ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A ELEKTROMECHANIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Využití simulačního programu ANSYS pro analýzu magnetického pole palivové pumpy

Radek Lukáš **2015**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: **2014/2015**

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení:	**Bc. Radek LUKÁŠ**
Osobní číslo:	**E12N0161P**
Studijní program:	**N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor:	**Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu:	**Využití simulačního programu ANSYS pro analýzu magnetického pole palivové pumpy**
Zadávající katedra:	**Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte literární rešerši používaných motorů palivových pump.
2. Popište základní vlastnosti a charakter magnetického pole stejnosměrného motoru.
3. Proveďte výpočet elektromagnetického pole reálného vzorku stejnosměrného motoru pomocí MKP softwaru ANSYS.
4. Proveďte základní rozměrovou optimalizaci stejnosměrného stroje s ohledem na sycení a hmotnost magnetického obvodu.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Vladimír Kindl, Ph.D.**
Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**

Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan

L.S.

Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2013

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na tvorbu modelu magnetického a teplotního pole stejnosměrného motoru. Jedná se o stejnosměrný motor s permanentními magnety, který je požíván pro palivové pumpy. Příliš tenká tloušťka statorového jha má za následek přesycení magnetického obvodu. Dále zde byl vytvořen matematický model magnetického a teplotního pole. V praktické části je popsán postup tvorby modelu v simulačním programu ANSYS. Výstupní data ze simulace jsou dále použita pro optimalizaci magnetického obvodu DC motoru.

Klíčová slova

Magnetická indukce, magnetický indukční tok, ANSYS, DC motor s permanentními magnety, DC motor, matematický model magnetického pole DC motoru, matematický model teplotního pole DC motoru, palivová pumpa

Abstract

Diploma thesis is focused on creating model of magnetic and thermal field DC motor. This DC motor with permanent magnets is used for fuel pump. Width of stator causes oversaturation of magnetic circuit. Next was derived mathematical model of magnetic and thermal field. In practical part was described creating model in simulation software ANSYS. Output data are used for optimization of magnetic circuits.

Key words

Magnetic flux density, Magnetic flux, ANSYS, DC motor, DC motor with permanent magnets, mathematical model, magnetic field, thermal field, fuel pump

Prohlášení

Prohlašuji, že danou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 11.5.2015 Radek Lukáš

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Vladimíru Kindlovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych rád poděkoval společnosti Robert Bosch spol. s.r.o. za poskytnutí licence simulačního softwaru ANSYS, vybavení a vzorků potřebných pro vypracování diplomové práce.

Obsah

Seznam symbolů a zkratek....10
Úvod....11
1. Rešerše motorů palivových pump....12
1.1 DC motor....12
1.1.1. Princip a použití DC motoru pro palivová čerpadla....12
1.1.2. Princip komutace DC motoru....15
1.2 BLDC motor....18
1.2.1 Řízení BLDC motoru six step komutací....19
1.2.2 Bezsenzorové řízení BLDC motoru....19
2. Teoretický základ analýzy magnetického a teplotního pole....20
2.1 MKP....21
2.1.1 Princip metody konečných prvků....21
2.1.2 Chyby metody konečných prvků....22
2.2 Magnetického pole DC motoru....22
2.3 Teplotního pole DC motoru....24
2.4 Okrajové podmínky....25
2.4.1 Dirichletova okrajová podmínka....25
2.4.2 Neumannova okrajová podmínka....26
3. Tvorba a výpočet matematického modelu....27
3.1 Vstupní data pro simulaci....27
3.2 Síť....29
3.3 Aplikace okrajových podmínek a napájení....30
3.4 Řešení 2D úlohy v softwaru Femm....30
3.5 Řešení 3D úlohy v software ANSYS....32
3.5.1 Magnetická analýza DC motoru....32
3.5.2 Teplotní analýza DC motoru....37
4. Optimalizace magnetického obvodu....40
4.1 2D analýza....40
4.2 Vliv optimalizace na moment stroje....49
4.3 Vliv optimalizace na úsporu materiálů....49
6. Závěr....51
Použitá literatura:....52

Příloha 1 1
1.1 Materiálová data pro simulaci magnetického pole: 1
1.2 Materiálová data pro simulaci teplotního pole: 2
Příloha 2 3
1.1 Měření elektrického proudu palivovou pumpou 3

Seznam symbolů a zkratek

I	Elektrický proud	A
J	Proudová hustota	A/m^2
U	Elektrické napětí	V
μ	Permeabilita	H/m
ϕ	Magnetický indukční tok	Wb
U_i	Indukované napětí	V
A	Magnetický potenciál	A
B	Magnetická indukce	T
B_r	Remanentní magnetická indukce	T
H	Intenzita magnetického pole	A/m
H_c	Koercitivní intenzita	A/m
H_c	Koercitivní síla	A/m
ω	Úhlová rychlost	rad/s
ρ	Rezistivita	Ω
γ	Konduktivita	S
M	Moment	N.m
F	Magnetické napětí	
ρ	Hustota	kg/m^3
D	Indukce elektrického pole	C/m^2
C	Měrná tepelná kapacita	$J.kg^{-1}K^{-1}$
α	Součinitel přestupu tepla	-
λ	Tepelná vodivost	$W.m^{-1}.K^{-1}$

Úvod

Práce se zabývá problematikou tvorby magnetického a teplotního modelu DC motoru s permanentními magnety. Zkoumá hlavně přesycování magnetického obvodu statoru, jeho příčiny a následnou optimalizaci tohoto obvodu.

V úvodu práce je vypracována rešerše běžně používaných motorů palivových pump. Principiální funkce těchto motoru popsána v kapitole 1 Rešerše motorů palivových pump. Tato kapitola zmiňuje principiální funkci kartáčových stejnosměrných motorů DC a bezkartáčových stejnosměrných motorů BLDC.

Ve třetí kapitole je popsán princip metody konečných prvků MKP a možnosti využití MKP v průmyslu. Dále lze v této kapitole nalézt rovnice magnetických a teplotní polí, nutné pro jejich fyzikální popis.

Následující část diplomové práce pojednává o problematice tvorby teplotního a magnetického modelu stejnosměrného motoru, jako je například aplikace okrajových podmínek, vstupní a výstupní data ze simulací atd.

Jedním z hlavních důvodů pro vypracování práce bylo nalezení optimálních rozměrů magnetického obvodu, za použití softwaru ANSYS. Během optimalizace byla měněna tloušťka jha statoru a permanentních magnetů. Následně byl sledován vliv těchto změn na rozložení magnetické indukce a moment stroje.

1. Rešerše motorů palivových pump

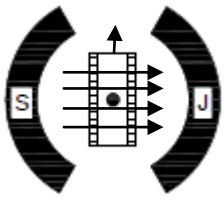
K přívodu paliva do motoru se používají palivová čerpadla. Zařízení, která během své historie prošla mnoha a mnoha konstrukčními úpravami. Jako pohon těchto čerpadel se používají DC a BLDC motory v mnoha konstrukčních provedeních. Například DC motory se vyrábějí s permanentními magnety na statoru. [1]

1.1 DC motor

V případě stejnosměrných motorů, jako pohonu pro palivová čerpadla, se používají DC motory s permanentními magnety. Odolnost permanentních magnetů zajišťuje povrchová úprava speciálními laky a složení permanentních magnetů. V permanentních magnetech jsou obsaženy příměsi látek, které nereagují na agresivní prostředí paliva. V případě simulované palivové pumpy se jedná o feritové magnety s příměsí stroncia. [1][2]

1.1.1. Princip a použití DC motoru pro palivová čerpadla

Jedná se o jeden z nejstarších typů elektrických strojů používaných pro elektromechanickou přeměnu energie. Mají velmi dobré regulační vlastnosti. Hlavním konstrukčním prvkem stroje je komutátor. Komutátor funguje jako mechanický střídač. Svou funkcí zajišťuje kolmost magnetického pole statoru na magnetické pole rotoru viz. obrázek 1.1.1. Kolmost magnetického pole rotoru a statoru. Stroj v pozici funguje s maximálním momentem viz rovnice 1.1.1.



Obr. 1.1.1 Kolmost magnetického pole rotoru statoru

$$M = k \cdot F_S \times F_R = k \cdot F_S \cdot F_R \cdot \sin\frac{\pi}{2} = k \cdot F_S \cdot F_R \qquad (1.1.1)$$

Kde M – moment stejnosměrného stroje

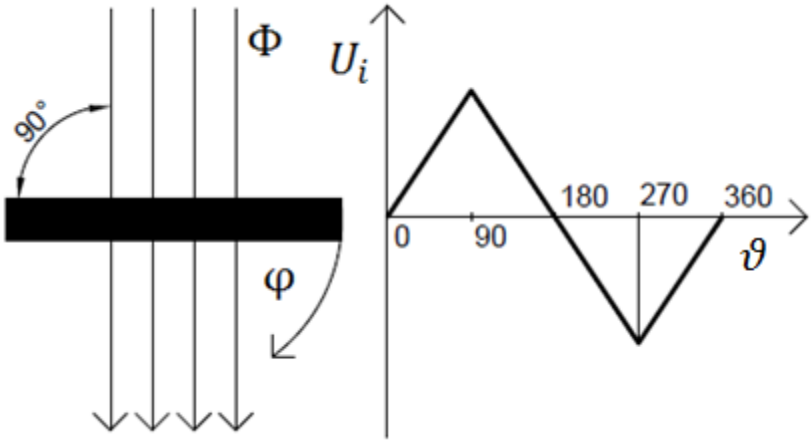
F_S – magnetický indukční tok statoru

F_R – magnetický indukční tok rotoru [1]

Otáčením cívky v magnetickém poli se do cívky indukuje napětí, jehož velikost lze spočítat z rovnice 1.1.2. Principiálně je indukce napětí znázorněna na obr. 1.1.2.

$$U_i = -\frac{\mathrm{d}\Phi_c}{\mathrm{dt}} = -\omega \cdot \Phi_m \cdot \sin\vartheta \quad (1.1.2)$$

$$\Phi_c = -\Phi_m \cdot \cos\vartheta \quad (1.1.3)$$



Obr. 1.1.2 Rotace smyčky v magnetickém poli

V případě že smyčku napájíme napětím U, protéká smyčkou elektrický proud I:

$$I = \frac{U - U_i}{R} \quad (1.1.4)$$

Tento proud vyvolá moment M:

$$M = k \cdot \Phi \cdot \mathrm{I} \quad (1.1.5)$$

Kde ϕ – magnetický indukční tok

Konstantu k, lze spočítat následovně:

$$k = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot V \cdot \frac{p}{a} \cdot \cos\frac{\lambda}{2}$$

Kde V – počet závitů v kotvě
p – počet pólových dvojic
a – počet paralelních větví
γ – úhel zkrácení cívkového kroku [2]

Střední hodnotu indukovaného napětí lze vypočítat z následujícího vztahu:

$$U_i = k \cdot \Phi \cdot \omega \tag{1.1.6}$$

Upravením vztahů1.1.4 a 1.1.6 dostaneme vztah pro rychlost ω:

$$\omega = \frac{\mathrm{U_i}}{\mathrm{k} \cdot \Phi} = \frac{\mathrm{U} - \mathrm{I} \cdot \mathrm{R}}{\mathrm{k} \cdot \Phi} \tag{1.1.7}$$

Pro určení točivého momentu lze postupovat dvěma způsoby. První možností je uvažování rovnosti vnitřního a vnějšího výkonu:

$$U_i \cdot I = M \cdot \omega \tag{1.1.8}$$

Tento stav platí za předpokladu ideálního stroje. Po dosazení do rovnice 1.1.8 za indukované napětí vyjádřené v rovnici 1.1.6 dostaneme vztah pro výpočet momentu:

$$M = k \cdot \Phi \cdot \mathrm{I} \tag{1.1.9}$$

Další možností určení momentu je možné ze silových účinků na vodič protékaný proudem:

$$F = B \cdot I \cdot l \tag{1.1.10}$$

Pro výpočet momentu bude zavedena hodnota střední indukce ve vzduchové mezeře $B_{stř}$:

$$B_{stř} = \frac{\phi}{l_{stř} \cdot t_p} \tag{1.1.11}$$

Točivý moment pak bude

$$M = \frac{D}{2} \cdot B_{stř} \cdot l_e \cdot I_v \cdot V \tag{1.1.12}$$

Kde D – průměr kotvy

l_e – efektivní délka železa
I_v – proud ve vodiči

Průměr kotvy lze vyjádřit vztahem:

$$D = \frac{2 \cdot p \cdot t_p}{\pi} \tag{1.1.13}$$

Dále pak platí relace mezi proudem stroje I a proudem v jednom závitu:

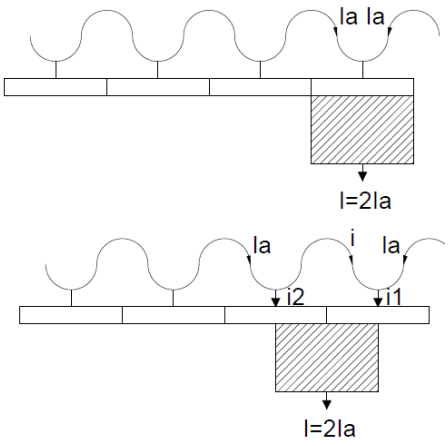
$$I_v = \frac{I}{2 \cdot a} \tag{1.1.14}$$

Dosazení do vztahu 1.1.12 ze vztahů 1.1.11, 1.1.13 a 1.1.14 lze získat vztah pro výsledný moment:

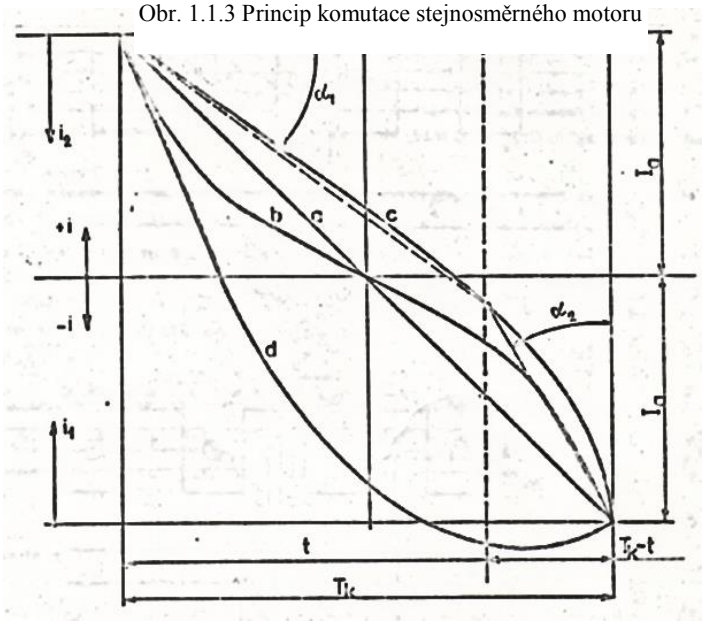
$$M = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot V \cdot \frac{p}{a} \cdot \phi \cdot I \cdot \cos\frac{\gamma}{2} \tag{1.1.15}$$

1.1.2. Princip komutace DC motoru

Funkce stejnosměrného motoru je založena na principu komutace, kdy dochází v cívkách ke změně směru napájení za použití mechanického střídače, který se nazývá komutátor. Při otáčení rotoru dochází ke změně polarity cívek tak, aby směr vyvolaného magnetického toku zůstal stejný. Kartáče komutátoru dosedají na lamely, čímž je přiváděn do rotoru elektrický proud. Princip je znázorněn na obrázku 1.1.3.



