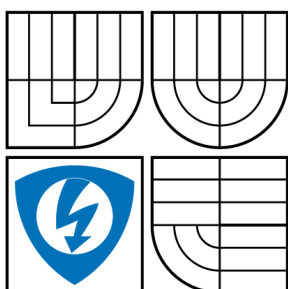


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A
ELEKTRONIKY

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

PROGRAM PRO VÝPOČET EC MOTORŮ

PROGRAM FOR CALCULATION OF BLDC MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

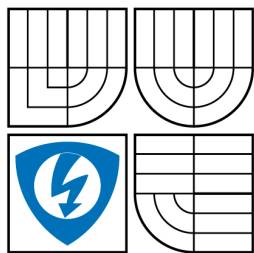
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. KAREL CHLOUPEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ONDŘEJ VÍTEK, Ph.D.

BRNO 2009



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor

Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika

Student: Bc. Karel Chloupek

ID: 85844

Ročník: 2

Akademický rok: 2008/2009

NÁZEV TÉMATU:

Program pro výpočet EC motorů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Seznamte se s problematikou EC-motorů a modelováním magnetických obvodů metodou konečných prvků.
2. Vytvořte program pro návrh EC-motorů a proveďte výpočet konkrétního motoru.
3. Vytvořte model uvedeného EC-motoru pomocí metody konečných prvků v programu FEMM.
4. Srovnajte výsledky, zvažte možnosti propojení analytického výpočtu s programem FEMM a navrhnete další postup.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle doporučení vedoucího.

Termín zadání: 1.10.2008

Termín odevzdání: 22.5.2009

Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vitek, Ph.D.

doc. Ing. Čestmír Ondrůšek, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

abstrakt:

Tato práce je zaměřena na problematiku návrhu EC motorů. Je členěna na dvě části: teoretickou a praktickou. V první části je čtenář seznámen s danou problematikou, příčinami jejich vzniku, výhodami a nevýhodami. Dále jsou popisovány jejich různé provedení a konstrukce. Největší pozornost je věnována segmentovému statoru.

Pro tento typ magnetického obvodu je vytvořen výpočetní program. Tento program provede návrh a výpočet motoru podle zadaných parametrů a vygeneruje zdrojový kód pro program FEMM, ve kterém se následně spustí simulace. Takto si může každý konstruktér snadno ověřit reálnost výpočtu.

abstract:

This thesis focuses on problematics of BLDC motors. Thesis consist of theoretical and practical part. In introduction is the reader acquaint with problematics, principals of development, advantages and disadvantages of BLDC motors. Then follows a description of different types, their realization and construction. Main part of this thesis deals with segment stator.

For this type of magnetic circuit was developed computing software. This software will design and provide calculation of motor due to given parameters. In second step, the program generates source code for FEMM software, which provides a simulation. This is the most effective way, how can designer simply verify his calculations.

Klíčová slova

EC motor; magnetický obvod; magnetické veličiny; permanentní magnety; výpočetní program; simulace.

Keywords

BLDC motor; computing software; magnetic circuit; magnetic value; permanent magnet; simulation.

Bibliografická citace

CHLOUPEK, K. *Program pro výpočet EC motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 60 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Program pro výpočet EC motorů jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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 své diplomové práce Ing. Ondřeji Vítkoví, Ph.D. za vstřícnost, trpělivost, optimismus, odbornou a pedagogickou pomoc a dále za cenné rady, připomínky a množství času, které mi věnoval při zpracování diplomové práce.
Dále bych chtěl poděkovat své rodině za psychickou a finanční podporu.

V Brně dne Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	ZÁKLADNÍ POJMY	14
2.1	Magneticky tvrdý materiál	14
2.2	Hysterezní křivka	14
2.3	Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole	15
2.3.1	Magnetický tok	15
2.3.2	Intenzita magnetického pole	16
2.3.3	Magnetická indukce	16
2.3.4	Permeabilita neboli prostupnost prostředí	17
2.3.5	Permeabilita vakua	18
2.3.6	Relativní permeabilita	18
2.4	Charakteristické parametry magnetu	18
2.5	Curieho Teplota	19
3	ZÁKLADNÍ POPIS A FUNKCE EC MOTORU	20
3.1	Konstrukce EC motoru	20
3.2	Princip činnosti	20
3.3	Výhody a nevýhody EC motorů	21
3.4	Vhodné aplikace EC motorů	22
4	JEDNOTLIVÉ TYPY A KONSTRUKCE EC MOTORŮ	23
4.1	Třífázový EC motor s vinutím typu 1 drážka na pól a fázi	23
4.2	Třífázový EC motor s vinutím typu 2 drážky na pól a fázi	24
4.3	Třífázový EC motor s tzv. segmentovým statorem s vinutím typu jedna cívka na pól a fázi..	25
5	KONSTRUKČNÍ SOUVISTLOSTI	28
5.1	Materiály rotorového a statorového magnetického obvodu	28
5.2	Neodymové magnety	30
6	PŘÍKLAD - POSTUP NÁVRHU A VÝPOČTU EC - MOTORU PODLE ZADANÝCH PARAMETRŮ	35
6.1	Rozměry, počet solenoidů	35
6.2	Základní elektromechanické výpočty	35
6.3	Vinutí, profil drážky a zubu	36
6.4	Výpočet magnetického obvodu	37
6.5	Výpočet hmotnosti rotoru a statoru	41
6.6	Výpočet hlavních ztrát, účinnost stroje	42
7	VÝPOČETNÍ PROGRAM	45
7.1	Přiblížení výpočetního programu	45
7.2	Simulace magnetického obvodu	49
7.3	Seznámení s řešením v programu FEMM	49
7.4	Popis programu FEMM 4.0.1	51
7.5	Výsledky simulace	54
7.6	Zhodnocení simulace	57
8	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59
	PŘÍLOHY	60

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1 Hysterezní smyčka $B(J)$ a $J(H)$ [9].</i>	15
<i>Obr. 2-2 Teplotní závislost magnetizace, T_c [9].</i>	19
<i>Obr. 3-1 Konstrukční provedení EC motoru [2].</i>	20
<i>Obr. 3-2 Blokové schéma pohonu s EC motorem.</i>	21
<i>Obr. 4-1 Vinutí třífázového EC motoru typu jedna drážka na pól a fázi, směr proudu ve fázích při momentálním úhlu natočení.</i>	23
<i>Obr. 4-2 Průběh fázových proudů v motoru typu jedna drážka na pól a fázi.</i>	23
<i>Obr. 4-3 Vinutí třífázového EC motoru typu dvě drážky na pól a fázi, směr proudu ve fázích při momentálním úhlu natočení.</i>	24
<i>Obr. 4-4 Průběh reakčních magnetických napětí ve stroji typu dvě drážky na pól a fázi.</i>	25
<i>Obr. 4-5 Segmentový stator s třífázovým vinutím typu jedna cívka na pólpár a fázi.</i>	26
<i>Obr. 4-6 Rozložení vinutí motoru, průběh reakčního pole.</i>	26
<i>Obr. 4-7 Vzájemné působení rotoru a statoru v jednom komutačním úseku.</i>	27
<i>Obr. 5-1 Magnetizační charakteristika transformátorových plechů [1].</i>	29
<i>Obr. 5-2 Blok NdFeB magnetu s povrchovou úpravou niklováním [10].</i>	32
<i>Obr. 5-3 Hysterezní křivka $H = f(B)$ a křivka $H = f(J)$ materiálu NdFeB VACODYM 655 HR (Vacuumschmelze) [5].</i>	33
<i>Obr. 5-4 Vývojový diagram (Postup při návrhu EC motoru se segmentovým statorem).</i>	34
<i>Obr. 6-1 Výkres statorového plechu.</i>	38
<i>Obr. 7-1 První okno pro zadávání hodnot.</i>	46
<i>Obr. 7-2 Druhé okno pro zadávání hodnot.</i>	47
<i>Obr. 7-3 Třetí okno pro zadávání hodnot.</i>	48
<i>Obr. 7-4 Zobrazení hlavních výsledků.</i>	48
<i>Obr. 7-5 Vygenerovaný model EC motoru těsně před spuštěním simulace.</i>	49
<i>Obr. 7-6 Příklad sítě použité v metodě konečných prvků [1].</i>	50
<i>Obr. 7-7 Vymešovaný model statoru + rotoru s magnety.</i>	52
<i>Obr. 7-8 Ukázka možnosti uložení výsledků do souboru.</i>	52
<i>Obr. 7-9 Vývojový diagram (postup při navrhování EC motoru).</i>	53
<i>Obr. 7-10 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru (celkový pohled).</i>	54
<i>Obr. 7-11 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře.</i>	54
<i>Obr. 7-12 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru, bez zátěže (celkový pohled).</i>	55
<i>Obr. 7-13 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře, bez zátěže.</i>	55
<i>Obr. 7-14 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru, šestipólové provedení (celkový pohled).</i>	56
<i>Obr. 7-15 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře u šestipólového provedení.</i>	56

SEZNAM TABULEK

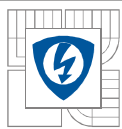
<i>Tab. 5-1 Magnetické charakteristiky Neodymových magnetů [3].</i>	32
<i>Tab. 6-1 Základní technické údaje o EC-motoru.</i>	44
<i>Tab. 1 Technické informace o permanentních magnetech. Jednotky magnetických veličin. Pro magnetické veličiny jsou od června 1970 zákonem předepsány jednotky SI.</i>	60

DEFINICE A ROZMĚR POUŽITÝCH SYMBOLŮ

α	úhel posunutí, natočení	°
η	účinnost	-
γ	úhel rozevření drážky	°
μ_0	permeabilita vakua	H.m ⁻¹
μ_r	relativní permeabilita	H.m ⁻¹
σ	proudová hustota	A.mm ⁻²
π	Ludolfovo číslo	-
ρ_{Fe}	hustota železa	kg.m ⁻³
ρ_m	měrný odpor mědi	Ω.m
ω	úhlová frekvence	rad.s ⁻¹
Φ	magnetický indukční tok	Wb, Vs
a	šířka zubu	m
b	šířka drážky	m
c	výška drážky	m
c_H	materiálová konstanta	-
d	průměr vodiče (vinutí)	m
f	frekvence	Hz
f_0	vztažná frekvence	Hz
k	počet statorových zubů	-
l	aktivní délka solenoidu	m
l	střední délka siločáry magnetického pole	m
l_m	tloušťka magnetu	m
l_p	délka oblouku magnetu	m
l_{JHO}	střední délka siločáry mezi sousedními póly	m
l_{ROT}	střední délka siločáry v rotorovém jhu	m
l_s	střední délka vinutí	m
l_v	velikost vzduchové mezery	m
m	počet fází	-
m_{celk}	celková hmotnost sestavy	kg
m_{rot}	hmotnost rotorového prstence	kg
m_{Fe}	hmotnost železa statoru	kg
m_{JHO}	hmotnost jha statoru	kg

m_v	hmotnost vinutí	kg
m_s	hmotnost jader solenoidů	kg
n	otáčky	s^{-1}
p	počet pólů stroje	-
p_h	měrné hysterezní ztráty	$W.kg^{-1}$
p_v	měrné vířivé ztráty	$W.kg^{-1}$
r	poloměr rotoru	m
r_{jho}	střední poloměr statorového jha	m
t	Celsiova teplota	$^{\circ}C$
v	výška statorového jha	m
v_{ROT}	tloušťka rotorového jha	m
B	magnetická indukce	T
B_0	amplituda magnetické indukce	T
B_0	vztažná magnetická indukce	T
B_m	maximální magnetická indukce v mezeře	T
B_{min}	minimální magnetická indukce v mezeře	T
B_{ROT}	sycení v rotorovém jhu	m
B_{jho}	sycení v statorovém jhu	m
B_r	remanentní indukce	T
B_z	magnetická indukce v zubu	T
BH_{max}	maximální energetický součin	$J.m^{-3}$
F_{JHO}	úbytek magnetického napětí na jhu statoru	Az
F_{ROT}	úbytek magnetického napětí na jhu rotoru	Az
F_m	magnetomotorické napětí	A
F_{reakce}	reakční magnetické napětí	Az
F_v	úbytek magnetického napětí v mezeře	Az
F_z	úbytek magnetického natětí na zubu	Az
H	intenzita magnetického pole	$A.m^{-1}$
H_{JHO}	intenzita magnetického pole ve statorovém jhu	$A.m^{-1}$
H_{ROT}	intenzita magnetického pole v rotorovém jhu	$A.m^{-1}$
H_c	koercitivita	$A.m^{-1}$
H_m	intenzita pole v magnetu	$A.m^{-1}$
H_{max}	intenzita pole v magnetu	$A.m^{-1}$
H_z	intenzita magnetického pole v zubu	$A.m^{-1}$
I	elektrický proud	A
I_{max}	špičková hodnota fázového proudu	A

I_{fef}	efektivní hodnota fázového proudu	A
J	magnetická polarizace	T
M	moment	N.m
N	počet vodičů na solenoidu	-
P	výkon	W
P_{Cu}	ohmické ztráty v mědi	W
P_{Fe}	ztráty v magnetickém obvodu	W
P_{FeH}	ztráty hysterezní	W
P_{FeV}	ztráty vířivé	W
P_{TOT}	celkové ztráty v motoru	W
P_{hZ}	hysterezní ztráty v zubech	W
P_{hJHO}	hysterezní ztráty ve statorovém jhu	W
P_{vent}	ventilační ztráty	W
P_{roz}	ztráty rozptylovými toky	W
P_{vroz}	vířivé ztráty rozptylovými toky	W
P_{vROT}	přídavné ztráty	W
P_{vJHO}	vířivé ztráty ve statorovém jhu	W
P_{vZ}	vířivé ztráty v zubech	W
R	odpor vinutí	Ω
S	plocha	m^2
S_{Cu}	průřez vodiče	m^2
S_{dr}	průřez drážky	m^2
T_{c}	Curieho teplota	K
T_{max}	maximální pracovní teplota	K
U_{D}	napájecí napětí	V
U_{i}	napětí stejnosměrného meziobvodu měniče	V
V_{dr}	objem všech drážek	m^3
V_{FE}	objem železa statoru	m^3
V_{JHO}	objem statorového jha	m^3
V_{ROT}	objem rotorového prstence	m^3
V_{ST}	objem celého tělesa statoru	m^3
V_{V}	objem celého vinutí	m^3
X	fáze	-
Y	fáze	-
Z	fáze	-



1 ÚVOD

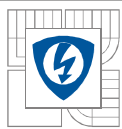
V dobách před nástupem výkonové elektroniky byl stroj s harmonickým indukovaným napětím nejčastějším typem synchronního stroje, protože většina strojů pracovala s harmonickým síťovým napětím resp. s harmonickým napětím generovaným jiným elektrickým strojem. Stroj se používal především jako generátor.

S nástupem elektroniky jeho význam vzrostl. Při napájení harmonickými proudy u něj lze v praxi dosáhnout téměř ideální konstantní průběh momentu v závislosti na úhlu natočení. Při použití čidla polohy, pak lze realizovat přesnou polohovou regulaci. Setkáme se s ním proto v synchronních servomechanismech, v trakčních pohonech s vysokou účinností i v moderních mobilních zdrojích elektrické energie.

Má-li být stroj napájen harmonickými proudy, pak je ovšem jeho relativní nevýhodou složitý způsob řízení a obvykle nutnost použití čidla polohy poskytujícího informaci o poloze v každém okamžitém úhlu natočení.

Proto byl koncem 80. let 20. století vyvinut tzv. elektronicky komutovaný motor (synchronní EC motor). Ten je konstruován tak, že pro konstantní moment v závislosti na úhlu natočení vyžaduje fázové proudy obdélníkového průběhu. Čidlo polohy musí dávat informaci pouze o polohách, v nichž má dojít k přepnutí proudu do jiného vinutí (elektronická komutace). Dosažení téměř konstantního momentu (v praxi mírně zvlněného) při obdélníkových průbězích fázových proudů se zajistí takovým rozložením vinutí, jemuž odpovídá indukované napětí rovněž obdélníkového průběhu (v praxi lichoběžníkového).

Dále se zde budeme zabývat návrhem, výpočtem a simulací třífázového EC motoru. Především jeho rozměrů, konstrukci magnetického obvodu, materiálu použitého pro magnetický obvod a permanentními magnety.



2 ZÁKLADNÍ POJMY

2.1 Magneticky tvrdý materiál

Pro trvalé magnety se používají materiály, označované souhrnně termínem "magneticky tvrdé materiály". Jejich základní magnetickou vlastností je schopnost zachovat značnou magnetickou polarizaci J i po ukončení působení vnějšího magnetického pole. Celková magnetická indukce B v materiálu je dána vztahem

$$B = \mu_0 \cdot H + J \quad (\text{T; TmA}^{-1}, \text{Am}^{-1}, \text{T}) \quad (1.1)$$

kde

- H je intenzita magnetického pole (A/m)
- B je magnetická indukce (T)
- J je magnetická polarizace (T)
- μ_0 je permeabilita vakua ($4\pi \cdot 10^{-7}$ Tm/A)

Velikost polarizace je úměrná velikosti magnetického pole :

$$J = \mu_0 \cdot (\mu_r - 1) \cdot H \quad (\text{T; TmA}^{-1}, -, \text{Am}^{-1}) \quad (1.2)$$

kde μ_r je relativní permeabilita.

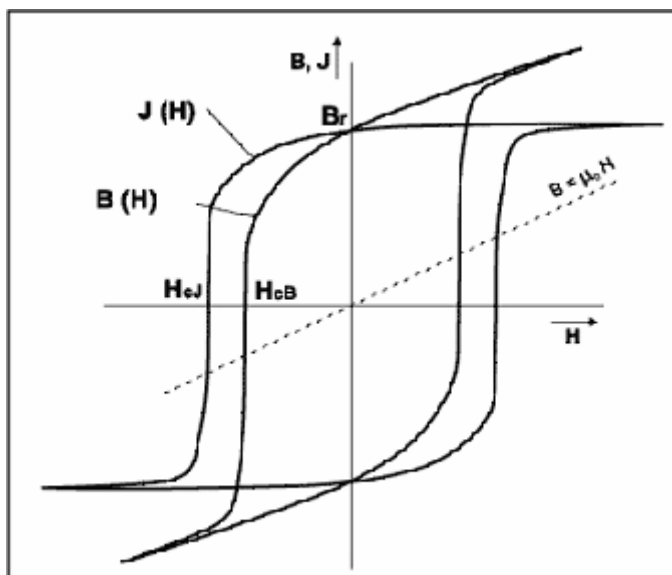
Vztah (1.1) je pak možno alternativně zapsat ve tvaru

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \quad (\text{T; TmA}^{-1}, -, \text{Am}^{-1}) \quad (1.3)$$

Permanentní (trvalý) magnet je magnet, který si po předchozím namagnetování zachová svůj magnetismus buď úplně, nebo alespoň zčásti. Dnešní magnety mají koercitivitu několikrát lepší a tím jsou i stabilnější nežli magnety, vyráběné před několika desetiletími. Jejich koercitivity H_c se nacházejí nad 1kA/m. Vysocekoercitivní magnety jako SmCo a NdFeB mají hodnoty H_{cJ} až přes 2000kA/m.

2.2 Hysterezní křivka

Závislosti $J(H)$ resp. $B(H)$ podle vztahů (1.2) resp. (1.3) charakterizují magneticky tvrdý materiál. Úplný průběh závislosti od $-H_{max}$ do $+H_{max}$ a zpět se nazývá hysterezní smyčka. Je odrazem změn uspořádání magnetických domén (Weissovy domény) v materiálu. Rozeznáváme v zásadě dva druhy těchto změn: posun doménových stěn a rotaci vektorů magnetizace. Zatímco první mechanismus se uplatňuje zejména v oblasti nižších polí, druhý je významný v oblasti nasycení. Na *obr.2-1* jsou vidět příklady obou typů hysterezní křivky. Liší se od sebe o aditivní složku $\mu_0 \cdot H$ ze vztahu (1.1). Závislost $B(H)$ se častěji využívá v technické praxi, avšak závislost $J(H)$ slouží spíše v oblasti materiálového výzkumu.



