

Bakalářská práce



České
vysoké
učení technické
v Praze

F3

Fakulta elektrotechnická
Katedra radioelektroniky

Perspektivní pohony pro elektrická vozidla

Radim Nejedlý

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.
Květen 2022

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nejedlý** Jméno: **Radim** Osobní číslo: **492218**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávací katedra/ústav: **Katedra radioelektroniky**
Studijní program: **Otevřené elektronické systémy**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Perspektivní pohony pro elektrická vozidla

Název bakalářské práce anglicky:

Perspective Drives for Electric Vehicles

Pokyny pro vypracování:

1. vypracujte rešerši aktuálního stavu techniky v oboru pohonů lehkých elektrických vozidel
2. zvolte velikost a varianty typového provedení pohonu vozidla
3. proveďte elektromagnetický návrh akčního členu pohonu v sw prostředí ANSYS Electronic
4. aplikujte modul ANSYS Motor-CAD pro simulace tepelného zatěžování pohonu
5. vypracujte doporučení pro technickou praxi

Seznam doporučené literatury:

- [1] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. 2nd. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 1118581571;9781118581575;.
[2] CHEN L., WANG J., LOMBART P., LAZARI P., LECONTE V. High – Efficiency Motor Design for Electric Vehicles, University of Sheffield, 2012

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Karel Buhr, CSc. katedra elektrických pohonů a trakce FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **07.02.2022**

Termín odevzdání bakalářské práce: **20.05.2022**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2023**

Ing. Karel Buhr, CSc.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Stanislav Vítek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Karlu Buhrovi, CSc. za poskytnutí rad, podnětů a materiálů pro zpracování této bakalářské práce.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Datum: 20.05.2022

Podpis autora

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá pohony lehkých elektrických vozidel. Předně je provedena rešerše v této oblasti a dále se práce věnuje samotnému návrhu.

Cílem práce byl návrh trakčního pohonu s využitím softwarového prostředí ANSYS Motor-CAD a tento software dále použít při analýze tepelného zatěžování pohonu. Výsledky elektromagnetického návrhu pohonu společně se simulacemi termálního zatěžování jsou uvedeny v posledních kapitolách bakalářské práce.

Klíčová slova: ANSYS Motor-CAD, synchronní reluktanční motor s permanentními magnety, PMA-SynRM, tepelné zatěžování, elektromagnetický návrh trakčního motoru

Vedoucí: Ing. Karel Buhr, CSc.

Abstract

This bachelor thesis deals with light electric vehicles drives. First of all, the research in this field is done and then the thesis deals with the design itself.

The aim of the thesis is to design the traction drive using the ANSYS Motor-CAD software environment and to use this software in the analysis of the thermal loading of the drive. The results of the electromagnetic design together with thermal loading simulations are presented in the last chapters of the bachelor thesis.

Keywords: ANSYS Motor-CAD, synchronous reluctance motor with permanent magnets, PMA-SynRM, thermal loading, electromagnetic design of traction motor

Title translation: Perspective Drives for Electric Vehicles

Obsah

1 Úvod	1	8 Elektromagnetický návrh a výsledky	33
2 Historie a současnost	3	9 Tepelné zatěžování pohonu	41
2.1 Historie elektromobility	3	9.1 Kontrola oteplení aktivní části stroje	43
2.2 Současnost	5	10 Závěr	49
3 Princip a základní rozdělení elektrických vozidel	7	Literatura	51
4 Pohony elektrických vozidel	9	A Seznam symbolů a zkratek	55
4.1 Pohony lehkých elektrických vozidel	10	B Materiálové vlastnosti M350-50A a měď	57
4.2 Princip tvorby momentu elektrických pohonů	10	C Materiálové vlastnosti Vacodym 974AP	59
4.2.1 Synchronní reluktanční motor s permanentními magnety (PMa-SynRM)	11	D Elektromagnetický návrh	61
5 Aktuální stav techniky oboru lehkých elektrických vozidel	15	E Termální návrh	65
5.0.1 Elektrické pohony	15		
5.0.2 Chladicí systémy	19		
6 Typové provedení a parametry elektrického pohonu	21		
7 Návrh synchronního reluktančního motoru	23		
7.1 Výpočet základních parametrů stroje	23		
7.1.1 Délka vzduchové mezery	24		
7.1.2 Délka stroje	25		
7.1.3 Ověření správného výpočtu základních rozměrů	25		
7.2 Návrh statorových drážek	25		
7.2.1 Návrh počtu vodičů v drážce	26		
7.2.2 Magnetický tok a velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře	26		
7.2.3 Rozměry statorových drážek a zubů	26		
7.2.4 Velikost vzduchové mezery	27		
7.3 Geometrie rotoru	28		
7.3.1 Volba typu rotoru	28		
7.3.2 Dimenzování	28		

Obrázky

2.1 První elektrické vozidlo z roku 1832, převzato [41]	3	8.1 Vstupní data pro elektromagnetický výpočet	34
2.2 Elektromobil Saturn EV1, převzato [7]	4	8.2 Magnetická indukce ve stroji při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min	36
2.3 Vývoj prodeje EV v letech 2019 - 2021, upraveno [3]	5	8.3 Točivý moment (vypočten metodou virtuální práce)	37
4.1 Klasifikace elektrických pohonů pro EV, převzato [16]	9	8.4 Indukované napětí při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min	37
4.2 Zobrazení d-q osy; SynRM, převzato [27]	11	8.5 Magnetická indukce ve vzduchové mezeře, radiální(Br) a tangenciální(Bt) složka při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min	38
4.3 Výkon/Moment závislý na zátěžovém úhlu; a) rotor s vnitřními magnety; b) rotor s magnety na povrchu; převzato [40]	12	8.6 Momentová charakteristika, řízení MTPA	38
4.4 SynRM rotory: a) vystouplé póly; b) podélně vrstvený rotor; c) příčně vrstvený rotor, převzato [23]	13	9.1 Dovolené oteplení jednotlivých tříd izolace, převzato [33]	41
5.1 Tesla Model S: převodovka, upraveno [29]	16	9.2 Geometrie stroje ve 3D	43
5.2 Design distribuovaného vinutí statorů pro trakční aplikace: a) vinutí Prius 2010; b) vlásenkové vinutí (Prius 2017); c) soustředěné vinutí Accord 2005; d) distribuované vinutí Tesla Model 3, převzato [30]	16	9.3 Geometrie stroje v axiálním řezu	43
5.3 Indukční motor Audi E Tron: a) stator; b) rotor, upraveno [31]	17	9.4 Nastavení výpočtu ekvivalentního tepelného obvodu	44
5.4 Design rotorů typu IPM: a) rotor tvaru V (Toyota Prius 2010); b) rotor tvaru dvojitého U (Toyota Prius 2017); c) rotor tvaru V (Tesla Model 3 2017); d) IPM rotor (Chevrolet Volt 2016), převzato [30]	18	9.5 Ekvivalentní tepelný obvod	44
5.5 Spínaný reluktanční motor s vnitřním rotorem, převzato [30]	18	9.6 Křivka momentu omezená teplotou vinutí a magnetů	45
5.6 Chladicí plášť statoru s mikrokanálky, převzato [33]	19	9.7 Křivka výkonu omezená teplotou vinutí a magnetů	45
5.7 Axiální ventilátor, převzato [33]	20	9.8 Mapa maximální teploty statorového vinutí momentové křivky	46
7.1 Pólová rozteč a pólové zóny pro 4-pólový, 3-fázový stroj, převzato [25]	24	9.9 Mapa maximální teploty statorového vinutí výkonové křivky	46
7.2 Obecná geometrie TLA rotoru, úhly α_m , upraveno [24]	29	9.10 Trvalé zatížení: křivka momentu	47
		9.11 Trvalé zatížení: průběh teplot	47
		9.12 Přerušované zatížení: křivka výkonu	48
		9.13 Přerušované zatížení: průběh teplot	48
		B.1 BH charakteristika M350-50A	57
		B.2 Hustota ztrát M350-50A v závislosti na magnetické indukci a frekvenci	58
		C.1 BH charakteristika Vacodym 974AP	59

D.1 Geometrie stroje v radiálním řezu	61
D.2 Geometrie stroje v axiálním řezu	62
D.3 Detail rozložení vinutí (vlevo), schéma vinutí (vpravo)	62
D.4 Volba materiálů	63
D.5 Nastavení elektromagnetického výpočtu	63
E.1 Geometrie stroje v radiálním řezu	65
E.2 Definice vinutí stroje	66
E.3 Definice chlazení	66
E.4 Definice ztrát použitých pro výpočet oteplení	67
E.5 Definice chladícího média	67
E.6 Nastavení chlazení koncového prostoru stroje	68
E.7 Nastavení cyklu konstantního zatěžování	68
E.8 Nastavení cyklu přerušovaného zatěžování	68

Tabulky

6.1 Parametry PMA-SynRM	21
7.1 Výsledky geometrie statoru modelovaného stroje	30
7.2 Výsledky statorového vinutí	30
7.3 Použité materiály	31
7.4 Výsledky geometrie rotoru modelovaného stroje	31
8.1 Výsledky elektromagnetického výpočtu	34
8.2 Výsledky elektromagnetického výpočtu - ztráty	35
8.3 Výsledky elektromagnetického výpočtu - parametry náhradního schématu	35
8.4 Porovnání parametrů	39
9.1 Dovolené oteplení $\Delta\Theta_{dov}$ a maximální teploty Θ_{dov} pro jednotlivé třídy izolace, převzato [33]	41
9.2 Parametry ekvivalentního tepelného obvodu, převzato [2]	42
B.1 Vlastnosti mědi	57
B.2 Další vlastnosti materiálu M350-50A	57
C.1 Další vlastnosti materiálu Vacodym 974AP	59



Kapitola 1

Úvod

Elektrifikace hnacích ústrojí automobilů je obecně považována jako nástroj ke zvýšení energetické účinnosti a snížení emisí skleníkových plynů v automobilovém průmyslu.

Trvalo několik desetiletí než se technologie v oblasti elektrických automobilů rozvinula natolik, abychom byli schopni sestavit elektrický automobil s vlastnostmi přibližující se či převyšující výhody spalovacích automobilů. Významnou roli v rozvoji elektromobilismu hrál výzkum bateriových článků, který dnes dosáhl takové úrovně akumulace energie, která se při dojezdu automobilu na jedno nabití (natankování) přibližuje klasickým spalovacím vozidlům. Některé elektromobily jsou schopny ujet až 400 km bez nutnosti dobíjení. Stále však přetrvává nevýhoda spočívající v potřebě relativně pomalého procesu nabíjení akumulátorů.

Ve srovnání s automobily využívající spalovací motor mohou mít elektromobily mnoho výhod, jako jsou nulové emise, nižší hlučnost, jednodušší servis či vyšší účinnost elektromotoru oproti motoru spalovacímu.

Bakalářská práce se zabývá analýzou současného stavu techniky pohonů elektrických vozidel. Dále čtenáře seznámí se základním rozdělením elektromobilů a typy jejich pohonů. Hlavním cílem práce je seznámení s vývojovým prostředím campus licence ANSYS a jeho aplikací pro elektromagnetický návrh trakčního stroje. Pro kontrolu tepelného zatěžení navrženého stroje je využit modul Motor-CAD, který je součástí softwarového balíku campus licence ANSYS. V závěru práce jsou formou doporučení pro technickou praxi shrnuty zkušenosti s daným softwarovým rozhraním.

Kapitola 2

Historie a současnost

2.1 Historie elektromobility

Historie elektromobility sahá až do poloviny 19. století, kdy profesor Sibrandus Stratingh zdokumentoval první elektrický automobil v roce 1835. Mezi další osobnosti, které nesou zásluhy za rozvoj elektromobilů jsou Robert Anderson, Sir David Salomon či dokonce český inženýr František Křižík [5].



Obrázek 2.1: První elektrické vozidlo z roku 1832, převzato [41]

V roce 1899 dosáhl Camille Jenattona velikého úspěchu, když jeho elektrické vozidlo překonalo rychlost 100 km/h [5].

Začátkem 20. století se po silnicích pohybovaly také vozy využívající spalovací a parní pohony. V této době byly elektromobily prodávány více než automobily konkurence a to z následujících důvodů. Vozidla s elektrickým pohonem byly méně hlučné, neměly problémy s pohybem po kopcovitém terénu a jejich připravenost k jízdě vyžadovala méně času, než tomu bylo u konkurence (za některých podmínek byl parní pohon schopen jízdy až po několika desítkách minut) [4-7].

Během několika dalších desetiletí následovalo období úpadku elektromobility. Výhody elektrických vozidel se postupně vytrácely kvůli nedostatečnému technologickému pokroku v oblasti akumulace energie. V porovnání s automobily se spalovacími motory byla vozidla s elektromotorem dražší. Rychlý přechod na spalovací motory proběhl po vynálezu startéru v roce 1912 [4-7].

Elektromobily (EV) se opět dostaly do popředí v roce 1995, kdy společnost General Motors představila elektrické vozidlo s názvem "Saturn EV1". Tato událost je považována za milník v historii moderních elektrických vozů. Následovala společnost Toyota, která představila EV Toyota Prius v roce 1997 [4-7].



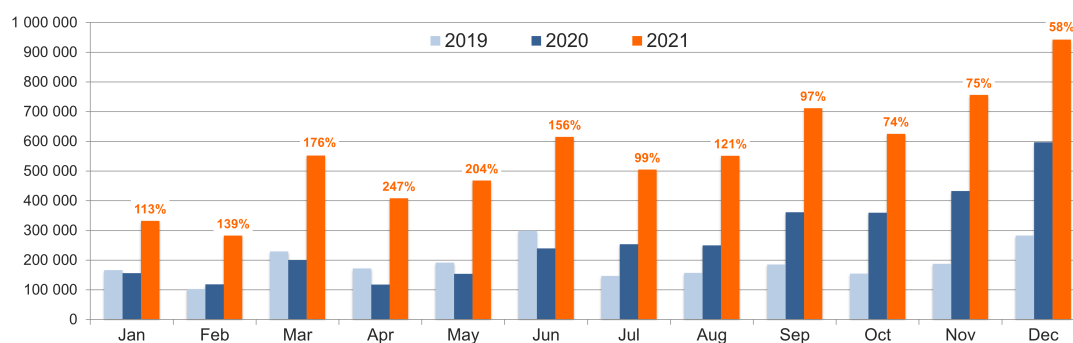
Obrázek 2.2: Elektromobil Saturn EV1, převzato [7]

V následujících letech se připojilo mnoho dalších výrobců automobilů, přičemž v dnešní době má elektrický automobil v nabídce každá velká automobilová společnost. Mezi tyto výrobce patří např. Honda, Nissan, BMW, Škoda Auto a další [4-7].

2.2 Současnost

V současné době je rozšíření elektrických vozidel a rivalita mezi výrobci vysoká. Soupeří se především v délce dojezdu a rychlosti dobíjení akumulátorů vozidla. V roce 2021 se prodalo 6.75 miliónů vozidel, co je asi o 108% více, než tomu bylo v předešlém roce.

Tyto hodnoty jednoznačně naznačují velký zájem o elektromobily. Velkým handicapem EV stále zůstává vysoká pořizovací cena, a to i přes snahu některých zemí jejich nákup dotovat a provoz zvýhodňovat, zejména v městských aglomeracích. Vývoj prodeje a zájmu o elektromobily je znázorněn v následujícím grafu [3].



Obrazek 2.3: Vývoj prodeje EV v letech 2019 - 2021, upraveno [3]

Kapitola 3

Princip a základní rozdělení elektrických vozidel

Základním principem elektrických vozidel je elektromechanický přenos elektrické energie na nápravu vozidla. Velkou výhodou elektrického pohonu je, že umožňuje pracovat jako generátor a rekuperovat pohybovou energii při brzdění či jízdě ze svahu. Rekuperace je proces, kdy je získávána zpět elektrická energie a ukládána do trakční baterie, superkondenzátoru či setrvačnicku. [20]

Elektromobily (EV) mohou být funkční s využitím pouze elektrické energie jako její jediný zdroj či s pomocí dalšího zdroje energie např. spalovacího motoru. Všechny typy EV jsou vybaveny třemi základními součástmi, kterými jsou baterie, elektromotor a trakční měnič.

Následující čtyři typy představují základní rozdělení elektrických vozidel:

- **Battery Electric Vehicle (BEV)**
Neboli elektromobily na baterie. Právě tento typ využívá pouze elektrické energie uložené v bateriích k uvedení vozidla do pohybu.
- **Hybrid Electric Vehicles (HEV)**
Hybrid k rozpohybování vozidla využívá dva typy motorů, elektromotor a motor spalovací. Spalovací motor je v tomto typu primárním zdrojem energie.
- **Fuel Cell Electric Vehicles (FCEV)**
Tento princip využívá energie uložené v bateriových článcích společně se získanou energií z vodíkových palivových článků.
- **Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)**
Plug-in hybrid technologie je stejná jako HEV technologie s tím rozdílem, že využívá elektrický motor jako primární pohonnou jednotku vozidla. Z tohoto důvodu je potřeba větší kapacita baterie, než je tomu u EV typu HEV.

Kapitola 4

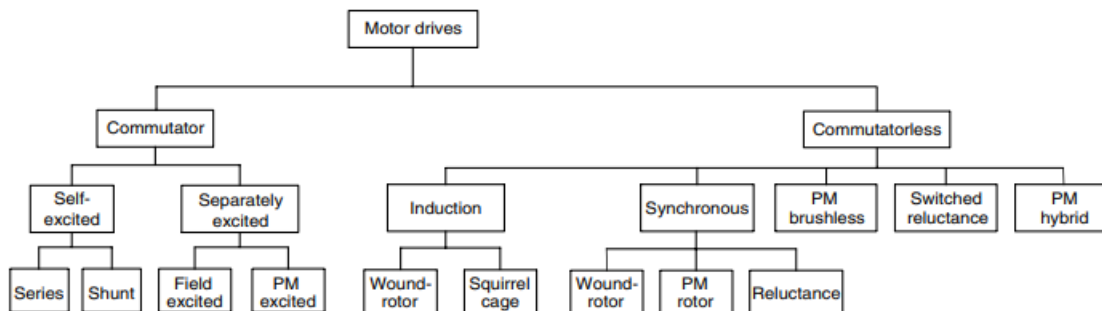
Pohony elektrických vozidel

V automobilovém průmyslu se z důvodu nedostatku fosilních paliv spolu s velkým tlakem na šetrnost k životnímu prostředí velice rychle rozvíjí technologie elektrických pohonů.

Bez ohledu na to, o který typ se jedná, se u elektrických pohonů pro elektromobily předpokládají tyto vlastnosti: velká účinnost, velké jmenovité otáčky, vysoká spolehlivost, vysoká výkonová hustota, velký rozsah otáček a tak dále [11-16].

Existuje několik různých typů motorů využívaných v nynějších EV jako je synchronní motor s permanentními magnety, spínaný reluktanční motor, indukční motor a další [11].

Rozdělení elektrických motorů, které je možné použít v elektromobilech je zobrazeno na obr. 4.1 [16].



