

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



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

TEPENÝ MODEL VYSOKOTÁČKOVÉHO ASYNCHRONNÍHO MOTORU

THERMAL MODEL OF HIGH-SPEED INDUCTION MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Světlík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Martin Světlík

ID: 206814

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Tepný model vysokotáčkového asynchronního motoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte základní vztahy přenosu tepla a metodu tepelných sítí.
2. Provedte literární rešerši v oblasti tepelných výpočtů vysokotáčkových strojů.
3. Vytvořte tepelný model vysokotáčkového asynchronního motoru založený na metodě tepelných sítí.
4. Pomocí vytvořeného modelu proveďte tepelný výpočet vysokotáčkového 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] LIST, Vladimír a Josef HAK. Elektrotechnika II, Elektrické stroje - část 1. SNTL, 1969.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 10.6.2020

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 stroje. V první části je popsáno rozdělení mechanických ztrát elektrického točivého stroje a proveden výpočet ztrát ve vzduchové mezeře a na kruzích rotoru. Tyto výpočty jsou provedeny na základě vztahů zohledňujících tření rotoru o okolní tekutinu. V další části je provedena literární rešerše na téma tepelných výpočtů a je zde popsán princip výpočtu metodou tepelných sítí. V poslední části se nachází tepelná síť navržená pro konkrétní stroj a tabulka s výslednými teplotami v důležitých částech stroje.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vysokootáčkový motor, tepelná síť, metoda ekvivalentních tepelných odporů

ABSTRACT

This paper deals with thermal calculation of high-speed machines. Distribution of electrical rotating machine losses and calculation of losses in the air gap and on the ends of rotor is described in first part. Based on relationships taking into account rotor friction are these calculations made. Literary search on theme of thermal calculation and principle of calculation by equivalent thermal resistance method is described here in the next part. Thermal network designed for specific machine and tabular of resulting temperatures are located in the last part.

KEYWORDS

High-speed motor, thermal network, equivalent thermal resistance method

SVĚTLÍK, Martin. *Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje*. Brno, 2020, 58 s. Bachelářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Marek Toman

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské 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 bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské 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

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Marku Tomanovi za odborné vedení, velkou trpělivost a ochotu při pravidelných konzultacích. Dále bych rád poděkoval za podnětné návrhy a konstruktivní připomínky k práci, díky kterým jsem získal mnohé znalosti nejen z oblasti tepelných výpočtů.

V neposlední řadě bych rád poděkoval mé rodině, která mi byla oporou v těžkých chvílích studia.

Obsah

Seznam symbolů, veličin a zkratk	10
Úvod	12
1 Ztráty ve vysokootáčkových strojích	13
1.1 Výpočet mechanických ztrát	13
1.1.1 Mechanické ztráty ve vzduchové mezeře	14
1.1.2 Mechanické ztráty na kruzích rotoru	15
1.2 Výpočet třecích koeficientů	15
1.2.1 Vzduchová mezera	15
1.2.2 Kruhy rotoru	15
1.3 Určení typu proudění tekutiny	16
1.3.1 Laminární proudění	16
1.3.2 Turbulentní proudění	16
1.3.3 Přechodná oblast	17
1.4 Směry proudění tekutiny	17
1.4.1 Tangenciální proudění	17
1.4.2 Radiální proudění	17
1.4.3 Axiální proudění	17
2 Přenos tepla	18
2.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)	18
2.2 Přenos tepla prouděním (konvekcí)	19
2.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře	19
2.2.2 Výpočet součinitele přestupu tepla v ostatních částech stroje	20
2.3 Sálání (radiace)	21
3 Metoda tepelné sítě	23
3.1 Výpočet tepelné sítě	23
3.2 Princip odvození maticového zápisu pro tepelnou síť	24
3.3 Tepelný odpor	25
3.3.1 Tepelný odpor kondukcí	25
3.3.2 Tepelný odpor konvekcí	25
4 Tepelná síť pro vysokootáčkový stroj	26
4.1 Výpočet tepelných odporů v jednotlivých částech sítě	27
4.1.1 Kostra stroje	28
4.1.2 Ložiskový štít	30

4.1.3	Jho statoru	31
4.1.4	Zub statoru	33
4.1.5	Vinutí statoru	34
4.1.6	Čelo vinutí statoru	35
4.1.7	Vzduchová mezera	37
4.1.8	Vnitřní vzduch	38
4.1.9	Zub rotoru	40
4.1.10	Jho rotoru	41
4.1.11	Hřídel	41
5	Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje	44
5.1	Vstupní parametry	44
5.1.1	Geometrické rozměry	44
5.1.2	Materiálové vlastnosti	44
5.1.3	Generované ztráty	46
5.1.4	Součinitelé přestupu tepla	46
5.2	Výsledné střední teploty	48
5.3	Tepelné toky	49
	Závěr	51
	Literatura	52
	Seznam příloh	54
	A Tabulka geometrických rozměrů	55
	B Výsledné tepelné odpor	57
	B.1 Vnitřní odpory stroje	57
	B.2 Odpory odvodu tepla do okolí	58