Obr. 2-1 Hysterezní smyčka $B(J)$ a $J(H)$ [9].

2.3 Základní fyzikální veličiny popisující magnetické pole

2.3.1 Magnetický tok

Je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících danou plochou, kolmou na směr orientace siločar. Fyzikální jednotka magnetického toku:

a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

1 weber (Wb)

1 voltsekunda (Vs)

odvozená ze vztahu: $\Phi = U_i \cdot t$ (Vs; V, s) (1.4)

b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS (předchůdce měrové soustavy SI):

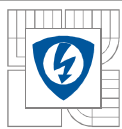
1 maxwell (M)

c) vzájemný přepočítání fyzikálních jednotek:

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ Vs} = 10^8 \text{ M} \quad (1.5)$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\Phi = B \cdot S \quad (\text{Wb; T, m}^2) \quad (1.6)$$



2.3.2 Intenzita magnetického pole

Je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující „mohutnost“ magnetického pole v závislosti na faktorech, které pole vytvářejí (např. velikost elektrického proudu tekoucího vodičem cívky) nezávisle na parametrech prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Fyzikální jednotka intenzity magnetického pole:

a) v mezinárodní soustavě jednotek SI:

1 ampér na metr (Am^{-1})

b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS:

1 oersted (Oe)

c) vzájemný přepočet fyzikálních jednotek:

$$1\text{Am}^{-1} = \frac{4\pi}{1000} = 0,0125664\text{Oe} \quad (1.7)$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$H = \frac{F_m}{l} \quad (\text{Am}^{-1} ; \text{A}, \text{m}) \quad (1.8)$$

F_m magnetomotorické napětí

l střední délka siločáry magnetického pole

$$H = \frac{B}{\mu} \quad (\text{Am}^{-1} ; \text{T}, \text{Hm}^{-1}) \quad (1.9)$$

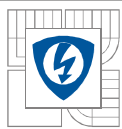
$$H = \frac{B}{(\mu_0 \cdot \mu_r)} \quad (\text{Am}^{-1} ; \text{T}, \text{Hm}^{-1}, -) \quad (1.10)$$

2.3.3 Magnetická indukce

Je vektorová fyzikální veličina, vyjadřující počet (indukčních) siločar magnetického pole procházejících jednotkovou plochou (1m^2), kolmou na směr siločar - tj. hustotu (indukčních) siločar daného magnetického pole. Fyzikální jednotka magnetické indukce:

a) v mezinárodní soustavě jednotek SI:

1 tesla (T)
1 voltsekunda/ m^2 (Vs.m^{-2})



odvozená ze vztahu:

$$B = \frac{\Phi}{S} \quad (\text{Vs.m}^{-2}; \text{Vs, m}^2) \quad (1.11)$$

b) v mezinárodní soustavě CGS:

$$1 \text{ gauss} \quad (\text{G})$$

c) vzájemný přepočít fyzikálních jednotek:

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Vs.m}^{-2} = 10^4 \text{ G} \quad (1.12)$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$B = \mu \cdot H \quad (\text{T; Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}) \quad (1.13)$$

2.3.4 Permeabilita neboli prostupnost prostředí

Je skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Fyzikální jednotka permeability prostředí:

a) v mezinárodní soustavě jednotek SI (v současnosti používaná):

$$\begin{aligned} 1 \text{ henry na metr} & \quad (\text{Hm}^{-1}) \\ 1 \text{ tesla/ampér/m} & \quad (\text{T/Am}^{-1}) \end{aligned}$$

ze vztahu:

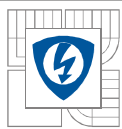
$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{T/Am}^{-1} ; \text{T, Am}^{-1}) \quad (1.14)$$

b) v mezinárodní soustavě jednotek CGS:

$$1 \text{ gauss na oersted} \quad (\text{G/Oe})$$

odvozená ze vztahu:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{G/Oe} ; \text{G, Oe}) \quad (1.15)$$



c) vzájemný přepočet fyzikálních jednotek:

$$1 \text{ H} \cdot \text{m}^{-1} = 1 \frac{\text{T}}{\text{A} \cdot \text{m}^{-1}}$$

Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (\text{Hm}^{-1}; \text{T}, \text{Am}^{-1}) \quad (1.16)$$

2.3.5 Permeabilita vakua

Neboli magnetická indukční konstanta vakua - skalární fyzikální veličina, vyjadřující magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) vakua:

$$\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} = 1,256637 \cdot 10^{-6} \frac{\text{T}}{\text{m}^{-1}} = 1 \frac{\text{G}}{\text{Oe}} \quad (1.17)$$

2.3.6 Relativní permeabilita

Neboli prostupnost prostředí je skalární fyzikální veličina, popisující relativní magnetickou polarizovatelnost (magnetickou „vodivost“, prostupnost pro magnetické pole) prostředí, ve kterém je magnetické pole vytvářeno. Tato fyzikální veličina vyjadřuje, kolikrát je dané prostředí magneticky polarizovatelnější (magneticky „vodivější“, prostupnější pro magnetické pole), než vakuum. Je to veličina bezrozměrná. Základní matematický vztah pro výpočet:

$$\mu_r = \frac{B}{(\mu_r \cdot H)} = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (-; \text{T}, \text{Hm}^{-1}, \text{Am}^{-1}; \text{Hm}^{-1}, \text{Hm}^{-1}) \quad (1.18)$$

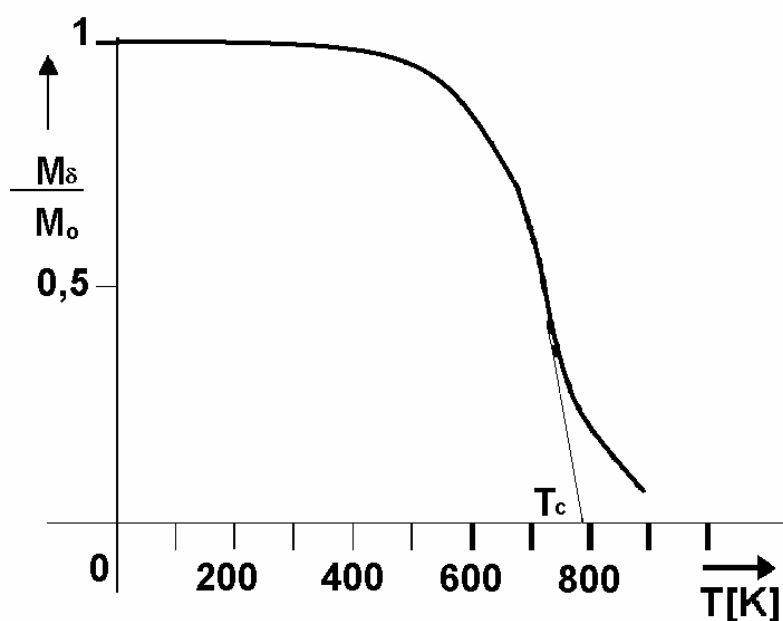
2.4 Charakteristické parametry magnetu

Trvalý magnet je zpravidla charakterizován těmito základními parametry: koercitivitou H_c , remanencí B_r a maximálním součinem $(BH)_{\max}$. Koercitivita H_c (A/m) je taková intenzita magnetického pole, která působí proti směru spontánní magnetizace, až dosáhne celková indukce v materiálu $B = 0$. Parametr H_c je mírou odolnosti magnetu proti odmagnetování (vnějším polem i vlastní demagnetizací). Remanence B_r (T) je hodnota magnetické indukce, která se ustálí po zmagnetování v uzavřeném obvodu magnetu bez působení vnějšího magnetického pole. Z *obr. 2-1* vyplývá, že zatímco parametr B_r je pro oba typy křivek $B(H)$ a $J(H)$ shodný, neplatí totéž pro parametr H_c . Proto rozlišujeme koercitivitu H_{cJ} a koercitivitu H_{cB} . Maximální součin $(BH)_{\max}$ (kJ/m³), (někdy též nazývaný maximální energetický součin)

je úměrný magnetické energii, uložené v magnetu optimálního tvaru. Parametr $(BH)_{max}$ odpovídá interakční síle magnetu vůči jiným feromagnetickým předmětům (nejčastěji železe).

2.5 Curieho Teplota

Magnetizace veškerých feromagnetických materiálů se vzrůstající teplotou klesá až k nule, totéž platí i pro trvalé magnety. Teplotní závislost je charakterizována tzv. Curieho teplotou T_c , která je průsečíkem směrnice sestupné části křivky s teplotní osou (*obr. 2-2*). Při použití trvalých magnetů je třeba dbát na to, aby se pracovní teplota nepřiblížila T_c , bezpečná "vzdálenost" je cca do 0,4 násobku T_c .



Obr. 2-2 Teplotní závislost magnetizace, T_c [9].

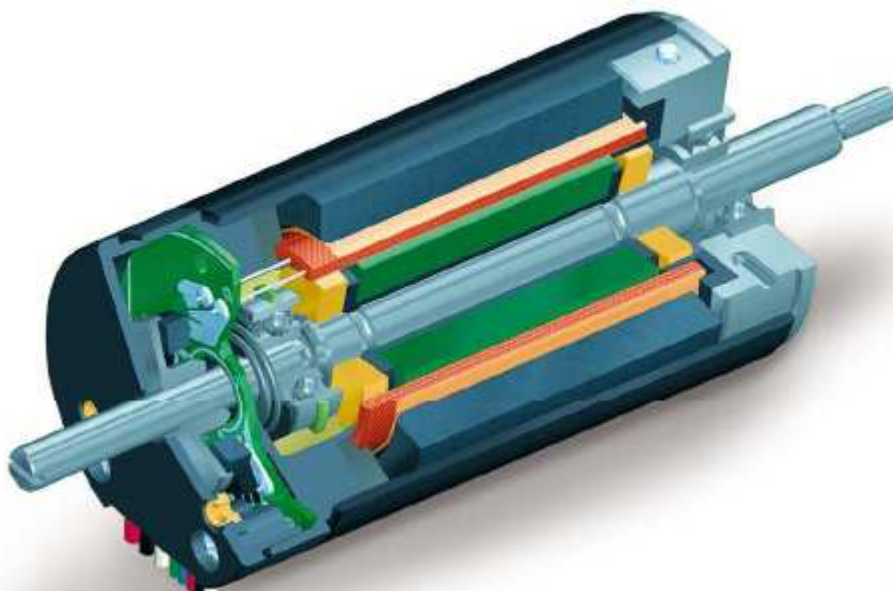
Porovnání jednotek popisujících magnetické vlastnosti materiálů, jejich velikost a vzájemné vztahy jsou uvedeny viz *tab. 1* v příloze.

3 ZÁKLADNÍ POPIS A FUNKCE EC MOTORU

3.1 Konstrukce EC motoru

Konstrukci bezkomutátorových motorů je znázorněna na *obr. 3-1*. Skládá se obdobně jako u většiny elektrických strojů z magnetického a elektrického obvodu. Magnetický obvod je tvořen buď z feromagnetických plechů (na statoru kvůli omezení ztrát vířivými proudy) s drážkami v nichž je uloženo vinutí, nebo z plného materiálu na rotoru. Na rotoru není nutné mít plechy, z důvodu konstantního magnetického toku, který vybudí permanentní magnety a tudíž ani nedochází ke ztrátám přemagnetováním (hysterézním) a vířivými proudy. Elektrický obvod je pouze na statoru a je tvořen vinutím, jež je uloženo v jeho drážkách. Vinutí rozlišujeme podle počtu fází. Nejběžnější a nejpoužívanější je třífázové vinutí, kterým se zde budeme dále zabývat. Třífázové vinutí je možno zapojit buď do hvězdy, nebo do trojúhelníka. V případě spojení do hvězdy je potřeba větší napětí, aby se dosáhlo stejného výkonu jako při zapojení do trojúhelníka. Jinak bude rychlost i moment ve hvězdě odmocnina ze 3 krát nižší. Jmenovité napětí se smí překročit, ovšem s ohledem na teplotní limit vinutí. Proud se přivádí vždy do dvou ze tří sekcí statorového vinutí. V některých případech je vinutí rozděleno do více sekcí, princip je však stejný [8].

Rotor je tvořen permanentními magnety většinou z materiálu NdFeB, SmCo, ale i feritu, AlNiCo a dalších. U válcových motorů je počet pólů rovem většinou 2 nebo 4. U diskových není výjimkou ani 24 pólů. Součástí rotoru je hřídel, která je uložena v kuličkových ložiscích. Ložiska mohou být samomazná, což zvyšuje jejich odolnost proti otěru.



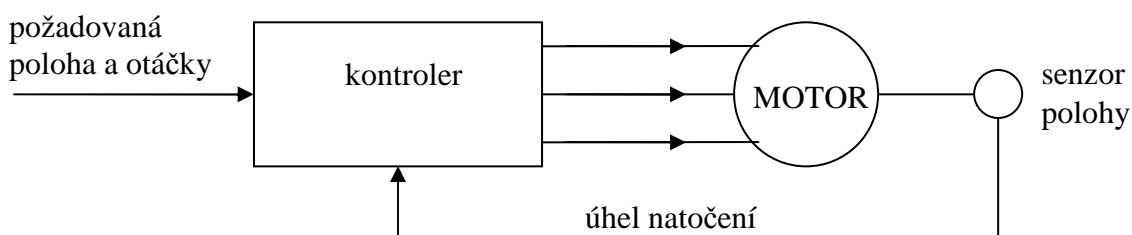
Obr. 3-1 Konstrukční provedení EC motoru [2].

3.2 Princip činnosti

Princip těchto motorů je založen na již zmíněné elektronické komutaci. Komutací rozumíme přepínání proudu do sekcí vinutí na základě informace o poloze rotoru, vytváří tak podmínky pro vysoký záběrný moment, rychlou a přesnou reakci na řízení a vysokou

účinnost. Elektronická komutace, kde mechanický komutátor je nahrazený elektronikou se zpětnou vazbou polohy díky snímačům polohy (nejčastěji Halovým sondám) je mnohem výhodnější z hlediska životnosti, kdy mechanický komutátor je většinou důsledkem poruchy stejnosměrných motorů. Sondy jsou ovládány zvláštním permanentním magnetem na rotoru. Informace ze sond se zpracovávají v řídicí jednotce, která napájí vždy dvě části statorového vinutí tak, aby napětí vytvořilo magnetické pole statoru s ohledem na polohu permanentního magnetu v rotoru. Tímto způsobem dochází ke vzniku mechanického momentu, který je tím větší, čím větší je délka vodiče a magnetu, průměr cívky, počet závitů, velikost magnetické indukce a velikost proudu vinutím. Předchozí lze shrnout větou, že mechanický moment je dán konstrukcí motoru a proudem procházejícím jeho vinutím.

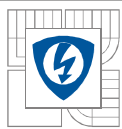
Základní prvky pohonu s EC motory jsou: motor s permanentními magnety, výkonový stupeň s budičem, usměrňovač, nebo jiný zdroj stejnosměrného napájení, čidlo pozice rotoru a řízení. Například digitálním signálovým procesorem (DSP), nebo postačí i jednoduchá komutační logika. Zjednodušené blokové schéma pohonu je na *obr. 3-2*.



Obr. 3-2 Blokové schéma pohonu s EC motorem.

3.3 Výhody a nevýhody EC motorů

Výhody EC motorů oproti ostatním druhům jsou zřejmé. Klasické synchronní stroje se sami nerozběhnou a jejich využití je tím omezeno na pohon zařízení bez rázů s lehkým rozběhem. Asynchronní stroje jsou velice rozšířeny, ale vyžadují pro plynulé řízení otáček drahé měniče kmitočtu. U stejnosměrných motorů dochází k opotřebení komutátoru a hlavně uhlíkových kartáčů. V dnešní době lze dosáhnout životnosti kolem 3000 provozních hodin. Při extrémně nepříznivých situacích se doba života zkrátí i na pouhých 100 hodin, naopak při příznivém zatížení a proudu kolem 50% trvale přípustného proudu lze dosáhnout i 10000 hodin provozu. Na druhou stranu nepotřebují v jednoduchých aplikacích žádnou řídicí elektroniku a pořízení je tak méně nákladné [2].



Přednosti elektronicky komutovaných motorů:

- Rychlý rozběh i při zatížení
- Velký záběrový moment
- Možnost krátkodobého přetížení
- Životnost několik desítek tisíc hodin (omezena kuličkovými ložisky)
- Řízení otáček vstupním napětím
- Neomezené možnosti aplikací
- Použití i jako krokový motor
- Vysoká účinnost
- Rychlost až 100000 min^{-1}
- Možnost napájení z baterie
- Lepší dynamické vlastnosti
- Malé rozměry, nízká hlučnost i hmotnost

Nevýhody:

Nutnost řídicí jednotky a výkonové jednotky (měniče), bez které nemohou pracovat

Citlivost na nárazy a velké otřesy kvůli křehkosti permanentních magnetů. Omezená pracovní teplota (kvůli demagnetizaci permanentních magnetů).

3.4 Vhodné aplikace EC motorů

EC motory jsou velmi výhodné z hlediska řízení motoru a jejich kompaktnosti. Využívá se jich prakticky ve všech oborech s nárokem na precizní i miniaturní pohony [2].

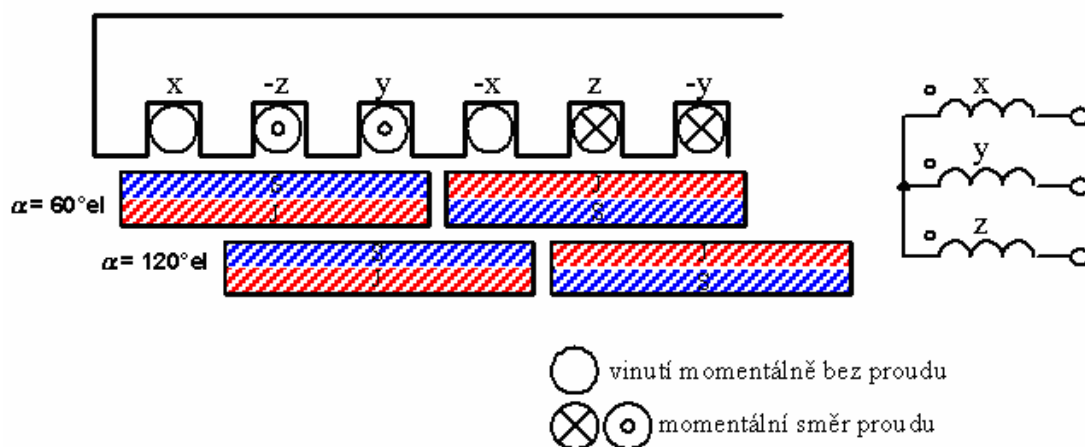
- Automatizace laboratorních analýz
- Řízení laseru v oční laboratoři
- Rentgenové vybavení
- Sterilní pily a odsávačky na chirurgii
- EKG a EEG zapisovače
- Citlivé čtyřprsté ruce
- Kanalizační roboti
- Robotická vozítka pro všemožné podmínky
- Laserové svařování
- Ruční nástroje
- CNC stroje
- Mikrometry
- Značkovací stroje
- Modely
- Tiskárny a kopírky
- Navigační systémy

4 JEDNOTLIVÉ TYPY A KONSTRUKCE EC MOTORŮ

Tato kapitola je volně převzata z [1].

