

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2021

Jakub Súkeník



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

TEPELNÝ MODEL VYSOKOotáčkového ASYNCHRONNÍHO MOTORU S PLNÝM ROTOREM A VODNÍM CHLAZENÍM

THERMAL MODEL OF SOLID ROTOR HIGH-SPEED INDUCTION MOTOR WITH WATER COOLING

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jakub Súkeník

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2021

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jakub Súkeník

ID: 209145

Ročník: 3

Akademický rok: 2020/21

NÁZEV TÉMATU:

Tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru s plným rotorem a vodním chlazením

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte základní vztahy přenosu tepla a metodu tepelných sítí.
2. Nastudujte metodiku tepelných výpočtů vysokootáčkových strojů s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a metodiku výpočtu vodního chlazení elektrických strojů.
3. Vytvořte tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a vodním chlazením. Model bude založený na metodě tepelných sítí.
4. Pomocí vytvořeného modelu proveďte tepelný výpočet vysokootáčkového asynchronního motoru a zhodnoťte výsledky výpočtu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] SAARI Juha, Thermal analysis of high-speed induction machines. Doctoral thesis, Finland, 1998.
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second Edition. WILEY, 2014.
- [3] CENGEL Yunus a Afshin GHAJAR. Heat and mass transfer. Fifth edition. McGraw hill education, 2015.
- [4] LIST, Vladimír a Josef HAK. Elektrotechnika II, Elektrické stroje - část 1. SNTL, 1969.

Termín zadání: 8.2.2021

Termín odevzdání: 27.5.2021

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá tepelnými výpočty vysokootáčkového asynchronního stroje s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a vodním chlazením. V první části jsou uvedeny základní vztahy a mechanismy přenosu tepla, také je zde popsána metoda tepelné sítě. V další části jsou odvozeny tepelné odpory pro jednotlivé části stroje a vodní chlazení. Ve třetí části je popsáno rozložení uzlů v tepelné síti asynchronního stroje. V poslední části se nachází výsledné střední teploty tepelné sítě pro vysokootáčkový asynchronní stroj s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a vodním chlazením. Funkčnost vytvořené tepelné sítě byla ověřena pomocí softwaru Ansys.

KLÍČOVÁ SLOVA

Tepelná síť, vysokootáčkový asynchronní motor, plný rotor, výpočet tepelných odporů, vodní chlazení, Ansys

ABSTRACT

This paper deals with thermal calculations of high-speed induction machine with a solid rotor with a copper coating and water cooling. The first part presents the basic equations and mechanisms of heat transfer, and also describes the method of heat network. In the next section, thermal resistances for individual parts of the machine and water cooling are derived. The third part describes the distribution of nodes in the heat network of the induction machine. The last part contains the results of the heat network for the high-speed induction machine with the solid rotor with the copper coating and water cooling. Functionality of the created heat network was verified using Ansys software.

KEYWORDS

Heat network, high-speed induction motor, full rotor, calculation of thermal resistances, water cooling, Ansys

SÚKENÍK, Jakub. *Tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru s plným rotorem a vodním chlazením*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2021, 55 s. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora:	Jakub Súkeník
VUT ID autora:	209145
Typ práce:	Bakalářská práce
Akademický rok:	2020/21
Téma závěrečné práce:	Tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru s plným rotorem a vodním chlazením

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Marku Tomanovi za jeho skvělý profesionální a lidský přístup. Jeho přínos byl pro mne nesmírně cenný a nad rámec běžných povinností vedoucího. Chtěl bych také poděkovat rodičům za jejich vytrvalou a laskavou pomoc v mém studijním úsilí.

Obsah

Úvod	11
1 Základní vztahy přenosu tepla	12
1.1 Mechanismy přenosu tepla	12
1.1.1 Přenos tepla vedením	12
1.1.2 Přenos tepla prouděním	14
1.1.3 Přenos tepla zářením	15
1.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami	16
1.3 Metoda tepelných sítí	16
1.3.1 Sestavení matic na základě tepelné sítě	17
2 Výpočet tepelných odporů	18
2.1 Typy rotorů vysokootáčkových asynchronních strojů	18
2.2 Výpočet tepelného odporu přes rovinnou stěnu	19
2.3 Výpočet tepelného odporu přes válcové mezikruží	19
2.4 Výpočet tepelného odporu ve válcové tyči s vývinem tepla	20
2.5 Výpočet tepelného odporu prouděním	21
2.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře	22
2.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje	23
2.5.3 Výpočet součinitele stykového odporu	24
2.6 Výpočet tepelného odporu vodního chlazení	24
3 Tepelná síť vysokootáčkového stroje	26
3.1 Rozmístění uzlů tepelné sítě ve vysokootáčkovém stroji	26
3.2 Navržená tepelná síť celého stroje	28
3.3 Geometrické rozměry vysokootáčkového stroje	30
3.3.1 Geometrické rozměry kostry a ložiskových štítů	30
3.3.2 Geometrické rozměry statorového paketu	31
3.3.3 Geometrické rozměry statorové drážky	32
3.3.4 Geometrické rozměry rotoru	32
4 Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje	33
4.1 Vstupní parametry použité do výpočtu	33
4.2 Vypočtené střední teploty	35
4.3 Ověření tepelné sítě simulacemi v programu Ansys	37
4.3.1 Porovnání části tepelné sítě s tepelným modelem rotoru	37
4.3.2 Porovnání části tepelné sítě s tepelným modelem statoru	38

4.4 Porovnání středních teplot tepelné sítě stroje s teplotními poli v softwaru Ansys	38
Závěr	40
Literatura	41
Seznam symbolů a zkratk	43
Seznam příloh	45
A Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu	46
B Seznam materiálů a stykových koeficientů zadávaných do výpočtu	49
C Výsledné rovnice tepelných odporů	50
C.1 Vnitřní tepelné odpory stroje	50
C.2 Tepelné odpory zajišťující odvod tepla do okolí a do vodního chlazení	54
C.3 Pomocné tepelné odpory	55
C.3.1 Čela statoru	55
C.3.2 Kostra - vodní chlazení	55
C.3.3 Kostra - konvekce do okolí	55

Seznam obrázků

1.1	Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou	12
1.2	Mezní vrstva rychlostní a mezní vrstva teplotní při přechodu tepla mezi tekutinou a pevnou látkou	14
2.1	Používané typy rotorů vysokootáčkových asynchronních motorů	18
2.2	Vedení tepla mezikružím	20
2.3	Tepelný odpor tyče s vývinem tepla	20
2.4	Oblasti s rozdílným druhem prouděním	23
2.5	Oteplení chladiva kostrou stroje	24
3.1	Rozmístění uzlů tepelné sítě ve vysokootáčkovém stroji	26
3.2	Navržená tepelná síť	28
3.3	Geometrické rozměry kostry a ložiskových štítů	31
3.4	Geometrické rozměry statorového paketu	31
3.5	Geometrické rozměry statorové drážky	32
3.6	Geometrické rozměry rotoru	32
4.1	Rozložení ztrát v rotoru	34
4.2	Teplotní pole rotoru v softwaru Ansys	37
4.3	Teplotní pole statoru v softwaru Ansys	38

Seznam tabulek

1.1	Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami	16
2.1	Vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje	23
4.1	Generované ztráty	34
4.2	Vypočtené střední teploty	35
4.3	Porovnání středních teplot teplotního pole statoru v softwaru Ansys a středních teplot tepelné sítě statoru vypočtené v Matlabu	39
4.4	Porovnání středních teplot teplotního pole rotoru v softwaru Ansys a středních teplot tepelné sítě rotoru vypočtené v Matlabu	39
A.1	Vstupní rozměry zadané do výpočtu	46
A.2	Vypočtené geometrické rozměry na základě vstupních hodnot	48
B.1	Tepelné vodivosti a ekvivalentní tepelné vodivosti	49
B.2	Stykové koeficienty	49

Úvod

Elektrické stroje se významně podílejí na spotřebě elektrické energie, podle [1] a [2] elektrické motory spotřebovávají přibližně 45 % celosvětové vyrobené energie. Díky tomu je potřeba zvyšovat účinnost elektrických strojů pro minimalizaci energetických ztrát.

Kvůli výše popsanému problému se v posledních dekadách vysokootáčkové elektrické stroje dostávají do popředí. Další důvod, který přispěl k jejich rozvoji, je rozmach výkonové elektroniky a frekvenčních měničů. Tyto řídicí prvky jsou schopny napájet vysokootáčkové stroje o velikostech desítek až stovek kilowattů a o frekvencích první harmonické až tisíců hertzů [3]. Neméně důležité jsou dostupné materiály pro tyto stroje, protože musí být uzpůsobeny na značné mechanické a tepelné zatížení.

Vysokootáčkové stroje pracují s vysokými provozními otáčkami. To má za důsledek značně vyšší ztráty než u klasických elektrických strojů, jako jsou ztráty v železe a mechanické ztráty. Na druhou stranu pracují s vyšší hustotou výkonu, což se příznivě projevuje na velikosti a hmotnosti elektrického stroje. Díky těmto vlastnostem je nezbytné tyto stroje konstruovat s adekvátním chlazením, které musí zajišťovat dostatečný odvod tepla ze stroje. Chlazení může být realizováno buď proudícím vzduchem či héliem, nebo vodním chlazením. V našem případě se budeme zabývat vodním chlazením.

Pro rozvoj vysokootáčkových strojů je klíčový vývoj konstrukčních materiálů, jako jsou magneticky tvrdé a měkké materiály směřující k nižší hustotě ztrát, materiálů dostatečně odolné proti mechanickému namáhání a v neposlední řadě také izolačním materiálům, které jsou odolné na vysoké teploty.

Pro pohon zařízení, které vyžaduje vysoké otáčky, je výhodné použít vysokootáčkového stroje namísto běžného elektrického motoru s převodovou skříní. Díky tomu by mohlo být celé zařízení jednodušší, spolehlivější a více účinné. Další výhoda spočívá v tom, že vzhledem k menší hmotnosti je potřeba méně materiálu, a proto by byla výroba vysokootáčkového motoru ekonomičtější.

V současné době se předpokládá, že největší využití těchto vysokootáčkových strojů bude v oblasti automobilového průmyslu. Jeho hlavní použití by spočívalo v turbodmychadlech, kde by se při nedostatku výfukových plynů choval jako motor a při přebytku by dodával elektrickou energii zpět do baterie. Další použití by spočívalo v oblasti turbomolekulárních vývěv nebo setrvačnickových systémů pro ukládání energie [3].

1 Základní vztahy přenosu tepla

1.1 Mechanismy přenosu tepla

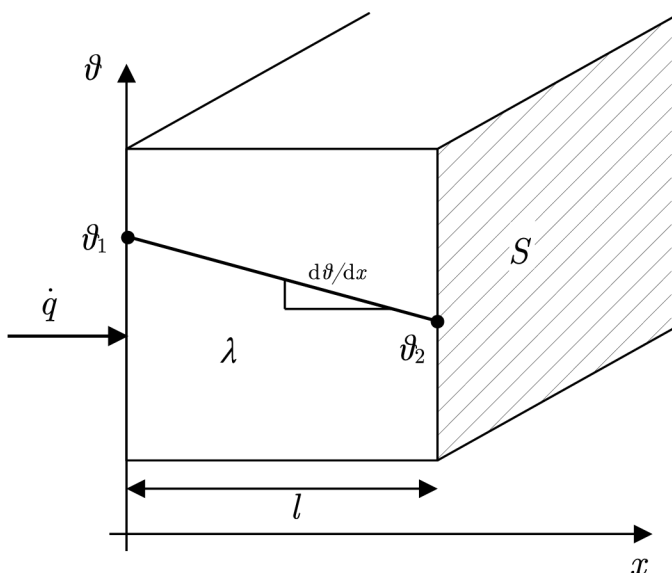
Existují tři způsoby přenosu tepla, a to vedením (kondukcí), prouděním (konvekcí) a sáláním (radiací). Rozdíl teplot se vyrovnává přirozeně jako přenos tepla z teplejšího místa na místo studenější podle druhého zákona termodynamiky. Všechny uvedené druhy přenosu tepla se v mnohých případech vyskytují současně [4].

1.1.1 Přenos tepla vedením

V pevných látkách se převážně uskutečňuje přenos tepla vedením, jinak řečeno kondukcí. Přenos energie je zprostředkován částicemi ve vnitřní struktuře látky, které se neustále pohybují [4]. Základním vztahem pro sdílení tepla vedením je podle [4, 5] Fourierův zákon

$$\dot{\mathbf{q}} = -\lambda \nabla \vartheta, \quad (1.1)$$

kde $\dot{\mathbf{q}}$ je vektor hustoty tepelného toku, λ je měrná tepelná vodivost, $\nabla \vartheta$ je gradient teploty. Záporné znaménko v rovnici (1.1) vyjadřuje to, že tepelný tok proudí ve směru klesající teploty [4]. Přenos tepla přes rovinnou stěnu je vyznačen na Obr. 1.1.



Obr. 1.1: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou, upraveno z [6].

Pomocí rovnice (1.1) lze vztah pro hustotu tepelného toku v rovinné stěně o obsahu jednotkové plochy z [6] psát ve tvaru

$$\dot{q} = \frac{\lambda}{l}(\vartheta_1 - \vartheta_2), \quad (1.2)$$

kde λ představuje měrnou tepelnou vodivost materiálu stěny, ϑ_1 a ϑ_2 jsou teploty jednotlivých stran stěny a l je tloušťka stěny.

Jednotlivé teploty ϑ_1 a ϑ_2 lze nahradit jedním symbolem $\Delta\vartheta$, který představuje rozdíl teplot. Potom můžeme psát

$$\vartheta_1 - \vartheta_2 = \Delta\vartheta. \quad (1.3)$$

Pro celkový tepelný tok \dot{Q} stěny tedy platí z [6]

$$\dot{Q} = \frac{\lambda S}{l} \Delta\vartheta, \quad (1.4)$$

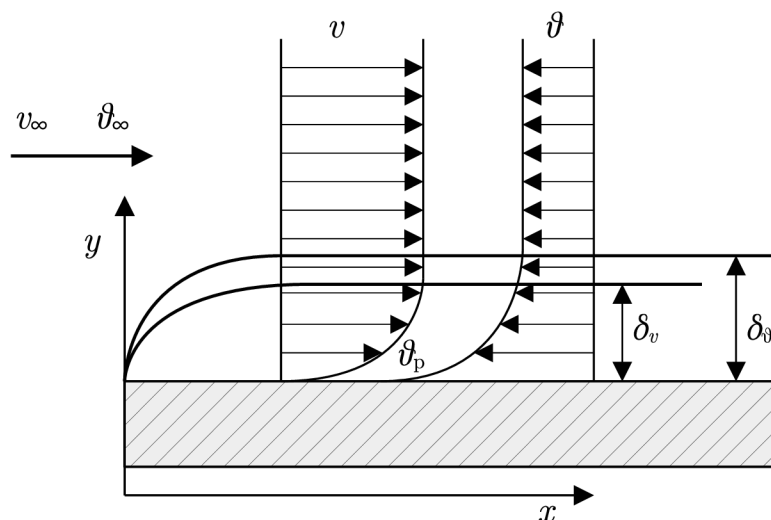
kde S je plocha stěny.