Obr. 1.1.3 Princip komutace stejnosměrného motoru



Obr.1.1.4 Komutační diagram: a) průběh lineární komutace

b) komutace s uvažováním odporů cívky a přívodů ke komutátoru

c) překomutovaný stroj d) podkomutovaný stroj

Komutační stejnosměrného stroje. Pro lineární komutaci (a) platí následující vztahy, kde se malými písmeny označují proměnné veličiny a velkými veličiny konstantní:

$$I = 2 \cdot I_a \tag{1.1.16}$$

$$i_2 = I_a - I \tag{1.1.17}$$

$$i_1 = I_a + I \tag{1.1.18}$$

Kde I je celkový proud odebíraný kartáčem stejnosměrného stroje, I_a proud jednou větví paralelního vinutí a proudy i_1 a i_2 jsou proudy procházející lamelou komutátoru, viz obr. 1.1.3. Proudy i odpovídají vodivosti kontaktní plochy kartáč lamela. Za předpokladu, že vodivost je úměrná ploše, lze psát:

$$\frac{i_2}{i_1} = \frac{\sigma_{p2}}{\sigma_{p1}} = \frac{r_{p1}}{r_{p2}} \tag{1.1.19}$$

Kde σ_{p1} a σ_{p2} – vodivosti kontaktních ploch

r_{p1} a r_{p2} – odpor kontaktních ploch

Následuje vztah pro výpočet krytí lamely 1:

$$b \cdot \frac{t}{T_k} = \frac{1}{r_{p2}} \tag{1.1.20}$$

krytí lamely 2 lze vypočítat obdobně:

$$b \cdot \frac{T_k - t}{T_k} = \frac{1}{r_{p1}} \tag{1.1.21}$$

Kde b – krytí lamely

T_k – doba komutace

Ze vztahů1.1.11, 1.1.12 a 1.1.13 vyplývá, že velikost proudů závisí na délce komutace T_k. Tuto závislost lze vyjádřit následujícími poměry:

$$\frac{i_1}{i_1 + i_2} = \frac{i_2}{I} = \frac{t}{T_k} => i_2 = \frac{t}{T_k} \cdot I \tag{1.1.22}$$

$$\frac{i_1 + i_2}{i_1} = \frac{I}{i_1} = \frac{T_k}{T_k - t} => i_1 = \frac{T_k - t}{T_k} \cdot I \tag{1.1.23}$$

Lineární průběh komutace nastane však pouze v okamžiku, kdy zanedbáme odpor a indukčnost cívek. Pro uvažování těchto parametrů platí průběh b v komutačním diagramu na obr. 1.1.4. Průběh proudu i byl odvozen z podmínky nulového napětí na komutující smyčce.

$$R_p \cdot \frac{T_k}{T_k - t} \cdot i_1 + R_{sp} \cdot i_1 + R_c \cdot i - R_{sp} \cdot i_2 - R_p \cdot \frac{T_k}{t} \cdot i_2 = 0 \tag{1.1.24}$$

Kde: $r_{p1} = R_p \cdot \frac{T_k}{T_k - t}$ a $r_{p2} = R_p \cdot \frac{T_k}{t} \cdot i_2$ (1.1.25)

R_c - odpor cívky

R_p – odpor přechodu kartáč lamela

R_{sp} – odpor přívodu komutátoru

[1][2]

1.2 BLDC motor

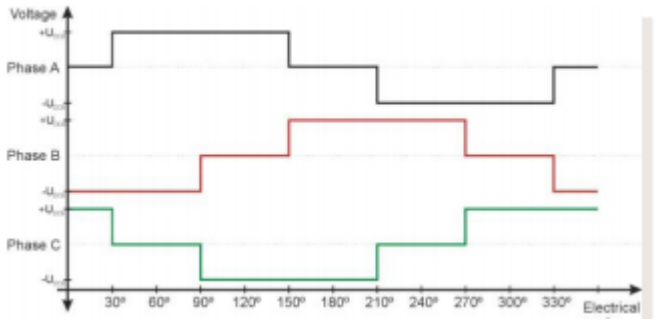
Bezkartáčový stejnosměrný motor je založen na obdobném principu jako motor stejnosměrný. Má však odlišnou konstrukci. Na statoru má umístěno trojfázové statorové vinutí a permanentní magnety jsou umístěny na rotoru. Statorové vinutí je spínáno v závislosti na poloze rotoru, tak aby BLDC motor pracoval s maximálním momentem. Řízení BLDC motoru je možné několika způsoby:

- Six-step komutace

- Bezsenzorové řízení

1.2.1 Řízení BLDC motoru six step komutací

V případě six step komutace je BLDC motor řízen na základě aktuální polohy rotoru BLDC motoru, kdy jsou vždy napájeny pouze dvě fáze statorového vinutí. Aktuální pozice se zjišťuje použitím senzorů polohy. Zde se využívají Hallovi senzory polohy, které jsou umístěny tak, aby odpovídali sdruženému indukovanému napětí. Jak ukazuje obrázek 1.2.1, cívky jsou spínané po 60° elektrických.



Obr. 1.1.2 Diagram spínání statorových cívek BLDC motoru

Vzhledem k počtu sepnutí cívek dochází k velkému zvlnění momentu. To zapříčiňuje omezení využití řízení pro některé aplikace.

1.2.2 Bezsenzorové řízení BLDC motoru

V nynější době se pracuje i na mnoha typech bezsenzorového řízení:

- bezsenzorové řízení založené na indukovaném napětí:

Nutnou podmínkou je dostatečná velikost indukovaného napětí. Z tohoto důvodu je pracovní rozsah řízení otáček od 5-10 % do 100 % jmenovitých otáček. Metoda je založena na měření průchodu indukovaného napětí nulou. Další možnou technikou je odhad indukovaného napětí.

- bezsenzorové řízení založené na změně indukčnosti:

Metoda předpokládá změnu parametrů stroje v důsledku otáčení rotoru. Tyto metody lze použít pro rozsahy dosahujících přibližně 20 % nominálních otáček. Princip je založen na měření přechodového děje proudu. Pokročilé techniky využívají injektování proudu.

2. Teoretický základ analýzy magnetického a teplotního pole

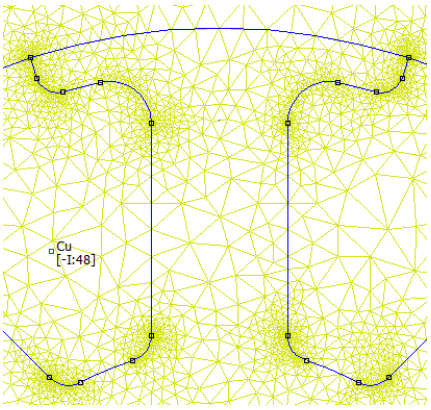
Metoda konečných prvků je silným nástrojem pro řešení fyzikálních polí. Vznikla díky potřebě řešit složité výpočty z mechaniky, elektrotechniky a dalších vědních oborů. Metoda konečných prvků pomáhá při konstrukci zařízení. Umožňuje například detailní zobrazení struktur materiálu a jeho změn vlivem působení mechanického a tepelného zatěžování. Dále pomáhá při zjištění rozložení magnetických polí a dalších aplikacích. Metoda konečných prvků se používá pro analýzu 2D i 3D modelů. Touto metodou lze řešit následující typy analýz:

- Statickou analýzu: řeší pouze ustálené stavy
- Transientní analýzu: řeší problém v časové závislosti, přechodné děje atd
- Teplotní analýzu
- Harmonickou analýzu: závislost zkoumaného děje na frekvenci
- Spektrální analýzu
- Sdružené analýzy: zde existuje mnoho kombinací jednotlivých analýz například mechanicko-teplotní, magneticko-mechanická nebo jako v našem případě magneticko-teplotní analýza. [4][5] [6]

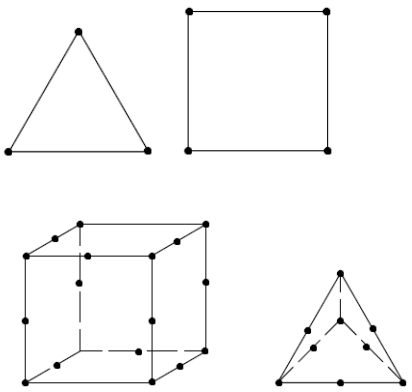
2.1 MKP

2.1.1 Princip metody konečných prvků

Princip metody konečných prvků spočívá v rozdělení spojité oblasti na menší části zvané elementy. Jednotlivé elementy jsou spojeny v uzlech. Jedná se o body popsané souřadnicemi v prostoru, pro něž je počítán potenciál daného pole. Metoda konečných prvků převádí složité diferenciální rovnice na soustavu jednodušších algebraických rovnic. Jako neznámá slouží veličiny jednotlivých polí. [4]



Obr. 2.1.1 Příklad MKP sítě - zub rotoru stejnosměrného stroje



Obr. 2.1.2 Příklad typů elementu

Na obrázku vlevo jsou zobrazeny základní tvary elementů trojúhelníkový, čtvercový, hexahedrový a tetrahedrový. Tyto elementy vyplňují plochy a objemy těles, v závislosti na tom zda se jedná o 2D či 3D model jsou použity plošné či objemové elementy. Na vrcholu každého elementu je umístěn prvek zvaný nod. Výsledný model je řešen jako soustava těchto algebraických rovnic. Během simulace je nutné dávat pozor

na volbu typu elementu, protože ne každý element je vhodný pro danou analýzu. V této diplomové práci bylo pracováno s typem elementu solid90, který lze použít jak pro analýzu magnetického pole tak pole teplotního. Element typu solid90, na obrázku 3.1.1 dole, obsahuje nody nejen na vrcholech, ale i ve středech stran. Tento element byl zvolen právě z důvodu jeho všestrannosti, hlavně co se týče možnosti řešení teplotního a magnetického pole zároveň. Prvek umožňuje řešení transientní i statické analýzy. [4]

2.1.2 Chyby metody konečných prvků

V metodě konečných prvků může docházet k nepřesnostem vzniklým diskretizací modelu. Tato chyby jsou závislé na velikosti elementů a kvalitě sítě. Další možnou chybou při výpočtu konečně prvkového modelu může být numerická chyba řešené odhadové metody, kterou výpočetní software používá konvergenci při výpočtu integrací a derivací. [7]

2.2 Magnetického pole DC motoru

Matematický model DC motoru je odvozen z první Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru:

$$rot\ \boldsymbol{H} = J \tag{2.2.1}$$

$$rot\ (\boldsymbol{H} - \boldsymbol{H_c}) = \boldsymbol{J} \tag{2.2.2}$$

Kde: H – vektor intenzita magnetického pole
H_c – vektor koercitivní intenzita
J – vektor celkové proudové hustoty

Vyjádřením intenzity magnetického pole $H = \frac{B}{\mu}$ a následným dosazením do rovnice 3.2.2, získáme následující vztah:

$$rot\ \frac{1}{\mu}(rot\ \boldsymbol{A} - \boldsymbol{B_r}) = \boldsymbol{J} \tag{2.2.3}$$

Kde : A – magnetický vektorový potenciál
B_r – remanentní indukce

V následujícím kroku je vyjádřena intenzita vnějšího elektrického pole, která se skládá z intenzity vnějšího elektrického pole a intenzity elektrického pole vznikající pohybem v magnetickém poli:

$$\boldsymbol{E'} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} = \boldsymbol{E} + \boldsymbol{v} \times rot\, \boldsymbol{A} \tag{2.2.4}$$

Kde : E' – zobecněná intenzita elektrického pole
E – intenzita vnějšího elektrického pole
B – indukce magnetického pole
v – rychlost rotace

Intenzita E' je posléze dosazena do druhé Maxwellovi rovnice v diferenciálním tvaru

$$rot(\boldsymbol{E'} - \boldsymbol{v} \times rot\, \boldsymbol{A}) = -rot \frac{d\boldsymbol{A}}{dt} \tag{2.2.5}$$

Tato rovnice je dále upravena odstraněním operátoru rotace a vynásobením elektrickou vodivostí **γ**, čímž získáme vztah pro proudovou hustotu **J**

$$\boldsymbol{J} = \gamma \cdot \boldsymbol{E'} = \gamma \cdot (\boldsymbol{v} \times rot\, \boldsymbol{A}) - \gamma \cdot \frac{d\boldsymbol{A}}{dt} - \gamma \cdot grad\, \varphi + \boldsymbol{J}_{ext} \tag{2.2.6}$$

Dosazením tohoto vztahu pro celkovou proudovou hustotu do první Maxwellovi rovnice 3.1.1, získáme následující vztah

$$rot \frac{1}{\mu} \cdot rot(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B_r}) - \gamma \cdot \frac{d\boldsymbol{A}}{dt} - \gamma \cdot (\boldsymbol{v} \times rot\, \boldsymbol{A}) = \boldsymbol{J_{ext}} - \gamma \cdot grad\, \varphi \tag{2.2.6}$$

Kde pravá strana rovnice respektuje vnější zdroje elektrického pole, $\gamma \cdot \frac{d\boldsymbol{A}}{dt}$ respektuje transformační složku, $\gamma \cdot (\boldsymbol{v} \times rot\, \boldsymbol{A})$ respektuje indukční složku a $rot \frac{1}{\mu} \cdot rot(\boldsymbol{A} - \boldsymbol{B_r})$ respektuje zdroj magnetického pole. Pro stejnosměrný motor s permanentními magnety je složka $\mathbf{B_r}$ nenulová. [8]

2.3 Teplotního pole DC motoru

Teplo se může šířit následujícími způsoby:

Kondukcí (vodivostí) – jedná se o způsob šíření tepla v tělesech, kdy částice s vyšší kinetickou energií předá část své energii látce s nižší kinetickou energií. Částice kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Vodivostní teplotní rovnice vypadá následovně:

$$\frac{d}{dx}\left(K_{xx}\frac{dT}{dx}\right)+\frac{d}{dy}\left(K_{yy}\frac{dT}{dy}\right)+\frac{d}{dz}\left(K_{zz}\frac{dT}{dz}\right)+q=\rho c\left(\frac{dT}{dt}+v_{xx}\frac{dT}{dx}+v_{yy}\frac{dT}{dy}+v_{zz}\frac{dT}{dz}\right) \tag{2.3.1}$$

kde K je tepelná vodivost, zadávána pomocí vodivostní matice, udávající vodivost v jednotlivých směrech materiálu, T teplota [K],ρ hustota, c měrná tepelná kapacita, rychlost proudícího média a jako q je označován objemový zdroj tepla:

$$[K]=\begin{bmatrix}K_{xx} & 0 & 0\\ 0 & K_{yy} & 0\\ 0 & 0 & K_{zz}\end{bmatrix} \tag{2.3.2}$$

Sáláním (radiací) – látka energii do prostoru za pomoci elektromagnetického záření. Tímto způsobem lze teplo šířit i ve vakuu. Tento děj závisí na počtu vyzařujících ploch N, S [m^2] plocha odpovídající vyzařovací plochy, teplotě T [K], emisivitě ε a celkovém vyzářeném výkonu Q_{ij}. Vztah pro popis šíření tepla následuje:

$$\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{\delta_{ij}}{\varepsilon_i}-F_{ij}\cdot\left(\frac{1-\varepsilon_i}{\varepsilon_i}\right)\right)\cdot\frac{1}{S_i}\cdot Q_i=\sum_{i=1}^{N}\left(\delta_{ij}-F_{ij}\right)\cdot\sigma\cdot T_i^4 \tag{2.3.3}$$

(2.3.4)

Prouděním (konvekcí) – při tomto ději dochází k pohybu hmoty, uplatňuje se pouze u látek kapalného nebo plynného skupenství. K tomuto ději dochází například při ochlazování tělesa proudící kapalinou. Celý děj lze popsat následujícím vztahem:

$$Q_t = \alpha \cdot S \cdot \Delta t$$

Ke Q_t je celkový tepelný tok a α koeficient přestupu tepla

V závislosti na velikosti činitele α se určí tepelný tok, který přestupuje mezi pevným tělesem a kapalinou. [9]

2.4 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky se aplikují na hranici mezi dvěma oblastmi, kde neplatí diferenciální tvar Maxwellových rovnic. Potenciál na tomto rozhraní musí být stejný pro obě oblasti. Mezi nejčastěji používané okrajové podmínky patří Neumannova okrajová podmínka a Dirichletova okrajová podmínka. [8][10]