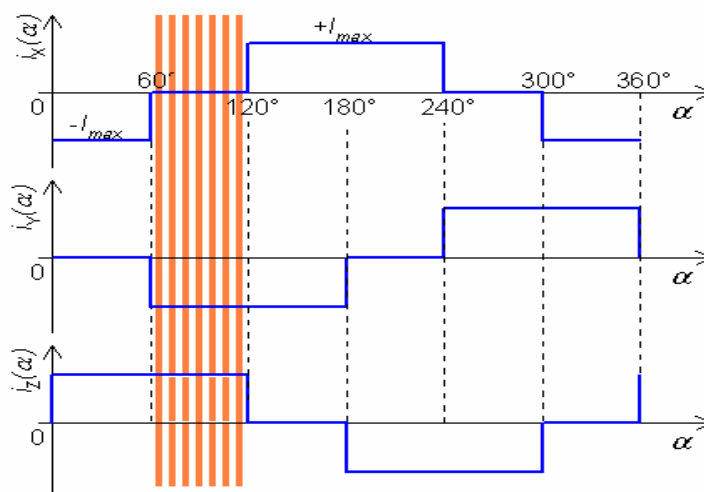
4.1 Třífázový EC motor s vinutím typu 1 drážka na pól a fázi

Z rozložení vinutí motoru na *obr. 4-1* je patrné, že cívka jedné fáze odpovídající jednomu pólpáru je uložena pouze do dvou drážek. To znamená, že na jeden pól připadá v jedné fázi pouze jediná drážka. Fáze označíme X, Y, Z . Znaménka u příslušných fází značí orientaci vinutí. Z *obr. 4-1* je zřejmé, že všechna tři vinutí jsou navzájem elektricky posunuta o 120° .



Obr. 4-1 Vinutí třífázového EC motoru typu jedna drážka na pól a fázi, směr proudu ve fázích při momentálním úhlu natočení.

Na *obr. 4-1* je zachycena poloha rotoru v úhlech $\alpha = 60^\circ \text{el}$ a $\alpha = 120^\circ \text{el}$. a proudu příslušnými vinutími, které odpovídají tomuto úhlovému rozmezí. Na následujícím *obr. 4-2* je zobrazen průběh fázových proudů. Vyšrafovaná oblast odpovídá *obr. 4-1*.



Obr. 4-2 Průběh fázových proudů v motoru typu jedna drážka na pól a fázi.

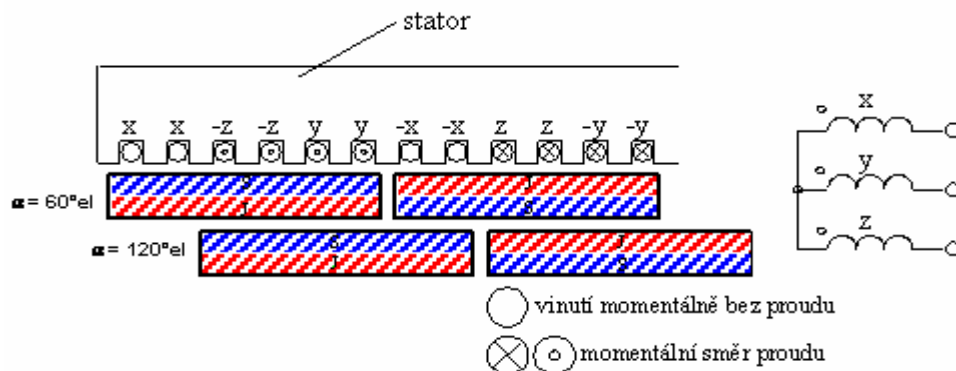
V dané situaci je fáze X bez proudu (tzv. komutující fáze), proud ve fázi Y má opačný směr, než ve fázi Z .

Vinutí jsou spojena do hvězdy, jak je patrné z *obr. 4-1*. To znamená, že v námi dané situaci je zdroj stejnosměrného proudu tvořen měničem a zapojen mezi vývody fáze Y a Z , vývod fáze X je odpojen od zdroje. V dalších úsecích je situace analogická.

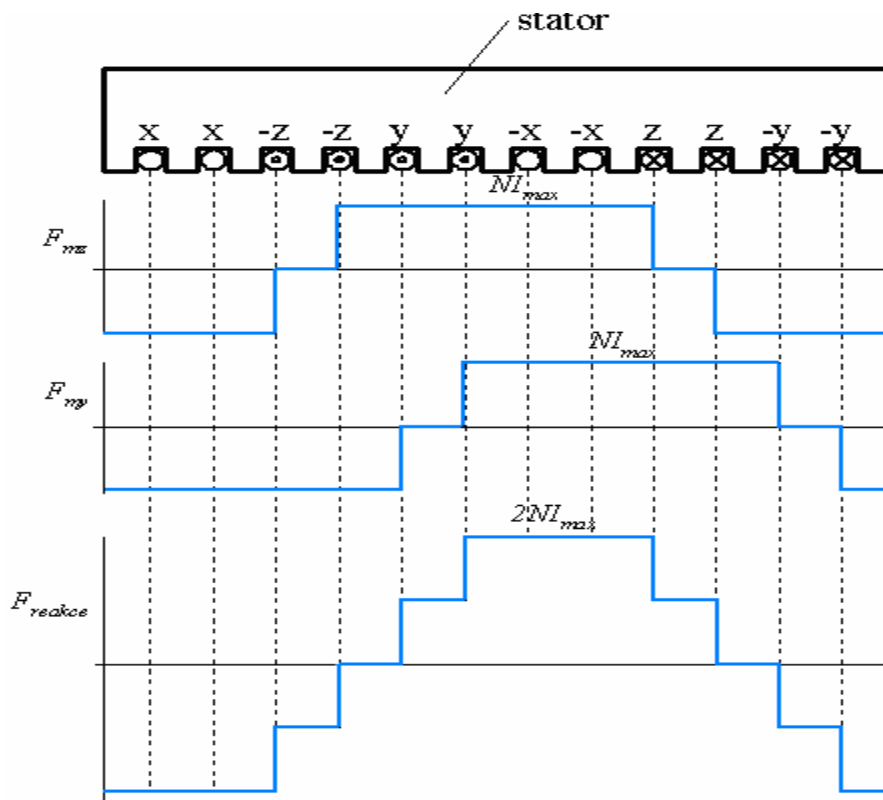
4.2 Třífázový EC motor s vinutím typu 2 drážky na pól a fázi

Pro EC motor se nejlépe hodí nejjednodušší rozložení vinutí a to typu jedna drážka na pól a fázi.

Avšak to při malém počtu pólů motoru znamená použití malého počtu drážek. Např. pro dvoupólový motor vychází pouze 6 drážek. To má za následek velkou drážkovou rozteč. Díky tomu rostou problémy s reluktančním zvlněním momentu motoru a rovněž problémy s praktickou dosažitelností rovnoměrného momentu v každém šedesáti stupňovém úseku mezi komutacemi. Proto v těchto případech často volíme vinutí se dvěma drážkami na pól a fázi. Při stejném počtu pólů je pak počet drážek dvojnásobný a zvlnění momentu není tak velké.



Obr. 4-3 Vinutí třífázového EC motoru typu dvě drážky na pól a fázi, směr proudu ve fázích při momentálním úhlu natočení.



Obr. 4-4 Průběh reakčních magnetických napětí ve stroji typu dvě drážky na pól a fázi.

Obr. 4-3 znázorňuje polohu rotoru v úhlech $\alpha = 60^\circ\text{el}$ a $\alpha = 120^\circ\text{el}$ a směr proudu vinutími odpovídající tomuto rozmezí.

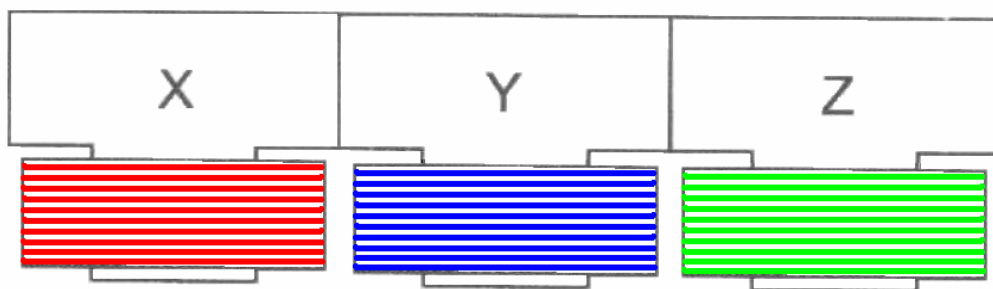
Reakční pole statorových vinutí se opět rotuje podél vzduchové mezery skokovitě po 60°el . Během času pole nemění tvar průběhu podél mezery ani svou maximální velikost. Průběh reakčního magnetického napětí podél mezery je schodovitý, jak je znázorněno na obr. 4-4.

Reakční magnetická napětí od všech fází sečteme dle principu superpozice.

4.3 Třífázový EC motor s tzv. segmentovým statorem s vinutím typu jedna cívka na pól a fázi

U dvou předchozích typů vinutí motorů bylo takové rozložení, že dvě strany stejné fázové cívky byly vždy vloženy do drážek vzdálených 180°el . Kvůli tomuto rozložení dochází ke křížení čel cívek od příslušných fází, protože jsou vzájemně pootočený o 120°el . Křížení čel má za následek neužitečný narůst osové délky motoru a objemu vinutí, které má pak velký odpor (ohmické ztráty).

Statorové vinutí je u motorů se segmentovým statorem provedeno tak, že se čela cívek od jednotlivých fází vzájemně vůbec nekříží. Jedná se o samostatné cívky (solenoidy) nasazené na trny (nástavce, zuby) statorového jha. Z takovýchto segmentů se pak složí celý stator. V rozvinutém tvaru je stator znázorněn na obr. 4-5.



Obr. 4-5 Segmentový stator s třífázovým vinutím typu jedna cívka na pólpár a fázi.

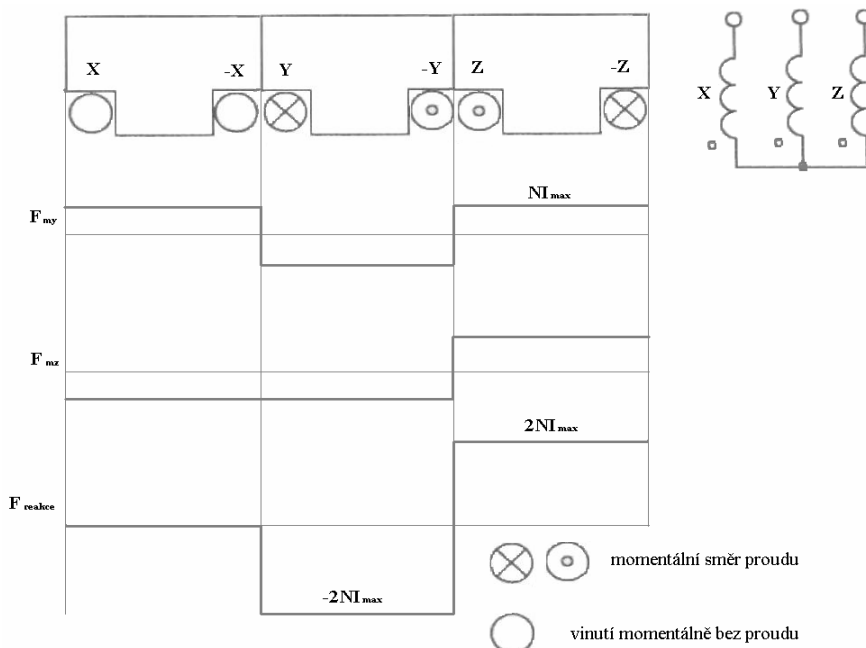
Výhody takového uspořádání vinutí jsou následující:

1. Snazší navíjení cívek, není nutno je vsypávat do drážek.
2. Redukce délky vodičů neúčinných čel vinutí tj. pokles odporu vinutí a ohmických ztrát v něm. Pokles zastavěného objemu motoru (osové délky) díky eliminaci křížení čel.

Při konstantních ohmických ztrátách ve vinutí a konstantním zastavěném objemu motoru lze touto konstrukcí zvýšit moment asi o 20%. Motory se segmentovým statorem představují moderní vývojový trend (cca posledních 7 let). Staví se jako EC motory i jako motory s harmonickým indukovaným napětím. Nejedná se vždy o koncepci rotorových a statorových pólů. Díky rozptylu a vhodné volbě pólového krytí lze dosáhnout i téměř harmonický průběh indukovaného napětí.

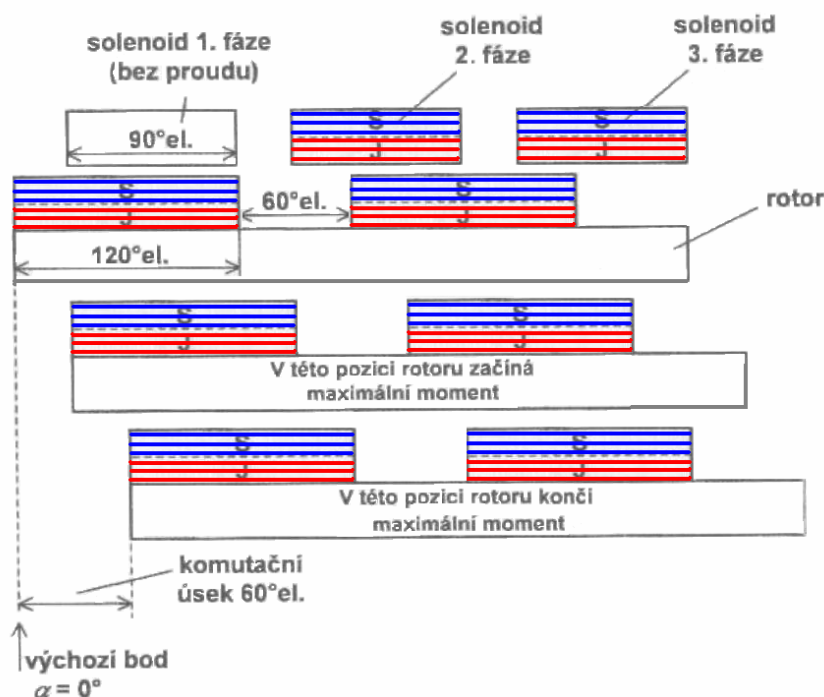
Rozložení vinutí motoru

Dále se zde budeme zabývat pouze konkrétním uspořádáním třífázového vinutí typu jedna cívka na pólpár a fází, zachyceného na obr. 4-5.



Obr. 4-6 Rozložení vinutí motoru, průběh reakčního pole.

Rozložení a zapojení vinutí je na *obr. 4-6*. Jedná-li se o EC motor, je jeho průběh fázových proudů znázorněn na *obr. 4-2*. Zachycení proudu v jednotlivých vinutích, které odpovídá vyšrafované oblasti v *obr. 4-2* je zobrazeno v *obr. 4-6*. Celkové reakční pole statoru vzniká opět superpozicí polí od jednotlivých statorových cívek, jako v předchozích případech.



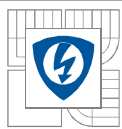
Obr. 4-7 Vzájemné působení rotoru a statoru v jednom komutačním úseku.

Na základě tohoto reakčního pole můžeme přejít k představě na *obr. 4-7*, kde stator v popisovaném komutačním úseku 60°el. nahrazují permanentní magnety.

Z *obr. 4-7*, kde jsou naznačeny tři pozice rotoru vidíme, že vzájemné silové působení rotoru a statoru, je představitelné na základě přitahování nebo odpuzování rotorových magnetů a pomyslných statorových magnetů.

V dalších úsecích je situace obdobná (fázové proudy viz *obr. 4-2*).

Funkce EC motoru s tímto uspořádáním vinutí je velice podobná funkci malého stejnosměrného motorku se třemi rotorovými nástavci a třemi lamelami komutátoru. Pouze rotor a stator si vyměnily svoje role.



5 KONSTRUKČNÍ SOUVISTLOSTI

5.1 Materiály rotorového a statorového magnetického obvodu

Ztráty v železe

Stator, který slouží jako obvod pro uzavření magnetického toku, je interaktivně vázán s magnetickým polem otáčejícího se permanentního magnetu. Vznikající výsledné ztráty v magnetickém obvodu jsou definovány jako součet hodnot ze dvou nezávislých zdrojů, a to ztrát hysterezních a ztrát vířivými proudy [8].

$$P_{Fe} = P_{FeH} + P_{FeV} \quad (5.1)$$

V následujícím textu si detailně povšimneme procesu vzniku těchto ztrát.

Hysterezní ztráty

Stator je poskládán ze svazku vhodně tvarovaných plechů. Pro tento svazek je charakteristický *hysterezní cyklus*. Během každého periodického magnetizačního cyklu způsobovaného rotací permanentního magnetu je energie přeměňována v teplo. Velikost energie přeměněné v teplo je vymezená hysterezní křivkou. Tyto hysterezní ztráty lze vyjádřit empiricky ve zjednodušené podobě. Pro homogenní (sinusově se měnící) magnetizaci plechů (válcovaných za tepla) statorového paketu mohou být ztráty definovány:

$$P_{FeH} \approx c_H \cdot n \cdot B^{1,6} \quad (5.2)$$

Pro plechy válcované za studena jsou magnetické vlastnosti rozdílné ve směru válcování, než ve směru kolmém na směr válcování. Hysterezní ztráty ve statoru P_{FeH} vyskytující se u EC motorů se hlavně projevují s lineárně narůstající otáčivou rychlostí rotoru. Lineární vztah hysterezních ztrát P_{FeH} v závislosti na otáčivé rychlosti rotoru n a závislosti amplitudy magnetické indukce B_o je určován zásadně kvalitou použitého materiálu plechů (materiálová konstanta c_H). Skutečná hodnota B_o je dána geometrickými rozměry magnetického obvodu [8].

Ztráty vířivými proudy

Točivé magnetické pole rotoru vyvolává vířivé proudy ve statorovém obvodu, který ho obklopuje (vliv jeho vodivosti). Tyto vířivé proudy mají za následek ztráty a z důvodu jejich eliminace se stator nekonstruuje z jednoho kusu železa. Místo toho je zde svazek elektricky navzájem izolovaných plechů tvořících vodivou cestu pro magnetický tok [8].

Materiál pro plechy

Dosud stále nejrozšířenějším typem plechů jsou křemíkové o tloušťkách 0,15 až 0,65mm. Jejich kvalitu posuzujeme podle permeability, magnetické indukce příslušející „kolenu“ magnetizační křivky a činného elektrického odporu plechů. Tyto veličiny vypovídají o hysterezních (velikost hysterezních ztrát závisí na ploše hysterezní smyčky)

a vířivých ztrátách ve feromagnetickém materiálu. Například označení 260-5/10 znamená, že na přemagnetování 1kg materiálu je zapotřebí při mg. indukci 1T a kmitočtu 50Hz příkon 2,6W.