1.1.2 Přenos tepla prouděním

Sdílení tepla prouděním, jinak řečeno konvekcí, je uskutečňováno makroskopickým pohybem tekutiny nebo plynu. Volné proudění vzniká v tekutině samovolně, protože teplejší části tekutiny mají menší hustotu, tudíž stoupají vzhůru, a tím se dává do pohybu celý obsah tekutiny. Zkráceně řečeno, volné proudění vzniká vlivem závislosti hustoty tekutiny na teplotě samovolně [4].

Proudění tepla vyvolané vnější silou, například čerpadlem nebo ventilátorem, se nazývá proudění nucené [4].

Sdílení tepla prouděním se uplatňuje také při přechodu tepla z tekutiny do pevného tělesa, nebo obráceně. Obr. 1.2 popisuje proudění tepla z pevného tělesa do tekutiny. U povrchu pevného tělesa vzniká tenká vrstva tekutiny, která se nazývá mezní vrstva. Na Obr. 1.2 je znázorněn průběh mezní vrstvy teplotní δ_ϑ a mezní vrstvy rychlostní δ_v [5].



Obr. 1.2: Mezní vrstva rychlostní a mezní vrstva teplotní při přechodu tepla mezi tekutinou a pevnou látkou, upraveno z [5].

Newtonova rovnice vyjadřuje množství tepelné energie \dot{q} , které projde za jednotku času jednotkovou plochou z tekutiny do stěny. Podle [4] má Newtonova rovnice tvar

$$\dot{q} = \alpha(\vartheta_p - \vartheta_\infty). \quad (1.5)$$

Pokud je rovnice (1.5) vztažena k určité ploše, kterou tepelný tok prochází, potom má tvar

$$\dot{Q} = \alpha S(\vartheta_p - \vartheta_\infty) = \alpha S \Delta\vartheta, \quad (1.6)$$

kde $\Delta\vartheta$ je rozdíl teploty na povrchu tělesa ϑ_p a teploty dané tekutiny v dostatečné vzdálenosti ϑ_∞ . Předpokládá se, že teplota na povrchu ϑ_p je vyšší, než teplota

v okolní tekutině ϑ_∞ . Hodnota tepelného toku \dot{Q} je kladná, protože se tepelný tok odvádí z tělesa do tekutiny. Proměnná S je teplosměnná plocha na povrchu. Konstanta α se nazývá součinitel přestupu tepla a udává množství tepla, které přejde jednotkovou plochou do tekutiny nebo z ní za jednotku času při teplotním rozdílu jeden Kelvin mezi tekutinou a stěnou [5]. Tento součinitel je podle [5] definován

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{l}, \quad (1.7)$$

kde α je součinitel přestupu tepla proudící tekutiny, l je charakteristická délka a Nu je Nusseltovo číslo, které popisuje, kolikrát je účinnější přenos tepla kondukcí oproti přenosu tepla konvekcí v dané tekutině [5]. Problematika výpočtu součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře je popsána v kapitole 2.5.1.

1.1.3 Přenos tepla zářením

Sdílení tepla sáláním, neboli radiací, je uskutečňováno prostřednictvím elektromagnetického záření. Každé těleso, které má vyšší teplotu než absolutní nula, vyzařuje do okolí toto záření [4].

Na rozdíl od přenosu tepla vedením a prouděním nepotřebuje přenos tepla sáláním prostředí s částicemi, a proto se může uskutečňovat i ve vakuu. Tento druh přenosu tepla je zároveň i nejrychlejší z výše uvedených, ve vakuu dosahuje až rychlosti světla [4].

Tepelný tok sáláním \dot{Q}_s pro dokonale černé těleso je podle [4, 7] vyjádřen ve tvaru

$$\dot{Q}_s = \sigma S T_p^4, \quad (1.8)$$

kde σ je Stefan-Boltzmannova konstanta a T_p je termodynamická teplota povrchu tělesa. Hodnota Stefan-Boltzmannovy konstanty je rovna $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Místo termodynamické teploty lze také dosadit teplotu ve stupních Celsia, avšak je třeba k ní připočíst rozdíl mezi Kelvinovou a Celsiovou stupnicí. Proměnná S představuje povrch tělesa. Výsledný vztah bude pro rovnici (1.8) ve stupních Celsia vypadat takto

$$\dot{Q}_s = \sigma S (\vartheta_p + 273,15)^4, \quad (1.9)$$

kde ϑ_p je teplota povrchu tělesa ve stupních Celsia.

Absolutně černé těleso je model, který dokonale pohlcuje veškeré elektromagnetické záření. Současně je také ideální zářič [4]. Pro reálná tělesa je podle [4, 8] tepelný tok sáláním \dot{Q} popsán vztahem

$$\dot{Q}_s = \varepsilon \sigma S T_p^4, \quad (1.10)$$

kde ε reprezentuje emisivitu povrchu. Absolutně černé těleso nabývá hodnot $\varepsilon = 1$, pro reálná tělesa nabývá emisivita ε hodnot menších než jedna [4, 8].

1.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami

Pro tepelné výpočty se využívá analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami. Tok tepla je analogický toku elektrického proudu a teplota odpovídá elektrickému potenciálu [5]. Tabulka 1.1 zobrazuje analogii mezi elektrickými a tepelnými veličinami.

Tab. 1.1: Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami [5, 9].

Tepelná veličina	Symbol	Jednotka	El. veličina	Symbol	Jednotka
Tepelná energie	Q	J	El. náboj	Q_e	C
Tepelný tok	\dot{Q}	W	El. proud	I	A
Hustota tep. toku	\dot{q}	$\frac{W}{m^2}$	Proud. hustota	J	$\frac{A}{m^2}$
Teplota	ϑ	°C	El. potenciál	φ	V
Oteplení	$\Delta\vartheta$	°C	El. napětí	U	V
Součinitel tep. vod.	λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	El. měrná vod.	σ_e	$\frac{S}{m}$
Tepelný odpor	R	$\frac{K}{W}$	El. odpor	R_e	Ω
Tepelná vodivost	G	$\frac{W}{K}$	El. vodivost	G_e	S
Tepelná kapacita	C	$\frac{J}{K}$	El. kapacita	C_e	F

Z tabulky 1.1 plyne, že v tepelných obvodech platí Ohmův zákon ve tvaru

$$\dot{Q} = \frac{\Delta\vartheta}{R}. \quad (1.11)$$

Tepelná vodivost se vyjádří podle [6] z rovnice (1.11) jako převrácená hodnota tepelného odporu.

$$G = \frac{1}{R}. \quad (1.12)$$

1.3 Metoda tepelných sítí

Kvůli vysoké hustotě výkonu je kladen velký důraz na chlazení vysokootáčkových strojů. Díky vyšším otáčkám má motor vyšší objemovou hustotu výkonu, a také vyšší objemovou hustotu ztrát. Proto je dobré mít před samotnou výrobou vysokootáčkového stroje představu o tom, jestli je chlazení dostatečné [6].

Tepelný výpočet stroje se dá realizovat například metodou tepelných sítí neboli metodou ekvivalentních tepelných obvodů. Cílem této metody je vytvořit tepelné schéma, které svým uspořádáním bude simulovat tepelné chování stroje. Tepelné schéma se skládá z jednotlivých prvků, jako jsou uzly, větve a nory [6].

- **Uzel** - je charakterizován svou teplotou a může, či nemusí být zdrojem tepelného toku.
- **Větev** - představuje cestu tepelného toku mezi jednotlivými uzly, je charakterizována tepelným odporem, případně vodivostí.
- **Nor** - zprostředkovává přestup tepla do okolního prostředí.

Tato metoda se používá především na ustálené stavy, ale je možné ji doplnit tepelnými kapacitami pro přechodné stavy [6, 10].

1.3.1 Sestavení matic na základě tepelné sítě

Výpočet tepelné sítě se řeší pomocí soustavy n lineárních rovnic, n představuje počet uzlů tepelné sítě. Tyto rovnice jsou ve tvaru

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{Q}_{01} + g_{n,1}\vartheta_{\text{okolí},1} \\ \dot{Q}_{02} + g_{n,2}\vartheta_{\text{okolí},2} \\ \dot{Q}_{03} + g_{n,3}\vartheta_{\text{okolí},3} \\ \vdots \\ \dot{Q}_{0n} + g_{n,n}\vartheta_{\text{okolí},n} \end{pmatrix}. \quad (1.13)$$

Proměnné g_{ij} představují tepelné vodivosti spojující i -tý a j -tý uzel. Podle [6] jsou tepelné vodivosti dány odporem této větve

$$g_{ij} = \frac{1}{R_{ij}} \quad (1.14)$$

a zároveň se rovná

$$g_{ij} = g_{ji}. \quad (1.15)$$

Rovnici (1.13) lze vyjádřit podle [6, 11] ve zkráceném tvaru

$$\mathbf{G} \times \boldsymbol{\vartheta} = \dot{\mathbf{Q}}, \quad (1.16)$$

kde \mathbf{G} představuje matici tepelných vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je matice neznámých teplot a $\dot{\mathbf{Q}}$ je matice tepelných toků, které obsahují vnitřní generované ztráty \dot{Q}_{0n} a odvod tepla do okolí. Řešením rovnice (1.13) je podle [6, 11] výsledná matice neznámých teplot $\boldsymbol{\vartheta}$, která je ve tvaru

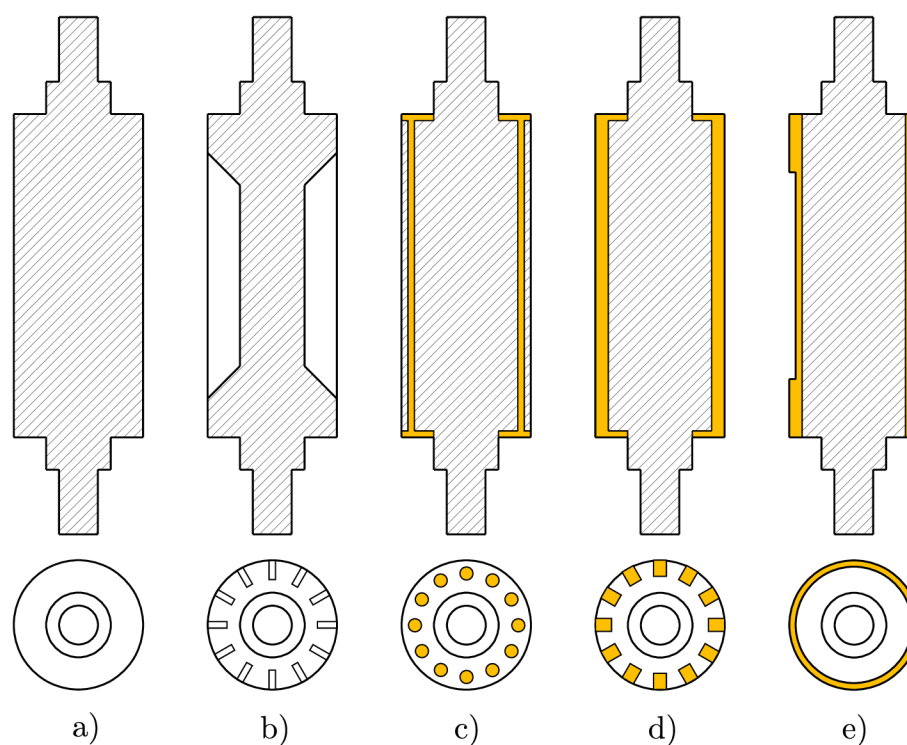
$$\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{G}^{-1}\dot{\mathbf{Q}}, \quad (1.17)$$

kde \mathbf{G}^{-1} je inverzní matice tepelných vodivostí. K sestavení matic popsaných výše je třeba znát geometrické rozměry řešeného stroje, dále je třeba také určit tepelné odpory všech částí stroje [6].

2 Výpočet tepelných odporů

2.1 Typy rotorů vysokootáčkových asynchronních strojů

V této sekci jsou uvedeny typy rotorů, které se používají u vysokootáčkových asynchronních motorů. U standardních asynchronních strojů se používá rotor s klecí nakrátko, který je poměrně jednoduchý a robustní. Vysokootáčkové stroje pracují s vyššími provozními otáčkami, proto je rotor více mechanicky namáhán. To je hlavní důvod, proč lze místo běžného klecového rotoru složeného z plechů zvolit masivní rotor z plné oceli [3]. Na Obr. 2.1 jsou zobrazeny používané typy rotorů vysokootáčkových asynchronních strojů. Tepelný model, který je v této práci uveden, bude uvažovat plný rotor s měděnou vrstvou na povrchu, Obr. 2.1 e).



Obr. 2.1: Používané typy rotorů vysokootáčkových asynchronních motorů, upraveno z [3].

2.2 Výpočet tepelného odporu přes rovinnou stěnu

Pro vyjádření tepelného odporu stěny R_s na Obr. 1.1 budeme vycházet z rovnice, která je podle [8] ve tvaru

$$\dot{Q} = \frac{\Delta\vartheta\lambda S}{l}. \quad (2.1)$$

Obecný tepelný odpor má tvar podle [8]

$$R = \frac{\Delta\vartheta}{\dot{Q}}. \quad (2.2)$$

Dosazením rovnice (2.1) do rovnice (2.2) dostáváme výsledný tepelný odpor stěny R_s ve tvaru

$$R_s = \frac{l}{\lambda S}. \quad (2.3)$$

2.3 Výpočet tepelného odporu přes válcové mezikruží

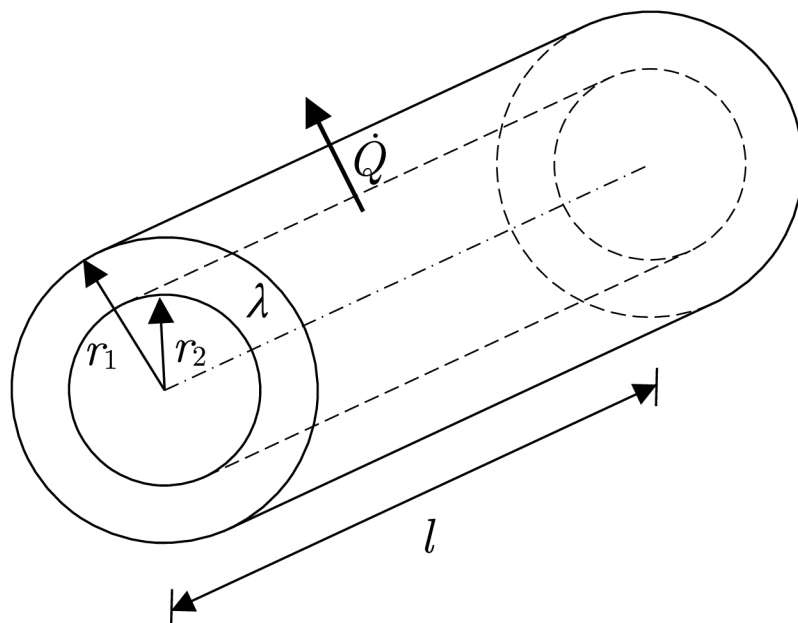
Podle [4] platí pro celkový tok válcového mezikruží \dot{Q} rovnice

$$\dot{Q} = \frac{2\pi l \Delta\vartheta}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{2\pi l \Delta\vartheta}{\frac{1}{\lambda} \ln \frac{d_2}{d_1}}, \quad (2.4)$$

kde r_1 , r_2 jsou vnitřní a vnější poloměry, respektive d_1 , d_2 jsou vnitřní a vnější průměry mezikruží a l je délka mezikruží. Na Obr. 2.2 je uvedeno vedení tepla mezikružím.

