



ZÁPADOČESKÁ  
UNIVERZITA  
V PLZNI

FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ  
KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

# DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tepelný a ventilační výpočet asynchronního trakčního motoru

**AUTOR PRÁCE:** Bc. Ondřej Rollinger  
**VEDOUCÍ PRÁCE:** Ing. Roman Pechánek, PhD.

PLZEŇ 2019

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**

**Fakulta elektrotechnická**

**Akademický rok: 2018/2019**

## **ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE**

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Ondřej ROLLINGER**

Osobní číslo: **E16N0060P**

Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**

Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**

Název tématu: **Tepelný a ventilační výpočet asynchronního trakčního motoru**

Zadávací 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. Seznamte se s metodami chlazení a modelování teplotních úloh v elektrických strojích.
2. Sestavte pomocí síťových metod tepelně-ventilační model asynchronního trakčního motoru.
3. Ověřte tepelný model metodou konečných prvků.
4. Vyšetřete rozložení teplot v různých částech stroje a navrhnete příslušná opatření.
5. Parametry stroje:  $P_n=95\text{kW}$ ,  $U_n=400\text{V}$ ,  $n_n=3450\text{ot/min}$ .

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.

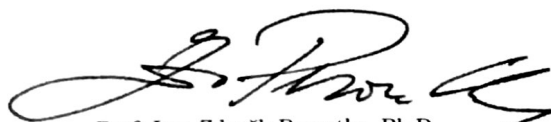
Vedoucí diplomové práce:

**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



  
Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

# Abstrakt

Předmětem této diplomové práce je výpočet a analýza rozložení teplot v asynchronním stroji o výkonu 100 kW. Výpočet je proveden dvěma metodami. Jednak metodou náhradní tepelné sítě a zároveň metodou konečných prvků. Při metodě konečných prvků je použit profesionální simulační program ANSYS. Výsledky jednotlivých metod jsou následně porovnány a podrobeny analýze.

## Klíčová slova

tepelný výpočet, tepelný model, metoda konečných prvků, ANSYS Workbench, asynchronní motor, součinitel přestupu tepla, měrná tepelná vodivost

# Abstract

The subject of this diploma thesis is calculation and analysis of temperature distribution in 100 kW asynchronous machine. The calculation is done by two methods. On the one hand, the method of the substitute heat network and on the other hand, the finite element method. The finite element method is done by the professional simulation program ANSYS. The results of individual methods are then compared and analyzed.

# Keywords

thermal calculation, thermal model, ANSYS Workbench, finite element method, asynchronous motor, heat transfer coefficient, specific thermal conductivity

# Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou diplomovou prací vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při vypracovávání této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 28. května 2019

Bc. Ondřej Rollinger

.....

Podpis

## Poděkování

Touto formou bych chtěl poděkovat všem, kteří mi byli nápomocni při tvorbě mé diplomové práce. Především bych chtěl poděkovat mému vedoucímu diplomové práce Ing. Romanu Pechánkovi, PhD. za ochotu a za poskytnuté konzultace při vypracovávání práce.

# Obsah

Seznam použitých symbolů a zkratek	9
Seznam obrázků	11
Seznam tabulek	12
<b>1 Úvod</b>	<b>13</b>
<b>2 Seznámení se s metodami chlazení a modelování teplotních úloh v elektrických strojích</b>	<b>14</b>
2.1 Výpočet vzestupu tepla ve vzduchem chlazeném asynchronním motoru metodou konečných prvků	14
2.2 Kombinovaná elektromagnetická a tepelná analýza asynchronních motorů	15
2.3 Výsledky optimalizace za účelem zvýšení výkonového využití u trakčního pohonu pro kolejová vozidla	17
2.4 Analýza parametrů a výkonu asynchronního motoru pomocí tepelného výpočtu metodou konečných prvků	19
2.5 Kombinovaný elektromagnetický a tepelný návrh pro uzavřené asynchronní stroje	20
2.6 Úprava struktury ventilačního systému u velkých motorů založená na analýze metodou konečných prvků	21
2.7 Tepelný model a analýza asynchronního motoru s vinutým rotorem	23
2.8 Shrnutí	24
<b>3 Parametry analyzovaného stroje</b>	<b>24</b>
<b>4 Tepelný výpočet</b>	<b>25</b>
4.1 Šíření tepla	26
4.1.1 Vedení tepla	26
4.1.2 Přestup tepla	26
4.1.3 Sálání	27
4.2 Náhradní tepelné obvody	27
4.2.1 Výpočet tepelných odporů	27
4.2.2 Jednoduchý tepelný obvod	28
4.2.3 Řešení složitých tepelných sítí	29



4.3	Tepelná síť rotoru . . . . .	30
4.3.1	Výsledné teploty získané řešením tepelné sítě rotoru . . . . .	36
4.4	Tepelná síť kompletního motoru . . . . .	37
4.4.1	Výsledné teploty získané řešením tepelné sítě kompletního stroje . . . . .	41
<b>5</b>	<b>Metoda konečných prvků</b>	<b>42</b>
5.1	Metodologická část . . . . .	42
5.1.1	Rotor . . . . .	43
5.1.2	Kompletní motor . . . . .	44
5.2	Definice problému . . . . .	44
5.2.1	Engineering Data . . . . .	44
5.2.2	Úprava geometrie . . . . .	45
5.2.2.1	Úpravy provedené v modulu SpaceClaim . . . . .	45
5.2.2.2	Úpravy provedené v modulu Steady-State Thermal . . . . .	46
5.2.3	Síť . . . . .	46
5.2.4	Ztráty . . . . .	47
5.2.5	Přiřazení součinitelů přestupu tepla . . . . .	47
5.3	Výsledky . . . . .	49
5.3.1	Rozložení teplot v rotoru . . . . .	49
5.3.2	Rozložení teplot kompletního stroje . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam použité literatury</b>	<b>55</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>56</b>
	Příloha A - Zdrojové soubory pro analytický výpočet tepelné sítě kompletního stroje .	56
	Příloha B - Zdrojové soubory pro analytický výpočet tepelné sítě rotoru . . . . .	60
	Příloha C - Matice tepelných vodivostí . . . . .	65

# Seznam použitých symbolů a zkratek

$\lambda$	měrná tepelná vodivost	$[\frac{W}{m K}]$
$\alpha$	součinitelem přestupu tepla	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$v$	rychlost proudění	$[\frac{m}{s}]$
$R_t$	tepelný odpor	$[\frac{K}{W}]$
$S_{pr}$	velikost ochlazovací plochy	$[m^2]$
$l$	délka úseku ve směru šíření tepelného toku	$[m]$
$S_v$	průřez	$[m^2]$
$P$	tepelný tok	$[W]$
$T$	teplota	$[^{\circ}C]$
$Q'$	množství vzniklého tepla	$[J]$
$C$	tepelná kapacita	$[\frac{J}{K}]$
$G$	tepelná vodivost	$[\frac{W}{K}]$
$L_{hridel}$	délka hřídele přesahující jeho magnetického obvodu rotoru	$[m]$
$L_{paket}$	délka plechového svazku	$[m]$
$\lambda_{hridel}$	měrná tepelná vodivost hřídele	$[\frac{W}{m K}]$
$\alpha_{hridel}$	součinitel přestupu tepla do okolí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$D_1$	průměr hřídele	$[m]$
$r_1$	poloměr hřídele	$[m]$
$r_3$	poloměr od středu do půlky jeho rotoru	$[m]$
$r_4$	poloměr od středu k patě drážky rotoru	$[m]$
$\lambda_{Fe\_rad}$	měrná tepelná vodivost plechového svazku v radiálním směru	$[\frac{W}{m K}]$
$\lambda_{Cu}$	měrná tepelná vodivost měděného vodiče	$[\frac{W}{m K}]$
$h_{d\_rotor}$	výška drážky rotoru	$[m]$
$h_{z\_rotor}$	výška zubu rotoru	$[m]$
$b_{d\_rotor}$	šířka drážky rotoru	$[m]$
$h_{z\_rotor}$	šířka zubu rotoru	$[m]$
$Q_2$	počet drážek rotoru	$[-]$
$L_{paket-kruh}$	délka vodiče mezi koncem drážky a kruhem nakrátko	$[m]$
$S_{Cu\_rotor}$	průřez vodiče rotorové klece nakrátko	$[m^2]$
$\alpha_{delta\_rotor}$	součinitel přestupu tepla z povrchu rotoru do okolí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$\alpha_{kruh1}$	součinitel přestupu tepla z plochy kruhu nakrátko kolmé na osu otáčení do okolí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$\alpha_{kruh2}$	součinitel přestupu tepla z vnějšího okraje kruhu nakrátko do okolí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$h_{d\_stator}$	výška drážky statoru	$[m]$

$h_{z\_stator}$	výška zubu statoru	$[m]$
$b_{d\_stator}$	šířka drážky statoru	$[m]$
$h_{z\_stator}$	šířka zubu statoru	$[m]$
$Q_1$	počet drážek statoru	$[-]$
$h_{z\_izolace}$	šířka vrstvy izolace	$[m]$
$\lambda_{izolace}$	měrná tepelná vodivost izolace	$[\frac{W}{m K}]$
$S_{Cu}$	průřez vodiče statorového vinutí	$[m^2]$
$L_{celo}$	délka čela	$[m]$
$\alpha_{celo}$	součinitel přestupu tepla z čel statorového vinutí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$r_z$	poloměr od středu k patě drážky statoru	$[m]$
$r_5$	poloměr od středu do půlky jha statoru	$[m]$
$r_6$	vnější poloměr jha statoru	$[m]$
$\alpha_{kostra}$	součinitel přestupu tepla z kostry do okolí	$[\frac{W}{m^2 K}]$
$S_{Cu\_kostra}$	chladící plocha kostry	$[m^2]$
$P_{Cur\_d}$	ztráty vznikající v drážkové části vodiče rotoru	$[W]$
$P_{Cur\_kruh}$	ztráty vznikající v kruhu nakrátko	$[W]$
$P_{Fer\_z}$	ztráty vznikající v zubech magnetického obvodu rotoru	$[W]$
$P_{Cus\_d}$	ztráty vznikající v drážkové části vodiče statoru	$[W]$
$P_{Cus\_cela}$	ztráty vznikající v čelech statorového vinutí	$[W]$
$P_{Fes\_j}$	ztráty vznikající v zubech magnetického obvodu statoru	$[W]$
$P_{Fes\_z}$	ztráty vznikající ve jhu magnetického obvodu statoru	$[W]$
$n$	jmenovité otáčky	$[\frac{ot}{min}]$
$R$	vzdálenost dané plochy od osy otáčení	$[m]$
$D$	průměr	$[m]$
$\nu$	dynamická viskozita vzduchu	$[\frac{m^2}{s}]$
$Re$	Reynoldsovo číslo	$[-]$
$Nu$	Nusseltovo číslo	$[-]$

# Seznam obrázků

1.1	Kompletní sestava kompaktní pohonné jednotky [2] . . . . .	13
2.1	Vývojový diagram výpočtu . . . . .	15
2.2	Proudění chladícího vzduchu zobrazeno v příčném řezu . . . . .	15
2.3	Popis umístění jednotlivých uzlů náhradní tepelné sítě . . . . .	16
2.4	Porovnání naměřených a vypočtených hodnot teploty v závislosti na čase . . . . .	16
2.5	Struktura tepelné sítě analyzovaného motoru . . . . .	17
2.6	Optimalizační cyklus . . . . .	18
2.7	Poměr střední teploty a efektivní hodnoty proudu naprázdno pro jednotlivé výsledky optimalizace . . . . .	18
2.8	Rozložení teplot pro a) původní návrh b) optimalizovaný návrh . . . . .	19
2.9	Ekvivalentní model statorového vinutí . . . . .	19
2.10	Ekvivalentní drážková část zobrazená v příčném řezu . . . . .	20
2.11	Popis umístění jednotlivých uzlů náhradní tepelné sítě . . . . .	20
2.12	Výsledné teploty v jednotlivých částech stroje . . . . .	21
2.13	Upravené konstrukční uspořádání s chladicími kanály v rotoru . . . . .	21
2.14	Zobrazení směru a rychlosti proudění chladícího vzduchu ve stroji s upravenou konstrukcí . . . . .	22
2.15	Rozložení teplot ve statorovém vinutí ve stroji s upravenou konstrukcí . . . . .	22
2.16	Upravená tepelná síť . . . . .	23
3.1	Analyzovaný stroj . . . . .	25
4.1	Schéma jednoduchého tepelného obvodu [11] . . . . .	28
4.2	Elementární šestipól [11] . . . . .	29
4.3	Podélný řez rotorem s popisem jednotlivých uzlů tepelné sítě . . . . .	31
4.4	Podélný řez kompletním motorem s popisem jednotlivých uzlů tepelné sítě . . . . .	37
5.1	Schéma projektu v ANSYS Workbench . . . . .	43
5.2	Vytvořená část geometrie odpovídající izolaci . . . . .	45
5.3	Vytvořená spojka spojující všechny cívky statorového vinutí . . . . .	46
5.4	Vygenerovaná síť pro celý stroj . . . . .	47
5.6	Plochy s přiřazeným součinitelem přestupu tepla . . . . .	48
5.7	Výsledné rozložení teplot v rotoru . . . . .	49

5.8	Výsledné rozložení teplot v rotoru zobrazené v podélném řezu . . . . .	49
5.9	Výsledné rozložení teplot kompletního stroje zobrazené v podélném řezu . . . . .	50
5.10	Výsledné rozložení teplot ve statorovém vinutí . . . . .	50
5.11	Výsledné rozložení teplot v rotoru . . . . .	51
5.12	Výsledné rozložení teplot na povrchu kostry . . . . .	51
5.13	Výsledné rozložení teplot na spodní straně kostry . . . . .	52

## Seznam tabulek

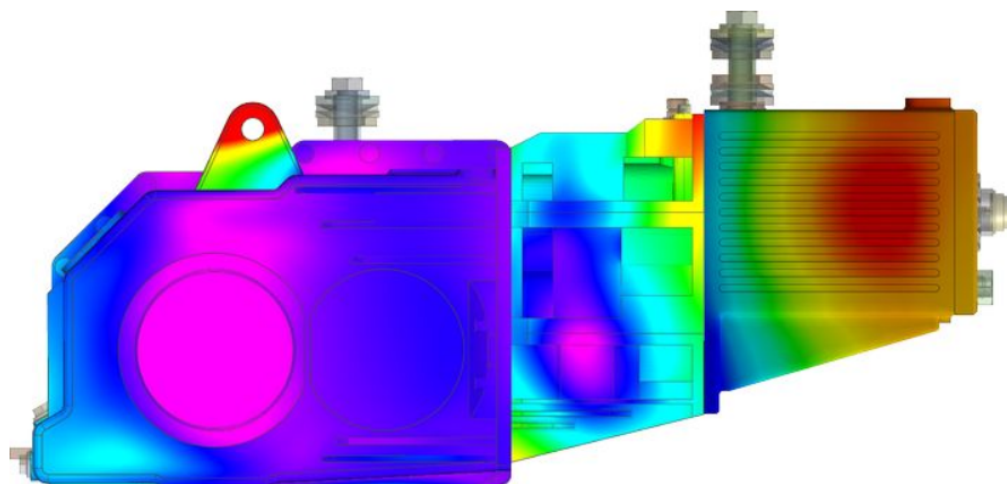
2.1	Porovnání naměřených a vypočtených teplot statorového vinutí . . . . .	14
2.2	Porovnání naměřených a vypočtených teplot . . . . .	24
3.1	Hlavní parametry analyzovaného stroje [10] . . . . .	24
3.2	Hlavní rozměry analyzovaného stroje [10] . . . . .	25
4.1	Hodnoty měrné tepelné vodivosti pro materiály běžně používané v elektrických strojích . . . . .	26
4.2	Vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla . . . . .	32
4.3	Výpis ztrát v rotoru . . . . .	36
4.4	Výsledné teploty při řešení rotoru . . . . .	37
4.5	Výpis ztrát . . . . .	41
4.6	Výsledné teploty při řešení kompletního stroje . . . . .	42
5.1	Hodnoty tepelných vodivostí v jednotlivých osách pro materiál Steel . . . . .	44
5.2	Hodnoty tepelných vodivostí materiálů vybraných z knihovny . . . . .	45
5.3	Velikosti ztrát vztažené na jednotku objemu . . . . .	47
6.1	Porovnání teplot statorového vinutí . . . . .	53

# 1 Úvod

Tato diplomová se zabývá tepelným výpočtem asynchronního motoru o výkonu 100 [kW]. Pro tento tepelný výpočet jsou použity dvě metody, nejdříve metoda náhradní tepelné sítě, následně metoda konečných prvků. K výpočtu metodou konečných prvků je využit profesionální simulační program ANSYS. Na základě získaných výsledků je provedena analýza rozložení teplot v jednotlivých částech stroje.

Předpokladem k úspěšnému vytvoření tepelného modelu je dostatečné seznámení se s metodami chlazení a s metodami modelování teplotních úloh. K tomuto účelu byl využit server IEEE [1].

Zkoumaný motor byl vyvinut tak, aby společně s polovodičovým měničem a převodovkou tvořil kompaktní pohonnou jednotku určenou pro použití v nízkopodlažních tramvajích, trolejbusích, elektrických autobusech a dalších elektrifikovaných prostředcích městské hromadné dopravy. Kompletní sestava kompaktní pohonné jednotky je zobrazena na Obrázku 1.1.



**Obrázek 1.1:** Kompletní sestava kompaktní pohonné jednotky [2]

Díky kompaktnímu designu je docíleno značné úspory rozměrů a hmotnosti. Při srovnání s konkurencí jde o úbytek ve výši 25% při zachování stejných výkonových parametrů a při srovnatelné ceně. Tato kompaktní pohonná jednotka umožňuje jak pohon nápravový, tak i kolový. Celý systém je chlazen pouze pasivně, což značně snižuje hluchnost celého vozidla a pozitivně ovlivňuje dopad na životní prostředí v okolí tratí městské hromadné dopravy. [2]

## 2 Seznámení se s metodami chlazení a modelování teplotních úloh v elektrických strojích

Seznámení se s metodami chlazení a modelování teplotních úloh je zde realizováno pomocí krátké rešerše vybraných článků ze serveru IEEE Xplore Digital Library [1]. Těchto 5 článků se zabývá danou tematikou a v následujících kapitolách je vždy probrán předmět zkoumání článku a dosažené výsledky. Tyto články také přinesly cenné informace ohledně vytváření tepelných modelů metodou konečných prvků a sestavování náhradních tepelných obvodů.

### 2.1 Výpočet vzestupu tepla ve vzduchem chlazeném asynchronním motoru metodou konečných prvků

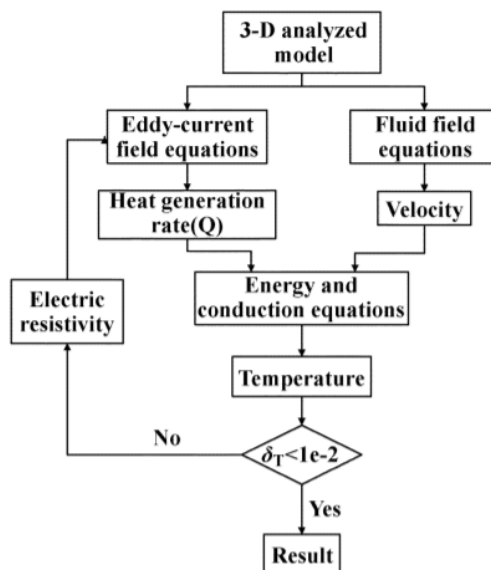
Autoři tohoto článku [3] se zabývali výpočtem rozložení teplot pro 6-fázový 8-pólový asynchronní motor s výkonem 200 [kW]. Výpočet byl realizován sdružením tepelného výpočtu, výpočtu proudění chladícího vzduchu a elektro-magnetického výpočtu. Postup výpočtu je zobrazen na Obrázku 2.1. Výsledek každé iterace výpočtu je porovnán s předchozím výsledkem a pokud se teploty liší více jak o 0,01 [°C], je nově vypočtená hodnota rezistivity statorového vinutí a klece na krátko použita pro následující iteraci.

Chlazení je konstrukčně řešeno v tomto případě pomocí axiálních chladících kanálů v rotoru i statoru. Umístění chladících kanálů včetně směru a rychlosti proudění chladícího vzduchu je zobrazeno na Obrázku 2.2.

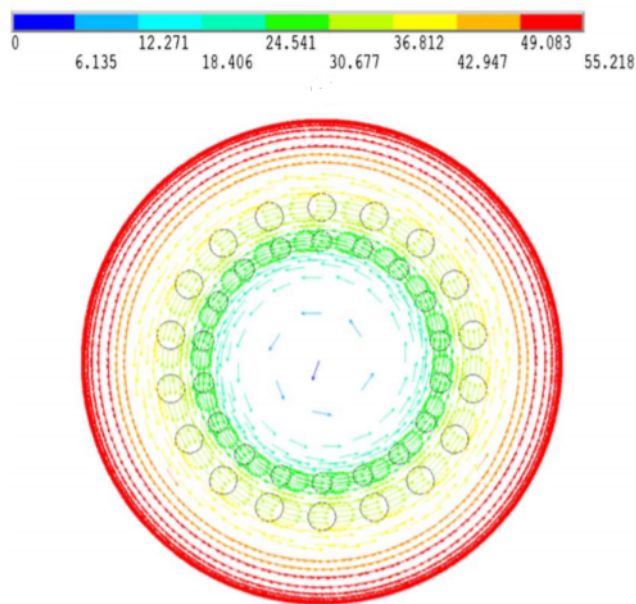
**Tabulka 2.1:** Porovnání naměřených a vypočtených teplot statorového vinutí

měřený bod	měření [°C]	výpočet [°C]	chyba [%]
1	80,8	87,332	8,1
2	84,5	89,010	5,3
3	90,0	91,633	1,8
4	95,6	93,102	-2,6
5	100,9	93,660	-7,2

Výsledky výpočtu byly experimentálně ověřeny měřením, kdy byly podél statorového vinutí rozmístěny teplotní čidla. Při porovnání změřených a vypočtených hodnot byly zjištěny rozdíly teplot v řádu jednotek procent. Pokud vezmeme v potaz komplexitu celé úlohy, jsou toto výborné výsledky. Konkrétní porovnání teplot je zobrazeno v Tabulce 2.1.



