

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROENERGETIKY A EKOLOGIE

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh asynchronního motoru pro elektrické vozidlo

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

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

Jméno a příjmení: **Bc. Jan MAŠEK**
Osobní číslo: **E17N0039K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Název tématu: **Návrh asynchronního motoru pro elektrické vozidlo**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky a ekologie**

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.
2. Na základě bodu 1. stanovte jmenovité parametry stroje a proveďte elektromagnetický návrh motoru.
3. Navrhněte vhodný způsob chlazení stroje a sestavte tepelně-ventilační model motoru a model ověřte pomocí MKP.
4. Vyšetřete rozložení teplot v různých částech stroje a navrhněte příslušná opatření.



Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Hak, J., Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů 1.Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973, 628s.
2. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcova V.; Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
3. LEE, Huei-Huang. Finite element simulations with ANSYS workbench 15. Mission: SDC, 2014. 602 s. ISBN 978-1-58503-907-4.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Roman Pechánek, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce se zabývá pohonnou jednotkou elektromobilu. Převážně je zaměřena na návrh tří-fázového asynchronního motoru pro elektrické vozidlo a řešení vhodného způsobu chlazení motoru. Tepelné vlastnosti elektromagnetického návrhu asynchronního motoru byly ověřeny pomocí metody konečných prvků.

Klíčová slova

Elektromobil, tří-fázový asynchronní motor, studie, návrh, vinutí, stator, rotor, chlazení, tepelný odpor, metoda konečných prvků.

Abstract

The master theses presents desing of three-phase induction motor for electric vehicle and solution of a suitable method of engine cooling. The thermal properties of the electromagnetic design of the asynchronous motor has been verified using the finite element method.

Key words

Electromobile, three-phase induction motor, study, design, winding, stator, rotor, cooling, thermal resistance, finite element method.

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 27.5.2019

Bc. Jan Mašek

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce. Ing. Romanovi Pechánkovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále také mé rodině, která mě plně podporovala po celou dobu studia.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	14
1 ELEKTRICKÉ MOTORY POUŽÍVANÉ V EV	15
1.1 POHON A NAPÁJENÍ ELEKTROMOBILU.....	15
1.1.1 Diagnostika bateriového systému.....	16
1.1.2 Nabíjení.....	16
1.2 SOUČASNÝ STAV ELEKTROMOBILŮ.....	18
1.2.1 Nissan Leaf.....	18
1.2.2 Tesla Model S.....	19
1.2.3 Další aktuálně nabízené elektromobily.....	20
1.3 MODERNÍ PRŮZKUMY V OBLASTI ELEKTRICKÝCH POHONŮ VYUŽÍVANÝCH V ELEKTROMOBILECH...	20
1.4 ASYNCHRONNÍ MOTOR S KOTVOU NAKRÁTKO.....	23
2 ELEKTROMAGNETICKÝ NÁVRH ASYNCHRONNÍHO MOTORU S KOTVOU NAKRÁTKO	25
2.1 URČENÍ HLAVNÍCH ROZMĚRŮ.....	25
2.1.1 Počet pólových dvojic.....	25
2.1.2 Výška osy v závislosti na výkonu a otáčkách.....	25
2.1.3 Vnější průměr statoru.....	26
2.1.4 Vnitřní průměr statoru.....	26
2.1.5 Pólová rozteč.....	26
2.1.6 Výpočtový vnitřní výkon.....	26
2.1.7 Elektromagnetické zatížení.....	26
2.1.8 Činitel pólového krytí α_s , činitel tvaru pole k_B a činitel statorového vinutí k_{V1}	27
2.1.9 Synchronní úhlová rychlost hřídele motoru.....	27
2.1.10 Essonův činitel.....	27
2.1.11 Délka stroje.....	27
2.1.12 Ideální délka vzduchové mezery.....	27
2.1.13 Štíhlostní poměr.....	27
2.2 URČENÍ STATOROVÝCH ČÁSTÍ.....	28
2.2.1 Drážková rozteč.....	28
2.2.2 Počet drážek.....	28
2.2.3 Počet drážek na pól a fázi a konečná drážková rozteč.....	28
2.2.4 Počet vodičů v drážce.....	28
2.2.5 Konečný počet závitů ve fázi a konečná lineární hustota proudu.....	29
2.2.6 Činitel vinutí.....	29
2.2.7 Magnetický tok a magnetická indukce ve vzduchové mezeře.....	29
2.2.8 Průřez vodiče.....	30
2.2.9 Rozměry drážek a zubů statoru.....	30
2.3 VOLBA VZDUCHOVÉ MEZERY.....	32
2.4 URČENÍ ČÁSTÍ ROTORU NAKRÁTKO.....	33
2.4.1 Počet drážek rotoru.....	33
2.4.2 Určení hlavních rozměrů rotoru.....	33
2.4.3 Proud kruhem nakrátko.....	34
2.4.4 Průřez tyče.....	34
2.4.5 Rozměry rotorové drážky.....	34
2.5 VÝPOČET MAGNETICKÉHO OBVODU.....	36
2.5.1 Velikosti jednotlivých indukcí.....	36
2.5.2 Velikosti magnetických napětí.....	37
2.5.3 Výsledné magnetomotorické napětí na jednu pólovou dvojici.....	39
2.5.4 Magnetizační proud.....	39

2.6	VELIKOSTI ODPORŮ A REAKTANCÍ.....	39
2.6.1	<i>Odpor jedné fáze statoru</i>	39
2.6.2	<i>Odpor jedné fáze rotoru</i>	40
2.6.3	<i>Rozptylová reaktance statoru</i>	41
2.6.4	<i>Rozptylová reaktance rotoru</i>	42
2.7	URČENÍ ZTRÁT	44
2.7.1	<i>Hlavní ztráty v železe</i>	44
2.7.2	<i>Pulzační ztráty</i>	45
2.7.3	<i>Povrchové ztráty</i>	46
2.8	ÚČINNOST	48
3	TEPELNĚ VENTILAČNÍ MODEL MOTORU.....	50
3.1	CHLADÍCÍ SYSTÉM	50
3.1.1	<i>Axiální ventilace</i>	50
3.2	MODEL NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ	51
3.2.1	<i>Definice tepelných odporů</i>	52
	TAB. 3.2 <i>TABULKA VEKTORU PRAVÉ STRANY, KTERÁ DEFINUJE ZTRÁTY STROJE V DÍLČÍCH ČÁSTECH.</i>	57
3.3	METODA KONEČNÝCH PRVKŮ	58
4	ROZLOŽENÍ TEPLŮ V RŮZNÝCH ČÁSTECH STROJE	63
4.1	OVĚŘENÍ V PROSTŘEDÍ FEMM.....	63
4.2	POROVNÁNÍ TEPLŮ	64
4.3	NÁVRH CHLADÍCÍHO OPATŘENÍ	65
	ZÁVĚR.....	67
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	69
	PŘÍLOHY	72

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Název	Jednotka
A	Lineární proudová hustota	$A \cdot m^{-1}$
a	Počet paralelních větví	-
a_{kn}	Výška vodiče	m
B	Magnetická indukce	T
b_d	Šířka drážky	m
b_{iz}	Součet izolačních šířek	m
b_{kn}	Šířka kruhu	m
b_o	Otevření drážky	m
b_v	Šířka vodiče	m
b_z	Šířka zubu	m
D	Vnitřní průměr statoru	m
D_e	Vnější průměr stroje	m
D_i	Vnitřní průměr rotoru	m
F_m	Magnetometrická napětí (síla)	A
f	Frekvence	Hz
H	Intenzita magnetického pole	$A \cdot m^{-1}$
h	Výška osy	m
h_{iz}	Součet izolačních výšek	m
h_j	Výška j ha	m
h_v	Výška vodiče	m
I_{1N}	Jmenovitý proud vinutí statoru	A
I_a	Proud v paralelní větvi	A

I_{kN}	Proud kruhem nakrátko	A
I_u	Magnetizační proud	A
I_{2t}	Proud v tyči rotoru	A
J	Proudová hustota	$A \cdot m^{-2}$
k_B	Činitel tvaru pole	-
k_C	Carterův činitel	-
k_{fe}	Činitel plnění železa	-
k_r	Činitel rozlohy vinutí	-
k_v	Činitel vinutí	-
k_y	Činitel kroku vinutí	-
k_z	Činitel nasycení zubů	-
$l_{\check{c}}$	Délka čela	m
l_i	Délka vzduchové mezery	m
l_j	Délka střední magnetické siločáry	m
M	Moment	$N \cdot m$
m	Počet fází	-
N	Počet závitů	-
Nu	Nusseltovo číslo	-
n_1	Synchronní otáčky	$ot \cdot min^{-1}$
P_i	Vnitřní výpočtový výkon	VA
P_n	Jmenovitý výkon	W
p	Počet pólových dvojic	-
p_i	Proudový převod	-
Q	Počet drážek	-
q	Počet drážek na pól a fázi	-

R	Odpor	Ω
R	Tepelný odpor	$K \cdot W^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	-
S	Průřez	m^2
t_d	Drážková rozteč	m
t_p	Pólová rozteč	m
U_{nf}	Fázové napětí	V
U_m	Magnetomotorické napětí	A
V_d	Předběžný počet vodičů v drážce	-
V'_d	Počet vodičů v drážce	-
X_σ	Rozptylová reaktance	Ω
X_u	Magnetizační reaktance	Ω
Z	Impedance	Ω
α_δ	Činitel pólového krytí	-
B	Zkrácení kroku	p. j.
δ	Šířka vzduchové mezery	mm
Δ	Činitel přepočtu proudu	-
λ	Štíhlostní poměr	-
λ	Činitel magnetické vodivosti	-
λ	Součinitel tepelné vodivosti	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
η	Účinnost	%, -
Φ	Magnetický tok	Wb
ω	Úhlová rychlost	$rad \cdot s^{-1}$
ΔP_{fe}	Ztráty v železe	W
ΔP_j	Jouleovy ztráty	W

ΔP_m	Mechanické ztráty	W
ΔP_p	Pulzační ztráty	W
$\Delta P_{\delta p}$	Povrchové ztráty	W

Indexy

1	statorový
2	rotorový
č	týkající se čela
d	týkající se drážky
j	týkající se jha
z	týkající se zubu
δ	týkající se vzduchové mezery
Al	hliník
Cu	měď
Fe	železo
H ₂ O	voda

Zkratky

EV	Electric Vehicle - elektromobil
HEV	Hybrid EV – hybridní elektromobil

Úvod

Hlavním cílem této práce je navrhnout vhodným způsobem vybraný typ elektrického motoru, který je uvažován pro elektrické vozidlo jako hlavní pohonná jednotka.

V úvodu práce se zabývám základními informacemi o elektromobilech a hybridních automobilech, kde je blíže rozebrána bateriová struktura a nabíjecí cyklus. Následně je provedeno zhodnocení vybraných elektromobilů, převážně s ohledem na typ motoru a jeho základní parametry.

Na téma elektromobility navazuje další část práce, která se zabývá moderními studii dílčích částí v konceptu vylepšení motoru elektromobilu. Následně jsou zhodnoceny výsledky studie.

Hlavní část této práce je návrh vybraného elektrického motoru jako hlavní pohonná jednotka. Byl zvolen asynchronní motor s klecovou kotvou, kterou ve svých vozidlech využívá nejznámější elektromobil současnosti Tesla. V této části jsou navrženy jednotlivé velikosti stroje, drážek i elektromagnetických vlastností. Následně jsou spočítány ztráty a výsledná účinnost.

V další části se zabývám návrhem vhodným způsobem chlazení a sestavením tepelného modelu stroje, kde výsledky této analýzy jsou ověřeny pomocí prostředí FEMM.

V poslední části jsou zhodnoceny výsledky početní analýzy v porovnání s metodou konečných prvků a jsou navržena dodatečná opatření pro dostatečné chlazení stroje a následně znovu zhodnoceny.

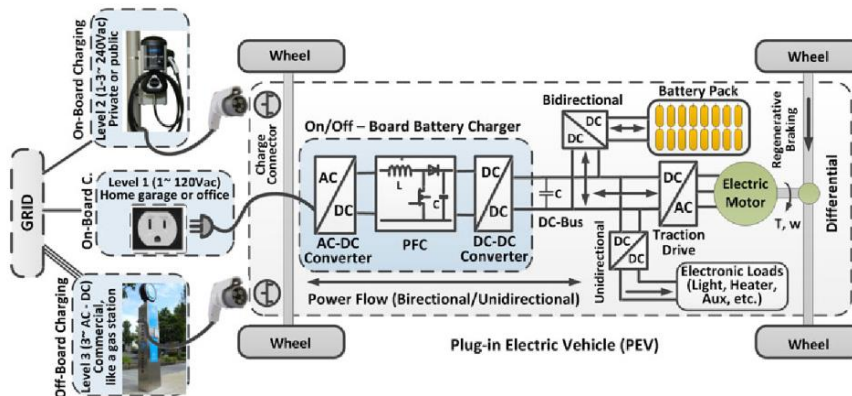
1 Elektrické motory používané v EV

Motory využívané v elektrických a hybridních vozidlech jsou v dnešní době v drtivé většině motory střídavé. V minulém století se využívalo převážně stejnosměrných motorů, nicméně s nástupem kvalitní výkonové elektroniky se od stejnosměrných motorů upustilo a to také z důvodu náročnějších požadavků na údržbu a méně efektivní regulace a řízení než je tomu u motorů střídavých.

1.1 Pohon a napájení elektromobilu

Elektromobil je drtivou většinou výrobců vyráběn pouze s osamoceným motorem, který je umístěn buď na zadní nebo na přední nápravě, kterou pohání, tzn. přední nebo zadní pohon jako je tomu u klasickým automobilů. Výjimku tvoří mimo jiné elektromobil od společnosti Tesla Motors ve svém Modelu S, který má dvě pohonné jednotky. Dominantní motor, který je umístěný na zadní nápravě má přibližně dvojnásobný výkon než motor, který pohání přední nápravu. [5]

Mechanický výkon je od elektromotoru přenášen přes převodovku s pevným převodem, diferenciálem a hřídeli na kola. Převodovka s proměnlivým převodem jako je u automobilů je nepotřebná z důvodu maximálního momentu v celém rozsahu otáček a není proto potřeba volit vždy vhodný převod pro optimální chod motoru. Napájení motoru je zajištěno z komplexního bateriového systému ve formě plata, uloženého pod kabinou v podlaze. Nejčastěji se skládají z velkého počtu jednotlivých lithiových článků (např. LiNiCoAlO_2 - baterie na bázi Nikl-Kobalt-Hliník - NCA, což označuje technologii dle katodového materiálu, od společnosti Panasonic, které využívá Tesla). Baterie je chráněná pomocí štítu z titanu a hliníkové slitiny o tloušťce 6 mm. Uchovávané stejnosměrné napětí v bateriích je převedeno přes měnič na napětí střídavé, to bývá v mezích 150V až 450V, do motoru. Měnič řídí velikost napětí na základě pokynů řídicího systému, který vyhodnocuje aktuální požadavky na provoz. [5]



Obr. 1.1 Výkonová topologie elektromobilu, převzato z [4]:

1.1.1 Diagnostika bateriového systému

Baterie v elektromobilech jsou vybaveny senzory, čidly a systémem, který zajišťuje optimální funkčnost a co nejspolehlivější dosažený výkon baterie. Tento komplexní diagnostický systém se nazývá battery management system a jeho hlavními úkoly jsou sledování elektrických a tepelných veličin a v případě nesprávných hodnot zabezpečení baterií pomocí ochran. Dalším velmi důležitým úkolem je balancování článků a předávání vyhodnocených informací centrálnímu počítači. [5]

Balancování článků patří mezi nejdůležitější a zásadní diagnostické zásahy do komplexního bateriového systému. Ačkoliv jsou všechny články vyráběny za stejných podmínek, mají jemně odlišné fyzikální vlastnosti (kapacita, vnitřní odpor). Po určitém množství nabíjecích cyklů tyto odlišnosti jsou stále výraznější, čímž dochází k rozdílné míře nabití a tedy rozdílnému napětí článků. Při těchto odlišnostech dochází v různých částech k podbíjení a nebo přebíjení článku a tím k zničení článků. Aby se zamezilo této nechtěné vlastnosti je využíváno aktivního a pasivního balancování. [5]

Pasivním balancováním se rozumí maření přebytečné energie přes odpor, tento způsob není příliš hospodárny nicméně v elektromobilismu se využívá z pohledu levnějšího a také spolehlivějšího.

Aktivní balancování je z hlediska energetické úspory mnohem příznivější. Při tomto balancování dochází k přenosu energie z přebívaných článků a méně nabitých články. Účinnost tohoto typu není příliš vysoká. Je to způsobeno velkými úbytky na jednotlivých článcích. Dalším negativním prvkem je velká investice do tohoto druhu diagnostiky a jeho poměrná složitost. [5]

1.1.2 Nabíjení

Nabíjecí infrastruktura pro elektromobily je s ohledem na aktuálně náročný provoz nedostatečná a nabíjecí proces příliš pomalý v porovnání načerpání paliva u spalovacího motoru.

V současné době nejběžnějším procesem nabíjení jsou kabelové nabíječky, kde nabíjecí napětí je přenášeno přes kabel. Tyto nabíječky mohou přenášet střídavé i stejnosměrné napětí. Mezi další funkce patří měření odebrané energie, požadovaná úroveň účinnosti, ochrana proti přepětí a zkratu, komunikace s centrálním počítačem, ohledně celkového procesu nabíjení. Kabelové nabíječky se dělí na dva typy - nabíjecí stanice a palubní nabíječky. [5]

Palubní nabíječky se dělí na dva druhy. Prvním je přímé připojení do jednofázové zásuvky, využívá se především tam, kde je velmi slabá dobíjecí infrastruktura. Tyto nabíječky nejsou schopny přenést výkon větší než je 3,7 kW jako tomu je u pomalých dobíjecích stanic. Druhý typ palubní nabíječky je kombinace nabíjecí stanice a palubní nabíječky. Nabíječka určená k střídavému dobíjení usměrňuje střídavé napětí a zároveň zajišťuje ochranu baterie. Střídavé palubní nabíječky nevyužívají tlumicí cívky k vyhlazení proudu protože k tomuto procesu jim postačí vinutí motoru. Pokud je určená pro stejnosměrné nabíjecí stanice je zajištěna úprava velikosti napětí a ochrana. [5]

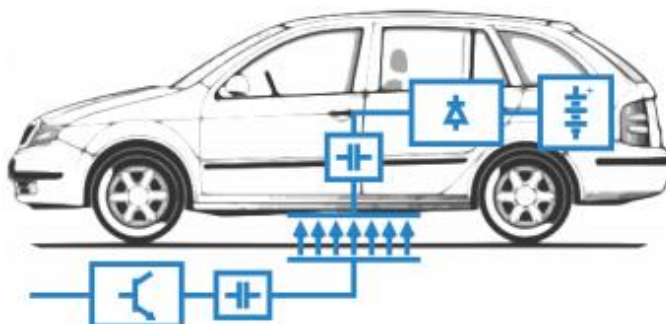
U nabíjecích stanic dosahují nejmenších výkonů stanice, které jsou instalovány v domácnostech, resp. v garáži. Mohou být jednofázové i třífázové, ovšem jednofázové nabíječky nejsou schopny přenést výkon větší než 3,7 kW, který je dán napětím sítě a jmenovitým proudem jističe. Oproti tomu třífázové dovedou přenést výkon až 22 kW při jistění s jmenovitou hodnotu jističe 32 A. Nabíjení se praktikuje převážně přes noc, tento proces trvá jednotky hodin. Výkony v řádu od 22 kW až po 40 kW umožňují nabíjecí stanice, které jsou umístěné u parkovacích ploch v nákupních zónách, čerpacích stanic nebo také u vývojových center podporujících elektromobilitu a nabíjení trvá opět jednotky hodin. Velmi často jsou zpoplatněny. Nejrychlejším způsobem nabíjení jsou rychlé nabíjecí stanice, které jsou schopny přenést výkon až 150 kW a tím jsou umožňují dobítí v řádu desítek minut. Tesla Supercharger je schopný nabít 90 kWh baterie z 80% do 40 minut. Ovšem i tento rychlý způsob není konkurence schopný s načerpáním fosilních paliv.[5]



Obr. 1.2 Tesla Supercharger, převzato z [5]:

Bezkontaktní nabíjení elektromobilu je v současné době velmi lákavá možnost dobíjení, nicméně se zatím významněji neprosadilo a to hlavně z důvodu vysokých pořizovacích nákladů, nedosahují a takové účinnosti a je potřebné zaparkování přesně mezi vysílačem energie nabíjecí stanice a přijímačem elektromobilu. Tento druh nabíjení bude

rozhodně užitečnější pro autonomní vozidla, která za pomoci řídicího systému přesně zaparkují. Nespornou výhodou je bezpochyby maximální komfort řidiče, který nemusí ani vystoupit z vozidla, dále je uspořeno místo kvůli uložení dobíjecí stanice v zemi a tím většího rozměru pro dobíjecí místa. K přenosu energie se využívá magnetické nebo elektrické pole. [5]



Obr. 1.3 Bezkontaktní nabíjení, převzato z [6]:

1.2 Současný stav elektromobilů

V současné době je rozvoj elektromobility na vysoké úrovni, neboť většina z významnějších automobilek už představila nebo v blízké budoucnosti představí koncept elektrického nebo hybridního vozidla. Aktuálně je nejmenším lákadlem pro zákazníky vysoká pořizovací cena a stále nedostateční nabíjecí infrastruktura včetně absolutně nevyhovující doby nabíjení. V této kapitole bude proveden průzkum aktuálně nabízených elektromobilů, včetně jejich hlavních parametrů.