Obrázek 4.1: Klasifikace elektrických pohonů pro EV, převzato [16]

Vzhledem k velké rozmanitosti typů pohonů a jejich odlišných vlastností je potřeba klást důraz na jejich výběr dle různých aplikací.

4.1 Pohony lehkých elektrických vozidel

Pojem lehké elektrické vozidlo neboli LEV není v současné době zvláště definováno. Pokrývá velké množství různých vozidel, mezi které můžeme zařadit jízdní kola, tříkolky, elektrické skútry či dokonce lehká čtyřkolová vozidla.

Obecně lze pojem lehké elektrické vozidlo popsat jako elektrické vozidlo s menší nosností a omezenou rychlostí. Právě LEV jsou jedním ze způsobů vypořádání se s nadměrným hlukem a chemickým znečištěním ve městech. Tato vozidla jsou daleko lépe cenově dostupná, jednoduchá na údržbu a velikostně kompaktnější. Z těchto důvodů je tento typ elektromobilů v dnešní době hojně prodáván. Jedním z příkladů je elektromobil Dacia Spring [38]:

- hmotnost: 970 kg
- výkon: 33 kW
- maximální rychlost: 125 km/h
- točivý moment: 125 Nm
- dojezd 230 km na jedno nabití akumulátoru
- cena: přibližně 450 000,- Kč

4.2 Princip tvorby momentu elektrických pohonů

Veškeré elektrické stroje mají základní rysy společné. Tvoření elektromagnetického momentu je jedním z těchto rysů. Celkový elektromagnetický moment je dán [40]:

$$T = \frac{1}{2}i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta} + \frac{1}{2}i_2^2 \frac{dL_2}{d\Theta} + i_2^2 i_1^2 \frac{dL_{12}}{d\Theta} = T_{rel} + T_{syn} \quad [\text{Nm}] \quad (4.1)$$

kde L_1 je indukčnost statoru, L_2 indukčnost rotoru a L_{12} jejich vzájemná indukčnost. Θ je úhel natočení rotoru. Vyvíjený elektromagnetický moment je složen ze dvou složek. Reluktanční (4.2) a synchronní složky (4.3):

$$T_{rel} = \frac{1}{2}i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta} + \frac{1}{2}i_2^2 \frac{dL_2}{d\Theta} \quad [\text{Nm}] \quad (4.2)$$

$$T_{syn} = i_2^2 i_1^2 \frac{dL_{12}}{d\Theta} \quad [\text{Nm}] \quad (4.3)$$

Reluktanční moment vznikne natáčením rotoru tak, aby minimalizoval reluktanci (magnetický odpor) a maximalizoval magnetickou vodivost. Jestliže má stroj vyniklé póly jen na jedné části magnetického obvodu (statoru, rotoru), vzniká jen jedna složka reluktančního momentu, buď $\frac{1}{2}i_1^2 \frac{dL_1}{d\Theta}$, nebo $\frac{1}{2}i_2^2 \frac{dL_2}{d\Theta}$. Pokud jsou vyniklé póly na obou částech magnetického obvodu, vznikají obě složky reluktančního momentu [40].

V případě, kdy máme stroj s hladkým rotorem, nevzniká reluktanční moment.

Moment synchronní vzniká snahou natočit rotor souhlasně s buzenými statorovými póly. Tento moment vzniká ve všech zmíněných typech.

■ 4.2.1 Synchronní reluktanční motor s permanentními magnety (PMA-SynRM)

Synchronní reluktanční motor se konstrukcí statoru v porovnání s indukčním nebo synchronním motorem s PM neliší. Liší se v provedení rotoru. Rotor je konstruován tak, aby využil principu reluktance. Zároveň je magnetické pole rotoru buzeno permanentními magnety, to znamená, že nevznikají ztráty způsobené budícími cívkami.

■ Princip reluktance

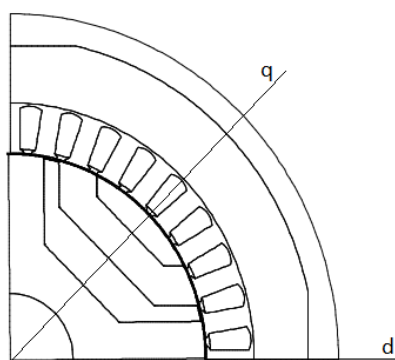
Střídavý proud, procházející statorovým vinutím, vytváří ve vzduchové mezeře točivé magnetické pole. Rotor se snaží natočit svoji nejvíce magnetickou osu (osa d) zároveň se směrem magnetického pole, tím vzniká reluktanční moment, který je přímo úměrný rozdílu indukčností v ose d a v ose q. Moment je pak dán rovnicí:

$$T_{rel} = \frac{3}{2}p(L_d - L_q)I_dI_q \quad (4.4)$$

Kde I_q a I_d je proud v ose q, respektive v ose d. Reluktanční moment lze vyjádřit i v závislosti na reaktancích v obecnější podobě jako:

$$T_{rel} = 3\frac{1}{\omega_s}U_n^2\frac{X_d - X_q}{2X_dX_q}\sin(2\Theta) \quad (4.5)$$

kde Θ je zátěžový úhel, U_n jmenovité napětí a X_d , X_q vyjadřuje reaktanci v ose d, respektive v ose q [40].



Obrázek 4.2: Zobrazení d-q osy; SynRM, převzato [27]

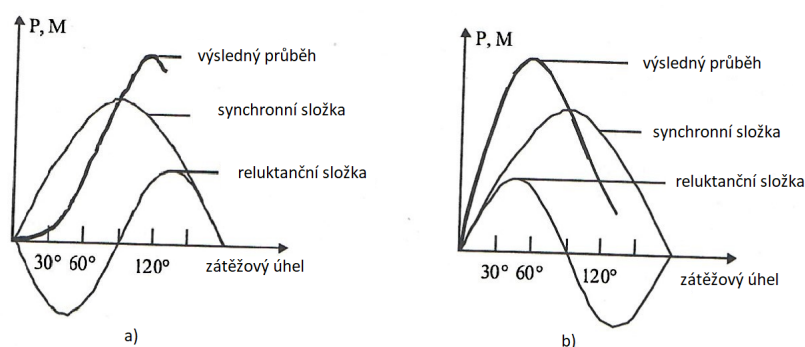
■ Celkový moment

PMA-SynRM je stroj s budícím vinutím umístěným ve statorových drážkách. Rotor s vnitřními permanentními magnety je považován za stroj s vyniklými póly. Z minulé podkapitoly víme, že v takovém stroji vznikají dva typy momentů, kde druhý typ je synchronní moment. Celkový elektromagnetický moment stroje je součtem reluktančního a synchronního momentu [40]:

$$T = \frac{3}{\omega_s} \left(\frac{U_n U_{ib}}{X_d} \sin(\Theta) + U_n^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin(2\Theta) \right) \quad (4.6)$$

ω_s značí synchronní úhlovou rychlost a U_{ib} indukované napětí. První součtový člen vyjadřuje synchronní moment.

Závislost momentu na zátěžovém úhlu je zobrazena na obrázku 4.3. Obvykle se snažíme pracovat v úzkém pásmu zátěžových úhlů.

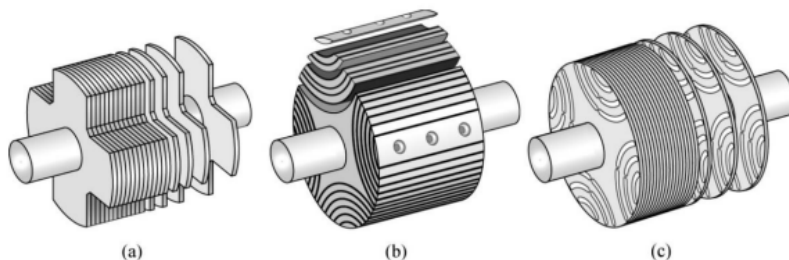


Obrázek 4.3: Výkon/Moment závislý na zátěžovém úhlu; a) rotor s vnitřními magnety; b) rotor s magnety na povrchu; převzato [40]

Z grafů je patrné, že maximální hodnoty momentu/výkonu dosáhneme při zátěžovém úhlu $\Theta > \frac{\pi}{2}$ pro rotor s vnitřními permanentními magnety, respektive $\Theta < \frac{\pi}{2}$ pro stroj s permanentními magnety na povrchu rotoru.

■ Konstrukce, vlastnosti

Rotor může být konstruován axiálně vrstvený, rotor s vystouplými póly nebo příčně laminovaný. Je vyráběn z magneticky měkkého materiálu a zároveň se na rotoru nenachází žádné vinutí [23].



Obrázek 4.4: SynRM rotory: a) vystouplé póly; b) podélně vrstvený rotor; c) příčně vrstvený rotor, převzato [23]

V minulosti kvůli nedokonalosti frekvenčních měničů, které jsou k funkčnosti potřebné, byl synchronní reluktanční motor méně používaný. PMA-SynRM jsou velikostně menší a spolehlivější. Nevýhodou je přítomnost permanentních magnetů, které zvyšují výrobní náklady a je nutné věnovat větší pozornost i chladicím systémům stroje. Při vyšších teplotách může dojít k demagnetizaci permanentních magnetů, a tím dojde k poškození stroje.

Kapitola 5

Aktuální stav techniky oboru lehkých elektrických vozidel

5.0.1 Elektrické pohony

Elektropohon pro automobily musí splňovat následující vlastnosti:

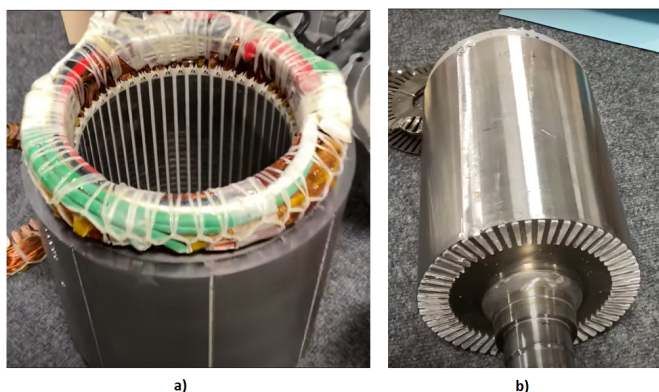
- vysoký záběrný točivý moment, aby splňoval požadavky na zrychlení
- vysoká hustota výkonu, díky které se sníží jeho objem
- vysoká účinnost k minimalizaci ztrát a prodloužení dojezdu na baterie
- konstantní široký rozsah otáček, aby nebylo nutné měnit převodový stupeň

Vysoká spolehlivost a nízká hlučnost jsou taktéž dalšími zásadními vlastnostmi elektropohonu pro trakční aplikace [29-32].

Trend v designu elektrických pohonů se v průběhu let vydal cestou zvyšování počtu pólů a maximálních otáček. Tyto dva aspekty zvýší točivý moment a hustotu výkonu. Dále zlepší účinnost ve smyslu delšího dojezdu na jedno nabití i ve smyslu snížení nákladů, neboť elektropohon s vysokým počtem pólů sníží délku koncových závitů a počet materiálů (magnetů) nutných k obdobným parametrům stroje.

Provoz stroje při vyšších otáčkách zvyšuje hustotu výkonu a sníží hmotnost systému. Problémy jsou dále převedeny na převodovku, která musí zvýšit převodový poměr mezi motorem a koly vozidla pomocí ozubených kol. Obrázek 5.1 zobrazuje převodovku Tesly (Model S), jejíž celkový převodový poměr rotor:kola je 9.7344:1 [29-32].

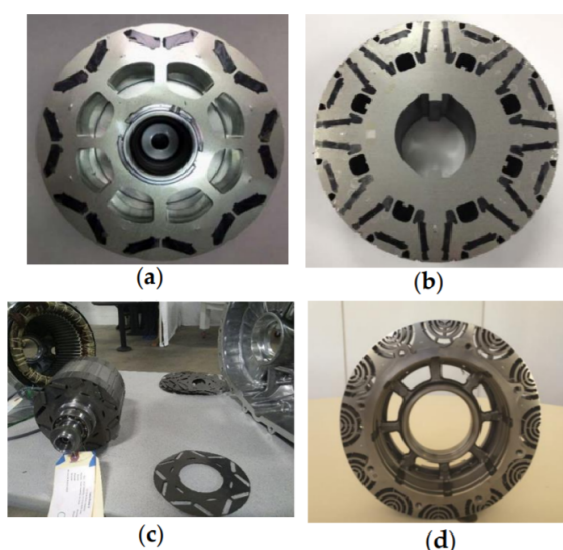
Asynchronní motory se v elektromobilech používají především kvůli jednoduchosti, robustnosti, spolehlivosti a nižší výrobní ceně oproti IPM motorům. Dále se vyznačují vysokým špičkovým točivým momentem a dobrou dynamickou odezvou. Přes všechny tyto dobré vlastnosti mají indukční stroje velké ztráty, tedy nižší účinnost. Kvůli tomu se očekává nahrazení asynchronních motorů motory synchronními s permanentními magnety (PMSM) nebo PMA-SynRM (synchronní reluktanční motor s permanentními magnety) [29-32].



Obrázek 5.3: Indukční motor Audi E Tron: a) stator; b) rotor, upraveno [31]

Do skupiny IPM se řadí synchronní motor s interními permanentními magnety (IPMSM). Většinou využívá neodymové magnety NdFeB (neodym-železo-bor). Právě tento motor se stal přední volbou trakčních elektrických strojů kvůli vysoké hustotě výkonu, točivého momentu a účinnosti. Konstrukce IPMSM je robustní kvůli uložení permanentních magnetů uvnitř rotoru. I přestože jsou náklady na výrobu IPMSM velice vysoké, především kvůli ceně za permanentní magnety, je v nynější době nejvíce využíván, neboť kterýkoliv jiný stroj nedokáže dosáhnout takových parametrů. IPMSM jsou oproti indukčním motorům účinnější a díky absenci ztrát v mědi rotoru se lépe chladí. U indukčních motorů naopak nehrozí riziko demagnetizace magnetů při vysokém proudu [29-32].

Ve srovnání IPMSM s SPMSM, mají IPMSM výhodu produkce reluktančního momentu. Tedy je pravděpodobné, že v budoucnosti budou synchronní motory s permanentními magnety nahrazovány PMA-SynRM. V PMA-SynRM není nutné vkládat velké množství magnetů, a tudíž jsou značně levnější při dosažení obdobných parametrů jako tomu je u IPMSM a SPMSM. Samotné SynRM bez permanentních magnetů mají pro trakční aplikace malý rozsah otáček při konstantním výkonu [29-32].



Obrázek 5.4: Design rotorů typu IPM: a) rotor tvaru V (Toyota Prius 2010); b) rotor tvaru dvojitého U (Toyota Prius 2017); c) rotor tvaru V (Tesla Model 3 2017); d) IPM rotor (Chevrolet Volt 2016), převzato [30]

Existuje ještě jeden aktuálně zkoumaný pohon pro automobilové aplikace, a to spínaný reluktanční motor (SRM). Tento motor je již znám několik desetiletí, ale v trakčních aplikacích nebyl prozatím moc využíván. Jeho nevýhody jako vysoký akustický hluk, velké zvlnění točivého momentu a složitost řízení nedovolily tomuto typu prorazit na poli automobilového průmyslu coby pohonné jednotky. Momentálně se nejedna automobilová společnost snaží vyřešit tyto překážky, neboť SRM vykazuje velkou účinnost a schopnost dosáhnout velkého rozsahu otáček při konstantním výkonu. V posledních několika letech probíhá několik výzkumných projektů s cílem snížení zvlnění točivého momentu. SRM navržené pro trakční aplikace neobsahují permanentní magnety a přesto vykazují vlastnosti podobné IPM motorům nebo motorům asynchronním. Vzhledem k současnosti, kdy se vyvíjí stroje neobsahující vzácné kovy, může být SRM v budoucnosti silným konkurentem mezi elektrickými vozidly [29-32].



Obrázek 5.5: Spínaný reluktanční motor s vnitřním rotorem, převzato [30]

5.0.2 Chladicí systémy

Detailní informace o aktuálních trendech v oblasti chlazení elektrických strojů pro trakční aplikace jsou velice těžko dostupné. Jsou uchovávané v tajnosti jednotlivých výrobců. Nicméně některé novinky v tomto oboru lze získat z vědeckých článků.

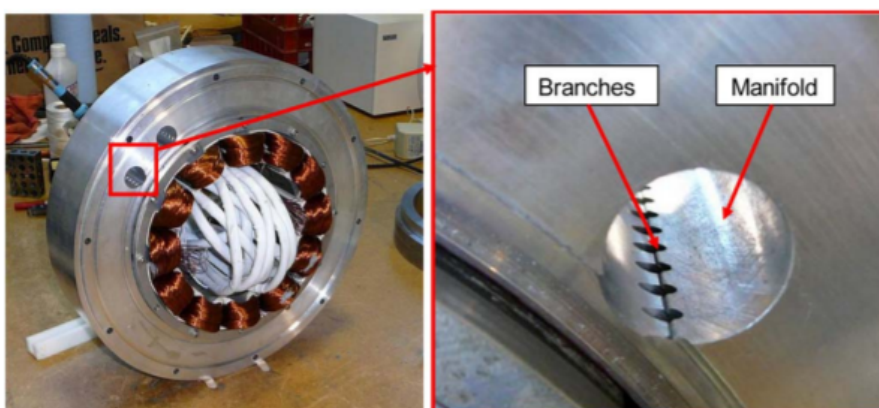
V důsledku elektromagnetických, mechanických a dalších ztrát, vznikajících v různých částech stroje, se při provozu elektromotoru vytváří teplo. Tepelná energie se přenáší do chladicího systému, aby se zamezilo poruchám v elektronice či materiálu motoru. Nedostatečné ochlazení stroje má dále za následek snížení výkonu a má vliv na délku životnosti. K účinnému ochlazení stroje se kromě minimalizace magnetických ztrát, jako zdrojů tepla, musíme zabývat mechanismy odvodu tepla.

Obecně, termální návrh využívá dva základní typy:

- otevřený chladicí okruh
- uzavřený chladicí okruh

Při provozu je stroj chladicím okruhem udržován na přijatelné teplotě. Teplo je odváděno z vnitřních částí stroje na vnější povrch motoru, kde je následně ochlazováno. Celkově existuje mnoho druhů chlazení a výběr záleží na konkrétní aplikaci [33].

V automobilovém průmyslu se velice často využívá nucené chlazení kapalinou. Chlazení může být realizováno pomocí speciální chladicí kapaliny EGW 50/50, oleje, nebo také obyčejné vody. Příkladem je elektromotor Nissan-Leaf, kde výrobce využívá vodní plášť se třemi chladicími kanálky s kapalinou EGW 50/50 [33].



Obrázek 5.6: Chladicí plášť statoru s mikrokanálky, převzato [33]

Kapitola 6

Typové provedení a parametry elektrického pohonu

Na základě řešených, které byly popsány v předešlých kapitolách, máme na výběr ze tří typů pohonů pro trakční aplikace. Nicméně pro tuto práci jsem vybral synchronní reluktanční motor s interními permanentními magnety.

