

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Model a návrh motoru elektrického vozidla

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2017/2018

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Radek ČERMÁK**
Osobní číslo: **E16N0045P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Model a návrh motoru elektrického vozidla**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte literární a patentovou rešerši elektrických motorů používaných v automobilovém průmyslu jako pohonná jednotka elektromobilu. Stanovte z dostupné literatury hlavní parametry konkrétního motoru vhodného pro osobní elektromobil.
2. Proveďte na základě bodu 1. elektromagnetický návrh motoru. Ověřte návrh motoru pomocí MKP a proveďte simulaci různých provozních podmínek elektromobilu.
3. Vytvořte 3D model navrženého motoru a zhodnoťte vývoj elektromotorů používaných v elektromobilech.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Veřejně dostupné informační zdroje, databáze www.ieee.org
2. Krishnan, R.: Electric Motor Drives: Modeling, Analysis, and Control, Prentice Hall 2001, ISBN: 978-0130910141
3. Larminie, J., Lowry, J.: Electric Vehicle Technology Explained, WILEY, 2003, ISBN-13: 978-0470851630
4. The Electric Car: Development and Future of Battery, Hybrid and Fuel-Cell Cars

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 10. října 2017

Termín odevzdání diplomové práce: 24. května 2018


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




Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 10. října 2017

Abstrakt

Práce se zabývá návrhem PMSM motoru s vnějším rotorem a vodním chlazením použitelného pro pohon osobního automobilu. V práci je proveden elektromagnetický výpočet stroje, výpočet náhradních parametrů a určení ztrát stroje. Výpočty jsou ověřeny v programu ANSYS. Dále je v práci zjednodušený výpočet a simulace oteplení v programu MOTOR-CAD a simulace motoru při různých provozních podmínkách automobilu. Práce obsahuje 2D model, který byl vytvořen v programu AutoCAD a 3D model vytvořený v programu Autodesk INVENTOR.

Klíčová slova

PMSM, synchronní motor s permanentními magnety, elektromagnetický návrh, tepelná simulace, MKP, ANSYS, MOTOR-CAD

Abstract

This thesis deals with the design of PMSM motor with external rotor and water cooling, used for driving a passenger car. Electromagnetic calculation of the machine, calculation of spare parameters and determination of machine losses are performed in this thesis. Calculations are verified in ANSYS. Furthermore, there is a simplified calculation and simulation of warming in the MOTOR-CAD program and simulation of the machine under various operating conditions of the car. Thesis contains a 2D model that was created in AutoCAD and a 3D model created in Autodesk INVENTOR.

Key word

PMSM, permanent-magnet synchronous motor, electromagnetic design, thermal simulation, FEM, ANSYS, MOTOR-CAD

Prohlášení

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

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

.....

podpis

V Plzni dne 22.5.2018

Bc. Radek Čermák

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále mé poděkování patří panu doc. Ing. Karlovi Hruškovi Ph.D. za cenné profesionální rady. Závěrem bych rád poděkoval Bc. Michalovi Černochovi, se kterým jsme si vyměňovali poznatky během vypracovávání našich diplomových prací, své rodině a přátelům za jejich podporu a společnosti Motor Design, která mi umožnila bezplatný přístup ke svému softwaru Motor-CAD.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD.....	15
AUTOMOBIL S ELEKTRICKÝM POHONEM.....	16
1.1 HISTORIE ELEKTROMOBILŮ	16
1.2 ELEKTROMOBILY SOUČASTNOSTI	17
1.2.1 Konstrukční specifika a části vozidla.....	18
1.2.2 Současná nabídka elektromobilů.....	20
1.2.3 Netradiční výrobci	21
1.3 SOUČASNÝ VÝVOJ ELEKTROMOTORŮ	21
1.4 ELEKTROMOBILY V BUDOUCNU	23
2 SYNCHRONNÍ STROJE S PERMANENTNÍMI MAGNETY	25
2.1 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ PMSM	25
2.1.1 Stator.....	26
2.1.2 Rotor	26
3 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH PMSM.....	28
3.1 URČENÍ ZÁKLADNÍCH PARAMETRŮ STROJE	28
3.2 NÁVRH VINUTÍ STATORU	30
3.3 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU	34
3.3.1 Návrh statorové drážky.....	37
3.4 NÁVRH ROTORU	39
3.5 VÝPOČET NÁHRADNÍCH PARAMETRŮ STROJE	44
3.6 VÝPOČET ZTRÁT A ÚČINNOSTI STROJE	48
4 OVĚŘENÍ NÁVRHU STROJE	50
4.1 OVĚŘENÍ V RMXPR T ANALYTICKÝM VÝPOČTEM.....	50
4.2 OVĚŘENÍ V MAXWELL2D METODOU KONEČNÝCH PRVKŮ	53
5 OTEPLENÍ STROJE.....	57
5.1 SIMULACE OTEPLENÍ V PROGRAMU MOTOR-CAD.....	57
5.2 ANALYTICKÝ VÝPOČET OTEPLENÍ	60
5.2 OVĚŘENÍ GEOMETRIE STROJE V PROGRAMU FEMM.....	67
6 ANALÝZA PROVOZU STROJE	69
6.1 ANALÝZA USTÁLENÉ JÍZDY AUTOMOBILU	69
6.2 ANALÝZA ZRYCHLENÍ AUTOMOBILU	72
7 KONSTRUKČNÍ USPOŘÁDÁNÍ A 3D MODEL MOTORU	76

ZÁVĚR	79
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	81
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

A	Obvodová proudová hustota	$[A/m]$
a	Počet paralelních větví	$[-]$
a	Zrychlení	$[m/s^2]$
B_{j1}	Magnetická indukce ve jhu statoru	$[T]$
B_{j2}	Magnetická indukce ve jhu rotoru	$[T]$
B_z	Magnetická indukce v zubu	$[T]$
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	$[T]$
b_0	Šířka otevření drážky	$[m]$
b_1	Šířka horní rozteče drážky	$[m]$
b_2	Šířka dolní rozteče drážky	$[m]$
b_m	Šířka permanentního magnetu	$[m]$
b_z	Šířka zubu	$[m]$
C	Essonův činitel	$[VA/m^3ot]$
$\cos\varphi$	Účinník	$[-]$
c_x	Součinitel vzdušného odporu	$[-]$
D_1	Vnější průměr statoru	$[m]$
D_2	Vnější průměr rotoru	$[m]$
D_r	Vnitřní průměr rotoru	$[m]$
D_V	Vnitřní průměr statoru	$[m]$
d	Průměr pneumatiky	$[m]$
d_v	Průměr vodiče	$[m]$
F	Síla	$[N]$
f	Frekvence	$[Hz]$
g	Tíhové zrychlení	$[m/s^2]$
H	Intenzita magnetického pole	$[A/m]$
H_c	Střední koercitivita magnetu	$[A/m]$
H_{j1}	Intenzita magnetického pole pro jho statoru	$[A/m]$
H_{j2}	Intenzita magnetického pole pro jho rotoru	$[A/m]$
H_z	Intenzita magnetického pole pro zub statoru	$[A/m]$

H_{δ}	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	[A/m]
h_0	Výška otevření drážky	[m]
h_1	Výška pólového nástavce	[m]
h_2	Hloubka drážky	[m]
h_d	Celková výška drážky	[m]
h_p	Výška pneumatiky	[m]
h_m	Výška magnetu	[m]
h_z	Výška zubu	[m]
I_f	Fázový proud	[A]
J	Proudová hustota	[A/m ²]
k_c	Carterův činitel	[-]
k_{dj}	Činitel zvýšení ztrát vlivem technologie zpracování plechů pro jho	[-]
k_{dz}	Činitel zvýšení ztrát vlivem technologie zpracování plechů pro zuby	[-]
k_e	Činitel udávající poměr mezi jmenovitým a indukovaným napětím	[-]
k_{Fe}	Činitel plnění železa	[-]
k_p	Činitel mechanických ztrát	[-]
k_r	Činitel rozlohy	[-]
k_y	Činitel kroku	[-]
k_v	Činitel vinutí	[-]
k_w	Činitel plnění drážky	[-]
k'_{β}, k_{β}	Činitelé pro určení rozptylu	[-]
$L_{a\sigma}$	Rozptylová indukčnost	[H]
$L_{\check{c}}$	Indukčnost čel vinutí	[H]
L_{dif}	Diferenční indukčnost	[H]
L_{mi}	Magnetizační indukčnost	[H]
$l_{\check{c}}$	Délka čela	[m]
l_e	Předběžná délka stroje	[m]
l_{ew}	Střední délka vzdálenosti čela vinutí od statoru	[m]
l_{e_skut}	Skutečná délka stroje	[m]
l_{j1}	Střední délka vzdálenosti jha statoru	[m]

l_{jz}	Střední délka vzdálenosti jha rotoru	[m]
l_r	Délka rotoru	[m]
l_v	Délka vodiče	[m]
l_z	Délka závitů	[m]
M_n	Jmenovitý moment stroje	[Nm]
m	Počet fází	[-]
m_c	Celková hmotnost stroje	[kg]
m_{Cu}	Hmotnost vinutí	[kg]
m_{Fe_s}	Hmotnost železa statoru	[kg]
m_{Fe_r}	Hmotnost železa rotoru	[kg]
m_{PM}	Hmotnost permanentních magnetů	[kg]
m_v	Hmotnost vozidla	[kg]
N_s	Počet závitů v sérii	[-]
N_u	Nusseltovo číslo	[-]
n	Otáčky	[ot/min]
n_{pl}	Počet plechů statorového svazku	[-]
O_a	Odpor zrychlení	[N]
O_f	Odpor válení	[N]
O_s	Odpor stoupání	[N]
O_{vz}	Odpor vzduchu	[N]
P	Činný výkon stroje	[W]
p	Počet pólů stroje	[-]
Q	Počet drážek statoru	[-]
Q_p	Počet drážek na pól	[-]
q	Počet drážek a pól a fázi	[-]
R	Tepelný odpor	[K/W]
R_a	Odpor vinutí	[-]
R_e	Reynoldsovo číslo	[-]
r_d	Dynamický poloměr kola vozidla	[m]
S	Zdánlivý výkon stroje	[VA]

S_i	Vnitřní elektromagnetický výkon	[VA]
S_{Cu}	Plocha vodiče	[mm ²]
S_{Cu_c}	Celková plocha mědi v drážce	[mm ²]
S_d	Plocha průřezu drážky	[mm ²]
S_x	Přední plocha vozidla	[mm ²]
s	Sklon vozovky	[%]
T	Teplota	[°C]
t	Čas	[s]
t_{d1}	Drážková rozteč statoru	[m]
t_p	Pólová rozteč statoru	[m]
U_f	Fázové napětí	[V]
U_i	Indukované napětí	[V]
U_s	Sdružené napětí	[V]
u	Počet vrstev drážky	[-]
V_d	Počet vodičů v drážce	[-]
v	Obvodová rychlost	[m/s]
v_v	Rychlost vozidla	[m/s]
v_z	Rychlost větru	[m/s]
X_{ad}	Podélná reaktance	[Ω]
$X_{a\sigma}$	Rozptylová reaktance	[Ω]
X_d	Celková synchronní reaktance	[Ω]
y_{1d}	Krok vinutí v počtu drážek	[-]
Z_n	Jmenovitá impedance	[Ω]
α	Součinitel přestupu tepla	[W/m ² K]
β	Činitel zkrácení kroku	[-]
β	Zátěžný úhel	[°]
ΔP	Celkové ztráty	[W]
ΔP_{Fe}	Celkové ztráty v železe	[W]
ΔP_j	Jouelovy ztráty	[W]
ΔP_m	Mechanické ztráty	[W]

Δp	Ztrátové číslo plechů	$[W/kg]$
ΔU_{j1}	Úbytek magnetického napětí v jhu statoru	$[A]$
ΔU_{j2}	Úbytek magnetického napětí v jhu rotoru	$[A]$
ΔU_z	Úbytek magnetického napětí v zubu statoru	$[A]$
ΔU_δ	Úbytek magnetického napětí ve vzduchové mezeře	$[A]$
$\Delta \vartheta$	Rozdíl teplot	$[^\circ C]$
δ	Velikost vzduchové mezery	$[m]$
δ_{ef}	Efektivní hodnota vzduchové mezery	$[m]$
η	Účinnost	$[\%]$
λ_{Cu}	Činitel tepelné vodivosti mědi z drážky do okolí	$[W/mK]$
λ_ξ	Činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí	$[-]$
λ_d	Činitel drážkového rozptylu	$[-]$
λ_{Fe}	Činitel tepelné vodivosti železa statoru	$[W/mK]$
λ_{izl}	Činitel tepelné vodivosti vyložení drážky	$[W/mK]$
λ_{PM}	Činitel tepelné vodivosti magnetu	$[W/mK]$
μ_0	Permeabilita vakua	$[H/m]$
μ_{env}	Permeabilita okolního prostředí	$[-]$
μ_r	Relativní permeabilita	$[-]$
ρ_{Cu}	Hustota mědi	$[kg/m^3]$
ρ_{Fe}	Hustota železa	$[kg/m^3]$
ρ_{vz}	Hustota vzduchu	$[kg/m^3]$
τ_{dif}	Činitel diferenčního rozptylu	$[-]$
Φ_c	Celkový magnetický tok	$[Wb]$
Φ_{j1}	Magnetický tok jhem statoru	$[Wb]$
Φ_{j2}	Magnetický tok jhem rotoru	$[Wb]$
Φ_z	Magnetický tok zubem	$[Wb]$

Úvod

V minulosti byly elektromobily často přehlíženy, protože nebyly schopny konkurovat autům se spalovacími motory, zejména v dojezdu a v rychlosti doplnění paliva. V poslední době se však elektromobily díky novým technologiím, které nezanedbatelně snižují nebo úplně odstraňují některé z jejich nevýhod, stávají stále oblíbenější a mnoho automobilek uvádí na trh nové modely.

Nedílnou součástí každého elektromobilu je elektromotor. Existuje několik typů motorů, které se používají, ale v současnosti se díky rozvoji výkonové elektroniky a větší dostupnosti materiálů pro permanentní magnety stále častěji využívají synchronní stroje s permanentními magnety (PMSM), zejména pro jejich vyšší účinnost a menší objem. Díky těmto výhodám dochází k jejich stále většímu uplatnění v automobilovém a trakčním průmyslu.

Teoretická část diplomové práce je rozdělena na dvě kapitoly. První kapitola obsahuje stručnou historii elektromobilů, popis jejich základní konstrukce a současnou nabídku na trhu. Ve druhé kapitole je základní popis PMSM.

Praktická část diplomové práce obsahuje návrh PMSM motoru s vnějším rotorem použitého pro pohon osobního automobilu a umístěného v náboji kola. V práci je elektromagnetický návrh stroje a jeho ověření v softwaru ANSYS, simulace oteplení stroje v programu MOTOR-CAD a zjednodušený analytický tepelný výpočet. Dále je zde zjednodušená analýza provozu stroje v závislosti na jízdě automobilu a navržené konstrukční uspořádání jednotlivých částí motoru a 3D model kompletního motoru vyhotovený v programu INVENTOR.

1 Automobil s elektrickým pohonem

1.1 Historie elektromobilů

V současné době je na elektromobily stále pohlíženo jako na novinku a trend poslední doby. Pravda je ale taková, že první elektromobil byl elektrický vozík Skota Roberta Andersona sestavený mezi lety 1832 - 1839, tedy přibližně 50 let před prvním automobilem se spalovacím motorem. Ke skutečnému uvedení elektromobilů na trh však došlo až v roce 1893, kdy byla v chicagském autosalonu představena celá nabídka těchto vozů. Tímto rokem započalo tzv. zlaté období, ve kterém jezdilo v USA více elektromobilů než automobilů se spalovacím motorem. V té době lidé elektromobily využívali pro jejich vyšší účinnost, snadnější ovládání a menší poruchovost, než měly konkurenční automobily se spalovacími motory. Belgický vůz „*La Jamais Contente*“ (Věčně nespokojená) na Obr. 1.1, od konstruktéra Camille Jénatzy, dokonce jako první automobil na světě překonal v roce 1899 rychlost 100 km/h. V souboji mezi elektromobily a vozidly se spalovacími motory je za zlom označovaný vynález startéru v roce 1912, po kterém začaly elektromobily ustupovat a za konec jejich zlatého období je pak symbolicky označován rok 1924, kdy na automobilových výstavách již nebyl ohlášen jediný zástupce [3], [4].



Obr. 1.1 „*La Jamais Contente*“ se svým konstruktérem (převzato z [3])

V období 1924 - 1990 se elektromobily vyráběly pouze v dobách, kdy byl omezen přístup k ropě (2. světová válka, období tzv. ropných šoků apod.), a protože nebyly schopny držet krok s rozvojem spalovacích motorů, bylo na ně pohlíženo jako na nutné zlo. Po ropné krizi v roce 1973 a 1979 si však lidé uvědomili svoji závislost na ropě a znečištění ovzduší, což donutilo automobilky a státní vědecké týmy vrátit se k výzkumu elektromobilů, i když zatím pouze na úrovni prototypů a testovacích vozů. Například Československo dostalo za úkol vyvinout pro státy socialistického bloku malé rodinné elektrické auto, později nazvané EMA, na Obr. 1.2 [3], [4], [9].



Obr. 1.2 Československý elektromobil EMA (převzato z [9])

V roce 1990 byl v Kalifornii přijat zákon o Vozidlech s nulovými emisemi (ZEV), ten stanovil, že od roku 1996 musí firmy prodávající automobily na kalifornském trhu mít v nabídce alespoň jeden model bezemisního vozidla. Díky tomu se na kalifornských cestách začaly objevovat první elektromobily. Mezi nejpočetnější patřily vozy Toyota RAV4 EV, Ford Ranger EV, Honda EV plus nebo dnes již kultovní GM EV1. Navzdory zájmu veřejnosti o elektromobily, došlo v roce 2004 k sešrotování většiny elektromobilů samotnými automobilkami, aby se podpořil prodej klasických automobilů. To vedlo k větší oblibě vozidel s hybridním pohonem, na které vsází většina velkých automobilek [3], [4].

1.2 Elektromobily současnosti

První elektromobily, jak je známe dnes, se začaly objevovat po roce 2005 zejména díky rozvoji spotřební elektroniky, kvůli kterému došlo k zdokonalení lithiových akumulátorů. Současné elektromobily mají proti vozidlům se spalovacími motory následující výhody a nevýhody [4]:

- Plynulejší jízdu
- Vyšší účinnost ve velikém rozsahu otáček
- Levnější údržbu
- Produkuje méně škodlivých látek i pokud započítáme tepelné elektrárny
- Menší kapacita baterií a s tím související nižší dojezd vozidla
- Neúplná síť nabíjecích stanic
- Pomalé dobíjení, i rychlé stanice nabíjí přes 30 min

1.2.1 Konstrukční specifika a části vozidla

V první generaci elektromobilů měly automobilky tendence vzít již vyráběný model a nahradit spalovací motor elektromotorem. Tento způsob se příliš neosvědčil, protože díky nízké kapacitě baterií je potřeba využít energii s maximální účinností. Při návrhu elektromobilu je tak potřeba vzít v úvahu [4]:

- Vysokou hmotnost baterie – na ostatní části vozidla se musí použít lehké slitiny hliníku (Tesla) nebo kompozity z uhlíkových vláken (BMW)
- Navrhnout karoserii vozidla tak, aby překonávala co nejmenší jízdní odpor
- K potlačení valivého odporu použít speciální pneumatiky
- Protože elektromotor pracuje při životu nebezpečném napětí, je potřeba minimalizovat nebezpečí s tím spojená

Důležité konstrukční prvky, kterými se elektromobily odlišují od vozidel se spalovacími motory jsou:

- **Motor**

V současnosti jsou elektromobily nejčastěji vybaveny jedním elektromotorem, který slouží pro pohon přední nebo zadní nápravy. Existují i výjimky např. Tesla Model S P100D, který má hlavní a pomocný motor nebo firma Protean, která se zaměřuje na motory umístěné v kole vozidla. Toto jsou nejčastěji používané elektromotory a příklady elektromobilů, které je využívají [4]:

- Asynchronní motor: Tesla Model S, Tesla Model X, BJEVEC EC 180
- PMSM: Nissan Leaf, BYD e6, BMW i3, Chevrolet Bolt
- Synchronní motor: Renault Zoe
- BLDC: Zhi Dou D1/D2

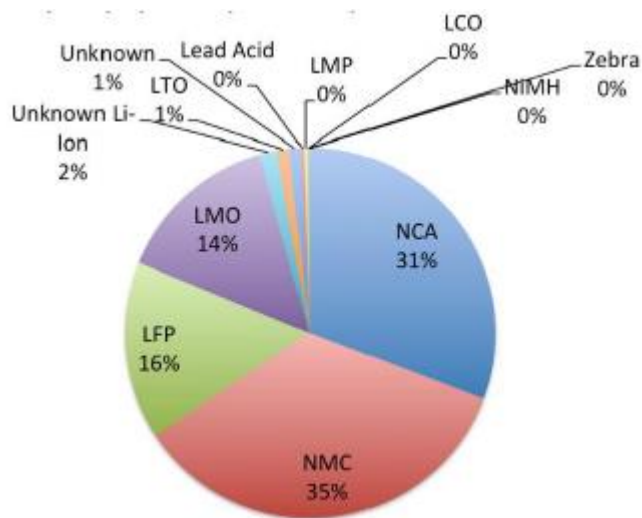
Díky své vysoké účinnosti a menším rozměrům jsou v současnosti nepoužívanější PMSM motory. Jejich největší nevýhodou je cena permanentních magnetů a menší teplotní odolnost než u asynchronních motorů [4].

- **Přenos momentu**

U elektromobilů je kroutící moment přenášen na kola podobně jako u vozidel se spalovacím motorem, ale není zapotřebí převodovky a stačí použití pevného převodu a vhodného vektorového řízení nebo přímého řízení momentu. Díky tomu lze použít motor s vyššími otáčkami a menším momentem, což vede k menšímu motoru [4].

- **Baterie**

Nejdůležitější součástí elektromobilů je baterie, která se skládá z velkého počtu lithiových článků. Podle materiálu katody se rozdělují na NMC (nikl-mangan-kobalt), NCA (nikl-kobalt hliník), LFP (lithium-železo-fosfát), LMO (lithium-mangan), LCO (lithium-kobalt), LTO (lithium-titan). Na Obr. 1.3 je procentuální rozložení podle použití u osobních automobilů. Nejpoužívanější typ je NMC a používají ho čínské automobilky, LFP se již používat přestává, LMO je například v Nissan Leaf a NCA používá Tesla [4], [19].



Obr. 1.3 Graf využití různých typů baterií (převzato z [4])

1.2.2 Současná nabídka elektromobilů

V tabulce 1.1 je současná nabídka nejvyhledávanějších elektromobilů pro český trh. Každý model existuje v mnoha provedeních a v různých motorizacích, s různým stupněm výbavy, takže uvedené informace jsou spíše orientační. Informace byly vyhledány na internetových stránkách výrobců a dodavatelů.

Tabulka 1.1 Tabulka modelů dostupných na českém trhu

Model	Cena (Kč)	Výkon (kW)	Kapacita baterie (kWh)	Dojezd (km)
Tesla Model S	2 800 000	386	75	490
Tesla Model X	3 480 000	386	100	475
BMW i3	915 000	125	27,2	200
Nissan Leaf	884 000	112	40	378
Nissan e-NV200	871 200	80	24	280
Kia Soul EV	869 980	82	27	250
Peugeot iOn	720 000	47	16	150
Hyundai Ioniq	859 900	89	28	280
Mercedes-Benz B250E	1 020 000	132	28	200
Volkswagen e-UP!	639 900	60	18,7	160
Volkswagen e-Golf	969 000	100	24,2	300
ZhiDou D1	400 000	18	11,5	145
ZhiDou D1	460 000	30	18	257
Renault Zoe	550 000 + pronájem baterie	68	41	400

Jak je vidět, tak kromě nejslabších modelů se ceny elektromobilů pohybují vysoko nad jejich protějšky se spalovacím motorem, např. nový vůz Škoda Fabia s motorizací 1.0 MPI s výkonem 55 kW se prodává od 279 000 Kč. Tuto nevýhodu však vyvažuje fakt nižší ceny za provoz vozidla. Je tak na každém, aby zvolil řešení, které nejvíce vyhovuje jeho potřebám.

1.2.3 Netradiční výrobci

Kromě těchto klasických typů elektromobilů existují i výrobci, kteří se snaží eliminovat nevýhody elektromobilů, např. lichtenštejnská společnost QUANT aktivně vyvíjí elektromobily, které nepotřebují klasickou baterii, ale energii získávají z tekutého elektrolytu, který slibuje dojezd až 1000 km, rychlé doplňování a dostatečný výkon. Automobily tohoto typu chce společnost v blízké době uvést na trh, ale žádné podrobnější informace zatím bohužel nejsou známy [7].

Společnost Protean Electric nabízí systém elektromotorů umístěných v kolech vozidla, dosahující výkonu až 75 kW a jmenovitém momentu 650 Nm. Tento systém lze podle stránek výrobce namontovat do již existujícího automobilu a zvýšit tak jeho výkon, nebo použít samostatně a vytvořit tak elektromobil *Obr. 1.4* [8].



Obr. 1.4 Pohon od společnosti Protean Electric (převzato z [8])

1.3 Současný vývoj elektromotorů

Protože jsou elektromobily stále více populární a představují jedno z možných řešení k snížení znečištění planety, jsou neustále prováděny nové studie, které se zabývají jejich problematikou. V rámci zadání diplomové práce jsou zde uvedeny některé studie, které byly využity při volbě navrhovaného motoru:

- **Porovnávací studie**

Tyto studie hlavně porovnávají různé typy elektromotorů používaných v elektromobilech a jsou tak dobrým odrazovým můstkem při volbě pohonu do nově vznikajícího elektromobilu.