Obrázek 2.1: Vývojový diagram výpočtu



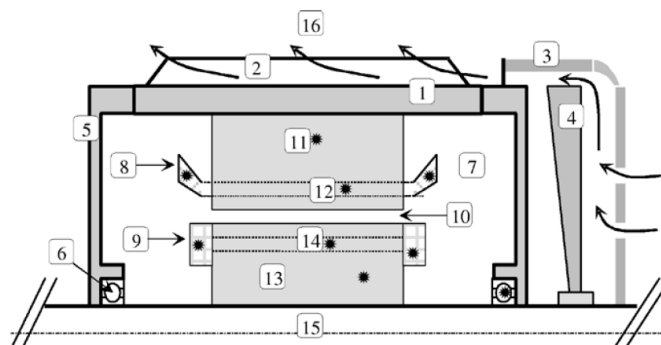
Obrázek 2.2: Proudění chladícího vzduchu zobrazeno v příčném řezu

## 2.2 Kombinovaná elektromagnetická a tepelná analýza asynchronních motorů

Článek [4] popisuje kombinaci analýzy elektromagnetismu a tepelné analýzy pro asynchronní motory. Sdružení výpočtu elektromagnetismu a tepelného výpočtu bylo v tomto případě realizováno cyklickým výpočtem rezistivity na základě vypočtené teploty.

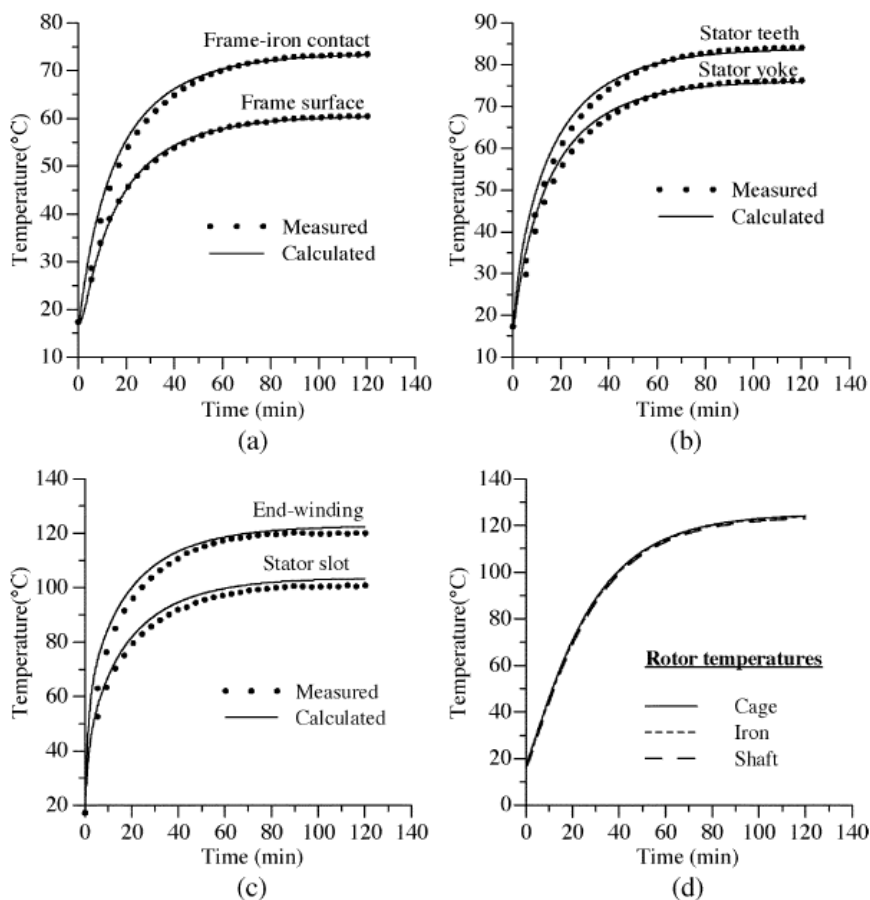
Pro účely tepelné analýzy je zde použita metoda náhradní tepelné sítě. Pozice jednotlivých uzlů tepelné sítě je zobrazena na Obrázku 2.3.



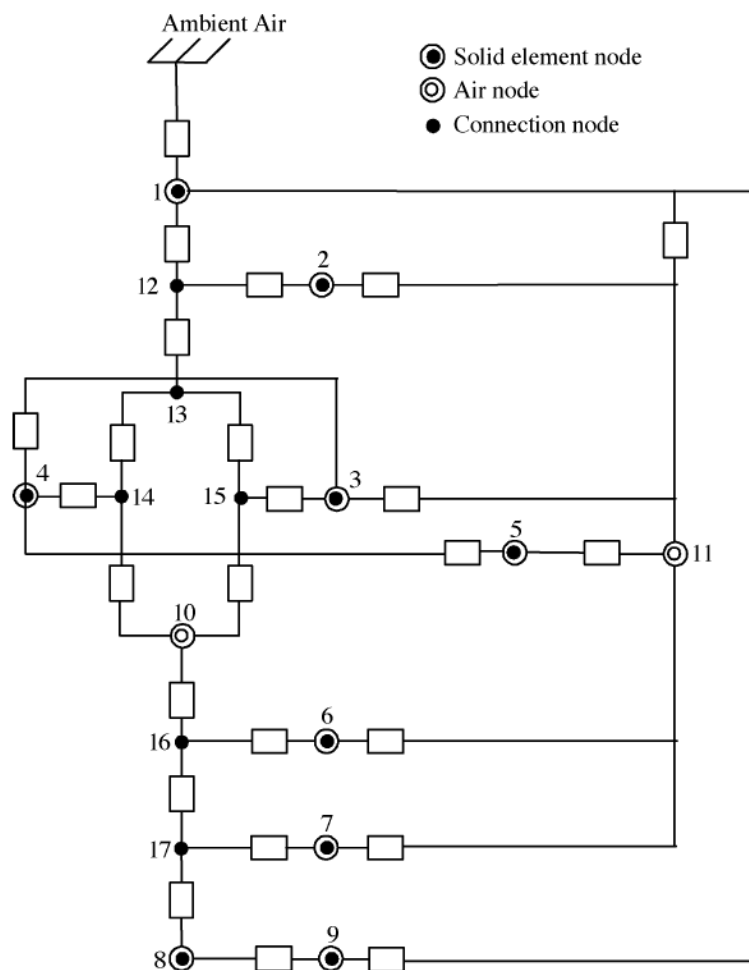


**Obrázek 2.3:** Popis umístění jednotlivých uzlů náhradní tepelné sítě

V tomto případě uzel 1 odpovídá kostře stroje, uzel 2 žebřím kostry stroje, uzel 3 krytu ventilátoru, uzel 4 ventilátoru, uzel 5 přednímu a zadnímu krytu stroje, uzel 6 ložiskům, uzel 7 vzduchu kolem čel statorového vinutí a kruhů nakrátko, uzel 8 čelům statorového vinutí, uzel 9 kruhům nakrátko, uzel 10 vzduchové mezeře, uzel 11 magnetickému obvodu statoru, uzel 12 drážce statoru, uzel 13 magnetickému obvodu rotoru, uzel 14 drážce rotoru, uzel 15 hřídeli a uzel 16 okolnímu vzduchu. Struktura tepelné sítě je zobrazena na Obrázku 2.5



**Obrázek 2.4:** Porovnání naměřených a vypočtených hodnot teploty v závislosti na čase

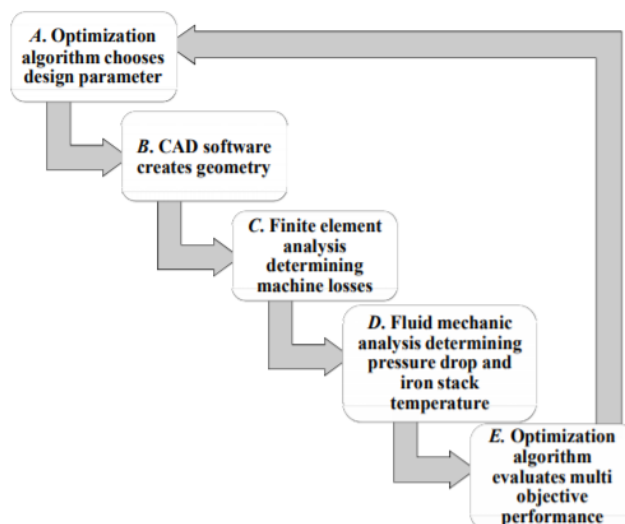


Obrázek 2.5: Struktura tepelné sítě analyzovaného motoru

Tepelný model byl sestaven pro uzavřený 3-fázový 4-pólový asynchronní motor s klecí nakrátko a výkonem  $5,5 [kW]$ . Výsledky tepelného výpočtu byly ověřeny měřeními. Na Obrázku 2.4 jsou vykresleny průběhy teplot jednotlivých částí v závislosti na čase získané jednak výpočtem a následně měřeními. Je zřejmé, že model dosahuje velmi přesných výsledků a vypočtené teploty se výrazně blíží k naměřeným teplotám.

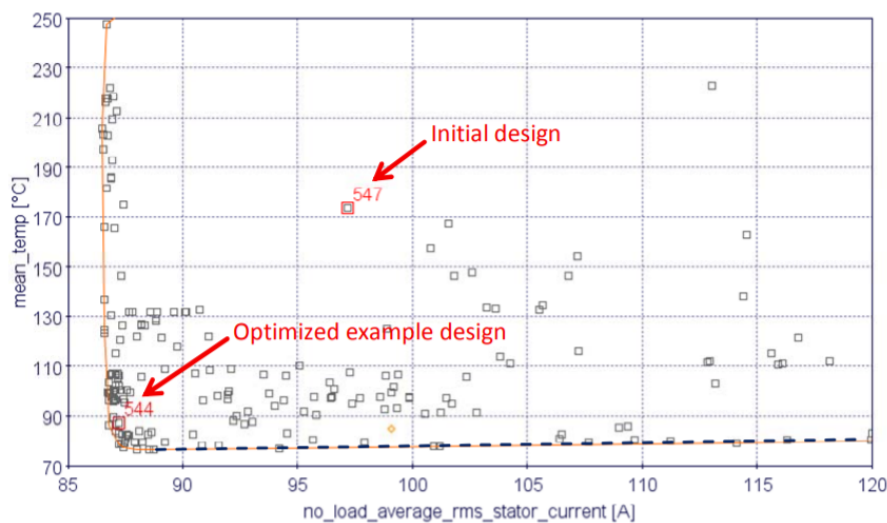
## 2.3 Výsledky optimalizace za účelem zvýšení výkonového využití u trakčního pohonu pro kolejová vozidla

Předmětem tohoto článku [5] je optimalizace konstrukčního provedení chladících kanálů s ohledem především na rozložení teplot a velikost ztrát. Optimalizační cyklus je zobrazen na Obrázku 2.6.



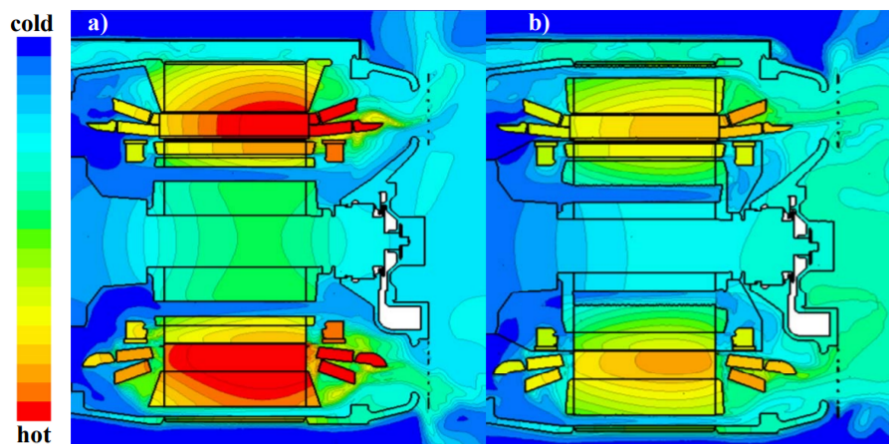
Obrázek 2.6: Optimalizační cyklus

Jako proměnné parametry pro optimalizační cyklus byly zvoleny rozměry chladících kanálů, jejich počet a umístění ve jhu statoru a rotoru. K vyhodnocení výsledků optimalizace byl využit poměr střední teploty a efektivní hodnoty proudu naprázdno. Na Obrázku 2.7 je zvýrazněný poměr pro původní návrh a poměr pro výsledný optimalizovaný návrh.



Obrázek 2.7: Poměr střední teploty a efektivní hodnoty proudu naprázdno pro jednotlivé výsledky optimalizace

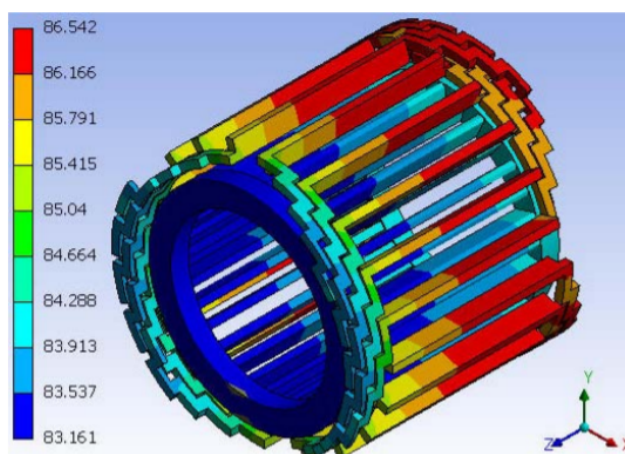
Pozitivní vliv optimalizace je zjevný i z Obrázku 2.8, kde je zobrazeno rozložení teplot pro původní návrh a pro optimalizovaný návrh. Optimalizací se docílilo značného snížení maximální dosahované teploty, a to o 15 [°C].



Obrázek 2.8: Rozložení teplot pro a) původní návrh b) optimalizovaný návrh

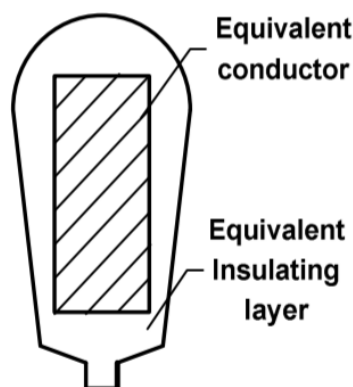
## 2.4 Analýza parametrů a výkonu asynchronního motoru pomocí tepelného výpočtu metodou konečných prvků

V tomto článku [6] se autoři zabývali výpočtem rozložení teplot v 5-fázovém asynchronním motoru o výkonu 5,5 [kW]. Výpočet byl realizován jako sdružená úloha elektromagnetického výpočtu a tepelného výpočtu v ustáleném stavu. Zajímavostí je použití ekvivalentního modelu statorového vinutí, kdy čela modelu vinutí jsou tvořena dvěma vrstvami v radiálním směru a čtyřmi vrstvami ve směru axiálním. Konkrétní uspořádání společně s vypočteným rozložením teplot je zobrazeno na Obrázku 2.9.



Obrázek 2.9: Ekvivalentní model statorového vinutí

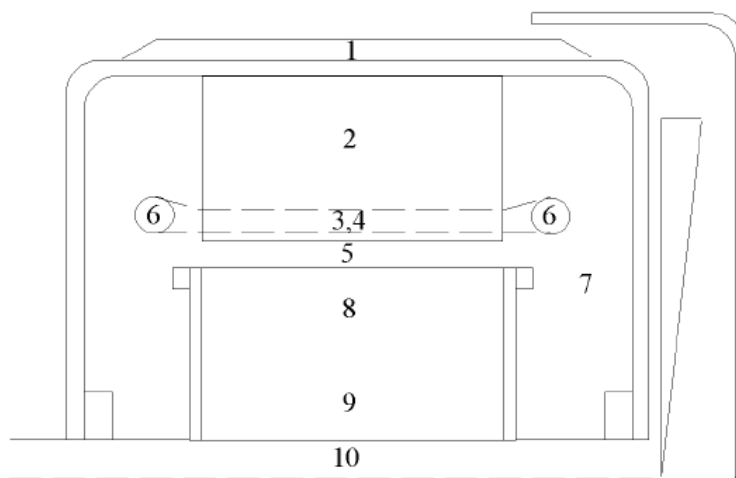
Další úpravou konstrukce modelu bylo nahrazení vodičů v drážce jedním ekvivalentním vodičem a nahrazení všech izolačních vrstev v drážce jednou souvislou ekvivalentní vrstvou izolace, která je tvořena výplní kolem vodiče v drážce. Stejně řešení je použito a popsáno v diplomové práci v kapitole 5.2.2.



Obrázek 2.10: Ekvivalentní drážková část zobrazená v příčném řezu

## 2.5 Kombinovaný elektromagnetický a tepelný návrh pro uzavřené asynchronní stroje

V tomto článku [7] se autoři zabývají elektromagnetickým a tepelným návrhem uzavřených asynchronních strojů. Na základě elektromagnetického výpočtu byla zjištěna hodnota ztrát v jednotlivých částech stroje a následně pomocí metody náhradní tepelné sítě byl vytvořen tepelný model analyzovaného motoru.



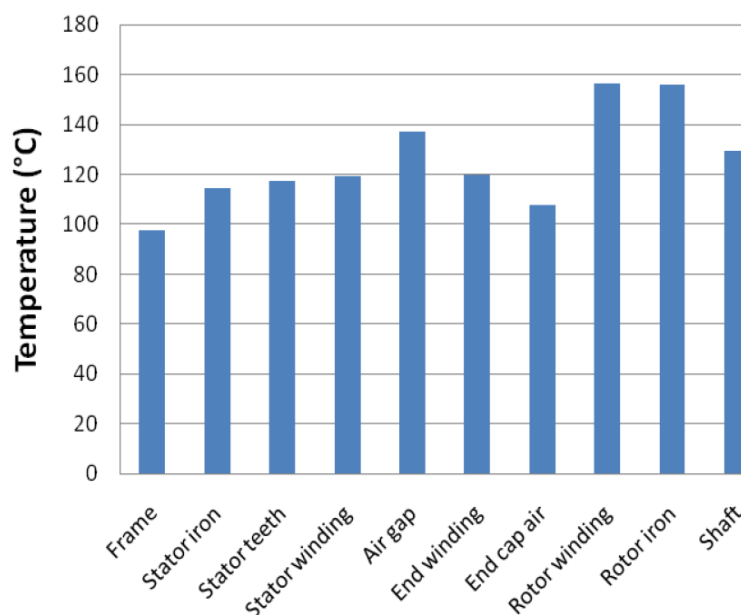
Obrázek 2.11: Popis umístění jednotlivých uzlů náhradní tepelné sítě

Umístění jednotlivých uzlů tepelné sítě je zobrazeno na Obrázku 2.11. Uzel 1 odpovídá kostře, uzel 2 jhu magnetického obvodu statoru, uzel 3 zubu magnetického obvodu statoru, uzel 4 statorovému vinutí, uzel 5 vzduchové mezeře, uzel 6 čelům statorového vinutí, uzel 8 kleci nakrátko, uzel 9 magnetickému obvodu rotoru a uzel 10 hřídeli.

Na základě vytvořené tepelné sítě byla sestavena matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  a vektor pravých stran  $\mathbf{P}$ . Výsledný vektor teplot byl získán pomocí vztahu:

$$\Delta\mathbf{T} = \mathbf{G}^{-1}\mathbf{P} \quad (2.1)$$

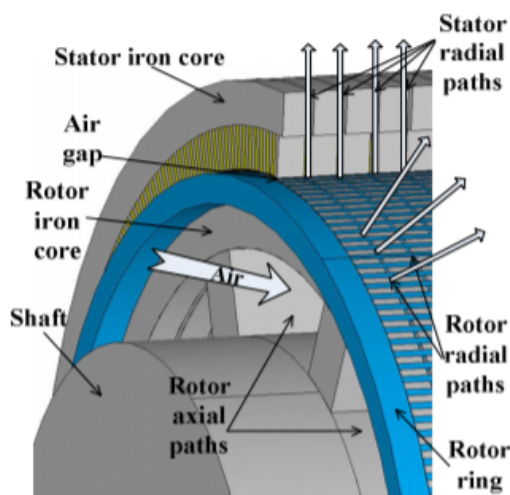
Na Obrázku 2.12 jsou zobrazené vypočtené teploty pro jednotlivé části stroje. Teplota statorového vinutí je v tomto případě necelých  $120^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 2.12: Výsledné teploty v jednotlivých částech stroje

## 2.6 Úprava struktury ventilačního systému u velkých motorů založená na analýze metodou konečných prvků

Tento článek [8] se zabývá výpočtem rozložení teplot 15-fázového 14-pólového asynchronního motoru o výkonu 10 [MW]. Vnější průměr statoru tohoto stroje je 2,6 [m]. Pro tento účel byla použita metoda konečných prvků. Celá úloha byla řešena jako sdružená 3-D analýza.