Důvod pro výběr tohoto typu je především v jeho vlastnostech. V budoucnosti je také velice pravděpodobné, že díky tomu budou motory tohoto typu čím dál častěji aplikované v elektrických vozidlech.

Dále je možné zdokonalení samotných synchronních reluktančních motorů, kdy pro trakční aplikace začnou být perspektivnější především kvůli absenci permanentních magnetů, z čehož vyplývá nižší výrobní cena.

Rozdíl v návrhu mezi PMa-SynRM a SynRM není velký. Jak již název napovídá, jedná se pouze o vložení permanentních magnetů do rotoru SynRM a následné optimalizaci stroje.

Návrh bude směřován pro použití v lehkých elektrických vozidlech do hmotnosti 1500 kg. Takové vozidlo je určeno pro použití především v urbanistickém prostředí a je charakterizováno mezinárodním jízdním cyklem WTLP (worldwide harmonized light vehicles test procedure). Dle výzkumných projektů [36][37] byly vybrány základní parametry pro tento návrh.

Značení	Parametr	Hodnota
P_n	Jmenovitý výkon	50 kW
n	Otáčky	9 000 ot/min
U_n	Jmenovité napětí	400 V
p	Počet pólových dvojic	4
-	Třída izolace	H

Tabulka 6.1: Parametry PMa-SynRM

Kubatura stroje je přímo úměrná otáčkám stroje. Aby bylo dosaženo co možná nejmenší kubatury, je nutné volit vyšší otáčky pro stejný výkon.

Konstrukční provedení stroje podstatně závisí na jmenovitém výkonu a otáčkách stroje. Vnitřní výkon stroje je součinem proudu a elektromotorického napětí.

$$P_i = E \cdot I \quad (6.1)$$

Po úpravách lze dojít k následujícímu vztahu:

$$P_i \approx JBnl^4 \quad (6.2)$$

kde l je délkový rozměr stroje, J označuje proudovou hustotu a B je střední hodnota magnetické indukce. J a B můžeme v této aproximaci zanedbat. Výkon $P = M \cdot n$, kde M je točivý moment stroje. Dojdeme k následující závislosti (6.3) [39].

$$\frac{P_i}{n} \approx l^4 \quad (6.3)$$

Při konstantním výkonu lze dopočítat rozdíl velikosti kubatury stroje pro různé otáčky. Rozdíl velikosti stroje při jmenovitých otáčkách 3 000 ot/min a 9 000 ot/min bude:

$$\left(\frac{n_2}{n_1}\right)^{-\frac{1}{4}} = \left(\frac{3000}{9000}\right)^{-\frac{1}{4}} = (0.759)^3 = 0.437 \quad (6.4)$$

Tedy při volbě 9 000 ot/min jsme schopni dosáhnout stejného výkonu při téměř poloviční velikosti stroje. Odvození a vztahy jsou znázorněny v literatuře [39].

Vyšší otáčky dále poskytnou lepší účinnost stroje. Z tohoto důvodu volíme nominální otáčky 9 000 ot/min.

Počet pólů/pólových dvojic redukuje zvlnění točivého momentu. Z tohoto důvodu je vhodnější zvolit vyšší počet pólů. V tomto návrhu je počet pólů roven 8 ($2 \cdot p = 8$).

Vypovídající hodnotou, a tedy i kritériem návrhu je hustota specifického výkonu. Tato hodnota by dle studie [37] měla být větší než 1.4kW/kg. Během práce bude tento parametr porovnán s navrženým strojem.

Druhým kritériem hodnocení navrženého stroje je třída izolace. Tedy analýza, zda-li stroj nepřesáhne dovoleného oteplení při definovaném zatížení.

Kapitola 7

Návrh synchronního reluktančního motoru

Návrh stroje se skládá ze dvou částí. Základní rozměry motoru jsou nejprve navrženy analyticky a následně je motor analyzován a podroben mnoha simulacím pomocí výpočetního softwaru. Pomocí simulací se parametry stroje upravují, dokud nedosáhneme optimálních výsledků.

Analytický návrh je složen z několika kroků. V následujících podkapitolách se budeme zabývat různými částmi, jako je výpočet parametrů statoru, rotoru nebo návrh vinutí. Návrh statoru synchronního reluktančního stroje je obdobný jako návrh asynchronního stroje. Hlavním rozdílem je návrh rotoru.

7.1 Výpočet základních parametrů stroje

Základní parametry stroje jako vstupní parametry stroje pro elektromagnetický návrh byly vypočteny analyticky pomocí literatury [26].

Nejprve byly určeny hlavní parametry stroje. Těmi jsou vnitřní průměr statoru D a ideální délka vzduchové mezery l_i . K určení l_i je zapotřebí vypočítat vstupní frekvenci dodávanou z měniče do motoru.

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = 600 \text{ Hz} \quad (7.1)$$

Následně z grafu (obr. 6.7 [26]) byla zvolena výška osy h a dle ní odpovídající vnější průměr statoru D_e dle tabulky 6.6 [26].

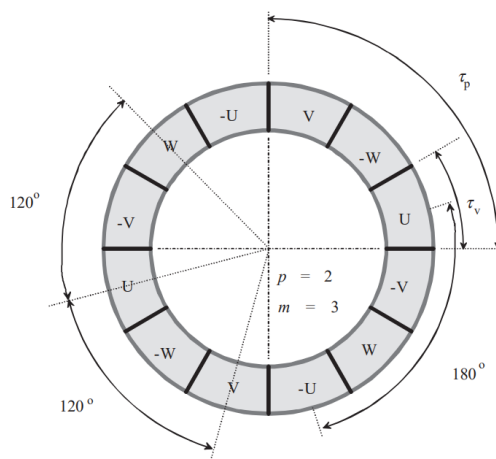
Vnitřní průměr statoru byl doložen za pomoci následujícího vztahu:

$$D = K_D \cdot D_e = 158.7 \text{ mm} \quad (7.2)$$

kde koeficient K_D charakterizuje poměr vnitřního a vnějšího průměru statoru. Tento koeficient byl odečten z tabulky 6.7 [26].

Dalším krokem v návrhu je určení pólové rozteče a vnitřního výkonu.

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = 62.3 \text{ mm} \quad (7.3)$$



Obrázek 7.1: Pólová rozteč a pólové zóny pro 4-pólový, 3-fázový stroj, převzato [25]

Vnitřní výkon byl spočten za pomoci k_E , η , $\cos(\phi)$.

$$P_i = \frac{k_E}{\eta \cdot \cos(\phi)} = 67.568 \text{ kW} \quad (7.4)$$

Koeficient k_E určuje poměr indukovaného ku jmenovitému napětí statoru. Je možné jej určit z obr. 6.8 [26]. Dále hodnoty účinnosti a účiníku byly získány z obr. 6.9 [26].

7.1.1 Délka vzduchové mezery

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_w \cdot A \cdot B_\delta} = 108.7 \text{ mm} \quad (7.5)$$

Ideální délku rotorových paketů lze vypočítat pomocí předem přibližně určené lineární proudové hustoty A a magnetické indukce ve vzduchové mezeře B_δ . Tyto hodnoty byly přibližně odečteny z obr. 6.11a [26].

Parametr ω_s udává synchronní úhlovou rychlost hřídele motoru:

$$\omega_s = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 942.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (7.6)$$

7.1.2 Délka stroje

Délka stroje:

$$l = \frac{P_i}{D^2 \cdot n \cdot C \cdot \frac{\pi}{60} \cdot \alpha_\delta \cdot B_\delta \cdot A \cdot k_B \cdot k_w} = 345.42 \text{ mm} \quad (7.7)$$

kde $\alpha_\delta = \frac{2}{\pi}$ a koeficient vinutí $k_w = 0.96$ byly určeny dle [26] pro sinusový průběh a pro vinutí s plným krokem.

7.1.3 Ověření správného výpočtu základních rozměrů

Kritérium, dle kterého lze ověřit správně navržené hlavní rozměry D a l_i , je tzv. štíhlostní poměr λ .

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} [-] \quad (7.8)$$

Tento poměr by se měl pohybovat dle obr. 6.14 [26]. V případě, kdy poměr nebude odpovídat danému rozmezí dle [26], je potřeba volit menší/větší výšku osy h a následně přepočítat dosavadní návrh stroje.

V tomto případě je štíhlostní poměr roven 1.7, lze tedy předpokládat, že základní parametry jsou správně vypočtené.

7.2 Návrh statorových drážek

Nejprve je zvolena velikost drážkové rozteče $t_{d,min} - t_{d,max}$ z obr. 6.15 [26]. Hodnoty volíme z oblasti 2 určené pro výšku osy $90 < h < 250$ mm.

Následně byl vypočten počet drážek statoru dle vztahu:

$$Q_{min} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d,max}} = 46 \quad (7.9)$$

$$Q_{max} = \frac{\pi \cdot D}{t_{d,min}} = 54 \quad (7.10)$$

Počet drážek Q se následně volí tak, aby hodnota byla dělitelná počtem fází a zároveň počet drážek na pól a fázi musí být pro většinu strojů celé číslo [26]:

$$q = \frac{Q}{2 \cdot p \cdot m} = 2 \quad (7.11)$$

kde m je počet fází.

Konečná hodnota drážkové rozteče:

$$t_d = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = 10.38 \text{ mm} \quad (7.12)$$

Velikost t_d musí spadat do rozmezí $t_{dmin} - t_{dmax}$ určené dříve.

7.2.1 Návrh počtu vodičů v drážce

Počet vodičů v drážce se nejprve určuje pro počet paralelních větví $a = 1$, aby zaokrouhlování výsledku nebylo příliš hrubé [26].

Počet efektivních vodičů pro $a = 1$:

$$V_{d1} = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_n \cdot Q} = 9.7 \quad (7.13)$$

kde I_n je proud procházející vinutím statoru.

Následně je zvolen počet paralelních cest a počet závitů ve fázi.

$$V_d = a \cdot V_{d1} = 20 \quad (7.14)$$

$$N = \frac{V_d \cdot Q}{2 \cdot a \cdot m} = 40 \quad (7.15)$$

Nyní je přepočítána lineární proudová hustota A na její pravou hodnotu:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N \cdot I_n}{\pi \cdot D} = 27\,330.75 \frac{\text{A}}{\text{m}} \quad (7.16)$$

7.2.2 Magnetický tok a velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře

Magnetický tok:

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_n}{4 \cdot k_b \cdot N \cdot f \cdot k_w} \approx 4 \cdot 10^{-3} \text{ Wb} \quad (7.17)$$

Velikost magnetické indukce ve vzduchové mezeře musí přibližně odpovídat dříve odhadnuté hodnotě.

$$B_\delta = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_i} = 0.938 \text{ T} \quad (7.18)$$

7.2.3 Rozměry statorových drážek a zubů

Při výpočtu těchto rozměrů je třeba dbát na dovolené hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech magnetického obvodu dle tabulky 6.10. [26].

Výška jha statoru:

$$h_{j,min} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j,max} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} \text{ [m]} \quad (7.19)$$

$$h_{j,max} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j,min} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} \text{ [m]} \quad (7.20)$$

kde hodnoty $B_{j,min}$, $B_{j,max}$ jsou zvoleny dle zmíněné tabulky 6.10. Tyto hodnoty jsou 1.4 – 1.6 T.

Činitel plnění železa k_{Fe} je roven 0.97 a byl určen podle tabulky 6.11. [26].

Šířka zubů statoru.

$$b_{z,min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d \cdot l_i}{B_{z,max} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} \text{ [m]} \quad (7.21)$$

$$b_{z,max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_d \cdot l_i}{B_{z,min} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} \text{ [m]} \quad (7.22)$$

$B_{z,min}, B_{z,max}$ jsou 1.7 – 1.9 T.

Hloubka drážky.

$$h_{d,min} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j,max} \text{ [m]} \quad (7.23)$$

$$h_{d,max} = \frac{D_e - D}{2} - h_{j,min} \text{ [m]} \quad (7.24)$$

Posledním parametrem je šířka drážky.

$$b_{d,min} = t_d - b_{z,max} \text{ [m]} \quad (7.25)$$

$$b_{d,max} = t_d - b_{z,min} \text{ [m]} \quad (7.26)$$

Veškeré tyto rozměry jsou uvedeny v tabulce 7.1.

■ 7.2.4 Velikost vzduchové mezery

Velikost vzduchové mezery má značný vliv na různé charakteristiky stroje. Je třeba vypočítat velikost vzduchové mezery tak, aby produkovala minimální magnetizační proud. V podstatě malá vzduchová mezera zapříčiní velké ztráty v materiálech statoru a rotoru kvůli výskytu vyšších harmonických složek při vyšších rychlostech. Technicky nejmenší možná vzduchová mezera je 0.2 mm [25].

V literatuře je možnost výpočtu vzduchové mezery dle empirických vztahů. Tyto vztahy se v jednotlivých textech mírně liší viz. následující vzorce.

Synchronní reluktanční motory navíc musí mít vysoký indukční poměr, proto je vhodné zvolit menší vzduchovou mezera. Z tohoto důvodu bude vzduchová mezera určena ze vztahu (7.28) a při optimalizačním procesu bude upravena tak, aby minimalizovala ztráty ve vinutí a maximalizovala účinnost stroje.

Empirický vztah pro výpočet velikosti vzduchové mezery dle literatury [25]:

$$\delta \approx \frac{0.18 + 0.006 \cdot P^{0.4}}{1000}, \text{ pro } p \geq 1 = 0.28 \text{ mm} \quad (7.27)$$

Empirický vztah pro výpočet velikosti vzduchové mezery pro motory středních a velkých výkonů ($P > 20$ kW) dle [26]:

$$\delta \approx \frac{\frac{D}{1.2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot p}\right)}{1000} = 0.41 \text{ mm} \quad (7.28)$$

Velikost vzduchové mezery 0.28 mm je při výrobě stroje těžko proveditelná. Budeme tedy vycházet z empirického vztahu (7.29).

7.3 Geometrie rotoru

7.3.1 Volba typu rotoru

Jak bylo dříve uvedeno (obr. 4.5), existují tři různé topologie rotorů synchronního reluktančního motoru. Nejvíce využívané jsou axiálně vrstvené rotory a příčně laminované rotory. Příčně laminované rotory mají navíc výhodu jednodušší výroby. Pro tento návrh jsem vybral TLA konstrukci rotoru z důvodu ceny výroby.

7.3.2 Dimenzování

Na začátku návrhu TLA rotoru je nutné vypočítat úhly bariér - jejich pozice a jejich počet [24]. Pro počet tokových bariér platí následující:

$$k = \frac{Q}{2 \cdot p} \pm 2 \text{ [-]} \quad (7.29)$$

Optimální počet bariér a jejich úhly je velice obtížné spočítat analyticky. Tyto hodnoty se dále upřesňují numerickými výpočty.

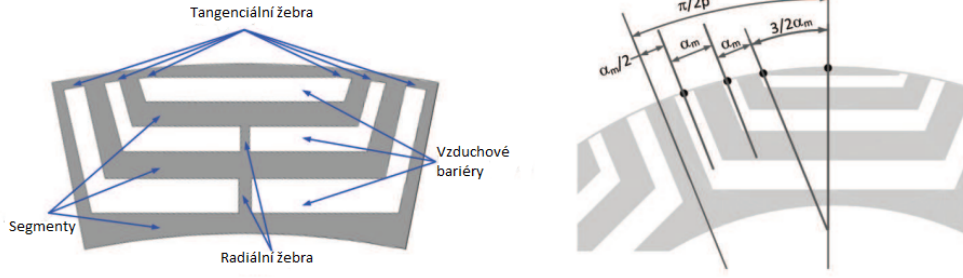
Umístění bariér je koncipováno tak, aby se dosáhlo dobrého rozložení magnetického pole a zároveň snížení zvlnění točivého momentu. K dosažení minimálního zvlnění točivého momentu se dále v optimalizaci geometrie tyto úhly mění. [24]

První nastavení těchto úhlu je dle [24] následovné:

$$\alpha_m = \frac{\pi}{2p \cdot (k + 1)} \text{ [rad]} \quad (7.30)$$

Počítané úhly a rotorová geometrie jsou znázorněné na obrázku 7.2. Obecně se při návrhu struktury rotoru musí řídit následujícími pravidly [27]:

- Magnetický tok v přímé ose musí protékat přes celý povrch pólů, jen tak dosáhnou maximální magnetické indukce
- Magnetický tok ve směru osách kvadrantů ($\pm 45^\circ$) musí být minimalizován.



Obrázek 7.2: Obecná geometrie TLA rotoru, úhly α_m , upraveno [24]

V této práci uvedu pouze závěry plynoucích z odvození [24][27], dle kterých jsem schopen spočítat rozměry segmentů a bariér.

Pravidlo pro dimenzování k-tého a k-tého + 1 segmentu:

$$\frac{S_k}{S_{k+1}} = \frac{F_{mk}}{F_{m(k+1)}} \quad [-] \quad (7.31)$$

kde S_k je šířka segmentu a F_{mk} je magnetomotorické napětí k-tého segmentu. Tento poměr zajistí stejnou hustotu magnetického toku ve všech segmentech. První segment, kde se magnetický tok dělí do dvou pólů je popsán obdobnou rovnicí:

$$2 \cdot \frac{S_1}{S_2} = \frac{F_{m1}}{F_{m2}} \quad [-] \quad (7.32)$$

Magnetomotorické napětí lze vyjádřit jako:

$$F_{mk} = \frac{\sin\left(\frac{2i-1}{2} \cdot p \cdot \alpha_m\right) - \sin\left(\frac{2i-3}{2} \cdot p \cdot \alpha_m\right)}{p \cdot \alpha_m} \quad [\text{A}] \quad (7.33)$$

Součet velikosti všech segmentů:

$$\sum_{i=1}^{k+1} S_i = \frac{\text{výška rotoru}}{1 + k_{insq}} \quad [\text{m}] \quad (7.34)$$

kde k_{insq} je tak zvaný izolační poměr mezi šířkou bariér a šířkou segmentů. Tento poměr závisí na samotné geometrii stroje.

Z těchto lineárních rovnic vypočteme velikosti jednotlivých segmentů S_k .

