdy lze cívkou komutovat (změnit smysl proudu tekoucí cívkou) je, když se cívkové strany nacházejí v oblasti nulového budícího magnetického pole – v rovině kolmé na podélnou osu hl. pólů. Protože zde pole zaniká a znovu vzniká, dochází k změně indukovaného napětí (proudu) plynule. V době komutace jsou cívky spojovány „nakrátko“ kartáči doléhajícími na lamely a neteče jimi žádný proud.

Průběh komutace je znázorněn na obr. 1-4., kde je komutátor pro názornost rozvinut a cívky zapojeny do smyčkového vinutí. Otáčivý pohyb je reprezentován rychlostí v (úměrná úhlové rychlosti komutátoru). U skutečných strojů je vždy šířka kartáče větší než lamely. Pro jednoduchost určíme šířku kartáče a lamely stejnou. V okamžiku znázorněném obr. 1-3 a) cívkou protéká proud jedním směrem. Jelikož ale k lamele 1 jsou připojeny dvě cívky, protéká lamelou dvojnásobný proud. V době na obr. 1-3 b) kartáč spojuje „nakrátko“ dvě sousední lamely 1 a 2 a cívka se nachází ve stavu komutace – bez proudu. Můžeme si všimnout stálého stejného proudu $2I$ procházejícího kartáčem. Z obr. 1-3 c), kdy kartáč doléhá pouze na lamelu 2, je patrna změna orientace proudu cívkou.



Obrázek 1-2: Průběh komutace

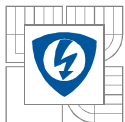
Pro dobu komutace T_k platí vztah:

$$T_k = \frac{b_k + l_i}{v} \quad (1.3.0)$$

kde b_k je šířka kartáče, v rychlost otáčení a l_i šířka izolace mezi lamelami. Protože šířka izolace bývá zanedbatelně tenká lze psát:

$$T_k = \frac{b_k}{v} \quad (1.3.1)$$

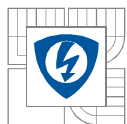
V době T_k se má cívka pohybovat v nulovém magnetickém poli statoru (magnetická neutrála). Vlivem reakce kotvy však dochází k natočení magnetické neutrály ve směru otáčení u dynama a proti směru otáčení u motoru a tím i neideální komutaci cívky. Výsledkem nastalé situace je indukce reakčního napětí u_r (1.3.2) a velký proud nakrátko (kartáče zkratují cívku přes lamely). Reakční napětí působí proti změně smyslu proudu při komutaci, což je nežádoucí – dochází k tzv. zpožděné (indukční) komutaci. Následkem je vznik elektrického oblouku (jiskření), nadměrné zahřívání kartáčů a komutátoru, což má za následek úbytek materiálu z obou částí, tím se zhoršuje kvalita kontaktu a povrchu komutátoru (vznik patiny) a růstu přechodného odporu kontaktu. Průběh proudu v komutující cívce je závislý na indukčnosti L_c , odporu vinutí cívky R_c a přechodnému odporu mezi kluzným kontaktem R_k z nichž největší význam má právě vlastní indukčnost cívky L_c . Snažíme se výše popsany jev odstranit umístěním komutačních (pomocných) pólů do konstrukce stroje a pro komutující cívku tak vytvořit vhodné magnetické pole, které působí proti poli reakce kotvy a zároveň se tak snaží v době komutace cívky „natočit“ magnetickou neutrálu do příčné osy (kolmá na podélnou osu pólů). Takto vytvořeným magnetickým polem se indukuje v době neideální komutace cívky napětí u_k , které působí proti



reakčnímu napětí u_r . Vinutí pomocných pólů se zapojuje do série s vinutím kotvy a to proto, aby vytvoření pomocného pole bylo úměrné zatížení stroje. Směr proudu ve vinutí pomocných pólů a tedy i polarita pole je daná nutností zrušení pole reakce kotvy a docílení tak snazší změny proudu v cívce. Proto následuje u dynama i motoru po hlavním severním pólu pomocný pól jižní, ale bráno se zřetelem na směr otáčení. U strojů bez pomocných pólů se toto pole získá natočením kartáčů z neutrální polohy. V praxi se ne vždy podaří optimálně zvolit pomocné póly a tedy i celkové vykompenzování reakčního pole komutující cívky. Je-li pole pomocných pólů slabší bude stroj podkomutován, je-li silnější stroj je nadkomutován.

$$u_r = L_c \frac{di}{dt} \quad (1.3.2)$$

kde L_c je celková indukčnost zahrnující vlastní indukčnost komutující cívky a vzájemnou indukčnost cívek současně komutujících, $i(t)$ je proud komutující cívkou.[3]



2 STĚRAČOVÝ MOTOR A STĚRAČOVÁ SOUSTAVA

V současné době nacházíme permanentní magnety používané k buzení malého elektrického stroje (do výkonu 1kW) ve velmi hojné míře, zvláště v automobilovém průmyslu. To je způsobené inovací a produkcí feritových magnetů a používáním nových druhů materiálů ze vzácných zemin. Stěračový motorek řadíme do skupiny stejnosměrných strojů s cizím buzením. Cizí buzení je v tomto případě reprezentované permanentní magnety na statoru. U stěračů je používán stále původní princip činnosti, tj. stírání dešťových kapek nebo sněhu pomocí tvrzených pryžových lišt. Pohon celého ústrojí pak tvoří elektromotorek, redukční převod a mechanismus pro změnu otáčivého pohybu na kývavý. Kývání stíracích ramen je pro řidiče nepříjemný, ale zatím se nepodařilo nalézt vhodnější způsob.

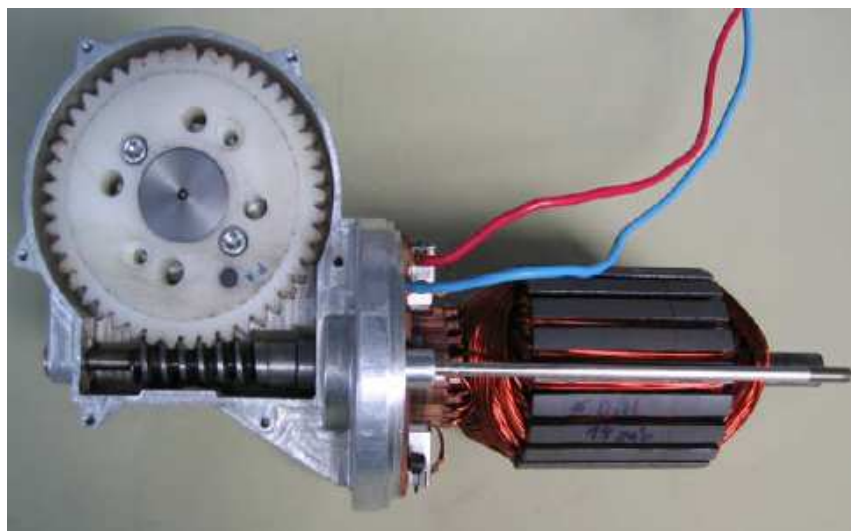
Pro stěrače osobních i užitkových automobilů platí právní předpisy Evropské hospodářské komise:

- Stíraná plocha musí být nejméně 80% tzv. referenčního pole, stanoveného s ohledem na bezpečný výhled z místa řidiče
- Stírací souprava musí mít nejméně dvě různé, přepínatelné rychlosti s rozdílem nejméně 15-ti kyvů za minutu. Největší rychlost přitom musí být nejméně 60 kyvů za minutu a nejmenší naopak nejvíce 50 kyvů za minutu.
- Jsou-li splněny výše zmíněné podmínky, může být stírací souprava vybavena i plynulou změnou rychlosti, případně plynulou nebo stupňovitou změnou prodlevy mezi po sobě následujícími kyvy, a to při stejné nebo proměnné době jednoho kyvu.
- Stěrač musí pracovat samočinně nezávisle na řidiči, s výjimkou zapnutí nebo vypnutí, po kterém se musí vždy samočinně vrátit do výchozí polohy.
- Stěrací raménko musí být odklopitelné od povrchu skla za účelem ručního čištění.
- Účinnost stírání musí být zaručena nejméně do 80% nejvyšší rychlosti vozidla nebo do rychlosti 160km.h^{-1}

2.1 Stěračové motorky

Výhradně se dnes používají motorky buzené permanentními magnety, derivační nebo kompaundní pro svůj těžký rozběh jenom výjimečně. Odkrytovaný motorek spolu s převodovým

ústrojem je vidět na obr 2-1. Počet otáček je v rozmezí 1500 min^{-1} až 4000 min^{-1} , výkon 12 – 50W. Elektromotory jsou navrženy se dvěma rychlostmi a cyklovačem. Výhodou použití derivačního motorku je snadná plynulá nebo stupňovitá regulace rychlosti. Mají však menší účinnost a jsou složité, proto se u moderních stěračových pohonů nepoužívají. U motorků s permanentními magnety se podstatně větší účinnost a mají jednodušší konstrukci. Proto se dnes tento druh pohonu využívá téměř výhradně.



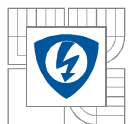
Obrázek 2-1: Stěračový motorek se šnekovým převodem (odkrytovaný)[15]

Z kapitoly 1.2 a pomocí vztahů (1.2.8) a (1.2.10) si odvodíme vztah pro otáčky:

$$n = \frac{U_M - R_a I_a - U_k}{K_U \cdot \Phi_1} \quad (2.1.0)$$

Otáčky lze tedy měnit:

- Změnou napájecího napětí U_M
- Změnou odporu R_a ve vinutí obvodu kotvy
- Změnou magnetického toku Φ



U motorků buzené permanentními magnety nelze měnit magnetický tok a vzhledem k faktu, že motorek je napájen ze zdroje o konstantním napětí (autobaterie 12V) a s uvažováním skutečnosti, že nechceme regulovat otáčky pouze směrem dolů, připadá v úvahu regulace pouze změnou odporu ve vinutí obvodu rotoru. Tu provedeme zařazením regulačního odporu R_r do série s vinutím rotoru R_a . Nyní můžeme psát, že pro otáčky n platí:

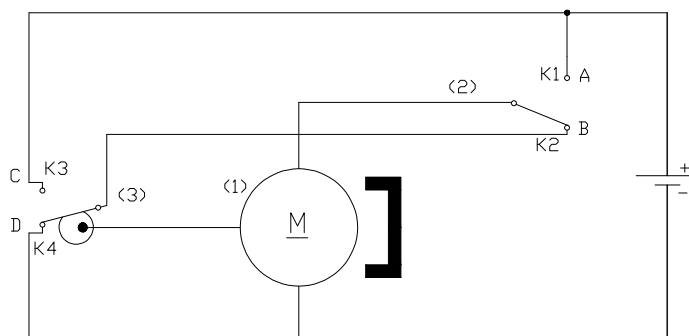
$$n = \frac{U_M - (R_a + R_r)I_a - U_k}{K_U \cdot \Phi_1} \quad (2.1.1)$$

2.1.1 Motorky jednorychlostní

Jsou opatřeny stejně jako dvourychlostní dobřehovým kontaktem, který je součástí převodového mechanismu. Dobřehový kontakt slouží k dobřehu a zastavení stíracích ramen v krajní poloze bez ohledu odepnutí napájení hlavního obvodu uživatelem (řidičem). Aby nedošlo k opětovnému sepnutí dobřehového kontaktu vlivem překmitnutí stíracích ramen díky jejich setrvačnosti, je motorek v koncové poloze elektricky bržděn.

2.1.1.1 Princip činnosti jednorychlostního motorku

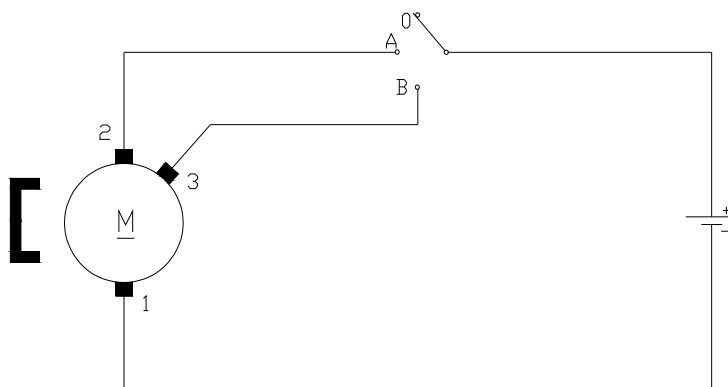
Motorku (1) je zajištěno napájení přes přepínač (2), kterým v poloze A prochází proud do motorku – požadavek od řidiče ke stírání. Po přepnutí do polohy B (řidič ukončil požadavek na stírání) se odpojí motorek od přímého napájení z baterie, ale přes sepnutý přepínač (3) v poloze C je motorek stále napájen z baterie ale už bez možnosti odpojení uživatelem. Pohyblivý kontakt přepínače (3) je ovládán převodovým mechanismem, který ve vhodnou chvíli odpojí motorek od napětí odepnutím pohyblivého kontaktu přepínače (3) z polohy C do polohy D. Motorek je odpojen od napětí, ale vlivem setrvačných hmot se dotáčí. Ve vodičích kotvy se indukuje napětí (z motorku se stává na chvíli generátor), tedy i proud, který vytváří moment působící proti směru setrvačných hmot a motorek se takto intenzivně dobržďuje.