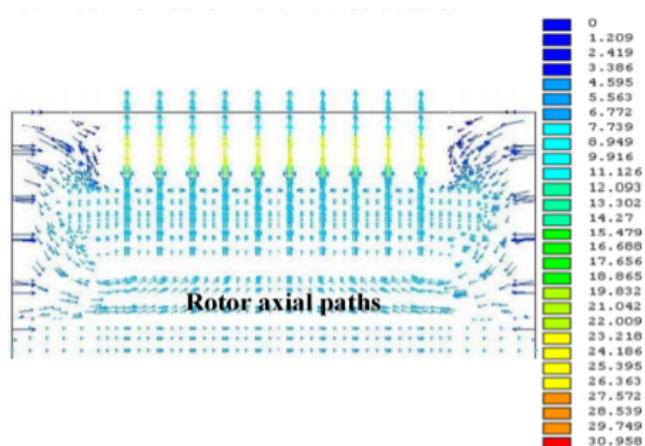


Obrázek 2.13: Upravené konstrukční uspořádání s chladicími kanály v rotoru

Na základě zadaných parametrů byl sestaven první model motoru. V tomto provedení byl vzduch do oblasti statoru a rotoru vháněn z obou konců stroje ve směru osy otáčení. Chlazení

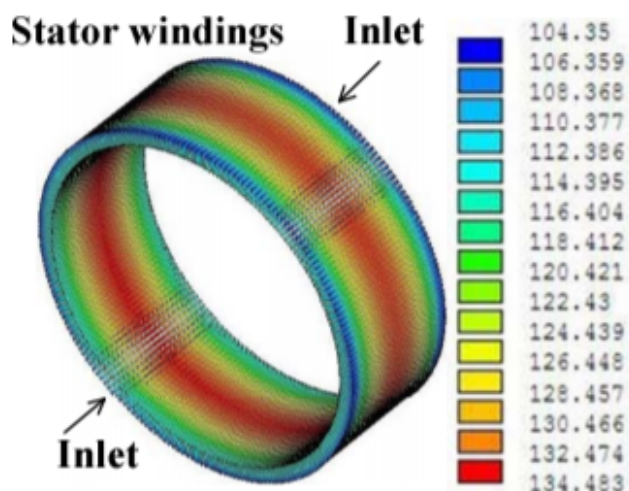
zajišťovaly radiální chladicí kanály umístěné ve statoru. Do těchto kanálů se chladicí vzduch dostává z oblasti vzduchové mezery.

Byla provedena analýza proudění chladicího vzduchu a rozložení teplot ve stroji a na základě těchto zjištění byla změněna konstrukce stroje. V rotoru byly podél hřídele vytvořeny axiální chladicí kanály. Dále pak byly vytvořeny radiální chladicí kanály, taktéž v rotoru, ústící do vzduchové mezery. Upravené konstrukční řešení je zobrazeno na Obrázku 2.13.



**Obrázek 2.14:** Zobrazení směru a rychlosti proudění chladicího vzduchu ve stroji s upravenou konstrukcí

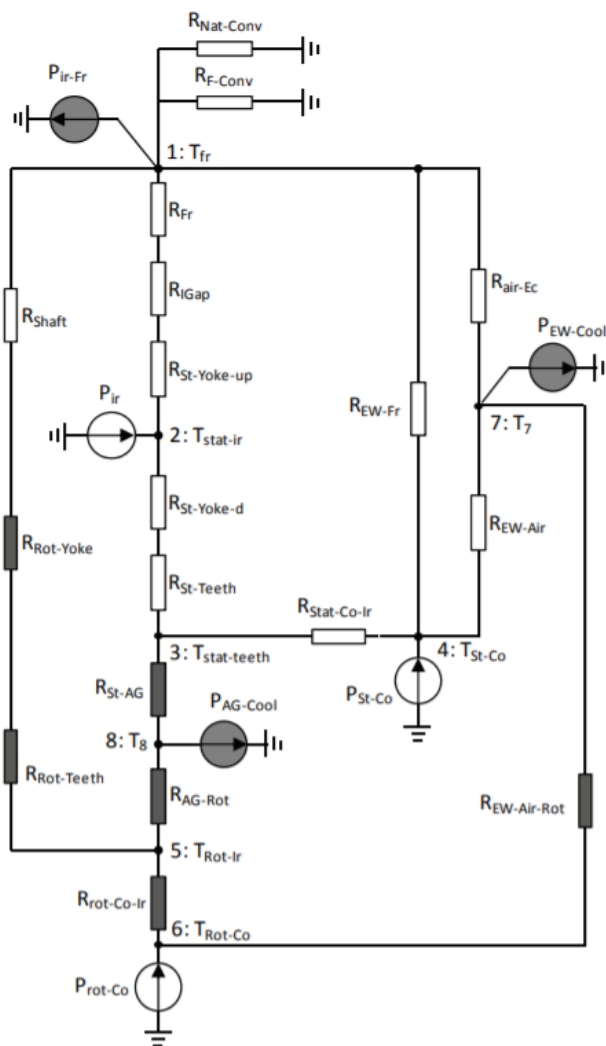
Tato konstrukční změna měla razantní vliv na proudění chladicího vzduchu ve stroji. Díky chladicím kanálům v rotoru se docílilo mnohem efektivnějšího chlazení. Teplota stále dosahuje maxima v polovině stroje jako v původním návrhu, je však razantně nižší. Bylo dosaženo poklesu maximální teploty o 27 % oproti původnímu návrhu na novou hodnotu 134 [°C]. Nové rozložení proudění chladicího vzduchu a nové rozložení teplot ve statorovém vinutí je zobrazeno na Obrázku 2.14 a 2.15.



**Obrázek 2.15:** Rozložení teplot ve statorovém vinutí ve stroji s upravenou konstrukcí

## 2.7 Tepelný model a analýza asynchronního motoru s vinutým rotorem

Předmětem tohoto článku [9] je řešení tepelného výpočtu metodou náhradní tepelné sítě. Výpočet byl proveden pro 6-pólový asynchronní stroj s vinutou kotvou o výkonu 2,8 [kW]. Na Obrázku 2.16 je zobrazen původní návrh tepelné sítě společně s nově přidanými prvky.



Obrázek 2.16: Upravená tepelná síť

Nově přidané prvky jsou na obrázku zvýrazněny tmavou barvou, jsou jimi tepelné odpory  $R_{rot-Co-Ir}$ ,  $R_{Ag-Rot}$ ,  $R_{St-AG}$ ,  $R_{Rot-Teeth}$ ,  $R_{Rot-Yoke}$  a  $R_{EW-Air-Rot}$ , dále pak přidané uzly číslo 7, 8 a nakonec zdroje chlazení  $P_{AG-Cool}$ ,  $P_{EW-Cool}$  a  $P_{ir-Fr}$ . Tyto přidané prvky pomohli k dosažení vysoké přesnosti výpočtu. Porovnání teplot hlavních částí stroje dosažených měřením s teplotami vypočtenými lze najít v Tabulce 2.2.



**Tabulka 2.2:** Porovnání naměřených a vypočtených teplot

	$T_{Frame} [^{\circ}C]$	$T_{StatorIron} [^{\circ}C]$	$T_{StatorWinding} [^{\circ}C]$	$T_{RotorWinding} [^{\circ}C]$
naměřeno	39,4	63,0	69,4	79,6
vypočteno	41,9	66,6	71,3	75,4
chyba [%]	6,5	5,8	2,7	-5,3

## 2.8 Shrnutí

Z výše zmíněných článků si lze odnést spoustu přínosných informací týkajících se tepelných výpočtů. Zejména je očividné, jak velký vliv má tento výpočet na nalezení optimálního návrhu stroje. Je zřejmé, že správným postupem a správnou úpravou ventilačního systému lze dosáhnout razantního snížení teploty v kritických částech stroje.

Do diplomové práce přinesly články cenné informace ohledně modelování tepelných úloh. Konkrétně byly v pozdějším výpočtu využity vztahy pro výpočet tepelných odporů z článku [9], dále pak matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  byla sestavena jako v případě článku [4] a volba umístění uzlů tepelné sítě je velmi podobná jako v článku [7]. Taktéž bylo při tvoření tepelného modelu pro výpočet metodou konečných prvků využito řešení ekvivalentní vrstvy izolace z článku [6].

## 3 Parametry analyzovaného stroje

Analyzovaným strojem je v tomto případě asynchronní motor s klecí nakrátko. Elektromagnetický návrh tohoto stroje byl proveden v diplomové práci Návrh trakčního asynchronního motoru pro kompaktní pohonnou jednotku od Dominika Hutery [10]. Jedná se o 3-fázový motor se šesti póly o výkonu 100 [kW]. Hlavní parametry stroje jsou uvedeny v Tabulce 3.1.

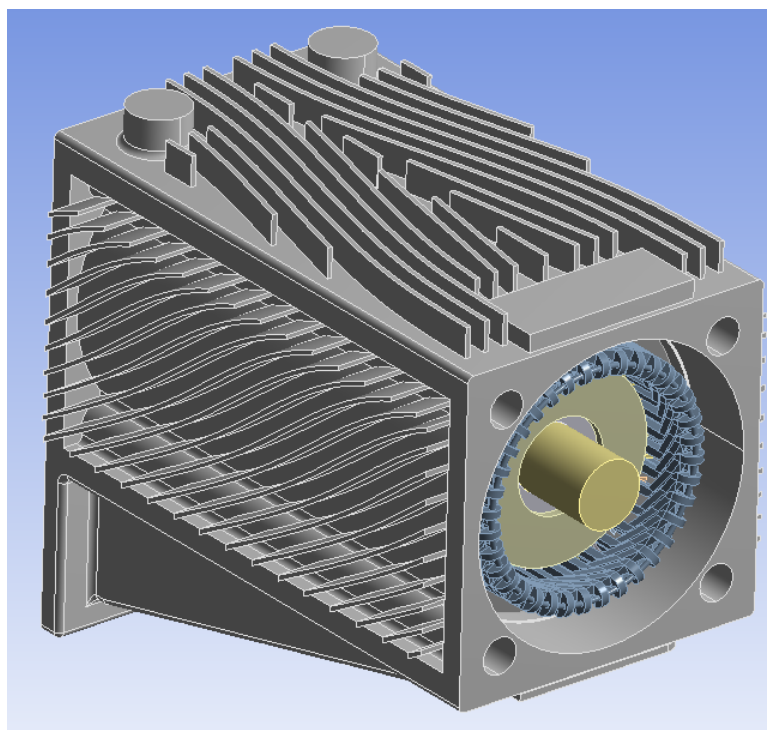
**Tabulka 3.1:** Hlavní parametry analyzovaného stroje [10]

výkon na hřídeli $P_2$	100 [kW]
sdužené napětí $U_s$	400 [V]
počet fází $m$	3
počet pólů $2p$	6
synchronní otáčky $n_s$	3450 [ $\frac{ot}{min}$ ]
jmenovitý proud $I_1 n$	170 [A]
záběrný proud $I_z$	853 [A]
jmenovitý moment $M_n$	246 [Nm]
účinnost $\eta$	94,59 [%]
druh vinutí	smyčkové, dvouvrstvé
spojení vinutí	Y
materiál klece nakrátko	Cu
počet drážek statoru	36
počet drážek rotoru	26

Kostra motoru je pokryta speciálně navrženými žebry se specifickým tvarem. Tento tvar a umístění žebry je navržen tak, aby zajišťoval ideální podmínky pro odvod tepla z motoru. Chlazení tohoto stroje je pouze pasivní a počítá s prouděním chladícího vzduchu kolem kostry při pohybu poháněného vozidla. Konstrukční řešení kompletního stroje je znázorněno na Obrázku 3.1. Hlavní rozměry tohoto stroje jsou zmíněny v Tabulce 3.2.

**Tabulka 3.2:** Hlavní rozměry analyzovaného stroje [10]

vnější průměr statoru $D_e$	0,24 [m]
vrtání statoru $D$	0,160 [m]
vzduchová mezera $\delta$	0,0005 [m]
vnější průměr rotoru $D_2$	0,159 [m]
průměr hřídele $D_h$	0.0552 [m]
délka plechového svazku statoru $l_1$	0.343 [m]



**Obrázek 3.1:** Analyzovaný stroj

## 4 Tepelný výpočet

Výsledkem tepelného výpočtu je zjištění teplot v jednotlivých částech stroje. Pokud je dosažená hodnota teploty moc vysoká, je potřeba provést změny ve ventilačním systému nebo snížit ztráty v příslušných částech stroje. Tyto změny však většinou znamenají větší rozměry a hmotnost stroje a tedy menší využití a vyšší cenu.

## 4.1 Šíření tepla

Šíření tepla probíhá třemi způsoby. Rozlišujeme šíření tepla jednak vedením, dále pak přestupem a posledním způsobem šíření tepla je sálání.

### 4.1.1 Vedení tepla

Vedení tepla se uplatňuje uvnitř látek. Charakteristickou veličinou pro vedení tepla je měrná tepelná vodivost  $\lambda$  [ $\frac{W}{mK}$ ]. Určení této fyzikální veličiny je naprosto bezproblémové, dokud uvažujeme homogenní těleso. Pokud je těleso nehomogenní, nastává složitější situace. Příklady nehomogenních tělesa v elektrických strojích jsou ovíjená izolace vodičů, plechový svazek a další podobně složitě části stoje. Zde hraje roli i technologie pracovního postupu. V Tabulce 4.1 jsou uvedeny příklady hodnot měrné tepelné vodivosti pro materiály běžně používané v elektrických strojích. [11]

**Tabulka 4.1:** Hodnoty měrné tepelné vodivosti pro materiály běžně používané v elektrických strojích

materiál	měrná tepelná vodivost $\lambda$ [ $\frac{W}{mK}$ ]
vzduch	0,0262 (při 25°C)
impregnovaný papír	0,17
mikanit	0,3
skelná vata	0,25
měď	400
plechový svazek v podélném směru	0,6
plechový svazek v příčném směru	30

Z uvedených hodnot měrné tepelné vodivosti je zřejmé, že nejhůře teplo vede vzduch. Naopak nejlépe vede teplo měď. Dalším zajímavým jevem je rozdíl mezi měrnou tepelnou vodivostí plechového svazku v podélném směru a ve směru příčném, kdy lépe je teplo vedeno ve směru příčném. To je dáno složením plechového svazku z tenkých a vzájemně odizolovaných plechů. V elektrických strojích se tato vlastnost projeví tak, že teplo je mnohem lépe vedeno ve směru radiálním než ve směru axiálním.

### 4.1.2 Přestup tepla

Přestup tepla se uplatňuje při šíření tepla z povrchu tělesa do okolního, zpravidla proudícího, prostředí. Tento typ šíření tepla je charakterizován součinitelem přestupu tepla  $\alpha$  [ $\frac{W}{m^2K}$ ]. Hodnota není vlastností látek, ale je závislá na fyzikálních vlastnostech ochlazovacího prostředí. Součinitel přestupu tepla je ovlivňován rychlostí a charakterem proudění, tedy zda je laminární či turbulentní, dále pak tlakem a také například kvalitou povrchu ochlazované plochy. [11]

V diplomové práci byl v případě výpočtu součinitelů přestupu tepla pro plochy nacházející se na rotoru použit výpočet z Nusseltova čísla. Pro tento výpočet je však potřeba nejdříve

zjistit hodnotu Reynoldsova čísla podle vztahu 4.1.

$$Re = \frac{D v}{\nu} \quad (4.1)$$

kde:

$D$  je průměr [m]  
 $\nu$  dynamická viskozita vzduchu ( $\nu = 1,95 \cdot 10^{-5} [\frac{m^2}{s}]$ )

Následně pak dosazením hodnoty Reynoldsova čísla do vztahu 4.2 získáváme Nusselotovo číslo, které je dosazeno do vztahu 4.3 a tím je získán konečný součinitel přestupu tepla pro danou plochu při známé obvodové rychlosti.

$$Nu = 0,21Re^{0,677} \quad (4.2)$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_{air}}{D} \quad (4.3)$$

kde:

$\lambda_{air}$  je tepelná vodivost vzduchu ( $\lambda_{air} = 0,0262 [\frac{W}{m K}]$ )

### 4.1.3 Sálání

Sálání představuje vyzařování tepla z povrchu tělesa do okolního prostředí. Uplatňuje se zde odraz ze sousedních povrchů a to zejména při vyšších teplotách. V případě elektrických strojů je vliv sálání zahrnut do přestupu tepla, díky vhodně zvolené hodnotě součinitele přestupu tepla.

## 4.2 Náhradní tepelné obvody

Pro tepelné výpočty se využívá náhradních tepelných obvodů, kdy je vytvořena tepelná síť z jednotlivých tepelných odporů. V tomto náhradním obvodu pak lze aplikovat analogické zákony jako v obvodech elektrických (analogii Ohmova zákona a Kirchhoffových zákonů).

### 4.2.1 Výpočet tepelných odporů

Rozlišujeme vztahy pro výpočet tepelného odporu podle druhu šíření tepla a v případě odporu vedením dále rozlišujeme, zda v tělese vznikají ztráty.

Odpor přestupem tepla z povrchu do okolního prostředí:

$$R_t = \frac{1}{\alpha S_{pr}} \quad (4.4)$$

kde:

$\alpha$  je součinitel přestupu tepla [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]  
 $S_{pr}$  velikost ochlazovací plochy [ $m^2$ ]

Odpor vedením tepla v tělese, kde nevznikají ztráty a tepelný tok jím pouze prochází:

$$R_t = \frac{l}{\lambda S_v} \quad (4.5)$$

kde:

$l$	je délka úseku ve směru šíření tepelného toku [m]
$\lambda$	měrná tepelná vodivost materiálu [ $\frac{W}{m K}$ ]
$S_v$	průřez tepelného vodiče [ $m^2$ ]

V případě, kdy počítáme odpor vedením tepla pro těleso, v kterém vznikají ztráty, je nutné rozlišit, zda výsledkem výpočtu bude teplota maximální a nebo teplota střední. V případě maximální teploty použijeme vztah 4.6 a v případě teploty střední použijeme vztah 4.7. [11]

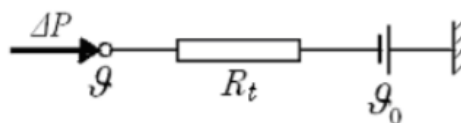
$$R_t = \frac{l}{2 \lambda S_v} \quad (4.6)$$

$$R_t = \frac{l}{3 \lambda S_v} \quad (4.7)$$

## 4.2.2 Jednoduchý tepelný obvod

Jednoduchý tepelný obvod je tvořen tepelným odporem, zdrojem tepelného toku a danou teplotou okolí. Schéma tohoto obvodu je uvedeno na Obrázku 4.1. Řešení tohoto jednoduchého tepelného obvodu je provedeno analogicky k obvodu elektrickému, kdy aplikujeme I. Kirchhoffův zákon a dojdeme ke vztahu:

$$\Delta P = \frac{\vartheta - \vartheta_0}{R_t} \quad (4.8)$$



**Obrázek 4.1:** Schéma jednoduchého tepelného obvodu [11]

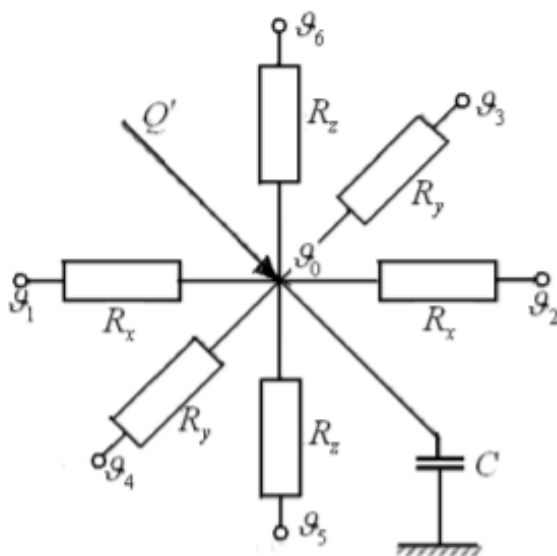
Lehce složitějším, ale pro řešení komplexních tepelných obvodů názornější, je popis elementárního šestipólu. Tento šestipól se skládá z jednoho uzlu, celkem šesti tepelných odporů a tepelné kapacity. Tepelná kapacita se uplatňuje pouze v přechodových stavech. Rovnice popisující tepelný výpočet pro tento uzel je dána vztahem:

$$\frac{\vartheta_0 - \vartheta_1}{R_x} + \frac{\vartheta_0 - \vartheta_2}{R_x} + \frac{\vartheta_0 - \vartheta_3}{R_y} + \frac{\vartheta_0 - \vartheta_4}{R_y} + \frac{\vartheta_0 - \vartheta_5}{R_z} + \frac{\vartheta_0 - \vartheta_6}{R_z} = Q' - C \frac{d\vartheta}{dt} \quad (4.9)$$

kde:

$\vartheta_0 - \vartheta_1$	je rozdíl mezi teplotou uzlu a okolní teplotou [K]
$R_{x,y,z}$	tepelné odpory mezi uzlem a okolím [ $\frac{K}{W}$ ]

- $Q'$  množství tepla vzniklého v uvažovaném elementu [ $J$ ]  
 $C$  tepelná kapacita [ $\frac{J}{K}$ ]



Obrázek 4.2: Elementární šestipól [11]

### 4.2.3 Řešení složitých tepelných sítí

Při řešení tepelných výpočtů elektrických stojů tvoří každá část stroje jeden uzel v tepelné síti. Počet těchto uzlů závisí na konstrukčním uspořádání, složitosti ventilačního systému a na dalších parametrech. Pro každý takový bod je sestavena obdobná rovnice jako je 4.9. Efektivním řešením této soustavy rovnic je vytvoření matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  společně s vektorem pravých stran  $\mathbf{P}$ . Pomocí rovnice 4.10 dostaneme výsledné teploty jednotlivých uzlů. [12]

$$\mathbf{T} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{P} \quad (4.10)$$

Vektor  $\mathbf{T}$  je naplněn teplotami v jednotlivých uzlech tepelné sítě. Tento vektor je výsledkem celého tepelného výpočtu.