1.2.1 Nissan Leaf

Nissan Leaf využívá ve svých elektromobilech synchronní motor s permanentními magnety, kde motor je 8-pólový a ve statoru je 48 drážek s měděným vinutím. Motor je chlazen třemi obvodovými kanály umístěnými v kostře stroje a dále axiálními kanály v jhu rotoru, kde chladícím médiem je vzduch. Motor disponuje maximálním výkonem 80 kW, točivým momentem 280 N·m a maximální rychlostí 295 km/hod. V tabulce níže jsou základní rozměry motoru tohoto modelu. Pořizovací cena se odvíjí od kapacity baterie, kde 24kWh lze pořídit od 730 tis. Kč a 30kWh od 858 tis. Kč. [6]

Tab. 1.1 Tabulka s vybranými parametry motoru, převzato z [6]:

Vnější průměr statoru	198,12 mm
Vnitřní průměr statoru	151,38 mm
Vnější průměr rotoru	151,16 mm
Vnitřní průměr rotoru	129,97 mm
Hmotnost motoru	58 kg



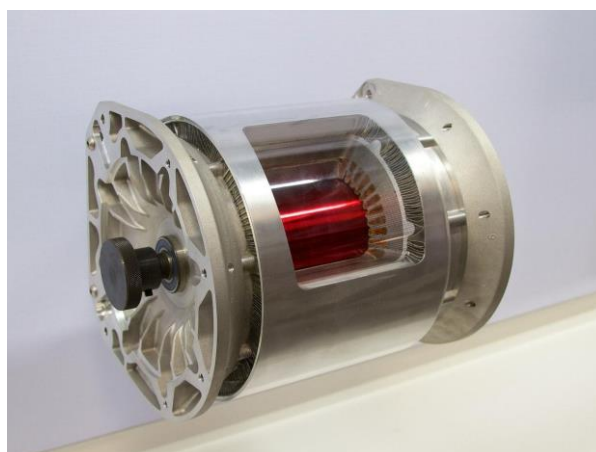
Obr. 1.4 Nissan Leaf - Motor a výkonový obvod, převzato z [8]:

1.2.2 Tesla Model S

Model S využívá jako jeden z mála elektromobilových výrobců ve svém modelu asynchronní motor s kotvou nakrátko. Motor je 4-pólový, stator disponuje 60 drážkami a v rotoru jich je vyfrézováno 74. Je použito dvouvrstvé měděné vinutí s dvěma paralelními větvemi. V každé drážce jsou dva vodiče. Hlavním chladičím prvkem je vodní chlazení v kostře stroje a dále je zabudováno přídavné chlazení v rotoru. Nejsilnější varianta P85D, která má pohon všech kol, kde u přední nápravy pracuje motor o výkonu 165 kW a u zadní 350 kW, kde při kombinaci těchto dvou motorů vzniká točivý moment 930 N·m. Disponuje dojezdem 443 km a maximální rychlostí vozidla 250 km/hod. Cena modelu se pohybuje okolo 2,5 mil. Kč. [6,14]

Tab. 1.2 Tabulka s vybranými parametry motoru, převzato z [6]:

Vnější průměr statoru	254 mm
Vnitřní průměr statoru	157 mm
Vnější průměr rotoru	155,8 mm
Vnitřní průměr rotoru	50 mm



Obr. 1.5 Tesla Model S, převzato z [1]:

1.2.3 Další aktuálně nabízené elektromobily

Tab. 1.3 Tabulka vybranými elektromobily:

Vozidlo	Druh motoru	Výkon	Moment	Dojezd	Cena (Kč)
Hyundai Kona Electric	Synchronní s PM	150 kW	395 N·m	482 km	od 1,2 mil.
Kia Soul EV	Synchronní s PM	81,4 kW	285 N·m	250 km	870 tis.
Chevrolet Bolt EV	Synchronní s PM	150 kW	360 N·m	320 km	660 tis.
Audi E-tron	Synchronní s PM	300 kW	664 N·m	400 km	od 2 mil.
Mercedes Benz B ED	Asynchronní	132 kW	340 N·m	200 km	od 1,1 mil.
Tesla Model X (P90D)	Asynchronní	375 kW	660 N·m	400 km	3,3 mil.

Parametry udávané v tabulce byly převzaty z oficiálních ceníků konkrétních elektromobilových prodejců. Při zhodnocení ceny je patrné, že ve většině moderních elektromobilů jsou používány synchronní motory s permanentními magnety. Dojezdy začínají být v některých případech konkurenceschopné dojezdům automobilů. Ovšem ceny v převážném měřítku bývají milion a více Kč.

1.3 Moderní průzkumy v oblasti elektrických pohonů využívaných v elektromobilech

V této kapitole budou popsány různé moderní studie týkající se parametrů elektrických pohonů. Následující budou v převážné míře čerpány z digitální knihovny ieeexplore.ieee.org

Na konferenci, která byla konána v Petrohradu a Moskvě na konci ledna 2019 řešili autoři Anatolij N. Kazak a Dmitriy M. Filippov vývoj synchronních motorů umístěných přímo v kole vozidle v článku s názvem **Development of In-wheel Motor for Vehicles.**

Autoři v první části konference představili výhody, které mají motory umístěné přímo v náboji kola. Mezi zmíněné výhody lze zařadit velmi dobré dynamické vlastnosti – lehké motory, které jsou schopny vyprodukovat točivý moment 700 N·m při nejnižších otáčkách. Další výhodou je možnost vozidla poháněného čtyřmi motory v kolech otáčet koly odlišnou rychlostí, tímto bodem tedy nepotřebuje vozidlo diferenciál, hnací



Obr. 1.6 Motor v kole vozidla, převzato z [7]:

hřídel, spojku ani převodovku. V další části byli zmíněni evropští výrobci elektrických motorů, jako například YASA Motors (Anglie), Etel (Švýcarsko), Elaphe (Slovinsko) a jiné.

Hlavní myšlenkou bylo představit možnosti vývoje motoru umístěného v kole s hmotností menší než 30 kg a se schopností vysokého točivého momentu – přibližně 27 N·m/kg a s cenou v přepočtu kolem 24,5 tis Kč. Tohoto lze dosáhnout využitím rozloženého vinutí namísto koncentrického v synchronních motorech s permanentními magnety anebo i bez magnetů.

Mezi výhody patří snížení vlivu vyšších – parazitických harmonických, což výrazně zvyšuje účinnost stroje, významné snížení ztrát vířivými proudy v permanentních magnetech anebo také snížení pulsace elektromagnetického momentu a v důsledku toho snížení hluku a vibrací. Mezi nevýhody patří zvýšení čel, což vede ke zvýšení tepelných ztrát. Další nevýhodou je složitost výrobního procesu vinutí. V rámci projektu byla navržena výrobní technologie rozloženého vinutí, která se skládá z jednotlivých cívek a je vyrobena bezrámovým procesem.

Inovativní řešení spočívá v tom, že bezrámové vinutí bylo doposud používáno pouze při výrobě hladkých statorů. Tato technologie umožňuje zvýšit specifický výkon stroje. V souladu s touto technologií byl navržen prototyp. [8]

Tab. 1.2 Tabulka s parametry prototypu [8]:

Maximální výkon s chlazením / bez chlazení	90 - 110 kW / 45 - 60 kW
Napětí	630 V
Maximální moment s chlazením / bez chlazení	650 - 800 N·m / 400 - 450 N·m
Proud s chlazením / bez chlazení	180 A / 96 A
Průměr motoru v kole	380 mm
Průměr rotoru	150 mm
Délka motoru s hřídelí	255 mm

Tuto studii jsem si zvolil z důvodu neustálého vývoje a implementačních pokusů o zavedení tohoto druhu motoru do tělesa kola v elektricky poháněných vozidlech. V budoucnosti by měl být tento druh pohonu zaváděn nejčastěji a to hlavně z důvodu ušetření místa pro baterie.

V článku s názvem **Optimal desing of stator and rotor slot of induction motor for electric vehicle applications** řešili autoři Mohammad Junaid Akhtar a Ranjan Kumar Behera optimální rozměry drážek statoru a rotoru asynchronních motorů s kotvou nakrátko. Pomocí parametrické studie analyzovali vliv rozměrů drážek statoru a rotoru na výkonové

parametry. Pro optimalizace návrhu byl použit algoritmus a jeho výkon porovnán s výkonem konvenčního stroje. Výsledkem této studie bylo ukázáno, že širší a kratší drážka statoru zvyšuje účinnost a zlepšuje účinník, zatímco točivý moment je nižší. Pro rotorovou drážku je vyšší účinnost způsobena užší a hlubší drážkou, zatímco širší a kratší drážka poskytuje lepší účinník. [9]

Tento článek jsem si zvolil z důvodu hlavní náplně této práce a pro následující kapitoly, především pro návrh motoru, by mohl být prospěšný.

Studie s názvem **How electrical steel optimizes traction electric machine design: A serviceable contribution of electrical vehicles** porovnávali autoři Sigrid Jacobs, Lode Vandenbossche a Emmanuel Attrazic dopady různých kvalit a vlastností elektrotechnických ocelí u synchronního stroje s permanentními magnety a u synchronního stroje s vyniklými póly. Přičemž byly provedeny analýzy a jejich výkony simulovány s různými typy elektrotechnických ocelí, různou tloušťkou, odlišnou polarizací a ztrátami. Autoři neuvádějí konkrétní optimální typy elektrotechnických ocelí, ale na konci článku připomínají, že pro konkrétní aplikaci vždy bude záležet na různých faktorech, ale náklady, výkon a účinnost jsou vždy tři nejdůležitější požadavky. [10]

Tento článek jsem si vybral hlavně z důvodu, že synchronní motory jsou nejčastěji využívanými stroji v elektromobilech a proto se dá předpokládat nadále jejich nasazování a tím neustálým vylepšováním parametrů jednotlivých prvků motoru.

Na konferenci s názvem **Analysis and simulatuon of hybrid electric vehielec for sedan vehicle** v Teheránu s moderátory Araz Saleki, Saman Rezazade, Mahmudreza Changizian bylo představeno modelování a simulace dvou topologií hybridních vozidel – paralelní a sériové hybridní elektrické vozidlo pomocí software ADVISOR, což je zdokonalený simulátor vozidel, který vychází z Matlabu / Simulinku. Přesná výkonová analýza vozidla vyžaduje dynamický model, který zahrnuje mnoho komponent, například elektrický motor, baterie, centrální řídicí počítač. Výsledkem těchto simulací bylo zjištěno, že elektrický motor v paralelní topologii postačí menší a motorový výkon je větší než u sériové topologie, zatímco ostatní sledované charakteristiky byly totožné. [11]

Tato studie byla zvolena z důvodu zjištění motorových topologií a jejich možného užití v průmyslové výrobě.

Ve studii s názvem **Quantitative comparison of electromagnetic performance of electrical machines fot HEVs/EVs** se autoři Z. Q. Zhu, W. Q. Chu a Y. Guan zabývají

porovnáváním všem možných typů elektrických motorů, které se používají nebo mohou využívat v elektromobilech nebo hybridních automobilech. V této studii jsou porovnávány základní elektromagnetické vlastnosti a nejsou zde zahrnuty tepelné aspekty. Autoři zde graficky znázornili různé charakteristiky, např. závislost momentu na rychlosti nebo závislost účinníku na rychlosti a jiné. V závěru autoři hodnotí výsledky studie, kde synchronní motory s permanentními magnety pod povrchem rotoru (IPM) mají lepší celkový účinník a lepší účinnost než asynchronní motory. Ovšem asynchronní motory jsou stále konkurence schopné kvůli nízké ceně a vyšší přetížitelnosti. Dále uvádějí možnost alternativy motorů IPM za synchronní reluktanční motory s permanentními magnety z důvodu nižší pořizovací ceny a potenciálně vyšší účinnosti. [12]

Tato studie přinesla ucelený přehled motorů využívaných elektromobilů a jejich vliv na jízdní vlastnosti vozidla.

Ve studii s názvem **An investigation into the induction motor of Tesla Model S vehicle** od autora Grzegorz Sieklucki je bližší analýza indukčního motoru používaného v Modelu S od Tesly. V tomto článku autor hodnotí aktuální nízkou veřejnou informovanost o Modelu S a proto jsou zde zhodnoceny různé problémy a analýzy jako například kinematika, mechanika, elektrický motor, akcelerace, otáčky a jiné. V článku se dále objeví různé grafické fyzikální závislosti, například závislost výkonu a momentu na rychlosti, síly působící na vozidlo a jiné. Dále zde autor přikládá různé odkazy na rozšíření podvědomí o těchto modelech. Cílem této studie bylo více představit tento model po technické stránce. [13]

Na základě této studie byl pro zbylé zadání zvolen typ motoru a parametry stroje obdobné využívané právě v indukčním motoru od Tesly.

Celkově byly všechny studie zvoleny z různých pramenů a odlišných vlastností, nicméně na základě těchto studií je možné další rozvoj všeobecné a i technicky konkrétní informovanosti ohledně těchto motorů.

1.4 Asynchronní motor s kotvou nakrátko

Tento druh elektrického motoru patří mezi nejrozšířenější v celém průmyslu, ve kterém zaujímá více než 75% všech elektrických zařízení. Jeho nezpochybnitelnými výhodami jsou v jednoduchosti, silné spolehlivosti a poměrně nízkým ztrátám. Stator může být tvořen nejčastěji nalisovanými plechy nebo pevnou litinovou částí. Dále jsou ve statoru

drážky a v nich uloženo vinutí. Rotor je tvořen z neizolovaných vodivých mosazných nebo měděných tyčí, v porovnání s hliníkovými dosahují menších ztrát. Na konci jsou tyto tyče pomocí kruhů spojeny dokrátka. Princip funkce spočívá v přivedení napětí k třífázovém vinutí, které je uloženo ve drážkách statoru. Průtokem proudů vinutím vzniká točivé magnetické pole. Toto pole indukuje přes vzduchovou mezeru, která bývá v řádech desítek desetin milimetru, do rotoru napětí, tímto způsobem je zajištěn průchod proudu rotorem, ve kterém vzniká magnetické pole rotoru. Vzájemným působením těchto dvou polí dochází k roztočení rotoru, nicméně zde musí být zachován určité zpoždění fyzického otáčení rotoru za magnetickým polem statoru, které se označuje skluz. Tato podmínka vychází z rovnice indukovaného napětí, kde musí být rozdílná frekvence rotorového a statorového magnetického pole.

Avšak asynchronní motor může pracovat také jako generátor a nebo asynchronní brzda. Generátorický režim je využíván při rekuperativním brzdění, kdy se přebytečná mechanická energie nebude vybíjet skrz odpor a mařit v tepelnou energii a tím nevyjde vniveč. Ale bude se zpátky využívat jako energie elektrická, která se ukládá v bateriích elektromobilů a bude využita pro pozdější provoz. Rekuperativní režim je nezbytný pro kterýkoliv elektromobil z důvodu úspory co možná největší energie. Pro tuto funkci je potřebná kvalitní výkonová elektronika. Využívá se čtyřkvadrantový pulsní měnič, ve kterém figurují převážně IGBT nebo IGCT tranzistory a k těmto spínacím součástkám zpětně orientované diody. Do tohoto měniče je elektrická energie přiváděna z asynchronního motoru přes střídač a napěťový meziobvod. Následně čtyřkvadrantový měnič vhodným spínáním tranzistorů zajistí potřebnou úroveň napětí, která se následně ukládá do baterií. [2,3]

Asynchronní motor využívá převážně ve svých vozidlech největší představitel elektromobilismu současnosti - společnost Tesla. Jedním z hlavních důvodů využívání právě těchto motorů je mimo jiné taky na počest Nikoli Tesly, vědce, který tento typ motoru vynalezl již v 19. století. Tyto motoru jsou také použity v modelu Tesla Model S, Tesla Model X a BJEV EC 180.

2 Elektromagnetický návrh asynchronního motoru s kotvou nakrátko

Výpočty asynchronního motoru vychází z určení hlavních rozměrů stroje, tj. vnitřního průměru statoru D a ideální délky vzduchové mezery l_i . Tyto rozměry jsou spojeny s výkonem, úhlovou rychlostí a elektromagnetickým zatížením tzv. strojovou konstantou.

2.1 Určení hlavních rozměrů

V první etapě výpočtů se určuje návrh veškerých rozměrů statoru a rotoru. Výpočet vychází z prvotních zadaných hodnot, veškeré další hodnoty budou určovány z grafů a tabulek. Správnost navržených parametrů se následně posuzuje podle kontrolních koeficientů.

Zadané hodnoty:

$$P_n = 110 \text{ kW}$$

$$U_{nf} = 400 \text{ V}$$

$$n_1 = 5000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$$

Počet pólových dvojic a počet fází byl zvolen s ohledem na firmu Tesla, Inc., která ve svých elektromobilech využívá především 3-fázový, 4-pólový asynchronní motor a proto bude tento návrh koncipován tímto směrem.

2.1.1 Počet pólových dvojic

Počet pólových dvojic byl zvolen $p = 2$, tzn. 4-pólový motor. Ze zadané hodnoty synchronních otáček lze dopočítat výstupní frekvenci z měniče do motoru za pomoci jednoduchého vzorce.

$$f = \frac{p \cdot n_1}{60} = \frac{2 \cdot 5000}{60} = 166,7 \text{ Hz} \quad (2.1)$$

2.1.2 Výška osy v závislosti na výkonu a otáčkách

Výška osy se předběžně určí z grafu (Obr. 6.7.) [1], následně se zvolí z řady výšek (tab. 6.6.) [1] nejbližší nižší hodnota h .

$$h = 0,225 \text{ m}$$

2.1.3 Vnější průměr statoru

Vnější průměr statoru, který odpovídá asynchronním motorům řady 4A se určí z tab. 6.6. [1], a to jako hodnota odpovídající zvolené normalizované výšce osy.

$$D_e = 0,392 \text{ m}$$

2.1.4 Vnitřní průměr statoru

Při stejné hodnotě indukce ve všech dílčích částech magnetického obvodu stroje, lze uvažovat výšku jha statoru jako funkci přímo úměrnou magnetickému toku a nepřímo úměrná počtu pólů stroje.