- Comparative study of electric car traction motors:

Autoři této studie se zabývali porovnáním v současnosti používaných motorů v osobních elektromobilech. V práci je popsáno porovnání synchronních motorů s permanentními magnety a motorů bez permanentních magnetů (asynchronní a synchronní). Jsou zde uvedeny příklady automobilů s těmito motory. V závěru práce došli autoři k závěru, že motory s permanentními magnety dodávají vyšší výkon za cenu vyšších nákladů a jsou vhodnější pro automobily, které jsou stavěny na nižší rychlosti, zatímco asynchronní motory jsou vhodnější u vozidel, které jsou určeny pro vyšší provozní rychlosti nebo kde jsou preferovány nižší náklady na výrobu [24].

- Performances of AC induction motors with different number of poles in urban electric cars:

Jak název napovídá je tato práce zaměřena na porovnání asynchronních motorů s různým počtem pólů. Autoři porovnávali $2p$, $4p$, $6p$ a $8p$ motory. Cílem jejich studie bylo vyhodnotit, který z těchto motorů nabízí nejdelší dojezd a nejlepší rekuperaci při normálním a agresivním stylu jízdy. Výsledky této studie jsou, že motory s $2p$, $4p$ a $6p$ mají velmi podobné vlastnosti, ale motor s $8p$ má kratší dojezd a vyšší cenu nákladů a není proto příliš vhodný [25].

- A Comparison of different types of motors used for low speed electric vehicles: experiments and simulation:

Tato studie je zaměřena na porovnání PMSM a BLDCM motoru a jejich využití u automobilů, které jsou určeny do města a očekává se tak od nich časté rozjíždění a nízká provozní rychlost. Jsou zde uvedeny simulace obou motorů metodou konečných prvků. Autoři zde došli k závěru, že BLDCM motory mohou nabídnout vyšší moment při nižších rychlostech a jsou tak vhodnější pro typicky městskou jízdu. PMSM motor ukázal, že na rozdíl od BLDCM udrží konstantní moment i ve vyšších rychlostech a je vhodnější do vozidel, kde se očekávají vyšší rychlosti. Autoři také uvádějí, že PMSM motor měl menší rozměry a vyšší účinnost než BLDCM o stejném výkonu, ale za cenu vyšších nákladů [26].

- Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles:

V práci jsou uvedeny PMSM motory s různě uloženými permanentními magnety a jejich porovnání z hlediska účinnosti a výsledných rozměrů. V závěru práce autoři neupřednostňují konkrétní typ, ale přikládají tabulku záporů a kladů pro jednotlivá uspořádání [27].

- **Studie zabývající se zlepšením parametrů a návrhem stroje**

Tento typ studií se většinou zaměřuje na návrh konkrétního typu motoru a zkoumá možné zlepšení jeho parametrů.

- Design and optimization of PMSM with outer rotor for electric vehicle:

Autoři této práce navrhli PMSM s vnějším rotorem a povrchovým uložením magnetů pomocí dvou různých nástrojů: sequential quadratic programming, které je založeno na deterministickém modelu a NSGAI algoritmu, kde se jedná o stochastickou metodu. V práci je dále uveden popis obou metod a závěrem uvádějí že díky těmto metodám se celková hmotnost motoru snížila z původních 9,48 kg na 8,27 kg [28].

- Design optimizations of outer-rotor permanent magnet synchronous machines with fractional-slot and concentrated-winding configurations in lightweight electric vehicles:

Autoři této studie se zaměřili na návrh a optimalizaci motoru do ultralehkého automobilu určeného pro městský provoz. Jako pohon automobilu zvolili 4 PMSM motory s vnějším rotorem umístěnými v kolech automobilu. V práci jsou navrženy 4 různé motory, které se od sebe liší počtem pólu: 20p, 22p, 26p a 28p. V rámci optimalizace zde autoři provedli 5 iterací návrhu, dokud se výsledné hodnoty neustálily. Docílili tak zvýšení hustoty momentu na kilogram stroje. Práce dále porovnává jednotlivé stroje z hlediska rozměrů drážek, celkové hmotnosti, rozložení magnetického pole a nežádoucích harmonických. V práci ukazují, že takto provedenou optimalizací zvýšili průměrnou hustotu výkonu z 3,9 Nm/kg na 4,7 Nm/kg [29].

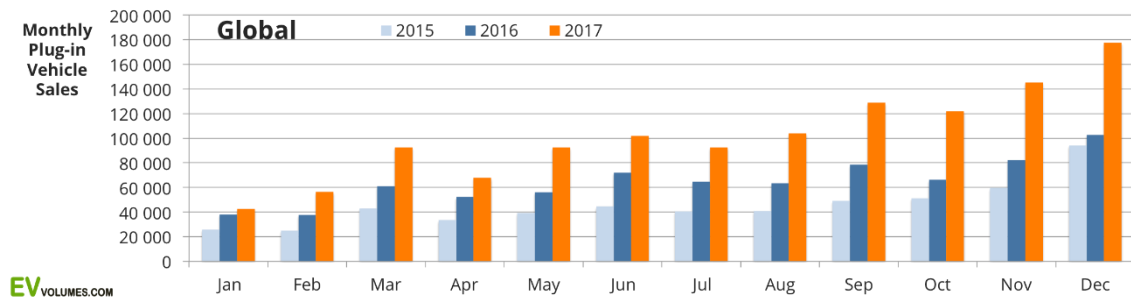
- Direct-driven interior magnet permanent-magnet synchronous motors for a full electric sports car:

Tato práce prezentuje návrh PMSM motoru pro sportovní automobil. Autoři zde přizpůsobili návrh motoru požadavku na vysoké zrychlení, proto navrhli motor s velkým momentem při nízkých otáčkách. V práci jsou uvedeny parametry motoru společně s analýzou motoru metodou konečných prvků [30].

1.4 Elektromobily v budoucnu

Protože řada zemí (Anglie, Francie) představila v roce 2017 zemní plán na budoucí zákaz vozidel se spalovacími motory, lze předpokládat, že prodej a vývoj elektromobilů bude v budoucnu nadále růst. I z grafu na Obr. 1.5 je jasně vidět stoupající tendence prodeje

elektromobilů ve světě. Čím dál více automobilek plánuje uvést na trh nové elektromobily a hybridy (např. Škoda chce v roce 2025 uvést na trh 5 nových modelů s čistě elektrickým pohonem), které v kombinaci s autonomním řízením představují potenciální revoluci na poli automobilové dopravy [4], [14].



Obr. 1.5 Prodej elektromobilů ve světě v posledních letech (převzato z [14])

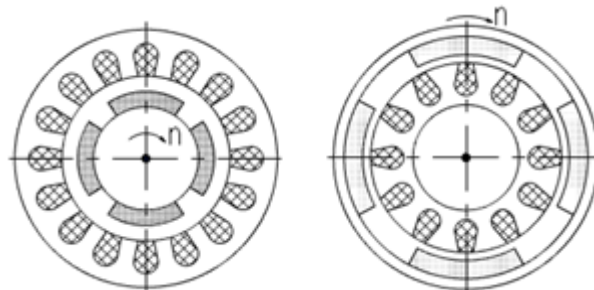
2 Synchronní stroje s permanentními magnety

Protože na základě studií z kapitoly 1.3 byl pro návrh zvolen synchronní stroj s permanentními magnety, je v této kapitole stručně popsán.

S rozvojem výkonové elektroniky a řídicích systému a s klesající cenou permanentních magnetů, se synchronní stroje s permanentními magnety (zkráceně PMSM) díky svým menším rozměrům stále více uplatňují např. v trakci, v servopohonech, v hodinových strojcích apod. [12], [15].

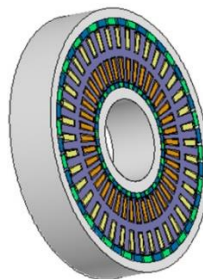
2.1 Konstrukční uspořádání PMSM

Z hlediska základní konstrukce můžeme PMSM motory rozdělit na motory s vnitřním a vnějším rotorem Obr. 2.1. Mnohem častěji používané jsou motory s vnitřním rotorem. Motory s vnějším rotorem se používají hlavně u aplikací, kde je rotor přímo součástí rotující části např. v kole vozidla, u elektrokola apod. Mezi výhody motoru s vnitřním rotorem patří snazší konstrukční uspořádání a lepší odvod tepla. Motor s vnějším rotorem dokáže vyvinout větší moment při zachování objemu [12], [15], [16].



Obr. 2.1 Různé typy konstrukcí PMSM (převzato z [10])

Kromě těchto dvou uspořádání existuje i kombinace obou typů – DRPSM (*Dual-rotor permanent magnet synchronous motor*) Obr. 2.2 [11].

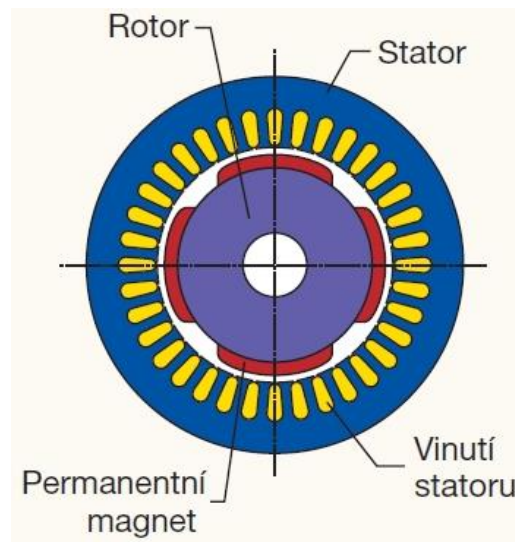


Obr. 2.2 DRPSM (převzato z 11)

2.1.1 Stator

Stator PMSM motoru je velmi podobný statoru asynchronního stroje. Skládá se z tenkých magnetických plechů, nejčastěji o šířce 0,5 mm a 0,35 mm, navzájem izolovaných tenkou vrstvou laku [1], [16].

Vinutí je nejčastěji tvořeno měděnými vodiči, které jsou uloženy ve statorových drážkách. Aby nedocházelo k poškození vodičů a zvětšila se elektrická pevnost izolačního systému, je drážka vyložena izolačním materiálem a zajištěna klínem, který brání vypadávání vodičů. Pro zlepšení mechanické odolnosti, voděodolnosti a větší pevnosti, se po navinutí stroj impregnuje epoxidem, který má lepší tepelnou vodivost než vzduch a dochází tak k lepšímu chlazení. Nejčastěji se používá 3f vinutí, ale je možné použít i jiné typy, např. 5f vinutí [1], [16].



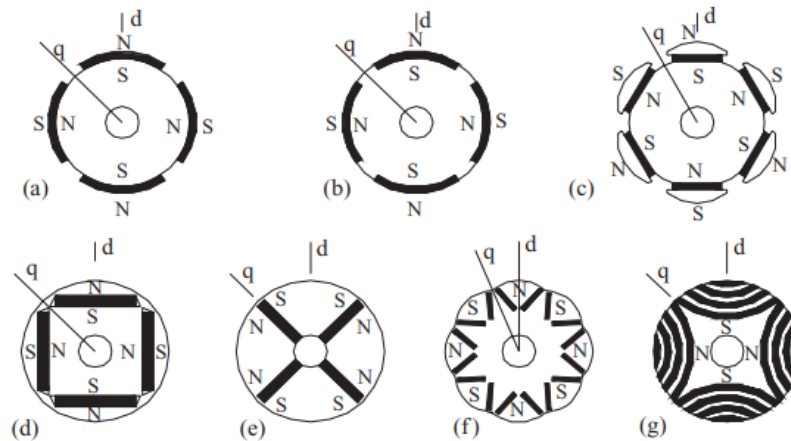
Obr. 2.3 Konstrukční uspořádání PMSM (převzato z [13])

2.1.2 Rotor

Rotor může být tvořen ocelovými plechy nebo může být vyroben z jednoho kusu oceli. V klasickém synchronním motoru se k vytvoření statického magnetického pole používá stejnosměrné budící vinutí, u PMSM toto pole vytváří permanentní magnety umístěné na rotoru stroje, díky tomu nevznikají Jouelovo ztráty v budícím vinutí a zvyšuje se tak účinnost stroje. Existuje několik konstrukčních uspořádání magnetů Obr. 2.4 [2], [12], [15], [16]:

- a) Povrchové umístění magnetů
- b) Magnety zapuštěné v povrchu rotoru
- c) Magnety umístěné ve vyniklých pólech

- d) Tangenciální uspořádání magnetů
- e) Radiálně zapuštěné magnety
- f) Vnitřní V uspořádání
- g) Synchronní reluktanční motor vybaven permanentními magnety



Obr. 2.4 Různé uspořádání magnetů v rotoru (převzato z [2])

Na výrobu nejjednodušší a nejčastěji používané jsou rotory s povrchovými magnety. Rotor se pak chová jako stroj s hladkým rotorem a magnety jsou nejefektivněji využity. Nevýhodou je mechanické namáhání magnetů a nutnost magnety dodatečně upevnit, např. omotáním skelnou bandáží a její impregnací [2].

Vnitřně uložené magnety jsou mechanicky pevnější, ale náročnější na výrobu a dochází ke ztrátě cca $\frac{1}{4}$ magnetického toku vlivem rozptylů. Magnety jsou v rotoru zajištěny klíny. Způsob magnetizace magnetů se volí podle množství vyrobených kusů (sériová/kusová výroba). V případě sériové výroby se magnety zmagnetizují až po jejich připevnění k rotoru. Výroba se tak urychlí, protože není ztížena o obtížnější manipulaci s magnety vlivem magnetických sil. V případě kusové výroby se magnety častěji zmagnetizují před jejich připevněním na rotor [2].

Permanentní magnety jsou z magneticky tvrdých materiálů na bázi vzácných zemin. Nejčastěji používané jsou neodým-železo bor magnety (NdFeB), keramické magnety, magnety na bázi slitiny hliníku, niklu, kobaltu, železa, mědi a titanu (AlNiCo) a samarium-kobaltové magnety (SmCo) [17].

3 Elektromagnetický návrh PMSM

Po domluvě s vedoucím práce byly jako pohon automobilu zvoleny dva motory umístěné v zadních kolech automobilu. Na základě studií uvedených v kapitole 1.3 byl zvolen PMSM motor, který má výhodu menších rozměrů než asynchronní motor o stejném výkonu. Protože je motor umístěn v kole, je konstrukčně výhodnější použít motor s vnějším rotorem a docílit tak snazšího přenosu momentu na ráfek kola. Určení základních parametrů motoru je inspirováno firmou Protean ELECTRIC, která vyrábí pohon pro obecné použití, a tak aby ho bylo možné namontovat do libovolného osobního automobilu (viz. kapitola 1.2.3). Je tedy zvoleno obecné vozidlo, které by mělo umožňovat pohodlnou jízdu na delší vzdálenosti a výkonově spadat do nižší střední třídy až střední třídy, s těmito parametry:

- průměrná rychlost $v_v = 95 \text{ km/h}$
- maximální hmotnost $m_v = 2000 \text{ kg}$
- celkový výkon $P_c = 80 \text{ kW}$
- velikost ráfku $\geq R16$
- napájecí napětí $U_s = 400 \text{ V}$ s PWM modulací.

Návrh stroje byl proveden na základě [1], [2].

3.1 Určení základních parametrů stroje

Pro určení jmenovitých otáček motoru n je potřeba znát celkový průměr kola d . Pro výpočet motoru byl určen ráfek o velikosti R16, kde 16 značí průměr udávaný v palcích, a pneumatiku 205/55 o výšce od kraje ráfku $h_p = 0,11275 \text{ m}$.

$$d = 16 \cdot 0,0254 + 2 \cdot 0,11275 = 0,6319 \text{ m} \quad (3.1)$$

Z průměru ráfku jsou stanoveny otáčky n :

$$n = \frac{60 \cdot \frac{v_v}{3,6}}{\pi \cdot d} = \frac{60 \cdot \frac{95}{3,6}}{\pi \cdot 0,6319} = 798 \text{ ot/min} \quad (3.2)$$

Počet pólů stroje, účinník a předpokládaná účinnost byly na základě studií z kapitoly 1.3 a podle [2] zvoleny jako:

$$\begin{aligned}2p &= 28 \\ \cos\varphi &= 0,85 \\ \eta &= 95 \text{ \%}.\end{aligned}$$

Jmenovitá frekvence:

$$f = \frac{p \cdot n}{60} = \frac{14 \cdot 798}{60} = 186,1 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Fázové napětí:

$$U_f = \frac{U_s}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ V} \quad (3.4)$$

Příkon stroje:

$$S = \frac{P}{\eta \cdot \cos\varphi} = \frac{40000}{0,95 \cdot 0,85} = 49535 \text{ VA} \quad (3.5)$$

Fázový proud:

$$I_f = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_s} = \frac{49535}{\sqrt{3} \cdot 400} = 71,5 \text{ A} \quad (3.6)$$

Jmenovitý moment:

$$M_n = \frac{P \cdot 30}{\pi \cdot n} = \frac{40000 \cdot 30}{\pi \cdot 798} = 478,9 \text{ Nm} \quad (3.7)$$

Při určování základních rozměrů motoru se vychází z výkonové rovnice:

$$S_i = C \cdot D_1^2 \cdot l \cdot n \quad (3.8)$$

Vnitřní elektromagnetický výkon S_i se vypočítá podle vztahu:

$$S_i = k_e \cdot S = 0,83 \cdot 49535 = 41114,5 \text{ VA} \quad (3.9)$$

Koeficient k_e udává poměr vnitřního napětí ku indukovanému a jeho hodnota je závislá na počtu pólů a průměru statoru. Jeho určení se provedlo poté, co byl stroj několikrát přepočítán a z fázorového diagramu vyšla hodnota $k_e = 0,83$ viz Obr. 3.6. C představuje Essonův činitel,

pro který platí vztah:

$$C = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot B_\delta \cdot A \cdot k_v = \frac{\pi^2}{60\sqrt{2}} \cdot 0,95 \cdot 50000 \cdot 0,866 = 4784,5 \text{ VA/m}^3 \text{ot} \quad (3.10)$$

B_δ představuje zvolenou hodnotu indukce ve vzduchové mezeře, A je obvodová proudová hustota a k_v je činitel vinutí. Podle doporučených hodnot v [2] bylo zvoleno: $A = 50000 \text{ A/m}$ a $B_\delta = 0,95 \text{ T}$. Protože bylo zadáno dvouvrstvé zubové vinutí, je činitel vinutí $k_v = 0,866$.

Vnější průměr statoru je s ohledem na rozměry ráfku zvolen $D_1 = 0,35 \text{ m}$. Po určení těchto parametrů se z výkonové rovnice může určit předběžná délka paketu l :

$$l = \frac{S_i}{C \cdot n \cdot D_1^2} = \frac{41114,5}{4784,5 \cdot 798 \cdot 0,35^2} = 0,0879 \text{ m} \quad (3.11)$$

Pólová rozteč statoru:

$$t_p = \frac{\pi \cdot D_1}{2p} = \frac{\pi \cdot 0,35}{28} = 0,0392 \text{ m} \quad (3.12)$$

3.2 Návrh vinutí statoru

Po konzultaci s vedoucím práce bylo zvoleno vsypávané, dvouvrstvé ($2u = 2$), zubové vinutí, kde počet drážek na pól a fázi $q = \frac{1}{2}$.

Počet drážek statoru:

$$Q = 2p \cdot m \cdot q = 28 \cdot 3 \cdot 0,5 = 42 \quad (3.13)$$

Drážková rozteč:

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D_1}{Q} = \frac{\pi \cdot 0,35}{42} = 0,02618 \text{ m} \quad (3.14)$$

Počet drážek na pól:

$$Q_p = \frac{Q}{2p} = \frac{42}{28} = 1,5 \quad (3.15)$$

Činitel zkrácení kroku:

$$\beta = \frac{y_{1d}}{Q_p} = \frac{1}{1,5} = 0,666 \quad (3.16)$$

Protože se jedná o zubové vinutí, je cívkový krok $y_{1d} = 1$.

Činitel vinutí pro první harmonickou je dán násobkem činitele rozlohy k_{r1} a činitelem kroku k_{y1} :

$$\begin{aligned} k_{v1} = k_{y1} \cdot k_{r1} &= \sin\left(n \cdot \beta \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(n \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{n \cdot \sin\left(v \cdot \frac{\pi}{n \cdot 6}\right)} \\ &= \sin\left(1 \cdot 0,666 \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \frac{\sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{6}\right)}{1 \cdot \sin\left(1 \cdot \frac{\pi}{1 \cdot 6}\right)} = 0,866 \end{aligned} \quad (3.17)$$

n je čísel z $q = \frac{1}{2} = \frac{n}{c}$

Počet závitů v sérii:

$$N_s = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot A}{2 \cdot m \cdot I_f} = \frac{\pi \cdot 0,35 \cdot 50000}{2 \cdot 3 \cdot 71,5} = 128,156 \quad (3.18)$$

Protože počet závitů v sérii musí být celé číslo, zvolil jsem $N_s = 128$.

Počet vodičů v drážce:

$$V_d = \frac{a \cdot N_s}{p \cdot q} = \frac{7 \cdot 128}{14 \cdot 0,5} = 128 \quad (3.19)$$

a je počet paralelních větví. Jejich možný počet lze zjistit takto:

$$a = \frac{Q}{m} = \frac{42}{3} = 14 \quad (3.20)$$

$a = 14$ je tedy nejvyšší možný počet paralelních větví. Protože 14 lze beze zbytku dělit čísly 14; 7; 2; 1, je možný počet paralelních větví 14; 7; 2; 1.

Při určení vhodného počtu a se vychází z toho, že při vyšším počtu a dojde k nárůstu vodičů v drážce, ale také k menší proudové zátěži na vodič, což povede k menšímu průměru

vodiče. Z konstrukčního hlediska je nejjednodušší zvolit sériové vinutí, kde $a = 1$, ale tak vychází průměr vodiče $d_v > 2,5 \text{ mm}$. Pro vsypávané vinutí je podle [1] nejvyšší povolený průměr $2,5 \text{ mm}$, proto je zvoleno $a = 7$.

Protože se jedná o vinutí dvouvrstvé $2u = 2$, je počet vodičů v jedné vrstvě drážky vypočítán takto:

$$\frac{V_d}{2} = 64 \quad (3.21)$$

Ve stroji je tedy použito vsypávané, dvouvrstvé, zubové vinutí, které je zapojeno v sério-
paralelním uspořádání (na jednu fázi připadá 14 cívek, které jsou zapojeny v sedmi paralelních
větších).

Po návrhu vinutí lze sestavit Tingleyho schéma, pilové schéma vinutí a sestavit Georgesův obrazec na *Obr. 3.2*. Protože se Tingleyho schéma opakuje, jsou na *Obr. 3.1* vidět pouze 4 první póly stroje. Kompletní Tingleyho schéma, konstrukční uspořádání statorového vinutí a pilové schéma vinutí je přiloženo jako *příloha E*, *příloha D* a *příloha C*. Tingleyho schéma je sestaveno následovně:

Počet řádků je roven počtu pólů stroje:

$$2p = 28 \quad (3.22)$$

Počet sloupců lze vypočítat jako násobek počtu fází $m = 3$ a čitatele počtu drážek na pól a fázi

$$q = \frac{1}{2} = \frac{n}{c}$$

$$m \cdot n = 3 \cdot 1 = 3 \quad (3.23)$$

Tingleyho schéma je tedy složeno z $3 \cdot 28 = 84$ buněk. Buňky se vyplňují podle čitatele z q :

$$c = 2 \quad (3.24)$$

Vyplněna je tedy každá druhá buňka.

Protože se jedná o dvouvrstvé vinutí, je v každé buňce uvedena přední a zadní cívková strana.

Celkový počet cívkových stran je:

$$Q \cdot 2 = 42 \cdot 2 = 84 \quad (3.25)$$

Lichými čísly jsou označeny přední cívkové strany a sudými čísly zadní cívkové strany.

Zapojení cívkových stran je určeno předním cívkovým krokem:

$$y_1 = 2u \cdot y_1 + 1 = 2 \cdot 1 + 1 = 3 \quad (3.26)$$

Tedy platí, že přední cívková strana č.1 je spojena se zadní cívkovou stranou č.4 atd.

pól	fáze	A A'	C' C	B B'
1	+	1 2		3 4
2	-		5 6	
3	+	7 8		9 10
4	-		11 12	

$\frac{\varphi_i}{2}$

Obr. 3.1 Tingleyho schéma

Pomocí Tingleyho schématu lze ověřit činitel vinutí k_{v1} . K jeho ověření se musí jedna z fází rozdělit tak, aby v každé polovině byl stejný počet cívkových stran od jedné fáze, a definovat odklon od osy fáze φ_i .

$$\varphi_i = \frac{180}{n \cdot m} = \frac{180}{1 \cdot 3} = 60 \quad (3.27)$$

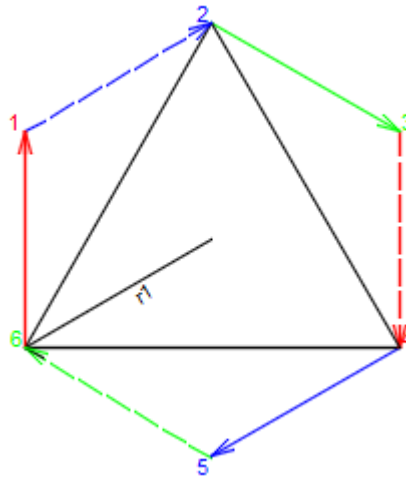
Výpočet činitele vinutí pro první harmonickou:

$$k_{v1} = \frac{S \cdot \cos\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{S} = \frac{28 \cdot \cos(30)}{28} = 0,866 \quad (3.28)$$

S udává celkový počet cívkových stran jedné fáze.

