

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Brno, 2024

Bc. Dávid Vaško



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

SYNCHRONNÍ MOTOR S PERMANENTNÍMI MAGNETY A ZVÝŠENOU ODOLNOSTÍ PROTI PORUCHÁM

FAULT TOLERANT PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Dávid Vaško

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

BRNO 2024

Diplomová práce

magisterský navazující studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a výkonová elektronika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Bc. Dávid Vaško

ID: 209262

Ročník: 2

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Synchronní motor s permanentními magnety a zvýšenou odolností proti poruchám

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Popište konstrukci a vlastnosti elektrických strojů se zvýšenou odolností proti poruchám.
2. Provedte návrh synchronního motoru se zvýšenou odolností proti poruchám v provedení s PM na povrchu rotoru.
3. Vytvořte elektromagnetický a tepelný model stroje v programu Ansys a/nebo Motor-CAD.
4. Provedte optimalizaci navrženého řešení pro dosažení vyšší účinnosti a momentové hustoty.
5. Provedte simulaci zadaných poruchových stavů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

literatura:

[1] PYRHONEN, Juha, JOKINEN, Tapani and HRABOVCOVA, Valerie. Design of Rotating Electrical Machines. 2nd edition. Wiley, 2013. 538 p. ISBN 978-1118581575.

[2] Hendershot, J. R. Jr., Miller, T.J.E. Design of Brushless Permanent-Magnet Motors. Oxford: Magna Physic Publishing and Clarendon Press, 1994.

[3] PETROV, Georgij N. Elektrické stroje 2. Praha: Academia, 1982. 728 s.

[4] Časopisecké a konferenční články z databáze IEEE Xplore. Např.:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/5601764>

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8607684>

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 20.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

doc. Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Táto diplomová práca sa zaoberá strojmi odolnými proti poruchám. V prvej časti je prebraná teória porúch elektrických strojov a možnosti zvyšovania poruchovej odolnosti najmä pre PMSM. V druhej časti je analytický výpočet hlavných rozmerov dvojitého trojfázového synchronného motoru s permanentnými magnetmi na povrchu potrebných pre vytvorenie modelu. V tretej časti sa práca zaoberá vytváraním modelu v programe ANSYS RMxprt, Maxwell 2D a Motor-Cad a porovnávaním výsledkov. V štvrtej časti bol stroj optimalizovaný na čo najväčšiu momentovú hustotu pri čo najvyššej účinnosti a postavený zjednodušený tepelný model vrátane olejového chladenia. Piata časť sa zaoberá simuláciami poruchových stavov: rozpojenie jedného trojfázového systému a jednofázový skrat. V šiestej časti bol navrhnutý motor s vnorenými magnetmi a simulovaný pri rovnakých poruchových stavoch.

Kľúčové slová

Poruchová odolnosť, magnety na povrchu, vnorené magnety, ANSYS RMxprt, Motor-Cad, Maxwell, OptiSlang, rozpojenie fáz, skrat

Abstract

This thesis deals with fault-tolerant machines. The first part covers the theory of faults in electrical machines and the possibility of increasing fault tolerance, especially for PMSM. The second part includes the analytical calculation of the main dimensions of the Dual-Three phase Fault-Tolerant surface mounted permanent magnet machine needed to create a RMxprt model. In the third part, the thesis deals with creating a model in ANSYS RMxprt, Maxwell 2D, and Motor-Cad and comparing the results. In the fourth part, the machine was optimized for the highest possible torque density at the highest efficiency and simplified thermal model was built including oil cooling. The fifth part deals with simulations of fault conditions: open circuit and single-phase short circuit. In the sixth part, a motor with interior permanent magnets was designed and simulated under the same fault conditions.

Keywords

Fault tolerance, surface mounted permanent magnets, interior permanent magnets, ANSYS RMxprt, Motor-Cad, Maxwell, OptiSlang, open circuit fault, short circuit fault

Bibliografická citácia

VAŠKO, Dávid. *Synchronní motor s permanentními magnety a zvýšenou odolností proti poruchám*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/160607>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce Ondřej Vítek.

Prohlášení autora o původnosti díla

| | |
|-----------------------------------|--|
| Jméno a příjmení studenta: | Dávid Vaško |
| VUT ID studenta: | 209262 |
| Typ práce: | Diplomová práce |
| Akademický rok: | 2023/24 |
| Téma závěrečné práce: | Synchronní motor s permanentními magnety a zvýšenou odolností proti poruchám |

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné 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 části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 20.5.2024

podpis autora

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Ondřejovi Vítkovi, Ph.D. za účinnú a metodickú, pedagogickú a odbornú pomoc a ďalšie cenne rady pri spracovaní mojej diplomovej práce.

V Brne dňa: 20.5.2024

podpis autora

Obsah

| | |
|--|-----------|
| ZOZNAM OBRÁZKOV | 9 |
| ZOZNAM TABULIEK | 10 |
| ÚVOD | 11 |
| 1. STROJE ODOLNÉ PROTI PORUCHÁM..... | 12 |
| 1.1 TYPY PORÚCH MOTOROV S PERMANENTNÝMI MAGNETMI | 13 |
| 1.2 ZVYŠOVANIE PORUCHOVEJ ODOLNOSTI..... | 15 |
| 1.2.1 Modulárne vinutie..... | 15 |
| 1.2.2 Segmentový stator | 16 |
| 1.2.3 Dizajn na obmedzenie skratového prúdu | 17 |
| 1.2.4 Stroje s viacfázovým vinutím..... | 18 |
| 1.2.5 Dvojité trojfázové stroje..... | 19 |
| 1.2.6 Dva stroje na spoločnej hriadeli..... | 19 |
| 2. ANALYTICKÝ VÝPOČET | 20 |
| 2.1 ZADANÉ PARAMETRE..... | 20 |
| 2.2 VÝPOČET HLAVNÝCH ROZMEROV..... | 20 |
| 2.3 VÝPOČET POČTU ZÁVITOV A ČINITEĽU VINUTIA | 21 |
| 2.4 VÝPOČET ROZMEROV PERMANENTNÉHO MAGNETU..... | 23 |
| 2.5 VÝPOČET ÚBYTKOV NAPÄTIA | 23 |
| 3. MODEL Y STROJA V PROGRAMOCH ANSYS | 27 |
| 3.1 RMXprt MODEL..... | 27 |
| 3.2 MOTORCAD MODEL..... | 30 |
| 3.3 MAXWELL 2D MODEL | 31 |
| 3.4 POROVNANIE VÝSLEDKOV | 32 |
| 4. OPTIMALIZÁCIA MOMENTOVEJ HUSTOTY A ÚČINNOSTI | 34 |
| 4.1 ANSYS OPTISLANG OPTIMALIZÁCIA | 34 |
| 4.2 DIZAJN 30387..... | 39 |
| 4.3 TEPELNÝ MODEL DIZAJN 30387..... | 41 |
| 5. PORUCHOVÉ STAVY | 43 |
| 5.1 ROZPOJENIE FÁZ..... | 44 |
| 5.2 JEDNOFÁZOVÝ SKRAT..... | 46 |
| 6. MODEL S VNORENÝMI MAGNETMI..... | 51 |
| 6.1 NÁVRH A OPTIMALIZÁCIA ROTORU | 51 |
| 6.2 DIZAJN 2417..... | 54 |
| 6.3 ROZPOJENIE FÁZ..... | 57 |
| 6.4 JEDNOFÁZOVÝ SKRAT..... | 58 |
| 7. ZÁVER..... | 62 |
| LITERATÚRA..... | 64 |
| ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK | 66 |

ZOZNAM PRÍLOH..... 69

ZOZNAM OBRÁZKOV

| | | |
|-------------|---|----|
| Obrázok 1.1 | Poruchy komponentov [4]..... | 13 |
| Obrázok 1.2 | Rozdelenie porúch v PMSM [4]..... | 14 |
| Obrázok 1.3 | Modulárne vinutie [6]..... | 16 |
| Obrázok 1.4 | Segmentový stator [6]..... | 16 |
| Obrázok 1.5 | a) modifikácia špičky na FTT b) modifikácia špičky ovinutého zubu [8]..... | 17 |
| Obrázok 1.6 | Presycovanie zubov v stroji s uzavretou drážkou..... | 18 |
| Obrázok 1.7 | Stator s polouzavretými drážkami [11]..... | 18 |
| Obrázok 1.8 | Stroj s dvojitým trojfázovým vinutím [6]..... | 19 |
| Obrázok 2.1 | Dvojvrstvové sústredené vinutie..... | 21 |
| Obrázok 2.2 | a) integračné medze pre činiteľ kroku b) fázory napätí cievok pre výpočet činiteľa rozlohy..... | 22 |
| Obrázok 2.3 | Fázorový diagram napätí a prúdov v počítanom stroji..... | 26 |
| Obrázok 3.1 | Statorový, rotorový plech a tvar drážky..... | 28 |
| Obrázok 3.2 | Vinutie motoru z programu Motor-Cad..... | 28 |
| Obrázok 3.3 | Momentová charakteristika modelu (vrátane účinnostnej mapy)..... | 30 |
| Obrázok 3.4 | Rozloženie magnetickej indukcie v zadanom pracovnom bode..... | 31 |
| Obrázok 3.5 | Model so sieťou v programe Maxwell..... | 31 |
| Obrázok 4.1 | Postup optimalizácie v OptiSlangu..... | 35 |
| Obrázok 4.2 | Pareto krivka z evolučného algoritmu..... | 36 |
| Obrázok 4.3 | Odozva cieľov na zmenu vstupných parametrov..... | 37 |
| Obrázok 4.4 | Pareto krivka v porovnaní s LAB modelmi..... | 38 |
| Obrázok 4.5 | Porovnanie rozmerov pôvodného a optimalizovaného motoru..... | 39 |
| Obrázok 4.6 | Rozdiel účinnostných máp upraveného a optimalizovaného stroja..... | 41 |
| Obrázok 4.7 | Chladenie stroja vrátane smeru prúdenia médií v chladičoch..... | 42 |
| Obrázok 5.1 | Možnosti rozloženia vinutí po obvode statoru..... | 43 |
| Obrázok 5.2 | Fázory napätí 6-fázový systém DL3..... | 44 |
| Obrázok 5.3 | Otepľovacia krivka hot spotu vinutia pri preťažovaní..... | 46 |
| Obrázok 5.4 | Externé napájanie modelu v Maxwell 2D..... | 46 |
| Obrázok 5.5 | Teploty v motore a) bezporuchový stav b) skrat (radiálny pohľad)..... | 47 |
| Obrázok 5.6 | Otepľovacia krivka hot spotu vinutia..... | 48 |
| Obrázok 5.7 | Priebehy prúdov počas skratu..... | 48 |
| Obrázok 5.8 | Priebeh momentu počas skratu..... | 49 |
| Obrázok 5.9 | Citlivostná analýza a) fázový posun b) I_d | 49 |
| Obrázok 6.1 | Princíp výpočtu rozmerov magnetu..... | 51 |
| Obrázok 6.2 | a) Legenda k tabuľke 6.1 b) Porovnanie rozmerov pred a po optimalizácii..... | 53 |
| Obrázok 6.3 | Účinnostná mapa IPM vrátane momentovej charakteristiky MNP..... | 55 |
| Obrázok 6.4 | Chladenie stroja vrátane teplôt pri menovitom zaťažení..... | 56 |
| Obrázok 6.5 | Priebeh teploty hot spotu vinutia pri preťažovaní..... | 58 |
| Obrázok 6.6 | a) Teploty MNP počas skratu b) Teploty IPM počas skratu..... | 59 |
| Obrázok 6.7 | Priebeh teploty hot spotu vinutia počas skratu..... | 60 |
| Obrázok 6.8 | Priebeh momentu počas skratu..... | 60 |
| Obrázok 6.9 | Priebehy fázových prúdov a skratového prúdu..... | 61 |

ZOZNAM TABULIEK

| | |
|--|----|
| Tabuľka 1.1 Pravdepodobnosti porúch motorov v letectve | 15 |
| Tabuľka 2.1 Požadované parametre stroja | 20 |
| Tabuľka 2.2 Parametre materiálu magnetu pre 20 °C..... | 23 |
| Tabuľka 3.1 Porovnanie RMXprt a analytického výpočtu pri 20°C..... | 29 |
| Tabuľka 3.2 Výsledky RMXprt pri 120 °C | 29 |
| Tabuľka 3.3 Výsledky Motor-Cad pri 120°C | 30 |
| Tabuľka 3.4 Výsledky Maxwell pri 120 °C..... | 32 |
| Tabuľka 3.5 Výsledky RMXprt, Motor-Cad, Maxwell pri 120°C..... | 32 |
| Tabuľka 4.1 Premenné parametre pri optimalizácii | 35 |
| Tabuľka 4.2 Požiadavky optimalizácie | 35 |
| Tabuľka 4.3 Ciele optimalizácie | 35 |
| Tabuľka 4.4 Výsledky 20 najlepších dizajnov | 38 |
| Tabuľka 4.5 Porovnanie pôvodného motoru s optimalizovaným a upraveným..... | 40 |
| Tabuľka 5.1 Kritériá výberu rozloženia vinutia..... | 43 |
| Tabuľka 5.2 Parametre motoru pri rozpojení fáz | 45 |
| Tabuľka 5.3 Parametre motoru počas skratu | 47 |
| Tabuľka 6.1 Premenné parametre pri optimalizácii | 53 |
| Tabuľka 6.2 Požiadavky optimalizácie | 53 |
| Tabuľka 6.3 Porovnanie motoru s magnetmi na povrchu s modelom s vnorenými..... | 54 |
| Tabuľka 6.4 Parametre motoru pri rozpojení fáz | 57 |
| Tabuľka 6.5 Parametre motoru počas skratovej poruchy..... | 59 |

ÚVOD

V súčasnosti je kladený stále väčší dôraz na elektrifikáciu v rôznych odvetviach s cieľom zvýšenia účinností a zníženia emisií. S týmto trendom prichádza aj požiadavka na poruchovú odolnosť. Napriek snahám nie je možné úplne eliminovať výskyt porúch, čo vyžaduje, aby tieto stroje boli schopné fungovať aj v prípade výskytu určitých typov porúch.

Najmä v letectve, elektrických vozidlách, pohonoch a veterných elektrárňach je odolnosť voči poruchám kľúčová, pretože stroj tvorí základnú zložku na realizáciu konverzie energie. V minulosti sa pre použitie v letectve skúmali spínané reluktančné stroje pre ich vysokú spoľahlivosť a prirodzenú odolnosť voči poruchám. Avšak nevýhodou pre tento typ strojov je v porovnaní so synchronnými strojmi s permanentnými magnetmi ich momentová alebo výkonová hustota. Synchronne stroje s permanentnými magnetmi sú známe najmä svojou vysokou účinnosťou, ale aj menšími pulzáciami momentu, nižším hlukom a menšími vibráciami. Preto sa pozornosť obrátila práve na tento typ stroja, jeho hlavným problémom však je, že nie je prirodzene odolný voči poruchám, a preto je potrebné implementovať rôzne úpravy na zvýšenie jeho poruchovej odolnosti.

V diplomovej práci budú rozobrané možnosti úprav na zvýšenie poruchovej odolnosti. Následne bude navrhnutý trojfázový synchronný motor s magnetmi na povrchu, ktorý bude ďalej upravený s cieľom zvýšiť jeho odolnosť voči poruchám.

V úvodnej kapitole tejto práce sú podrobnejšie predstavené podmienky, ktoré musí stroj spĺňať, aby bol odolný voči poruchám. Potom sú stručne definované najčastejšie typy porúch. A nasleduje analýza rôznych možností úprav na zlepšenie poruchovej odolnosti.

V druhej kapitole je uvedený analytický výpočet stroja. Počítané sú najmä hlavné rozmery rotorového a statorového zväzku, závitov a veľkosť permanentného magnetu. Teda kľúčové parametre potrebné pre vytvorenie modelu stroja v programe RMxprt, ktorý je opísaný v kapitole číslo tri.

V tretej kapitole sú tiež vytvorené modely v programoch Motor-Cad a Maxwell 2D na overenie a spresnenie výsledkov. Štvrtá kapitola sa zaoberá optimalizáciou momentovej hustoty a účinnosti a zahŕňa aj jednoduchý tepelný model stroja s olejovým chladením.

V piatej kapitole tejto práce sú predstavené výsledky simulácií poruchových stavov týkajúce sa konkrétne navrhnutého stroja s magnetmi na povrchu. Ide o simuláciu rozpojenia jedného trojfázového systému a jednofázového skratu. Tomu sa okrem iného venuje aj kapitola šesť, ktorá je doplnená o stručný návrh a optimalizáciu stroja s vnorenými magnetmi.

1. STROJE ODOLNÉ PROTI PORUCHÁM

Stroje odolné proti poruchám, v skratke FTM (Fault Tolerant Machines), sú stroje, ktorých úlohou je dočasnú poruchu buď vydržať bez toho aby sa poškodili, napríklad medzi fázový alebo trojfázový skrat, alebo pracovať aj počas poruchových stavov, napríklad rozpojenie jednej fáze alebo jej skratovanie.

Aby to bolo možné docieľiť, je potrebné dodržať nasledovné podmienky:

- Elektrické oddelenie fáz – táto podmienka je dosiahnuteľná prostým napájaním každej fáze zvlášť z vlastného H-mostíku.
- Magnetické oddelenie fáz – nutnosť malej vzájomnej indukčnosti medzi fázami, aby sa predišlo spájaniu toku zo zdravých fáz so skratovanou fázou, čo by mohlo viesť na veľký skratový prúd, veľké Joulove straty, následný nárast teploty a brzdného momentu.
- Obmedzenie skratového prúdu – skratový prúd je obmedzovaný fázovým odporom a indukčnosťou. Z toho vyplýva, že je možné ho napríklad obmedziť zvýšením rozptylovej indukčnosti prispôbením geometrie drážky.
- Fyzické oddelenie fáz – zamedzuje vzniku porúch typu fáza-fáza, ktoré sú veľmi kritické, pretože môžu spôsobiť vyradenie až dvoch fáz. Toto oddelenie je možné dosiahnuť napríklad navinutím každej fáze na samostatný zub so samostatnou cievkou na drážku.
- Tepelná izolácia medzi fázami – pri zabezpečení dostatočného odvodu tepla z povrchu statoru je najväčší nárast tepla práve v jednotlivých drážkach. Toto v spojení s fyzickým oddelením fáz vedie na efektívnu termálnu izoláciu medzi fázami.
- Počet fáz – motor by mal byť schopný produkovať menovitý moment aj počas poruchy jednej z fáz, z čoho je zrejmé, že počet fáz by mal byť vyšší ako 3.

Stroj odolný proti poruchám nemusí nutne spĺňať všetky podmienky. To, ktoré by mal spĺňať závisí od finálnej aplikácie a aj očakávaných porúch.

Ako stroje odolné proti poruchám sa zvyčajne používajú asynchrónne motory, spínané reluktančné motory alebo synchronné motory s permanentnými magnetmi.

Spínané reluktančné motory majú veľkú výhodu v tom, že sú prirodzene odolné voči poruchám. Táto odolnosť je daná ich konštrukciou, ktorá zabezpečuje elektrickú a magnetickú izoláciu medzi fázami. Z ich konštrukcie tiež pramení znížené riziko poruchy typu fáza-fáza, pretože konce vinutí sa neprekrývajú a taktiež nepotrebujú vysokú fázovú indukčnosť na obmedzenie skratových prúdov. Ďalšou výhodou je, že nemajú v sebe žiadny permanentný magnet, tým pádom sú lacnejšie a nie sú limitované maximálnou prístupnou teplotou magnetu. Majú robustný rotor, ktorý umožňuje operovať pri vyšších rýchlostiach. Ich hlavnou nevýhodou a dôvodom, prečo sa

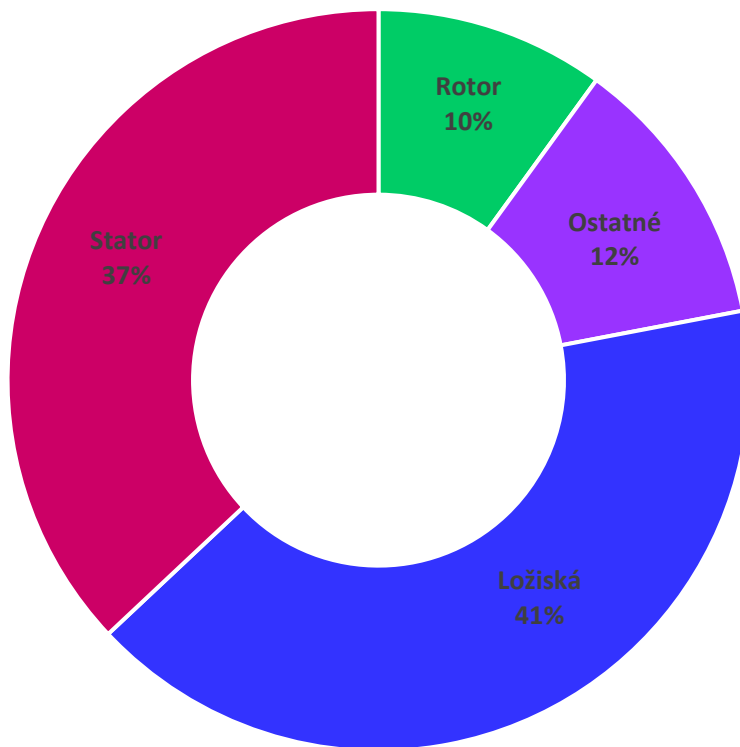
využívajú menej často (v letectve vôbec) je, že oproti PMSM majú menšiu hustotu výkonu, momentu a tak isto aj nižšiu účinnosť. Medzi ďalšie nevýhody patrí vysoké zvlnenie momentu, silné vibrácie a hluk.

Hlavnou nevýhodou synchronných motorov s permanentnými magnetmi je, že ako také nie sú odolné proti poruchám a je potrebné zavádzať určité konfigurácie stroja, aby dosiahol určitú poruchovú odolnosť. Jednou z ďalších nevýhod je, ho je náročnejšie odbudiť. Ich výhody však výrazne prevyšujú ich nevýhody a preto sú PMSM viac používané ako spínané reluktančné motory. Medzi výhody patrí napríklad vysoká momentová a výkonová hustota a taktiež účinnosť. Oproti reluktančným strojom majú aj menšie zvlnenie momentu a sú menej hlučné. A preto aj v tejto práci budú rozoberané najmä synchronne stroje s permanentnými magnetmi a ich rôzne úpravy pre zvýšenie poruchovej odolnosti.

Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [2] a [3].

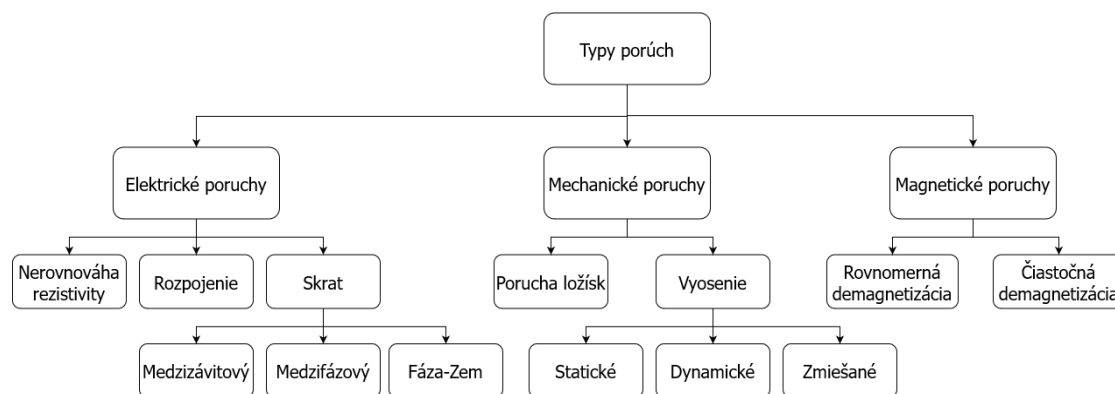
1.1 Typy porúch motorov s permanentnými magnetmi

V elektrických strojoch môžu nastať poruchy v rotore, statoru a mechanických komponentoch stroja. Podľa [4] a z obrázku 1.1 je zrejmé, že asi 41% porúch súvisí s mechanickými komponentami, 37% súvisí so statorom, 10% je spojených s rotorom a zvyšných 12% je klasifikovaných ako iné.



Obrázok 1.1 Poruchy komponentov [4]

Obrázok 1.2 zobrazuje jednotlivé rozdelenia porúch PMSM na elektrické, mechanické a magnetické. V tejto práci bude venovaná pozornosť najmä elektrickým poruchám.



Obrázok 1.2 Rozdelenie porúch v PMSM [4]

Elektrické poruchy sa ďalej typicky delia na poruchu nevyváženosti odporu, poruchu rozpojenia fáze alebo skratovú poruchu vo vinutí statoru. Skrat sa ešte ďalej delí na medzi závitový, medzi fázový a zemný skrat. Skrat môže zvyčajne vzniknúť ako medzi závitová porucha, ktorá môže prerásť až do zemného poprípade medzifázového skratu, ak nie je použitá dostatočná prevencia.

Porucha nevyváženosti odporu, kde odpor jednej fáze sa zvýši, zatiaľ čo indukčnosť ostáva nezmenená je bežná porucha, ktorá môže vzniknúť v akomkoľvek pripojení elektrických strojov. Môže byť spôsobená zlým spracovaním, tepelnými cyklami a vibráciami alebo poškodením kontaktov napríklad koróziou. Porucha potom spôsobuje nevyváženosť statorových napätí a prúdov, zväčšuje pulzáciu momentu, znižuje moment a samozrejme zvyšuje straty a tým môže spôsobovať nadmerné zahrievanie.