Šířka vzduchových bariér v ose q musí být dimenzována tak, aby minimalizovala magnetický tok:

$$\frac{W_{qk}}{W_{qk+1}} = \frac{\Delta F_{qk}}{\Delta F_{qk+1}} \quad [-] \quad (7.35)$$

Kde F_{qk} :

$$F_{qk} = \frac{\cos\left(\frac{2i-3}{2} \cdot p \cdot \alpha_m\right) - \cos\left(\frac{2i-1}{2} \cdot p \cdot \alpha_m\right)}{p \cdot \alpha_m} \quad [\text{A}] \quad (7.36)$$

Šířka vzduchových bariér v ose d lze vyjádřit jako poměr šířky bariér v ose q a d [24]:

$$\frac{W_{qk}}{W_{qk+1}} = \frac{W_{dk}}{W_{dk+1}} \quad [-] \quad (7.37)$$

Soustavu rovnic pro výpočet W_{qi} doplníme o celkovou šířku vzduchových bariér.

$$\sum_{i=1}^k W_{qi} = \frac{\text{výška rotoru}}{1 + \frac{1}{k_{insq}}} \quad [\text{m}] \quad (7.38)$$

Označení	Význam	Min. Hodnota	Max. Hodnota
2p	Počet pólů	8	8
m	Počet fází	3	3
Q	Počet statorových drážek	45	54
δ	Šířka vzduchové mezery	0.3 mm	0.6 mm
l	Délka stroje	345.4 mm	345.4 mm
l_i	Délka vzduchové mezery	108.7 mm	108.7 mm
h	Výška osy	125 mm	125 mm
D	Vnitřní průměr statoru	158.7 mm	158.7 mm
D_o	Vnější průměr statoru	213 mm	213 mm
h_j	Výška/šířka jha	12 mm	13.7 mm
b_z	Šířka zubu	5.3 mm	5.9 mm
w_z	Hloubka drážky	13.5 mm	15.2 mm
h_d	Šířka drážky	4.5 mm	5.1 mm
S_o	Otevření drážky	1 mm	2 mm

Tabulka 7.1: Výsledky geometrie statoru modelovaného stroje

Analyticky vypočtené hodnoty uvedené v tabulce 7.1. se mohou v průběhu dalšího návrhu změnit. Výběr mezi maximální a minimální hodnotou je prováděn na základě numerických výpočtů.

Označení	Význam	Hodnota
-	Vinutí jednovrstvé	-
z_Q	Počet vodičů v drážce	20
a	Počet paralelních cest	2
-	Počet závitů na cívku	4
-	Parametry vodiče (průměr)	1.250 mm/1.351 mm (s izolací)

Tabulka 7.2: Výsledky statorového vinutí

Materiál statorové laminace	M350-50A
Materiál rotorové laminace	M350-50A
Materiál vodičů	Měď
Materiál magnetů	Vacodym 974 AP

Tabulka 7.3: Použité materiály

Materiálové vlastnosti jednotlivých použitých materiálů jsou k dispozici v příloze B-E. Tyto vlastnosti byly převzaty z materiálové databáze ANSYS Motor-CAD.

Označení	Význam	Hodnota
D_{ri}	Vnitřní průměr rotoru	50 mm
D_{ro}	Vnější průměr rotoru	158.1 mm
k	Počet bariér	3
S_1	Šířka 1. segmentu	5.5 mm
S_2	Šířka 2. segmentu	11.6 mm
S_3	Šířka 3. segmentu	9.9 mm
S_4	Šířka 4. segmentu	7.2 mm
l_1	Vnitřní průměr 1. bariéry	68 mm
l_2	Vnitřní průměr 2. bariéry	106.6 mm
l_3	Vnitřní průměr 3. bariéry	139 mm
W_{q1}	Šířka 1. vzduchové bariéry	8.7 mm
W_{q2}	Šířka 2. vzduchové bariéry	6.3 mm
W_{q3}	Šířka 3. vzduchové bariéry	3.3 mm
W_{d1}	Šířka 1. vzduchové bariéry	3.3 mm
W_{d2}	Šířka 2. vzduchové bariéry	2.4 mm
W_{d3}	Šířka 3. vzduchové bariéry	1.3 mm

Tabulka 7.4: Výsledky geometrie rotoru modelovaného stroje

Dle vztahu (7.29) je vhodný počet bariér 4. Takový počet je pro daný průměr rotoru nemožný. Velikost některých segmentů by byla příliš malá a při provozu by došlo k nenávratnému poškození. Z tohoto důvodu byly zvoleny tři bariéry.

Geometrie stroje v axiálním řezu, radiálním řezu a vinutí stroje je zobrazena v příloze D.

Kapitola 8

Elektromagnetický návrh a výsledky

Elektromagnetický návrh byl proveden v softwarovém prostředí ANSYS Motor-CAD.

V prvotním návrhu byla definována geometrie stroje a vinutí dle analytických výpočtů uvedených v předchozí kapitole. Vzhledem k tomu, že analytický výpočet vycházel ze zjednodušených předpokladů a několika odhadů, jsou jeho výsledky přibližné. Během analytického výpočtu nejsou započítány přechodné či nelineární jevy. Například ztráty ve vinutí, v jádře, nasycení, výřivé proudy a další. Z tohoto důvodu jsou provedeny elektromagnetické výpočty numerickými metodami a na základě těchto výpočtů je geometrie stroje optimalizována.

Elektromagnetické výpočty jsou běžně prováděny třemi numerickými metodami. Jedná se o metodu konečných prvků (MKP), metodu konečných diferencí (FDM) a metodu hraničních prvků (BEM).

ANSYS Motor-CAD k elektromagnetickému výpočtu využívá kombinaci analytických a numerických výpočtů. Numerické výpočty jsou provedeny metodou konečných prvků (MKP).

Geometrie stroje v axiálním řezu se zadanými rozměry je zobrazena v příloze D. Rozměry stroje jsou definovány v červeně ohraničeném rámu.

Elektromagnetický výpočet byl proveden při výkonu 50 kW a 9 000 ot/min. Hodnota statorového proudu je $I_{max} = 147.1$ A. Hodnota byla přesně určena z předběžného výpočtu momentové charakteristiky v režimu řízení MTPA (maximum torque per ampere).

The screenshot shows the E-Magnetics software interface with the following input data:

- Drive:** Shaft Speed: 9000; Line Current Definition: Peak (selected); Peak Current: 147.1; RMS Current: 104; RMS Current Density: 8.476; DC Bus Voltage: 400; Phase Advance [elec deg]: 41.
- Temperatures:** Amature Winding Temperature: 40; Magnet Temperature: 70; Stator Lamination Temperature: 20; Rotor Lamination Temperature: 20; Stator Sleeve Temperature: 20; Rotor Banding Temperature: 20; Shaft Temperature: 50; Amature Wedge Temperature: 20; Housing Temperature: 20.
- Performance Tests:** Single operating points: Open Circuit (unchecked), Q axis current only (checked), On Load (checked); Open Circuit: Back EMF (checked), Cogging Torque (checked), Electromagnetic Forces (unchecked); On Load: Torque (checked), Torque Speed Curve (checked), Demagnetization (unchecked), Electromagnetic Forces (unchecked); Parameters: Self and Mutual Inductances (unchecked); Transient: Sudden short-circuit (unchecked).
- E-Magnetic ↔ Thermal Coupling:** E-Magnetic ↔ Thermal Coupling: No coupling (default) (selected); E-Magnetic Losses → Thermal (unchecked); E-Magnetic ← Thermal Temperatures (unchecked); Iterate to Converged Solution (unchecked).
- Skew:** Skew Type: None (default) (selected); Stator Skew: 0; Rotor slices: 5.
- Winding Connection:** Star Connection (default) (selected); Delta Connection (unchecked).
- Magnetisation:** Parallel (selected); Radial (unchecked); Halbach Continuous Ring Array (unchecked); Halbach Sinusoidal Array (unchecked).

Obrázek 8.1: Vstupní data pro elektromagnetický výpočet

Z elektromagnetického výpočtu byly získané tyto výsledky:

Označení	Význam	Hodnota
T_{av}	Průměrná hodnota momentu	51.108 Nm
T_h	Moment na hřídeli	49.1 Nm
T_{ripple}	Zvlnění momentu	7.7 Nm
$T_{ripple} \%$	Zvlnění momentu v procentech	14.9 %
n_{max}	Maximální rychlost pro konstatní otáčky	9024.2 rpm
P_{in}	Příkon	48 999 W
P	Výkon	46 237 W
ΔP_{tot}	Celkové ztráty	2 762.8 W
η	Účinnost	94.33 %
$\cos(\phi)$	Účinník	0.97

Tabulka 8.1: Výsledky elektromagnetického výpočtu

Vzhledem k oscilaci hodnot točivého momentu okolo střední hodnoty, v závislosti na úhlu natočení rotoru, je hodnota dána jako průměrná hodnota momentu T_{av} a byla spočtena při pootočení rotoru o 180° . Toto pootočení nemá, díky symetrii stroje, vliv na výsledky a je použito pro snížení výpočetního času elektromagnetických parametrů.

Označení	Význam	Hodnota
ΔP_{tot}	Celkové ztráty	2 763 W
$\Delta P_{\text{S-Fe}}$	Ztráty v železe statoru	2 041 W
$\Delta P_{\text{R-Fe}}$	Ztráty v železe rotoru	337.7 W
ΔP_{PM}	Ztráty v permanentních magnetech	5.5 W
$\Delta P_{\text{Cu-DC}}$	Ztráty ve statorovém vinutí DC	328.5 W
$\Delta P_{\text{Cu-AC}}$	Ztráty ve statorovém vinutí AC	49.92 W

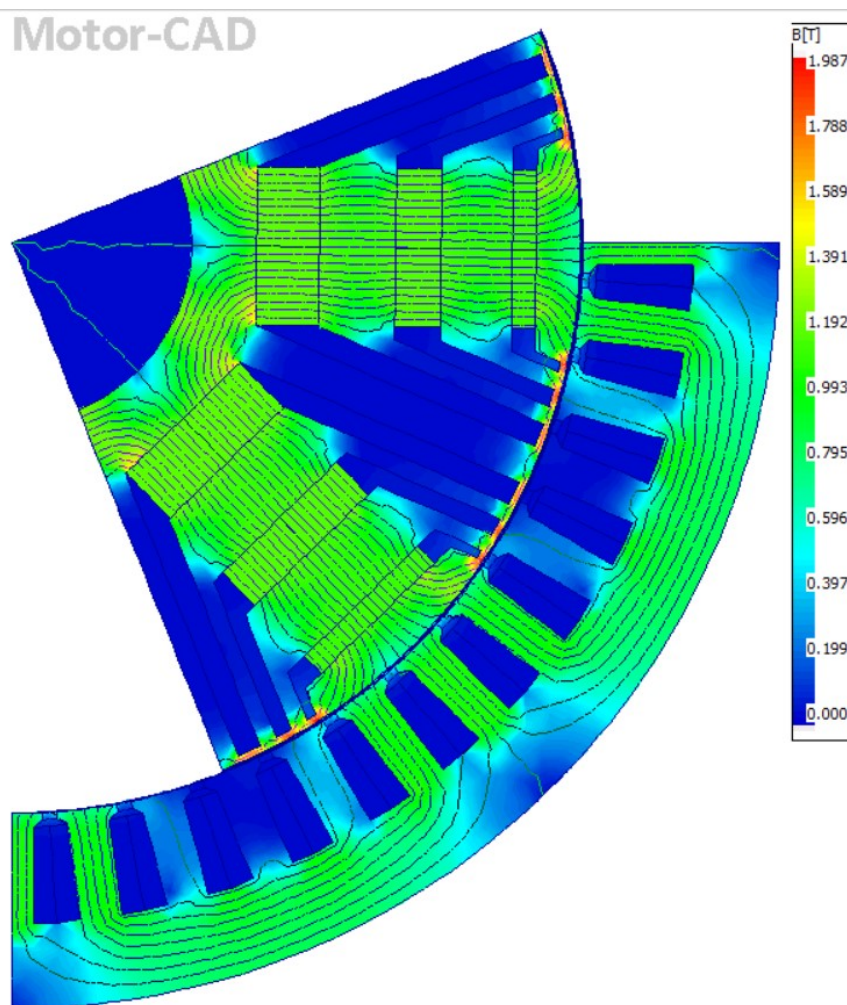
Tabulka 8.2: Výsledky elektromagnetického výpočtu - ztráty

Celkové ztráty jsou 2 763 W, z toho přibližně 74 % tvoří ztráty ve statorovém magnetickém obvodu a statorovém vinutí, tedy ztráty hysterézní a ztráty vířivými proudy. Tyto ztráty jsou zapříčiněny změnou magnetického toku buzeného vinutím. $\Delta P_{\text{Cu-AC}}$ jsou dodatečné ztráty ve vinutí způsobeny skin efektem. Zbýlých 24 % ztrát je tvořeno ztrátami v železe rotoru, v permanentních magnetech (tvořeny pulzačními ztrátami) nebo Jouleovými ztrátami. Velikosti ztrát odpovídá účinnost navrženého stroje. Pokud bychom chtěli účinnost zvýšit, zvolíme statorový plech s užší hysterézní křivkou, nebo s menší hustotou ztrát například M350-35A.

Označení	Význam	Hodnota
R_f	Odpor fáze vinutí	0.101 Ω
L_d	Indukčnost v ose d	80.48 μH
L_q	Indukčnost v ose q	460.8 μH
L_σ	Rozptylová indukčnost	18.79 μH
X_d	Reaktance v ose d	0.303 Ω
X_q	Reaktance v ose q	1.737 Ω

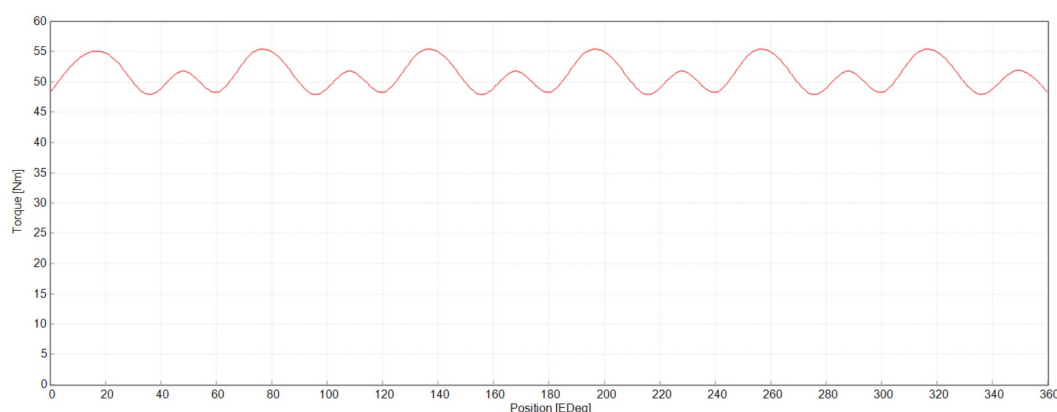
Tabulka 8.3: Výsledky elektromagnetického výpočtu - parametry náhradního schématu

Výsledky udávají rozdíl indukčností v ose d a q 0.38032 mH. Poměr indukčností mezi osou d a q je velmi důležitý. Rozdíl indukčností udává točivý moment, jak již bylo popsáno v podkapitole 4.2. V literatuře je hodnota maximálního dosažitelného poměru indukčností udávána okolo 10. Navržený stroj dosahuje poměru 5.7, tedy bylo by možné optimalizovat geometrii rotorového magnetického obvodu pro jeho zvýšení.



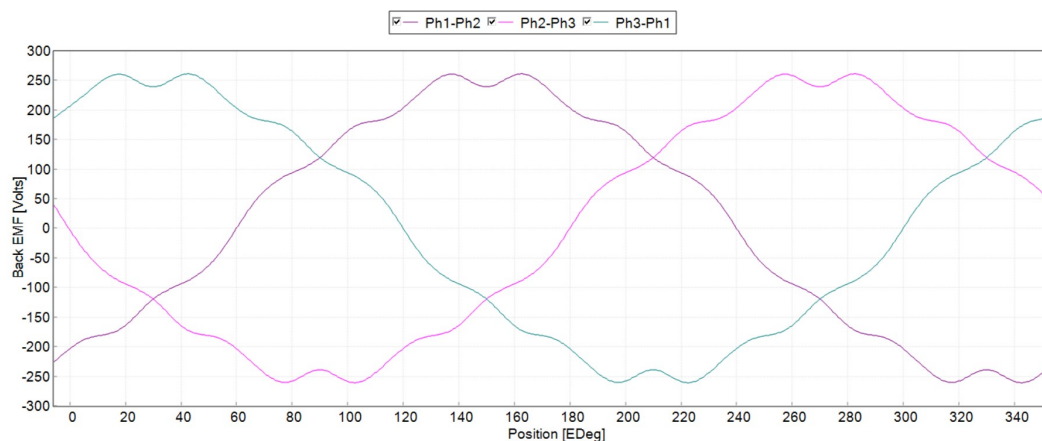
Obrázek 8.2: Magnetická indukce ve stroji při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min

Magnetické pole v rotoru i statoru je poměrně homogenní v rozsahu 0.8 - 1.2 T. Pouze v oblasti můstků mezi výseky rotorových plechů je lokální přesycení dosahující hodnot okolo 1.8 T. Z toho lze usoudit, že v daných místech budou lokálně zvýšené ztráty v železe.



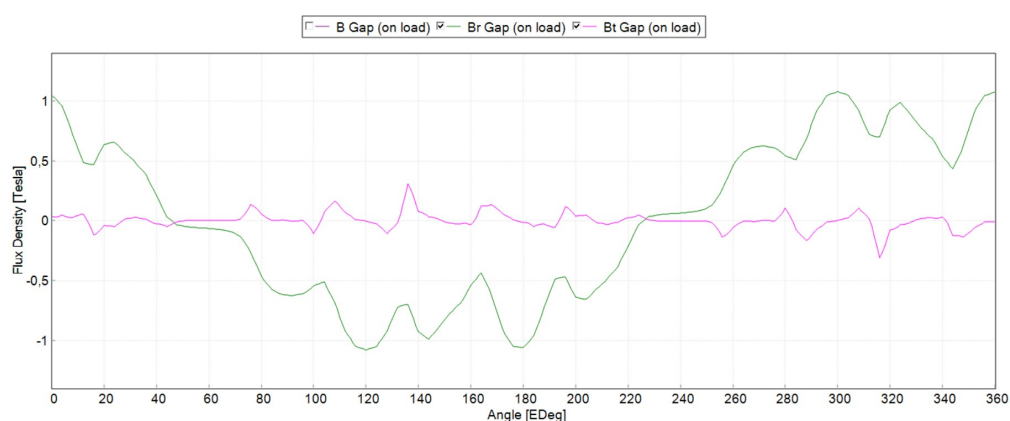
Obrázek 8.3: Točivý moment (vypočten metodou virtuální práce)

Točivý moment dosahuje maximální hodnoty 56.38 Nm a minimální hodnoty 49.1 Nm. Zvlnění momentu nabývajícím téměř 15% by bylo možné zredukovat optimalizací geometrie rotoru popřípadě geometrie statoru. Optimalizace by mohla spočívat například ve zvýšení počtu drážek statoru. Pro minimalizaci zvlnění točivého momentu je obvyklé zvýšení počtu rotorových bariér. Z výrobního hlediska tato možnost, pro dané rozměry, není uskutečnitelná.



