

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vliv provozních parametrů na oteplení PMSM motoru

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

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Lukáš SOBOTKA**
Osobní číslo: **E17N0045P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Vliv provozních parametrů na oteplení PMSM motoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Proveďte z dostupné dokumentace stanovení ztrát motoru při různých provozních podmínkách.
2. Stanovte s využitím CFD součinitel přestupu tepla na ochlazovaných plochách motoru.
3. Stanovte pomocí metody konečných prvků oteplení stroje při různých provozních podmínkách.
4. Parametry motoru: $P = 35 \text{ kW}$, $U = 248 \text{ V}$, otáčky 9000 ot/min , IM 3001, IP44, IC00.

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. Blejchař, T.: Návody do cvičení Modelování proudění CFX: VŠB TU strava 2009.
2. Hak, J., Ošlejšek, O.: Výpočet chlazení elektrických strojů 1.Díl: Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet. Vydání VUES Brno, 1973 628s.
3. Pyrhönen J., Jokinen T., Hrabovcova V.; Design of Rotating Electrical Machines, John Wiley & Sons, Ltd, 2008.
4. Kopylov, I. P., kol.: Stavba elektrických strojů. Praha , STNL/MIR, 1988.

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

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na simulaci oteplení synchronního motoru s permanentními magnety s ohledem na jeho zatížení. Model stroje je založen na reálném motoru s parametry $P=35\text{kW}$, $U=248\text{ V}$, $n=9000\text{ot/min}$, IM 3001, IP44 a IC00. První kapitola bude věnována teorii a konstrukci synchronního stroje s bližším zaměřením na stroj s permanentními magnety. Následně bude rozebrán výpočet ztrát synchronního stroje. Pomocí programu Ansys modulu CFX bude zjištěn součinitel přestupu tepla a metodou konečných prvků namodelováno oteplení jednotlivých částí motoru.

Klíčová slova

Ztráty, synchronní motor, PMSM, ANSYS, chlazení, model synchronního stroje, CFX.

Abstract

The master theses present the simulation of warming of a synchronous machine with a permanent magnet in term of his load. The Machine model based on the real motor with parameters: P=35kW, U=248V, n=9000ot/min, IM 3001, IP44, IC00. The first Chapter is dedicated to the theory and construction of the synchronous machine with a focus on the machine with a permanent magnet. Next, will be analyzed the calculation of losses of the synchronous machine. A Heat Transfer coefficient detects by software Ansys CFX. We will detect the warming of individual machine parts using the FEM.

Key words

Losses, synchronous machine, PMSM, ANSYS, cooling, synchronous machine model,CFX.

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 26.5.2019

Bc. Lukáš Sobotka

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi, Ph.D. za cenné rady při vypracování diplomové práce a za trpělivost, především v pozdější fázi tvorby mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě Škoda Electric a.s., jmenovitě Ing. Pavlu Dvořákovi, Ph.D. za poskytnutí a vysvětlení funkce programu na výpočet ztrát stroje s permanentními magnety.

Obsah

OBSAH	1
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	2
ÚVOD	4
1 SYNCHRONNÍ STROJ	5
1.1 KONSTRUKCE SYNCHRONNÍHO STROJE.....	7
1.1.1 PMSM.....	8
1.2 ZTRÁTY V SYNCHRONNÍM STROJI.....	9
1.2.1 Ztráty na statoru.....	10
1.2.2 Ztráty v rotoru.....	13
1.2.3 Ostatní ztráty.....	14
1.3 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH MOTORŮ POUŽÍVANÝCH V TRAKCI.....	15
2 VÝPOČET PARAMETRŮ SIMULOVANÉHO STROJE	20
2.1 HLAVNÍ PARAMETRY A PŘEDSTAVENÍ STROJE.....	20
2.2 ZATĚŽOVACÍ CYKLUS STROJE.....	21
2.2.1 Přepočítání ztrát na objemové ztráty.....	23
3 VÝSLEDKY ANSYS	25
3.1 MODEL SYNCHRONNÍHO STROJE.....	25
3.2 SIMULACE CHLAZENÍ V CFX.....	28
3.3 SIMULACE OTEPLENÍ.....	35
ZÁVĚR	44
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	45
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratk

Φv	[m/s]	průměrná rychlost
A_t	[A/m]	lineární proudová hustota
B	[T]	magnetická indukce
B_m	[T]	maximální indukce
B_n	[T]	jmenovitá indukce ve jhu
CFX		computation fluid dynamics program
$\cos\varphi_n$	[-]	jmenovitý účinník
C_p	[J/kgK]	tepelná kapacita
d	[mm]	tloušťka plechu
D	[mm]	průměr kola
D	[mm]	průměr drátu
DE		drive end
D_i	[mm]	průměr drátu s izolačním přírůstkem
f	[Hz]	frekvence
f_s	[Hz]	synchronní frekvence
h	[mm]	výška plechu
I_f	[A]	fázový proud
I_{FEV}	[A]	proud generující vířivé ztráty
I_k	[A]	zkratový proud
I_n	[A]	jmenovitý proud
J	[A/mm ²]	proudová hustota
k	[-]	korekční koeficient
l	[m]	délka statoru
l	[mm]	délka vodiče
l	[mm]	naměřená délka trati v plánu
l_{skut}	[m]	skutečná ujetá dráha
M	[Nm]	moment
m	[-]	počet fází
m_{FE}	[kg]	hmotnost železa
M_n	[Nm]	jmenovitý moment
n	[ot/min]	otáčky
NDE		non drive end
n_k	[ot/min]	otáčky kola
n_m	[ot/min]	otáčky motoru
n_s	[ot/min]	synchronní otáčky
P	[W]	činný výkon
p	[-]	počet pólpárů
p	[W/kg]	ztrátové číslo
PWM		pulzně šířková modulace
R_f	[Ω]	odpor jedné fáze
R_{FEV}	[Ω]	odpor proudové dráhy vířivých proudů
S	[mm ²]	průřez vodiče
s	[mm]	celková naměřená délka trati v plánu
s_{skut}	[m]	celková skutečná délka trati
t	[s]	čas
T	[°C]	teplota
$T_{zv.}$		takzvané

U	$[V]$	<i>fázové napětí</i>
U_i	$[V]$	<i>indukované napětí</i>
U_{ib}	$[V]$	<i>indukované napětí vytvořené buzením</i>
U_n	$[V]$	<i>jmenovité napětí</i>
V	$[m^3]$	<i>objem</i>
v	$[m/s]$	<i>rychlost</i>
w	$[mm]$	<i>délka plechu</i>
x,y,z	$[-]$	<i>směrové vektory</i>
X_d	$[\Omega]$	<i>reaktance v podélném směru</i>
X_q	$[\Omega]$	<i>reaktance v příčném směru</i>
α	$[W/m^2K]$	<i>součinitel přestupu tepla</i>
α_{th}	$[W/m^2K]$	<i>součinitel přestupu</i>
β	$[^\circ]$	<i>zátěžný úhel</i>
δ	$[mm]$	<i>velikost vzduchové mezery</i>
ΔP	$[W]$	<i>celkové ztráty</i>
ΔP_{ad}	$[W]$	<i>přídavné ztráty</i>
ΔP_{FE}	$[W]$	<i>ztráty v železe</i>
ΔP_{FEH}	$[W]$	<i>ztráty v železe způsobené hysterezí</i>
ΔP_{FEn}	$[W]$	<i>jmenovité ztráty v železe</i>
ΔP_{FEV}	$[W]$	<i>ztráty v železe způsobené vířivými proudy</i>
ΔP_{jn}	$[W]$	<i>jmenovité Jouleovy ztráty</i>
ΔP_{js}	$[W]$	<i>ztráty Jouleovy na statoru</i>
ΔP_m	$[W]$	<i>mechanické ztráty</i>
ΔP_{mn}	$[W]$	<i>jmenovité mechanické ztráty</i>
ΔP_{pm}	$[W]$	<i>ztráty v magnetech</i>
ΔP_{pmn}	$[W]$	<i>jmenovité ztráty v magnetech</i>
ΔP_v	$[W]$	<i>objemové ztráty</i>
η	$[-]$	<i>empirická konstanta pro výpočet hysterezních ztrát</i>
η_n	$[-]$	<i>jmenovitá účinnost</i>
λ	$[W/mK]$	<i>výsledná měrná tepelná vodivost</i>
λ_i	$[W/mK]$	<i>měrná tepelná vodivost izolace</i>
ρ	$[\Omega m]$	<i>měrná rezistivita</i>
ρ	$[kg/m^3]$	<i>hustota</i>
σ	$[Pa]$	<i>tlak</i>
Φ	$[Wb]$	<i>magnetický tok</i>
ω	$[rad/sec]$	<i>úhlová rychlost</i>
ω_s	$[rad/sec]$	<i>synchronní úhlová rychlost</i>

Úvod

Diplomová práce se zabývá rozbořem ztrát v synchronním stroji a následné simulací oteplení již navrženého stroje. Simulovaný stroj je konstruován jako stroj bez kostry. Stroj je určen pro pohon vozidla, jeho vinutí bylo navrženo v teplotní třídě izolace F, tedy do 155°C. Jeho chlazení bude probíhat pomocí ofuku statorového paketu, tzv. náporové chlazení. Velikost rychlosti proudění chladícího média, tedy vzduchu, je stejná jako rychlost pohybu vozidla. Ztráty jsou počítány pouze pro případ nesjetých pneumatik. Simulace je provedena pro dvě podobné geometrie. První geometrií je původní geometrie bez jakýchkoliv úprav ve vnější části statorového svazku. Ve druhé geometrii jsou upraveny tvary chladících žebek, konkrétně jsou smazány díry v žebrech a některá zaoblení. V obou geometriích jsou smazána ložiska a nahrazena válcem, stejně tak tomu bylo s čidlem otáček na straně NDE. K tomuto je přistoupeno z důvodu malých poloměrů a špatnému síťování geometrie, kdy v některých případech software nebyl schopen vytvořit síť pro výpočet v těchto částech geometrie. K simulaci je použit software Ansys. Konkrétně jsou využity moduly CFX, pro výpočet proudění a přestupu tepla ze statorového paketu do okolí. Z této simulace jsou následně dopočteny průměrné, maximální a minimální hodnoty součinitele přestupu tepla. Dále je využit modul Mechanical, ve kterém je spočtena přechodová teplotní analýza. Pro správné nastavení modelu je využita steady-state analýza, ve kterém je ověřeno správné nastavení jednotlivých kontaktů v geometrii, velikost objemových ztrát a součinitelů tepelných vodivostí jednotlivých materiálů. Poté je totéž nastavení vloženo do transientní analýzy, ve které je stroj zatěžován po dobu deseti kol. Pracovní diagram stroje odpovídá deseti stejným kolům.

1 Synchronní stroj

Synchronní stroj je jedním ze tří základních druhů elektrických strojů točivých. Dříve byly synchronní stroje používány především jako generátory v elektrárnách případně jako kompenzátory jalové energie. S rozvojem elektroniky a výpočetní techniky se začaly dostávat do popředí i synchronní motory, což bylo dáno velkými nároky na řídicí a výkonové struktury synchronních motorů. Synchronní motory se dnes používají především v trakci, průmyslu a energetice. [1-3] [7]

Synchronní stroj pracuje na interakci dvou magnetických polí. Statorové točivé pole je buzené střídavým vícefázovým proudem, rotorové pole je buzeno stejnosměrným proudem. Rychlost otáčení obou polí je stejná, právě proto mluvíme o synchronním stroji. Ve stroji s tlumičem se pak objevuje ještě třetí pole, které je buzeno, stejně jako je tomu u asynchronního stroje, napětím indukovaným do tyčí tlumiče. Princip tlumiče je tedy shodný s principem klece nakrátko. Vinutí tlumiče se kromě tlumení kyvů stroje při změně zatížení užívá i k asynchronnímu rozběhu. [5][7]

Otáčky synchronního stroje udává vztah:

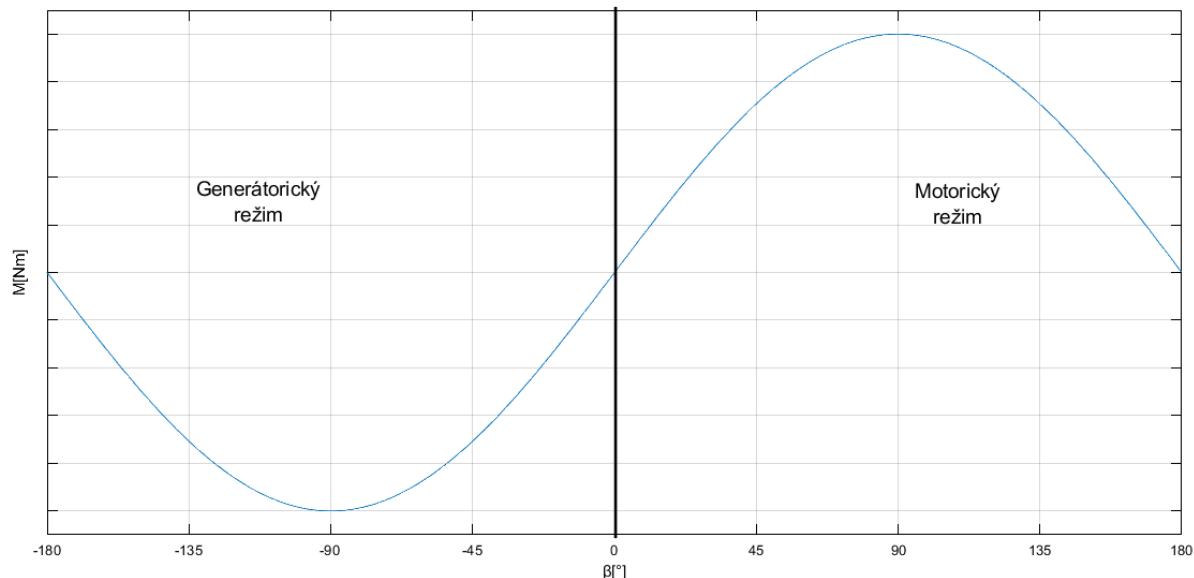
$$n_s = \frac{60f_s}{p} \quad (1.1)$$

Obecná rovnice momentu:

$$M = \frac{P}{\omega_s} \quad (1.2)$$

Po dosazení výkonu nám pro stroj s hladkým rotorem vyjde vztah:

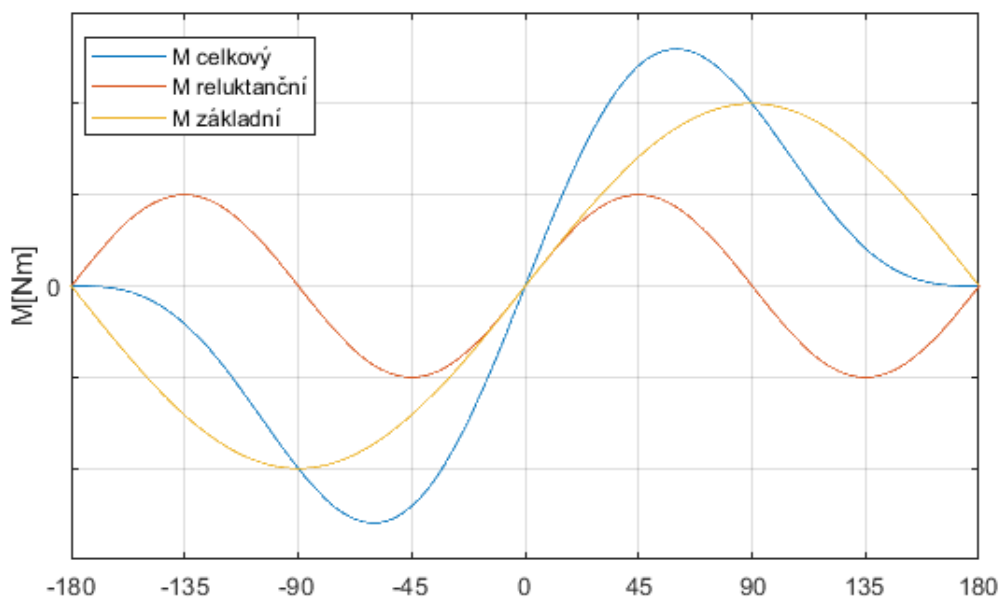
$$M = \frac{m}{\omega_s} UI_k \sin(\beta) \quad (1.3)$$



Obr. 1. Závislost momentu synchronního stroje s hladkým rotorem na zátěžném úhlu

U stroje s vyniklými póly je třeba uvažovat rozdílných indukčností v podélné a příčné ose. Vztah pro moment stroje je tedy dán:

$$M = \frac{mp}{\omega_s} UI_k \left[\frac{U}{2} \left(\frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin(2\beta) + \frac{U_{ib}}{X_d} \sin(\beta) \right] \quad (1.4)$$



Obr. 2. Závislost momentu synchronního stroje s vyniklými póly na zátěžném úhlu beta

Největší výhodou synchronních motorů jsou bezesporu konstantní otáčky pro různá zatížení hřídele. Při změně zatížení dochází nikoli k zpomalení stroje, jak je tomu u asynchronních motorů, ale jak je patrné z výše uvedených rovnic, ke změně zátěžného úhlu β . Pro stabilní chod stroje v motorickém režimu může tento úhel nabývat hodnot v intervalu $(0, \pi/2)$. Při přetížení stroje a nárůstu zátěžného úhlu nad tuto hodnotu může dojít k vypadnutí ze synchronismu a zastavení stroje. Nevýhodou motorů bez tlumiče je, že při přímém připojení na síť se nejsou schopny samy rozběhnout. Důvodem je rychlost statorového pole, které je moc rychlé. Rozběh synchronního stroje lze realizovat cizím rozběhovým motorem, tlumičem tzv. asynchronní rozběh případně frekvenčním rozběhem. Rozběh cizím motorem je výhodný tehdy, pokud je možné rozbíhat mechanicky nezatížený stroj, v opačném případě tento rozběh ztrácí smysl z důvodu srovnatelných parametrů obou strojů. Při spouštění stroje pomocí asynchronního rozběhu není rotorové budící vinutí napájeno. Stroj se rozbíhá po momentové charakteristice asynchronního motoru a při otáčkách blízkých synchronním se stroj nabudí. Následně je stroj vtažen do synchronismu. Nejsložitější, ale nejefektivnější rozběh stroje je rozběh frekvenčním měničem, kdy je zvyšována napájecí frekvence statoru. Rotorové pole má při optimálním zvyšování frekvence napájení čas reagovat na rychlost otáčení statorového pole a rychlost rotoru se tedy postupně zvyšuje až na jmenovité otáčky. [24]

1.1 Konstrukce synchronního stroje

Základní rozdělení podle konstrukce synchronního stroje je na stroje s vyniklými póly – hydroalternátory a na stroje s hladkým rotorem – turboalternátory. Dále se stroj může dělit podle zdroje buzení, a to na stroje s permanentními magnety, stroje s externím napájením tzv. budiče, případně na stroje bez buzení, tedy synchronní reluktanční stroje. [2]

Synchronní stroje se obecně skládají ze statoru, rotoru, kostry stroje a případně ložiskových stojanů, pokud nejsou ložiska umístěna v ložiskových šítech. Rotor se skládá z hřídele, rotorových plechů, náboje ventilátoru, labyrintů a kroužků pro přívod budícího proudu na rotor. Rotor synchronních strojů se vyrábí ve dvou základních provedeních. Prvním provedením je stroj s hladkým rotorem. Oproti stroji s vyniklými póly mají turboalternátory dlouhý úzký rotor. Hřídel a rotorové jho je u tohoto typu rotoru vyrobena jako odlitek. Drážky jsou následně vyfrézovány pro konkrétní rozměry budícího vinutí. [23]