Seznam obrázků

1.1	Rozložení ztrát v elektrickém točivém stroji [2].	13
1.2	Rychlostní profily pro různé typy proudění ve vzduchové mezeře. [3]. .	14
2.1	Přenos tepla přes rovinnou stěnu [14]	18
2.2	Oblasti s rozdílným typem proudění. [3]	21
3.1	Příklad jednoduché tepelné sítě.	24
4.1	Tepelná síť asynchronního vysokootáčkového stroje.	26
4.2	Příklad výpočtu dílčích odporů.	27
4.3	Kostra stroje.	28
4.4	Ložiskový štít ze strany elektrického přívodu.	30
4.5	Ložiskový štít ze strany hřídele.	31
4.6	Jho statoru.	32
4.7	Zub statoru.	33
4.8	Drážka statoru.	34
4.9	Vinutí statoru.	34
4.10	Čelo vinutí statoru.	35
4.11	Vzduchová mezera.	37
4.12	Vnitřní vzduch.	38
4.13	Zub rotoru.	40
4.14	Jho rotoru.	41
4.15	Hřídel.	42
5.1	Rozložení ztrát v rotoru stroje	47

Seznam tabulek

2.1	Ztráty generované ve stroji	21
3.1	Tabulka elektrických a k nim ekvivalentních tepelných veličin [13]. . .	23
5.1	Tabulka geometrických rozměrů	45
5.2	Tabulka použitých materiálů	45
5.3	Ztráty generované ve stroji	46
5.4	Tabulka použitých součinitelů přestupů tepla a stykových koeficientů	47
5.5	Tabulka vypočtených teplot	48
5.6	Tabulka Tepelných toků	49
A.1	Tabulka geometrických rozměrů	55

Seznam symbolů, veličin a zkratk

Parametr	Popis	Jednotka
α	Koeficient přestupu tepla	[W/m ² K]
$\Delta\vartheta$	Rozdíl povrchových teplot	[K; °C]
ΔP	Ztráty	[W]
ΔP_{j1}	Jouleovy ztráty ve statoru	[W]
ΔP_{j2}	Jouleovy ztráty v rotoru	[W]
ΔP_{Fe}	Jouleovy ztráty v železe	[W]
δ	Šířka vzduchové mezery	[m]
ε	Emisivita	[-]
ϑ	Matice teplot	[°C]
λ	Tepelná vodivost materiálu	[W/m·K]
μ	Dynamická viskozita tekutiny	[Pa·s]
ν	Kinematická viskozita tekutiny	[m ² /s]
ρ	Hustota tekutiny obklopující rotor	[kg/m ³]
σ_{SB}	Steffan-Boltzmanova konstanta	[W/m ² K ⁴]
ω	Úhlová rychlost rotoru	[rad/s]
A	Průřez profilu	[m ²]
$C_{T,\delta}$	Koeficient tření ve vzduchové mezeře	[-]
$C_{T,kruh}$	Koeficient tření na kruhu rotoru	[-]
c_B	Součinitel sálání absolutně černého tělesa	[W/m ² K ⁴]
c_p	Měrná tepelná kapacita	[J/kg·K]
d	Průměr hřídele	[m]
F_g	Geometrický faktor	[m]
G	Poměr vzdálenosti kruhu rotoru od štítu vůči poloměru rotoru	[-]
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí	[W/K]
g_ϑ	Tepelná vodivost	[W/K]
h	Tloušťka stěny	[m]
$h_{\text{š}}$	Výška štítu od hřídele po vnitřní stranu kostry	[m]
h_{kruh}	Výška kruhu rotoru	[m]
$h_{\text{k,š}}$	Vzdálenost kruhu rotoru od štítu	[m]
k_1	Koeficient drsnosti povrchu	[-]
k_2	Rychlostní faktor	[-]
L	Délka profilu ve směru šíření tepla	[m]
L_c	Charakteristická geometrická délka	[m]
l	Délka válcové stěny	[m]
l_{rot}	Délka aktivní části rotoru	[m]

Nu	Nusseltovo číslo	[-]
\mathbf{P}	Matice tepelných toků	[W]
P	Tepelný tok	[W]
P_1	Příkon	[W]
P_2	Výkon	[W]
P_δ	Výkon přenesený přes vzduchovou mezeru	[W]
$P_{\text{mech,kruh}}$	Mechanické ztráty třením vzduchu o kruh rotoru	[W]
$P_{\text{mech},\delta}$	Mechanické ztráty třením vzduchu ve vzduchové mezeře	[W]
Pr	Prandtlovo číslo	[-]
q_m	Hmotnostní průtok	[kg/s]
R_{proud}	Tepelný odpor prouděním	[K/W]
R_{ved}	Tepelný odpor vedením	[K/W]
Re	Reynoldsovo číslo	[-]
Re_δ	Reynoldsovo číslo v tangenciálním směru	[-]
R_ϑ	Tepelný odpor	[K/W]
Re_r	Reynoldsovo číslo v radiálním směru	[-]
$Re_{r,h}$	Reynoldsovo číslo v radiálním směru v okolí hřídele	[-]
Re_a	Reynoldsovo číslo v axiálním směru	[-]
r_h	Poloměr hřídele	[m]
r_{rot}	Poloměr rotoru	[m]
S	Teplosměnná plocha	[m ²]
Ta	Taylorovo číslo	[-]
Ta_m	Modifikované Taylorovo číslo	[-]
u_1	Obvodová rychlost rotoru	[m/s]
u_m	Radiální rychlost tekutiny	[m/s]
v	Axiální rychlost proudění tekutiny mimo mezní vrstvu	[m/s]
v_m	Axiální rychlost proudění tekutiny	[m/s]

Úvod

Elektrické stroje spotřebovávají na svůj provoz téměř polovinu veškeré vyrobené elektrické energie. Zvyšující se poptávka po této energii vede ke zvýšení množství emisí vypouštěných do atmosféry. Z tohoto důvodu je snaha o zvýšení účinnosti elektrických strojů a soustav, ve kterých tyto stroje figurují.