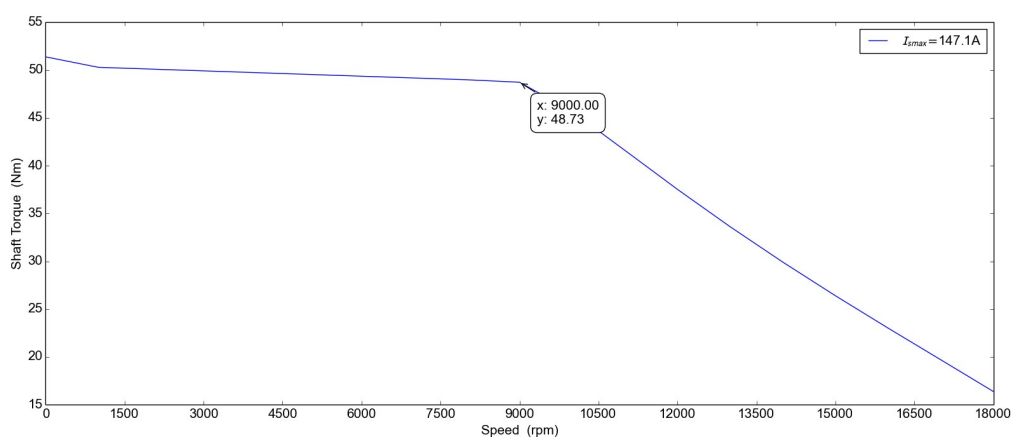
Obrázek 8.4: Indukované napětí při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min

Z průběhu indukovaných napětí v jednotlivých fázích stroje lze usoudit, že zvlnění dané geometrií statoru a rotoru je v únosných mezích. Průběh indukovaného napětí by bylo možné vyhladit změnou velikosti vzduchové mezery.



Obrázek 8.5: Magnetická indukce ve vzduchové mezeře, radiální(Br) a tangenciální(Bt) složka při momentu 51.18 Nm a otáčkách 9 000 ot/min

Zvlnění magnetické indukce ve vzduchové mezeře je poměrně výrazné a negativně ovlivňuje velikost ztrát v železe rotoru. Pro vyhlazení by bylo možné volit například větší množství statorových drážek.



Obrázek 8.6: Momentová charakteristika, řízení MTPA

Momentová charakteristika v rozsahu 0 - 9 000 ot/min mírně klesá z hodnoty 52 Nm na hodnotu 47.73 Nm. Ideálně by hodnota měla být konstantní. Pokles momentu v této oblasti může být zapříčiněn zvyšováním ztrát v závislosti na otáčkách stroje, respektive frekvence ve stroji. Točivý moment v oblasti konstantního výkonu lineárně klesá se zvyšujícími se otáčkami.

Ve studii [37] byl navržen a vyroben osmi pólový indukční motor se jmenovitým výkonem 55 kW (viz. položka 1). Tento indukční motor byl zvolen pro základní srovnání. Položka 2 představuje námi navržený PMa-SynRM.

	Měrná hustota výkonu [$\frac{\text{kW}}{\text{kg}}$]	Účinnost [-]	Zvlnění momentu [%]
1	1.55	91.75	2.43
2	1.88	94.36	14.94

Tabulka 8.4: Porovnání parametrů

Je zřejmé, že stroj, který byl navržen, by vyžadoval ještě další optimalizace zejména s ohledem na zvlnění momentu. Je třeba poznamenat, že do výpočtu výkonové hustoty byly zahrnuty pouze aktivní materiály. Jaké materiály jsou zahrnuty ve studii [37] není zcela jasné.

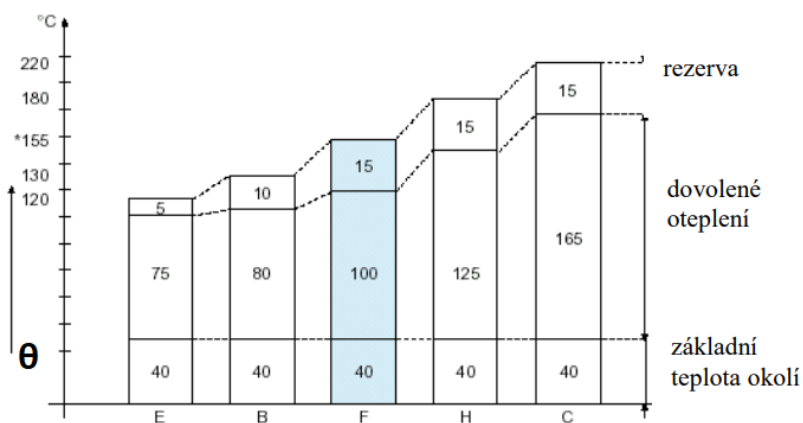
Kapitola 9

Tepelné zatěžování pohonu

V této kapitole je práce věnována tepelné analýze navrženého stroje. Analýza bude provedena v souladu se zadáním, tedy pro tepelnou třídu izolace H. Tepelné třídy oteplení točivých elektrických strojů jsou definované v normě ČSN 33 0050 [33].

Třída izolace	$\Delta\Theta_{dov}$ [°C]	Θ_{dov} [°C]	rezerva [°C]
A	60	100	15
E	75	115	15
B	80	120	15
F	100	140	15
H	125	165	15

Tabulka 9.1: Dovolené oteplení $\Delta\Theta_{dov}$ a maximální teploty Θ_{dov} pro jednotlivé třídy izolace, převzato [33]



Obrázek 9.1: Dovolené oteplení jednotlivých tříd izolace, převzato [33]

Analýza byla provedena pomocí softwaru ANSYS Motor-CAD, který je schopen po elektromagnetickém a termálním návrhu provést i tepelné simulace stroje.

Software ANSYS Motor-CAD je schopen provést tepelné výpočty dvěma způsoby. První metoda je analytický výpočet ekvivalentního tepelného obvodu. Druhý způsob je numerická metoda využívající metodu konečných prvků, tak zvaná výpočetní dynamika tekutin (CFD). Analytický výpočet je méně přesný a časově méně náročný. Zároveň je o mnoho jednodušší jeho nastavení, neboť metoda CFD vyžaduje rozsáhlé znalosti v oblasti dynamiky tekutin. V této práci je proveden tepelný výpočet metodou ekvivalentního tepelného obvodu.

Ekvivalentní tepelný obvod se skládá z následujících parametrů:

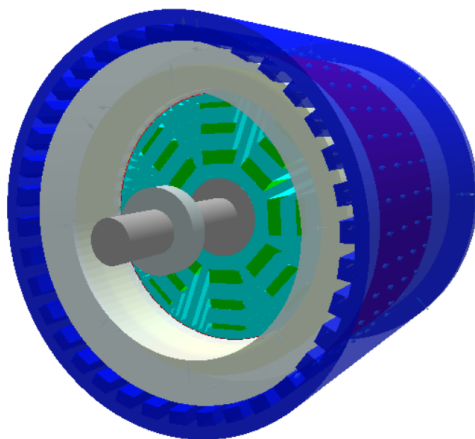
Symbol	Parametr	Jednotka
Φ_{th}	Tepelný tok	W
q_{th}	Hustota tepelného toku	W/m ²
Q_{th}	Teplo	J
T	Teplota	K
ΔT	Teplotní spád	K
λ	Tepelná vodivost na metr	W/m K
R_{th}	Tepelný odpor	K/W
G_{th}	Tepelná vodivost	W/K
C_{th}	Tepelná kapacita	J/K

Tabulka 9.2: Parametry ekvivalentního tepelného obvodu, převzato [2]

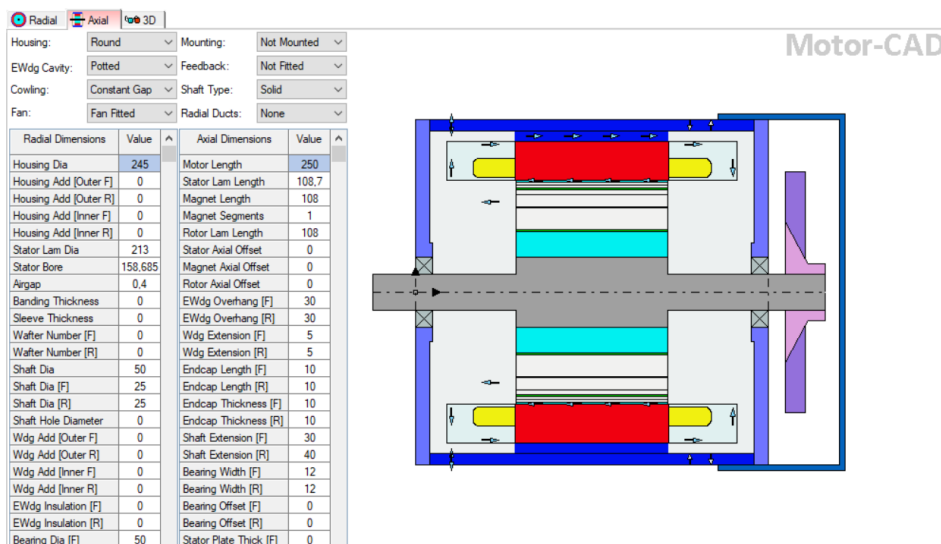
9.1 Kontrola oteplení aktivní části stroje

Tato práce se do detailu nezabývá termálním návrhem. Pro tento návrh bylo zvoleno nucené chlazení s externím ventilátorem. Výsledný návrh je zobrazen v příloze E.

Softwarové prostředí Motor-CAD nabízí i možnost zobrazení 3D modelu stroje. Při zobrazení ve 3D lze některé části stroje nastavit viditelné, méně viditelné či neviditelné. Na následujícím obrázku lze vidět průsvitný plášť, hřídel s ložisky a rotor. V plášti jsou vyobrazeny vyříznuté kanálky pro účely chlazení.



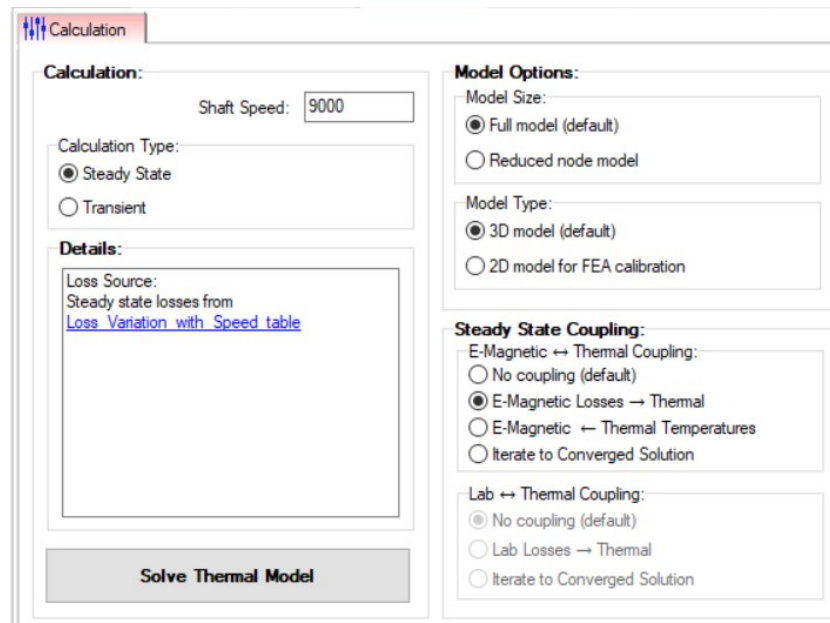
Obrázek 9.2: Geometrie stroje ve 3D



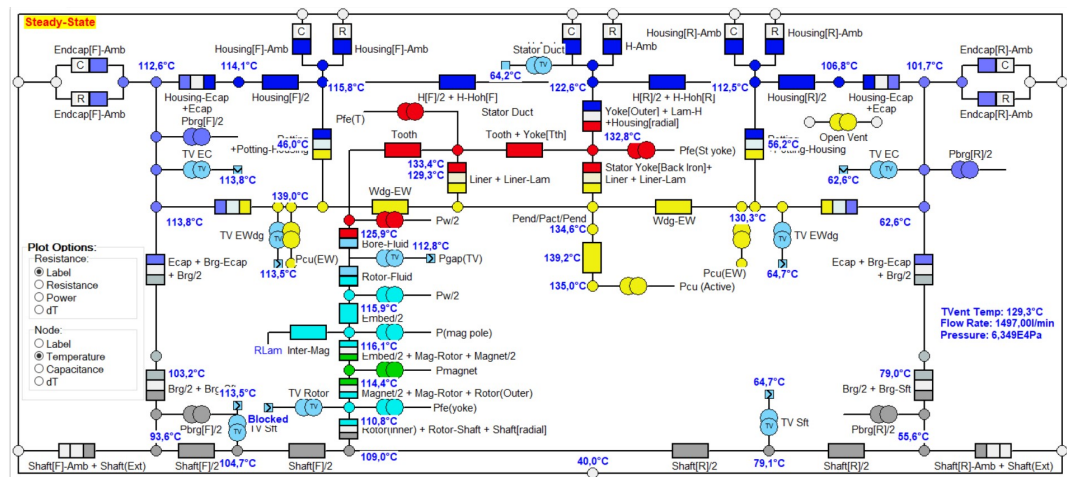
Obrázek 9.3: Geometrie stroje v axiálním řezu

Jako chladicí médium byl použit vzduch jehož parametry jsou definovány softwarovým prostředím ANSYS Motor-CAD (příloha E).

Náhradní tepelné schéma v pracovním režimu pro 9 000 ot/min. Ztráty, se kterými je vypočten ekvivalentní tepelný obvod jsou k zobrazení v příloze E.



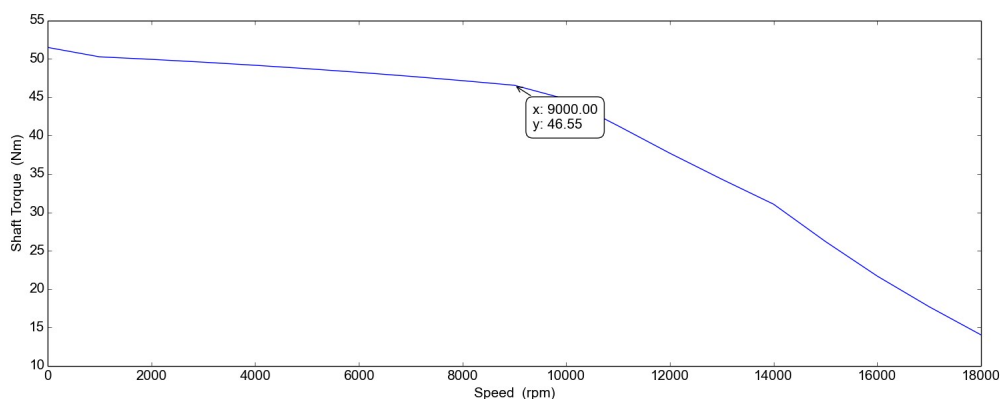
Obrázek 9.4: Nastavení výpočtu ekvivalentního tepelného obvodu



Obrázek 9.5: Ekvivalentní tepelný obvod

Náhradní tepelné schéma je základní zobrazení rozložení teploty ve stroji. Jedná o výpočet oteplení v ustáleném stavu, při trvalém zatěžování, kde již další nárůst teplot nenastává. Hlavní zdroje tepla jsou Joulové ztráty (ztráty ve vinutí), hysterézní ztráty a ztráty vířivé. Pro pracovní bod je maximální teplota rovna 139.2 °C ve vinutí stroje.

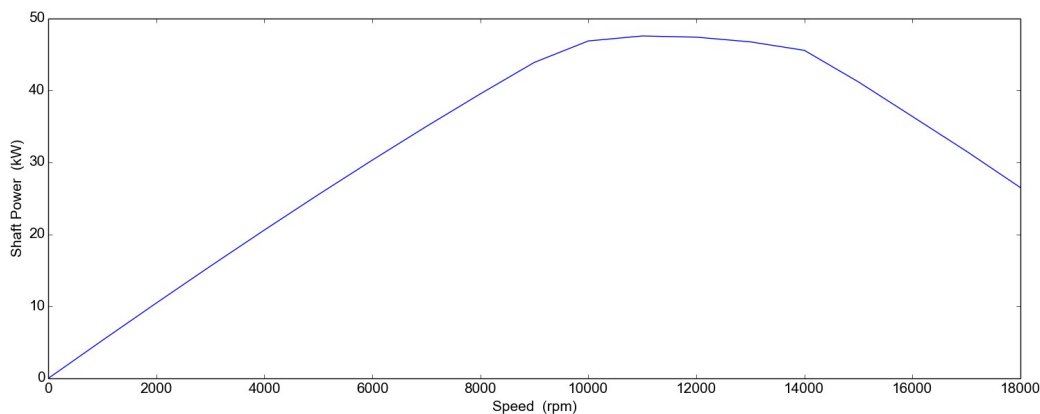
Při analýze má velký význam momentová a výkonová křivka stroje. Pomocí těchto dvou křivek, závislých na rychlosti otáčení stroje, lze posoudit vlastnosti trakčního pohonu. Při jejich výpočtu byly nastavené omezení maximální teploty na hodnoty uvedené v třídě izolace H.



Obrázek 9.6: Křivka momentu omezená teplotou vinutí a magnetů

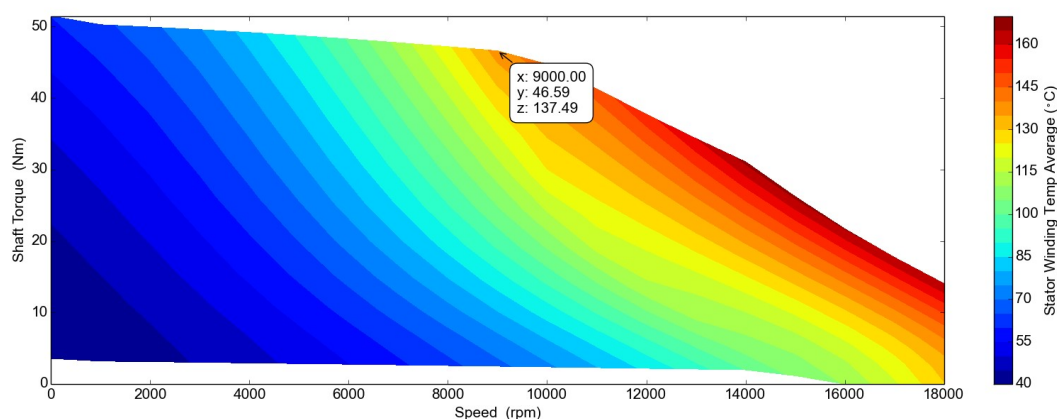
Z obr. 9.6 vyznačuje oblast konstantního momentu do rychlosti $\pm 9\,000$ ot/min. V oblasti konstantního výkonu klesá lineárně se zvyšující se rychlostí otáček. Lze si povšimnout, že točivý moment dosahuje při 9 000 ot/min menší hodnoty oproti momentové charakteristice uvedené na obr. 6.8. Toto snížení je způsobeno zvyšujícími se ztrátami v závislosti na otáčkách stroje.

Obr. 9.7 naznačuje omezení výkonu vzhledem k teplotám vinutí, magnetů. Křivka výkonu dosahuje maximální hodnoty 47 540 W při 11 000 ot/min. Je zřejmé, že při provozu stroje při 9 000 ot/min nenastanou komplikace přehřátí stroje.