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ T_{N-1} \\ T_N \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Prvky matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  jsou tvořeny zápornou převrácenou hodnotou tepelných odporů mezi jednotlivými uzly. Prvky diagonály jsou pak naplněny sumou kladných hodnot prvků každé jednotlivé řady matice sečtené s hodnotou tepelné vodivosti přestupu z příslušného uzlu do okolí. Ve výsledku je matice souměrná podle diagonály. [12]

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & -G_{1,2} & \dots & \dots & -G_{1,N-1} & -G_{1,N} \\ -G_{2,1} & G_{2,2} & \dots & \dots & -G_{2,N-1} & -G_{2,N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & & & \vdots \\ \vdots & \vdots & & \ddots & \vdots & \vdots \\ -G_{N-1,1} & -G_{N-1,2} & \dots & \dots & G_{N-1,N-1} & -G_{N-1,N} \\ -G_{N,1} & -G_{N,2} & \dots & \dots & -G_{N,N-1} & G_{N,N} \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

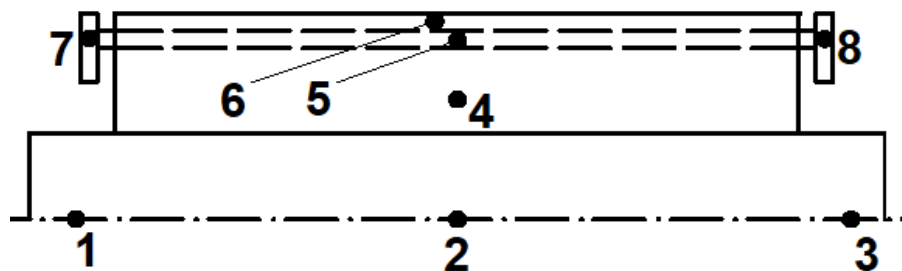
$$\begin{aligned} G_{1,1} &= \sum_{j=1}^N G_{1,j} + G_{1,0} \\ G_{2,2} &= \sum_{j=1}^N G_{2,j} + G_{2,0} \\ &\vdots \\ G_{N-1,N-1} &= \sum_{j=1}^N G_{N-1,j} + G_{N-1,0} \\ G_{N,N} &= \sum_{j=1}^N G_{N,j} + G_{N,0} \end{aligned}$$

Vektor pravých stran  $\mathbf{P}$  je pro tepelný výpočet ustálených stavů naplněn ztrátami vznikajícími v určitém uzlu společně se součinem tepelné vodivosti z uzlu do okolí s teplotou okolí.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_1 + G_{1,0} T_0 \\ P_2 + G_{2,0} T_0 \\ \vdots \\ \vdots \\ P_{N-1} + G_{N-1,0} T_0 \\ P_N + G_{N,0} T_0 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

### 4.3 Tepelná síť rotoru

Pro názornost bude příklad výpočtu předveden nejdříve na tepelném výpočtu samotného rotoru. Na Obrázku 4.3 je zobrazen podélný řez rotorem a jsou zde popsány jednotlivé uzly tepelné sítě. Celkový počet těchto uzlů je 8. Uzel číslo 1 odpovídá jednomu konci hřídele, číslo 2 středu hřídele, číslo 3 druhému konci hřídele, číslo 4 jhu magnetického obvodu rotoru, číslo 5 vodičům v drážce, číslo 6 zubům magnetického obvodu rotoru a číslo 7 a 8 kruhům nakrátko.



Obrázek 4.3: Podélný řez rotorem s popisem jednotlivých uzlů tepelné sítě

V tomto případě uvažujeme, že rotor je samostatně umístěn v prostoru, kdy je z povrchu stroje teplo odváděno do okolního prostředí přestupem tepla. Teplota okolního vzduchu je  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rotor se v tomto případě točí  $3450\text{ }[\frac{\text{ot}}{\text{min}}]$ .

Součinitele přestupu tepla je potřeba vypočítat jednak pro plochy na koncích hřídele, dále pak pro kruhy nakrátko a pro povrch, odkud přestupuje teplo do vzduchové mezery. V případě kruhů nakrátko rozlišujeme vnější plochu kruhu soustřednou s osou otáčení a dále pak plochu kolmou na tuto osu.

Výpočet jednotlivých součinitelů přestupu tepla je proveden na základě znalosti Nusseltova čísla. K výpočtu je nejdříve potřeba vypočítat obvodovou rychlost ochlazované plochy a následně Reynoldsovo číslo. V případě ploch kolmých na osu otáčení je k výpočtu obvodové rychlosti použit její střední poloměr. Pro názornost je zde uveden příklad výpočtu součinitele přestupu tepla pro vnější plochu rotoru, odkud přestupuje teplo do vzduchové mezery:

$$v = \frac{2\pi n}{60} \cdot R = \frac{2\pi \cdot 3450}{60} \cdot 0,0795 = 28,722\text{ }[m \cdot s^{-1}] \quad (4.14)$$

kde:

- $v$  je obvodová rychlost  $[m \cdot s^{-1}]$
- $n$  jmenovité otáčky ( $n = 3450\text{ }[\frac{\text{ot}}{\text{min}}]$ )
- $R$  vnější poloměr rotoru ( $R = 0,0795\text{ }[m]$ )

$$Re = \frac{D v}{\nu} = \frac{0,159 \cdot 28,722}{1,95 \cdot 10^{-5}} = 2,3419 \cdot 10^5\text{ }[-] \quad (4.15)$$

kde:

- $Re$  je Reynoldsovo číslo  $[-]$
- $D$  průměr ( $D = 0,159\text{ }[m]$ )
- $\nu$  dynamická viskozita vzduchu ( $\nu = 1,95 \cdot 10^{-5}\text{ }[\frac{m^2}{s}]$ )

$$Nu = 0,21 Re^{0,677} = 0,21 \cdot (2,3419 \cdot 10^5)^{0,677} = 906,6156\text{ }[-] \quad (4.16)$$

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_{air}}{D} = \frac{906,6156 \cdot 0,0262}{0,159} = 149,392\text{ } \left[ \frac{W}{m^2 K} \right] \quad (4.17)$$



kde:

$Nu$	je Nusseltovo číslo [-]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]
$\lambda_{air}$	tepelná vodivost vzduchu ( $\lambda_{air} = 0,0262[\frac{W}{m K}]$ )

Výsledkem tohoto výpočtu je součinitel přestupu tepla pro plochu, odkud přestupuje teplo z rotoru do vzduchové mezery. Kompletní seznam vypočtených součinitelů přestupu tepla je sepsán společně s hodnotami vzdáleností od osy otáčení, obvodovou rychlostí, Reynoldsovým číslem a Nusseltovým číslem v Tabulce 4.2.

**Tabulka 4.2:** Vypočtené hodnoty součinitele přestupu tepla

	vzdálenost od osy $R$ [mm]	obvodová rychlost $v$ [ $\frac{m}{s}$ ]	Reynoldsovo číslo $Re$ [-]	Nusseltovo číslo $Nu$ [-]	součinitel přestupu tepla $\alpha$ [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]
plocha hřídele mimo magnetický obvod	27,60	9,971	$2,8227 \cdot 10^4$	216,4298	102,73
plocha kruhu nakrátko kolmá na osu otáčení	58,48	21,128	$1,2672 \cdot 10^5$	598,2105	134,00
vnější plocha kruhu nakrátko	78,50	28,3607	$2,2834 \cdot 10^5$	891,2090	148,72
vnější plocha rotoru	79,50	28,722	$2,3419 \cdot 10^5$	906,6156	149,39

Je zřejmé, že čím vyšší hodnota vzdálenosti od osy otáčení, tím vyšší hodnota obvodové rychlosti a tím vyšší součinitel přestupu tepla. To znamená, že podle součinitele přestupu tepla jsou nejlepší podmínky pro odvod tepla na povrchu rotoru.

Při znalosti jednotlivých součinitelů přestupu tepla a dalších parametrů stroje je možné přistoupit k výpočtu jednotlivých tepelných odporů. V prvním kroku budou určeny tepelné odpory v hřídeli. Zde se nachází uzel 1 (jeden konec hřídele), uzel 2 (střed hřídele) a uzel 3 (druhý konec hřídele). Je nutné určit jednak odpory mezi těmito uzly, dále odpory z konců hřídele do okolí a odpor ze středu hřídele do uzlu 4 (jho magnetického obvodu rotoru).

$$R_{1,2} = \frac{\frac{L_{hridel}}{2}}{\lambda_{hridel} \frac{\pi D_1^2}{4}} + \frac{\frac{L_{paket}}{2}}{\lambda_{hridel} \frac{\pi D_1^2}{4}} \quad (4.18)$$

$$R_{1,2} = R_{2,3} \quad (4.19)$$

$$R_{1,out} = \frac{1}{\alpha_{hridel} 2\pi r_1 L_{hridel}} + \frac{r_1}{\lambda_{hridel} \pi r_1 L_{hridel}} \quad (4.20)$$

$$R_{3,out} = R_{1,out} \quad (4.21)$$

$$R_{2,4} = \frac{r_1}{\lambda_{hridel} \pi r_1 L_{paket}} + \frac{r_3 - r_1}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi \left(\frac{r_3 - r_1}{2} + r_1\right) L_{paket}} \quad (4.22)$$

kde:

$L_{hridel}$	je délka hřídele přesahující jeho magnetického obvodu rotoru [m]
$L_{paket}$	délka plechového svazku [m]
$\lambda_{hridel}$	měrná tepelná vodivost hřídele [ $\frac{W}{m K}$ ]
$\alpha_{hridel}$	součinitel přestupu tepla do okolí [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]
$D_1$	průměr hřídele [m]
$r_1$	poloměr hřídele [m]
$r_3$	poloměr od středu do půlky jha [m]

Dále pak doplníme zbylé tepelné odpory spojené s uzlem 4, a to odpor mezi uzlem 4, uzlem 5 (vodiče v drážce rotoru) a uzlem 6 (zuby magnetického obvodu rotoru).

$$R_{4,5} = \frac{r_4 - r_3}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi \left(\frac{r_4 - r_3}{2} + r_3\right) L_{paket}} + \frac{\frac{h_{d\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Cu} b_{d\_rotor} L_{paket} Q_2} \quad (4.23)$$

$$R_{4,6} = \frac{r_4 - r_3}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi \left(\frac{r_4 - r_3}{2} + r_3\right) L_{paket}} + \frac{\frac{h_{z\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} b_{z\_rotor} L_{paket} Q_2} \quad (4.24)$$

kde:

$\lambda_{Fe\_rad}$	je měrná tepelná vodivost plechového svazku v radiálním směru [ $\frac{W}{m K}$ ]
$\lambda_{Cu}$	měrná tepelná vodivost měděného vodiče [ $\frac{W}{m K}$ ]
$h_{d\_rotor}$	výška drážky rotoru [m]
$h_{z\_rotor}$	výška zubu rotoru [m]
$b_{d\_rotor}$	šířka drážky rotoru [m]
$h_{z\_rotor}$	šířka zubu rotoru [m]
$Q_2$	počet drážek rotoru

Uzel 5 a uzlem 6 jsou také vzájemně propojeny. Jde o přechod mezi měděnými vodiči v drážce a zuby magnetického obvodu rotoru.

$$R_{5,6} = \frac{\frac{b_{d\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Cu} 2 h_{d\_rotor} L_{paket} Q_2} + \frac{\frac{b_{z\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2 h_{z\_rotor} L_{paket} Q_2} \quad (4.25)$$

S uzlem 5 jsou také spojené uzly 7 a 8 (oba kruhy klece nakrátko). Tyto odpory jsou tvořeny tepelnými odpory vedením tepla podél drážky v měděných vodičích.

$$R_{5,7} = \frac{\frac{L_{paket}}{2} + L_{paket-kruh}}{3 \lambda_{Cu} S_{Cu\_rotor} Q_2} \quad (4.26)$$

$$R_{5,8} = R_{5,7} \quad (4.27)$$

kde:

$L_{paket-kruh}$  je délka vodiče mezi koncem drážky a kruhem nakrátko [m]  
 $S_{Cu\_rotor}$  průřez vodiče rotorové klece nakrátko [m<sup>2</sup>]

A posledními zbývající tepelnými odpory v rotoru jsou odpory do okolí z uzlů 5, 6, 7 a 8. Kdy odpory z uzlů 7 a 8 tvoří paralelní spojení jednak odporu přestupem z plochy kruhu nakrátko kolmé na osu otáčení a dále odporu přestupem z vnějšího okraje kruhu nakrátko. Tyto plochy jsou znázorněny dále v diplomové práci na Obrázku 5.6.

$$R_{5,out} = \frac{\frac{h_{d\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Cu} b_{d\_rotor} L_{paket} Q_2} + \frac{1}{\alpha_{delta\_rotor} b_{d\_rotor} L_{paket} Q_2} \quad (4.28)$$

$$R_{6,out} = \frac{\frac{h_{z\_rotor}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} b_{z\_rotor} L_{paket} Q_2} + \frac{1}{\alpha_{delta\_rotor} b_{z\_rotor} L_{paket} Q_2} \quad (4.29)$$

$$R_{7a,out} = \frac{1}{\alpha_{kruh1} \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4}} \quad (4.30)$$

$$R_{7b,out} = \frac{1}{\alpha_{kruh2} \pi D_o b_{kruh}} \quad (4.31)$$

$$R_{7,out} = \frac{R_{7a,15} \cdot R_{7b,15}}{R_{7a,15} + R_{7b,15}} \quad (4.32)$$

$$R_{8,out} = R_{7,out} \quad (4.33)$$

kde:

$\alpha_{delta\_rotor}$  je součinitel přestupu tepla z povrchu rotoru do okolí [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]  
 $\alpha_{kruh1}$  součinitel přestupu tepla z plochy kruhu nakrátko kolmé na osu otáčení do okolí [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]  
 $\alpha_{kruh2}$  součinitel přestupu tepla z vnějšího okraje kruhu nakrátko do okolí [ $\frac{W}{m^2 K}$ ]  
 $D_o$  vnější průměr kruhu nakrátko [m]  
 $D_i$  vnitřní průměr kruhu nakrátko [m]  
 $b_{kruh}$  šířka kruhu nakrátko [m]

S takto známými tepelnými odpory lze vytvořit matici tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  a vektor pravých stran  $\mathbf{P}$ , k tomu je však potřeba sestavit, podle analogie I. Kirchhoffova zákona, příslušné rovnice.

$$(G_{1,2} + G_{1,out})T_1 - G_{1,2}T_2 = G_{1,out}T_0 \quad (4.34)$$

$$-G_{1,2}T_1 + (G_{1,2} + G_{2,3})T_2 - G_{2,3}T_3 - G_{2,4}T_4 = 0 \quad (4.35)$$

$$-G_{2,3}T_2 + (G_{2,3} + G_{3,out})T_3 = G_{3,out}T_0 \quad (4.36)$$

$$-G_{2,4}T_2 + (G_{2,4} + G_{4,5} + G_{4,6})T_4 - G_{4,5}T_5 - G_{4,6}T_6 = P_{Fe\_j} \quad (4.37)$$

$$-G_{4,5}T_4 + (G_{4,5} + G_{5,6} + G_{5,7} + G_{5,8} + G_{5,out})T_5 - G_{5,6}T_6 - G_{5,7}T_7 - G_{5,8}T_8 = P_{Cu\_d} + G_{5,out}T_0 \quad (4.38)$$

$$-G_{4,6}T_4 - G_{5,6}T_6 + (G_{4,5} + G_{5,6} + G_{6,out})T_6 = P_{Fe\_z} + G_{6,out}T_0 \quad (4.39)$$

$$-G_{5,7}T_5 + (G_{5,7} + G_{7,out})T_7 = \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} + G_{7,out}T_0 \quad (4.40)$$

$$-G_{5,8}T_5 + (G_{5,8} + G_{8,out})T_7 = \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} + G_{8,out}T_0 \quad (4.41)$$

$$\mathbf{G} = \begin{bmatrix} G_{1,1} & -G_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -G_{1,2} & G_{2,2} & -G_{2,3} & -G_{2,4} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_{2,3} & G_{3,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -G_{2,4} & 0 & G_{4,4} & -G_{4,5} & -G_{4,6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -G_{4,5} & G_{5,5} & -G_{5,6} & -G_{5,7} & -G_{5,8} \\ 0 & 0 & 0 & -G_{4,6} & -G_{5,6} & G_{6,6} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{5,7} & 0 & G_{7,7} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{5,8} & 0 & 0 & G_{8,8} \end{bmatrix} \quad (4.42)$$

$$G_{1,1} = G_{1,2} + G_{1,out}$$

$$G_{2,2} = G_{1,2} + G_{2,3}$$

$$G_{3,3} = G_{2,3} + G_{3,out}$$

$$G_{4,4} = G_{2,4} + G_{4,5} + G_{4,6}$$

$$G_{5,5} = G_{4,5} + G_{5,6} + G_{5,7} + G_{5,8} + G_{5,out}$$

$$G_{6,6} = G_{4,5} + G_{5,6} + G_{6,out}$$

$$G_{7,7} = G_{5,7} + G_{7,out}$$

$$G_{8,8} = G_{5,8} + G_{8,out}$$

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} G_{1,out}T_0 \\ 0 \\ G_{3,out}T_0 \\ 0 \\ P_{Cu\_d} + G_{5,out}T_0 \\ P_{Fe\_z} + G_{6,out}T_0 \\ \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} + G_{7,out}T_0 \\ \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} + G_{8,out}T_0 \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

kde:

$P_{Cu\_d}$	jsou ztráty vznikající v drážkové části vodiče [W]
$P_{Cu\_kruh}$	ztráty vznikající v kruhu nakrátko [W]
$P_{Fe\_z}$	ztráty vznikající v zubech magnetického obvodu [W]

K rozdělení Jouleových ztrát v rotoru  $\Delta P_{j2}$  na ztráty vznikající v drážkové části  $P_{Cu\_d}$  a ztráty vznikající v kruhu nakrátko  $P_{Cu\_kruh}$  je použit poměr délek těchto vodičů. Ztráty vznikající v zubech magnetického obvodu  $P_{Fe\_z}$  jsou rovny součtu pulsních ztrát v rotoru  $\Delta P_{p2}$  a povrchových ztrát v rotoru  $\Delta P_{\delta p2}$ . Konkrétní hodnoty všech ztrát vznikajících v rotoru jsou uvedeny v Tabulce 4.3.

**Tabulka 4.3:** Výpis ztrát v rotoru

	číslo uzlu	$\Delta P$ [W]
ztráty v drážkové části $P_{Cu\_d}$	5	639
ztráty v kruhu nakrátko $P_{Cu\_kruh}$	7, 8	11
ztráty v zubech magnetického obvodu $P_{Fe\_z}$	6	483

### 4.3.1 Výsledné teploty získané řešením tepelné sítě rotoru

Řešením tepelné sítě rotoru byly dosaženy výsledky uvedené v Tabulce 4.4. Z této tabulky lze určit, že nejvyšších hodnot (přibližně 92 [°C]) dosahuje teplota v uzlu 4 (jho magnetického obvodu rotoru), uzlu 5 (drážková část klece nakrátko) a uzlu 6 (zuby magnetického obvodu rotoru). Lze tedy konstatovat, že v tomto případě je nejvyšší teplota lokalizována v blízkosti povrchu rotoru na ose souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení. To je způsobeno tím, že ztráty vznikající v rotoru jsou lokalizovány do míst blízkých k povrchu rotoru. Jsou jimi ztráty vznikající v drážkové části  $P_{Cu\_d}$  a ztráty vznikající v zubech magnetického obvodu  $P_{Fe\_z}$ .

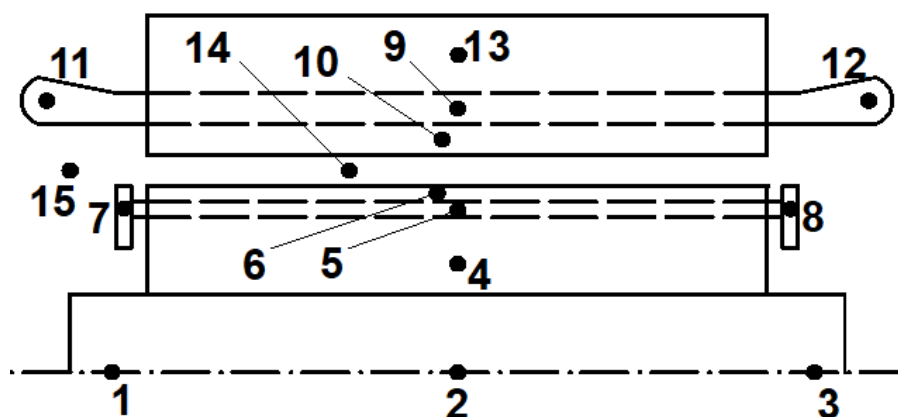
Pokud si totiž prohlédneme teplotu v uzlu 2 (střed hřídele), vidíme, že teplota směrem do středu stroje klesá. Stejně tak pokud si prohlédneme teploty v uzlech 7 a 8 (kruhy nakrátko), lze pozorovat, že směrem ke koncům stroje teplota také klesá. Tyto poklesy nejsou sice nijak zásadní, ale jsou zřejmé. Pokud si prohlédneme teploty uzlů 1 a 3 (části hřídele mimo magnetický obvod rotoru), je patrné, že pokles teploty směrem ke koncům stroje je zde už mnohem znatelnější. Celkově lze říci, že rozložení teploty v rotoru je souměrné podle osy souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení.