Medzizávitová porucha je jednou z najčastejších porúch v elektrických strojoch. Vzniká v jednej fáze stroja medzi dvoma alebo viacerými závitmi zlyhaním izolácie statorového vinutia. Porucha môže byť spôsobená prechodovým prepätím statorového vinutia počas rozbehu, veľkou teplotou, vibráciami alebo dlhodobým prevádzkovaním vo vlhkom, teplom a drsnom prostredí. Táto porucha potom spôsobuje veľký cirkulačný prúd v skratovaných závitoch a to môže viesť až na demagnetizáciu magnetov.

Odpojenie fáze zvyčajne vzniká, keď je fázové vinutie odpojené od zdroja a to môže byť spôsobené vnútorným zlyhaním statorového vinutia alebo mechanickým zlyhaním svoriek stroja. Táto porucha môže spôsobovať pulzácie elektromagnetického momentu a prípadne aj mechanické vibrácie.

Podľa [5] sú v tabuľke 1.1 znázornené pravdepodobnosti výskytu porúch v motoroch využívaných v letectve vzťahnutých na letovú hodinu. Z tabuľky je tiež zrejmé, že najväčšia pravdepodobnosť je pre skrat a odpojenie vinutia motoru.

Tabuľka 1.1 Pravdepodobnosti porúch motorov v letectve

| Typ poruchy | Poruchovosť/za letovú hodinu |
|---------------------------------------|------------------------------|
| Prerušený obvod vinutia motoru | $1,3 \times 10^{-5}$ |
| Prerušený obvod na svorkách | 1×10^{-6} |
| Ďalšie poruchy súvisiace s rozpojením | 4×10^{-7} |
| Skratovaný obvod vinutia motoru | $6,7 \times 10^{-6}$ |
| Skratovaný obvod na svorkách | 1×10^{-6} |
| Iné skratové poruchy | 4×10^{-7} |
| Celková poruchovosť | $2,25 \times 10^{-5}$ |

Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [4] a [5].

1.2 Zvyšovanie poruchovej odolnosti

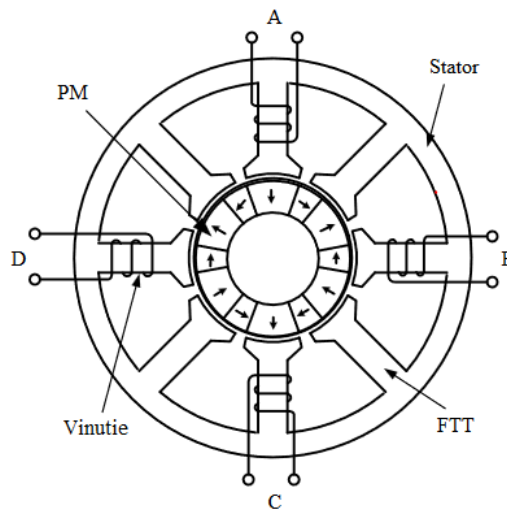
V tejto kapitole budú uvedené najčastejšie dizajny a úpravy na zvýšenie odolnosti proti poruchám hlavne synchronných strojov s permanentnými magnetmi.

1.2.1 Modulárne vinutie

Za modulárne vinutie môžeme podľa [6] považovať také vinutie, ktorého každá cievka je navinutá na samostatnom zube a každá drážka obsahuje iba jednu fázu. To je možné dosiahnuť napríklad tak, že sa navinie každý druhý zub statoru ako je znázornené na obrázku 1.3. Zub, ktorý nie je ovinutý cievkou sa potom nazýva ako FTT (fault tolerant tooth). Takýto druh vinutia sa nazýva aj jednovrstvové vinutie.

Výhodou tohto vinutia je elektromagnetické oddelenie jednotlivých fáz a tak isto aj úplné fyzické oddelenie, čo takmer vylučuje medzifázové poruchy a vedie k lepšej tepelnej izolácii medzi fázami pri prípadnom prechode skratového prúdu. Tým, že cievky sa neprekrývajú sú tiež menšie čelá vinutí, tým pádom sa znižujú aj straty v medi a skracuje sa celková dĺžka zväzku. Týmto typom vinutia je tiež možné dosiahnuť väčšieho činiteľa plnenia drážky a je tiež jednoduchšie na výrobu v porovnaní s dvojrstvovými vinutiami.

Podľa [6] sa magnetické väzby medzi fázami dajú ešte viac obmedziť vhodnou voľbou počtu drážok statoru a počtu pólov rotoru, ak sú tieto čísla blízko, magnetické väzby budú zmenšené.

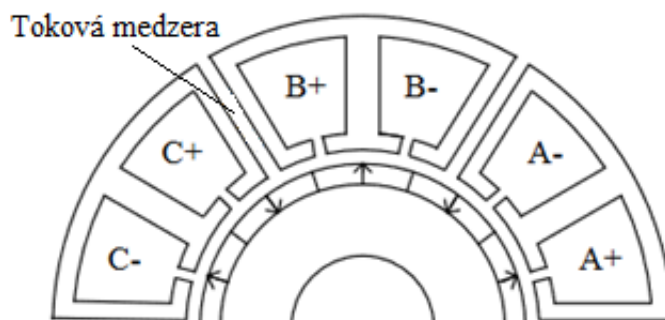


Obrázok 1.3 Modulárne vinutie [6]

1.2.2 Segmentový stator

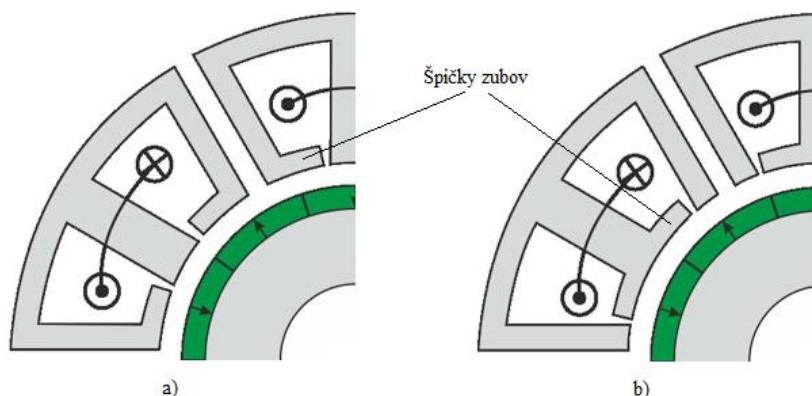
Definícia tejto topológie sa u viacerých autorov líši. Avšak podľa [6] sa dá segmentový stator predstaviť ako stator, ktorý je poskladaný z viacerých častí, ako je znázornené na obrázku 1.4. Jednotlivé segmenty statora vznikli tak, že sa do neovinutých zubov vložila takzvaná toková medzera. Vinutie týchto strojov je tým pádom izolované samostatným neovinutým zubom a tiež tokovou medzerou, čo vedie na väčšiu nezávislosť fáz a tým aj zvýšenú poruchovú odolnosť. V [7] bol predstavený stator, z ktorého je možné odstrániť moduly s poruchou a stroj je schopný pracovať ďalej s menším momentom.

Modulárne stroje s väčším počtom statorových drážok ako počet pólov majú po zavedení tokovej medzery menší priemerný elektromagnetický moment vďaka menšiemu činiteľu vinutia a menšej koncentrácii toku. Avšak u strojov s menším počtom drážok ako počet pólov sa priemerný elektromagnetický moment môže zvýšiť pri použití vhodnej šírky tokovej medzery vďaka vyššiemu činiteľu vinutia a koncentrácii toku.



Obrázok 1.4 Segmentový stator [6]

Podľa [8] je možné pomocou šírky špičky zubu na ovinutých zuboch kompenzovať nižší činiteľ vinutia u strojov s väčším počtom drážok ako pólův a tým navrátiť priemerný moment na pôvodnú hodnotu alebo ho dokonca zvýšiť. Pre stroje s počtom drážok menším ako je počet pólův možno zvýšiť priemerný moment vhodnou voľbou šírky špičky nenavínutých zubův.



Obrázok 1.5 a) modifikácia špičky na FTT b) modifikácia špičky ovinutého zubu [8]

1.2.3 Dizajn na obmedzenie skratového prúdu

V PMFT by mal byť skratový prúd obmedzený na hodnoty približne menovitého prúdu aby sa predišlo katastrofálnym škodám. Kľúčovým spôsobom, ako znížiť skratový prúd je zvýšenie indukčnosti, keďže zvyšovaním odporu by rástli aj straty vo vinutí. Zvýšenie indukčnosti je možné docieľiť zmenou geometrie satorových drážok alebo použitím rotoru s vnorenými magnetmi. V [6] je súhrn niekoľkých spôsobov ako limitovať skratové prúdy.

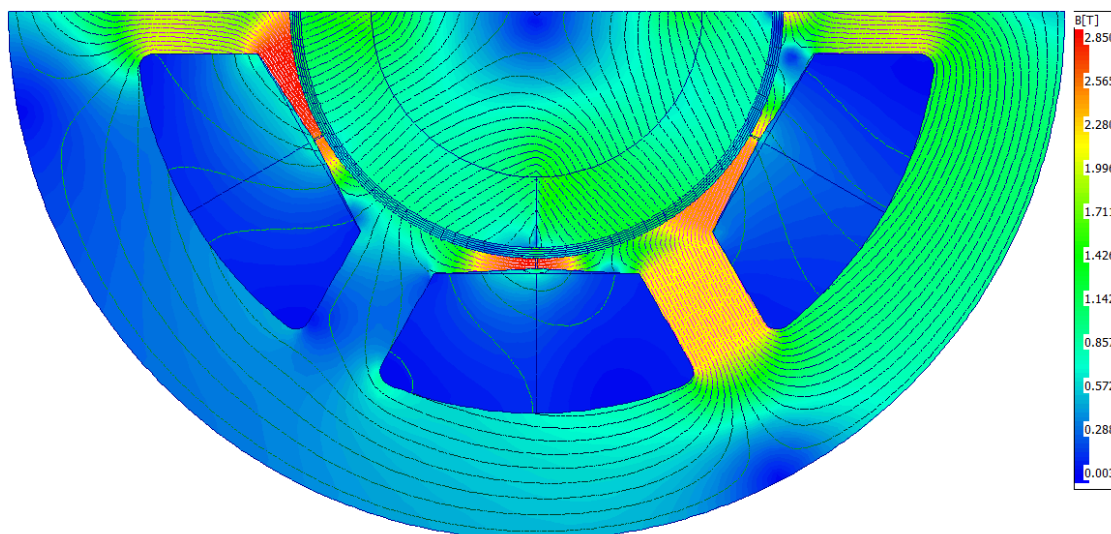
V [9] boli otvory drážok naplnené polo magnetickými klinmi vyrobenými zo železo-epoxidovej živice s relatívnou permeabilitou približne 3. Zmenou pomeru železa a epoxidu je možné meniť veľkosť relatívnej permeability a tým limitovať skratové prúdy.

Podľa [10] je možné značne zvýšiť fázovú indukčnosť úplným uzavretím drážky a tým redukovať skratové prúdy a tak isto aj straty vírivými prúdmi v rotore. Avšak ako je znázornené na obrázku 1.6 problém pri tomto dizajne môže byť veľké presycovanie špičiek zubův.

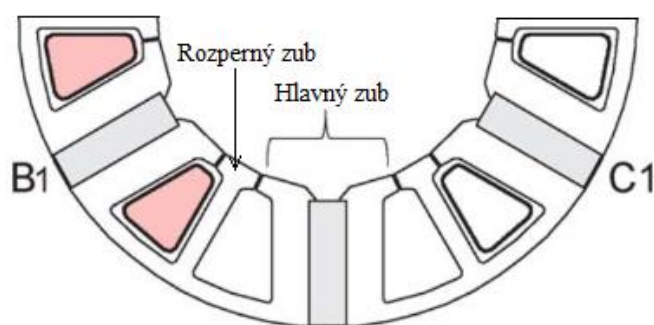
V [11] boli na zvýšenie fázovej indukčnosti použité polouzavreté drážky. V tomto dizajne bol tiež použitý rozperný zub v strede drážky na zaistenie magnetickej a fyzickej izolácie fáz ako je znázornené na obrázku 1.7. Nevýhodou polouzavretých drážok je, že tento dizajn môže zvyšovať rozptylový tok a znižovať moment.

Pri všetkých úpravách na zníženie skratového prúdu sa v podstate len zvyšuje fázová indukčnosť stroja aby prúd, ktorý vznikne vplyvom indukovaného napätia bol čo

najmenší, treba však brať ohľad na to, že takto upravené stroje majú potom v bezporuchovej prevádzke väčšie úbytky na tejto indukčnosti a sú celkovo „mäkšie“ ako stroje bez týchto úprav a taktiež majú nižšiu momentovú hustotu.



Obrázok 1.6 Presycovanie zubov v stroji s uzavretou drážkou



Obrázok 1.7 Stator s polouzavretými drážkami [11]

1.2.4 Stroje s viacfázovým vinutím

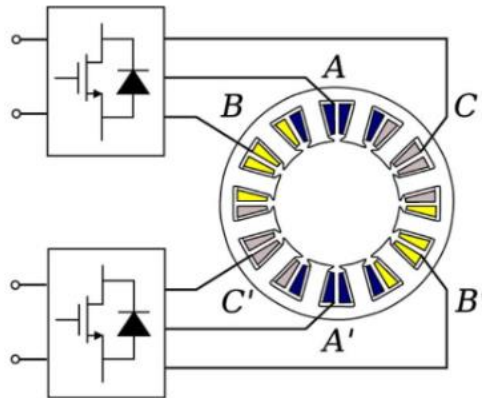
Za viacfázové stroje sú považované také stroje, ktoré majú viac ako tri fáze. V porovnaní s trojfázovými strojmi majú viacfázové stroje veľa výhod, napríklad možnosť rozdelenia výkonu, menšie zvlnenie momentu, menší pomer výkonu na fázu a majú vysokú poruchovú odolnosť. Prakticky väčší počet fáz dáva stroju viac stupňov voľnosti, ktoré môžu byť efektívnejšie použité na riadenie post poruchového chodu a tým sa vysporiadať s rôznymi poruchami. Tieto stroje teda vykazujú výbornú poruchovú odolnosť aj vďaka vhodne zrealizovanému riadeniu stroja, čo je zároveň ich najväčšia nevýhoda, pretože tieto riadiace jednotky sú veľmi drahé.

Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [6].

1.2.5 Dvojité trojfázové stroje

Dvojité trojfázové stroje sú také, ktoré majú dve trojfázové vinutia na statore, ktoré sú na sebe nezávislé. Tieto stroje je možné riadiť dvoma oddelenými trojfázovými meničmi, ako je možné vidieť na obrázku 1.8. To je zároveň jedna z ich hlavných výhod pretože tieto meniče sú podstatne lacnejšie, ako na mieru vyrobené meniče pre viacfázové stroje. Ďalšie výhody sú možnosť nezávislého riadenia jednotiek a vysoká spoľahlivosť. Medzi nevýhody patrí najmä 50% strata výkonu pri poruche jedného z vinutí. Taktiež elektromagnetická väzba medzi fázami a aj to, že nie sú mechanicky oddelené, čo vyplýva z typov vinutí použitých v týchto strojoch.

Práve tento typ bude navrhovaný a skúmaný v tejto práci. Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [6].



Obrázok 1.8 Stroj s dvojitým trojfázovým vinutím [6]

1.2.6 Dva stroje na spoločnej hriadeli

Výhodou tohto riešenia je podobne, ako pri dvojitom trojfázovom vinutí použitie dvoch lacnejších riadiacich jednotiek a tiež vysoká spoľahlivosť. Medzi nevýhody patrí 50% strata výkonu pri výpadku jedného zo strojov a taktiež brzdný moment stroja počas poruchy.

2. ANALYTICKÝ VÝPOČET

V tejto kapitole bude zjednodušený analytický výpočet motoru a výpočet hlavných parametrov, ktoré budú neskôr použité na modely v RMxpert, Maxwell 2D a Motor-Cad.

2.1 Zadané parametre

V tabuľke 2.1 sú jednotlivé parametre, ktoré by mal navrhovaný motor spĺňať.

Tabuľka 2.1 Požadované parametre stroja

| Veličina | Jednotka | Veľkosť |
|------------------|----------------------|---------|
| P_i | (kW) | 50 |
| n | (min ⁻¹) | 6000 |
| σ | (A/m ²) | 5,5 |
| $B_{\delta\max}$ | (T) | 0,95 |
| U | (V) | 400 |
| $2p$ | (-) | 10 |
| Q_s | (-) | 12 |

2.2 Výpočet hlavných rozmerov

Pri výpočte hlavných rozmerov stroja sa vychádzalo z [12]. Hlavné rozmery boli určené na základe tangenciálneho napätia σ_{FT} , ktoré bolo podľa [12] určené na 33500 Pa. Následne sa zo zadaných hodnôt výkonu a otáčok určil moment.

$$M = \frac{P_i}{\omega} = \frac{50000}{\frac{2\pi \cdot 6000}{60}} = 79,577 \text{ Nm} \quad (2.1)$$

Z momentu a tangenciálneho napätia sa určil objem rotoru ako

$$V_r = \frac{M}{2 \cdot \sigma_{FT}} = \frac{79,577}{2 \cdot 33500} = 1,188 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \quad (2.2)$$

Ďalej sa určil štíhlostný pomer

$$\chi = \frac{l'}{D_i} = \frac{\pi}{4 \cdot p} \cdot \sqrt{p} = \frac{\pi}{4 \cdot 5} \cdot \sqrt{5} = 0,3512 \quad (2.3)$$

Na základe tohto pomeru sa určila efektívna dĺžka a vonkajší priemer rotoru ako

$$D_i = \sqrt[3]{\frac{V_r \cdot 4}{4 \cdot \pi}} = \sqrt[3]{\frac{1,188 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{\chi \cdot \pi}} = 162,69 \text{ mm} \quad (2.4)$$

$$l' = D_i \cdot \chi = 162,69 \cdot 0,3512 = 57,14 \text{ mm} \quad (2.5)$$

Parametre boli zaokrúhlené a ďalej sa počítalo s hodnotami $D_i = 163 \text{ mm}$ a $l' = 58 \text{ mm}$. Ďalej bola určená dĺžka vzduchovej medzery [11] zo vzťahu

$$\delta \geq \gamma \cdot \tau_p \cdot \frac{A_a}{B_\delta} \quad (2.6)$$

γ bola z [12] určená ako $3 \cdot 10^{-7}$ a lineárna prúdová hustota bola vypočítaná ako

$$A_a = \frac{\sigma \cdot S_{dcu} \cdot Q_s}{\pi \cdot D_i} = \frac{5,5 \cdot 1575 \cdot 12 \cdot 0,3}{\pi \cdot 163 \cdot 10^{-3}} = 60899 \text{ A/m} \quad (2.7)$$

Pólová rozteč sa potom rovná

$$\tau_p = \frac{\pi \cdot D_i}{2p} = \frac{\pi \cdot 163}{10} = 51,208 \text{ mm} \quad (2.8)$$

Teraz už boli určené všetky parametre potrebné na výpočet vzduchovej medzery

$$\begin{aligned} \delta \geq \gamma \cdot \tau_p \cdot \frac{A_a}{B_\delta} &= 3 \cdot 10^{-7} \cdot 51,208 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{60899}{0,95} \\ &= 0,9848 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.9)$$

Dĺžka vzduchovej medzery bola ako východisková zvolená na $\delta = 2 \text{ mm}$. Jej finálna dĺžka bude výsledkom optimalizácie.

2.3 Výpočet počtu závitov a činiteľu vinutia

Vinutie bolo zvolené dvojvrstvé sústredné ako je znázornené na obrázku 2.1. Drážková rozteč v elektrických stupňoch sa rovná

$$\tau_{d^\circ} = \frac{360}{Q_s} \cdot p = \frac{360}{12} \cdot 5 = 150^\circ \text{ elektrických} \quad (2.10)$$



Obrázok 2.1 Dvojvrstvé sústredné vinutie

Potom činiteľ kroku sa určí ako

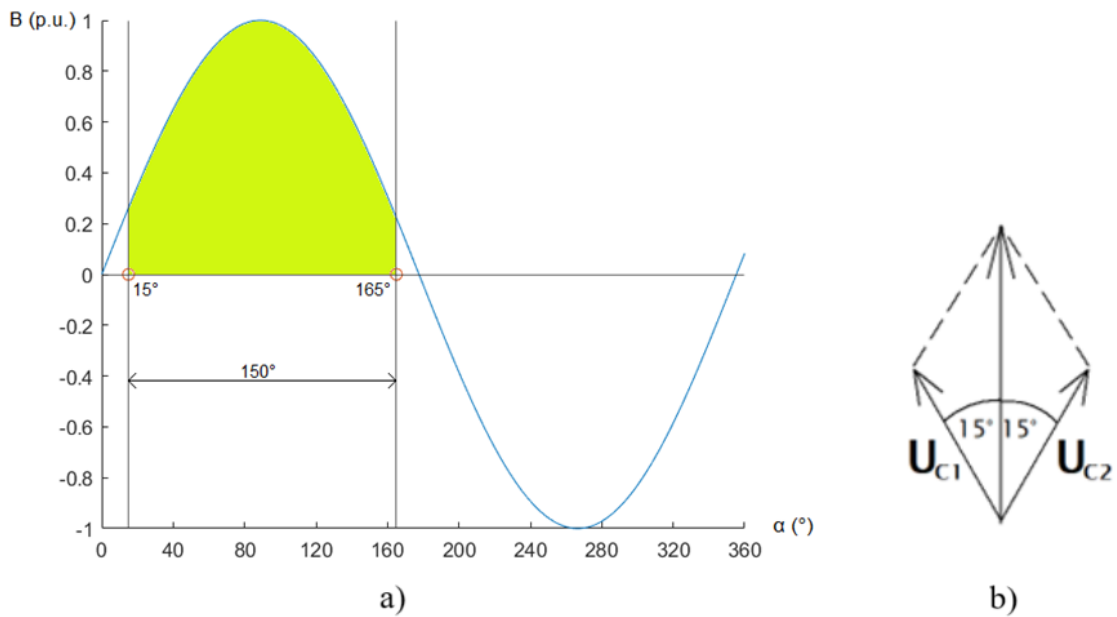
$$k_y = \frac{\int_{15^\circ}^{165^\circ} \sin(\alpha) d\alpha}{\int_{0^\circ}^{180^\circ} \sin(\alpha) d\alpha} = \frac{-\cos(165^\circ) + \cos(15^\circ)}{-\cos(180^\circ) + \cos(0^\circ)} = 0,9659 \quad (2.11)$$

A činiteľ rozlohy ako

$$k_r = \frac{2 \cdot U_c \cdot \cos(15^\circ)}{2 \cdot U_c} = 0,9659 \quad (2.12)$$

A celkový činiteľ vinutia

$$k_v = k_y \cdot k_r = 0,9659 \cdot 0,9659 = 0,933 \quad (2.13)$$



Obrázok 2.2 a) integračné medze pre činiteľ kroku b) fázory napätí cievok pre výpočet činiteľa rozlohy

Závity jednej fáze v sérii boli určené podľa

$$\begin{aligned}
 N_f &= \frac{U_{of}}{B_\delta \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2p} \cdot l' \cdot 2\pi \cdot f \cdot k_v} = \\
 &= \frac{\frac{400}{\sqrt{3}}}{0,95 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot 163 \cdot 10^{-3}}{10} \cdot 58 \cdot 10^{-3} \cdot 2\pi \cdot 500 \cdot 0,933} = \\
 &= 62,032
 \end{aligned} \tag{2.14}$$

Závity boli zaokrúhlené na celé číslo $N_f = 62$.

2.4 Výpočet rozmerov permanentného magnetu

Materiál magnetu bol zvolený N35UH, ktorý má parametre uvedené v tabuľke 2.2.

Tabuľka 2.2 Parametre materiálu magnetu pre 20 °C

| Veličina | Jednotka | Veľkosť |
|------------|----------|---------|
| B_r | (T) | 1,21 |
| H_c | (kA/m) | -907 |
| μ_{PM} | (-) | 1,06162 |

Pri výpočte výšky magnetu sa použil trochu iný prístup. B_{PM} bola určená ako $B_{\delta M}$ nad maximálnou výškou magnetu preto nebol pri výpočte uvažovaný vplyv drážkovania pomocou Carterovho činiteľa. Pracovný bod magnetu sa teda určil ako

$$H_{PM} = \frac{B_{PM} - B_r}{\mu_0 \cdot \mu_{PM}} = \frac{0,95 - 1,21}{\mu_0 \cdot 1,06162} = -194892 \text{ A/m} \tag{2.15}$$

Z týchto hodnôt sa následne dopočítala výška magnetu

$$h_{PM} = \frac{B_{\delta m} \cdot \delta}{\mu_0 \cdot H_{PM}} = \frac{0,95 \cdot 2}{\mu_0 \cdot 194892} = 7,758 \text{ mm} \tag{2.16}$$

Výška magnetu bola zaokrúhlená na $h_{PM} = 8 \text{ mm}$.