2.4.1 Dirichletova okrajová podmínka

Dirichletovu okrajovou podmínku popisuje následující vztah:

$$\boldsymbol{A}(\Gamma, t) = \boldsymbol{A}_{\boldsymbol{\Gamma}} \cdot (\Gamma, t) \qquad (2.3.5)$$

Kde $\mathbf{A}$ – neznámá hodnota vektorového potenciálu

$\mathbf{A_\Gamma}$ – hodnota vektorového potenciálu na rozhraní Γ

Z Dirichletovy okrajové podmínky je možné určit vektorový potenciál v tečném směru k hranici $\mathbf{\Gamma}$, normálovou složku rot $\mathbf{A}$ a normálovou složku $\mathbf{B}$. [8][10]

2.4.2 Neumannova okrajová podmínka

Neumannova okrajová podmínka je dána vztahem:

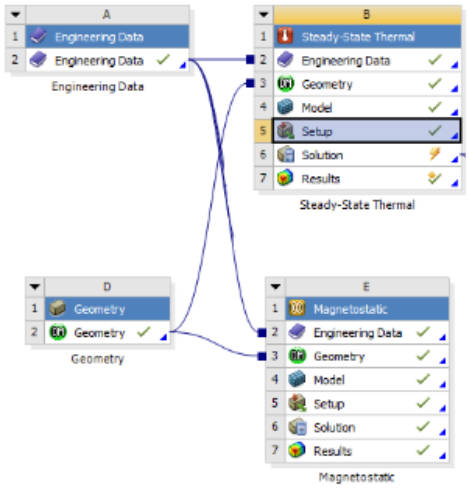
$$\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial n}(\Gamma, t) = g(\Gamma, t) \tag{2.3.6}$$

Kde g – derivace podle normály

Tato podmínka lze s výhodou využít u symetrických modelů v ose jejich symetrie. Dále se Neumannova podmínka používá pro určení normálové složky vektoru B. [8][10]

3. Tvorba a výpočet matematického modelu

V cad softwaru byl připraven model palivové pumpy, kde musely být odstraněny složité geometrické prvky, jako byly horní a spodní víko pumpy. Jedná se o velmi složité geometrie, v jejichž objemech by nebylo možné vytvořit počitatelnou síť. Prvky malých



Obr. 3.1 Schéma simulačního modelu magnetického a teplotního pole

rozměrů mají za následek vysoký počet elementů celého modelu. I po zjednodušení musí být model rozdělen na dvě části, z důvodu úspory elementů a možnosti jednoduššího zadávání napájení rotorového vinutí. Každá polovina stejnosměrného motoru byla řešena samostatně jak pro magnetické pole tak pole teplotní. Schéma celého modelu magnetické i teplotní analýzy v simulačním softwaru ANSYS Workbench lze spatřit na obrázku.

3.1 Vstupní data pro simulaci

Jako vstupní data pro simulaci byla použita materiálová data. Různé typy materiálů charakterizují různé materiálové parametry. Konkrétní hodnoty materiálových dat budou popsány právě v této kapitole. Vinutí stejnosměrného motoru palivové pumpy bylo vyrobeno z mědi, tento materiál je charakterizován permeabilitou. Stejným parametrem je charakterizován i okolní vzduch pumpy a protékající palivo. Feromagnetické materiály se zadávají permeabilitou a BH charakteristikou. Pro simulaci magnetického pole se permanentními magnety je nutné znát jejich permeabilitu, koercitivní sílu. Kompletní přehled materiálových parametrů pro výpočet magnetického

pole zobrazuje následující tabulka 4.1.1. Kde μ_r je poměrná permeabilita, H_c koercitivní intenzita, B_r remanentní indukce a ρ měrný odpor.

materiál	μ_r	B-H charakteristika	H_c	ρ
Plasty	X	-	-	-
Feromagnetické materiály	-	X	-	-
Permanentní magnety	X	-	X	-
Palivo	X	-	-	-
Měď	X	-	-	X

Tab. 3.1.1 Přehled materiálových parametrů pro analýzu magnetického pole

Pro teplotní analýzu motoru palivového čerpadla. Teplo a jeho šíření je závislé na tepelné vodivosti materiálů, tepelné kapacitě, hustotě a jejich objemu. To jaké parametry byly použité v simulaci zobrazuje tabulka 4.1.2.

materiál	Tepelná vodivost	Tepelná kapacita	hustota
Plasty	X	X	X
Feromagnetické materiály	X	X	X
Permanentní magnety	X	X	X
Palivo	X	X	X

Tab. 3.1.2 Přehled materiálových parametrů pro analýzu teplotního pole

Konkrétní materiálová data jsou uvedena v příloze 1

Dalším vstupním parametrem je napájecí proud, který byl získán z měření palivové pumpy. Pumpa byla měřena pro napájecí napětí U=12,5 V a tlak p=600 kPa. Z měření byl získán napájecí proud pro simulaci. Pro transientní analýzu lze aplikovat průběh proudu. Pro statickou analýzu postačí efektivní hodnota tohoto proudu. Příloha B obsahuje kompletní průběh měření palivové pumpy pro tři hodnoty výstupního tlaku 200, 400 a 600 kPa. Jelikož během úpravy modelu došlo i k úpravám ploch a objemů vinutí. Je nutné tento proud přepočítat dle poměru skutečné plochy S_{skut} a nové upravené plochy modelu S_{uprav} tak, aby zůstala zachována proudová hustota J, jak zobrazuje následující výpočet.

$$I_{uprav} = I_{skut} \cdot \frac{S_{uprav}}{S_{skut}} \tag{3.1.1}$$

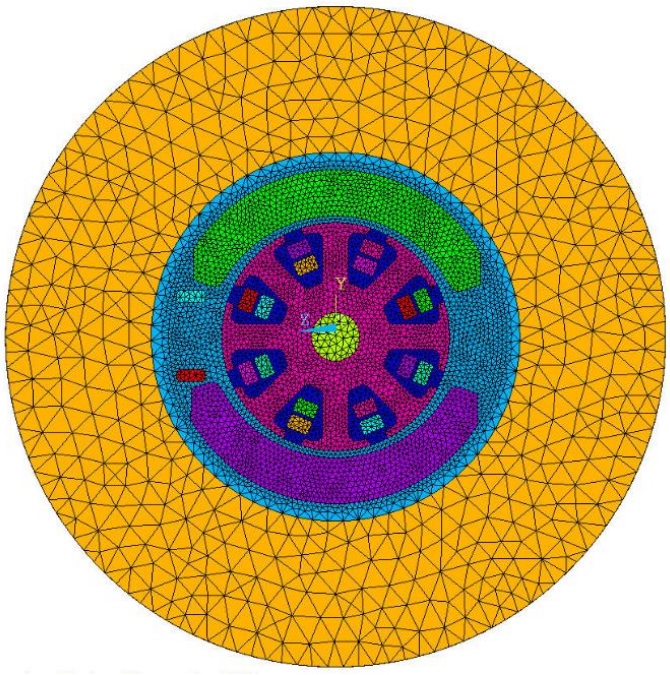
$$I_{uprav} = 5{,}5 \cdot \frac{1}{3{,}8}$$

$$I_{uprav} = 1{,}45\ A$$

Jako vstupní data pro teplotní úlohu byl vždy použit výsledkový soubor z magnetické analýzy.

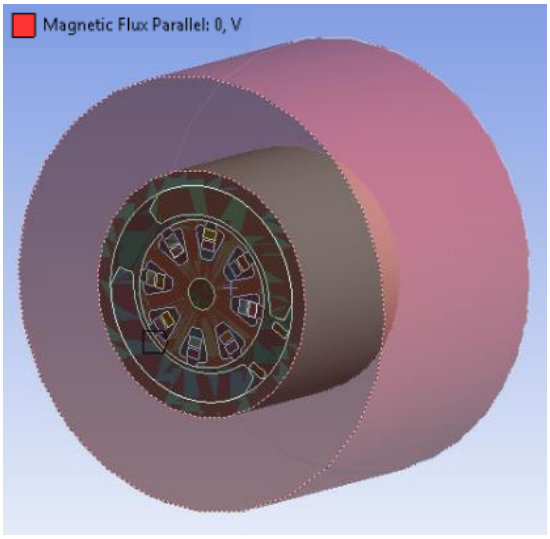
3.2 Síť

Tvorba vhodné sítě je možná nejdůležitější a nejsložitější částí každé analýzy. Jemnost sítě se volí tak, aby změna energie byla co nejmenší. Jak už bylo napsáno v předchozí části, model vyžaduje velké zjednodušení geometrie. U Malých ploch a křivek by jinak nebylo možné vytvořit síť nebo by naopak mohl vzniknout model s obrovským počtem elementů, který by posléze byl velmi časově náročný.



Obr 3.2.1 2D síť stejnosměrného motoru palivové pumpy

3.3 Aplikace okrajových podmínek a napájení



Obr. 3.3.1 Nastavení okrajových podmínek

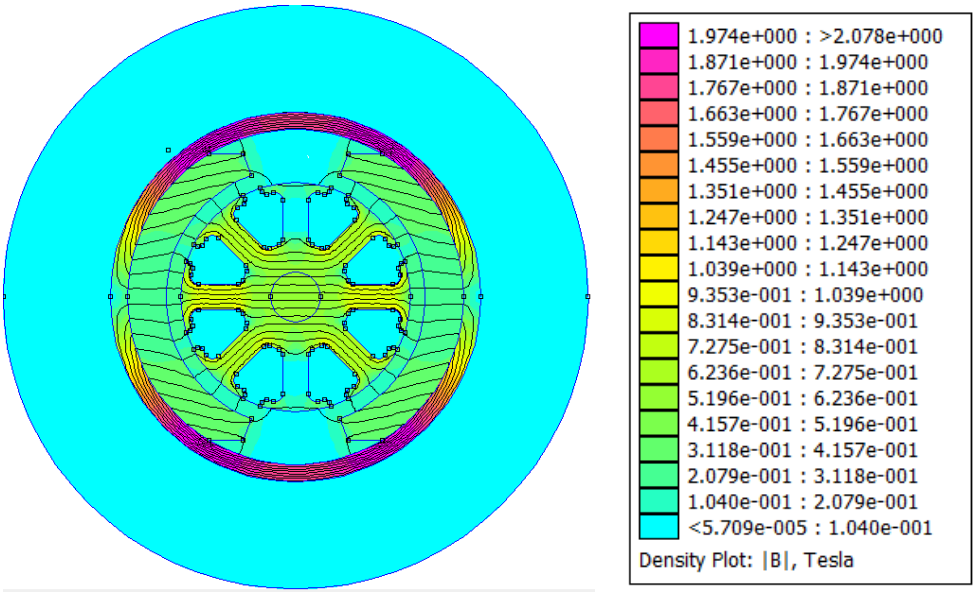
Následujícím krokem po vytvoření sítě je aplikace okrajových podmínek a napájení. Na vnější plochy modelu se nastaví nulový magnetický potenciál, jak je zobrazeno na obr. 4.3.1. Tento krok odpovídá nulové Dirichletově okrajová podmínce. Dále pak aplikujeme napájení proudem, který byl získán z měření, viz Příloha 2 a dále upraven dle vztahu 4.1.1. Jelikož v našem případě zadáváme pouze elektrický proud bez počtu závitů, musí tento proud být násoben daným počtem vodičů, dle vztahu 4.3.1.

$$I_{napájecí} = N \cdot I_{uprav} \tag{3.3.1}$$

$$I_{napájecí} = 48 \cdot 1{,}45 = 70\ A$$

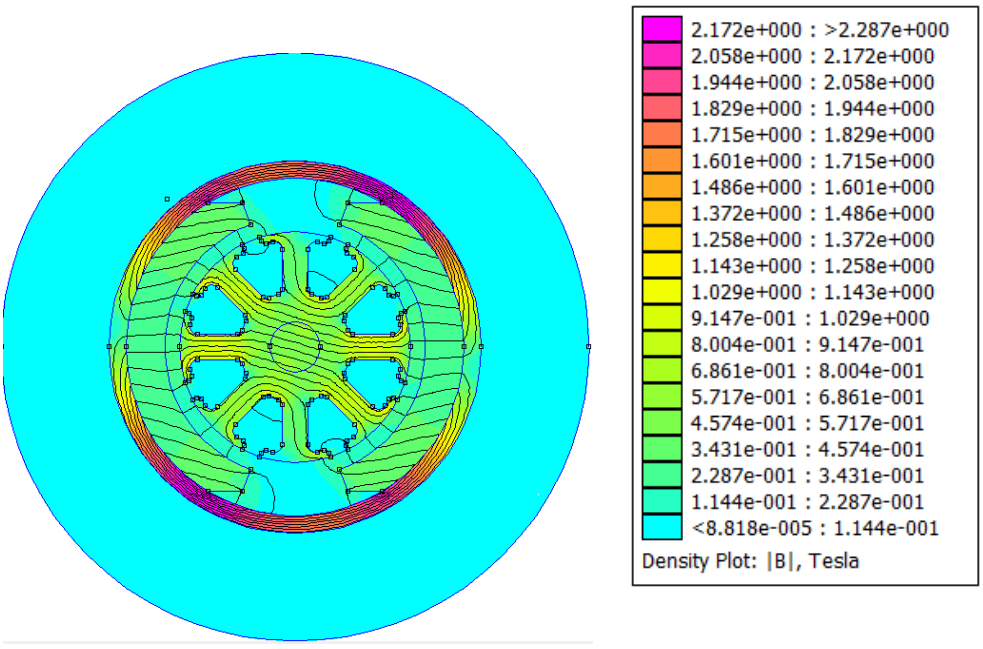
3.4 Řešení 2D úlohy v softwaru Femm

Před řešením 2D úlohy v simulační software ANSYS byla vytvořena 2D úloha v simulační software Femm. Uživatelské prostředí je mnohem přehlednější než v případě ANSYSu a práce s ním je tak mnohem jednodušší a rychlejší. Byla zde nastavena statická analýza magnetického pole, kdy v prvním kroku byl vytvořen model bez napájení a posléze model s napájením maximálním proudem získaným z měření v Příloze 2. Přesycování magnetického obvodu statoru bylo potvrzeno již během tvorby modelu bez napájení, kdy indukce magnetického pole dosahovala hodnot až 2,1 T.



Obr. 3.4.1 Rozložení magnetické indukce DC motoru - bez napájení

V předchozím obrázku 3.4.1 je zobrazeno rozložení magnetické indukce, bez napájení. U tohoto 2D modelu dochází přesycování magnetického obvodu. Hodnoty magnetické indukce zde dosahují 2,078 T. Vysokou hodnota magnetické indukce způsobuje pouze tok vytvářený permanentními magnety.



Obr. 3.4.2 Rozložení magnetické indukce DC motoru - s napájením

Rozložení magnetické indukce na obrázku 3.4.2 ukazju mírný nárůst hodnot magnetické indukce hlavně ve statorové části motoru vlivem proudu, který zároveň

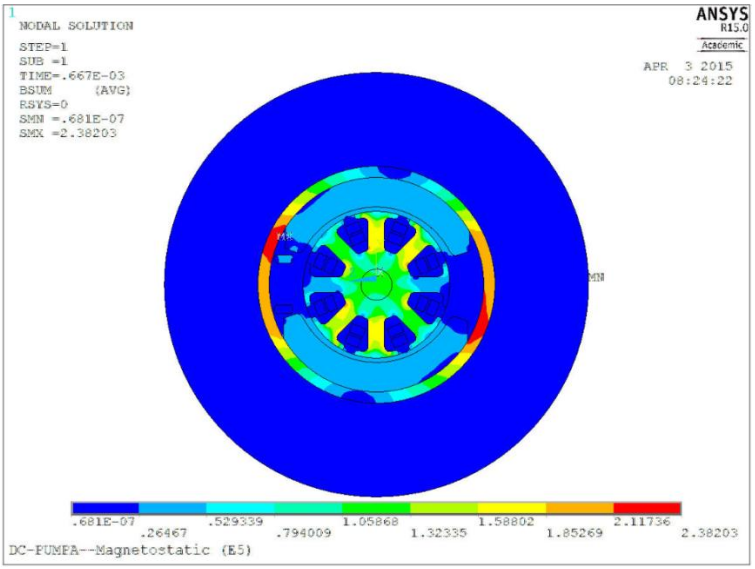
změnil rozložení magnetických siločar v rotoru. Magetické pole rotoru vytlačuje siločáry magnetického pole statoru a vzniká tak silové působení mezi oběma poli, které následně způsobý vznik točivého momentu.