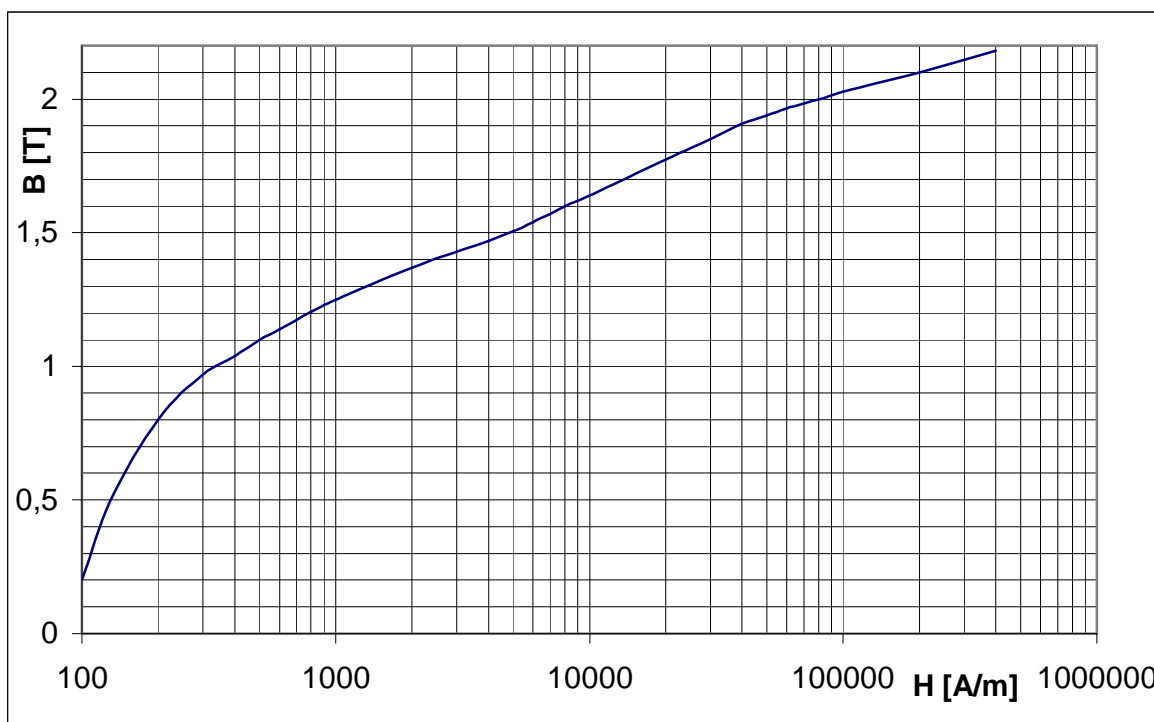
Při konstrukci elektrických strojů musíme téměř vždy volit co největší dosažitelnou magnetickou indukci (maximálně asi 2,2T). Ovšem obvykle běžná je 1 až 1,6T. Pouze u strojů pracujících s kmitočty v řádu kHz zmenšujeme indukci na 0,3T. Z důvodu použití feritů, které se pro toto použití nejvíce hodí.

Někdy se jakost plechů charakterizuje tzv. mg. součinem, který je dán součinem napětí a proudu, potřebného k dosažení předepsané indukce při jednotkové váze magnetického materiálu a daném kmitočtu napájecího napětí.

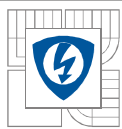
Abychom eliminovali vliv vířivých proudů je nutné jednotlivé plechy vzájemně izolovat. Izolační vrstva nesmí přirozeně zhoršit hladkost povrchu a musí být co nejtenčí, aby příliš neklesal činitel plnění železa.

Plný feromagnetický materiál.

V těch částech magnetického obvodu stroje, jimiž prochází časově neproměnný magnetický tok lze použít plného materiálu. Například válcovaná ocel či speciální slitiny niklu a kobaltu, dovolující dosáhnout magnetické indukce až 2,4T. Při takto vysoké indukci můžeme podstatně zmenšit množství feromagnetického materiálu a tím hmotnost stroje a jeho rozměry při zachování stejných vlastností [6].



Obr. 5-1 Magnetizační charakteristika transformátorových plechů [1].



5.2 Neodymové magnety

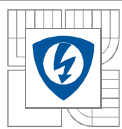
Neodymové magnety přesněji NdFeB nabízí nejlepší poměr ve srovnání výkonu, ceny a rozměru. Ještě do nedávné doby byly nejsilnějšími známými permanentní magnety materiály na bázi samaria a kobaltu (SmCo). V současné době byly však překonány materiálem o složení $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a jsou současnými nejnovějšími a nejsilnějšími typy magnetů s vynikajícími magnetickými vlastnostmi a vůbec nejvyšší vnitřní energií jako je remanence a energetická hustota. Magnety uvedeného typu jsou schopny unést více než tisícinásobek vlastní váhy a magnet o velikosti malé mince tak může udržet železný předmět o hmotnosti kolem 10kg. Zajímavé je, že i výrobní cena těchto magnetů je nižší než u SmCo magnetů. Vzhledem ke své síle jsou poměrně levné a malé. Velice snadno korodují, proto je potřeba u nich provést povrchovou úpravu nejčastěji niklováním zinkováním nebo pryskyřicí. Jejich další nevýhodou je malá tepelná odolnost oproti magnetům SmCo. Naopak magnety NdFeB mají dobrou odolnost proti působení vnějšího demagnetizačního pole kvůli jejich vysoké koercitivitě. Proto jsou tyto magnety obzvláště vhodné pro elektromechanické aplikace. V současné době jsou tyto magnety prakticky používány v počítačové technice v záznamových hlavách harddisků nebo při výrobě malých mikrofonů a reproduktorů ve sluchátkách a obdobných elektrotechnických aplikacích [3].

Výrobní proces

Bloky neodymových magnetů jsou obvykle vyráběny procesem práškové metalurgie. Neodymový prach o velikosti několika mikronů je produkován v atmosféře inertního plynu a pak následně stlačen v tuhé ocelové nebo gumové formě. Kaučuková forma je zpevněná na všech stranách kapalinou a ta předává tlak pro izostatické slisování. V ocelových formách jsou produkovány magnety finálních tvarů, zatímco v gumových formách jsou produkovány velké bloky (tzv. bochníky), které jsou pak následně děleny na konečné tvary. Magnetický výkon slitiny je optimalizován tím, že je používáno silného magnetického pole před a během lisovacího procesu. Toto pole určí směr magnetizace tzv. orientaci Weissových domén. Srovnání částecek vyplývá z anizotropní povahy slitiny a velice zlepšuje remanentní magnetickou indukci B_r a ostatní magnetické charakteristiky permanentního magnetu. Po vylisování a spečení až dosáhnou plně tuhé konzistence, se chovají jako permanentní magnety. Vylisované magnety takto dosáhnou finálních rozměrů, ale magnety lisované v gumových formách do tzv. „bochníků“ se obvykle srovnají na velkých mlýncích a pak následně „nakrájí“ na finální tvary [3].

Chemická odolnost

Vedle intermetalických fázových částic obsahuje strukturální stavba těchto trvalých magnetů volný neodym. Tomu nelze z výrobně-technických důvodů úplně zamezit. Jako téměř všechny kovy ze skupiny vzácných zemin je i tento ve své volné formě extrémně náchylný ke korozi a ke spontánní přeměně na práškový oxid nebo hydroxid neodymu doprovázené výrazným vzrůstem objemu. Permanentní magnety NdFeB jsou již napadány působením vzdušné vlhkosti. Materiál je však vůči většině rozpouštědel relativně stabilní, na soli a kyseliny reaguje ovšem extrémně silně korozívně. Působením vodíků materiál křehne.



Reakce probíhá spontánně za vzniku tepla a silného vzrůstu objemu. Magnetické vlastnosti se ztrácejí [3].

Povrchová úprava:

NdFeB magnety podléhají velice rychle korozi. Lakování a pokovení jsou jedny z možností jak chránit magnet před okolním prostředím. Velice rychlá oxidace vyžaduje pečlivou přípravu povrchu magnetu před nanesením laku nebo pokovením. Většina prostředků pro povrchovou úpravu není schopna tuto slitinu magnetu povrchově upravit. Slitina NdFeB nepřijme pokovení tak jako ostatní slitiny kovů a to má za následek, že začne korodovat zevnitř směrem na povrch magnetu. Způsob povrchové úpravy tohoto typu magnetu je: zinkem, niklem, pasivací, epoxidovou pryskyřicí, stříbrem, zlatem [3].

Kovové povlakování

Vrstva korozivzdorného kovu se nanáší nejčastěji galvanicky. Tato ochrana povrchu je vhodná pro permanentní magnety SmCo a NdFeB. Ochranná vrstva zvětšuje zpravidla „vzduchovou“ mezeru a vrstva niklu vytváří ještě navíc „magnetický zkrat“. Tímto je způsobeno snížení magnetické indukce až do 5% [3].

Plastem pojené permanentní magnety NdFeB.

Obsahují feromagnetický materiál NdFeB a epoxidovou pryskyřici nebo polyamid. Volný neodým, který se vyskytuje v sintrovaných materiálech, se zde nachází jen v nepatrném podílu. Tyto permanentní magnety jsou proto značně odolnější, nežli srovnatelný sintrovaný materiál. Vysokým podílem plastového pojiva (až do 20% objemu), který feromagnetický materiál obklopuje, jsou ještě více chráněny citlivé částice. Povrchová koroze, která se eventuálně vyskytuje, vniká pouze velmi pomalu dále do tělesa permanentního magnetu. Proto jsou permanentní magnety tohoto druhu použitelné pro většinu aplikací. V kritických aplikacích se provádí ochrana povrchu doplňkovým plastovým povrstvením. Zhoršování funkce v důsledku odlupování materiálu se zabrání a dále se zvýší odolnost permanentních magnetů vůči chemickým vlivům [3].



Obr. 5-2 Blok NdFeB magnetu s povrchovou úpravou niklováním [10].

Nevýhody a rizika:

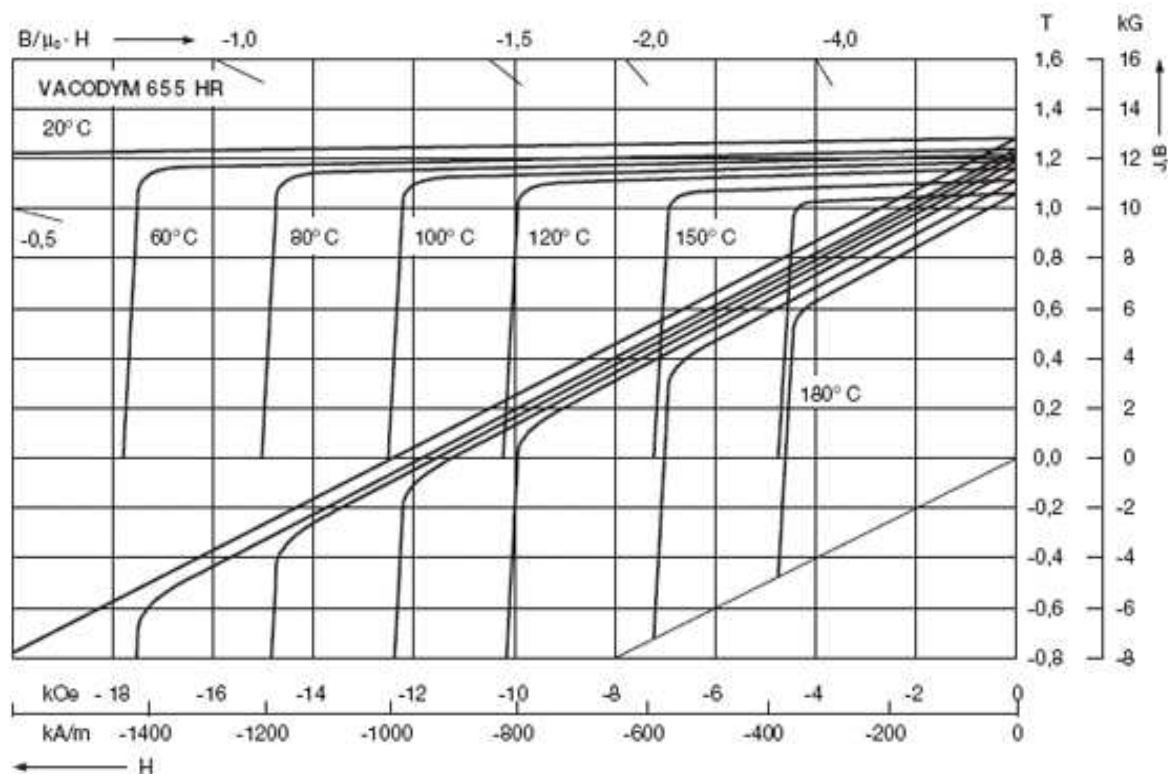
Neodymové magnety ztrácejí magnetické vlastnosti již při teplotě nad 80°C, zatímco běžné Samariové magnety jsou použitelné i při teplotách kolem 300°C.

Materiál těchto magnetů je poměrně křehký a může se snadno rozbít nejen mechanickým úderem, ale i při náhlém vystavení silnému magnetickému poli nebo teplotám nad 150°C.

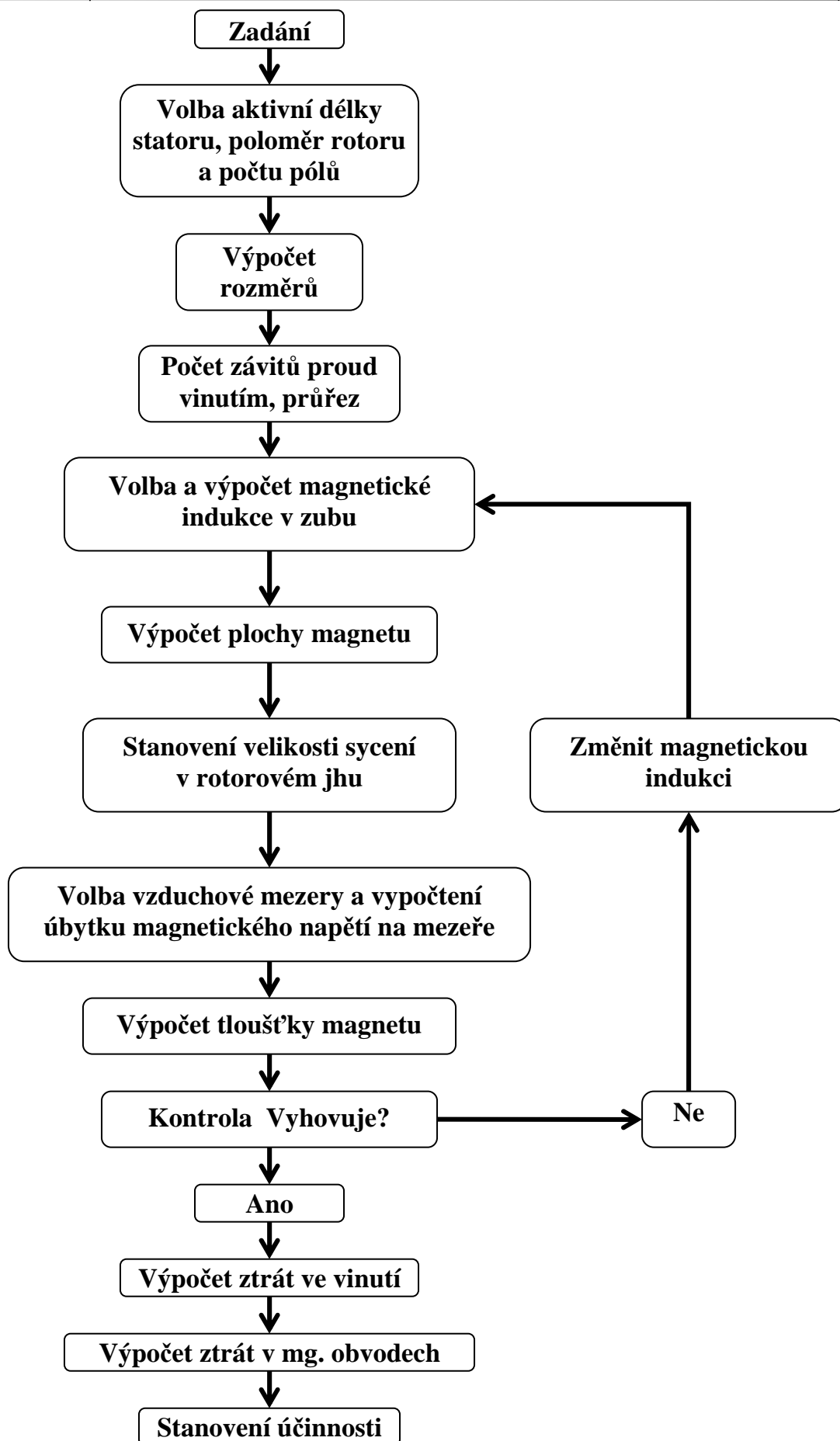
Jejich vysoká magnetická síla může způsobit vymazání dat na záznamových médiích počítačů (disketa, pevný disk), ale i na bankovních kartách, znemožnit funkci některých zařízení jako elektroměrů, vodoměrů, nebo poškození obrazovek počítačových monitorů [3].

Tab. 5-1 Magnetické charakteristiky Neodymových magnetů [3].

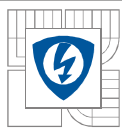
Obchodní značka	B_r , (T)	H_{cB} , (kA/m)	H_{cJ} , (kA/m)	BH_{max} (kJ/m ³)	T_{max} (°C)	Značka materiálu	Struktura
HM 240/1200	> 1,05	> 750	> 1200	> 240	100	NdFeB	anizotropní
HM 270/1150	1,2-1,25	> 900	1150-1250	> 270	100	NdFeB	anizotropní
HM 240/1400	> 1,05	> 750	> 1400	> 240	120	NdFeB	anizotropní
HM 245/1360	1,15-1,22	> 850	1360-1440	> 245	120	NdFeB	anizotropní
HM 240/1440	1,1-1,15	> 800	1440-1600	> 240	150	NdFeB	anizotropní



Obr. 5-3 Hysterezní křivka $H = f(B)$ a křivka $H = f(J)$ materiálu NdFeB VACODYM 655 HR (Vacuumschmelze) [5].



Obr. 5-4 Vývojový diagram (Postup při návrhu EC motoru se segmentovým statorem).



6 PŘÍKLAD - POSTUP NÁVRHU A VÝPOČTU EC - MOTORU PODLE ZADANÝCH PARAMETRŮ

Zadání:

třífázový synchronní solenoidový EC-motor
jmenovitý výkon: $P = 600\text{W}$
jmenovité otáčky: $n = 3000\text{min}^{-1}$
napájecí napětí: $U_D = 24\text{V}$
počet pólů: $p = 4$

6.1 Rozměry, počet solenoidů

Nejprve je nutno zvolit délku statorového svazku l a poloměr rotoru r . Vzhledem k tomu, aby motor měl délku a průměr přibližně v rovnováze (aby nebyl příliš diskový ani příliš válcový) volíme tedy $l = 30\text{mm}$ a poloměr rotoru $r = 20\text{mm}$. Počet statorových zubů k musí být (počet fází x počet pólů):

$$k = 3 \frac{p}{2} = 3 \cdot \frac{4}{2} = 6$$

6.2 Základní elektromechanické výpočty

Mechanická úhlová rychlost rotoru:

$$\omega = 2\pi \frac{n}{60} = 2\pi \frac{3000}{60} = 314\text{rad/s}^{-1}$$

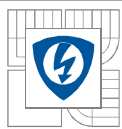
Moment motoru tedy bude:

$$M = \frac{P}{\omega} = \frac{600}{314} = 1,91\text{Nm}$$

Použijeme permanentní magnet NdFeB VACODYM 655 HR. Z hysterezní smyčky na obr. 5-3 lze předpokládat realizovatelnou volbu následujících parametrů:

budicí indukce v mezeře: $B = 0,8\text{T}$; maximální indukce v mezeře (v místě, kde se sčítá pole budící s maximem pole reakčního): $B_m = 0,9\text{T}$; minimální indukce v mezeře (v místě, kde působí maximum reakčního pole proti poli budícímu). $B_{min} = 0,6\text{T}$.

Jedná se o prvotní volbu, přesnější výpočty a ověření těchto hodnot budou provedeny později. Byla zvolena vzduchová mezera: $l_v = 1\text{mm}$. Vzhledem k použití permanentních magnetů ze vzácných zemin nemá smysl volit větší hodnotu (sám magnet má totiž relativní permeabilitu 1), vzhledem k reakčnímu poli statoru se chová jako mezera.