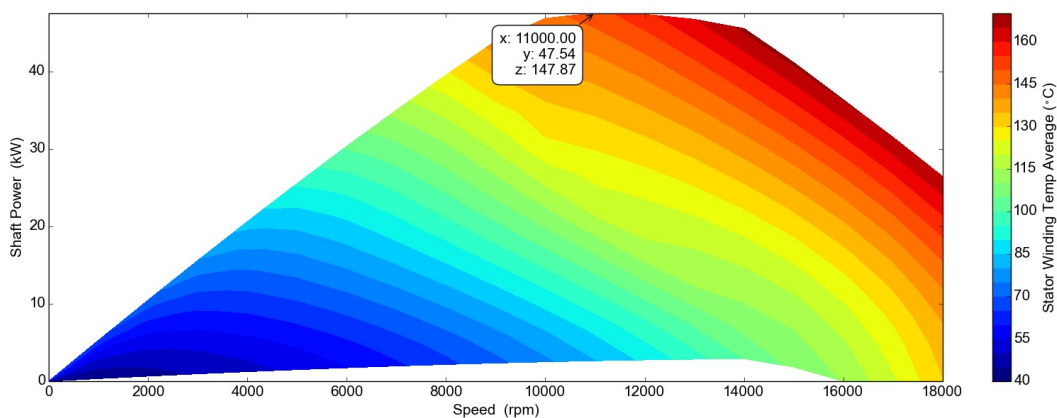


Obrázek 9.7: Křivka výkonu omezená teplotou vinutí a magnetů

Teplotní mapy na obrázcích 9.8, 9.9 jsou vyobrazeny pro maximální teplotu ve vinutí, kde je oteplení stroje při provozu nejvyšší. Z mapy lze vyčíst, že maximální teploty dosahuje vinutí při 14 000 ot/min, a to 166°C. Při rychlosti 9 000 ot/min dosahuje přibližně 138°C. Teplotní mapy jsou ohraničeny horními křivkami. Provoz stroje pod těmito křivkami je možný, neboť teplota na hraničních křivkách grafů dosahuje maximálních hodnot. Z teplotních map lze odhadnout ustálenou teplotu stroje při daných otáčkách a daném výkonu.



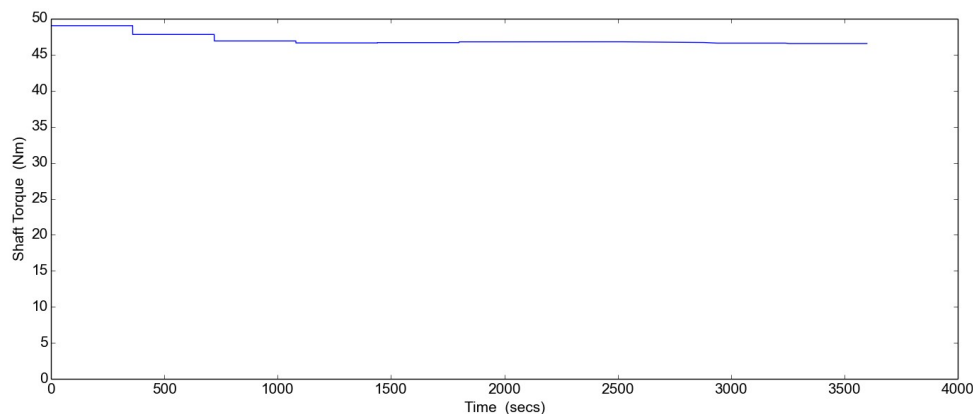
Obrázek 9.8: Mapa maximální teploty statorového vinutí momentové křivky



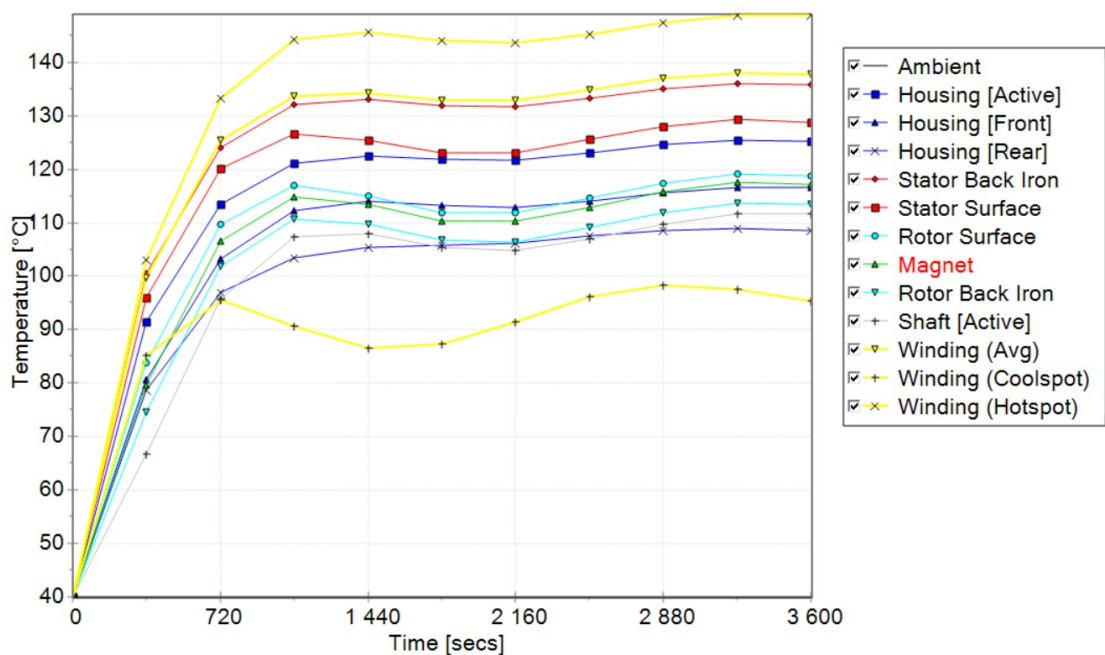
Obrázek 9.9: Mapa maximální teploty statorového vinutí výkonové křivky

V případech, jako je zvýšení teploty okolí, změny nadmořské výšky, nebo při přetěžování motoru, může dojít k překročení maximální teploty určené teplotní mapou.

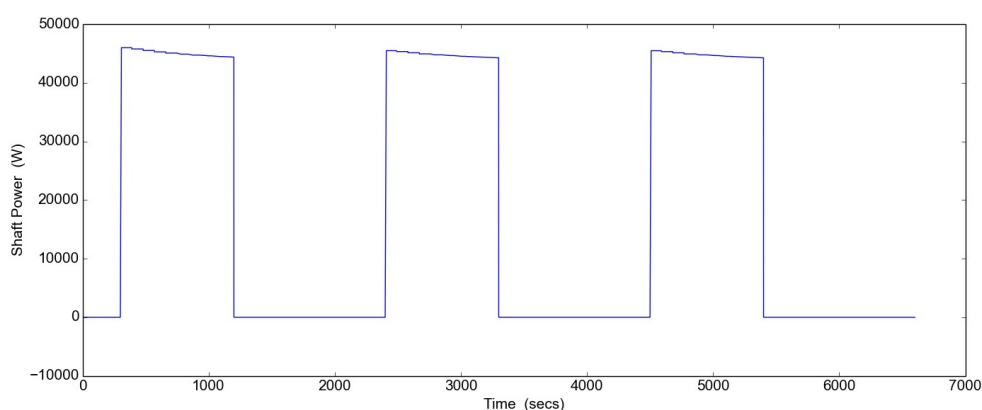
Obrázky 9.10 a 9.11 zobrazují simulace tepelného zatěžování při trvalém, respektive přerušovaném zatížení (obr. 9.12 a 9.13). Jednotlivé druhy zatěžování jsou definovány v mezinárodní klasifikaci dle ČSN EN 60034-1 [35].



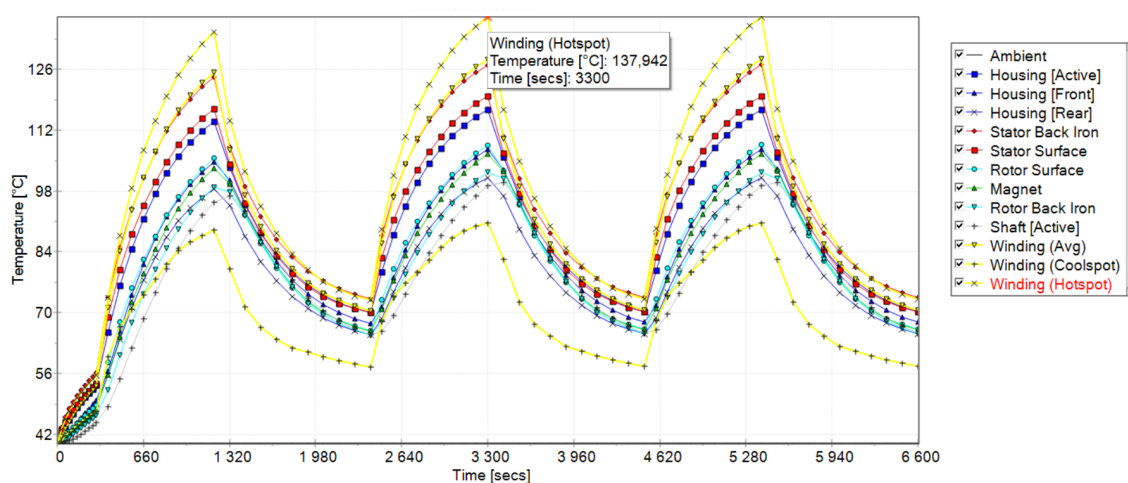
Obrázek 9.10: Trvalé zatížení: křivka momentu



Obrázek 9.11: Trvalé zatížení: průběh teplot



Obrázek 9.12: Přerušované zatížení: křivka výkonu



Obrázek 9.13: Přerušované zatížení: průběh teplot

Maximální teploty při provozu nepřesahují maximální dovolené oteplení třídy H. V grafu je zobrazena špičková teplota jednoho cyklu. Pro více cyklů se teplota zvyšuje o maximálně několik jednotek stupňů.

Nejvíce kritickým místem je statorové vinutí dosahující teploty přibližně 138°C při přerušovaném zatěžování a přibližně 149°C při trvalém zatěžování. Na povrchu statoru se rovněž projevuje zvýšení oteplení dané povrchovými pulzačními ztrátami.

Definice konstantního a přerušovaného zatěžování je zobrazena v příloze E (E.7, E.8).

Kapitola 10

Závěr

V první části bakalářské práce byla popsána historie elektromobility spolu s rostoucím trendem prodeje elektromobilů. Bylo představeno základní rozdělení elektrických vozidel, načež v kapitole 4 jsou uvedeny typy elektrických vozidel a základní poznatky tvoření točivého momentu v elektrickém stroji. V podkapitole 4.2 byl vysvětlen princip synchronního reluktančního motoru s permanentními magnety, jeho možné konstrukční řešení a charakteristické rysy.

Aktuální trendy v oblasti lehkých elektrických vozidel jsou uvedeny v 5. kapitole. V této kapitole byla vypracována rešerše elektrických pohonů a jejich chladících systémů. Aktuálně se vyrábí stále menší ale výkonnější motory, a to má za následek nutné zvýšení efektivity chladících systémů.

Druhá část práce se zabývá návrhem trakčního pohonu. Dle rešerší byl zvolen synchronní reluktanční motor s permanentními magnety jako perspektivní typ pohonu. Důvody tohoto výběru jsou popsány v 6. kapitole. Parametry pro návrh jsou uvedeny v tabulce 6.1.

Postup návrhu synchronního reluktančního stroje byl vypracován v kapitole 7. Dle tohoto postupu byl navrhnut motor v softwarovém prostředí ANSYS Motor-CAD a v závěru kapitoly jsou vyobrazeny jeho parametry.

Kapitola 8 byla věnována elektromagnetickému návrhu stroje a jeho výpočtům. V průběhu kapitoly byly uvedeny a rozebrány výsledky elektromagnetického návrhu stroje, spolu s možnými konstrukčními vylepšeními.

V podkapitole 9.1 bylo představeno nucené chlazení ventilátorem pro navržený stroj. Podkapitola 9.2 se zabývá kontrolou oteplení aktivní části stroje, jejíž cílem bylo ověřit, zda-li je navržený stroj schopen splnit třídu izolace H při trvalém a přerušovaném provozu, při jmenovitém výkonu 50 kW. Tento cíl byl splněn vykreslením výkonové a momentové křivky společně s termální mapou udávající maximální teplotu vinutí 149°C. Dalším ověřením byl výpočet třídy zatěžování pro trvalý a přerušovaný provoz. Pro tyto cykly teplota stroje nepřesáhne dovolené oteplení třídy izolace H.

Výsledky uvedené v kapitolách 8 a 9 značí splnění požadavků navrženého stroje dle zadaných parametrů a omezení (viz. tabulka 6.1).

Při pokračování v návrhu představeného stroje doporučuji optimalizovat návrh. Optimalizace se týká především rotoru s cílem minimalizovat zvlnění točivého momentu. Pokud by byla potřeba zvýšit účinnost stroje, doporučuji nahradit statorový plech M350-50A za plech s užší hysterezní křivkou. Chlazení stroje je možné zefektivnit výměnou ventilátoru za ventilátor s vyšším výkonem, nebo za ventilátor s externím řízením, který odvádí teplo z aktivní části stroje nezávisle na jeho otáčkách. Další vylepšení chladicího okruhu by mohlo být provedeno výměnou chlazení vzduchem za vodní chlazení.

Hlavním cílem práce bylo seznámení se se softwarovým prostředím ANSYS Motor-CAD a použití ho pro elektromagnetický návrh elektrického trakčního stroje a jeho tepelného zatěžování. Softwarové prostředí Motor-CAD je silným nástrojem při návrhu elektrických strojů, zejména při dimenzování tepelného návrhu. Program umožňuje provádět rychlou optimalizaci stroje pro tepelné výpočty s různými systémy chlazení. Software dále umožňuje ověřit správnost dimenzovaného stroje a ověřit vlastnosti pomocí výpočtu jednotlivých zatěžovacích cyklů dle vlastní definice, nebo provést simulaci dle mezinárodních jízdních cyklů (například podle WLTP).



Literatura

- [1] Husain, I. Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals, 2nd ed.; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, 2011.
- [2] AGAMLOH, Emmanuel, Annette VON JOUANNE a Alexandre YOKOCHI. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. *Machines* [online]. 2020, 8(2) [cit. 2022-02-20]. ISSN 2075-1702. Dostupné z: doi:10.3390/machines8020020
- [3] EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database. EV-Volumes - The Electric Vehicle World Sales Database [online]. Dostupné z: <https://www.ev-volumes.com>
- [4] GÖKOZAN, Hayrettin. Elektrikli Araçlarda Kullanılan Motorlar ve Motor Sürücüleri. *European Journal of Science and Technology* [online]. 105-111 [cit. 2022-02-20]. ISSN 2148-2683. Dostupné z: doi:10.31590/ejosat.699699
- [5] Elektromobil info: Všetko čo potrebujete vedieť o elektromobiloch. *MojElektromobil.sk*: Internetový magazín o elektromobiloch [online]. Copyright © 2010 [cit. 21.02.2022]. Dostupné z: <https://www.mojelektromobil.sk/elektromobil/>
- [6] Historia elektromobilov | Eco Auto | 1. showroom elektromobility. *Eco Auto | Slovensko | 1. showroom elektromobility* [online]. Copyright © 2017 [cit. 21.02.2022]. Dostupné z: <https://www.ecoauto.sk/historia-elektromobil>
- [7] General Motors EV1 US car sales figures. *CarSalesBase - Global Automotive Sales Data* [online]. Copyright © All Rights Reserved [cit. 21.02.2022]. Dostupné z: <https://carsalesbase.com/us-general-motors-ev1/>
- [8] TRIFA, V. a C. MARGINEAN. Preliminary Design of Reluctance Motors for Light Electric Vehicles Driving. *Advances in Electrical and Computer Engineering* [online]. 2009, 9(1), 78-81 [cit. 2022-02-23]. ISSN 1582-7445. Dostupné z: doi:10.4316/aece.2009.01015

- [9] EWERT, Amelie, Mascha BROST, Christine EISENMANN a Sylvia STIELER. Small and Light Electric Vehicles: An Analysis of Feasible Transport Impacts and Opportunities for Improved Urban Land Use. Sustainability [online]. 2020, 12(19) [cit. 2022-02-23]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: doi:10.3390/su12198098
- [10] Krishnan, Vijayakumar & Kr, Vijayakumar & Rajaram, Karthikeyan & Ambrose, J & Basanth, Joseph & Selvam, Kannan. (2020). Annual Technical Volume. Journal of the Institution of Engineers (India): Electrical Engineering Division. 4. 23-28.
- [11] DE SANTIAGO, J., H. BERNHOFF, B. EKERGÅRD, S. ERIKSSON, S. FERHATOVIC, R. WATERS a M. LEIJON. Electrical Motor Drivelines in Commercial All-Electric Vehicles: A Review. IEEE Transactions on Vehicular Technology [online]. 2012, 61(2), 475-484 [cit. 2022-02-28]. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2011.2177873
- [12] Cheng, K.W.E.. (2009). Recent development on electric vehicles. 2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, PESA 2009. 1 - 5.
- [13] Trifa, V. & Calin, Marginean. (2009). Preliminary Design of Reluctance Motors for Light Electric Vehicles Driving. Advances in Electrical and Computer Engineering. 9. 10.4316/aeece.2009.01015.
- [14] WU, Zhongming, Mufangzhou ZHU, Yu GUO, Li SUN, Yuchen GU a Deepak GUPTA. Drive System Design for Small Autonomous Electric Vehicle: Topology Optimization and Simulation. Wireless Communications and Mobile Computing [online]. 2021, 2021, 1-12 [cit. 2022-02-28]. ISSN 1530-8677. Dostupné z: doi:10.1155/2021/7192484
- [15] HUGHES, Austin. Electric Motors and Drives Fundamentals: Types and Applications. 3rd Edition. Great Britain: Elsevier, 2006. ISBN 978-0-08-102615-1.
- [16] EHSANI, Mehrdad, Yimin GAO, Sebastien E. GAY a Ali EMADI. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles [online]. CRC Press, 2004 [cit. 2022-02-28]. ISBN 9780429128196. Dostupné z: doi:10.1201/9781420037739
- [17] Motors & Drives, A Practical Technology Guide [online]. Dostupné z: <https://www.globalspec.com/reference/10791/179909/chapter-3-ac-and-dc-motors-ac-motors-ac-induction-motor>
- [18] AN885, Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals [online]. Dostupný z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [19] Maxon Motor USA. Human like bipedal walking robot [online]. Dostupné z: <https://maxonmotorusa.wordpress.com/tag/right-angle-gear2/>