3.5 Řešení 3D úlohy v software ANSYS

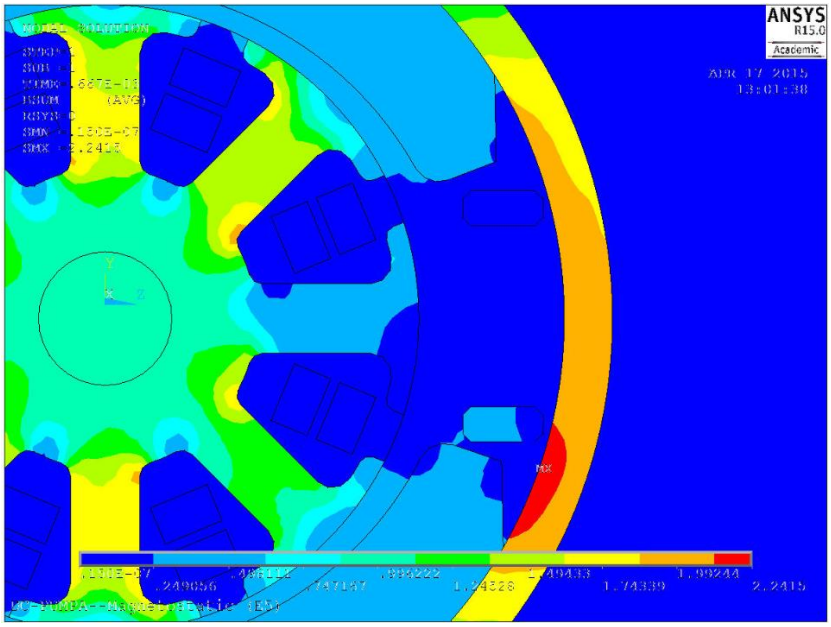
Pro řešení této úlohy bylo využito kooperace dvou prostředí softwaru ANSYS. V uživatelském prostředí Workbench byla importována geometrie, nastaveny materiálové parametry, aplikovány okrajové podmínky a napájení a vytvořena síť. Pro výpočet byl použit ANSYS APDL.

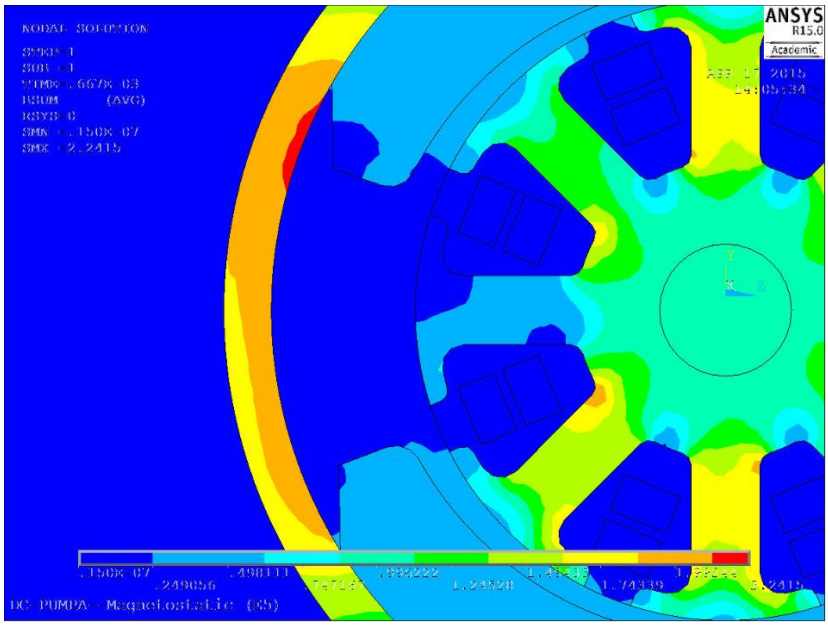
3.5.1 Magnetická analýza DC motoru

Na vnější plochy modelu byla aplikována nulová Dirichletova podmínka. Bohužel v tomto případě model není zjednodušen natolik, abychom mohli nastavit Neumannovu podmínku na hranici symetrie. V obrázku 3.5.1. je vyobrazeno rozložení indukce magnetického pole. V magnetickém obvodu dochází k přesycení. Díky tomu indukce magnetického pole dosahuje hodnot 2,38 T.



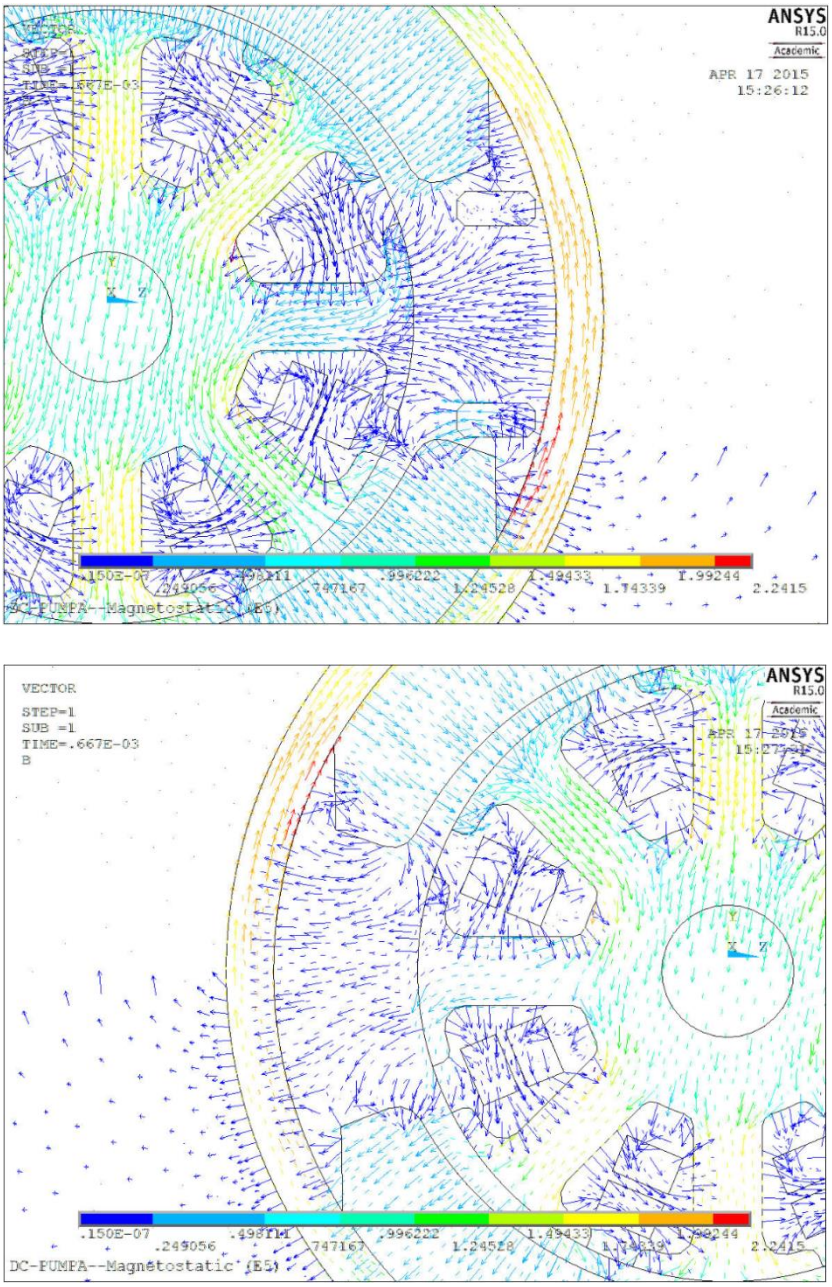
Obr. 3.5.1 Rozložení magnetické indukce - 3D model ANSYS





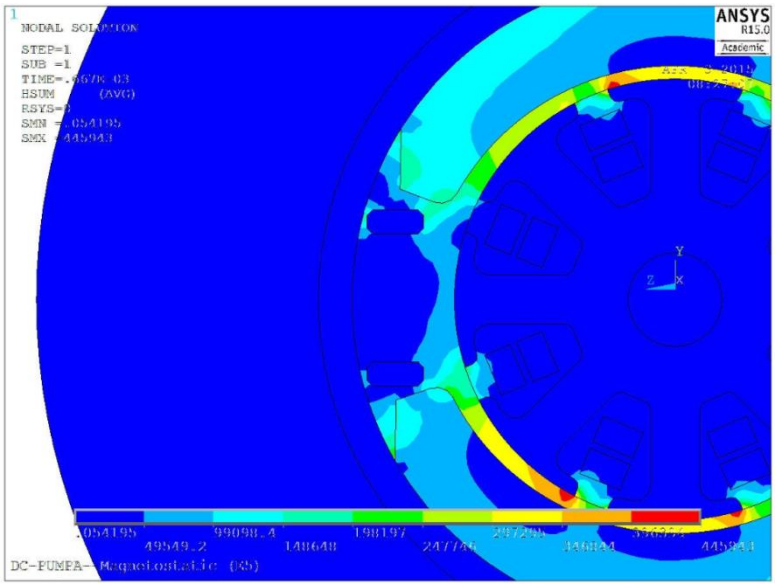
Obr.3.5.2a Rozložení magnetické indukce – detail

Na obrázku 3.5.2a je detail nodálního zobrazení magnetické indukce. Zde je patrné, že vlivem uzavírání části magnetického toku přes sponku, kterou jsou magnety zajištěny proti pohybu, dochází k většímu přesycování magnetického obvodu. To potvrzuje i vektorové zobrazení magnetického pole.

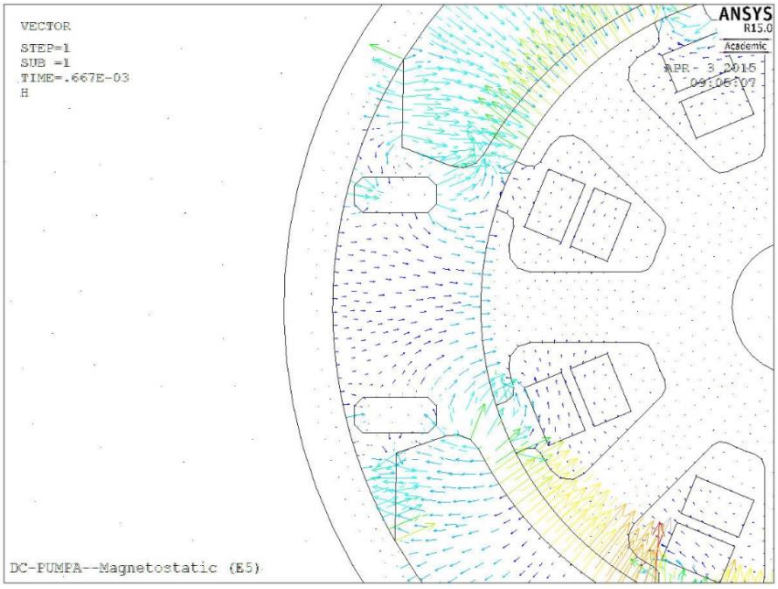


Obr.3.5.2b Rozložení magnetické indukce - detail vektorové zobrazení

Indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře se pohybuje kolem 0,45 T. Z vektorového zobrazení na obr. 3.5.2b lze vyčíst orientaci magnetického pole. Lze zde spatřit působení rotorového pole, které vychyluje původní směr vektorů magnetické indukce.

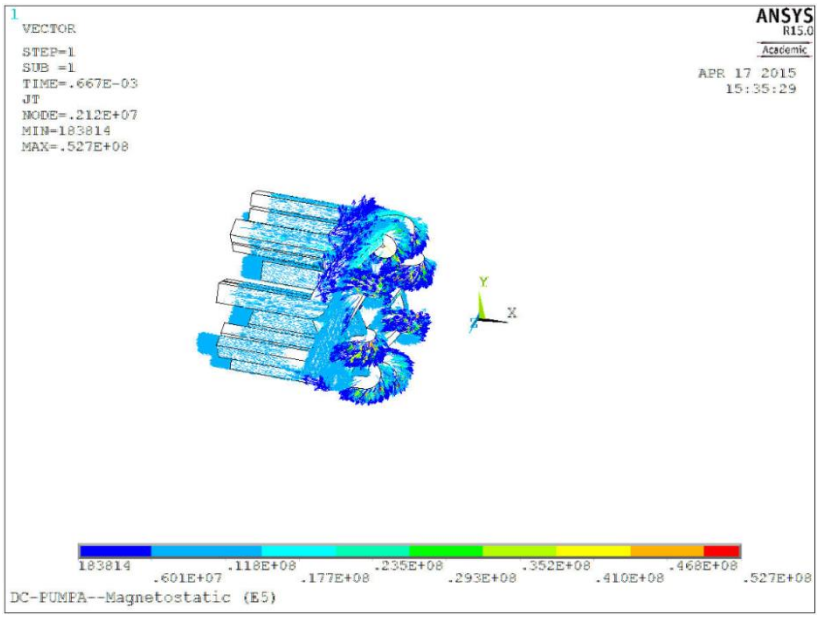


3.5.3a Intenzita magnetického pole - detail

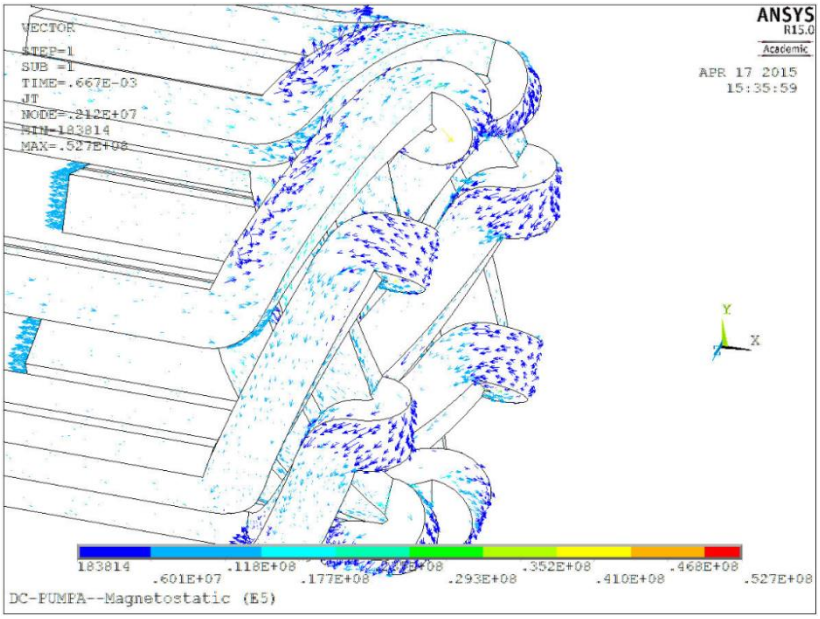


3.5.3b Intenzita magnetického pole – detail vektorové zobrazení

Nejvyšší hodnoty intenzity byly zjištěny ve vzduchové mezeře nad zuby rotoru. Intenzita magnetického pole zde dosahovala hodnot $H = 400000$ A/m



Obr.4.5.3a Proudová hustota ve vinutí

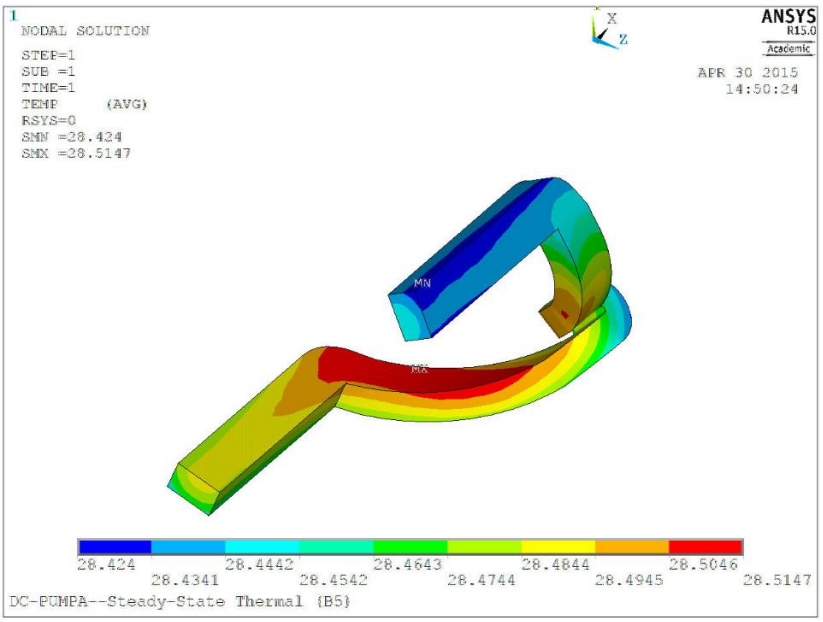


Obr.3.5.3b Proudová hustota ve vinutí

Dalším zkoumaným parametrem byla proudová hustota, která nám bude ovlivňovat ztráty a oteplování vodičů. Proudová hustota se pohybuje cca $15*10^7$ A/m^2. Najdou se však i extrémy hodnot dosahujících až 52700000. Tyto hodnoty se vyskytují v malém rozsahu na hranách čel cívek. Vyšší hodnoty proudové hustoty jsou předpokladem pro vyšší oteplení v místě dislokace.