Jedním z možných způsobů zvyšování účinnosti soustav jsou tzv. vysokootáčkové stroje, které pro pohon systému nepotřebují převodovku a tím zvyšují jeho celkovou účinnost. Za vysokootáčkové stroje jsou obvykle považovány takové stroje, které jsou schopny dosáhnout otáček vyšších než 10 000 ot/min.

V důsledku vysokých nominálních rychlostí a větší hustoty výkonu dochází v těchto strojích k řádově vyšší hustotě generovaných ztrát. Tyto se dále projevují výraznějším oteplením stroje. Na druhou stranu díky vyšší hustotě výkonu jsou stroje menší a proto je komplikovanější jejich chlazení (jejich chladicí plocha je s ohledem na velikost generovaných ztrát malá). Za účelem efektivnějšího chlazení těchto strojů se přistupuje k účinnějším způsobům konstrukčního provedení. Mezi tyto způsoby patří například kostra prostoupená kanálky, kterými proudí chladicí tekutina tak, aby se zvýšil odvod tepla z kostry. Další možný způsob, kterým lze zvýšit odvod tepla, je otevření kostry v oblasti statorového paketu tak, aby mohlo docházet k proudění chladicího plynu přímo přes vnitřní části stroje. Tento způsob přímo umožňuje odvádět velké množství tepla z vnitřních částí stroje jako například stator, rotor nebo čela vinutí. V neposlední řadě lze uvažovat i odvod tepla do okolí, přes uzavřenou kostru, prostřednictvím přirozené či nucené konvekce.

I přes zjevné komplikace spojené s chlazením těchto strojů naznačují současné trendy, že budou vysokootáčkové stroje hojně využívány v mnoha aplikacích. K tomuto trendu přispívá i fakt, že se tyto stroje začínají využívat například pro čerpání chladiva v elektrárnách nebo lze díky jejich malým rozměrům a hmotnostem uvažovat využití v leteckém nebo automobilovém průmyslu.

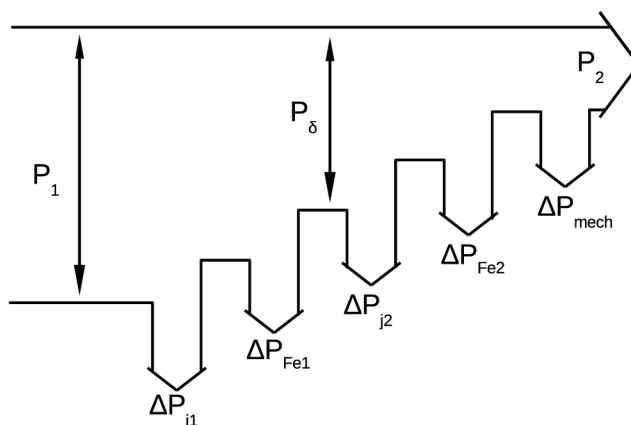
Jelikož s sebou mnohé ze zmíněných aplikací nesou vysoké požadavky na spolehlivost, je nezbytné provedení přesných tepelných výpočtu tak, aby nedocházelo k jejich přehřívání nebo k rychlé degradaci izolace. Z tohoto důvodu jsou na přesnost tepelných výpočtů kladeny velmi vysoké nároky.

1 Ztráty ve vysokootáčkových strojích

V této kapitole jsou přiblíženy způsoby výpočtu mechanických ztrát, které jsou v případě elektrických strojů dominantní. Celkové ztráty generované ve vysokootáčkových strojích jsou však složeny ze stejných dílčích ztrát jako celkové ztráty ve strojích nízkootáčkových. Proto lze pro celkové ztráty psát

$$\Delta P = \Delta P_{j1} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{j2} + \Delta P_{mech}, \quad (1.1)$$

kde ΔP jsou celkové ztráty v motoru, ΔP_{j1} jsou Jouleovy ztráty ve vinutí statoru, ΔP_{Fe1} jsou ztráty v železe statoru, ΔP_{j2} jsou Jouleovy ztráty v rotoru, ΔP_{Fe2} jsou ztráty v železe rotoru a ΔP_{mech} jsou celkové mechanické ztráty [1]. Rozložení těchto ztrát je graficky znázorněno na Obr. 1.1.

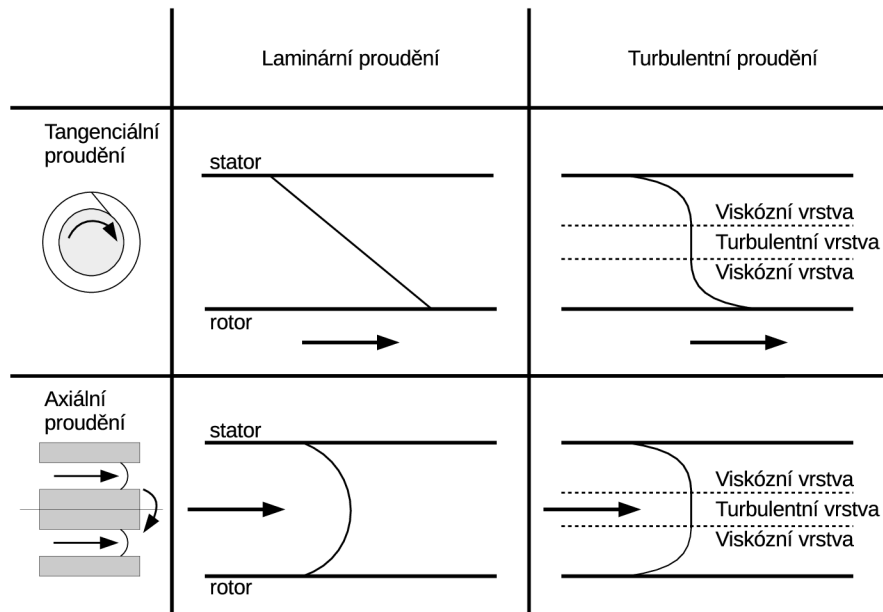


Obr. 1.1: Rozložení ztrát v elektrickém točivém stroji [2].