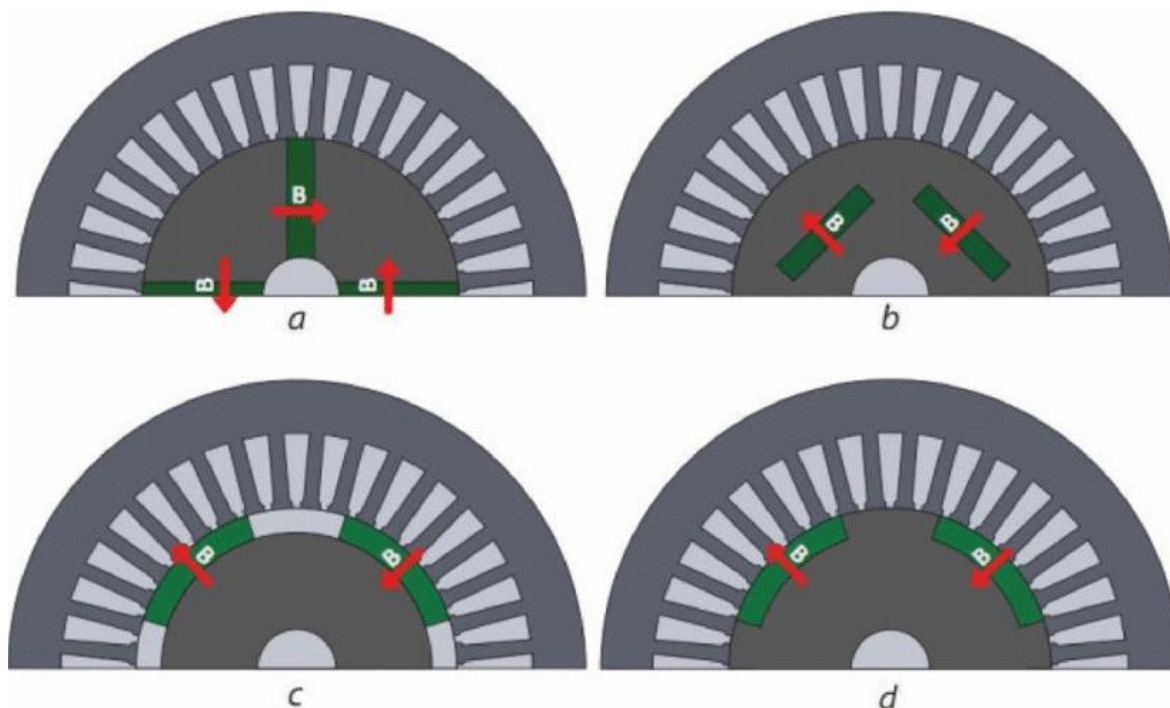
Do drážek je vkládáno koncentrické vinutí, které bývá zajištěno proti odstředivým silám bronzovými klíny. Tyto klíny spolu s bandážemi na koncích rotorového jha vytvářejí tlumič. Poslední drážky se nechávají prázdné a slouží k tvarování magnetického pole. Do hřídele se pak může udělat osový vývrt, který snižuje váhu výkovku a zároveň skrz něj je možné vést napájení budícího vinutí z kroužků. Rotory s vyniklými póly jsou krátké s velkým průměrem a více pólpáry. Rotory s vyniklými póly se skládají z hřídele, ke které je upevněno rotorové jho. Jho magnetického obvodu na rotoru se skládá z plechů, ale může být tvořeno i odlitkem. Póly je pak lepší dělat listěné, vzhledem k omezení ztrát vířivými proudy v jeho nástavcích. Póly jsou přichyceny ke jhu pomocí šroubů případně rybin. Listěné póly jsou sešroubované nemagnetickými svorníky. Budící vinuté je vkládáno do prostoru pod pólovým nástavcem. Vinutí hydroalternátorů je konstruované jako koncentrované. Mezi dvě sousední cívky se vkládá mezipólová rozpěrka, která zabraňuje pohybu cívky. Do pólových nástavců můžeme umístit tyče tlumícího vinutí, které na obou koncích spojíme kruhem nakrátko. Tyto kruhy mohou být z jednoho kusu případně děleny do segmentů. [23]

Konstrukce statoru všech typů synchronních strojů je pak podobná, jediným rozdílem jsou pak rozměry, které odpovídají velikosti rotoru. Stator synchronního stroje se skládá z listěných plechů, které ještě navíc mohou být děleny do segmentů. Slisované plechy jsou následně vkládány do kostry a na obou koncích svařeny s kostrou. Proti rozevření statorového paketu se používají tzv. prsty, které tlačí proti rozevření zubů. Pro lepší chlazení se na statoru dělají radiální chladicí kanály, které pomáhají chladit stroj v radiálním směru. Do statoru se vkládá třífázové nebo vícefázové postupné vinutí.[23]

Kostry malých synchronních strojů jsou odlité z jednoho kusu. U větších strojů se pak používá svařovaná konstrukce. Geometrické uspořádání kostry odpovídá typu chlazení stroje.[23]

1.1.1 PMSM

Konstrukce synchronních strojů s permanentními magnety se téměř neliší od konstrukce klasických synchronních strojů. Podstatný rozdíl je na rotoru, kde je vyjmuto budící vinutí napájené stejnosměrným proudem a nahrazeno permanentními magnety z vzácných zemin. Nejčastěji používané magnety jsou z materiálů NdBF_e, SmCo. Z konstrukčního hlediska je možné uložit permanentní magnety na rotoru povrchově, zapuštěné v povrchové drážce rotoru, vnitřně radiální magnety nebo s tangenciálním uložením magnetů.[17]



Obr. 3. a. Tangenciálně uložené magnety, b. Vnitřně uložené magnety, c. Povrchově uložené magnety, d. Zapuštěné magnety v povrchové drážce rotoru, převzato z [17]

1.2 Ztráty v synchronním stroji

Vzhledem k tomu, že synchronní stroj je reálný systém, pak jeho účinnost nemůže být stoprocentní. Velikost ztrát a jejich procentuální zastoupení ve stroji je dána především jmenovitým výkonem stroje. Obecně platí, že čím větší stroj, tím větší ztráty, ale ne všechny ztráty rostou lineárně s výkonem stroje, a proto je i účinnost těchto strojů vyšší. Účinnost synchronních strojů se pohybuje, pro nejmenší stroje, od 85 %, pro největší stroje, až 97 %. Ztráty vzniklé ve stroji můžeme rozdělit na ztráty na statoru, ztráty v rotoru a ostatní, především mechanické ztráty. Dále je potřeba zauvažovat nad tím, z čeho je stroj napájen. Je-li stroj napájen ze sítě, pak nemusíme uvažovat žádné dodatečné ztráty vzniklé napájením. Napájíme-li však stroj z měničů, musíme dále uvažovat vliv PWM na průběh proudu, a tedy i vliv na ztráty. Běžně se uvažuje zvýšení ztrát vlivem PWM kolem 20 % z jmenovitých ztrát. [2]

1.2.1 Ztráty na statoru

Ztráty na statoru jsou dvojího typu. Ztráty v železe ΔP_{FE} a Jouleovy ztráty ΔP_{js} .

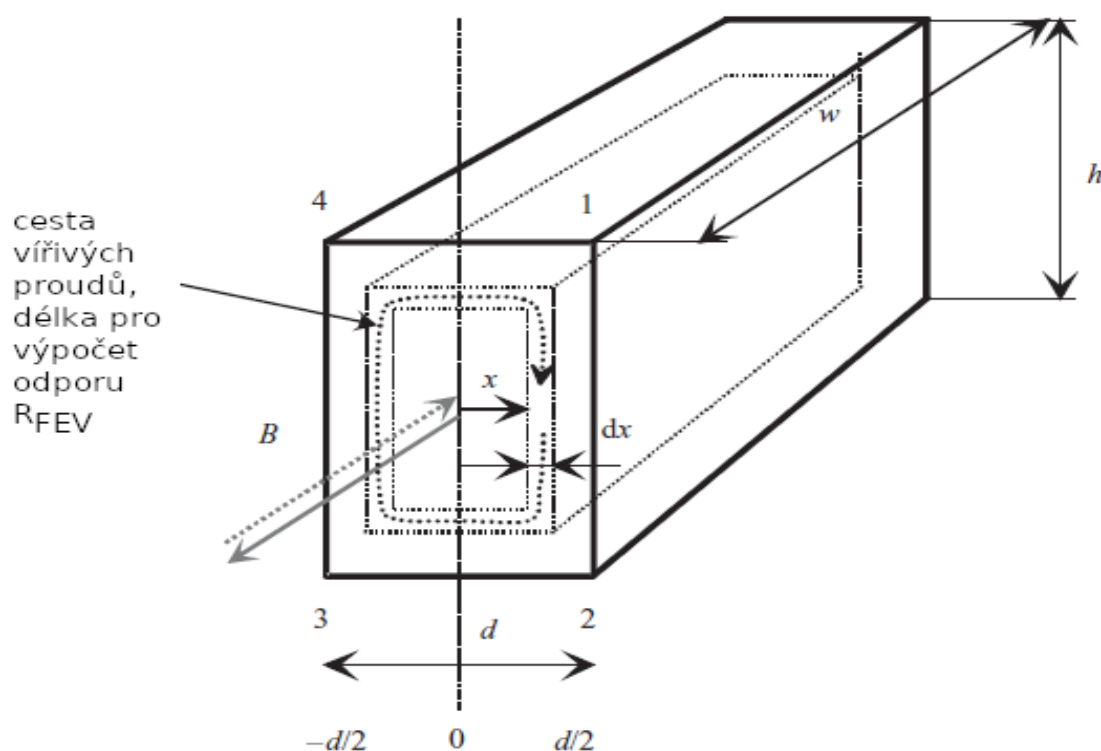
Jouleovy ztráty, někdy též nazývané ztráty v mědi, vznikají průchodem proudu vodičem. Jejich výpočet je dán vztahem [4]:

$$\Delta P_{js} = mR_f I_f^2 \quad (1.5)$$

Fázový odpor je pak možné při návrhu spočítat jako:

$$R_f = \rho \frac{l}{S} \quad (1.6)$$

kde ρ je měrná rezistivita materiálu, ze kterého je vodič vyroben, l je celková délka vodiče a S je jeho průřez. Ztráty v železe můžeme ještě navíc rozdělit na ztráty vířivými proudy ΔP_{FEV} a ztráty hysterezní ΔP_{FEH} .



Obr. 4. Vířivé proudy v plechu, převzato z [2]

Ztráty vířivými proudy vznikají změnou magnetické indukce v plechu. Tyto ztráty mohou vzniknout pouze tehdy, je-li charakter magnetického pole střídavý, tedy ve statoru a rotoru asynchronního stroje, ve statoru synchronního stroje a v rotoru stejnosměrného stroje. Dále pak vznikají vířivé proudy v magnetech, bude blíže rozebráno v kapitole ztráty v rotoru. Tyto ztráty, jak bude patrné z následujících rovnic, závisí na třetí mocnině tloušťky plechu, kvadrátu indukce a frekvence. Z toho plynou důvody, proč se některé součásti stroje musí dělat lištěné a jiné se mohou dělat z jednoho kusu.

Indukované napětí do jednoho plechu je dáno rovnicí:

$$U_i = -\frac{d\phi}{dt} = \omega \frac{B_m}{\sqrt{2}} 2hx \quad (1.7)$$

Kde ω je úhlová rychlost, B_m maximální indukce, h výška plechu a x je tloušťka plechu.

Proud, který vznikne naindukováním tohoto napětí je omezován odporem plechu:

$$R_{FEV} = \frac{\rho l}{S} = \frac{2h\rho}{w dx} \quad (1.8)$$

ρ měrný elektrický odpor plechu, w je délka plechu a dx je diferenciál tloušťky plechu

Diferenciál vířivých proudů je tedy:

$$dI_{FEV} = \frac{U_i}{R_{FEV}} = \frac{2\pi f B_m w x dx}{\rho \sqrt{2}} \quad (1.9)$$

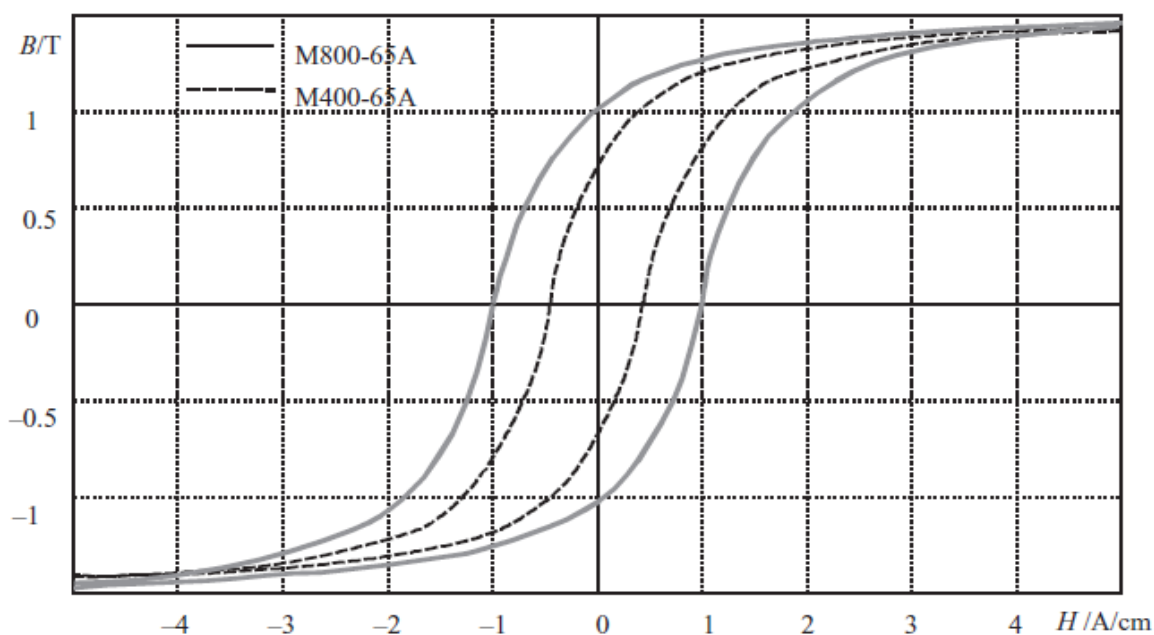
Následně se ztráty vířivými proudy po integraci přes tloušťku plechu vypočítají:

$$\Delta P_{FEV} = U \cdot I_{FEV} = \frac{wh\pi^2 f^2 d^3 B_m^2}{6\rho} \quad (1.10) [2]$$

Hysterezní ztráty jsou dány velikostí hysterezní smyčky. Pro plechy, ze kterých jsou skládány magnetické obvody je žádoucí, aby hysterezní smyčka byla co nejmenší, tedy aby materiál byl magneticky měkký. Pro výpočet hysterezních ztrát platí vztah:

$$\Delta P_{FEH} = \eta \cdot V \cdot f \cdot B_m^n \quad (1.11)$$

kde η je empirická konstanta a n se pohybuje v intervalu [1,5-2,5].



Obr. 5. Hysterezní smyčky plechů M800-65A a M400-65A, převzato z [2]

Pro výpočet stroje je však potřeba zavést určité zjednodušující závislosti. Pro každý typ plechu je udáváno výrobcem tzv. ztrátové číslo p . Toto číslo udává velikost celkových ztrát v železe na kilogram pro určité parametry. Běžně se udávají ztráty pro magnetickou indukci 1T nebo 1,5T a frekvenci 50Hz případně 60Hz.[2]

Celková velikost ztrát je pak dána vztahem:

$$\Delta P_{FE} = kp \left(\frac{B_n}{B} \right)^2 m_{FE} \quad (1.12)$$

m_{FE} je hmotnost paketu, k korekční koeficient, p měrné ztráty, B_n jmenovitá indukce v plechu, B referenční indukce plechu, která je udávána u B-H charakteristiky.

Pro synchronní stroje se koeficient k pohybuje pro zuby kolem 2 a pro jho 1,5-1,7. Kvalita plechů, a tedy i maximální velikost ztrát lze předběžně určit ze značení elektrotechnických plechů. Elektrotechnické plechy se běžně značí Mxxx-yyz, kde xxx jsou maximální měrné ztráty, yy je tloušťka plechů a z je typ plechů, který určuje, zda jsou plechy orientované nebo neorientované.[2]

Příklady značení plechů:

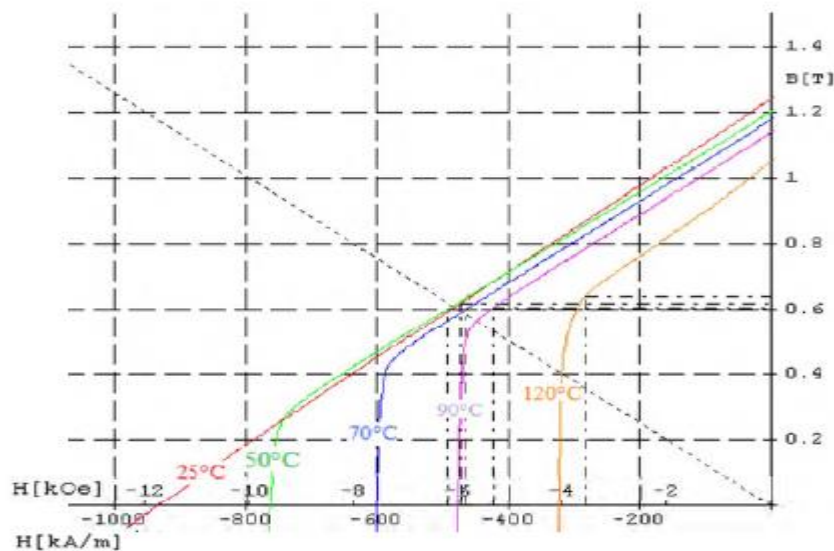
M800-65A plech má maximální měrné ztráty 8W/kg při 50Hz a 1T, tloušťka plechu je 0,65mm a je neorientovaný

M150-35S plech má maximální měrné ztráty 1,5W/kg při 50Hz a 1,7T, tloušťka plechu je 0,35mm a plechy jsou orientované

1.2.2 Ztráty v rotoru

Ztráty v rotoru závisí na typu buzení stroje. Pro klasické stroje s budící cívkou na rotoru se počítají ztráty v buzení stejně jako Jouleovy ztráty ve statoru. Jediným rozdílem je, že budící cívka na rotoru není napájena třífázovým střídavým napětím, ale stejnosměrně. Z toho pak plynou drobné úpravy ve vztahu pro výpočet ztrát. V případě reluktančního stroje bez permanentních magnetů ztráty v rotoru vůbec nevznikají. Při buzení stroje permanentními magnety, vznikají ztráty vířivými proudy v magnetech, tzv. povrchové ztráty.