Obrázek 2-2: Schéma zapojení motorku s trvale připojeným záporným pólem

2.1.2 Motorky dvourychlostní

Velmi častým způsobem regulace otáček je konstrukce s tzv. třetím kartáčem. Vyšší rychlost otáčení se dosáhne přivedením napětí na menší počet cívek rotoru právě třetím kartáčem a rotor se tak musí otáčet rychleji. Princip činnosti je obdobný jako u jednorychlostních motorků současně i s funkcí doběhového kontaktu.[6]



Obrázek 2-3: Schéma zapojení dvourychlostního motorku pro stěrač

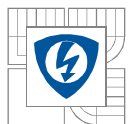
2.2 Stěračová soustava

Stírací soustava předního skla má v nejčastějším případě dvě stírací ramena, jejichž pohyb může být souběžný nebo protiběžný. V druhém případě realizace vyžaduje soustava vyšší kinematické nároky na mechanismus, na druhou stranu je pak ale stíraná plocha souměrná a vhodnější pro vysoká okna – zejména u užitkových, nákladních vozidlech nebo u autobusů.

Ramena stíracích lišt mohou být poháněna jedním motorkem – tandemové uspořádání nebo každé zvlášť od dvou motorků, kde je nutná synchronizace činnosti.

Zajímavým řešením je použití reverzačního elektromotorku s využitím řízení elektronikou, kdy vhodným spínáním dochází ke změně polaroty a tím i směru otáčení v průběhu činnosti stírací soustavy. Páka převodového mechanismu se pohybuje v rozmezí 180°. Další výhodou elektronického řízení je plynulá regulace otáčení elektromotorku, např. v úvratích při změně pohybu, ale také při spolupráci s činností ostřikovače skla.

Požadovaný výkon motorku pro stírací soupravu se odvíjí od nejvyšší rychlosti (maximálního počtu kyvů za minutu), počtem stíracích lišt a jejich přitlakem ke sklu a součinitelem tření mezi pryžovou lištou a stíraným sklem. Další podmínkou je odolnost proti tepelné přetížitelnosti a případnému zkratu při zastaveném pohybu a zapnutém stírači. Přenesení momentu mezi motorkem a stíračem a vlastní převod je realizován z redukčního ozubeného



soukolí a z klikového nebo kulisového mechanismu se spojenými táhly, kterým se mění otáčivý pohyb na úhlový kývavý. Redukční převod je konstrukčně spojen s motorkem. U stíračů s pohonem jen jedné lišty (stírání zadního skla, stírání světlometů) je mechanismus pro kývavý pohyb vestavěn přímo do převodovky motorku. Někdy se také používá ke stírání předního skla, kdy jedna lišta je poháněna přímo přes převod motorkem a druhá je k ní připojena táhlem, tzv. tandemové uspořádání.

Další zvláštní konstrukcí je stírací souprava, kde pro přenos momentu z klikového mechanismu v převodovce motorku používá ozubená hřídel vedená lanovodem až na samostatné převodovky jednotlivých stíracích ramen, tzv. souprava s ohebnou hřídelí. Toto řešení má horší mechanickou účinnost, ale dovoluje snadnou instalaci, manipulaci a také dobře řeší prostorové problémy s umístěním motorku a mechanismů stírací soupravy.

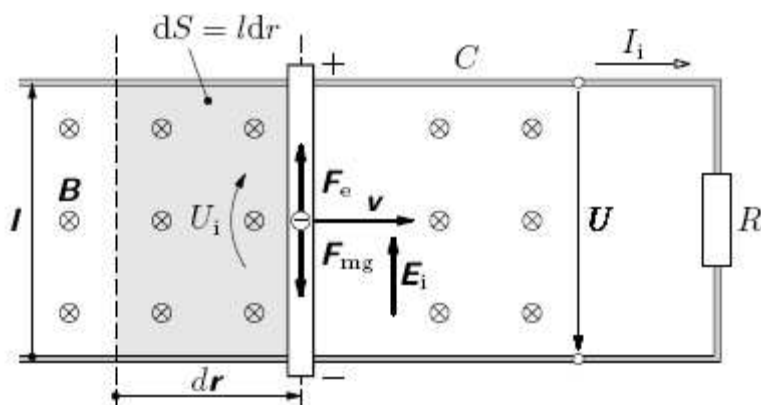
Nejvíce namáhanou částí soupravy je pryžová lišta, která musí s dostatečnou přitlačnou silou dosedat na sklo po celé své délce. Jestliže je přední sklo více zakřivené, musí se dbát na zvýšenou pozornost přitlačnému systému ramene lišty. Měrný přitlak se pohybuje v rozmezí 0,05–0,25 Nm. Při provedení stírací lišty (břitu) je nutno počítat s aerodynamickými podmínkami, neboť při vyšších rychlostech vozidla může dojít k nadlehčování břitu a s tím spojenou chybnou činností, kdy lišta nedosedá v dostatečném přitlaku na sklo. Velikost přitlačné síly se reguluje u vozidel dosahujících vyšších rychlostí předpětím hlavní pružiny stíracího ramene a která je řízena jednoduchým mechanismem s krokovým motorkem podle elektronické řídicí jednotky vyhodnocující rychlost automobilu a výkon motorku stěrače.

Za určitých podmínek může být nejnižší rychlost stírání příliš vysoká. K tomu dochází zejména při mrholení nebo slabém dešti a lišty tak pracují téměř „nasucho“. Tento nechtěný stav doprovázený zvukovými projevy lišty třenou o stírané sklo se odstraňujeme pomocí intervalového spínání - časovače. Stírací souprava je uváděna do činnosti s časovou prodlevou

mezi dvěma kyvy. Stěrač se vrátí zpět do výchozí polohy po ukončení jednoho cyklu, kde opět čeká na impuls. Doba čekání na impuls nebo také doba klidu může být pevná nebo proměnlivá. Intervalový spínač se spíná pouze na dobu potřebnou k tomu, kdy pohyb stírače automaticky sepne doběhový spínač zaručující přerušení napájení motorku po skončení cyklu (dvou kyvů). Určitým způsobem je jednodušší použití „dešťového“ čidla, které samočinně spíná obvod stírací soustavy podle optického stavu čelního skla, tj. reaguje podle množství dešťových kapek na povrchu skla.

3 TEORIE ELEKTROMAGNETICKÉHO POLE

Elektromagnetická indukce se stala jedním z významných objevů počátku 19. stol. kdy bylo zjištěno, v okolí vodiče, kterým protéká elektrický proud, magnetické pole. Od této chvíle se řady vědců pokoušely zjistit děj opačný – jak působením magnetického pole vyvolat proud elektrický. To se povedlo člověku, kterému se nedostalo v průběhu života systematického vzdělání, ale který byl ryzím experimentátorem, angličanovi Michaelovi Faradayovi. V roce 1831 uskutečnil řadu pokusů, kterými dokázal pravdivost svých teorií. Dnes je jeho objev považován za důležitý pilíř teorie i praxe elektromagnetického pole uplatňujícím se v celé škále elektrotechnického a energetického průmyslu.



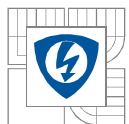
Obrázek 3-1: Vodič v magnetickém poli

Mějme homogenní magnetické pole v čase neproměnné s konstantní indukcí B . Do pole vložíme vodič o aktivní délce l , který je zapojen do obvodu s odporem R a začneme jím pohybovat rychlostí v (viz. obr. 3-1). V tuto chvíli začne na elektrony vodiče působit magnetická složka Lorentzovy síly $\vec{F}_{mg} = Q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ použitím teorie pro velikost vektorového součinu, můžeme rovnici přepsat ve tvaru:

$$F_{mg} = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \varphi \quad (3.1.0)$$

kde φ je úhel svíraný vektorem rychlosti $\vec{v}$ a vektorem magnetické indukce $\vec{B}$

Působením magnetické síly $\vec{F}_{mg}$ dojde k přesouvání elektronů k zápornému konci vodiče a ten se tak začne nabíjet (horní část kladně, spodní záporně). Tím vzniká elektrostatické pole vodiče o intenzitě $\vec{E}$, které působí na elektrony silou $\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}$ v opačném směru než síla magnetická.



V určité chvíli budou obě síly působící na záporné nosiče náboje v rovnováze – jejich účinky se vyruší. Lze psát $\vec{F}_e + \vec{F}_{mg} = 0$ nebo také

$$\vec{v} \times \vec{B} + \vec{E} = 0 \quad (3.1.1)$$

Můžeme tedy konstatovat, že magnetická síla $\vec{F}_{mg}$ vyvolává elektrické pole o intenzitě $\vec{E}_i = \vec{v} \times \vec{B}$. Jestliže působí na vodič o aktivní délce l můžeme psát:

$$U_i = \oint_C \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = \vec{E}_i \cdot \vec{l} = (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} \quad (3.1.2)$$

kde U_i je velikost indukovaného napětí, C uzavřená křivka v jejímž okolí vzniká elektrické pole.

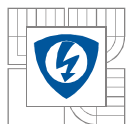
Ted' uvažme podle obr. 3-1, že změna rychlosti v vyvolá změnu posunutí vodiče o $d\vec{r}$ a vztaženo vůči celkové aktivní délce vodiče v poli, změnu plochy $d\vec{S}$, kterou prochází magnetická indukce $\vec{B}$. Vztah (3.1.2) upravíme s uvážením časové změny dt :

$$\begin{aligned} U_i &= (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{l} = -(\vec{B} \times \vec{v}) \cdot \vec{l} = -(\vec{v} \times \vec{l}) \cdot \vec{B} = \\ &= -\frac{1}{dt} (\vec{v} dt \times \vec{l}) \cdot \vec{B} = -\frac{1}{dt} (d\vec{r} \times \vec{l}) \cdot \vec{B} = -\frac{d\vec{S}}{dt} \times \vec{B} \end{aligned} \quad (3.1.3)$$

Zavedme element magnetického indukčního toku $d\vec{\Phi} = d\vec{S} \cdot \vec{B}$, pak může psát vztah pro indukované elektromotorické napětí:

$$U_i = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1.4)$$

který nám říká, že velikost napětí je rovno rychlosti změny magnetického toku Φ procházejícího obvodem. Znaménko minus nám pouze říká, že indukované napětí působí v takovém směru, aby zabránilo změně magnetického toku, který jej vyvolal.[7]



4 METODIKA ŘEŠENÍ SDRUŽENÝCH ÚLOH

Sdruženou úlohou míníme v širším slova smyslu současně řešení tří nestacionárních nelineárních fyzikálních polí : elektromagnetického, teplotního a termoplastických posuvů (prodloužení materiálu a jeho následné ochlazení, stlačení – ohřev)

Metody řešení fyzikálních polí, resp. sdružených úloh si můžeme rozdělit na metody:

- analytické
- numerické
- kombinované

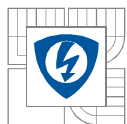
4.1 Analytické metody

V níže uvedeném textu jsou přiblíženy analytické metody využívané při řešení elektromagnetických polí jež lze modifikovat i pro jiná fyzikální pole.

Základní analytické metody vycházejí zejména z:

- přímého použití základních rovnic pole v integrálním tvaru – této metody lze použít v soustavách, které jsou izotropní, homogenní a lineární a je-li ze zadání úlohy zřejmá taková symetrie pole, že lze zvolit za integrační plochu resp. křivku libovolnou ekvipotenciální plochu resp. ekvipotenciální křivku.
- řešení Laplaceovy nebo Poissonovy rovnice kdy technické problémy lze formulovat pomocí parciálních diferenciálních rovnic. Ty lze pak řešit množstvím různých metodik z nichž nejvíce známé jsou: metoda přímé integrace nebo separace proměnných
- vhodné transformace – jedná se např. o aplikování Gaussovo–Ostrogradského či Stokesovy věty nebo metoda zrcadlení
- vícenásobné integrace – kde hlavním kritériem použití je podmínka existence statického pole v lineárním homogenním prostředí a je-li známo rozložení všech zdrojů..