2.5 Výpočet úbytkov napätia

Na výpočet úbytku na magnetizačnej reaktancii už je potrebné zahrnúť vplyv drážkovania. Ako prvá sa teda určila dĺžka ekvivalentnej vzduchovej medzery podľa

$$\delta' = \delta + \frac{h_{\text{PM}}}{\mu_{\text{PM}}} = 2 + \frac{8}{1,06162} = 9,5356 \text{ mm} \quad (2.17)$$

Pomocou ekvivalentnej dĺžky vzduchovej medzery sa určil koeficient χ_d

$$\chi_d = \frac{b_{\text{ds1}}/\delta'}{5 + b_{\text{ds1}}/\delta'} = \frac{7,16/9,5356}{5 + 7,16/9,5356} = 0,1309 \quad (2.18)$$

Ďalej je potrebné určiť drážkovú rozteč v milimetroch na priemere vzduchovej medzery, ktorý sa určí jednoducho z

$$D_\delta = D_i + \delta = 163 + 2 = 165 \text{ mm} \quad (2.19)$$

A drážková rozteč sa potom rovná

$$\tau_d = \frac{\pi \cdot D_\delta}{Q_s} = \frac{\pi \cdot 165}{12} = 43,197 \text{ mm} \quad (2.20)$$

Cartrov činiteľ sa určí ako

$$k_c = \frac{\tau_d}{\tau_d - \chi_d \cdot b_{\text{ds1}}} = \frac{43,197}{43,197 - 0,1309 \cdot 7,16} = 1,0222 \quad (2.21)$$

Efektívna dĺžka vzduchovej medzery, ktorá je potrebná na určenie magnetizačnej indukčnosti jednej fáze sa potom určí jednoducho zo súčinu ekvivalentnej dĺžky vzduchovej medzery s Cartrovým činiteľom.

$$\delta'' = \delta' \cdot k_c = 9,5356 \cdot 1,0222 = 9,736 \text{ mm} \quad (2.22)$$

Magnetizačná indukčnosť jednej fáze sa potom určí podľa

$$\begin{aligned} L_{\mu\sigma 1h} &= \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot \frac{(N_f \cdot k_v)^2 \cdot l' \cdot D_\delta}{p^2 \cdot \delta''} \\ &= \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \mu_0 \cdot \frac{(62 \cdot 0,933)^2 \cdot 58 \cdot 165 \cdot 10^{-3}}{5^2 \cdot 9,736} \\ &= 1,5787 \cdot 10^{-4} \text{ H} = 0,15787 \text{ mH} \end{aligned} \quad (2.23)$$

Synchrónna reaktancia sa vypočíta ako

$$X_s = L_{\mu\sigma 1h} \cdot \omega = 2 \cdot \pi \cdot 500 \cdot 1,5787 \cdot 10^{-4} = 0,49599 \Omega \quad (2.24)$$

Na určenie napät'ového úbytku na synchrónnej reaktancii je najprv potrebné určiť fázový prúd. Ten sa, za predpokladu nulového fázového posunu medzi fázovým prúdom I_{1f} a fázovým napätím indukovaným magnetickým poľom PM U_{0f} , rovná

$$I_{1f} = \frac{P_{\text{mech}}}{m \cdot U_{0f}} = \frac{50000}{3 \cdot \frac{400}{\sqrt{3}}} = 72,169 \text{ A} \quad (2.25)$$

Napät'ový úbytok na synchrónnej reaktancii sa potom rovná

$$U_{xs} = X_s \cdot I_{1f} = 0,49599 \cdot 72,169 = 35,795 \text{ V} \quad (2.26)$$

Napätie U_{1f} sa vypočíta z

$$\mathbf{U}_{1f} = \mathbf{U}_{0f} + \mathbf{U}_{xs} \quad (2.27)$$

Pri podmienke, že I_{1f} je vo fázi s U_{0f} , potom je možné rovnicu 2.27 zjednodušiť na tvar

$$\mathbf{U}_{1f} = U_{0f} + j \cdot U_{xs} = \frac{400}{\sqrt{3}} + j \cdot 35,795 = 233,698 \angle 8,81^\circ \text{ V} \quad (2.28)$$

Toto napätie je väčšie ako nám menič dokáže dodať, preto je potrebné U_{0f} znížiť na 225 V a znovu vyčíslit parametre na ňom závislé.

Po znížení U_{0f} na 225V sa zníži počet závitov na $N_f = 60$, magnetizačná indukčnosť na $L_{\mu\sigma h1} = 0,1477$ mH a synchrónna reaktancia na $X_s = 0,464 \Omega$. Po znížení závitov na 60 je potrebné spätne určiť U_{0f} ako

$$\begin{aligned} U_{0f} &= N_f \cdot B_\delta \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot D_i}{2p} \cdot l' \cdot 2\pi \cdot f \cdot k_v \\ &= 60 \cdot 0,95 \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi \cdot 163 \cdot 10^{-3}}{10} \cdot 58 \cdot 10^{-3} \\ &\quad \cdot 2\pi \cdot 500 \cdot 0,933 = 223,38 \text{ V} \end{aligned} \quad (2.29)$$

Nový fázový prúd sa rovná

$$I_{1f} = \frac{P_{\text{mech}}}{m \cdot U_{0f}} = \frac{50000}{3 \cdot 223,38} = 74,611 \text{ A} \quad (2.30)$$

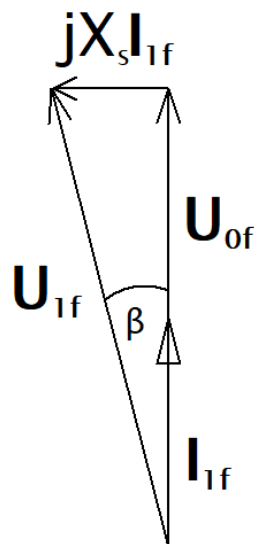
Úbytok na X_s potom

$$U_{xs} = X_s \cdot I_{1f} = 0,464 \cdot 74,611 = 34,62 \text{ V} \quad (2.31)$$

A U_{1f} potom (pri $I_{1f} \parallel U_{0f}$) bude

$$U_{1f} = U_{0f} + j \cdot U_{xs} = 223,38 + j \cdot 34,62 = 226,04 \angle 8,81^\circ \text{ V} \quad (2.32)$$

Pri výpočte napätia U_{1f} nebol uvažovaný odpor vinutia, pretože je zanedbateľne malý ($R_{1f} = 6,51 \text{ m}\Omega$).



Obrázok 2.3 Fázorový diagram napätí a prúdov v počítanom stroji

3. MODELÝ STROJA V PROGRAMOCH ANSYS

V tejto kapitole budú predstavené modely, postupy ich vytvárania a výsledky z jednotlivých programov na simulácie elektrických strojov od spoločnosti Ansys.

RMxpert (Rotation Machine Expert) je softvér na optimalizáciu a návrh elektrických strojov. Dajú sa pomocou neho porovnávať prvotné návrhy a vykonávať mnoho parametrických analýz behom niekoľkých sekúnd. Výstupné veličiny sú väčšinou straty, účinnosť, momentové charakteristiky, indukcia vo vzduchovej medzere, indukčnosť vinutia a rozptyl. Softvér využíva klasickú analytickú teóriu točivých strojov a magnetických obvodov.

Motor-Cad umožňuje konštruktérom rýchlo vytvárať koncepčné elektromagnetické a tepelné dizajny elektrických strojov s využitím intuitívnych šablón pre elektrické stroje, vrátane topológií chladenia. Softvér zahŕňa aj simulácie prevádzkových cyklov vrátane teplotných závislostí a s využitím účinnostných máp dokáže poskytnúť užívateľom efektívne pracovné body pre ich návrhy. Motor-Cad využíva analytické metódy, metódy konečných prvkov (FEM) a empirické korelácie.

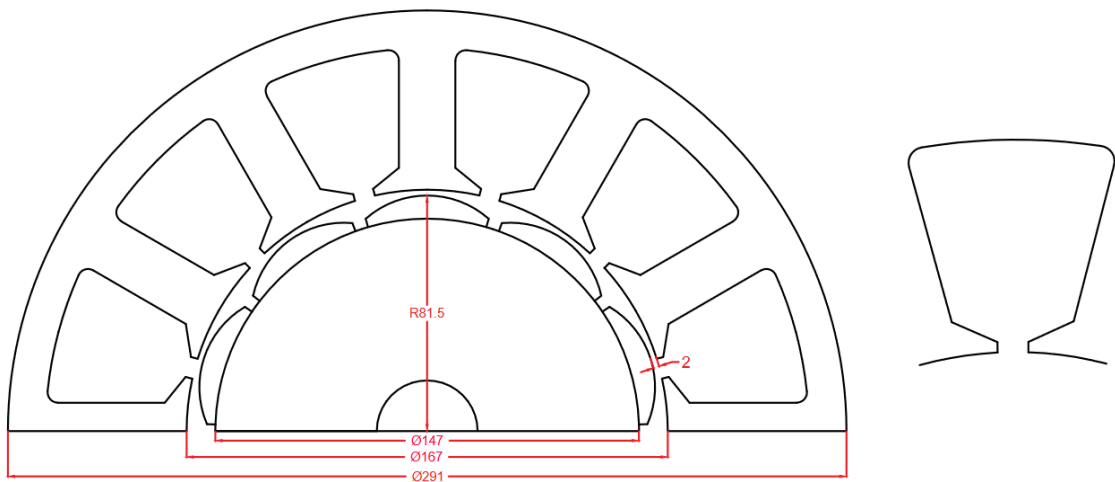
Ansys Maxwell 2D/3D je softvér určený k simulácii nízkofrekvenčných elektromagnetických polí, elektrických obvodov a systémov. Umožňuje simulácie elektromagnetických polí v časovej ale aj frekvenčnej oblasti. Dokáže zohľadniť rotačný a translačný pohyb objektov v elektromagnetickom poli. Jeho využitie spočíva v analýze elektromotorov, generátorov, solenoidov, transformátorov a senzorov. Softvér využíva na výpočet metódu konečných prvkov.

Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [13].

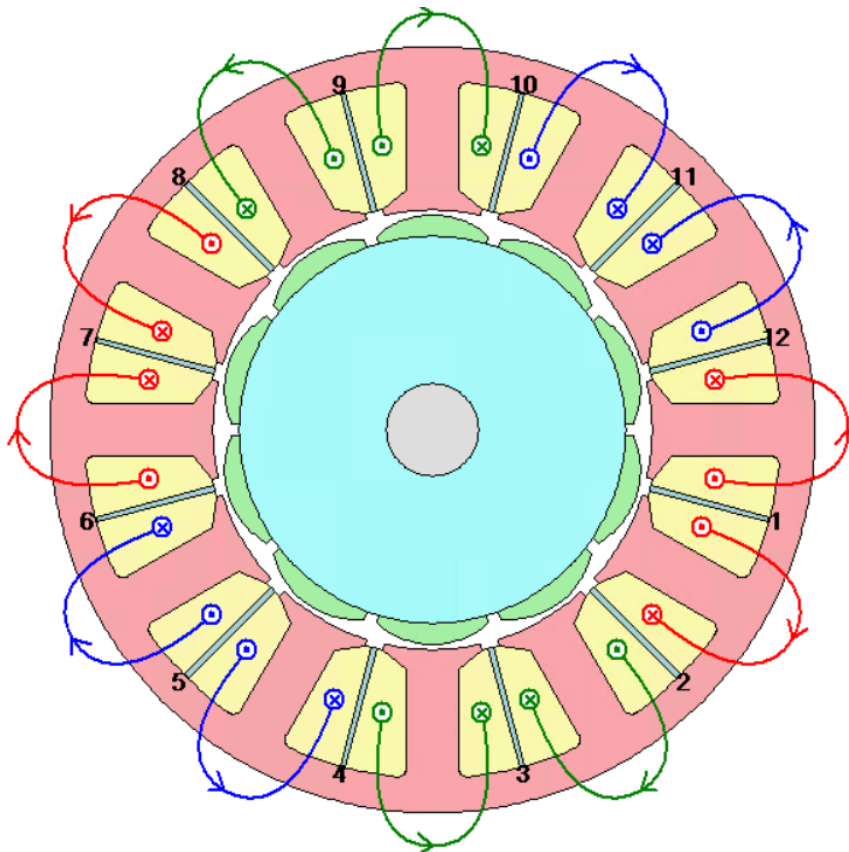
3.1 RMxpert model

Do RMxpertu boli vložené rozmery dopočítané z kapitoly 2.2. Statorový plech s tvarom drážky je znázornený na obrázku 3.1. Materiál statorových a rotorových plechov bol použitý M235-35A, straty v železe boli ešte upravené o koeficient opracovania 1,6, plech široký 0,35mm bol použitý kvôli obmedzeniu strát v železe nakoľko stroj pracuje pri 500Hz. V stroji bolo použité dvojvrstvové sústredné (koncentrované) vinutie, ktoré je na obrázku 3.2. Každá drážka obsahuje 30 závitov s 28 paralelnými vodičmi, priemer jedného vodiča bol určený na 0,813mm.

Materiál permanentného magnetu bol použitý N35UH, ktorého parametre boli prepočítané na 120°C. Podľa programu Ansys Maxwell bol vymodelovaný tvar PM tak, aby ich okraje nemali menej ako 3mm. Offset bol nastavený na 50mm a šírka pólu 0.9.



Obrázok 3.1 Statorový, rotorový plech a tvar drážky



Obrázok 3.2 Vinutie motoru z programu Motor-Cad

V tabuľke 3.1 sú znázornené výsledky simulácie v porovnaní s vypočítanými hodnotami z kapitoly 2, pre tento účel bol stroj simulovaný pri 20°C.

Tabuľka 3.1 Porovnanie RMxprt a analytického výpočtu pri 20°C

| Veličina | Jednotka | RMxprt | Výpočet |
|--------------------|----------------------|---------|---------|
| | | Veľkosť | |
| U_{sMax} | (V) | 530,99 | 547,17 |
| I_{lf} | (A) | 77,2 | 74,61 |
| M_n | (Nm) | 79,58 | 79,58 |
| β | (°) | 32,98 | 8,81 |
| B_δ | (T) | 0,815 | 0,95 |
| B_{PM} | (T) | 0,939 | 0,95 |
| $L_{\mu\sigma lh}$ | (mH) | 0,1412 | 0,1477 |
| n | (min ⁻¹) | 6000 | 6000 |
| η | (%) | 98,51 | - |

V programe RMxprt bolo ešte potrebné umelo zvýšiť napätie meniča (Rated Voltage) na 440V, aby sa fázový prúd čo najviac zarovnal s fázovým napätím U_{of} (dostať ich do fázy však nebolo možné, aj preto vznikli vo výsledkoch určité odchýlky). Z tabuľky 3.1 je tiež zrejmé, že RMxprt uvažuje vo vzduchovej medzere menšiu indukciu ako na povrchu magnetu, vo výpočte bolo uvažované zjednodušenie, pri ktorom mala byť indukcia vo vzduchovej medzere rovnaká ako na povrchu magnetu. Zátlačný uhol β sa značne líši, to je spôsobené tým, že v programe RMxprt sú rozdielne hodnoty prúdov a napätí, ale najmä tým, že RMxprt uvažuje aj úbytky na rozptylovej reaktancii a vinutí, ktoré boli v analytickom výpočte zanedbané. V tabuľke 3.2 sú parametre stroja pri 120°C.

Tabuľka 3.2 Výsledky RMxprt pri 120 °C

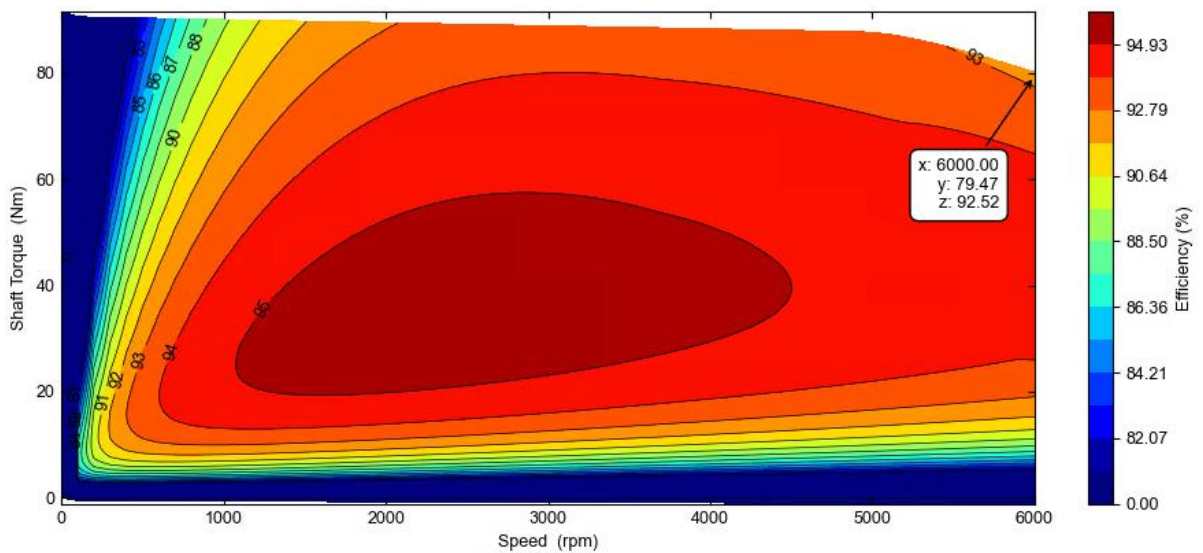
| Veličina | Jednotka | Veľkosť |
|--------------------|----------------------|---------|
| U_{sMax} | (V) | 473,52 |
| I_{lf} | (A) | 86,66 |
| ΔP_{Fe} | (W) | 783 |
| ΔP_{Cu} | (W) | 654 |
| ΔP_{total} | (W) | 1437 |
| P_{in} | (W) | 51454 |
| P_{out} | (W) | 50016 |
| η | (%) | 97,21 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 |
| M_n | (Nm) | 79,60 |
| β | (°) | 40,03 |
| B_δ | (T) | 0,73 |
| B_{PM} | (T) | 0,84 |

3.2 MotorCad model

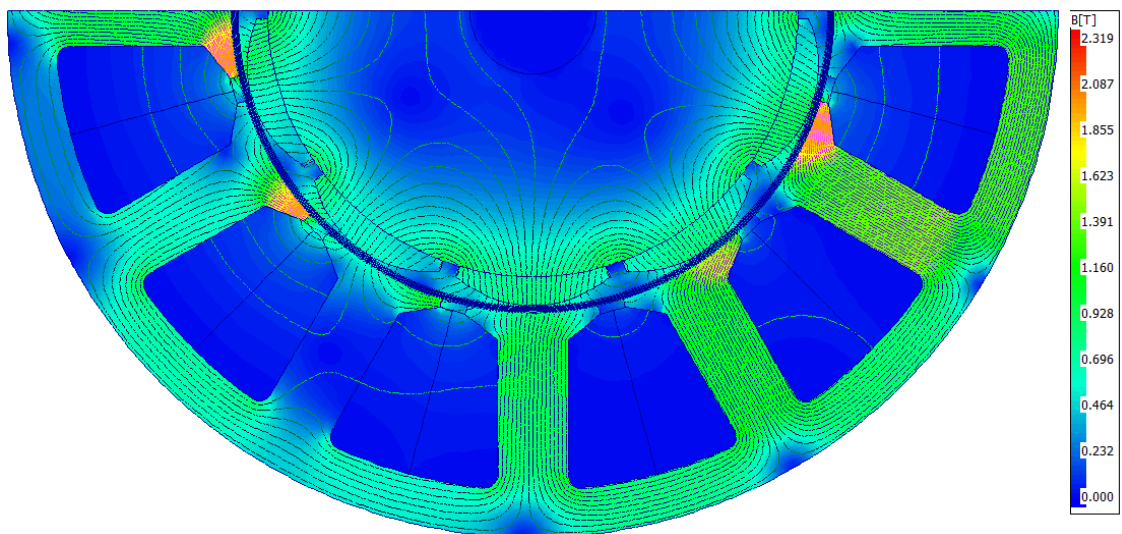
Do programu Motor-Cad boli vložené rozmery rovnako, ako v kapitole 3.1. Výhodou MotorCadu však je, že materiály nie je potrebné definovať, pretože už sa nachádzajú v knižnici a tak isto ich nie je potrebné prepočítavať na iné prevádzkové teploty, pretože toto robí program automaticky.

Tabuľka 3.3 Výsledky Motor-Cad pri 120°C

| Veličina | Jednotka | Veľkosť |
|--------------------|----------------------|---------|
| U_{sMax} | (V) | 498,6 |
| I_{lf} | (A) | 103,8 |
| ΔP_{Fe} | (W) | 675 |
| ΔP_{Cu} | (W) | 901 |
| ΔP_{mag} | (W) | 1660 |
| ΔP_{total} | (W) | 3236 |
| P_{out} | (W) | 50008 |
| P_{in} | (W) | 53244 |
| η | (%) | 93,92 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 |
| M_n | (Nm) | 79,59 |
| B_δ | (T) | 0,86 |
| B_{PM} | (T) | 0,83 |



Obrázok 3.3 Momentová charakteristika modelu (vrátane účinnostnej mapy)

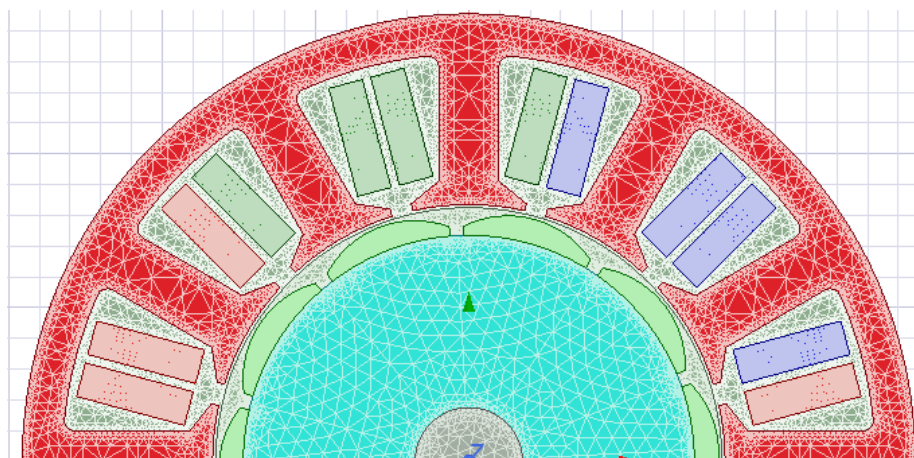


Obrázok 3.4 Rozloženie magnetickej indukcie v zadanom pracovnom bode

Na obrázku 3.4 je znázornené rozloženie magnetickej indukcie v stroji v zadanom pracovnom bode z prostredia Motor-Cad. Na obrázku 3.3 je znázornená momentová charakteristika vrátane účinnostnej mapy s vyznačením zadaného pracovného bodu z prostredia Motor-Cad Lab.

3.3 Maxwell 2D model

Model v programe Maxwell 2D bol vygenerovaný ako z programu RMxprt tak aj z programu Motor-Cad. Model vygenerovaný z programu RMxprt bolo ešte potrebné upraviť z napäťovo napájaného stroja na prúdovo napájaný a tiež zdefinovať „excitation“ v magnetoch pre správne počítanie strát v magnetoch. Po týchto úpravách sa výsledky z oboch modelov zhodovali a ďalej bol používaný už len Motor-Cadom vygenerovaný model.



Obrázok 3.5 Model so sieťou v programe Maxwell

Tabuľka 3.4 Výsledky Maxwell pri 120 °C

| Veličina | Jednotka | Veľkosť |
|--------------------|----------------------|---------|
| U_{sMax} | (V) | 491,66 |
| I_{If} | (A) | 103,8 |
| ΔP_{Fe} | (W) | 686 |
| ΔP_{Cu} | (W) | 901,5 |
| ΔP_{mag} | (W) | 1644 |
| ΔP_{total} | (W) | 3122 |
| P_{out} | (W) | 50473 |
| P_{in} | (W) | 53595 |
| η | (%) | 94,18 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 |
| M_n | (Nm) | 78,62 |

Na obrázku 3.5 je znázornený stator a rotor modelu z programu Maxwell vygenerovaný pomocou Motor-Cadu aj so sieťou, ktorá bola rovnaká, ako v Motor-Cade.

3.4 Porovnanie výsledkov

V tabuľke 3.5 sú uvedené výsledky simulácií modelu zo všetkých troch programov.

Tabuľka 3.5 Výsledky RMxpvt, Motor-Cad, Maxwell pri 120°C

| Veličina | Jednotka | RMxpvt | Motor-Cad | Maxwell |
|--------------------|----------------------|--------|-----------|---------|
| U_{sMax} | (V) | 473,52 | 498,6 | 491,66 |
| I_{If} | (A) | 86,66 | 103,8 | 103,8 |
| ΔP_{Fe} | (W) | 783 | 675 | 686 |
| ΔP_{CuDC} | (W) | 654 | 901 | 902 |
| ΔP_{mag} | (W) | | 1660 | 1661 |
| ΔP_{total} | (W) | 1437 | 3236 | 3249 |
| P_{out} | (W) | 50016 | 50008 | 50473 |
| P_{in} | (W) | 51454 | 53244 | 53722 |
| η | (%) | 97,21 | 93,92 | 93,95 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 | 6000 | 6000 |
| M_n | (Nm) | 79,6 | 79,59 | 78,62 |

Z tabuľky 3.5 je na prvý pohľad zrejmé, že program RMxpvt bude pre ďalšie skúmanie modelov nepoužiteľný. A to z toho dôvodu, že neuvažuje straty v magnetoch ΔP_{mag} , ktoré sú v tomto prípade zásadné. Straty v železe sa taktiež líšia značne od programov Maxwell a MotorCad, to bude pravdepodobne spôsobené tým, že RMxpvt uvažuje len analytický výpočet týchto strát, kdežto v ostatných programoch sú počítané pomocou metódy končených prvkov (FEM). To, že stroj má vďaka zanedbaniu podstatnej zložky ΔP_{mag} oveľa menšie celkové straty vedie aj na menší odoberaný prúd. Čo logicky

vedie aj na menšie straty v medi ΔP_{Cu} . A stroj má vďaka oveľa menším celkovým stratám ΔP_{total} nezmyselne vysokú účinnosť oproti ostatným programom.

Na druhej strane výsledky z programov Motor-Cad a Maxwell sa veľmi nelíšia, preto budú tieto dva programy použité pri ďalšom vyšetrení strojov.

4. OPTIMALIZÁCIA MOMENTOVEJ HUSTOTY A ÚČINNOSTI

V tejto kapitole bude predstavený postup optimalizácie na maximalizovanie momentovej hustoty a minimalizovanie strát pomocou programu Ansys Optislang v kombinácii s MotorCadom.