Při úvaze, kdy rozměry drážek nejsou závislé na počtu pólů, lze zavést vztah.

$$D = K_D \cdot D_e \quad (2.2)$$

Koeficient K_D , který charakterizuje poměry vnitřních a vnějších průměrů statoru a slouží k předběžnému výpočtu vnitřního průměru statoru D , lze jej určit z tab. 6.7. [1]

$K_D = 0,62 - 0,68$, pro následující výpočty byla zvolena hodnota 0,65.

$$D = K_D \cdot D_e = 0,65 \cdot 0,392 = 0,255 \text{ m} \quad (2.3)$$

2.1.5 Pólová rozteč

$$t_p = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot 0,255}{2 \cdot 2} = 0,200 \text{ m} \quad (2.4)$$

2.1.6 Výpočtový vnitřní výkon

$$P_i = m \cdot I \cdot U_i = P_2 \cdot \frac{k_E}{\eta \cdot \cos \varphi} = 110 \cdot 10^3 \frac{0,974}{0,94 \cdot 0,92} = 123890 \text{ VA} \quad (2.5)$$

$$k_E = 0,974$$

$$\eta = 0,94$$

$$\cos \varphi = 0,92$$

kde koeficient k_E charakterizuje poměr indukovaného napětí vinutí statoru k jmenovitému napětí, lze jej určit z obr. 6.8. [1]. Velikosti hodnot η a $\cos \varphi$ lze získat z obr. 6.9. b [1]

2.1.7 Elektromagnetické zatížení

Elektromagnetické zatížení je v podstatě závislé na lineární hustotě proudu A a indukci ve vzduchové mezeře B_δ . Přibližné hodnoty se určí z obr. 6.11. b [1].

$$A = 37 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$$

$$B_\delta = 0,77 \text{ T}$$

2.1.8 Činitel pólového krytí α_δ , činitel tvaru pole k_B a činitel statorového vinutí k_{V1}

$$\alpha_\delta = \frac{2}{\pi} \cong 0,64 \quad k_B = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{2}} \cong 1,11 \quad k_{V1} = 0,91$$

Tyto hodnoty se uvažují při předpokladu sinusového pole, přičemž vliv zploštění se bude uvažovat až při dílčích výpočtech úseků magnetického obvodu.

2.1.9 Synchronní úhlová rychlost hřídele motoru

$$\omega_s = 2\pi \cdot \frac{n_1}{60} = 2\pi \cdot \frac{5000}{60} = 523,6 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (2.6)$$

2.1.10 Essonův činitel

$$C = \frac{\pi}{60} \cdot \alpha_\delta \cdot A \cdot \beta_\delta \cdot k_B \cdot k_{V1} = \frac{\pi}{60} \cdot 0,64 \cdot 37 \cdot 10^3 \cdot 0,77 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \\ = 964,4 \text{ VA} \cdot \text{m}^3 \cdot \text{ot}^{-1} \quad (2.7)$$

2.1.11 Délka stroje

$$l_1 = \frac{P_i}{D_i^2 \cdot n_s \cdot C} = \frac{123,9 \cdot 10^3}{0,255^2 \cdot 964 \cdot 5000} = 0,395 \text{ m} \quad (2.8)$$

2.1.12 Ideální délka vzduchové mezery

$$l_i = \frac{P_i}{D^2 \cdot \omega_s \cdot k_B \cdot k_{V1} \cdot A \cdot B_\delta} \\ = \frac{123890}{0,255^2 \cdot 523,6 \cdot 1,11 \cdot 0,91 \cdot 37 \cdot 10^3 \cdot 0,77} = 0,126 \text{ m} \quad (2.9)$$

2.1.13 Štíhlostní poměr

Pro vhodné velikosti veličin D a l_i se zavádí štíhlostní poměr λ

$$\lambda = \frac{l_i}{t_p} = \frac{0,126}{0,200} = 0,63 \quad (2.10)$$

V tomto případě výsledek odpovídá oblasti dle obr. 6.14. a [1] a proto se dá předpokládat správné zvolení velikosti parametrů.

2.2 Určení statorových částí

V následující etapě se určuje počet drážek statoru Q_1 a počet závitů sériově řazených jedné fáze statorového vinutí N_1 . Počet závitů v sérii by měl korespondovat s hodnotami určenými v předchozí etapě, tzn. stejné hodnoty lineární hustoty proudu a indukce ve vzduchové mezeře. Počet drážek se volí s ohledem na rovnoměrnost rozložení vinutí.

2.2.1 Drážková rozteč

Drážková rozteč t_{d1} se pro rovnoměrné rozložení vinutí volí malá z důvodu velkého počtu drážek po obvodu stroje. Velikosti mezních hodnot t_{d1min} a t_{d1max} se určí z obr. 6.15. oblast 2 [1] pro stroj s $90 < h \leq 250$ mm.

$$t_{d1min} = 0,0132 \text{ m}$$

$$t_{d1max} = 0,0156 \text{ m}$$

Konečná drážková rozteč je určena až v kapitole 2.2.3 po všech potřebných výpočtech.

2.2.2 Počet drážek

Určí se mezní hodnoty pro počet drážek. Výsledný počet drážek musí být dělitelný počtem fází s ohledem na symetrii vinutí a požadovanému počtu drážek na pól a fázi q , které musí být celé číslo.

$$\begin{aligned} Q_{1min} \text{ až } Q_{1max} &= \frac{\pi \cdot D}{t_{d1max}} \text{ až } \frac{\pi \cdot D}{t_{d1min}} = \frac{\pi \cdot 0,255}{0,0132} \text{ až } \frac{\pi \cdot 0,255}{0,0156} \\ &= 52 \text{ až } 61 \end{aligned} \quad (2.11)$$

Výsledný počet drážek se zvolí na hodnotu $Q_1 = 60$, který vyhovuje požadavkům.

2.2.3 Počet drážek na pól a fázi a konečná drážková rozteč

$$q = \frac{Q_1}{2 \cdot p \cdot m} = \frac{60}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 5 \quad (2.12)$$

$$t_{d1} = \frac{\pi \cdot D}{2 \cdot p \cdot m \cdot q} = \frac{\pi \cdot 0,255}{2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 5} = 0,0134 \text{ m} \quad (2.13)$$

2.2.4 Počet vodičů v drážce

Prvním krokem je určení předběžného počtu vodičů v drážce za předpokladu, že vinutí nemá paralelní větve ($a = 1$).

$$V'_d = \frac{\pi \cdot D \cdot A}{I_{1N} \cdot Q_1} = \frac{\pi \cdot 0,255 \cdot 37 \cdot 10^3}{106 \cdot 60} = 4,66 \quad (2.14)$$

kde jmenovitý proud vinutí statoru lze získat ze vztahu

$$I_{1N} = \frac{P_2}{m \cdot U_N \cdot \eta \cdot \cos\varphi} = \frac{110 \cdot 10^3}{3 \cdot 400 \cdot 0,94 \cdot 0,92} = 106 \text{ A} \quad (2.15)$$

Při tomto návrhu se použije dvouvrstvé vinutí a tři paralelní větve $a = 3$. Takže proud paralelní větví bude následující:

$$I_a = \frac{I_{1N}}{a} = \frac{106}{3} = 35,3 \text{ A} \quad (2.16)$$

Dále se určí předběžný počet vodičů v drážce:

$$V_d = a \cdot V'_d = 3 \cdot 4,66 \cong 14 \quad (2.17)$$

Byla provedeno zaokrouhlení na nejbližší celé číslo, které je dělitelné dvěma.

2.2.5 Konečný počet závitů ve fázi a konečná lineární hustota proudu

$$N_1 = \frac{V_d \cdot Q_1}{2 \cdot a \cdot m} = \frac{14 \cdot 60}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 47 \text{ závitů} \quad (2.18)$$

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot I_{1N}}{\pi \cdot D} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 47 \cdot 106}{\pi \cdot 0,255} = 37,3 \cdot 10^3 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \quad (2.19)$$

Hodnota konečné lineární hustoty by se neměla příliš lišit již od dříve určené.

2.2.6 Činitel vinutí

$$k_v = k_r \cdot k_y \quad (2.20)$$

kde se činitel rozlohy k_r určí ze vztahu

$$k_r = \frac{\sin\left(\frac{q}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{1}{Q_p} \cdot \frac{\pi}{2}\right)} = \frac{\sin\frac{\pi}{2 \cdot m}}{q \cdot \sin\frac{\pi}{2 \cdot m \cdot q}} = \frac{0,5}{q \cdot \sin\frac{30^\circ}{q}} = \frac{0,5}{5 \cdot \sin\frac{30^\circ}{5}} \quad (2.21)$$

$$= 0,957$$

a činitel kroku $k_y = 0,94$ pro $\beta = 0,8$ se určí z obr. 3.11. [1]. Činitel vinutí tedy bude:

$$k_v = k_r \cdot k_y = 0,957 \cdot 0,94 = 0,9 \quad (2.22)$$

2.2.7 Magnetický tok a magnetická indukce ve vzduchové mezeře

$$\Phi = \frac{k_E \cdot U_{1N}}{4 \cdot k_B \cdot N_1 \cdot f_1 \cdot k_{v1}} = \frac{0,974 \cdot 400}{4 \cdot 1,11 \cdot 47 \cdot 167 \cdot 0,91} = 0,01229 \text{ Wb} \quad (2.23)$$

$$B_{\delta} = \frac{\Phi}{\alpha_{\delta} \cdot t_p \cdot l_i} = \frac{p \cdot \Phi}{D \cdot l_i} = \frac{2 \cdot 0,01229}{0,255 \cdot 0,126} = 0,765 \text{ T} \quad (2.24)$$

Magnetická indukce odpovídá mezím, které již byly určeny v první etapě, tzn. vyhovuje požadavkům.

2.2.8 Průřez vodiče

$$S_{ef1} = \frac{I_a}{J_1} = \frac{35,3}{5,04 \cdot 10^6} = 7,01 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \quad (2.25)$$

Je snaha o velkou hodnotu proudové hustoty J_1 , ovšem takto se zvyšují i ztráty ve vinutí. Projevují se snížením účinnosti motoru a zvýšením teploty ve vinutí. Proudová hustota klesá s rostoucími rozměry stroje.

$$J_1 = \frac{(AJ)}{A} = \frac{188 \cdot 10^9}{37,3 \cdot 10^3} = 5,04 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2.26)$$

Hodnota součinu lineární proudové hustoty a proudové hustoty ve vinutí (AJ) se určí z obr. 6.16. b [1].

Průřez všech vodičů v drážce:

$$S_C = V_d \cdot S_{ef1} = 14 \cdot 7,01 = 98,14 \text{ mm}^2 \quad (2.27)$$

Výsledná proudová hustota

$$J = \frac{I_{1N}}{a \cdot S_v \cdot n_p} = \frac{106}{3 \cdot 7,069 \cdot 10^{-6} \cdot 2} = 2,5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2} \quad (2.28)$$

2.2.9 Rozměry drážek a zubů statoru

Rozměry drážek je nutné volit s ohledem na počet vodičů a jejich rozměrů, včetně izolace. Dále je podstatné, aby velikost magnetické indukce v zubech a jhu statoru byla ve stanovených mezích. Při tomto výpočtu byla zvolena drážka typu **M** (dle obr. 6.19. [1]), která má rovnoběžné strany a mění se z ní magnetická indukce v zubech.

Výška jha statoru

$$h_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot B_{j1} \cdot l_{Fe1} \cdot k_{Fe}} = \frac{0,01229}{2 \cdot 1,5 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 0,0335 \text{ m} \quad (2.29)$$

Dovolená indukce v jhu statoru B_{j1} se určí z tab. 6.10. [1]. V tomto případě se jedná o

$B_{j1} = 1,4 - 1,6 \text{ T}$. Byla zvolena $B_{j1} = 1,5 \text{ T}$.

Činitel plnění železa k_{Fe} se určí z tab. 6.11. [1]. Určeno $k_{Fe} = 0,97$.

Orientační šířka zubu

Dovolená indukce v zubu statoru B_{z1} se určí z tab. 6.10. [1]. V tomto případě se jedná o $B_{z1} = 1,7 - 1,9$ T. Byla zvolena $B_{z1} = 1,8$ T.

$$b_{z1min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{B_{z1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0134 \cdot 0,126}{1,8 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 5,9 \text{ mm} \quad (2.30)$$

Šířka drážky

$$b_{d1} = t_{d1} - b_{z1} = 0,0134 - 0,00594 = 7,5 \text{ mm} \quad (2.31)$$

Celková velikost vodiče (izolace, vyložení drážky,...)

Jednotlivé vodiče jsou izolovány kaptonem, následuje cívková izolace. Dále je potřeba zahrnout do výpočtů vyložení drážky a technologickou vůli.

kapton - 0,18 mm

cívková izolace - 0,78 mm

vyložení drážky - 0,8 mm

technologická vůle - 1 mm

Součet velikostí těchto dílčích částí $b_{iz} = 2,76$ mm.

Skutečná šířka vodiče

$$b_v = b_{d1} - b_{iz} = 0,00746 - 0,00276 = 4,7 \text{ mm} \quad (2.32)$$

Výška vodiče

$$h_v = \frac{S_{ef1}}{b_v} = \frac{7,01}{4,7} = 1,49 \text{ mm} \quad (2.33)$$

Hloubka drážky

I zde je třeba do výpočtu zanést hodnoty izolací, klínu atd...

kapton - 2,88 mm

cívková izolace - 1,56 mm

vyložení drážky - 0,4 mm

klín - 2 mm

vrchol drážky - 1 mm

Součet velikostí těchto dílčích částí $h_{iz} = 7,84$ mm.

Skutečná výška drážky

$$b_v = h_v \cdot V_d - h_{iz} = 1,49 \cdot 14 - 7,84 = 28,7 \text{ mm} \quad (2.34)$$

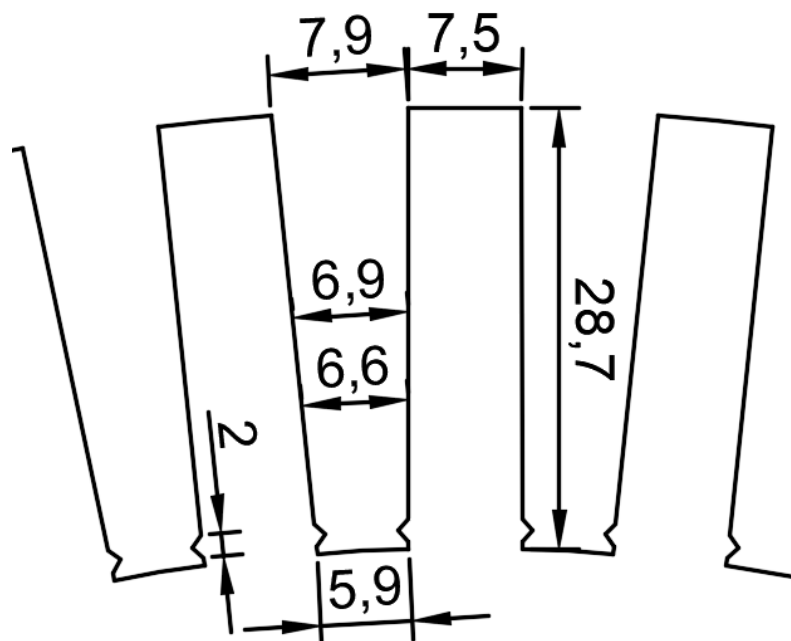
Šířka v širším konci zubu

$$\begin{aligned} b_{z1max} &= t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot b_v}{D_e}\right) - b_{d1} \\ &= 0,0134 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,0287}{0,392}\right) - 0,00746 = 7,9 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.35)$$

Šířka zubu v 1/2 a v 1/3 výšky zubu

$$\begin{aligned} b_{z1/2} &= t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot b_v}{2 \cdot D_e}\right) - b_{d1} = 0,0134 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,0287}{2 \cdot 0,392}\right) - 0,00746 \\ &= 6,9 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} b_{z1/3} &= t_{d1} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot b_v}{3 \cdot D_e}\right) - b_{d1} = 0,0134 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,0287}{3 \cdot 0,392}\right) - 0,00746 \\ &= 6,6 \text{ mm} \end{aligned} \quad (2.37)$$



Obr. 2.1 Drážky a zuby statoru

2.3 Volba vzduchové mezery

Od volby správné velikosti vzduchové mezery se odvíjí další parametry. Patří mezi ně účinník $\cos \varphi$ a nebo pulzační a povrchové ztráty. Je snaha o co nejmenší vzduchovou mezeru.

$$\delta \cong \frac{D}{1,2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot p}\right) \cdot 10^{-3} = \frac{0,255}{1,2} \cdot \left(1 + \frac{9}{2 \cdot 2}\right) \cdot 10^{-3} = 0,69 \quad (2.38)$$

$$\cong 0,7 \text{ mm}$$

2.4 Určení částí rotoru nakrátko

Tento typ vinutí nemá určitý počet fází a pólů proto může tento typ rotoru pracovat ve strojích, jejichž statoru mají různé počty pólů.

2.4.1 Počet drážek rotoru

Asynchronní motory s kotvou nakrátko obvykle mají $Q_1 > Q_2$, neboť vzájemným vztahem mohou ovlivňovat ztráty. Dle tab. 6.15 [1] byly zvoleny drážky nenatočené s $Q_2 = 52$.

2.4.2 Určení hlavních rozměrů rotoru

Délka rotoru

Délka paketu je stejná jako u statoru.

$$l_2 = l_1 = 0,126 \text{ m}$$

Vnější průměr rotoru

$$D_2 = D - 2 \cdot \delta = 0,255 - 2 \cdot 0,0007 = 0,2536 \text{ m} \quad (2.39)$$

Drážková rozteč

$$t_{d2} = \frac{\pi \cdot D_2}{Q_2} = \frac{\pi \cdot 0,2536}{52} = 0,0153 \text{ m} \quad (2.40)$$

Vnitřní průměr rotoru (průměr hřídele)

$$D_i = D_h = k_h \cdot D_{es} = 0,23 \cdot 0,5164 = 0,118 \text{ m} \quad (2.41)$$

kde činitel $k_h = 0,23$ byl zvolen z tab. 6.16. [1] pro velikost $h = 71$ až 250 mm.

Proud v tyči rotoru

$$I_{2t} = k_i \cdot I_1 \cdot p_i = 0,93 \cdot 106 \cdot 4,88 = 481 \text{ A} \quad (2.42)$$

kde činitel $k_i = 0,93$, který charakterizuje vliv magnetizačního proudu a odpor vinutí, byl zvolen z obr. 6.22. [1] a proudový převod stroje p_i je dán vztahem:

$$p_i = \frac{2 \cdot m \cdot N_1 \cdot k_{v1}}{Q_2} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 47 \cdot 0,9}{52} = 4,88 \quad (2.43)$$

zde platí $k_{v1} = k_r = 0,9$

2.4.3 Proud kruhem nakrátko

$$I_{kn} = \frac{I_{2t}}{\Delta} = \frac{481}{0,297} = 1619,5 \text{ A} \quad (2.44)$$

kde činitel přepočtu proudů v kruhu na proud v tyči Δ se získá ze vztahu:

$$\Delta = 2 \cdot \sin \cdot \frac{\pi \cdot p}{Q_2} = 2 \cdot \sin \cdot \frac{\pi \cdot 2}{52} = 0,297 \quad (2.45)$$

2.4.4 Průřez tyče

$$S_t = \frac{I_{2t}}{J_2} = \frac{481}{5 \cdot 10^6} = 96,2 \text{ mm}^2 \quad (2.46)$$

kde proudová hustota byla zvolena $J_2 = 5 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$.