Kde P_1 znázorňuje příkon, který je dodáván stroji, P_δ určuje výkon přenesený přes vzduchovou mezeru a P_2 udává výkon na hřídeli stroje [2]. Jelikož jsou v oblasti vysokootáčkových strojů majoritní mechanické ztráty, musí se jejich výpočtu věnovat zvýšená pozornost.

1.1 Výpočet mechanických ztrát

Mechanické ztráty jsou do značné míry ovlivněny tím, jakým způsobem proudí chladicí médium přes vzduchovou mezeru. Grafické znázornění možných typů proudění je uvedeno v Obr. 1.2. [3]



Obr. 1.2: Rychlostní profily pro různé typy proudění ve vzduchové mezeře. [3].

V tomto obrázku je axiálním prouděním myšleno proudění tekutiny ve směru osy hřídele a tangenciální proudění značí proudění tekutiny kolmo na osu hřídele, ale mimo její rovinu. Popis laminárního a turbulentního proudění je podrobněji uveden v kapitole 1.3. [4]

1.1.1 Mechanické ztráty ve vzduchové mezeře

Ztráty ve vzduchové mezeře je možné rozdělit na ztráty vytvořené radiálním nebo axiálním prouděním. Oba druhy ztrát jsou způsobeny třením rotoru o okolní tekutinu, kterou je nejčastěji vzduch. U zvláštních typů kompresorů, určených pro čerpání tekutin o nízké teplotě, může být rotor obklopen čerpanou tekutinou.

Při výpočtu ztrát vytvořených radiálním prouděním úplně zanedbáváme ztráty související s prouděním axiálním. V případě, že se na rotoru vyskytuje drážkování, popřípadě jsou na statoru štěrbiny, uvažujeme, že ztráty mohou být korigovány koeficientem drsnosti povrchu, který nabývá hodnot 1-1,4, kdy v případě hladkého rotoru uvažujeme jeho hodnotu rovnu jedné. Tento odhad je založený na řadě pokusných měření. [6] Výsledný vztah sloužící k výpočtu ztrát vytvořených radiálním prouděním lze psát ve tvaru

$$P_{\text{mech},\delta} = k_1 C_{T,\delta} \pi \rho \omega^3 r_r^4 l_{\text{rot,akt}}, \quad (1.2)$$

kde k_1 je koeficient drsnosti povrchu, C_T je koeficient třecích mechanických ztrát, který je více popsán v kapitole 1.2, r_r je poloměr rotoru a $l_{\text{rot,akt}}$ je délka aktivní části

rotoru. [5] Ztráty generované axiálním prouděním v našem případě neuvažujeme, ale v případě potřeby je možné dohledat vztah pro jejich výpočet v [3].

1.1.2 Mechanické ztráty na kruzích rotoru

Tyto ztráty jsou způsobeny třením kruhů rotoru o okolní tekutinu. Kruhy rotoru potom působí jako centrifuga a tlačí tekutinu směrem k vnější části vzduchové mezery. Tento jev je nejvíce znatelný u motorů, které mají v oblastech kruhů více volného prostoru. Lze je určit z následující rovnice

$$P_{\text{mech,kruh}} = \frac{1}{2} C_{\text{T,kruh}} \rho \omega^3 (r_{\text{s,in}}^5 - r_{\text{r}}^5), \quad (1.3)$$

kde ρ je hustota tekutiny, která obklopuje rotor, ω je úhlová rychlost rotoru, r_{r} je vnitřní poloměr vzduchové mezery, $r_{\text{s,in}}$ je vnější poloměr vzduchové mezery. [3]

1.2 Výpočet třecích koeficientů

Koeficient tření nabývá jiných hodnot pro kruhy rotoru a pro vzduchovou mezeru. Různé vztahy výpočtu tohoto koeficientu platí pro různé velikosti Reynoldsova čísla. Problematikou Reynoldsova čísla se podrobněji zabývá 1.3

1.2.1 Vzduchová mezer

Pro vzduchovou mezeru platí podle [6] vztahy

$$\begin{aligned} C_{\text{T},\delta} &= \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0,3}}{\text{Re}_\delta^{0,6}} && \text{pro } \text{Re}_\delta < 64, \\ C_{\text{T},\delta} &= 5 \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0,3}}{\text{Re}_\delta} && \text{pro } 64 < \text{Re}_\delta < 500, \\ C_{\text{T},\delta} &= 0,515 \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0,3}}{\text{Re}_\delta^{0,5}} && \text{pro } 500 < \text{Re}_\delta < 10^4, \\ C_{\text{T},\delta} &= 0,0325 \frac{\left(\frac{\delta}{r}\right)^{0,3}}{\text{Re}_\delta^{0,2}} && \text{pro } \text{Re}_\delta > 10^4. \end{aligned} \quad (1.4)$$

Uvedené vztahy se liší v závislosti na změnách Reynoldsova čísla v tangenciálním směru.