Dosazením rovnice (2.2) do rovnice (2.4) získáme výsledný tepelný odpor mezikruží R_v ve tvaru

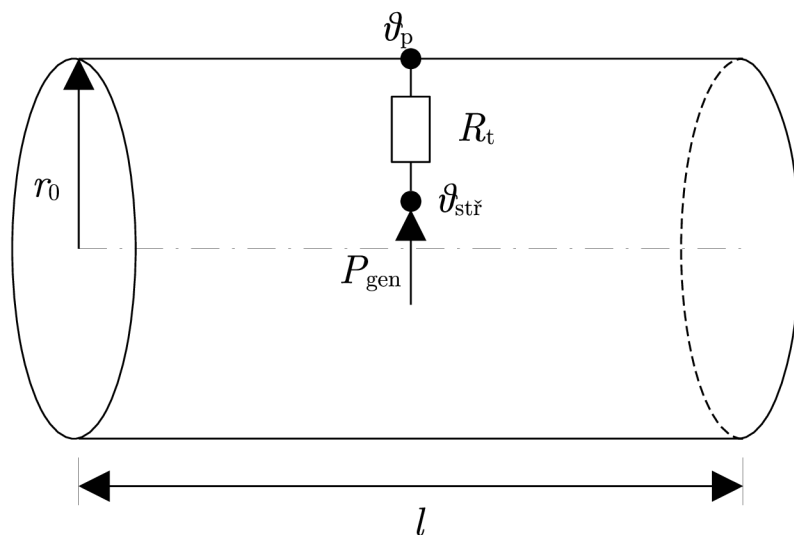
$$R_v = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi l \lambda}. \quad (2.5)$$



Obr. 2.2: Vedení tepla mezikružím, upraveno z [4].

2.4 Výpočet tepelného odporu ve válcové tyči s vývinem tepla

Na Obr. 2.3 je zobrazena tyč o poloměru r_0 , měrné tepelné vodivosti λ a délce l . V této tyči se generují měrné objemové ztráty p_{gen} .



Obr. 2.3: Tepelný odpor tyče s vývinem tepla, upraveno z [8].

Vztah mezi celkovými ztrátami a ztrátami objemovými v tyči je podle [8] popsáno vztahem

$$P_{\text{gen}} = p_{\text{gen}} \pi r_0^2 l, \quad (2.6)$$

kde P_{gen} jsou celkové generované ztráty v tyči. Pro odvození odporu v tyči budeme vycházet z rovnice teplotního průběhu, která je podle [8] ve tvaru

$$\vartheta = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\lambda} (r_0^2 - r^2), \quad (2.7)$$

kde ϑ je teplota závislá na poloměru tyče, ϑ_p je teplota na povrchu, r_0 je poloměr tyče a λ je měrná tepelná vodivost tohoto tělesa.

Dosazením rovnice (2.6) do rovnice (2.7) dostaneme

$$\vartheta = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\pi\lambda l r_0^2} (r_0^2 - r^2). \quad (2.8)$$

Dosazením $r = 0$ do rovnice (2.8) se získá

$$\vartheta_{\text{max}} = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\pi\lambda l}, \quad (2.9)$$

kde ϑ_{max} je maximální teplota uprostřed tyče.

Při určení střední teploty je potřeba zohlednit hodnotu teploty vzhledem k poloměru a platí

$$\vartheta_{\text{stř}} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} \vartheta(r) 2\pi r dr = \frac{2}{r_0^2} \int_0^{r_0} \vartheta(r) r dr, \quad (2.10)$$

kde $\vartheta_{\text{stř}}$ je střední teplota v tyči. Dosazením rovnice (2.10) do rovnice (2.8) dostáváme

$$\vartheta_{\text{stř}} = \vartheta_p + \frac{P_{\text{gen}}}{4\pi\lambda l}. \quad (2.11)$$

Podle Obr. 2.3 platí pro střední teplotu

$$\vartheta_{\text{stř}} = \vartheta_p + P_{\text{gen}} R_t. \quad (2.12)$$

Výsledná rovnice pro výpočet vnitřního odporu vedením uvnitř tyče se určí tak, že se porovnají rovnice (2.11) a (2.12).

$$R_t = \frac{1}{8\pi l \lambda}. \quad (2.13)$$

2.5 Výpočet tepelného odporu prouděním

Odpor prouděním R se získá z rovnic (2.2) a (1.6) ve tvaru

$$R = \frac{1}{\alpha S}, \quad (2.14)$$

kde α je součinitel přestupu tepla a S je plocha povrchu tělesa.

2.5.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Výpočet přestupu tepla ve vzduchové mezeře je důležitý z hlediska přenosu tepla prouděním. Tento koeficient se vypočte posloupností rovnic, které jsou zde popsány. Podle [5, 12] se nejdříve vypočte Taylorovo číslo Ta , které vyjadřuje poměr mezi viskózními silami a odstředivými silami,

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 r_{stř} \delta^3}{\mu^2}, \quad (2.15)$$

kde ω je úhlová rychlost rotoru, ρ je hustota dané tekutiny, $r_{stř}$ je střední hodnota poloměru vzduchové mezery, δ je šířka vzduchové mezery a μ je viskozita tekutiny.

Geometrický faktor F_g je podle [5] ve tvaru

$$F_g = \frac{\pi^4 \left[\frac{2r_{stř} - 2,304\delta}{2r_{stř} - \delta} \right]}{1697 \left[\frac{2r_{stř} - 2,304\delta^2}{2r_{stř} - \delta} \right] \left[1 - \frac{\delta}{2r_{stř}} \right]}. \quad (2.16)$$

Modifikované Taylorovo číslo Ta_m se vypočte podle [5] jako

$$Ta_m = \frac{Ta}{F_g}. \quad (2.17)$$

Obvykle je šířka vzduchové mezery δ v porovnání s poloměrem rotoru velice malá, díky této okolnosti je geometrický faktor F_g roven přibližně jedné a můžeme podle [5] předpokládat

$$Ta_m \approx Ta. \quad (2.18)$$

Nusseltovo číslo se určí podle [5] ve tvaru

$$\begin{aligned} Nu &= 2 && \text{pro } Ta_m \leq 1700, \\ Nu &= 0,128 Ta_m^{0,367} && \text{pro } 1700 < Ta_m < 10^4, \\ Nu &= 0,409 Ta_m^{0,241} && \text{pro } < Ta_m < 10^7. \end{aligned} \quad (2.19)$$

Výsledný součinitel přestupu tepla z rotoru do vzduchové mezery ze statoru se určí dle [5, 13] ve tvaru

$$\alpha = \frac{Nu \lambda}{\delta}. \quad (2.20)$$

Taylorovo číslo dosahuje ve vysokootáčkových strojích velikosti od 10^7 do 10^9 .

Pro $Ta < 1700$ je proudění turbulentní a vztah pro Nusseltovo číslo je experimentálně ověřeno do hodnoty $Ta < 10^7$, ale dá se očekávat, že tento vztah bude platný i pro vyšší hodnoty proudění [14].

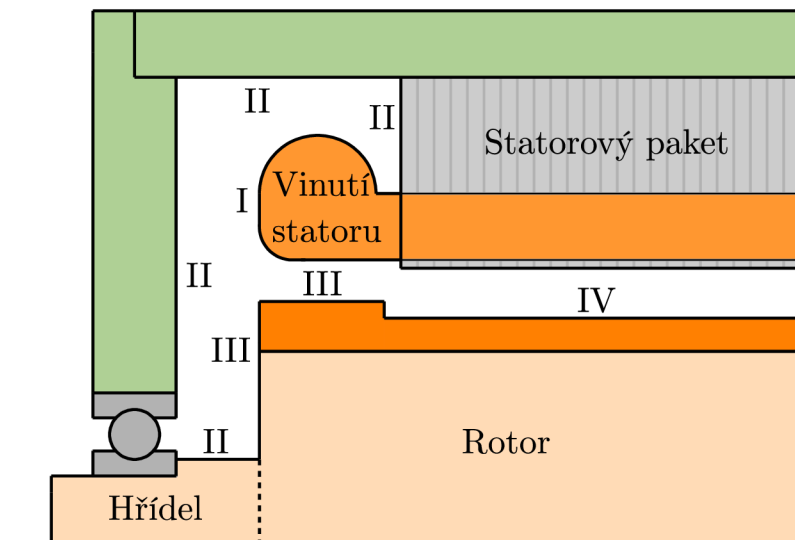
2.5.2 Výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje

Kvůli náročnému modelování proudění ve vnitřních částech vysokootáčkového stroje bylo určení součinitelů přestupu tepla uvnitř stroje velice obtížné. Vztahy popisující proudění ve vysokootáčkových strojích nebylo možné dohledat, dokonce ani v základních literárních pramenech, které přímo řeší problematiku vysokootáčkových strojů, jako jsou [5] a [14]. Proto byly použity vztahy pro pomaluběžné stroje z [15]. Tyto vztahy se nachází v tabulce 2.1. Výpočty součinitelů přestupu tepla uvnitř stroje

Tab. 2.1: Vztahy pro výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje.

Číslo oblasti	Název oblasti	Vztah
I	Čela vinutí statoru	$\alpha_{c,v} = 6,5 + 5,25^{0,6} u_1^{0,6}$
II	Statorový paket Štítý stroje Kostra stroje Hřídel	$\alpha_{Fe,sv}$ $\alpha_{s,vv} = 15 + 6,75^{0,65} u_1^{0,65}$ $\alpha_{r,vv}$ $\alpha_{h,vv}$
III	Kruh rotoru v radiálním směru Kruh rotoru v axiálním směru	$\alpha_{k,rr} = 16,5^{0,65} u_1^{0,65}$ $\alpha_{k,ra}$
IV	Vzduchová mezera	α_{Del} Viz kapitola 2.5.1

jsou závislé na obvodové rychlosti otáčení rotoru u_1 .



Obr. 2.4: Oblasti s rozdílným druhem prouděním.

2.5.3 Výpočet součinitele stykového odporu

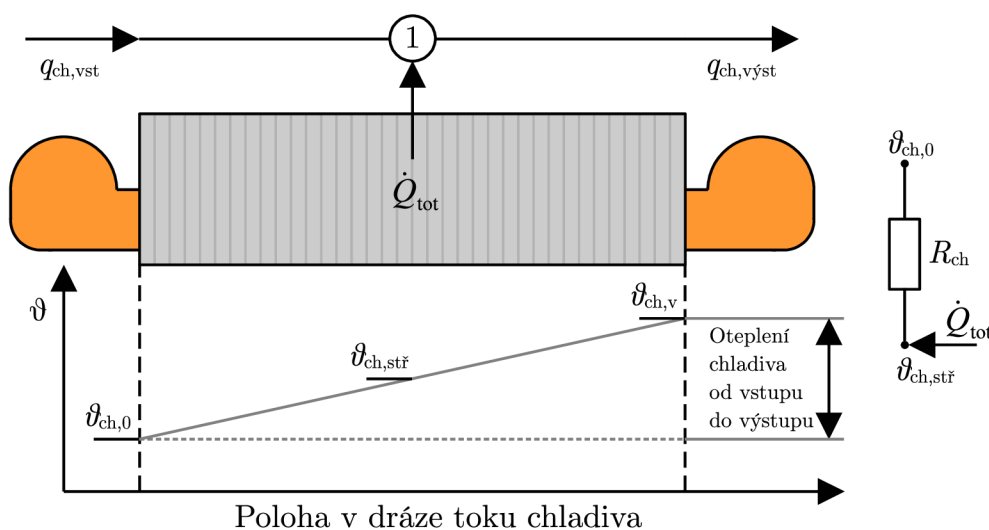
Jestliže jsou dva pevné materiály ve styku, můžeme mezi nimi uvažovat součinitel stykového odporu. Tento součinitel vyjadřuje množství tepelného toku, který je přenesen mezi dvěma plochami těchto materiálů, zmenšených o nedokonalosti povrchů styčných ploch těchto materiálů. Rovnice pro výpočet součinitele stykového odporu k je podle [5] ve tvaru

$$k = \frac{\text{Nu}\lambda}{l}, \quad (2.21)$$

kde l je charakteristická délka mezi dvěma materiály, Nu je Nusseltovo číslo a λ je součinitel tepelné vodivosti. Součinitel stykového odporu k má stejný rozměr jako součinitel přestupu tepla. Tyto koeficienty je možné dohledat v [5].

2.6 Výpočet tepelného odporu vodního chlazení

Na Obr. 2.5 je znázorněna jednoduchá tepelná síť vodního chlazení. Během proudění chladiva v kanálech kostry se chladivo rovnoměrně otepluje ze vstupní teploty $\vartheta_{\text{ch},0}$ na konečnou teplotu $\vartheta_{\text{ch},v}$.



Obr. 2.5: Oteplení chladiva kostrou stroje, upraveno z [5].