Takto vypočítaný činitel vinutí se shoduje s činitelem vinutí vypočítaným v rovnici 3.17.

K určení diferenčního rozptylu je potřeba sestavit Georgesův obrazec na Obr. 3.2.



Obr. 3.2 Georgesův obrazec

Vzdálenost r_1 se udává v poměrných jednotkách jako:

$$r_1 = \frac{1}{2} \quad (3.29)$$

$$r_{1g} = \frac{m}{\pi} \cdot k_{v1} \cdot q = \frac{3}{\pi} \cdot 0,866 \cdot 0,5 = 0,413 \quad (3.30)$$

Pro zubové vinutí platí:

$$R_1^2 = r_1^2 = \frac{1}{4} \quad (3.31)$$

Výsledný diferenční rozptyl:

$$\tau_{dif} = \frac{R_1^2 - r_{1g}^2}{r_{1g}^2} = \frac{\frac{1}{4} - 0,17}{0,17} = 0,46 \quad (3.32)$$

Tyto výpočty jsou provedeny na základě přednášek z předmětu *Vybrané partie z elektrických strojů* a zkontrolovány v programu od pana doc. Ing. Karla Hrušky Ph.D. Výsledné hodnoty se shodují.

3.3 Výpočet magnetického obvodu

Protože se při výpočtu počtu vodičů zaokrouhluje na celá čísla, je potřeba přepočítat hodnotu obvodové proudové hustoty na A_{skut} , ze které lze vypočítat skutečnou hodnotu

Essonova činitele C_{skut} a skutečnou délku paketu rotoru $l_{e,skut}$.

$$A_{skut} = \frac{N_s \cdot m \cdot I_f}{\pi \cdot D_1} = \frac{128 \cdot 3 \cdot 71.5}{\pi \cdot 0,35} = 49939 A/m \quad (3.33)$$

$$C_{skut} = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot A_{skut} \cdot B_\delta \cdot k_v = \frac{\pi^2}{60 \cdot \sqrt{2}} \cdot 49939 \cdot 0,95 \cdot 0,866 = 4778,76 VA/m^3 ot \quad (3.34)$$

Efektivní délka stroje:

$$l_e = \frac{S_i}{D_1^2 \cdot C_{skut} \cdot n} = \frac{41609,9}{0,35^2 \cdot 4778,76 \cdot 798} = 0,0881 m \quad (3.35)$$

Statorový paket se kvůli omezení vířivých proudů skládá z tenkých plechů, a proto se délka stroje dále upravuje tak, aby byla dělitelná tloušťkou plechu. V této práci je zvolená tloušťku plechu 0,5 mm.

$$n_{pl} = \frac{l_e}{0,0005} = \frac{0,0891}{0,0005} = 176,1 \rightarrow 176 \quad (3.36)$$

Skutečná délka stroje:

$$l_{e,skut} = n_{pl} \cdot 0,0005 = 176 \cdot 0,0005 = 0,088 m \quad (3.37)$$

Statorový paket je složen z ocelových plechů *SURA M250 – 50A* (katalogový list viz *Příloha A*). V tomto výpočtu není zohledněno chlazení stroje a umístění chladících kanálů, tohoto tématu se týká *kapitola 5*, která je zaměřena na oteplení.

Velikost indukovaného napětí ve stroji:

$$U_i = U_f \cdot k_e = 231 \cdot 0,83 = 191,68 V \quad (3.38)$$

Celkový magnetický tok:

$$\Phi_c = \frac{U_i}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot N_s \cdot k_v \cdot f} = \frac{191,68}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot 128 \cdot 0,866 \cdot 186,1} = 0,00209 Wb \quad (3.39)$$

Kontrola indukce ve vzduchové mezeře:

$$B_{\delta} = \frac{\Phi_c}{\frac{2}{\pi} \cdot t_p \cdot l_{e_skut}} = \frac{0,00209}{\frac{2}{\pi} \cdot 0,0392 \cdot 0,088} = 0,9506 \text{ T} \quad (3.40)$$

Protože tok v jhu statoru se rozdělí na dvě poloviny, je předpokládáný tok procházející jhem:

$$\Phi_{j1} = \frac{\Phi_c}{2} = \frac{0,00209}{2} = 0,001045 \text{ Wb} \quad (3.41)$$

Výsledná výška jha:

$$h_{j1} = \frac{\Phi_{j1}}{k_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot B_{j1}} = \frac{0,001045}{0,97 \cdot 0,0895 \cdot 1,4} = 0,0087 \text{ m} \quad (3.42)$$

B_{j1} je předpokládaná hodnota magnetické indukce v jhu statoru. Hodnota $B_{j1} = 1,4 \text{ T}$ je zvolena podle doporučených hodnot v [2].

Kontrola Indukce v jhu statoru:

$$B_{j1} = \frac{\Phi_{j1}}{0,97 \cdot l_{e_skut} \cdot h_{j1}} = \frac{0,001045}{0,97 \cdot 0,088 \cdot 0,0087} = 1,407 \text{ T} \quad (3.43)$$

Byly zvoleny paralelní zuby s drážkou typu L (viz Obr. 3.3). Magnetický tok v zubu Φ_z se předpokládá stejný jako celkový tok Φ_c .

$$\Phi_z = \Phi_c = 0,00209 \text{ Wb} \quad (3.44)$$

Výpočet šířky zubu:

$$b_z = \frac{\Phi_z}{0,97 \cdot l_{e_skut} \cdot B_z} = \frac{0,00209}{0,97 \cdot 0,088 \cdot 1,9} = 0,012895 \text{ m} \quad (3.45)$$

B_z je indukce v zubu, zvolená podle [2].

Šířka zubu je zaokrouhlena na:

$$b_z = 0,013 \text{ m} \quad (3.46)$$

Kontrola Indukce v zubu:

$$B_z = \frac{\Phi_z}{k_{Fe} \cdot b_z \cdot l_{e_skut}} = \frac{0,00209}{0,97 \cdot 0,013 \cdot 0,088} = 1,883 \text{ T} \quad (3.47)$$

3.3.1 Návrh statorové drážky

Na základě proudové hustoty σ_{Cu} byla určena potřebná plocha pro jeden vodič.

$$S_{Cu} = \frac{I_f}{a \cdot \sigma_{Cu}} = \frac{71,5}{7 \cdot 6,5} = 1,57 \text{ mm}^2 \quad (3.48)$$

Velikost proudové hustoty $\sigma_{Cu} = 6,5 \text{ A/mm}^2$ je zvolená pro synchronní stroj chlazený vodou podle [2]. Ideální průměr jednoho vodiče je pak:

$$d_v = \sqrt{\frac{S_{Cu} \cdot 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,57 \cdot 4}{\pi}} = 1,41 \text{ mm} \quad (3.49)$$

Podle normalizovaných velikostí vodičů v [1] byl zvolen vodič o efektivním průměru a obsahu:

$$d_v = 1,4 \text{ mm} \quad (3.50)$$

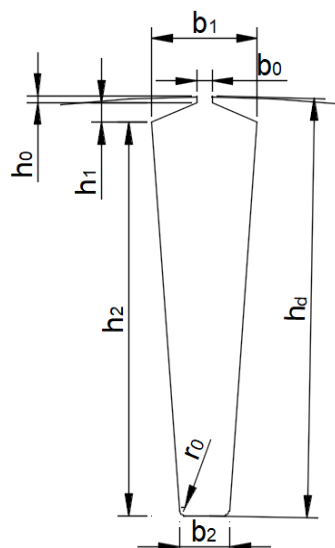
$$S_{Cu} = 1,539 \text{ mm}^2 \quad (3.51)$$

Nová hodnota proudové hustoty je:

$$\sigma_{Cu} = \frac{I_f}{a \cdot S_{Cu}} = \frac{71,5}{7 \cdot 1,539} = 6,63 \text{ A/mm}^2 \quad (3.52)$$

Po určení průměru vodiče je možné spočítat celkový obsah mědi v drážce:

$$S_{Cu_c} = V_d \cdot S_{Cu} = 128 \cdot 1,539 = 197 \text{ mm}^2 \quad (3.53)$$



Obr. 3.3 Drážka typu L

Tabulka 3.1 Tabulka rozměrů drážky

h_0	0,7 mm
h_1	2,25 mm
h_2	45 mm
h_d	47,95 mm
b_0	2,9 mm
b_1	12,73 mm
b_2	6,05 mm
r_0	0,7 mm

Jako typ drážky byl zvolen typ L viz Obr. 3.3. Drážka je navržena tak, že nejprve byla předběžně určena výška nástavce jako $h_0 + h_1 = 4 \text{ mm}$ a výška drážky bez nástavce $h_2 = 45 \text{ mm}$. Protože je známa šířka zubu ($b_z = 0,013 \text{ m}$) je možné pomocí geometrických úprav vypočítat šířku b_1 jako:

$$b_1 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1 - 2 \cdot (h_0 + h_1)}{2} - Q \cdot b_z}{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,35 - 2 \cdot 0,004}{2} - 42 \cdot 0,013}{42} = 0,01258 \text{ m} \quad (3.54)$$

Po vypočítání předběžné šířky b_1 je možné přesněji určit výšku nástavce. Podle [1] jsou zvoleny normalizované hodnoty pro šířku $b_1 = 12,5 \text{ mm}$ jako $h_0 = 0,7 \text{ mm}$ a $h_1 = 2,25 \text{ mm}$. Po určení těchto rozměrů lze pomocí stejného výpočtu (3.51) určit skutečnou šířku drážky $b_1 = 12,738 \text{ mm}$ a spodní šířku drážky jako:

$$b_2 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{D_1 - 2 \cdot (h_0 + h_1)}{2} - 2 \cdot h_2 + r_0 - Q \cdot b_z}{Q} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \frac{0,35 - 2 \cdot (0,0007 + 0,00225)}{2} - 2 \cdot 0,045 + 0,0007 - 42 \cdot 0,013}{42} = 0,00605 \text{ m} \quad (3.55)$$

r_0 je poloměr rohů drážky, díky kterému se omezí přesycení plechů v ostrých rozích drážky a

vodič kruhového průměru tak lépe zapadne. Jeho hodnota je zvolena jako $\frac{d_v}{2} = 0,7 \text{ mm}$. Velikost otevření drážky byla zvolena podle [1], kde je pro vsypávaná vinutí doporučena minimální hodnota otevření drážky jako:

$$b_0 = d_v + 1,5 \text{ mm} = 1,4 + 1,5 = 2,9 \text{ mm} \quad (3.56)$$

Celková výška drážky:

$$h_d = h_0 + h_1 + h_2 = 0,7 + 2,25 + 45 = 47,95 \text{ mm} \quad (3.57)$$

Celková plocha drážky:

$$S_d = \frac{b_1 + b_2}{2} \cdot h_2 = \frac{12,73 + 6,05}{2} \cdot 45 = 422,73 \text{ mm}^2 \quad (3.58)$$

Činitel využití drážky:

$$k_w = \frac{S_{Cu_c}}{S_d} = \frac{197}{422,73} = 0,466 \quad (3.59)$$

Činitel k_w bere v potaz vyložení drážky, nerovnoměrnost uložení vodičů a izolaci vodičů. Jeho hodnota by podle [2] měla být $k_w \leq 0,6$. Tato podmínka je splněna a drážku lze považovat za vyhovující.

Vnitřní průměr statoru:

$$D_V = D_1 - 2 \cdot (h_d) - 2 \cdot h_{j1} = 0,35 - 2 \cdot (0,04795) - 2 \cdot 0,0087 = 0,2367 \text{ m} \quad (3.60)$$

3.4 Návrh rotoru

Jak bylo výše zmíněno, jedná se o synchronní motor s permanentními magnety místo budících cívek. Kvůli své snadné konstrukci byl zvolen rotor s povrchovým uložením magnetů *Obr. 2.4 (a)*. Návrh byl proveden podle [2] a [17]. Byly zvoleny neodým-železo-borové magnety, typ *N35UH*. Zde jsou jejich výchozí parametry odečtené z katalogového listu, který je přiložen jako příloha B:

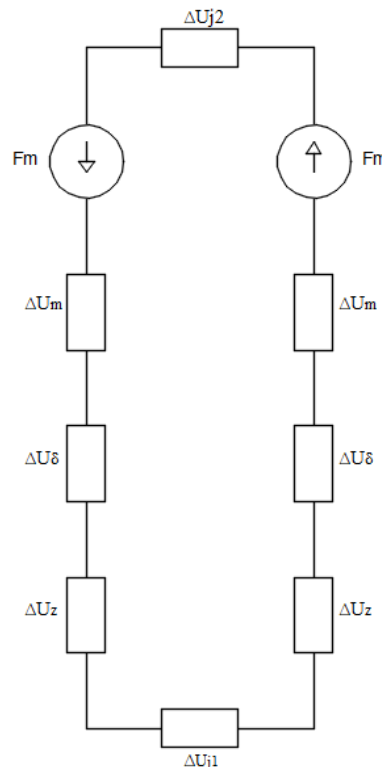
- Střední koercitivita magnetu: $H_c = 907 \text{ kA/m}$
- Relativní permeabilita: $\mu_r = 1,05$
- Teplotní odolnost: 180°C
- Koeficient poklesu remanence v závislosti na teplotě: $\alpha(B_r) = -0,12 \text{ \%}/^\circ\text{C}$
- Koeficient poklesu koercitivity v závislosti na teplotě: $\alpha(H_c) = -0,465 \text{ \%}/^\circ\text{C}$

Pro použité plechy *SURA M250-50A* byly z katalogového listu (*příloha A*) odečteny intenzity magnetického pole pro hodnoty magnetické indukce v jednotlivých částech statoru. Protože v katalogových listech jsou uvedeny pouze hodnoty intenzit pro $f = 50 \text{ Hz}$ a jmenovitá frekvence pro běh motoru je $f = 186,1 \text{ Hz}$, nelze určit hodnoty přesně. Nicméně hodnoty by se neměly příliš lišit. Byly tedy zvoleny hodnoty pro $f = 50 \text{ Hz}$:

- Pro jhu statoru: $B_{j1} = 1,4 \text{ T} \rightarrow H_{j1} = 585 \text{ A/m}$
- Pro jhu rotoru: $B_{j2} = 1,4 \text{ T} \rightarrow H_{j2} = 585 \text{ A/m}$
- V zubu: $B_z = 1,8 \text{ T} \rightarrow H_z = 11600 \text{ A/m}$

Indukce v jhu rotoru byla předpokládána stejná jako v jhu statoru. $B_z = 1,8 \text{ T}$ byla zvolena, protože původní zvolená hodnota $B_z = 1,9 \text{ T}$ se po určení šířky zubu zmenšila na $B_z = 1,88 \text{ T}$ a protože se dle [2] předpokládají rozptylové toky 5 – 20 %, které ve výpočtu nejsou uvažovány, lze předpokládat, že se indukce nadále sníží.

Při určení velikosti magnetu se vychází z jednotlivých úbytků magnetického napětí. Náhradní schéma magnetického obvodu stroje je na *Obr. 3.4*.



Obr. 3.4 Náhradní schéma magnetického obvodu

Úbytek napětí v zubu:

$$\Delta U_z = H_z \cdot h_z = 11600 \cdot 0,04795 = 556,22 \text{ A} \quad (3.61)$$

Úbytek napětí v jhu statoru:

$$\Delta U_{j1} = H_{j1} \cdot l_{j1} = 585 \cdot 0,0266 = 16 \text{ A} \quad (3.62)$$

l_{j1} je délka střední siločáry jha statoru:

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_V + h_{j1})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,2367 + 0,0087)}{28} = 0,0275 \text{ m} \quad (3.63)$$

Úbytek napětí v jhu rotoru:

$$\Delta U_{j2} = H_{j2} \cdot l_{j2} = 585 \cdot 0,042 = 24,6 \text{ A} \quad (3.64)$$

Délka střední siločáry jha rotoru:

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_2 - h_{j2})}{2p} = \frac{\pi \cdot (0,385 - 0,0087)}{28} = 0,042 \text{ m} \quad (3.65)$$

Protože v této fázi není ještě známá velikost magnetu, nelze určit přesně vnější průměr rotoru D_2 . Tento průměr byl tedy zvolen s ohledem na velikost ráfku jako: $D_2 = 0,385 \text{ m}$. Šířka rotorového jha $h_{j2} = 0,0087 \text{ m}$ byla uvažována stejná jako statorového.

Úbytek napětí ve vzduchové mezeře:

$$\Delta U_{\delta} = H_{\delta} \cdot \delta' = 755985,9 \cdot 0,00104 = 788 \text{ A} \quad (3.66)$$

H_{δ} je indukce magnetického pole ve vzduchové mezeře:

$$H_{\delta} = \frac{B_{\delta}}{\mu_0} = \frac{0,95}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 755985,9 \text{ A/m} \quad (3.67)$$

δ' je přepočtená hodnota vzduchové mezery:

$$\delta' = k_c \cdot \delta = 1,04 \cdot 0,001 = 0,00104 \text{ m} \quad (3.68)$$

Pro její výpočet se musí spočítat hodnota Carterova činitele k_c :

$$k_c = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \delta \cdot \gamma} = \frac{0,02618}{0,02618 - 0,001 \cdot 1,064} = 1,04 \quad (3.69)$$

Výpočet γ :

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,0029}{0,001}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,0029}{0,001}\right)} = 1,064 \quad (3.70)$$

Intenzita magnetického pole magnetu:

$$H_m = \frac{B_m}{\mu_0 \cdot \mu_r} = \frac{0,95}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,05} = 719986,67 \text{ A/m} \quad (3.71)$$

Magnetická indukce B_m na povrchu magnetů se předpokládá stejná jako ve vzduchové mezeře.

Po vyčíslení všech hodnot úbytků magnetického napětí lze spočítat výšku magnetů:

$$\begin{aligned} h_m &= \frac{2 \cdot \Delta U_z + 2 \cdot \Delta U_\delta + \Delta U_{j2} + \Delta U_{j1}}{2 \cdot (H_c - H_m)} \\ &= \frac{2 \cdot 590,44 + 2 \cdot 788 + 24,6 + 16}{2 \cdot (907000 - 719986,67)} = 0,00729 \text{ m} \end{aligned} \quad (3.72)$$

Tato výška je pouze přibližná, protože nebere v úvahu zvětšení vzduchové mezery o velikost permanentního magnetu. Pro přesné určení výšky magnetu se musí použít následující iretační postup:

$$\delta' = h_m + \delta \quad (3.73)$$

$$\gamma' = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta'}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta'}\right)} \quad (3.74)$$

$$k_c' = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \delta' \cdot \gamma'} \quad (3.75)$$

$$\delta'' = k_c \cdot \delta \quad (3.76)$$

Pro novou hodnotu vzduchové mezery byl znovu přepočítán úbytek napětí a nová výška magnetu. Po několika cyklech se výška ustálila na $h_m = 7,2 \text{ mm}$.

Šířka permanentního magnetu:

$$b_m = \frac{\Phi_c}{B_\delta \cdot l_{e_skut}} = \frac{0,00209}{0,95 \cdot 0,088} = 0,025 \text{ m} \quad (3.77)$$

Z důvodu lepší rozložení magnetické indukce by se dle [2] měla volit větší délka magnetu, než je délka statoru minimálně o $2 \cdot \delta$. Délka rotoru je poté:

$$l_r = l_{e_skut} + 2 \cdot \delta = 0,088 + 2 \cdot 0,001 = 0,09 \text{ m} \quad (3.78)$$

Po výpočtu velikosti magnetu lze určit vnitřní průměr rotoru:

$$D_r = D_1 + 2 \cdot \delta + 2 \cdot h_m = 0,35 + 2 \cdot 0,001 + 2 \cdot 0,0072 = 0,3664 \text{ m} \quad (3.79)$$

Hmotnost magnetů:

$$m_{PM} = 2p \cdot b_m \cdot h_m \cdot l_r \cdot \rho_{PM} = 28 \cdot 0,025 \cdot 0,0072 \cdot 0,09 \cdot 7500 = 3,4 \text{ kg} \quad (3.80)$$

ρ_{PM} je hustota materiálu magnetu určena z katalogového listu v Příloze B.

Kontrola syčení rotorového jha:

$$B_{j2} = \frac{\Phi_{j1}}{0,97 \cdot l_r \cdot \frac{D_2 - D_r}{2}} = \frac{0,001045}{0,97 \cdot 0,09 \cdot \frac{0,385 - 0,3664}{2}} = 1,28 \text{ T} \quad (3.81)$$

Protože se změnila hodnota magnetické indukce v rotoru, je dle katalogového listu (příloha A) nová hodnota intenzity v rotoru $B_{j2} = 1,28 \text{ T} \rightarrow H_{j2} = 278 \text{ A/m}$. Po přepočítání velikosti magnetu se jeho šířka ustálila na hodnotě $h_m = 7,17 \text{ mm}$. Kvůli minimálnímu rozdílu v hodnotách byla ponechána výše zvolená výška permanentního magnetu:

$$h_m = 7,2 \text{ mm} \quad (3.82)$$

Na základě studie [21], která porovnává různé způsoby omezení ztrát v permanentních magnetech, jsou navržené permanentní magnety rozděleny v axiálním směru na 5 segmentů, každý o délce 18 mm .

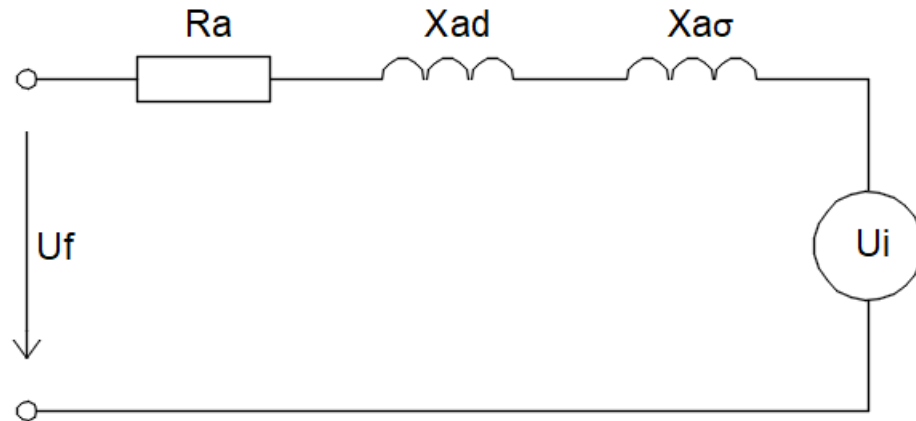
Hmotnost železa rotoru:

$$\begin{aligned} m_{Fe_r} &= \rho_{Fe} \cdot l_r \cdot \frac{D_2 - D_r}{2} \cdot (D_r + 9,3) \cdot \pi \\ &= 7600 \cdot 0,09 \cdot \frac{0,385 - 0,3664}{2} \cdot (0,3664 + 9,3) \cdot \pi = 7,5 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.83)$$

ρ_{Fe} je hustota oceli určená z katalogového listu v příloze A.

3.5 Výpočet náhradních parametrů stroje

Na Obr. 3.5 je náhradní schéma synchronního stroje kde R_a - odpor vinutí, X_{ad} - reaktance reakce kotvy (podélná reaktance) a $X_{a\sigma}$ - rozptylová reaktance [12].



Obr. 3.5 Náhradní schéma synchronního stroje (převzato z [12])

K výpočtu parametrů náhradního schématu je potřeba zjistit celkovou délku jednoho závitu.

Délka vodiče v drážce:

$$l_v = l_{e_skut} = 0,088 \text{ m} \quad (3.84)$$

Délka čela:

$$l_\xi = K_\xi \cdot b_c + 2 \cdot B = 1,9 \cdot 0,0226 + 2 \cdot 0,01 = 0,0629 \text{ m} \quad (3.85)$$

B je přímá délka části cívky vystupující z drážky. Zvolena jako $B = 0,01 \text{ m}$ podle [1] pro vsypávaná vinutí, zakládaných do drážek před nalisováním stroje do kostry. b_c je střední šířka cívky určena na oblouku kružnice procházející středy drážky.

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D_1 - h_d)}{2p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (0,35 - 0,04795)}{28} \cdot 0,666 = 0,0226 \text{ m} \quad (3.86)$$

K_ξ je činitel zvolený podle [1] pro čela izolovaná páskou.