Ztráty v magnetech lze poměrně výrazně eliminovat, podobně jako v elektrotechnických plechách, rozdělením na několik segmentů. Velikost vířivých ztrát klesá s každým rozdělením magnetu přibližně exponencialně. V důsledku vzniku ztrát dochází k ohřívání magnetu, a tedy jeho demagnetizaci. Touto demagnetizací slábne magnetické pole, které je magnet schopen vytvořit a v případě motoru se tak snižuje i moment, kterého může motor dosáhnout. Závislost demagnetizace magnetů NdFeB je zobrazena v Obr. 6.[9] [10]



Obr. 6. Závislost hysterezní smyčky na teplotě magnetu, převzato z [10]

1.2.3 Ostatní ztráty

Mezi ostatní ztráty řadíme především mechanické ztráty a přídatné ztráty. Výpočet mechanických ztrát vychází většinou z empirických vztahů a každá literatura udává jiný vztah. Zároveň se ne všechny vztahy hodí pro stroje s větším počtem otáček. Pro stroje s vyšším počtem otáček, než je běžných 3000 případně 3600, mohou dle těchto vztahů vznikat i několikaset wattové ztráty, což je fyzikální nesmysl. Dle dodaných parametrů stroje vyšly ztráty 703W. Literatura [26] udává polynom pro výpočet mechanických ztrát stroje bez ventilace. Pro jmenovité otáčky našeho stroje vychází:

$$\Delta P_m = 0,135715 + 0,0099333n + 7,38095 * 10^{-6} * n^2 = 687,4W \quad (1.13)$$

Naopak například dle literatury [1] je tento vztah dán:

$$\Delta P_m = 3,68p * \left(\frac{v}{40}\right)^3 * \sqrt{l} = 3,68p * \left(\frac{32,99}{40}\right)^3 * \sqrt{0,1162} = 1,4W \quad (1.14)$$

Přídavné ztráty se dělí na ztráty povrchové, ztráty způsobené vlivem napájení a pulzační ztráty. V poslední době je daleko častější napájení strojů ze střídačů nebo frekvenčních měničů. Napájení z takového zdroje snižuje účinnost stroje až o 2 % z celkového výkonu. To je dáno tím, že výstup z měničů je pouze přibližně sinusový, a tedy výstupní napětí má na sobě superponováno několik sinusových průběhů o různých frekvencích. Tyto frekvence pak vytvářejí proud, který dodatečně tepelně zatěžuje stroje. Povrchové ztráty vznikají indukovaní vířivých proudů v celistvých částech rotoru, jako je například pólový nástavec nebo magnet. Tyto ztráty byly popsány v předchozí kapitole. Velikost přídavných ztrát je úměrná tomuto vztahu:

$$\Delta P_{ad} \approx I^2 f^{1.5} \quad (1.15)$$

1.3 Chlazení elektrických motorů používaných v trakci

Pro chlazení motorů v trakci se nejčastěji používá vzduch případně kapalina, voda smíchaná v určitém poměru s nemrznoucí kapalinou. V následující tabulce je uveden přibližný odhad velikosti veličin zatěžujících motor, na které je možno se dostat při určitém typu chlazení.

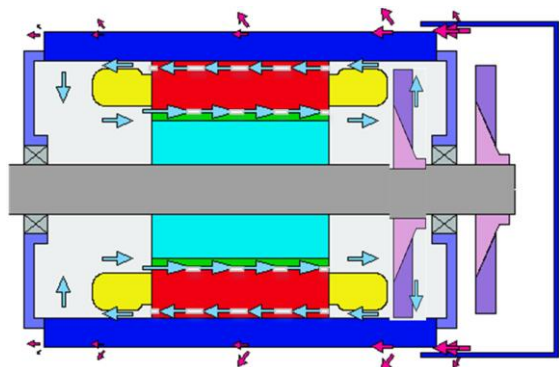
Chladicí metoda		σ [kPa]	A_t [kA/m]	J [A/mm ²]	α [W/m ² K]
Přirozená konvekce		-	-	1,5-5	5-30
Nucené chlazení plynem	Vzduch	<15	<80	5-10	20-300
	Vodík	<25	70-110	7-12	100-1000
Nucené chlazení kapalinou	Nepřímé	20-60	90-130	7-20	100-10000
	Přímé	60-100	100-200	10-30	200-25000
	Fázová změna	-	-	-	500-50000

Tabulka 1. Dosažitelné hodnoty zatížení vodičů pro jednotlivé typy chlazení, převzato z[18]

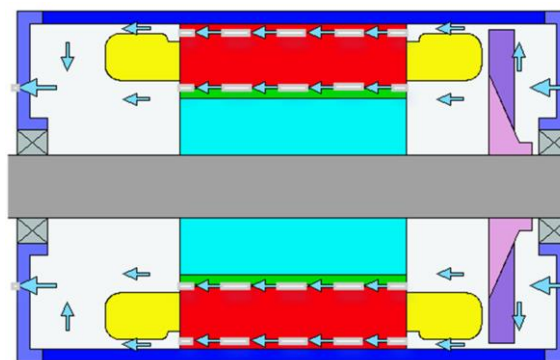
Jak je patrné z tabulky základním druhem chlazení elektrického stroje je přirozená konvekce. Tento typ chlazení je použit taktéž u našeho motoru. Konstrukčně je tento typ

chlazení nejjednodušší, protože není třeba velkých úprav elektromotoru. Po obvodu kostry, případně statorového paketu, se rozmisťují žebra, která zvětšují plochu, přes kterou jsou odváděny ztráty ve formě tepelné energie.

Dalším typem chlazení stroje je nucené proudění plynu. Nejčastěji se používá vzduch, u mezních výkonů pak vodík. Pro chlazení vodíkem musí být použita speciální, hermeticky uzavřená kostra, tak aby nedocházelo k úniku vodíku do okolního prostředí. Nevýhodou tohoto chlazení je také nutnost vodíkového hospodářství. Stroje nuceně chlazené vzduchem můžeme rozdělit na základní dvě skupiny. Stroje s vlastní a stroje s cizí ventilací. Stroje s vlastním chlazením pak můžeme ještě rozdělit na stroje s otevřeným chladicím okruhem nebo stroje s uzavřeným vnitřním chladicím okruhem.



Obr. 7. Uzavřený stroj s vlastním chlazením, převzato z [18]

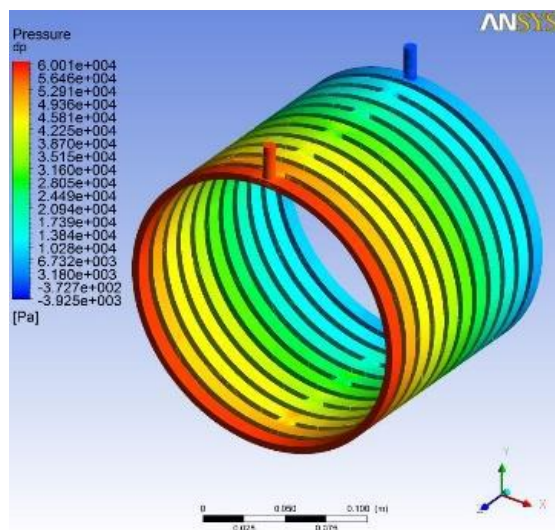


Obr. 8. Otevřený stroj s vlastním chlazením, převzato z [18]

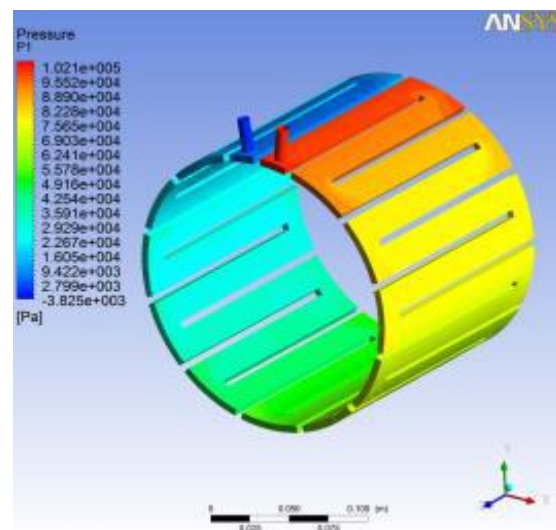


Obr. 9. Otevřený motor s cizí ventilací, převzato z [19]

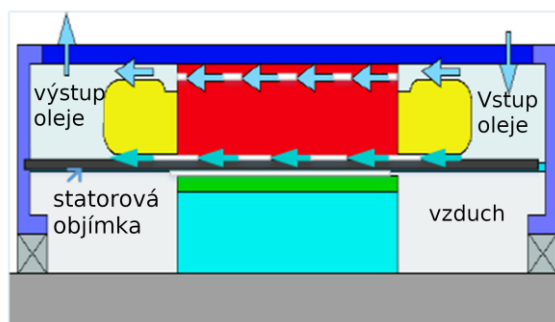
Nestačí-li k chlazení motoru nucené proudění vzduchu, pak se přechází na chlazení kapalinou. Jak je vidět z *Tabulka 1* maximální součinitel přestupu tepla kapaliny je o dva řády větší než maximální součinitel přestupu tepla vzduchu. Z toho plyne, že při stejné ploše jsme schopni odvést daleko větší ztráty. To vede na zmenšování stroje samotného, tedy zvětšování hustoty výkonu. Chlazení kapalinou je dnes doménou především automotivu, kde je potřeba relativně velký výkon uzavřít do co nejmenšího objemu. Jak bylo zmíněno výše, jako chladicí kapalina se používá voda s nemrznoucí směsí případně olej. Jednou z možností chlazení stroje vodou je chlazení přes těleso kostry. Ve formě lité kostry jsou předem připraveny chladicí kanály se vstupem a výstupem chladicí kapaliny. Tyto kanály mohou být po obvodu stroje umístěny s axiální osou rotace, případně meandrují podél axiální osy stroje. Podobným typem chlazení vodou je pak chlazení skrz statorový paket. Chladicí okruh v paketu stroje musí být konzulován s výpočtářem magnetického obvodu, tak aby nedošlo k výraznému zhoršení elektromagnetických vlastností stroje. Poslední možností je přímé chlazení rotoru. Vzhledem k velkým hydraulickým ztrátám se nepoužívá přímé chlazení rotoru skrz vzduchovou mezeru, ale je využit osový vývrt hřídele a odstředivé síly při rotaci. Osový vývrt je rozdělen na dvě části. Stacionární vstup chladicího média je ve vnitřní části hřídele. Výstup je pak po obvodu osového vývrtu kam se díky odstředivým silám vytlačuje kapalina.



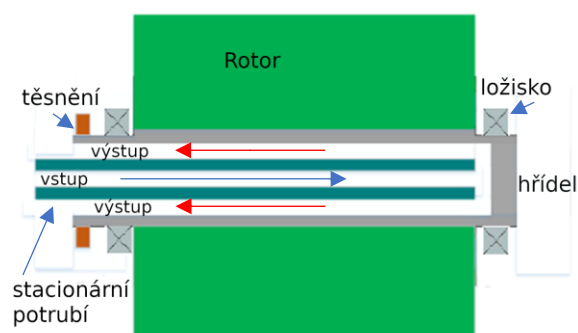
Obr. 10. Chladicí kanál s axiální osou rotace, převzato z [21]



Obr. 11. Chladicí kanál na statoru axiálně meandrující, převzato z [22]

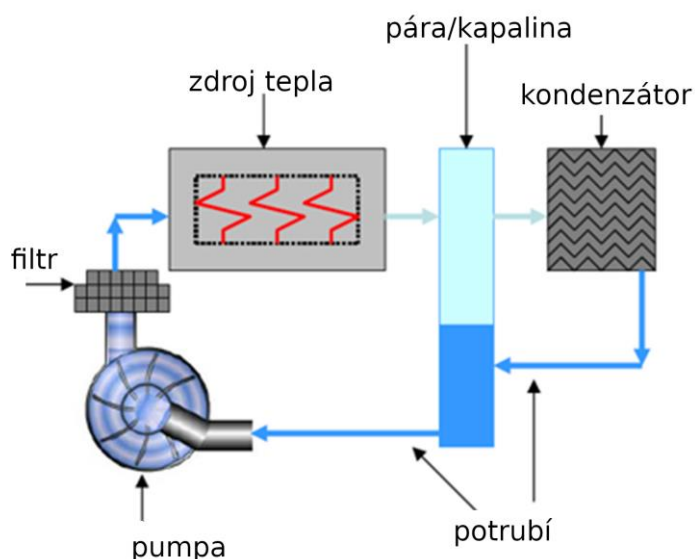


Obr. 12. Chlazení statoru olejem, převzato z [18]



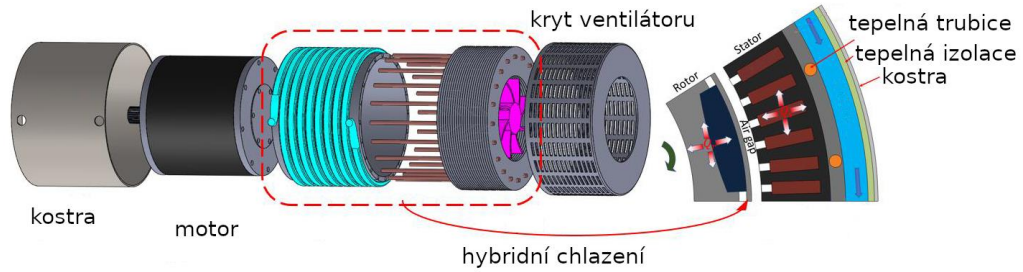
Obr. 13. Přímé chlazení rotoru, převzato z [18]

K chlazení lze využít fázovou přeměnu kapaliny v páru, vypařování. Tento jev lze použít k přímému chlazení čel, pomocí rozprašování chladicího média. Častěji se s tímto jevem můžeme setkat u tepelných trubice. Tepelná trubice je konstruována jako hermeticky uzavřený chladicí okruh, ve kterém je kapalina. Kapalina se vlivem přestupu tepla vypařuje a přestupuje do kondenzátoru, chladiče, ve kterém zkondenzuje zpět na kapalinu. Následně se pomocí pumpy nebo samovolně, z podstaty konstrukce, chladicí médium dostává zpět k ochlazované ploše a celý děj se opakuje. [18]



Obr. 14. Princip tepelné trubice, převzato z [18]

Jako hybridní typ chlazení můžeme označit kombinaci některých předešlých typů chlazení. Tato kombinace může vypadat například následovně.



Obr. 15. Hybridní chlazení, převzato z [20]

2 Výpočet parametrů simulovaného stroje

2.1 Hlavní parametry a představení stroje

P	35	kw
n	9000	ot/min
U_n	247,68	V
η_n	96,6	%
$\text{Cos}(\varphi_n)$	0,8	-
p	2	-
I_n	108,72	A
M_n	37,14	Nm
ΔP_{jn}	457,27	W
ΔP_{pmn}	365,72	W
ΔP_{FEn}	353,60	W
ΔP_{mn}	50	W

Tabulka 2. Jmenovité hodnoty stroje

Simulovaný stroj je určen k pohonu studentské formule, která je vyvíjena na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Provedení stroje je IP44, IM3001, IC00. Stroj se oproti běžným synchronním motorům liší v konstrukci statoru, který není uzavřen do kostry. Kostru tedy tvoří statorové plechy, které byly po obvodu vytvarovány do zaoblených žeber, pro zvětšení chladicího účinku vzduchu a ložiskové štíty z karbonu. Pro porovnání byla vytvořena druhá geometrie, ze které byla odstraněna některá zaoblení a po zhodnocení výsledků proudění byl do této geometrie doplněn deflektor, který má za úkol zlepšit proudění vzduchu ve špatně chlazené části motoru. Stator se skládá z celkem tří podobných tvarů plechů. Pro porovnání jednotlivých plechů byly do přílohy umístěny jednotlivé ilustrace bez kót. Statorové vinutí stroje je navrženo jako zubové. Stroj je proveden jako čtyřpólový s osmi permanentními magnety na hřídeli. Na straně NDE je umístěno otáčkové čidlo.

Ztráty synchronního stroje, které jsou použity v simulaci, vycházejí z výpočtu ztrát pro jmenovitý stav synchronního stroje, které mi byly poskytnuty katedrou KEV. Jmenovité hodnoty stroje jsou shrnuty v Tabulka 2. Všechny hodnoty ztrát počítají se sinusovým napájením, tedy není zohledněno napájení z měniče a vliv PWM. Po konzultaci s vedoucím práce byla upravena hodnota mechanických ztrát na nižší hodnotu. Důvodem snížení ztrát byla již zmíněná nevhodnost některých vztahů pro výpočet.

2.2 Zatěžovací cyklus stroje

Pro výpočet ztrát stroje při různých zatíženích je potřeba znát rychlost vozidla v daném úseku a jeho momentální výkon. Z nalezených dat v [11], byla odhadnuta průměrná rychlost ve 43 různě dlouhých úsecích. V těchto úsecích byl odhadnut průměrný výkon spalovacího motoru a následně vzata polovina jako výkon elektrického motoru. Daleko přesnější by bylo použít k výpočtu moment, ale tato data jsem neměl k dispozici. Pro přepočítání rychlosti na otáčky kola je potřeba znát průměr pneumatiky. V našem případě je průměr nové pneumatiky 297 mm. Příklad výpočtu pro $\varnothing v = 13\text{ m/s}$

$$n_k = \frac{\varnothing v}{D} \frac{60}{2\pi} = \frac{13}{0,297} \frac{60}{2\pi} = 836 \text{ ot/min} \quad (2.1)$$

Dále je nutné znát převodový poměr planetové převodovky, která zde byla použita. Ten činí 1:3. Otáčky samotného motoru n_m jsou pak dány výše zmíněným převodovým poměrem:

$$n_m = 3 * n_k = 3 * 836 = 2508 \text{ ot/min} \quad (2.2)$$

Pro další potřeby byly ze známé dráhy celého okruhu s_{skut} , 710 m, a vytisknutého plánu okruhu změřeny a dopočteny jednotlivé dráhy, po které bude v jednotlivých úsecích motor zatěžován dle zatěžovacího diagramu. Celková délka dráhy s , pomocí které byl změřen obvod vytisknutého okruhu je 730 mm. Délka prvního úseku, l , změřeného na plánu je 28 mm. Pomocí přímé úměry je dopočtena skutečná vzdálenost.

$$l_{skut} = l \frac{s_{skut}}{s} = 28 \frac{710}{730} \doteq 27,23\text{ m} \quad (2.3)$$

Z toho lze pak jednoduchým vztahem mezi dráhou, průměrnou rychlostí a časem dopočítat čas, po který je formule zatěžována:

$$t = \frac{l}{\varnothing v} = \frac{27,23}{13} = 2,095\text{ s} \quad (2.4)$$

Obdobným způsobem jsem postupoval u zbylých úsecích, které jsou uvedeny v příloze B

Výpočet mechanických ztrát byl pak brán v poměru jmenovitých otáček a aktuálních otáček. Příklad výpočtu mechanických ztrát pro první úsek:

$$\Delta P_m = \Delta P_{mn} \frac{n_m}{n_n} = 50 \frac{2508}{9000} = 14W \quad (2.5)$$

Ztráty v železe nebyly přepočítávány a uvažoval jsem je jako konstantní. Pro přesnější výpočet ztrát v železe by byla nutná analýza magnetického pole pro každý ze 43 úseků. Tyto ztráty mají po uvažování napájení z měniče následující hodnotu:

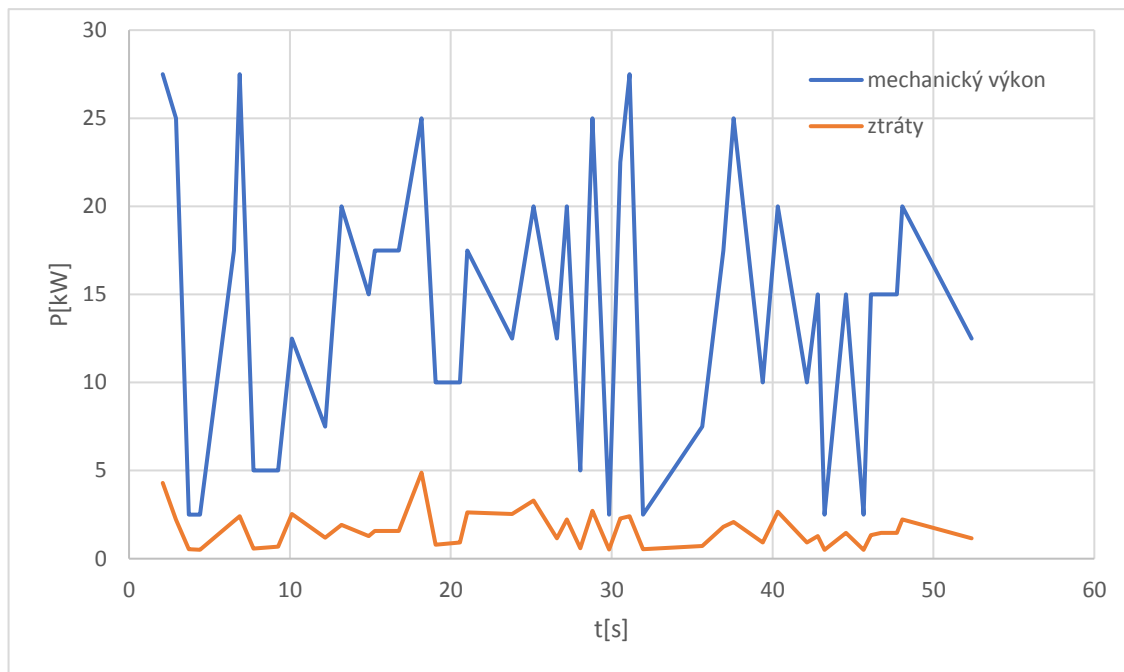
$$\Delta P_{FE} = 1,2P_{FE_n} = 1,2 * 353,6 = 424,32W \quad (2.6)$$

Ztráty v permanentních magnetech byly podobně jako mechanické ztráty přepočteny v poměru jmenovitých otáček a aktuálních otáček. Jak bylo zmíněno výše, ztráty v permanentních magnetech rostou s kvadrátem frekvence, právě proto byl i poměr otáček umocněn.

$$\Delta P_{PM} = 1,2P_{PM_n} \left(\frac{n_m}{n_n}\right)^2 = 1,2 * 438 * \left(\frac{2508}{9000}\right)^2 = 35W \quad (2.7)$$

K výpočtu ztrát mi byl poskytnut program od firmy Škoda Electric a.s., bohužel v programu nejsou zahrnuty ztráty v permanentních magnetech a po bližším porozumění výpočtu a konzultaci s vedoucím práce byla nalezena chyba ve výpočtu mechanických ztrát, která byla přejata z literatury [2]. Ztráty v železe jsou zde počítány taktéž pouze odhadem, jako 1% z jmenovitého výkonu. Tento odhad přibližně odpovídá ztrátám, které jsou spočteny v návrhu stroje. Velikost ztrát ve vinutí je založena na metodě Maximum Torque per Ampere. Vstupními parametry programu jsou počet fází, počet pólů, napěťová konstanta stroje, odpor vinutí při 20 °C, podélná a příčná indukčnost, pracovní teplota stroje, pracovní teplota permanentních magnetů, teplotní závislost remanentní indukce, maximální hodnota proudu, maximální hodnota napětí, výkon a otáčky.