Analytické metody omezuje řada zjednodušujících předpokladů díky nimž se mohou někdy vzdálit od původního zadání řešené úlohy. Jejich velkou výhodou je obecný charakter nalezeného řešení, který tak umožňuje hlubší pohled na zákonitosti sledovaných jevů. Jde také říci, že



analytické metody jsou již za horizontem svých možností, které už vyčerpaly a dále se prakticky nerozvíjí.

4.2 Numerické metody

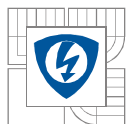
Jejich praktický význam je pouze ve spojení s výpočetní technikou, což s sebou nese určitou výhodu, kterou je matematická nenáročnost řešitele a také, že jsou univerzální. Numerické metody lze zhruba rozčlenit na:

- **diferenciální** – které lze dále rozčlenit na:
 - ✓ **diferenční** – *metoda konečných diferencí /MKD/ (finite difference method /FDM/)*
 - ✓ **variační** – *metoda konečných prvků /MKP/ (finite element method /FEM/)* - je to velice účinná variační metoda řešení okrajových úloh založená na obecných energetických principech. O metodě je podrobněji pojednáno v kapitole 4.2.1
- **integrální** – *metoda hraničních (okrajových) prvků (MOP), [boundary element method (BEM)]*
- **kombinované** – obsahují některé prvky z obou předchozích tříd
- **speciální**
 - ✓ **stochastické** – např. *Monte Carlo*;
 - ✓ ostatní

4.2.1 Metoda konečných prvků

Neustálé vyšší požadavky spotřebitele kladou větší nároky na vývojové techniky a tím i v dnešní době počítačovou podporu v řešení těchto požadavků. Každý technický pracovník je z počátku obeznámen s úlohou nebo zadáním, které má řešit nebo analyzovat. To je první a důležitý předpoklad, protože nezná-li cíl svého snažení, nemůže se dopracovat ke správnému výsledku. Je-li cíl stanoven obvykle bývá v obecném rozsahu a z širšího pohledu. Je vhodné rozdělit si tento celek na menší – dílčí zadání, nejlépe tak, aby bylo možno snáze proniknout do jádra zúženého problému. Přesně specifikovat a definovat problém pomocí fyzikálních podstat, mechanických vlastností a různých dějů, které pomohou přiblížit a porozumět problematice, která se třeba i zprvu zdála neřešitelná nebo jen obtížně.

Metoda konečných prvků (dále jen MKP) je numerická metoda využívající k dopracování se výsledků řešení diferenciálních rovnic, popisujících model zkoumaného předmětu v obecném



slova smyslu, jeho vlastností a fyzikálních principů navzájem se ovlivňujících. Pokud by se jednalo o základní fyzikální úlohy na jednoduchých tělesech, analytické řešení diferenciálních rovnic by nepředstavovalo velký problém. Protože ale v praxi se s podobnými úkoly takřka vůbec nesetkáváme a jádro řešení úlohy spočívá ve vyřešení i několika milionů rovnic, ukázalo se jako nejvhodnější použití aproximační metody- MKP. Z tohoto základního pojetí už můžeme usuzovat, že se bude jednat o komplexní řešení problémů kladoucích nemalé nároky na konstruktéra nebo vývojového pracovníka, ale především vysoké nároky na výpočetní techniku. S posledním jmenovaným faktem úzce souvisí vývoj a aplikování do praxe MKP. Počáteční výpočetní programy se objevují v druhé polovině sedmdesátých let, právě s vývojem počítačových systémů. Metodu konečných prvků navrhl v roce 1943 americký matematik německého původu Richard Courant. Zhruba o deset let později byla znovu objevena americkými inženýry při provádění pevnostních výpočtů leteckých konstrukcí. Systematické teoretické studium MKP začalo až v šedesátých letech. V roce 1968 dokázal jako první konvergenci MKP brněnský profesor Miloš Zlámal (1924 - 1997).

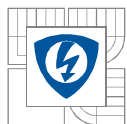
4.2.1.1 Princip metody konečných prvků

Jádro spočívá v geometrickém rozdělení zkoumaného objektu na konečný počet elementů, které svojí velikostí odpovídají požadované přesnosti výpočtu. Elementy jsou navzájem spojeny ve společných bodech mezi sebou, tzv. uzlech, které mají definované souřadnice obecně v prostoru (v dnešní době se MKP využívá zejména k řešení úloh ve 2D nebo 3D rozměru). Každý z těchto uzlů je charakterizován matematickou funkcí, což už obstarává výpočetní program na základně vstupních parametrů zadaných pracovníkem. Získáme tak podrobný popis vlastností předmětu pomocí diferenciálních rovnic, které se dále řeší převedením na soustavy algebraických rovnic.[8]

Konečnému výpočtu a analyzování předmětu předchází tři hlavní kroky:

- *Předzpracování*

V této fázi dochází k vytváření modelu a definici jeho geometrických rozměrů (uplatnění CAD systémů). Následuje volba materiálových vlastností a generování výpočtové sítě, tzv. meshování, které nám vytvoří doslova síť elementů zkoumaného předmětu a definuje uzlové body.



Zadávat se hodnoty veličin fyzikálních jevů a volba materiálů takovým způsobem, který odpovídá co nejvěrohodněji skutečnosti. Většinou se zde také aplikují okrajové podmínky (ohraničenost výpočtové oblasti atd.)

- *Vlastní řešení*

Zde probíhá volba typu analýzy (statická, harmonická), výběr žádané veličiny, kterou požadujeme znát a která je optimalizovaná pro dané fyzikální pole. Dále nastavení požadované přesnosti. Podle typu analýzy se pak volí výpočetní časy, způsob zápisu a tisku výsledků atd. Ve většině výpočetních programů je tato část plně automatizována.

- *Vyhodnocení*

V této závěrečné části se provádí vyhodnocení řešené úlohy. K dispozici bývá několik možností grafické interpretace výsledků, z nichž nejpoužívanější je zobrazení mapy či vynesení závislosti na čase nebo v daném místě materiálu. Příslušná výstupní data jsou pak přístupná formou různě obarvených, stínovaných nebo šrafovaných ploch, ba dokonce vyobrazením směrů vektorů.

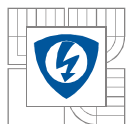
4.2.1.2 Závěrem o metodě konečných prvků

Metoda konečných prvků je velice populární metodou používanou pro numerické modelování počátečních ale i stávajících problémů. Význam MKP se ještě zvýšil vývojem směrem k osobním počítačům a CAD systémům. Dnes už se objevují aplikace, které navzájem kombinují geometrický návrh a analyzování vlastností třeba jen právě “zhotovovaného” tovaru. To umožňuje konstruktérům nahlédnout už od počátku a průběžně vyhodnocovat aktuální stavy plánovaného výrobku. Následkem je finanční i časová úspora, která může dalekonásobně přesahovat výdaje vynaložené jak na potřebný software, tak i technicky vzdělanou obsluhu.

Výběr software pro 2D i 3D modelování je v dnešní době již rozsáhlý, ale jde především o komerční software a ne každý je vhodný pro použití řešení specifické úlohy. Výhodou MKP je předvídání vlastností a stavů předmětu, který se nachází teprve v počátcích vlastní konstrukce. To umožňuje další odlaďování předmětu samotného nebo i přizpůsobování okolí, které na něj v praxi působí a ovlivňuje tak jeho činnost.

4.3 Kombinované metody

Kombinované metody nacházejí své uplatnění v moderních výpočtových programech. Dodržením příslušných podmínek se použijí vhodné analytické metody na řešení části úlohy a na zbylou část se použije metod numerických. Jejich výhoda spočívá zejména rychlosti výpočtu a v relativně menších nárocích na použitou výpočetní techniku.[13]



5 ÚVOD DO PROGRAMU FEMM

Program FEMM můžeme považovat za soustavu programů pro řešení nízkofrekvenčních elektromagnetických problémů ve dvourozměrných a axisymetrických (souosých) oblastí. Program řeší lineární/nelineární magnetostatická zadání, lineární/nelineární časově harmonická magnetická zadání, lineární elektrostatická zadání a problematiku proudění (rozložení tepelného toku) tepla v materiálu.

Postup při řešení úlohy můžeme rozdělit do tří hlavních částí:

- Interaktivní rozhraní (femm.exe) - umožňuje předzpracování a následné zpracování pro různé typy úloh uvedených výše. Obsahuje CADlike - rozhraní pro navrhování geometrických rozměrů, které jsou základem správného výpočtu součástí. Umožňuje také definovat hraniční podmínky. Pro přesnější geometrické vyobrazení součástí je vhodné použít program AutoCad, jehož soubory s příponou DXF se snadno importují do simulačního prostředí programu FEMM. Vyhodnocení řešených úloh jsou nejčastěji vyobrazena formou obrysu a hustoty vykreslení požadované veličiny (barevně znázorněné). Program také dovoluje uživateli řešení pole v libovolných bodech, v jejichž okolí vyznačeném uzavřenou plochou pak program sám interpretuje vlastnosti materiálu, které předtím byly nadefinovány uživatelem.
- triangle.exe - rozdělí geometricky nadefinovanou oblast (buď v CADlike nebo AutoCad) do konečného množství trojúhelníků, což je důležitou částí MKP.
- výpočetní zařízení (fkern.exe pro magnetismus, belasolv pro elektrostatiiku, hsolv pro tepelný tok a csolv pro analyzování přemětu protékajícího proudem) - každé výpočetní

zařízení se odvolává na soubor dat, v němž jsou uložena data popisující daný problém a následně řeší diferenciální rovnice k získání hodnot pro požadované pole.

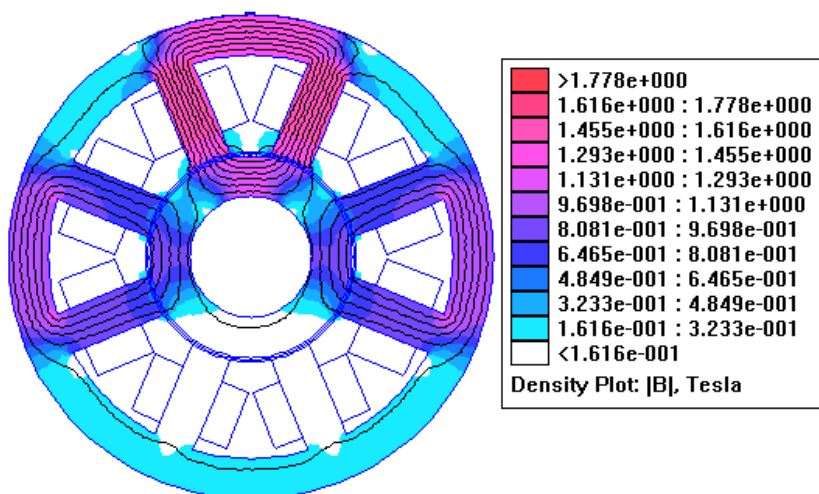
Pozn. : Program podporuje Lua skriptovací jazyk integrovaný do interaktivního rozhraní. U verzí 3.4 a nižších je možno spustit vždy pouze jeden skrip na rozdíl od verze 4.2. Tato skutečnost ulehčuje jak samotnou práci, tak nezanedbatelnou časovou úsporu v případě, že technik analyzuje úlohy blízké si svým charakterem. Jde v podstatě o naprogramování určitého typu zadání.

5.1 Magnetostatické úlohy (Magnetics problems)

Magnetostatické úlohy jsou zadání, ve kterých jsou pole časově invariantní -neměnné. Tedy, kde nedochází ke změnám charakteristických veličin (jakou je např. magnetická indukce) magnetického pole, které vytváří buď nepohybliví se vodič s konstantním – stejnosměrným elektrickým proudem, proud částic s nábojem při pohybu rovnoměrném přímočarém nebo nepohyblivý permanentní magnet.

5.2 Nestacionární magnetické úlohy (Magnetics problem)

Výše uvedené pole charakterizuje řešení typových úloh, ve kterých dochází k časovým změnám magnetického pole a příbuzných veličin na něm závislých. Nejpodrobnějšímu zkoumání v takovém případě podléhá samotná elektromagnetická indukce spolu s magnetickým tokem, jež spolu navzájem úzce souvisí, dále velikost magnetického odporu vzduchové mezery a konstrukční geometrie tovaru a se změnou plochy procházejícího magnetického toku. Důležitou úlohu zde hraje i vzájemná poloha (natočení) zkoumaných součástí. Předmětem zkoumání jsou i ztráty v magnetickém obvodu zapříčiněné vířivými proudy, které ohřívají okolní materiál a z hlediska návrhu se je obsluha programu snaží minimalizovat pro větší hospodárnost budoucího výrobku.