Efektívny softvérový nástroj pre optimalizáciu a integráciu procesov, Ansys OptiSlang, umožňuje navrhnuť produkt spĺňajúci všetky požiadavky na citlivosť, spoľahlivosť a odolnosť. Všetky analýzy sa vykonávajú prostredníctvom prehľadného grafického užívateľského rozhrania, pomocou ktorého je možné pripojiť akýkoľvek existujúci simulačný proces (bez ohľadu na použitý CAD software a FEM riešič z rodiny Ansys alebo mimo nej). Optimalizačné a stochastické analýzy môžu byť vykonávané v ľubovoľnej fáze vývojového procesu. Ansys OptiSlang sa dá využiť na úlohy týkajúce sa citlivostnej analýzy, multidisciplinárnej optimalizácie, analýzy spoľahlivosti a odolnosti, kalibrácie modelu, vyhodnotenie vplyvu vstupných parametrov a optimalizácie robustnosti systému (RDO).

Príklady využitia v praxi zahŕňajú optimalizáciu produktu, zníženie hmotnosti, zvýšenie spoľahlivosti, kalibráciu modelu, automatizáciu workflow, prepojenie simulácií rôznych riešičov a tvorbu digitálneho dvojčaťa.

Kľúčové vlastnosti softvéru sú pokročilé DOE a optimalizačné algoritmy (vrátane evolučných algoritmov alebo neurónových sietí), analýzy citlivosti a spoľahlivosti, redukované modely (metamodel/ROM), možnosť prepojenia ľubovoľných riešičov alebo vlastných kódov, správu simulácií, prepojenie simulovaných a nameraných dát a ľubovoľné rozšírenie vďaka python skriptom.

Informácie v tejto kapitole boli čerpané z [13].

4.1 Ansys OptiSlang optimalizácia

Model bol optimalizovaný pomocou programu Ansys OptiSlang v kombinácii s MotorCadom. Pred optimalizáciou boli ešte kvôli obrovským stratám v magnetoch ΔP_{mag} magnety rozdelené na 17 axiálnych segmentov. Taktiež bol použitý silnejší magnet N42UH a na spresnenie výpočtu strát koeficient navýšenia strát v magnetoch bol určený na 2 (zahŕňa možné nepresnosti vo výpočte vodivosti magnetov, prípadne nepresnosti v zvlnení prúdu generovaného PWM).

V tabuľke 4.1 sú uvedené parametre, ktoré boli menené počas optimalizácie, všetky ostatné parametre boli konštantné.

Tabuľka 4.1 Premenné parametre pri optimalizácii

| Parameter | Pôvodná | Min. | Max. |
|------------------------|---------|-------|------|
| Aktívna dĺžka (mm) | 58 | 50 | 75 |
| D_{outS} (mm) | 291,05 | 200 | 300 |
| D_{inS} (mm) | 167 | 149,9 | 180 |
| Vzduchová medzera (mm) | 2 | 1 | 2 |
| Hĺbka drážky (mm) | 49 | 46 | 52,6 |
| Šírka zubu (mm) | 19,58 | 15 | 21,5 |
| Výška magnetu (mm) | 8 | 7,5 | 12 |

V tabuľke 4.2 sú uvedené jednotlivé body z momentovej charakteristiky, ktoré by mal výsledný model spĺňať. Požiadavky neboli nastavené veľmi prísne oproti pôvodnému stroju a to aj z dôvodu, že cieľom je, aby mal čo najmenší objem (čo najvyššiu momentovú hustotu) a pri výraznom znížení strát v magnetoch ΔP_{mag} sa zvýšil aj maximálny moment.

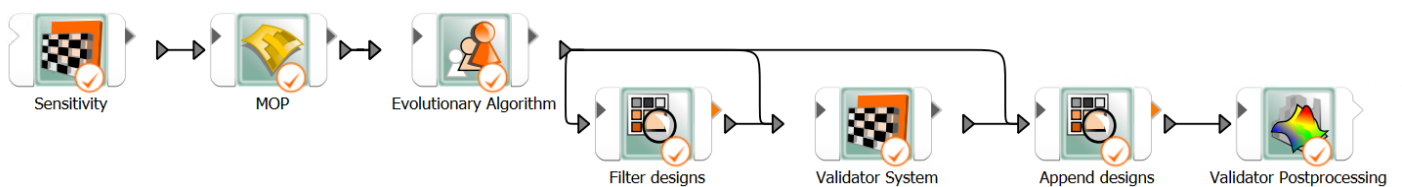
Tabuľka 4.2 Požiadavky optimalizácie

| Typ | Veličina | Požiadavka | Operačný bod |
|------|-------------|------------|--------------|
| Max. | Moment (Nm) | > 95 | 1000 rpm |
| Max. | Moment (Nm) | > 95 | 3000 rpm |
| Max. | Moment (Nm) | > 90 | 6000 rpm |
| Max. | Výkon (W) | > 56550 | 6000 rpm |

Ciele optimalizácie sú uvedené v tabuľke 4.3. Pracovný cyklus na zvýšenie priemernej účinnosti bol definovaný bodmi 50Nm 1000 otáčok, 50Nm 3000 otáčok a 80Nm 6000 otáčok a všetky body trvali rovnaký čas.

Tabuľka 4.3 Ciele optimalizácie

| Cieľ | Typ | Premenná |
|---------------|-----------------|---------------|
| Minimalizovať | Objem | Aktívny objem |
| Maximalizovať | Pracovný cyklus | Účinnosť |



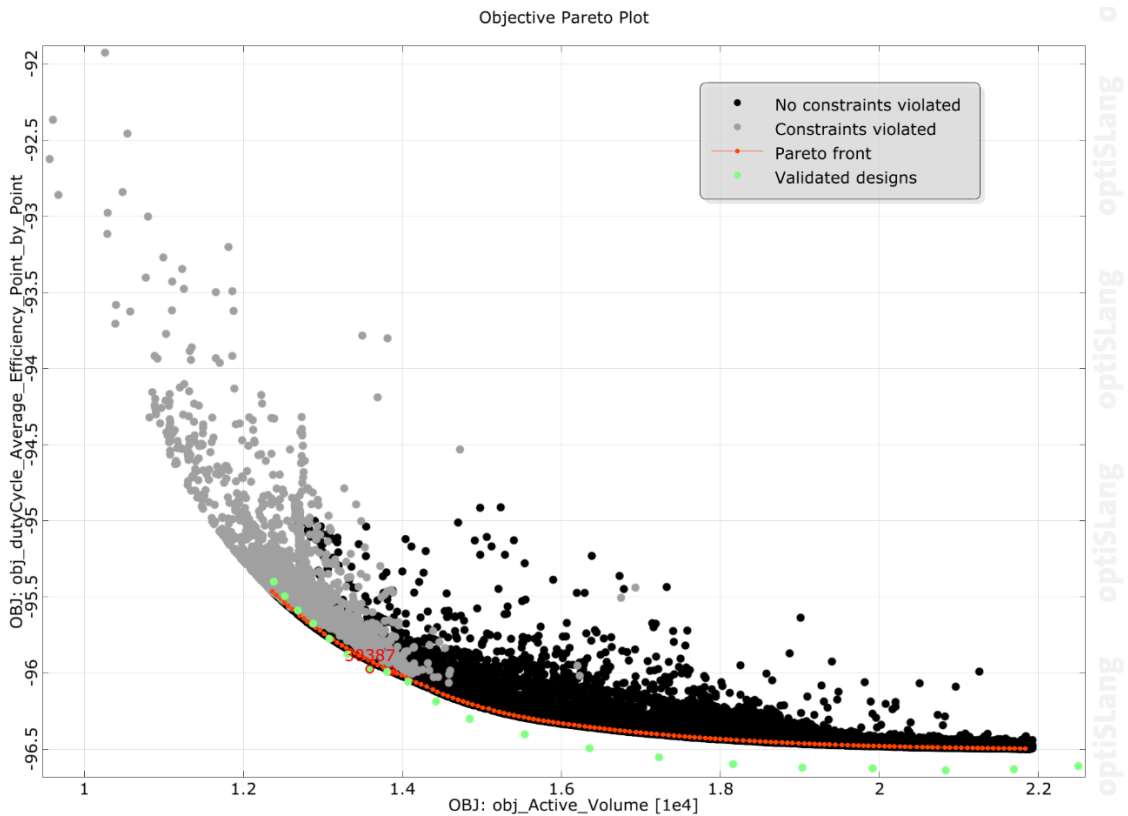
Obrázok 4.1 Postup optimalizácie v OptiSlangu

Prvá sa v OptiSlangu vykonala citlivostná analýza (Sensitivity ikona Obrázok 4.1). OptiSlang pomocou modulu Motor-Cad Lab postavil 185 vzoriek modelov a testoval, aký

vplyv bude mať zmena parametrov v tabuľke 4.1 na výstupy v tabuľke 4.2. Z celkového počtu 185 vzoriek splnilo všetky 4 požiadavky až 77 vzoriek.

Metamodel optimálnej prognózy (MOP ikona v obrázku 4.1) – OptiSlang na základe výsledkov z citlivostnej analýzy vypočíta optimálny aproximačný model pre každú veličinu definovanú v požiadavkách a cieľoch, čo znamená, že určí aký veľký majú jednotlivé parametre dopad na požiadavky a ciele.

V ďalšom kroku bolo pomocou evolučného algoritmu a dát získaných z citlivostnej analýzy a MOP vygenerovaných ďalších 31250 vzoriek. Použitím evolučného algoritmu je možné generovanie veľkého počtu vzoriek v relatívne krátkom čase, tento počet vzoriek by bol z časového hľadiska použitím citlivostnej analýzy nereálny (pre porovnanie 31250 vzoriek z evolučného algoritmu trvalo približne hodinu, 185 vzoriek z citlivostnej analýzy približne 5 dní).



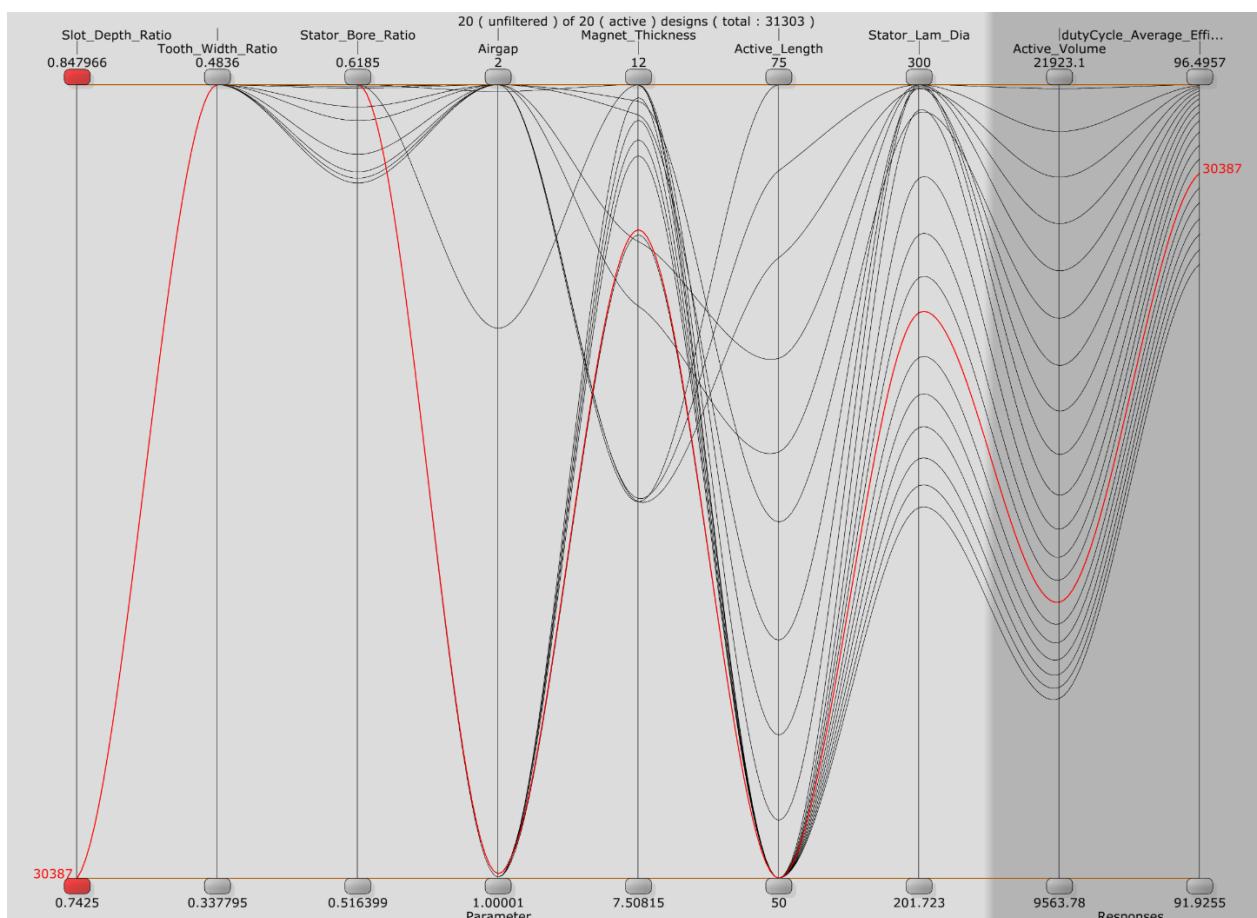
Obrázok 4.2 Pareto krivka z evolučného algoritmu

Na obrázku 4.2 je znázornených všetkých 31250 dizajnov, červenou farbou sú označené najlepšie dizajny z paretoho čela. Z týchto dizajnov bolo pomocou filtru dizajnov (Filter Designs ikona v obrázku 4.1) vybraných 20 najlepších (tieto dizajny sú znázornené zelenou farbou), pre ktoré boli potom postavené aj Motor-Cad Lab modely

a výsledky z týchto modelov sa dajú porovnať s výsledkami z evolučného algoritmu vo Validator Postprocessing.

Na obrázku 4.4 sú znázornené výsledné parametre z postavených LAB modelov z Motor-Cadu (Zelená) a výsledky z evolučného algoritmu pre týchto 20 modelov (Červená).

Na obrázku 4.3 je znázornený vplyv zmeny vstupných parametrov na parametre výsledné. Je zrejmé, že najväčší vplyv na sledované ciele bude mať aktívna dĺžka stroju a vonkajší statorový priemer, pretože s nimi značne rastie aj objem.

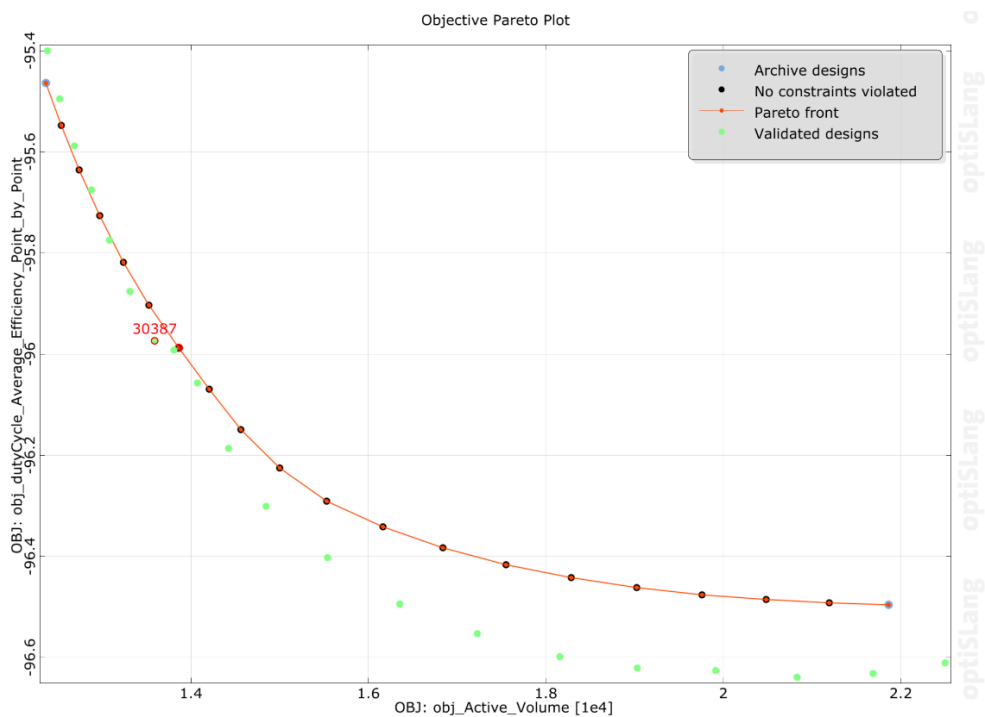


Obrázok 4.3 Odozva cieľov na zmenu vstupných parametrov

V tabuľke 4.4 je všetkých 20 dizajnov, ktoré vybral OptiSlang aj s ďalšími kritériami výberu finálneho modelu. Ciele optimalizácie boli dosiahnuť čo najvyššiu účinnosť pri čo najvyššej momentovej hustote. Momentovú hustotu má logicky najvyššiu najmenší stroj (Dizajn 27751), ale na druhú stranu má aj najnižšiu účinnosť. Z týchto 20 dizajnov bol zvolený dizajn 30387. Bol zvolený ako kompromis medzi objemom (momentovou hustotou), účinnosťou a parametrom η/V , pretože menšie stroje by už mohli mať problémy s chladením (nižšia účinnosť je výsledkom vyšších strát v medi) a väčšie zasa majú veľký krok v raste objemu a malý v raste účinnosti.

Tabuľka 4.4 Výsledky 20 najlepších dizajnov

| Dizajn | V (cm ³) | η (%) | η/V (%/dm ³) |
|--------|----------------------|-------|--------------------------|
| 27751 | 12382 | 95,40 | 7,70 |
| 23739 | 12519 | 95,50 | 7,63 |
| 27638 | 12685 | 95,59 | 7,54 |
| 29113 | 12787 | 95,68 | 7,48 |
| 25607 | 13081 | 95,77 | 7,32 |
| 19502 | 13312 | 95,88 | 7,20 |
| 30387 | 13590 | 95,97 | 7,06 |
| 14523 | 13807 | 95,99 | 6,95 |
| 28956 | 14072 | 96,06 | 6,83 |
| 23161 | 14423 | 96,19 | 6,67 |
| 18343 | 14846 | 96,30 | 6,49 |
| 21106 | 15538 | 96,40 | 6,20 |
| 24859 | 16352 | 96,49 | 5,90 |
| 28371 | 17227 | 96,55 | 5,60 |
| 25196 | 18157 | 96,60 | 5,32 |
| 5011 | 19029 | 96,62 | 5,08 |
| 30192 | 19914 | 96,63 | 4,85 |
| 18158 | 20831 | 96,64 | 4,64 |
| 7435 | 21688 | 96,63 | 4,46 |
| 22305 | 22500 | 96,61 | 4,29 |



Obrázok 4.4 Pareto krivka v porovnaní s LAB modelmi

4.2 Dizajn 30387

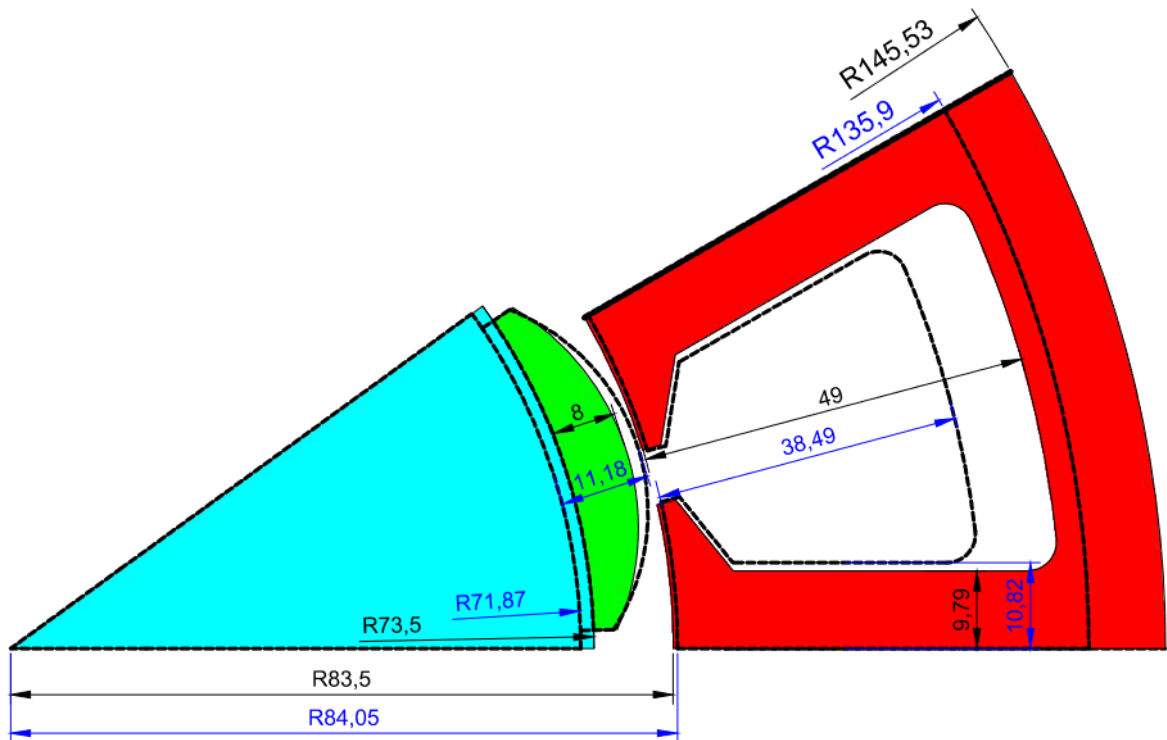
V tejto kapitole sú výsledky zo simulácií optimalizovaného modelu a tiež porovnanie s pôvodným dizajnom a s dizajnom s upravenými magnetmi.

V tabuľke 4.5 sú výsledky simulácií jednotlivých strojov z programov Motor-Cad aj Maxwell 2D. Všetky modely boli simulované v menovitom pracovnom bode 79,58Nm 6000 otáčok a v oboch programoch bolo nastavené rovnaké napájanie, tj. rovnaké I_d a I_q pre oba programy.

Rozdiel medzi pôvodným a upraveným strojom je z hľadiska strát enormný, pri použití 17 axiálnych segmentov v magnetoch sa straty znížia až o 98% a vďaka tomu klesnú aj straty v medi (približne o 20%). Účinnosť sa následne zvýši až o 3,22%.

Rozdiel účinnosti medzi upraveným a optimalizovaným modelom je len 0,05%. Tento veľmi malý nárast je spôsobený tým, že optimalizovaný stroj má menšie rozmery, z čoho vyplývajú menšie straty v železe, ale tým pádom má aj menší rozmer drážky, čo pri konštantnom činiteli plnenia vedie na vyššie straty v medi.

Čo sa však týka momentovej hustoty, vychádza optimalizovaný stroj taktiež lepšie ako pôvodné stroje. Momentová hustota pôvodného a upraveného modelu je 20,623 Nm/dm³ optimalizovaný dosahuje až 27,432 Nm/dm³. Čo sa týka momentu vzťahnutého na hmotnosť, pôvodné stroje majú 3,042 Nm/kg a optimalizovaný 4,094 Nm/kg. Výsledný optimalizovaný stroj je o 958 cm³ menší, o 6,72 kg ľahší a o 0,05% účinnejší.



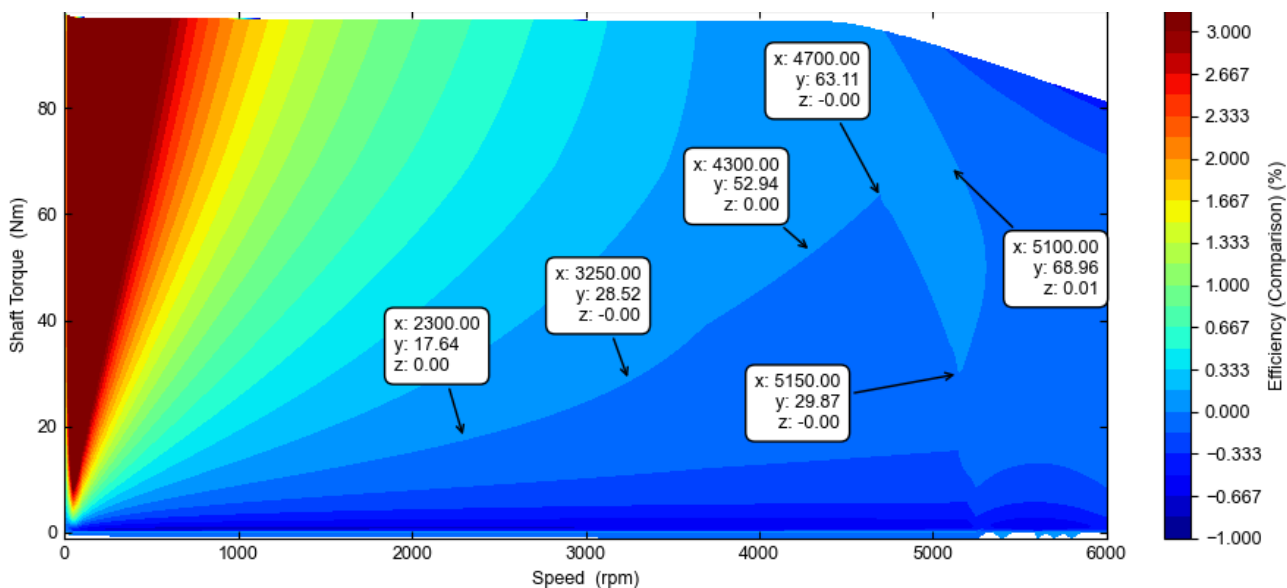
Obrázok 4.5 Porovnanie rozmerov pôvodného a optimalizovaného motoru

Na obrázku 4.5 je porovnanie radiálnych rozmerov stroja, prerušovanou čiarou je nakreslený optimalizovaný stroj, ku ktorému sa vzťahujú modré kóty, farebný stroj je pôvodný. Zakótované sú všetky parametre, ktoré mal OptiSlang možnosť meniť.