Jak bylo zmíněno v předchozích kapitolách, některé ztráty jsou závislé tvaru napájecího napětí. Právě proto byly Jouleovy ztráty, ztráty v železe a ztráty v permanentních magnetech zvýšeny o 20% , jak je vidět z předešlých vztahů.



Obr. 16. Zatěžovací cyklus stroje pro jedno kolo, přesné hodnoty uvedeny v příloze C

2.2.1 Přepočítání ztrát na objemové ztráty

Modul Mechanical programu Ansys pracuje pouze s objemovými ztrátami, právě proto bylo třeba zjistit objem jednotlivých těles a vypočtené ztráty přepočítat na objemové ztráty. Hodnoty jednotlivých objemových ztrát pro jmenovitý stav jsou uvedeny v *Tabulka 3*. Všechny uvedené tabulky v příloze zobrazují průběh zatížení motoru pro jedno kolo. Doba zatěžování motoru v simulaci je deset stejných kol.

Část stroje	Vinutí	Permanentní magnet	Hřídel	Stator
$V[m^3]$	0,001438	0,000018358	0,00057436	0,0011384
$\Delta P[W]$	457,27	365,72	50	353,6
$\Delta P_V [W/m^3]$	317990,2643	19921560,08	87053,41598	310611,3844

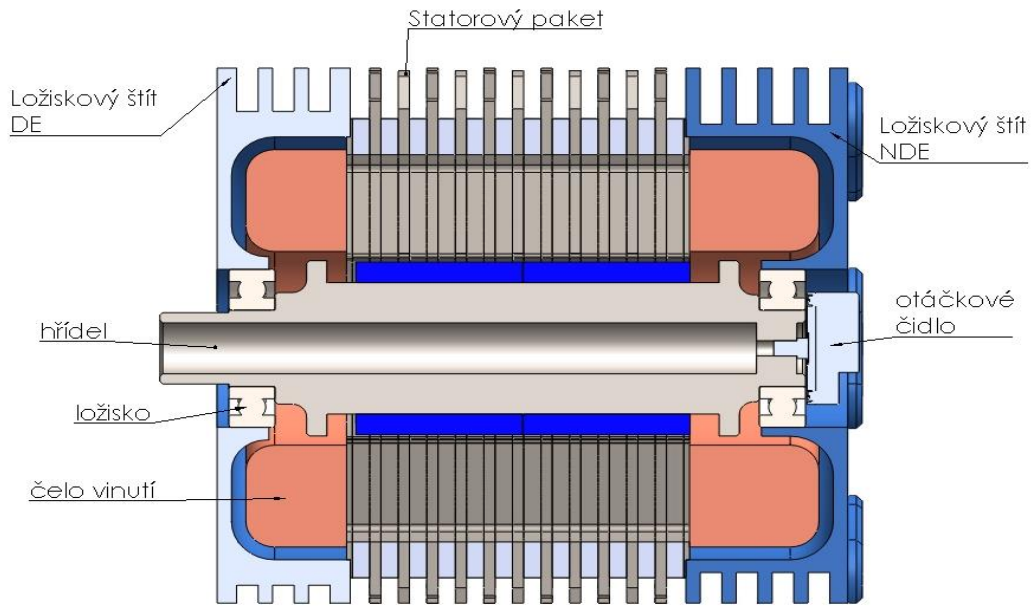
Tabulka 3. Přepočet ztrát pro jmenovitý bod, hodnoty pro cyklus v příloze D

3 Výsledky ANSYS

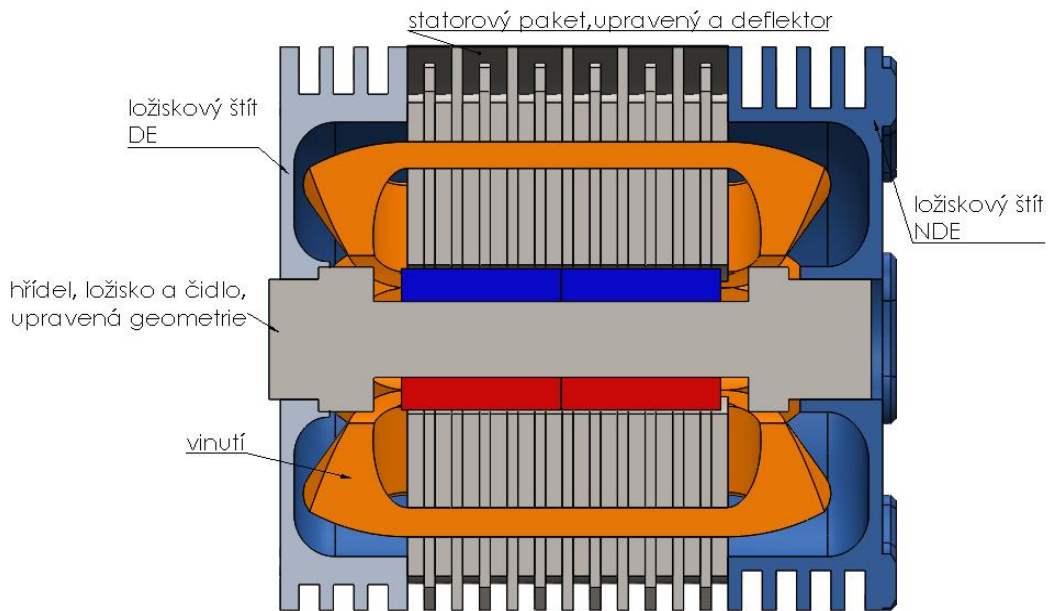
Tato kapitola se bude zabývat geometrií motoru a výsledky jednotlivých simulací.

3.1 Model synchronního stroje

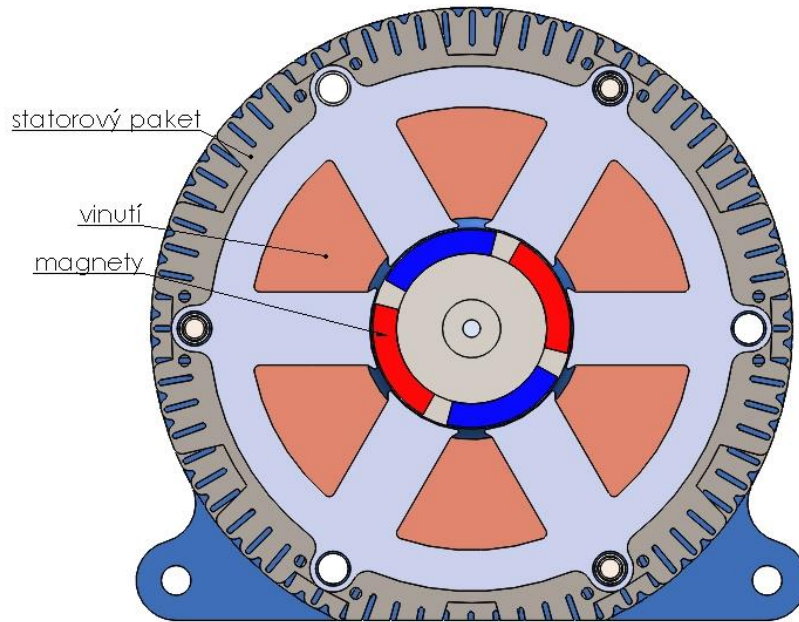
Geometrie motoru mi byla poskytnuta katedrou elektromechaniky a výkonové elektroniky. Vzhledem ke složitosti geometrie, bylo potřeba přistoupit k několika úpravám. Tyto úpravy nemají významný vliv na konečné výsledky. Dále bylo po několika simulacích proudění zjištěno, že by bylo vhodné původní geometrii doplnit o deflektor proudícího vzduchu na straně motoru, která je v závětrí při směru jízdy vpřed. Následující obrázky zobrazují model v podélném a příčném řezu s původní geometrií bez úprav a upravenou geometrií s minimálním zaoblením výběžků na kostře. Původní záměr bylo importovat výsledky z CFX do teplotní analýzy. Vzhledem k problémům s geometrií při importu výsledků toto nakonec nebylo realizováno.



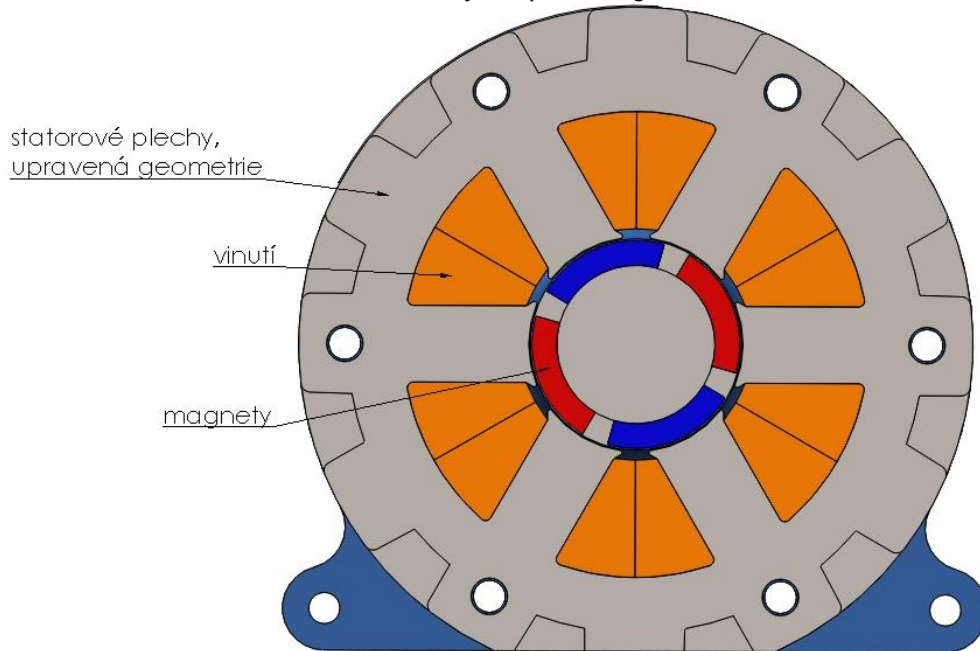
Obr. 17. Podélný řez původní geometrií



Obr. 18. Podélný řez upravenou geometrií



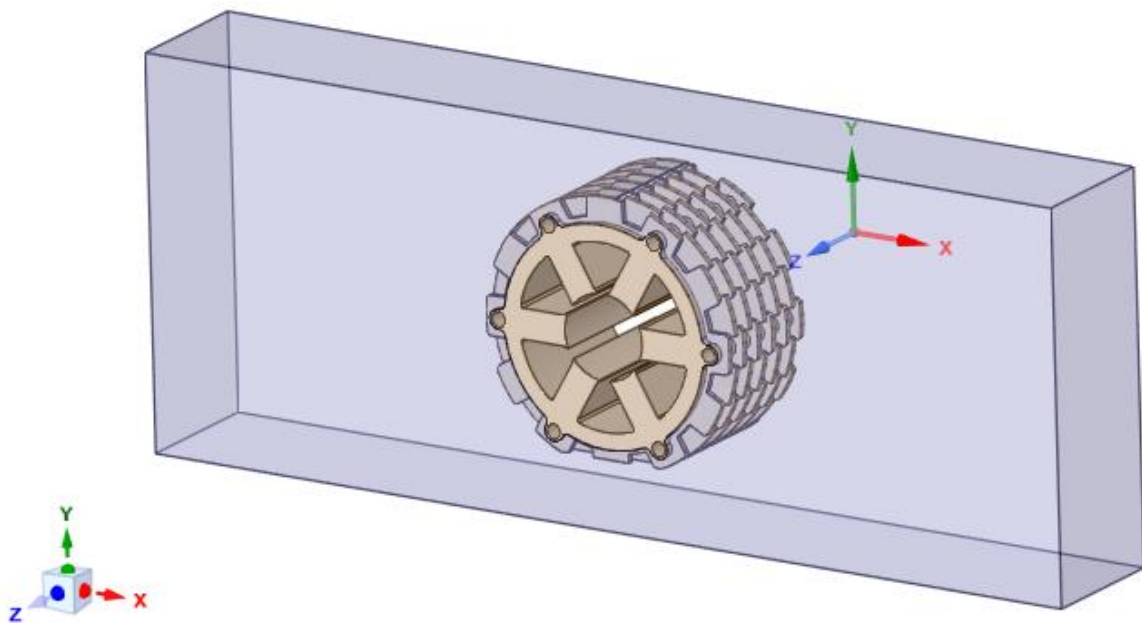
Obr. 19. Příčný řez původní geometrií



Obr. 20. Příčný řez upravené geometrie

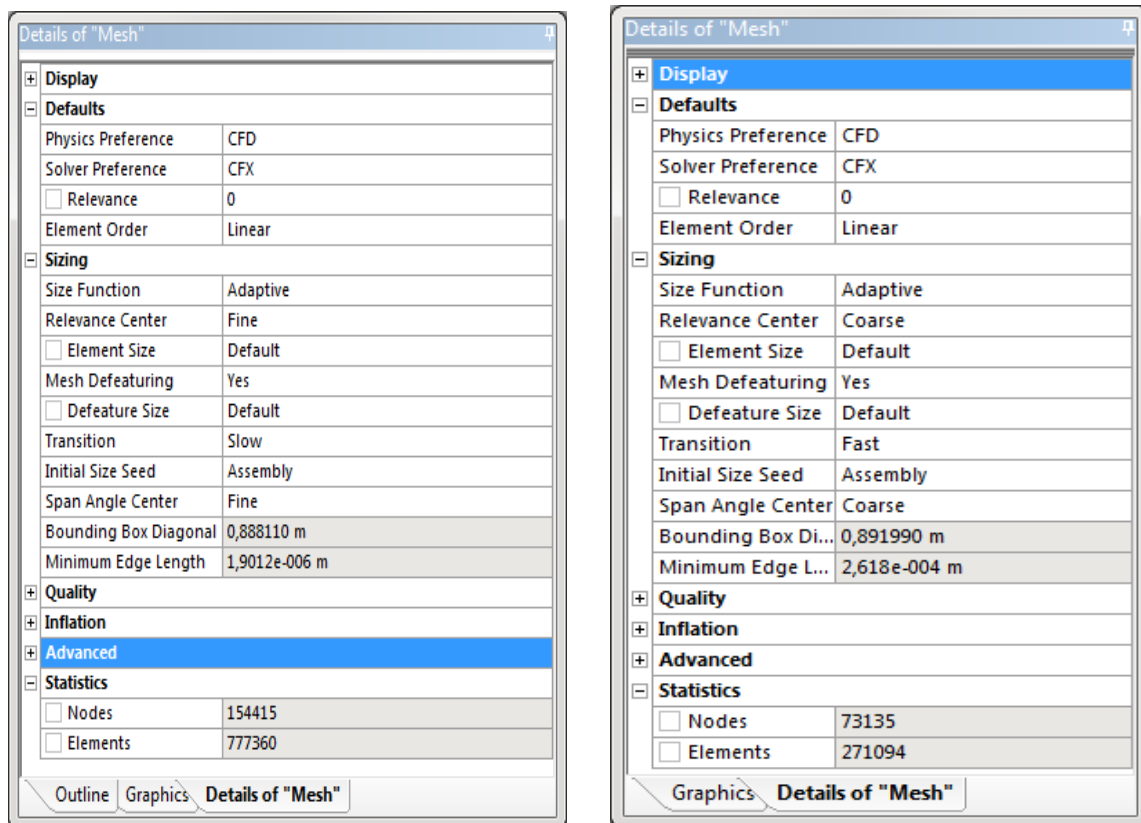
3.2 Simulace chlazení v CFX

Do simulace byly postupně importovány jednotlivé geometrie. Pro zjednodušení byl však ofukován pouze stator, který zároveň tvoří kostru motoru. Geometrie statoru byla doplněna o okolní prostředí s následujícími rozměry. Délka 820 mm, výška 320 mm, hloubka odpovídá šířce statorového paketu. Délka musela být upravena z původních 300 mm z důvodu vlivu okrajových podmínek na konečné výsledky. Při příliš krátkém vzduchovém kanálu se za motorem nevytvoří zpětný proud vzduchu, který částečně ofukuje zadní plochu motoru a tím ji chladí. Z tohoto prostoru byl vyjmut objem statoru a odebrán vzduch ze vzduchové mezery. Následující geometrie zobrazuje zjednodušený model. U druhé geometrie jsem postupoval obdobně.



Obr. 21. Geometrie použitá při simulaci proudění

Dalším nastavením v modulu CFX je nastavení sítě, ve které se bude model počítat. Zde byly vypnuty kontakty mezi plochami, které následně způsobovali neúměrně dlouhé čekání na spuštění samotného nastavení okrajových podmínek. K velkému překvapení však nebylo nutné opět spouštět mesh, která tak zůstala nezměněná. Kontakt byl následně doplněn v následujícím nastavení. Parametry nastavení síťování jsou shrnuty na následujícím obrázku.