Délka závitu:

$$l_z = 2 \cdot l_\xi + 2 \cdot l_v = 2 \cdot 0,0629 + 2 \cdot 0,088 = 0,30185 \text{ m} \quad (3.87)$$

Hmotnost vinutí:

$$m_{cu} = \rho_{Cu} \cdot l_z \cdot S_{Cu} \cdot \frac{V_d}{2} \cdot Q = 8900 \cdot 0,30185 \cdot 1,53 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{128}{2} \cdot 42 = 11,04 \text{ kg} \quad (3.88)$$

Odpor vinutí při 20°C

$$R_{a_{Cu_{20^{\circ}C}}} = \rho_{Cu_{20^{\circ}C}} \cdot \frac{N_s \cdot l_z}{S_{Cu} \cdot a} = 1,709 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{128 \cdot 0,30185}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 7} = 0,061 \Omega \quad (3.89)$$

Protože odpor vodiče s teplotou roste, je potřeba přepočítat novou rezistivitu mědi na pracovní teplotu stroje $\rho_{Cu_{120^{\circ}C}}$, která byla po domluvě s vedoucím práce zvolena na 120 °C.

$$\begin{aligned} \rho_{Cu_{120^{\circ}C}} &= \rho_{Cu_{20^{\circ}C}} \cdot (1 + \alpha_{Cu} \cdot \Delta\vartheta) = 1,709 \cdot 10^{-8} \cdot (1 + 0,004 \cdot (120 - 20)) \\ &= 2,39 \cdot 10^{-8} \Omega/m \end{aligned} \quad (3.90)$$

Odpor 1 fáze vinutí při 120°C:

$$R_{a_{Cu_{120^{\circ}C}}} = \rho_{Cu_{120^{\circ}C}} \cdot \frac{N_s \cdot l_z}{S_{Cu} \cdot a} = 2,39 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{128 \cdot 0,30185}{1,539 \cdot 10^{-6} \cdot 7} = 0,085 \Omega \quad (3.91)$$

Z náhradního schématu vyplývá, že celková synchronní reaktance je $X_d = X_{ad} + X_{a\sigma}$. Pro určení podélné reaktance X_{ad} se musí nejdříve určit hodnota magnetizační indukčnosti:

$$\begin{aligned} L_{mi} &= t_p \cdot l_{eskut} \cdot \frac{\mu_0}{\delta_{ef}} \cdot \frac{4 \cdot q}{Q} \cdot \left(N_s \cdot k_{v1} \cdot \frac{m}{\pi} \right)^2 = \\ &= 0,0392 \cdot 0,088 \cdot \frac{12,56 \cdot 10^{-7}}{0,007878} \cdot \frac{4 \cdot 0,5}{42} \cdot \left(128 \cdot 0,866 \cdot \frac{3}{\pi} \right)^2 \\ &= 2,94 \cdot 10^{-4} H \end{aligned} \quad (3.92)$$

δ_{ef} je efektivní hodnota vzduchové mezery, která bere v potaz permanentní magnety.

$$\delta_{ef} = \delta' + \frac{h_m}{\mu_r} = 0,001 + \frac{0,0072}{1,05} = 0,007878 m \quad (3.93)$$

Podélná reaktance se pak spočte jako:

$$X_{ad} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{mi} = 2 \cdot \pi \cdot 186,1 \cdot 2,94 \cdot 10^{-4} = 0,343 \Omega \quad (3.94)$$

Pro výpočet rozptylové reaktance $X_{a\sigma}$ se musí nejdříve spočítat rozptylová indukčnost:

$$\begin{aligned} L_{a\sigma} &= 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{l_{eskut}}{q \cdot \frac{2p}{2}} \cdot N_s^2 \cdot (\lambda_c + \lambda_d) + L_{dif} = \\ &= 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,088}{0,5 \cdot 14} \cdot 128^2 \cdot (0,0891 + 1,45) + 1,36 \cdot 10^{-4} \\ &= 0,932 \cdot 10^{-3} H \end{aligned} \quad (3.95)$$

L_{dif} představuje diferenční indukčnost vypočítanou dle:

$$L_{dif} = L_{mi} \cdot \tau_{dif} = 2,94 \cdot 10^{-4} \cdot 0,46 = 1,36 \cdot 10^{-4} \text{ H} \quad (3.96)$$

λ_{ξ} je činitel magnetické vodivosti rozptylu čel vinutí:

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_{eskut}} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) \\ &= 0,34 \cdot \frac{0,5}{0,088} \cdot (0,0629 - 0,64 \cdot 0,66 \cdot 0,0392) = 0,0891 \end{aligned} \quad (3.97)$$

Pro výpočet činitele magnetické vodivosti drážky λ_d je potřeba spočítat činitele k'_β a k_β . Hodnota těchto činitelů závisí na kroku vinutí. Podle [1] platí pro $\frac{2}{3} \leq \beta < 1$ následující vztahy:

$$k'_\beta = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3\beta) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,666) = 0,75 \quad (3.98)$$

$$k_\beta = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3k'_\beta) = \frac{1}{4} \cdot (1 + 3 \cdot 0,75) = 0,8125 \quad (3.99)$$

Činitel drážkového rozptylu:

$$\begin{aligned} \lambda_d &= \frac{h_2}{3 \cdot b_1} \cdot k_\beta + \left(\frac{3 \cdot b_1}{b_1 + 2 \cdot b_0} + \frac{h_0}{b_0} \right) \cdot k_\beta \\ &= \frac{45}{3 \cdot 12,73} \cdot 0,8125 + \left(\frac{3 \cdot 12,73}{12,73 + 2 \cdot 2,9} + \frac{0,7}{2,9} \right) \cdot 0,8125 = 1,45 \end{aligned} \quad (3.100)$$

Rozptylová reaktance:

$$X_{a\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{a\sigma} = 2 \cdot \pi \cdot 186,1 \cdot 0,932 \cdot 10^{-3} = 1,08 \Omega \quad (3.101)$$

Celková synchronní reaktance stroje:

$$X_d = X_{ad} + X_{a\sigma} = 1,08 + 0,343 = 1,433 \Omega \quad (3.102)$$

Jmenovitá impedance stroje:

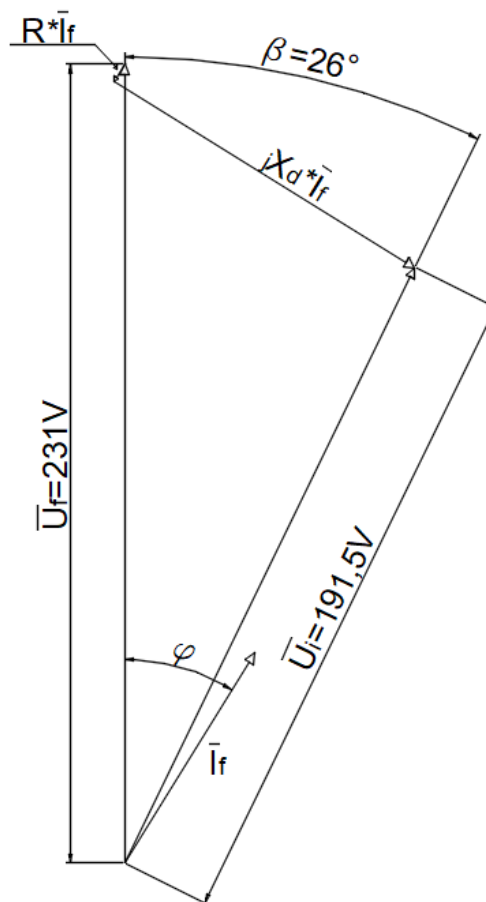
$$Z_n = \frac{U_f}{I_f} = \frac{231}{71,5} = 3,23 \Omega \quad (3.103)$$

Pomocí fázorového diagramu na *Obr. 3.6* lze ověřit hodnotu činitele k_e jako poměr fázového a indukovaného napětí:

$$k_e = \frac{U_i}{U_f} = \frac{191,5}{231} = 0,829 \quad (3.104)$$

Vypočítaná hodnota se tedy od předpokládané téměř neliší. Fázorový diagram byl sestrojen v programu AutoCAD.

Zátěžný úhel je dle fázorového diagramu $\beta = 26^\circ$.



Obr. 3.6 Fázorový diagram

3.6 Výpočet ztrát a účinnosti stroje

- **Ztráty ve vinutí statoru**

Jouleovy ztráty:

$$\Delta P_j = m \cdot R_{a_{Cu_{120C}}} \cdot I_f^2 = 3 \cdot 0,085 \cdot 71,5^2 = 1315,6 \text{ W} \quad (3.105)$$

- **Ztráty v železe**

Hmotnost zubů:

$$m_{Fe_z} = \rho_{Fe} \cdot Q \cdot l_{e_{skut}} \cdot b_z \cdot h_z = 7600 \cdot 42 \cdot 0,088 \cdot 0,0013 \cdot 0,04795 = 17,5 \text{ kg} \quad (3.106)$$

Hmotnost jha statoru:

$$\begin{aligned} m_{Fe_{j1}} &= \rho_{Fe} \cdot l_{e_{skut}} \cdot h_{j1} \cdot (D_e + h_{j1}) \cdot \pi = \\ &= 7600 \cdot 0,088 \cdot 0,0087 \cdot (0,2367 + 0,0087) \cdot \pi = 4,5 \text{ kg} \end{aligned} \quad (3.107)$$

ρ_{Fe} je hustota železa zvolená podle katalogových listů z Přílohy A.

Celková hmotnost aktivního železa statoru:

$$m_{Fe_s} = m_{Fe_z} + m_{Fe_{j1}} = 17,5 + 4,5 = 22 \text{ kg} \quad (3.108)$$

Celková hmotnost stroje:

$$m_c = m_{Fe_s} + m_{Fe_r} + m_{Cu} + m_{PM} = 22 + 7,5 + 11,04 + 3,4 = 43,94 \text{ kg} \quad (3.109)$$

Magnetické ztráty v železe zubů statoru:

$$\Delta P_{Fe_z} = k_{dz} \cdot \Delta p_{1,8/186} \cdot m_{Fe_z} = 2 \cdot 23 \cdot 17,5 = 805 \text{ W} \quad (3.110)$$

Magnetické ztráty ve jhu statoru:

$$\Delta P_{Fe_{j1}} = k_{dj} \cdot \Delta p_{1,4/184} \cdot m_{Fe_{j1}} = 2 \cdot 13,5 \cdot 4,5 = 121,5 \text{ W} \quad (3.111)$$

Při výpočtu ztrát v železe se musí brát v potaz ztráty, které vzniknou např. zkratováním plechů ořepy, porušením laku apod. Tyto ztráty jsou vyjádřeny činiteli k_{dz} a k_{dj} . Činitelé byly zvoleni podle [1] pro synchronní motory, kde $P < 100 \text{ kW}$. $\Delta p_{1,8/186}$ a $p_{1,4/186}$ jsou ztrátová čísla plechů, která byla určena na základě katalogového listu v Příloze A.

Celkové ztráty v železe:

$$\Delta P_{Fe} = \Delta P_{Fe_{j1}} + \Delta P_{Fe_z} = 121,5 + 805 = 926,5 \text{ W} \quad (3.112)$$

- **Mechanické ztráty**

Výpočet obvodové rychlosti:

$$v = \pi \cdot \frac{n}{30} \cdot \frac{D_2}{2} = \pi \cdot \frac{798}{30} \cdot \frac{0,385}{2} = 16,07 \text{ m/s} \quad (3.113)$$

Výpočet mechanických ztrát:

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= v^2 \cdot k_\rho \cdot D_2 \cdot (l_{e_{skut}} + 0,6 \cdot t_p) \\ &= 16,07^2 \cdot 10 \cdot 0,385 \cdot (0,088 + 0,6 \cdot 0,0392) = 111 \text{ W} \end{aligned} \quad (3.114)$$

Koeficient k_ρ byl zvolen dle [2] pro malé uzavřené stroje.

- **Ztráty v rotorovém jhu a v permanentních magnetech**

Tyto ztráty se z dostupných zdrojů nepodařilo spočítat, ale na základě studie [21] a [22] by měly být velmi malé a neměly by příliš ovlivnit účinnost stroje, proto nejsou v této části uvažovány. Tyto ztráty byly simulovány v programu MOTOR-CAD viz kapitola 5.1.

- **Celkové ztráty stroje:**

$$\Delta P = 1,2 \cdot (\Delta P_m + \Delta P_{Fe} + \Delta P_j) = 1,2 \cdot (111 + 926,5 + 1315,6) = 2823,72 \text{ W} \quad (3.115)$$

Protože motor bude napájen z PWM měniče, musí se při výpočtu brát v potaz navýšení ztrát o 20%. Výsledná účinnost stroje je pak:

$$\eta = \frac{P}{P + \Delta P} \cdot 100 = \frac{40000}{40000 + 2823,72} \cdot 100 = 93,4 \% \quad (3.116)$$

4 Ověření návrhu stroje

K ověření návrhu stroje byl použit software ANSYS electronics, ve kterém se nejprve pomocí modulu RMXprt provede analytický výpočet a následně ověří výsledek metodou konečných prvků v modulu Maxwell2D.

4.1 Ověření v RMXprt analytickým výpočtem

V RMXprt se nejprve zvolí typ stroje a následně se zadají všechny výše vypočtené parametry (konstrukční rozměry, vinutí stroje, použité materiály atd.) a zvolí se při jakých vstupních hodnotách má analýza proběhnout. Zvolené vstupní hodnoty jsou tedy: $P = 40000 \text{ W}$, $U_s = 400 \text{ V}$, $n = 798 \text{ ot/min}$ a $T = 120 \text{ }^\circ\text{C}$. Kromě konstrukčních parametrů se také zadávají mechanické ztráty stroje, které jsou v tomto případě $\Delta P_m = 111 \text{ W}$.

V tabulkách 4.1 až 4.5 je porovnání výsledků:

- **Hlavní parametry stroje**

Tabulka 4.1 Tabulka základních parametrů stroje

	Analytický výpočet	RMXprt
U_i	191,5 V	192 V
I_f	71,5 A	66,9 A
A	49939 A/m	46762 A/m
σ_{Cu}	6,63 A/mm ²	6,21 A/mm ²
ΔP_m	111 W	111 W
ΔP_j	1315,6 W	1198,8 W
ΔP_{Fe}	926,5 W	612 W
ΔP	2823,72 W	1922 W
η	93,4%	95,4%
n	798 ot/min	798 ot/min
M_n	478,9 Nm	478,6 Nm
β	26°	24°

V tabulce 4.1 je porovnání základních parametrů stroje. Chyba oproti teoretickým předpokladům je většinou $\leq 6,5 \%$. Tento výsledek se považuje za přijatelný. Největší

odchylku od teoreticky vypočítaných hodnot mají ztráty v železe ΔP_{Fe} , kde se výsledky liší o 33 %. Tato chyba je pravděpodobně způsobena různou aproximací ztrátového čísla v železe Δp . Výsledné ztráty se liší o 32 %, ale je potřeba vzít v úvahu, že ve vypočítaných ztrátách je 20 % zvýšení vlivem PWM.

- **Hmotnost stroje**

Tabulka 4.2 Tabulka hmotností jednotlivých částí stroje

	Analytický výpočet	RMxpřt
m_{Cu}	11,04 kg	11,12 kg
m_{PM}	3,4 kg	3,36 kg
m_{Fe_s}	22 kg	21,728 kg
m_{Fe_r}	7,5 kg	7,5 kg
m_c	43,94 kg	43,49 kg

Díky porovnání hmotností jednotlivých částí stroje lze ověřit, že všechny rozměry stroje jsou zadány do RMxpřt v souladu s teoretickým návrhem. Důležité je zejména porovnat váhu permanentních magnetů, kde by měl být rozdíl minimální. V tomto případě je rozdíl přibližně 1,4 g na jeden magnet.

- **Magnetické sycení materiálů**

Tabulka 4.3 Tabulka magnetických indukcí v jednotlivých částech stroje

	Analytický výpočet	RMxpřt
B_Z	1,88 T	1,82 T
B_{j1}	1,4 T	1,45 T
B_{j2}	1,28 T	1,22 T
B_δ	0,95 T	0,945 T
B_{PM}	0,95 T	0,94 T

Porovnání magnetického sycení jednotlivých částí stroje v tabulce 4.3 ukazuje, že dle Ansysu by mělo dojít k poklesnutí magnetické indukce v zubu statoru a vzduchové mezeře. To je pravděpodobně způsobeno rozptylovým tokem, který při výpočtu nebyl brán v úvahu. [2] tento rozptyl udává 5 – 20 %. Navýšení B_{j1} mohlo vzniknout různým způsobem výpočtu.

- **Rozměry satorové drážky**

Tabulka 4.4 Tabulka rozměrů satorové drážky

	Analytický výpočet	RMxpřt
b_1	12,738 mm	12,74 mm
b_2	6,05 mm	6 mm
k_w	0,466	0,57

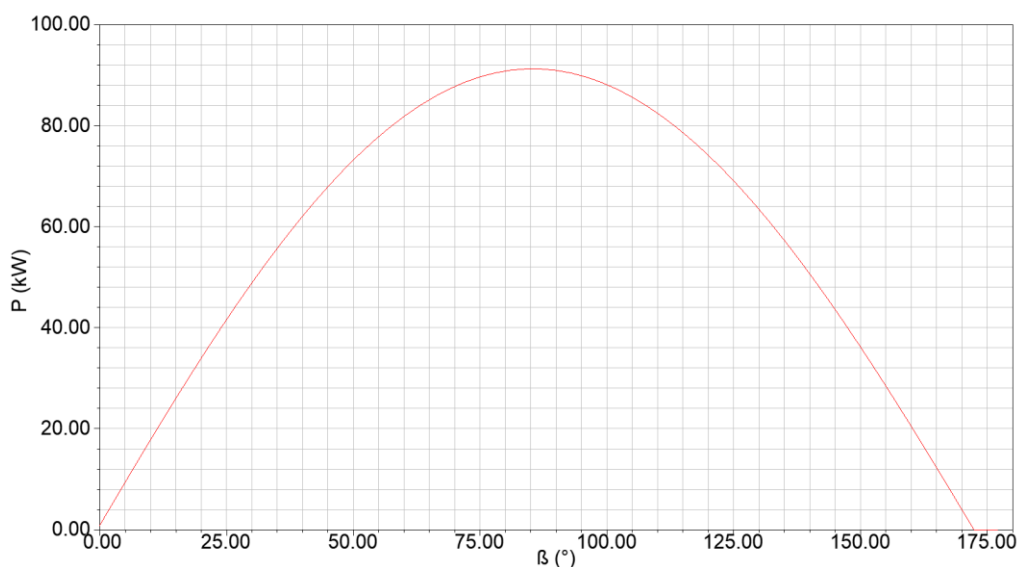
Při ověření návrhu drážky je důležité porovnat činitele plnění drážky k_w a ověřit si tak, zda se vinutí vejde do drážky. Zde došlo k rozdílu výsledků o 22 %. Protože se shodují velikosti drážky, došlo k této odchylce pravděpodobně tím, že RMxpřt bere při výpočtu v úvahu izolaci vodiče, nebo zajištění vodičů klínem. Oba vypočítané činitele však splňují, že $k_w \leq 0,6$. Drážku lze proto vyhodnotit jako vyhovující.

- **Náhradní parametry stroje**

Tabulka 4.5 Tabulka náhradních parametrů stroje

	Analytický výpočet	RMxpřt
$R_{a_Cu_120^{\circ}C}$	0,085 Ω	0,089 Ω
L_{mi}	$2,94 \cdot 10^{-4} H$	$3,13 \cdot 10^{-4} H$
$L_{a\sigma}$	$0,932 \cdot 10^{-3} H$	$0,92327 \cdot 10^{-3} H$
k_{v1}	0,866	0,866

- **Momentová charakteristika**



Obr. 4.1 Momentová charakteristika stroje

Z fázorového diagramu na *Obr. 3.6* by měl být zátěžný úhel při jmenovitém stavu stroje $\beta = 26^\circ$. Tato hodnota byla potvrzena v RMxprt viz *tabulka 4.1*. Protože synchronní stroj je stabilní do $\beta < 90^\circ$, je teoreticky možné dosáhnout výkonu až $P = 90 \text{ kW}$. Na *Obr. 4.1* je momentová charakteristika analyticky vypočítaná v RMxprt.

4.2 Metoda konečných prvků v Maxwell2D

Po ověření analytického výpočtu je možné přejít na kontrolu stroje pomocí metody konečných prvků v řešiči Maxwell2D. Protože se jedná o 2D zobrazení, musí se v Maxwellu2D definovat indukčnost, kterou 2D model neobsahuje. Tato indukčnost se skládá z rozptylové indukčnosti čel vinutí a indukčnosti umístěné před strojem (sít', měnič apod.). V tomto případě byla uvažována pouze indukčnost čel L_{ζ} . Protože indukčnost čel lze vypočítat několika způsoby a výsledky se liší, byl po domluvě s vedoucím práce použit následující postup:

Indukčnost čel podle [1]:

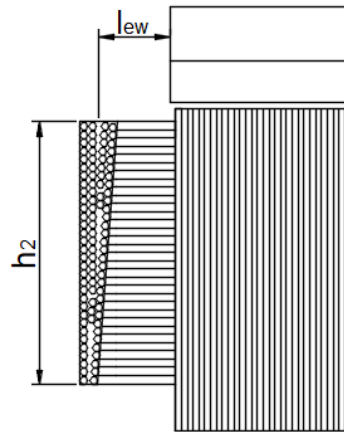
$$L_{\zeta_1} = 2 \cdot \mu_0 \cdot \frac{l_{e_{skut}}}{q \cdot \frac{2p}{2}} \cdot N_s^2 \cdot \lambda_{\zeta} = 2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{0,088}{0,5 \cdot 14} \cdot 128^2 \cdot 0,089 = 4,62 \cdot 10^{-5} H \quad (4.1)$$

Indukčnost čel podle [2]:

$$L_{\zeta_3} = \frac{Q}{m} \cdot \mu_0 \cdot \mu_{env} \cdot \frac{\left(\frac{V_d}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot (l_{ew})^2}{h_2} \quad (4.2)$$

$$= \frac{42}{3} \cdot 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,2 \cdot \frac{\left(\frac{128}{2}\right)^2 \cdot \pi \cdot (0,0125)^2}{0,045} = 9,42 \cdot 10^{-4} H$$

μ_{env} je permeabilita okolního prostředí (železné části stroje apod.) a volí se v intervalech 1,2 – 2. Bylo zvoleno $\mu_{env} = 1,2$. l_{ew} je střední vzdálenost čela cívky od rotoru, viz *Obr. 4.2*. Tato vzdálenost je dle [2] doporučena jako $l_{ew} = \frac{b_m}{2} = \frac{0,025}{2} = 0,0125 \text{ m}$. Po překontrolování v programu AutoCAD vychází tato vzdálenost i pro výše vypočtenou délku čela $l_{\zeta} = 0,0629 \text{ m}$.



Obr. 4.2 Průřez čel vinutí

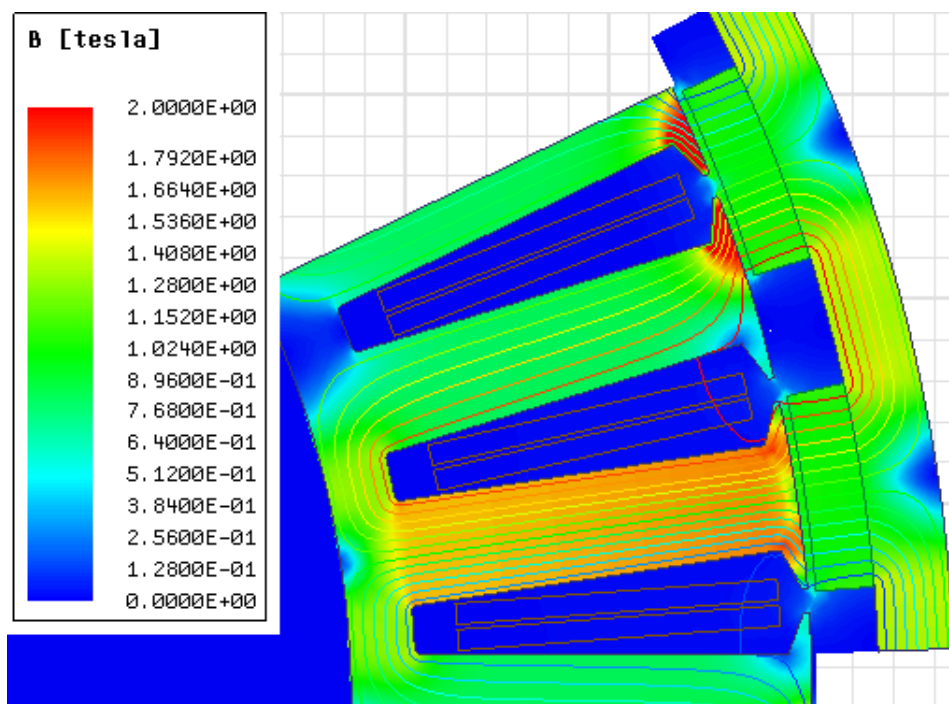
Indukčnost čel, kterou vypočítal RMxpřt:

$$L_{\check{c}_2} = 2,48 \cdot 10^{-5} H \quad (4.3)$$

Protože ani jeden z uvedených výsledků nevedl k přesné simulaci, byla použita průměrná hodnota z těchto výsledků:

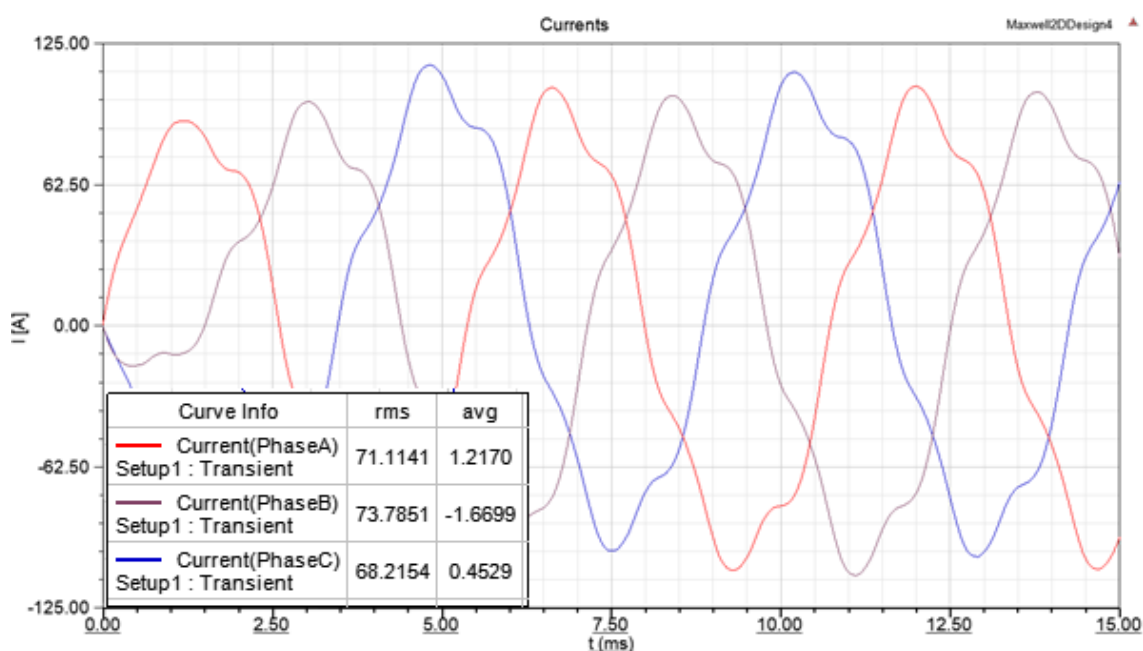
$$L_{\check{c}} = \frac{L_{\check{c}_1} + L_{\check{c}_2} + L_{\check{c}_3}}{3} = \frac{4,62 \cdot 10^{-5} + 9,42 \cdot 10^{-4} + 2,48 \cdot 10^{-5}}{3} = 3,37 \cdot 10^{-4} H \quad (4.4)$$

Krok simulace byl nastaven na $5 \cdot 10^{-5} s$.