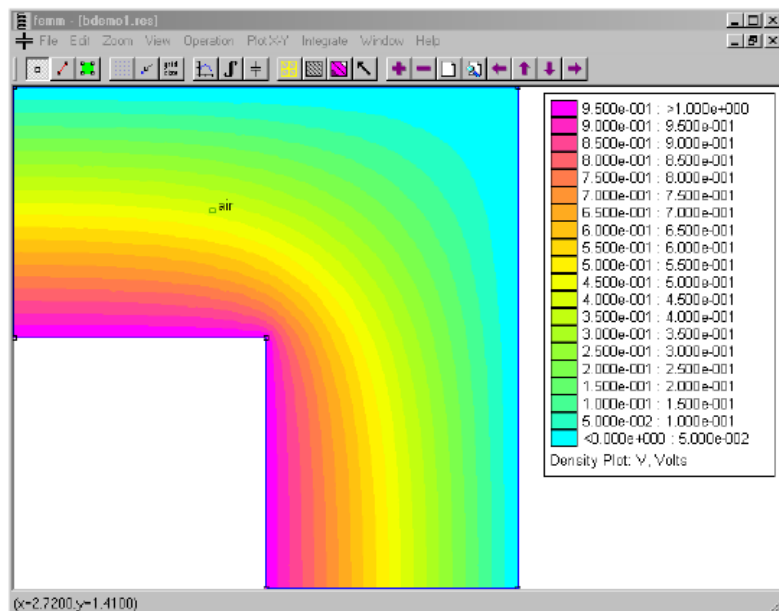


Obrázek 5-1: Početní výsledek rozvržení magnetické indukce v FEMM (ukázka)

5.3 Elektrostatické úlohy (Electrostatics problem)

Elektrostatické problémy uvažují nebo spíše jejich řešení se zaměřují zejména na charakteristickou veličinu, kterou je intenzita elektrického pole E a elektrická indukce D . V obecném slova smyslu můžeme začít v této části namodelováním vzájemného silového působení dvou elektrických nábojů, jež každý má své vlastní el. pole, která se navzájem ovlivňují silami

každého z nich. V praxi pak např. vyhodnocujeme stavy E a D v blízkém okolí vodičů, přepínačů nebo odpínačů použitých v distribučních sítích, kde v jejich pracovních stavech vznikají extrémní síly působící deformačně na vlastní konstrukci.



Obrázek 5-2: Rozvržení napětí (ukázka)

5.4 Úlohy vedení tepla (Heat flow problem)

Problémy tepelného proudění jsou reprezentovány teplotním gradientem G a tepelnou hustotou toku F . V širším slova smyslu je vedení tepla materiálem a následný ohřev nežádoucí z hlediska změn jeho parametrů. Příčinou vzniku nerovnoměrnosti rozložení teploty v materiálu může být hned několik: elektrický proud, mechanické namáhání, lokální ohřev a další. Stejný problém reprezentuje i ochlazení. Následkem může být deformace tovaru a špatná funkčnost. Analýza rozložení tepelného toku si najde své uplatnění v celé široké škále působení lidské činnosti.

5.5 Úlohy toku proudu (Current flow problem)

Jde v podstatě o aktuální řešení kvazi- elektrostatického pole, nebo-li elektrostatického pole časově proměnného. Důležitou roli při výpočtech sehrává Maxwellův posuvný proud, jehož odvození však není náplní této práce. Pro přiblížení si však můžeme posuvný proud představit jako běžný elektrický proud skutečných nábojů, který vykazuje stejné magnetické účinky avšak bez přítomnosti elektrických nábojů. Důležitým faktem je, že vzniká i ve vakuu. Maxwellův posuvný proud je např. tím proudem, který "překonává" izolační vrstvu kondenzátorů.

6 PRAKTICKÁ ČÁST

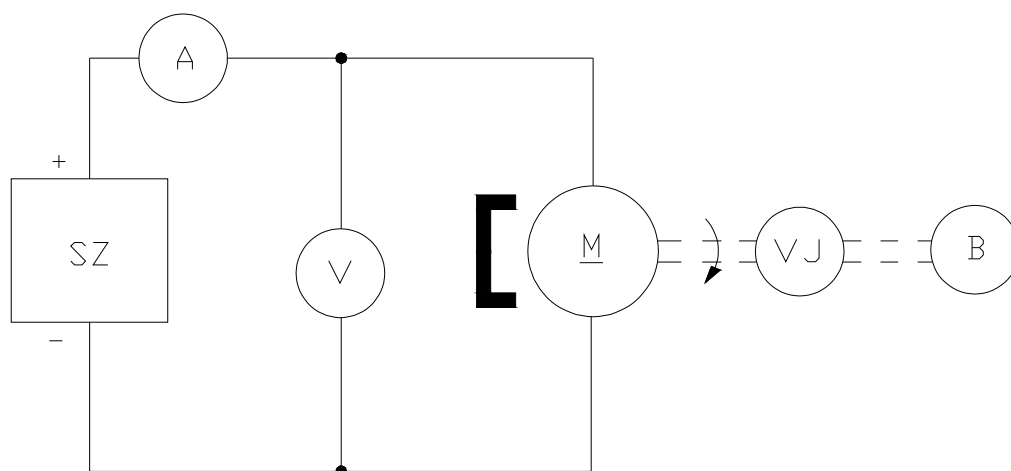
6.1 Laboratorní měření

V této laboratorní úloze jsem měřil základní charakteristiky (otáčkovou a zatěžovací) střechačového motorku s buzením permanentními magnety. Při měření byly použity jak klasické měřicí přístroje (voltmetr a ampérmetr), tak i modernější vyhodnocovací elektronická jednotka k určení zatěžovacího momentu.

6.1.1 Úkol měření

- 1) Změřte otáčkovou charakteristiku střechačového motorku pro oba kartáče
- 2) Změřte zatěžovací charakteristiku střechačového motorku pro oba kartáče
- 3) Měření vyhodnoťte graficky

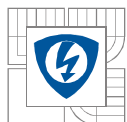
6.1.2 Schéma zapojení



Obrázek 6-1: Schéma zapojení měření na střechačovém motorku

6.1.3 Postup měření

- 1) Nejdříve podle zadání jsem změřil otáčkovou charakteristiku po připojení napětí ke kartáči 1. Napájecí napětí jsem postupně zvyšoval od 5 do 20V s krokem 0,5V. Při každém kroku jsem zapsal příslušné hodnoty otáček a proudu motorkem. Otáčky byly měřeny vyhodnocovací jednotkou a kontrolovány mechanickým měřidlem. Při přiložení napájecího napětí na kartáč 2 byl postup měření stejný. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6-1 a Tab. 6-2



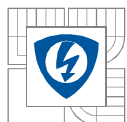
- 2) Následně jsem změřil zatěžovací charakteristiku pro oba kartáče, připojené konstantní napájecí napětí 12V. Pomocí brzdy, na kterou jsem kladl sadu závaží, jsem přibrzdňoval motorek – simuloval jsem tak zátěžný moment na hřídeli stroje. Rozsah zátěžného momentu se pohybuje přibližně od 3,6 do 8,2 Nm s náhodným krokem (dle připojeného kartáče). Horní hranice zátěžného momentu (8,2 Nm) byla určena na základě maximálního vyvinutého momentu motorku, který ještě dokázal s tímto bržděním pracovat. Po každém kroku jsem odečetl hodnotu momentu, proudu a otáček. Otáčky byly měřeny stejným způsobem jako v bodě 1) této podkapitoly. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v Tab. 6-3 a Tab. 6-4.
- 3) Naměřené hodnoty jsou vyneseny v grafech na obrázcích Obr. 6-2, Obr. 6-3.

6.1.4 Výsledky měření

tabulka 6-1: Otáčková charakteristika, kartáč 1

$v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 44\%$

U			I ₁			n ₁
α	k	[V]	α	k	[A]	[min ⁻¹]
25,0	24/120	5,0	20,0	6/120	1,000	13
27,5		5,5	20,5		1,025	15
30,0		6,0	20,5		1,025	17
32,5		6,5	20,5		1,025	19
35,0		7,0	21,0		1,050	21
37,5		7,5	21,5		1,075	23
40,0		8,0	21,5		1,075	25
42,5		8,5	21,5		1,075	27
45,0		9,0	22,0		1,100	29
47,5		9,5	22,0		1,100	30
50,0		10,0	22,0		1,100	32
52,5		10,5	22,5		1,125	34
55,0		11,0	23,0		1,150	36
57,5		11,5	23,0		1,150	38
60,0		12,0	23,0		1,150	40
62,5		12,5	23,5		1,175	42
65,0		13,0	23,5		1,175	43
67,5		13,5	24,0		1,200	45
70,0		14,0	24,0		1,200	47
75,0		15,0	24,5		1,225	50
80,0		16,0	25,0		1,250	54
85,0		17,0	25,0		1,250	58
90,0		18,0	25,5		1,275	61
95,0		19,0	25,5		1,275	64
100,0		20,0	26,0		1,300	68



tabulka 6-2: Otáčková charakteristika, kartáč 2

$v = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 44\%$

U			I ₂			n ₂
α	k	[V]	α	k	[A]	[min ⁻¹]
25,0	24/120	5,0	11,5	6/120	0,575	11
27,5		5,5	11,8		0,590	12
30,0		6,0	12,0		0,600	13
32,5		6,5	12,2		0,610	15
35,0		7,0	12,5		0,625	16
37,5		7,5	12,5		0,625	18
40,0		8,0	12,7		0,635	19
42,5		8,5	12,9		0,645	21
45,0		9,0	13,0		0,650	22
47,5		9,5	13,0		0,650	24
50,0		10,0	13,2		0,660	25
52,5		10,5	13,4		0,670	26
55,0		11,0	13,5		0,675	28
57,5		11,5	13,7		0,685	29
60,0		12,0	13,9		0,695	30
62,5		12,5	14,0		0,700	32
65,0		13,0	14,2		0,710	33
67,5		13,5	14,3		0,715	34
70,0		14,0	14,5		0,725	36
75,0		15,0	14,7		0,735	38
80,0		16,0	15,0		0,750	41
85,0	↓	17,0	15,3	↓	0,765	44
90,0		18,0	15,5		0,775	46
95,0		19,0	15,8		0,790	49
100,0		20,0	16,0		0,800	52

Jak je uvedeno v kapitole 6.1.3 (Postup měření) body 1) a 2) otáčky byly kontrolovány mechanickým měřidlem. Při určení otáček tímto způsobem je důležité znát průměr měřícího kruhu mechanického otáčkoměru d a průměr hřídele D , na kterém se otáčky měřili (motorku). Přepočet je pak dán konstantou k .

Průměr měřícího kruhu mechanického otáčkoměru $d = 3,11\text{cm}$

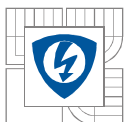
Průměr hřídele, na které se otáčky ručně měřily $D = 12,4\text{cm}$

Konstanta pro přepočet je tedy dána poměrem:

$$k = \frac{D}{d} = \frac{12,4}{3,11} = 3,987 \quad (6.1.4.0)$$

Skutečný počet otáček n je pak dán poměrem naměřených otáček mechanickým měřidlem n_m a konstantou pro přepočet k , jež v sobě zohledňuje průměr hřídele a průměr měřícího kruhu:

$$n = \frac{n_m}{k} \quad (6.1.4.1)$$



tabulka 6-3: Zatěžovací charakteristika, kartáč 1

$\nu = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 44\%$, $U = 12\text{V}$

M		I_{z1}		n_{z1}
[Nm]	α	k	[A]	[min ⁻¹]
3,582	24	12/120 ↓	2,4	25,0
4,562	30,0		3,0	23,0
5,230	33,0		3,3	22,0
5,749	37,0		3,6	21,0
6,312	40,0		4,0	20,0
7,201	42,0		4,2	17,8
7,824	45,0		4,5	17,0

tabulka 6-4: Zatěžovací charakteristika, kartáč 2

$\nu = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi = 44\%$, $U = 12\text{V}$