**Tabulka 4.4:** Výsledné teploty při řešení rotoru

	číslo uzlu	teplota [ $^{\circ}\text{C}$ ]
část hřídele mimo magnetický obvod rotoru	1	46,88
střed hřídele	2	91,51
část hřídele mimo magnetický obvod rotoru	3	46,88
žho magnetického obvodu rotoru	4	92,34
drážková část klece nakrátko	5	92,39
zuby magnetického obvodu rotoru	6	92,37
kruh nakrátko	7	91,22
kruh nakrátko	8	91,22

## 4.4 Tepelná síť kompletního motoru

K řešení tepelné sítě celého stroje je potřeba náhradní tepelný obvod následně rozšířit o další části nacházející se ve statorové části stroje. Kompletní motor s vyznačenými jednotlivými uzly je zobrazen v podélném řezu na Obrázku 4.4. Po rozšíření náhradního tepelného obvodu obsahuje tepelná síť 15 uzlů. Popis uzlů 1 až 8 je zmíněn v Kapitole 4.3. Dále pak uzel číslo 9 odpovídá drážkové části vodičů statorového vinutí, číslo 10 zubům magnetického obvodu statoru, číslo 11 a 12 čelům statorového vinutí, číslo 13 žhu magnetického obvodu statoru, číslo 14 vzduchové mezeře a číslo 15 vzduchu ve stroji kolem čel, kruhů a hřídele.

**Obrázek 4.4:** Podélný řez kompletním motorem s popisem jednotlivých uzlů tepelné sítě

K řešení kompletního stroje jsou využity hodnoty tepelných odporů v rotoru. Je však potřeba upravit strukturu této části tepelné sítě. Vzhledem k tomu, že už neuvažujeme samostatný rotor ve volném prostoru, ale kompletní stroj, uzly 1 a 3 (konce hřídele) a uzly 7 a 8 (kruhy nakrátko) nejsou již nadále místem přestupu tepla do volného prostředí, ale jsou spojeny s uzlem 15 (vzduchem ve stroji kolem čel, kruhů a hřídele), tím pádem se z tepelných odporů  $R_{1,out}$ ,  $R_{3,out}$ ,  $R_{7,out}$  a  $R_{8,out}$  stávají odpory  $R_{1,15}$ ,  $R_{3,15}$ ,  $R_{7,15}$  a  $R_{8,15}$ .

Stejným případem jsou odpory rotoru z uzlu 5 (drážková část vodičů rotoru) a uzlu 6 (zuby magnetického obvodu rotoru), kdy tyto uzly už nadále nejsou místem přestupu tepla do okolí,

ale jsou spojeny s uzlem 14 (vzduchová mezera). Tím pádem se z tepelných odporů  $R_{5,out}$  a  $R_{6,out}$  stávají odpory  $R_{5,14}$  a  $R_{6,14}$ .

Pokud tedy budeme postupovat směrem ze vzduchové mezery dále směrem ke statoru, jako první tepelný odpor přichází na řadu tepelný odpor mezi uzly 14 a 9 (drážková část statorového vinutí). Dále pak tepelný odpor taktéž z uzlu 14, ale tentokrát do uzlu 10 (zuby magnetického obvodu). Pro výpočet těchto tepelných odporů je potřeba znát hodnotu součinitele přestupu tepla mezi vzduchovou mezerou a státorem. Tato hodnota je určena jako 95% ze součinitele přestupu tepla z rotoru do vzduchové mezery, tedy  $141,92 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ .

$$R_{14,9} = \frac{\frac{h_{d\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Cu} b_{d\_stator} L_{paket} Q_1} + \frac{1}{\alpha_{delta\_stator} b_{d\_stator} L_{paket} Q_1} + \frac{h_{izolace}}{\lambda_{izolace} b_{d\_stator} L_{paket} Q_1} \quad (4.44)$$

$$R_{14,10} = \frac{\frac{h_{z\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} b_{z\_stator} L_{paket} Q_1} + \frac{1}{\alpha_{delta\_stator} b_{z\_stator} L_{paket} Q_1} \quad (4.45)$$

kde:

$h_{d\_stator}$	je výška drážky statoru [m]
$h_{z\_stator}$	výška zubu statoru [m]
$b_{d\_stator}$	šířka drážky statoru [m]
$h_{z\_stator}$	šířka zubu statoru [m]
$h_{izolace}$	šířka izolace [m]
$\alpha_{delta\_stator}$	součinitel přestupu tepla ze vzduchové mezery do statoru $\left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$
$\lambda_{izolace}$	měrná tepelná vodivost izolace $\left[ \frac{W}{m K} \right]$
$Q_1$	počet drážek statoru

Uzly 9 a 10 jsou také vzájemně propojeny a tvoří tepelný odpor mezi drážkou statoru a zuby statoru.

$$R_{9,10} = \frac{\frac{b_{d\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Cu} 2 h_{d\_rotor} L_{paket} Q_1} + \frac{\frac{b_{z\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2 h_{z\_stator} L_{paket} Q_1} + \frac{h_{izolace}}{\lambda_{izolace} 2 h_{d\_stator} L_{paket} Q_1} \quad (4.46)$$

Další spojením uzlu 9 je k uzlům 11 a 12 (čela statorového vinutí). Tento tepelný odpor představuje odpor vedením tepla v měděných vodičích statorového vinutí ze středu stroje směrem k čelům statorového vinutí.

$$R_{9,11} = \frac{\frac{L_{paket}}{2} + \frac{L_{celo}}{2}}{3 \lambda_{Cu} S_{Cu\_stator} Q_1} \quad (4.47)$$

$$R_{9,12} = R_{9,11} \quad (4.48)$$

kde:

$L_{celo}$  je délka čela statorového vinutí [ $m$ ]  
 $S_{Cu\_stator}$  průřez mědi v drážce statoru [ $m^2$ ]

Uzly 10 a 11 jsou spojeny s uzlem 15 a tvoří tepelný odpor mezi čely statorového vinutí a vzduchem ve stroji. K výpočtu je potřeba znát součinitel přestupu tepla z čel, ten je určen jako 80 % ze součinitele přestupu tepla z vnějšího okraje kruhu nakrátko, tedy  $118,97 \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ .

$$R_{11,15} = \frac{1}{\alpha_{celo} 2\pi \sqrt{\frac{S_{Cu\_stator}}{\pi}} \frac{L_{celo}}{2} Q_1} + \frac{h_{izolace}}{\lambda_{izolace} 2\pi \sqrt{\frac{S_{Cu\_stator}}{\pi}} \frac{L_{celo}}{2} Q_1} \quad (4.49)$$

$$R_{12,15} = R_{11,15} \quad (4.50)$$

Oba uzly 9 i 10 jsou spojeny s uzlem 13 (jho magnetického obvodu statoru). Z tohoto uzlu je následně teplo odváděné z celkového povrchu kostry ( $S_{kostra} = 2,037 [m^2]$ ) do okolí. Teplota okolního vzduchu je stejně jako u rotoru  $40 [^{\circ}C]$ . Součinitel přestupu tepla z kostry do okolí je roven  $52 \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ . Tento údaj byl poskytnut a odpovídá proudění chladícího vzduchu při rychlosti poháněného vozidla  $40 \left[\frac{km}{hod}\right]$ .

$$R_{9,13} = \frac{r_5 - r_z}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi \left(\frac{r_5 - r_z}{2} + r_z\right) L_{paket}} + \frac{\frac{h_{d\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Cu} b_{d\_stator} L_{paket} Q_1} \quad (4.51)$$

$$R_{10,13} = \frac{r_5 - r_z}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi \left(\frac{r_5 - r_z}{2} + r_z\right) L_{paket}} + \frac{\frac{h_{z\_stator}}{2}}{3 \lambda_{Fe\_rad} b_{z\_stator} L_{paket} Q_1} \quad (4.52)$$

$$R_{13,out} = \frac{r_6 - r_5}{3 \lambda_{Fe\_rad} 2\pi r_6 L_{paket}} + \frac{1}{\alpha_{kostra} S_{kostra}} \quad (4.53)$$

kde:

$r_z$  je poloměr k patě zubu magnetického obvodu statoru [ $m$ ]  
 $r_5$  poloměr do středu jha magnetického obvodu statoru [ $m$ ]  
 $r_6$  vnější poloměr statoru [ $m$ ]  
 $\alpha_{kostra}$  součinitel přestupu tepla z kostry do okolí  $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$   
 $S_{kostra}$  povrch kostry [ $m^2$ ]

Na základě získaných tepelných odporů lze sestavit rovnice potřebné pro vyplnění matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$  a vektoru pravých stran  $\mathbf{P}$ . Tyto rovnice vznikly úpravou a doplněním rovnic z Kapitoly 4.3.

$$(G_{1,2} + G_{1,15})T_1 - G_{1,2}T_2 - G_{1,15}T_{15} = 0 \quad (4.54)$$

$$-G_{1,2}T_1 + (G_{1,2} + G_{2,3})T_2 - G_{2,3}T_3 - G_{2,4}T_4 = 0 \quad (4.55)$$

$$-G_{2,3}T_2 + (G_{2,3} + G_{3,15})T_3 - G_{3,15}T_{15} = 0 \quad (4.56)$$

$$-G_{2,4}T_2 + (G_{2,4} + G_{4,5} + G_{4,6})T_4 - G_{4,5}T_5 - G_{4,6}T_6 = P_{Fe\_j} \quad (4.57)$$

$$-G_{4,5}T_4 + (G_{4,5} + G_{5,6} + G_{5,7} + G_{5,8} + G_{5,15})T_5 - G_{5,6}T_6 - G_{5,7}T_7 - G_{5,8}T_8 - G_{5,15}T_{15} = P_{Cu\_d} \quad (4.58)$$



$$-G_{4,6}T_4 - G_{5,6}T_6 + (G_{4,5} + G_{5,6} - G_{6,15})T_6 - G_{6,15}T_{15} = P_{Fe\_z} \quad (4.59)$$

$$-G_{5,7}T_5 + (G_{5,7} + G_{7,15})T_7 - G_{7,15}T_{15} = \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} \quad (4.60)$$

$$-G_{5,8}T_5 + (G_{5,8} + G_{8,15})T_7 - G_{8,15}T_{15} = \frac{P_{Cu\_kruh}}{2} \quad (4.61)$$

$$(G_{9,10} + G_{9,11} + G_{9,12} + G_{9,13} + G_{14,9})T_9 - G_{9,10}T_{10} - G_{9,11}T_{11} - G_{9,12}T_{12} - G_{9,13}T_{13} = P_{Cus\_d} \quad (4.62)$$

$$-G_{9,10}T_9 + (G_{9,10} + G_{10,13} + G_{14,10})T_{10} - G_{10,13}T_{13} = P_{Fes\_z} \quad (4.63)$$

$$-G_{9,11}T_9 + (G_{9,11} + G_{11,15})T_{11} - G_{11,15}T_{15} = \frac{P_{Cus\_cela}}{2} \quad (4.64)$$

$$-G_{9,12}T_9 + (G_{9,12} + G_{12,15})T_{12} - G_{12,15}T_{15} = \frac{P_{Cus\_cela}}{2} \quad (4.65)$$

$$-G_{9,13}T_9 - G_{10,13}T_{10} + (G_{9,13} + G_{10,13} + G_{13,out})T_{13} = P_{Fes\_j} + G_{13,out}T_0 \quad (4.66)$$

$$-G_{5,14}T_5 - G_{6,14}T_6 - G_{14,9}T_9 - G_{14,10}T_{10} + (G_{5,14} + G_{6,14} + G_{14,9} + G_{14,10})T_{14} = 0 \quad (4.67)$$

$$-G_{1,115}T_1 - G_{3,15}T_3 - G_{7,15}T_7 - G_{8,15}T_8 - G_{11,15}T_{11} - G_{12,15}T_{12} + (G_{1,15} + G_{3,15} + G_{7,15} + G_{8,15} + G_{11,15} + G_{12,15})T_{15} = 0 \quad (4.68)$$

Na základě těchto rovnic byla naplněna matice tepelných vodivostí  $\mathbf{G}$ . Tato matice je umístěna v Příloze C. Též z výše zmíněných rovnic je sestaven vektor pravých stran  $\mathbf{P}$ .

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ P_{Cur\_d} \\ P_{Fer\_z} \\ \frac{P_{Cur\_kruh}}{2} \\ \frac{P_{Cur\_kruh}}{2} \\ P_{Cus\_d} \\ P_{Fes\_z} \\ \frac{P_{Cus\_cela}}{2} \\ \frac{P_{Cus\_cela}}{2} \\ P_{Fes\_j} + G_{13,out}T_0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.69)$$

**Tabulka 4.5:** Výpis ztrát

	číslo uzlu	$\Delta P$ [W]
ztráty v drážkové části $P_{Cu\_d}$	5	639
ztráty v kruhu nakrátko $P_{Cu\_kruh}$	7, 8	11
ztráty v zubech magnetického obvodu $P_{Fe\_z}$	6	483
ztráty v drážkové části statoru $P_{Cus\_d}$	9	1038
ztráty v čelech statorového vinutí $P_{Cus\_cela}$	11, 12	339
ztráty ve jhu magnetického obvodu statoru $P_{Fes\_j}$	13	985
ztráty v zubu magnetického obvodu statoru $P_{Fes\_z}$	10	230

Ztráty vznikající v rotoru nabývají shodných hodnot jako v případě výpočtu samotného rotoru v Kapitole 4.3. Dále pak ztráty vznikající ve statorovém vinutí  $\Delta P_{j1}$  jsou rozděleny v poměru délek vodičů na ztráty vznikající v drážkové části statoru  $P_{Cus\_d}$  a ztráty vznikající v čelech statorového vinutí  $P_{Cus\_cela}$ . Následně hodnota hlavních ztrát v železe statoru  $\Delta P_{Fe1}$  je přiřazena ztrátám ve jhu magnetického obvodu statoru  $P_{Fes\_j}$ . Nakonec součet pulsních ztrát ve statoru  $\Delta P_{p1}$  a povrchových ztrát ve statoru  $\Delta P_{\delta p2}$  je přiřazen ztrátám vznikajícím v zubech magnetického obvodu statoru  $P_{Fes\_z}$ .

Výsledný vektor teplot je získán pomocí vztahu:

$$\mathbf{T} = \mathbf{G}^{-1} \mathbf{P} \quad (4.70)$$

#### 4.4.1 Výsledné teploty získané řešením tepelné sítě kompletního stroje

Výsledné teploty získané řešením tepelné sítě kompletního stroje jsou uvedeny v Tabulce 4.6. Při pohledu nejdříve na uzly umístěné v rotorové části, lze pozorovat podobné rozložení teplot jako v případě řešení rotoru samotného. Teploty jsou však mnohem vyšší. Opět teplota dosahuje maxima v uzlu 4 (jhu magnetického obvodu rotoru), uzlu 5 (drážková část klece nakrátko) a uzlu 6 (zuby magnetického obvodu rotoru). V tomto případě jde o teplotu přibližně 171 [°C]. Tato teplota v rotoru opět mírně klesá směrem do středu stroje a výrazněji klesá směrem ke koncům stroje.

**Tabulka 4.6:** Výsledné teploty při řešení kompletního stroje

	číslo uzlu	teplota [ $^{\circ}C$ ]
část hřídele mimo magnetický obvod rotoru	1	106,92
střed hřídele	2	169,98
část hřídele mimo magnetický obvod rotoru	3	106,92
jho magnetického obvodu rotoru	4	171,16
drážková část klece nakrátko	5	171,22
zuby magnetického obvodu rotoru	6	171,20
kruh nakrátko	7	169,49
kruh nakrátko	8	169,49
drážková část statorového vinutí	9	84,19
zuby magnetického obvodu statoru	10	79,83
čela statorového vinutí	11	91,11
čela statorového vinutí	12	91,11
jho magnetického obvodu statoru	13	75,98
vzduchová mezera	14	121,22
vzduch ve stroji	15	97,19

V prostoru mezi rotorem a státorem se nachází uzel 14 (vzduchová mezera). Teplota v tomto uzlu dosahuje 121,22 [ $^{\circ}C$ ]. Důležitými údaji jsou teploty v uzlu 9 (drážková část statorového vinutí) a v uzlech 11 a 12 (čela statorového vinutí). Teplota v uzlu 9 je rovna 84,19 [ $^{\circ}C$ ] a teplota v uzlech 11 a 12 odpovídá 91,11 [ $^{\circ}C$ ].

Je zřejmé, že teplota v čelech vinutí je vyšší, a to z důvodu horšího odvodu tepla. Z drážkové části vinutí je totiž teplo odváděno mnohem lépe skrze magnetický obvod statoru a následně kostru stroje. Čela vinutí jsou obklopena pouze vzduchem uvnitř stroje.

Z uvedených výsledných teplot je možné konstatovat, stejně jako v případě samotného rotoru, že rozložení teplot je souměrné podle osy souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení.

## 5 Metoda konečných prvků

### 5.1 Metodologická část

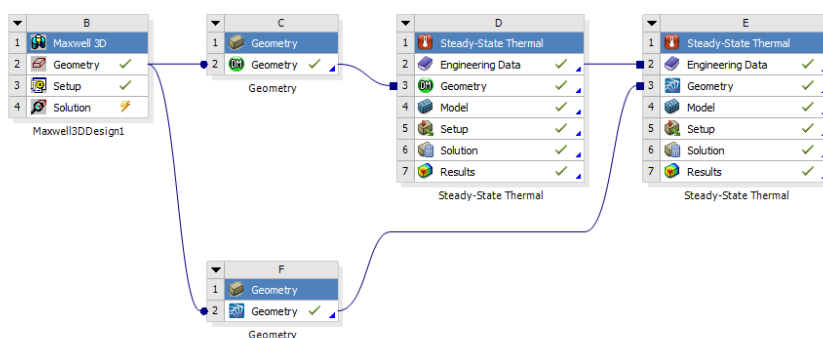
Pro ověření výsledků získaných tepelným výpočtem pomocí náhradních tepelných obvodů byla využita metoda konečných prvků. V tomto případě byl využit profesionální simulační program ANSYS. Při práci s tímto programem byly využity znalosti nabyté při studiu článků z Kapitoly 2 společně s informacemi nalezenými v knize Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15 [13].

Na začátku tepelného výpočtu metodou konečných prvků byla využita simulace provedená Dominikem Hutýrou pomocí modulu Maxwell 3D. Tato simulace byla jím provedena v rámci jeho diplomové práce Návrh trakčního asynchronního motoru pro kompaktní pohonnou jed-

notku [10].

Maxwell 3D byl v tomto případě využit pro získání geometrie stroje. Tato geometrie obsahovala rotor a stator daného stroje, bylo však potřeba tuto geometrii optimalizovat pro tepelný výpočet a doplnit o kostru.

V rámci diplomové práce byly provedeny dvě simulace rozložení teplot. Jedna pouze pro rotor asynchronního stroje. Druhá pro kompletní sestavu rotor, stator, kostra. Pro efektivní práci se simulačním programem ANSYS byla využita jeho funkce ANSYS Workbench, kdy je možné jednotlivé moduly řetězit za sebou a vytvořit mezi nimi určité závislosti. Konkrétní schéma celého projektu je zobrazeno na Obrázku 5.1.



**Obrázek 5.1:** Schéma projektu v ANSYS Workbench

### 5.1.1 Rotor

V rámci první simulace byl ve vygenerované geometrii potlačen stator a prozatím nebyla přidána kostra. To znamená, že zbyla pouze hřídel, magnetický obvod rotoru a rotorové tyče společně s kruhem nakrátko. K této geometrii byla přidána jakási obálka obklopující celou zkoumanou část stroje. Tato úprava geometrie byla provedena v modulu SpaceClaim. Funkce, která vytváří tento obal celého stroje a taktéž tvoří výplň mezi jednotlivými částmi stroje, se nazývá Create Worpiece a nachází se v záložce Manufacturing. Tato obálka pak dále v simulaci tvoří prostředí, které představuje okolní vzduch. Tato část je důležitá pro pozdější správné vytvoření sítě.

Dalším krokem v tepelném výpočtu pomocí metody konečných prvků bylo vytvoření samotné simulace v modulu Steady-State Thermal. Nutnou podmínkou k úspěšnému spuštění řešení je správné nastavení Engineering Data. V této sekci se definují materiály a jejich vlastnosti. Blíže se tímto tématem zabývá Kapitola 5.2.1.

Dále bylo potřeba právě definované materiály přiřadit jednotlivým částem stroje. Následně vytvořit síť (Kapitola 5.2.3) a závěrečným krokem před spuštěním řešení bylo nastavení okrajových podmínek (Kapitola 5.2.5) a definování, kde a jak velké vznikají ztráty (Kapitola 5.2.4).