Při respektování skutečnosti, že kruh se ochlazuje lépe než tyče, lze proudovou hustotu upravit $J_{kn} = 0,8 \cdot J_2 = 0,8 \cdot 5 = 4 \cdot 10^6 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$. Poté lze vypočítat průřez kruhu.

$$S_{kn} = \frac{I_{kn}}{J_{kn}} = \frac{1619,5}{4 \cdot 10^6} = 404,9 \text{ mm}^2 \quad (2.47)$$

2.4.5 Rozměry rotorové drážky

Další část výpočtu se zabývá určením rotorové drážky. Byla zvolena lichoběžníková drážka.

Šířka zubu

$$b_{z2} = \frac{B_\delta \cdot t_{d2} \cdot l_i}{B_{z2} \cdot l_{fe2} \cdot k_{fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0153 \cdot 0,126}{1,8 \cdot 0,126 \cdot 0,97} \cong 0,0068 \text{ m} \quad (2.48)$$

kde $B_{z2} = 1,8 \text{ T}$ je dovolená indukce v zubech rotoru dle tab. 6.10.[1].

Otevření drážky a vzdálenost od povrchu

$b_0 = 1,5 \text{ mm}$, $h_0 = 0,7 \text{ mm}$

Šířka drážky v horní části

$$\begin{aligned} b_{dhmax} &= \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_p)}{Q_2} - b_{z2} = \frac{\pi \cdot (0,2536 - 2 \cdot 0,0007)}{52} - 0,0068 \\ &= 0,0085 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.49)$$

Šířka drážky v nejmenší části

$$\begin{aligned}
 b_{dhmin} &= \frac{\pi \cdot (D_2 - 2 \cdot h_p - 2 \cdot h_{d2})}{Q_2} - b_{z2} \\
 &= \frac{\pi \cdot (0,2536 - 2 \cdot 0,0007 - 2 \cdot 0,018)}{52} - 0,0068 \quad (2.50) \\
 &= 0,00626 \text{ m}
 \end{aligned}$$

kde byla určena hloubka drážky $h_{d2} = 18 \text{ mm}$ s ohledem na šířku drážky a velikost průřezu vodiče.

Skutečný průřez vodiče

$$\begin{aligned}
 S_t &= \frac{(b_{d2max} + b_{d2min}) \cdot h_{d2}}{2} = \frac{(0,0085 + 0,00626) \cdot 0,018}{2} \\
 &= 132,8 \text{ mm}^2 \quad (2.51)
 \end{aligned}$$

Při porovnání hodnoty průřezu předem počítaného (2.45) se skutečným, je zde viditelný nárůst velikosti průřezu, který je žádoucí z důvodu, že nedojde k překročení zvolené proudové hustoty. Dalším aspektem je nedokonalost výrobního procesu vodiče.

Výška vodiče

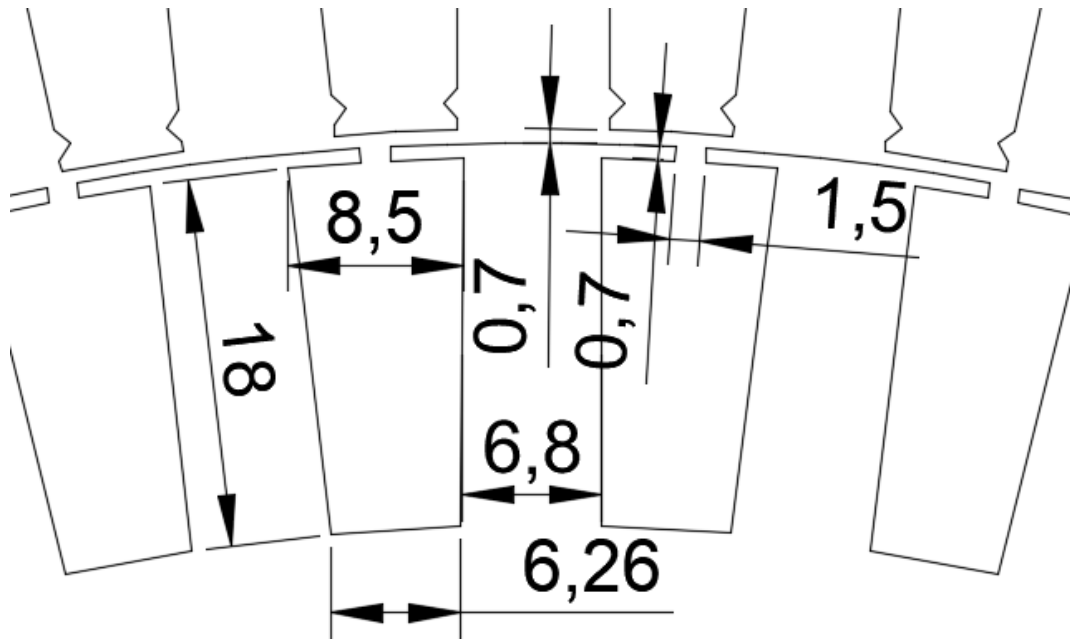
$$a_{kn} = 1,2 \cdot h_{d2} = 1,2 \cdot 0,018 = 0,0216 \text{ m} \quad (2.52)$$

Šířka kruhu

$$b_{kn} = \frac{S_{kn}}{a_{kn}} = \frac{404,9 \cdot 10^{-6}}{0,0216} = 0,0187 \text{ m} \quad (2.53)$$

Skutečná výška jha rotoru

$$\begin{aligned}
 h_{j2} &= \frac{D_2 - D_h}{2} - (h_{d2} + h_0) = \frac{0,2536 - 0,118}{2} - (0,018 + 0,0007) \\
 &= 0,0505 \text{ m} \quad (2.54)
 \end{aligned}$$



Obr. 2.1 Drážky a zuby rotoru

2.5 Výpočet magnetického obvodu

Pro výpočet magnetického obvodu se uvažuje chod motoru naprázdno, při kterém dochází k silnému nasycení zubů statoru a rotoru. [1]

2.5.1 Velikosti jednotlivých indukcí

Zub statoru

$$B_{z1max} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1min} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0134 \cdot 0,126}{0,00594 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,78 \text{ T} \quad (2.55)$$

$$B_{z1min} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1max} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0134 \cdot 0,126}{0,0079 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,34 \text{ T} \quad (2.56)$$

$$B_{z1/3} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1/3} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0134 \cdot 0,126}{0,0066 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,6 \text{ T} \quad (2.57)$$

$$B_{z1/2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d1} \cdot l_i}{b_{z1/2} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0134 \cdot 0,126}{0,0069 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,53 \text{ T} \quad (2.58)$$

Zub rotoru

$$B_{z2} = \frac{B_{\delta} \cdot t_{d2} \cdot l_i}{b_{z2} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,765 \cdot 0,0153 \cdot 0,126}{0,0068 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,77 \text{ T} \quad (2.59)$$

Jho statoru

$$B_{j1} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j1} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,01229}{2 \cdot 0,0335 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 1,5 \text{ T} \quad (2.60)$$

Jho rotoru

$$B_{j2} = \frac{\Phi}{2 \cdot h_{j2} \cdot l_i \cdot k_{Fe}} = \frac{0,01229}{2 \cdot 0,0505 \cdot 0,126 \cdot 0,97} = 0,99 \text{ T} \quad (2.61)$$

2.5.2 Velikosti magnetických napětí

Prvním krokem je určení hodnot Carterova činitele drážkování, zvlášť pro stator a zvlášť pro rotor. Výsledný Carterův činitel je součinem těchto dvou.

Carterův činitel statoru k_{c1} a rotoru k_{c2}

$$k_{c1} = \frac{t_{d1}}{t_{d1} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0134}{0,0134 - 0,64 \cdot 0,0007} = 1,03 \quad (2.62)$$

$$k_{c2} = \frac{t_{d2}}{t_{d2} - \gamma \cdot \delta} = \frac{0,0153}{0,0153 - 0,64 \cdot 0,0007} = 1,03 \quad (2.63)$$

kde koeficient γ lze dopočítat dle vztahu:

$$\gamma = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,0015}{0,0007}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,0015}{0,0007}\right)} = 0,64 \quad (2.64)$$

Celkový Carterův činitel

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2} = 1,03 \cdot 1,03 = 1,069 \quad (2.65)$$

Magnetomotorické napětí vzduchové mezery

$$U_\delta = \frac{2}{\mu_0} \cdot B_\delta \cdot \delta \cdot k_c = \frac{2}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} \cdot 0,765 \cdot 0,0007 \cdot 1,069 = 911 \text{ A} \quad (2.66)$$

kde $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ je permeabilita vakua.

Dle Simpsonova pravidla byla určena hodnota intenzity magnetického pole v zubech

$$\begin{aligned} H_{z1} &= \frac{1}{6} \cdot (H_{z1max} + 4 \cdot H_{z1/2} + H_{z1min}) = \frac{1}{6} \cdot (2500 + 4 \cdot 1210 + 790) \\ &= 1355 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1} \end{aligned} \quad (2.67)$$

kde jednotlivým hodnotám indukce odpovídají následující hodnoty intenzity magnetického pole dle tab. D 2.9.[1], kde byly zvoleny oceli 2211 pro jha a dle tab. D 2.10.[1], kde byly zvoleny oceli 2211 pro zuby:

$$B_{z1max} = 1,78 T \approx H_{z1max} = 2500 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{z1min} = 1,34 T \approx H_{z1min} = 790 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{z1/3} = 1,6 T \approx H_{z1/3} = 1450 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{z1/2} = 1,53 T \approx H_{z1/2} = 1210 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{z2} = 1,77 T \approx H_{z2} = 2380 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{j1} = 1,5 T \approx H_{j1} = 905 A \cdot m^{-1}$$

$$B_{j2} = 0,99 T \approx H_{j2} = 269 A \cdot m^{-1}$$

Magnetomotorické napětí zuby statoru

$$U_{mz1} = 2 \cdot h_{d1} \cdot H_{z1} = 2 \cdot 0,0287 \cdot 1355 = 78 A \quad (2.68)$$

Magnetomotorické napětí zuby rotoru

$$U_{mz2} = 2 \cdot h_{d2} \cdot H_{z2} = 2 \cdot 0,018 \cdot 2380 = 86 A \quad (2.69)$$

Činitel nasycení zubů

$$k_z = 1 + \frac{U_{mz1} + U_{mz2}}{U_\delta} = 1 + \frac{78 + 86}{911} = 1,18 \quad (2.70)$$

Magnetomotorické napětí jha statoru

$$U_{mj1} = l_{j1} \cdot H_{j1} = 0,305 \cdot 905 = 276,2 A \quad (2.71)$$

kde je třeba určit délku střední magnetické siločáry v jhu statoru l_{j1} :

$$l_{j1} = \frac{\pi \cdot (D_e - h_{j1})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,392 - 0,0335)}{2 \cdot 2} = 0,305m \quad (2.72)$$

Magnetomotorické napětí jha rotoru

$$U_{mj2} = l_{j2} \cdot H_{j2} = 0,053 \cdot 269 = 14,3 A \quad (2.73)$$

kde je třeba určit délku střední magnetické siločáry v jhu rotoru l_{j2} :

$$l_{j2} = \frac{\pi \cdot (D_h - h_{j2})}{2 \cdot p} = \frac{\pi \cdot (0,118 - 0,0505)}{2 \cdot 2} = 0,053 \text{ m} \quad (2.74)$$

2.5.3 Výsledné magnetomotorické napětí na jednu pólovou dvojici

$$\begin{aligned} F_m &= U_\delta + U_{mz1} + U_{mz2} + U_{mj1} + U_{mj2} \\ &= 911 + 78 + 86 + 276,2 + 14,3 = 1365,5 \text{ A} \end{aligned} \quad (2.75)$$

Činitel nasycení magnetického obvodu

$$k_z = \frac{F_m}{U_\delta} = \frac{1365,5}{911} = 1,49 \quad (2.76)$$

2.5.4 Magnetizační proud

$$I_\mu = \frac{p \cdot F_m}{0,9 \cdot m_1 \cdot N_1 \cdot k_{v1}} = \frac{2 \cdot 1365,5}{0,9 \cdot 3 \cdot 0,9 \cdot 47} = 23,9 \text{ A} \quad (2.77)$$

$$i_\mu = \frac{I_\mu}{I_N} = \frac{23,9}{106} \cdot 100\% = 22,5\% \quad (2.78)$$

2.6 Velikosti odporů a reaktancí

Při projekci asynchronního motoru je nutno znát odpory, rozptylové reaktance vinutí statoru i rotoru, dále vzájemnou reaktanci a fiktivní reaktanci, které respektuje ztráty v železe.

Magnetizační reaktance

$$X_\mu = \frac{U_{nf} \cdot k_E}{I_\mu} = \frac{400 \cdot 0,97}{23,9} = 16,23 \Omega \quad (2.79)$$

2.6.1 Odpor jedné fáze statoru

Střední šířka cívky

$$b_c = \frac{\pi \cdot (D + h_{d1})}{2 \cdot p} \cdot \beta = \frac{\pi \cdot (0,255 + 0,0287)}{2 \cdot 2} \cdot 0,8 = 0,178 \text{ m} \quad (2.80)$$

Délka čela

$$l_\zeta = K_\zeta \cdot b_c + 2 \cdot B + h_{d1} = 1,26 \cdot 0,178 + 2 \cdot 0,025 + 0,0287 = 0,3 \text{ m} \quad (2.81)$$

kde $B = 0,025 \text{ m}$ (tab. 6.20.[1]) a činitel K_ζ se získá ze vztahu:

$$K_{\zeta} = \frac{1}{\sqrt{1-m^2}} = \frac{1}{\sqrt{1-0,612^2}} = 1,26 \quad (2.82)$$

v němž:

$$m = \frac{(b_v + S)}{t_{d1}} = \frac{(0,0047 + 0,0035)}{0,0134} = 0,612 \quad (2.83)$$

Vyložení čela

$$\begin{aligned} l_v &= K_v \cdot b_c + B - 0,5 \cdot h_{d1} = 0,385 \cdot 0,178 + 0,025 - 0,5 \cdot 0,0287 \\ &= 0,079 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.84)$$

kde činitel $K_v = 0,385$ m se získá ze vztahu:

$$K_v = 0,5 \cdot K_{\zeta} \cdot m = 0,5 \cdot 1,26 \cdot 0,612 = 0,385 \text{ m} \quad (2.85)$$

Délka drážkové části

Délka drážkové části je stejně velká jako délka stroje.

$$l_d = l_1 = 0,126 \text{ m}$$

Střední délka zavitu

$$l_{av} = 2 \cdot (l_d + l_{\zeta}) = 2 \cdot (0,126 + 0,3) = 0,852 \text{ m} \quad (2.86)$$

Celková délka vodičů jedné fáze vinutí

$$l = l_{av} \cdot N_1 = 0,852 \cdot 47 = 40,04 \text{ m} \quad (2.87)$$

Skutečná velikost odporu jedné fáze statoru

$$R_1 = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{l}{S_{ef} \cdot a} \cdot k_{\sim} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{40,04}{7,01 \cdot 10^{-6} \cdot 3} \cdot 1 = 0,0405 \Omega \quad (2.88)$$

kde $\rho_{\vartheta} = 1/47 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$ je rezistivita pro vinutí z měděných vodičů při teplotě 75° a koeficient $k_{\sim} = 1$ nemá na výsledek vliv, proto již bude při dalších výpočtech zanedbán.

2.6.2 Odpor jedné fáze rotoru

Odpor tyče

$$R_t = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{l_2}{S_t} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{0,126}{96,2 \cdot 10^{-6}} = 2,787 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.89)$$

Odpor kruhu nakrátko

$$R_{kn} = \rho_{\vartheta} \cdot \frac{\pi \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot S_{kn}} = \frac{1}{47} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{\pi \cdot 0,232}{52 \cdot 404,9 \cdot 10^{-6}} = 7,365 \cdot 10^{-6} \Omega \quad (2.90)$$

kde střední průměr kruhu nakrátko D_{kn} je určen ze vztahu:

$$D_{kn} = D_2 - a_k = 0,2536 - 0,0216 = 0,232 \text{ m} \quad (2.91)$$

Odpor jedné fáze rotoru

$$R_2 = R_t + \frac{R_{kn}}{\Delta^2} = 2,787 \cdot 10^{-5} + \frac{7,365 \cdot 10^{-6}}{0,297} = 5,267 \cdot 10^{-5} \Omega \quad (2.92)$$

Odpor fáze rotoru přepočítaný na počet závitů statoru

$$\begin{aligned} R'_2 &= 4 \cdot R_2 \cdot m \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 4 \cdot 5,267 \cdot 10^{-5} \cdot 3 \cdot \frac{(47 \cdot 0,9)^2}{52} \\ &= 0,0217 \Omega \end{aligned} \quad (2.93)$$

Poměrná hodnota

$$r'_2 = R'_2 \cdot \frac{I_n}{U_{nf}} \cdot 100\% = 0,0217 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 106}{400} \cdot 100\% = 0,99\% \quad (2.94)$$

2.6.3 Rozptylová reaktance statoru

Činitel magnetické vodivosti drážky

$$\begin{aligned} \lambda_{d1} &= \frac{h_2 - h_m}{3 \cdot b_{d1}} \cdot k_{\beta} + \frac{h_1}{b_{d1}} \cdot k'_{\beta} + \frac{h_m}{4 \cdot b_{d1}} \\ &= \frac{0,034 - 0,0015}{3 \cdot 0,00746} \cdot 0,8875 + \frac{0,004}{0,00746} \cdot 0,85 + \frac{0,0015}{4 \cdot 0,00746} \\ &= 1,749 \end{aligned} \quad (2.95)$$

kde jednotlivé velikosti veličin jsou:

výška otevření drážky: $h_1 = 0,004 \text{ m}$

výška mědi s mezivložkami: $h_2 = 0,034 \text{ m}$

výška mezivložky: $h_m = 0,0015 \text{ m}$

šířka drážky: $b_{d1} = 0,00746 \text{ m}$

dále je žádoucí vyjádřit hodnoty činitelů, kteří jsou závislí na kroku vinutí:

$$k'_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot \beta) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,8) = 0,85 \quad (2.96)$$

$$k_{\beta} = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot k'_{\beta}) = 0,25 \cdot (1 + 3 \cdot 0,85) = 0,8875 \quad (2.97)$$

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\begin{aligned} \lambda_{\xi 1} &= 0,34 \cdot \frac{q}{l_i} \cdot (l_{\xi} - 0,64 \cdot \beta \cdot t_p) = 0,34 \cdot \frac{5}{0,126} (0,3 - 0,64 \cdot 0,8 \cdot 0,2) \\ &= 2,66 \end{aligned} \quad (2.98)$$

Činitel magnetické vodivosti diferenčního rozptylu vinutí

$$\lambda_{dif1} = \frac{t_{d1}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_1 = \frac{0,0134}{12 \cdot 0,0007 \cdot 1,069} \cdot 0,62 = 0,925 \quad (2.99)$$

kde činitel, u kterého nejsou natočeny statorové ani rotorové drážky se vyjádří ze vztahu:

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \left(2 \cdot \frac{t_{d2}}{t_{d1}} - \frac{t_{d1}}{t_{d2}} \cdot \Delta_{z1} \right) \cdot k_{\beta} - k_{v1} \cdot \left(\frac{t_{d2}}{t_{d1}} \right)^2 \\ &= \left(2 \cdot \frac{0,0153}{0,0134} - \frac{0,0134}{0,0153} \cdot 0,225 \right) \cdot 0,8875 - 0,91 \cdot \left(\frac{0,0153}{0,0134} \right)^2 \\ &= 0,62 \end{aligned} \quad (2.100)$$

kde činitel $\Delta_{z1} = 0,225$ se určí z obr. 6.39 [1] s pomocnými výpočty:

$$\frac{b_{d1}}{t_{d1}} = \frac{0,00746}{0,0134} = 0,556$$

$$\frac{b_{d1}}{\delta} = \frac{0,00746}{0,0007} = 10,5$$

Rozptylová reaktance statoru

$$\begin{aligned} X_{1\sigma} &= 15,8 \cdot \frac{f_1}{100} \cdot \left(\frac{N_1}{100} \right)^2 \cdot \frac{l_2}{p \cdot q} \cdot (\lambda_{d1} + \lambda_{\xi 1} + \lambda_{dif1}) \\ &= 15,8 \cdot \frac{167}{100} \cdot \left(\frac{47}{100} \right)^2 \cdot \frac{0,126}{2 \cdot 5} \cdot (1,749 + 2,66 + 0,925) \\ &= 0,387 \Omega \end{aligned} \quad (2.101)$$

2.6.4 Rozptylová reaktance rotoru

Činitel magnetické vodivosti drážkového rozptylu

Tento výpočet byl zjednodušen a je počítán pro obdélníkový typ drážky, kterému odpovídá výška a šířka v 1/2 drážky.

$$\lambda_{d2} = \frac{h_{d2}}{2 \cdot \frac{b_{d2}}{3}} \cdot k_d + \frac{h_1}{b_0} = \frac{0,018}{2 \cdot \frac{0,0085}{3}} \cdot 1 + \frac{0,0025}{0,0015} = 4,84 \quad (2.102)$$

kde je uvažován pracovní chod, tzn. $k_d = 1$.