Budeme předpokládat, že objemový průtok q_{ch} není závislý na teplotě chladiva [8]. Z Obr. 2.5 je možné úvahou dojít na to, že výstupní teplota chladiva $\vartheta_{\text{ch},v}$ je ve tvaru

$$\vartheta_{\text{ch},v} = \vartheta_{\text{ch},0} + 2(\vartheta_{\text{ch},\text{stř}} - \vartheta_{\text{ch},0}), \quad (2.22)$$

kde je $\vartheta_{\text{ch},\text{stř}}$ střední teplota chladiva. Úpravou rovnice (2.22) dostáváme

$$\vartheta_{\text{ch},v} = 2\vartheta_{\text{ch},\text{stř}} - \vartheta_{\text{ch},0}. \quad (2.23)$$

Podle [8] je vztah mezi vstupní a výstupní teplotou chladiva a celkovým tepelným tokem odváděným chladivem \dot{Q}_{tot} udáván následující rovnicí

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \rho_{\text{ch}} q_{\text{ch}} c_p (\vartheta_{\text{ch,v}} - \vartheta_{\text{ch,0}}), \quad (2.24)$$

kde ρ_{ch} je hustota daného chladiva, q_{ch} je objemový průtok nezávislý na teplotě a c_p je měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku. Dosazením rovnice (2.23) do rovnice (2.24) a následné úpravě dostaneme

$$\dot{Q}_{\text{tot}} = \rho_{\text{ch}} q_{\text{ch}} c_p (2\vartheta_{\text{ch,stř}} - 2\vartheta_{\text{ch,0}}). \quad (2.25)$$

Obecný odpor je podle rovnice (2.2) roven

$$R = \frac{\Delta\vartheta}{\dot{Q}}. \quad (2.26)$$

Rozdíl teplot $\Delta\vartheta$ můžeme pro rovnici (2.26) zapsat ve tvaru

$$\Delta\vartheta = \vartheta_{\text{ch,stř}} - \vartheta_{\text{ch,0}}. \quad (2.27)$$

Dosazením rovnice (2.25) a rovnice (2.27) do vztahu (2.26) je výsledek roven

$$R_{\text{ch}} = \frac{(\vartheta_{\text{ch,stř}} - \vartheta_{\text{ch,0}})}{2\rho_{\text{ch}} q_{\text{ch}} c_p (\vartheta_{\text{ch,stř}} - \vartheta_{\text{ch,0}})}. \quad (2.28)$$

Po úpravě vztahu (2.28) získáváme výsledný tepelný odpor chladiva ve tvaru

$$R_{\text{ch}} = \frac{1}{2\rho_{\text{ch}} q_{\text{ch}} c_p}. \quad (2.29)$$

Z rovnice (2.29) je patrné, že tepelný odpor chladiva není závislý na teplotě. Tento odpor se nachází mezi vstupní teplotou a střední teplotou chladiva [5].

3 Tepelná síť vysokootáčkového stroje

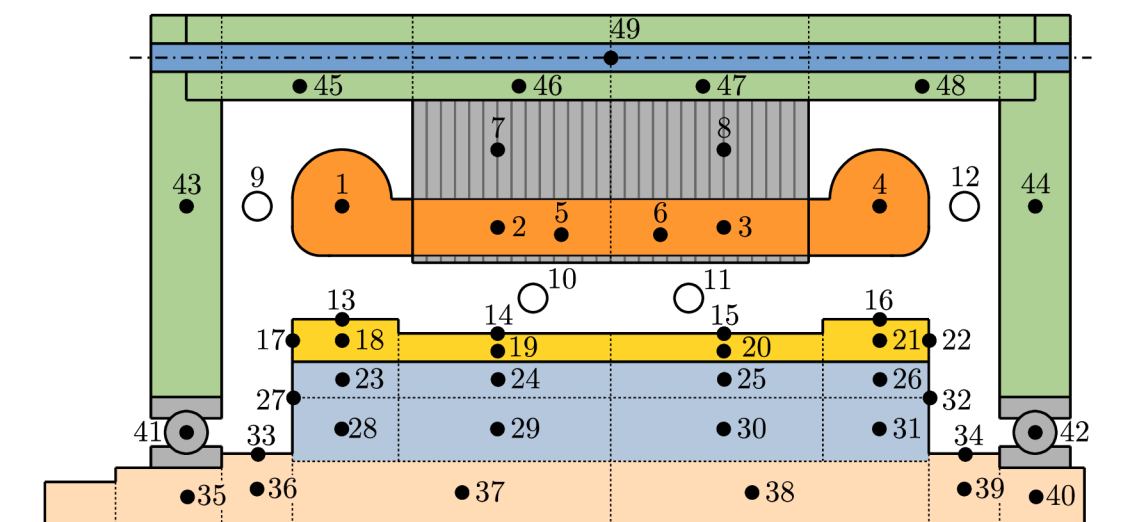
3.1 Rozmístění uzlů tepelné sítě ve vysokootáčkovém stroji

Rozmístění bodů tepelné sítě vysokootáčkového stroje je zobrazeno na Obr. 3.1. Na tomto obrázku je rozloženo 49 uzlů, které jsou vyznačeny body a v každém uzlu je počítána střední teplota dané části stroje. Bílé kruhy s ohraničením na Obr. 3.1 značí body, které se nachází v prostoru vnitřního vzduchu a ve vzduchové mezeře stroje.

Návrh, uspořádání uzlů a následné očíslování uzlů bylo vhodně provedeno pomocí pokynů vedoucího s ohledem na geometrické rozměry analyzovaného stroje, rozmístění ztrát generovaných v podobě mechanických ztrát a rozmístění objemových ztrát uvnitř stroje.

Na Obr. 3.1 byla aktivní část stroje rozdělena na dvě části z důvodu, aby bylo možné v budoucnu síť dále upravit na variantu stroje s radiálním kanálem uprostřed, jak je použito v práci [14].

Stroj byl rozdělen na jednotlivé sekce, které jsou ohraničeny přerušovanými čarami. Ve skutečnosti jsou tyto čáry pouze myšlené. Tímto rozdělením se definovalo ohraničení jednotlivých objemů, ve kterých je počítána střední teplota. Zároveň se tímto ohraničením daly určit geometrické rozměry zadávané do výpočtů jednotlivých odporů tepelné sítě stroje.



Obr. 3.1: Rozmístění uzlů tepelné sítě ve vysokootáčkovém stroji.

Význam jednotlivých uzlů rozmístěných na Obr. 3.1.

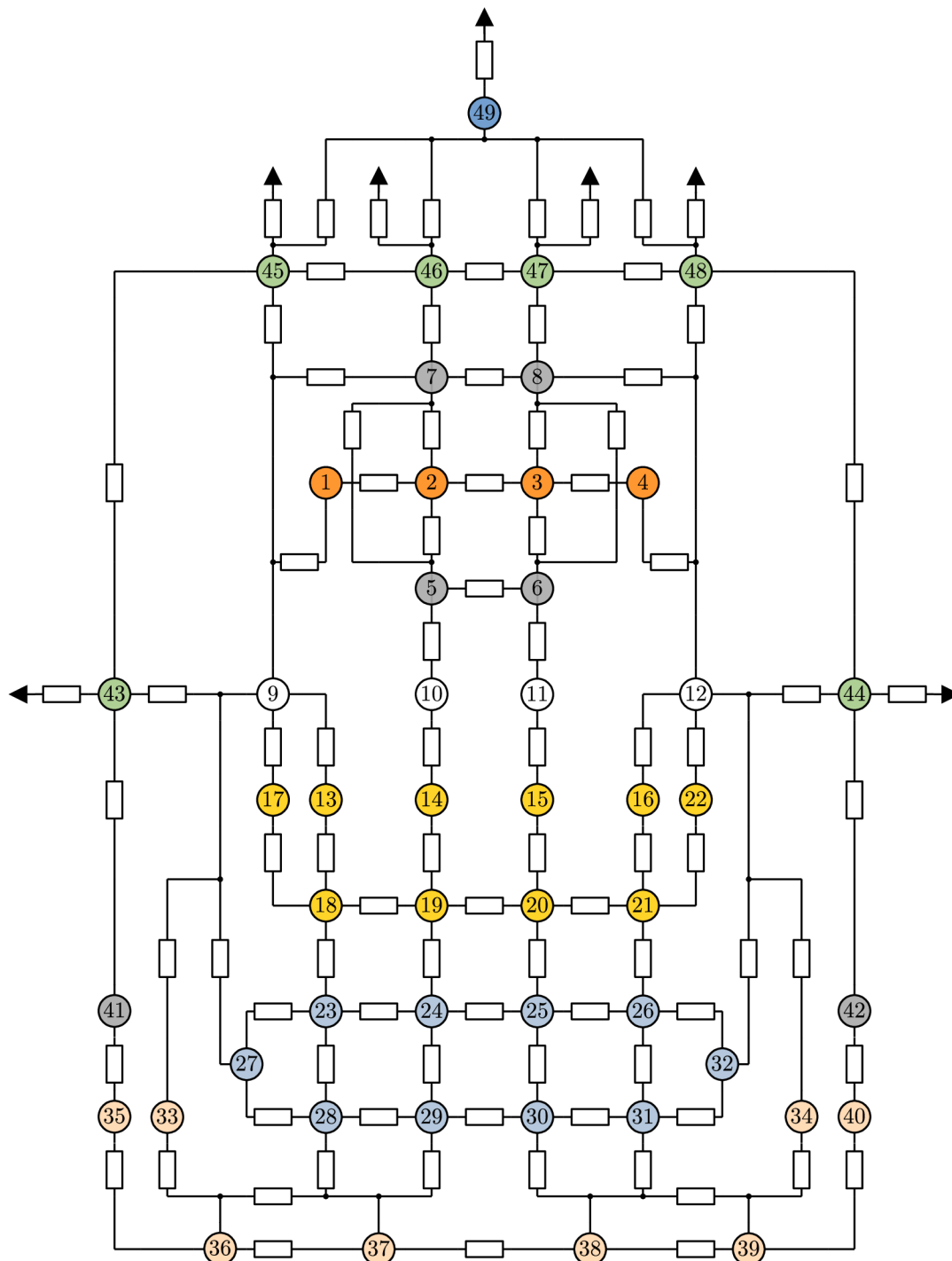
1 - Čelo vinutí statoru	26 - Jho rotoru, kruh I
2 - Vinutí v drážkách statoru	27 - Povrch jha rotoru z boku
3 - Vinutí v drážkách statoru	28 - Jho rotoru, kruh II
4 - Čelo vinutí statoru	29 - Jho rotoru, aktivní část II
5 - Zuby statoru	30 - Jho rotoru, aktivní část II
6 - Zuby statoru	31 - Jho rotoru, kruh II
7 - Jho statoru	32 - Povrch jha rotoru z boku
8 - Jho statoru	33 - Povrch hřídele, vn. vzduch
9 - Vnitřní vzduch	34 - Povrch hřídele, vn. vzduch
10 - Vzduchová mezera	35 - Hřídel pod ložiskem
11 - Vzduchová mezera	36 - Hřídel, vnitřní vzduch
12 - Vnitřní vzduch	37 - Vnitřní část hřídele
13 - Povrch kruhu rotoru	38 - Vnitřní část hřídele
14 - Povrch aktivní části rotoru	39 - Hřídel, vnitřní vzduch
15 - Povrch aktivní části rotoru	40 - Hřídel pod ložiskem
16 - Povrch kruhu rotoru	41 - Ložisko
17 - Povrch kruhu rotoru z boku	42 - Ložisko
18 - Kruh rotoru	43 - Štít, strana hřídele
19 - Aktivní část rotoru	44 - Štít, strana el. přívodu
20 - Aktivní část rotoru	45 - Kostra, oblast čel
21 - Kruh rotoru	46 - Kostra, statorové jho
22 - Povrch kruhu rotoru z boku	47 - Kostra, statorové jho
23 - Jho rotoru, kruh I	48 - Kostra, oblast čel
24 - Jho rotoru, aktivní část I	49 - Vodní chlazení
25 - Jho rotoru, aktivní část I	

Rozmístění uzlů je na Obr. 3.1 symetrické v radiálním směru, proto by bylo možné uvažovat jen polovinu všech uzlů. Toto řešení by se dalo použít pouze na symetrické rozložení teplot ve stroji, ovšem rozmístění uzlů je konstruováno i na případné nesymetrické rozložení teplot v axiálním směru, proto jsou uvažovány všechny uzly. Největší hustota uzlů na Obr. 3.1 se nachází v rotoru analyzovaného stroje. Tato část je z hlediska tepelného výpočtu velice důležitá, proto jsou zde uvedeny uzly i na povrchu.

Jho rotoru je myšleně rozděleno na dvě vrstvy. Tyto vrstvy jsou popsány římskými číslicemi.

3.2 Navržená tepelná síť celého stroje

Na Obr. 3.2 je zobrazena kompletní navržená tepelná síť analyzovaného stroje. Počet uzlů na Obr. 3.2 koresponduje s počtem uzlů na Obr. 3.1.



Obr. 3.2: Navržená tepelná síť.

Pro přehlednost byly uzly na Obr. 3.2 vybarveny stejnými barvami jako na Obr. 3.1. Jednotlivé tepelné odpory jsou zobrazeny schématickými značkami odporu. Většinou se jedná o sériovou kombinaci více tepelných odporů.

Uzly 45 až 48 na Obr. 3.2 značí kostru stroje. Odsud je odváděna většina ztrát ze stroje, nejvíce se na tomto odvodu tepla podílí uzel číslo 49. Tento uzel reprezentuje vodní chlazení. Předpokládá se, že téměř veškeré tepelné ztráty se odvedou ze stroje přes satorový paket a přes ložiskové štíty stroje do vodního chlazení. Jen malá část tepelných ztrát se odvede konvekcí z povrchu kostry stroje do okolí. Proto není v tomto případě uvažován odvod tepelných ztrát radiací z kostry.

Ložiskové štíty jsou popsány uzly 43 a 44. Přes tyto uzly se odvádí část tepelných ztrát z rotoru přes ložiska do kostry stroje. Také se z ložiskových štítů odvádí tepelné ztráty do okolí pomocí konvekce. Pro přenos ztrát z těchto uzlů do kostry bylo zapotřebí určit součinitele stykového odporu mezi kostrou, štíty a ložisky.

Uzly 5 a 6 reprezentují zuby satoru a uzly 7 a 8 znázorňují satorové jho. Kvůli tomu, že jsou tyto části sestavené z izolovaných plechů, je jejich tepelná vodivost značně omezena v axiálním směru, a tak se převážně uplatňuje vedení tepla v radiálním směru. V axiálním směru je závislá na tloušťce izolace a druhu izolace plechu. Pro výpočty uvažujeme ekvivalentní vodivost zahrnující tepelné vlastnosti plechu a izolace.

Oranžové uzly na Obr. 3.2 označené čísly 1 až 4 vyjadřují vinutí a čela satoru. Na vinutí je použito materiálu s dobrou tepelnou i elektrickou vodivostí, jako je měď nebo hliník. Jelikož je vinutí tvořeno jednotlivými lakovanými vodiči, předpokládá se dobrá tepelná vodivost v axiálním směru a nízká tepelná vodivost v radiálním směru. Pro zjednodušení byly samostatné vodiče nahrazeny homogenní tyčí s ekvivalentními tepelnými vlastnostmi. I když je tepelná vodivost v radiálním směru malá, kvůli velké ploše se podstatná část tepelných ztrát odvede do satorových plechů radiálně.