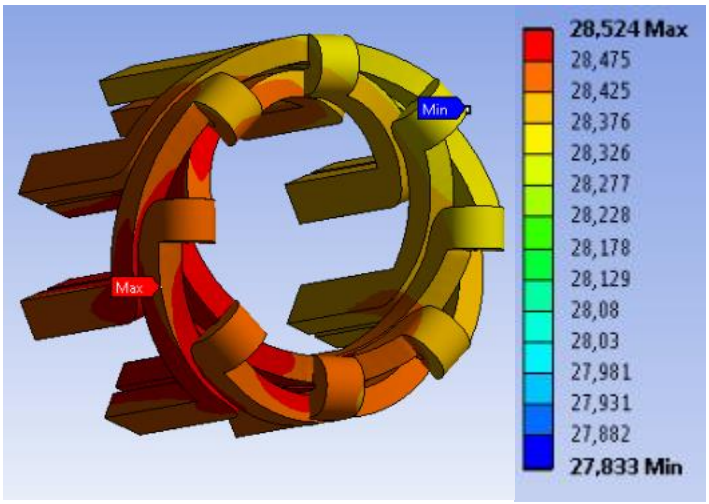
3.5.2 Teplotní analýza DC motoru

Na vnější plochy modelu palivové pumpy byla aplikována konvekce 100 W/m^2. Tato hodnota konvekce odpovídá, dle tabulky pro daný materiál, pro statickou kapalinu. Jako vstupní data pro simulaci byla použita data ze sdružené analýzy. Materiálové parametry pro simulaci lze nalézt v příloze 1.



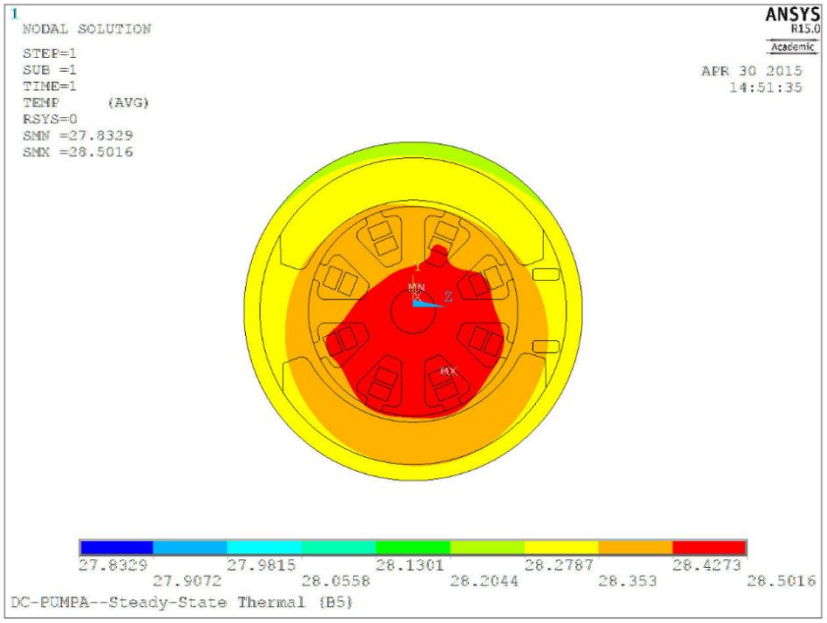
Obr. 3.6.1 Rozložení teploty v cívce DC motoru

Ve vinutí vznikají Joulovy ztráty $P_j=RI^2$. Tyto ztráty se posléze přeměňují na teplo a zahřívají vinutí. Rozložení teploty ve vinutí si, je vyobrazeno na obr 3.6.1. Ne tento obrázek znázorňuje rozložení teploty v jedné cívce stejnosměrného motoru. V čelech vinutí lze nalézt nejvyšší hodnoty teploty dosahující až 28,5 °C.

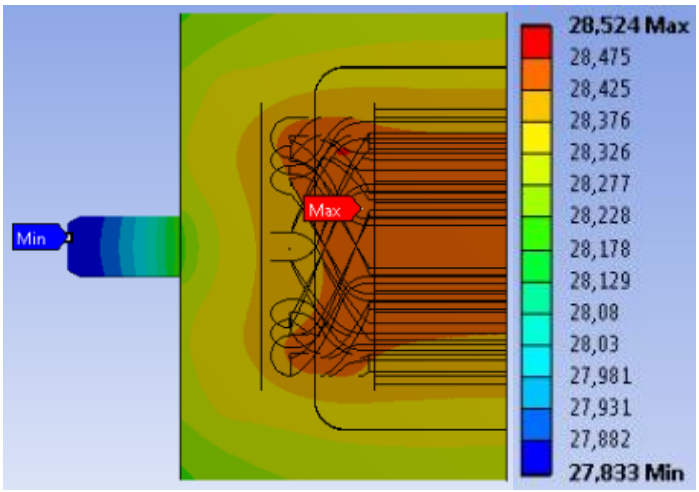


Obr.3.6.5 Rozložení teploty ve vinutí DC motoru

Na obrázku 4.6.5 je rozložení teplot v celém vinutí. Jedna strana vinutí se zahřívá o něco více. Jedná se o hodnoty, které jsou vyšší řádově o desetiny stupně celsia.

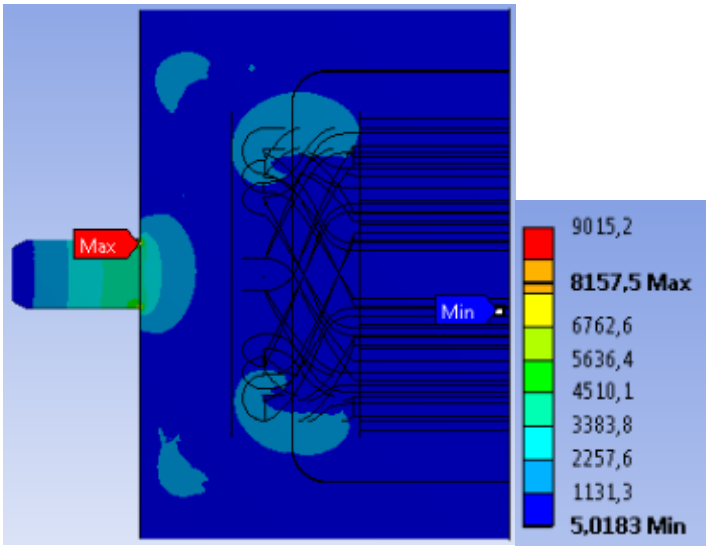


Obr. 3.6.6 Rozložení teploty v čelech vinutí - řez

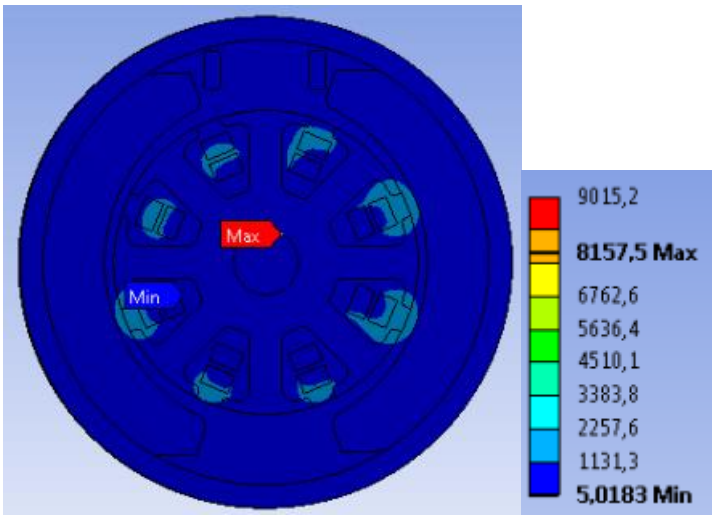


Obr. 3.6.7 Rozložení teploty DC motoru - boční řez

Na obrázku 3.6.7. je vyobrazeno rozložení teploty v podélném řezu. Nejvyšší teplota byla zjištěna v čelech vinutí.



Obr. 3.6.8 Rozložení teplotního toku [W/m^2] – boční řez



Obr. 3.6.9 Rozložení teplotního toku [W/m2]

Nejnižší hodnota teploty byla zjištěna na hřídeli, v místech, kde byla nastavena konvekce do okolí, viz obrázek 4.6.7. Nejvyšší hodnota byla lokalizována v čelech vinutí, kde dochází k stěsnání vinutí. Z obrázků 4.6.8 a 4.6.9 lze vyčíst rozložení teplotního toku.

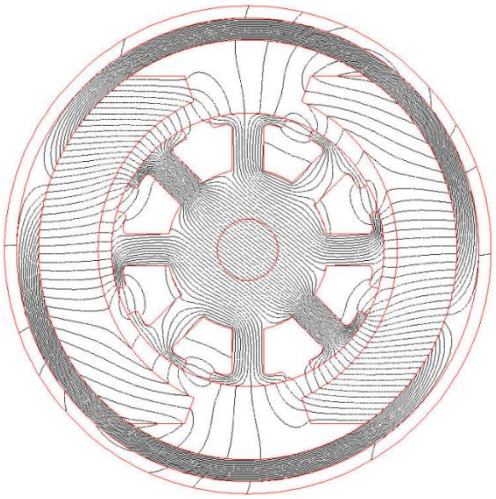
4. Optimalizace magnetického obvodu

Magnetickým obvodem se uzavírá magnetický indukční tok. Kvalitou tohoto obvodu mohou být ovlivněny parametry stroje. V případě přesycení magnetického obvodu dochází ke zvýšení ztrát a naopak pokud je obvod předimenzovaný dochází k jeho nedostatečnému využití. Přesycení magnetického obvodu může u stroje způsobit i problémy s elektromagnetickou kompatibilitou. [3]

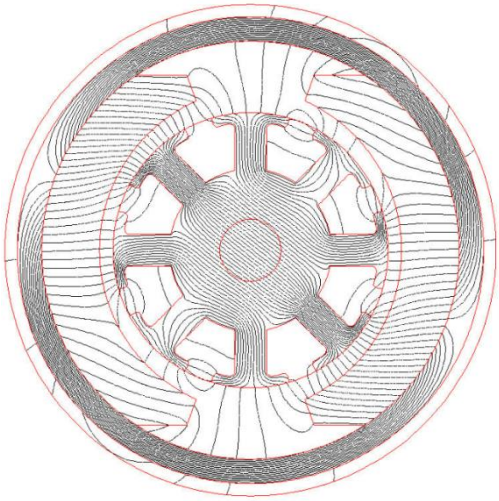
4.1 2D analýza

Během optimalizace magnetického obvodu hledáme vhodné rozměry magnetického obvodu, při kterých stroj bude pracovat s co nejlepšími parametry a s co nejmenší spotřebou materiálu. Jednou z možností pro snížení hmotnosti magnetického obvodu může být například optimalizace magnetického obvodu. V našem případě jsou magnety zbytečně předimenzovány, to je však dáno využitím stejné konstrukce statoru pro více typů palivových pump s vyššími výkony. Vhodný rozměr komponent magnetického obvodu bude určen na základě několika provedených 2D modelů, s různými tloušťkami jha statoru a permanentních magnetů. Rozměry musí být měněny

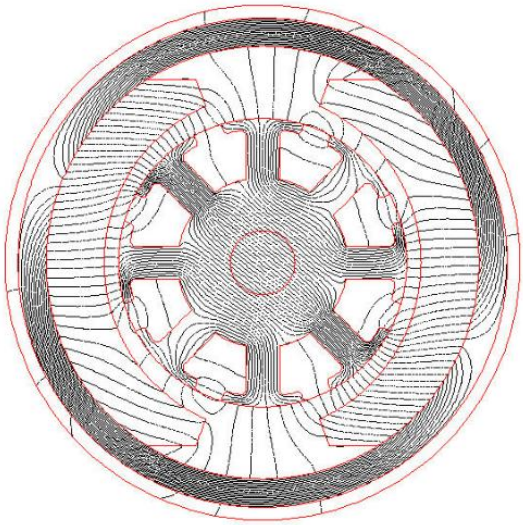
tak, aby vnější průměr stroje zůstal nezměněn. Vnější rozměr je dán rozměry hrnce, do kterého je palivová pumpa umístěna. Pokud by nebyl dodržen bylo by znemožněno použití palivové pumpy pro stávající palivové jednotky. Tloušťka jha statoru bude zvětšována od 1,8 mm do 2,6 mm po 0,2 mm. Změně rozměrů statoru musí následně odpovídat i zmenšování permanentního magnetu, jehož tloušťka klesne z 5 mm na 4,2. Jako výstupní parametry bude sledována nejenom magnetická indukce, ale i moment na hřídeli, který je změnou rozměrů ovlivněn. Dále pak bude vypočítáno množství použitého materiálu, kdy se očekává, že optimalizací by mělo dojít k úspoře drahých permanentních magnetů.