Činitel magnetické vodivosti čel

$$\begin{aligned} \lambda_{\check{c}2} &= \frac{2,3 \cdot D_{kn}}{Q_2 \cdot l_2 \cdot \Delta^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot D_{kn}}{2 \cdot (a_{kn} + b_{kn})} \\ &= \frac{2,3 \cdot 0,232}{52 \cdot 0,126 \cdot 0,297^2} \cdot \log \frac{4,7 \cdot 0,232}{2 \cdot (0,0216 + 0,0187)} = 1,04 \end{aligned} \quad (2.103)$$

Činitel magnetické vodivosti diferečního klecového vinutí

$$\lambda_{dif2} = \frac{t_{d2}}{12 \cdot \delta \cdot k_c} \cdot \xi_2 = \frac{0,0134}{12 \cdot 0,0007 \cdot 1,069} \cdot 0,983 = 1,46 \quad (2.104)$$

kde

$$\xi_2 = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot p}{Q_2} \right)^2 - \frac{\Delta_{z2}}{1 - \left(\frac{p}{Q_2} \right)^2} = 1 + \frac{1}{5} \cdot \left(\frac{\pi \cdot 2}{52} \right)^2 - \frac{0,02}{1 - \left(\frac{2}{52} \right)^2} = 0,983 \quad (2.105)$$

pro něhož se činitel $\Delta_{z1} = 0,02$ určí z obr. 6.39 [1] s pomocnými výpočty:

$$\frac{b_0}{t_{d2}} = \frac{0,0015}{0,0134} = 0,112$$

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{0,0015}{0,0007} = 2,143$$

Rozptylová reaktance rotoru

$$\begin{aligned} X_{2\sigma} &= 7,9 \cdot f_1 \cdot l_2 \cdot (\lambda_{d2} + \lambda_{\check{c}2} + \lambda_{dif2}) \cdot 10^{-6} \\ &= 7,9 \cdot 167 \cdot 0,126 \cdot (4,84 + 1,04 + 1,46) \cdot 10^{-6} \\ &= 1,22 \cdot 10^{-3} \Omega \end{aligned} \quad (2.106)$$

Rozptylová reaktance rotoru přepočtená na statorové vinutí

$$\begin{aligned} X'_{2\sigma} &= X_{2\sigma} \cdot 4 \cdot m_1 \cdot \frac{(N_{s1} \cdot k_{v1})^2}{Q_2} = 1,22 \cdot 10^{-3} \cdot 4 \cdot 3 \cdot \frac{(47 \cdot 0,91)^2}{52} \\ &= 0,515 \Omega \end{aligned} \quad (2.107)$$

Poměrná hodnota

$$x'_{2\sigma} = X'_{2\sigma} \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot I_n}{U_{nf}} = 0,515 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot 106}{400} = 0,236 \cdot 100\% = 23,6\% \quad (2.108)$$

2.7 Určení ztrát

V asynchronním motoru se vyskytují Jouleovy ztráty, ztráty v železe, pulzační ztráty, ventilační ztráty, mechanické a ztráty při zatížení.

2.7.1 Hlavní ztráty v železe

Ztráty v železe v jhu statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{fej1} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_{j1}}{1,5}\right)^\beta \cdot m_{j1} = 2,5 \cdot \left(\frac{167}{50}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,5}{1,5}\right)^{1,5} \cdot 42,69 \\ &= 651,4 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.109)$$

kde $\Delta p_{1,0} = 2,5 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ jsou měrné ztráty použité oceli 2211, koeficient $\beta = 1,5$, oba dle tab. 6.24. [1]. Činitelé $k_{dj} = 1,6$ a $k_{dz} = 1,8$, kteří uvažují vliv nerovnoměrného rozložení toku v částech magnetického obvodu. Dále se určí hmotnost jha statoru za vztahu:

$$\begin{aligned} m_{j1} &= \pi \cdot (D_e + h_{j1}) \cdot h_{j1} \cdot l_{fe1} \cdot k_{fe1} \cdot \gamma_{fe} \\ &= \pi \cdot (0,392 + 0,0335) \cdot 0,0335 \cdot 0,126 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 \\ &= 42,69 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.110)$$

kde hustota oceli $\gamma_{fe} = 7,8 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Ztráty v železe v zubech statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{fez1} &= \Delta p_{1,0} \cdot \left(\frac{f_1}{50}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_{1/2}}{1,5}\right)^\beta \cdot m_{z1} = 2,5 \cdot \left(\frac{167}{50}\right)^{1,5} \cdot \left(\frac{1,52}{1,5}\right)^{1,5} \cdot 11,89 \\ &= 185 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.111)$$

kde hmotnost zubů statoru se vyjádří:

$$\begin{aligned} m_{z1} &= h_{d1} \cdot b_{z1} \cdot Q_1 \cdot l_{fe1} \cdot k_{fe1} \cdot \gamma_{fe} = 0,035 \cdot 0,00594 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot \\ &0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 11,89 \text{ kg} \end{aligned} \quad (2.112)$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{feh} = \Delta P_{fej1} + \Delta P_{fez1} = 651,4 + 185 = 836,4 \text{ W} \quad (2.113)$$

2.7.2 Pulzační ztráty

Při otevření drážky je důležité určit činitel $\mathfrak{K}_\delta = 2,9$ za již dříve spočteného pomocného výpočtu z tab. 6.42. [1].

$$\begin{aligned} b'_{01} &= \frac{b_{d1}}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot t_{d1}}{t_{d1} \cdot b_{d1} + \mathfrak{K}_\delta}\right) \\ &= \frac{0,00746}{3} \cdot \left(1 + \frac{0,5 \cdot 0,0134}{0,0134 \cdot 0,00746 + 2,9}\right) = 0,0025 \text{ m} \end{aligned} \quad (2.114)$$

dále je třeba určit následující koeficienty:

$$\gamma_1 = \frac{\left(\frac{b'_{01}}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b'_{01}}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,0025}{0,0007}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,0025}{0,0007}\right)} = 1,48 \quad (2.115)$$

$$\gamma_2 = \frac{\left(\frac{b_0}{\delta}\right)^2}{5 + \left(\frac{b_0}{\delta}\right)} = \frac{\left(\frac{0,0015}{0,0007}\right)^2}{5 + \left(\frac{0,0015}{0,0007}\right)} = 0,64 \quad (2.116)$$

Hodnoty pulzace pole v zubech statoru a rotoru

$$B_{p1} = \frac{\gamma_2 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d1}} \cdot B_{z1/2} = \frac{0,64 \cdot 0,0007}{2 \cdot 0,0134} \cdot 1,52 = 0,0252 \text{ T} \quad (2.117)$$

$$B_{p2} = \frac{\gamma_1 \cdot \delta}{2 \cdot t_{d2}} \cdot B_{z2} = \frac{1,48 \cdot 0,0007}{2 \cdot 0,0153} \cdot 1,77 = 0,0599 \text{ T} \quad (2.118)$$

Pulzační ztráty v zubech statoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{p1} &= 0,11 \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p1}\right)^2 \cdot m_{z1} \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{52 \cdot 5000}{1000} \cdot 0,0252\right)^2 \cdot 11,89 = 56,15 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.119)$$

Pulzační ztráty v zubech rotoru

$$\begin{aligned} \Delta P_{p2} &= 0,11 \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n_s}{1000} \cdot B_{p2}\right)^2 \cdot m_{z2} \\ &= 0,11 \cdot \left(\frac{60 \cdot 5000}{1000} \cdot 0,0599\right)^2 \cdot 6,068 = 21,55 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.120)$$

kde hmotnost zubů rotoru se vyjádří:

$$\begin{aligned}
 m_{z1} &= h_{d2} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_{fe2} \cdot k_{fe} \cdot \gamma_{fe} \\
 &= 0,018 \cdot 0,0068 \cdot 52 \cdot 0,126 \cdot 0,97 \cdot 7,8 \cdot 10^3 = 6,068 \text{ kg}
 \end{aligned} \quad (2.121)$$

2.7.3 Povrchové ztráty

Tyto ztráty vznikají v povrchové vrstvě zubů statoru i rotoru. Jsou způsobeny pulzací indukce ve vzduchové mezeře. Často bývají spolu s pulzačními ztrátami udávány jako ztráty dodatečné.

Hustota povrchových ztrát

Povrchové ztráty jsou vztaženy na 1 m² povrchu.

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p1} &= 0,5 \cdot k_{01} \cdot \left(\frac{Q_2 \cdot n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{01} \cdot t_{d2} \cdot 10^3)^2 \\
 &= 0,5 \cdot 1,8 \cdot \left(\frac{52 \cdot 5000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,13 \cdot 0,0153 \cdot 10^3)^2 \\
 &= 472 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned} \quad (2.122)$$

$$\begin{aligned}
 p_{\delta p2} &= 0,5 \cdot k_{02} \cdot \left(\frac{Q_1 \cdot n_s}{10000} \right)^{1,5} \cdot (B_{02} \cdot t_{d1} \cdot 10^3)^2 \\
 &= 0,5 \cdot 1,8 \cdot \left(\frac{60 \cdot 5000}{10000} \right)^{1,5} \cdot (0,42 \cdot 0,0134 \cdot 10^3)^2 \\
 &= 4684,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}
 \end{aligned} \quad (2.123)$$

kde za pomocných výpočtů

$$\frac{b_0}{\delta} = \frac{0,0015}{0,0007} = 2,143$$

$$\frac{b_{d1}}{\delta} = \frac{0,00746}{0,0007} = 10,5$$

se určí hodnoty činitelů z obr. 6.41. [1].

$$\beta_{01} = 0,16$$

$$\beta_{02} = 0,42$$

kde následujícími výpočty byly hodnoty pulzace ve vzduchové mezeře:

$$B_{01} = \beta_{01} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,16 \cdot 1,069 \cdot 0,765 = 0,130 \text{ T} \quad (2.124)$$

$$B_{02} = \beta_{02} \cdot k_c \cdot B_\delta = 0,42 \cdot 1,069 \cdot 0,765 = 0,343 \text{ T} \quad (2.125)$$

v poslední řadě byly zvoleny činitele, kteří charakterizují opracování povrchů zubů statoru i rotoru:

$$k_{01} = 1,8$$

$$k_{02} = 1,8$$

Celkové povrchové ztráty v rotoru a statoru

$$\begin{aligned} P_{\delta p1} &= p_{\delta p1} \cdot (t_{d1} - b_{d1}) \cdot Q_1 \cdot l_1 \\ &= 472 \cdot (0,0134 - 0,00746) \cdot 60 \cdot 0,126 = 21,2 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.126)$$

$$\begin{aligned} P_{\delta p2} &= p_{\delta p2} \cdot (t_{d2} - b_0) \cdot Q_2 \cdot l_2 \\ &= 4684,2 \cdot (0,0153 - 0,0015) \cdot 52 \cdot 0,126 = 423,5 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.127)$$

Celkové dodatečné ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_{fep} &= P_{\delta p1} + P_{\delta p2} + \Delta P_{p1} + \Delta P_{p2} = 21,2 + 423,5 + 56,15 + 21,55 = \\ &= 525,4 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.128)$$

Celkové ztráty v železe

$$\Delta P_{fe} = \Delta P_{feh} + \Delta P_{fep} = 836,4 + 525,4 = 1361,8 \text{ W} \quad (2.129)$$

Jouleovy ztráty ve vinutí statoru

$$\Delta P_{j1} = m_1 \cdot I_n^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 106^2 \cdot 0,0405 = 1365,17 \text{ W} \quad (2.130)$$

Jouleovy ztráty ve tyčích rotoru

$$\Delta P_{j2} = m_2 \cdot I_t^2 \cdot R_2 = 52 \cdot 481^2 \cdot 5,267 \cdot 10^{-5} = 633,6 \text{ W} \quad (2.131)$$

Celkové Jouleovy ztráty

$$\Delta P_j = \Delta P_{j1} + \Delta P_{j2} = 1365,17 + 633,6 = 1998,8 \text{ W} \quad (2.132)$$

Mechanické ztráty

$$\begin{aligned} \Delta P_m &= K_T \cdot \left(\frac{n_s}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot D_1)^3 = 6 \cdot \left(\frac{5000}{1000}\right)^2 \cdot (10 \cdot 0,2536)^3 \\ &= 2446,5 \text{ W} \end{aligned} \quad (2.133)$$

Celkové ztráty celého stroje

$$\Delta P = \Delta P_{fe} + \Delta P_j + \Delta P_m = 1361,8 + 1998,8 + 2446,5 = 5807,1 \text{ W} \quad (2.134)$$

2.8 Účinnost

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P} = \frac{110 \cdot 10^3}{110 \cdot 10^3 + 5807,1} = 0,95 = 95\% \quad (2.135)$$

Předem uvažovaná účinnost, která je určena již na začátku návrhu tohoto stroje udává účinnost 0,94, vzniká zde tedy jednocentní odchylka, která vznikla nepřesnostmi při návrhu motoru.

Činná složka proudu naprázdno

$$I_{fe} = \frac{\Delta P_{fe} + \Delta P_m + \Delta P_{j0}}{m_1 \cdot U_{nf}} = \frac{1508,25 + 2446,5 + 69,4}{3 \cdot 400} = 3,35 \text{ A} \quad (2.136)$$

kde

$$\Delta P_{j0} = m_1 \cdot I_\mu^2 \cdot R_1 = 3 \cdot 23,9^2 \cdot 0,0405 = 69,4 \text{ W} \quad (2.137)$$

Proud naprázdno

Magnetizační proud odpovídá velikosti jalové složky naprázdno

$$I_0 = \sqrt{I_{fe}^2 + I_\mu^2} = \sqrt{3,35^2 + 23,9^2} = 24,13 \text{ A} \quad (2.138)$$

Účinitk při chodu naprázdno

$$\cos \varphi_0 = \frac{I_{fe}}{I_0} = \frac{3,35}{24,13} = 0,138 \quad (2.139)$$

Proud nakrátko

$$I_k = \frac{U_{nf}}{Z_k} = \frac{400}{0,393} = 1017,8 \text{ A} \quad (2.140)$$

kde impedance $Z_k = 0,393 \Omega$ se určí ze vztahu:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + jX_k^2} = \sqrt{0,0622^2 + 0,38822^2} = 0,393 \Omega \quad (2.141)$$

Účinitk nakrátko

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{0,0622}{0,38822} = 0,160 \quad (2.142)$$

Skluz zvratu

$$s_z = \frac{R'_2}{\sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2}} = \frac{0,0217}{\sqrt{0,0405^2 + (0,387 + 0,515)^2}} = 0,024 \quad (2.143)$$

$$= 2,4 \%$$

Moment stroje

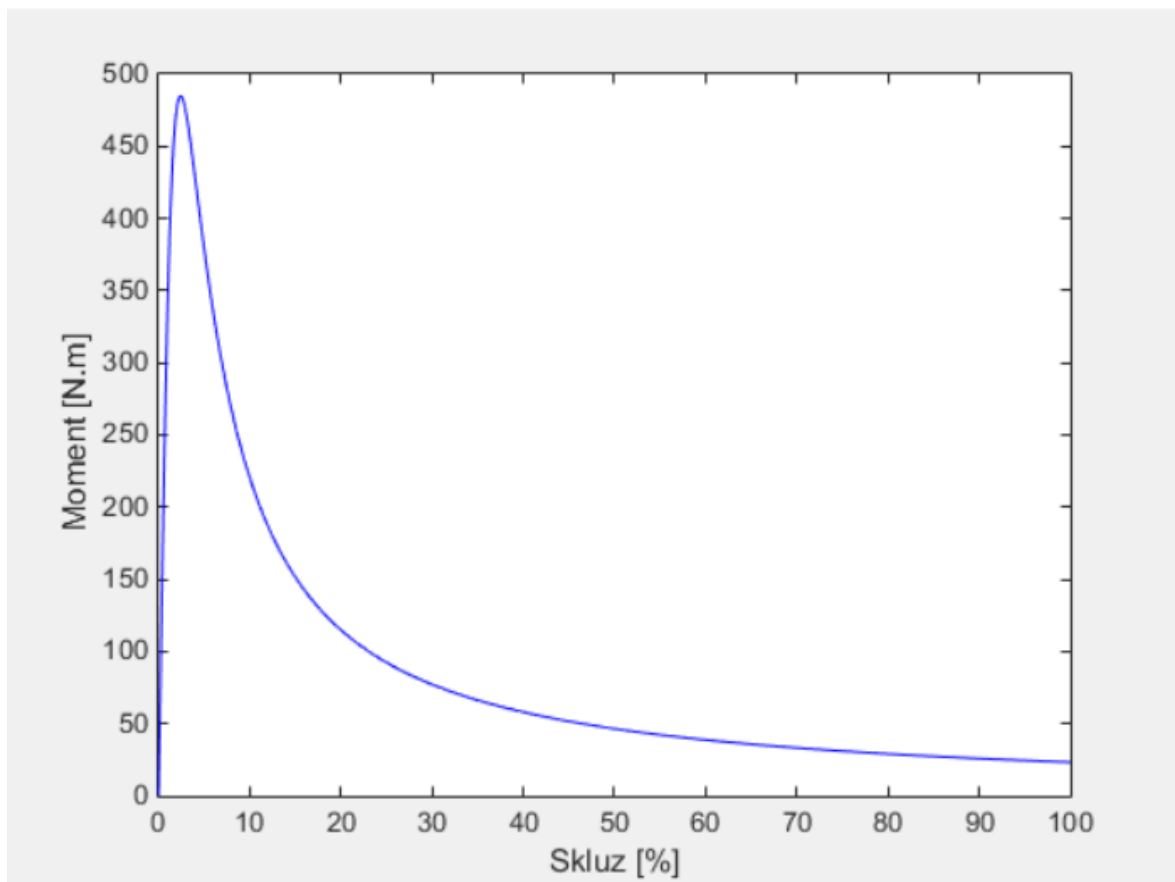
$$M = \frac{P_2}{\omega_s} = \frac{110 \cdot 10^3}{523,6} = 210 \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.144)$$

Moment zvratu stroje

$$M_z = \frac{p \cdot m_1 \cdot U_{nf}^2}{4 \cdot \pi \cdot f_1 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_{1\sigma} + X'_{2\sigma})^2})} \quad (2.145)$$

$$= \frac{2 \cdot 3 \cdot 400^2}{4 \cdot \pi \cdot 167 \cdot (0,0405 + \sqrt{0,0405^2 + (0,387 + 0,515)^2})}$$

$$= 484,89 \text{ N} \cdot \text{m}$$



Obr. 2.3 Momentová charakteristika

3 Tepelně ventilační model motoru

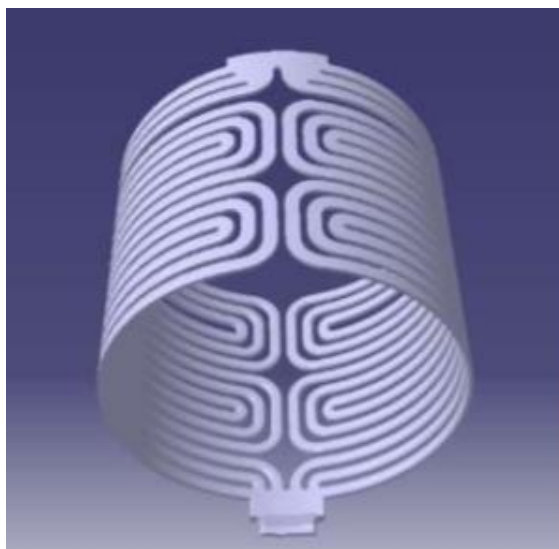
Veškerá energie, která se při elektro-mechanickém ději v motoru přeměňuje na nežádoucí teplo musí být co nejefektivněji a nejrychleji odvedena z tělesa motoru z důvodu zamezení degradace izolace vinutí a následnému zničení celého motoru. Proto se veškerá zařízení, která se svojí prací zahřívají musí určitým způsobem chladit. Při tomto návrhu motoru pro elektromobil bude způsob chlazení a typ chladicího média odvozen od skutečného - v praxi běžně využívaného způsobu.