Pólové krytí volíme 120° el. na rotoru a 90° el. na statoru. Délka pólu stroje l_p (délka vnějšího oblouku magnetu) musí být:

$$l_p = \frac{2\pi}{3} \frac{90}{180} = \frac{2\pi \cdot 0,02}{3} \frac{90}{180} = 0,0209m$$

Vzhledem k úbytkům napětí na polovodičích měniče volíme s rezervou $U_i = 20V$. Je vypočten nutný počet vodičů na pól a fázi (počet závitů zaokrouhlíme dolů, aby indukované napětí nemohlo přesáhnout zvolenou mez):

$$N = \frac{U_i}{1,5B \cdot l \cdot \omega \cdot r \cdot p} = \frac{20}{1,5 \cdot 0,8 \cdot 0,03 \cdot 314 \cdot 0,02 \cdot 4} = 22$$

Je známo, že v každé drážce bude dvojnásobný počet závitů. Nyní je nutno vypočíst špičkovou hodnotu obdélníkového fázového proudu pro požadovaný moment:

$$I_{\max} = \frac{M}{1,25B \cdot l \cdot r \cdot p \cdot N} = \frac{1,91}{1,25 \cdot 0,8 \cdot 0,03 \cdot 0,02 \cdot 4 \cdot 22} = 36,2A$$

Na proud I_{\max} je třeba dimenzovat silový obvod měniče!

6.3 Vinutí, profil drážky a zubu

Vzhledem k předpokládanému trvalému provozu stroje byla zvolena proudová hustota ve vinutí:

$$\sigma = 8,5A/mm^2$$

Efektivní hodnota fázového proudu je:

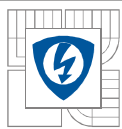
$$I_{\text{fef}} = I_{\max} \sqrt{\frac{120^\circ}{180^\circ}} = 36,2 \cdot \sqrt{\frac{120^\circ}{180^\circ}} = 29,6A$$

Průřez vodiče:

$$S_{Cu} = \frac{I_{\text{fef}}}{\sigma} = \frac{29,6}{8,5} = 3,5mm^2$$

Odhadnutý činitel plnění vinutí je $k_{pl} = 0,52$, pak potřebný průřez drážky činí:

$$S_{dr} = \frac{2 \cdot N \cdot S_{Cu}}{k_{pl}} = \frac{2 \cdot 22 \cdot 3,5}{0,52} = 296mm^2$$



Volíme obdélníkový tvar zubu a lichoběžníkový tvar drážky. Šířku zubu a i drážky b volíme stejně tedy:

$$a = b = \frac{2\pi(r + l_v)}{2k} = \frac{2\pi(0,02 + 0,001)}{2 \cdot 6} = 11\text{mm}$$

Úhel rozevření drážky γ je:

$$\gamma = \frac{360^\circ}{k} = \frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$$

Pro průřez drážky lze napsat:

$$S_{dr} = c \cdot (b + c \cdot \operatorname{tg} \gamma)$$

Známe-li již potřebný průřez S_{dr} , úhel γ i délku b lze vypočítat výšku drážky c . Z předchozí rovnice lze vyjádřit:

$$c = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4 \cdot S_{dr} \cdot \operatorname{tg} \gamma}}{2 \cdot \operatorname{tg} \gamma} = \frac{-11 + \sqrt{11^2 + 4 \cdot 296 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ}}{2 \cdot \operatorname{tg} 60^\circ} = 10,3\text{mm}$$

Vzhledem k optimalizaci tvaru zubu (na úkor drážky) volíme raději výšku zubu 11mm. Průměr jediného vodiče s potřebným průřezem S_{Cu} :

$$d = \sqrt{\frac{4 \cdot S_{Cu}}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 3,5}{\pi}} = 2,1\text{mm}$$

6.4 Výpočet magnetického obvodu

Statorové zuby:

Úbytek magnetického napětí na zubu spočítáme pro maximální výsledné pole, kde se sčítá budící pole s maximem reakčního pole. Nad tímto místem bude podle následujícího vztahu indukce:

$$B_z = B_m \frac{a+b}{a} = 0,9 \frac{11+11}{11} = 1,8\text{T}$$

Je patrné, že tyto zuby jsou dosti přesyceny. Z křivky pro dynamové plechy na obr. 5-1 odečteme velikost intenzity při této indukci: $H_z = 23\text{kA/m}$.

Výpočet úbytku magnetického napětí na zubu:

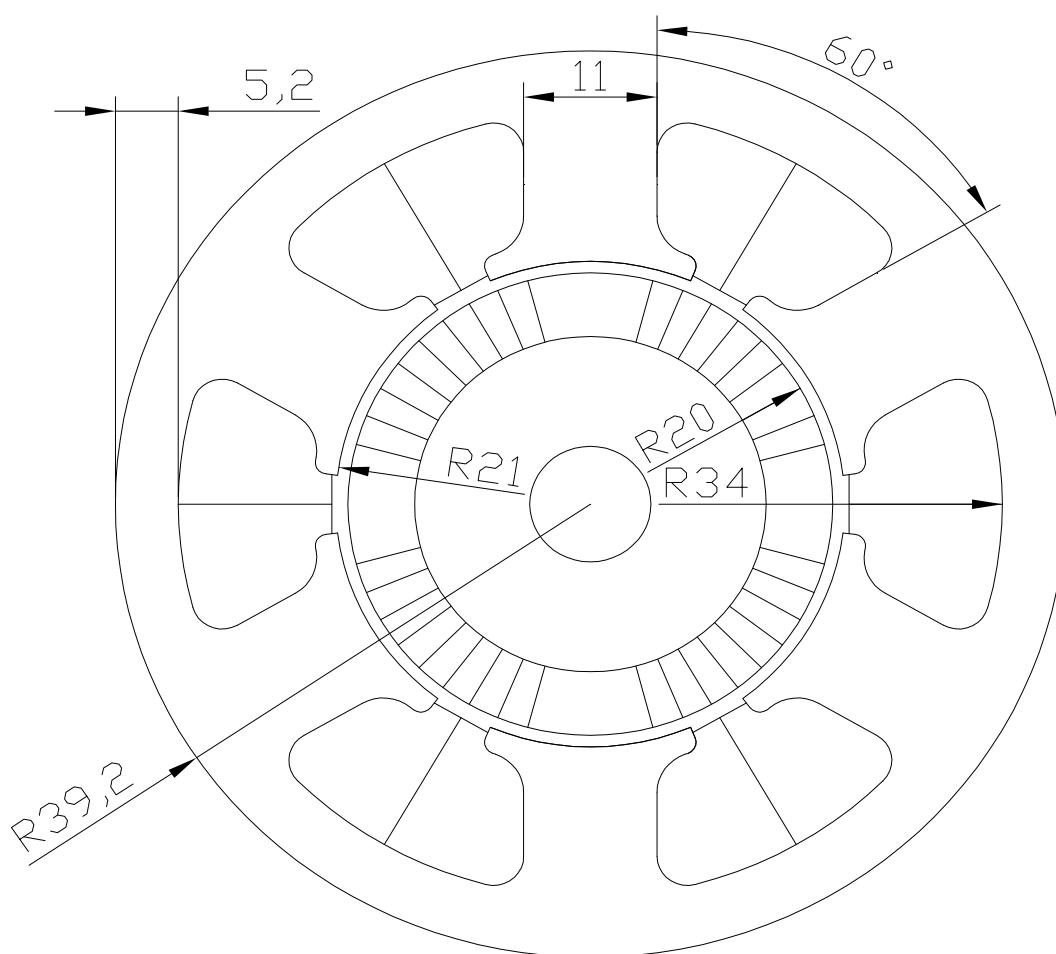
$$F_z = H_z \cdot c = 23 \cdot 10^3 \cdot 11 \cdot 10^{-3} = 220\text{Az}$$

Statorové jho:

Indukce ve statorovém jhu B_{jho} volíme cca 1,6T. Podle následujícího vztahu je nutné vypočítat výšku statorového jha. Za B je nutno dosadit průměrnou indukci výsledného pole pod pólem - tj. zhruba budicí indukci 0,8T:

$$v = \frac{l_p}{2} \cdot \frac{B}{B_{JHO}} = \frac{0,0209 \cdot 0,8}{2 \cdot 1,6} = 5,2mm$$

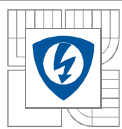
Podle předchozího výpočtu použijeme výšku statorového jha 5,2mm. Toto je poslední hodnota potřebná pro náčrtek statorového plechu, viz. obr. 6-1.



Obr. 6-1 Výkres statorového plechu.

Z obr. 6-1 je možno odečíst střední poloměr statorového jha $r_{JHO} = 36,6mm$. Z tohoto údaje můžeme určit střední délku siločáry mezi sousedními póly na statoru:

$$l_{JHO} = \frac{2\pi r_{JHO}}{p} - \frac{0,8l_p}{2} = \frac{2\pi \cdot 0,0366}{4} - \frac{0,8 \cdot 0,0209}{2} = 49,1mm$$



Z křivky pro dynamové plechy na *obr. 5-1* odečteme intenzitu pole ve jhu pro indukci 1,6T:

$$H_{JHO} = 8251 \text{ A/m.}$$

Podle následujícího vztahu vypočteme úbytek magnetického napětí na jhu:

$$F_{JHO} = H_{JHO} \cdot l_{JHO} = 8251 \cdot 0,0491 = 405 \text{ Az}$$

Rotorové jho:

Z mechanického hlediska byla zvolena tloušťka rotorového jha v_{ROT} asi 10mm. Dále je nutno zkontrolovat velikost sycení v rotorovém jhu B_{ROT} . Za B je třeba dosadit opět průměrnou indukci výsledného pole pod pólem - tj. zhruba budící indukci 0,8T:

$$B_{ROT} = \frac{l_p \cdot B}{2 \cdot v_{ROT}} = \frac{0,0209 \cdot 0,8}{2 \cdot 0,010} = 0,85 \text{ T}$$

Úbytek magnetického napětí na rotorovém jhu bude velmi malý (malá indukce). Střední délku siločáry v rotorovém jhu je odhadneme pomocí následujícího vztahu:

$$l_{ROT} = 0,5 \cdot l_p = 0,5 \cdot 20,9 = 10,45 \text{ mm}$$

Z křivky pro měkké železo na *obr. 5-1* odečteme intenzitu pole ve jhu pro indukci 0,85 T:

$$H_{ROT} = 220 \text{ A/m.}$$

Podle tohoto vzorce byl vypočten úbytek magnetického napětí na jhu:

$$F_{ROT} = H_{ROT} \cdot l_{ROT} = 220 \cdot 0,01045 = 2,3 \text{ Az}$$

Vzduchová mezera:

Pro výpočet úbytku magnetického napětí na vzduchové mezeře, je nutné dosadit průměrnou indukci výsledného pole pod pólem B - tj. zhruba budící indukci 0,8 T:

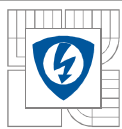
$$F_v = \frac{B \cdot l_v}{\mu_0} = \frac{0,8 \cdot 0,001}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 637 \text{ Az}$$

Permanentní magnety:

Pro výpočet permanentního magnetu je nejprve nutné stanovit maximální hodnotu reakčního magnetického napětí F_{reakce} od statorových vinutí, která bude:

$$F_{reakce} = 2 \cdot N \cdot I_{\max} = 2 \cdot 22 \cdot 36,2 = 1593 \text{ Az}$$

Při zvolené minimální indukci $B_{\min} = 0,6 \text{ T}$ v nejvíce odmagnetovaném místě má magnet podle *obr. 5-3* intenzitu H_m asi 470kA/m.



Pro vybuzení magnetického obvodu s uvažováním vlivu reakce kotvy je potřebná délka magnetu:

$$l_m = \frac{F_{ROT} + F_{JHO} + 2 \cdot F_z + 2 \cdot F_v + F_{reakce}}{2 \cdot H_m} = \frac{2,3 + 405 + 2 \cdot 220 + 2 \cdot 637 + 1593}{2 \cdot 470000} = 3,9 \text{ mm}$$

Nyní je třeba zkontrolovat předpokládané budící indukce, neboť tyto hodnoty byly pouze zvoleny (budeme považovat, že velikost magnetického napětí na rotorovém a statorovém jhu je konstantní).

Výpočet skutečné budící indukce:

Budeme postupovat následující iterační metodou:

Prvotní odhad budící indukce byl $B = 0,8 \text{ T}$:

Pak v zubu bude indukce (bez reakčního pole):

$$B_z = B \frac{a+b}{a} = 0,8 \frac{11+11}{11} = 1,6 \text{ T}$$

Z obr. 5-1 je odečten: $H_z = 8251 \text{ A/m}$

Pro úbytek magnetického napětí:

$$F_z = H_z \cdot c = 8251 \cdot 0,011 = 90 \text{ Az}$$

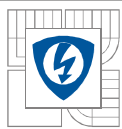
V mezeře bude úbytek napětí:

$$F_v = \frac{B \cdot l_v}{\mu_0} = \frac{0,8 \cdot 0,001}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 637 \text{ Az}$$

Při uvažování $F_{reakce} = 0$ bude v magnetu intenzita:

$$H_m = \frac{F_{ROT} + F_{JHO} + 2 \cdot F_z + 2 \cdot F_v + F_{reakce}}{2 \cdot l_m} = \frac{2,3 + 405 + 2 \cdot 90 + 2 \cdot 637 + 0}{2 \cdot 0,0039} = 240 \text{ kA/m}$$

Z obr. 5-3 tomu při 120°C odpovídá indukce $0,8 \text{ T}$. Takže první odhad byl docela přesný, a proto není nutno volit druhý krok iterace.



Výpočet skutečné maximální indukce B_m :

Prvotní odhad byl $B_m = 0,9T$. Z předchozích výpočtů víme, že magnetické napětí v mezeře při dané indukci je: $F_z = 90Az$.

Úbytek magnetického napětí na vzduchové mezeře při dané indukci je:

$$F_v = \frac{B \cdot l_v}{\mu_0} = \frac{0,9 \cdot 0,001}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 716Az$$

Při výpočtu intenzity pole v magnetu dosadíme do následujícího vzorce výsledné reakční magnetické napětí F_{reakce} z opačným znaménkem.

$$H_m = \frac{F_{ROT} + F_{JHO} + 2 \cdot F_z + 2 \cdot F_v - F_{reakce}}{2 \cdot l_m} = \frac{2,3 + 405 + 2 \cdot 90 + 2 \cdot 716 - 1593}{2 \cdot 0,0039} = 55kA/m$$

Podle obr. 5-3 vychází intenzita B_m asi 1 až 1,05T. Při 120°C.

6.5 Výpočet hmotnosti rotoru a statoru

Rotor:

Hustota materiálu permanentních magnetů je prakticky stejná jako hustota železa. Jsou zanedbány mezery mezi magnety a je pohlíženo na sestavu magnetů + rotorové jho z hlediska hmotnosti jako na válcový prstenec o vnějším poloměru r , vnitřním poloměru $r - v_{rot}$ a délce l .

Pak objem tohoto prstence je:

$$V_{ROT} = \pi(r^2 - (r - v_{ROT})^2) \cdot l = \pi \cdot (0,02^2 - (0,02 - 0,01)^2) \cdot 0,03 = 2,8 \cdot 10^{-5} m^3$$

Hustota železa je $\rho_{Fe} = 7800kg/m^3$. Pak hmotnost rotorového prstence je:

$$m_{ROT} = V_{ROT} \cdot \rho_{Fe} = 7800 \cdot 2,8 \cdot 10^{-5} = 0,22kg$$

Hmotnost středové nosné části rotoru a hmotnost hřídele zde není uvažováno.

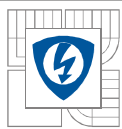
Železo statoru:

Objem prostoru všech drážek:

$$V_{dr} = S_{dr} \cdot l \cdot k = 2,96 \cdot 10^{-4} \cdot 0,03 \cdot 6 = 5,3 \cdot 10^{-5} m^3$$

Objem statorového jha:

$$V_{JHO} = \pi((r + l_v + c + v)^2 - (r + l_v + c)^2)l = \pi \cdot ((0,02 + 1 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3} + 5,2 \cdot 10^{-3})^2 -$$



$$(0,02 + 1 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 0,03 = 3,39 \cdot 10^{-5} m^3$$

Objem celého tělesa statoru od vnějšího obrysu po vzduchovou mezeru:

$$V_{ST} = \pi((r + l_v + c + v)^2 - (r + l_v)^2)l = \pi \cdot ((0,02 + 1 \cdot 10^{-3} + 11 \cdot 10^{-3} + 5,2 \cdot 10^{-3})^2 - (0,02 + 1 \cdot 10^{-3})^2) \cdot 0,03 = 8,89 \cdot 10^{-5} m^3$$

Objem železa statoru (při činiteli plnění plechových svazku rovno jedné).

$$V_{Fe} = V_{ST} - V_{dr} = 8,89 \cdot 10^{-5} - 5,3 \cdot 10^{-5} = 3,6 \cdot 10^{-5} m^3$$

Hmotnost železa statoru:

$$m_{Fe} = V_{Fe} \cdot \rho_{Fe} = 3,6 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 0,28 kg$$

Vinutí statoru:

Nejprve je třeba stanovit střední délku vinutí (jednoho závitu):

$$l_s = 2 \cdot (l + a + \frac{a}{2}) = 2 \cdot (0,03 + 0,011 + \frac{0,011}{2}) = 0,093 m$$

Objem celého vinutí je:

$$V_v = k \cdot N \cdot S_{Cu} \cdot l_s = 6 \cdot 22 \cdot 3,5 \cdot 10^{-6} \cdot 0,093 = 4,3 \cdot 10^{-5} m^3$$

Nyní již lze snadno stanovit hmotnost vinutí, při hustotě mědi $\rho_{Cu} = 8900 kg/m^3$.

$$m_v = \rho_{Cu} \cdot V_v = 8900 \cdot 4,3 \cdot 10^{-5} = 0,38 kg$$

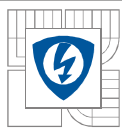
Celková hmotnost sestavy činí:

$$m_{celk} = m_v + m_{Fe} + m_{ROT} = 0,38 + 0,28 + 0,22 = 0,88 kg$$

6.6 Výpočet hlavních ztrát, účinnost stroje

Ohmické ztráty ve statoru:

Pro výpočet ztrát ve vinutí je použit následující vztah (vše musí být dosazeno v základních jednotkách):



$$P_{Cu} = V_v \cdot \rho_m \cdot \sigma^2 = 4,3 \cdot 10^{-5} \cdot 0,0178 \cdot 10^{-6} \cdot (8,5 \cdot 10^6)^2 = 51,6W$$

Hysterezní ztráty v železe statoru:

Je třeba určit zvlášť ztráty ve statorovém jhu a zvlášť v zubech, neboť v zubech je větší sycení. Nejdříve je tedy nutné stanovit hmotnost železa v zubech a ve jhu:

$$m_{JHO} = V_{JHO} \cdot \rho_{Fe} = 3,39 \cdot 10^{-5} \cdot 7800 = 0,26kg$$

Pak hmotnost zubů bude činit:

$$m_z = m_{Fe} - m_{JHO} = 0,28 - 0,26 = 0,02kg$$

Měrné hysterezní ztráty závisí na materiálu použitých plechů. Při návrhu je předpokládáno použití plechů s následujícími parametry:

tloušťka: 0,35mm

měrné hysterezní ztráty $p_h = 2,3W/kg$ (při $B_o = \pm 1T$ a $f_o = 100Hz$)

měrné vířivé ztráty $p_v = 2,2W/kg$ (při $B_o = \pm 1T$ a $f_o = 100Hz$)

Skutečný kmitočet magnetování f při jmenovitých otáčkách $n = 3000ot/min$ bude:

$$f = \frac{n}{60} \cdot \frac{m}{2} = \frac{3000}{60} \cdot \frac{4}{2} = 100Hz$$

Pro výpočet hysterezních ztrát jsou použity následující vztahy (při jmenovitých otáčkách):

$$P_{hJO} = p_h \cdot \frac{f}{f_0} \cdot \left(\frac{B_{JHO}}{B_0} \right)^2 \cdot m_{JHO} = 2,3 \cdot \frac{100}{100} \cdot \left(\frac{1,6}{1} \right)^2 \cdot 0,26 = 1,6W$$

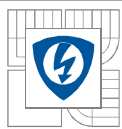
A hysterezní ztráty v zubech:

$$P_{hZ} = p_h \cdot \frac{f}{f_0} \cdot \left(\frac{B_z}{B_0} \right)^2 \cdot m_z = 2,3 \cdot \frac{100}{100} \cdot \left(\frac{2}{1} \right)^2 \cdot 0,02 = 0,22W$$

Vířivé ztráty v železe statoru:

$$P_{vJO} = p_v \cdot \left(\frac{f}{f_0} \right)^2 \cdot \left(\frac{B_{JHO}}{B_0} \right)^2 \cdot m_{JHO} = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{100} \right)^2 \cdot \left(\frac{1,6}{1} \right)^2 \cdot 0,26 = 1,5W$$

A vířivé ztráty v zubech:



$$P_{vZ} = p_v \cdot \left(\frac{f}{f_0}\right)^2 \cdot \left(\frac{B_z}{B_0}\right)^2 \cdot m_z = 2,2 \cdot \left(\frac{100}{100}\right)^2 \cdot \left(\frac{2}{1}\right)^2 \cdot 0,02 = 0,2W$$

Ostatní ztráty:

Vzhledem k velikosti stroje lze při jmenovitých otáčkách odhadnout velikost ostatních ztrát, skutečné ztráty ovšem závisí na konstrukčním řešení konkrétního stroje.