Čela jsou složena podobně jako vinutí. Určení středních teplot čel bylo velice náročné, protože se v tomto uspořádání musí předpokládat s tím, že se v některých částech čela projevuje dobrá tepelná vodivost v radiálním směru a v jiných částech čela v axiálním směru. Bylo zde zavedeno zjednodušení, které spočívá v tom, že se čela nahradí toroidem, do kterého se zapustí jednotlivé vodiče nahrazené tyčemi vystupujícími z drážek satoru. Tato zapuštěná vinutí mají dobrou tepelnou vodivost v axiálním směru. Samotný toroid má dobrou tepelnou vodivost v tangenciálním směru, to je pravoúhlý směr k ose otáčení. V oblasti čela se nachází více než polovina délky celého satorového vinutí. To má za důsledek větší generaci tepelných ztrát v čelech vinutí, než ve vinutí v drážce satoru, proto zde dochází ke značnému oteplení.

Uzly 10 a 11 znázorněnými bílými kruhy značí vzduchovou mezeru stroje. Jelikož se jedná o vysokootáčkový stroj, nabývají ztráty třením o vzduch mnohem větších

hodnot, než je tomu tak u pomaluběžných strojů. Díky těmto ztrátám je teplota ve vzduchové mezeře a v oblastech vnitřního vzduchu vyšší. Tepelné ztráty jsou z rotoru odváděny přes vzduchovou mezeru do statorových plechů a přes hřídel do kostry stroje. Jelikož není na Obr. 3.2 uvažován axiální odpor mezi uzlem 10 a 11, předpokládá se pouze radiální přenos tepla konvekcí ve vzduchové mezeře. Pro správný výpočet tepelného odporu vzduchové mezery je důležité určit součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře, postup výpočtu je uveden v kapitole 2.5.1.

Uzly 9 a 12 představují vnitřní vzduch stroje. Zde se také uplatňuje přenos tepla konvekcí. Tyto uzly spojují jednotlivé části stroje. V tomto případě uvažujeme střední teplotu ve všech částech vnitřního vzduchu konstantní. Velikost přenosu tepelných ztrát závisí na ploše mezi danou částí stroje a vnitřním vzduchem a na součinitelích přestupu tepla v různých částech stroje. Výpočty jednotlivých součinitelů přestupu tepla uvnitř stroje jsou uvedeny v kapitole 2.5.2.

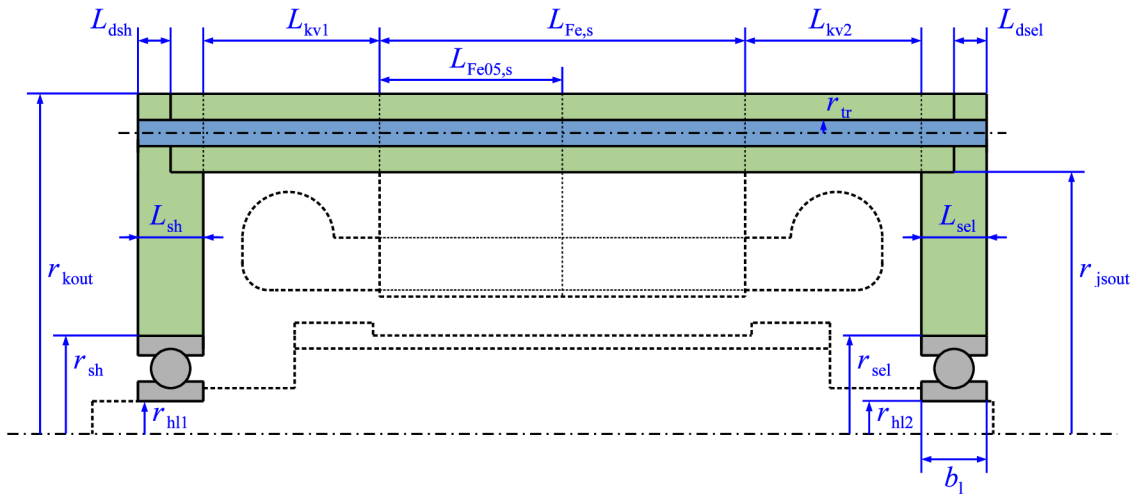
Uzly 13 až 22 reprezentují měděnou vrstvu na povrchu rotoru. Tato vrstva je zhotovena z materiálu, který má stejné tepelné vlastnosti v radiálním i v axiálním směru. V této části se předpokládá značné oteplení.

Jho rotoru je popsáno uzly 23 až 32. Na tuto část navazuje hřídel s uzly 33 až 40. Obě tyto části mají stejné tepelné vlastnosti v radiálním i axiálním směru, protože jsou vyrobeny z plného materiálu. Konkrétní tvary rovnic pro tepelné odpory jsou uvedeny v příloze C.

3.3 Geometrické rozměry vysokootáčkového stroje

3.3.1 Geometrické rozměry kostry a ložiskových štítů

Na Obr. 3.3 jsou zobrazeny geometrické rozměry kostry a ložiskových štítů. Kostra je pomyslně rozdělena na tři úseky, boční úseky začínají od ložiskových štítů a končí začátkem plechů statorového paketu a prostřední úsek vymezují plechy statorového paketu. Geometrie kostry a štítů je navržena univerzálně tak, aby se dala použít i na podobné vysokootáčkové stroje. Modrý pruh na Obr. 3.3 značí kanál vodního chlazení. Geometrické rozměry jsou popsány v příloze A.1.

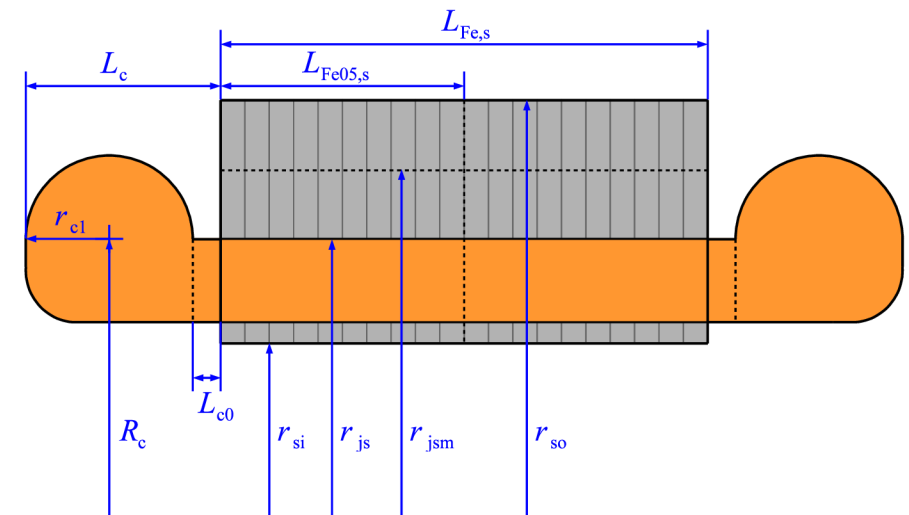


Obr. 3.3: Geometrické rozměry kostry a ložiskových štítů.

Ložiskové štíty jsou uloženy po stranách kostry. Z Obr. 3.3 je patrné, že ložiskové štíty jsou různě široké, to způsobuje, že se odvod tepelných ztrát rozděluje z hřídele do štítů nerovnoměrně. Ložiskové štíty jsou na kostru uchyceny pomocí šroubů.

3.3.2 Geometrické rozměry statorového balení

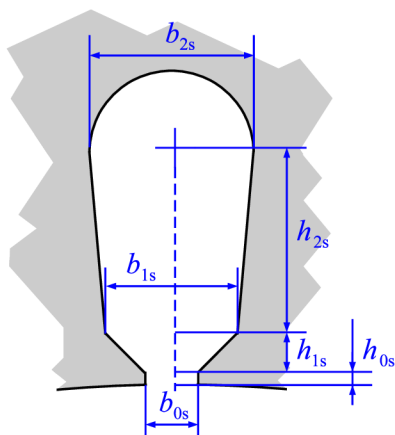
Na Obr. 3.4 jsou zobrazeny geometrické rozměry statorového balení. Statorové plechy jsou myšleně rozděleny na úseky statorového jádra a statorových zubů. Čela vinutí statoru jsou zjednodušena a předpokládá se, že jejich geometrie je podobná toroidu se zapuštěnými vinutími vystupujícími z drážek statoru.



Obr. 3.4: Geometrické rozměry statorového balení.

3.3.3 Geometrické rozměry statorové drážky

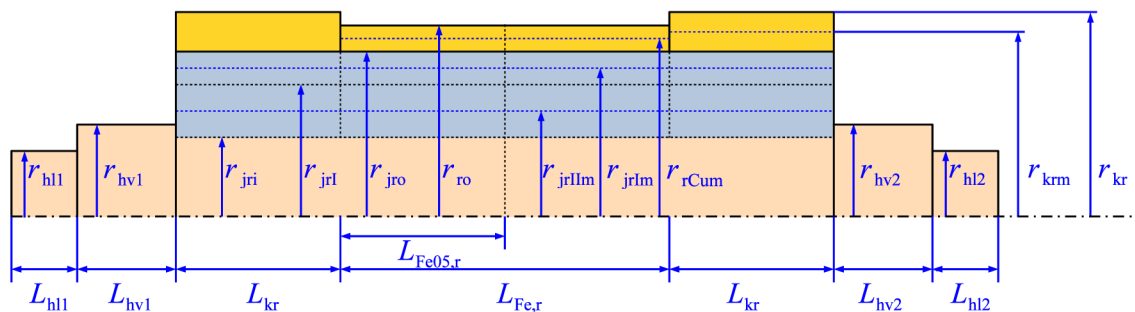
Rozměry statorové drážky jsou uvedeny na Obr. 3.5.



Obr. 3.5: Geometrické rozměry statorové drážky.

3.3.4 Geometrické rozměry rotoru

Na Obr. 3.6 jsou vyznačeny geometrické rozměry rotoru. Modré přerušované čáry na Obr. 3.6 značí středy jednotlivých úseků rotoru, které byly popsány v sekci 3.1.



Obr. 3.6: Geometrické rozměry rotoru.

4 Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje

Pro výpočet středních teplot byl vytvořen tepelný model v softwaru Matlab. Poté se do tohoto tepelného modelu vytvořeného s využitím tepelné sítě zadaly vstupní parametry. Pro ověření výsledných středních teplot tepelného modelu vytvořeného v softwaru Matlab byly provedeny simulace v softwaru Ansys.

4.1 Vstupní parametry použité do výpočtu

Vstupní parametry jako tepelné ztráty a geometrické rozměry vychází z práce [3]. Motor má jmenovitý výstupní výkon na hřídeli $P_2 = 12 \text{ kW}$ při jmenovitých otáčkách $n = 45000 \text{ ot/min}$, celkové účinnosti přibližně $\eta = 90 \%$ a počtu pólů $2p = 2$.

Tabulka 4.1 popisuje rozdělení tepelných ztrát v různých oblastech asynchronního stroje. Aby bylo možné zohlednit velikost ztrát v různých částech rotoru, je rotor rozdělen na úseky. Tyto úseky jsou popsány na Obr. 4.1 římskými číslicemi I až VI.

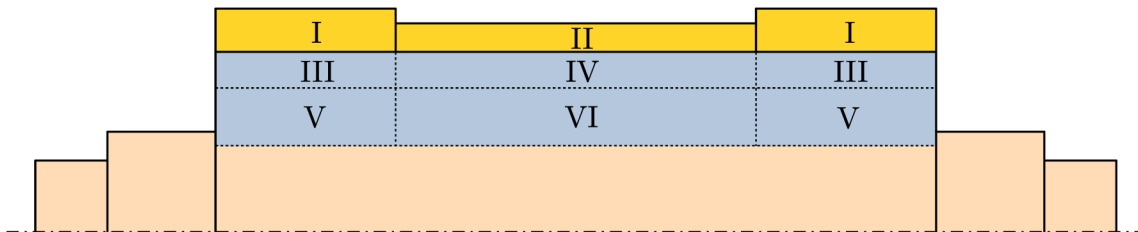
V úsecích I a II podle tabulky 4.1 dochází ke generaci největších tepelných ztrát v rotoru stroje. V úsecích III a IV dochází také ke generaci značných tepelných ztrát. V úsecích V a VI je generováno nejméně tepelných ztrát v rotoru.

Úseky I a II vymezuje oblast měděné vrstvy na povrchu rotoru. Tato vrstva je na Obr. 4.1 zvýrazněna žlutou barvou. Modrá vrstva na Obr. 4.1 představuje oblast rotorového jha. V horní vrstvě jha rotoru se nachází úseky III a IV a ve spodní vrstvě jsou umístěny úseky V a VI.

Pro kompletní výpočet bylo zapotřebí také určit tepelné vodivosti, ekvivalentní tepelné vodivosti a stykové koeficienty. Hodnoty tepelných vodivostí a ekvivalentních tepelných vodivostí jsou uvedeny v tabulce B.1, v tabulce B.2 jsou uvedeny hodnoty stykových koeficientů.

Tab. 4.1: Generované ztráty z [3].

Typ ztrát	Oblast	Hodnota [W]
Jouleovy nebo elektromagnetické	Plechý statoru	84
	Drážky	147,6
	Čela	253,4
	Rotor, oblast I	101,6
	Rotor, oblast II	203,3
	Rotor, oblast III	33,54
	Rotor, oblast IV	67,68
	Rotor, oblast V	16,93
	Rotor, oblast VI	33,9
	Rotor, celkem	457
Mechanické	Vzduchová mezera	252,9
	Kruhy a strany rotoru	177,1



Obr. 4.1: Rozložení ztrát v rotoru.

4.2 Vypočtené střední teploty

V tabulce 4.2 jsou uvedeny střední hodnoty teplot tepelné sítě motoru.

Tab. 4.2: Vypočtené střední teploty.