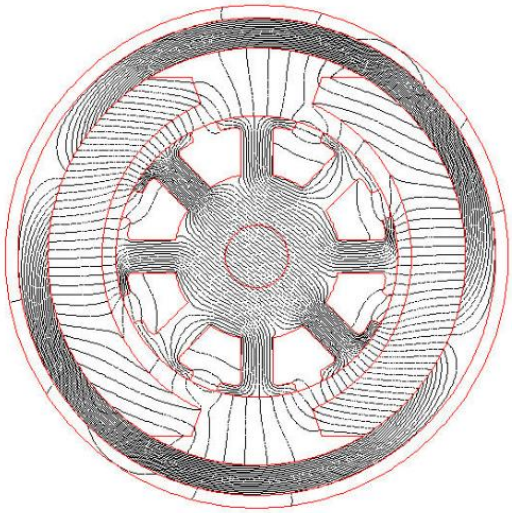
a) tloušťka jha statoru 1,8mm



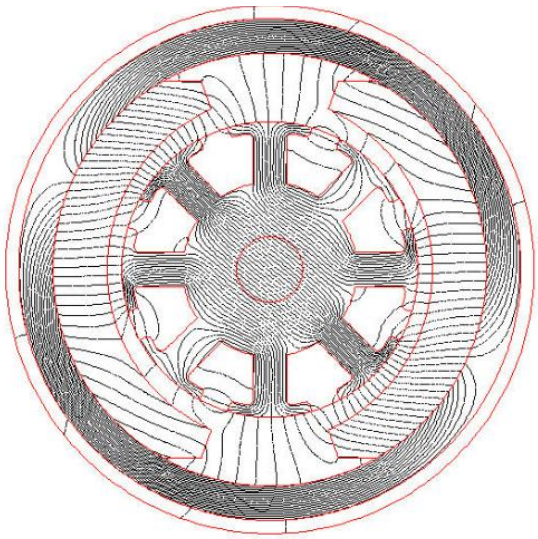
b) tloušťka jha statoru 2 mm



c) tloušťka jha statoru 2,2 mm



d) tloušťka jha statoru 2,4 mm

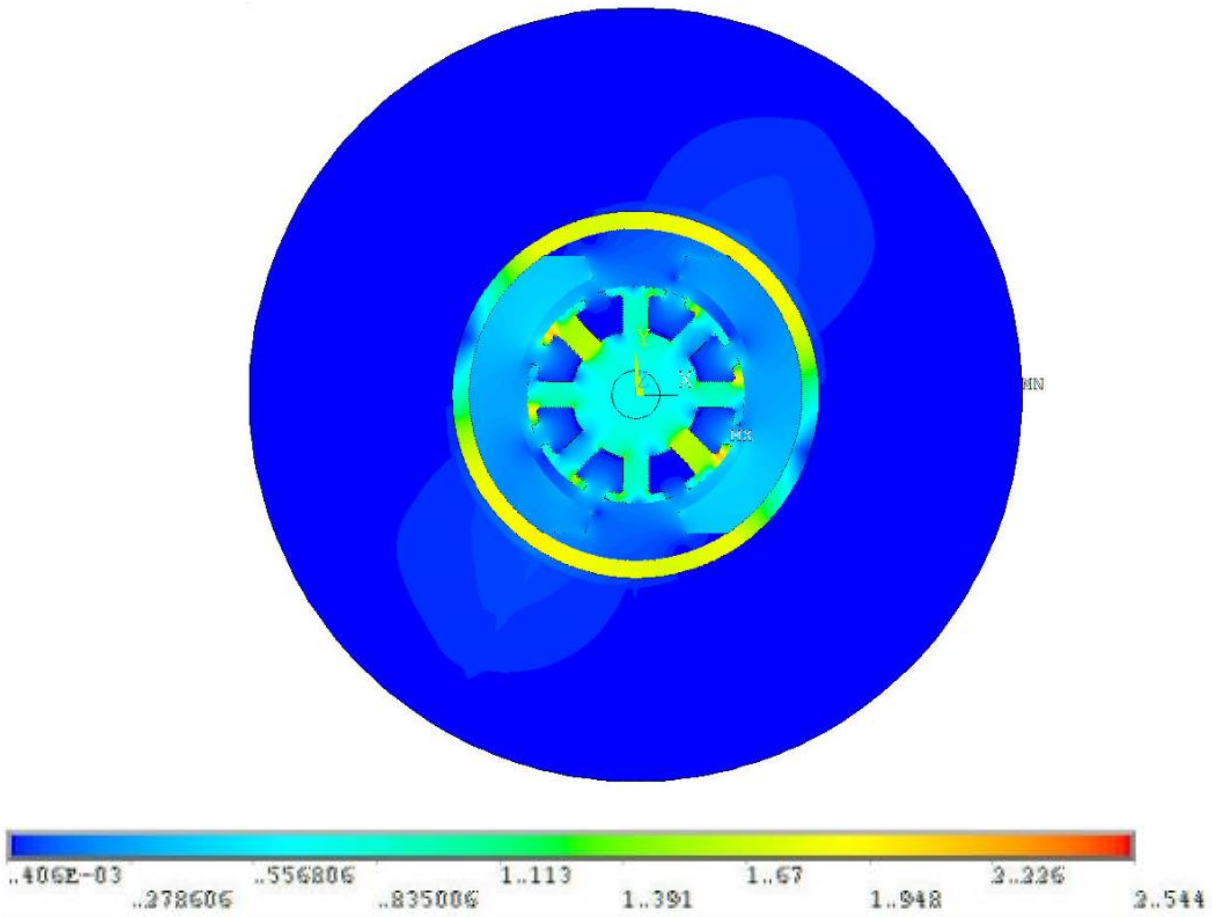


e) tloušťka jha statoru 2,6 mm

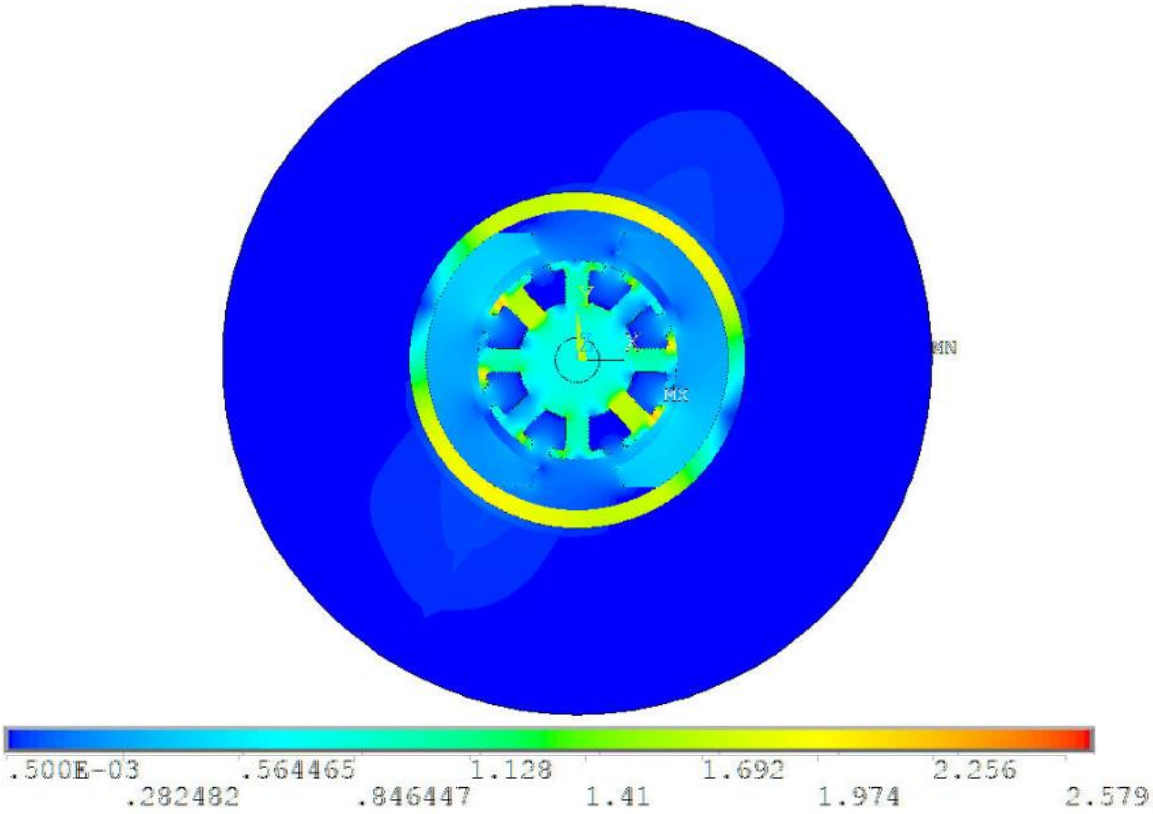
Obr. 4.1.1 Siločáry magnetického pole DC motoru

Z obrázku 4.1.1 vyplývá, že zvětšováním tloušťky jha a zmenšováním tloušťky permanentních magnetů dochází k lepšímu využití magnetického obvodu statoru. Magnetické pole se lépe uzavírá jeho objemem a není propouštěno ven v takovém množství. Tento fakt ovlivňuje i magnetický tok v rotoru.

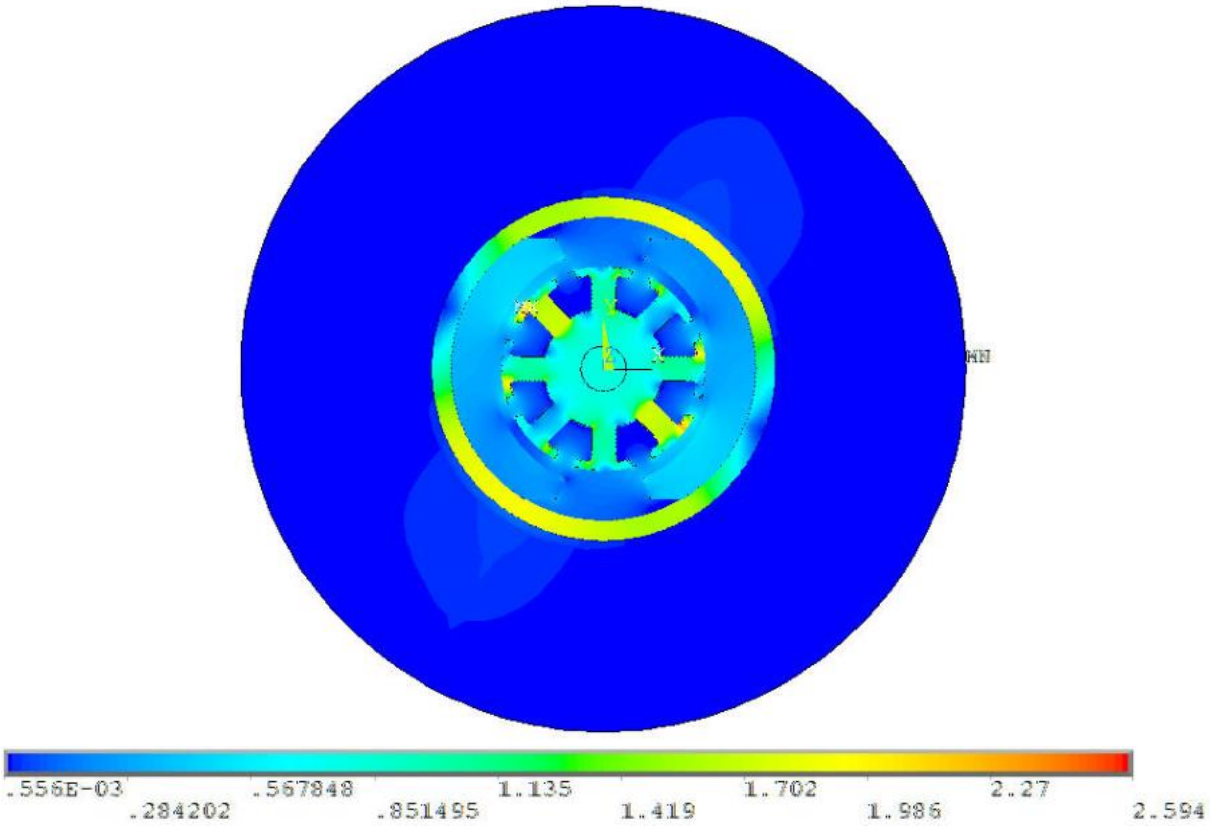
Oproti 3D modelu lze v obrázku 4.1.2a pozorovat extrémy hodnot magnetické indukce na hranách zubů, které dosahují hodnot 2,5 T. Indukce ve jhu rotoru se pohybuje okolo 1,5 T. Obě hodnoty postupně rostou se zvětšující se tloušťkou jha. Pro jho široké 2,6 mm je indukce v rotoru nejvyšší. V zubech dosahuje 2,6 T a ve jhu rotoru 1,7 T. Rozložení magnetické indukce pro jednotlivé rozměry zobrazují obrázky 4.1.2a-4.1.2e.



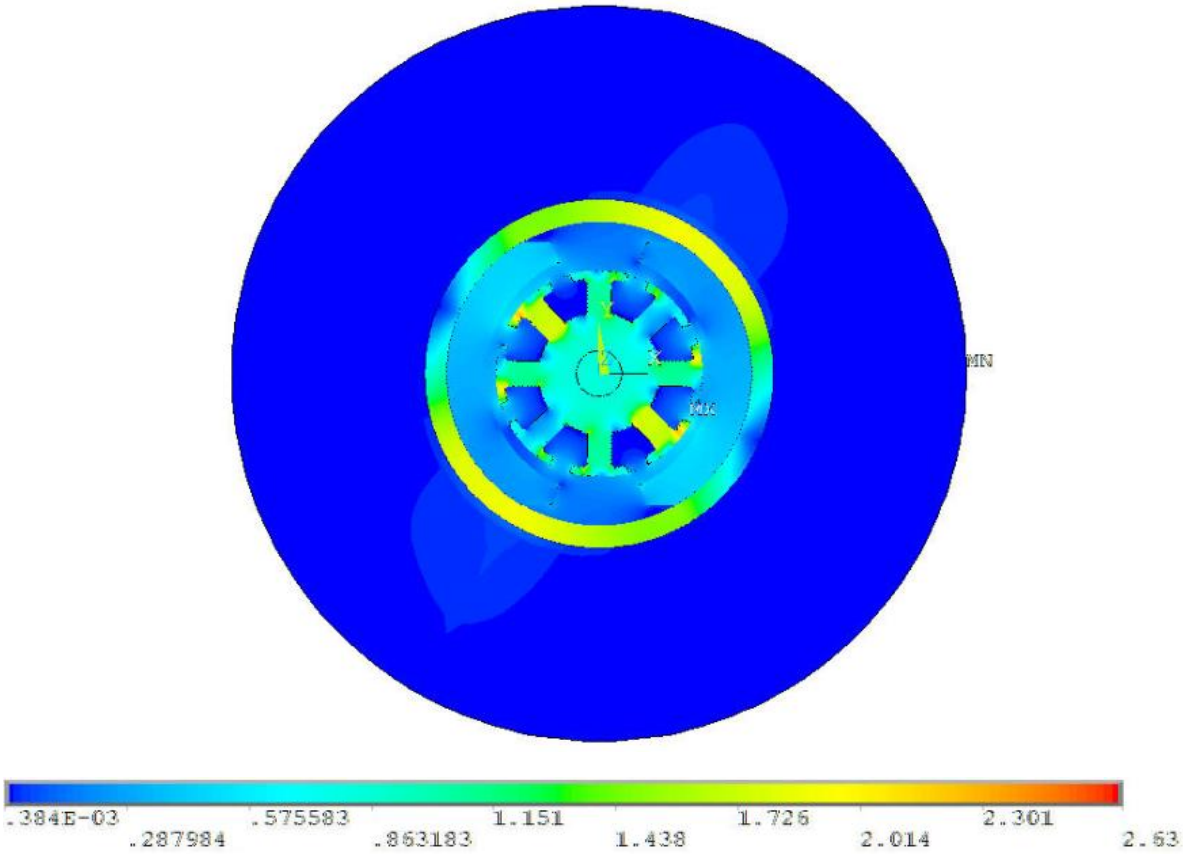
Obr. 4.1.2a Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 1,8 mm