Ventilační ztráty a ztráty v ložiscích: $P_{vent} = 12W$

Vířivé ztráty způsobené rozptylovými toky ve stojících kovových částech stroje:
 $P_{roz} = 5W$

Přídavné vířivé ztráty v rotoru způsobené reluktančním zvlněním: $P_{vROT} = 10W$

Účinnost stroje:

Byla vypočtena účinnost stroje při jeho jmenovitých otáčkách a momentu.

Celkové ztráty ve stroji při jmenovitém výkonu činí:

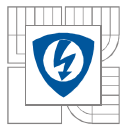
$$P_{TOT} = P_{Cu} + P_{hJHO} + P_{hZ} + P_{vJHO} + P_{vZ} + P_{vent} + P_{roz} + P_{vROT} = \\ 51,6 + 1,6 + 0,22 + 1,5 + 0,2 + 12 + 5 + 10 = 82,12W$$

Účinnost tedy bude:

$$\eta = \frac{P}{P + P_{TOT}} = \frac{600}{600 + 82,12} = 0,879 = 87,9\%$$

Tab. 6-1 Základní technické údaje o EC-motoru.

název	označení	jednotka	hodnota
Efektivní hodnota fázového proudu	I_{fef}	A	29,6
Průřez vodiče	S_{cu}	mm ²	3,5
Průřez drážky	S_{dr}	mm ²	296
Obdélníkový tvar zubu	a, b	mm	11
Úhel rozevření drážky	γ	°	60
Výška drážky	c	mm	11
Průměr vodiče	d	mm	2,1
počet závitů na solenoidu	N	-	22



7 VÝPOČETNÍ PROGRAM

7.1 Přiblížení výpočetního programu

Výpočetní program byl navrhován a vytvářen ve vývojovém software C++Builder. Je koncipován tak, že uživatel postupně zadává potřebné hodnoty v jednoduchých třech krocích a následně je vygenerován příslušný zdrojový kód a spuštěn program FEMM, ve kterém je simulace připravena na spuštění daného problému. Při zadávání hodnot jednotlivých veličin je třeba mít alespoň základní odhad či představu o dané problematice. Převážně předpokládané hodnoty magnetické indukce a rozměry stroje vzhledem k výkonu (momentu). Cílem vývoje tohoto programu byla jeho co možná největší univerzálnost pro návrh EC motorů. Tedy co možná nejširší možnosti návrhu a největší možnost volby při zadávání vstupních dat. Ať už různý výkon, otáčky, počet pólů, rozměry (diskový, válcový), ale také pólové krytí, proudová hustota, magnetická indukce, vzduchová mezera a další možnosti.

V prvním kroku při návrhu elektrického točivého stroje je zapotřebí znát konkrétní požadavky jako výkon popřípadě jmenovitý moment, otáčky, počet pólů. Dále v našem případě je zapotřebí vědět zda námi navrhovaný EC motor, chceme konstruovat jako diskový, válcový, nebo zvolit nějaký střed.

Dále je nutné znát proudovou hustotu ve vinutí. Ta se dost zásadně liší podle toho do jakých podmínek chceme daný EC motor použít. V rozsahu přibližně (2,5 až 20 A/mm²). Na proudovou hustotu mají vliv parametry jako: teplota okolního pracovního prostředí, trvalý nebo jen krátkodobý chod, častá reverzace apod. Od proudové hustoty se následně odvíjí potřebný prostor pro vinutí (drážky) a tím i rozměry stroje. Příklad ukázky vzorově vyplněných hodnot je znázorněn na *obr. 7-1*. Při zadávání napětí na výstupu měniče je nutno odhadnout jeho hodnotu, protože musíme brát v potaz úbytky napětí na polovodičových součástkách, vodičích apod.

Výpočet EC motoru

Soubor Materiály O programu

Zadané hodnoty

Výkon 600 W

Otáčky 3000 ot/min

Počet pólů 4 -

Poloměr rotoru 20 mm

Délka stat. svazku 30 mm

Pólové krytí rotoru 120 °

Nap. na výst. z měniče 20 V

Proudová hustota 8,5 A/mm²

Dále >> KONEC

Obr. 7-1 První okno pro zadávání hodnot.

V druhém kroku je třeba zadat údaje týkající se magnetického obvodu a jeho rozměrů. Jedná se o předpokládané hodnoty magnetické indukce ve vzduchové mezeře, zubu, rotorovém a statorovém jhu. Tyto hodnoty se odvíjí mimo jiné od druhu (typu) permanentního magnetu, především toho jakou má schopnost permanentní magnet vyvinout indukci. Při volbě indukce ve statorovém a rotorovém obvodu volíme její velikost v závislosti na konkrétním materiálu či frekvenci spínání (otáčení). Magnetický obvod musí být optimálně využit. Tedy nesmí být podstatně předimenzovaný. Z důvodu nárustu rozměrů a hmotnosti stroje, ale také nesmí být poddimenzovaný. Při poddimenzování magnetického obvodu sice dochází ke zmenšení rozměrů a hmotnosti stroje, ale také dochází k přesycování materiálu. Při přesycování dochází k tomu, že materiál se dostává za „koleno“ magnetizační křivky. Jinými slovy při podstatném vzrůstu intenzity magnetického pole se tato indukce již podstatně nezvyšuje. Tímto dochází k nárustu délky magnetů, rozptylových toků a proto tento stav také není optimální. Poslední parametr, který umožňuje zmenšení rozměrů stroje je činitel plnění vinutí. Čím je toto číslo vyšší je vyšší poměr vinutí v drážce na úkor vzduchových mezer. Tento parametr lze pozitivně ovlivnit vhodným vinutím (tvaru průřezu vodiče) a optimálním využitím prostoru pro vinutí.

Výpočet EC motoru

Soubor Materiály O programu

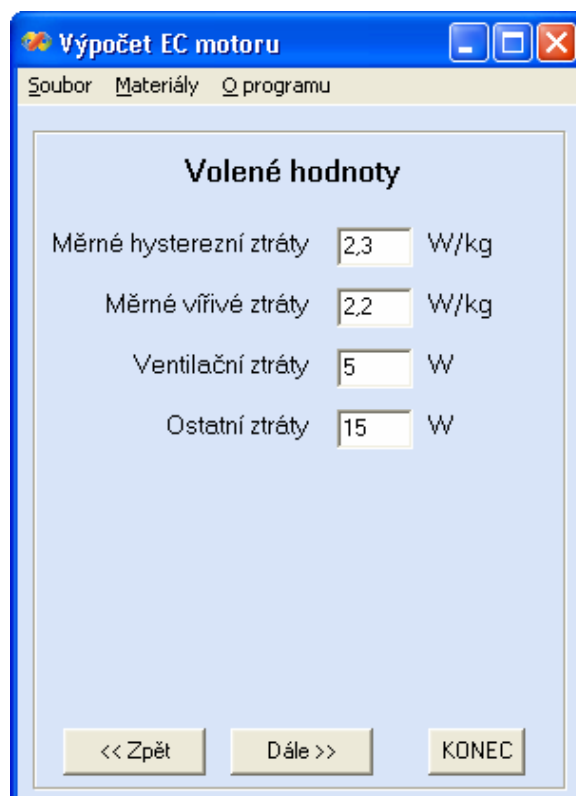
Předpokládané hodnoty

Tloušťka rot. jha	10	mm
Vzduchová mezera	1	mm
Činitel plnění vinutí	0,52	-
Předpokl. B v mezeře	0,8	T
Max. indukce	0,9	T
Min. indukce	0,6	T
Indukce v stat. jhu	1,6	T

<< Zpět Dále >> KONEC

Obr. 7-2 Druhé okno pro zadávání hodnot.

Ve třetím kroku je třeba zadat hodnoty o ztrátách. Tyto jsou nutné pro výpočet účinnosti EC mototu. Měrné hysterezní a vířivé ztráty jsou závislé na použitém materiálu magnetického obvodu. Je to výkon, který se ztrácí v jednom kilogramu materiálu při určité vztažené frekvenci, v našem případě je to 100Hz. Hysterezní ztráty se mění lineárně se vzrůstající frekvencí v magnetickém obvodu, zatímco vířivé se mění kvadraticky (s druhou mocninou) vzrůstající frekvence. Další ztráty, které nesmíme ve výpočtu opomenout jsou ztráty ventilační, způsobené cirkulací vzduchu a přítomnosti vzduchu ve vzduchové mezeře. V neposlední řadě je zapotřebí vzít v potaz ostatní ztráty reprezentující odpor v ložiscích, apod.



Výpočet EC motoru

Soubor Materiály O programu

Volené hodnoty

Měrné hysterezní ztráty 2,3 W/kg

Měrné vířivé ztráty 2,2 W/kg

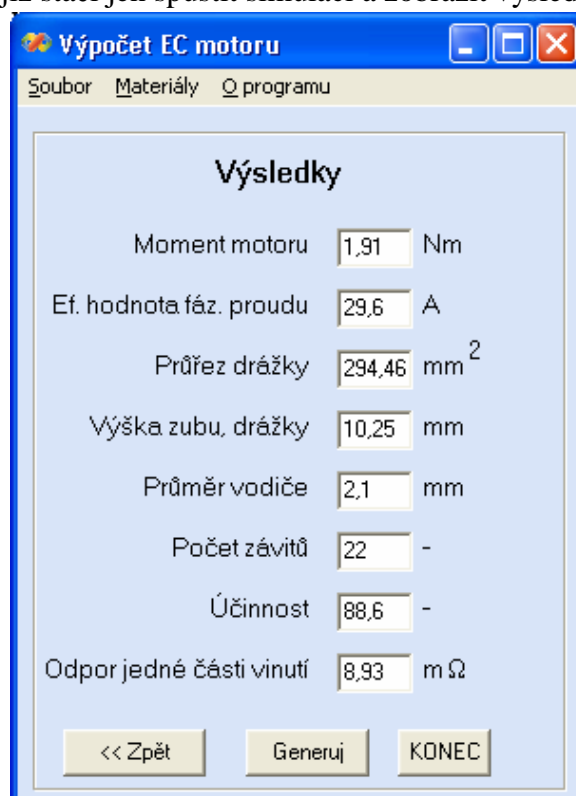
Ventilační ztráty 5 W

Ostatní ztráty 15 W

<< Zpět Dále >> KONEC

Obr. 7-3 Třetí okno pro zadávání hodnot.

V posledním kroku se zobrazí nejdůležitější vypočtené hodnoty. Pakliže je konstruktér s těmito hodnotami spokojen je po stisknutí tlačítka *generuj* vygenerován zdrojový kód *.FEM pro program FEMM a také automaticky spuštěn tento program ve kterém je zobrazen model EC motoru. Pak již stačí jen spustit simulaci a zobrazit výsledky.



Výpočet EC motoru

Soubor Materiály O programu

Výsledky

Moment motoru 1,91 Nm

Ef. hodnota fáz. proudu 29,6 A

Průřez drážky 294,46 mm²

Výška zubu, drážky 10,25 mm

Průměr vodiče 2,1 mm

Počet závitů 22 -

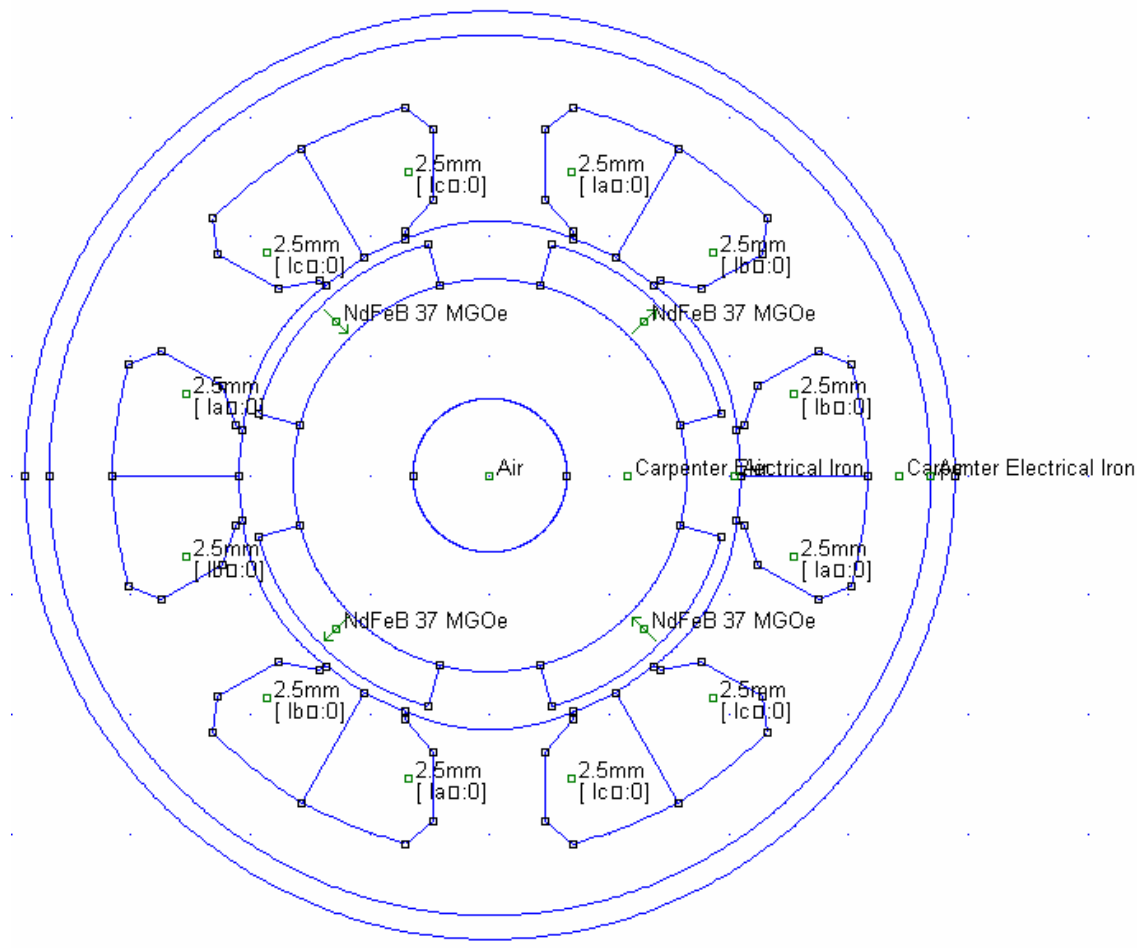
Účinnost 88,6 -

Odpor jedné části vinutí 8,93 mΩ

<< Zpět Generuj KONEC

Obr. 7-4 Zobrazení hlavních výsledků.

Vygenerovaný zdrojový kód obsahuje model (řez) statoru s vinutím a rotoru viz. Obr.7-5. Dále model obsahuje vedle geometrických rozměrů i informace a data o příslušných materiálech jako je magnetický obvod, vinutí, vzduchová mezera či údaje o permanentních magnetech včetně jejich orientace.



Obr. 7-5 Vygenerovaný model EC motoru těsně před spuštěním simulace.

7.2 Simulace magnetického obvodu

Pro výpočet fyzikálních polí existuje v současnosti řada velmi kvalitních programů. Většina z nich pochází z komerční oblasti např. ANSYS, Matlab (finančně velmi nákladné). Najdou se však i jiné sharewarové či freewarové programy běžně dostupné na internetu, které sice nemají takové široké možnosti jako předchozí, ale pro řešení našeho problému však plně vyhovují. Jedním z těchto programů je také program FEMM, který bude použit pro naši simulaci [3].

7.3 Seznámení s řešením v programu FEMM

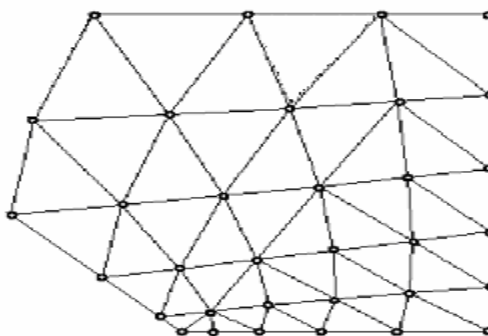
Reálná magnetická pole inženýrské praxe se počítají, stejně jako pole elektrická, numerickými metodami. Podobnost diferenciálních rovnic s rovnicí elektrostatiky umožňuje použít tytéž metody. Prakticky se používají metody konečných prvků a konečných diferencí, které lze modifikovat i pro výpočet nelineárních polí. Na těchto metodách pracuje i program FEMM [3].

Metoda konečných prvků

Již řadu let představují numerické metody přední výpočetní nástroj. Zpočátku nezajímavá metoda konečných prvků (MKP) se dnes díky rozvoji výpočetní techniky stala jedním z hlavních výpočetních prostředků nejen ve strojírenství, pro kterou byla prvotně určena, ale i ve všech oblastech elektrotechnického průmyslu. Hlavní přednost MKP spočívá v grafické interpretaci často velmi abstraktních fyzikálních polí, ve kterých klasická technika řešení zavádí mnohdy značná zjednodušení na úkor přesnosti. Podstatou metody konečných prvků je rozdělit problém na velké množství regionů, kde se počítají pole, uzly a uzlové potenciály. Uzly však mohou být rozloženy v oblasti nerovnoměrně a mohou tak sledovat tvar hraničních ploch. V místech, kde se očekává prudká změna pole, se zavede vyšší hustota sítě [3].

Výhodou rozdělení oblasti na velké množství malých částí je, že z malého, ale obtížného problému, se stane problém relativně velký, ale lehce řešitelný. Procesem rozdělení je, tento problém lineární algebry, formován desetitisíci neznámými. Avšak existují algoritmy, které umožňují tento problém lineární algebry vyřešit navíc v krátkém čase [3].

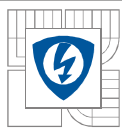
Konkrétně, FEMM rozděluje oblast s použitím trojúhelníkových dvojic. Řešení každého z těchto prvků je přibližně vypočítáno lineární interpolací hodnot kapacit ve třech vrcholech trojúhelníku. Problém lineární algebry je formován minimalizací rozsahu chyb mezi přesnou diferenciální rovnicí a předpokládanou diferenciální rovnicí napsanou v jednotkách pokusné (zkušební) funkce [3].



Obr. 7-6 Příklad sítě použité v metodě konečných prvků [1].