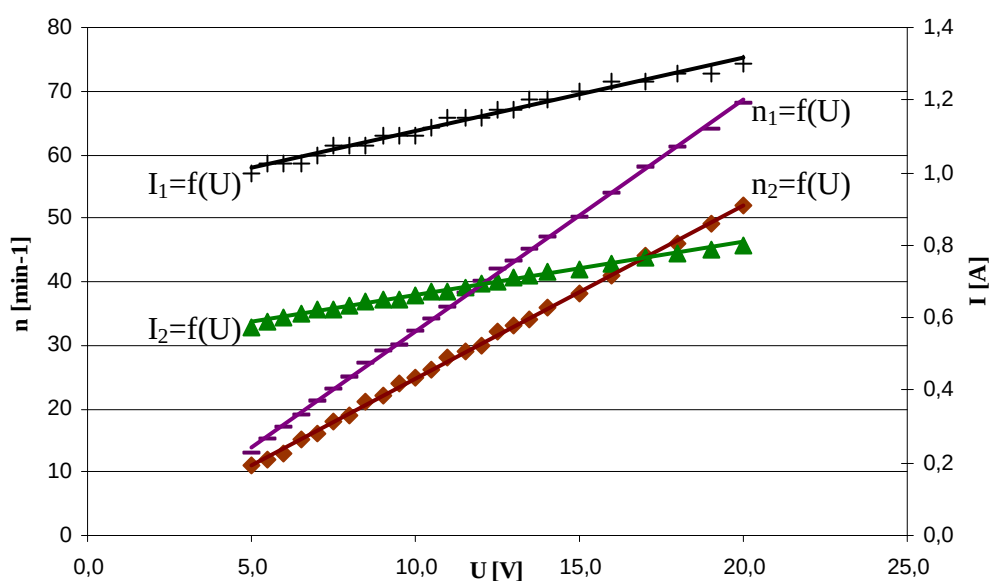
M		I_{z2}		n_{z2}
[Nm]	α	k	[A]	[min ⁻¹]
3,602	36,0	6/120 ↓	1,8	34,0
4,213	41,5		2,1	32,0
4,800	46,0		2,3	30,5
5,423	52,0		2,6	28,5
6,006	55,0		2,8	26,5
6,515	60,0		3,0	25,0
7,103	65,5		3,3	23,5
7,621	68,0		3,4	22,0
8,201	72,0		3,6	20,0

Hodnoty uvedené v tabulkách Tab. 6-1 až Tab. 6-4 jsou pro lepší přehlednost a názornost vyneseny do grafů. Na obrázku 6-2 je vidět kromě závislosti otáček na napájecím napětí i závislost proudu I , který se spotřebovává na vytvoření dynamického momentu motoru M_d . Ten je při nezatíženém stavu roven vnitřnímu indukovanému momentu M_i . Dále můžeme vidět, že otáčky lineárně rostou se zvyšujícím se napětím. Z kapitoly 2.1 a vztahu 2.1.0 víme, že otáčky lze regulovat napájecím napětím, protože odpor vinutí R_a je v tomto případě konstantní, úbytek na kartáčích U_k také a zanedbatelný, stejně jako se nemění magnetický tok Φ_1 vybuzený permanentními magnety. Z toho plyne lineární závislost jak otáček, tak i proudu, která se ověřila i praktickým měřením.

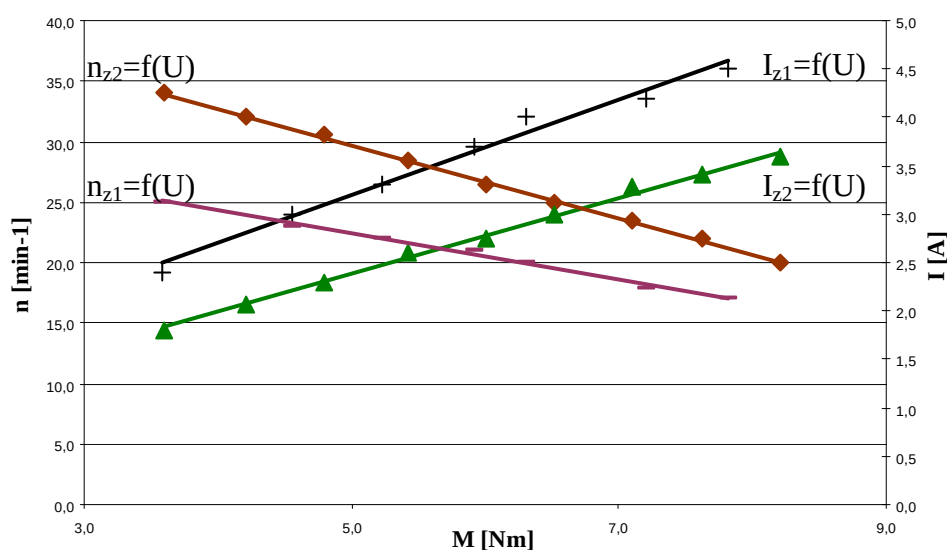
Na obrázku 6-3 jsou znázorněny zatěžovací charakteristiky a je patrné, že při zatížení zátežným momentem M_z se motor snaží zachovat otáčky naprázdno při stejném napětí (tedy 12V). To se děje zvětšením odběru proudu ze zdroje a s tím spojeným zvětšením ztrát ve vinutí a

magnetickém obvodu. Klesá napětí a tím i otáčky. Motor se čím dál více zahřívá a pracuje až do chvíle, kdy nám jej neodpojí proudová nebo tepelná ochrana. Celkový indukovaný moment M_i je dán vztahem:

$$M_i = M_d + M_z = J \frac{d\omega}{dt} + M_z \quad (6.1.4.2)$$



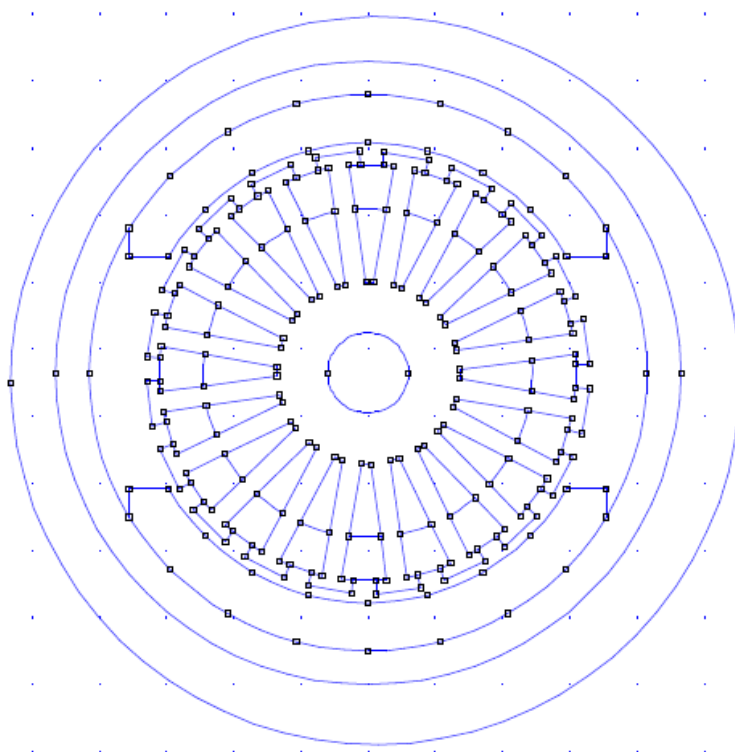
Obrázek 6-2: Otáčková charakteristika pro kartáč 1 a kartáč 2



Obrázek 6-3: Zatěžovací charakteristika pro kartáč 1 a kartáč 2

6.2 Model 2D v programu FEMM

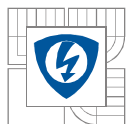
Prvotní myšlenkou pro simulování magnetického pole v řezu stěračového motorku je definování typu úlohy a jak vyplývá z výše uvedených vět, jde o problematiku zaměřenou na zjištění magnetické indukce (Magnetics problem viz. kap. 5.2). Důležitým předpokladem správného výpočtu je co nejautentičtější zhotovení modelu dle originálu, tedy skutečného stroje. Pro tuto část je neoptimálnější použití Cad programů, v mém případě šlo o AutoCad 2007. V této části je nutné uložit vytvořený soubor s příponou *dxg*, který nám umožní snadné importování do programu Femm. Pokud bych tak neučinil, mohl bych model vytvořit přímo v programu Femm, jehož prostředí však pro definování geometrických rozměrů už neposkytuje tak přesné a uživatelsky příjemné funkce přesného zhotovení.



Obrázek 6-4: Geometrický model magnetického obvodu

Po úspěšném importování se zobrazí model rozdělený do příslušného počtu ploch (Obrázek 6-4). Důležitým pojmem je zde „plocha“, přesněji řečeno definování vlastností plochy. Před vlastním výpočtem lze rozdělit postup modelování do několika kroků:

- Určení okrajové podmínky



Jedná se o tzv. Dirichletovu okrajovou podmínku, která nám určuje do jaké vzdálenosti od modelu program bude vypočítávat zadané stavy. Přesněji říká, že ta složka vektoru elektrické (magnetické) intenzity, která je tečná k elektrickému (magnetickému) vodiči, musí být na tomto vodiči nulová. Často označována $A = 0$. Nastavení se nachází v záložce Properties, řádek Boundary.

- Definování materiálů

Materiály a jejich vlastnosti lze definovat samostatně, což s sebou nese určitý předpoklad znalostí a zkušeností uživatele. K dispozici je i materiálová knihovna, kde už vlastnosti jednotlivých částí jsou předem uloženy. Použití materiálů z knihovny vzhledem k její rozsáhlosti vede k zefektivnění práce (nalézá se v záložce Properties, řádek Materials Library). V tomhle konkrétním případě jsem volil materiál *vzduch* (Air) s permeabilitou $\mu_r = 1$; kostru motorku kterou se uzavírá magnetický tok z materiálu *železo* (Pure Iron); pro magnetické buzení statoru permanentní magnety *AlNiCo 6*, které se běžně používají v sériově vyráběných strojích, stejně jako materiál kotvy z plechů *M-19 Steel* kvůli zmenšení ztrát výřivými proudy; hřídel rotoru z oceli *US Steel 2-S 0.018* a nakonec měděné vinutí tvořící závity na rotoru.

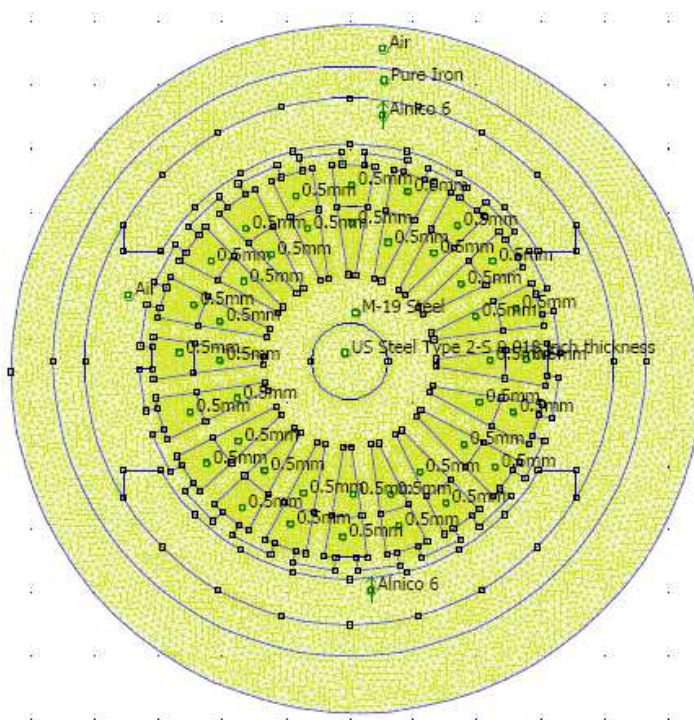
- Zadání obvodových a vlastních veličin

V magnetických obvodech se jedná nejčastěji o nadefinování proudu tekoucího jednotlivými cívkami. Je nutné dbát správného toku proudu vzhledem k poloze cívek a magnetického pole statoru. Pro tuto simulaci jsem použil hodnoty proudů z naměřené úlohy, která je podrobněji popsána v kap. 6.1. Konkrétní hodnota proudu při chodu bez zatížení, s připojeným kartáčem 1 a napětím 12V je $I_1 = 1.15A$ (Tab.6-1). A hodnota proudu zatíženým motorkem, opět s připojeným kartáčem 1 a napájecím napětím 12V je $I_{z1} = 3,6A$ (Tab. 6-3). Nastavení proudů se nachází v záložce Properties, řádek Circuits.

- Rozdělení modelu do končného počtu částí

Závěrečnou částí před vlastním analyzováním modelu je určení počtu elementů, tedy uzlů, ve kterých se bude zjišťovat velikost hledané veličiny – magnetické indukce. Pro co nejpřesnější výpočet jsem se snažil o co nejhustší síť, ale je nutné najít kompromis mezi počtem uzlů, dobou výpočtu a jeho přesností. Od určitého počtu uzlů je zaručena požadovaná přesnost a další zvyšování počtu uzlů je už zbytečné a časově náročné.

Tohoto kompromisu se mi podařilo dosáhnout při 17 105 elementech a 33 912 uzlech (Obrázek 6-5). Vinutí jsem rozdělil do většího počtu částí (elementů-plošek) z hlediska výpočtu ztrát ve vinutí.