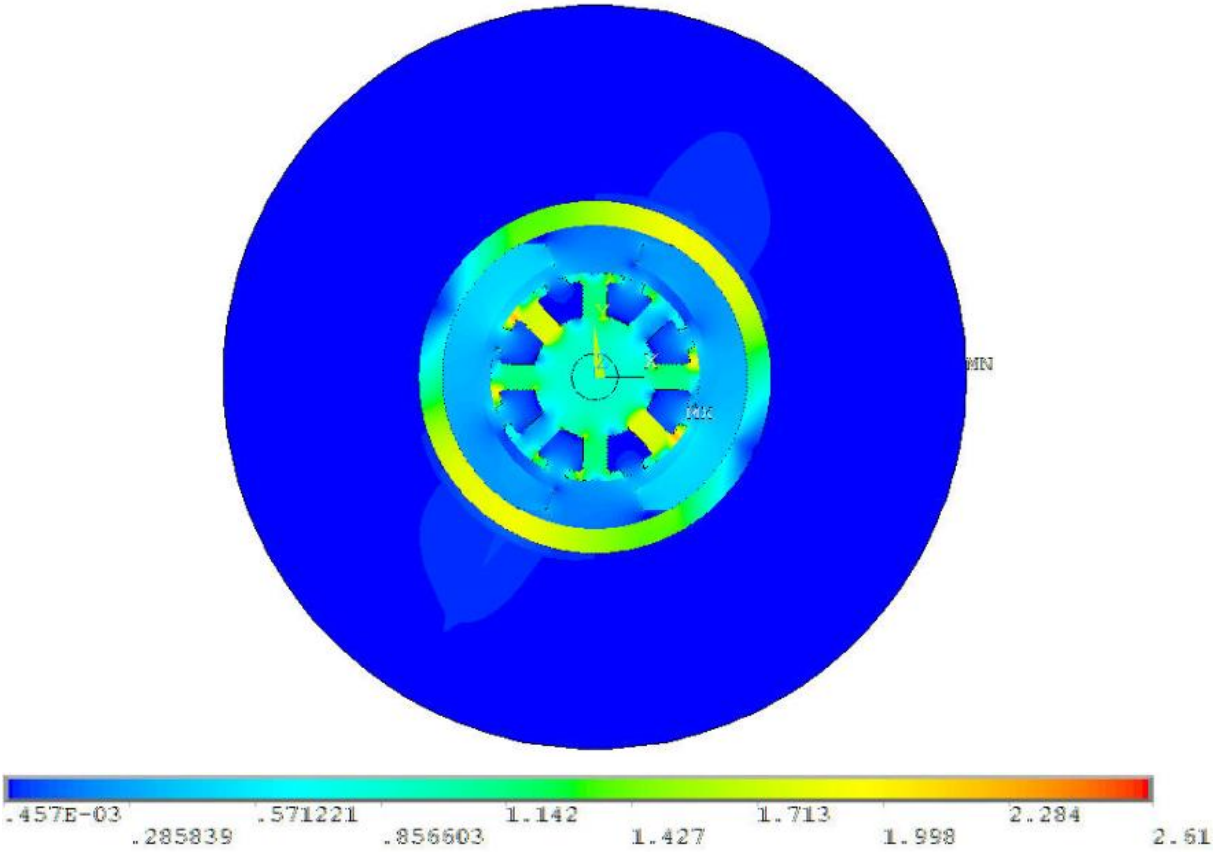
Obr. 4.1.2b Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2 mm



Obr. 4.1.2c Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,2 mm

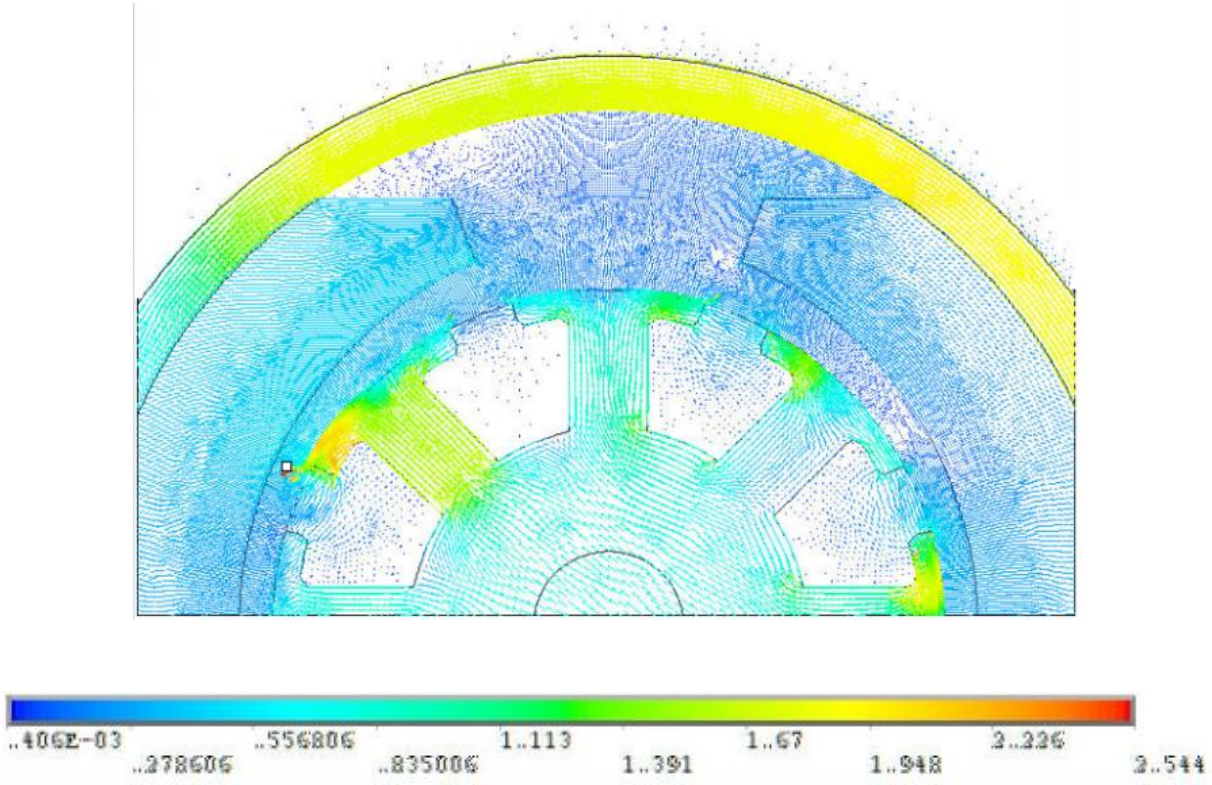


Obr. 4.1.2d Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,4 mm

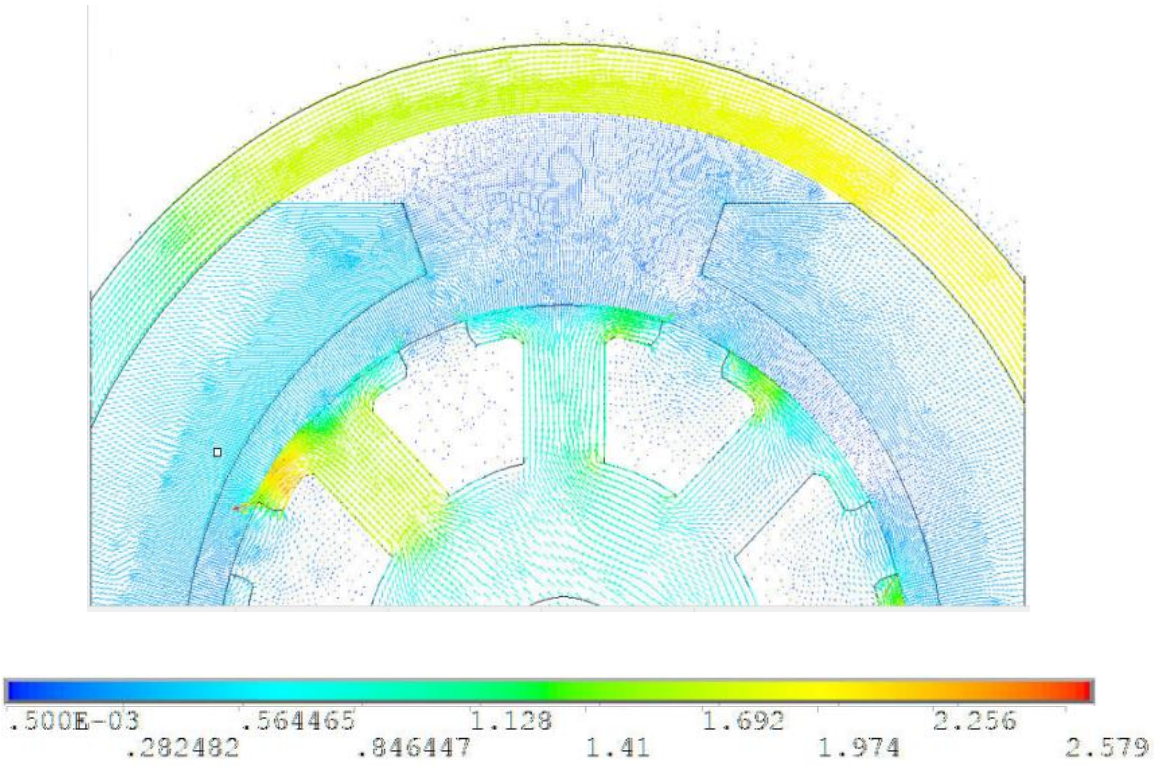


Obr. 4.1.2e Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,6 mm

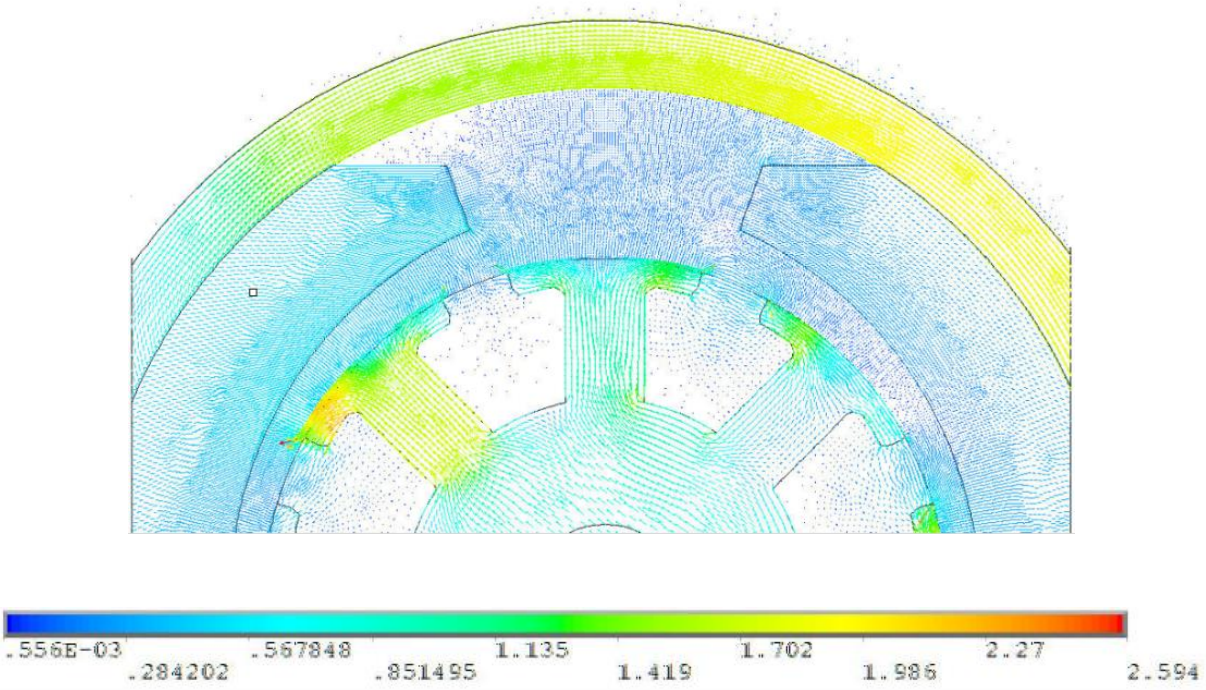
V následujících obrázcích 4.1.3a)-4.1.3e) jsou zobrazeny detaily vektorového zobrazení magnetické indukce. Magnetická indukce ve jhu statoru klesá s rostoucí tloušťkou jha. Na obrázku 4.1.3a magnetická indukce dosahuje místy 2,3 T, jak ukázal již 3D model v kapitole 3.5. Tato indukce postupně klesala s tloušťkou až na 1,8T, viz obrázek 4.1.3e.



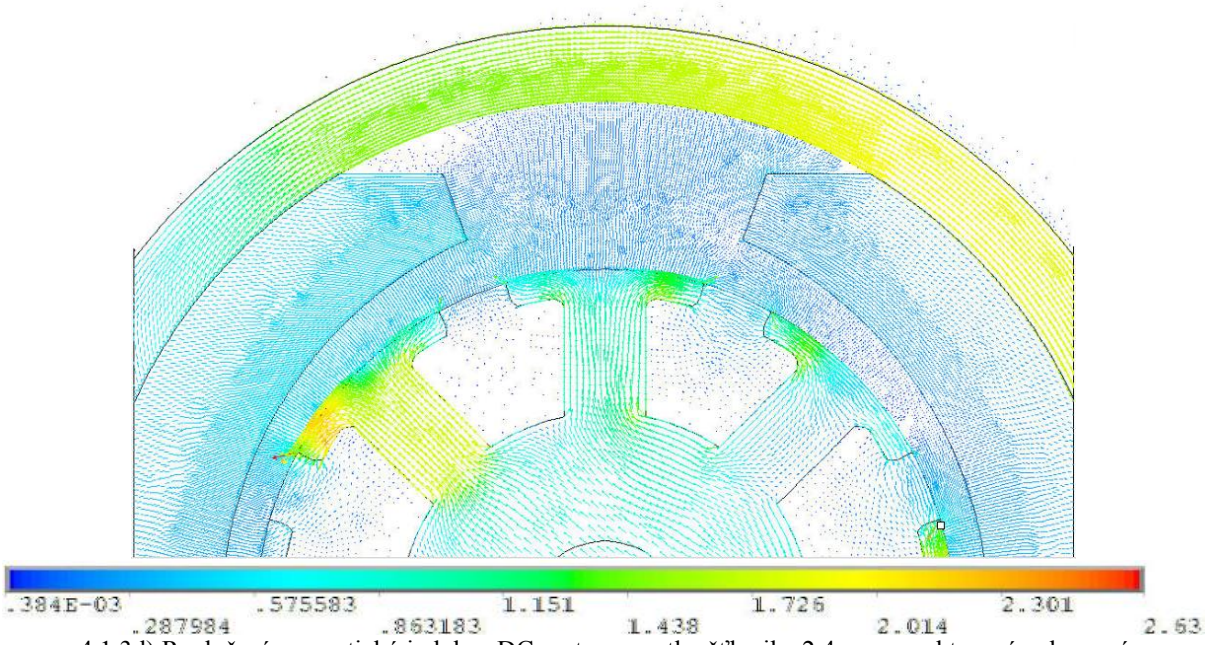
4.1.3a) Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 18 mm – vektorové zobrazení



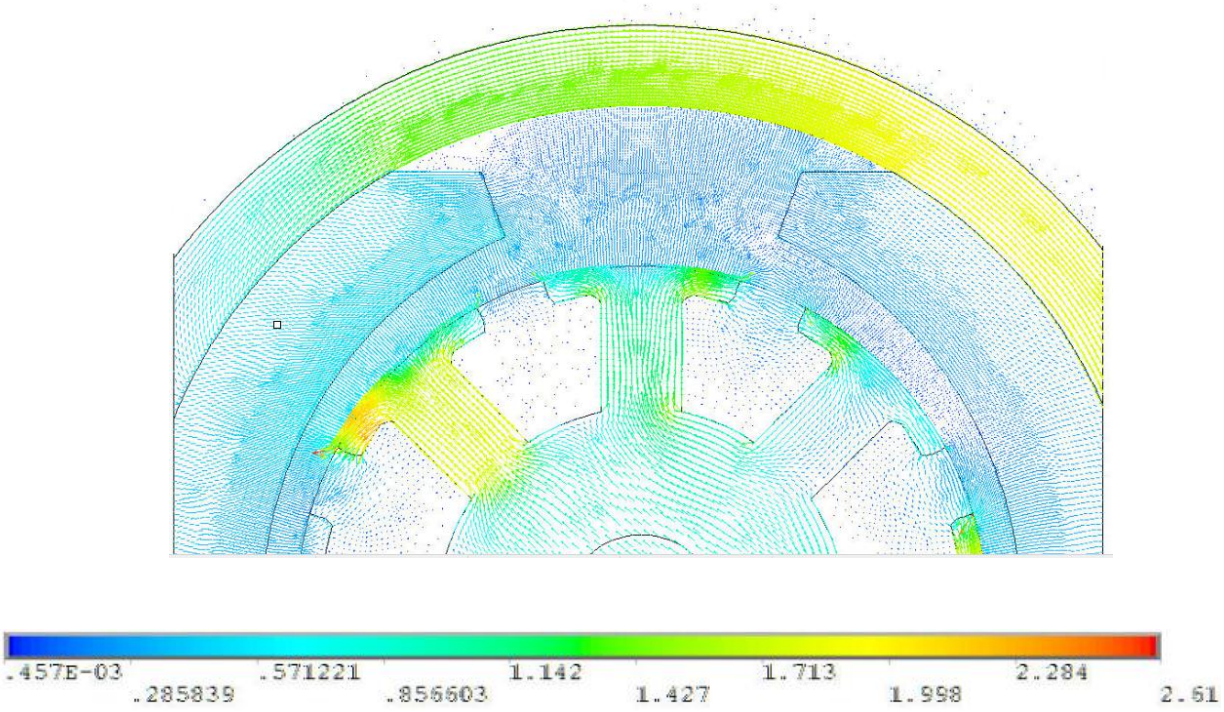
4.1.3b) Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,0 mm – vektorové zobrazení