Tabuľka 4.5 Porovnanie pôvodného motoru s optimalizovaným a upraveným

| Veličina | Jednotka | Pôvodný | | Upravený | | Optimalizovaný | |
|----------------------|----------------------|-----------|---------|-----------|---------|----------------|---------|
| | | Motor-Cad | Maxwell | Motor-Cad | Maxwell | Motor-Cad | Maxwell |
| M_{dq} | (Nm) | 80,831 | 81,443 | 80,671 | 78,85 | 80,34 | 80,26 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 |
| P_{emag} | (W) | 50788 | 51172 | 50687 | 49543 | 50472 | 50429 |
| P_{out} | (W) | 50065 | 50459 | 49947 | 48824 | 49851 | 49850 |
| P_{in} | (W) | 53356 | 53746 | 51466 | 50322 | 51340 | 51298 |
| η | (%) | 93,83 | 93,88 | 97,05 | 97,02 | 97,10 | 97,18 |
| I_{lfmax} | (A) | 147,36 | 147,36 | 133,5 | 133,5 | 135,6 | 135,6 |
| I_{dmax} | (A) | -69,03 | -69,02 | -61,66 | -61,66 | -63,36 | -63,47 |
| I_{qmax} | (A) | 130,19 | 130,2 | 118,41 | 118,41 | 119,83 | 119,82 |
| ΔP_{FeS} | (W) | 690 | 686 | 709 | 694 | 590 | 553 |
| ΔP_{FeR} | (W) | 17 | 11 | 15 | 9 | 10 | 5 |
| ΔP_{Cu} | (W) | 908 | 909 | 746 | 746 | 854 | 854 |
| ΔP_{mag} | (W) | 1660 | 1665 | 33 | 33 | 15 | 15 |
| $\Delta P_{windage}$ | (W) | 16 | 16 | 16 | 16 | 21 | 21 |
| ΔP_{total} | (W) | 3291 | 3287 | 1519 | 1498 | 1490 | 1448 |
| V | (cm ³) | 3859 | | | | 2901 | |
| Stator | (kg) | 10,16 | | | | 7,98 | |
| Rotor | (kg) | 6,75 | | | | 5,56 | |
| Med' | (kg) | 6,75 | | | | 3,52 | |
| Magnet | (kg) | 1,20 | | | | 1,44 | |
| Hriadeľ | (kg) | 1,06 | | | | 0,94 | |
| Celkovo | (kg) | 26,16 | | | | 19,44 | |

Na obrázku 4.6 je porovnanie účinnostných máp upraveného a optimalizovaného stroja. Šípkami je vyznačená hranica, za ktorou má optimalizovaný stroj vyššiu účinnosť, ako stroj upravený (región s tmavšou modrou).



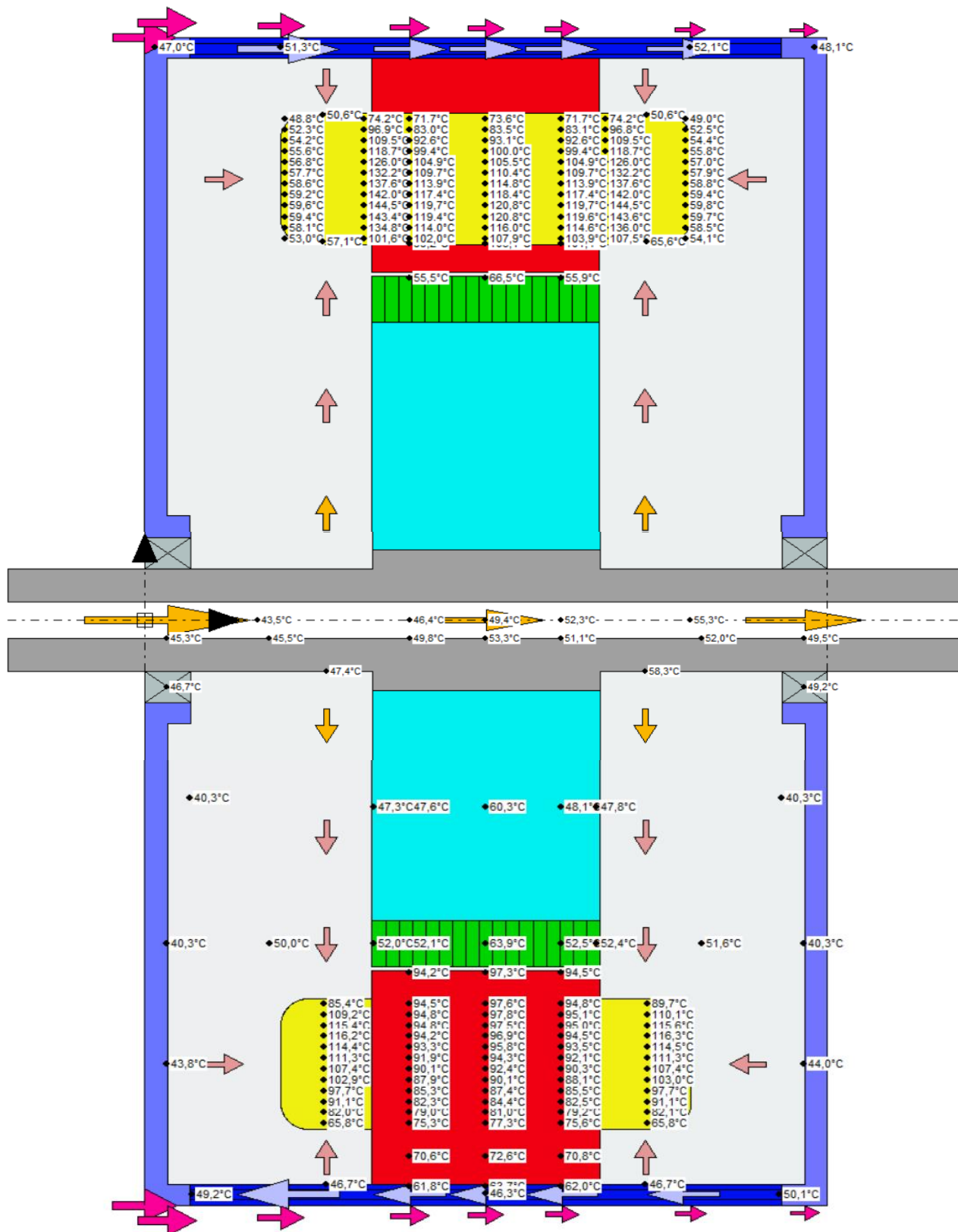
Obrázok 4.6 Rozdiel účinnostných máp upraveného a optimalizovaného stroja

4.3 Tepelný model dizajn 30387

V tejto kapitole bude predstavený zjednodušený tepelný model a návrh chladenia v programe Motor-Cad Thermal.

V modeli boli použité tri druhy chladenia, olejové chladenie kostry, olejové chladenie hriadele a sprejové chladenie čiel vinutí. Sprejové chladenie sa skladá z 5 trysiek na kostre a 4 trysiek na hriadelí, ktoré chladia vonkajšiu a vnútornú stranu čiel vinutí a využívajú olej pretekajúci týmito chladiacimi systémami a ďalšími 4 tryskami, ktoré sú napájané externe a chladia prednú a zadnú stranu čiel. Ako chladiace médium bol použitý olej ATF134. Chladiaci systém a smer prúdenia médií je znázornený na obrázku 4.7.

Obrázok 4.7 tiež obsahuje výsledné teploty pri pracovnom bode 79,58Nm a 6000 otáčok, je vidieť, že teplota rotoru a magnetov je veľmi priaznivá, na druhej strane teplota vinutia je o niečo vyššia, čo je spôsobené najmä pomerne vysokými stratami vo vinutí. V prílohe A sa nachádza podrobné tepelné schéma stroja.

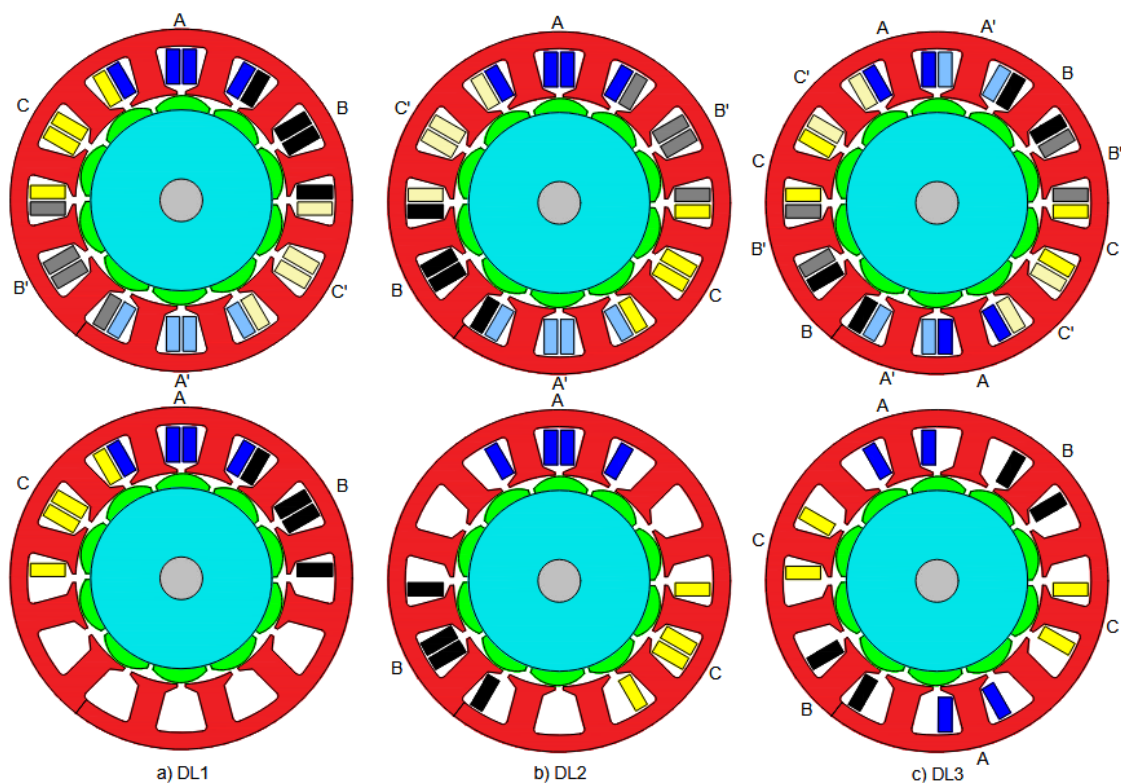


Obrázok 4.7 Chladienie stroja vrátane smeru prúdenia médií v chladičoch

5. PORUCHOVÉ STAVY

V tejto kapitole budú rozobrané dva poruchové stavy, ktoré boli simulované. Prvý poruchový stav je rozpojenie jednej z fáz, po rozpojení jednej z fáz sa odpojí celý trojfázový systém a motor už pracuje len s jedným trojfázovým systémom s polovičným momentom a výkonom. Druhý poruchový stav je jednofázový skrat, po skrate sa taktiež odpojí celý jeden trojfázový systém a jedno z vinutí zostáva skratované.

Pred simuláciami jednotlivých porúch bolo ešte nutné zvoliť rozloženie dvoch trojfázových systémov po obvode statoru. Podľa [6] boli uvažované tri možnosti, ktoré sú znázornené na obrázku 5.1



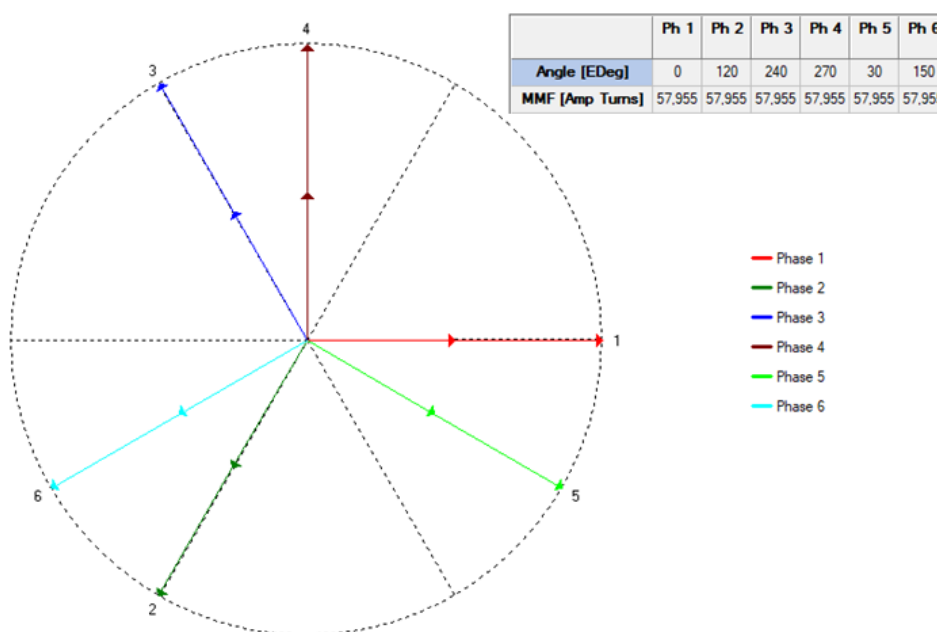
Obrázok 5.1 Možnosti rozloženia vinutí po obvode statoru

Tabuľka 5.1 Kritériá výberu rozloženia vinutia

| | Rozpojenie Fáz | | | Skrat | | |
|-----|----------------|-------------|----------------------|---------|-------------|---------------|
| | UMP (N) | Moment (Nm) | Zvlnenie momentu (%) | UMP (N) | Moment (Nm) | I_{shc} (A) |
| DL1 | 835 | 39,78 | 3,87 | 1292 | 39,18 | 200,31 |
| DL2 | 157 | 40,04 | 2,80 | 1366 | 38,17 | 195,99 |
| DL3 | 0,05 | 41,62 | 4,47 | 0,05 | 35,15 | 229,51 |

Na základe tabuľky 5.1 bol zvolený dizajn s rozložením DL2. Tento dizajn bol zvolený na základe relatívne priaznivej veľkosti nevyváženého magnetického ťahu počas prevádzky na polovičný výkon, v tomto stave stroj tiež dosahuje najnižšie zvlnenie momentu. Čo sa týka skratu, má stroj síce najvyššiu hodnotu nevyváženého magnetického ťahu, ale dosahuje najnižšie hodnoty skratového prúdu. Rozloženie DL1 nebolo zvolené vďaka vysokým hodnotám UMP v oboch poruchách, taktiež vyššiemu zvlneniu momentu a skratového prúdu.

Rozloženie DL3 má práve vďaka symetrickému rozloženiu fáz po obvodě statoru veľmi priaznivú veľkosť UMP, stroj taktiež dosahuje najvyšší moment pri poruche jedného trojfázového systému, ale tiež má aj najväčšie zvlnenie momentu. Pri zdravom chode má stroj dokonca o približne 3% väčší moment, práve kvôli vyššiemu činiteľu vinutia keďže stroj musí byť napájaný ako 6 fázový (druhý trojfázový systém je posunutý o 30° elektrických oproti prvému ako je znázornené na obrázku 5.2). Podľa [6] má toto rozloženie z vyššie zmienených najpriaznivejšie vlastnosti čo sa týka tepelného manažmentu počas poruchy. DL3 však dosahuje najhoršie vlastnosti počas skratu, tj. najmenší moment a najvyšší skratový prúd.



Obrázok 5.2 Fázory napätí 6-fázový systém DL3

5.1 Rozpojenie fáz

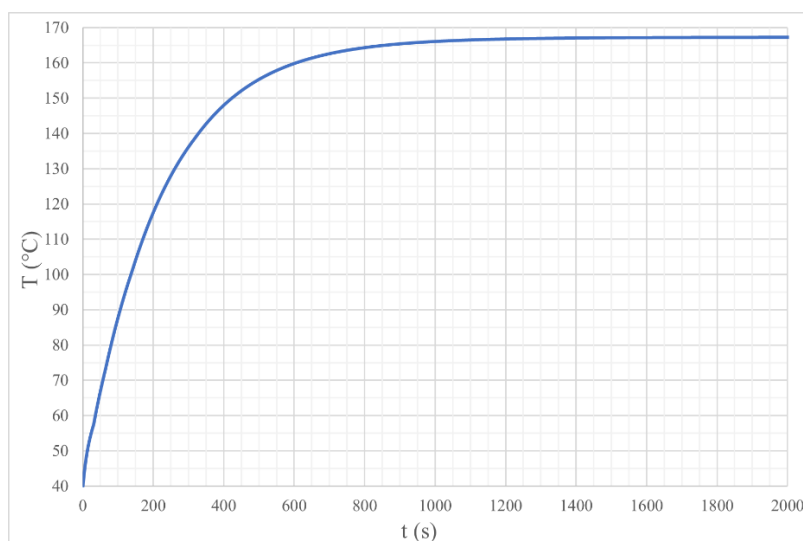
V tejto podkapitole budú uvedené výsledky zo simulácie poruchového stavu, kde je jeden trojfázový systém vypnutý.

Stroj bol napájaný takými prúdmi, aby pri rovnakých prúdoch v bezporuchovej prevádzke dosahoval menovitých 79,58 Nm a 6000 otáčok za minútu. V tabuľke 5.2 sú znázornené prevádzkové parametre stroja pri chode na polovičný výkon (výpadok jedného trojfázového systému) a maximálne možné preťaženie z programu Maxwell aj Motorcad. Je zrejmé, že výpadok ½ stroja zníži straty v medi o polovicu, ostatných strát sa tento výpadok skoro vôbec netýka. Stroj stále dosahuje pomerne vysokú účinnosť 95,90%.

Tabuľka 5.2 Parametre motoru pri rozpojení fáz

| | | Normal | | Overload | |
|-------------------|----|--------|---------|----------|---------|
| | | Mcad | Maxwell | Mcad | Maxwell |
| I_{phmax} | A | 135,6 | 135,6 | 153,3 | 153,3 |
| PhA | ° | 27,91 | 27,91 | 28,03 | 28,03 |
| I_q | A | 119,83 | 119,83 | 135,32 | 135,32 |
| I_d | A | -63,47 | -63,47 | -72,04 | -72,04 |
| P_{em} | W | 25525 | 25157 | 28584 | 28165 |
| P_{in} | W | 25962 | 25594 | 29145 | 28726 |
| P_{out} | W | 24843 | 24546 | 27896 | 27552 |
| M | Nm | 40,64 | 40,04 | 45,51 | 44,83 |
| Zvlnenie | % | 2,13 | 2,80 | 2,26 | 2,78 |
| ΔP_{fe} | W | 661 | 590 | 667 | 592 |
| ΔP_{Cu} | W | 427 | 427 | 546 | 546 |
| ΔP_{mag} | W | 10 | 10 | 13 | 12 |
| ΔP_{mech} | W | 21 | 21 | 21 | 21 |
| ΔP_{tot} | W | 1119 | 1048 | 1249 | 1174 |
| η | % | 95,69 | 95,90 | 95,71 | 95,91 |

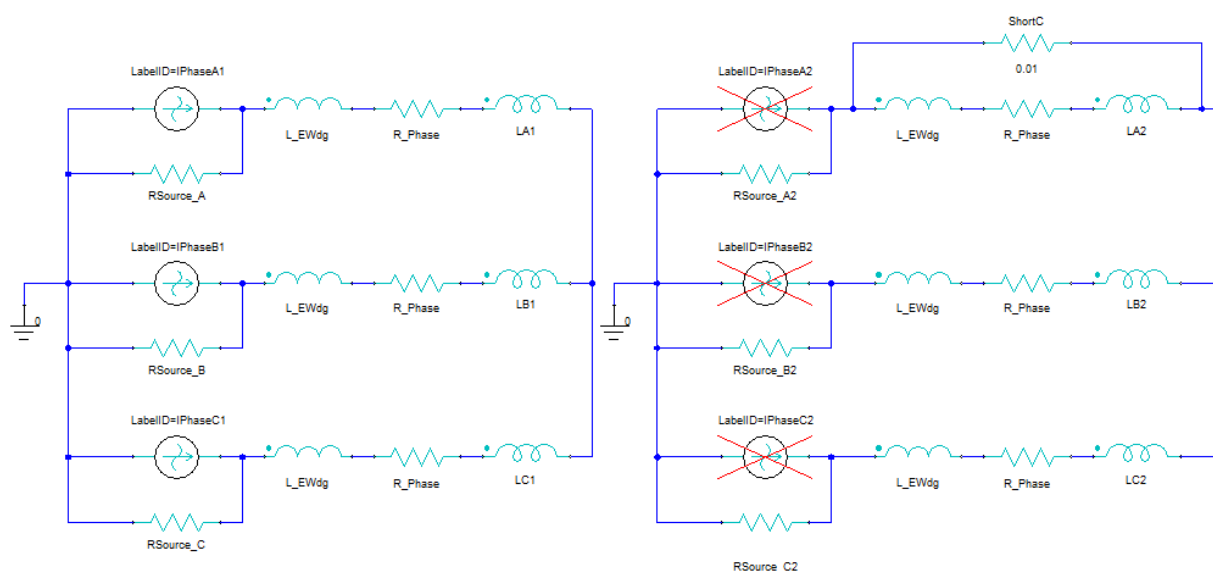
Pri tejto poruche bolo ešte otestované, aké veľké trvalé preťaženie je stroj schopný zniesť. Tým je myslené, o koľko väčší prúd je možné použiť pri snahe zvýšiť moment v poruchovom stave čo najviac (oproti predpokladaným 40Nm) Hranica tohto preťaženia bola určená podľa maximálnej teploty v drážke alebo čiel vinutí, maximálna teplota bola vzhľadom na izoláciu zvolená 165°C. Keďže hot spot pri zdravom chode (približne 145°C) je pomerne blízko maximálnej dovolenej hodnote je jasné, že stroj nebude mať veľkú rezervu. V tabuľke 5.2 (Overload) sú uvedené parametre, ktoré boli dosiahnuté tak, aby maximálna teplota v drážke/čielach neprekročila 165°C. Z tabuľky vyplýva, že pri výpadku jedného trojfázového systému je ešte možné zvýšiť moment o 12% na konečných 44,83Nm tak, aby to stroj teplotne zvládol.



Obrázok 5.3 Otepľovacia krivka hot spotu vinutia pri preťažovaní

5.2 Jednofázový skrat

Ďalšia simulovaná porucha bol jednofázový skrat, táto porucha bola simulovaná už len v Maxwell 2D, pretože ju nie je možné simulovať v MotorCade. Porucha je znázornená na obrázku 5.4.

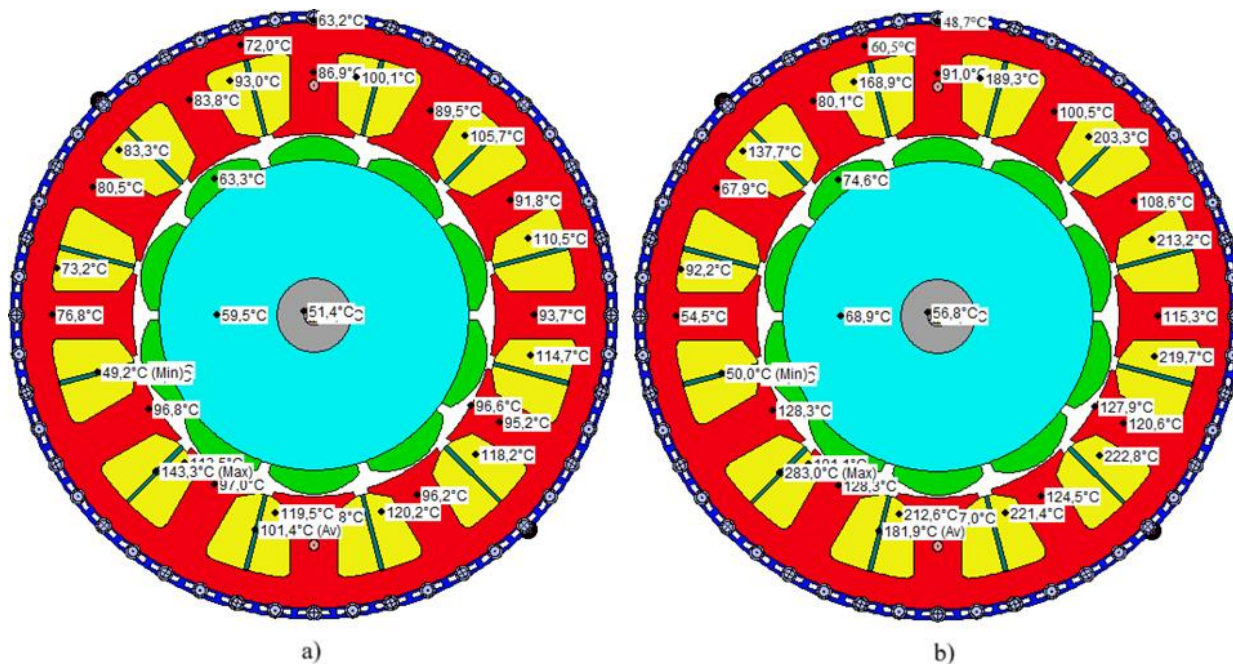


Obrázok 5.4 Externé napájanie modelu v Maxwell 2D

Tabuľka 5.3 Parametre motoru počas skratu

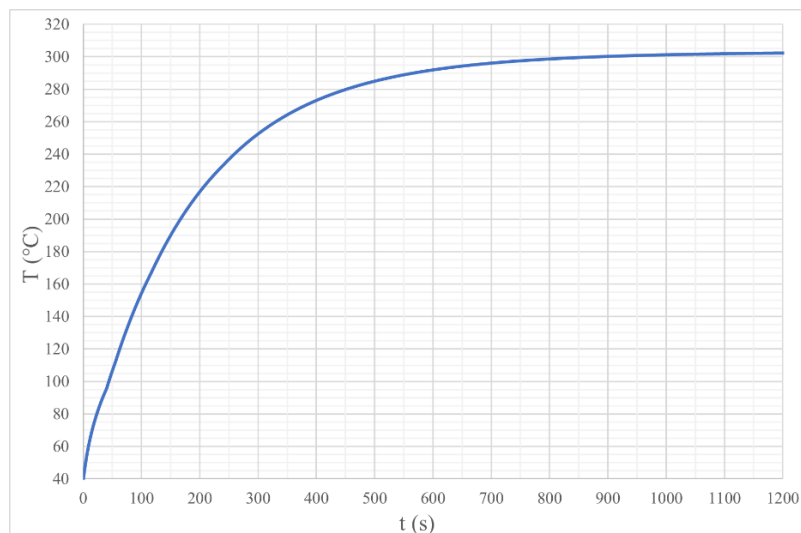
| | | |
|-------------------|----|--------|
| I_{SHCmax} | A | 192,2 |
| I_{lfmax} | A | 135,6 |
| P_{em} | W | 23980 |
| P_{in} | W | 24937 |
| P_{out} | W | 23433 |
| M | Nm | 38,17 |
| Zvlnenie | % | 119,86 |
| ΔP_{fe} | W | 526 |
| ΔP_{Cu} | W | 941 |
| ΔP_{mag} | W | 16 |
| ΔP_{mech} | W | 21 |
| ΔP_{tot} | W | 1504 |
| η | % | 93,97 |

V tabuľke 5.3 sú uvedené výsledné parametre motoru počas skratu. Zaujímavé je, že brzdný moment zo skratovanej fáze nie je až taký veľký a zníži výsledný moment len o 2Nm (stroj má počas skratu vypnuté napájanie v danom trojfázovom systéme). Čo sa týka jednotlivých strát, väčšina z nich zostane takmer nezmenená, okrem strát vo vinutí, ktoré v dôsledku skratového prúdu v poškodenej fáze dokonca vyrastú o približne 100W oproti bezporuchovému chodu. Na obrázku 5.5 je znázornený radiálny pohľad na motor, ktorý zachytáva rozloženie teplôt v stroji s rešpektovaním rozloženia strát do jednotlivých drážok, z obrázku je zrejmé, že stroj by tepelne skratovú poruchu nezvládol.