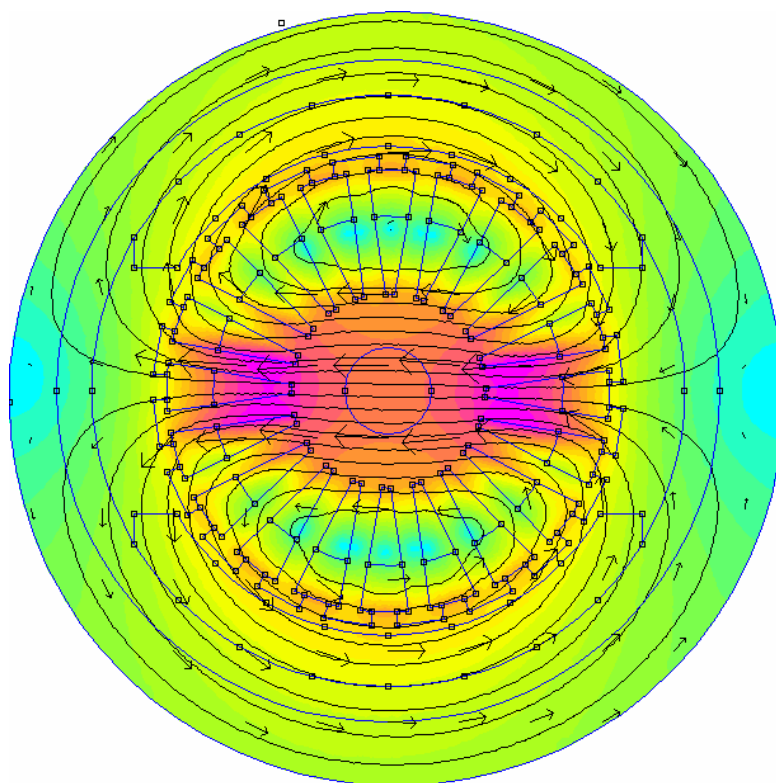
Obrázek 6-5: Magnetický model s homogenním namagnetováním

Na Obrázku 6-5 si povšimněte směru magnetické indukce permanentních magnetů na statoru. Severní i jižní pól je namagnetován v jednom směru, tj. v každém bodě permanentního magnetu je smysl buzení stejný. Siločáry magnetické indukce vystupují ze severního magnetického pólu, vstupují do jižního magnetického pólu přes který se uzavírají zpět do pólu severního. Identifikovat směr nám pomáhá “šipka“, kterou lze vidět vedle typu magnetu - AlNiCo 6. Později bude řešen magnetický obvod, v němž permanentní magnety na statoru jsou segmentově rozděleny a směr buzení každého segmentu směřuje do osového středu nebo z něj vystupuje v závislosti na pólu severním nebo jižním.

6.2.1 Výpočet magnetického modelu s homogenním magnetováním

Po nadefinování všech potřebných atributů přistoupíme k výpočtu modelu (záložka Analysis, řádek Analyze). Program spustí výpočet s ohledem na požadovanou přesnost (v mém případě byla přesnost zaručena na osmém desetinném místě) a s tím souvisejícím počtem kroků přiblížení se k výsledku (konkrétní počet Newtonových iterací je 12). V záložce Analyze a poklepáním na řádek View Results, se zobrazí grafické řešení úlohy. To si dále můžeme modifikovat dle vlastní potřeby a následně pak volit oblasti, v nichž hledáte výsledek, který se zobrazuje do klasického grafu nebo početně do panelu vedle grafického řešení modelu, samozřejmě v závislosti na požadavcích uživatele a charakteru veličiny.

Ještě než si ukážeme konečnou namodelovanou situaci, je užitečné simulovat si pouze magnetické pole rotoru a zvlášť také magnetické pole statoru. Výsledkem obou polí je výsledné magnetické pole jež souhrnně nazýváme reakcí kotvy.

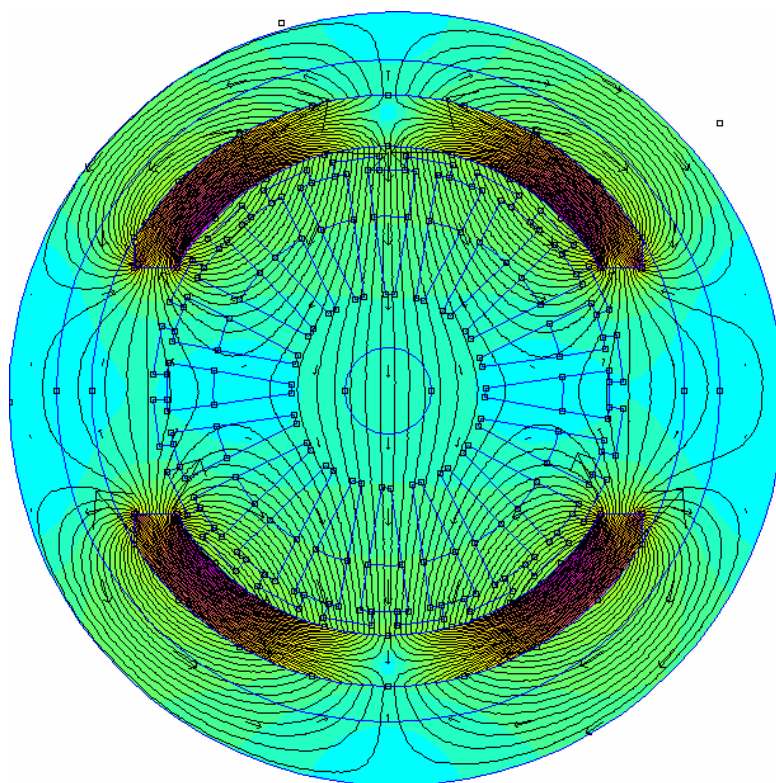


Obrázek 6-6: Magnetické pole rotorového vinutí (homogenní magnetizace)

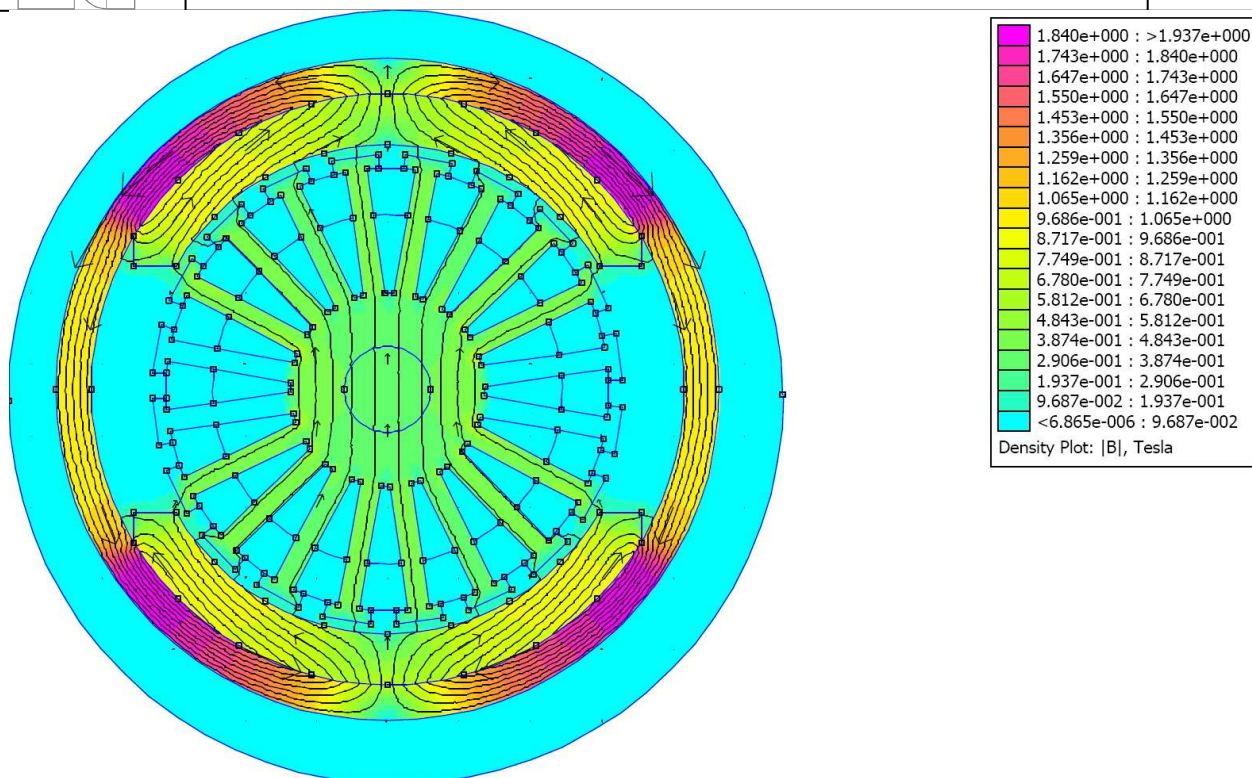
Na Obrázku 6-6 vidíme magnetické pole pouze rotorového vinutí s uvážením, že se nachází samotné ve vzduchu bez vlivu dalších částí stroje. Šipky naznačují směr indukčních čar, který by

s uvažováním celého magnetického obvodu zůstal stejný, protože závisí na směru průchodu proudu vodiči – pouze by se indukční siločáry zhušťily do konstrukce stroje.

Na Obrázku 6-7 je simulované pouze budící pole permanentních magnetů na statoru opět samotné magnety obklopuje pouze vzduch a není tak započten vliv částí stroje. Naznačené šipky opět ukazují směr indukčních čar. Na magnetech díky svému zakřivení můžeme pozorovat nesouměrné rozložení magnetické indukce, která je soustředěna téměř na obou koncích obou magnetů. Pro lepší názornost jsem použil vykreslení většího počtu indukčních čar. Protože se obě pole navzájem ovlivňují a z fyzikálního hlediska nemohou vedle sebe existovat dvě magnetická pole, získáme jejich součtem (složením) celkové magnetické pole. Magnetické pole vytvořené proudem ve vinutí kotvy se v realitě vektorově složí spolu s magnetickým polem statoru a dají tak vzniku celkovému magnetickému poli stroje (Obrázek 6-8)



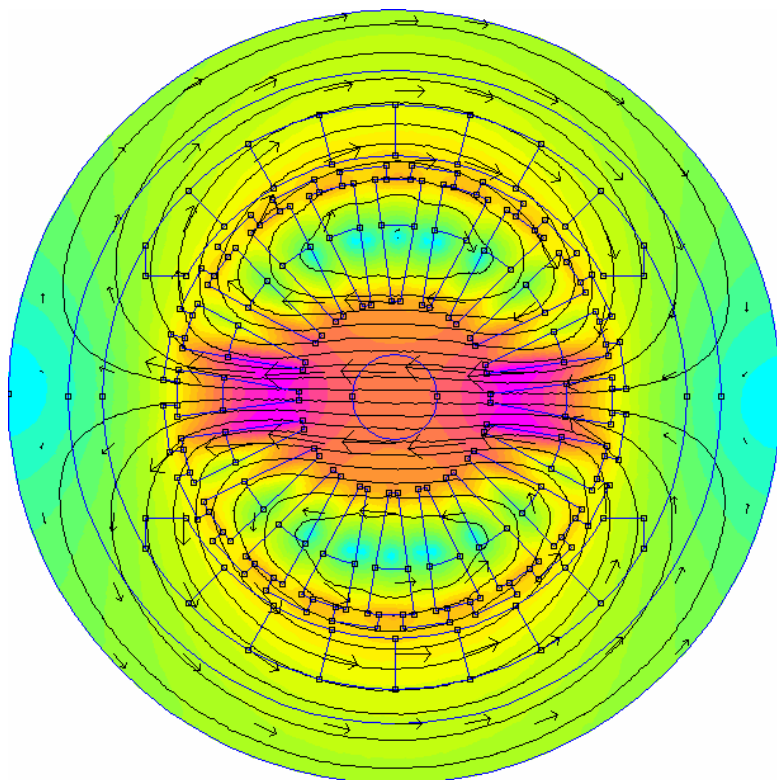
Obrázek 6-7: Magnetické pole statoru (homogenní magnetizace)



Obrázek 6-8: Výsledné magnetické pole (reakce kotvy) 2D modelu (homogenní magnetizace)