3.1 Chladicí systém

Správná volba chladicího systému je jedním z velmi důležitých prvků při návrhu stroje, která určuje velikost a intenzitu odvodu ztrátové energie z tělesa motoru. Mimo jiné se dále podílí na úrovni hluku, spotřebě materiálu a celkové velikosti stroje. Při určení správného chladicího systému musí být co nejvíce vyrovnána tepelná symetrie po celém objemu stroje a tím zajištěna i tepelná vyváženost.

3.1.1 Axiální ventilace

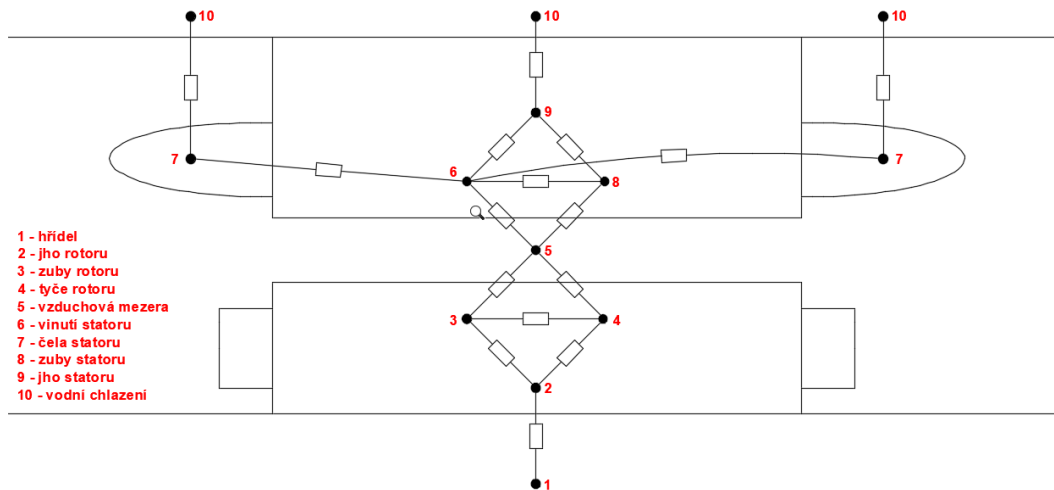
Při návrhu tohoto motoru byla zavedeno chlazení stroje glykolem, který je v praxi znám spíše pod názvem Fridex. Jeho velké využití je mimo jiné v odmrazování skel u dopravních prostředků, chlazení a u okruhu klimatizačních jednotek. Glykol je protékána nízkou rychlostí, aby nedocházelo ke zbytečně velkým hydraulickým ztrátám z důvodu poměrně vysoké hustoty vody. Chladivo protéká kanálem chladiče v tažené trubce, svazku a litině v povrchové kostře motoru a ochlazuje statorové části. Pro požadovaný rychlostní oběh je nutná vhodně nadimenzovaná soustava čerpadel, která ale není předmětem této práce.



Obr. 3.1 Chladicí systém statoru Tesla S [9]

3.2 Model náhradní tepelné sítě

Při již navrženém chlazením stroje je dále možné sestavit model tepelné sítě, který představuje reálné odpory a zde různé teplotní rozdíly. Byla vytvořena síť s deseti uzly od hřídele až po vodní chlazení v kostře motoru. Hlavní myšlenkou této metody je co nejlépe zdokumentovat tepelné odpory a zdroje tepelných ztrát, ze kterých se určí celkové oteplení motoru. Tato část práce byla po nejvíce konzultována s vedoucím práce.



Obr. 3.2 Model tepelné sítě

Tepelné toky mezi uzlem 1 a 2

$$\frac{T_1 - T_2}{R_{12}} = \Delta P \quad (3.1)$$

kde pro snadnější výpočty se zavede následující vztah:

$$\frac{1}{G} = R \rightarrow G = \frac{1}{R} \quad (3.2)$$

Ad 3.1.

$$G_{12} \cdot (T_1 - T_2) = \Delta P$$

Rovnice pro uzel 2

$$G_{12}(T_2 - T_1) + G_{23}(T_2 - T_3) + G_{24}(T_2 - T_4) = \Delta P_2 \quad (3.3)$$

Tímto způsobem by se dalo pokračovat až k výpočtů všech 10 uzlů pomocí soustav rovnic. Avšak tento způsob je poněkud zdlouhavý a výpočet lze zjednodušit převodem na matici odporů, resp. vodivostmi s vektorem teplot a výpočtem v moderním matematickém

prostředí, např. Matlab. Kde lze tepelné toky převést na rozdíly teplot pomocí následujícího velmi jednoduchého vzorce.

Zde je naznačeno řešení pomocí maticového zápisu pro tři uzly, kde počet sloupců určuje počet uzlů. Matice je vždy čtvercová, kdy na hlavní diagonále se sčítají všechny vodivosti, které vstupují do daného uzlu. Mimo diagonálu se vodivosti mezi jednotlivými uzly odečítají. Matice je vektorově násobena hodnotami určených ztrátami.

$$\begin{bmatrix} G_1 & -G_{12} & -G_{13} \\ -G_{12} & G_{12} + G_{23} + G_{24} & -G_{23} \\ -G_{13} & -G_{23} & G_{35} + G_{34} + G_{32} \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta T_1 \\ \Delta T_2 \\ \Delta T_3 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$\text{inv}(G) * P = T \quad (3.5)$$

Avšak pro vytvoření výsledné matice je potřebné nadefinovat jednotlivé odpory, resp. vodivosti, které respektují vlastnosti v jednotlivých materiálech a přechodech mezi různými částmi motoru.

3.2.1 Definice tepelných odporů

Při výpočtu odporů budou dosazovány již vypočítané hodnoty z elektromagnetického návrhu a proto jejich bližší specifikace by měla redundantní charakter.

Tepelný odpor mezi hřídelí a jhem rotoru se získá z následujícího vztahu:

$$R_{12} = \frac{l}{\lambda \cdot S} = \frac{D_{i2} + h_{j2}}{\lambda \cdot \pi \cdot D_i \cdot l_i} = \frac{0,0118 + 0,0505}{60 \cdot \pi \cdot 0,118 \cdot 0,126} = 0,06012 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \quad (3.6)$$

Pro tepelný odpor mezi jhem rotoru a zubem rotoru platí vztah:

$$\begin{aligned} R_{23} &= \frac{l}{\lambda \cdot S} = \frac{\frac{h_{j2}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot D_r \cdot l_i \cdot 3} + \frac{\frac{h_{z2}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_i \cdot 3} \\ &= \frac{0,0505}{45 \cdot \pi \cdot 0,1685 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{0,0187}{45 \cdot 0,0068 \cdot 52 \cdot 0,126 \cdot 3} \\ &= 0,00436 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1} \end{aligned} \quad (3.7)$$

kde $D_r = 0,1685$ mm se získá pomocí součtu průměru hřídele a jha rotoru.

Pro tepelný odpor mezi jhem rotoru a tyčemi rotoru platí:

$$\begin{aligned}
 R_{24} &= \frac{\frac{h_{j2}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot \pi \cdot D_r \cdot l_i \cdot 3} + \frac{\frac{h_{d2}}{2}}{\lambda_{Al} \cdot b_{ds2} \cdot Q_2 \cdot l_i \cdot 3} \\
 &= \frac{\frac{0,0505}{2}}{45 \cdot \pi \cdot 0,1685 \cdot 0,126 \cdot 3} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,018}{2}}{220 \cdot 0,00738 \cdot 52 \cdot 0,126 \cdot 3} = 0,003086 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

kde b_{ds2} představuje střední šířku rotorové drážky. Pro hliníkové tyče v rotorových drážkách je $\lambda_{Al} = 220 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ a pro měděné vinutí ve statorových drážkách je $\lambda_{Cu} = 380 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Tepelný odpor mezi zuby rotoru a tyčemi rotoru je definován:

$$\begin{aligned}
 R_{34} &= \frac{\frac{b_{ds2}}{2}}{\lambda_{Al} \cdot h_{d2} \cdot l_i \cdot Q_2 \cdot 2 \cdot 3} + \frac{\frac{b_{z2}}{2}}{\lambda_{fe} \cdot h_{d2} \cdot l_i \cdot Q_2 \cdot 2 \cdot 3} \\
 &= \frac{\frac{0,00738}{2}}{220 \cdot 0,018 \cdot 0,126 \cdot 52 \cdot 2 \cdot 3} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,0068}{2}}{45 \cdot 0,018 \cdot 0,126 \cdot 52 \cdot 2 \cdot 3} = 0,00558 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

Tepelný odpor mezi zubem rotoru a vzduchovou mezerou:

$$\begin{aligned}
 R_{35} &= \frac{\frac{h_{z2}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot b_{z2} \cdot Q_2 \cdot l_i \cdot 3} + \frac{1}{\alpha \cdot S_{vz}} \\
 &= \frac{\frac{0,0187}{2}}{45 \cdot 0,0068 \cdot 52 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{1}{307,1 \cdot 0,10066} \\
 &= 0,0339 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.10}$$

kde se určí koeficient přestupu tepla ve vzduchové mezeře a plocha vzduchové mezery, ze které je odváděno teplo:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D_{vz}} = \frac{3123,8 \cdot 0,025}{0,2543} = 307,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1} \tag{3.11}$$

$$\begin{aligned}
 S_{vz} &= D_{vz} \cdot \pi \cdot l_i = \left(\frac{(D_2 + \delta)}{2} \right)^2 \cdot \pi \cdot l_i - S_r \\
 &= (0,2536 + 0,0007) \cdot \pi \cdot 0,126 = 0,1066 \text{ m}^2
 \end{aligned} \tag{3.12}$$

kde se Nusseltovo číslo Nu získá ze vztahu:

$$Nu = 0,21 \cdot Re^{0,67} = 3123,8 \tag{3.13}$$

kde Reynoldsovo číslo Re se získá ze vztahu:

$$\begin{aligned}
 Re &= \frac{v \cdot D_{vz}}{\nu} = \frac{\omega \cdot r \cdot D_{vz}}{\nu} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot r \cdot D_{vz}}{2 \cdot 10^{-5}} \\
 &= \frac{2 \cdot \pi \cdot 166,7 \cdot 0,1268 \cdot 0,2543}{2 \cdot 10^{-5}} = 1688694,5
 \end{aligned} \tag{3.14}$$

V tomto vzorci se $\nu = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a tato hodnota určuje kinematickou viskozitu vzduchu a je určena z tabulky. [1]

Tepelný odpor mezi vzduchovou mezerou a zubem statoru je určen podobně jako R_{35} :

$$\begin{aligned}
 R_{58} &= \frac{\frac{h_{z1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot b_{z1/2} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 3} + \frac{1}{\alpha \cdot S_{vz}} \\
 &= \frac{\frac{0,0287}{2}}{45 \cdot 0,0069 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{1}{307,1 \cdot 0,10066} \\
 &= 0,03439 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Tepelný odpor mezi tyčemi rotoru a vzduchovou mezerou se určí následovně:

$$\begin{aligned}
 R_{45} &= \frac{\frac{h_{d2}}{2}}{\lambda_{Al} \cdot b_{ds2} \cdot Q_2 \cdot l_i \cdot 3} + \frac{1}{\alpha \cdot S_{vz}} \\
 &= \frac{\frac{0,018}{2}}{220 \cdot 0,00738 \cdot 52 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{1}{307,1 \cdot 0,10066} \\
 &= 0,03238 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.16}$$

Tepelný odpor mezi vzduchovou mezerou a vinutím statoru:

$$\begin{aligned}
 R_{56} &= \frac{\frac{h_{d1}}{2}}{\lambda_{Al} \cdot b_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 3} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot b_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i} + \frac{1}{\alpha \cdot S_{vz}} \\
 &= \frac{\frac{0,0287}{2}}{220 \cdot 0,0075 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{0,00276}{0,3 \cdot 0,0075 \cdot 60 \cdot 0,126} \\
 &\quad + \frac{1}{307,1 \cdot 0,10066} = 0,19501 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

Tepelný odpor mezi měděným vinutím a čely statoru:

$$\begin{aligned}
 R_{67} &= \frac{\frac{l_i}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot S_{dr} \cdot 3} + \frac{\frac{l_{\check{c}}}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot S_{dr} \cdot 3} = \frac{\frac{0,126}{2}}{380 \cdot 0,0123 \cdot 3} + \frac{\frac{0,3}{2}}{380 \cdot 0,0123 \cdot 3} \\
 &= 0,007346 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.18}$$

kde obsah drážky společně zahrnující všechny drážky byl určen následujícím vzorcem:

$$S_{dr} = b_v \cdot b_{d1} \cdot Q_1 = 0,0287 \cdot 0,0075 \cdot 60 = 0,0123 \text{ m}^2 \tag{3.19}$$

Tepelný odpor mezi vinutím statoru a zuby statoru:

$$\begin{aligned}
 R_{68} &= \frac{\frac{b_{d1}}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot h_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 3 \cdot 2} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot h_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 2} \\
 &\quad + \frac{b_{z1/2}}{\lambda_{Fe} \cdot h_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 3 \cdot 2} \\
 &= \frac{\frac{0,0075}{2}}{380 \cdot 0,0287 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 3 \cdot 2} \\
 &\quad + \frac{0,00276}{0,3 \cdot 0,0287 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 2} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,0069}{2}}{45 \cdot 0,0287 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 3 \cdot 2} = 0,00706 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.20}$$

Tepelný odpor mezi vinutím statoru a jhem statoru:

$$\begin{aligned}
 R_{69} &= \frac{\frac{h_{d1}}{2}}{\lambda_{Cu} \cdot b_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i \cdot 3} + \frac{h_{iz}}{\lambda_{iz} \cdot h_{d1} \cdot Q_1 \cdot l_i} + \frac{\frac{h_{j1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot D \cdot l_i \cdot 3} \\
 &= \frac{\frac{0,0287}{2}}{380 \cdot 0,0075 \cdot 60 \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{0,00276}{0,3 \cdot 0,0287 \cdot 60 \cdot 0,126} \\
 &\quad + \frac{\frac{0,0335}{2}}{45 \cdot 0,3585 \cdot 0,126 \cdot 3} = 0,04641 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.21}$$

kde $D = D_e - h_{j1} = 0,392 - 0,0335 = 0,3585 \text{ m}$.

Tepelný odpor mezi čely statoru a chlazením v kostře stroje se získá ze vztahu:

$$\begin{aligned}
 R_{710} &= \frac{1}{2 \cdot (h_{d1} + b_{d1}) \cdot l_{\check{c}1/2} \cdot \alpha_1} + \frac{0,00276}{\lambda_i \cdot 2 \cdot (h_{d1} + b_{d1}) \cdot l_{\check{c}1/2}} \\
 &= \frac{1}{2 \cdot (0,0287 + 0,0075) \cdot 0,15 \cdot 120} \\
 &\quad + \frac{0,00276}{0,3 \cdot 2 \cdot (0,0287 + 0,0075) \cdot 0,15} = 1,61449 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.23}$$

kde střední hodnota součinitele přestupu tepla $\alpha_1 = 120 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ tepla byla odečtena z obr. 5.59 [1] pro $h = 0,225 \text{ m}$ a $D_e = 0,392 \text{ m}$.

Tepelný odpor mezi zuby statoru a jhem statoru:

$$\begin{aligned}
 R_{89} &= \frac{\frac{h_{d1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot b_{z1max} \cdot l_i \cdot Q_1 \cdot 3} + \frac{\frac{h_{j1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot D \cdot \pi \cdot l_i \cdot 3} \\
 &= \frac{\frac{0,0287}{2}}{45 \cdot 0,0079 \cdot 0,126 \cdot 60 \cdot 3} + \frac{\frac{0,0335}{2}}{45 \cdot 0,3585 \cdot \pi \cdot 0,126 \cdot 3} \\
 &= 0,002654 \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.24}$$

Tepelný odpor z jha statoru do chlazení v kostře stroje se získá ze vztahu:

$$\begin{aligned}
 R_{910} &= \frac{\frac{h_{j1}}{2}}{\lambda_{Fe} \cdot D \cdot \pi \cdot l_i \cdot 3} + \frac{1}{h_k \cdot D_e \cdot \pi \cdot l_i} + \frac{1}{\alpha \cdot D_{H2O} \cdot \pi \cdot l_i} \\
 &= \frac{\frac{0,0335}{2}}{45 \cdot 0,3585 \cdot \pi \cdot 0,126 \cdot 3} + \frac{1}{600 \cdot 0,392 \cdot \pi \cdot 0,126} \\
 &\quad + \frac{1}{4000 \cdot 0,402 \cdot \pi \cdot 0,126} = 0,01318K \cdot W^{-1}
 \end{aligned} \tag{3.25}$$

kde $D_{H2O} = D_e + 2 \cdot h_{kostry} = 0,392 + 2 \cdot 0,005 = 0,402 \text{ m}$ a α je součinitel přestupu tepla a získá se z tabulek [1].

Tab. 3.1 Tabulka zhodnocení tepelných odporů

Definice tepelného odporu	Označení	Velikost (K/W)
Odpor mezi hřídelí a jhem rotoru	R ₁₂	0,06012
Odpor mezi jhem rotoru a zubem rotoru	R ₂₃	0,00436
Odpor mezi jhem rotoru a tyčí rotoru	R ₂₄	0,00309
Odpor mezi zubem rotoru a tyčí rotoru	R ₃₄	0,00558
Odpor mezi zubem rotoru a vzduchovou mezerou	R ₃₅	0,03391
Odpor mezi tyčí rotoru a vzduchovou mezerou	R ₄₅	0,03238
Odpor mezi vzduchovou mezerou a vinutím statoru	R ₅₆	0,19501
Odpor mezi vzduchovou mezerou a zubem statoru	R ₅₈	0,03439
Odpor mezi vinutím statoru a čely statoru	R ₆₇	0,00735
Odpor mezi vinutím statoru a zubem statoru	R ₆₈	0,00706
Odpor mezi vinutím statoru a jhem statoru	R ₆₉	0,04641
Odpor mezi čely statoru a vodním chlazením	R ₇₁₀	1,61449
Odpor mezi zubem statoru a jhem statoru	R ₈₉	0,002654
Odpor mezi jhem statoru a vodním chlazením	R ₉₁₀	0,01318

Tab. 3.2 Tabulka vektoru pravé strany, která definuje ztráty stroje v dílčích částech.