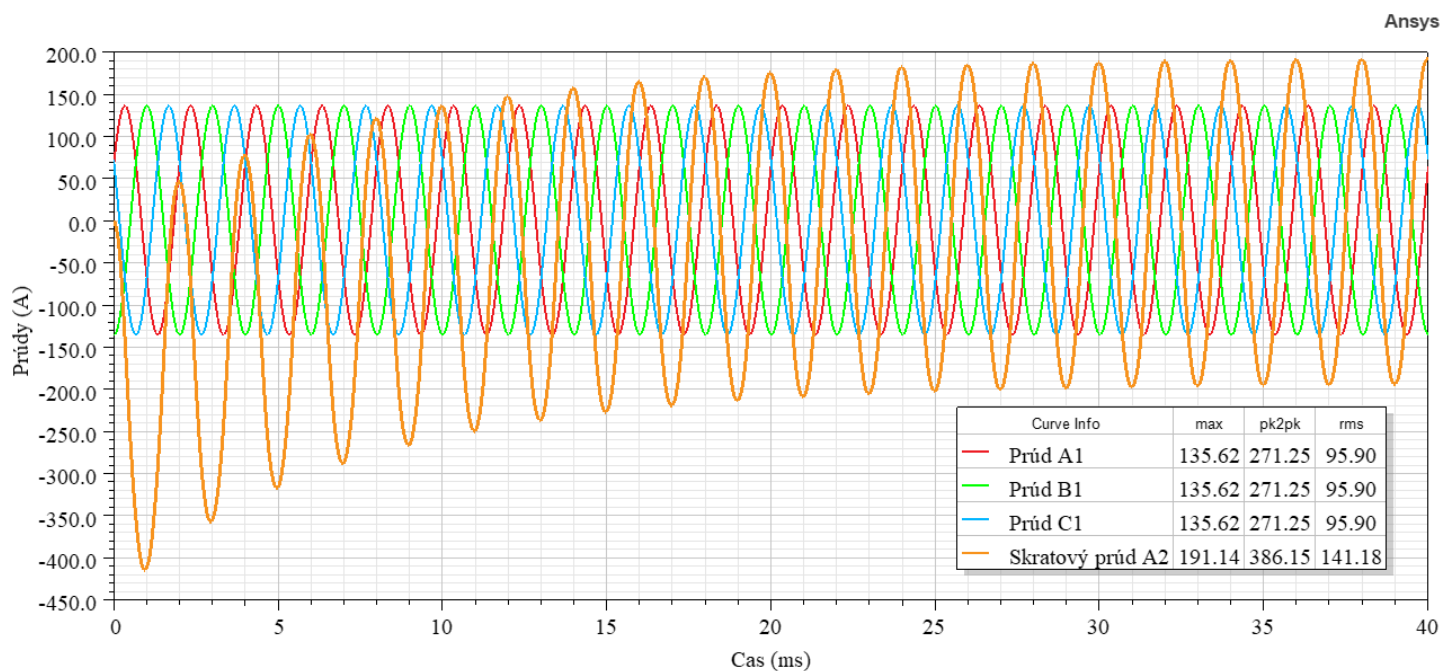
Obrázok 5.5 Teploty v motore a) bezporuchový stav b) skrat (radiálny pohľad)

Z obrázku 5.6 je tiež zrejmé, že stroj by aj v prípade skratu bez predošlej prevádzky ($T_0=40^\circ\text{C}$) vydržal len približne 100 sekúnd (čas po dosiahnutí max. povolenej teploty izolácie). V prípade, že by skrat nastal počas chodu alebo v momente, keď už je stroj zahriaty, k tepelnému zlyhaniu by došlo takmer okamžite.



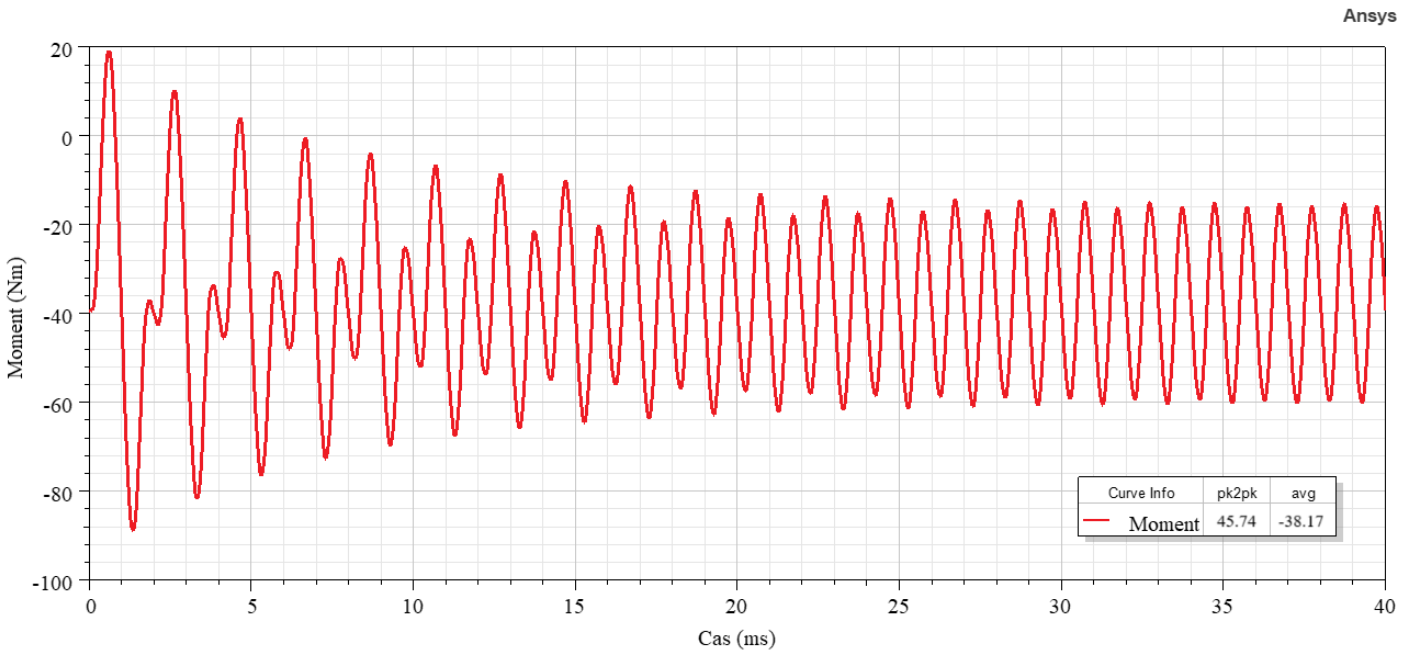
Obrázok 5.6 Otepľovacia krivka hot spotu vinutia

Na obrázku 5.7 je znázornený priebeh skratového prúdu. Ustálenie nastáva po približne 25 ms.

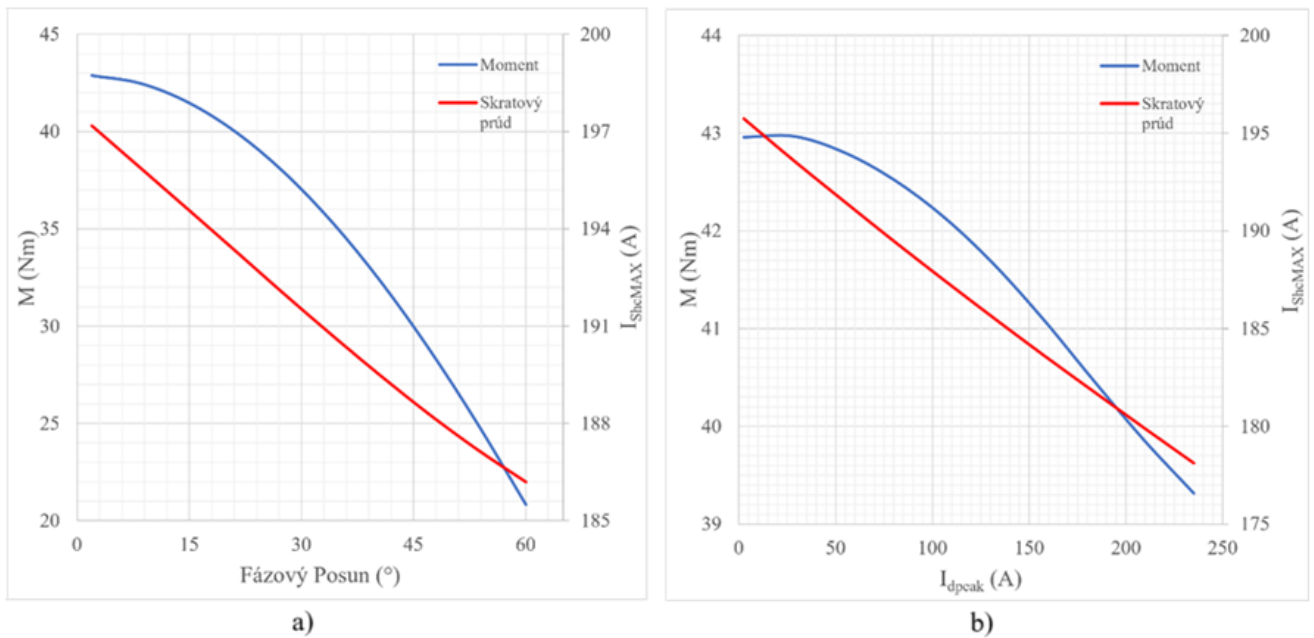


Obrázok 5.7 Priebehy prúdov počas skratu

Z obrázku 5.8 je zrejmé, že moment síce po ustálení má „jeden smer“, ale aj značné zvlnenie a to by mohlo spôsobovať nežiadúce vibrácie a hluk.



Obrázok 5.8 Priebeh momentu počas skratu



Obrázok 5.9 Citlivostná analýza a) fázový posun b) I_d

Pri skratovej poruche bola ešte vykonaná citlivostná analýza na zmenu fázového posunu (fázový posun je uhol medzi q osou a fázovým prúdom $\text{PhA} = \tan^{-1}(I_d/I_q) = \cos^{-1}(I_q/I_{1f})$) pri konštantnom $I_{1f\text{max}}$ (obrázok 5.9 a)) a citlivostná analýza zvyšovania prúdu v d ose pri konštantnom I_q (obrázok 5.9 b)). Sledovaná bola stredná hodnota momentu a maximálny skratový prúd. Z obrázku 5.9 a) je zrejmé, že moment bude zvyšovaním fázového posunu klesať, keďže sa zvyšuje d zložka prúdu na úkor momentotvornej q zložky. Zvyšovaním fázového posunu sa tiež znižuje aj skratový prúd, ten sa však na celom rozsahu zníži len o približne 10A ale moment sa vďaka veľkej d a malej q zložke zníži takmer na polovicu.

V druhom prípade (obrázok 5.9 b)) sa deje niečo podobné, pretože zvyšovaním I_d sa zvyšuje aj fázový posun, akurát v tomto prípade je I_q konštantný. Tu sa na rozsahu tiež približne 60° fázového posunu zníži moment len o 4 Nm ale skratový prúd klesne len o približne 20 A, čo je stále nedostatočné a navyše rastú aj celkové straty v medi stroja, pretože pri držaní konštantnej I_q a pridávaní I_d sa zvyšuje I_{1f} .

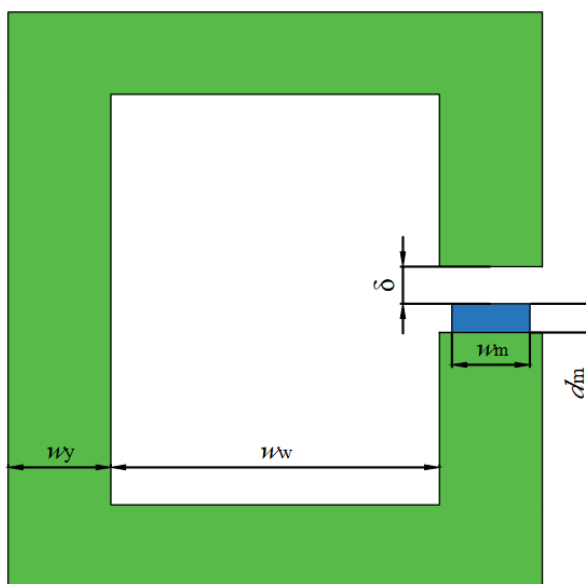
6. MODEL S VNORENÝMI MAGNETMI

Z predošlej kapitoly vyplýva, že stroj s magnetmi na povrchu nie je odolný voči skratovej poruche. A ako bolo spomenuté v kapitole 1, skratový prúd je možné efektívne obmedziť práve zvyšovaním indukčnosti, ktorú majú stroje s vnorenými magnetmi podstatne vyššiu ako stroje s magnetmi na povrchu. V tejto kapitole bude predstavený zjednodušený návrh rotoru s vnorenými magnetmi, stroj bude mať pre porovnanie rovnaký stator (tj. vinutie, materiály, rozmery).

6.1 Návrh a optimalizácia rotoru

Pri návrhu boli na začiatku vypočítané iba rozmery magnetov, aby bol k dispozícii východiskový bod na začiatok optimalizácie. Ostatné parametre boli získané prostredníctvom optimalizácie v OptiSlangu, pričom ich hodnoty a limity boli inšpirované podľa [14].

Pri návrhu rozmerov magnetov sa vychádzalo z [15]. Ako je zrejmé z obrázku 6.1 myšlienkou bolo nájsť také rozmery magnetu w_m a d_m pri, pri ktorých bude splnená požiadavka $B_\delta = 0,75T$.



Obrázok 6.1 Princíp výpočtu rozmerov magnetu

Šírka magnetu bola určená na základe rovnosti tokov podľa rovnice 6.1

$$B_m \cdot S_m \cdot k_1 = B_\delta \cdot S_\delta \quad (6.1)$$

Kde B_m je magnetická indukcia v zvolenom pracovnom bode magnetu, S_m je plocha magnetu pod vzduchovou medzerou, k_1 je koeficient zohľadňujúci rozptyl toku B_δ je

magnetická indukcia v medzere a S_δ je plocha vzduchovej medzery nad jedným pólom. Pri uvažovaní, že osová dĺžka magnetu a vzduchovej medzery je rovnaká je možné rovnicu upraviť na tvar

$$B_m \cdot w_m \cdot k_l = B_\delta \cdot w_\delta \quad (6.2)$$

Kde w_m je šírka magnetu a w_δ šírka vzduchovej medzery nad jedným pólom.

Výška magnetu bola určená na základe úbytkov magnetického napätia pozdĺž vzduchovej medzery podľa rovnice 6.3

$$H_m \cdot d_m = -H_\delta \cdot \delta \cdot k_r \quad (6.3)$$

Kde H_m je magnetická intenzita v zvolenom pracovnom bode magnetu, d_m je výška magnetu, H_δ je magnetická intenzita vo vzduchovej medzere, δ je výška vzduchovej medzery a k_r je činiteľ zohľadňujúci reluktanciu železa.

Na výpočet šírky magnetu je potrebné určiť B_m podľa zvolenej $H_m = -200 \text{ kA/m}$ ako

$$B_m = -\frac{B_r}{H_c} H_m + B_r = -\frac{1,31}{-911} \cdot -200 + 1,31 = 1,022 \text{ T} \quad (6.4)$$

Rovnica 6.4 vychádza z lineárnej časti BH krivky magnetu. Parametre B_r a H_c sú pre magnet N42UH. Šírka vzduchovej medzery nad jedným pólom sa určí ako pólová rozteč v strede vzduchovej medzery

$$w_\delta = \frac{\pi \cdot D_\delta}{2p} = \frac{\pi \cdot 167,1}{10} = 52,496 \text{ mm} \quad (6.5)$$

Šírka magnetu pod jedným pólom sa potom rovná

$$w_m = \frac{B_\delta \cdot w_\delta}{B_m \cdot k_l} = \frac{0,75 \cdot 52,496}{1,0224 \cdot 0,9} = 42,79 \text{ mm} \quad (6.6)$$

Na výpočet výšky je ešte potrebné určiť magnetickú intenzitu vo vzduchovej medzere ako

$$H_\delta = \frac{B_\delta}{\mu_0} = \frac{0,75}{\mu_0} = 596831 \text{ A/m} \quad (6.7)$$

A výška magnetu sa potom určí ako

$$d_m = \frac{H_\delta \cdot \delta \cdot k_r}{H_m} = \frac{596831 \cdot 1 \cdot 1,15}{200000} = 3,43 \text{ mm} \quad (6.8)$$

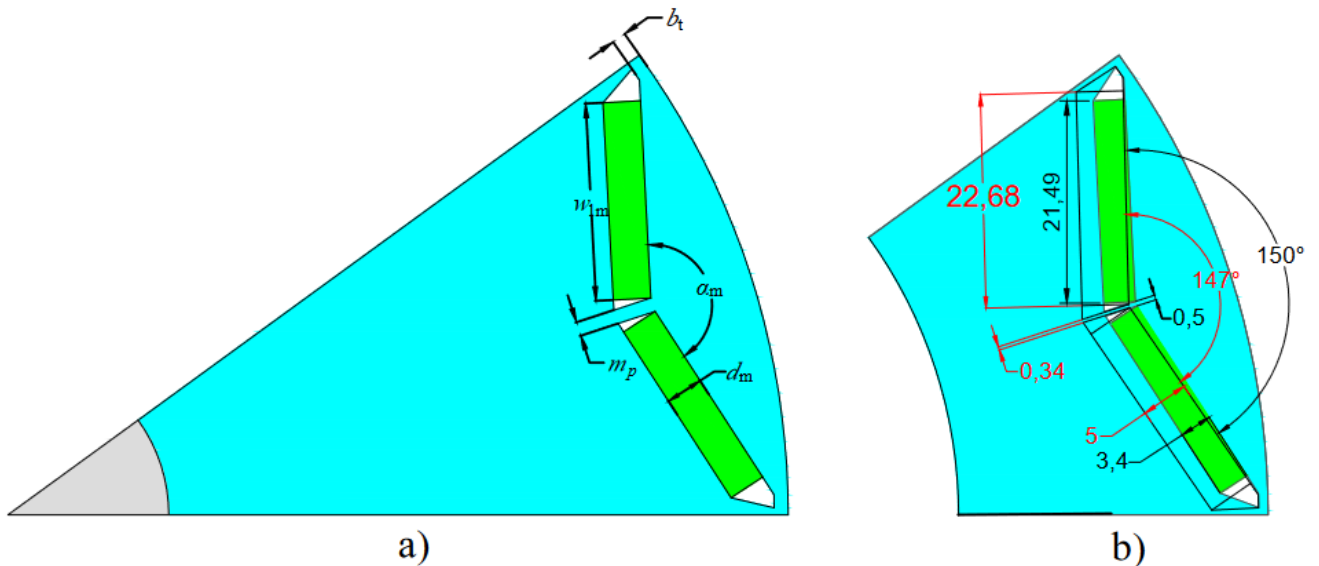
Východiskový bod na optimalizáciu magnetu je teda $w_{1m} = 21,4 \text{ mm}$ a $d_m = 3,43 \text{ mm}$.

Kde w_{1m} je šírka jedného magnetu z dvojice magnetov v jednom póle.

Ako bolo vyššie spomínané, ďalšie parametre sa nedopočítavali, ale boli (rovnako ako výška a šírka magnetu) výsledkom optimalizácie, v tabuľke 6.1 sú uvedené všetky parametre, ktoré boli optimalizované vrátane ich medzí. Pre lepšiu predstavu sú tieto parametre zobrazené aj na obrázku 6.2. Obrázok tiež znázorňuje aj výsledné hodnoty po optimalizácii (červené kóty, čierne kóty sú hodnoty pred optimalizáciou).

Tabuľka 6.1 Premenné parametre pri optimalizácii

| Značka | Parameter | Pôvodná | Min. | Max. |
|------------|----------------------------------|---------|------|-------|
| m_p | Šírka medzi magnetmi (mm) | 0,5 | 0 | 3 |
| b_t | Výška mostíku (mm) | 1 | 1 | 5 |
| w_{1m} | Šírka magnetu (mm) | 21,4 | 19 | 23,15 |
| d_m | Výška magnetu (mm) | 3,43 | 2 | 5 |
| α_m | Uhol medzi magnetmi ($^\circ$) | 150 | 110 | 165 |
| | Vzduchová medzera (mm) | 1 | 0,7 | 1 |



Obrázok 6.2 a) Legenda k tabuľke 6.1 b) Porovnanie rozmerov pred a po optimalizácii

Tabuľka 6.2 Požiadavky optimalizácie

| Typ | Veličina | Požiadavka | Operačný bod |
|------|-----------------------------|------------|--------------|
| Max. | Moment (Nm) | > 83 | 1000 rpm |
| Max. | Moment (Nm) | > 82 | 3000 rpm |
| Max. | Moment (Nm) | > 79,58 | 6000 rpm |
| Max. | Výkon (W) | > 50000 | 6000 rpm |
| | Bezpečnostný koeficient (-) | > 3 | 6000 rpm |

Pri tomto type stroja boli požiadavky na špičkový výkon položené nižšie, pretože sa neočakávala podobná/rovnaká momentová hustota. Bolo tiež potrebné definovať

bezpečnostný koeficient, ktorý udáva pomer maximálneho mechanického napätia v rotore ku maximálnemu povolenému napätiu. Týmto parametrom bola v podstate limitovaná výška mostíku a šírka medzi magnetmi. Ciele optimalizácie boli maximalizovať účinnosť a maximalizovať moment pri 6000 otáčkach. Ďalej bol už postup rovnaký, ako v optimalizácii v kapitole 4.

6.2 Dizajn 2417

V tejto kapitole bude predstavený optimalizovaný model motoru s vnorenými magnetmi.