Obr. 22. Nastavení sítě pro upravenou geometrii Obr. 23. Nastavení sítě pro původní geometrii

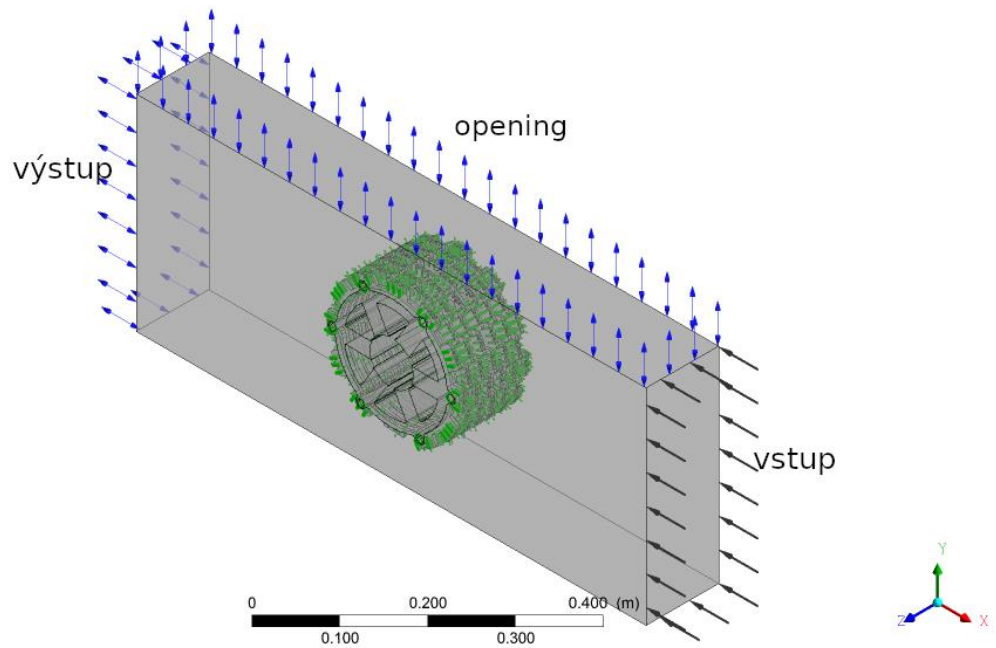
Posledním nastavením před konečnou simulací proudění bylo nastavení okrajových podmínek jednotlivých stěn vzduchu, vložení již zmíněného kontaktu mezi vzduchem a státorem a vložení objemových ztrát do statoru, bez kterých by nebylo možné dopočítat koeficient přestupu tepla, označovaný jako „*wall heat transfer coefficient*”. Nejprve byl rozdělen objekt na dvě tělesa, okolí, které představuje vzduch a pevné části představující stator.

Doména	Okolí	Pevné části
Typ	Fluid	Solid
Materiál	Vzduch	Ocel
Tlak	1atm	-
Model	Thermal Energy	Thermal Energy
Řešič turbulencí	k-epsilon	-
Intenzita turbulencí	5%	-
Počáteční teplota	40°C	40°C

Tabulka 4. Nastavení vlastností domén v CFX

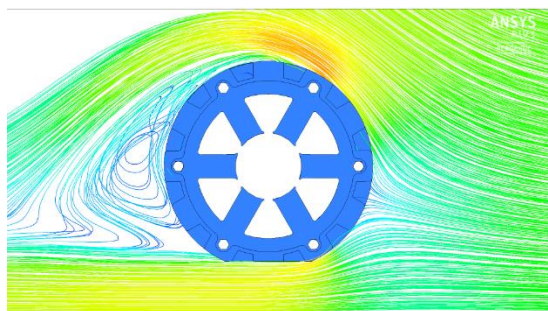
Vstup vzduchu je na jedné ze stran, která je rovnoběžná s rovinou YZ, tento vstup je v obrázku vyobrazen jako černé šipky. U modelu s reflektorem je vstup vzduchu umístěn tak, aby proudící vzduch vstupoval do mezery mezi statorový paket a reflektor. Zde byla taktéž nastavena teplota 40 °C a definován vstupní parametr speed, pomocí kterého se bude parametricky měnit rychlost proudění vzduchu. Další okrajovou podmínkou je podmínka opening. Tato podmínka nám říká, že okolní prostor je otevřený. V podmínce je nutné definovat tlak, který je zde 1atm. Okrajová podmínka je zobrazena jako modré šipky na *Obr. 24*. Poslední podmínkou v tomto tělese je podmínka wall. Podmínka nám říká, že skrz tuto stěnu nebude procházet proudění, zároveň je zde však nastaven adiabatický přestup tepla. Podmínka wall je umístěna na zbylých stěnách kvádrů, který uzavírá vzduch. V pevném tělese je vložena subdoména, ve které vzniká objemový tepelný výkon od velikosti 1MW/m³. Tato hodnota nemá žádnou souvislost se ztrátami v železe. Do materiálu byla vložena pouze jako zatěžující, tak aby byl řešič schopný vypočítat koeficient přestupu tepla. Mezi obě tělesa je vložen interface, který zajišťuje přestup tepla ze statoru do vzduchu. Z toho je pak počítán koeficient přestupu tepla. Typ podmínky interface je fluid solid s povoleným přestupem tepla. Nastavení řešiče bylo ponecháno v původním nastavení.

Z časových důvodů došlo k jediné změně, kterou je snížení počtu iterací na 10 z původních 100. Pro přesnější výpočet je vhodné tento počet navýšit.

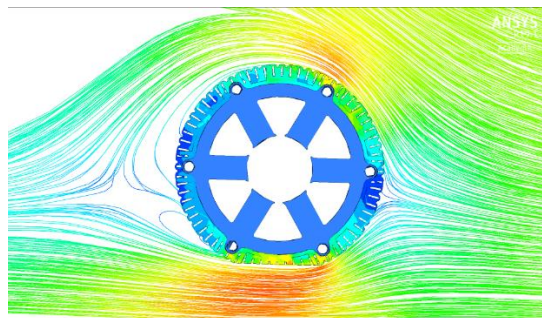


Obr. 24. Nastavení jednotlivých ploch

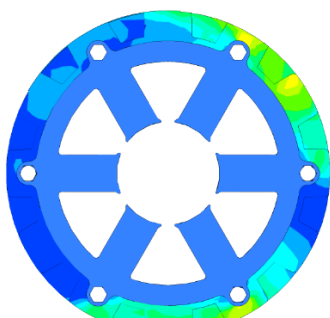
Po nastavení všech předchozích parametrů byla spuštěna simulace pro jednu rychlost. Ve výsledcích pro první rychlost byly nastaveny tři výstupní parametry, průměrný koeficient přestupu tepla značený av_{HTC} , minimální koeficient přestupu tepla min_{HTC} a maximální koeficient přestupu tepla max_{HTC} . Následně byly dopsány i ostatní rychlosti a simulace přepočítána i pro ně. Původní záměr byl simulovat proudění pro rychlosti od 5m/s do 50m/s. Od tohoto bylo nakonec upuštěno. V cyklu, pro který bylo počítáno zatížení se formule pohybuje rychlostí v rozmezí od 0 km/h do přibližně 70 km/h, tedy téměř 20 m/s. Podle původní teze by tedy proběhlo příliš mnoho simulací, které by nakonec nebyly využity. Z cyklu je zřejmé, že maximální průměrná rychlost na trati je 18,5 m/s. Rychlost pohybu vozidla a rychlost chladícího vzduchu, který dopadá na motor jsme uvažovali stejný. Toto nemusí být zcela pravda, vzhledem k umístění motoru bude záležet na zakrytí motoru okolními komponenty. Pro přesnější výsledky by bylo tedy nutné udělat komplexnější analýzu proudění vzduchu kolem celé formule. Jak je vidět z *Obr. 25. Proudění kolem statoru s upravenou geometrií* a *Obr. 26. Proudění kolem statoru s původní geometrií* při stejných vstupních rychlostech proudění vzduchu 12,5m/s přidání reflektoru zlepšilo proudění. Maximální hodnota koeficientu přestupu tepla je 205,8W/m²K pro upravenou geometrii, původní geometrie má při stejných vstupních parametrech 177,8 W/m²K. Upravená geometrie má však horší průměrný koeficient přestupu tepla. Na *Obr. 29* a *Obr. 30* je omezená stupnice na průměrnou hodnotu koeficientu přestupu tepla. Z těchto obrázků je pak vidno, v jakých místech se bude motor chladit lépe oproti průměru a která místa se mohou zahřívat více.



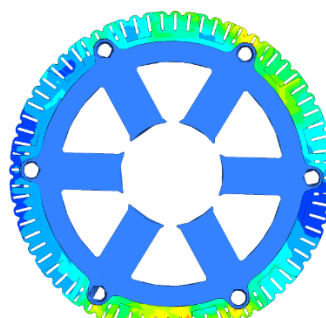
Obr. 25. Proudění kolem statoru s upravenou geometrií



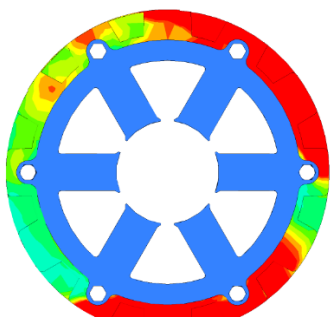
Obr. 26. Proudění kolem statoru s původní geometrií



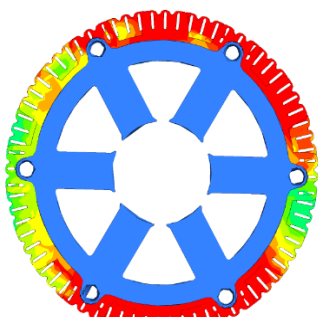
Obr. 27. Rozložení koeficientu přestupu tepla na upravené geometrii



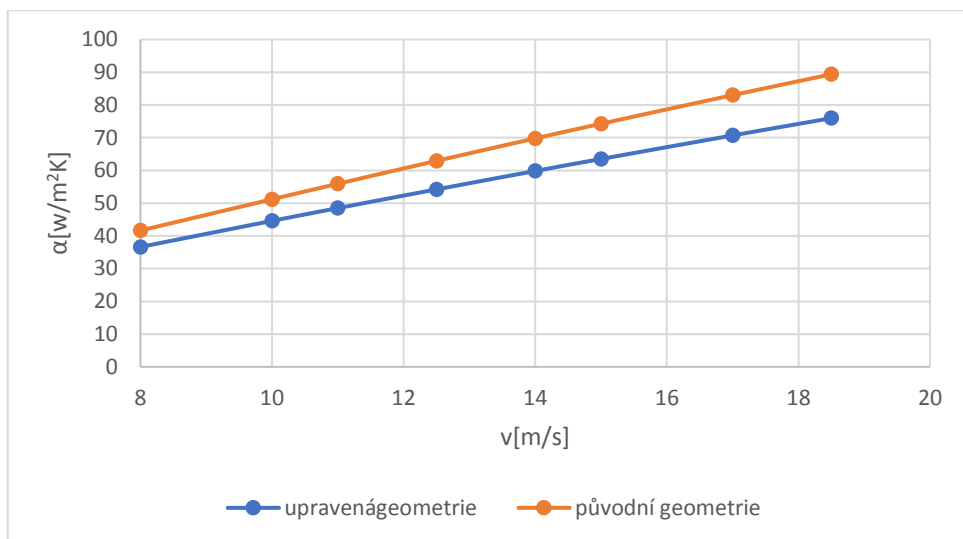
Obr. 28. Rozložení koeficientu přestupu tepla na původní geometrii



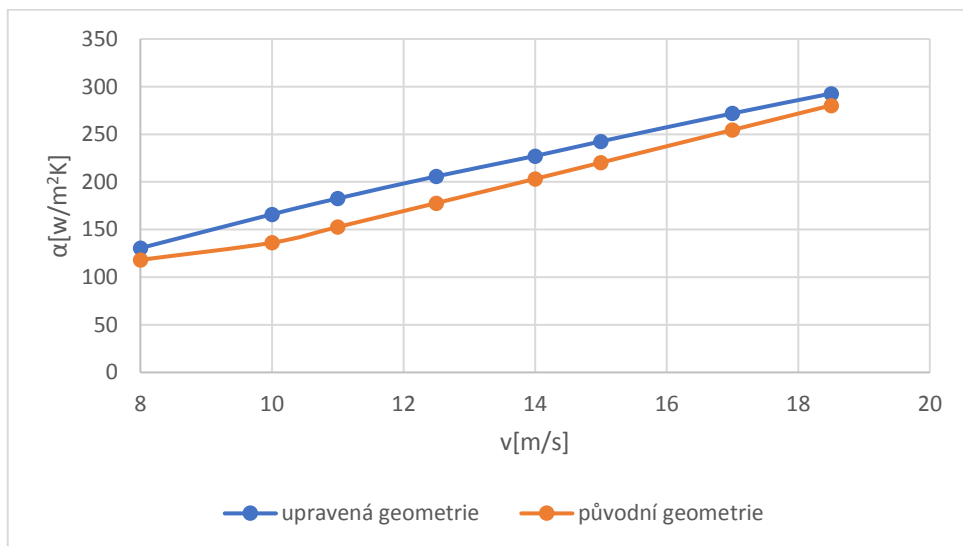
Obr. 29. Rozložení koeficientu přestupu tepla na upravené geometrii, upravená stupnice



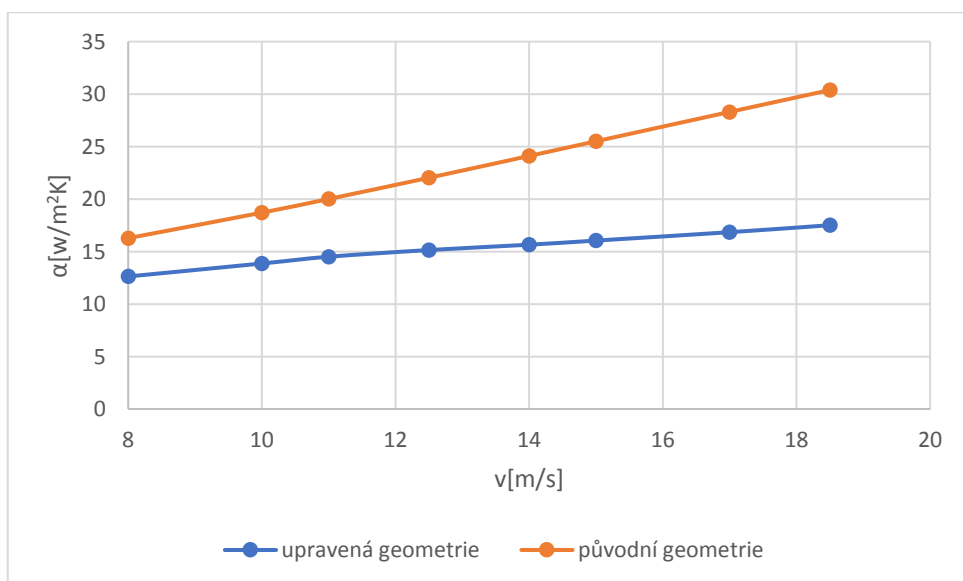
Obr. 30. Rozložení koeficientu tepla na původní geometrii, upravená stupnice



Obr. 31. Závislost průměrného koeficientu přestupu tepla na rychlosti



Obr. 32. Závislost maximálního koeficientu přestupu tepla na rychlosti

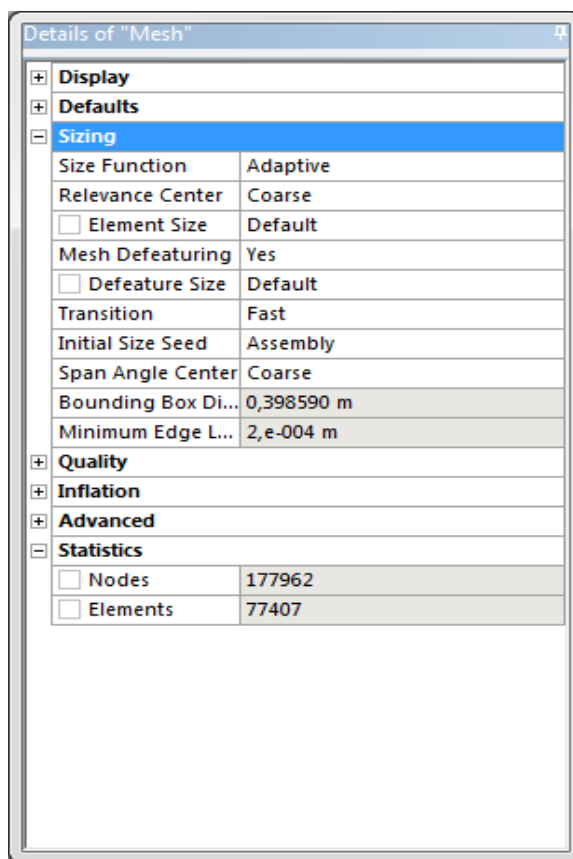


Obr. 33. Závislost minimálního koeficientu přestupu tepla na rychlosti

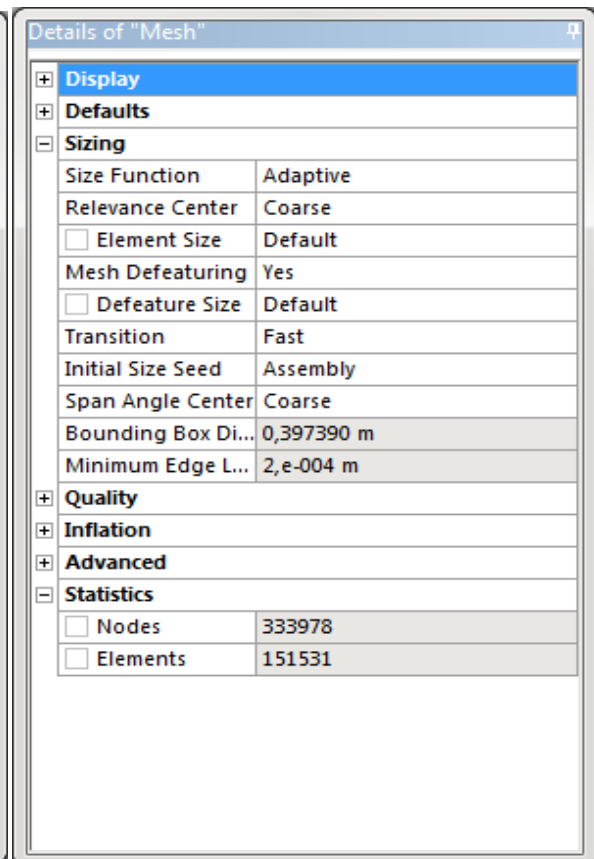
3.3 Simulace oteplení

Oteplení bylo simulováno v modulu Mechanical. Prvotní nastavení modelu bylo provedeno v Steady-State Thermal, ze které lze vyčíst ustálenou teplotu jednotlivých míst v geometrii, a tedy i správnost nastavení modelu. Následně toto nastavení bylo přeneseno do Transient Thermal, do které byly doplněny jednotlivé pracovní body motoru během jízdy.

Geometrie statoru ze simulace proudění byla doplněna o ložiskové štíty, magnety, hřídel, vinutí a vzduch uvnitř motoru. Naopak bylo odebráno okolní prostředí. Stator byl rozdělen na dvě části, a to na část ve které vznikají ztráty, nazvaná v modelu stator in, a na část která ztráty odvádí, stator out. Stejně jako u modelu proudění následovalo nastavení sítě.



Obr. 34. Nastavení sítě pro upravenou geometrii



Obr. 35. Nastavení sítě pro původní geometrii

Dalším důležitým nastavením byla volba jednotlivých materiálů. V následujících tabulkách je seznam jednotlivých materiálů a jejich vlastností spolu s jejich použitím v modelu. Některé parametry musely být dohledány z externích zdrojů, protože knihovna materiálů programu Ansys neobsahuje například Carbon a materiál magnetů NdFeB. Jiné parametry musely být dopočítány.