Obr. 4.3 Rozložení magnetického pole

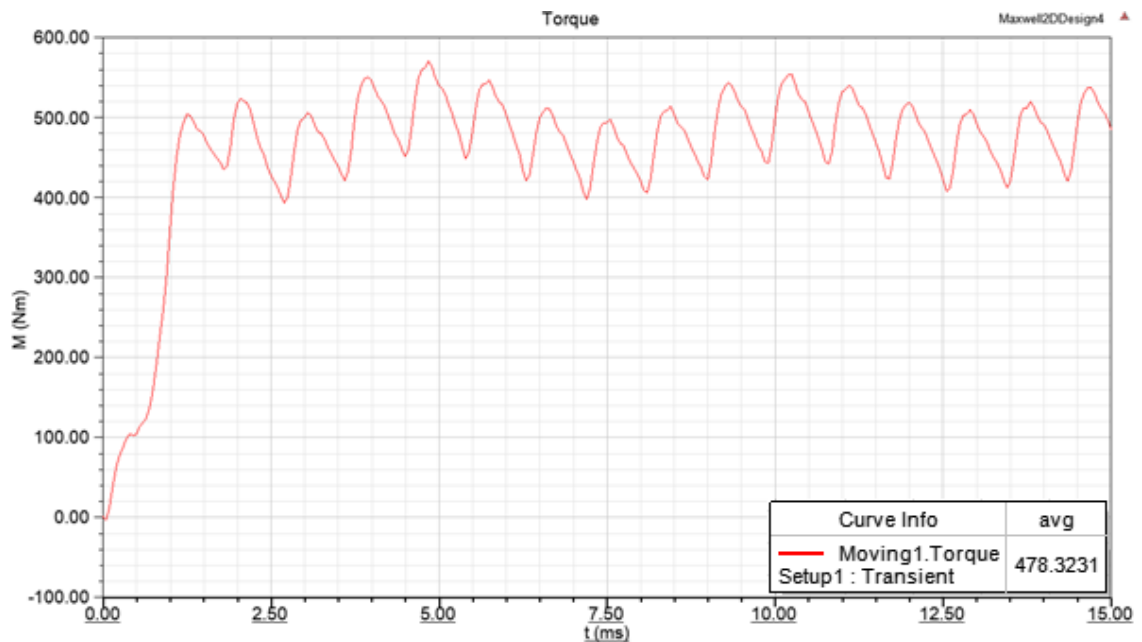
Na Obr. 4.3 je znázorněno magnetické pole. Hodnoty magnetických indukcí vyšly dle simulace: $B_z = 1,76 T$, $B_{j1} = 1,43 T$, $B_\delta = 0,96 T$ a $B_{j2} = 1,3 T$. Nasimulované hodnoty se přibližně shodují s vypočítanými. Pokles indukce v zubu statoru je přisuzován rozptylovým tokům viz kapitola 4.1.



Obr. 4.4 Průběh proudu v jednotlivých fázích

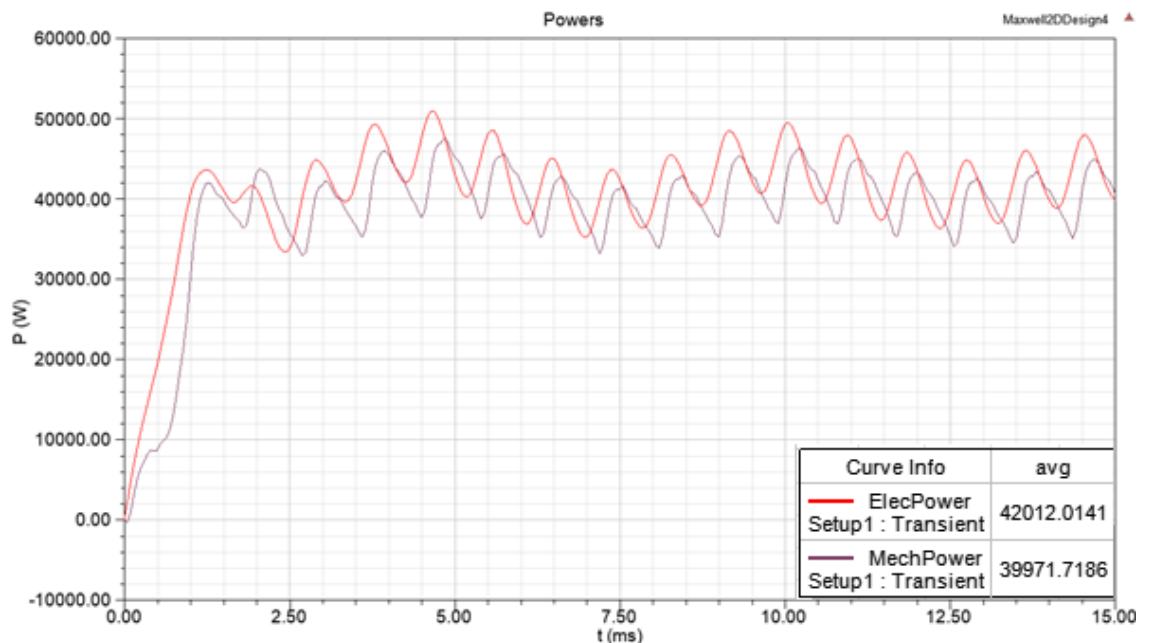
Na Obr. 4.4 je nasimulovaný průběh proudů v jednotlivých fázích. Ke zvlnění dochází,

protože se jedná o zubové vinutí. Analytický výpočet proudu byl $I_f = 71,5 \text{ A}$. Nasimulované hodnoty se tedy pohybují kolem analytického výpočtu.



Obr. 4.5 Průběh momentu

Jmenovitý moment na Obr. 4.5 byl dosažen při zátěžném úhlu $\beta = 28^\circ$.

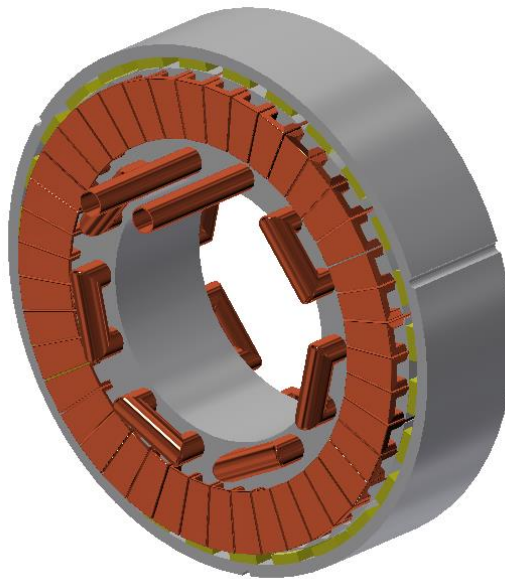


Obr. 4.6 Průběh výkonu a příkonu

Graf na Obr. 4.6 znázorňuje mechanický výkon a elektrický příkon stroje. Po odeznění přechodového děje v čase $t \geq 2,5 \text{ ms}$ se průměrné hodnoty ustálí a nasimulované ztráty jsou $\Delta P = 2041 \text{ W}$. Tato hodnota odpovídá ztrátám vypočítaným v RMxprt.

5 Oteplení stroje

Protože je stroj umístěn v kole vozidla, je zapotřebí, aby byl dobře chráněn proti vnějším vlivům. Proto byl zvolen plně uzavřený stroj se stupněm krytí *IP 55*, je tak zabráněno vniknutí prachu a vody z vozovky. Jako chlazení byl zvolen typ *IC 3 W 6* dle normy *ČSN EN 60034-6*, kdy je stroj chlazen vodou, která je přivedena spirálou procházející těsně pod jhem statoru. Spirála je tvořena 14 měděnými trubkami (1 trubka na 3 drážky), viz *Obr. 5.1*. Vnější průměr jedné trubky je 20 mm a tloušťka stěny je 1 mm . Motor je chráněn ocelovým pláštěm o tloušťce 5 mm .



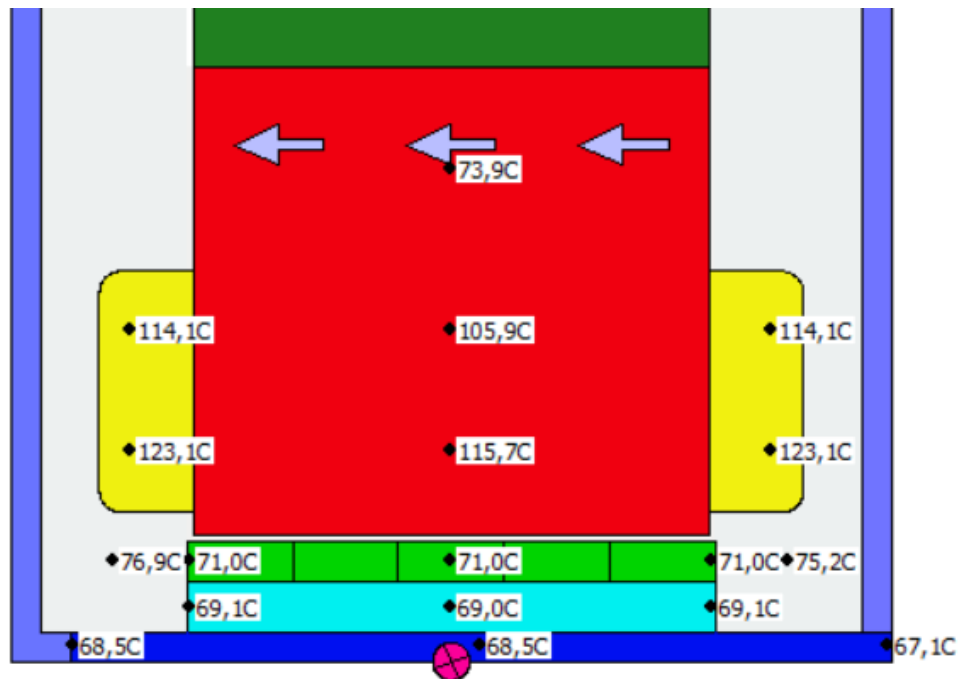
Obr. 5.1 Stator a rotor stroje se zavedeným chlazením

Protože použité permanentní magnety *N35UH* mají nejvyšší povolenou teplotu $180\text{ }^{\circ}\text{C}$, byla zvolena tepelná třída *F* s maximální teplotou $155\text{ }^{\circ}\text{C}$, aby bylo zabráněno přehřátí magnetu a ztráty jejich magnetických vlastností. Pokud je uvažována teplota okolního prostředí $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, je maximální dovolená hodnota oteplení $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

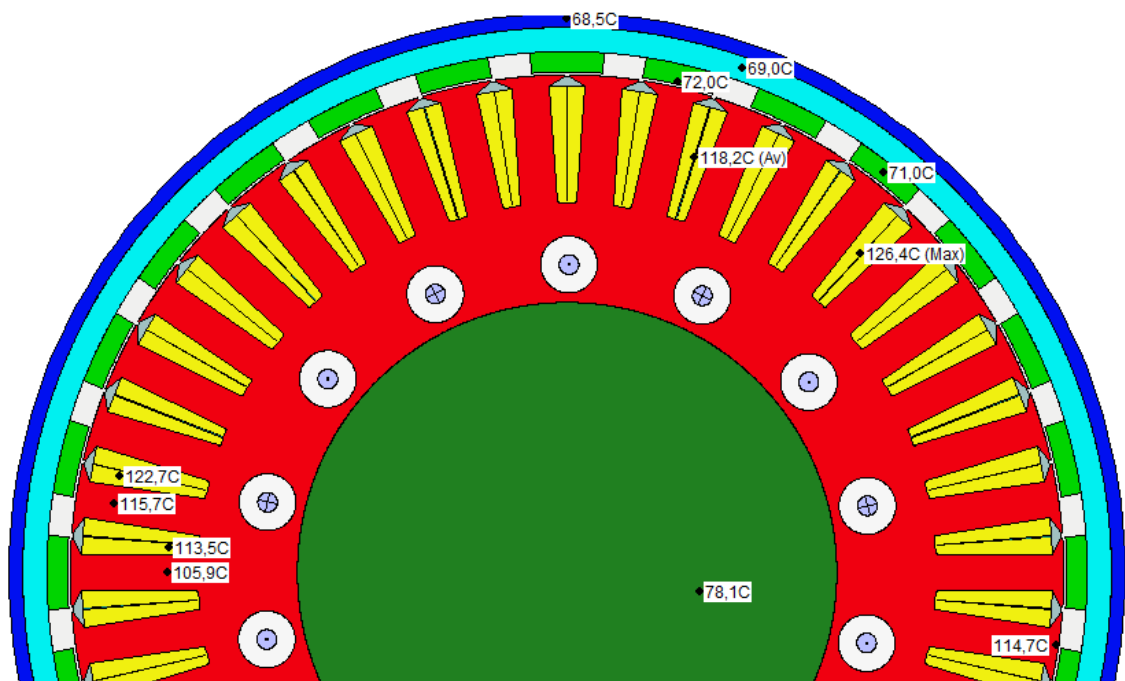
5.1 Simulace oteplení v programu MOTOR-CAD

Pro simulaci oteplení byl zvolen program *MOTOR-CAD*, který umožňuje tepelné simulace s přesným nastavením geometrie stroje a použitého chlazení. Jako chladicí kapalina byla použita voda o vstupní teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a průtoku 4 l/min . Simulace byla provedena při okolní teplotě $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a jmenovitých otáčkách stroje $n = 798\text{ ot/min}$. Uvažované ztráty stroje byly dosazeny na základě analytického výpočtu viz kapitola 3.6: $\Delta P_j = 1315,6\text{ W}$, $\Delta P_{Fe} = 926,5\text{ W}$, $\Delta P_m = 111\text{ W}$. Dále jsou uvažovány ztráty v permanentních magnetech

$\Delta P_{PM} = 25 \text{ W}$ a ztráty v jhu rotoru $\Delta P_{Fe_j2} = 1,6 \text{ W}$. Tyto ztráty byly spočítány v programu MOTOR-CAD.



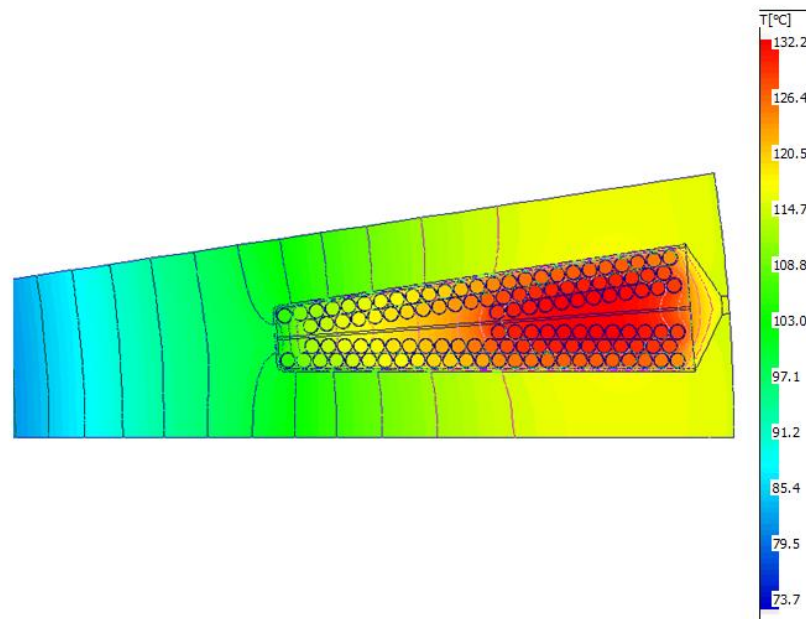
Obr. 5.2 Podélný řez strojem s nasimulovanými hodnotami oteplení



Obr. 5.3 Příčný řez strojem s nasimulovanými hodnotami oteplení

Na Obr. 5.2 a Obr. 5.3 je vidět příčný a podélný průřez strojem s vypočítanou teplotou ve vinutí, magnetech a povrchu stroje. Magnety N35UH mají dle katalogového listu (v Příloze B) nejvyšší přípustnou pracovní teplotu $180 \text{ }^{\circ}\text{C}$, nejvyšší nasimulovaná teplota magnetu je $72 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

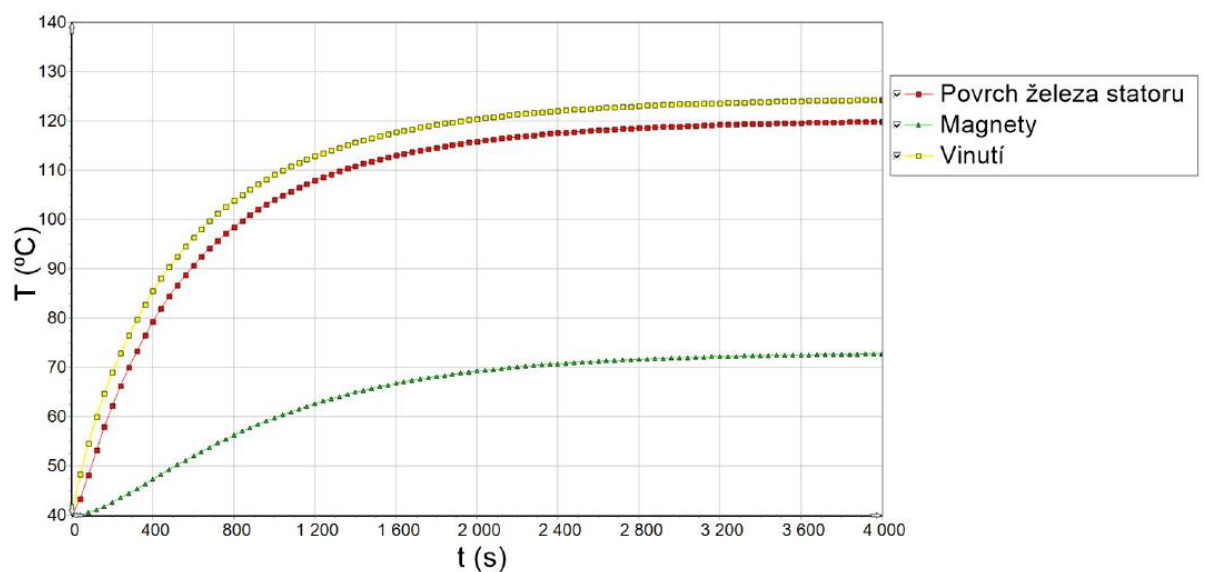
Průměrná teplota vinutí je $118,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Maximální teplota vinutí je $126,4\text{ }^{\circ}\text{C}$. Průměrná teplota zubu je $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Na Obr. 5.4 je detailní rozložení teploty v drážce a v okolním železe.



Obr. 5.4 Oteplení v drážce

Ve jmenovitém stavu jsou tedy splněny podmínky pro nejvyšší teplotu magnetu a pro teplotní třídu F.

Na závěr byla provedena transientní analýza v programu MOTOR-CAD, která ukázala, že se motor oteplí na jmenovitou teplotu za 3600 s. Průměrné hodnoty oteplení jednotlivých částí motoru jsou v grafu na Obr. 5.5.

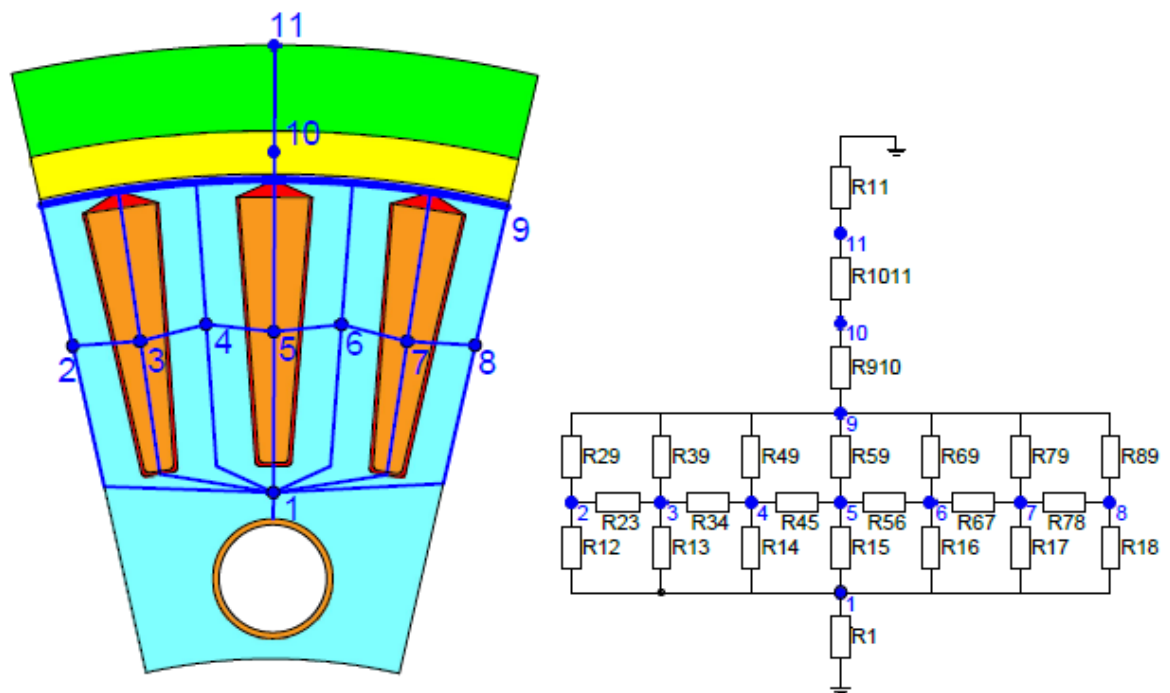


Obr. 5.5 Graf závislosti oteplení na čase

5.2 Analytický výpočet oteplení

Pomocí analytického výpočtu byl proveden zjednodušený výpočet oteplení při jmenovité rychlosti $n = 798 \text{ ot/min}$ pro $\frac{1}{14}$ stroje podle [2]. Na Obr. 5.6 je $\frac{1}{14}$ stroje s vyznačenou tepelnou sítí a jejími uzly. Jednotlivé části stroje jsou barevně odlišeny:

- Zelená – rotorové jho s pláštěm (pro zjednodušení byl uvažován stejný materiál pro jho i plášť)
- Žlutá – magnety se vzduchovou mezerou (pro zjednodušení výpočtu nebyla uvažována vzduchová mezera mezi magnety)
- Světle modrá – plechy statoru
- Červená – izolace
- Oranžová – statorové vinutí a trubka chlazení
- Bílá – chladicí kapalina a vzduchová mezera



Obr. 5.6 $\frac{1}{14}$ stroje s vyznačenou tepelnou sítí

Jednotlivé tepelné odpory mezi vyznačenými uzly byly vypočítány následovně:

Teplený odpor mezi chladicí trubicou a uzlem č.1:

$$R_1 = \frac{\frac{h_{j1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot o_1} + \frac{1}{\alpha_v \cdot D_T \cdot \pi \cdot l_{e_skut}} \quad (5.1)$$

$$= \frac{\frac{0,0087}{2}}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,055} + \frac{1}{1000 \cdot 0,02 \cdot \pi \cdot 0,088} = 0,2 \text{ K/W}$$

$D_T = 0,02 \text{ m}$ je vnější průměr chladicí trubky, $\alpha_v = 1000 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ je součinitel přestupu tepla chladicí kapaliny (voda) a $\lambda_{Fe} = 45 \frac{W}{mK}$ je součinitel tepelné vodivosti ocele, obě konstanty byly zvoleny po domluvě s vedoucím práce. $o_1 = 0,055 \text{ m}$ je délka oblouku, který protíná $\frac{1}{14}$ stroje v místě uzlu č.1:

$$o_1 = \frac{\pi \cdot (D_1 - 2 \cdot h_d - h_{j1})}{14} = \frac{\pi \cdot (0,35 - 2 \cdot 0,004795 - 0,0087)}{14} = 0,055 \text{ m} \quad (5.2)$$

Ostatní odpory byly označeny podle toho, mezi kterými uzly leží:

$$R_{15} = \frac{\frac{h_{j1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot b_2} + \frac{l_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot l_{e_skut} \cdot b_2} + \frac{\frac{h_2}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot l_{e_skut} \cdot b_{2,s}} \quad (5.3)$$

$$= \frac{\frac{0,0087}{2}}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,00605} + \frac{0,0003}{0,16 \cdot 0,088 \cdot 0,00605}$$

$$+ \frac{\frac{0,045}{2}}{1,119 \cdot 0,088 \cdot 0,0076} = 33,5 \text{ K/W}$$

$l_{iz} = 0,0003 \text{ m}$ je tloušťka izolace a $\lambda_{iz} = 0,16 \frac{W}{mK}$ je součinitel tepelné vodivosti izolace, oboje zvoleno dle [1]. $b_{2,s} = 0,0076 \text{ m}$ je střední šířka dolní poloviny drážky, která byla odměřena v programu AutoCAD. $\lambda_{Cu} = 1,119 \frac{W}{mK}$ je součinitel tepelné vodivosti vinutí. Protože výpočet tohoto koeficientu je komplikovaný a tato práce není primárně zaměřena na oteplení, byla jeho hodnota zvolena podle programu MOTOR-CAD.