1.2.2 Kruhy rotoru

V případě kruhů rotoru poté platí podle [6] vztahy, které jsou opět závislé na Reynoldsově čísla, tentokrát se však jedná o Reynoldsovo číslo v radiálním směru. Tyto

vztahy lze definovat jako

$$C_{T,kruh} = \frac{3,87}{Re_r^{0,5}} \quad \text{pro } Re_r < 3 \cdot 10^5, \quad (1.5)$$
$$C_{T,kruh} = \frac{0,146}{Re_r^{0,2}} \quad \text{pro } Re_r > 3 \cdot 10^5.$$

1.3 Určení typu proudění tekutiny

Při určování, zda ve stroji dochází k laminárnímu nebo turbulentnímu proudění se využívá tzv. Reynoldsovo číslo, které je dáno poměrem setrvačných a viskózních sil [7]. Toto číslo lze obecně určit jako

$$Re = \frac{vL_c}{\nu}, \quad (1.6)$$

kde v je rychlost volného proudu tekutiny, čili v dostatečné vzdálenosti od analyzovaného povrchu, L_c je charakteristická délka a ν je kinematická viskozita tekutiny. Kinematickou viskozitu můžeme vyjádřit jako

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \quad (1.7)$$

kde μ je dynamická viskozita tekutiny a ρ udává hustotu tekutiny. Po dosazení rovnice (1.7) do rovnice (1.6) získáme podle [7] vztah

$$Re = \frac{\rho v L_c}{\mu}. \quad (1.8)$$

1.3.1 Laminární proudění

V případě laminárního proudění nedochází k vzájemnému protínání proudnic (proudnic jsou rovnoběžné), jelikož setrvačné síly nejsou dostatečně velké na to, aby překonaly viskózní síly. Rychlostní průběh podél vzduchové mezery je lineární, viz Obr. 1.2 [7].

Hranice, při které je proudění čistě laminární, je dána $Re < 2000$ [1].

1.3.2 Turbulentní proudění

V případě turbulentního proudění dochází k vzájemnému protínání proudnic a následnému neuspořádanému pohybu. Tento jev je způsoben nárůstem setrvačných sil, které převažují nad silami viskózními. Tyto viskózní síly nedokáží zabránit náhodným a rychlým výkyvům tekutiny. Při turbulentním proudění je rychlostní průběh podél vzduchové mezery téměř rovnoměrný, viz Obr. 1.2, jedinou výjimkou jsou tenké viskózní vrstvy, které vznikají na okrajích vzduchové mezery. Tyto vrstvy se rostoucí rychlostí proudící tekutiny zužují [7].

Plně turbulentní proudění se vyskytuje v případě, kdy je $Re > 10\,000$ [1].

1.3.3 Přejchodná oblast

Hodnota čísla, při které přechází laminární proudění v turbulentní, se nazývá kritická hodnota Reynoldsova čísla. Tato hodnota se mění v závislosti na geometrii obtékaného tělesa a na vlastnostech obtékající tekutiny. Proudnice tak přestávají být rovnoběžné a začíná docházet k jejich protínání a k jejich neuspořádanému pohybu[7].

K přechodu mezi laminárním a turbulentním prouděním dochází v případě, že $2000 < Re < 10000$ [1].

1.4 Směry proudění tekutiny

Hodnota Reynoldsova čísla se odvíjí od různých vlastností proudící tekutiny a různých směrů proudění této tekutiny ve stroji, z toho důvodu se hodnota Reynoldsova čísla určuje jinými způsoby pro tangenciální a jinými způsoby pro radiální proudění.

1.4.1 Tangenciální proudění

Tento typ proudění se vyskytuje převážně ve vzduchové mezeře stroje. Grafické znázornění tohoto typu proudění je uvedeno v Obr. 1.2. Výpočet tangenciálního proudění je proveden prostřednictvím vztahu

$$Re_{\delta} = \frac{\rho u_1 \delta}{\mu}, \quad (1.9)$$

kde δ je šířka vzduchové mezery.

1.4.2 Radiální proudění

Radiální proudění působí kolmo na osu stroje, přímo v její rovině. Při výpočtech proudění v jiných částech stroje, než je vzduchová mezera se často uvažuje právě radiální proudění tekutiny. Tento typ proudění lze určit jako

$$Re_r = \frac{\rho u_1 r_{rot}}{\mu}. \quad (1.10)$$

1.4.3 Axiální proudění

Axiální typ proudění se uvažuje pouze v případě, kdy je motor profukován chladivem v axiálním směru. Názorně je tento typ proudění naznačen na Obr. 1.2. Axiální proudění lze poté určit vztahem

$$Re_a = \frac{\rho v_m 2\delta}{\mu}. \quad (1.11)$$

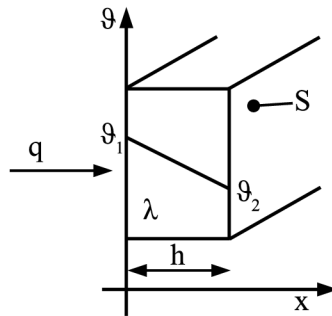
Zmíněné složky proudění určují celkovou povahu proudění tekutiny. [3]

2 Přenos tepla

V této kapitole je uveden popis jednotlivých mechanismů přenosu tepla. Tyto slouží k přenosu tepla z oblastí, ve kterých dochází ke generování ztrát do ostatních částí stroje a následně dále do okolí.

2.1 Přenos tepla vedením (kondukcí)

K přenosu tepla vedením dochází zejména v pevných látkách. Princip přenosu tepla přes jednoduchou rovinnou stěnu je naznačen na Obr. 2.1.