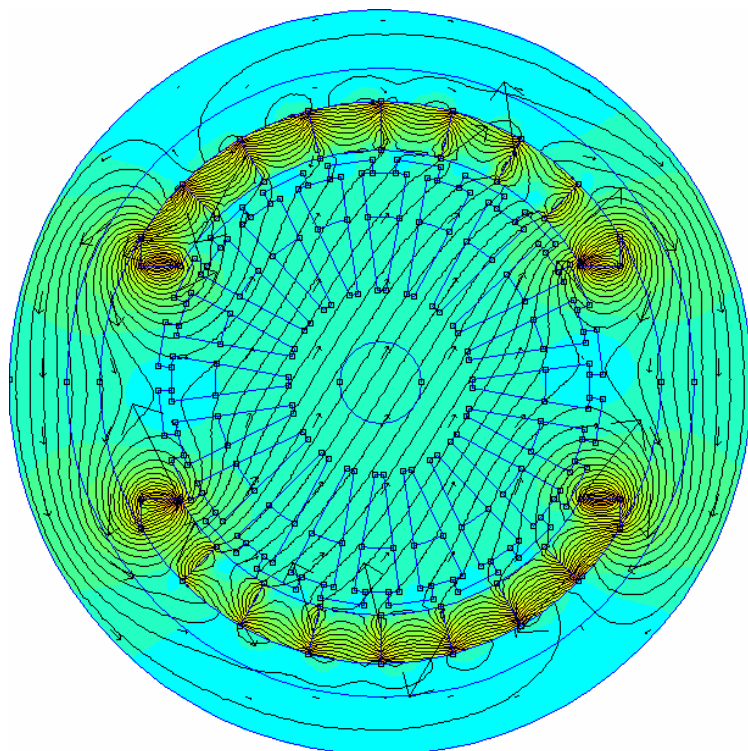
6.2.2 Výpočet magnetického modelu se směrem magnetizace do středu křivosti

Při simulování této úlohy jsem postupoval obdobně jako v předešlé kapitole. V drážkách rotoru se obdobně jako v první simulaci nachází vinutí rozdělené do vrchní a spodní vrstvy – dvouvrstvé vinutí. Bylo zde však nutné upravit v Cad programu rozdělení permanentních magnetů do jednotlivých segmentů a v programu Femm definovat nově vzniklé plochy jako permanentní magnety AlNiCo 6 s příslušným směrem magnetizace. Z Obrázku 6-9 je patrná shoda magnetického pole rotorového vinutí (smysl a velikost proudu totožná s Obr. 6-6).

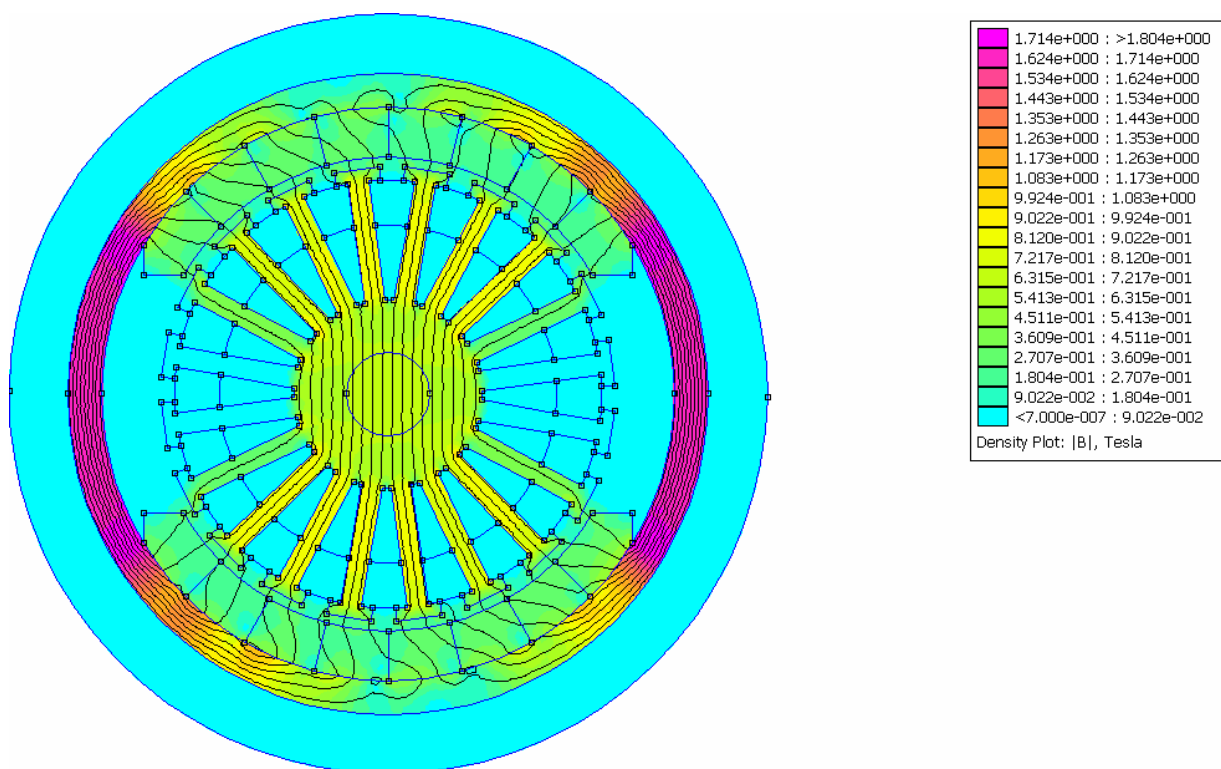


Obrázek 6-9: Magnetické pole rotorového vinutí (směr magnetizace do středu křivosti)

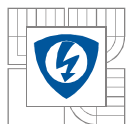
Z Obrázku 6-10 je už na první pohled patrná jiná charakteristika magnetického pole buzeného permanentními magnety, které jsou tentokrát rozděleny do segmentů. Je vidět, že indukční čáry jednotlivých segmentů vedle sebe se sčítají (odčítají) a navzájem tak oslabují, protože každý element se chová jako jednotlivý menší magnet. Celkové pole je tak deformované. Směr magnetizace do středu křivosti se projeví ve velikosti momentu. Ze vztahu 1.2.0 vyplývá, že moment stejnosměrného stroje je závislý na úhlu natočení cívek (budící na statoru a cívky na rotoru), respektive na „kosinu úhlu“.



Obrázek 6-10: Magnetické pole statoru (směr magnetizace do středu křivosti)



Obrázek 6-11: Výsledné magnetické pole 2D modelu (směr magnetizace do středu křivosti)



Aplikujeme-li tuto myšlenku na stejnosměrný stroj buzený permanentními magnety, kdy za „budící cívku“ můžeme považovat každý segment permanentního magnetu a za druhou cívku klasicky cívku rotorového vinutí, bude „kosinus úhlu natočení“ konstantní a maximální, tedy i střední hodnota momentu bude větší než v případě homogenního buzení.

U Obrázku 6-11 můžeme pozorovat jiné rozložení magnetické indukce, kde obě maxima jsou koncentrována do blízkosti hranic severního a jižního pólu, což je způsobeno právě magnetizací do středu křivosti. Na okrajovém segmentu každého pólu sousedícího s okrajovým segmentem opačného pólu už nedochází k odečítání magnetických siločar od sousedního segmentu stejného pólu. To má za následek zvětšení magnetické indukce v daném místě.

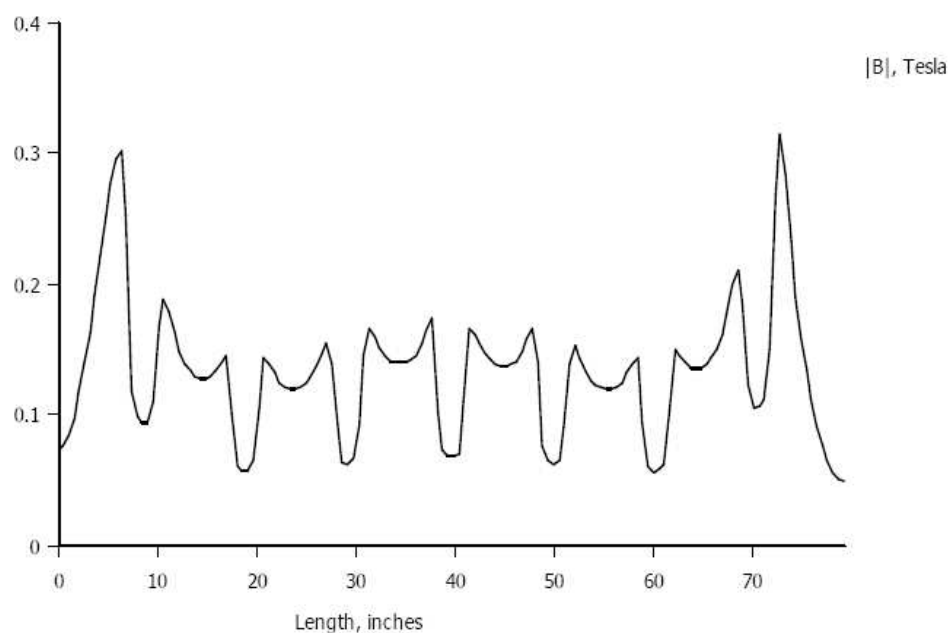
6.2.3 Výsledky simulování 2D modelů

Výsledky hodnot momentů a magnetické indukce jsou shrnuty do Tab.6-5. Simulace 2D modelu proběhla pouze se zapojeným kartáčem 1 při zatížení. Při srovnání hodnot v tabulce Tab. 6-3, na řádce č.4 s tabulkou Tab. 6-5, řádkem č. 2, kde jsou hodnoty proudu při zatížení motorku v obou případech stejné (I_{z1} a I_{pz}), vidíme, že hodnoty momentů se od sebe liší o přibližně 0,03 Nm, což je zanedbatelný rozdíl. Jelikož jsem v laboratoři měl možnost odměřit pouze stěračový motorek s homogenní magnetizací, je hodnota výsledného vyvinutého momentu srovnávána jenom v tomto případě. Dále jsem se věnoval modelování atypické situace, kdy směr magnetování směřuje do středu křivosti. Na druhou stranu modelování atypického statoru přineslo zajímavé výsledky co se týče výsledného magnetického pole (Obrázek 6-11), tak i dosažení vyššího momentu při zatížení. Hodnota momentu při zachování stejných veličin napájecího napětí a proudu je v tomto případě vyšší o 1,14 Nm.

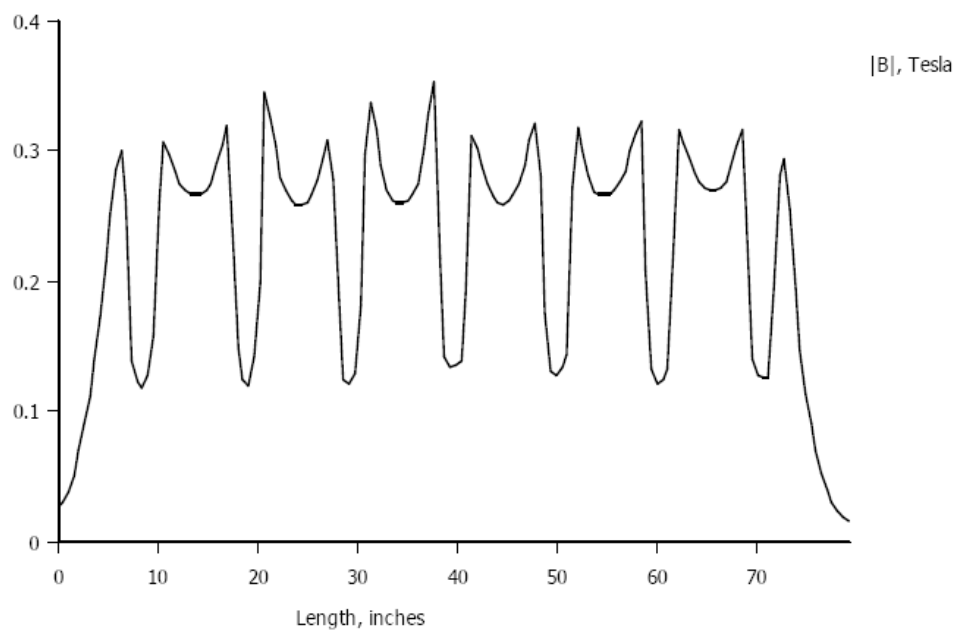
tabulka 6-5: Hodnoty momentů a magnetické indukce 2D modelů