$$\begin{aligned}
 R_{13} = R_{17} &= \frac{l_1}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot b_2} + \frac{l_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot l_{e_skut} \cdot b_2} + \frac{\frac{h_2}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot l_{e_skut} \cdot b_{2_s}} \\
 &= \frac{0,0192}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,00605} + \frac{0,0003}{0,16 \cdot 0,088 \cdot 0,00605} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,045}{2}}{1,119 \cdot 0,088 \cdot 0,0076} = 34,12 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

$l_1 = 0,0192 \text{ m}$ je vzdálenost od uzlu č.1 ke spodnímu ukončení vzdálenější drážky, která byla odměřena v programu AutoCAD.

$$R_{14} = R_{16} = \frac{l_2}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot b_z} = \frac{0,034}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,013} = 0,66 \text{ K/W} \tag{5.5}$$

$l_2 = 0,034 \text{ m}$ je vzdálenost od uzlu č.1 ke středu bližšího zubu, která byla odměřena v programu AutoCAD.

$$R_{12} = R_{18} = \frac{l_3}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot b_z} = \frac{0,052}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,013} = 1,01 \text{ K/W} \tag{5.6}$$

$l_3 = 0,052 \text{ m}$ je vzdálenost od uzlu č.1 ke středu vzdálenějšího zubu, která byla odměřena v programu AutoCAD.

$$\begin{aligned}
 R_{23} = R_{34} = R_{45} = R_{56} = R_{67} = R_{78} &= \frac{\frac{b_{sd}}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot l_{e_skut} \cdot h_2} + \frac{l_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot l_{e_skut} \cdot h_2} + \frac{\frac{b_z}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot h_2} \\
 &= \frac{0,00935}{1,119 \cdot 0,088 \cdot 0,045} + \frac{l_{iz}}{0,16 \cdot 0,088 \cdot 0,045} \\
 &\quad + \frac{0,013}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,045} = 1,56 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{5.7}$$

$b_{sd} = 0,00935 \text{ m}$ je šířka středu drážky, která byla odměřena v programu AutoCAD.

$$\begin{aligned}
 R_{39} = R_{59} = R_{79} &= \frac{\frac{h_2}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot l_{e_skut} \cdot b_1} + \frac{h_0 + h_1}{\lambda_{iz} \cdot l_{e_skut} \cdot b_0} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot b_0 \cdot l_{e_skut}} \\
 &= \frac{0,045}{1,119 \cdot 0,088 \cdot 12,73} + \frac{0,00295}{0,16 \cdot 0,088 \cdot 0,0029} \\
 &\quad + \frac{1}{62,44 \cdot 0,0029 \cdot 0,088} = 152,93 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{5.8}$$

$\alpha_1 = 62,44 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ je součinitel přestupu tepla ze statoru do vzduchové mezery, který se vypočítá:

$$v = \frac{\pi \cdot D_1 \cdot n}{60} = \frac{\pi \cdot 0,35 \cdot 798}{60} = 14,61 \text{ m/s} \tag{5.9}$$

$$R_e = \frac{D_1 \cdot v}{\nu} = \frac{0,35 \cdot 14,61}{2,17 \cdot 10^{-5}} = 235748,59 \tag{5.10}$$

$\nu = 2,11 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$ je kinematická vazkost vzduchu, která byla zvolena na základě údajů z [1].

$$N_u = 0,21 \cdot R_e^{0,677} = 0,21 \cdot 235748,59^{0,677} = 910,68 \tag{5.11}$$

$$\alpha_1 = \frac{N_u \cdot \lambda_{vz}}{D_1} = \frac{910,68 \cdot 0,024}{0,35} = 65,17 \frac{W}{m^2 \cdot K} \tag{5.12}$$

$\lambda_{vz} = 0,024 \frac{W}{mK}$ je součinitel tepelné vodivosti vzduchu, který byl zvolen podle [1].

$$\begin{aligned}
 R_{49} = R_{69} &= \frac{\frac{h_2}{2} + h_0 + h_1}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot b_{z_p}} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot b_{z_p} \cdot l_{e_skut}} \\
 &= \frac{\frac{0,045}{2} + 0,00295}{45 \cdot 0,088 \cdot 0,02328} + \frac{1}{62,44 \cdot 0,02328 \cdot 0,088} = 8,09 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{5.13}$$

$$\begin{aligned}
 R_{29} = R_{89} &= \frac{\frac{h_2}{2} + h_0 + h_1}{\lambda_{Fe} \cdot l_{e_skut} \cdot \frac{b_{z_p}}{2}} + \frac{1}{\alpha_1 \cdot \frac{b_{z_p}}{2} \cdot l_{e_skut}} \\
 &= \frac{\frac{0,045}{2} + 0,00295}{45 \cdot 0,088 \cdot \frac{0,02328}{2}} + \frac{1}{62,44 \cdot \frac{0,02328}{2} \cdot 0,088} = 16,18 \text{ K/W}
 \end{aligned} \tag{5.14}$$

$b_{z_p} = 0,02328 \text{ m}$ je šířka konce zubu odměřena v programu AutoCAD.

$$\begin{aligned}
 R_{910} &= \frac{\frac{h_m}{2}}{\lambda_m \cdot l_r \cdot o_3} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot o_2 \cdot l_r} \\
 &= \frac{\frac{0,0072}{2}}{7,6 \cdot 0,09 \cdot 0,0806} + \frac{1}{62,57 \cdot 0,079 \cdot l_r} = 2,31 \text{ K/W}
 \end{aligned}
 \tag{5.15}$$

$\lambda_m = 7,6 \frac{W}{mK}$ je součinitel tepelné vodivosti magnetu, který byl zvolen podle katalogového listu v příloze B. $\alpha_2 = 62,57 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ je součinitel přestupu tepla ze vzduchové mezery do magnetů, jeho výpočet byl proveden stejně jako v případě α_1 , ale vnější průměr statoru D_1 byl nahrazen vnitřním průměrem permanentních magnetů $D_{PM} = 0,352 \text{ m}$. $o_2 = 0,079 \text{ m}$ je délka oblouku na povrchu permanentních magnetů a $o_3 = 0,0806 \text{ m}$ je délka oblouku ve středu permanentních magnetů (uzel č.10). o_2 a o_3 byly vypočteny podle vztahu (5.2), ve kterém byl nahrazen průměr tak, aby odpovídal vzdálenosti oblouku od středu stroje: $o_2 \rightarrow D_{PM} = 0,352 \text{ m}$ a $o_2 \rightarrow D_{PM,S} = D_{PM} + h_m = 0,352 + 0,0072 = 0,3592 \text{ m}$.

$$\begin{aligned}
 R_{1011} &= \frac{\frac{h_m}{2}}{\lambda_m \cdot l_r \cdot o_3} + \frac{h_{j2} + h_p}{\lambda_{Fe} \cdot l_r \cdot o_4} \\
 &= \frac{\frac{0,0072}{2}}{7,6 \cdot 0,09 \cdot 0,0806} + \frac{0,0093 + 0,005}{45 \cdot 0,09 \cdot 0,088} = 0,105 \text{ K/W}
 \end{aligned}
 \tag{5.16}$$

$h_p = 0,005 \text{ m}$ je tloušťka ocelového pláště kolem stroje. $o_4 = 0,088 \text{ m}$ je délka oblouku na povrchu $\frac{1}{14}$ stroje. Byla vypočtena podle vztahu (5.2), kde byl nahrazen použitý průměr celkovým průměrem stroje: $o_4 \rightarrow D_c = D_2 + 2 \cdot h_p = 0,385 + 0,01 = 0,395 \text{ m}$. Pro zjednodušení zde bylo uvažováno, že plášť stroje a použitá rotorová ocel mají stejný součinitel tepelné vodivosti.

Tepelný odpor mezi okolním prostředím a uzlem č.11.

$$R_{11} = \frac{1}{\alpha_3 \cdot l_r \cdot o_4} = \frac{1}{65,17 \cdot 0,09 \cdot 0,088} = 1,93 \text{ K/W}
 \tag{5.17}$$

$\alpha_3 = 65,17 \frac{W}{m^2 \cdot K}$ je součinitel přestupu tepla mezi okolním prostředím a vnějším povrchem stroje. Byl vypočten podle vztahů (5.9) - (5.12), kde byl nahrazen použitý průměr celkovým průměrem stroje $D_c = 0,395 \text{ m}$.

Protože k výpočtu teplot v 11 uzlech je zapotřebí soustava o 11 lineárních rovnicích přepisují se rovnice do následujícího maticového tvaru [20]:

$$[\mathbf{G}] \cdot [\mathbf{T}] = [\mathbf{P}] \quad (5.18)$$

↓

$$[\mathbf{T}] = [\mathbf{G}]^{-1} \cdot [\mathbf{P}] \quad (5.19)$$

$[\mathbf{T}]$ představuje matici 1×11 , ve které jsou zatím neznámé teploty v jednotlivých uzlech. V matici 1×11 $[\mathbf{P}]$ jsou vyjádřeny ztráty vzniklé v jednotlivých uzlech, teplota chladiva a teplota okolního prostředí. Teplota chladiva a okolního prostředí byla uvažována $40 \text{ }^\circ\text{C}$ a ztráty v uzlech byly vypočítány jako:

$$\Delta P_1 = \frac{\Delta P_{Fej1}}{14} = \frac{121,5}{14} = 8,67 \text{ W} \quad (5.20)$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_4 = \Delta P_6 = \Delta P_8 = \frac{\Delta P_{Fez}}{Q} = \frac{805}{42} = 19,16 \text{ W} \quad (5.21)$$

Protože je stroj uzavřený, bylo s vedoucím práce domluveno, že se vezmou v úvahu celkové Jouleovo ztráty ve vinutí a nebudou se dělit na drážkovou část a čela vinutí. Výsledné ztráty v jedné drážce jsou pak:

$$\Delta P_3 = \Delta P_5 = \Delta P_7 = \frac{\Delta P_j}{Q} = \frac{1315,6}{42} = 31,32 \text{ W} \quad (5.22)$$

Ztráty v permanentních magnetech (uzel č.9) a ztráty v rotorovém jhu (uzel č.10).

$$\Delta P_9 = \frac{\Delta P_{PM}}{14} = \frac{25}{14} = 1,78 \text{ W} \quad (5.23)$$

$$\Delta P_{10} = \frac{\Delta P_{Fe-j2}}{14} = \frac{1,6}{14} = 0,11 \text{ W} \quad (5.24)$$

$[\mathbf{G}]$ je vodivostní matice 11×11 , ve které jsou tepelné vodivosti jednotlivých částí stroje. Tepelné vodivosti se používají místo tepelných odporů kvůli snadnějšímu zápisu matice. Značení tepelných vodivostí odpovídá značení tepelných odporů, tzn.:

$$G_1 = \frac{1}{R_1} \quad (5.25)$$

Kompletní maticová rovnice je přiložena v příloze H.

Tabulka 5.1 Výsledné teploty

Uzel č.	Část stroje	Teplota
1	Střed statorového jha	73,97 °C
2	Střed krajního zubu	106,17 °C
3	Střed krajní drážky	128,09 °C
4	Střed zubu	104,56 °C
5	Střed drážky	127,28 °C
6	Střed zubu	104,56 °C
7	Střed krajní drážky	128,09 °C
8	Střed krajního zubu	106,17 °C
9	Vzduchová mezera	84,65 °C
10	Střed permanentního magnetu	61,07 °C
11	Vnější povrch rotoru	59,98 °C

V tabulce 5.1 jsou výsledné teploty v jednotlivých částech stroje, které byly získány vyřešením rovnice (5.19) v programu MATLAB.

Protože MOTOR-CAD neumožňuje výpočet teploty v libovolné části stroje, je v tabulce 5.2 provedeno porovnání maximálních vypočítaných a nasimulovaných teplot u vinutí, a průměrné hodnoty nasimulované v zubech statoru a ve vzduchové mezeře.

Tabulka 5.2 Porovnání vypočítaných a nasimulovaných teplot

Část stroje	Analytický výpočet	MOTOR-CAD
Statorové jho	73,97 °C	73,9 °C
Drážková část vinutí	128,09 °C	126,4 °C
Zub	106,17 °C	110,8 °C
Vzduchová mezera	84,65 °C	93,35 °C
Střed magnetu	61,07 °C	71 °C
Rotorové jho a plášť stroje	59,98 °C	68,5 °C

Vypočítaná teplota vinutí, zubu statoru a statorového jha se téměř shoduje s nasimulovanými teplotami. K nejvyššímu rozdílu mezi teplotami dochází ve středu magnetu, kde je rozdíl 9,99 °C. Tento rozdíl může být způsoben velkým zjednodušením analyticky počítaného modelu

a neuvažováním toho, že například kinematická viskozita vzduchu se mění v závislosti na teplotě apod.

Je potřeba nezapomenout, že jak simulace, tak analytický výpočet je proveden pro zjednodušený model stroje a nelze se na ně tak plně spoléhat. Pro lepší tepelnou analýzu stroje by bylo potřeba sestavit přesnější tepelnou síť a provést simulaci například v programu ANSYS, který umožňuje plný 3D model stroje.

5.3 Ověření geometrie stroje v programu FEMM

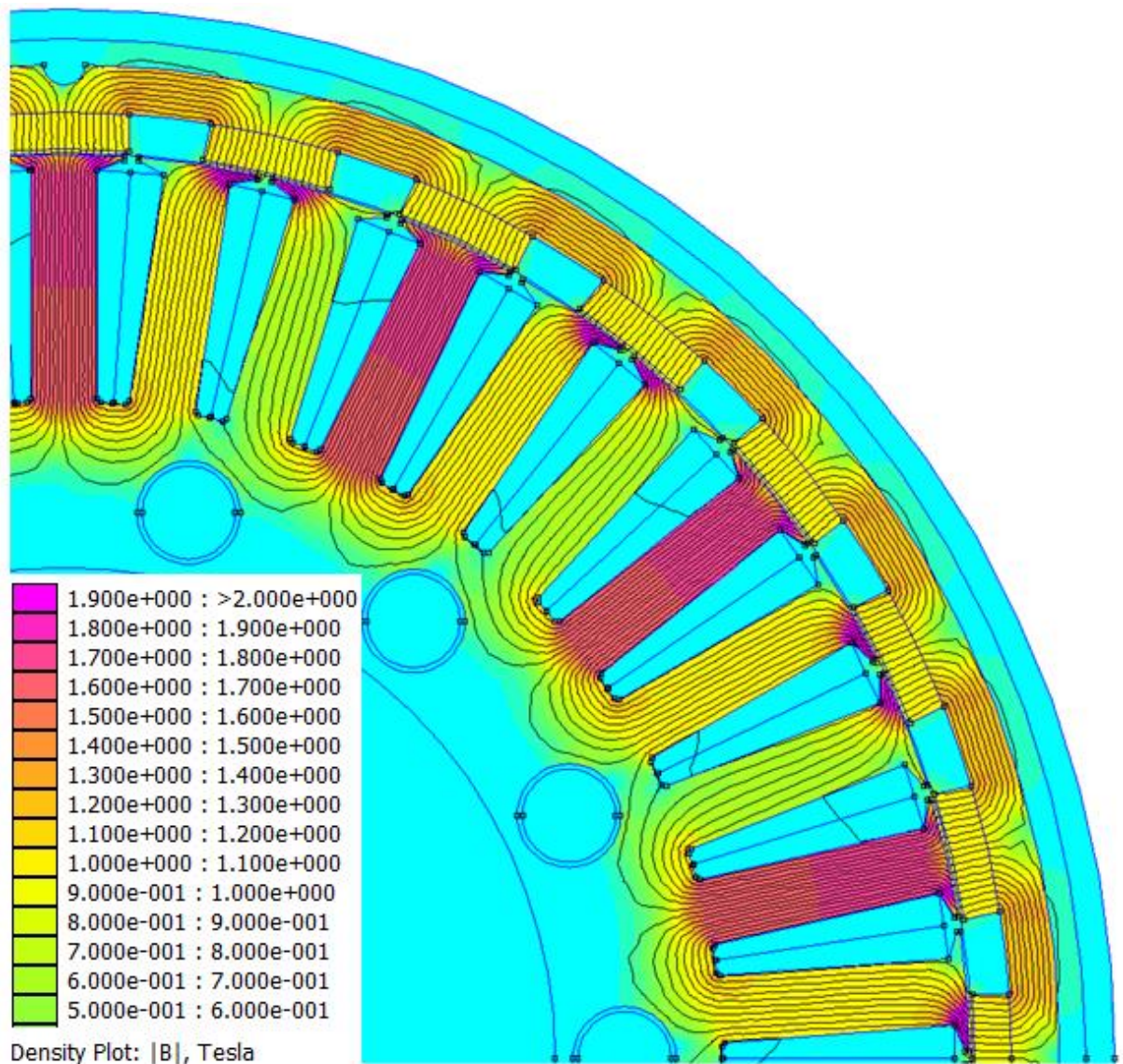
Protože po přidání chladících kanálů dojde ke změně geometrie stroje a mohlo by tak dojít k narušení magnetického pole uvnitř stroje, byla provedena kontrolní analýza pomocí MKP v programu FEMM. Pro simulaci byla zvolena konstantní hodnota proudu v jednom časovém okamžiku:

$$U = \frac{I_f \cdot \sqrt{2}}{a} = \frac{71,5 \cdot \sqrt{2}}{7} = 14,4 \text{ A} \quad (5.26)$$

$$V = \frac{U}{2} = \frac{14,4}{2} = 7,2 \text{ A} \quad (5.27)$$

$$W = \frac{U}{2} = \frac{14,4}{2} = 7,2 \text{ A} \quad (5.28)$$

Dále byly nadefinovány materiálové vlastnosti podle katalogových hodnot v příloze A a příloze B. Pro obal kolem rotoru a vnitřek statoru byla zvolena běžná konstrukční ocel z materiálové knihovny FEMMu. Jako materiál chladících trubek byla zvolena měď, také z materiálové knihovny FEMMu. Permeabilita vody byla zvolena $\mu_r = 1$ a jako okolní prostředí byl zvolen vzduch s okrajovou podmínkou *mixed*.



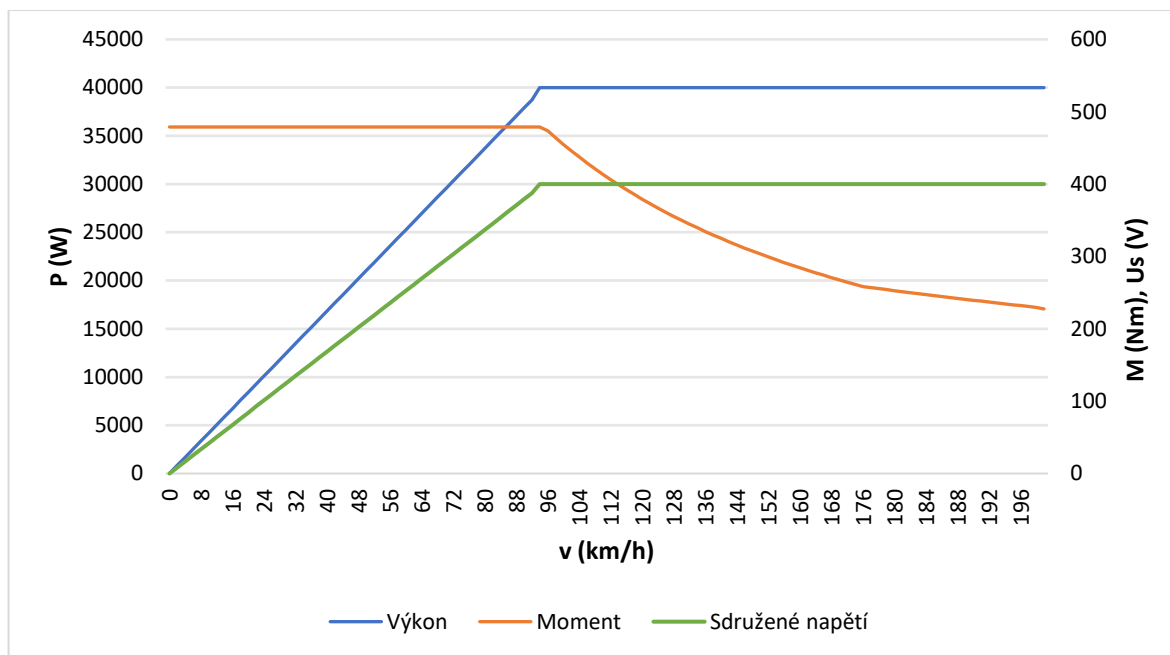
Obr. 5.7 Rozložení magnetického pole stroje s přidaným pláštěm a chlazením

Výsledná simulace na Obr. 5.7 dokazuje, že vložené chlazení magnetické pole téměř nedeformuje. V horní části rotoru stroje jsou po obvodu stroje umístěny 3 půlkruhové drážky, které umožňují pevnější spojení s kostrou stroje. Tyto drážky výsledné pole také nijak nedeformují. Výsledné magnetické indukce jsou $B_z = 1,73 T$, $B_{j_1} = 1,04 T$, $B_\delta = 1 T$ a $B_{j_2} = 1,27 T$. Protože došlo ke zvětšení statorového jha, došlo ke snížení indukce o $0,4 T$. Zbylé hodnoty vyšly téměř shodně s ANSYSSEM (viz kapitola 4).

6 Analýza provozu stroje

6.1 Analýza ustálené jízdy automobilu

Podle [23] jsou na elektromotor v elektromobilu kladeny stejné nároky jako na trakční motory, tzn. konstantní moment do jmenovité rychlosti, konstantní fázový proud po celou dobu provozu a konstantní výkon po dosažení jmenovité rychlosti. Charakteristika pro navržený motor je na (Obr. 6.1).



Obr. 6.1 Graf průběhu momentu, výkonu a sdruženého napětí v závislosti na rychlosti vozidla

Protože je proud konstantní, reguluje se motor pomocí hodnoty napětí:

$$U_s = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot I_f \cdot \eta \cdot \cos\varphi} \quad (6.1)$$

V programu RMXprt bylo analyticky ověřeno chování stroje při různých rychlostech podle grafu na obrázku. Simulace byla provedena při teplotě vinutí 127 °C.

Tabulka 6.1 Tabulka nasimulovaných hodnot při různých rychlostech

v (km/h)	12	24	48	72	95	150	200
I_f (A)	78	68,1	67	67	66,9	66	74
P (W)	5052	10105	20210	30315	40000	40000	40000
M (Nm)	477	480	478	479	478,6	303,5	227
η (%)	74	88	93	94,62	95,39	94,2	91,8
β (°)	32,7	25,2	24,2	24	24	25,7	26,3

V tabulce 6.1 jsou uvedeny výsledné hodnoty. Lze říci, že kromě nízkých otáček, kde účinnost strmě klesá, se stroj chová podle předpokladů. Po důkladnější analýze stroje by mělo být možné stroj plynule regulovat, např. vhodným vektorovým řízením.

Pro lepší popsání chování motoru, je proveden zjednodušený výpočet momentu, který je potřeba k pohybu automobilu. Výpočet byl proveden podle [5], [6].

Aby se automobil pohyboval, musí být síla která ho pohání větší než součet odporů, které ho brzdí:

$$F = O_f + O_s + O_a + O_{vz} \quad (6.2)$$

Odpor valení:

$$O_f = m \cdot g \cdot \cos(\alpha) \cdot f \quad (6.3)$$

α je sklon vozovky, $f = 0,015$ je součinitel valivého odporu asfaltu, gravitační zrychlení je $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Odpor vzduchu:

$$O_{vz} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{vz} \cdot c_x \cdot S_x \cdot (v_v + v_z)^2 \quad (6.4)$$

$\rho_{vz} = 1,25 \text{ kg/m}^3$ je hustota vzduchu, $c_x = 0,32$ je součinitel vzdušného odporu, $S_x = 1,6 \text{ m}^2$ je čelní plocha vozidla, v_v je rychlost vozidla a v_z je rychlost protivětru.

Odpor stoupání:

$$O_s = m \cdot g \cdot \sin\left(\arctg\left(\frac{s}{100}\right)\right) \quad (6.5)$$

s je sklon vozovky.

Odpor zrychlení:

$$O_a = m \cdot a \cdot v \quad (6.6)$$

v je součinitel vlivu rotačních částí. Tato hodnota se pro osobní automobil se spalovacím motorem pohybuje v rozmezí 1,05 – 1,5 a bere v potaz odpor všech rotačních částí, které mají vliv na jízdu. Protože je motor uložen v kole a odpadá tak spousta rotačních částí, které jsou u spalovacího motoru nezbytné, je zvolena nejnižší možná hodnota $v = 1,05$. a je zrychlení vozidla.