Obr. 2.1: Přenos tepla přes rovinnou stěnu [14]

Tepelný tok, který prochází přes jednoduchou rovinnou stěnu je podle [4] definován jako

$$P = qS, \quad (2.1)$$

kde q je hustota tepelného toku a S je plocha. Hustotu tepelného toku lze vypočítat jako

$$q = \frac{\lambda \Delta\vartheta}{h}, \quad (2.2)$$

kde λ je měrná tepelná vodivost materiálu, $\Delta\vartheta$ je rozdíl povrchových teplot stěny a h je tloušťka stěny. Rozdíl povrchových teplot je definován jako

$$\Delta\vartheta = \vartheta_1 - \vartheta_2, \quad (2.3)$$

kde ϑ_1 je teplota teplejšího povrchu a ϑ_2 je teplota chladnějšího povrchu.

Pro válcovou jednoduchou stěnu je tepelný tok definován podle [4] jako

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

kde l je délka válcové stěny, r_2 je vnější poloměr válce a r_1 je vnitřní poloměr válce.

2.2 Přenos tepla prouděním (konvekcí)

K přenosu tepla prouděním dochází pouze v tekutinách, kdy podle [8] existují dva základní typy proudění (přirozené a nucené). Obecně je podle [4] tepelný tok přenosu tepla prouděním definován jako

$$P = \alpha S \Delta \vartheta, \quad (2.5)$$

kde α je součinitel přestupu tepla, který je důležitým parametrem výpočtu přenosu tepla prouděním a vyjadřuje množství tepla, které je přeneseno jednotkovou plochou mezi tekutinou a pevným tělesem za jednotku času při rozdílu teplot 1 K. Součinitel přestupu tepla lze podle [6] obecně definovat jako

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{L_c}, \quad (2.6)$$

kde L_c je charakteristická délka a Nu je Nusseltovo číslo. Toto číslo vyjadřuje, kolikrát je lepší přenos tepla prouděním v pohybující se tekutině oproti tekutině v klidu, ve které by tak probíhal přenos tepla pouze vedením. To znamená, že vyšší hodnota Nusseltova čísla představuje vyšší efektivitu přenosu tepla. V případě, že $\text{Nu}=1$ dochází k přenosu tepla v tekutině pouze vedením.[6]

Vzhledem ke komplexnosti problematiky proudění chladicí tekutiny v elektrických strojích se přistupuje k určení součinitelů přestupu tepla prostřednictvím empirických vztahů. Z hlediska různé povahy proudění na různých vnitřních částech stroje jsou rozlišovány rozdílné způsoby výpočtu součinitele přestupu tepla. Nejvýznamnější oblastí z hlediska přenosu tepla prouděním ve stroji je vzduchová mezera, proto je výpočtu součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře věnována zvýšená pozornost. Vztahy pro výpočet součinitelů přestupu tepla v ostatních oblastech jsou uvedeny v tabulce 2.1. Zmiňované oblasti, u kterých jsou uvažovány rozdílné součinitele přestupu tepla jsou uvedeny na Obr. 2.2.

2.2.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Oblast vzduchové mezery je na Obr. 2.2 znázorněna jako oblast č. 1. Pro výpočet součinitele přestupu tepla v této oblasti platí vztah vycházející z rovnice (2.6) ve tvaru

$$\alpha = \frac{\text{Nu}\lambda}{\delta}, \quad (2.7)$$

kde podle [3] můžeme pro vzduchovou mezeru nahradit charakteristickou délku L_c výškou této mezery δ . Nu pro oblast vzduchové mezery lze určit prostřednictvím následujících vztahů.

$$\begin{aligned} \text{Nu} &= 2 && \text{pro } \text{Ta}_m < 1700, \\ \text{Nu} &= 0,128 \text{Ta}_m^{0,367} && \text{pro } 1700 < \text{Ta}_m < 10^4, \\ \text{Nu} &= 0,409 \text{Ta}_m^{0,241} && \text{pro } 10^4 < \text{Ta}_m < 10^7, \end{aligned} \quad (2.8)$$

kde Ta_m značí Taylorovo modifikované číslo, které zahrnuje vliv poloměru rotoru a délky vzduchové mezery. Tento koeficient lze podle [6] určit prostřednictvím vztahu

$$Ta_m = \frac{Ta}{F_g}, \quad (2.9)$$

kde Ta značí Taylorovo číslo, které souvisí s tzv. Taylor-Couettovým prouděním. Toto proudění způsobuje tzv. Taylorovy víry, které vznikají ve vzduchové mezeře stroje. Taylorovo číslo je možné určit prostřednictvím vztahu.

$$Ta = Re_\delta^2 \frac{\delta}{r_1}, \quad (2.10)$$

kdy po dosazení rovnice (1.9) do rovnice (2.10) obdržíme výsledný vztah pro výpočet Taylorova čísla ve tvaru [6]

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 r_1 \delta^3}{\mu^2}. \quad (2.11)$$

F_g je podle [6] geometrický faktor, který je dán vztahem

$$F_g = \frac{\pi^4 \left[\frac{2r_1 - 2,304\delta}{2r_1 - \delta} \right]}{1697 \left[0,056 + 0,0571 \left(\frac{2r_1 - 2,304\delta}{2r_1 - \delta} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{\delta}{r_1} \right]^2}. \quad (2.12)$$