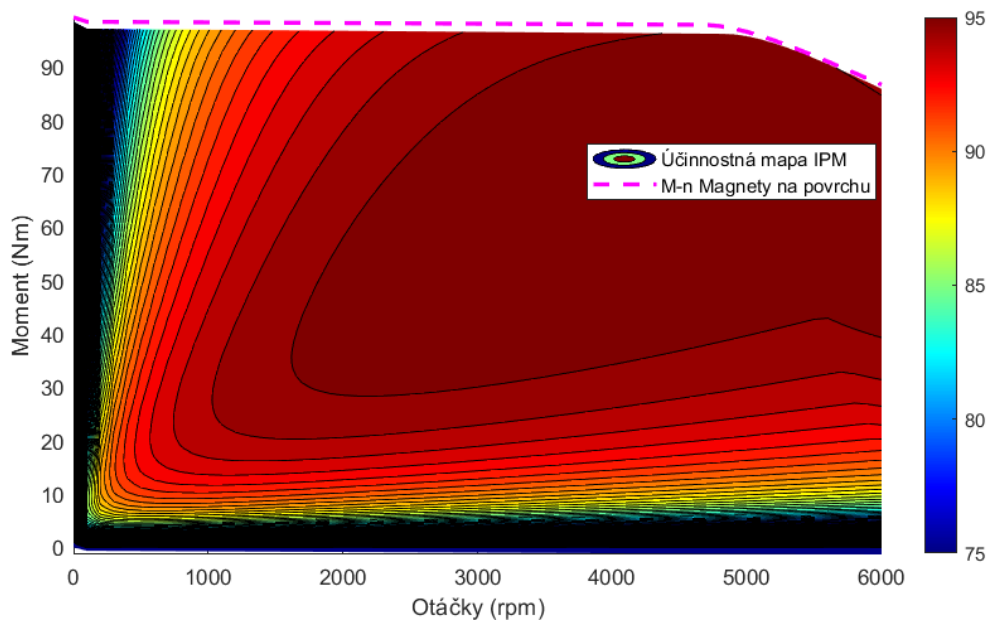
Tabuľka 6.3 Porovnanie motoru s magnetmi na povrchu s modelom s vnorenými

| Veličina | Jednotka | Magnety na povrchu | | Vnorené magnety | |
|----------------------|----------------------|--------------------|---------|-----------------|---------|
| | | Motor-Cad | Maxwell | Motor-Cad | Maxwell |
| M_{dq} | (Nm) | 80,34 | 80,26 | 80,21 | 80,00 |
| Zvlhnenie | % | 0,62 | 0,8 | 5,46 | 5,38 |
| n_n | (min ⁻¹) | 6000 | 6000 | 6000 | 6000 |
| P_{emag} | (W) | 50472 | 50429 | 50390 | 50245 |
| P_{out} | (W) | 49851 | 49850 | 49199 | 49214 |
| P_{in} | (W) | 51340 | 51298 | 51359 | 51214 |
| η | (%) | 97,1 | 97,18 | 95,79 | 96,09 |
| I_{lfmax} | (A) | 135,6 | 135,6 | 129,95 | 129,96 |
| I_{dmax} | (A) | -63,36 | -63,47 | -84,57 | -84,54 |
| I_{qmax} | (A) | 119,83 | 119,82 | 98,71 | 98,71 |
| ΔP_{FeS} | (W) | 590 | 553 | 943 | 861 |
| ΔP_{FeR} | (W) | 10 | 5 | 242 | 164 |
| ΔP_{Cu} | (W) | 854 | 854 | 784 | 784 |
| ΔP_{mag} | (W) | 15 | 15 | 41 | 41 |
| $\Delta P_{windage}$ | (W) | 21 | 21 | 6 | 6 |
| ΔP_{total} | (W) | 1490 | 1448 | 2160 | 2000 |
| L_d | (mH) | 0,1075 | | 0,1678 | |
| L_q | (mH) | 0,1059 | | 0,2336 | |
| L_{md} | (mH) | 0,05178 | | 0,112 | |
| L_{mq} | (mH) | 0,05572 | | 0,1778 | |
| L_{lph} | (mH) | 0,1183 | | 0,2175 | |
| Rotor | (kg) | 5,56 | | 6,64 | |
| Magnet | (kg) | 1,44 | | 0,85 | |

V tabuľke 6.3 sú uvedené výsledné parametre motoru s vnorenými magnetmi porovnané

s motorom s magnetmi na povrchu. Motor s vnorenými magnetmi dosahuje o viac ako 1% nižšiu účinnosť, ktorá je spôsobená zdvojnásobením strát v železe. Napriek tomu má táto konfiguráciu výhodu v tom, že vyžaduje až o 69% menej materiálu na magnety. Treba však poznamenať, že motor s vnorenými magnetmi má o približne 0,5kg vyššiu hmotnosť, čo je výsledkom nárastu hmotnosti rotorového jha.

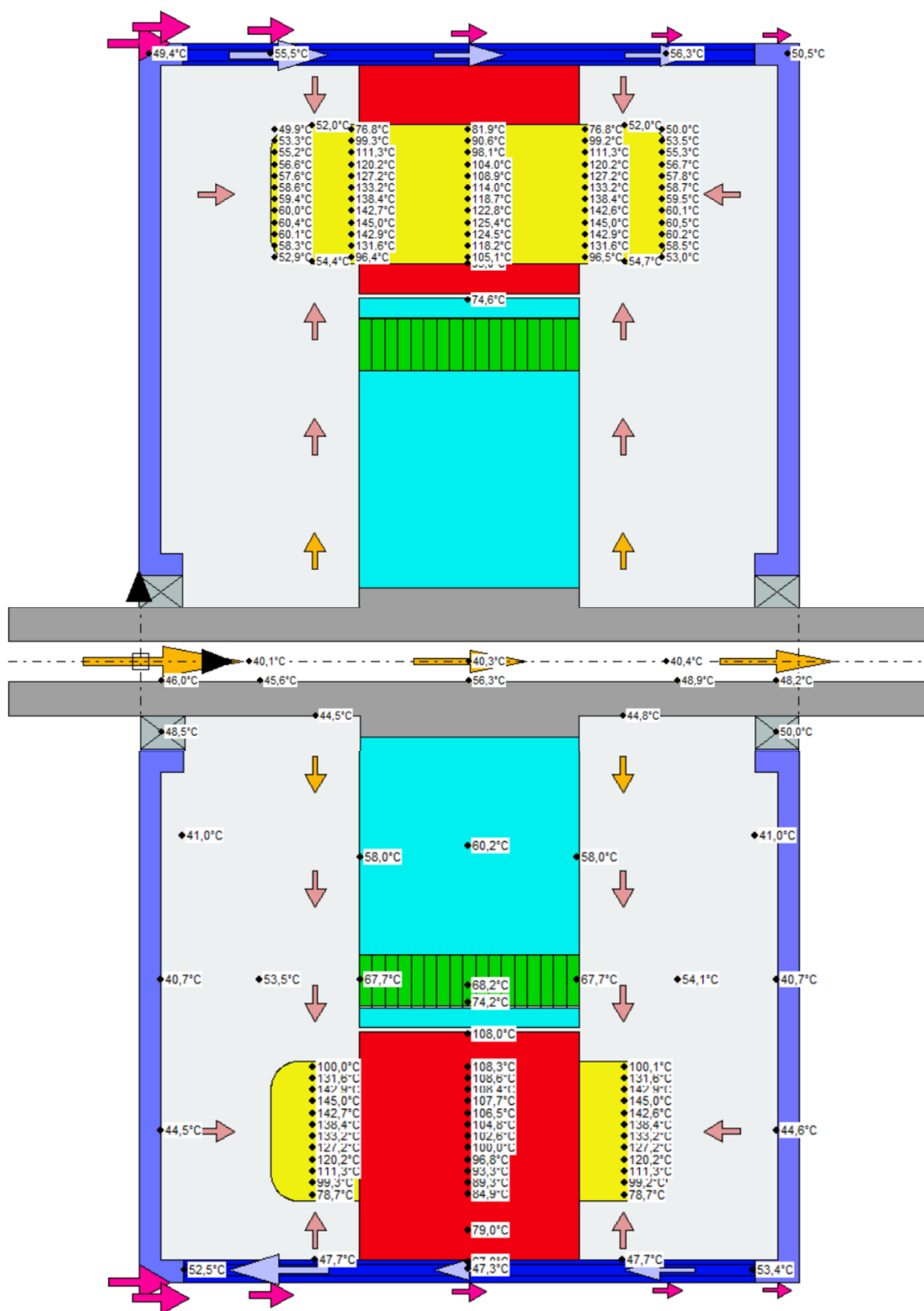
Na obrázku 6.3 je znázornená účinnosťná mapa motoru s vnorenými magnetmi spolu s momentovou charakteristikou motoru s magnetmi na povrchu, pri rovnakom prúde bude mať stroj s magnetmi na povrchu aj o niečo väčší špičkový moment.



Obrázok 6.3 Účinnosťná mapa IPM vrátane momentovej charakteristiky MNP

Kvôli vysokým stratám v železe bol pre vyhodnotenie možnosti ich potlačenia postavený model s plechmi N20 0.2mm. S týmito plechmi sa v stroji s vnorenými magnetmi znížili straty v železe statoru o 182 W a straty v železe rotoru o 82 W, výsledné tak teda boli $\Delta P_{FeS} = 761$ W, $\Delta P_{FeR} = 160$ W a výsledná účinnosť $\eta = 96,97\%$. A pre stroj s magnetmi na povrchu sa straty v železe statoru znížili o 172 W a výsledné boli $\Delta P_{FeS} = 418$ W a účinnosť $\eta = 97,44\%$. (Všetky tieto hodnoty boli počítané v programe Motor-Cad). S týmito modelmi sa však ďalej nepočítalo, boli vytvorené výlučne na zaistenie potenciálu zníženia strát v železe prostredníctvom tejto jednoduchšej zmeny.

Pre motor s vnorenými magnetmi bol vytvorený zjednodušený tepelný model, ako v kapitole 4.3. Bolo použité rovnaké chladenie a jednotlivé teploty v ustálenom stave v menovitom bode sú znázornené na obrázku 6.4. Očakávalo sa, že nárast strát v rotore a statore bude sprevádzať aj zvýšenie teploty týchto komponentov, čo sa aj potvrdilo. Napriek tomu však teplota zostala v rámci povolených hodnôt, čo znamená, že chladenie uvedené v kapitole 4.3 je dostatočné.



Obrázok 6.4 Chladenie stroja vrátane teplôt pri menovitom zaťažení

6.3 Rozpojenie fáz

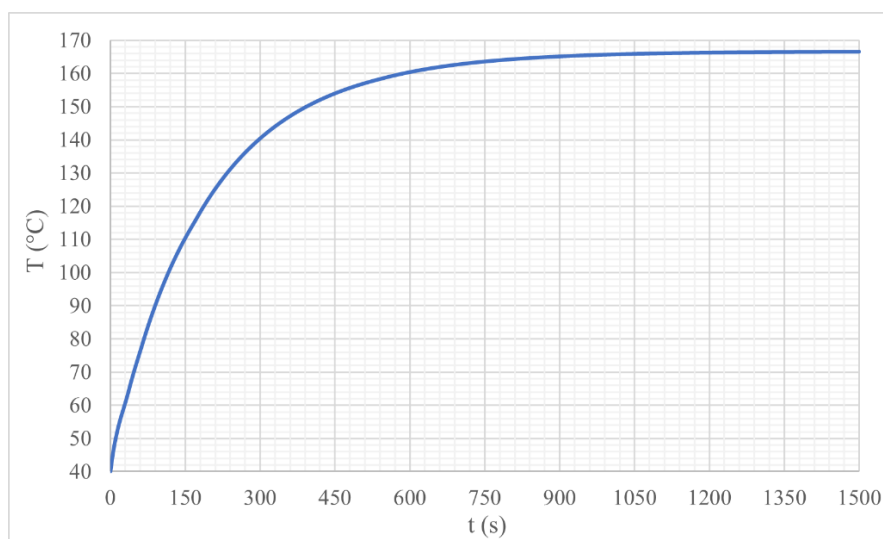
Stroj bol rovnako ako v 5.1 zaťažovaný tak, aby pri bezporuchovom chode dosahoval menovitý moment 79,58 Nm. V tabuľke 6.4 sú znázornené prevádzkové parametre stroja pri chode na polovičný výkon a maximálne možné preťaženie pri odpojení jedného trojfázového systému.

Z tabuľky je zrejmé, že v porovnaní so strojom s magnetmi na povrchu má tento stroj horšie parametre pri chode na polovičný výkon. Stroj s vnorenými magnetmi dosahuje o približne 2 Nm menší moment o 2% menšiu účinnosť a dokonca až o 13% väčšie zvlnenie momentu.

Čo sa týka maximálneho možného preťaženia (limitujúci faktor je teplota vinutia/čiel vinutí $T_{max} = 165^{\circ}\text{C}$), je možné rovnako ako aj pri stroji s magnetmi na povrchu (ďalej MNP) zvýšiť moment o približne 12% avšak v tomto prípade klesne účinnosť o 0,5% a zvýši sa zvlnenie momentu o ďalšie ~ 3%. Nevyvážený magnetický ťah dosahuje v tomto prípade až 468 N čo je skoro 3 násobne viac ako pri MNP.

Tabuľka 6.4 Parametre motoru pri rozpojení fáz

| | | Normal | | Overload | |
|-------------------|----|--------|---------|----------|---------|
| | | Mcad | Maxwell | Mcad | Maxwell |
| I_{phmax} | A | 130 | 129,96 | 165,7 | 165,7 |
| PhA | ° | 40,58 | 40,58 | 46,92 | 46,92 |
| I_q | A | 98,71 | 98,71 | 113,21 | 113,21 |
| I_d | A | -84,54 | -84,54 | -121,06 | -121,06 |
| P_{em} | W | 23875 | 23819 | 26698 | 26623 |
| P_{in} | W | 24292 | 24237 | 27378 | 27304 |
| P_{out} | W | 22735 | 22818 | 25480 | 25567 |
| M | Nm | 38,06 | 37,91 | 42,57 | 42,37 |
| Zvlnenie | % | 15,122 | 15,41 | 17,99 | 17,16 |
| ΔP_{fe} | W | 1134 | 995 | 1212 | 1050 |
| ΔP_{Cu} | W | 392 | 392 | 638 | 638 |
| ΔP_{mag} | W | 25 | 26 | 42 | 43 |
| ΔP_{mech} | W | 6 | 6 | 6 | 6 |
| ΔP_{tot} | W | 1557 | 1419 | 1898 | 1737 |
| η | % | 93,59 | 94,15 | 93,07 | 93,64 |



Obrázok 6.5 Priebeg teploty hot spotu vinutia pri preťažovaní

6.4 Jednofázový skrat

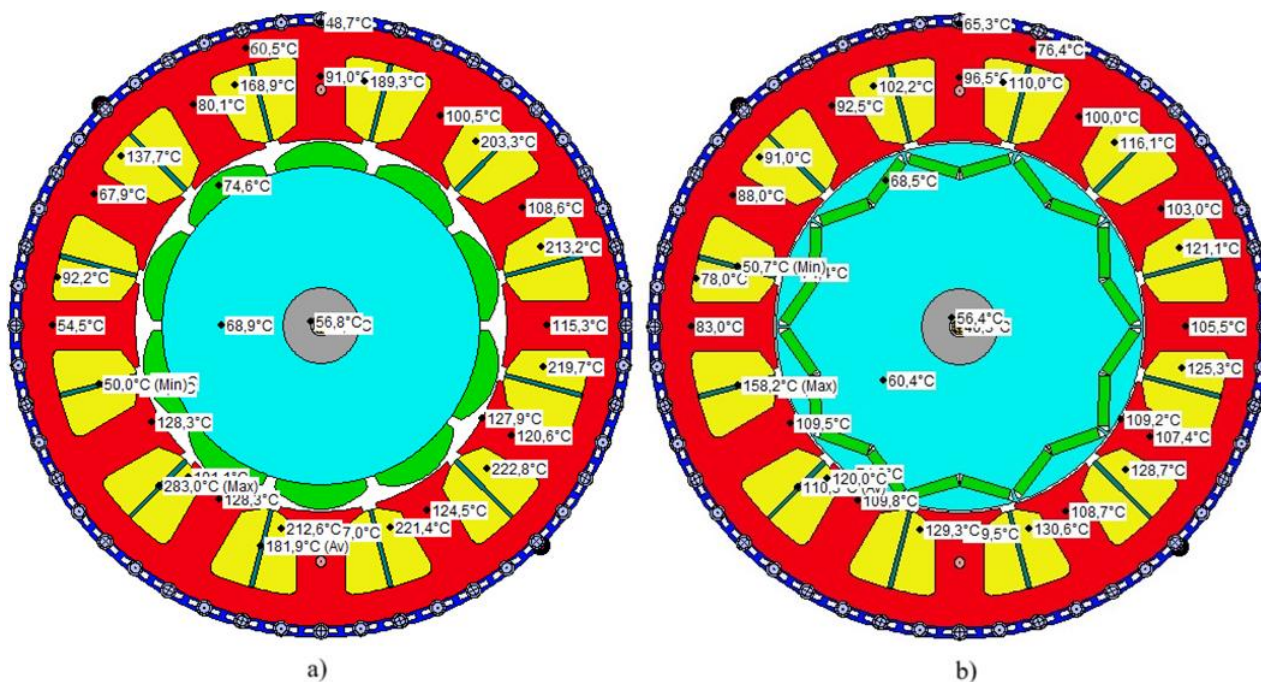
V tejto kapitole bola simulovaná rovnaká porucha ako v kapitole 5.2 v rovnakom pracovnom bode.

V tabuľke 6.5 sú zobrazené parametre motora počas skratu v porovnaní s motorom s magnetmi na povrchu. Stroj podľa očakávaní vykazuje menší skratový prúd ako MNP, dokonca je tento prúd približne o 5 A nižší ako menovitý fázový prúd. Avšak, výsledný moment je trochu nižší ako pri MNP, rovnako aj jeho zvlnenie. Pokiaľ ide o celkové straty, sú takmer rovnaké. Aj keď stroj s vnorenými magnetmi má vďaka menšiemu skratovému prúdu približne polovičné straty v medi, má zasa 2 krát väčšie straty v železe.

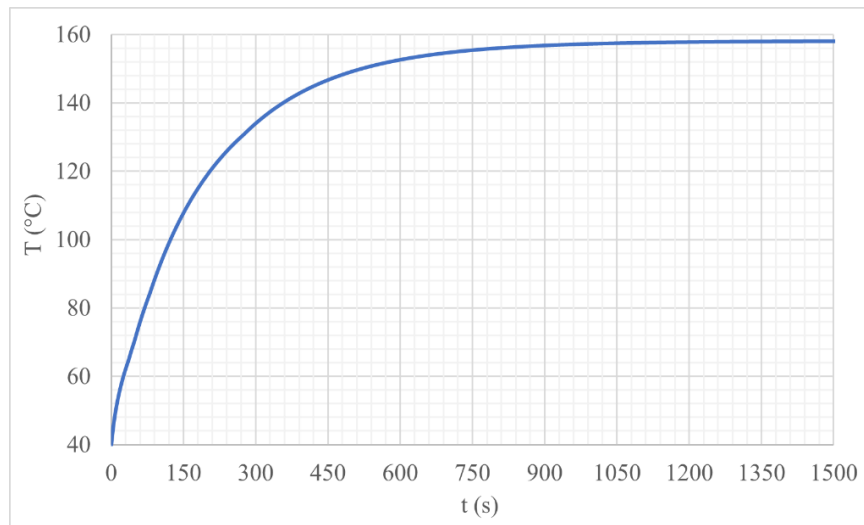
Na obrázku 6.6 je znázornený radiálny pohľad na motor, ktorý zachytáva rozloženie teplôt v stroji s rešpektovaním rozloženia strát do jednotlivých drážok. Aj napriek rovnakým celkovým stratám by stroj mal skratovú poruchu tepelne zvládnuť, je to spôsobené tým, že vďaka menšiemu skratovému prúdu v stroji vzniknú výrazne menšie straty v medi a stroj je tým pádom jednoduchšie uchladiť aj napriek zvýšeným stratám v železe. Obrázok 6.7 znázorňuje, za akú dobu bude dosiahnutá maximálna ustálená teplota hot spotu vinutia.

Tabuľka 6.5 Parametre motoru počas skratovej poruchy

| Veličina | Jednotka | Magnety na povrchu | Vnorené magnety |
|-------------------|----------|--------------------|-----------------|
| I_{SHCmax} | A | 192,2 | 124,5 |
| I_{phmax} | A | 135,6 | 130,0 |
| P_{em} | W | 23980 | 23099 |
| P_{in} | W | 24937 | 23693 |
| P_{out} | W | 23433 | 22203 |
| M | Nm | 38,17 | 36,76 |
| Zvlnenie | % | 119,86 | 112,92 |
| ΔP_{fe} | W | 526 | 890 |
| ΔP_{Cu} | W | 941 | 562 |
| ΔP_{mag} | W | 16 | 32 |
| ΔP_{mech} | W | 21 | 6 |
| ΔP_{tot} | W | 1504 | 1490 |
| η | % | 93,97 | 93,71 |

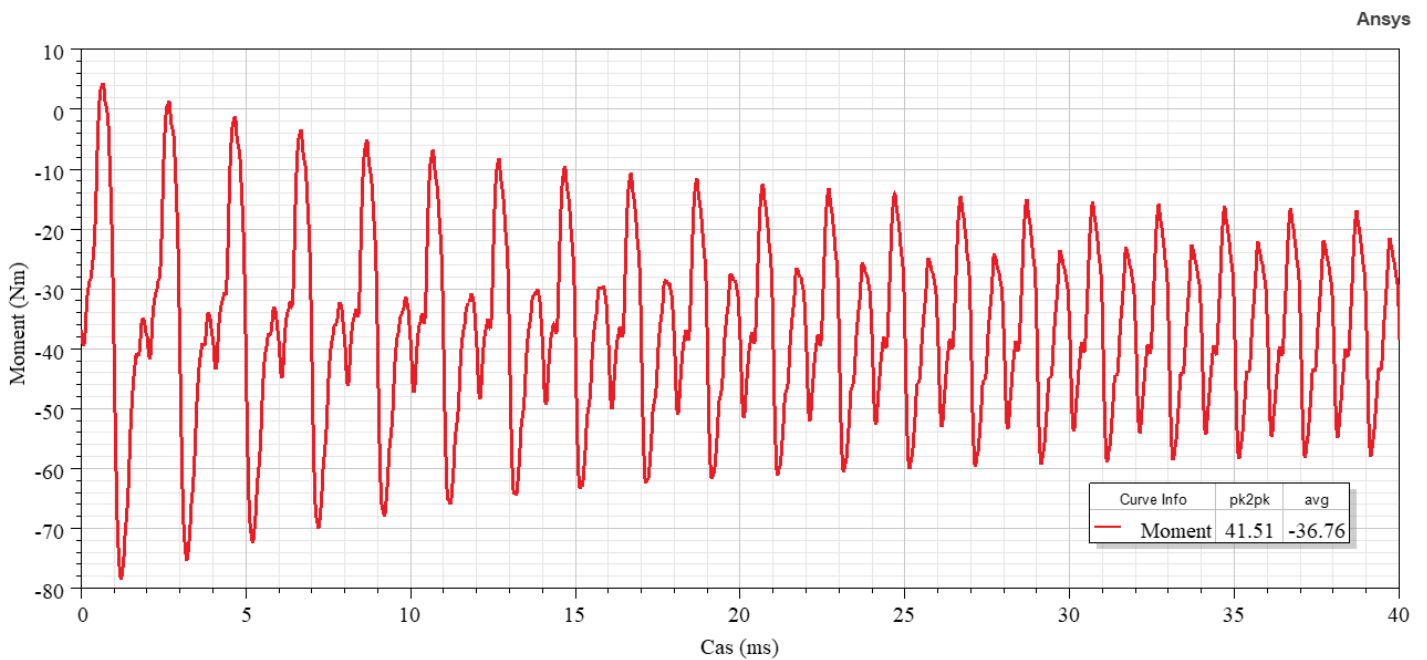


Obrázok 6.6 a) Teploty MNP počas skratu b) Teploty IPM počas skratu

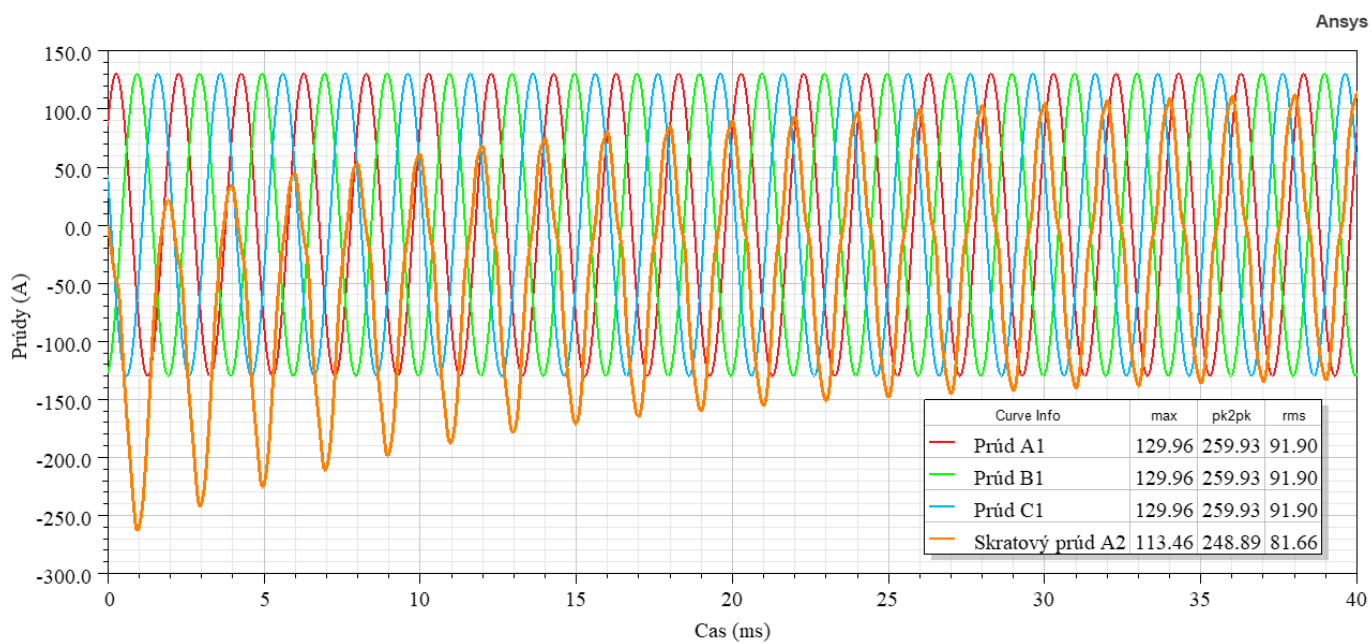


Obrázok 6.7 Priebeh teploty hot spotu vinutia počas skratu

Na obrázkoch 6.8 a 6.9 sú znázornené priebehy momentu počas skratu a skratového prúdu v porovnaní s prúdmi v zdravých fázach. Moment je aj napriek relatívne nízkemu skratovému prúdu značne zvlnený a to môže spôsobiť vibrácie a hluk.