Uzel	Ztráty	Velikost (W)
2	V jhu rotoru	0
3	V zubech rotoru	633,6
4	Jouelovy v tyčích rotoru	759,6
5	Ve vzduchové mezeře	0

6	Jouelovy ve vinutí statoru	484,5
7	Jouelovy v čelech vinutí statoru	1153,7
8	V zubech statoru	314,4
9	V jhu statoru	781,2
10	V chlazení v kostře	0

Ztráty v tabulce 3.2 i 3.3 jsou oproti elektromagnetickému návrhu stroje zvětšeny, resp. vynásobeny koeficientem $k = 1,2$, který zahrnuje ztráty vzniklé ve výkonové řídicí části stroje (PWM, střídač,..).

3.3 Metoda konečných prvků

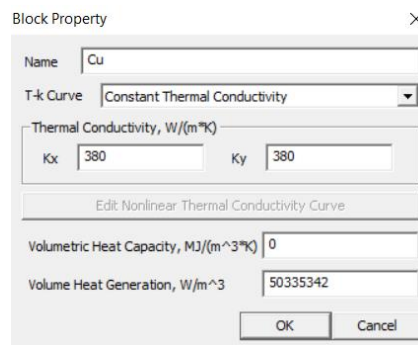
Pro analýzu motoru metodou konečných prvků bylo využito softwarové prostředí FEMM 4.2, kam byl naimportován výkres motoru. Původní 2D výkres motoru byl zkreslen v CAD systému AutoCad LT 2016, následně převeden do výkresového souboru .DXF a vložen. Ve výkresu byla zahrnuta hřídel, rotor, stator a kostra stroje. V programu FEMM byly nadefinovány výchozí parametry a dokresleno dvouvrstvé vinutí, izolace a klín.

Ztráty stroje z elektromagnetického návrhu stroje byly přepočteny na ztráty v závislosti na objemové jednotce stroje v m^3 a následně nadefinovány do materiálových vlastností. Již při elektromagnetickém návrhu stroje bylo patrné, že mechanické ztráty nabývají vysokých hodnot. Ovšem tento stav byl způsoben vysokými synchronními otáčkami, které byly zadány jako vstupní parametr pro návrh stroje.

Názvy jednotlivých částí byly zvoleny s ohledem na lokalizaci v stroje, kdy materiálová vlastnost *Fe-rotor* a *Fe-stator* obsahují jednotlivá jha a také zuby. Při tomto návrhu nebyly uvažovány ztráty v rotorovém jhu, neboť jsou zanedbatelné, atak veškeré ztráty v této části stroje jsou ztráty dodatečné a jsou součtem pulzační ztrát v zubech rotorech a povrchovými ztrátami, které byly způsobeny pulzací magnetického pole ve vzduchové mezeře.

Dále materiálová vlastnost pojmenovaná *klinek* představuje zjednodušenou izolaci a proto byla nadefinována jako vlastnost pro klín i cívkovou izolaci včetně kaptonu a vyložení drážky. Do statorových drážek byla nadefinována měď, železo bylo určeno pro jho statoru i rotoru. Tyče rotoru a kostra stroje byly nadefinované jako hliníkové. Materiálová vlastnost *vzduch* byla nadefinována pro vzduchovou mezeru.

V programu byly nadefinovány vlastní materiály:



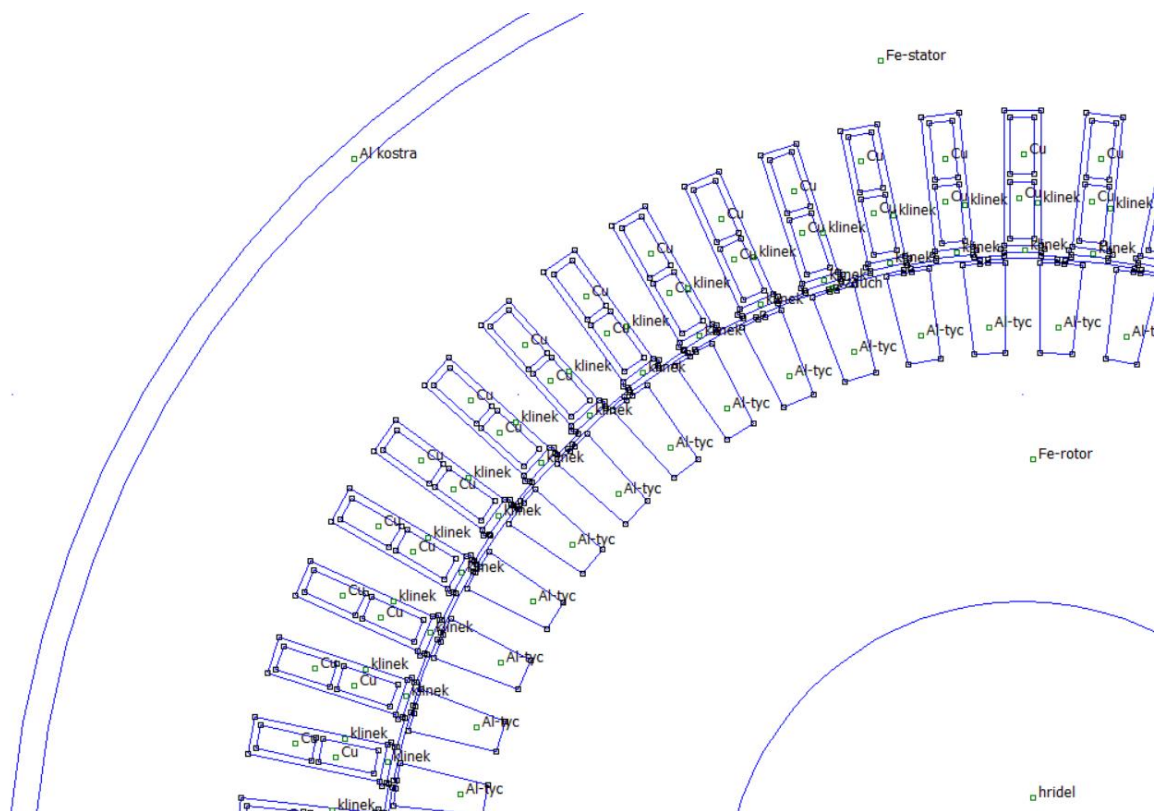
Obr. 3.3 Ukázkové nadefinování materiálových vlastností v prostředí FEMM

Tab. 3.3 Materiálové charakteristické vlastnosti

Dílní část stroje	Materiál	Součinitel tepelné vodivosti (W/(m·K))		Ztráty (W)	Objem (m ³)	Měrné tepelné ztráty (kW/m ³)
		X	Y			
Rotorové jho + zuby	Železo	45	45	534	$3,385 \cdot 10^{-3}$	157,755
Vinutí rotoru	Hliník	220	220	759,6	$8,704 \cdot 10^{-4}$	872,702
Vzduchová mezera	Vzduch	0,03	0,03	0	$6,631 \cdot 10^{-5}$	0
Izolace	Kapton, lakovaná tkanina,...	0,3	0,3	0	$1,636 \cdot 10^{-4}$	0
Vinutí statoru (bez ztrát čel)	Měď	380	380	484,54	$1,627 \cdot 10^{-3}$	297,812
Statorové jho + zuby	Železo	45	45	1117,2	$7,880 \cdot 10^{-3}$	142,192
Kostra stroje	Hliník	220	220	0	$7,857 \cdot 10^{-4}$	0

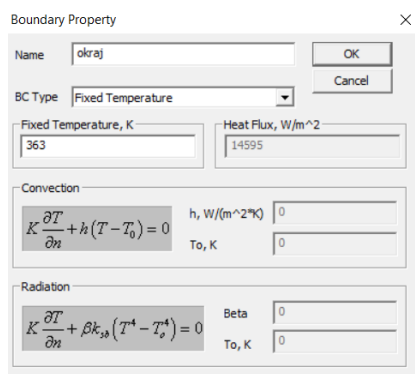
Jednotlivé objemové velikosti byly spočteny dle elementárních matematických postupů. Následně byly jednotlivé ztráty poděleny s objemovými velikostmi dílčích částí stroje a tím získány měrné tepelné ztráty, které se do prostředí FEMM vkládají v poměru 1 Wattu na 1 metr krychlový.

Ztráty v kostře stroje byly určeny z hodnot požadovaného ochlazení stroje a tepelného toku. Požadována teplota k ochlazení byla zvolena 90° C.



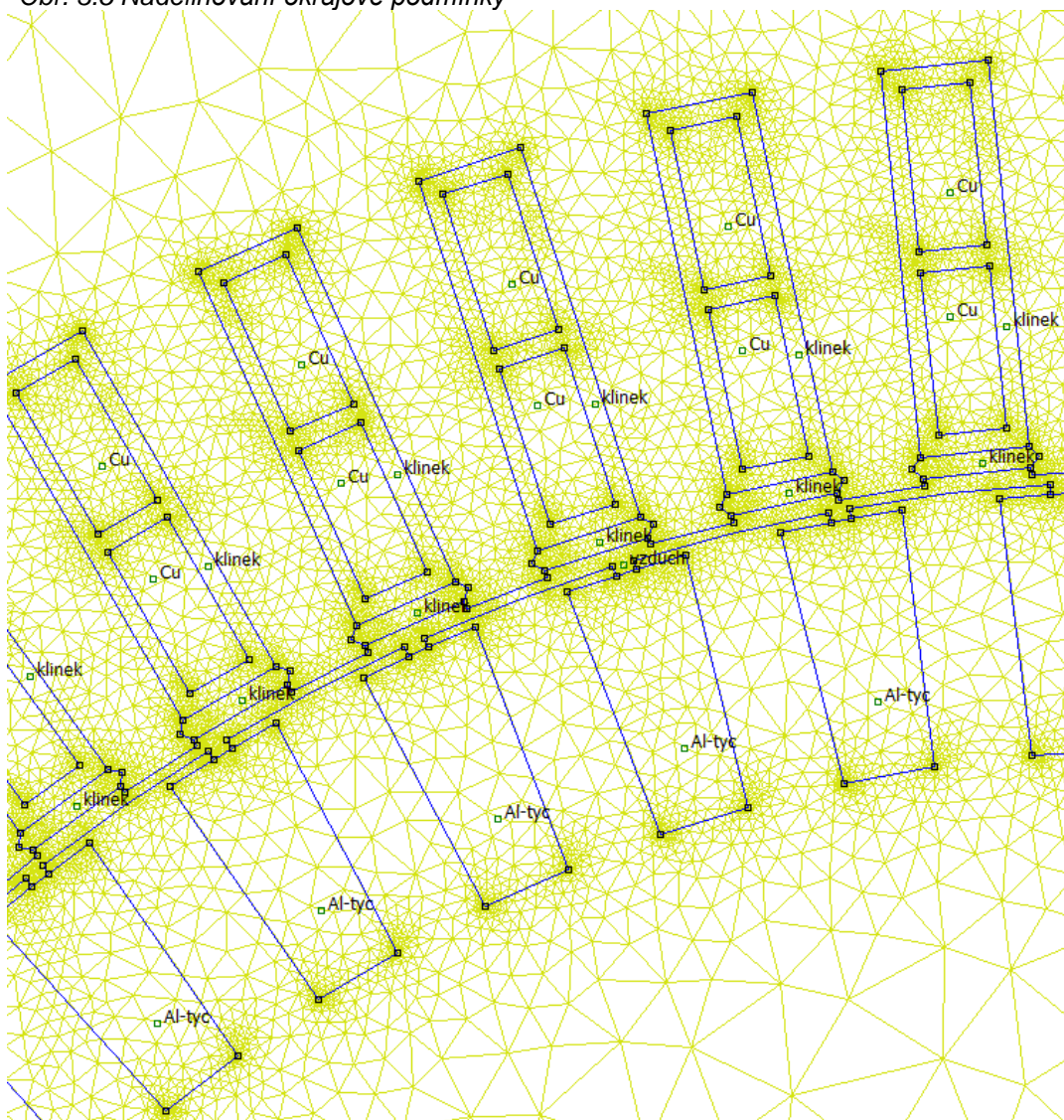
Obr. 3.4 Nadefinované materiálové vlastnosti přiřazené modelu

Takto nadefinovaný model musí být uzavřen do konečného prostoru a proto byla nastavena Dirichletova okrajová podmínka na vnějším obvodovém kruhu hliníkové kostry stroje, kde



byla stanovena maximální dovolená teplota. Následně byla vytvořena síť 213 722 trojúhelníků a 427 254 uzlů. Síť musí být dostatečně hustá hlavně u přechodů mezi prostředními kvůli dostatečné simulaci, jelikož v těchto místech bývají největší odlišnosti.

Obr. 3.5 Nadefinování okrajové podmínky

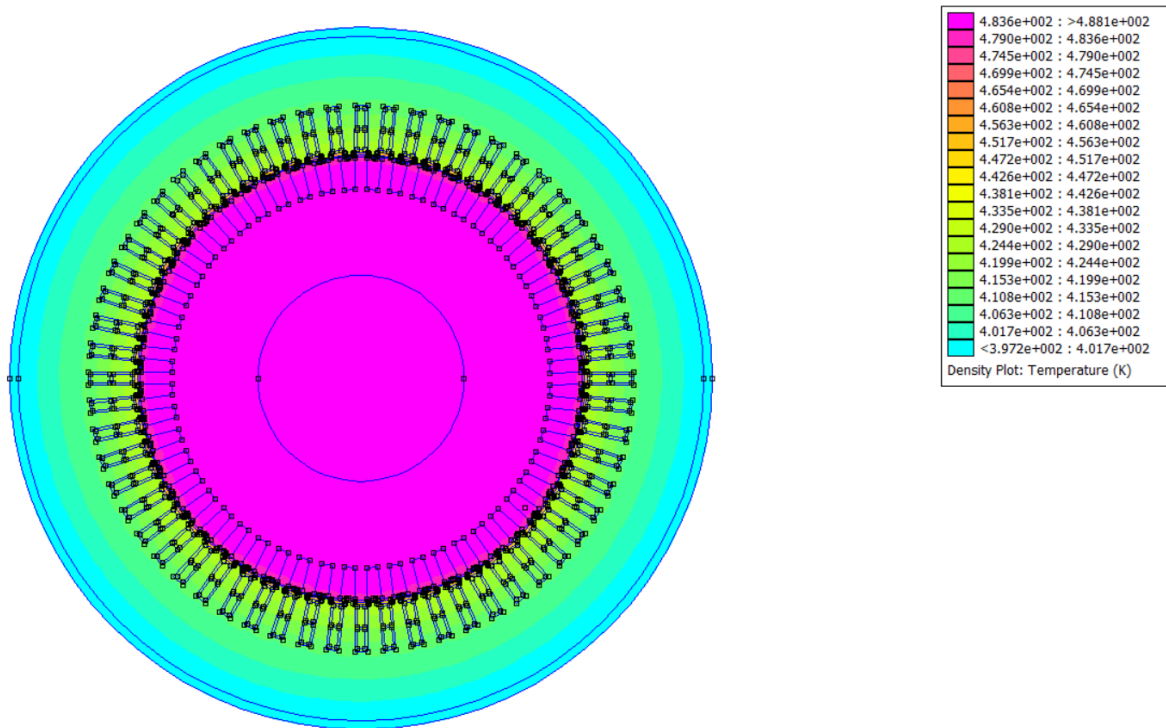


Obr. 3.6 Vygenerovaný mesh s konečnými prvky v místech největších změn

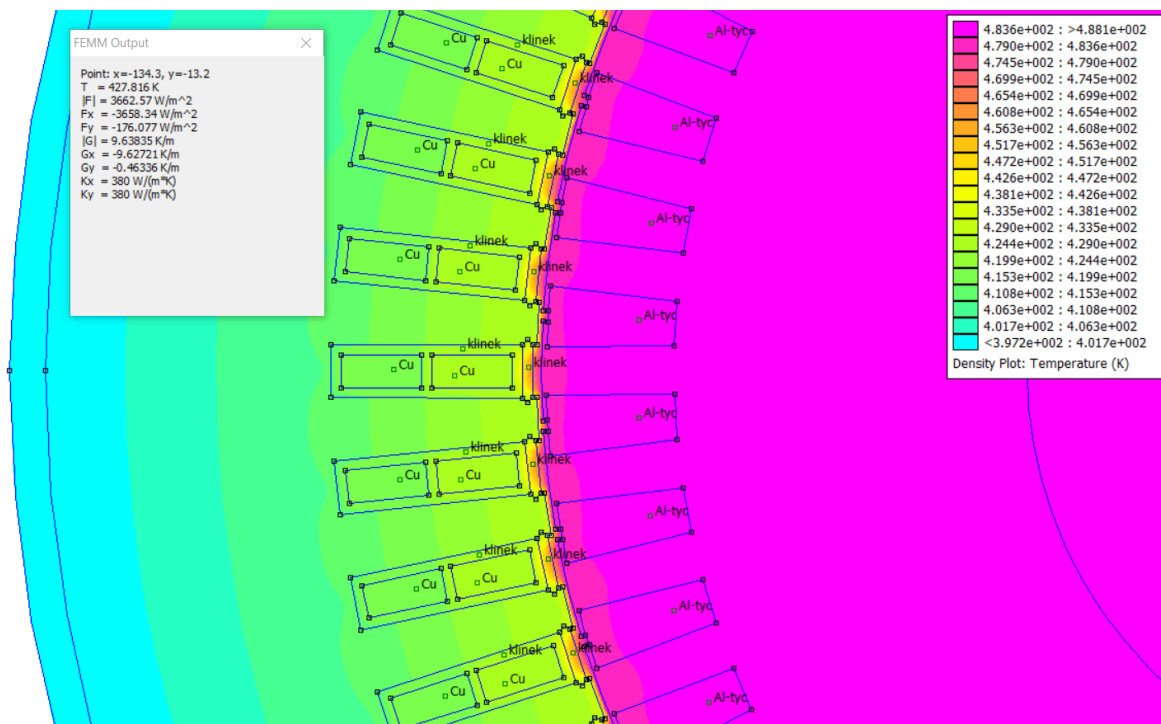
Po správném vygenerování sítě s trojúhelníky a uzly se přešlo na krok postprocessingu, kde se výsledný výpočtový model zobrazí v novém okně s koncovkou *.ans. Byly vykresleny modely s rozložením teploty. Teploty v jednotlivých bodech byly odečteny pomocí přímého odečítání, které prostředí FEMM umožňuje. Následně byly vypočtené hodnoty zaznamenány do samostatné tabulky, kde byly porovnány s hodnotami teplot, které byly získány pomocí analytických výpočtů.

4 Rozložení teplot v různých částech stroje

4.1 Ověření v prostředí FEMM



Obr. 4.1 Model s teplotními vlastnostmi stroje



Obr. 4.2 Model s teplotními vlastnostmi stroje znázorňující vlastnosti vinutí statoru (oblast Cu)

Na první pohled je patrné nadměrné zahřátí rotorové části stroje. Toto je způsobeno požadavkem na vysoké otáčky motoru, na kterých byl návrh stroje založen. Při prvotním návrhu chlazení umístěné v kostře stroje nebyl tento parametr uvažován a proto dostatečnému chlazení celého stroje bude věnována následující kapitola této práce.

V následující tabulce jsou odečteny teploty z programu FEMM v jednotkách Kelvin a následně jsou přepočteny na stupně Celsia. Hodnoty z analytického výpočtu byly vypočteny v matematickém prostředí Matlab, kde jim byli nadefinované příslušné ztráty.