4.1.3c) Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,2 mm – vektorové zobrazení



4.1.3d) Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,4 mm – vektorové zobrazení



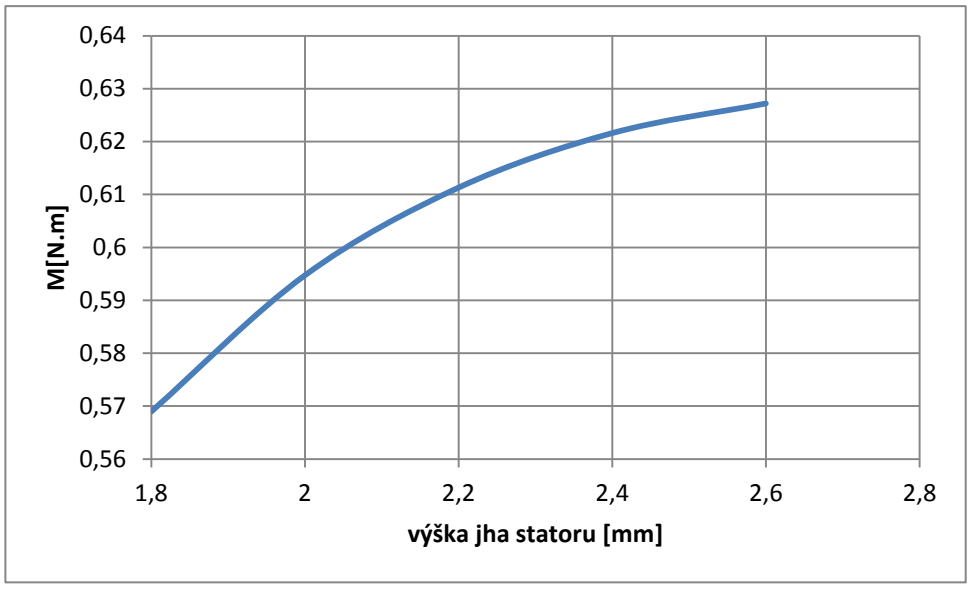
4.1.3d) Rozložení magnetické indukce DC motoru pro tloušťku jha 2,4 mm – vektorové zobrazení

4.2 Vliv optimalizace na moment stroje

Optimalizace má velký vliv na velikost točivého momentu stroje. V našem případě změnou magnetického obvodu moment rostl. Optimalizací bylo totiž dosaženo nárůstu magnetického indukčního toku ve vzduchové mezeře. Hodnoty momentu byly získány z 2D analýzy a jsou zaznamenány do tabulky 4.2.1 a vyneseny v grafu 4.2.1. Nárůst momentu oproti původní hodnotě dosahuje 10% původní hodnoty.

šířka PM	[mm]	5	4,8	4,6	4,4	4,2
Výška jha statoru	[mm]	1,8	2	2,2	2,4	2,6
M	[N.m/m]	50,8	53,1	54,58	55,5	56
M	[N.m]	0,56896	0,59472	0,611296	0,6216	0,6272

Tab. 4.2.1 Vliv optimalizace na velikost točivého momentu



Graf. 4.2.1 Vliv optimalizace na velikost točivého momentu

4.3 Vliv optimalizace na úsporu materiálů

Ze základních rozměrů palivové pumpy byl vypočítán objem jha statoru a permanentních magnetů, ze kterého se následně určila hmotnost daných komponent pro jednotlivé stupně optimalizace. Hodnoty jsou zaznamenány do tabulky 4.3.1. Úspora materiálu permanentních magnetů by mohla být až 18%. Oproti tomu spotřeba oceli stoupla o 40%. Vyšší cena permanentních magnetů, by však měla způsobit i cenovou úsporu.

Výpočet hmotnosti jha statoru						
objem	mm3	13299,2	14695,2	16074,9	17438,3	18785,4
hmotnost	kg	104,4	115,4	126,2	136,9	147,5
nárůst hmotnosti	g	0	11,0	21,8	32,5	43,1
Výpočet hmotnosti permanentních magnetů						
objem	mm3	30049,8	28648,9	27264,5	25896,7	24545,5
hmotnost	kg	135,2	128,9	122,7	116,5	110,5
pokles hmotnosti	g	0	6,3	12,5	18,7	24,8

Tab 4.2.2 Vliv optimalizace na úsporu materiálu

6. Závěr

Diplomová práce se věnovala tématu tvorby modelu magnetického pole a jeho následného řešení. V úvodu práce byla vypracována rešerše motorů palivových pump a jejich principiální funkce. Následující kapitola se zabývala teoretickým základem pro tvorbu magnetické a teplotní analýzy. Obsahuje popis metody konečných prvků a možností jejího využití v mnoha oborech. Dále se zde uvádí teoretický rozbor magnetického a teplotního pole. Čtvrtá část diplomové práce je zaměřena na postup tvorby a řešení modelů. Nejdříve se tvorbou 2d modelu v simulačním software ANSYS. Na jehož základě pak byl vytvořen kontrolní model v software FEMM, k ověření správnosti nastavení analýzy magnetického pole, při které docházelo k přesycení magnetického obvodu statoru. Po ověření této skutečnosti byl vytvořen 3D model magnetického pole, který vycházel s obdobnými hodnotami jako předchozí dvě analýzy. Výsledky jsou uvedeny a popsány v rámci kapitol. Teplotní analýza znázorňuje rozložení teploty v modelu stejnosměrného motoru palivové pumpy. Následující kapitola se zabývá optimalizací magnetického obvodu statoru na základě provedení několika 2D modelů magnetického pole za využití simulačního softwaru ANSYS. Při zachování vnějšího průměru stroje byly měněny rozměry jha statoru a permanentních magnetů, čímž bylo dosaženo lepšího využití magnetického obvodu stroje a nárůstu indukce ve vzduchové mezeře s rostoucí výškou jha statoru. Tato skutečnost má za následek i následné zvýšení momentu stroje. Optimalizací obvodu bylo zároveň dosaženo úspory materiálu permanentních ve výši 18 % původní hmotnosti.

Metoda konečných prvků řešená simulačním softwarem ANSYS je velmi silným nástrojem pro řešení modelů magnetických i teplotních polí, jejímž využitím bylo zjištěno přesycování magnetického obvodu statoru. Přesycení bylo způsobeno předimenzováním permanentních magnetů, čemuž neodpovídali rozměry statorového obvodu. Hodnoty magnetické indukce dosahovaly až 2,4 T. V rámci optimalizace obvodu byla tato hodnota snížena.

Použitá literatura:

1) Prof. Ing. BARTOŠ, Václav, CSc. 2011. *Elektrické stroje*. 1. vydání dotisk. Plzeň: Západočeská univerzita v Pzni. ISBN 978-80-7043-444-4.

2) Prof. Ing. BARTOŠ, Václav, CSc. 1986. *Elektrické stroje I,II*. 1. vydání. Plzeň: Ediční středisko VŠSE v Plzni. ISBN 55-061-86.

3) DOC. Ing. ČERVENÝ, Josef, CSc. Stavba elektrických strojů. Plzeň, 2012

4) Ing. KINDL, Vladimír, Ph.D.. *Modelování polí v elektrických strojů: Podpůrný text pro výuku KEV/MPS [online dokument]*. : 89 stran. Dostupné také z: https://courseware.zcu.cz/ [cit. 2015-05-01].

5) ANSYS, lnc. 2010. *ANSYS Mechanical APDL Element Reference [online dokument]*. Release 13.0. Cansburg, PA 15317. Dostupné také z: http://ansys.com [cit 2015-05-01].

6) ANSYS, LNC. *ANSYS HELP[online]*. Release 15.0. Dostupné také z: http://ansys.com [cit. 2015-05-01].

7) FUSEK, Martin a HALAMA, Radim. MKP a MHP – interaktivní studijní materiál [online].2012,s.221 [cit. 2015-05-01]

8) Mach, František. *Rotační ohřev nemagnetických válců ve stacionárním magnetickém poli*. Plzeň. Diplomová práce. FEL, ZČU. Vedoucí práce Ing. Pavel KarbanPh.D

9) VUT v Brně, *Teplotní pole v programu ANSYS*. : 16. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=8874 [cit. 2015-05-01]

10) Beneš, Jan. *Vliv relativní permeability na indukční ohřevy*. Plzeň 2007. Diplomová práce. FEL, ZČU. Vedoucí práce Prof. Ing. Jiří Kožený, CSc.

11) LEPKA, Jaroslav a Pavel GRASBLUM. 2011. *Použití mikroprocesorů pro Řízení pohonů s BLDC motory: Učební texty ke kurzu.* Brno: VUT v Brně. Dostupné také z: *http://www.crr.vutbr.cz/system/files/brozura_09_1111.pdf*

Příloha 1

1.1 Materiálová data pro simulaci magnetického pole:

Vinutí – měď: permeabilita $\mu_r = 1$

rezistivita $\rho = 0{,}0169\ \Omega/\mathrm{m}$

Palivo – benzin: permeabilita $\mu_r = 1$

Vzduch – permeabilita $\mu_r = 1$

Izolace – POM: permeabilita $\mu_r = 1$

Stator – ocel: B-H charakteristika

Hřídel – ocel: B-H charakteristika

Rotorové plechy – ocel: B-H charakteristika

B-H charakteristika plechů rotoru	
H[A/m]	B[T]
0	0
74,7	0,1
97,5	0,2
110	0,3
120	0,4
130	0,5
140	0,6
150	0,7
162	0,8
175	0,9
190	1
208	1,1
227	1,2
265	1,3
366	1,4
633	1,5
1490	1,6
3670	1,7
7420	1,8

Permanentní magnety: feritové magnety: permeabilita $\mu_r = 1$

koercitivní síla $H_c = 300000\ \mathrm{A/m}$

remanentní indukce $B_r = 0{,}4\ \mathrm{T}$

1.2 Materiálová data pro simulaci teplotního pole:

Vinutí – měď: měrná hustota $\rho = 8300$ kg/m^3
tepelná vodivost $\lambda = 401$ W.m^{-1}.°C^{-1}
měrná tepelná kapacita $C = 385$ J.kg^{-1}C^{-1}

Palivo – benzin: měrná hustota $\rho = 750$ kg/m^3
tepelná vodivost $\lambda = 0{,}116$ W.m^{-1}.°C^{-1}
měrná tepelná kapacita $C = 2160$ J.kg^{-1}C^{-1}

Permanentní magnety: feritové magnety: měrná hustota $\rho = 2600$ kg/m^3
tepelná vodivost $\lambda = 1{,}7$ W.m^{-1}.°C^{-1}
měrná tepelná kapacita $C = 710$ J.kg^{-1}C^{-1}

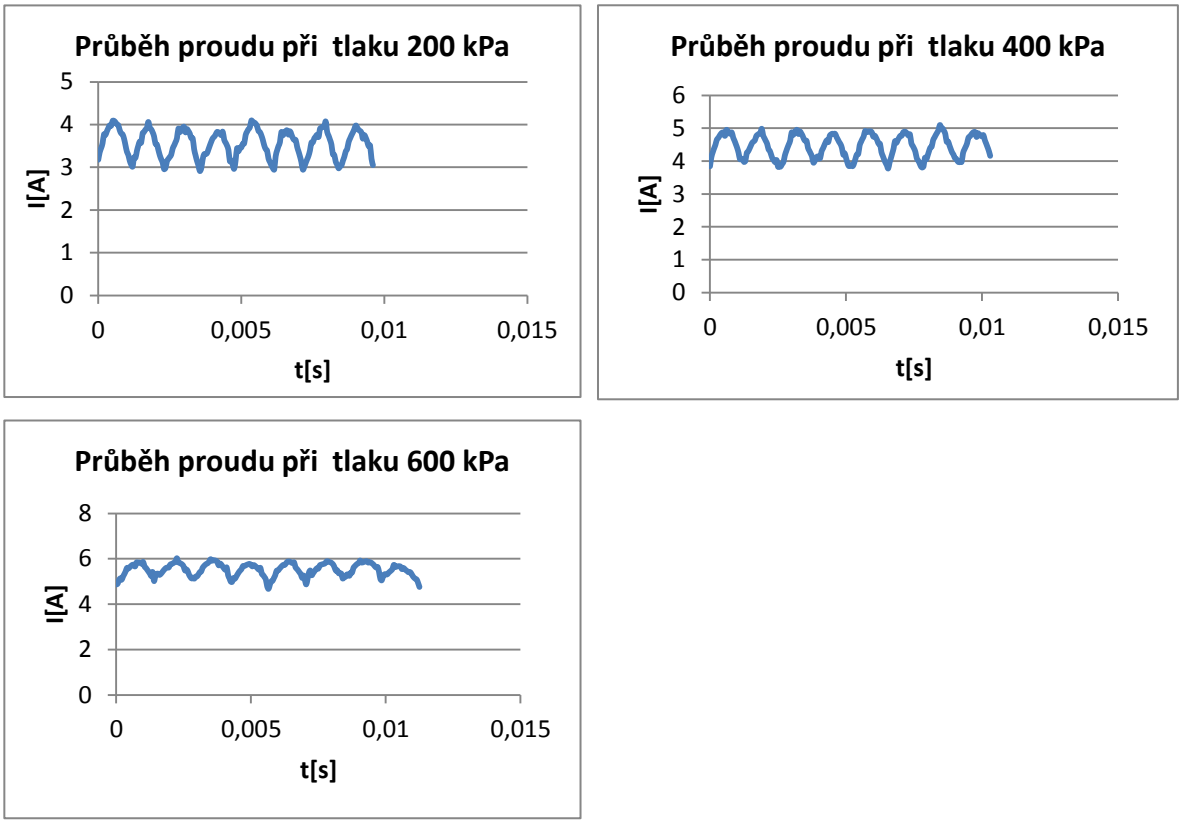
Izolace – POM: měrná hustota $\rho = 1410$ kg/m^3
tepelná vodivost $\lambda = 0{,}25$ W.m^{-1}.°C^{-1}
měrná tepelná kapacita $C = 2429$ J.kg^{-1}C^{-1}

magnetické obvody – ocel: měrná hustota $\rho = 7850$ kg/m^3
tepelná vodivost $\lambda = 434$ W.m^{-1}.°C^{-1}
měrná tepelná kapacita $C = 434$ J.kg^{-1}C^{-1}

Příloha 2

1.1 Měření elektrického proudu palivovou pumpou

Toto měření probíhalo z důvodu zjištění proudu palivovou pumpou. Palivová pumpa byla napájena napětím U=12,5 V. Proud byl měřen při třech provozních stupních tlaku palivové pumpy 200kPa, 400kPa a 600kPa. Tento tlak byl řízen tlakovým senzorem. Změřené hodnoty jsou vyneseny do následujících grafů.



Průběh proudu DC motoru palivové pumpy pro různé stupně zatížené

Vlivem komutace dochází ke zvlnění elektrického proudu. Pro simulace byla použita jeho efektivní hodnota.