Následně bylo spuštěno řešení celé úlohy. Po úspěšném řešení je k dispozici rozložení teplot v konkrétních částech stroje. Vyhodnocením a analýzou výsledků se zabývá Kapitola 5.3.1.

### 5.1.2 Kompletní motor

V druhé simulaci bylo provedeno řešení kompletního motoru. To znamená, že k vygenerované geometrii byla navíc přidána kostra a byly upravené některé části stroje. Úpravami a vytvořením prostoru vyplněného vzduchem se zabývá Kapitola 5.2.2.

Takto připravená geometrie byla opět dodána do modulu Steady-State Thermal. Co se týče sítě, okrajových podmínek a definice místa a velikosti ztrát, byl postup velmi podobný jako v případě první simulace. Vyhodnocením a analýzou výsledků řešení pro tuto úlohu se zabývá Kapitola 5.3.2.

## 5.2 Definice problému

### 5.2.1 Engineering Data

Pro potřeby následné konfigurace a přiřazení jednotlivých materiálů k určitým částem stroje bylo potřeba v modulu Steady-State Thermal v sekci Engineering Data vytvořit, nebo vybrat z knihovny, dále používané materiály. Pro potřeby tohoto projektu byl vytvořen materiál s názvem Steel. Tento materiál byl následně přiřazen magnetickému obvodu rotoru a statoru. Vzhledem k tomu, že tento magnetický obvod je tvořen vzájemně odizolovanými plechy, byly tomuto materiálu nastaveny anizotropní vlastnosti. V ose X a Y byly nastaveny hodnoty tepelné vodivosti shodné. V ose Z (směr podél osy otáčení) byla hodnota nastavena výrazně nižší. Konkrétní vlastnosti jsou uvedeny v Tabulce 5.1.

**Tabulka 5.1:** Hodnoty tepelných vodivostí v jednotlivých osách pro materiál Steel

tepelná vodivost v ose X [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]	tepelná vodivost v ose Y [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]	tepelná vodivost v ose Z [ $\frac{W}{m \cdot K}$ ]
30	30	0,6

Dalším uživatelsky definovaným materiálem je Izolace. Tomuto materiálu byla přiřazena hodnota tepelné vodivosti  $0,3 \frac{W}{m \cdot K}$ . Tento materiál je přiřazen částem stroje kolem cívek statoru. Tyto části je potřeba vytvořit pomocí úpravy geometrie. Kroky k vytvoření těchto úprav jsou uvedeny v Kapitole 5.2.2.

Zbývajících materiály potřebnými pro správné nastavení byly měď (Copper), materiál hřídle (Steel 1008), hliník (Aluminium) a vzduch (Air). Měď byla přiřazena částem tvořící statorové vinutí, rotorovým tyčím a kruhu nakrátko. Steel 1008 byl přiřazen hřídli. Z hliníku je tvořena kostra stroje. Vzduchem jsou vyplněny části okolo čel statorového vinutí a vzduchová mezera. Všechny tyto materiály byly vybrány z existující knihovny materiálů. Konkrétní hodnoty tepelných vodivostí jednotlivých materiálů jsou uvedeny v Tabulce 5.2.

**Tabulka 5.2:** Hodnoty tepelných vodivostí materiálů vybraných z knihovny

	tepelná vodivost $\lambda \left[ \frac{W}{m \cdot K} \right]$
Copper	400
Steel 1008	45
Aluminium	230
Air	0,026

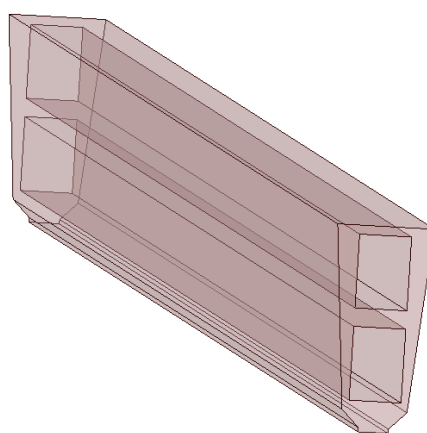
## 5.2.2 Úprava geometrie

Pro první simulaci, kde byla použita pouze geometrie rotoru, nebylo nutné provádět žádné změny kromě potlačení statoru a vytvoření vzduchové obálky. V případě druhé simulace bylo potřeba provést úprav hned několik.

### 5.2.2.1 Úpravy provedené v modulu SpaceClaim

První z nich byl import kostry stroje. Tato část stroje byla dodána ve formátu STEP a následně importována ke zbytku stroje. Pro správné vzájemné umístění kostry, statoru a rotoru byla použita funkce Align, kdy byl pomocí této funkce nastaven vzájemný vztah mezi pozicí stroje a pozicí kostry. Díky této operaci byla kostra umístěna do správné polohy.

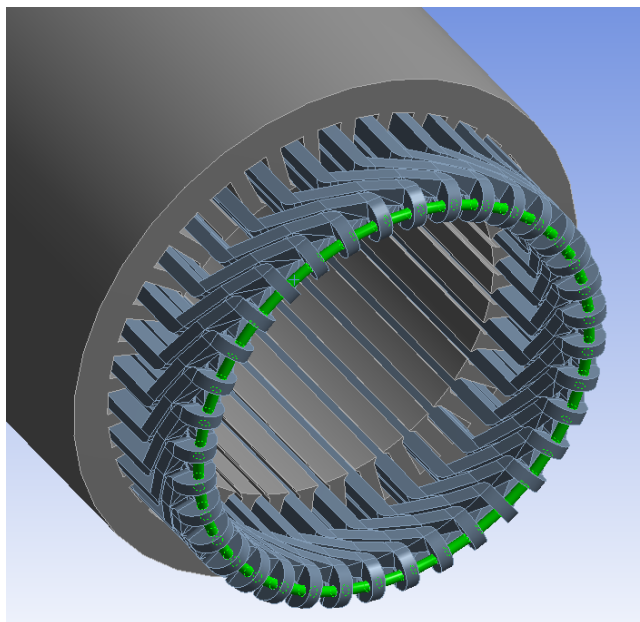
Další nutnou úpravou bylo vytvoření ekvivalentu izolace. Tyto části byly vytvořeny jako výplň drážky kolem statorového vinutí. Výplň těchto míst byla vytvořena pomocí nástrojů Create Workpiece, Combine a Split Body. Výsledná část odpovídající izolaci v jedné z drážek je zobrazena na Obrázku 5.2. Pokud by nebyla provedena tato úprava, zůstal by mezi statorovým vinutím a magnetickým obvodem statoru volný prostor, který by negativně ovlivňoval tepelný výpočet.

**Obrázek 5.2:** Vytvořená část geometrie odpovídající izolaci

Pomocí stejných nástrojů byly vytvořené části odpovídající vzduchu uvnitř stroje kolem čel statorového vinutí a kolem kruhu nakrátko.

Dalším nutným krokem pro úspěšné řešení celé úlohy bylo vytvoření spojky spojující všechny cívky statoru. Modul Maxwell 3D totiž vytvoří cívky, které nejsou nijak vzájemně spojeny.

Dodáním spojky, zobrazené na Obrázku 5.3, a následným sloučením všech statorových cívek bylo dosaženo jedné části geometrie reprezentující celé statorové vinutí.



**Obrázek 5.3:** Vytvořená spojka spojující všechny cívky statorového vinutí

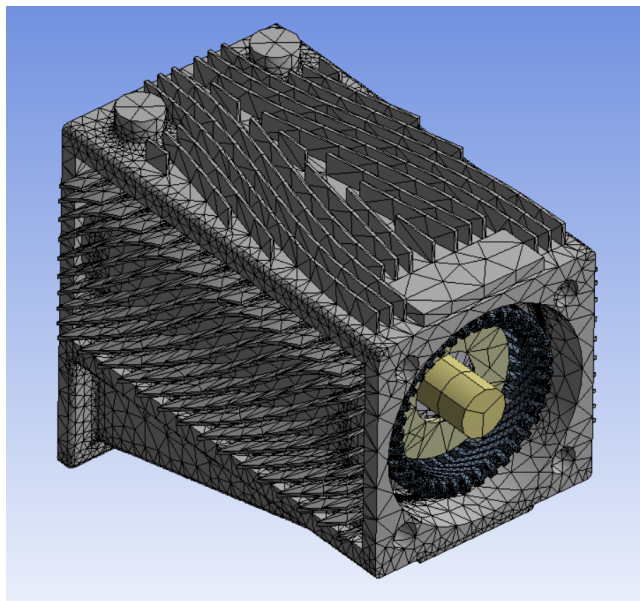
### 5.2.2.2 Úpravy provedené v modulu Steady-State Thermal

Vzhledem k tomu, že tepelná vodivost je ve statorovém a rotorovém magnetického obvodu závislá na směru os X, Y a Z, bylo tedy potřeba se ujistit, že pro tyto části je opravdu osa Z souběžná s osou otáčení. Toho bylo docíleno vytvořením nového souřadnicového systému přiřazeného pouze pro tyto dvě části. K tomuto účelu slouží funkce s názvem Coordinate System. Osa Z byla nastavena tak, že platí její kolmost na přední stěnu těchto částí a tím je zaručena souběžnost osy Z s osou otáčení.

K dosažení správného řešení bylo dále potřeba nastavit vytvořené kontakty. Tyto kontakty se nacházejí v záložce Contacts. Bylo nutné udělat jejich revizi a případně nesprávné kontakty odstranit. V tomto případě byly odstraněny kontakty, které nevhodně spojovali rotor se statorem přes vzduchovou mezeru a kontaktům mezi rotorovým a statorovým magnetickým obvodem byl přiřazen součinitel přestupu tepla odpovídající vnější ploše rotoru z tabulky 4.2, tedy  $149,39 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ .

### 5.2.3 Síť

Nutným krokem pro spuštění řešení celé úlohy bylo v obou případech, jak pro samotný rotor, tak pro celý stroj, vygenerování sítě. Tento krok je proveden v modulu Steady-State Thermal pomocí Generate Mesh. Vygenerovaná síť pro celý stroj je zobrazena na Obrázku 5.4. Tato síť obsahuje 1084854 uzlů a 553126 elementů. Takto vygenerovaná síť nebyla nijak upravována a bylo ponecháno výchozí nastavení parametrů sítě.



Obrázek 5.4: Vygenerovaná síť pro celý stroj

### 5.2.4 Ztráty

Dále je k úspěšnému spuštění řešení nutné nastavit Internal Heat Generation v záložce Solution samotného modulu Steady-State Thermal. Tyto hodnoty vyjadřují velikost ztrát vznikajících v konkrétních částech stroje. V našem případě byly zadány ztráty vznikající v rotorových tyčích a kruhu nakrátko, ztráty vznikající v magnetickém obvodu rotoru, ztráty vznikající v magnetickém obvodu statoru a ztráty vznikající ve statorovém vinutí. Tyto parametry jsou zadávány v jednotkách wattů vztažených na objem  $[\frac{W}{m^3}]$ . Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v Tabulce 5.3.

**Tabulka 5.3:** Velikosti ztrát vztažené na jednotku objemu

	ztráty $\Delta P [W]$	objem $V [m^3]$	Internal Heat Generation $[\frac{W}{m^3}]$
rotorové tyče a kruh nakrátko	650	$1,801 \cdot 10^{-3}$	$360,910 \cdot 10^3$
magnetický obvod rotoru	484	$4,483 \cdot 10^{-3}$	$107,963 \cdot 10^3$
magnetický obvod statoru	1215	$6,013 \cdot 10^{-3}$	$202,062 \cdot 10^3$
statorové vinutí	1377	$1,86 \cdot 10^{-3}$	$740,322 \cdot 10^3$

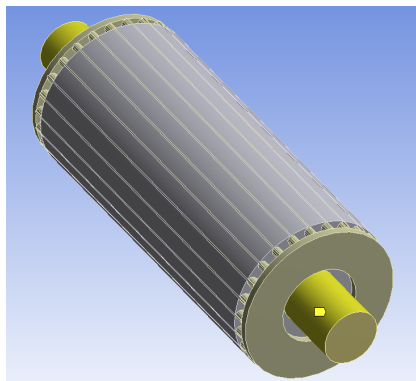
### 5.2.5 Přiřazení součinitelů přestupu tepla

Posledním krokem před úspěšným spuštěním řešení je nastavení okrajových podmínek. Tyto okrajové podmínky byly nastaveny celkem na 5 ploch. Jednotlivé plochy jsou znázorněny žlutou barvou na Obrázku 5.6. Pro simulaci samotného rotoru byly nastaveny okrajové podmínky pro plochy 1 až 4. Pro simulaci kompletního motoru byla nastavena okrajová podmínka pouze na plochu 5.

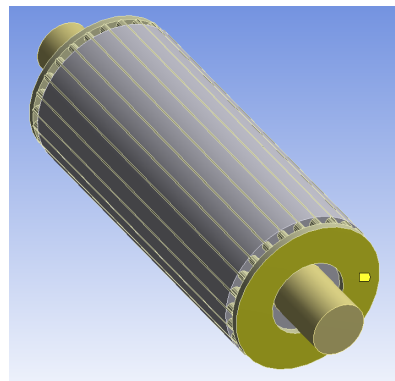
Plocha 1 odpovídá povrchu hřídele, pouze však tomu, který není krytý magnetickým obvodem stroje a vystupuje do volného prostoru. Plocha 2 je povrchem kruhů nakrátko, ne však celým povrchem, ale pouze v rovině kolmé na osu otáčení. Plocha 3 je opět spjata s kruhy



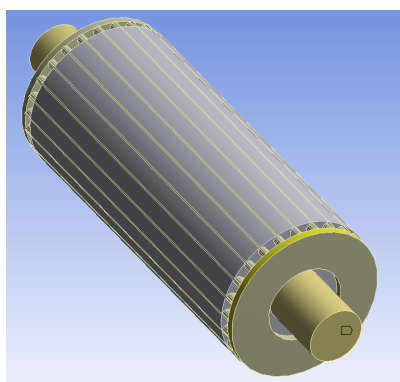
nakrátko, tentokrát se však jedná o povrch, který je na vnějším okraji a je soustředný s osou otáčení. Plocha 4 odpovídá povrchu rotoru, odkud teplo přestupuje do vzduchové mezery. Plocha 5 je plochou největší a odpovídá ploše kostry, odkud teplo přestupuje z kostry do okolního prostředí.



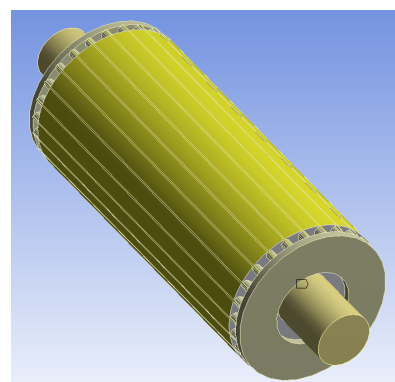
(a) Plocha 1 - povrch hřídele mimo magnetický obvod rotoru



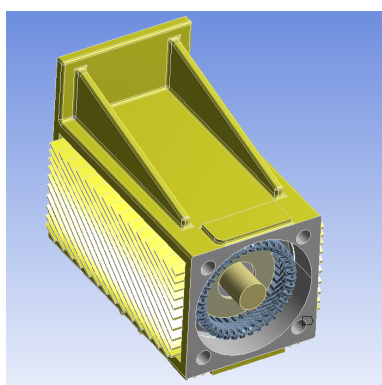
(b) Plocha 2 - povrch kruhů nakrátko kolmý na osu otáčení



(c) Plocha 3 - vnější okraj kruhu nakrátko



(d) Plocha 4 - vnější povrch rotoru pod magnetickým obvodem statoru



(e) Plocha 5 - vnější povrch kostry stroje

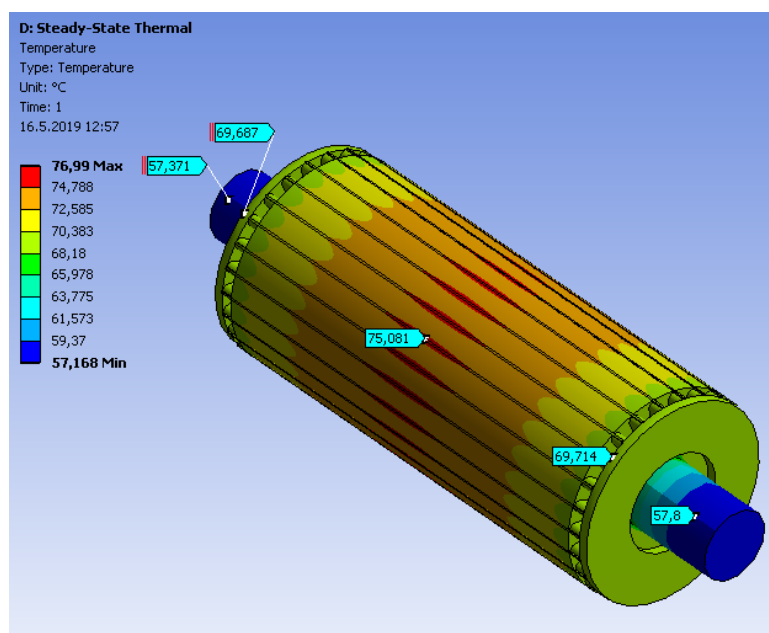
**Obrázek 5.6:** Plochy s přiřazeným součinitelem přestupu tepla

Těmto plochám byla přiřazena hodnota součinitele přestupu tepla. Konkrétní vypočtené hodnoty pro jednotlivé plochy na rotoru jsou uvedeny v Tabulce 4.2. Součinitel přestupu tepla pro povrch kostry stroje byl dodán jako hodnota  $52 \left[ \frac{W}{m^2 K} \right]$ , což odpovídá rychlosti proudění okolního vzduchu při rychlosti poháněného vozidla  $40 \left[ \frac{km}{hod} \right]$ .

## 5.3 Výsledky

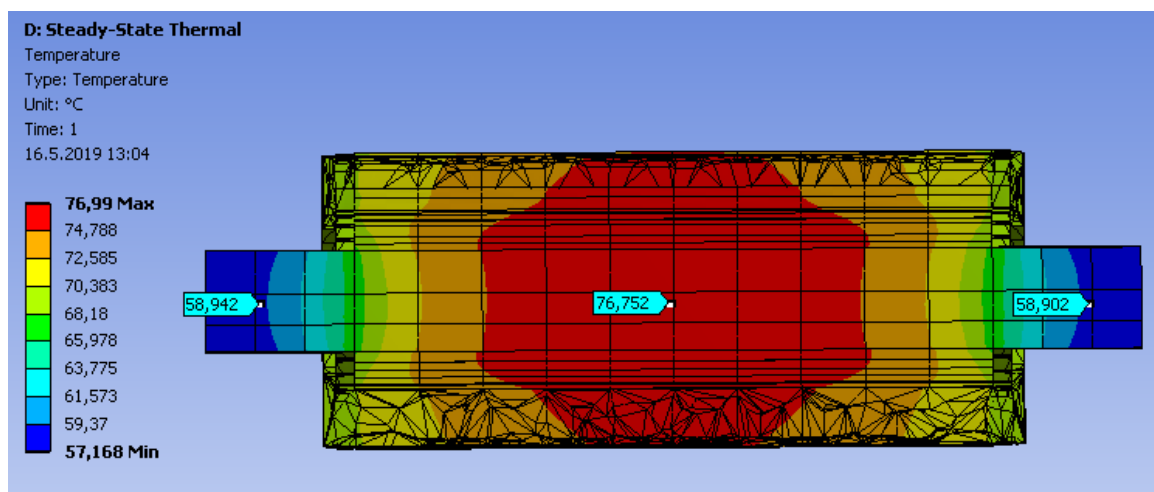
### 5.3.1 Rozložení teplot v rotoru

Na Obrázku 5.7 je zobrazeno výsledné rozložení teplot v rotoru. Na první pohled je zřejmé, že rozložení teploty je souměrné podle osy souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení. Nejvyšších teplot tedy dosahuje rotor právě v této ose. Na povrchu tato maximální teplota dosahuje hodnoty přibližně 75 [°C]. Směrem ke koncům stroje teplota klesá. Díky zobrazení teplot pomocí barevné škály je možné pozorovat vyšší teploty podél drážek rotoru. Na kruzích nakrátko pak teplota dosahuje teploty přibližně 69 [°C].



Obrázek 5.7: Výsledné rozložení teplot v rotoru

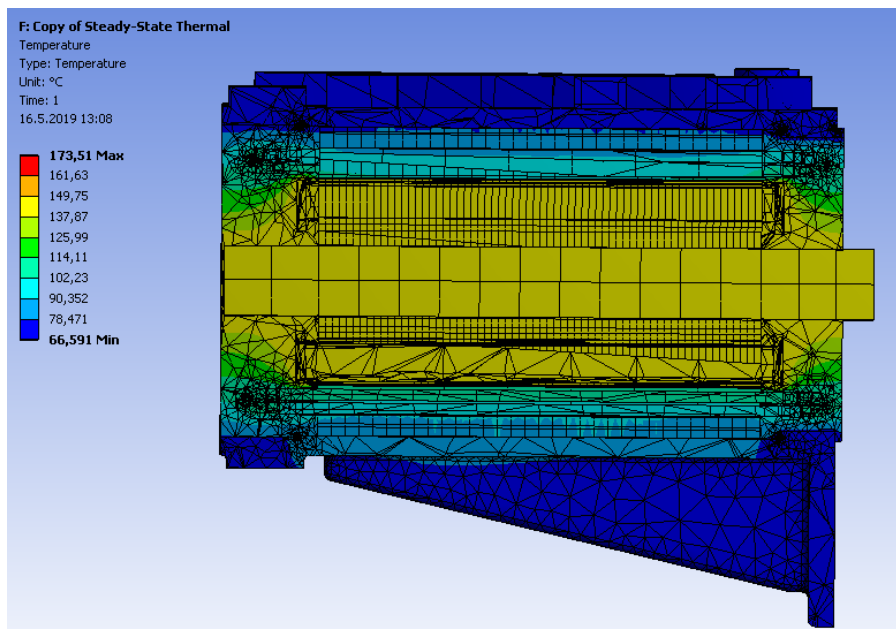
Na Obrázku 5.8 je možné opět pozorovat souměrné rozložení teploty podle osy souměrnosti stroje. Ve středu stroje teplota dosahuje hodnoty 76,752 [°C]. I zde je zřejmé, že teplota směrem ke koncům rotoru klesá. V koncích hřídele pak dosahuje teplota hodnot přibližně 58 [°C].