- [20] ELUC [online]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/776>
- [21] STÝSKALA, Vítězslav. Indukční stroje [online]. [cit.2014-7-18]. Dostupný na: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/sylab_As-Motory%20nazorne%206_2.pdf
- [22] Ondřej Černý, Radovan Doleček, Jaroslav Novák, Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel [online]. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/195384/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>
- [23] Bc. Jan Pavluk, Aplikace vývojového prostředí Ansys pro návrh reluktančního synchronního motoru 15 kW [online]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/68480/F3-DP-2017-Pavluk-Jan-Aplikace_vyvojoveho_prostredi_Ansys_pro_navrh_reluktančního_synchronního_motoru15kW.pdf
- [24] López Torres, C. "Analysis and implementation of a methodology for optimal PMa-SynRM design taking into account performances and reliability". Tesi doctoral, UPC, Departament d'Enginyeria Elèctrica, 2018. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/2117/121037>
- [25] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. 2nd. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 1118581571;9781118581575
- [26] I.P. Kopylov, Stavba elektrických strojů, 1.vydání Praha: Státní nakladatelství technické literatury; Moskva, Mir, 1988
- [27] Reza Rajabi Moghaddam, Synchronous Reluctance Machine (SynRM) Design [online]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:753114/FULLTEXT01.pdf>
- [28] OZDIL, Ali a Yunus UZUN. Design and Analysis of a Rotor for a 22 kW Transversally Laminated Anisotropic Synchronous Reluctance Motor. Elektronika ir Elektrotechnika [online]. 2021, 27(6), 17-24 [cit. 2022-03-20]. ISSN 2029-5731. Dostupné z: doi:10.5755/j02.eie.29046
- [29] Understanding the Tesla Model S Performance Motor - YouTube. YouTube [online]. Copyright © 2022 Google LLC [cit. 26.03.2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=M QV3D8F6gvw>
- [30] Agamloh E, von Jouanne A, Yokochi A. An Overview of Electric Machine Trends in Modern Electric Vehicles. Machines. 2020; 8(2):20. <https://doi.org/10.3390/machines8020020>
- [31] Model Y E16: Electric Motor Comparison MY-M3, Industry review of Electric Motors, Table for Sale! - YouTube. YouTube [online]. Copyright © 2022 Google LLC [cit. 26.03.2022]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=V72cmDjuKHA&t=542s>

- [32] Gronwald P-O, Kern TA. Experimental Validation and Parameter Study of a 2D Geometry-Based, Flexible Designed Thermal Motor Model for Different Cooled Traction Motor Drives. *World Electric Vehicle Journal*. 2021; 12(2):76. <https://doi.org/10.3390/wevj12020076>
- [33] Gai, Yaohui, Mohammad Kimiabeigi, Yew Chuan Chong, James D. Widmer, Xu Deng, Mircea Popescu, James E. Goss, David Alan Staton and Andrew Steven. “Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods.” *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 66 (2019): 1681-1692.
- [34] Ing. Tomáš Mlčák, Ph.D.Doc. Ing. Václav Vrána, CSc., ELEKTRICKÉ STROJE – ÚVOD [online]. Dostupné z: https://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FMMI/Prednasky/8_ES_uvod_sylab_BC_06.pdf
- [35] Vítězslav Stýskala, Druhy zatížení elektrických motorů [online]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/Bakalarske_FS/prednasky/Druhy_zatizeni.pdf
- [36] Flux Conference High Efficiency Motor Design for Electric Vehicles - PDF Free Download. Enjoy free comfortable tools to publish, exchange, and share any kind of documents online! [online]. Copyright © DocPlayer.net [cit. 03.05.2022]. Dostupné z: <https://docplayer.net/17111886-Flux-conference-2012-high-efficiency-motor-design-for-electric-vehicles.html>
- [37] Galioto, Steven J. and Francis Johnson. “Alternative High-Performance Motors with Non-Rare Earth Materials, Final Publishable Report.” (2017).
- [38] Dacia Spring výbava a cena | fDrive.cz. fDrive.cz – Elektromobily, autonomní řízení a doprava budoucnosti [online]. Dostupné z: <https://fdrive.cz/katalog/dacia-spring>
- [39] PETROV, Georgij Nikolajevič. Elektrické stroje. Přeložil Břetislav BENDA. Praha: Academia, 1980.
- [40] Valéria Hrabovcová, Ladislav Janoušek, Pavol Rafajdus, Miroslav Ličko: Moderné elektrické stroje. EDIS, Žilina, 2001. ISBN 80-7100-809-5

Příloha A

Seznam symbolů a zkratk

DC	Stejnoseměrný proud	[-]
IM	Indukční motor	[-]
PMSM	Synchronní motor s permanentními magnety	[-]
SynRM	Synchronní reluktanční motor	[-]
EMF	Elektromotorické napětí	[-]
IPM	Motor s vnitřními permanentními magnety	[-]
PMa-SynRM	Synchronní reluktanční motor s permanentními magnety	[-]
IPMSM	Synchronní motor s vnitřními permanentními magnety	[-]
SPMSM	Synchronní motor se vnějšími permanentními magnety	[-]
WLTP	Mezinárodní jízdní cyklus	[-]
T	Točivý moment	[Nm]
I_q	Proud v ose q	[A]
I_d	Proud v ose d	[A]
L_d	Indukčnost v ose d	[H]
L_q	Indukčnost v ose q	[H]
P_n	Jmenovitý výkon	[W]
n	Otáčky	[rpm]
m	Počet fází	[-]
U_n	Jmenovité napětí	[V]
p	Počet pólů	[-]
D	Vnitřní průměr statoru	[m]
D_e	Vnější průměr statoru	[m]
l_i	Ideální délka vzduchové mezery	[m]
ω_s	Synchronní úhlová rychlost	[rad·s ⁻¹]
P_i	Vnitřní výkon	[W]
α_δ	Činitel pólového krytí	[-]
k_B	Činitel tvaru pole	[-]
k_w	Činitel vinutí	[-]
A	Lineární proudová hustota	[A·m ⁻¹]
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	[T]
f	Frekvence	[Hz]
t_p	Pólová rozteč	[m]
Q	Počet drážek	[-]

V_d	Počet efektivních vodičů	[-]
I_n	Jmenovitý proud vinutí statoru	[A]
K_e	Poměr indukovaného k jmenovitému napětí statoru	[-]
η	Účinnost	[-]
$\cos(\phi)$	Účinník	[-]
λ	Štíhlostní poměr	[-]
q	Počet drážek na pól a fázi	[-]
V_d	Počet vodičů v drážce	[-]
N	Počet závitů ve fázi	[-]
Φ	Magnetický tok	[Wb]
h_j	Výška j ha statoru	[m]
b_z	Šířka zubů statoru	[m]
h_d	Hloubka drážky	[m]
b_d	Šířka drážky	[m]
δ	Velikost vzduchové mezery	[m]
k	Počet vzduchových bariér	[-]
S	Šířka segmentu	[m]
F_{mk}	Magnetomotorické napětí	[A]
W	Šířka vzduchových bariér	[m]
S_o	Šířka otevření drážky	[m]
T_{av}	Průměrná hodnota momentu	[Nm]
T_h	Průměr na hřídeli	[m]
T_{ripple}	Zvlnění momentu	[Nm]
$T_{ripple\%}$	Zvlnění momentu v procentech	[%]
P_{in}	Příkon	[W]
P	Výkon	[W]
ΔP_{tot}	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{S-Fe}	Ztráty ve statorovém železe	[W]
ΔP_{R-Fe}	Ztráty v rotorovém železe	[W]
ΔP_{PM}	Ztráty v permanentních magnetech	[W]
ΔP_{Cu-DC}	Ztráty ve statorovém vinutí DC	[W]
ΔP_{Cu-AC}	Ztráty ve statorovém vinutí AC	[W]
R_f	Odpor fáze vinutí	[Ω]
L_d	Indukčnost v ose d	80.48 [H]
L_q	Indukčnost v ose q	460.8 [H]
L_σ	Rozptylová indukčnost	18.79 [H]
X_d	Reaktance v ose d	0.303 [Ω]
X_q	Reaktance v ose q	1.737 [Ω]
Φ_{th}	Tepelný tok	[W]
q_{th}	Hustota tepelného toku	[W/m ²]
Q_{th}	Teplo	[J]
T	Teplota	[K]
ΔT	Teplotní spád	[K]
λ	Tepelná vodivost na metr	[W/m K]
R_{th}	Tepelný odpor	[K/W]
G_{th}	Tepelná vodivost	[W/K]
C_{th}	Tepelná kapacita	[J/K]

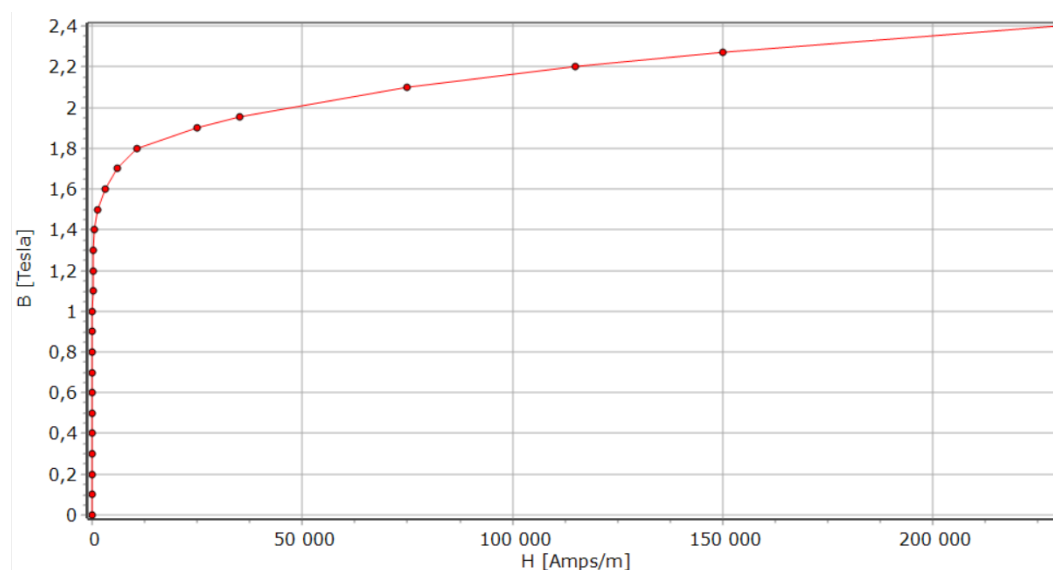
Příloha B

Materiálové vlastnosti M350-50A a měď

Uvedené hodnoty jsou převzaty z materiálové databáze ANSYS Motor-CAD.

Tepelná vodivost [W/m/°C]	401
Měrné teplo [J/kg/°C]	833
Hustota [kg/m ³]	8933
Rezistivita [Ωm]	$1.724 \cdot 10^{-8}$
Teplotní koeficient rezistivity	0.003862

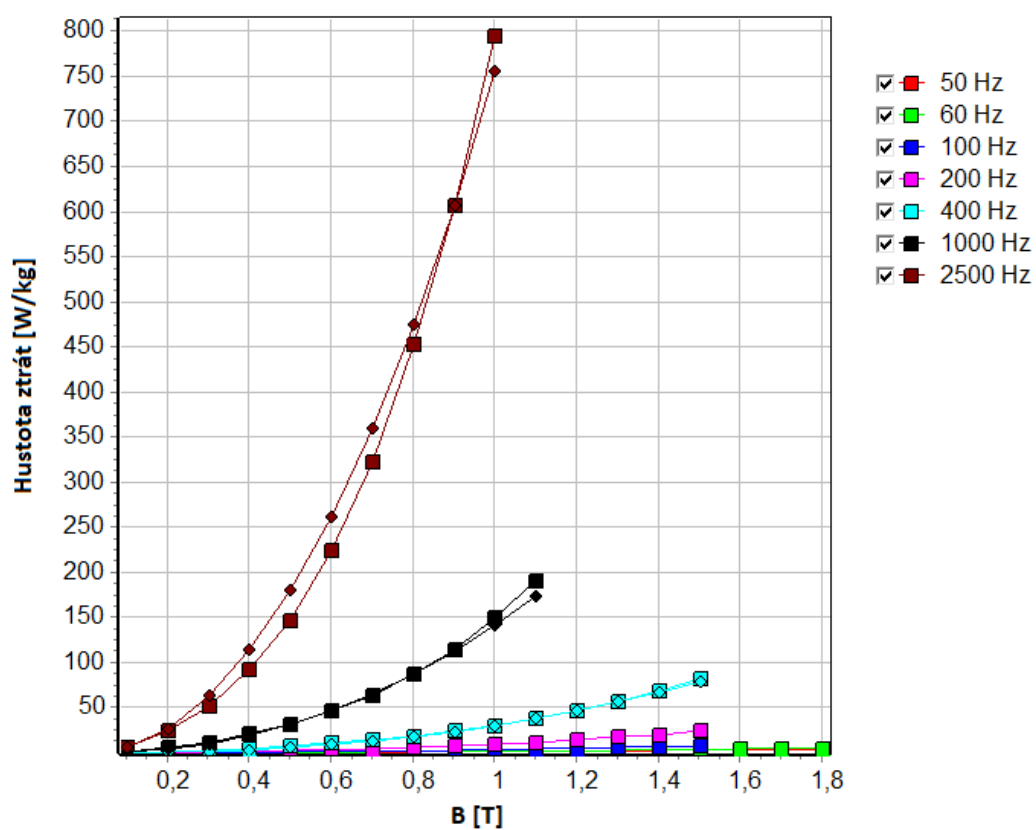
Tabulka B.1: Vlastnosti mědi



Obrázek B.1: BH charakteristika M350-50A

Tepelná vodivost [W/m/°]	Šířka plechu [mm]	Hustota [kg/m ³]	Rezistivita [Ω m]
168	0.5	7650	$4.4 \cdot 10^{-7}$

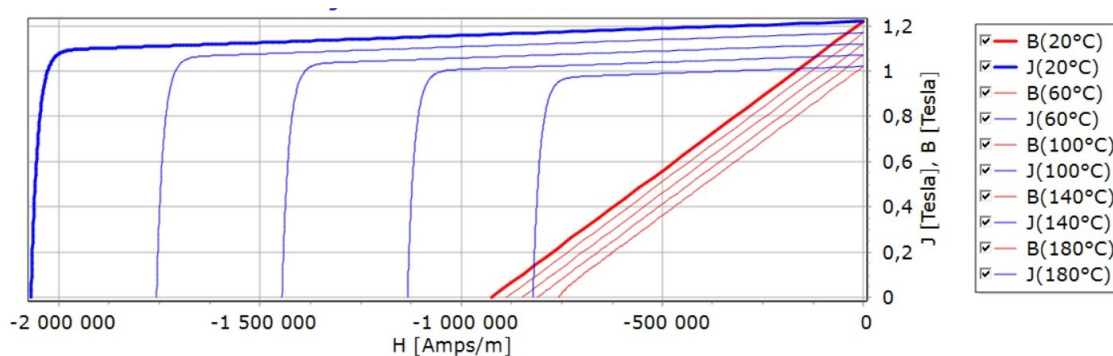
Tabulka B.2: Další vlastnosti materiálu M350-50A



Obrázek B.2: Hustota ztrát M350-50A v závislosti na magnetické indukci a frekvenci

Příloha C

Materiálové vlastnosti Vacodym 974AP



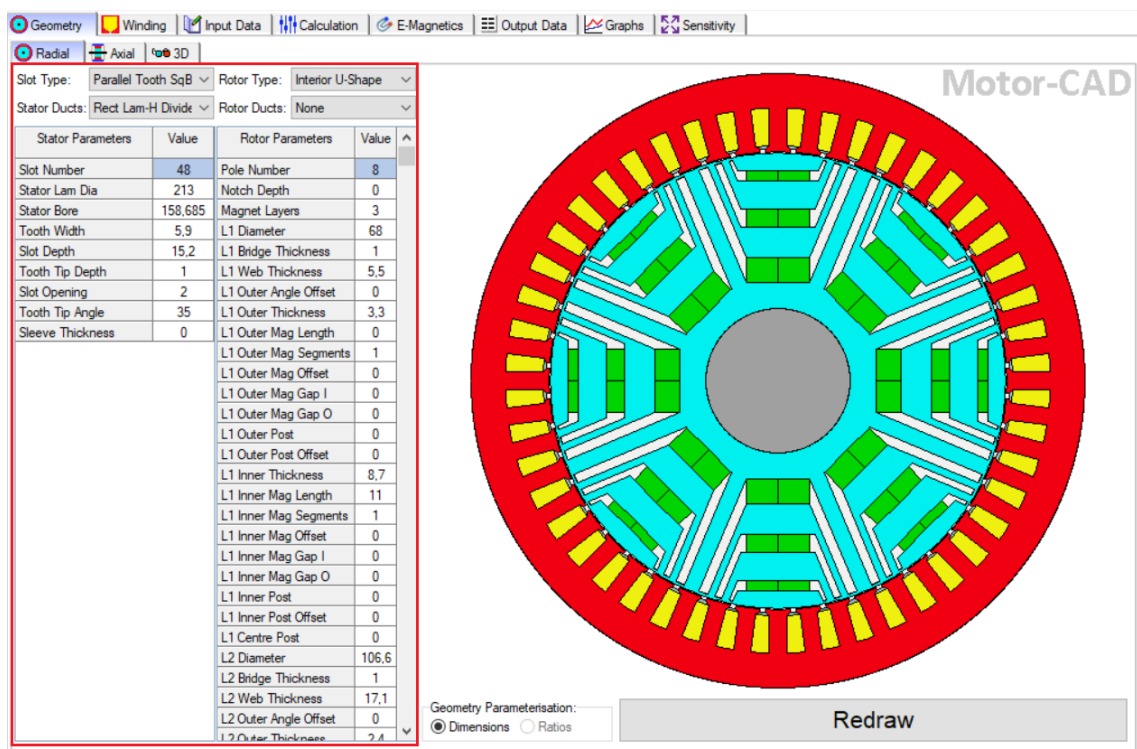
Obrázek C.1: BH charakteristika Vacodym 974AP

B_r [T]	1.22
H_{cB} [kAm]	925
BH_{max} [kJ/m ³]	280
Teplotní koeficient B_r [%/°C]	-0.102
Teplotní koeficient H_{cJ} [%/°C]	-0.377
Hustota [kg/m ³]	7700
T_{max} [°C]	210
Rezistivita [Ω m]	$1.5 \cdot 10^{-6}$