Číslo uzlu	Název uzlu	Teplota [°C]
1	Čelo vinutí statoru	112,03
2	Vinutí v drážkách statoru	106,10
3	Vinutí v drážkách statoru	106,10
4	Čelo vinutí statoru	112,03
5	Zuby statoru	87,42
6	Zuby statoru	87,42
7	Jho statoru	69,81
8	Jho statoru	69,81
9	Vnitřní vzduch	103,03
10	Vzduchová mezera	166,26
11	Vzduchová mezera	166,26
12	Vnitřní vzduch	102,96
13	Povrch kruhu rotoru	189,10
14	Povrch aktivní části rotoru	191,51
15	Povrch aktivní části rotoru	191,51
16	Povrch kruhu rotoru	189,09
17	Povrch kruhu rotoru z boku	188,99
18	Kruh rotoru	189,17
19	Aktivní část rotoru	191,53
20	Aktivní část rotoru	191,53
21	Kruh rotoru	189,16
22	Povrch kruhu rotoru z boku	188,98
23	Jho rotoru, kruh I	189,28
24	Jho rotoru, aktivní část I	191,54
25	Jho rotoru, aktivní část I	191,54
26	Jho rotoru, kruh I	189,27
27	Povrch jha rotoru z boku	187,80
28	Jho rotoru, kruh II	189,18
29	Jho rotoru, aktivní část II	190,91
30	Jho rotoru, aktivní část II	190,90
31	Jho rotoru, kruh II	189,17
32	Povrch jha rotoru z boku	187,78
33	Povrch hřídele, vn. vzduch	173,15

34	Povrch hřídele, vn. vzduch	173,10
35	Hřídel pod ložiskem	157,52
36	Hřídel, vnitřní vzduch	173,73
37	Hřídel, jho a kruhy rotoru	189,46
38	Hřídel, jho a kruhy rotoru	189,45
39	Hřídel, vnitřní vzduch	173,68
40	Hřídel pod ložiskem	157,40
41	Ložisko	73,77
42	Ložisko	73,33
43	Štít, strana hřídele	28,49
44	Štít, strana el. přívodu	28,15
45	Kostra	19,29
46	Kostra	20,77
47	Kostra	20,77
48	Kostra	19,30
49	Vodní chlazení	14,99

Nejvyšší střední teploty se v tabulce 4.2 nachází v uzlech číslo 24 a 25, hodnota těchto středních teplot dosahuje 191,54 °C. V této oblasti dochází k nejvyššímu oteplení ve stroji. Také na povrchu rotoru v aktivní části dochází ke značnému oteplení, konkrétně 191,51 °C. Povrch aktivní části reprezentují uzly 14 a 15. V oblasti hřídele, která se nachází pod ložisky, se teplota liší od oblasti hřídele, která se nachází uvnitř rotoru. Zde dochází k tepelnému spádu přibližně 32 °C.

V ložiscích stroje je teplota popsána uzly 46 a 47, zde je střední teplota rovna přibližně 73,5 °C. Mezi štíty a hřídelí rotoru pod ložisky dochází ke značnému tepelnému spádu. Tento spád je roven přibližně 129 °C.

Ve vzduchové mezeře stroje, označené uzly 10 a 11, nabývají střední teploty 166,26 °C. Tepelný spád mezi uzly na povrchu v aktivní části rotoru a mezi uzly ve vzduchové mezeře je přibližně 25 °C. Vnitřní vzduch v oblasti čel, uzly 9 a 12, je roven střední teplotě 103 °C. Teplotní spád mezi čelem statoru a drážkou statoru se pohybuje kolem 6 °C.

Uzel číslo 49 je v tabulce 4.2 označen jako vodní chlazení. Počáteční teplota chladiva je rovna 10 °C a konečná teplota má dosahovat 20 °C. Tedy výsledná střední hodnota chladiva je 15 °C.

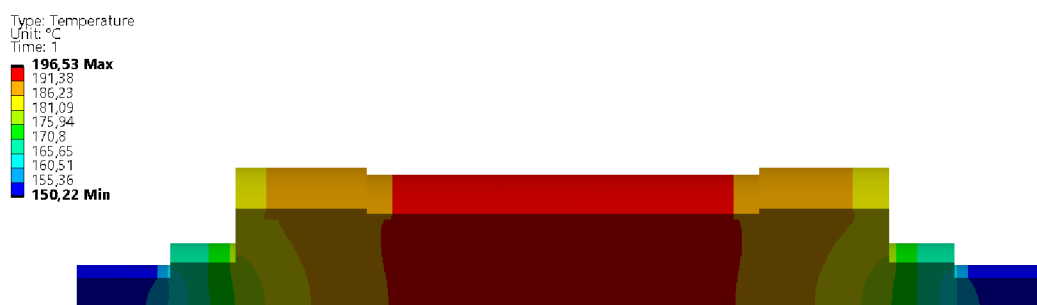
Vypočtené střední teploty by bylo v budoucnu vhodné ověřit měřeními.

4.3 Ověření tepelné sítě simulacemi v programu Ansys

Teplotní pole v softwaru Ansys slouží jako reference při ověřování funkce tepelného modelu založeném na použití tepelné sítě. Okrajové podmínky v podobě teplot a součinitelů přestupu tepla byly zadány do modelů pomocí konvekce na jednotlivé povrchy. Dále se do těchto modelů zadaly tepelné ztráty z tabulky 4.1.

4.3.1 Porovnání části tepelné sítě s tepelným modelem rotoru

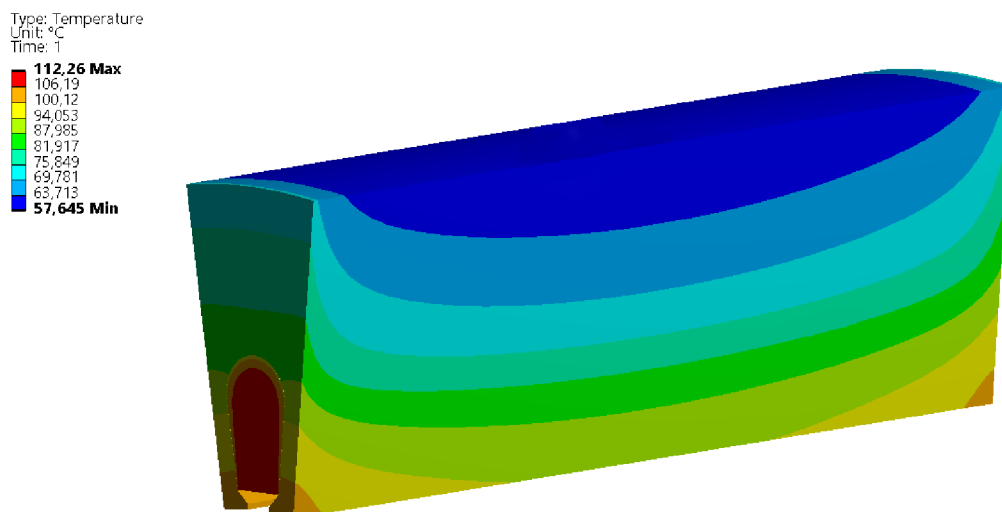
Na Obr. 4.2 se nachází teplotní pole rotoru vytvořené v softwaru Ansys. Pro rychlejší řešení teplotního pole rotoru byl model upraven do podoby válcové výseče se středovým úhlem $\theta = 45^\circ$, protože se předpokládá rotační symetrie rozložení teplot. Porovnání středních teplot teplotního pole rotoru a tepelné sítě je uvedeno v tabulce 4.4.



Obr. 4.2: Teplotní pole rotoru v softwaru Ansys.

4.3.2 Porovnání části tepelné sítě s tepelným modelem statoru

Teplotní pole statoru je zobrazeno na Obr. 4.3. Podobně jako na Obr. 4.2 je teplotní pole statoru na Obr. 4.3 vytvořené v softwaru Ansys a upraveno do podoby výseče. Úhel této výseče odpovídá jedné drážce statoru. Pro složitost modelování nejsou na Obr. 4.3 uvedena čela vinutí statoru. Porovnání středních teplot teplotního pole a tepelné sítě je uvedeno v tabulce 4.3.



Obr. 4.3: Teplotní pole statoru v softwaru Ansys.

4.4 Porovnání středních teplot tepelné sítě stroje s teplotními poli v softwaru Ansys

V tabulkách 4.3 a 4.4 jsou uvedeny střední teploty uzlů statoru a rotoru tepelné sítě asynchronního stroje s teplotními poli statoru a rotoru v softwaru Ansys. Pro přehlednost byly některé uzly v tabulce 4.4 sloučeny. Číslování uzlů v tabulkách odpovídá Obr. 3.1. Rozdíly středních teplot v posledním sloupci v tabulkách 4.3 a 4.4 jsou uvedeny v absolutní hodnotě.

Z tabulek vyplývá, že se střední teploty tepelné sítě asynchronního stroje jen s drobnými odchylkami liší od středních teplot tepelných polí vytvořených v softwaru Ansys. Největší rozdíl středních teplot v tabulce 4.3 je v uzlech číslo 7 a 8. Tyto uzly se nachází v oblasti jha statoru. V tabulce 4.4 je největší rozdíl středních teplot v uzlu číslo 27. Tento uzel se nachází na povrchu jha rotoru.

Tab. 4.3: Porovnání středních teplot teplotního pole statoru v softwaru Ansys a středních teplot tepelné sítě statoru vypočtené v Matlabu.

	Ansys	Matlab	Rozdíly teplot
Číslo uzlu	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
2	103,72	106,10	2,38
3	104,02	106,10	2,08
5	85,14	87,42	2,28
6	85,02	87,42	2,40
7	66,56	69,81	3,25
8	66,56	69,81	3,25

Tab. 4.4: Porovnání středních teplot teplotního pole rotoru v softwaru Ansys a středních teplot tepelné sítě rotoru vypočtené v Matlabu.

	Ansys	Matlab	Rozdíly teplot
Číslo uzlu	Teplota [°C]	Teplota [°C]	Teplota [°C]
13	187,33	189,10	1,77
14	194,06	191,51	2,55
15	194,05	191,51	2,54
16	187,27	189,09	1,82
17	185,81	188,99	3,18
18	187,38	189,17	1,79
19	194,08	191,53	2,55
20	194,07	191,53	2,54
21	187,32	189,16	1,84
22	185,56	188,98	3,42
23+24	190,84	190,41	0,43
25+26	190,84	190,40	0,44
27	183,23	187,80	4,57
28+29	190,40	190,05	0,35
30+31	190,40	190,04	0,36
32	183,85	187,78	3,93
33	170,39	173,15	2,76
34	170,42	173,10	2,68
35+36	161,58	165,63	4,05
37	190,50	189,46	1,04
38	190,48	189,45	1,03
39+40	161,66	165,54	3,88

Závěr

Cílem této práce bylo vytvořit řešerši v oblasti tepelných výpočtů vysokootáčkových asynchronních motorů s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a vodním chlazením a následně vytvořit tepelný model tohoto stroje. Poté byl pomocí vytvořeného tepelného modelu proveden tepelný výpočet vysokootáčkového asynchronního motoru.

Nejdříve si bylo nutné nastudovat základní vztahy přenosu tepla, tyto vztahy jsou uvedeny v první části této práce. Dále jsou zde uvedeny výpočty pro tepelné odpory a je zde také uveden výpočet tepelného odporu vodního chlazení.

Stěžejní část této práce spočívala ve vytvoření a popisu tepelné sítě pro vysokootáčkový asynchronní stroj s plným rotorem s měděnou vrstvou na povrchu a vodním chlazením. Nejdříve bylo zapotřebí určit tepelné odpory pro výpočty středních teplot tepelné sítě stroje, konkrétní rovnice tepelných odporů jsou uvedeny v příloze C.

Dále pro ověření správnosti výsledných středních teplot tepelné sítě stroje byly vytvořeny tepelné modely v softwaru Ansys. Vstupní parametry zadané do tepelných modelů byly zadány s ohledem na řešený stroj. Výsledné střední teploty tepelné sítě jsou uvedeny v tabulce 4.2. Následně bylo provedeno porovnání tepelných polí s dílčími částmi tepelné sítě vysokootáčkového stroje, viz tabulka 4.3 a 4.4. Střední teploty asynchronního stroje se jen s drobnými odchylkami liší od středních teplot tepelných polí v softwaru Ansys.

Vypočtené střední teploty tepelné sítě asynchronního stroje jsou poměrně vysoké. Některé parametry, jako jsou součinitelé přestupu tepla nebo stykové koeficienty, by mohly být do budoucna zpřesněny na základě měření, což může výsledné střední teploty ovlivnit.

Literatura

- [1] BÁRTA, Jan. *Návrh elektrického stroje 6kW, 120 000 ot/min pro turbocirkulátor hélia*. Brno, 2017. Disertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Vedoucí práce Čestmír Ondrůšek.
- [2] KIM, Youn-Hwan, Hee-Deuk JUN, Jae-Won MOON, Rae-Eun KIM, Se-Hyun RHYU a Sang-Young JUNG. *Motor Efficiency Determination of SynRM and Measurement Uncertainty* [online]. IEEE, 2019, 2019, , 233-239 [cit. 2020-12-28]. ISBN 978-1-5386-7687-5. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9007174/>
- [3] VÍTEK, Ondřej. *Vysokootáčkové elektrické motory*. Brno, 2016. Habilitační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií.
- [4] LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Technická mechanika: Mechanika poddajných těles*. Brno, 2014.
- [5] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of rotating electrical machines*. 2nd ed. Chichester: Wiley, 2014. ISBN 978-1-118-58157-5.
- [6] TOMAN, Marek. *Vázané modelování asynchronního motoru metodou fyzikálního modelování*. Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Radek Vlach.
- [7] KOTHANDARAMAN, C.P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. Vyd. 3. Nové Dillí: New Age International (P) Ltd., Publishers, 2006. ISBN 978-81-224-2642-7.
- [8] CENGEL, Yunus A. a Afshin J. GHAJAR. *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*. Vyd. 5. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339818-1.
- [9] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky: Tepelné jevy, činný výkon*. Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004. ISBN 80-214-2742-6.
- [10] HENNEBERGER, G. Calculation and identification of a thermal equivalent circuit of a water cooled induction motor for electric vehicle applications. *Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives* [online]. IEE, 1995, 1995, , 6-10 [cit. 2021-04-18]. ISBN 0852966482. Dostupné z: https://digital-library.theiet.org/content/conferences/10.1049/cp_19950825

- [11] TOMAN, Marek, Radoslav CIPIN a Pavel VOREL. *18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME): Thermal Networks Respecting Asymmetric Cooling of Electrical Machine Parts* [online]. 2018, , 1-6 [cit. 2021-04-18]. ISBN 978-80-214-5542-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8624804>
- [12] WIESCHE a STEFAN. *Heat Transfer in Rotating Flows* [online]. Steinfurt: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2021-04-18]. ISBN 978-3-319-32003-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32003-8_12-1
- [13] MELLOR, P.H., D. ROBERTS a D.R. TURNER. Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design. *IEE Proceedings B Electric Power Applications* [online]. 1991, 138(5), 205 - 218 [cit. 2020-11-06]. ISSN 01437038. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=92929>
- [14] SAARI, Juha. *Thermal Analysis of High-speed Induction Machines*. Helsinki, 1998. ISBN 952-5148-43-2. UDC 621.313. Disertační práce. Helsinki University of Technology.
- [15] DEMETRIADES, Georgios D., Hector Zelaya DE LA PARRA, Erik ANDERSSON a Hakan OLSSON. A Real-Time Thermal Model of a Permanent-Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics* [online]. 2010, 25(2), 463-474 [cit. 2021-04-18]. ISSN 0885-8993. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5204128/>