Prvním dopočteným parametrem byly složky tepelné vodivosti mědi. Složka z zůstala stejná tedy 381W/mK. Důvodem je změna souřadného systému na cylindrický a v tomto systému je složka z rovnoběžná se směrem, kterým teče proud, tedy neprotíná izolaci vodiče. Složky x a y byly dopočítány dle literatury [8].

Vodiče jsem uvažoval nepřesazené a mohl jsem tedy postupovat stejně jako je tomu v příkladu 58. ve výše uvedené literatuře. Průměr námi použitého holého vodiče je 1,25mm a průměr izolovaného vodiče je 1,32mm.

Poměr neizolovaného a izolovaného vodiče:

$$\frac{D}{D_i} = \frac{1,25}{1,32} = 0,95 \quad (3.1)$$

Následně poměr tepelných vodivostí je dán nomogramem, který je uveden v [8]

$$\frac{\lambda}{\lambda_i} = 5,25.$$

Tepelná vodivost izolace byla zvolena 0,2W/mK.

Celková tepelná vodivost:

$$\lambda = 5,25\lambda_i = 5,25 * 0,2 \doteq 1,05 \text{ W/mK.} \quad (3.2)$$

Vzduch				
Vzduch mezi hřídelí, statorem a ložiskovými štíty				
ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]			C_p [J/kgK]
1,1614	0,026			1007
Carbon				
Ložiskové štíty				
ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]			C_p [J/kgK]
1400	1,6			1000
Měď				
Statorové vinutí				
ρ [kg/m ³]	λ_x [W/mK]	λ_y [W/mK]	λ_z [W/mK]	C_p [J/kgK]
8933	1,05	1,05	381	385

Magnety NdFeB				
Magnety na rotoru				
ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]			C_p [J/kgK]
7500	7,6			502
Elektrotechnická ocel 1010				
Stator				
ρ [kg/m ³]	λ_x [W/mK]	λ_y [W/mK]	λ_z [W/mK]	C_p [J/kgK]
7872	45	45	1	448
Ocel				
Rotor				
ρ [kg/m ³]	λ [W/mK]			C_p [J/kgK]
7850	65			434

Loctite 315	Izolace
Lepidlo mezi magnety a hřídelí	Izolace vodičů
λ [W/mK]	
0,808	0,2

Tabulka 5. Materiálové vlastnosti [8] [12] [13] [14] [15] [16][25]

Další důležité parametry pro výpočet tepelného modelu je součinitel přestupu tepla na rozhraní dvou materiálů. Tyto součinitele se nastavují v kontaktech, kde lze nastavit i typ kontaktu. Kontakty na rozhraní dvou materiálů si vytvoří program Ansys sám, má však předem nastavené ideální spojení dvou materiálů, a tedy i ideální přestup tepla. Prvním rozhraním je přestup tepla z hřídele do vzduchové mezery. Pro jmenovité otáčky platí následující výpočet.

Do následujícího vztahu se dosadí poloviční obvodová rychlost, pro kterou platí následující vztah:

$$v = \frac{\pi D n}{120} = \pi * 0,0688 * \frac{9000}{120} = 16,21 \text{ m/s} \quad (3.3)$$

Výpočet součinitele přestupu tepla je dán vztahem, velikost vzduchové mezery je 1,1mm:

$$\alpha_{th} = 3,6 \sqrt[5]{v^4 / 2\delta} = 3,6 \sqrt[5]{\frac{16,21^4}{2 * 0,0011}} = 113,669 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.4)$$

Výsledný součinitel tepla se nakonec násobí pomocným činitelem, který nabývá hodnot 1,5-2. Pomocný činitel byl zvolen 2. Výsledný součinitel přestupu tepla

$$\alpha = 2\alpha_{th} = 2 * 113,669 = 227,338 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.5)$$

Další součinitel přestupu na rozhraní je mezi magnetem a vzduchovou mezerou, který jsem uvažoval stejný jako je tomu v případě rotoru. Kontakty mezi vzduchem a ložiskovými štíty jsem ponechal kontrolované programem. Stejně tak tomu bylo u vzduchu, který se dotýká kostry uvnitř motoru. Přestup mezi čelem a vzduchem jsem zvolil $100 \text{ W/m}^2\text{K}$, dle literatury [8], která udává rozmezí $25\text{-}180 \text{ W/m}^2\text{K}$ pro malé a střední stroje. Součinitel přestupu tepla mezi magnety a hřídelí byl dopočítán z rovnosti vztahů:

$$\frac{1}{\alpha S} = \frac{l}{\lambda S} \quad (3.6)$$

Při rovnosti ploch a následné úpravě dostáváme vztah pro součinitel přestupu tepla. Z datasheetu [16] je měrná tepelná vodivost $0,808 \text{ W/mK}$. Tloušťka vrstvy lepidla je prakticky neměřitelná. Pro výpočet jsem uvažoval tloušťku vrstvy $10 \mu\text{m}$:

$$\alpha = \frac{\lambda}{l} = \frac{0,808}{10^{-6}} = 80800 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (3.7)$$

Rozhraní	$\alpha[\text{W/m}^2\text{K}]$
Hřídel-ložiskové štíty	∞
Magnet-Magnet	∞
Stator-ložiskové štíty	6000
Stator in-Stator out	∞

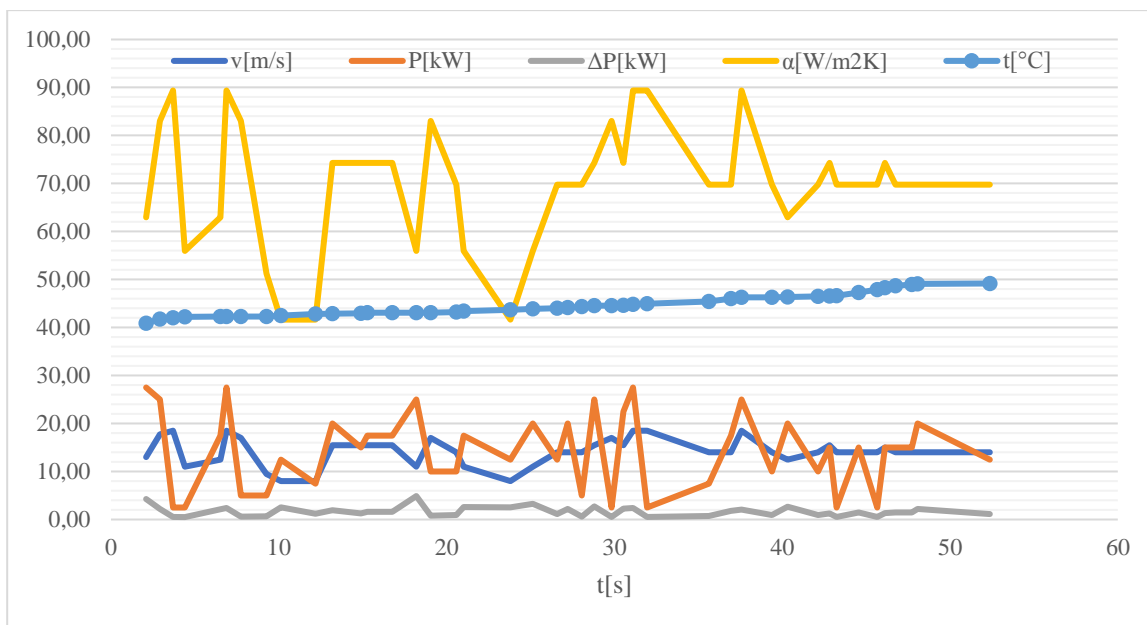
Tabulka 6. Nastavení kontaktů

Na rozhraní mezi hřídelí a ložiskovými štíty nebyl tento parametr počítán V tomto místě by se musel počítat přestup mezi hřídelí, vnitřním ložiskovým kroužkem, segmentem ložiska, mazivem ložiska, vnějším kroužkem ložiska a ložiskovým štítem. Přestup tepla mezi státorem a ložiskovými štíty záleží na síle stažení ložiskových štítů a statorového paketu. Pohybuje se v rozmezí $2500\text{-}6000 \text{ W/m}^2\text{K}$, tyto hodnoty mi byly sděleny vedoucím práce.

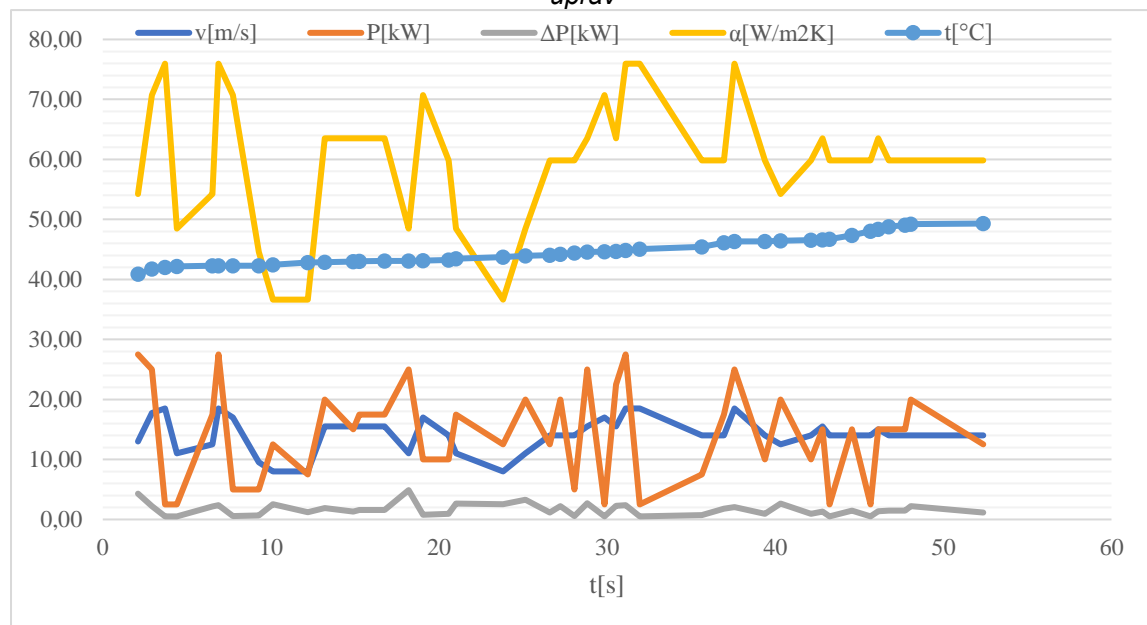
Posledním dopočteným součinitelem přestupu tepla je přestup mezi vinutím a statorovým paketem. Tepelná vodivost vyložení drážky byla zvolena $0,3 \text{ W/mK}$ a tloušťka vyložení drážky $0,3\text{mm}$. Z výše uvedeného vztahu vyplývá, že součinitel přestupu tepla je $1000 \text{ W/m}^2\text{K}$. Posledním kontaktem, který vznikl při tvorbě tělesa je kontakt mezi vnitřní a vnější částí statoru. Tato část se v reálném stroji nevyskytuje a kontakt byl zvolen jako nerozdělený, tedy s nekonečně velkou tepelnou vodivostí.

Posledním krokem před spuštěním samotného výpočtu je nastavení ztrát v jednotlivých částech stroje a nastavení konvekce a počet kroků pro jednotlivé časové úseky. Dle výše uvedené tabulky byly mechanické ztráty umístěny na hřídel, ztráty vířivými proudy v magnetech do jednotlivých těles magnetů, ztráty v železe do vnitřní části statorového paketu a ztráty v mědi do vinutí. Koeficient přestupu tepla, který definuje konvekci jednotlivých míst, byl umístěn na část hřídele, která ční ze stroje, na povrch obou ložiskových štítů, které jsou v kontaktu s okolním vzduchem a na vnější část statoru. Koeficienty přestupu tepla pro různé rychlosti byly nastaveny dle *Obr. 31. Závislost průměrného koeficientu přestupu tepla na rychlosti*.

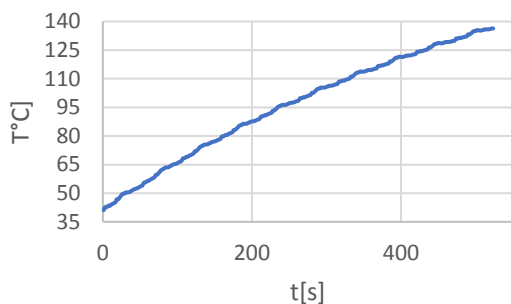
Počet substepů pro každý časový úsek byl nastaven na 2. Stejně tak byl nastaven i počet iterací. Pro detailnější průběh simulace by bylo vhodné zvolit větší počet kroků, což by ale zapříčinilo nárůst dat.



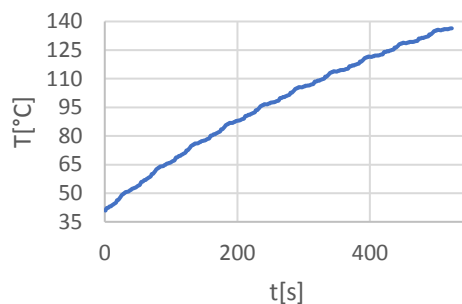
Obr. 36. Průběhy rychlosti, výkonu, ztrát, koeficientu přestupu tepla a teploty pro geometrii bez úprav



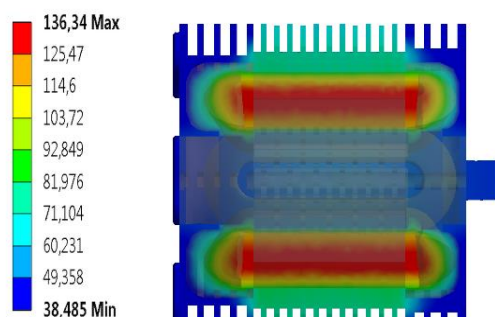
Obr. 37. Průběhy rychlosti, výkonu, ztrát, koeficientu přestupu tepla a teploty pro upravenou geometrii



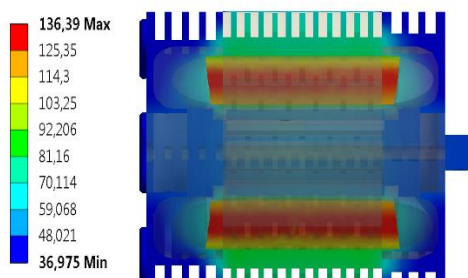
Obr 38. Průběh teploty během jednoho cyklu na původní geometrii



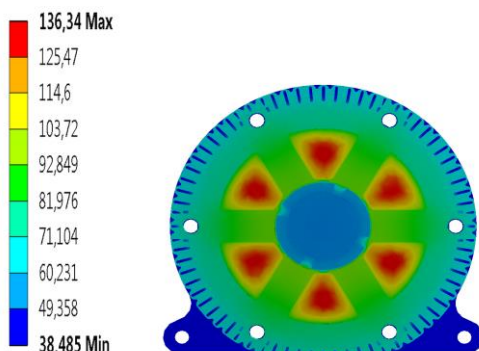
Obr 39. Průběh teploty během jednoho cyklu na upravené geometrii



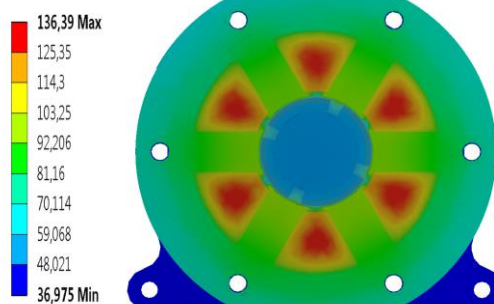
Obr 40. Rozložení teploty- podélný řez původní geometrií



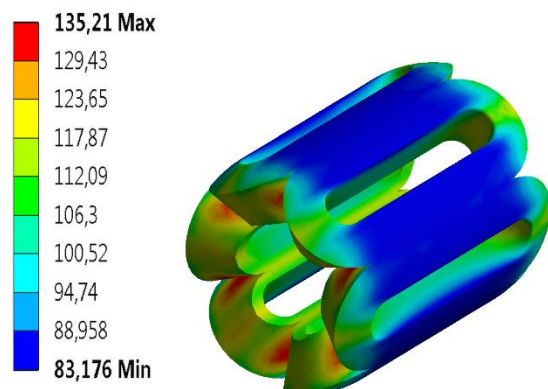
Obr 41. Rozložení teploty- podélný řez upravenou geometrií



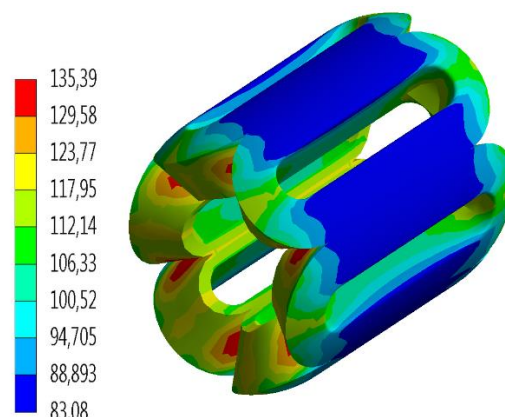
Obr. 42. Rozložení teploty – příčný řez původní geometrií



Obr. 43. Rozložení teploty – příčný řez upravenou geometrií



Obr. 44. Rozložení teploty – vinutí původní geometrie



Obr. 45. Rozložení teploty – vinutí upravené geometrie

Závěr

Z *Obr 38* a *Obr 39* není na první pohled patrné, u které geometrie vyšla nižší teplota. Následně z *Obr 40* a *Obr 41* je vidět, že se obě dvě teploty lišily jen o $0,05^{\circ}\text{C}$. Maximální teplota stroje pro horší variantu je $136,39^{\circ}\text{C}$. Vzhledem k tomu, že u MKP mohou nastat i několikaprocentní chyby, v závislosti na počtu iterací, nelze z tohoto jednoznačně určit, která geometrie bude mít reálně nižší teplotu. V neprospěch obou navíc hraje i to, že nebylo simulováno znečištění jednotlivých ploch, případně zneprůchodnění některého z ventilačních kanálů.

Z rozložení teplot ve vinutí, *Obr. 44* a *Obr. 45*, je vidět, že maximální teplota vinutí vyšla u upravené geometrie přibližně o $0,1^{\circ}\text{C}$ horší. Izolační systém, který je navržen v třídě F, do 155°C , by tyto teploty měl vydržet. Maximální teplota vinutí pro horší případ vychází $135,39^{\circ}\text{C}$. Do maximální povolené teploty je tedy rezerva necelých 20°C . Tuto rezervu může spotřebovat nepřesnost simulace, kdy byl využit pouze průměrný koeficient přestupu tepla a některá místa modelu se tedy reálně mohou zahřívat o něco více.

Další zajímavou teplotou je teplota magnetů, která se pohybuje v rozmezí od 51°C do $55,7^{\circ}\text{C}$. Při této teplotě ještě u magnetů nedochází k výrazné demagnetizaci. Vzhledem k tomu, že jsem při výpočtu ztrát počítal s oteplením magnetů 130°C , budou Jouleovy ztráty nižší. To je způsobeno tím, že magnety dodají do stroje potřebnou energii, kterou by musel stroj nahrazovat zvýšeným proudem do statorového vinutí. Naopak ztráty v permanentních magnetech, vlivem vyšší indukce, nepatrně vzrostou a tím i jejich oteplení.