Obrázok 6.8 Priebeh momentu počas skratu



Obrázok 6.9 Priebehy fázových prúdov a skratového prúdu

7. ZÁVER

Táto diplomová práca sa zaoberala strojmi odolnými voči poruchám a návrhom dvojitého trojfázového synchronného motoru s permanentnými magnetmi na povrchu (MNP) s menovitým výkonom 50 kW a 6000 otáčkami za minútu. Okrem toho bol navrhnutý aj stroj s vnorenými magnetmi s použitím rovnakého statoru a bol skúmaný dopad porúch na obe verzie.

Prvá časť práce sa venuje teoretickému rozboru možných porúch v stroji a následne predstavuje podmienky odolnosti voči poruchám a možnosti dizajnu na zvýšenie poruchovej odolnosti.

V druhej časti bol na základe požadovaných parametrov stroja (výkonu, otáčok, napájacieho napätia atď.) vykonaný výpočet určitých parametrov stroja. Tento proces zahŕňal výpočet rozmerov rotoru a statoru, návrh vinutia, výpočet permanentného magnetu a závitov. Nakoniec boli určené aj úbytky napätia v stroji za predpokladu nulového fázového posunu medzi fázovým prúdom a indukovaným napätím.

V tretej časti boli vytvorené modely v programoch RMxpert, Motor-Cad a Ansys Maxwell 2D a ich výsledky navzájom porovnané. Z analýzy vyplynulo, že RMxpert nie je vhodný pre ďalšie simulácie, pretože nezohľadňuje straty v magnetoch. Výsledky z programov Maxwell 2D a Motor-Cad sa veľmi nelíšili, čo je čiastočne spôsobené tým, že Motor-Cad využíva určité prvky metódy konečných prvkov (MKP) a nie je to čisto analytický výpočet ako RMxpert.

V štvrtej časti bol stroj s magnetmi na povrchu optimalizovaný, s cieľom dosiahnuť čo najvyššiu momentovú hustotu, pri zachovaní čo najvyššej účinnosti. Na optimalizáciu bol využitý program OptiSlang v kombinácii s Motor-Cadom. Výsledný stroj je o 8 mm kratší a má o 19,26 mm menší priemer statoru čo vedie k nárastu momentovej hustoty až o 6,83 Nm/dm³. Výsledný optimalizovaný stroj je o 958 cm³ menší, o 6,72 kg ľahší a o 0,05% účinnejší ($\eta = 97,10\%$). V tejto časti bol ešte vytvorený zjednodušený tepelný model spolu s olejovým chladením pomocou modulu Therm v programe Motor-Cad. Teplota v rotore a magnetoch sa pohybuje okolo 66 °C zatiaľ čo teplota vo vinutí vrátane čiel dosahuje miestami až 145 °C čo je ale stále so značnou rezervou voči maximálnej povolenej teplote izolácie.

V piatej časti bol motor s magnetmi na povrchu simulovaný pri dvoch poruchových stavoch: rozpojenia jedného trojfázového systému a jednofázového skratu. Pri rozpojení motor dosahoval moment 40,04 Nm, zvlnenie momentu 2,80 % a účinnosť 95,90%. Pri tejto poruche bolo ešte skúmané, ako veľmi je možné zvýšiť prúd za účelom zvýšenia momentu a neprekročenia teploty vinutia 165 °C, v tomto stave bolo dosiahnutého momentu 44,83 Nm, zvlnenia momentu 2,78 % a účinnosti 95,91%. Počas skratu tento stroj dosahoval v skratovanej fáze 1,42 krát väčší skratový prúd ako prúd fázový, moment 38,17 Nm pri značnom zvlnení ~120% a účinnosť 93,97%. Skratový prúd v daných

drážkach poruchovej fáze však spôsobí tak veľké straty v medi, že stroj nie je možné uchladiť ($T_{\max} = 283 \text{ }^{\circ}\text{C}$) a počas tejto poruchy by stroj tepelne zlyhal.

V šiestej časti bol navrhnutý motor s vnorenými magnetmi s použitím rovnakého statoru ako pri MNP. Tento stroj dosahoval v menovitom bode účinnosť 96,09 % čo je o 1,09 % menej ako MNP, to bolo spôsobené výrazne väčšími stratami v železe rotoru a statoru. Medzi nevýhody tohto stroja môže tiež patriť nutnosť použitia meniču s väčším DC Bus voltage kvôli vyšším úbytkom napätia na reaktanciách stroja. Tento stroj má taktiež väčšie zvlnenie momentu aj v bezporuchovom stave (5,38 %) čo je o 4,58% viac ako MNP. Jednou z výhod je, že na dosiahnutie rovnakého momentu je potrebné o 0,59 kg menej magnetu ako pri MNP. Pri poruchovom stave rozpojenie fáz stroj dosahoval momentu 37,91 Nm, zvlnenie momentu 15,41% a účinnosť 94,15%. Pri simulácii maximálneho dovoleného preťažovania bol dosiahnutý moment 42,37 Nm, zvlnenie až 17,16 % a účinnosti len 93,64 %. Čo sa týka skratu, má stroj s vnorenými magnetmi skratový prúd v skratovanej fáze dokonca menší ako fázový prúd (0,96 násobok). Moment počas skratu dosahuje hodnotu 36,76 Nm, zvlnenie 112,92 % a účinnosť 93,71%, vďaka malému skratovému prúdu je však tento stroj schopný sa uchladiť a tým pádom je možné ho so zníženým momentom dlhodobo prevádzkovať aj počas skratu.

LITERATÚRA

- [1] HUANG, Xiaoyan, Andrew GOODMAN, Chris GERADA, Youtong FANG a Qinfen LU. Design of a Five-Phase Brushless DC Motor for a Safety Critical Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2013, 10 [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: doi:10.1109/TIE.2011.2172170
- [2] JACK, A.G., B.C. MECROW a J. HAYLOCK. A comparative study of permanent magnet and switched reluctance motors for high performance fault tolerant applications. *IAS '95. Conference Record of the 1995 IEEE Industry Applications Conference Thirtieth IAS Annual Meeting* [online]. IEEE, 1995, 734-740 [cit. 2023-05-19]. ISBN 0-7803-3008-0. Dostupné z: doi:10.1109/IAS.1995.530372
- [3] BIANCHI, N., M.D. PRE, G. GREZZANI a S. BOLOGNANI. Design considerations on fractional-slot fault-tolerant synchronous motors. *IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, 2005* [online]. IEEE, 2005, 902-909 [cit. 2023-05-19]. ISBN 0-7803-8987-5. Dostupné z: doi:10.1109/IEMDC.2005.195829
- [4] CHENG, Ming, Jun HANG a Jianzhong ZHANG. Overview of fault diagnosis theory and method for permanent magnet machine. *Chinese Journal of Electrical Engineering* [online]. 2015, 1(1), 21-36 [cit. 2023-05-19]. ISSN 2096-1529. Dostupné z: doi:10.23919/CJEE.2015.7933135
- [5] JIANG, Xuefeng, Shaoshuai WANG, Qiang LI a Yufei GAO. Design and optimization of dual-winding fault-tolerant permanent magnet motor. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems* [online]. 2019, 3(1), 45-53 [cit. 2023-05-19]. ISSN 2096-3564. Dostupné z: doi:10.30941/CESTEMS.2019.00007
- [6] ZHAO, Wenxiang, Liang XU a Guohai LIU. Overview of permanent-magnet fault-tolerant machines: Topology and design. *CES Transactions on Electrical Machines and Systems* [online]. 2018, 2(1), 51-64 [cit. 2023-05-19]. ISSN 2096-3564. Dostupné z: doi:10.23919/TEMS.2018.8326451
- [7] PETROV, Ilya, Chong DI, Pia LINDH, Markku NIEMELA, Anna-Kaisa REPO a Juha PYRHONEN. Fault-Tolerant Modular Stator Concentrated Winding Permanent Magnet Machine. *IEEE Access* [online]. 2020, 8, 7806-

- 7816 [cit. 2023-05-19]. ISSN 2169-3536. Dostupné z:
doi:10.1109/ACCESS.2020.2964332
- [8] LI, Guang-Jin, Zi-Qiang ZHU, Martin FOSTER, Dave STONE a Han-Lin ZHAN. Modular Permanent-Magnet Machines With Alternate Teeth Having Tooth Tips. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2015, **62**(10), 6120-6130 [cit. 2023-05-19]. ISSN 0278-0046. Dostupné z:
doi:10.1109/TIE.2015.2427112
- [9] EL-REFAIE, Ayman M., Manoj R. SHAH a Kum-Kang HUH. High-Power-Density Fault-Tolerant PM Generator for Safety-Critical Applications. *IEEE Transactions on Industry Applications* [online]. 2014, **50**(3), 1717-1728 [cit. 2023-05-19]. ISSN 0093-9994. Dostupné z: doi:10.1109/TIA.2013.2282852
- [10] PAPINI, Luca, Tsarafidy RAMINOSOA, David GERADA a Chris GERADA. A High-Speed Permanent-Magnet Machine for Fault-Tolerant Drivetrains. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2014, **61**(6), 3071-3080 [cit. 2023-05-19]. ISSN 0278-0046. Dostupné z:
doi:10.1109/TIE.2013.2282604
- [11] RAMINOSOA, Tsarafidy, Chris GERADA a Michael GALEA. Design Considerations for a Fault-Tolerant Flux-Switching Permanent-Magnet Machine. *IEEE Transactions on Industrial Electronics* [online]. 2011, **58**(7), 2818-2825 [cit. 2023-05-19]. ISSN 0278-0046. Dostupné z:
doi:10.1109/TIE.2010.2070782
- [12] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valeria HRABOVCOVA. *DESIGN OF ROTATING ELECTRICAL MACHINES*. First. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2008. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [13] SVS FEM s.r.o. [online]. [cit. 2023-05-19]. Dostupné z:
<https://www.svsfem.cz/>
- [14] T. ABDEL-WAHED, Ahmed, Zia ULLAH, Ayman S. ABDEL-KHALIK, Mostafa S. HAMAD, Shehab AHMED a Noha A. ELMALHY. *Design and Finite-Element-Based Optimization for a 12-Slot/10-Pole IPM Motor with Integrated Onboard Battery Charger for Electric Vehicle Applications* [online]. 2023, 24 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z:
https://www.researchgate.net/publication/370643515_Design_and_Finite-Element-Based_Optimization_for_a_12-Slot10-Pole_IPM_Motor_with_Integrated_Onboard_Battery_Charger_for_Electric_Vehicle_Applications
- [15] FARD, Ali Jamali. *ComProgExpert* [online]. 2022 [cit. 2024-05-09]. Dostupné z: <https://comprogexpert.com/introductory-course-on-interior-permanent-magnet-motor-ipm-design/>

Zoznam symbolov a skratiek

Skratky:

| | |
|--------|---|
| PMSM | Permanent Magnet Synchronous Machine |
| PMFTM | Permanent Magnet Fault Tolerant Machine |
| FTM | Fault Tolerant Machine |
| FFT | Fault Tolerant Teeth |
| RMxprt | Rotation Machine Expert |
| PM | Permanentný Magnet |
| MOP | Metamodel optimálnej prognózy |
| UMP | Unbalanced Magnetic Pull |
| MNP | magnety na povrchu |
| IPM | vnorené magnety (interior permanent magnet) |

Symboly:

| | | |
|------------------|--|-------|
| $2p$ | počet pól párov | (-) |
| A_a | lineárna prúdová hustota | (A/m) |
| b_{ds1} | šírka otvorenia drážky | (m) |
| b_t | výška mostíku | (m) |
| B_m | magnetická indukcia v zvolenom pracovnom bode magnetu | (T) |
| B_{PM} | magnetická indukcia magnetu | (T) |
| B_r | remanentná indukcia magnetu | (T) |
| B_δ | magnetická indukcia vo vzduchovej medzere | (T) |
| $B_{\delta max}$ | maximálna magnetická indukcia vo vzduchovej medzere | (T) |
| D_i | vonkajší priemer rotoru | (m) |
| D_{outS} | vonkajší priemer statoru | (m) |
| D_{inS} | vnútorný priemer statoru | (m) |
| D_δ | Stredný priemer vzduchovej medzery | (m) |
| f | frekvencia | (Hz) |
| H_c | koerzitívna sila | (A/m) |
| H_δ | magnetická intenzita vo vzduchovej medzere | (A/m) |
| H_m | magnetická intenzita v zvolenom pracovnom bode magnetu | (A/m) |
| H_{PM} | magnetická intenzita magnetu | (A/m) |
| h_{PM} | výška permanentného magnetu | (m) |

| | | |
|--------------------|--|-----------------------|
| I_{1f} | fázový prúd | (A) |
| I_d | prúd v ose d | (A) |
| I_q | prúd v ose q | (A) |
| I_{shc} | skratový prúd | (A) |
| I_{SHCmax} | maximálny skratový prúd v ustálenom stave | (A) |
| I_{1fmax} | maximálny fázový prúd | (A) |
| I_{dmax} | maximálny prúd v ose d | (A) |
| I_{qmax} | maximálny prúd v ose q | (A) |
| k_l | koeficient zohľadňujúci rozptyl toku | (-) |
| k_c | Cartrov činiteľ | (-) |
| k_r | činiteľ rozlohy | (-) |
| k_v | činiteľ vinutia | (-) |
| k_y | činiteľ kroku | (-) |
| l' | dĺžka železa | (m) |
| $L_{\mu\sigma 1h}$ | magnetizačná indukčnosť jednej fáze | (H) |
| L_d | Indukčnosť v ose d | (H) |
| L_q | indukčnosť v ose q | (H) |
| L_{md} | magnetizačná indukčnosť v ose d | (H) |
| L_{mq} | magnetizačná indukčnosť v ose q | (H) |
| L_{1ph} | indukčnosť jednej fáze vrátane čiel vinutí | (H) |
| m | počet fáz | (-) |
| m_p | Šírka medzi magnetmi | (m) |
| M_n | menovitý moment | (Nm) |
| M_{dq} | moment v dq sústave | (Nm) |
| n | otáčky | (min^{-1}) |
| N_f | počet závitov jednej fáze | (-) |
| n_n | menovité otáčky | (min^{-1}) |
| P_i | vnútorný výkon | (W) |
| P_{mech} | mechanický výkon | (W) |
| P_{emag} | elektromagnetický výkon | (W) |
| P_{out} | výkon | (W) |
| P_{in} | príkion | (W) |
| PhA | fázový posun medzi q osou a fázovým prúdom | (°) |
| Q_s | počet drážok statoru | (-) |
| R_{1f} | odpor jednej fáze | (Ω) |
| S_{dcu} | čistý prierez medi | (m^2) |
| S_m | plocha magnetu pod vzduchovou medzerou | (m^2) |

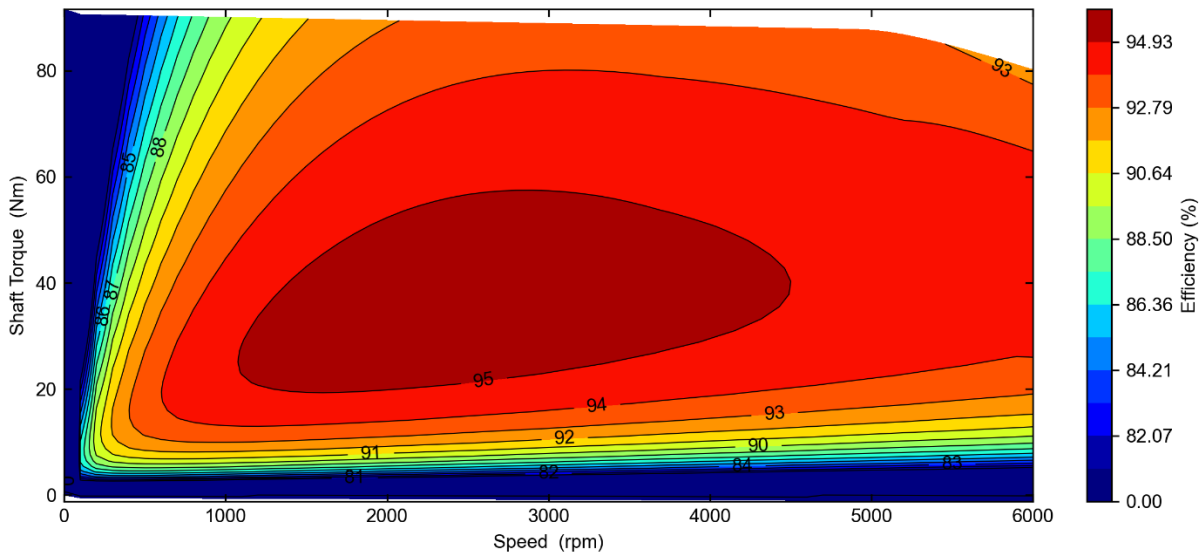
| | | |
|----------------------|--|----------------------|
| S_{δ} | plocha vzduchovej medzery nad jedným pólom | (m ²) |
| U | napätie | (V) |
| U_{of} | indukované napätie | (V) |
| U_{1f} | napájacie napätie | (V) |
| U_c | napätie jednej cievky | (V) |
| U_{sMax} | maximálne združené indukované napätie | (V) |
| U_{xs} | úbytok na synchronnej reaktancii | (V) |
| V_r | objem rotoru | (m ³) |
| V | objem aktívnej časti stroja | (m ³) |
| w_m | šírka magnetu pod pólom | (m) |
| w_{1m} | šírka jedného z magnetov daného pólu V | (m) |
| w_{δ} | šírka vzduchovej medzery nad jedným pólom | (m) |
| d_m | výška magnetu | (m) |
| X_s | synchronná reaktancia | (Ω) |
| α | uhol medzi cievkami | ($^{\circ}$) |
| α_m | Uhol medzi magnetmi | ($^{\circ}$) |
| β | záťažný uhol | ($^{\circ}$) |
| γ | konštanta na výpočet vzduchovej medzery | (-) |
| ΔP_{mag} | straty v magnetoch | (W) |
| ΔP_{FeS} | straty v železe statoru | (W) |
| ΔP_{FeR} | straty v železe rotoru | (W) |
| ΔP_{Cu} | straty v medi | (W) |
| $\Delta P_{windage}$ | straty trením | (W) |
| ΔP_{total} | celkové straty | (W) |
| δ | vzduchová medzera | (m) |
| δ' | ekvivalentná vzduchová medzera | (m) |
| δ'' | efektívna vzduchová medzera | (m) |
| η | účinnosť | (%) |
| μ_{rpm} | relatívna permeabilita | (-) |
| σ | prúdová hustota | (A/mm ²) |
| σ_{FT} | tangenciálne napätie | (Pa) |
| τ_d | drážková rozteč v mm | (m) |
| $\tau_{d^{\circ}}$ | drážková rozteč v stupňoch | ($^{\circ}$) |
| τ_p | pólová rozteč | (m) |
| χ | štíhlostný pomer | (-) |
| χ_d | koeficient na výpočet kc | (-) |
| ω | uhlová rýchlosť | (rad/s) |

ZOZNAM PRÍLOH

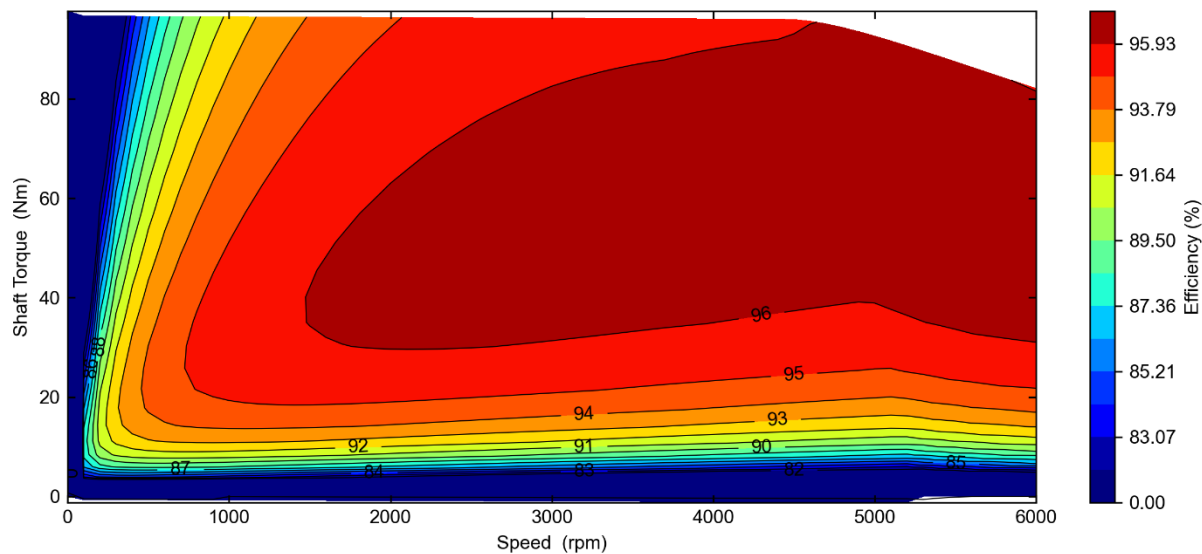
| | |
|----------------------------------|----|
| PRÍLOHA A – TEPELNÉ SCHÉMA..... | 71 |
| PRÍLOHA B – ÚČINNOSTNÉ MAPY..... | 73 |

Příloha B - Účinnostné mapy

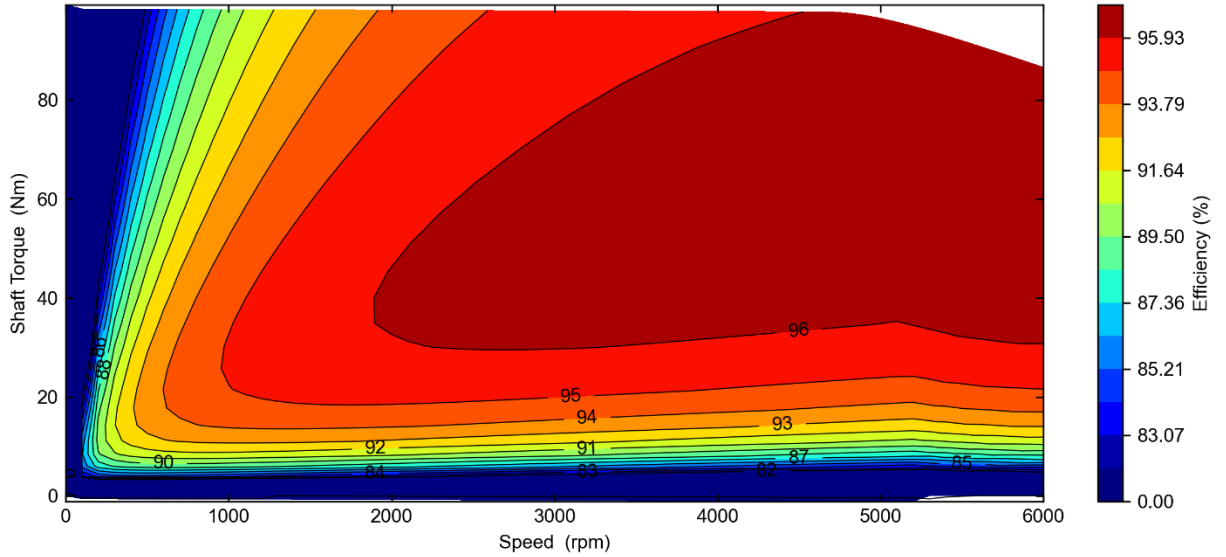
B.1 Pôvodný motor



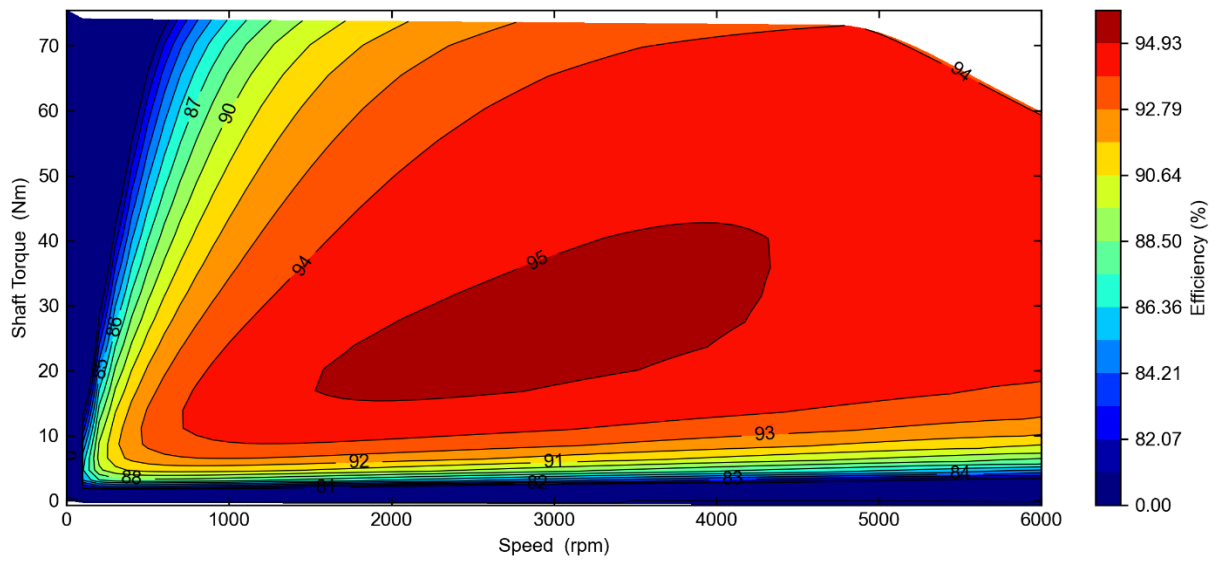
B.2 Upravený motor



B.3 Optimalizovaný motor



B.4 Pôvodný IPM motor



B.5 Optimalizovaný IPM motor