Obrázek 5.8: Výsledné rozložení teplot v rotoru zobrazené v podélném řezu

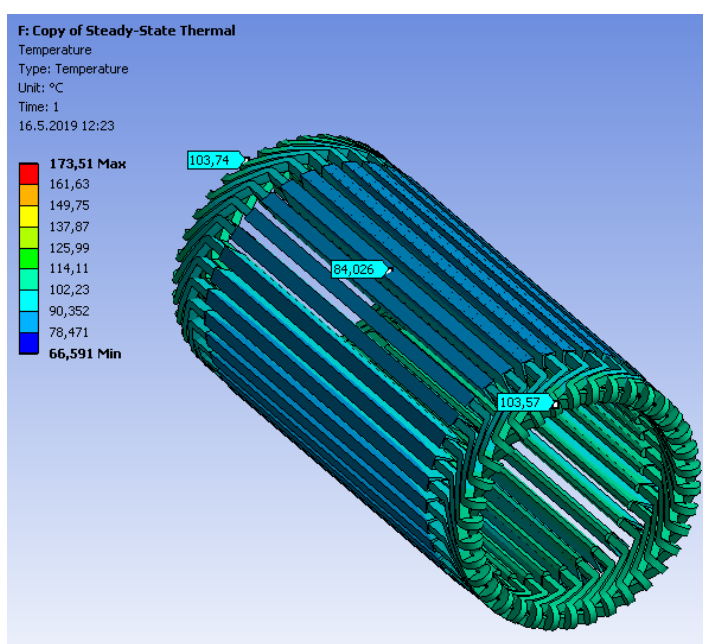
### 5.3.2 Rozložení teplot kompletního stroje

Na Obrázku 5.9 je výsledné rozložení teplot zobrazené v podélném řezu získané při řešení kompletního stroje. Maximální teplota je dosahována na povrchu rotoru a naopak minimální teplota se vyskytuje na povrchu kostry.



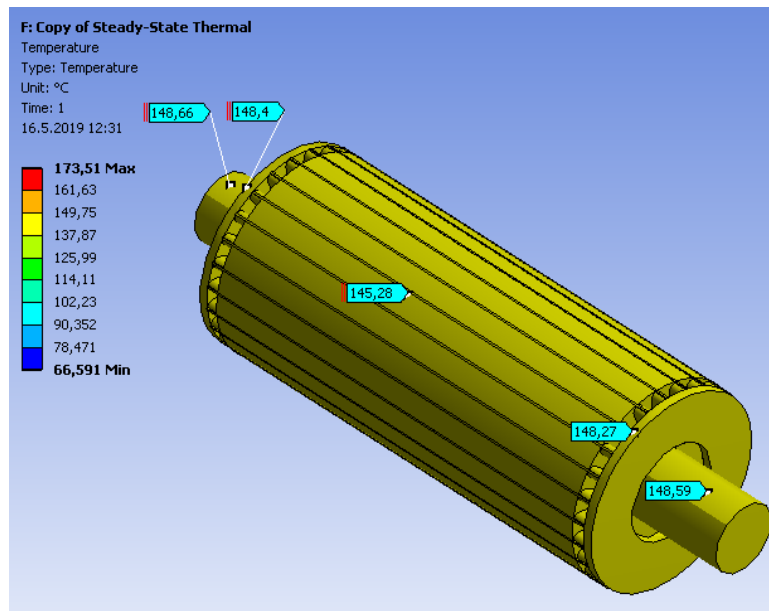
Obrázek 5.9: Výsledné rozložení teplot kompletního stroje zobrazené v podélném řezu

Velmi důležitým údajem při analýze rozložení teplot je teplota ve statorovém vinutí a ve vrstvě izolace. Obě tyto části stroje společně s rozložením teploty jsou zobrazeny na Obrázku 5.10. Je zřejmé, že teplota v drážkové části dosahuje nižších teplot ( $85 [^{\circ}C]$ ) než teplota v čelech vinutí ( $103 [^{\circ}C]$ ).



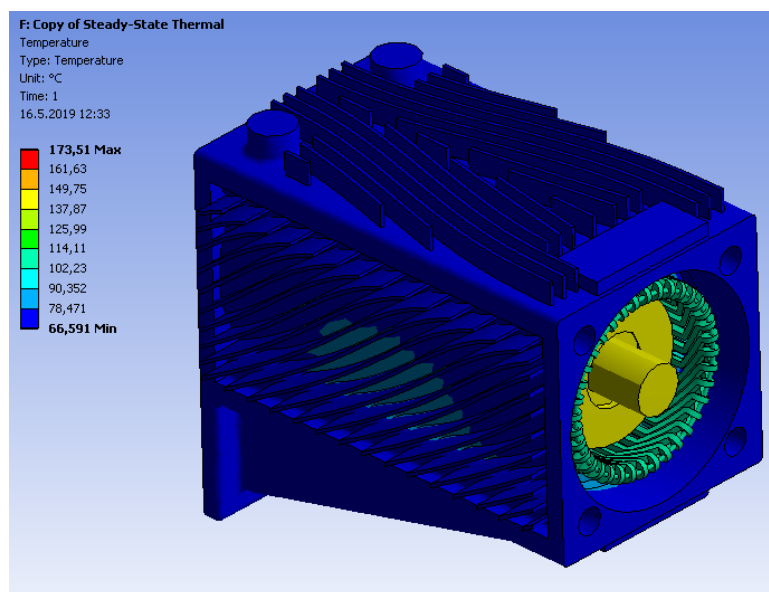
Obrázek 5.10: Výsledné rozložení teplot ve statorovém vinutí

Při pohledu na Obrázek 5.11 lze říci, že výsledná teplota v rotoru při řešení tepelného výpočtu kompletního stroje je takřka konstantní v celém objemu a dosahuje tedy teploty přibližně 148 [°C]. Teplota se v tomto případě nesnižuje směrem podél osy otáčení, jako tomu bylo v případě řešení samotného rotoru.



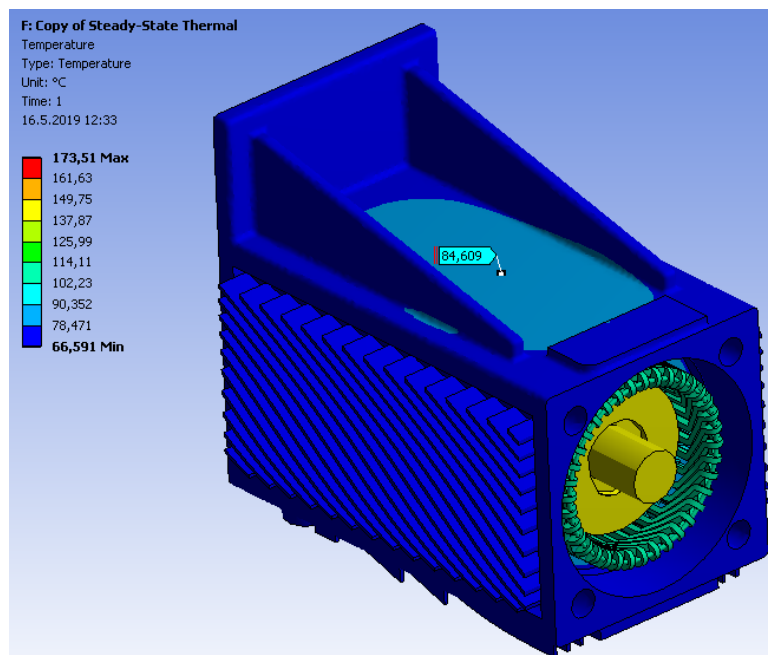
Obrázek 5.11: Výsledné rozložení teplot v rotoru

Vzhledem ke speciálnímu žebrování kostry rotoru poskytuje kostra výborný prostředek pro odvod veškerého tepla ze stroje. Jak je vidět na Obrázku 5.12, dosahuje teplota na povrchu kostry přibližně 66 [°C].



Obrázek 5.12: Výsledné rozložení teplot na povrchu kostry

To však neplatí o povrchu spodní strany kostry, kde nejsou realizována chladicí žebra a kostra zde dosahuje teploty kolem  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Obrázek 5.13: Výsledné rozložení teplot na spodní straně kostry

## 6 Závěr

Předmětem diplomové práce byl tepelný výpočet asynchronního motoru metodou náhradní tepelné sítě a metodou konečných prvků. Analyzovaným motorem byl 3-fázový 6-pólový asynchronní motor s výkonem  $100\text{ }[kW]$ . Podkladem pro tuto diplomovou práci byl elektromagnetický návrh provedený v rámci diplomové práce Dominika Hutery [10].

Pro správný a efektivní postup při vytváření tepelného modelu nejdříve proběhlo seznámení se s daným tématem a načerpání potřebných informací. K tomuto účelu posloužila analýza a zpracování článků ze serveru IEEE [1].

Nabyté informace z článků a dalších přínosných zdrojů bylo nejdříve využito při analytickém výpočtu metodou tepelné sítě. Tato metoda byla nejdříve teoreticky popsána (Kapitola 4.2) a následně byl proveden výpočet nejdříve samotného rotoru (Kapitola 4.3) a následně celého stroje (Kapitola 4.4). Pro tyto účely byl využit program Matlab a všechny výpočty byly zapsány do kódu a řešeny pomocí vytvořených výpočetních skriptů. Zdrojový kód těchto skriptů je uveden v Příloze A a v Příloze B.

Rotor byl modelován jako samostatně se točící ve volném prostředí se vzduchem o teplotě  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Získané výsledky metodou náhradní tepelné sítě pro samotný rotor jsou vypsány v Kapitole 4.3.1. Nejvyšší teplota je v tomto případě dosahována v ose souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení, a to konkrétně v blízkosti povrchu rotoru. Rozdíly teplot mezi uzly nacházejícími se

právě v tomto prostoru (uzel 6 - drážková část vodiče klece nakrátko, uzel 5 - zub magnetického obvodu rotoru a uzel 4 - střed jha magnetického obvodu rotoru) byl v řádech jednotek setin [ $^{\circ}C$ ]. Nejvyšší hodnota teploty byla konkrétně dosahována v drážková části vodiče klece nakrátko (92,39 [ $^{\circ}C$ ]). Směrem od této osy ke koncům hřídele se tato teplota snižovala a na koncích hřídele dosahovala teploty pouhých 46,88 [ $^{\circ}C$ ].

V případě výsledků výpočtu kompletního stroje metodou náhradní tepelné sítě dosahovala teplota maxima ve stejných uzlech jako v případě samotného rotoru. Tentokrát se jednalo o teplotu 171,22 [ $^{\circ}C$ ]. Rozložení teploty v rotoru odpovídalo rozložení teploty z výpočtu samotného rotoru. Dále pak statorové vinutí dosahovalo v tomto případě 84,19 [ $^{\circ}C$ ] v ose souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení a 91,11 [ $^{\circ}C$ ] v čelech. Konkrétní hodnoty teplot pro všechny uzly a analýza těchto teplot se nachází v Kapitole 4.4.1.

Dalším krokem byla realizace tepelného výpočtu metodou konečných prvků. Tento výpočet byl realizován pomocí profesionálního simulačního programu ANSYS. Konkrétně byla využita jeho funkce Workbench a moduly Steady-State Thermal a SpaceClaim. Vstupní geometrie byla převzata z modulu Maxwell 3D a následně upravena a rozšířena o dodanou geometrii kostry.

Výsledné rozložení teplot pro samostatný rotor získané tepelným výpočtem metodou konečných prvků je zobrazené v Kapitole 5.3.1. Rozložení částečně odpovídá výsledkům získaným analytickým výpočtem. Shodují se v tvrzení, že teplota dosahuje maxima v ose souměrnosti stroje kolmé na osu otáčení, ale teplota v této ose získaná metodou konečných prvků je nižší než hodnota získaná analytickým výpočtem, a to 76,752 [ $^{\circ}C$ ]. Také v tomto případě neplatí, že maximální teplota je lokalizována u povrchu rotoru. To je zřejmě způsobeno zadáváním ztrát vznikajících v určitých částech stroje. V případě analytického výpočtu jsou ztráty v magnetickém obvodu rotoru lokalizované do zubu, tedy blízko k povrchu rotoru, kdežto v případě výpočtu metodou konečných prvků je hodnota ztrát v magnetickém obvodu rotoru vztažena na celý objem a ne pouze jen na zuby. Z toho zřejmě pramení tyto nepatrné rozdíly v rozložení teploty.

Z výsledků tepelného výpočtu získaných metodou konečných prvků je důležitým údajem rozložení teplot ve statorovém vinutí. V tomto případě se výsledky analytického výpočtu a výsledky získané metodou konečných prvků velmi blíží. Porovnání teplot ve středu statorového vinutí a v čelech vinutí získaných jednotlivými metodami se nachází v Tabulce 6.1.

**Tabulka 6.1:** Porovnání teplot statorového vinutí

	analytický výpočet	metoda konečných prvků	rozdíl [ $^{\circ}C$ ]
střed statorového vinutí	84,26	84,19	0,07
čelo statorového vinutí <sub>1</sub>	103,74	91,11	12,63
čelo statorového vinutí <sub>2</sub>	103,57	91,11	12,46

Rozdíl mezi teplotami čel získanými různými metodami je zřejmě dán vlivem teploty vzduchu uvnitř stroje. Kromě statorového vinutí je také nutné si všimnout rozložení teploty na kostře stroje. Je zřejmé, že na spodní straně kostry dosahuje teplota o 20 [°C] vyšších hodnot než na zbytku kostry. To je zapříčiněno absencí chladících žeber. Zde je prostor pro optimalizaci návrhu kostry. Dodání žeber by zvětšilo povrch kostry a zlepšilo tak odvod tepla do okolí.

# Seznam použité literatury

- [1] *IEEE Xplore Digital Library*. WWW: <https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>.
- [2] *Kompaktní pohonná jednotka pro plně elektrická vozidla hromadné dopravy | Smart akcelerator*. WWW: <https://www.inovujtevpk.cz/kompaktni-pohonna-jednotka-pro-plne-elektricka-vozidla-hromadne-dopravy/>.
- [3] Y. Zhang, J. Ruan, T. Huang, X. Yang, H. Zhu a G. Yang, „Calculation of temperature rise in air-cooled induction motors through 3-d coupled electromagnetic fluid-dynamical and thermal finite-element analysis“, in *IEEE Transactions on Magnetics*, sv. 48, ún. 2012, s. 1047–1050. DOI: 10.1109/TMAG.2011.2174433.
- [4] L. Popova, J. Nerg a J. Pyrhönen, „Combined Electromagnetic and Thermal Design Platform for Totally Enclosed Induction Machines“, ISBN: 9781424493036.
- [5] M. A. Vogelsberger, J. Buschbeck, A. Orellano, M. Bazant a E. Schmidt, „Outcome of multi-physics optimization for increase in power density of asynchronous railway traction drives“, in *2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications, EPE-ECCE Europe 2015*, Institute of Electrical a Electronics Engineers Inc., říj. 2015, ISBN: 9789075815221. DOI: 10.1109/EPE.2015.7309253.
- [6] G. Li, M. Qiao, J. Liang a L. Huang, „Research on parameters and performance of asynchronous motor based on thermal finite element analysis“, 2012, ISBN: 9781467312776. DOI: 10.1109/ICMA.2012.6284325.
- [7] S. Mezani, N. Takorabet a B. Laporte, „A combined electromagnetic and thermal analysis of induction motors“, in *IEEE Transactions on Magnetics*, sv. 41, květ. 2005, s. 1572–1575. DOI: 10.1109/TMAG.2005.845044.
- [8] Y. Zhang, M. Sun, J. Ruan a T. Huang, „Ventilation structure improvement of large motors using 3-D multi-physical coupled-field finite-element analysis“, in *2012 6th International Conference on Electromagnetic Field Problems and Applications, ICEF'2012*, 2012, ISBN: 9781467313353. DOI: 10.1109/ICEF.2012.6310356.
- [9] A. Boglietti, A. Cavagnino, M. Popescu a D. Staton, „Thermal Model and Analysis of Wound Rotor Induction Machine“, IEEE, 2012, ISBN: 9781467308038.
- [10] D. Hutýra, „Návrh trakčního asynchronního motoru pro kompaktní pohonnou jednotku“, Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2018.
- [11] J. Červený, *Stavba elektrických strojů*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická, 2016.
- [12] J. Pyrhönen, T. Jokinen a V. Hrabovcová, *Design of Rotating Electrical Machines*. 2008, ISBN: 9780470695166. DOI: 10.1002/9780470740095.
- [13] L. Huei-Huang, *Finite Element Simulations with ANSYS Workbench 15*. Mission: SDC, 2014, s. 602, ISBN: 9781585039074.



# Přílohy

## Příloha A - Zdrojové soubory pro analytický výpočet tepelné sítě kompletního stroje

### R\_calc.m

```

1 function [ R ] = R_calc( citatel, jmenovatel )
2
3 R = citatel/jmenovatel;
4
5 end

```

### parametry.m

```

1 %% Rotor %%
2
3 D_rotor_out = 0.159;
4 alpha_hridel = 102.73;
5 L_paket = 0.343;
6 L_hridel = 0.5 * L_paket;
7 lambda_hridel = 45;
8 r1 = 0.0276; %% polomer hridele
9 D1 = 2 * r1; %% prumer hridele
10 konst = 1;
11 lambda_Fe_rad = 30;
12 lambda_Fe_ax = 0.6;
13 lambda_Cu = 400;
14 hd = 0.031; %% vyska drazky
15 r4 = (D_rotor_out/2) - hd; %% polomer ke dnu drazky
16 r3 = r4 - ((r4 - r1)/2); %% polomer od stredu do poloviny jha
17 bd = 0.0055; %% sirka drazky (stredni hodnota prumeru
18 %% zaobleni horni a dolni casti)
19 Q2 = 26; %% pocet drazek rotoru
20 D4 = 2*r4; %% prumer ke dnu drazky
21 hz = 0.0235; %% vyska zubu
22 bz = 0.0094; %% sirka zubu
23 L_paket_kruh = 0.005; %% delka mezery mezi paketem a kruhem
24 %% nakratko
25 S_Cu = 1.587e-4; %% prurez drazky
26 alpha_kruh1 = 133.94; %% soucinitel prestupu tepla, plocha kruhu
27 %% kolma na osu
28 alpha_kruh2 = 148.72; %% soucinitel prestupu tepla, plocha kruhu
29 %% soustredna s osou
30 D_kruh_out = 0.0785; %%vnejsi obvod kruhu
31 D_kruh_in = 0.03846; %%vnitrni obvod kruhu
32 tloustka_kruhu = 0.0068;
33 L_kruh = 0.16;
34 alpha_paket = 129.89;
35 alpha_Δ = 148.39; %% soucinitel prestupu tepla do drazky
36
37 V_d_rotor = Q2*bd*hd*L_paket; %% objem drazek rotoru
38 V_kruh = ((pi*(D_kruh_out^2-D_kruh_in^2))/4)*tloustka_kruhu;
39 V_Cu_rotor = V_d_rotor + V_kruh;
40
41 P_Cu_rotor = 650.107;

```

```

42
43 P_Cur_d = P_Cu_rotor*V_d_rotor/(V_d_rotor + V_kruh);
44 P_Cur_kruh = P_Cu_rotor*V_kruh/(V_d_rotor + V_kruh);
45
46
47 P_Fer_z = 74+409;
48 P_Fer_j = 0;
49
50 %% Stator %%
51
52 h_izolace = 0.0005;
53 lambda_izolace = 0.3;
54 hd_stator = 0.0233;
55 bd_stator = (0.0111+0.0075)/2;
56 alpha_delta_stator = alpha_delta * 0.95;
57 Q1 = 36;
58 bz_stator = 0.0069;
59 hz_stator = 0.0235;
60 delka_cela = 0.1243;
61 S_Cu_stator = 0.000195;
62 obvod_vodice_cela = sqrt(S_Cu_stator/pi);
63 vrtani_statoru = 0.16;
64 vyska_jha_statoru = 0.0167;
65 rz = vrtani_statoru + hz_stator;
66 r5 = rz + (vyska_jha_statoru/2);
67 r6 = rz + vyska_jha_statoru;
68 alpha_out_50kmh = 52;
69 S_kostra = 2.037;
70
71 V_d_stator = Q1*bd_stator*hd_stator*L_paket;           %% objem drazek rotoru
72 V_cela = S_Cu_stator * delka_cela * Q1;
73 V_Cu_stator = V_d_stator + V_cela;
74
75 P_Cu_stator = 1377.121;
76
77 P_Cus_d = P_Cu_stator*V_d_stator/(V_d_stator+V_cela);
78 P_Cus_cela = P_Cu_stator*V_cela/(V_d_stator+V_cela);
79
80
81 P_Fes_z = 219+11;
82
83 P_Fes_j = 985;