Pro detailnější popis oteplení stroje během cyklu je na přenosném médiu nahrána animace oteplení. Vzhledem k podobným průběhům oteplení stroje, byla na přenosné médium nahrána pouze animace s horšími výsledky.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] KOPYLOV, I.P.,KOL.: *Stavba elektrických strojů..* Praha, STNL/MIR,1988.
- [2] PYRHÖNEN J. JOKINEN T. HRABOVCOVA V. *Design of Rotating Electrical Machines*, . JOHN WILEY & SONS, LTD 2008
- [3] PETROV, Georgij N. *Elektrické stroje 2: asynchronní stroje - synchronní stroje.* Vyd. 1. Praha: Academia, 1982. 728 s.
- [4] BARTOŠ, Václav a SKALA, Bohumil. *Měření na elektrických strojích.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. 109 s. ISBN 80-7082-896-X.
- [5] BARTOŠ, Václav. *Teorie elektrických strojů.* 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. 230 s. ISBN 80-7043-509-7.
- [6] HAK J. OŠLEJŠEK O. : , *Výpočet chlazení elektrických strojů-1.Díl : Fyzikální podklady výpočtu chlazení a ventilační výpočet.* Vydání VUES Brno, 1973 , 628s
- [7] BAŠTA J. CHLÁDEK J. MAYER I. : , *Teorie elektrických strojů* Vydání SNTL, 1968 , 584s
- [8] LIST, VLADIMÍR A JOSEF HAK A KOLEKTIV. *TECHNICKÝ PRŮVODCE 12: Elektrotechnika II-Elektrické stroje část 1.* Vydání 3. přepracované. PRAHA: SNTL, 1969.
- [8] LIST, VLADIMÍR A JOSEF HAK A KOLEKTIV. *TECHNICKÝ PRŮVODCE 12: Elektrotechnika II-Elektrické stroje část 1.* Vydání 3. přepracované. PRAHA: SNTL, 1969.
- [9] Xiaoyuan Wang, Juan Li and Peng Song, "*Design Optimization and Eddy Current Losses Analysis of Permanent Magnets in PMSM,*" *2006 12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, Miami, FL, 2006, pp. 187-187.
- [10] M. CALIN AND E. HELEREA, "*Temperature influence on magnetic characteristics of NdFeB permanent magnets,*" *2011 7TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ADVANCED TOPICS IN ELECTRICAL ENGINEERING (ATEE)*, Bucharest, 2011, pp. 1-6.
- [11] *It is'all about horsepower... or is it?* [online]. 23.4.2012 [cit. 2019-01-27]. Dostupné z: <http://www.optimung.com/technical/it-is-all-about-horsepower-or-is-it/>

- [12] *Thermal Conductivity of Carbon Fiber, and other Carbon Based Materials* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: https://www.christinedemerchant.com/carbon_characteristics_heat_conductivity.html
- [13] Nakouzi, S & Pancrace, Johann & Schmidt, Fabrice & le maoult, Yannick & Berthet, Florentin & UPS, Mines Albi, ISAE, ICA - Institut Clement Ader, Campus Jarlard, Albi cedex, INSA, & des Mines Albi, Campus Jarlard, Albi, Ecole. (2011). Infrared curing simulations of liquid composites molding. AIP Conference Proceedings. 1353. 10.1063/1.3589667.
- [14] *Neodymium Magnet Physical Properties* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: <https://www.kjmagnetics.com/specs.asp>
- [15] *Characteristics of NdFeB Magnets* [online]. [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: https://e-magnetsuk.com/neodymium_magnets/characteristics.aspx
- [16] *Technical Data Sheet LOCTITE® 315™* [online]. 2014 [cit. 2019-02-17]. Dostupné z: [https://tdsna.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/A81CDA78EEDA409D882571870000D652/\\$File/315-EN.pdf](https://tdsna.henkel.com/NA/UT/HNAUTTDS.nsf/web/A81CDA78EEDA409D882571870000D652/$File/315-EN.pdf)
- [17] SORGDRAGER, A. J. a A. J. GROBLER. Influence of magnet size and rotor topology on the air-gap flux density of a radial flux PMSM. In: *2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*[online]. IEEE, 2013, 2013, s. 337-343 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1109/ICIT.2013.6505695. ISBN 978-1-4673-4569-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/6505695/>
- [18] GAI, Yaohui, Mohammad KIMIABEIGI, Yew CHUAN CHONG, et al. Cooling of Automotive Traction Motors: Schemes, Examples, and Computation Methods. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*[online]. 2019, **66**(3), 1681-1692 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1109/TIE.2018.2835397. ISSN 0278-0046. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8369353/>
- [19] NATEGH, S., D. LINDBERG, O. AGLÉN, R. BRAMMER a A. BOGLIETTI. Review and Trends in Traction Motor Design: Electromagnetic and Cooling System Layouts. In: *2018 XIII International Conference on Electrical Machines (ICEM)* [online]. IEEE, 2018, 2018, s. 2600-2606 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1109/ICELMACH.2018.8506817. ISBN 978-1-5386-2477-7. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8506817/>
- [20] HUANG, Junkui, Shervin SHOAI NAINI, Richard MILLER, Denise RIZZO, Katie SEBECK, Scott SHURIN a John WAGNER. A Hybrid Electric Vehicle Motor Cooling System- Design, Model, and Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* [online]. , 1-1 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1109/TVT.2019.2902135. ISSN 0018-9545. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8654693/>

- [21] CUIPING, Li, Guan ZHENGWEI, Li JUNHUI, Zhao BING a Ding XIUCUI. Optimal design of cooling system for water cooling motor used for mini electric vehicle. In: *2017 20th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 1-4 [cit. 2019-04-07]. DOI: 10.1109/ICEMS.2017.8056319. ISBN 978-1-5386-3246-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8056319/>
- [22] CUIPING, Li, Chai FENG, Feng XICHAO a Cheng SHUKANG. Optimization design and analysis of cooling system used for mini electric vehicle motor. In: *2014 17th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS)* [online]. IEEE, 2014, 2014, s. 2413-2417 [cit. 2019-04-14]. DOI: 10.1109/ICEMS.2014.7013894. ISBN 978-1-4799-5162-8. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/7013894/>
- [23] ČERVENÝ, J *Přednášky k předmětu KEV/SES1,2* [online]. 2016 Dostupné z : <https://courseware.zcu.cz/portal/studium/courseware/kev/ses1/prednasky.html>
- [24] BARTOŠ, Václav. *Elektrické stroje*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2006. ISBN 978-80-7043-444-4.
- [25] MEEKER, David. *Materials Library femm 4.2*. Feb 25 2018
- [26] DABALA, K. Analysis of mechanical losses in three-phase squirrel-cage induction motors. In: *ICEMS'2001. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems (IEEE Cat. No.01EX501)* [online]. Int. Acad. Publishers, 2001, s. 39-42 [cit. 2019-05-26]. DOI: 10.1109/ICEMS.2001.970604. ISBN 7-5062-5115-9. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/document/970604/>

Přílohy

Příloha A Parametry motoru

vstupní parametry	vinutí	stator	náhradní schéma	ztráty																			
$U_n = 247,68 \text{ V}$ $N_n = 9000,00 \text{ rpm}$ $P_n = 35000,00 \text{ W}$ $m = 3 \text{ fáze}$ $\eta_n = 0,938$ $\cos \varphi_n = 0,800$ $\varphi_n = 36,87^\circ$ $p = 2$ $f_n = 300,00 \text{ Hz}$ $D_e = 180 \text{ mm}$ $\delta = 1,1 \text{ mm}$	$Q = 6 \text{ drážek}$ $2u = 2 \text{ vrstvy}$ $q = 1,02$ $n = 1$ $c = 2$ $t_{id} = 1,5$ $y_{id} = 1$ $\beta = 0,667$ $k_{y1} = 0,866$ $k_{z1} = 1,000$ $k_{v1} = 0,866$ elektromagnetismus $k_c = 0,791$ $k_b = 1,12$ $\alpha_\delta = 0,64$ $\alpha_{mech} = 0,95$ $S_1 = 36893,66 \text{ VA}$ $A = 77125 \text{ A/m}$ $B_\delta = 0,92 \text{ T}$ $D_1 = 70,00 \text{ mm}$ $t_p = 54,98 \text{ mm}$ $C = 7207,10 \text{ VA/m}^3 \text{ot}$ $l = 116,08 \text{ mm}$ $npl = 332 \text{ plechů}$ $z_{aokr. l} = 116,2 \text{ mm}$ $chyba l = -0,10 \%$ $I_d = 2826,78 \text{ A}$ $V_d = 26,00 \text{ vodičů}$ $N_c = 13 \text{ závitů}$ $z_{aokr. V_d} = 26 \text{ vodičů}$ $chyba V_d = 0,00 \%$ $N_{s1} = 26 \text{ závitů v sérii}$ $\Phi = 3,74E-03 \text{ Wb}$ $B_\delta = 0,92 \text{ T}$ $chyba B_\delta = 0,10 \%$ $U_b = 113,113 \text{ V}$	$B_{z1} = 1,2 \text{ T}$ $B_{z1}' = 1,4 \text{ T}$ $h_{z1} = 14,11 \text{ mm}$ $z_{aokr. h_{z1}} = 14,00 \text{ mm}$ $oprav. B_{z1} = 1,21 \text{ T}$ $chyba B_{z1} = -0,77 \%$ $l_{z1} = 130,38 \text{ mm}$ $H_{z1} = 180,00 \text{ A/m}$ $U_{m1} = 23,47 \text{ A}$ $t_{d1} = 36,65 \text{ mm}$ $b_{z1} = 24,19 \text{ mm}$ $z_{aokr. b_{z1}} = 25,00 \text{ mm}$ $oprav. B_{z1} = 1,35 \text{ T}$ $chyba B_{z1}' = 3,26 \%$ $h_{z1} = 41,00 \text{ mm}$ $t_{d1,1} = 43,81 \text{ mm}$ $k_{z1,1} = 0,84$ $B_{z1,1} = 1,35 \text{ T}$ $H_{z1,1} = 500,00 \text{ A/m}$ $U_{mz1,1} = 6,83 \text{ A}$ $t_{d1,2} = 47,39 \text{ mm}$ $k_{z1,2} = 1,00$ $B_{z1,2} = 1,35 \text{ T}$ $H_{z1,2} = 500,00 \text{ A/m}$ $U_{mz1,2} = 6,83 \text{ A}$ $t_{d1,3} = 50,96 \text{ mm}$ $k_{z1,3} = 1,15$ $B_{z1,3} = 1,35 \text{ T}$ $H_{z1,3} = 500,00 \text{ A/m}$ $U_{mz1,3} = 6,83 \text{ A}$ $H_{z1} = 500,00 \text{ A/m}$ $U_{mz1} = 20,50 \text{ A}$ $U_{m1} = 64,47 \text{ A}$	$J = 5,00 \text{ A/mm}^2$ $D_v = 1,25 \text{ mm}$ $\rho_i = 0,07 \text{ mm}$ $D_{v1} = 1,32 \text{ mm}$ $b_v = 9 \text{ mm}$ $h_v = 1 \text{ mm}$ $h_1 = 1,46 \text{ mm}$ $b_{d1} = 14,23 \text{ mm}$ $b_{d2} = 54,59 \text{ mm}$ $h_u = 38,54 \text{ mm}$ $S_d = 1326,07 \text{ mm}^2$ $N_p = 18 \text{ vodičů}$ $S_{vCO} = 22,09 \text{ mm}^2$ $J = 4,92 \text{ A/mm}^2$ $chyba J = 1,56 \%$ $S_v = 637,54 \text{ mm}^2$ $k_v = 0,48$ magnety a rotor $B_p = 1,1 \text{ T}$ $b_m = 38,00 \text{ mm}$ $B_m = 0,85 \text{ T}$ $h_m = 7,70 \text{ mm}$ $\delta = 8,80 \text{ mm}$ $y = 0,17$ $kc = 1,04$ $\delta^* = 1,15 \text{ mm}$ $h_{j2} = 15,39 \text{ mm}$ $z_{aokr. h_{j1}} = 16,00 \text{ mm}$ $oprav. B_{j1} = 1,06 \text{ T}$ $chyba B_{j1} = 3,81 \%$ $l_{j1} = 28,59 \text{ mm}$ $H_{j1} = 144,00 \text{ A/m}$ $U_{mp} = 4,12 \text{ A}$ $h_m = 8,04 \text{ mm}$ $t_{p1} = 40,62 \text{ mm}$ $opis t_p = 40 \text{ mm}$	$l_v = 116,2 \text{ mm}$ $l_v = 95,34 \text{ mm}$ $l_v = 11000,10 \text{ mm}$ $Z_n = 1,32 \Omega$ $R_{1,20} = 0,009 \Omega$ $R_n = 0,013 \Omega$ $r_n = 0,010$ $k_{y1}' = 0,750$ $k_{y1} = 0,813$ $\lambda_y = 1,019$ $\lambda_c = 0,105$ $\lambda_w = 0,462$ $L_{1,20} = 2,84E-04 \text{ H}$ $X_{1,20} = 0,54 \Omega$ $x_{1,20} = 0,41$ $L_{m1} = 1,35E-04 \text{ H}$ $X_{m1} = 0,25 \Omega$ $x_{m1} = 0,19$ $X_{11} = 0,79 \Omega$ $x_{11} = 0,600 = x_{q1}!!!$ $\cos \varphi_n = 0,801$ $chyba \cos \varphi_n = -0,10 \%$ $k_c = 0,790$ $chyba k_c = 0,13 \%$ permanentní magnety $t_{pm} = 53,25 \text{ mm}$ $\alpha_{mech} = 0,71$ $\alpha_{me} = 0,83$ $\text{střed } \gamma_{m1} = 74,86^\circ$ $z_{aokr. \gamma_{m1}} = 75^\circ$ $\text{střed } b_{pm} = 44,37 \text{ mm}$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>segmentů</th> <th>$\gamma_{m1} [^\circ]$</th> <th>$b_{m1} [\text{mm}]$</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>75,00</td> <td>44,37</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>37,50</td> <td>22,19</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>25,00</td> <td>14,79</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>18,75</td> <td>11,09</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>15,00</td> <td>8,87</td> </tr> </tbody> </table>	segmentů	$\gamma_{m1} [^\circ]$	$b_{m1} [\text{mm}]$	1	75,00	44,37	2	37,50	22,19	3	25,00	14,79	4	18,75	11,09	5	15,00	8,87	$\Delta P_{j1,20} = 301,87 \text{ W}$ $\Delta P_{j1n} = 457,27 \text{ W}$ $\Delta P_{PM,20} = 365,72 \text{ W}$ $\Delta P_{PM} = 365,72 \text{ W}$ $V_z = 714630 \text{ mm}^3$ $V_v = 848383,3 \text{ mm}^3$ $V_{cu} = 242984,8 \text{ mm}^3$ $m_z = 5,47 \text{ kg}$ $m_v = 6,49 \text{ kg}$ $m_{cu} = 2,18 \text{ kg}$ $\Delta p_z = 35,00 \text{ W/kg}$ $\Delta p_j = 25,00 \text{ W/kg}$ $\Delta P_z = 191,34 \text{ W}$ $\Delta P_j = 162,25 \text{ W}$ $\Delta P_{PM} = 353,60 \text{ W}$ $\omega_m = 942,48 \text{ rad/s}$ $v_{m1} = 32,99 \text{ m/s}$ $\Delta P_w = 703,54 \text{ W}$ $\Delta P_c = 1880,12 \text{ W}$ $\Delta P_{\text{otPM}} = 2256,15 \text{ W}$ $\text{odhad } \Delta P_c = 2313,43 \text{ W}$ $chyba \Delta P_c = -2,54 \%$ $\eta = 0,939$
segmentů	$\gamma_{m1} [^\circ]$	$b_{m1} [\text{mm}]$																					
1	75,00	44,37																					
2	37,50	22,19																					
3	25,00	14,79																					
4	18,75	11,09																					
5	15,00	8,87																					

Příloha B Mechanické parametry potřebné k výpočtu ztrát během jednoho kola

<i>úsek</i>	n_k [ot/min]	n_m [ot/min]	t [s]	l [mm]	s [m]	$\varnothing v$ [m/s]
1	836	2508	2,095	28	27,23	13,00
2	1141	3423	0,822	15	14,59	17,75
3	1190	3570	0,789	15	14,59	18,50
4	707	2121	0,707	8	7,78	11,00
5	804	2412	2,101	27	26,26	12,50
6	1190	3570	0,368	7	6,81	18,50
7	1093	3279	0,858	15	14,59	17,00
8	611	1833	1,536	15	14,59	9,50
9	514	1542	0,851	7	6,81	8,00
10	514	1542	2,066	17	16,53	8,00
11	997	2991	1,004	16	15,56	15,50
12	997	2991	1,694	27	26,26	15,50
13	997	2991	0,377	6	5,84	15,50
14	997	2991	1,506	24	23,34	15,50
15	707	2121	1,415	16	15,56	11,00
16	1093	3279	0,858	15	14,59	17,00
17	900	2700	1,529	22	21,40	14,00
18	707	2121	0,442	5	4,86	11,00
19	514	1542	2,796	23	22,37	8,00
20	707	2121	1,326	15	14,59	11,00
21	900	2700	1,459	21	20,42	14,00
22	900	2700	0,625	9	8,75	14,00
23	900	2700	0,834	12	11,67	14,00
24	997	2991	0,753	12	11,67	15,50
25	1093	3279	1,03	18	17,51	17,00
26	997	2991	0,69	11	10,70	15,50
27	1190	3570	0,578	11	10,70	18,50
28	1190	3570	0,841	16	15,56	18,50
29	900	2700	3,682	53	51,55	14,00
30	900	2700	1,32	19	18,48	14,00
31	1190	3570	0,631	12	11,67	18,50
32	900	2700	1,806	26	25,29	14,00
33	804	2412	0,934	12	11,67	12,50
34	900	2700	1,806	26	25,29	14,00
35	997	2991	0,69	11	10,70	15,50
36	900	2700	0,417	6	5,84	14,00
37	900	2700	1,32	19	18,48	14,00
38	900	2700	1,111	16	15,56	14,00
39	965	2895	0,454	7	6,81	15,00
40	900	2700	0,625	9	8,75	14,00
41	900	2700	0,973	14	13,62	14,00
42	900	2700	0,347	5	4,86	14,00
43	900	2700	4,307	62	60,30	14,00

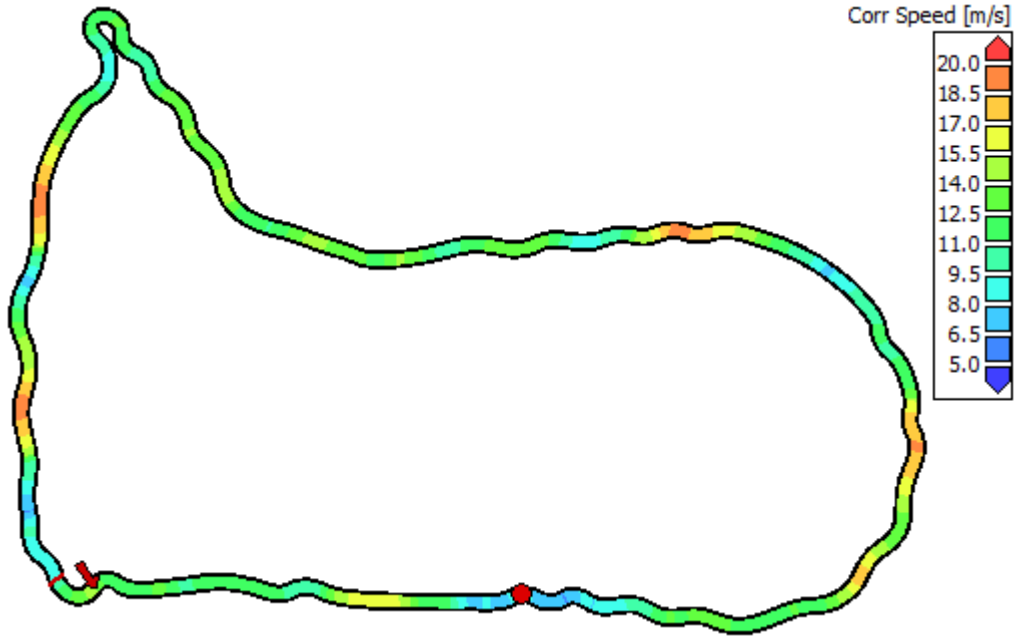
Příloha C Velikost výkonu, ztrát a účinnost pro jednotlivé úseky v jednom kole