V praxi je obvykle rozdíl těchto délek poměrně velký, z toho důvodu je vždy geometrický faktor velice blízký jedné. Tato vlastnost F_g je dána konstrukcí stroje, protože šířka vzduchové mezery je v porovnání s poloměrem rotoru velice malá. Z tohoto důvodu můžeme podle [6] předpokládat

$$Ta_m \approx Ta. \quad (2.13)$$

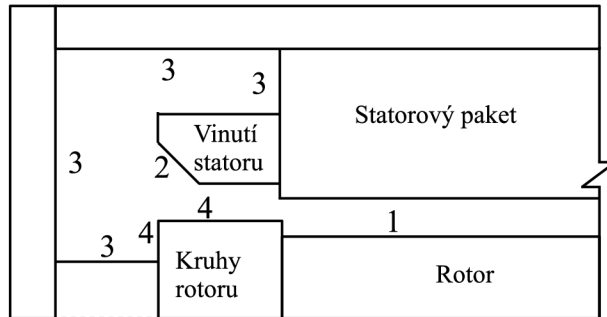
V problematice vysokootáčkových strojů dosahuje Taylorovo a tím i Taylorovo modifikované číslo řádu $10^8 - 10^9$. Tyto řády jsou nad mezí, která je definována v rovnici (2.8), ale vzhledem k tomu, že při řádu 10^7 lze proudění ve vzduchové mezeře považovat za plně turbulentní a nepředpokládá se, že by docházelo k dalším změnám povahy proudění, můžeme daný vztah využít. [3]

2.2.2 Výpočet součinitele přestupu tepla v ostatních částech stroje

Z důvodu vysoké obtížnosti modelování proudění ve vysokootáčkových strojích bylo téměř nemožné dohledat vzorce, prostřednictvím kterých by bylo možné dopočítat součinitele přestupu tepla v dalších částech stroje. Tyto vztahy nebylo možné dohledat ani v publikacích, které se zabývají přímo vysokootáčkovými stroji, jako jsou např. [3], [6], proto byly pro výpočet využity vztahy pro pomaluběžné stroje, které jsou uvedeny v tabulce 2.1

Tab. 2.1: Ztráty generované ve stroji

Číslo oblasti	Název oblasti	Značení	Vztah
2	Čela vinutí statoru	$\alpha_{\check{c}v,vv}$	$6,5 + 5,25^{0,6} u_1^{0,6}$
3	Statorový paket	$\alpha_{js,vv}$	$15 + 6,75^{0,65} u_1^{0,65}$
	Kostra stroje	$\alpha_{r,vv}$	
	Ložiskový štít	$\alpha_{\check{s},vv}$	
	Hřídel	$\alpha_{h,vv}$	
4	Kruhy rotoru (axiálně)	$\alpha_{k,vv,a}$	$16,5^{0,65} u_1^{0,65}$
	Kruhy rotoru (radiálně)	$\alpha_{k,vv,r}$	



Obr. 2.2: Oblasti s rozdílným typem proudění. [3]

V případě, že se jedná o styk dvou pevných materiálů, uvažujeme tzv. součinitel stykového odporu. Tento součinitel vyjadřuje, kolik tepla je přeneseno přes stykovou plochu těchto materiálů, která je ve skutečnosti zmenšená oproti celkové ploše o nedokonalosti, které se vyskytují na povrchu každého tělesa. Tyto koeficienty je možné pro různé povrchy dohledat např v [6].

2.3 Sálání (radiace)

K přenosu tepla sáláním dochází v jakémkoliv prostředí (např. vzduch i vákuum) pomocí elektromagnetického záření. Toto záření produkuje každé těleso, které má teplotu vyšší, než absolutní nula ($0 \text{ K} = -273,15 \text{ }^\circ\text{C}$) [8]. Tepelný tok pro přenos tepla sáláním mezi dvěma vodorovnými deskami je podle [6] definován jako

$$P = \varepsilon \sigma_{SB} S (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.14)$$

kde ε značí relativní emisivitu mezi dvěma vzájemně se ovlivňujícími povrchy, σ_{SB} je Steffan-Boltzmanova konstanta, T_1 je termodynamická teplota teplejšího tělesa a T_2 značí termodynamickou teplotu studenějšího tělesa.

3 Metoda tepelné sítě

Tepelné dimenzování je nedílnou součástí návrhu každého technického zařízení. Jednou z možností, jak realizovat tento tepelný návrh je použití tzv. metody tepelných sítí neboli metody ekvivalentních tepelných obvodů [12]. Tato metoda je založena na principu sestavení tepelného schématu, které svým uspořádáním a typologií vystihuje tepelné chování reálné soustavy. Výslednou síť tvoří tři základní prvky [12]:

- Uzel - uzly jsou charakterizovány jejich teplotou a mohou být zdrojem tepelného toku.
- Větev - větve představují cestu tepelného toku mezi jednotlivými uzly.
- Nor - nory představují cestu tepelného toku mezi uzlem a okolní teplotou. Nespojují proto dva uzly, ale zajišťují odvod tepla do okolí.

3.1 Výpočet tepelné sítě

Tepelné výpočty pomocí tepelných sítí vychází z analogie mezi elektrickými a tepelnými obvody. Tabulka 3.1 znázorňuje tepelné veličiny, vztažené na ekvivalentní veličiny elektrické. Obvykle bývá výpočet řešen v ustáleném tepelném stavu. Síť však může být doplněna tepelnými kapacitami a pak je možné řešit i přechodné stavy.

Tab. 3.1: Tabulka elektrických a k nim ekvivalentních tepelných veličin [13].