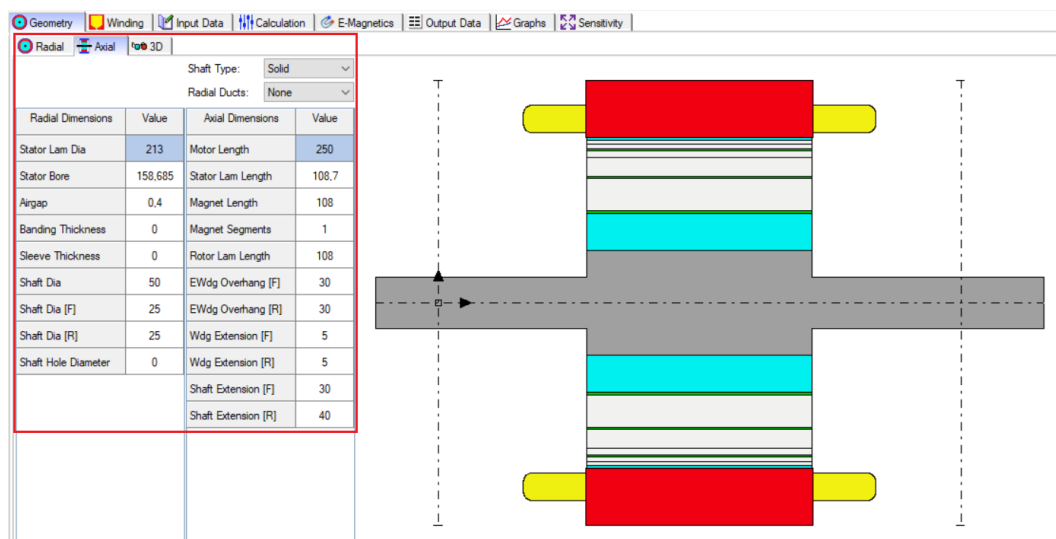
Tabulka C.1: Další vlastnosti materiálu Vacodym 974AP

Příloha D

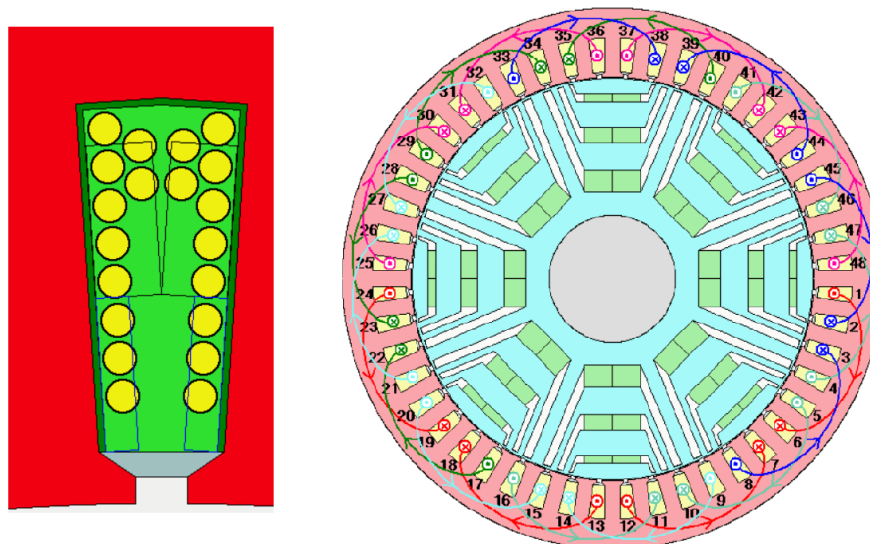
Elektromagnetický návrh



Obrázek D.1: Geometrie stroje v radiálním řezu



Obrázek D.2: Geometrie stroje v axiálním řezu



Obrázek D.3: Detail rozložení vinutí (vlevo), schéma vinutí (vpravo)

Component	Material from Database	Electrical Resistivity	Temp Coef Electrical Resistivity	Magnet Br at 20°C	Magnet Relative Permeability	Temp Coef Br	Density	Weight
Units		Ohm.m		Tesla		%/°C	kg/m ³	kg
Stator Lam (Back Iron)	M350-50A	4,4E-07	0				7650	6.092
Stator Lam (Tooth)	M350-50A	4,4E-07	0				7650	3.604
Stator Lamination [Total]								9.696
Armature Winding [Active]	Copper (Pure)	1,724E-08	0,003862				8933	1,144
Armature EWdg [Front]	Copper (Pure)	1,724E-08	0,003862				8933	0,5276
Armature EWdg [Rear]	Copper (Pure)	1,724E-08	0,003862				8933	0,5276
Armature Winding [Total]								2,199
Slot Wedge		0	0				1000	0,0169
Rotor Lam (Back Iron)	M350-50A	4,4E-07	0				7650	1,496
Rotor Lam (IPM Magnet Pole)	M350-50A	4,4E-07	0				7650	6,102
Rotor Lam (Inter Magnet Gap)	M350-50A	4,4E-07	0				7650	1,313
Rotor Lamination [Total]								8,912
Magnet	VACODYM 974 AP	1,5E-06	0	1,22	1,05	-0,102	7600	2,644
Shaft [Active]		0	0				7800	1,665
Shaft [Front]	M350-50A	4,4E-07	0				7650	0,3793
Shaft [Rear]		0	0				7800	0,425
Shaft [Total]								2,469
Fan		0	0				7800	0,7694
Total								25,94

Obrázek D.4: Volba materiálů

Geometry Winding Input Data Calculation E-Magnetics Output Data Graphs Sensitivity

Materials Settings Material database

E-Magnetics Calculation Graphs Losses

Magnetics settings:

Cores:

Rotor Iron:

Laminated (default)

Solid

Non Magnetic

Lamination Stacking Factor [Rotor]: 0,97

Stator Iron:

Laminated (default)

Solid

Non Magnetic

Lamination Stacking Factor [Stator]: 0,97

Stacking factor calculation:

Ignore Stacking Factor

Stacking Factor (axial length)

Stacking Factor (saturation)(default)

Demagnetisation Curve Method:

Linear

Non-linear (default)

Manufacturing Factors:

Armature EWdg length multiplier: 1

EWdg Inductance multiplier: 1

Magnet Br multiplier: 1

Length Adjustment Factors:

Stator saturation multiplier: 1

Rotor saturation multiplier: 1

Magnetic axial length multiplier: 1

Eccentricity:

Eccentricity Type:

None (default)

Static

Dynamic

Static + Dynamic

Shaft Centre Offset:

Distance: 0

Angle: 0

Rotor Centre Offset:

Distance: 0

Angle: 0

End Winding Inductance Calculation:

Rosa and Grover (default)

Hanselman

Sine Drive Modulation:

Circle tracking (default)

Six Step 180

Hexagon tracking - piecewise linear

Hexagon tracking - secant

Sixstep 120

Maximum linear range of sine/triangle

Sine/triangle with 3rd harmonic injection

External Line Resistance:

Definition:

Resistance (default)

Dimensions

Resistance: 0

Area: 1 Length: 100

Phasor Diagram Options:

Input Filter Circuit:

None (default)

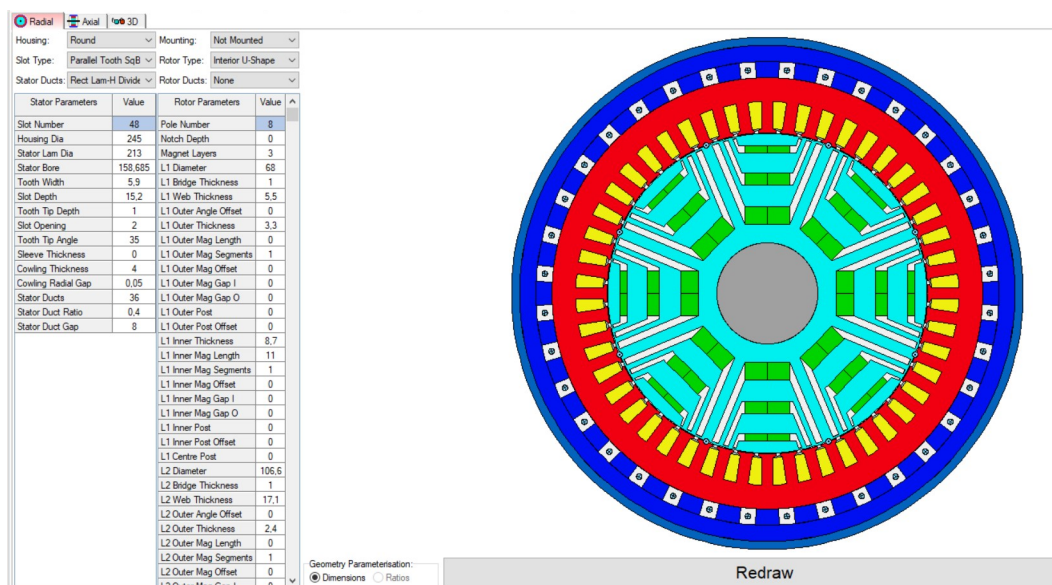
LC Sine Filter

Inductance: 0 Capacitance: 0

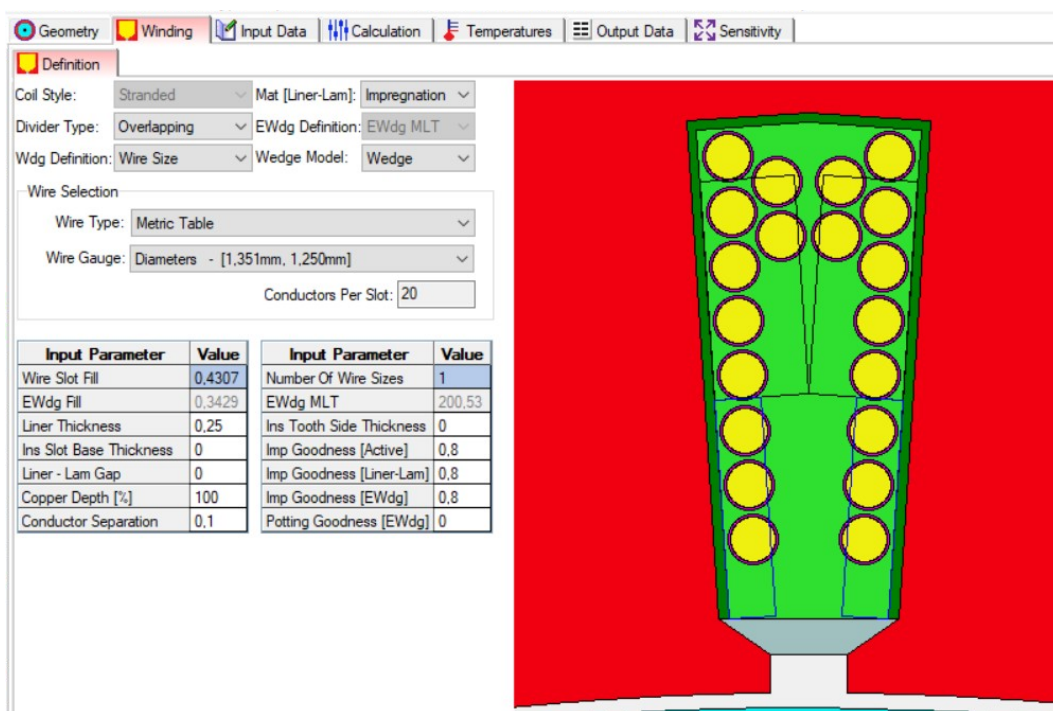
Obrázek D.5: Nastavení elektromagnetického výpočtu

Příloha E

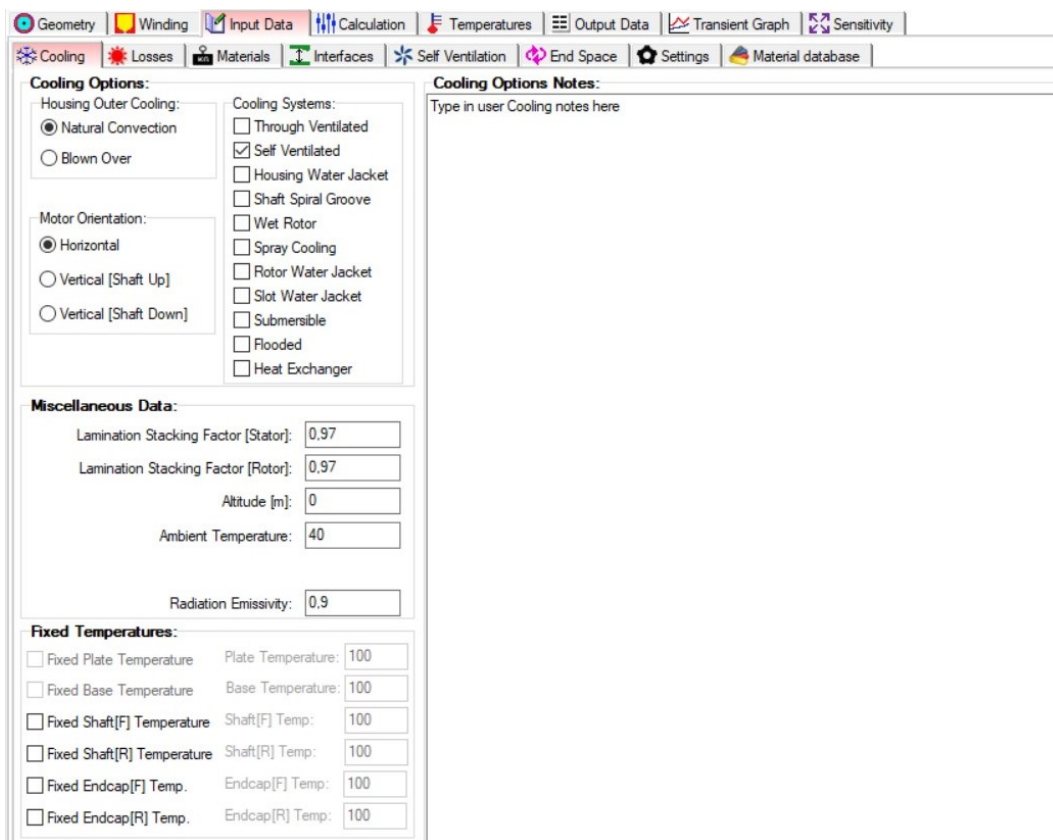
Termální návrh



Obrázek E.1: Geometrie stroje v radiálním řezu



Obrázek E.2: Definice vinutí stroje



Obrázek E.3: Definice chlazení

Loss Variation with Speed:

$P[\text{speed}] = P[\text{input}] \times \left[\frac{\text{Shaft Speed}}{\text{Speed}[\text{REF}]} \right]^{\text{coef}[\text{A}]}$

Speed Dependent Losses
 Single value of Speed[REF] [rpm]

Shaft Speed:

Component	P[Input]	Speed[REF]	coef[A]	W/kg	P[speed]
Units	Watts	rpm		W/kg	Watts
Loss [Armature Copper]	328,5	9000	0	149,4	328,5
Loss [Armature Copper Freq Com]	49,92	9000	2	22,7	49,92
Loss [Stator Back Iron]	1248	9000	1,5	204,8	1248
Loss [Stator Tooth]	793,4	9000	1,5	220,1	793,4
Loss [Magnet]	5,548	9000	0	2,099	5,548
Loss [Embedded Magnet Pole]	334	9000	0	54,74	334
Loss [Rotor Back Iron]	3,701	9000	0	2,474	3,701
Loss [Friction - F Bearing]	0	9000	1	0	0
Loss [Friction - R Bearing]	0	9000	1	0	0
Loss [Windage]	0	9000	3	0	0
Loss [Windage] (Ext Fan)	0	3000	3	0	0

Obrázek E.4: Definice ztrát použitých pro výpočet oteplení

Flow Options

Ventilation Fluid Data:

Air (Motor-CAD model)

Thermal Conductivity:

Density:

Cp:

Kinematic Viscosity:

Dynamic Viscosity:

Pr - Prandtl Number:

Flow Definition:

Fan Definition:

Constant Flow Rate
 Constant Flow Rate from Fan Characteristic
 Flow Rate Proportional to Speed
 User Specified Flow Rate Variation with Speed

Reference Shaft Speed:

Fluid Volume Flow Rate:

Inlet Temperature:

Ventilation Flow:

Use Circular Ducts in Housing for Vent Flow
 Stator Cooling only (No airgap or rotor flow)

Radial Duct Flow:

Radial Duct Blockage:

Unblocked (Default)
 Blocked

Flow Direction:

Inlet Definition:

Front Inlet Type: Rear Inlet Type:

Front Grill Axial Offset: Rear Grill Axial Offset:

Grill Length [Front]: Not Used:

Not Used: Not Used:

Not Used: Not Used:

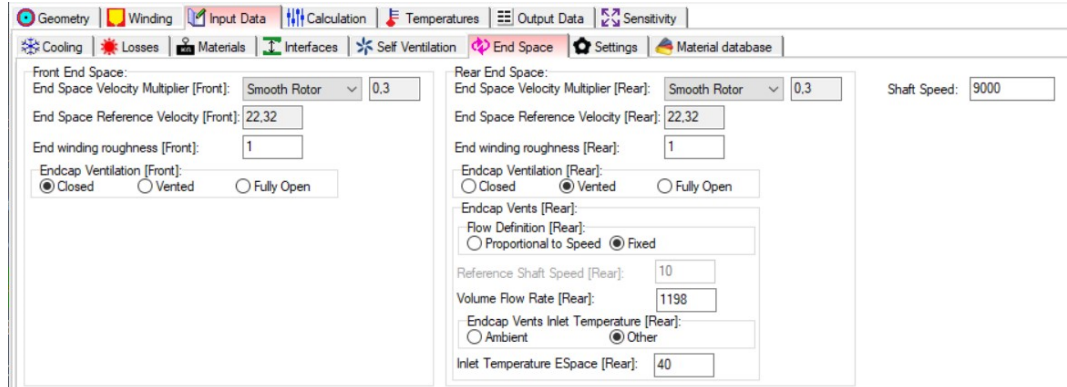
Front Grill Free Area Ratio: Rear Grill Free Area Ratio:

Front Vent Total Area: Rear Vent Total Area:

Front Vent Free Area: Rear Vent Free Area:

Obrázek E.5: Definice chladicího média

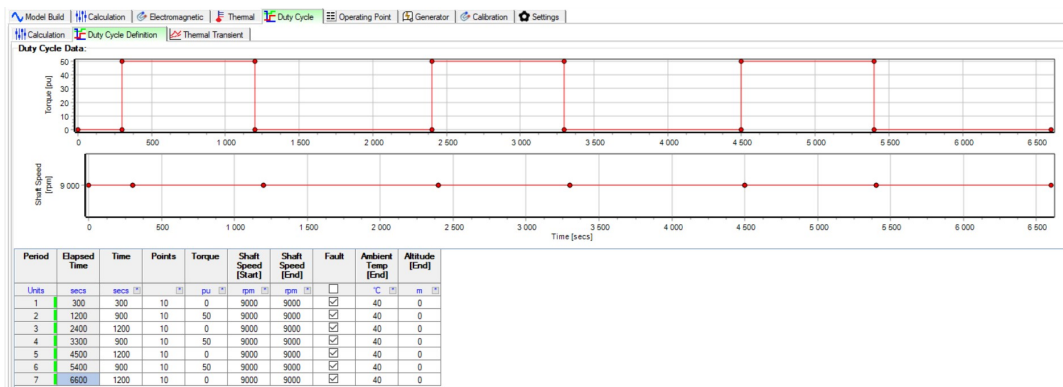
E. Termální návrh



Obrázek E.6: Nastavení chlazení koncového prostoru stroje



Obrázek E.7: Nastavení cyklu konstantního zatěžování



Obrázek E.8: Nastavení cyklu přerušovaného zatěžování