$I_n = 1,15\text{A}$; $I_{pz} = 3,6\text{A}$; $U = 12\text{V}$

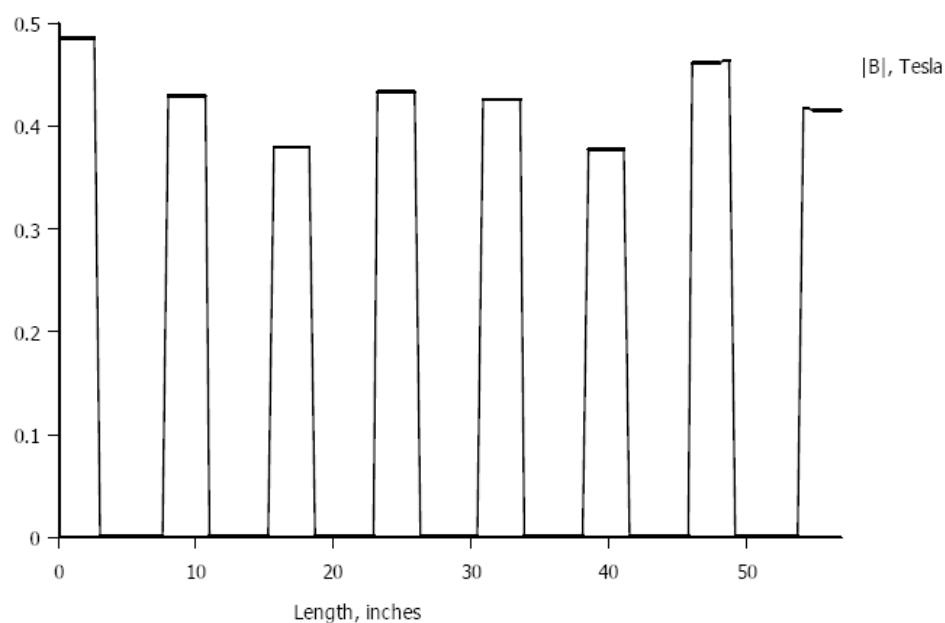
	homogenní magnetování	směr magnetizace do středu křivosti
M_n [Nm]	5,53	6,485
M_{pz} [Nm]	5,72	6,86
B_n [T]	1,940	1,803
B_z [T]	1,942	1,804



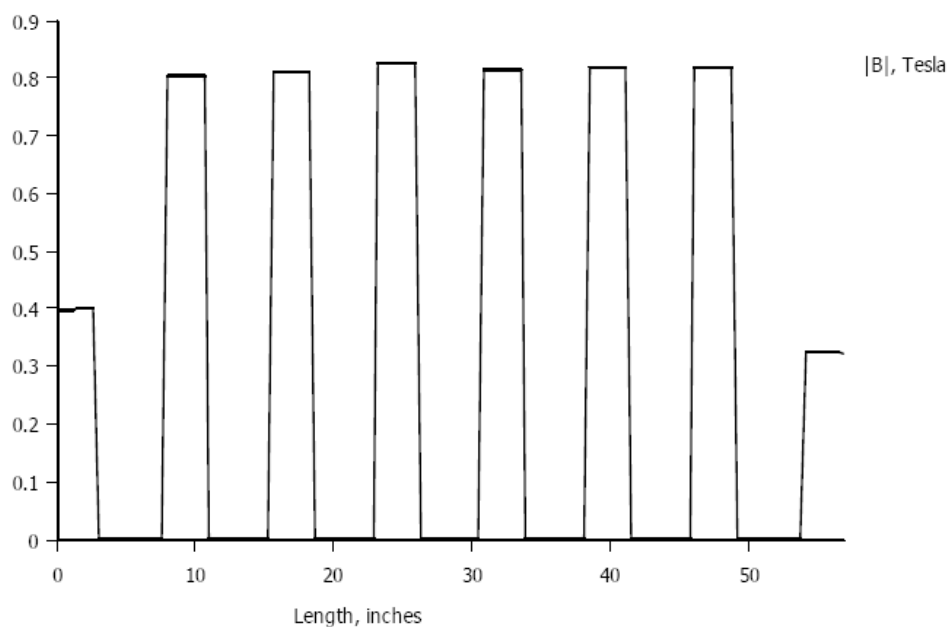
Obrázek 6-12: Průběh magnetické indukce na hraně zubů a vzduchové mezery
(homogenní magnetizace)



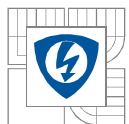
Obrázek 6-13: Průběh magnetické indukce na hraně zubů a vzduchové mezery
(směr magnetizace do středu křivosti)



Obrázek 6-14: Velikost magnetické indukce v polovině plechů
(homogenní magnetizace)



Obrázek 6-15: Velikost magnetické indukce v polovině plechů
(směr magnetizace do středu křivosti)



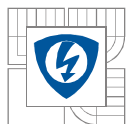
7 ZÁVĚR

Cílem bakalářské práce bylo seznámit se s konstrukcí a vlastnostmi střeračového motoru. Uvést jednotlivé typy motorů a druhy zapojení používaných v praxi a vysvětlit jejich činnost. Dále modelovat ve 2D, pomocí metody konečných prvků v programu FEMM, reálnou úlohu chodu střeračového motoru a následně získané hodnoty z měření i simulace porovnat. Souběžně s touto simulací probíhá pro zajímavost i numerický výpočet méně obvyklého případu, kde magnety na statoru netvoří dva kompaktní celky, ale jsou rozděleny do určitého počtu segmentů.

Projekt představuje stejnosměrný elektrický stroj se zaměřením na jeho speciální případ, kterým je komutátorový motor s buzením permanentními magnety. Vyváženě je věnována pozornost mezi teoretickým rozбором činnosti stroje v obecném slova smyslu, konkrétními příklady použití střeračových motorů a praktickou částí zaměřenou především na výpočet magnetického modelu výše zmíněného motoru. Podrobně je pak popsán úvod do metod řešení sdružených úloh, kde je zvláštní pozornost zaměřena na vysvětlení metody konečných prvků, která se projevila v posledních desetiletích velice užitečnou a efektivní metodou pro numerické modelování. Velká pozornost je zde kladena i na konkrétní postup vytváření simulace v programu FEMM.

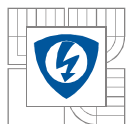
Simulovaný model ve 2D ukazuje jednotlivá magnetická pole permanentních magnetů a rotorového vinutí složena v jedno výsledné magnetické pole, tzv. reakce kotvy, které se svým charakterem shoduje s teorií. Společným ukazatelem správnosti výsledku simulace reálné úlohy se stává vyvinutý moment motorkem při zatížení a tedy i proudu 3,6A a napájecího napětí 12V (Kap. 6.2.3). Srovnáním obou hodnot momentů vidíme, že se liší zanedbatelně, tedy jsou si velice blízké. Korektnost numerického výpočtu byla zejména způsobena přesnými geometrickými rozměry magnetického modelu a linearitou odměřené zatěžovací charakteristiky. K přihlédnutí výše zmíněným faktům, mohu konstatovat, že program FEMM je vhodnou volbou pro simulování 2D modelů rotačně symetrických úloh.

Důležitou částí práce je i současné paralelní modelování střeračového motorku, jehož magnety na statoru jsou rozděleny do dílů. Každý díl je z výroby namagnetován tak, aby směr buzení směřoval do středu křivosti každého z nich. Z toho zřetelně vyplývá, že magnetická indukce působící na vodiče kotvy v blízkosti pólů bude vždy kolmá. Z teorie a vztahu 1.2.0 víme, že moment stejnosměrného stroje závisí na úhlu natočení cívek statoru a rotoru (v tomto



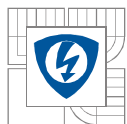
konkrétním případě statorovou cívku zastupují jednotlivé díly permanentního magnetu) a je tak přímo úměrný velikosti „kosinu“ úhlu. Zjištěná hodnota vyvinutého momentu byla při stejných vstupních parametrech vyšší oproti simulaci motorku s homogenním statorovým buzením o 1,14 Nm, což představuje zvýšení momentu o téměř 20%. S uvažováním faktu správnosti srovnání předešlého modelování s reálnou úlohou, lze očekávat ve skutečnosti i vyšší moment stroje s buzením permanentních magnetů směřujícím do středu křivosti. Hodnoty maximální indukce v obou případech jsou uvedeny v tabulce Tab. 6-5.

Celkový náhled na práci dotváří silný vývoj v oblasti výpočetní techniky, se kterým jsou úzce spjaty metody numerického řešení. Díky své podstatě řešení úloh a snáze pochopitelnému principu výpočtu se do popředí dostala metoda konečných prvků (MKP). Výhodou MKP je předvídání vlastností a stavů předmětu, který se nachází teprve v počátcích vlastní konstrukce. To umožňuje další odlaďování předmětu samotného nebo i přizpůsobování okolí, které na něj v praxi působí a ovlivňuje tak jeho činnost. Můj osobní názor na MKP je kladný, avšak jak je metoda užitečná, stejně tak může být i její výsledek řešení zrazující. Nemůže nikdy nahradit potenciál vnímavého a zkušeného konstruktéra a pouze se tak stává účinným a efektivním pomocníkem při řešení současných situací nebo inovativních úloh.

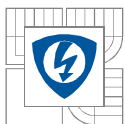


POUŽITÁ LITERATURA

- [1] ONDRŮŠEK, Čestmír: *Elektrické stroje. Část - Stejnosměrné stroje*, VUT v Brně; 79 s.
Dostupný z <http://www.uvee.feec.vutbr.cz/Predmety/BESB/BESB.html>
- [2] CHMELÍK, Karel., POSPÍŠILÍK, Jiří.: *Elektrické stroje v energetice*, součást učebního textu. VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2003. 94 s.
- [3] CHMELÍK, Karel.: *Stejnosměrné a komutátorové elektrické stroje*, obecný stroj, VŠB-TU Ostrava, 2001. 87 s.
- [4] POKORNÝ, Karel: *Stejnosměrné stroje, Vybrané statě*, VUT v Brně, 1975. 101 s.
- [5] POKORNÝ, Karel: *Vinutí kotev stejnosměrných strojů*, VUT v Brně, 1967, 84 s.
- [6] ŠŤASTNÝ, Jiří, REMEK, Branko: *Autoelektrika a autoelektronika*, Praha, T.Malina nakladatelství 2003, 315 s., ISBN 80-86293-02-5
- [7] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika. Část 3 – Elektřina a magnetismus*. Brno – Praha, VUTINUM – PROMETHEUS 2000.
- [8] KOLÁŘ, Vladimír: *FEM, Principy a praxe metody konečných prvků*, Praha: Computer Press 1997, 401 s., ISBN: 80-7226-021-9
- [9] SVÁČEK, Petr: *Metoda konečných prvků*, Praha Nakladatelství ČVUT, 2006, 116 s., ISBN: 80-01-03522-0



- [10] OSTEREICHER, Jan: *Moderní metody analýzy konstrukce strojů*, Praha Nakladatelství ČVUT, 2006, 70 s., ISBN 80-01-03521-2
- [11] BEJČEK, V., STÁREK, M., PALOUŠEK, D., BEJČKOVÁ, M.: *Autodesk Inventor Professional 10*. Metoda konečných prvků, TechData 2005, Dostupný z http://uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/profil_publicace/2005
- [12] VYBÍRAL, B.: *Elektromagnetická indukce*, Studijní text pro soutěžící FO a ostatní zájemce o fyziku
- [13] Škopek, M.: *Metody matematického a počítačového modelování vybraných sdružených úloh*, elektronický text dostupný z http://k315.feld.cvut.cz/coupled_problems/Publikace/Skopek_rigo/RIGO.DOC
- [14] ČERMÁK, Libor: *Algoritmy metody konečných prvků*, Brno PC-DIR Real, 2000, 106 s. ISBN: 80-214-1697-1
- [15] HÁJEK, Vítězslav. *Motor Type for Specific Applications.*, článek s. 6.



UŽITEČNÉ ODKAZY

<http://femm.foster-miller.net/wiki/HomePage>

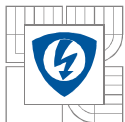
<http://www.mmspektrum.com>

<http://home.zcu.cz/~karban/teaching/femm.php>

<http://www.walter-fendt.de>

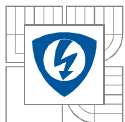
http://homen.vsb.cz/~kac37/_num_met_Kacor/

www.autodito.cz/PDF/AEROTWIN.pdf



SEZNAM PŘÍLOH

Příloha č. 1: Seznam měřících přístrojů



Příloha č. 1: Seznam měřících přístrojů

M; stěračový motorek; 12V; č. 1119569

SZ; stabilizovaný zdroj; STATRON; 0-32V/ 0-24A; č. 3234.1

A; ampérmetr; Metra; 1,2-600V 0,12-2400A; TP 0,5; č. 5672; elektromagnetický
bočník; DKP 107; 60mV/ 5Ω; č. 172

V; voltmetr; 0-600V; č. 512565; TP 0,5; elektromagnetický

VJ; vyhodnocovací jednotka; Magtrol 6400; č.1K6 40057

B; brzda; 200Nm, 10000 ot./min, 25mV/ Nm, č. 806535
mechanický otáčkoměr; č. U4033T