Některé body při aplikaci MKP:

1. Generace sítě prvků s uzly
2. Aproximace potenciálu na jednotlivých prvcích z uzlových hodnot
3. Dosazení zvolené aproximace do diferenciální rovnice nebo jejího ekvivalentu a sestavení soustavy rovnic pro neznámé uzlové hodnoty.
4. Vyřešení soustavy.
5. Zobrazení výsledků.



7.4 Popis programu FEMM 4.0.1

FEMM je soubor programů pro řešení nízkofrekvenčních a statických elektromagnetických problémů ve 2D.

Program současně oslovuje lineární a nelineární magnetostatické problémy, lineární a nelineární časově harmonické magnetické problémy a lineární elektrostatické problémy.

FEMM lze rozdělit do tří částí:

a) Interaktivní obal (FEMM.exe). Tento program je mnohačetné dokumentové před- a post-procesní rozhraní určené pro rozličné typy problémů řešených FEMMem. Obsahuje CAD což je program pro geometrické rozvržení problému a určení vlastností materiálu a hraničních podmínek. Pro usnadnění analýzy existujících geometrií je možné do programu importovat soubory AutoCad ve formátu dxf.

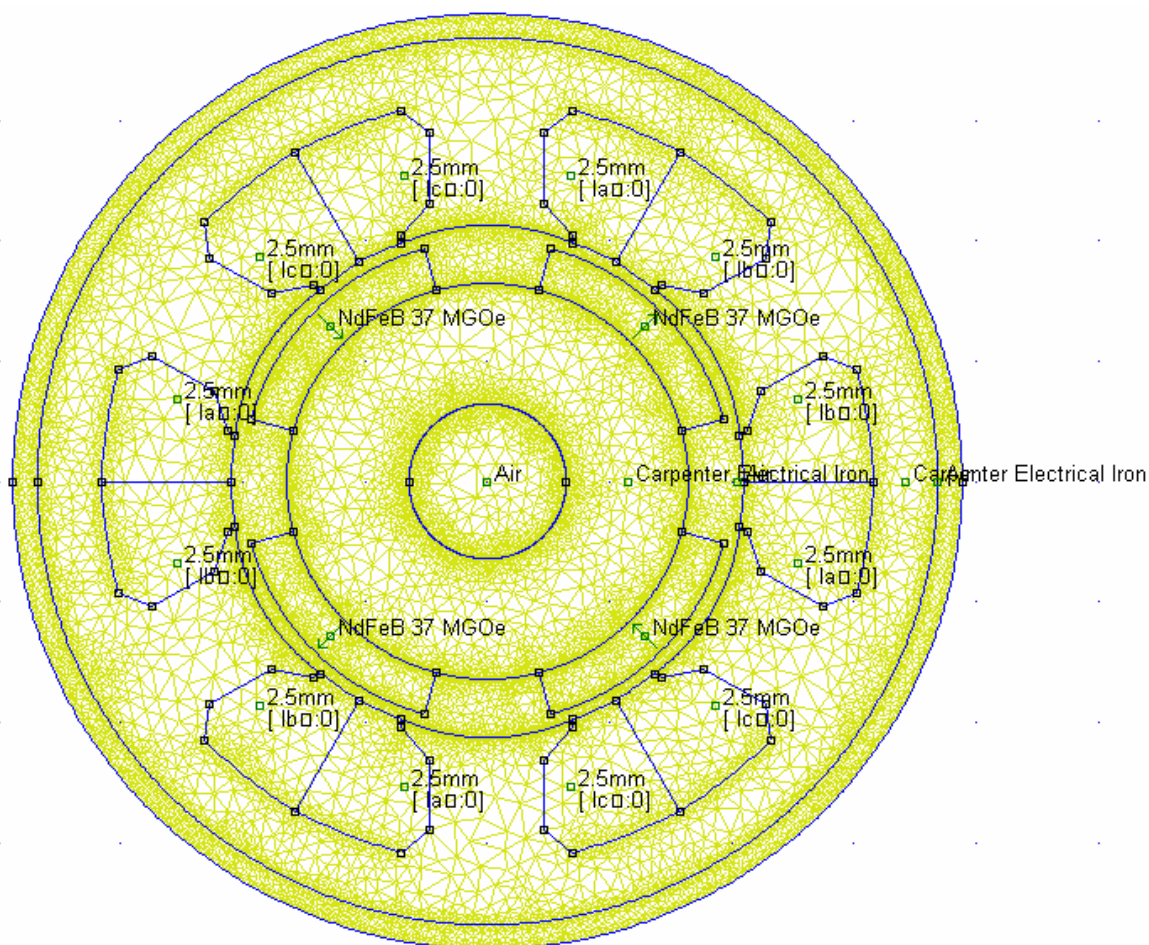
Výsledky magnetického pole mohou být znázorněny ve formě obrysových schémat a schémat hustoty. Program také uživateli umožňuje kontrolovat pole v libovolných fázích, stejně jako umožňuje i vyhodnotit počet různých integrálů a naplánovat množství aplikací v mezích daných uživatelem.

b) Triangle (triangle.exe) rozkládá oblast řešení do velkého množství trojúhelníků, podstatné části finálního procesu prvků (tzv. „vymešování“) viz *obr. 7-7*.

c) Solvers (fkern.exe) každý řešitel si vezme soubor dat, které popisují a řeší příslušnou Maxwellovu rovnici, aby získal hodnoty pro požadované pole ve všech oblastech řešeného problému.

Po vymešování modelu je zavolán program fkern.exe, který provede analýzu a výpočet. Doba výpočtu závisí na složitosti modelu a hlavně na hustotě vytvořené sítě. Nejpřesnější výpočet je určitý kompromis mezi velkým a malým počtem trojúhelníků. Při malém počtu trojúhelníků vzniká chyba výpočtu tím, že je velice hrubě rozdělen model a určité části, kde například dochází k přesycování. Mohou být opomenuty nebo jejich výpočet může být velice zkreslen. Zatímco při velkém počtu trojúhelníků dochází k zaokrouhlovacím chybám při postupném řešení výpočtů. Nehledě na fakt, že doba výpočtu je velice dlouhá.

Po proběhnutí programu je výpočet hotov. Poslední fáze spočívá v zobrazení výsledků, viz *obr. 7-10 až 7-15*.



Obr. 7-7 Vymešovaný model statoru + rotoru s magnety.

Výpočet EC motoru

Soubor Materiály O programu

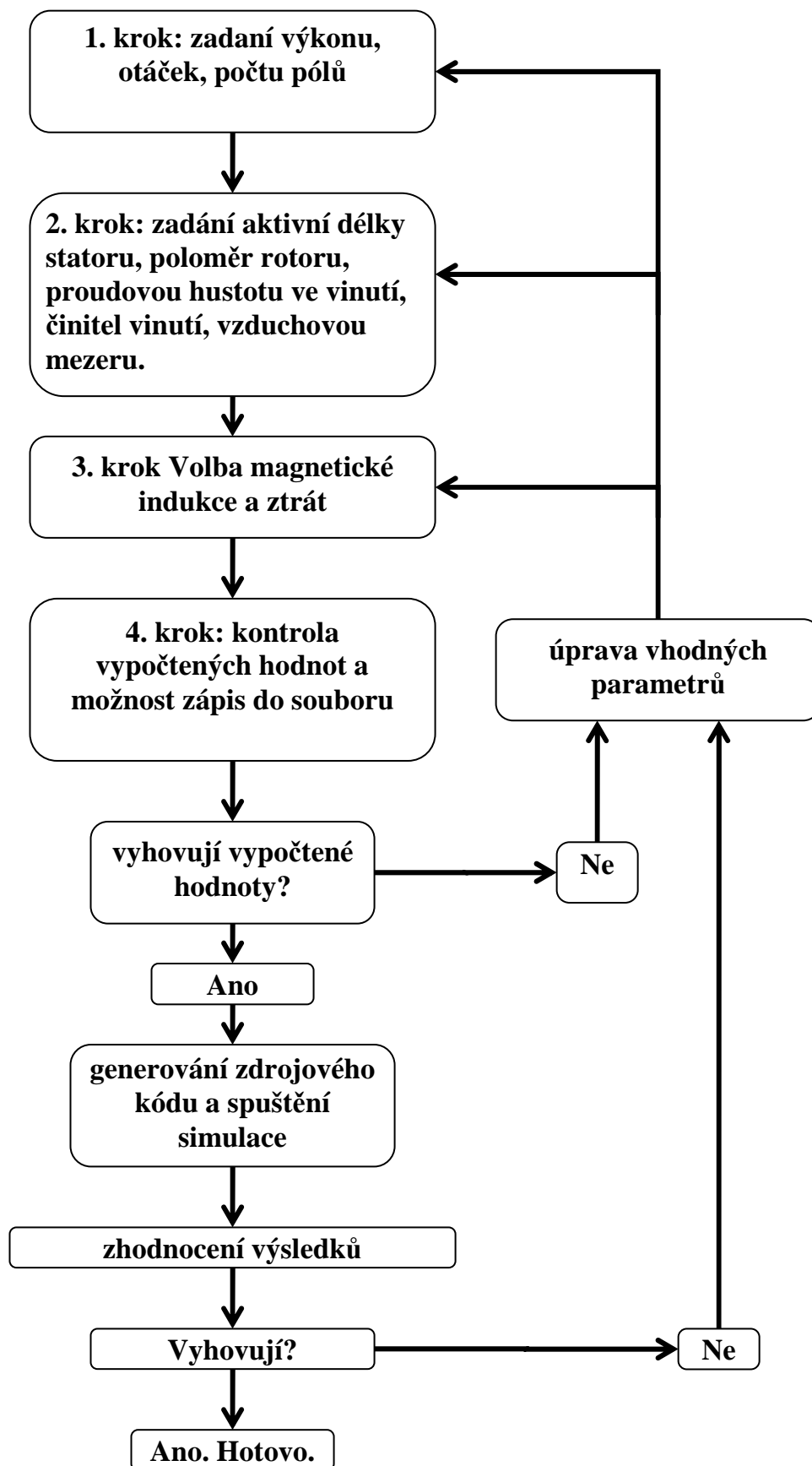
Ulož
Zadej soubor .FEM
Konec

Výsledky

Moment motoru	1,91	Nm
Ef. hodnota fáz. proudu	29,6	A
Průřez drážky	294,46	mm ²
Šířka zubu	9,35	mm
Výška zubu, drážky	10,62	mm
Průměr vodiče	2,1	mm
Počet závitů	22	-
Účinnost	88,7	-

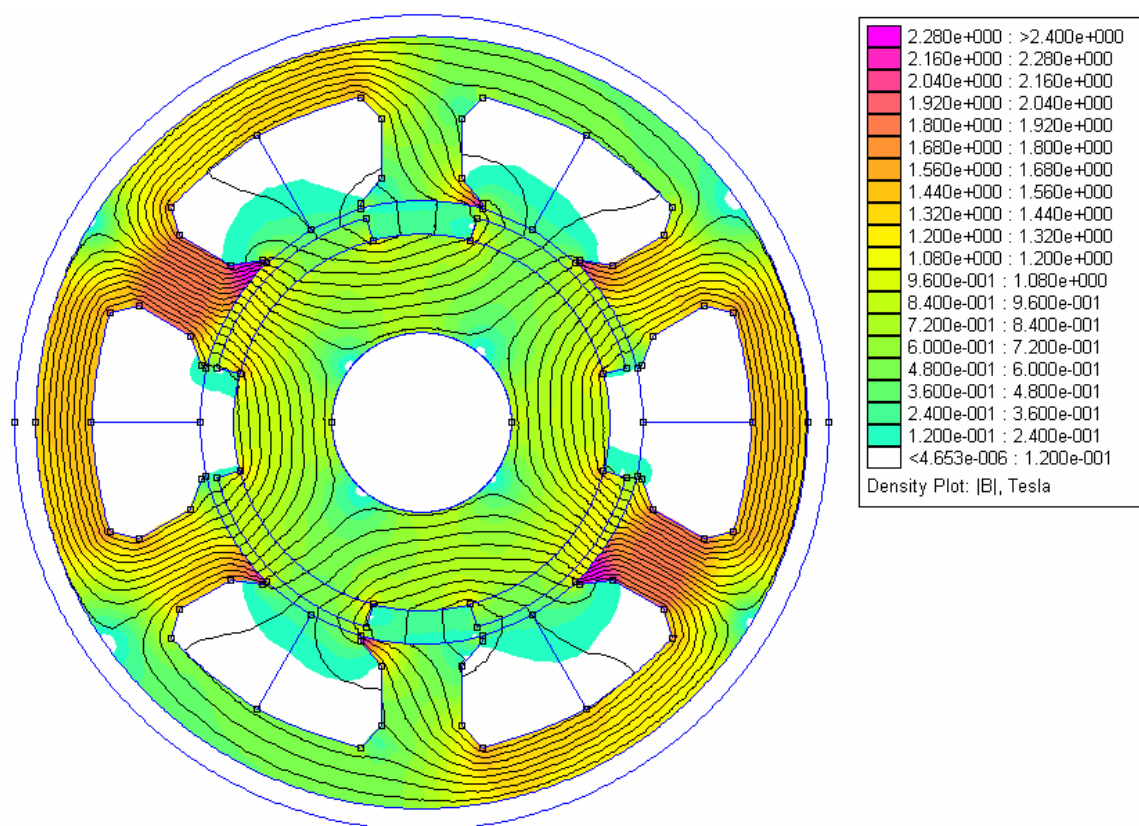
<< Zpět Generuj KONEC

Obr. 7-8 Ukázka možnosti uložení výsledků do souboru.

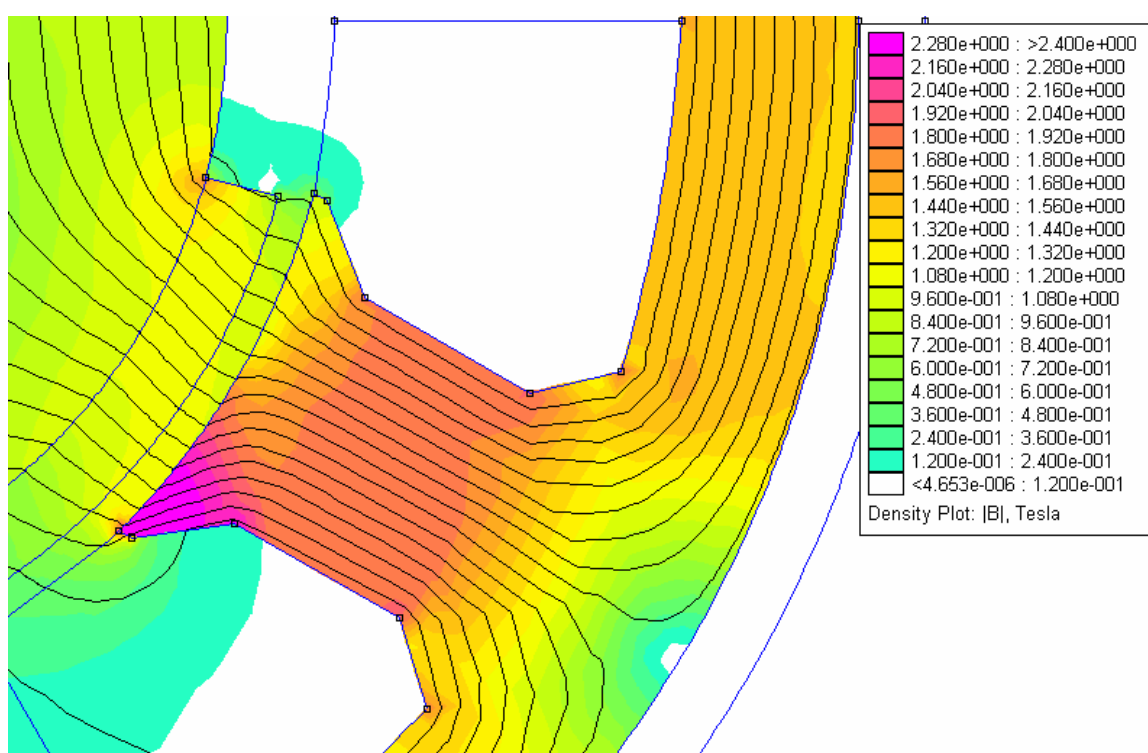


Obr. 7-9 Vývojový diagram (postup při navrhování EC motoru).