```

## casti\_stroje.m

```

1  % CASTI STROJE %
2
3  hridel_1 = 1;
4
5  hridel_stred = 2;
6
7  hridel_2 = 3;
8
9  jho = 4;
10
11 drazka = 5;
12
13 zub = 6;
14
15 kruh_1 = 7;
16
17 kruh_2 = 8;

```

```

18
19 drazka_stator = 9;
20
21 zub_stator = 10;
22
23 celo_1 = 11;
24
25 celo_2 = 12;
26
27 jho_stator = 13;
28
29 Δ = 14;
30
31 out = 15;

```

## odpory.m

```

1 clear
2 parametry
3 casti_stroje
4
5 N = 15;
6
7
8 R = zeros(N,N);           %% vytvoreni N-rozmerne matice odporu
9
10 R(hridel_1, hridel_stred) = R_calc(L_hridel/2, lambda_hridel*((pi*D1^2)/4))
11                               + R_calc(L_paket/2, (lambda_hridel*pi*D1^2)/4);
12 R(hridel_stred, hridel_2) = R(hridel_1, hridel_stred);
13 R(hridel_stred, jho) = R_calc(r1, lambda_hridel*pi*r1*L_paket) + R_calc(r3
14                               -r1, ...
15                               3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r3-r1))+r1)*L_paket);
16 R(jho, drazka) = R_calc(r4-r3, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r4-r3))+r3) ...
17                               *L_paket) + R_calc(hd/2, 3*lambda_Cu* bd*L_paket*Q2);
18 R(jho, zub) = R_calc(r4-r3, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r4-r3))+r3)*L_paket)
19                               + R_calc(hz/2, 3*lambda_Fe_rad*bz*L_paket*Q2);
20 R(drazka, kruh_1) = R_calc((L_paket/2)+L_paket_kruh, 3*lambda_Cu*S_Cu*Q2);
21 R(drazka, kruh_2) = R(drazka, kruh_1);
22 R(drazka, zub) = R_calc(bd/2, 3*lambda_Cu*2*hd*L_paket*Q2) + R_calc(bz/2, 3
23                               *lambda_Fe_rad*2*hz*L_paket*Q2);
24 R(Δ, drazka_stator) = R_calc(hd_stator/2, 3*lambda_Cu*bd_stator*L_paket*Q1
25                               ) + R_calc(1, alpha_Δ_stator*bd_stator*L_paket*Q1
26                               ) + R_calc(h_izolace, lambda_izolace*bd_stator
27                               *L_paket*Q1);
28 R(Δ, zub_stator) = R_calc(hz_stator/2, 3*lambda_Fe_rad*bz_stator*L_paket
29                               *Q1) + R_calc(1, alpha_Δ_stator*bz_stator*L_paket
30                               *Q1);
31 R(drazka_stator, celo_1) = R_calc((L_paket/2)+(delka_cela/2), 3*lambda_Cu
32                               *S_Cu_stator*Q1);
33 R(drazka_stator, celo_2) = R(drazka_stator, celo_1);
34 R(drazka_stator, jho_stator) = R_calc(r5-rz, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((r5-rz)/2
35                               )+rz)*L_paket) + R_calc(hd_stator/2, 3
36                               *lambda_Cu*bd_stator*L_paket*Q1) + R_calc
37                               (h_izolace, lambda_izolace*bd_stator*L_paket
38                               *Q1);
39 R(zub_stator, jho_stator) = R_calc(r5-rz, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((r5-rz)/2)+rz
40                               )*L_paket) + R_calc(hz_stator/2, 3*lambda_Fe_rad
41                               *bz_stator*L_paket*Q1);
42 R(drazka_stator, zub_stator) = R_calc(bd_stator/2, 3*lambda_Cu*2*hd_stator
43                               *L_paket*Q1) + R_calc(bz_stator/2, 3
44                               *lambda_Fe_rad*2*hz_stator*L_paket*Q1) +
45                               R_calc(h_izolace, lambda_izolace*2*hd_stator

```

```

44                                     *L_paket*Q1);
45 R(hridel_1,out) = R_calc(1, alpha_hridel*2*pi*r1*L_hridel) + R_calc(r1,
46                                     lambda_hridel*pi*r1*L_hridel);
47 R(hridel_2,out) = R(hridel_1,out);
48
49 R_7outa = R_calc(1, (alpha_kruh1*pi*(D_kruh_out^2-D_kruh_in^2))/4);
50 R_8outa = R_7outa;
51 R_7outb = R_calc(1, alpha_kruh2*pi*D_kruh_out*tloustka_kruhu);
52 R_8outb = R_7outb;
53 R(kruh_1,out) = 1/((1/R_7outa)+(1/R_7outb));
54 R(kruh_2,out) = R(kruh_1, out);
55
56 R(drazka,Δ) = R_calc(hd/2, 3*lambda_Cu*bd*L_paket*Q2) + R_calc(1,
57                                     alpha_Δ*bd*L_paket*Q2);
58 R(zub,Δ) = R_calc(hz/2, 3*lambda_Fe_rad*bd*L_paket*Q2) + R_calc(1,
59                                     alpha_Δ*bd*L_paket*Q2);
60 R(celo_1,out) = R_calc(1, 0.8*alpha_kruh2*2*pi*sqrt(S_Cu_stator/pi
61                                     )*(delka_cela/2)*Q1);
62 R(celo_2,out) = R(celo_1,out);
63
64 R_temp = R';
65
66 R = R + R_temp;                               %% vysledkem je matice soumerna podle diagonaly
67
68 for i = 1:N
69     R(i,i) = 0;                               %% vynulovani prvku na diagonale (prvky by mely
70                                             %% byt nulove samy o sobe)
71 end
72
73 sumR = sum(R,2);                             %% sloupcovy vektor obsahujici soucty
74                                             %% jednotlivych rad
75
76 for i = 1:N
77     R(i,i) = sumR(i);                       %% naplni diagonalu souctem cele rady
78 end
79
80 R0 = zeros(N,1);
81
82 R0(jho_stator,1) = R_calc(r6-r5, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((r6-r5)/2)+r5
83                                     )*L_paket) + R_calc(1,alpha_out_50kmh*S_kostra);
84
85 G = zeros(N,N);                             %% vytvoreni N-rozmerne matice odporu
86
87 G(hridel_stred, hridel_1) = 1/R(hridel_stred, hridel_1);
88 G(hridel_stred, hridel_2) = 1/R(hridel_stred, hridel_2);
89 G(hridel_stred, jho) = 1/R(hridel_stred, jho);
90 G(jho, zub) = 1/R(jho, zub);
91 G(jho, drazka) = 1/R(jho, drazka);
92 G(drazka, kruh_1) = 1/R(drazka, kruh_1);
93 G(drazka, kruh_2) = 1/R(drazka, kruh_2);
94 G(drazka, zub) = 1/R(drazka, zub);
95 G(Δ, drazka_stator) = 1/R(Δ, drazka_stator);
96 G(Δ, zub_stator) = 1/R(Δ, zub_stator);
97 G(drazka_stator, celo_1) = 1/R(drazka_stator, celo_1);
98 G(drazka_stator, celo_2) = 1/R(drazka_stator, celo_2);
99 G(drazka_stator, jho_stator) = 1/R(drazka_stator, jho_stator);
100 G(zub_stator, jho_stator) = 1/R(zub_stator, jho_stator);
101 G(drazka_stator, zub_stator) = 1/R(drazka_stator, zub_stator);
102 G(drazka, Δ) = 1/R(drazka, Δ);
103 G(zub, Δ) = 1/R(zub, Δ);
104 G(hridel_1,out) = 1/R(hridel_1,out);
105 G(hridel_2,out) = G(hridel_1,out);
106 G(kruh_1,out) = 1/R(kruh_1,out);
107 G(kruh_2,out) = G(kruh_1,out);
108 G(celo_1,out) = 1/R(celo_1,out);
109 G(celo_2,out) = G(celo_1,out);

```

```

110
111 G0 = zeros(N,1);
112
113 G0(jho_stator,1) = 1/R0(jho_stator,1);
114
115 G_temp = G';
116
117 G = G + G_temp;           %% vysledkem je matice soumerna podle diagonaly
118
119 G = G .* (-1);
120
121 for i = 1:N
122     G(i,i) = 0;           %% vynulovani prvku na diagonale (prvky by mely
123                           %% byt nulove samy o sobe)
124 end
125
126 sumG = sum(G,2);         %% sloupcovy vektor obsahujici soucty
127                           %% jednotlivych rad
128
129 for i = 1:N
130     G(i,i) = -sumG(i) + G0(i,1);   %% naplni diagonalu souctem cele rady
131 end

```

## matice.m

```

1 odpory
2
3 P = zeros(N,1);           %% vytvoreni matice ztrat
4
5 P(jho, 1) = P_Fer_j;
6 P(drazka, 1) = P_Cur_d;
7 P(zub, 1) = P_Fer_z;
8 P(kruh_1, 1) = P_Cur_kruh/2;
9 P(kruh_2, 1) = P_Cur_kruh/2;
10 P(jho_stator, 1) = P_Fes_j;
11 P(drazka_stator, 1) = P_Cus_d;
12 P(zub_stator, 1) = P_Fes_z;
13 P(celo_1, 1) = P_Cus_cela/2;
14 P(celo_2, 1) = P_Cus_cela/2;
15
16 T_out = 40;
17
18 P(jho_stator,1) = P(jho_stator,1) + (G0(jho_stator,1) * T_out);
19
20 T = G\P;

```

## Příloha B - Zdrojové soubory pro analytický výpočet tepelné sítě rotoru

### R\_calc.m

```

1 function [ R ] = R_calc( citatel, jmenovatel )
2
3 R = citatel/jmenovatel;
4
5 end

```

## parametry.m

```

1  %%  Rotor  %%
2
3  D_rotor_out = 0.159;
4  alpha_hridel = 102.73;
5  L_paket = 0.343;
6  L_hridel = 0.5 * L_paket;
7  lambda_hridel = 45;
8  r1 = 0.0276;                %% polomer hridele
9  D1 = 2 * r1;                %% prumer hridele
10 konst = 1;
11 lambda_Fe_rad = 30;
12 lambda_Fe_ax = 0.6;
13 lambda_Cu = 400;
14 hd = 0.031;                 %% vyska drazky
15 r4 = (D_rotor_out/2) - hd;   %% polomer ke dnu drazky
16 r3 = r4 - ((r4 - r1)/2);     %% polomer od stredu do poloviny jha
17 bd = 0.0055;                %% sirka drazky (stredni hodnota prumeru
18                                %% zaobljeni horni a dolni casti)
19 Q2 = 26;                    %% pocet drazek rotoru
20 D4 = 2*r4;                   %% prumer ke dnu drazky
21 hz = 0.0235;                %% vyska zubu
22 bz = 0.0094;                %% sirka zubu
23 L_paket_kruh = 0.005;       %% delka mezery mezi paketem a kruhem
24                                %% nakratko
25 S_Cu = 1.587e-4;            %% prurez drazky
26 alpha_kruh1 = 133.94;       %% soucintel prestupu tepla, plocha kruhu
27                                %% kolma na osu
28 alpha_kruh2 = 148.72;       %% soucintel prestupu tepla, plocha kruhu
29                                %% soustredna s osou
30 D_kruh_out = 0.0785;        %% vnejsi obvod kruhu
31 D_kruh_in = 0.03846;        %% vnitřni obvod kruhu
32 tloustka_kruhu = 0.0068;
33 L_kruh = 0.16;
34 alpha_paket = 129.89;
35 alpha_Δ = 148.39;           %% soucinitel prestupu tepla do drazky
36
37 V_d_rotor = Q2*bd*hd*L_paket; %% objem drazek rotoru
38 V_kruh = ((pi*(D_kruh_out^2-D_kruh_in^2))/4)*tloustka_kruhu;
39 V_Cu_rotor = V_d_rotor + V_kruh;
40
41 P_Cu_rotor = 650.107;
42
43 P_Cur_d = P_Cu_rotor*V_d_rotor/(V_d_rotor + V_kruh);
44 P_Cur_kruh = P_Cu_rotor*V_kruh/(V_d_rotor + V_kruh);
45
46 P_Fer_z = 74+409;
47 P_Fer_j = 0;

```

## casti\_stroje.m

```

1  % CASTI STROJE %
2
3  hridel_1 = 1;
4
5  hridel_stred = 2;
6
7  hridel_2 = 3;
8

```

```

9  jho = 4;
10
11  drazka = 5;
12
13  zub = 6;
14
15  kruh_1 = 7;
16
17  kruh_2 = 8;

```

## odpory.m

```

1  clear
2  parametry
3  casti_stroje
4
5  N = 8;
6
7  R = zeros(N,N);           %% vytvoreni N-rozmerne matice odporu
8
9  R(hridel_1, hridel_stred) = R_calc(L_hridel/2, ...
   lambda_hridel*(pi*D1^2)/4) +
10                                R_calc(L_paket/2, (lambda_hridel*pi*D1^2)/4);
11  R(hridel_stred, hridel_2) = R(hridel_1, hridel_stred);
12  R(hridel_stred, jho) = R_calc(r1, lambda_hridel*pi*r1*L_paket) + ...
   R_calc(r3-
13                                r1, ...
   3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r3-r1))+r1)*L_paket);
14  R(jho, drazka) = R_calc(r4-r3, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r4-r3))+r3)
   *L_paket) + R_calc(hd/2, 3*lambda_Cu* bd*L_paket*Q2);
15  R(jho, zub) = R_calc(r4-r3, 3*lambda_Fe_rad*2*pi*((0.5*(r4-r3))+r3)*L_paket)
   + R_calc(hz/2, 3*lambda_Fe_rad*bz*L_paket*Q2);
16  R(drazka, kruh_1) = R_calc((L_paket/2)+L_paket_kruh, 3*lambda_Cu*S_Cu*Q2);
17  R(drazka, kruh_2) = R(drazka, kruh_1);
18  R(drazka, zub) = R_calc(bd/2, 3*lambda_Cu*2*hd*L_paket*Q2) + R_calc(bz/2, 3
   *lambda_Fe_rad*2*hz*L_paket*Q2);
19
20
21
22  R_temp = R';
23
24  R = R + R_temp;           %% vysledkem je matice soumerna podle diagonaly
25
26  for i = 1:N
27      R(i,i) = 0;           %% vynulovani prvku na diagonale (prvky by mely
28                              %% byt nulove samy o sobe)
29  end
30
31  sumR = sum(R, 2);         %% sloupcovy vektor obsahujici soucty
32                              %% jednotlivych rad
33
34  for i = 1:N
35      R(i,i) = sumR(i);     %% naplni diagonalu souctem cele rady
36  end
37
38  R0 = zeros(N, 1);
39
40  R0(hridel_1, 1) = R_calc(1, alpha_hridel*2*pi*r1*L_hridel) + R_calc(r1,
   lambda_hridel*pi*r1*L_hridel);
41
42  R0(hridel_2, 1) = R(hridel_1, 1);
43
44  R_7outa = R_calc(1, (alpha_kruh1*pi*(D_kruh_out^2-D_kruh_in^2))/4);
45  R_8outa = R_7outa;
46  R_7outb = R_calc(1, alpha_kruh2*pi*D_kruh_out*tloustka_kruhu);
47  R_8outb = R_7outb;

```

```

48 R0(kruh_1,1) = 1/((1/R_7outa)+(1/R_7outb));
49 R0(kruh_2,1) = R(kruh_1, 1);
50
51 R0(drazka,1) = R_calc(hd/2, 3*lambda_Cu*bd*L_paket*Q2) + R_calc(1,
52     alpha_delta*bd*L_paket*Q2);
53 R0(zub,1) = R_calc(hz/2, 3*lambda_Fe_rad*bz*L_paket*Q2) + R_calc(1,
54     alpha_delta*bz*L_paket*Q2);
55
56 G = zeros(N,N);           %% vytvoreni N-rozmerne matice odporu
57
58 G(hridel_stred, hridel_1) = 1/R(hridel_stred, hridel_1);
59 G(hridel_stred, hridel_2) = 1/R(hridel_stred, hridel_2);
60 G(hridel_stred, jho) = 1/R(hridel_stred, jho);
61 G(jho, zub) = 1/R(jho, zub);
62 G(jho, drazka) = 1/R(jho, drazka);
63 G(drazka, kruh_1) = 1/R(drazka, kruh_1);
64 G(drazka, kruh_2) = 1/R(drazka, kruh_2);
65 G(drazka, zub) = 1/R(drazka, zub);
66
67 G0 = zeros(N,1);
68
69 G0(hridel_1,1) = 1/R0(hridel_1,1);
70 G0(hridel_2,1) = G0(hridel_1,1);
71 G0(kruh_1,1) = 1/R0(kruh_1,1);
72 G0(kruh_2,1) = G0(kruh_1,1);
73
74 G0(drazka,1) = 1/R0(drazka,1);
75 G0(zub,1) = 1/R0(zub,1);
76
77 G_temp = G';
78
79 G = G + G_temp;         %% vysledkem je matice soumerna podle diagonaly
80
81 G = G .* (-1);
82
83 for i = 1:N
84     G(i,i) = 0;         %% vynulovani prvku na diagonale (prvky by mely
85                         %% byt nulove samy o sobe)
86 end
87
88 sumG = sum(G,2);       %% sloupcovy vektor obsahujici soucty
89                         %% jednotlivych rad
90
91 for i = 1:N
92     G(i,i) = -sumG(i) + G0(i,1);   %% naplni diagonalu souctem cele rady
93 end

```

## matice.m

```

1 odpory
2
3 P = zeros(N,1);       %% vytvoreni matice ztrat
4
5 P(jho,1) = P_Fer_j;
6 P(drazka,1) = P_Cur_d;
7 P(zub,1) = P_Fer_z;
8 P(kruh_1,1) = P_Cur_kruh/2;
9 P(kruh_2,1) = P_Cur_kruh/2;
10
11 T_out = 40;
12
13 P(hridel_1,1) = P(hridel_1,1) + (G0(hridel_1,1) * T_out);

```



```
14 P(hridel_2,1) = P(hridel_2,1) + (G0(hridel_2,1) * T_out);
15 P(kruh_1,1) = P(kruh_1,1) + (G0(kruh_1,1) * T_out);
16 P(kruh_2,1) = P(kruh_2,1) + (G0(kruh_2,1) * T_out);
17 P(zub,1) = P(zub,1) + (G0(zub,1) * T_out);
18 P(drazka,1) = P(drazka,1) + (G0(drazka,1) * T_out);
19
20 T = G\P;
```

## Příloha C - Matice tepelných vodivostí

$$\begin{bmatrix}
 G_{1,1} & -G_{1,2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{1,15} \\
 -G_{1,2} & G_{2,2} & -G_{2,3} & -G_{2,4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -G_{2,3} & G_{3,3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{3,15} \\
 0 & -G_{2,4} & 0 & G_{4,4} & -G_{4,5} & -G_{4,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -G_{4,5} & G_{5,5} & -G_{5,6} & -G_{5,7} & -G_{5,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & -G_{4,6} & -G_{5,6} & G_{6,6} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{5,7} & 0 & G_{7,7} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{7,15} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{5,8} & 0 & 0 & G_{8,8} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{8,15} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_{9,9} & -G_{9,10} & -G_{9,11} & -G_{9,12} & -G_{9,13} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{9,10} & G_{10,10} & 0 & 0 & -G_{10,13} & -G_{14,10} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{9,11} & 0 & G_{11,11} & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{11,15} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{9,12} & 0 & 0 & G_{12,12} & 0 & 0 & 0 & -G_{12,15} \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{9,13} & -G_{10,13} & 0 & 0 & G_{13,13} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & -G_{5,14} & -G_{6,14} & 0 & 0 & -G_{14,9} & -G_{14,10} & 0 & 0 & 0 & G_{14,14} & 0 & 0 \\
 -G_{1,15} & 0 & -G_{3,15} & 0 & 0 & 0 & -G_{7,15} & -G_{8,15} & 0 & 0 & -G_{11,15} & -G_{12,15} & 0 & 0 & 0 & G_{15,15}
 \end{bmatrix}$$

## Diagonála matice vodivosti

$$G_{1,1} = G_{1,2} + G_{1,15}$$

$$G_{2,2} = G_{1,2} + G_{2,3} + G_{2,4}$$

$$G_{3,3} = G_{2,3} + G_{3,15}$$

$$G_{4,4} = G_{2,4} + G_{4,5} + G_{4,6}$$

$$G_{5,5} = G_{4,5} + G_{5,6} + G_{5,7} + G_{5,8} + G_{5,14}$$

$$G_{6,6} = G_{4,6} + G_{5,6} + G_{6,14}$$

$$G_{7,7} = G_{5,7} + G_{7,15}$$

$$G_{8,8} = G_{5,8} + G_{8,15}$$

$$G_{9,9} = G_{9,10} + G_{9,11} + G_{9,12} + G_{9,13} + G_{14,9}$$

$$G_{10,10} = G_{9,10} + G_{10,13} + G_{14,10}$$

$$G_{11,11} = G_{9,11} + G_{11,15}$$

$$G_{12,12} = G_{9,12} + G_{12,15}$$

$$G_{13,13} = G_{9,13} + G_{10,13} + G_{13,out}$$

$$G_{14,14} = G_{5,14} + G_{6,14} + G_{14,9} + G_{14,10}$$

$$G_{15,15} = G_{1,15} + G_{3,15} + G_{7,15} + G_{8,15} + G_{11,15} + G_{12,15}$$