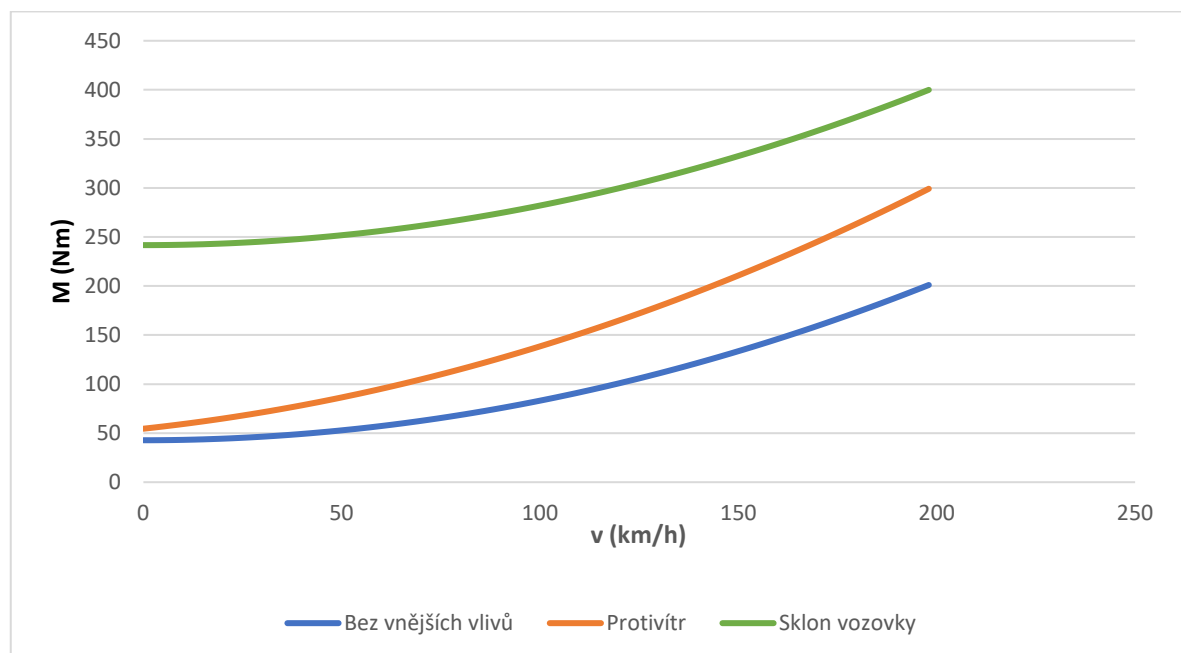
Celkový moment jednoho motoru k překonání jízdních odporů:

$$M = \frac{F}{2} \cdot r_d \quad (6.7)$$

r_d je dynamický poloměr pneumatiky, který bere v potaz její deformaci vlivem jízdy a hmotnosti automobilu. Pro použitou běžnou radiální pneumatiku se spočte:

$$r_d = 0,92 \cdot \frac{d}{2} = 0,92 \cdot \frac{d}{2} = 0,92 \cdot \frac{0,6319}{2} = 0,29 \text{ m} \quad (6.8)$$

Pomocí těchto rovnic bylo ověřeno, zda jsou motory dostatečně výkonné pro ustálený pohyb automobilu.



Obr. 6.2 Graf závislosti momentu na rychlosti při různých okolních podmínkách

Graf na *Obr. 6.2* ukazuje, jaký je přibližný potřebný moment v závislosti na okolních podmínkách. Rychlost protivětru je zvolena pro mírný víchr podle Beaufortovy stupnice síly větru jako $v_z = 15 \text{ m/s}$ a úhel sklonu vozovky je zvolen $s = 7 \%$ [18]. Soustava dvou motorů by tedy měla být pro běžné podmínky na vozovce dostatečně silná k plynulé jízdě v ustálené rychlosti.

6.2 Analýza zrychlení automobilu

Pomocí výše uvedených rovnic bylo vypočítáno, v jakém čase zrychlí automobil z $0 - 100 \text{ km/h}$ na rovné vozovce, bez protivětru, aniž by překročil jmenovitý moment motoru. Protože nejvyšší odpor by měl automobil překonat při dosažení maximální rychlosti, je podmínka pro maximální zrychlení taková, aby nebyl překročen jmenovitý moment motoru při rychlosti $v = 100 \text{ km/h}$. Z rovnic 6.7, 6.6 a 6.2 je pro výpočet zrychlení provedena následující úprava:

$$F = O_f + O_s + m \cdot a \cdot v + O_{vz} \quad (6.9)$$

↓

$$a = \frac{\frac{2 \cdot M}{r_d} - O_f - O_s - O_{vz}}{m \cdot v} \quad (6.10)$$

V *tabulce 6.2* jsou uvedeny výsledné hodnoty.

Tabulka 6.2 Tabulka maximálního zrychlení při jmenovitém výkonu při různých hmotnostech vozidla

$m_v \text{ (kg)}$	$a \text{ (m/s}^2\text{)}$	$t \text{ (s)}$
2000	1,3	21,3
1500	1,78	15,6
1000	2,72	10,2

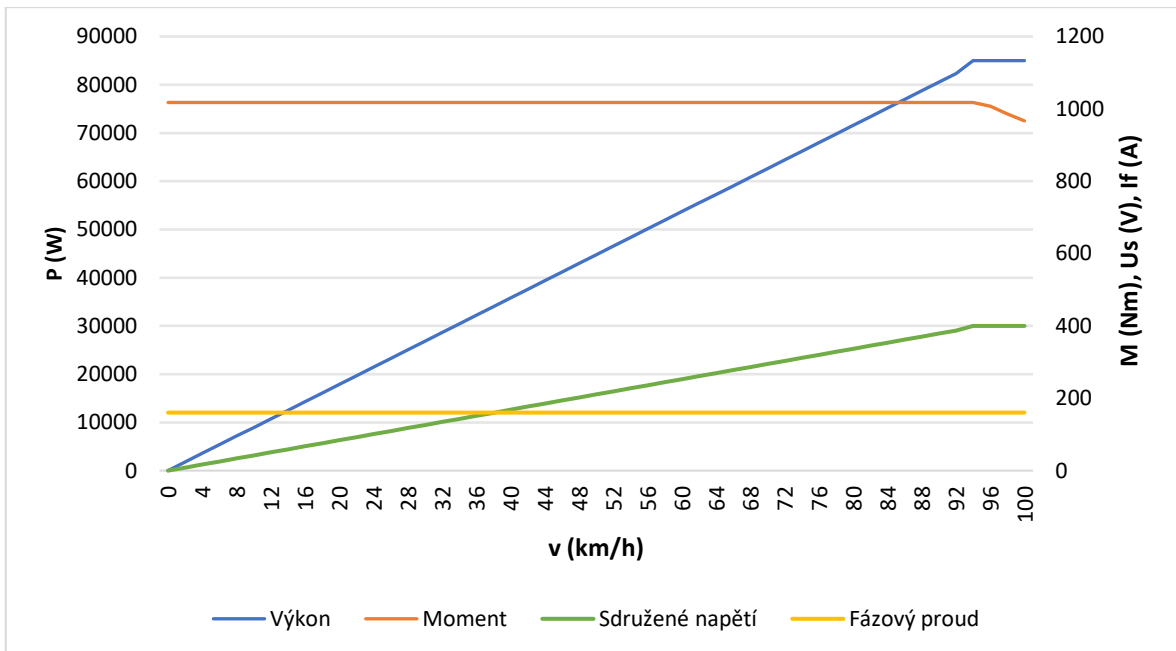
Tyto časy nejsou příliš příznivé, protože automobily se spalovacími motory dosahují v průměru z $0 - 100 \text{ km/h}$ za 10s. Protože motor dosahuje svého jmenovitého výkonu při zátěžném úhlu $\beta < 30^\circ$, je možné využít i zbytek momentové charakteristiky (*Obr. 4.1*) a dosáhnout tak maximálního výkonu až 90 kW . Pokud však motor pracuje v maximálním zátěžném úhlu $\beta = 90^\circ$, hrozí vypadnutí ze synchronismu. Proto byl zvolen výkon 85 kW a spočítáno maximální zrychlení při stejných podmínkách.

Tabulka 6.3 Tabulka maximálního zrychlení při maximálním výkonu při různých hmotnostech vozidla

m_v (kg)	a (m/s ²)	t (s)
2000	3,05	9,1
1500	4,15	6,69
1000	6,23	4,45

Jmenovitý moment jednoho stroje je při těchto zrychleních $M = 1017 \text{ Nm}$. Při výpočtu proudu je potřeba uvažovat pokles účinnosti v závislosti zvětšení zátěžného úhlu. Nová hodnota účinnosti byla zvolena $\eta = 90 \%$. Proud procházející jednou fází je pak:

$$I_f = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_s \cdot \cos\varphi \cdot \eta} = \frac{85000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,85 \cdot 0,9} = 160,3 \text{ A} \quad (6.11)$$



Obr. 6.3 Graf průběhu momentu, výkonu, fázového proudu a sruženého napětí v závislosti na rychlosti vozidla při zvoleném maximálním výkonu 85 kW

Na Obr. 6.3 jsou vypočítané rozběhové charakteristiky. Pro tyto charakteristiky bylo provedeno ověření v RMXprt. Výsledky těchto simulací jsou v tabulce 6.4.

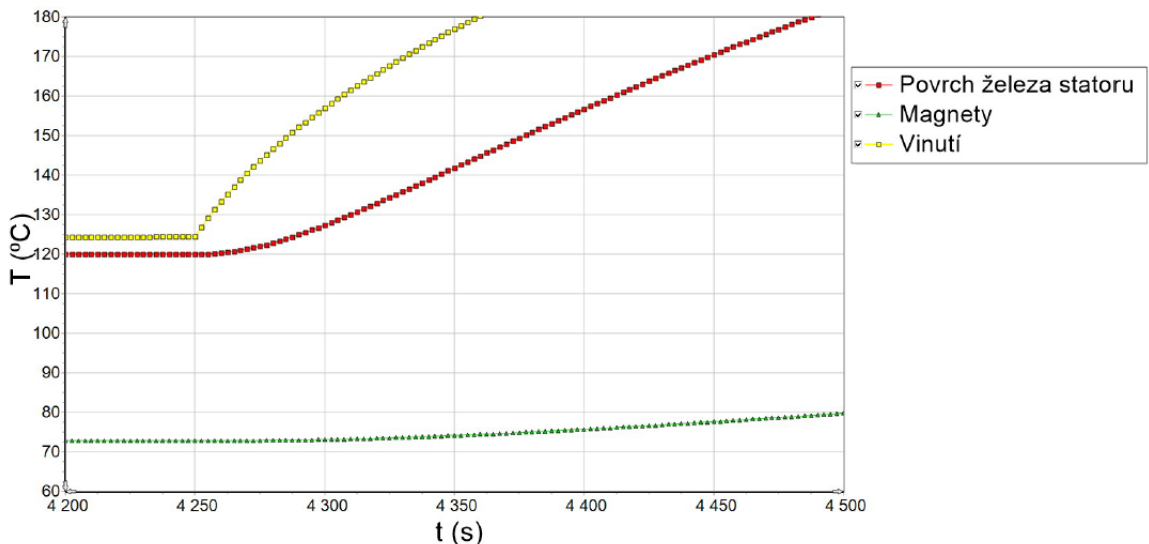
Tabulka 6.4 Tabulka nasimulovaných hodnot při různých rychlostech

v (km/h)	20	40	60	80	100
I_f (A)	171	195	174	168	160
P (W)	14 510	34 858	53 700	76 000	85 000
M (Nm)	824	990	1 017	1 017	1 017
η (%)	64	76	86	89	91,6
β (°)	72	81	69	66	65

Zde již dochází k větším rozdílům, než tomu bylo při podobném ověření parametrů stroje v kapitole 6.1. Při vhodně zvoleném vektorovém řízení stroje by však mělo být možné dosáhnout přesných výsledků.

Protože došlo ke zvýšení proudu, dojde i ke zvýšení oteplení stroje. Byla proto provedena transienční simulace v programu MOTOR-CAD, aby se přibližně zjistilo, kdy teplota motoru překročí povolenou teplotu 155 °C. Nově uvažované Jouleovy ztráty jsou:

$$\Delta P_j = m \cdot R_{a_{Cu_{150C}}} \cdot I_f^2 = 3 \cdot 0,0943 \cdot 160,3^2 = 7269,42 \text{ W} \quad (6.12)$$



Obr. 6.4 Graf závislosti oteplení na čase při fázovém proudu 160,3A

Simulace je provedena pro motor zahřátý na teploty uvedené v kapitole 5.1. Podle simulace (Obr. 6.4) by měl stroj po navýšení výkonu překročit nejvyšší povolenou teplotu zvolené izolační třídy F (155 °C) za 50 s. Protože takto přetížený motor by měl pracovat pouze v rozmezí několika sekund při potřebě maximálního zrychlení, mělo by být možné motor využít

k vyššímu zrychlení.

Výpočty v této kapitole jsou pouze přibližné a zanedbávají několik faktorů, např. vliv sbíhavosti kol, změnu parametrů v závislosti na rychlosti, změnu odporu vinutí v závislosti na teplotě apod. Pro dosažení přesnějších výsledků by bylo zapotřebí podrobit vozidlo přesné analýze.

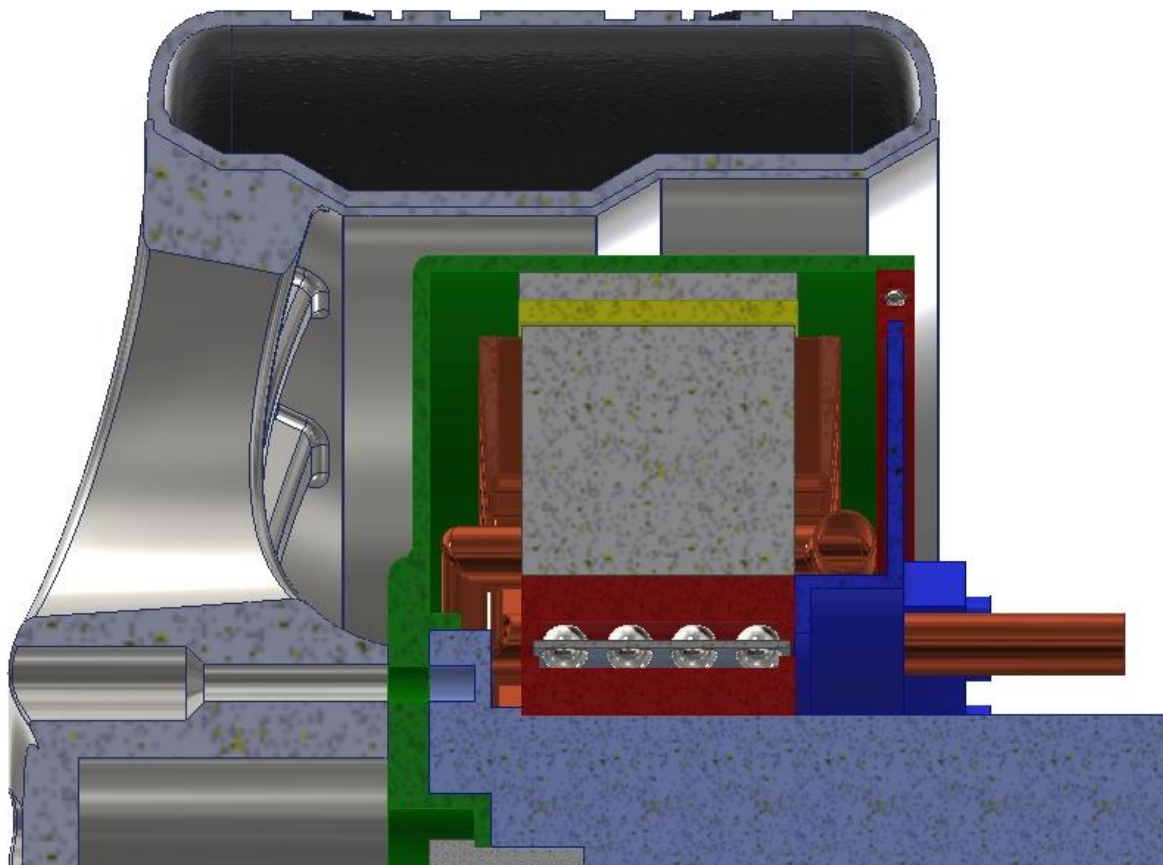
7 Konstrukční uspořádání a 3D model motoru

Dle zadání vedoucího práce bylo navrženo možné řešení konstrukčního provedení a následně nakreslen 3D model. Na *Obr. 7.1* a *Obr. 7.2* je příčný a podélný řez strojem. Pro lepší přehlednost jsou jednotlivé části označeny různými barvami:

- Zelená – přední kryt statoru
- Modrá – zadní kryt statoru
- Červená – ložiska
- Žlutá – permanentní magnety
- Světle modrá – hřídel
- Měděná – chladicí potrubí a vinutí
- Šedivá – statorový a rotorový paket

Představa konstrukčního uspořádání je taková, že zadní strana krytu je pevně spojena s nosnými ložisky ve středu stroje a je na ní vyvedena svorkovnice a přívody chlazení. Zadní strana je pomocí ložisek spojena s předním krytem. Tyto ložiska mají pouze vodící funkci. Přední kryt je přes tlakový spoj pevně spojen s rotorem. Prokluzu zabírají 3 půlkruhové drážky. Přední kryt je spojen šroubovým spojením s hřídelí a s kolem automobilu. Na hřídeli mohou být vyvedeny brzdové kotouče. Ve středu motoru jsou červeně znázorněna nosná ložiska. Stroj je pod různými úhly zobrazen na *Obr. 7.3*. Pro vytvoření modelu byl použit software Autodesk INVENTOR. Pneumatika s ráfkem byly převzaty z databáze: [31].

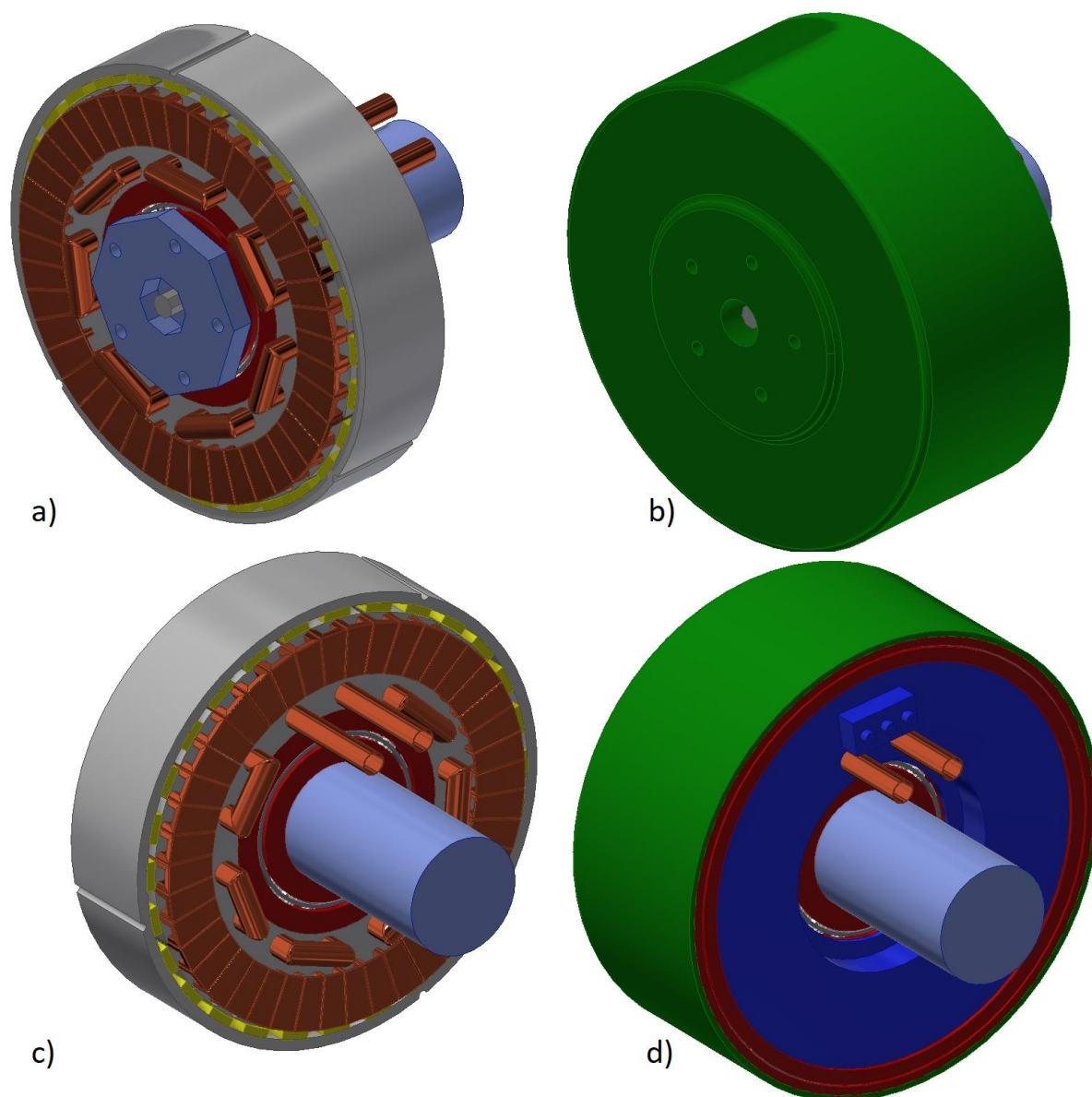
Jedná se pouze o hrubé uspořádání stroje. Návrh neobsahuje např. stažení statorového paketu, dimenzování ložisek, hřídele a pláště stroje, svorkovnici apod. Příčný a podélný řez rotoru a statorového paketu je přiložen v *příloze F* a *příloze G*.



Obr. 7.1 Podélný řez konstrukcí kola



Obr. 7.2 Příčný řez konstrukcí kola



Obr. 7.3 a) Pohled na přední část motoru b) Pohled na přední část motoru s krytem
c) Pohled na zadní část motoru bez krytu d) Pohled na zadní část motoru s krytem

Závěr

Cílem diplomové práce bylo navrhnout elektromotor pro osobní automobil. Jako pohon automobilu jsou zvoleny 2 PMSM motory s vnějším rotorem umístěné v zadních kolech automobilu o celkovém jmenovitém výkonu $P = 80\text{kW}$. Návrh je tedy proveden pro motor o jmenovitém výkonu $P = 40\text{kW}$, jmenovité rychlosti $n = 798\text{ ot/min}$, počtu pólů $2p = 28$ a jmenovitém fázovém proudu $I = 71,5\text{ A}$ napájeného z PWM měniče o maximálním sdruženém napětí $U_s = 400\text{ V}$.

V kapitole 3 je proveden elektromagnetický návrh tohoto stroje. V první části jsou vypočítány parametry statoru. Statorový paket je složen z $0,5\text{ mm}$ plechů typu *SURA M250-50A* o celkové délce $l_{e_skut} = 0,088\text{ m}$ a vnějším průměru $D_1 = 0,35\text{ m}$, vnitřní průměr statoru se po započítání prostoru nutného pro chladicí potrubí změnil na $D_V = 0,19\text{ m}$. Ve statoru je 42 drážek, ve kterých je umístěno dvouvrstvé zubové vinutí v sério-parallelním zapojení o 7 paralelních větvích. Tento typ zapojení byl zvolen, aby bylo možné použít vodiče o menším průměru a vyhovět tak požadavku na použití vsypávaného vinutí. Pokud má případný výrobce možnost použít cívky složené z více paralelních vodičů, je možné po úpravě parametrů vinutí použít sériové zapojení vinutí a docílit tak snadnějšího zapojení cívek. Ve druhé části je návrh vnějšího rotoru s povrchovým uložením permanentních magnetů. Vnější průměr rotoru je $D_2 = 0,385\text{ m}$ o celkové délce $l_r = 0,09\text{ m}$. Pro návrh byly použity NdFeB magnety typu *N35UH*, o vypočítané tloušťce $h_m = 7,2\text{ mm}$ a šířce $b_m = 25\text{ mm}$, které jsou upevněny k vnitřnímu průměru rotoru ($D_r = 0,3664\text{ m}$). Velikost vzduchové mezery je zvolena na $\delta = 1\text{ mm}$. Pro omezení ztráty jsou magnety rozděleny na 5 segmentů v axiální ose. V závěrečné části kapitoly jsou určeny náhradní parametry stroje a vypočteny ztráty a účinnost. Výsledná účinnost $\eta = 93,4\%$ se od předpokládané $\eta = 95\%$ liší jen nepatrně. Postup návrhu motoru byl použit převážně z [1] a [2].

V kapitole 4 je ověření návrhu stroje nejprve pomocí analytického výpočtu v řešiči RMxprt a poté metodou konečných prvků v programu Maxwell2D. V RMxprt bylo pro většinu hodnot dosaženo přesnosti $\leq 6,5\%$. Veškeré porovnání je v tabulkách 4.1 až 4.5. MKP ověřila rovnoměrné rozložení magnetického pole po obvodu stroje a potvrdila velikost magnetické indukce v jednotlivých částech stroje. K největší odchylce od vypočítaných hodnot došlo ve statorovém zubu, kde je magnetická indukce nižší o $0,14\text{ T}$. Tento úbytek přisuzují rozptylovým tokům, které při výpočtu šířky zubu nebyly brány v potaz. Metoda konečných

prvků také přibližně potvrdila předpokládaný jmenovitý moment $M = 478 \text{ Nm}$ při jmenovitém fázovém proudu $I_f = 71,5 \text{ A}$.

5. kapitola se zabývá oteplením stroje. Vzhledem ke svému umístění v kole vozidla byl zvolen plně uzavřený stroj se stupněm krytí *IP 55*, s vodním chlazením typu *IC 3W6* a s tepelnou třídou izolace *F*. V prvních dvou částech byla nejprve provedena simulace oteplení stroje v programu *MOTOR-CAD* a následně zjednodušený analytický tepelný výpočet. Výsledky těchto dvou metod se nejvíce liší o $9,99 \text{ }^\circ\text{C}$ ve vzduchové mezeři. Největší shody je dosaženo u drážkové části vinutí, statorového jha a zubu statoru, kde je největší rozdíl pouze o $4,63 \text{ }^\circ\text{C}$ a maximální teplota vinutí by se měla pohybovat kolem $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Tím je splněna podmínka pro maximální povolenou teplotu třídy *F* ($155 \text{ }^\circ\text{C}$). Permanentní magnety *N35UH* mají podle výrobce nejvyšší povolenou teplotu $180 \text{ }^\circ\text{C}$, protože jejich nejvyšší nasimulovaná teplota je $72 \text{ }^\circ\text{C}$, mělo by být teoreticky možné použít magnety s menší tepelnou odolností a vyšší koerzitivitou a dosáhnout tak jak menších finančních nákladů, tak zmenšení objemu stroje (např. magnet typu *N48H*). Na závěr kapitoly je provedeno ověření rozložení magnetického pole po přidání chladících prvků metodou konečných prvků v programu *FEMM*. Analýza ukázala že pole není narušeno a shoduje se s výpočtem *Maxwell2D*.