úsek	P [kW]	ΔP_j [W]	ΔP_{pm} [W]	ΔP_m [W]	ΔP_{FE} [W]	ΔP [W]	η [%]
1	27,5	3825,8	35	14	424,32	4299,12	86,48
2	25	1697,5	64	19	424,32	2204,82	91,9
3	2,5	15,6	69	20	424,32	528,92	82,54
4	2,5	44,3	25	12	424,32	505,62	83,18
5	17,5	1675,2	32	13	424,32	2144,52	89,08
6	27,5	1888,3	69	20	424,32	2401,62	91,97
7	5	74	59	18	424,32	575,32	89,68
8	5	236,9	19	10	424,32	690,22	87,87
9	12,5	2091,1	13	9	424,32	2537,42	83,13
10	7,5	752,9	13	9	424,32	1199,22	86,21
11	20	1422,9	49	17	424,32	1913,22	91,27
12	15	800,4	49	17	424,32	1290,72	92,08
13	17,5	1089,4	49	17	424,32	1579,72	91,72
14	17,5	1089,4	49	17	424,32	1579,72	91,72
15	25	4420,9	25	12	424,32	4882,22	83,66
16	10	296,1	59	18	424,32	797,42	92,61
17	10	436,6	40	15	424,32	915,92	91,61
18	17,5	2166,3	25	12	424,32	2627,62	86,95
19	12,5	2091,1	13	9	424,32	2537,42	83,13
20	20	2829,5	25	12	424,32	3290,82	85,87
21	12,5	682,1	40	15	424,32	1161,42	91,5
22	20	1746,1	40	15	424,32	2225,42	89,99
23	5	109,2	40	15	424,32	588,52	89,47
24	25	2223,2	49	17	424,32	2713,52	90,21
25	2,5	18,5	59	18	424,32	519,82	82,79
26	22,5	1800,8	49	17	424,32	2291,12	90,76
27	27,5	1888,3	69	20	424,32	2401,62	91,97
28	2,5	15,6	69	20	424,32	528,92	82,54
29	7,5	245,6	40	15	424,32	724,92	91,19
30	17,5	1336,9	40	15	424,32	1816,22	90,6
31	25	1560,6	69	20	424,32	2073,92	92,34
32	10	436,6	40	15	424,32	915,92	91,61
33	20	2188	32	13	424,32	2657,32	88,27
34	10	436,6	40	15	424,32	915,92	91,61
35	15	800,4	49	17	424,32	1290,72	92,08
36	2,5	27,3	40	15	424,32	506,62	83,15
37	15	982,2	40	15	424,32	1461,52	91,12
38	2,5	27,3	40	15	424,32	506,62	83,15
39	15	854,4	46	16	424,32	1340,72	91,8
40	15	982,2	40	15	424,32	1461,52	91,12
41	15	982,2	40	15	424,32	1461,52	91,12
42	20	1746,1	40	15	424,32	2225,42	89,99
43	12,5	682,1	40	15	424,32	1161,42	91,5

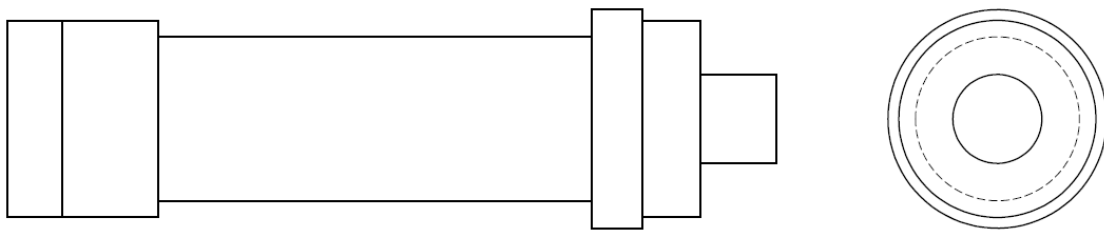
Příloha D Přepočtené ztráty na objemové ztráty pro jedno kolo

úsek	Objemové ztráty vinutí [W/m ³]	Objemové ztráty FE [W/m ³]	Objemové ztráty magnetu [W/m ³]	Objemové ztráty mechanické [W/m ³]
1	2660500,695	372733,6613	238315,7207	12297,96205
2	1180458,971	372733,6613	435777,3178	16690,09136
3	10848,40056	372733,6613	469822,4207	17568,51722
4	30806,67594	372733,6613	170225,5148	10541,11033
5	1164951,321	372733,6613	217888,6589	11419,53619
6	1313143,255	372733,6613	469822,4207	17568,51722
7	51460,36161	372733,6613	401732,2148	15811,6655
8	164742,6982	372733,6613	129371,3912	8784,258609
9	1454172,462	372733,6613	88517,26768	7905,832748
10	523574,4089	372733,6613	88517,26768	7905,832748
11	989499,3046	372733,6613	333642,0089	14933,23963
12	556606,3978	372733,6613	333642,0089	14933,23963
13	757579,9722	372733,6613	333642,0089	14933,23963
14	757579,9722	372733,6613	333642,0089	14933,23963
15	3074339,36	372733,6613	170225,5148	10541,11033
16	205910,9875	372733,6613	401732,2148	15811,6655
17	303616,1335	372733,6613	272360,8236	13176,38791
18	1506467,316	372733,6613	170225,5148	10541,11033
19	1454172,462	372733,6613	88517,26768	7905,832748
20	1967663,421	372733,6613	170225,5148	10541,11033
21	474339,3602	372733,6613	272360,8236	13176,38791
22	1214255,911	372733,6613	272360,8236	13176,38791
23	75938,80389	372733,6613	272360,8236	13176,38791
24	1546036,161	372733,6613	333642,0089	14933,23963
25	12865,0904	372733,6613	401732,2148	15811,6655
26	1252294,854	372733,6613	333642,0089	14933,23963
27	1313143,255	372733,6613	469822,4207	17568,51722
28	10848,40056	372733,6613	469822,4207	17568,51722
29	170792,7677	372733,6613	272360,8236	13176,38791
30	929694,0195	372733,6613	272360,8236	13176,38791
31	1085257,302	372733,6613	469822,4207	17568,51722
32	303616,1335	372733,6613	272360,8236	13176,38791
33	1521557,719	372733,6613	217888,6589	11419,53619
34	303616,1335	372733,6613	272360,8236	13176,38791
35	556606,3978	372733,6613	333642,0089	14933,23963
36	18984,70097	372733,6613	272360,8236	13176,38791
37	683031,9889	372733,6613	272360,8236	13176,38791
38	18984,70097	372733,6613	272360,8236	13176,38791
39	594158,5535	372733,6613	313214,9472	14054,81377
40	683031,9889	372733,6613	272360,8236	13176,38791
41	683031,9889	372733,6613	272360,8236	13176,38791
42	1214255,911	372733,6613	272360,8236	13176,38791
43	474339,3602	372733,6613	272360,8236	13176,38791

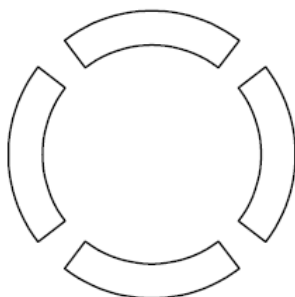
Příloha E Traťový profil, převzato z [11]



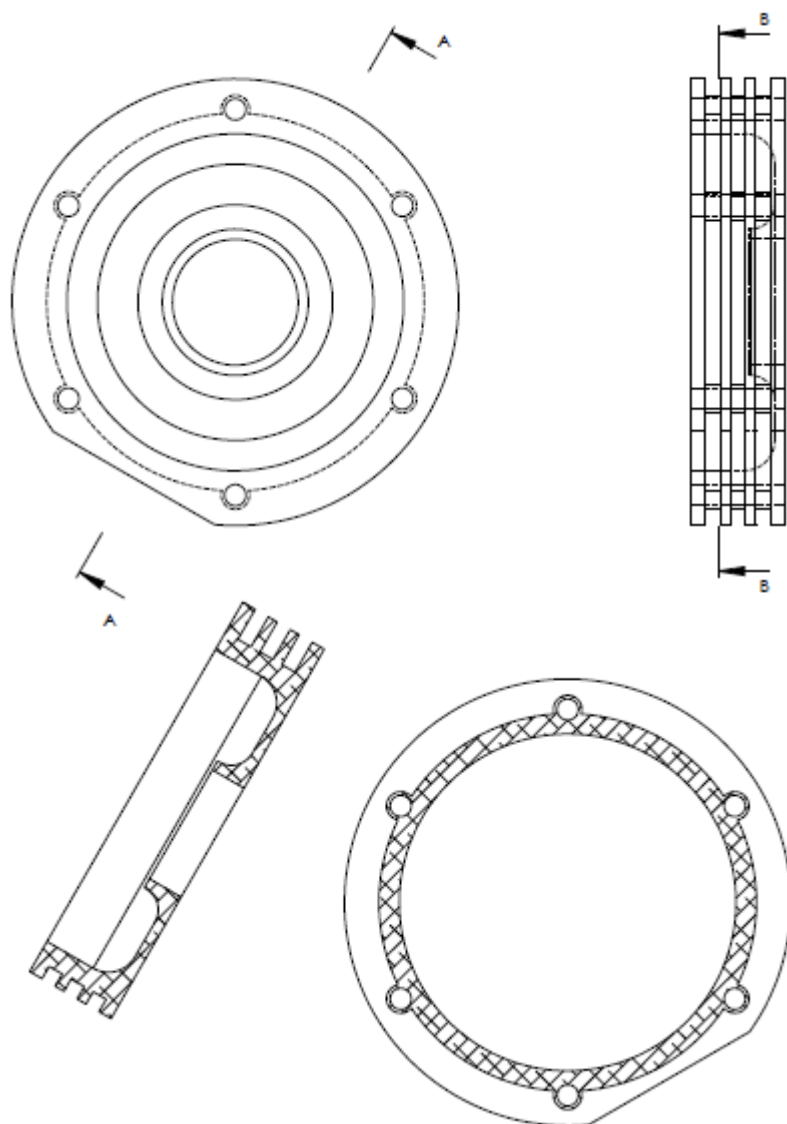
Příloha F Hřídel upravený



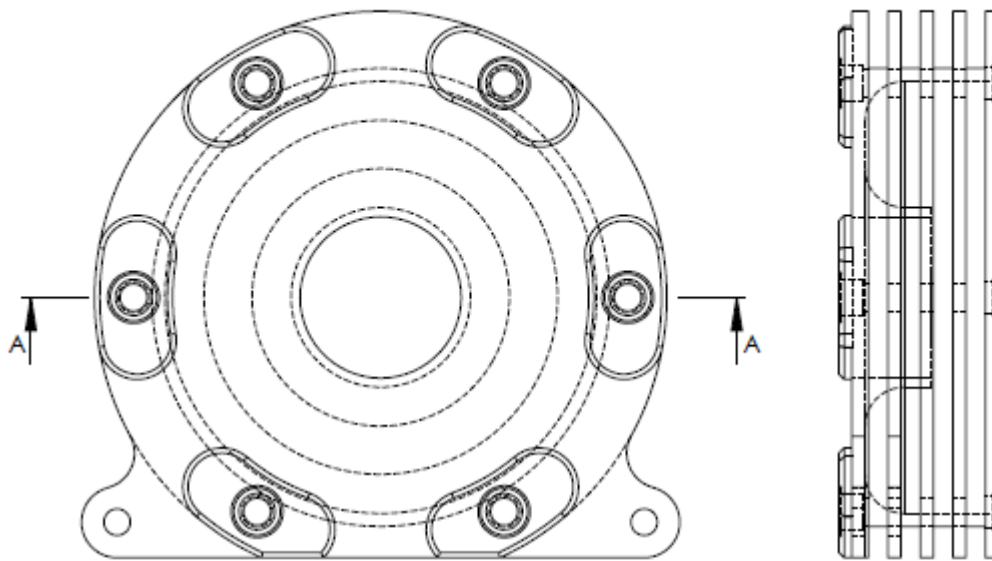
Příloha G Magnety



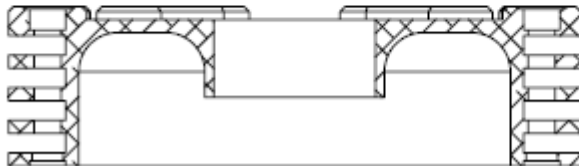
Příloha H Drive End



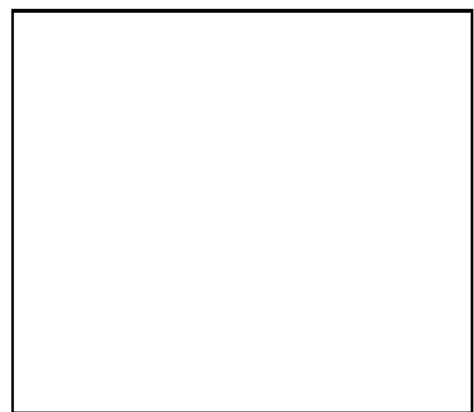
Příloha I Non Drive End



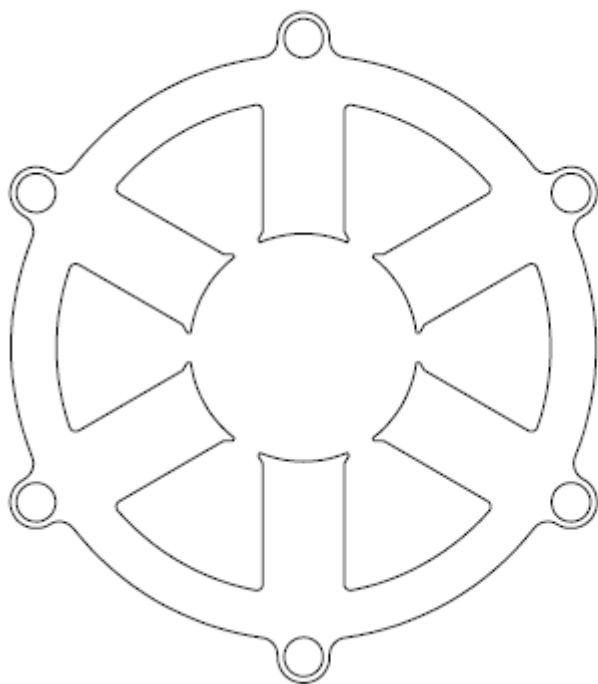
ŘEZ A-A



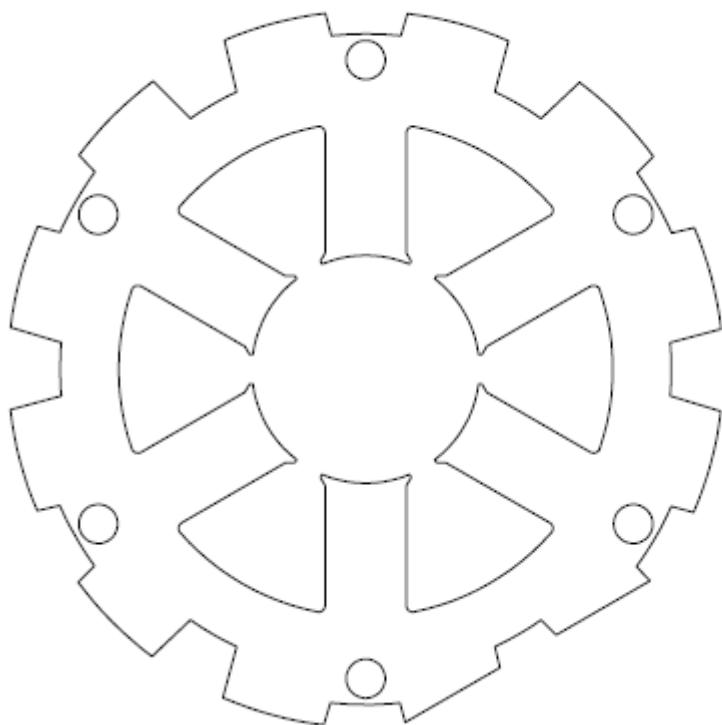
Příloha J Deflektor



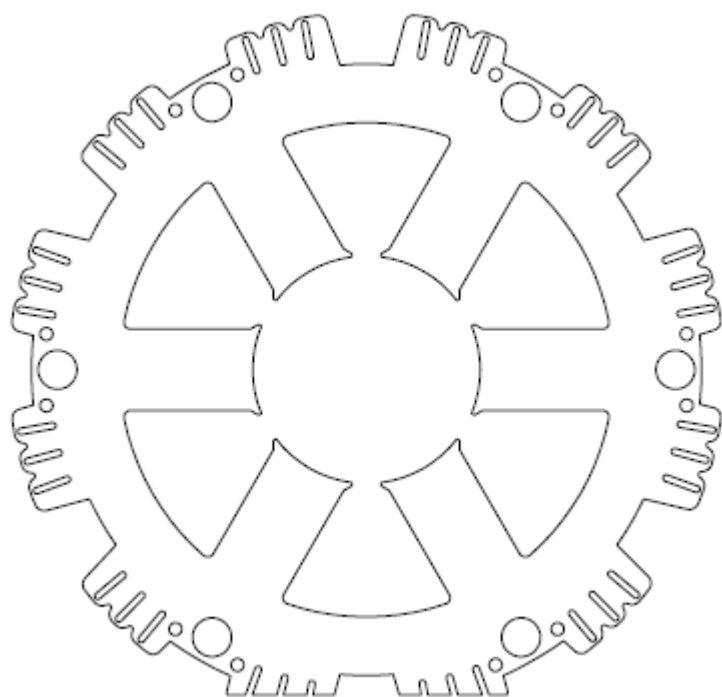
Příloha K Plech A



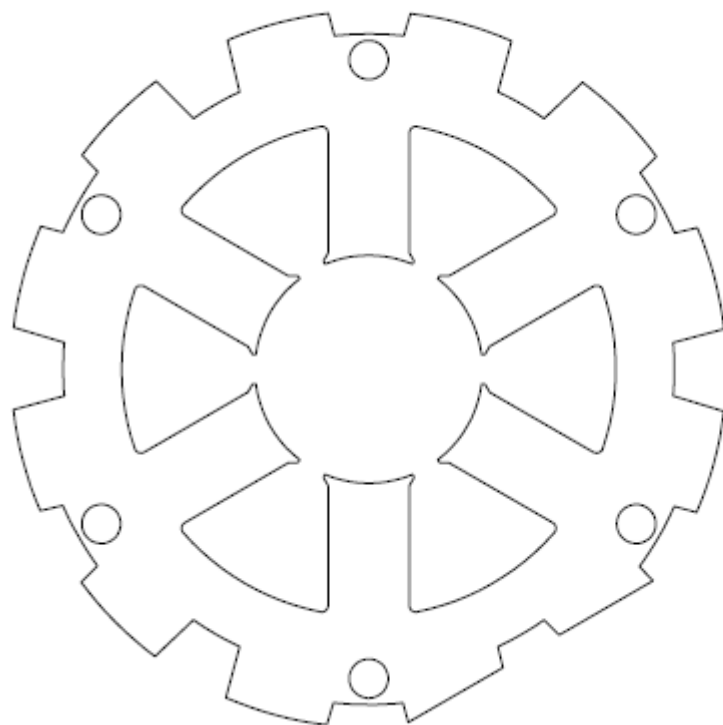
Příloha L Plech B upravený



Příloha M Plech B původní



Příloha N Plech C upravený



Příloha O Plech C původní