4.2 Porovnání teplot

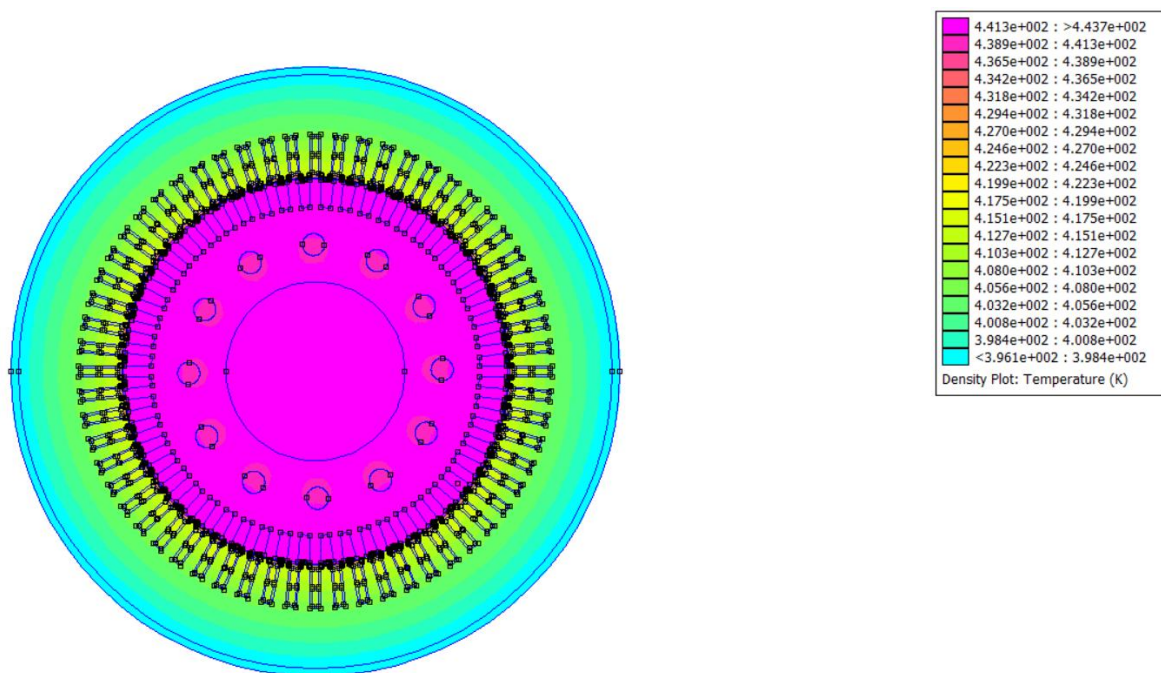
Tab. 4.1 Tabulka porovnání teplot z prostředí FEMM a analytického výpočtu

	FEMM (°C)	Analytický (°C)
Hřídel	214,955	209,929
Jho rotoru	213,919	209,929
Zuby rotoru	210,867	209,754
Tyče rotoru	210,769	210,054
Vzduchová mezera	184,531	188,481
Vinutí statoru	154,656	158,666
Čela statoru	x	166,445
Zuby statoru	146,865	149,248
Jho statoru	133,146	141,845

Při porovnání hodnot je patrné, že stupně v jednotlivých částech stroje nemají mezi sebou teplotní rozdíly větší než 10°C, dá se tedy předpokládat, že při tepelném výpočtu oběma metody bylo postupováno správně. Teplotní odlišnost, která nastala u vzduchové mezery, je v tabulce zaznamenána jako aritmetický průměr dvou teplot. Neboť je podstatné, v jaké části byla teploty z modelu odečítána. Odečítání v prostoru pod statorovým zubem je teplota přibližná k 168°C a pod statorovou drážkou je tato hodnota přibližně rovna 200°C. Odlišné teplotní hodnoty jsou způsobeny nepřesnostmi při výpočtech a následném hrubém zaokrouhlování na pět desetinných míst.

4.3 Návrh chladícího opatření

K zmírnění tepelného oteplení byly do středu rotorového jha navrženy a vyvrtány chladící axiální kanály. Bylo navrženo 12 kanálů s průměrem 15 mm. Teplota chladícího média – vzduchu byla nastavena na 90°C stejně jako u satorového chlazení v kostře stroje. Následně tento model byl ověřen v prostředí FEMM.



Obr. 4.3 Model s teplotními vlastnostmi po přidání axiálních chladících kanálů

Tab. 4.2 Tabulka teplot z prostředí FEMM po zavedení axiálních kanálů v porovnání s původním oteplením

	s axiálními kanály (°C)	bez axiálních kanálů (°C)
Hřídel	168,608	214,955
Jho rotoru	168,796	213,919
Zuby rotoru	170,413	210,867
Tyče rotoru	170,418	210,769
Vzduchová mezera	156,582	184,531
Vinutí satoru	143,387	154,656
Zuby satoru	138,511	146,865
Jho satoru	127,824	133,146

V porovnávací tabulce je patrné značné snížení teploty v rotorové části, kde se teploty snížila téměř o 45°C. Při postupném prostupování tepla strojem se teplotní rozdíly mezi teplotami s axiálními chladicími kanály a bez nich postupně snižují. Kdy je patrné, že teplota ve statorovém jhu klesla pouze o přibližně 5,5 °C.

Kombinace chlazení v kostře stroje pomocí vodního média a chlazení v podobě axiálních kanálů v rotorové části profukovaným vzduchem se jeví jako optimální chladicí kombinace pro uspokojivé zahřívání stroje.

Závěr

Cílem této práce bylo navrhnout vhodný elektrický motor jako hlavní pohonnou jednotku elektromobilu a ověřit tepelné vlastnosti takového motoru.

Na začátku teoretické části jsem se věnoval nastínění elektrickým vozidel z pohledu pohonu a napájení, kde byl popsán blíže proces nabíjení a diagnostický systém. Dále byly popsány dostupné palubní nabíječky nabíjecí stanice, kde aktuálně nejvýkonějším způsobem jsou Superchargery od společnosti Tesla.

Při vyhledávání parametrů od jednotlivých společností, které se zabývají výrobou a prodejem elektrických vozidel, jsem zjistil, že dojezdy vozidel se zvětšují a jsou konkurenceschopné vozidlům se spalovacími motory. Nicméně cena elektromobilu se ve většině případů pohybuje kolem částky milion Kč a více.

Dále jsem zjistil, že je spousta studií a vědeckých konferencí pro zajištění dokonalejšího a efektivnějšího způsobu využívání materiálových vlastností používaných v elektrických motorech. V některých studiích jsou mezi sebou porovnávány aktuálně využívané materiály s materiály, které by se mohly používat, dále jsou uvedeny vlastnosti, výhody a nevýhody. V jiné studii je popsáno použití rozloženého vinutí v synchronním motoru integrovaném přímo v kole vozidla. Dále jsou řešeny optimální rozměry drážek a jejich vlivy na parametry motoru.

Při návrhu asynchronního motoru s kotvou nakrátko jsem vycházel ze zadaných údajů a následně jsem provedl návrh motoru dle příslušné literatury. Vnější rozměr statoru byl po zavedení chlazení zvětšen na 402mm a délka paketu byla vypočítána s velikostí 126mm. Celková účinnost stroje byla po návrh motoru spočtena na 95%.

Po návrhu motoru jsem ověřoval tepelné vlastnosti stroje. Navrhnul jsem prvotní příslušné chladicí opatření – chlazení pomocí glykolu v kostře motoru. Následně jsem provedl, za pomoci vedoucího, specifikaci tepelných odporů mezi jednotlivými tepelnými toky, které se následně maticově vypočítaly v softwaru Matlab. V dalším kroku jsem pomocí metody konečných prvků ověřil tepelné vlastnosti motoru. 2D model motoru byl zkrešen v prostředí AutoCad a následně naimportován do prostředí FEMM. Zde byly nadefinované jednotlivé materiálové a okrajové podmínky. Následně byly provedena tepelné analýza stroje.

Následně jsem porovnával teploty z analytického výpočtu s hodnotami odečtených v prostředí FEMM. Teplotní rozdíly byly maximálně 8 °C, nicméně celkové oteplení stroje bylo vysoké. Proto bylo navrženo opatření proti tomuto tepelnému namáhání stroje. Do jha rotoru jsem přidal dvanáct axiálních chladících kanálů, které jsou profukovány vzduchem a poté provedl ověření pouze v prostředí FEMM. Teploty v rotorové části se tímto způsobem zmenšili téměř o 45 °C. Po tomto kroku se dá předpokládat vyhovující tepelné namáhání stroje.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOYPLOV, Igor Petrovič. Stavba elektrických strojů. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988. ISBN L25-C3-IV-41f/58667.
- [2] VRÁNA, Václav. Studijní texty - Asynchronní stroje [online]. In: . [cit. 2019-03-03]
- [3] KŮS, Václav, Jiří SKÁLA a Jiří Hammerbauer. Elektromagnetická kompatibilita výkonových elektronických systémů. Praha: BEN - technická literatura, 2013. ISBN 978-80-7300-476-7.
- [4] ČERNÝ, Ondřej, Radovan DOLEČEK a Jaroslav NOVÁK. Synchronní motory s permanentními magnety pro trakční pohony kolejových vozidel[online]. [cit. 2019-03-13]. Vědeckotechnický sborník ČD č.29/2010. Dostupné z: <https://vts.cd.cz/documents/168518/168657/2908.pdf/0cfb0eda-cd8d-42f1-941e-b4e3ed2dfd2a>
- [5] KOŠÍK, Michal a Pavel SKAROLEK. Trakční vlastnosti elektromobilu – výkony a účinnosti. B1M14EPT [online]. 2017, 2017, 20 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/B1M14EPT/EPT_úloha5_2017_18_elektromobil.pdf
- [6] STATON, Dr David a Dr James GOSS. Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors. Motor Design Limited [online]. 2017, 2017(1), 89 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.coilwindingexpo.com/berlin/___media/pages/Tutorial-1-D--Staton-&J-Goss-MDL.PDF
- [7] [online]. [cit. 2019-05-02]. Dostupné z: https://www-europe.nissan-cdn.net/content/dam/Nissan/cz/brochures/Pricelists/NEW_LEAF_CZ.pdf
- [8] A. N. Kazak and D. M. Filippov, "Development of In-wheel Motor for Vehicles," 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), Saint Petersburg and Moscow, Russia, 2019, pp. 1406-1408. doi: 10.1109/EIConRus.2019.8657014
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8657014&isnumber=8656628>
- [9] M. J. Akhtar and R. K. Behera, "Optimal design of stator and rotor slot of induction motor for electric vehicle applications," in IET Electrical Systems in Transportation, vol. 9, no. 1, pp. 35-43, 3 2019.
doi: 10.1049/iet-est.2018.5050
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8665731&isnumber=8665730>
- [10] S. Jacobs, L. Vandenbossche and E. Attrazic, "How Electrical Steel Optimizes Traction Electric Machine Design: A Serviceable Contribution to Electric Vehicles," in IEEE Electrification Magazine, vol. 7, no. 1, pp. 39-48, March 2019. doi: 10.1109/MELE.2018.2889550

URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8658029&isnumber=8658015>

- [11] A. Saleki, S. Rezazade and M. Changizian, "Analysis and simulation of hybrid electric vehicles for sedan vehicle," 2017 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, 2017, pp. 1412-1416.
doi: 10.1109/IranianCEE.2017.7985263
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7985263&isnumber=7985087>
- [12] Z. Q. Zhu, W. Q. Chu and Y. Guan, "Quantitative comparison of electromagnetic performance of electrical machines for HEVs/EVs," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, no. 1, pp. 37-47, March 2017.
doi: 10.23919/TEMS.2017.7911107
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7911107&isnumber=7911100>
- [13] G. Sieklucki, "An Investigation into the Induction Motor of Tesla Model S Vehicle," 2018 *International Symposium on Electrical Machines (SME)*, Andrychów, 2018, pp. 1-6.
doi: 10.1109/ISEM.2018.8442648
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8442648&isnumber=8442427>
- [14] BUREŠ, David. Tesla Model S P85D: Elektromobil s výkonem 515 kW a pohonem všech kol. Auto.cz [online]. auto.cz: auto.cz [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/tesla-model-s-p85d-elektromobil-s-vykonem-515-kw-a-pohonem-vsech-kol-83510>

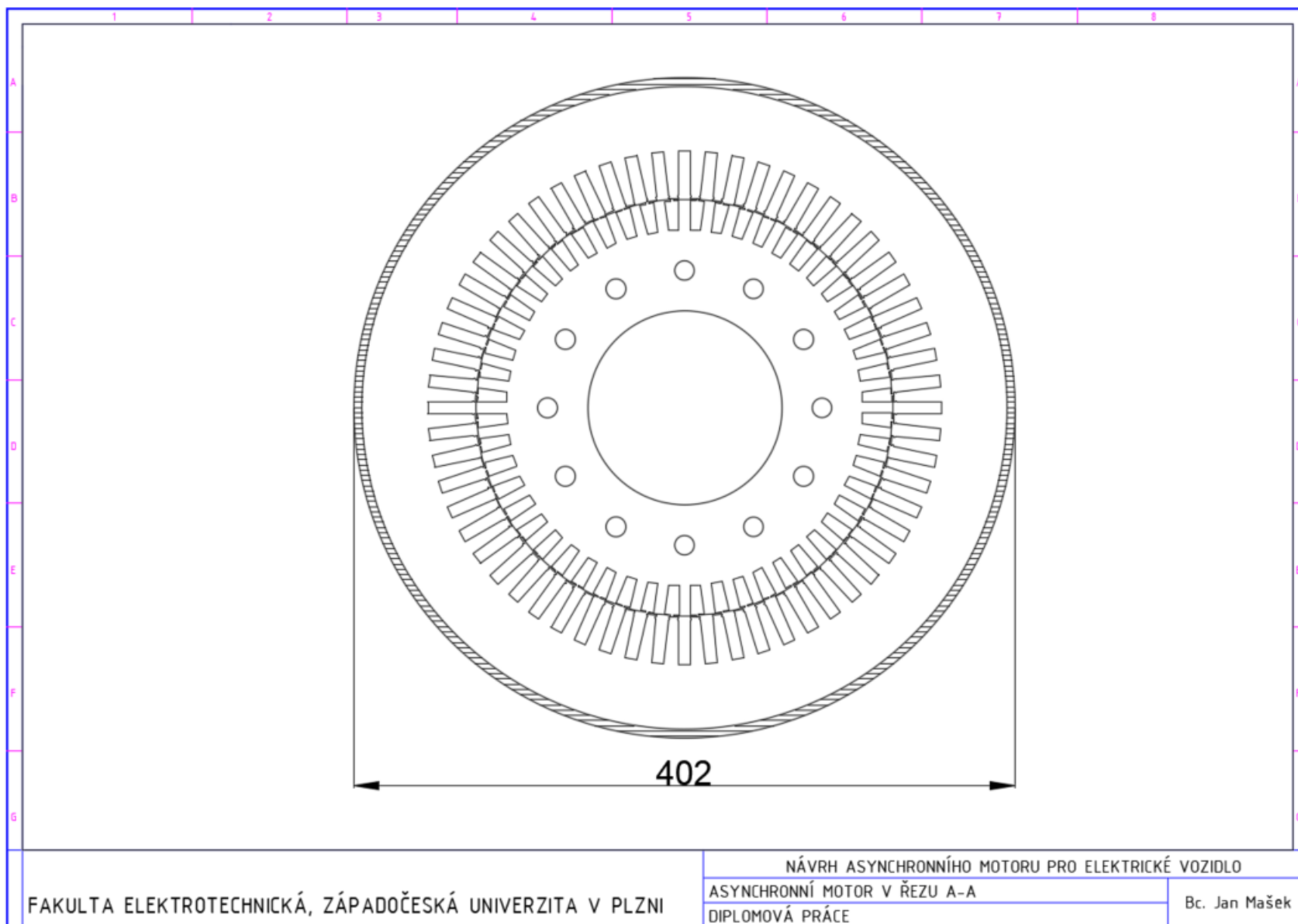
Obrázky

- [1] *Tesla motors Inc. - Open Tesla Research* [online]. [cit. 2019-03-11]. Dostupné z: <https://image.jimcdn.com/app/cms/image/transf/dimension=origxorig:format=jpg/p/ath/s40c423127565d23a/image/i2344432e0db28973/version/1388968344/image.jpg>
- [2] *RARE EARTH MAGNETS STILL OPTIMUM CHOICE, SAYS MOTOR DESIGN EXPERT* [online]. 2015, 1 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <http://erean.eu/wordpress/rare-earth-magnets-still-optimum-choice-says-motor-design-expert/>
- [4] YILMAZ, Mustafa a Philip T. KREIN. Review of Battery Charger Topologies, Charging Power Levels, and Infrastructure for Plug-In Electric and Hybrid Vehicles. *Yilmaz2013ReviewOB* [online]. 2013, 2013, 2013, 28 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Review-of-Battery-Charger-Topologies%2C-Charging-and-Yilmaz-Krein/b6b87f4a11ece51c932e36ea45b19fe3497b4929>
- [5] *Tesla Tesla On the Road* [online]. [cit. 2019-03-18]. Dostupné z: https://www.tesla.com/sites/default/files/images/supercharger/model3_supercharger_@1x_1020px.jpg?190206
- [6] KOŠÍK, Michal a Pavel SKAROLEK. *Trakční vlastnosti elektromobilu – výkony a účinnosti. BIM14EPT* [online]. 2017, 2017, 20 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: http://motor.feld.cvut.cz/sites/default/files/predmety/BIM14EPT/EPT_úloha5_2017_18_elektromobil.pdf
- [7] WHITEHEAD, Andrew a Chris HILTON. Protean Electric's In-Wheel Motors Could Make EVs More Efficient [online]. 2018, 2018 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/transportation/advanced-cars/protean-electrics-inwheel-motors-could-make-evs-more-efficient>
- [8] MORRIS, Charles. A redesigned Nissan LEAF arrives in 2018, joining the new generation of plug-ins. *Charged* [online]. 2018, 2018(1), 7 [cit. 2019-04-18]. Dostupné z: <https://chargedevs.com/features/a-redesigned-nissan-leaf-arrives-in-2018-joining-the-new-generation-of-plug-ins/>
- [9] STATON, Dr David a Dr James GOSS. Open Source Electric Motor Models for Commercial EV & Hybrid Traction Motors. *Motor Design Limited* [online]. 2017, 2017(1), 89 [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.coilwindingexpo.com/berlin/___media/pages/Tutorial-1-D--Staton-&-J--Goss-MDL.PDF
- [10] Tesla Model S Dual Motor. <https://myelectriccar.com.au> [online]. australia [cit. 2019-05-05]. Dostupné z: <https://myelectriccar.com.au/wp-content/uploads/2013/12/ModelS-800x600-6.jpg>

Přílohy

Příloha A – Model motoru

Příloha B – Vodivostní matice



X	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
1	G12	-G12	0	0	0	0	0	0	0	x	T1	ΔP1
2	-G12	G12+G23 +G24	-G23	-G24	0	0	0	0	0		T2	ΔP2
3	0	-G23	G35+G34 +G23	-G34	-G35	0	0	0	0		T3	ΔP3
4	0	-G24	-G34	G24+G34 +G45	-G45	0	0	0	0		T4	ΔP4
5	0	0	-G35	-G45	G35+G54 +G58+G65	-G56	0	-G58	0		T5	ΔP5
6	0	0	0	0	-G56	G56 +G67 +G68+G69	-G67	-G68	-G69		T6	ΔP6
7	0	0	0	0	0	-G67	G67	0	0		T7	ΔP7+ 90*G710
8	0	0	0	0	-G58	-G68	0	G58 +G68 +G89	-G89		T8	ΔP8
9	0	0	0	0	0	-G69	0	-G89	G69 +G89		T9	ΔP9+ 90*G910