Seznam symbolů a zkratek

Parametr	Popis	Jednotka
$\nabla\vartheta$	Gradient teploty	[°C/m]
α	Součinitel přestupu tepla	[W/(m ² ·K)]
C	Tepelná kapacita	[J/K]
C_e	Elektrická kapacita	[F]
c_p	Měrná tepelná kapacita za konstantního tlaku	[J/(kg·K)]
d_1	Vnitřní průměr mezikruží	[m]
d_2	Vnější průměr mezikruží	[m]
δ	Šířka vzduchové mezery	[m]
δ_{ϑ}	Mezní vrstva teplotní	[m]
δ_v	Mezní vrstva rychlostní	[m]
ε	Emisivita	[-]
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot (oteplení)	[K;°C]
ϑ	Teplota	[°C]
ϑ	Matice neznámých teplot	[°C]
ϑ_{\max}	Maximální teplota tyče	[°C]
ϑ_p	Teplota povrchu tělesa ve stupních Celsia	[°C]
$\vartheta_{\text{stř}}$	Střední teplota tyče	[°C]
$\vartheta_{\text{ch},0}$	Vstupní teplota chladiva	[°C]
$\vartheta_{\text{ch},v}$	Výstupní teplota chladiva	[°C]
$\vartheta_{\text{ch},\text{stř}}$	Střední teplota chladiva	[°C]
ϑ_{∞}	Teplota tekutiny v dostatečné vzdálenosti	[°C]
λ	Součinitel tepelné vodivosti	[W/(m·K)]
F_g	Geometrický faktor	[-]
G	Tepelná vodivost	[W/K]
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí	[W/K]
G_e	Elektrická vodivost	[S]
η	Účinnost	[%]
I	Elektrický proud	[A]
J	Proudová hustota	[A/m ²]
k	Součinitel stykového odporu	[W/(m ² ·K)]
l	Charakteristická délka	[m]
μ	Viskozita tekutiny	[Pa · s]
n	Otáčky	[1/min]
Nu	Nusseltovo číslo	[-]
$\dot{\mathbf{Q}}$	Matice tepelných toků	[W]

p_{gen}	Měrné objemové ztráty	$[\text{W}/\text{m}^3]$
P_{gen}	Celkové generované ztráty	$[\text{W}]$
P_2	Výkon na hřídeli	$[\text{W}]$
Q	Tepelná energie	$[\text{J}]$
q	Hustota tepelného výkonu	$[\text{W}/\text{m}^2]$
$\dot{\mathbf{q}}$	Vektor hustoty tepelného toku	$[\text{W}/\text{m}^2]$
\dot{Q}	Tepelný tok	$[\text{W}]$
\dot{Q}_{tot}	Celkový tepelný tok odváděný chladičem	$[\text{W}]$
Q_e	Elektrický náboj	$[\text{C}]$
q_{ch}	Objemový průtok chladiwa	$[\text{m}^3/\text{s}]$
R	Tepelný odpor	$[\text{K}/\text{W}]$
ρ	Hustota tekutiny	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
r_1	Vnitřní poloměr mezikruží	$[\text{m}]$
r_2	Vnější poloměr mezikruží	$[\text{m}]$
R_e	Elektrický odpor	$[\Omega]$
ρ_{ch}	Hustota chladiwa	$[\text{kg}/\text{m}^3]$
R_s	Tepelný odpor stěny	$[\text{K}/\text{W}]$
R_{ch}	Tepelný odpor chladiwa	$[\text{K}/\text{W}]$
R_t	Vnitřní tepelný odpor vedením uvnitř tyče	$[\text{K}/\text{W}]$
$r_{\text{stř}}$	Střední hodnota poloměru vzduchové mezery	$[\text{m}]$
r_0	Poloměr tyče	$[\text{m}]$
S	Teplosměnná plocha	$[\text{m}^2]$
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta	$[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)]$
σ_e	Elektrická měrná vodivost	$[\text{S}/\text{m}]$
Ta	Taylorovo číslo	$[-]$
Ta_m	Modifikované Taylorovo číslo	$[-]$
T_p	Termodynamická teplota povrchu tělesa	$[\text{K}]$
U	Elektrické napětí	$[\text{V}]$
u_1	Obvodová rychlost	$[\text{m}/\text{s}]$
v_∞	Rychlost tekutiny v dostatečné vzdálenosti	$[\text{m}/\text{s}]$
φ	Elektrický potenciál	$[\text{V}]$
ω	Úhlová rychlost rotoru	$[\text{rad}/\text{s}]$

Seznam příloh

A	Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu	46
B	Seznam materiálů a stykových koeficientů zadávaných do výpočtu	49
C	Výsledné rovnice tepelných odporů	50
C.1	Vnitřní tepelné odpory stroje	50
C.2	Tepelné odpory zajišťující odvod tepla do okolí a do vodního chlazení	54
C.3	Pomocné tepelné odpory	55
C.3.1	Čela statoru	55
C.3.2	Kostra - vodní chlazení	55
C.3.3	Kostra - konvekce do okolí	55

A Seznam vstupních geometrických proměnných zadávaných do výpočtu

Tab. A.1: Vstupní rozměry zadané do výpočtu.

Značení	Název
Kostra	
b_l	Délka ložiska
$L_{kv,1}$	Délka kostry, oblast vinutí, levá strana
$L_{kv,2}$	Délka kostry, oblast vinutí, pravá strana
$L_{Fe,s}$	Délka kostry, která je ve styku se jhem statoru
$r_{k,out}$	Vnější poloměr kostry
$r_{js,out}$	Vnitřní poloměr kostry
r_{tr}	Poloměr kanálu pro vodní chlazení
Štíty	
L_{sel}	Tloušťka štítu, el. strana
$L_{d,sel}$	Délka drážky ve vnitřní straně na okraji štítu, el. strana
L_{sh}	Tloušťka štítu, strana hřídele
$L_{d,sh}$	Délka drážky ve vnitřní straně na okraji štítu, strana hřídele
r_{sel}	Vnitřní poloměr štítu na el. straně
r_{sh}	Vnitřní poloměr štítu na straně hřídele
Statorový paket	
Q_1	Počet drážek statoru
L_{c0}	Délka vyčnívajícího vinutí ze statorových plechů
r_{si}	Vnitřní poloměr statoru
r_{so}	Vnější poloměr statoru
N_v	Počet vodičů v jedné drážce statoru
t_i	Tloušťka drážkové izolace
b_{0s}	Šířka drážky v části 0
b_{1s}	Šířka drážky v části 1
b_{2s}	Šířka drážky v části 2
h_{0s}	Výška drážky v části 0
h_{1s}	Výška drážky v části 1
h_{2s}	Výška drážky v části 2
r_{js}	Poloměr jha statoru

P_M | Poměr mezi odpory ve statoru, v zubu a ve drážce

Rotor

r_{hl1}	Poloměr hřídele na straně hřídele v oblasti ložisek
r_{hl2}	Poloměr hřídele na el. straně v oblasti ložisek
r_{hv1}	Poloměr hřídele na straně hřídele v oblasti vnitřního vzduchu
r_{hv2}	Poloměr hřídele na el. straně v oblasti vnitřního vzduchu
r_{kr}	Poloměr kruhu rotoru
r_{ro}	Poloměr mědi na povrchu mezi kruhy
r_{jro}	Poloměr j_{ja} rotoru na povrchu
r_{jrI}	Poloměr uvnitř j_{ja} rotoru
r_{jri}	Poloměr hřídele uvnitř rotoru
L_{hl1}	Délka části hřídele na straně hřídele v oblasti ložisek
L_{hl2}	Délka části hřídele na el. straně v oblasti ložisek
L_{hv1}	Délka části hřídele na straně hřídele v oblasti vnitřního vzduchu
L_{hv2}	Délka části hřídele na el. straně v oblasti vnitřního vzduchu
L_{kr}	Délka hřídele v oblasti kruhu
$L_{Fe,r}$	Délka hřídele v aktivní části rotoru

Tab. A.2: Vypočtené geometrické rozměry na základě vstupních hodnot.

Značení	Název
Kostra	
$r_{k,m}$	Střední poloměr kostry
Štíty	
$r_{sel,m}$	Střední poloměr štítu na el. straně
$r_{sh,m}$	Střední poloměr štítu na straně hřídele
Statorový paket	
$h_{d,s}$	Celková výška drážky statoru
h_{Cu}	Střední výška drážky, vyplněná mědí
b_{Cu}	Střední šířka drážky, vyplněná mědí
b_{zs}	Šířka zubu statoru
$h_{z,2s}$	Výška zubu statoru v oblasti h_{2s}
$h_{dz,s}$	Obvod poloviny rozvinuté drážkové izolace
$b_{0s,o}$	Otevření drážky statoru
b_{ds}	Střední šířka drážky statoru
$L_{Fe05,s}$	Polovina aktivní délky železného svazku statoru
$r_{js,m}$	Střední poloměr jha statoru
h_{zs}	Výška zubu statoru
R_c	Střední poloměr toroidu vinutí statoru
$r_{c,1}$	Poloměr toroidu
L_c	Délka vinutí od statorových plechů po konec toroidu
Rotor	
$r_{kr,m}$	Střední poloměr kruhu rotoru
$r_{r,Cu,m}$	Střední poloměr mědi na povrchu mezi kruhy
$r_{rjrI,m}$	Střední poloměr uvnitř jha rotoru
$r_{rjrII,m}$	Střední poloměr jha rotoru blíže ke hřídeli uvnitř rotoru
$L_{Fe05,r}$	Polovina délky aktivní části rotoru

B Seznam materiálů a stykových koeficientů zadávaných do výpočtu

Tab. B.1: Tepelné vodivosti a ekvivalentní tepelné vodivosti.

Materiál	Značení	Hodnota [W/(m·K)]
Statorový paket		
Měď vinutí a čel	λ_{Cu}	380
Kombinace mědi a laku v drážce	λ_{d}	0,5
Kombinace mědi a laku v čele	λ_{c}	0,5
Drážková izolace	λ_{i}	0,2
Kombinace statorového plechu a laku	$\lambda_{\text{Fes,a}}$	0,6
Statorový plech	$\lambda_{\text{Fes,r}}$	31,4
Rotor		
Měď na povrchu rotoru	$\lambda_{\text{Cu,r}}$	380
Ocel hřídele	$\lambda_{\text{Fer,r}}$	47
Kostra		
Ocel 11600	λ_{k}	50

Tab. B.2: Stykové koeficienty.

Název	Značení	Hodnota [W/(m ² ·K)]
Stykové koeficienty		
Styk mezi plechy statoru a kostrou	α_{k}	866,7
Styk mezi kostrou a štíty	α_{sk}	4600,0
Styk mezi ložiskovým štítem a ložiskem	α_{isl}	3562,0

C Výsledné rovnice tepelných odporů

C.1 Vnitřní tepelné odpory stroje

$$R_{1,2} = \frac{L_{\text{Fe05,s}}}{6\lambda_{\text{Cu}}S_{\text{Cu}}Q_1} + \frac{L_c}{6\lambda_{\text{Cu}}S_{\text{Cu}}Q_1} \quad (\text{C.1})$$

$$R_{1,9} = R_{\text{vin}} \quad (\text{C.2})$$

$$R_{2,3} = \frac{L_{\text{Fe05,s}}}{3\lambda_{\text{Cu}}S_{\text{Cu}}Q_1} \quad (\text{C.3})$$

$$R_{2,5} = \frac{1}{2Q_1} \cdot \left(\frac{b_{\text{Cu}}}{6h_{\text{Cu}}L_{\text{Fe05,s}}\lambda_d} + \frac{t_i}{h_{d,zs}L_{\text{Fe05,s}}\lambda_i} + \frac{b_{zs}}{6h_{ds}L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}\lambda_{\text{Fes,r}}} \right) \quad (\text{C.4})$$

$$R_{2,7} = \frac{1}{Q_1} \cdot \frac{h_{ds}}{3\lambda_d b_{ds}L_{\text{Fe05,s}}} + \frac{t_i}{\lambda_i \pi \frac{b_{s2}^2}{2} L_{\text{Fe05,s}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{js,m}}{r_{js}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}\lambda_{\text{Fes,r}}} \cdot \frac{1}{P_M} \quad (\text{C.5})$$

$$R_{3,4} = R_{1,2} \quad (\text{C.6})$$

$$R_{3,6} = R_{2,5} \quad (\text{C.7})$$

$$R_{3,8} = R_{2,7} \quad (\text{C.8})$$

$$R_{4,12} = R_{1,9} \quad (\text{C.9})$$

$$R_{5,6} = \frac{2}{Q_1} \cdot \frac{L_{\text{Fe05,s}}}{6 \frac{\lambda_{\text{Fes,a}}}{Q_1} \left(\pi (r_{js}^2 - r_{si}^2) - Q_1 S_{ds,1} \right)} \quad (\text{C.10})$$

$$R_{5,7} = \frac{1}{Q_1} \cdot \frac{h_{ds}}{6\lambda_{\text{Fes,r}}b_{zs}L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}} + \frac{1}{(1 - P_M)} \cdot \frac{\ln\left(\frac{r_{js,m}}{r_{js}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}\lambda_{\text{Fes,r}}} \quad (\text{C.11})$$

$$R_{5,10} = \frac{1}{Q_1} \cdot \frac{h_{zs}}{6\lambda_{\text{Fes,r}}b_{zs}L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{Del}}L_{\text{Fe05,s}}(2\pi r_{js} - Q_1 b_{0s,o})} \quad (\text{C.12})$$

$$R_{7,9} = \frac{1}{Q_1} \cdot \left(\frac{L_{\text{Fe05,s}}}{6 \frac{\lambda_{\text{Fes,a}}}{Q_1} \pi (r_{so}^2 - r_{si}^2)} + \frac{1}{\frac{\alpha_{\text{Fes,v}}}{Q_1} \pi (r_{so}^2 - r_{si}^2)} \right) \quad (\text{C.13})$$

$$R_{7,46} = \frac{\ln\left(\frac{r_{so}}{r_{js,m}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,s}}k_{\text{Fe,l}}\lambda_{\text{Fes,r}}} + \frac{1}{\alpha_k 2\pi r_{so} L_{\text{Fe05,s}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{k,m}}{r_{js,out}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,s}}\lambda_k} \quad (\text{C.14})$$

$$R_{8,12} = R_{7,9} \quad (\text{C.15})$$

$$R_{8,47} = R_{7,46} \quad (\text{C.16})$$

$$R_{9,13} = \frac{1}{\alpha_{kr,r}L_{kr}2\pi r_{kr}} \quad (\text{C.17})$$

$$R_{9,17} = \frac{1}{\alpha_{kr,a}\pi (r_{kr}^2 - r_{jro}^2)} \quad (\text{C.18})$$

$$R_{9,27} = \frac{1}{\alpha_{\text{Fe,r,vzd}}\pi (r_{jro}^2 - r_{hv}^2)} \quad (\text{C.19})$$

$$R_{9,33} = \frac{1}{\alpha_{\text{hv},\text{v}} L_{\text{hv}1} 2\pi r_{\text{hv}1}} \quad (\text{C.20})$$