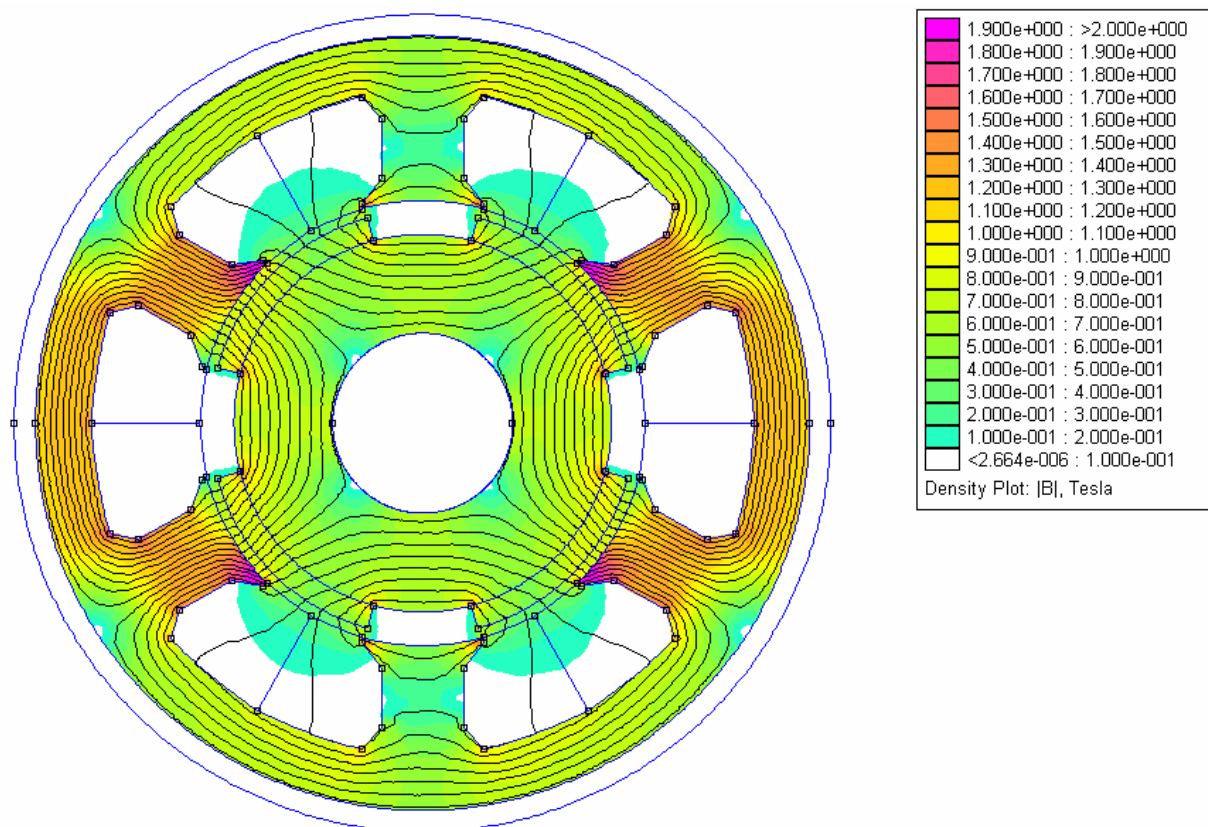
7.5 Výsledky simulace



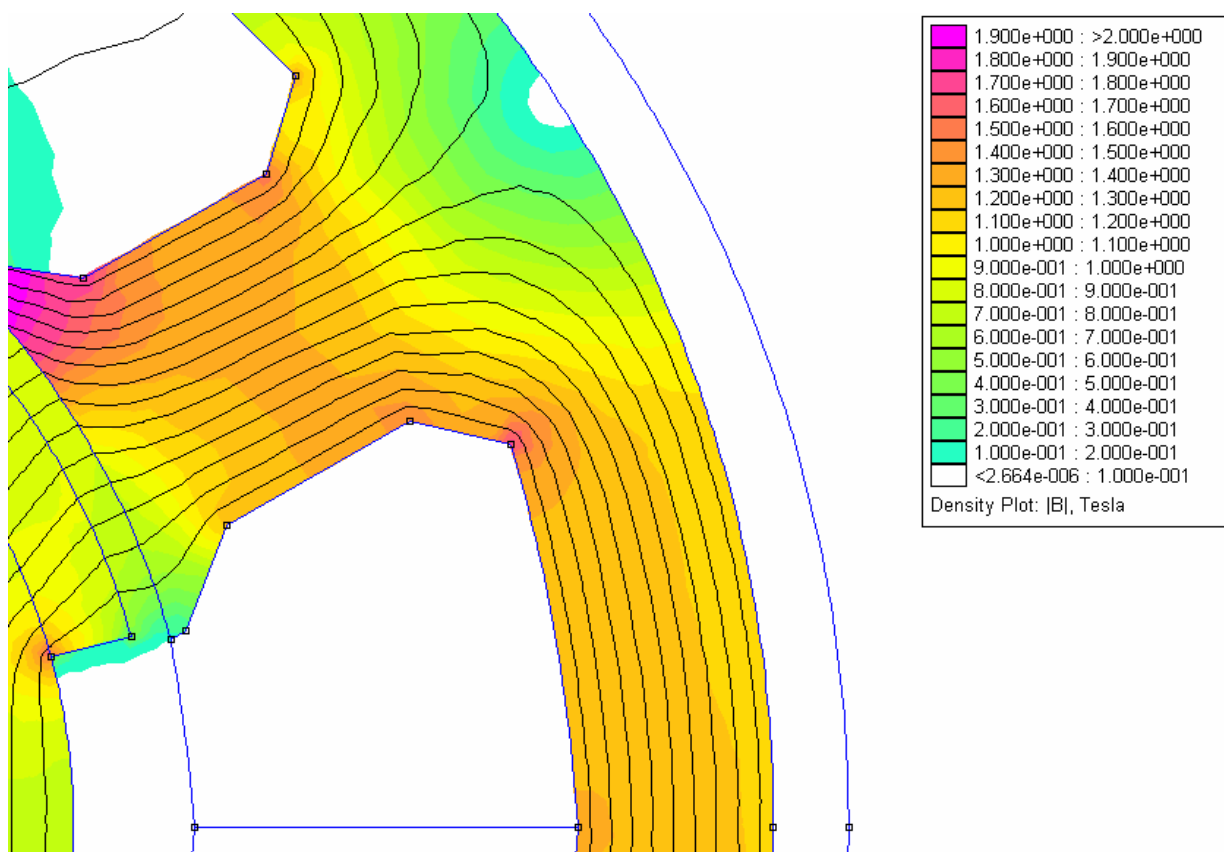
Obr. 7-10 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru (celkový pohled).



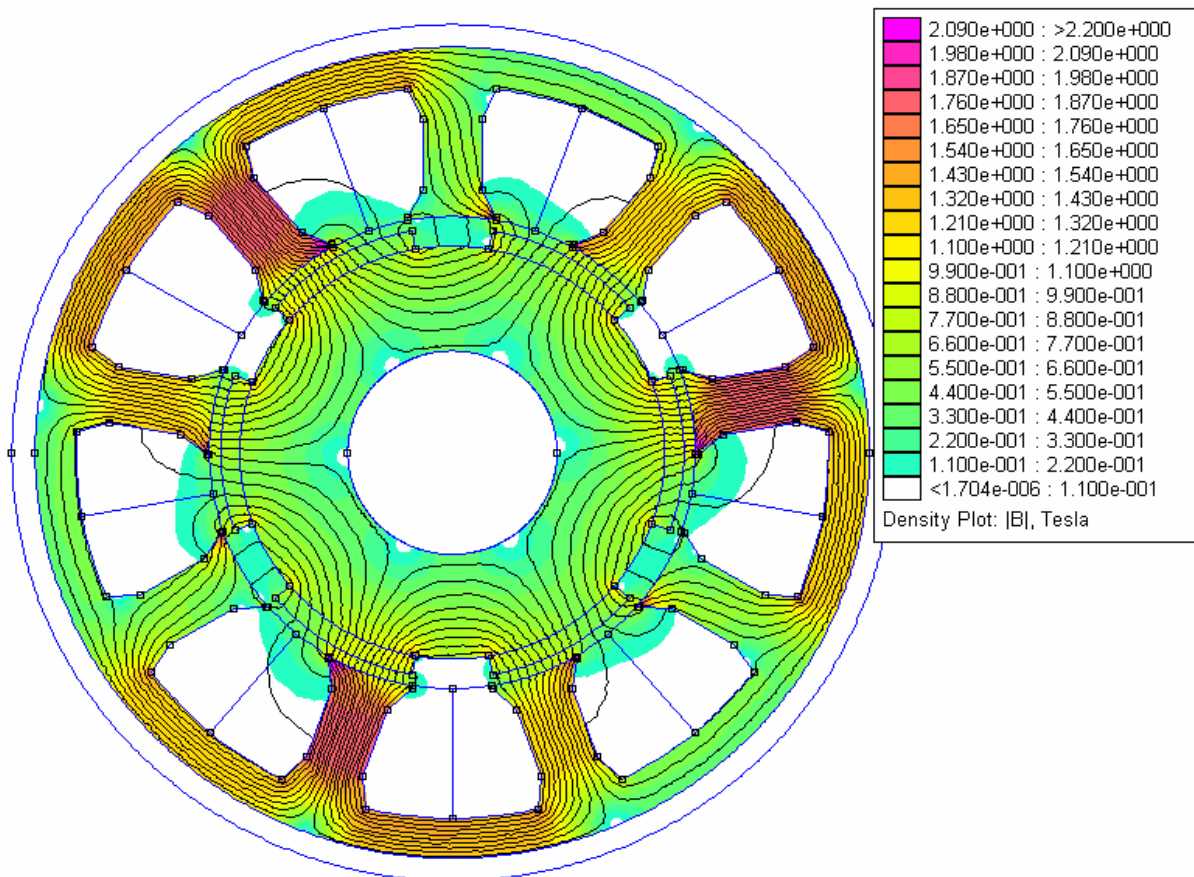
Obr. 7-11 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře.



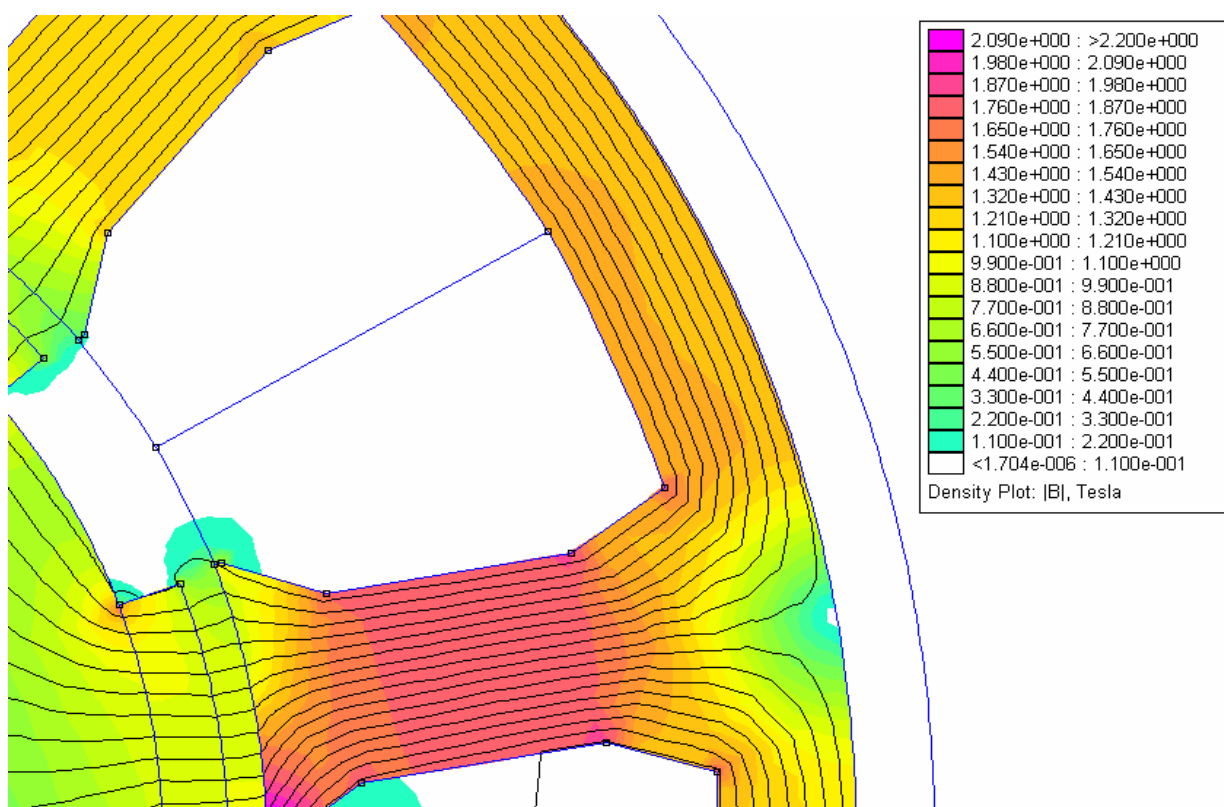
Obr. 7-12 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru, bez zátěže (celkový pohled).



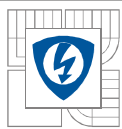
Obr. 7-13 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře, bez zátěže.



Obr. 7-14 Hustota magnetického toku řešeného EC-motoru, šestipólové provedení (celkový pohled)



Obr. 7-15 Detail indukce v zubu, statorovém jhu a vzduchové mezeře u šestipólového provedení.



7.6 Zhodnocení simulace

Simulace vytvořeného konečně-prvkového modelu je jedna z možností jak ověřit správnost matematického výpočtu a návrhu elektrického stroje. Jsou zde zobrazené simulace při jmenovitém zatížení, *obr. 7-10* a *obr. 7-11*. Simulace magnetického obvodu bez zatížení *obr. 7-12* a *obr. 7-13*. A simulace téhož EC motoru, ale v šestipólovém provedení *obr. 7-14* a *obr. 7-15*.

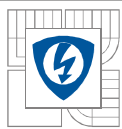
Na *obr. 7-11* je navrhovaný EC motor při plném (jmenovitém) zatížení. Vinutím protéká jmenovitý proud. Ze simulace je zřejmé, že vypočtené a odhadnuté hodnoty magnetické indukce v zubu 1,8T a ve vzduchové mezeře 0,8T se téměř neliší od hodnot vypočtených metodou konečných prvků. Taktéž hodnoty magnetické indukce ve statorovém jhu 1,6T jsou přesně dle odhadu. Z toho lze jednoznačně usoudit, že prvotní odhad byl správný a simulace nám potvrdila naše výpočty z předchozí kapitoly. Největší přesycení se nachází těsně kolem „rožků“ zubů. Magnetická indukce zde dosahuje hodnoty 2,4T, toto přesycení je dáno vzájemnou polohou zubů a magnetů. Tato chyba je způsobena tím, že „rožky“ zubů nejsou zcela optimálně navrženy. A také tím, že ve skutečnosti na oblouku magnetu není jeho pól orientován konkrétním směrem, ale plynule se mění v každém elementu oblouku. Tento jev se nejvíce projevuje u dvoupólového EC motoru. Naopak u více pólového motoru např. 12-ti pólového se vlivem malého zakřivení téměř neprojevív.

Při příliš vysoké indukci by docházelo k přesycování materiálu a EC motor by vykazoval velké ztráty, tím by podstatně klesala jeho účinnost. Naopak při malé indukci by nebyl materiál zcela využit. Sice by byly minimální ztráty, ale motor by byl rozměrný a podstatně dražší na výrobu. Také by se to projevilo na jeho velké hmotnosti.

Následující *obr. 7-12* a *obr. 7-13* ukazují nezatížený EC motor, tj. vinutím protéká jen minimální proud. Z těchto obrázků je vidět, že indukce nedosahuje takových hodnot jako při zatížení. Intuitivně lze tento jev chápat tak, že se zde nevytváří taková energie (výkon, magnetická indukce), jako při zatíženém stavu. Magnetický tok a indukci zde vytvářejí pouze permanentní magnety.

V poslední dvojici *obr. 7-14* a *obr. 7-15* bylo cílem dokázat, že výpočetní program je navržen univerzálně pro co možná největší spektrum EC motorů. Je zde tedy demonstrován EC motor v šestipólovém provedení. Je zřejmé, že odsimulované hodnoty magnetické indukce platí i pro jiné než naše konkrétní zadání. Zkusmo bylo ověřeno, že výpočty a simulace souhlasí i u jiných provedení, v diskovém, nebo válcovém provedení, různých výkonů či počtu pólů.

Je třeba zdůraznit, že potřebné návrhy a jejich simulace jsou pouze orientační!!! Při případné konstrukci je třeba detailnější, hlubší rozbor a simulace ve 3D například v programu ANSYS.



8 ZÁVĚR

Tato práce je věnována problematice elektronicky komutovaných motorů, jejich vlastností, popisu jednotlivých druhů, vhodnosti jejich aplikace a použití. V úvodu je čtenář seznámen s historií EC motoru a hlavním důvodem jeho vzniku.

Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. V teoretické části je pojednáváno o různých typech konstrukce statorového magnetického i elektrického obvodu. V praktické části je řešen návrh a výpočet konkrétního EC motoru s využitím permanentních magnetů typu NdFeB.

V první kapitole je věnována pozornost veličinám a jednotkám popisující magnetické vlastnosti materiálů. Jejich jednotky a základní vztahy platící mezi nimi. Je zde také popsán vliv teploty na permanentní magnety a jejich optimální pracovní oblast.

Ve třetí a čtvrté kapitole je popisován EC motor, jeho vznik a nahrazení synchronního stroje, princip funkce a nezbytné součásti. Popis rozložení vinutí typu jedna drážka na pól a fázi, dvě drážky na pól a fázi a motor s tzv. segmentovým (tzv. solenoidovým) statorem, kterému je v práci věnována největší pozornost a soustředí se na něj návrh a výpočet. Jejich porovnání, výhody, nevýhody a znázornění průběhů reakčního magnetického napětí.

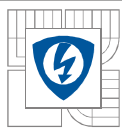
V následující kapitole jsou popsány materiály pro konstrukci a výpočet magnetického obvodu (permanentní magnety a plechy). Též zde jsou zobrazeny nezbytné charakteristiky pro konstrukci, jako je magnetizační charakteristika a hysterezní křivka zvoleného permanentního magnetu.

Praktická část je věnována návrhu a simulaci magnetického a elektrického obvodu EC motoru. Pro tuto část byl vytvořen software ve vývojovém prostředí C++ Builder, pomocí něhož jsou prováděny návrhy a výpočty. Hlavním cílem vyvíjeného software byla jeho co největší univerzálnost, pro nejširší možné spektrum navrhovaných EC motorů. Pro názornou ukázkou je zde proveden výpočet a simulace i pro jiný motor, než je v zadání.

Návrh a výpočet EC motoru je členěn do několika podkapitol, jež se zajímají o různé součásti motoru. V některých případech je třeba volit určitý kompromis např. výškou zubu, průřezem vinutí, proudovou hustotou či délkou stroje. Výpočet je převážně zaměřen na elektrický a magnetický obvod, který zde plní základní funkci. Při výpočtu nejsou uvažována ložiska, ložiskové štíty, apod.

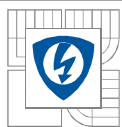
Simulace magnetického obvodu je prováděna v programu FEMM 4.0.1, který se používá pro simulování elektrických a magnetických polí. Ze simulace vyplývá, že vypočtené a odsimulované hodnoty magnetického obvodu se od sebe téměř neliší. Na základě toho můžeme usuzovat, že je výpočet správný, což je patrné z obrázků v kapitole 7.

Práce může posloužit jako podklad pro návrh vlastního EC motoru nebo jen pro seznámení s touto problematikou.



SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Vorel, P.: Synchronní stroje s permanentními magnety. Brno: Akademické Nakladatelství CERM 2005
- [2] Keller, K.: Mikropohony s EC motory. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007
- [3] Chloupek, K.: Moderní permanentní magnety pro použití v EC stroji. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2007
- [4] [Http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf](http://www.sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf) [online]. 2007 [cit. 2008-02-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.sinomag.cz>>.
- [5] [Http://www.vacuumschmelze.de](http://www.vacuumschmelze.de) [online]. 2008 [cit. 2008-12-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.vacuumschmelze.de>>.
- [6] Henry-Baudot, J.: Elektrické stroje pro automatizaci. Praha: SNTL, 1971
- [7] Gieras, Jacek F, Wing, Mitchell. *Permanent magnet motor technology*. New York : Marcel Dekker, cop., 2002. 590 s. ISBN 0-8247-0739-7.
- [8] KOLÁČNÝ, Josef. *Elektrické mikropohony.*, 2007. 173 s. Dostupný z WWW: <<http://www.feec.vutbr.cz/et/>>.
- [9] [Abcmagnet.cz](http://www.abcmagnet.cz) [online]. [2003] [cit. 2009-03-20]. Dostupný z WWW: <<http://www.abcmagnet.cz/>>.
- [10] [Http://www.supermagnete.de](http://www.supermagnete.de) [online]. [cit. 2009-05-19]. Dostupný z WWW: <<http://www.supermagnete.de/cze/Q-51-51-25-N>>.



PŘÍLOHY

Tab. 1 Technické informace o permanentních magnetech. Jednotky magnetických veličin. Pro magnetické veličiny jsou od června 1970 zákonem předepsány jednotky SI.

Označení	Jednotka SI	Jednotka CGS	
B magnetická indukce	T tesla	G (gauss)	<p>$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ VS/cm}^2$ $1 \text{ T} = 10\,000 \text{ G}$ $1 \text{ mT} = 10 \text{ G}$</p> <p>T = Tesla G = Gauss mT = milliTesla $10^{-4} \text{ VS/cm}^2 = \text{Voltsekunda/cm}^2$</p>
H intenzita magnetického pole	A/m ampér/metr	Oe (oersted)	<p>$100 \text{ kA/m} \times (4 \times \pi) = 1256,6 \text{ Oe}$</p> <p>kA/m = kiloAmper/metr A/cm = Amper/centimetr A/m = Amper/metr Oe = Oersted</p>
B.H maximální energetický součin	J/m ³ joule/m ³	G . Oe (gauss . oersted)	<p>$100 \text{ kA/m} \times \left(\frac{4 \times \pi}{100}\right) = 1,256 \times 10^6 \text{ G} \times \text{Oe}$ $1 \times 10^6 \text{ G} \times \text{Oe} = 7,96 \text{ kJ/m}^3$</p> <p>KJ/m² = KiloJoule/metr² $10^6 \text{ G} \times \text{Oe} = \text{Gauss} \times \text{Oersted}$ mWS/cm³ = miliVoltsekunda/cm³</p>
Φ magnetický tok	Wb Vs weber voltsekunda	M (maxwell)	<p>$1 \text{ Wb} = 1 \text{ VS} = 10^8 \text{ M}$</p> <p>Wb = Weber M = Maxwell mWb = miliWeber</p>
$\mu_0 \cdot \mu_p$ μ_p permanentní permabilita	T A/m tesla ampér/metr	G Oe gauss oersted	<p>$\mu_0 = 1,256$</p>