V 6. kapitole je zjednodušená analýza provozu stroje během ustálené jízdy automobilu a při plynulém zrychlení vozidla. Při ustálené jízdě automobilu o váze $m = 2000 \text{ kg}$ by měly být motory dostatečně silné, aby ve svém jmenovitém stavu umožnily plynulou jízdu o konstantní rychlosti i při zhoršených povětrnostních podmínkách nebo v případě sklonu vozovky. Ve druhé části je vypočítané teoretické zrychlení, pokud by se motor krátkodobě přetížil na výkon $P = 85 \text{ kW}$. Takto přetížené motory by měly umožňovat zrychlení dvoutunového automobilu z $0 - 100 \text{ km/h}$ za $9,1 \text{ s}$. Kvůli navýšení Jouleových ztrát by takto přetížené motory měly přesáhnout povolenou teplotu za 50 s . Mělo by tedy být možné motor takto využít po dobu, která je postačující k rychlému dosažení požadované rychlosti.

V 7. kapitole je hrubě navrženo uspořádání motoru v kole automobilu.

Jako další postup při návrhu tohoto motoru bych navrhoval iteraci návrhu stroje v závislosti na nasimulovaných výsledcích, podrobnější tepelný výpočet a na základě jeho výsledků zvolit nejvhodnější typ magnetů a určit přesný pokles jejich koerzitivity v závislosti na provozní teplotě a vypracovat přesný jízdní model vozidla a tím upřesnit požadavky na motor.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, I.P. *Stavba elektrických strojů*. Praha: SNTL, 1988.
- [2] PYRHONEN, Juha., Tapani JOKINEN a Valeria. HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. Second edition. Chichester, West Sussex, United Kingdom: Wiley, 2014. ISBN 9781118701621.
- [3] VEJBOR, Jan. *Stručná historie elektromobilů*. [online]. [Cit. 20.4.2018]. Dostupné z: <http://www.elektromobily-os.cz/stru%C4%8Dn%C3%A1-historie-elektromobilu>
- [4] KOŠÍK, Michal a SKAROLEK, Pavel. *Trakční vlastnosti elektromobilu – výkony a účinnosti* [online]. [Cit. 22.4.2018]. Poslední změna 16.11.2017. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/B1M14EPT/EPT_%C3%BAloha_5_2017_18_elektromobil.pdf
- [5] VLK, František. *Dynamika motorových vozidel: jízdní odpory: hnací charakteristika: brzdění: odpruženost: říditelnost, ovladatelnost: stabilita*. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5273-6.
- [6] Pohyb silničních vozidel. [online]. [Cit. 15.2.2018]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/Moodle/2_4.pdf
- [7] AUTOMOTIVE. [online]. [Cit. 25.4.2018]. Dostupné z: <http://www.nanoflowcell.com/what-we-do/application-research/automobile/>
- [8] Protean Electric. [online]. [Cit. 21.3.2018]. Dostupné z <https://www.proteanelectric.com/>
- [9] SRP, Pavel. *První moderní elektromobil české výroby Ema 1 existoval již před 45 lety*. [online]. Poslední změna 16.1.2016. [Cit. 22.4.2018]. Dostupné z: <https://auto-mania.cz/prvni-moderni-elektromobil-ceske-vyroby-ema-1-existoval-jiz-pred-45-lety-video/>
- [10] Elevator Driving Systém Magnet. [online]. [Cit. 5.4.2018]. Dostupné z: <http://www.china-magnets-source-material.com/en/proshow/elevator-driving-system-magnet.html>
- [11] ZHAO, Jing a GAO, Xu. *Open-Phase Fault Tolerance Techniques of Five-Phase Dual-Rotor Permanent Magnet Synchronous Motor*. [online]. Poslední změna 12.11.2015. [Cit. 17.4.2018]. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1996-1073/8/11/12342/htm>
- [12] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 80-7043-444-9.
- [13] KANG, Jun. *Řízení motorů s permanentními magnety bez snímačů otáček*. [online]. Poslední změna 18.10.2010. [Cit. 2.4.2018]. Dostupné z: <http://www.controlengcesko.com/hlavni-menu/artykuly/artykul/article/řízení-motoru-s-permanentními-magnety-bez-snimacu-otacek/>

- [14] Global Plug-in Vehicle Sales for 2017 – Final results. [online]. [Cit. 7.5.2018]. Dostupné z: <http://www.ev-volumes.com/country/total-world-plug-in-vehicle-volumes/>
- [15] Motory s permanentními magnety. [online]. [Cit. 17.4.2018]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/A1M14PO2/Prednaska_6_Spec_pohony.pdf
- [16] ČERVENÝ, Josef. Stavba elektrických strojů: skripta k předmětu SES [online]. 2016. [Cit. 17.4.2018]. Dostupné z: <https://courseware.zcu.cz>
- [17] HORNÍKOVÁ, Lucie. *Návrh synchronního motoru s PM*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2015
- [18] Beaufortova stupnice. [online]. Poslední změna 31.3.2018. [Cit. 4.4.2018]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Beaufortova_stupnice
- [19] Přehled technologií. [online]. [Cit. 10.5.2018]. Dostupné z: https://gwipower.cz/_files/200000190-a8559a953d/Prehled_techologii_letak_CZ.pdf
- [20] PECHÁNEK, Roman. *Ventilační a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru*. Disertační práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2011
- [21] WAN, Yuan a CUI, Shumei. *Electromagnetic design and losses analysis of a high-speed permanent magnet synchronous motor with toroidal windings for pulsed alternator*. [online]. Poslední změna 6.3.2018. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: www.mdpi.com/1996-1073/11/3/562/pdf
- [22] HUYNH, Co a ZHENG, Liping. *Losses in high speed permanent magnet machines used in microturbine applications*. [online]. Poslední změna 25.3.2009. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://www.calnetix.com/sites/default/files/7.pdf>
- [23] Electric Vehicle Motor. [online]. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: www.higenmotor.com/info/download_data.asp?no=427
- [24] SOKOLOV, Emil. *Comparative study of electric car traction motors*. [online]. Poslední změna 2017. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7955461/>
- [25] SEDEG, Kanber a MAHERI, Alireza. *Performances of AC induction motors with different number of poles in urban electric cars*. [online]. Poslední změna 2014. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7059946/>
- [26] WANG, Yue. *A comparison of different types of motors used for low speed electric vehicles: Experiments and simulation*. [online]. Poslední změna 2014. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6940689/>

- [27] FINKEN, Thomas a HOMBITZER, Marco. *Study and comparison of several permanent-magnet excited rotor types regarding their applicability in electric vehicles*. [online]. Poslední změna 2010. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5668074/>
- [28] MSADDEK, Hejra a BRISSET, Stephane. *Design and optimization of PMSM with outer rotor for electric vehicle*. [online]. Poslední změna 2015. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7348154/>
- [29] WU, Demin a FEI, Weizhong. *Design optimization of outer-rotor permanent magnet synchronous machine with fractional-slot and concentrated-winding configurations in lightweight electric vehicles*. [online]. Poslední změna 04.02. 2016. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7398956/>
- [30] NERG, Janne a RILLA, Marko. *Direct-driven interior magnet permanent magnet synchronous motors for a full electric sports car*. [online]. Poslední změna 08.08. 2014. [Cit. 19.5.2018]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/646921>
- [31] FREE CAD LIBRARY. [online]. [Cit. 25.4.2018]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library>

Přílohy

Příloha A – Katalogový list SURA M250-50A

Typical data for SURA® M250-50A

T	W/kg at 50 Hz	VA/kg at 50 Hz	A/m at 50 Hz	W/kg at 100 Hz	W/kg at 200 Hz	W/kg at 400 Hz	W/kg at 1000 Hz	W/kg at 2500 Hz
0,1	0,02	0,06	30,6	0,04	0,10	0,28	1,38	5,71
0,2	0,07	0,17	40,7	0,16	0,42	1,15	4,91	19,8
0,3	0,13	0,31	47,9	0,34	0,88	2,41	10,0	41,4
0,4	0,22	0,46	54,5	0,57	1,47	4,03	16,8	71,8
0,5	0,31	0,65	61,3	0,83	2,17	6,03	25,6	113
0,6	0,43	0,86	69,0	1,13	3,00	8,47	36,6	169
0,7	0,55	1,12	77,8	1,47	3,95	11,3	50,3	243
0,8	0,70	1,41	88,6	1,85	5,05	14,7	67,2	338
0,9	0,86	1,77	102	2,28	6,30	18,7	87,8	461
1,0	1,02	2,21	120	2,75	7,73	23,4	113	617
1,1	1,21	2,79	145	3,28	9,36	28,8	143	
1,2	1,42	3,63	186	3,89	11,2	35,2		
1,3	1,67	5,16	278	4,61	13,4	42,4		
1,4	2,02	9,69	584	5,51	15,9	50,9		
1,5	2,38	26,7	1600	6,51	18,9	60,7		
1,6	2,71	68,6	3680					
1,7	2,96	143	6890					
1,8	3,18	263	11600					

Loss at 1.5 T , 50 Hz, W/kg	2,38
Loss at 1.0 T , 50 Hz, W/kg	1,02
Anisotropy of loss, %	10

Magnetic polarization at 50 Hz

H = 2500 A/m, T	1,55
H = 5000 A/m, T	1,64
H = 10000 A/m, T	1,77

Coercivity [DC], A/m	30
Relative permeability at 1.5 T	740
Resistivity, $\mu\Omega\text{cm}$	59

Yield strength, N/mm ²	475
Tensile strength, N/mm ²	590
Young's modulus, RD, N/mm ²	175 000
Young's modulus, TD, N/mm ²	190 000
Hardness HV5 (VPN)	220

RD represents the rolling direction
 TD represents the transverse direction
 Values for yield strength (0.2 % proof strength)
 and tensile strength are given for the rolling direction
 Values for the transverse direction are approximately 5% higher



June 2008

Příloha B – Katalogový list N35UH



N35UH

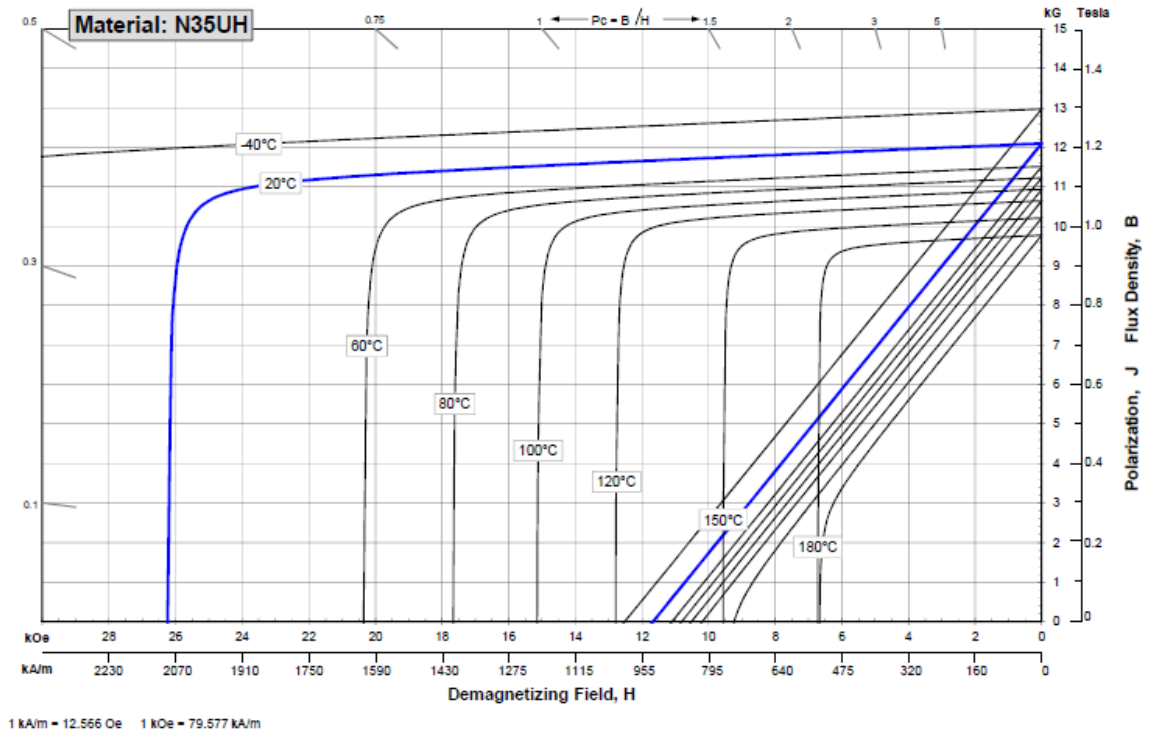
Sintered Neodymium-Iron-Boron Magnets

These are also referred to as "Neo" or NdFeB magnets. They offer a combination of high magnetic output at moderate cost. Please contact Arnold for additional grade information and recommendations for protective coating. Assemblies using these magnets can also be provided.

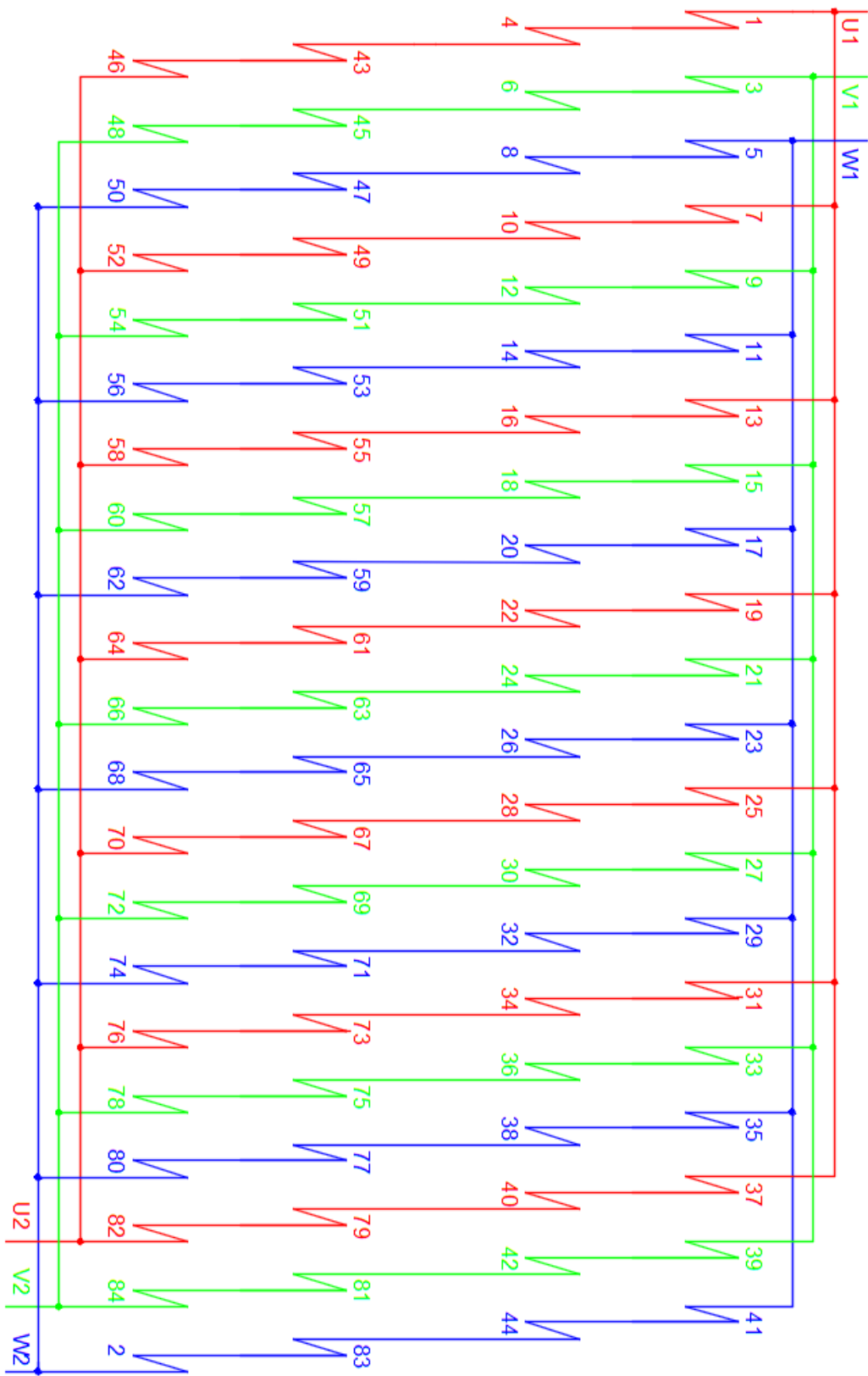
Characteristic	Units	Magnetic Properties		
		min.	nominal	max.
Br, Residual Induction	Gauss	11,700	12,100	12,500
	mT	1170	1210	1250
H _{CB} , Coercivity	Oersteds	10,800	11,400	12,000
	kA/m	860	907	955
H _{CJ} , Intrinsic Coercivity	Oersteds	25,000		
	kA/m	1,990		
BHmax, Maximum Energy Product	MGOe	33	36	38
	kJ/m ³	263	283	302

Characteristic	Units	Thermal Properties	
		C //	C ⊥
Reversible Temperature Coefficients ⁽¹⁾			
of Induction, α(Br)	%/°C		-0.120
of Coercivity, α(H _{CJ})	%/°C		-0.465
Coefficient of Thermal Expansion ⁽²⁾			
ΔL/L per °C x 10 ⁻⁶		7.5	-0.1
Thermal Conductivity	W / (m · K)		7.6
Specific Heat ⁽³⁾	J / (kg · K)		480
Curie Temperature, T _c	°C		310
Other Properties			
Flexural Strength	psi		41,300
	MPa		285
Density	g/cm ³		7.5
Hardness, Vickers	Hv		620
Electrical Resistivity, ρ	μΩ · cm		180

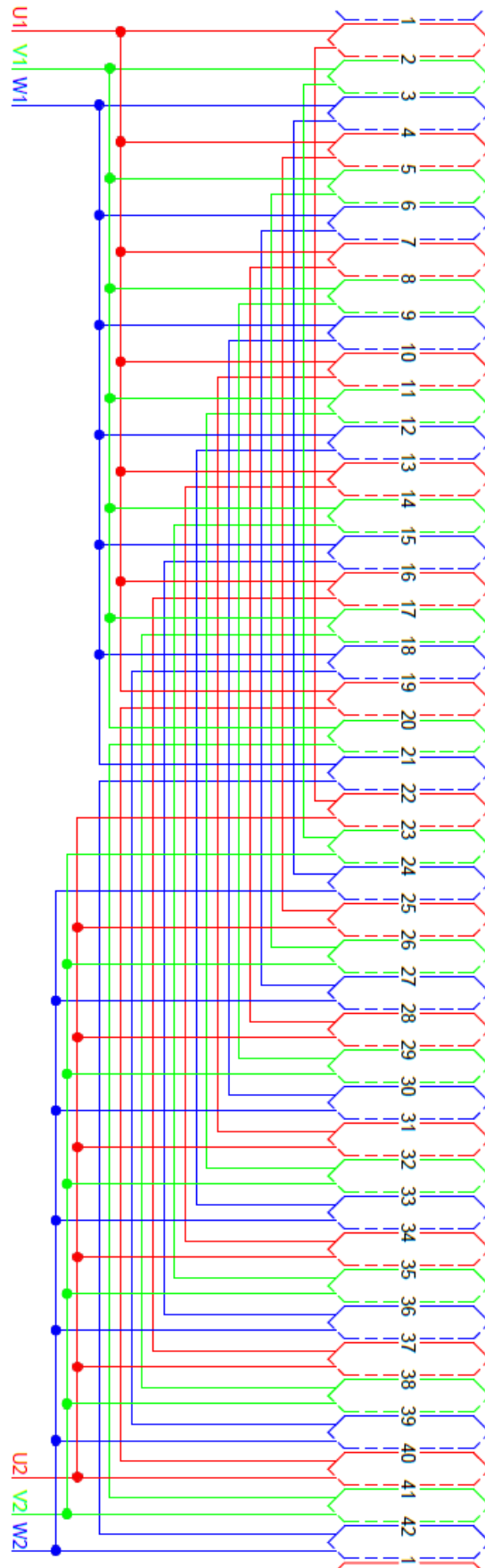
Notes: (1) Coefficients measured between 20 and 180 °C
 (2) Between 20 and 200 °C
 (3) Between 20 and 140 °C



Příloha C – Pilové schéma statorového vinutí



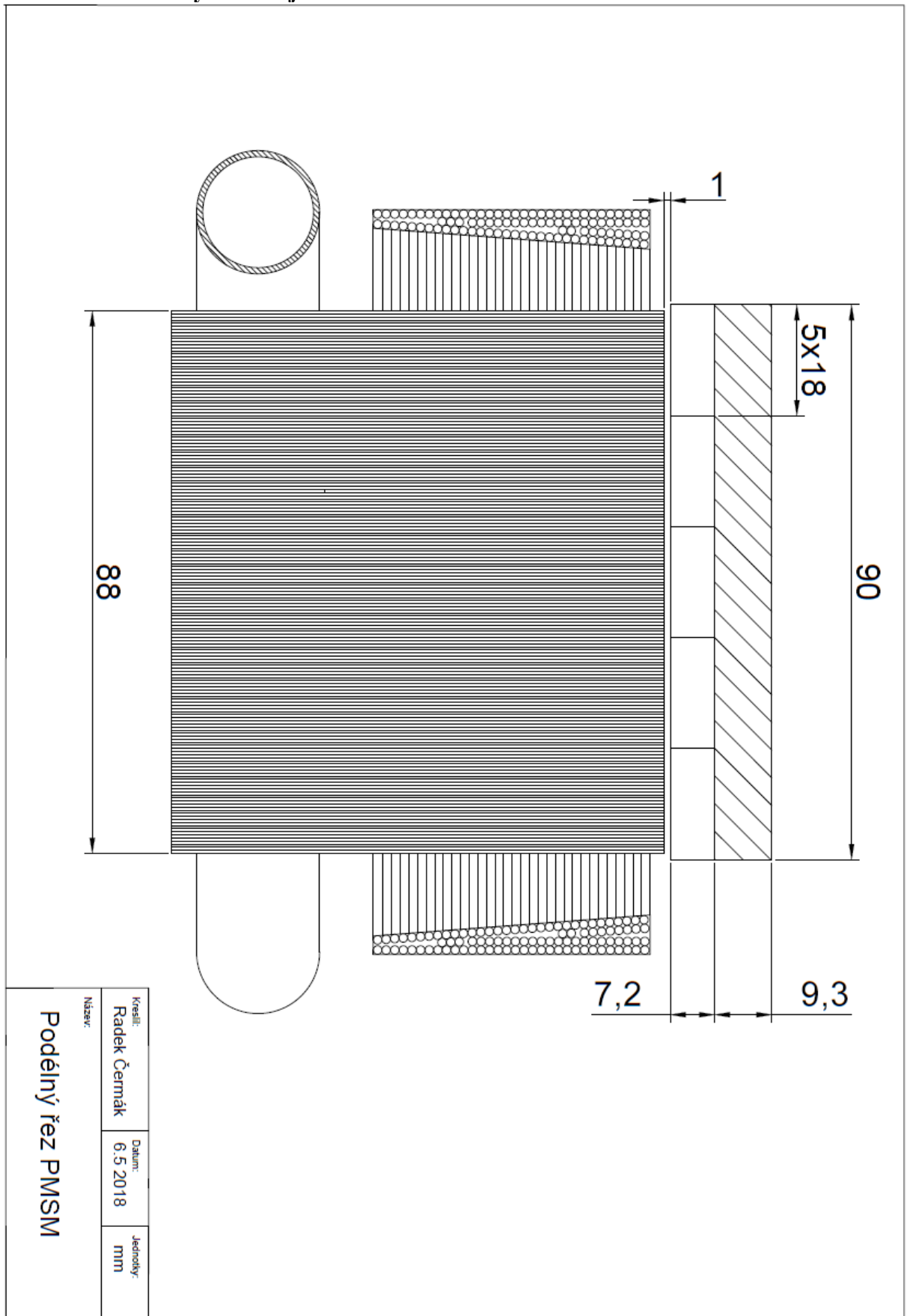
Příloha D – Konstrukční uspořádání statorového vinutí



Příloha E – Tingleyho schéma

pól	fáze	U	W'	V
		U'	W	V'
1	+	1		3
		2		4
2	-		5	
			6	
3	+	7		9
		8		10
4	-		11	
			12	
5	+	13		15
		14		16
6	-		17	
			18	
7	+	19		21
		20		22
8	-		23	
			24	
9	+	25		27
		26		28
10	-		29	
			30	
11	+	31		33
		32		34
12	-		35	
			36	
13	+	37		39
		38		40
14	-		41	
			42	
15	+	43		45
		44		46
16	-		47	
			48	
17	+	49		51
		50		52
18	-		53	
			54	
19	+	55		57
		56		58
20	-		59	
			60	
21	+	61		63
		62		64
22	-		65	
			66	
23	+	67		69
		68		70
24	-		71	
			72	
25	+	73		75
		74		76
26	-		77	
			78	
27	+	79		81
		80		82
28	-		83	
			84	

Příloha F – Podélný řez strojem



Příloha G – Příčný řez strojem