$$R_{9,43} = \frac{L_{\text{sh}}}{6\lambda_{\text{k}}\pi (r_{\text{js,out}}^2 - r_{\text{sh}}^2)} + \frac{1}{\alpha_{\text{s},\text{vv}}\pi (r_{\text{js,out}}^2 - r_{\text{sh}}^2)} \quad (\text{C.21})$$

$$R_{9,45} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{k,m}}}{r_{\text{js,out}}}\right)}{2\pi L_{\text{kv},1}\lambda_{\text{k}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{r},\text{vv}}2\pi r_{\text{js,out}}L_{\text{kv},1}} \quad (\text{C.22})$$

$$R_{10,14} = \frac{1}{\alpha_{\text{Del}}2\pi r_{\text{ro}}L_{\text{Fe05,r}}} \quad (\text{C.23})$$

$$R_{11,15} = R_{10,14} \quad (\text{C.24})$$

$$R_{12,16} = R_{9,13} \quad (\text{C.25})$$

$$R_{12,22} = R_{9,17} \quad (\text{C.26})$$

$$R_{12,32} = \frac{1}{\alpha_{\text{Fe},\text{r},\text{vzd}}\pi (r_{\text{jro}}^2 - r_{\text{hv}2}^2)} \quad (\text{C.27})$$

$$R_{12,34} = \frac{1}{\alpha_{\text{hv},\text{v}}L_{\text{hv}2}2\pi r_{\text{hv}2}} \quad (\text{C.28})$$

$$R_{12,44} = R_{9,43} \quad (\text{C.29})$$

$$R_{12,48} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{k,m}}}{r_{\text{js,out}}}\right)}{2\pi L_{\text{kv},2}\lambda_{\text{k}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{r},\text{vv}}2\pi r_{\text{js,out}}L_{\text{kv},2}} \quad (\text{C.30})$$

$$R_{13,18} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{kr}}}{r_{\text{kr,m}}}\right)}{2\pi L_{\text{kr}}\lambda_{\text{Cu},\text{r}}} \quad (\text{C.31})$$

$$R_{14,19} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{ro}}}{r_{\text{r,Cu,m}}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,r}}\lambda_{\text{Cu},\text{r}}} \quad (\text{C.32})$$

$$R_{15,20} = R_{14,19} \quad (\text{C.33})$$

$$R_{16,21} = R_{13,18} \quad (\text{C.34})$$

$$R_{17,18} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Cu},\text{r}}\pi (r_{\text{kr}}^2 - r_{\text{jro}}^2)} \quad (\text{C.35})$$

$$R_{18,19} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Cu},\text{r}}\pi (r_{\text{kr}}^2 - r_{\text{jro}}^2)} + \frac{L_{\text{Fe05,r}}}{6\lambda_{\text{Cu},\text{r}}\pi (r_{\text{ro}}^2 - r_{\text{jro}}^2)} \quad (\text{C.36})$$

$$R_{18,23} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{kr,m}}}{r_{\text{jro}}}\right)}{2\pi L_{\text{kr}}\lambda_{\text{Cu},\text{r}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jro}}}{r_{\text{jrI,m}}}\right)}{2\pi L_{\text{kr}}\lambda_{\text{Fe},\text{r}}} \quad (\text{C.37})$$

$$R_{19,20} = \frac{L_{\text{Fe05,r}}}{3\lambda_{\text{Cu},\text{r}}\pi (r_{\text{ro}}^2 - r_{\text{jro}}^2)} \quad (\text{C.38})$$

$$R_{19,24} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{r,Cu,m}}}{r_{\text{jro}}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,r}}\lambda_{\text{Cu},\text{r}}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jro}}}{r_{\text{jrI,m}}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05,r}}\lambda_{\text{Fe},\text{r}}} \quad (\text{C.39})$$

$$R_{20,21} = R_{18,19} \quad (\text{C.40})$$

$$R_{20,25} = R_{19,24} \quad (\text{C.41})$$

$$R_{21,22} = R_{17,18} \quad (\text{C.42})$$

$$R_{21,26} = R_{18,23} \quad (\text{C.43})$$

$$R_{23,24} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jro}}^2 - r_{\text{jrl}}^2)} + \frac{L_{\text{Fe05},r}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jro}}^2 - r_{\text{jrl}}^2)} \quad (\text{C.44})$$

$$R_{23,27} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jro}}^2 - r_{\text{jrl}}^2)} \quad (\text{C.45})$$

$$R_{23,28} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl},\text{m}}}{r_{\text{jrl}}}\right)}{2\pi L_{\text{kr}}\lambda_{\text{Fe},r}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl}}}{r_{\text{jrl},\text{m}}}\right)}{2\pi L_{\text{kr}}\lambda_{\text{Fe},r}} \quad (\text{C.46})$$

$$R_{24,25} = \frac{L_{\text{Fe05},r}}{3\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jro}}^2 - r_{\text{jrl}}^2)} \quad (\text{C.47})$$

$$R_{24,29} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl},\text{m}}}{r_{\text{jrl}}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05},r}\lambda_{\text{Fe},r}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl}}}{r_{\text{jrl},\text{m}}}\right)}{2\pi L_{\text{Fe05},r}\lambda_{\text{Fe},r}} \quad (\text{C.48})$$

$$R_{25,26} = R_{23,24} \quad (\text{C.49})$$

$$R_{25,30} = R_{24,29} \quad (\text{C.50})$$

$$R_{26,31} = R_{23,28} \quad (\text{C.51})$$

$$R_{26,32} = R_{23,27} \quad (\text{C.52})$$

$$R_{27,28} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jrl}}^2 - r_{\text{hv1}}^2)} \quad (\text{C.53})$$

$$R_{28,29} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jrl}}^2 - r_{\text{jri}}^2)} + \frac{L_{\text{Fe05},r}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jrl}}^2 - r_{\text{jri}}^2)} \quad (\text{C.54})$$

$$R_{28,36} = \frac{L_{\text{kr}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{hv1}}^2 - r_{\text{jri}}^2)} + \frac{L_{\text{hv1}}}{6\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{hv1}}^2 - r_{\text{jri}}^2)} \quad (\text{C.55})$$

$$R_{28,37} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl},\text{m}}}{r_{\text{jri}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{Fe},r}L_{\text{kr}}} + \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fe},r}L_{\text{kr}}} \quad (\text{C.56})$$

$$R_{29,30} = \frac{L_{\text{Fe05},r}}{3\lambda_{\text{Fe},r}\pi (r_{\text{jrl}}^2 - r_{\text{jri}}^2)} \quad (\text{C.57})$$

$$R_{29,37} = \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{jrl},\text{m}}}{r_{\text{jri}}}\right)}{2\pi\lambda_{\text{Fe},r}L_{\text{Fe05},r}} + \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fe},r}L_{\text{Fe05},r}} \quad (\text{C.58})$$

$$R_{30,31} = R_{28,29} \quad (\text{C.59})$$

$$R_{30,38} = R_{29,37} \quad (\text{C.60})$$

$$R_{31,32} = \frac{L_{kr}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi \left(r_{\text{jrl}}^2 - r_{\text{hv2}}^2 \right)} \quad (\text{C.61})$$

$$R_{31,38} = R_{28,37} \quad (\text{C.62})$$

$$R_{31,39} = \frac{L_{kr}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi \left(r_{\text{hv2}}^2 - r_{\text{jri}}^2 \right)} + \frac{L_{\text{hv2}}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi \left(r_{\text{hv2}}^2 - r_{\text{jri}}^2 \right)} \quad (\text{C.63})$$

$$R_{33,36} = \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fer},r}L_{\text{hv1}}} \quad (\text{C.64})$$

$$R_{34,39} = \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fer},r}L_{\text{hv2}}} \quad (\text{C.65})$$

$$R_{35,36} = \frac{L_{\text{hl1}}}{3\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{hl1}}^2} + \frac{L_{\text{hv1}}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{hv1}}^2} \quad (\text{C.66})$$

$$R_{35,41} = \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fer},r}L_{\text{hl1}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lsl}}2\pi r_{\text{hl1}}b_1} + R_{\text{loz1}} \quad (\text{C.67})$$

$$R_{36,37} = \frac{L_{\text{hv1}}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{jri}}^2} + \frac{(L_{kr} + L_{\text{Fe05},r})}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{jri}}^2} \quad (\text{C.68})$$

$$R_{37,38} = \frac{(L_{kr} + L_{\text{Fe05},r})}{3\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{jri}}^2} \quad (\text{C.69})$$

$$R_{38,39} = \frac{(L_{kr} + L_{\text{Fe05},r})}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{jri}}^2} + \frac{L_{\text{hv2}}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{jri}}^2} \quad (\text{C.70})$$

$$R_{39,40} = \frac{L_{\text{hl2}}}{3\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{hl2}}^2} + \frac{L_{\text{hv2}}}{6\lambda_{\text{Fer},r}\pi r_{\text{hv2}}^2} \quad (\text{C.71})$$

$$R_{40,42} = \frac{1}{8\pi\lambda_{\text{Fer},r}L_{\text{hl2}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lsl}}2\pi r_{\text{hl2}}b_1} + R_{\text{loz1}} \quad (\text{C.72})$$

$$R_{41,43} = R_{\text{loz2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lsl}}2\pi r_{\text{sh}}b_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{sh},m}}{r_{\text{sh}}}\right)}{2\pi\lambda_k L_{\text{sh}}} \quad (\text{C.73})$$

$$R_{42,44} = R_{\text{loz2}} + \frac{1}{\alpha_{\text{lsl}}2\pi r_{\text{sel}}b_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_{\text{sel},m}}{r_{\text{sel}}}\right)}{2\pi\lambda_k L_{\text{sel}}} \quad (\text{C.74})$$

$$R_{43,45} = \frac{\ln\left(\frac{r_{k,m}}{r_{\text{sh},m}}\right)}{2\pi\lambda_k L_{\text{sh}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{sk}} \left(2\pi r_{\text{js,out}} L_{\text{d,sh}} + \pi \left(r_{\text{k,out}}^2 - r_{\text{js,out}}^2 \right) \right)} + \frac{L_{\text{kv},1}}{6\lambda_k\pi \left(r_{\text{k,out}}^2 - r_{\text{js,out}}^2 \right)} \quad (\text{C.75})$$

$$R_{44,48} = \frac{\ln\left(\frac{r_{k,m}}{r_{\text{sel},m}}\right)}{2\pi\lambda_k L_{\text{sel}}} + \frac{1}{\alpha_{\text{sk}} \left(2\pi r_{\text{js,out}} L_{\text{d,sel}} + \pi \left(r_{\text{k,out}}^2 - r_{\text{js,out}}^2 \right) \right)} + \frac{L_{\text{kv},2}}{6\lambda_k\pi \left(r_{\text{k,out}}^2 - r_{\text{js,out}}^2 \right)} \quad (\text{C.76})$$

$$R_{45,46} = \frac{L_{kv,1}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} + \frac{L_{Fe05,s}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} \quad (C.77)$$

$$R_{45,49} = R_{k,ch} \cdot \frac{(L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})}{L_{kv,1}} \quad (C.78)$$

$$R_{46,47} = \frac{L_{Fe05,s}}{3\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} \quad (C.79)$$

$$R_{46,49} = R_{k,ch} \cdot \frac{(L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})}{L_{Fe05,s}} \quad (C.80)$$

$$R_{47,48} = \frac{L_{Fe05,s}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} + \frac{L_{kv,2}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} \quad (C.81)$$

$$R_{47,49} = R_{k,ch} \cdot \frac{(L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})}{L_{Fe05,s}} \quad (C.82)$$

$$R_{48,49} = R_{k,ch} \cdot \frac{(L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})}{L_{kv,2}} \quad (C.83)$$

C.2 Tepelné odpory zajišťující odvod tepla do okolí a do vodního chlazení

$$R_{43,o} = \frac{L_{sh}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{sh}^2)} + \frac{1}{\alpha_{so}\pi (r_{k,out}^2 - r_{sh}^2)} \quad (C.84)$$

$$R_{44,o} = \frac{L_{sel}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{sel}^2)} + \frac{1}{\alpha_{so}\pi (r_{k,out}^2 - r_{sel}^2)} \quad (C.85)$$

$$R_{45,o} = R_{k,o} \cdot \frac{(L_{Fe,s}L_{kv,1}L_{kv,2})}{L_{kv,1}} \quad (C.86)$$

$$R_{46,o} = R_{k,o} \cdot \frac{(L_{Fe,s}L_{kv,1}L_{kv,2})}{L_{Fe05,s}} \quad (C.87)$$

$$R_{47,o} = R_{k,o} \cdot \frac{(L_{Fe,s}L_{kv,1}L_{kv,2})}{L_{Fe05,s}} \quad (C.88)$$

$$R_{48,o} = R_{k,o} \cdot \frac{(L_{Fe,s}L_{kv,1}L_{kv,2})}{L_{kv,2}} \quad (C.89)$$

$$R_{49,o} = R_{k,ch} \quad (C.90)$$

C.3 Pomocné tepelné odpory

C.3.1 Čela statoru

$$R_{1,c} = \frac{b_{Cu}}{12h_{Cu}\lambda_d L_{c,0} Q_1} \quad (C.91)$$

$$R_{2,c} = \frac{h_{Cu}}{12h_{Cu}\lambda_d L_{c,0} Q_1} \quad (C.92)$$

$$R_{3,c} = \frac{1}{\alpha_{c,v} L_{c,0} O_{Cu} Q_1} \quad (C.93)$$

$$R_{1,2,3,c} = \frac{R_{1,c} \cdot R_{2,c}}{(R_{1,c} + R_{2,c})} + R_{3,c} \quad (C.94)$$

$$R_{4,c} = \frac{1}{16\pi^2 R_c \lambda_c} \quad (C.95)$$

$$R_{5,c} = \frac{1}{\alpha_{c,v} (4\pi^2 r_{c,l} R_c - Q_1 S_{Cu})} \quad (C.96)$$

$$R_{4,5,c} = R_{4,c} + R_{5,c} \quad (C.97)$$

$$R_{vin} = \frac{R_{1,2,3,c} \cdot R_{4,5,c}}{R_{1,2,3,c} + R_{4,5,c}} \quad (C.98)$$

C.3.2 Kostra - vodní chlazení

$$R_{k,ch} = \frac{1}{2\rho_{ch} q_{ch} c_p} \quad (C.99)$$

C.3.3 Kostra - konvekce do okolí

$$R_{k,o} = \frac{\ln\left(\frac{r_{k,out}}{r_{k,m}}\right)}{2\pi\lambda_k (L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})} + \frac{1}{\alpha_{k,o} 2\pi r_{k,out} (L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})} \quad (C.100)$$
$$+ \frac{1}{\alpha_{v,ch} 12\pi r_{tr} (L_{Fe,s} + L_{kv,1} + L_{kv,2})}$$