Elektrické veličiny		Tepelné eličiny	
El. napětí	U [V]	Rozdíl teplot	$\Delta\vartheta$ [°C] [K]
El. proud	I [A]	Tepelný tok	P [W]
El. odpor	R [Ω]	Tepelný odpor	R_{ϑ} [K/W]

Z Tabulky 3.1 plyne, že v tepelných obvodech platí princip Ohmova zákona v podobě

$$P = \frac{\Delta\vartheta}{R_{\vartheta}}. \quad (3.1)$$

Obdobně lze podle ohmova zákona vyjádřit tepelnou vodivost jako převrácenou hodnotu tepelného odporu [12]

$$g_{\vartheta} = \frac{1}{R_{\vartheta}}. \quad (3.2)$$

Výpočet samotné tepelné sítě spočívá v řešení soustavy n lineárních rovnic, kde n je počet uzlů tepelné sítě. Soustavu rovnic je možné zapsat ve tvaru

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & \dots & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ \dots & \dots & \dots & \ddots & \dots \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{01} + g_{n,1}\vartheta_{\text{okolí},1} \\ P_{02} + g_{n,2}\vartheta_{\text{okolí},2} \\ P_{03} + g_{n,3}\vartheta_{\text{okolí},3} \\ \vdots \\ P_{0n} + g_{n,n}\vartheta_{\text{okolí},n} \end{pmatrix}. \quad (3.3)$$

Hlavní diagonála matice tepelných vodivostí je tvořena členy G_i . Členy P_{01} až P_{0n} v matici tepelných toků značí tepelné toky v jednotlivých uzlech. Hodnota členů G_i je dána součtem vodivostí, které vstupují do i -tého uzlu. Členy g_{ij} představují tepelnou vodivost mezi i -tým a j -tým uzlem a platí [14]

$$g_{ij} = g_{ji} \quad (3.4)$$

Pro soustavu rovnic 3.3 je možné použít zápis ve zjednodušeném tvaru

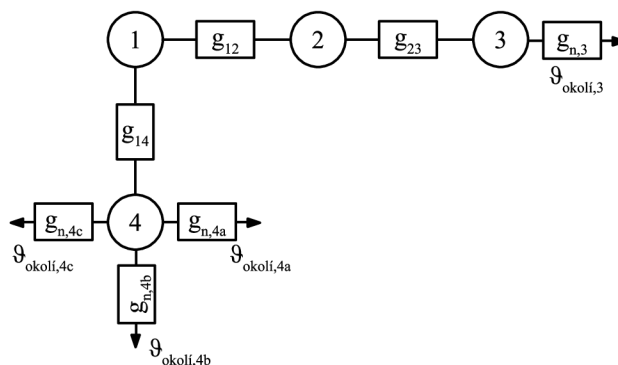
$$\mathbf{G} \times \boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{P}, \quad (3.5)$$

kde \mathbf{G} je matice tepelných vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je vektor neznámých teplot a \mathbf{P} je vektor tepelných toků. Pro určení neznámých teplot využijeme inverzní matici tepelných vodivostí

$$\boldsymbol{\vartheta} = \mathbf{G}^{-1} \times \mathbf{P}. \quad (3.6)$$

3.2 Princip odvození maticového zápisu pro tepelnou síť

Tvoření maticového zápisu je naznačeno na příkladu vycházejícím z Obr. 3.1. Jedná se o imaginární tepelnou síť určenou pro demonstraci sestavení vodivostní matice a matice tepelných toků. Tato tepelná síť obsahuje 4 uzly, 3 větve a 4 nory.



Obr. 3.1: Příklad jednoduché tepelné sítě.

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & 0 & -g_{14} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & 0 \\ 0 & -g_{32} & G_3 & 0 \\ -g_{14} & 0 & 0 & G_4 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vartheta_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{01} \\ P_{02} \\ P_{03} + g_{n,3}\vartheta_{\text{okolí},3} \\ P_{04} + g_{n,4a}\vartheta_{\text{okolí},4a} + g_{n,4b}\vartheta_{\text{okolí},4b} + g_{n,4c}\vartheta_{\text{okolí},4c} \end{pmatrix} \quad (3.7)$$

Pro jednotlivé členy hlavní diagonály vodivostní matice platí

$$\begin{aligned} G_1 &= g_{12} + g_{14}, \\ G_2 &= g_{12} + g_{23}, \\ G_3 &= g_{23} + g_{n,3}, \\ G_4 &= g_{14} + g_{n,4a} + g_{n,4b} + g_{n,4c}. \end{aligned} \quad (3.8)$$

3.3 Tepelný odpor

3.3.1 Tepelný odpor kondukcí

V oblasti tepelných strojů se uplatňuje zejména přenos tepla kondukcí a konvekcí, proto se zaměříme na určení tepelných odporů těchto dvou mechanismů.

Jednotlivé součásti elektrických strojů je možné obecně klasifikovat jako tělesa s vývinem tepla. V obecném případě je teplotní průběh v takovémto tělese popsán hyperbolickými funkcemi (\sinh , \cosh), přičemž skutečné řešení závisí na okrajových podmínkách. [15] Velmi často je však uvažováno, že teplotní průběh je parabolický, což značně zjednodušuje vyjádření tepelných odporů [16]. Tepelný odpor vedením předpokládající parabolický průběh teploty se podle [15] určí jako

$$R_{\text{ved}} = \frac{L}{6\lambda A}, \quad (3.9)$$

kde L je délka profilu ve směru šíření tepla a A je průřez.

3.3.2 Tepelný odpor konvekcí

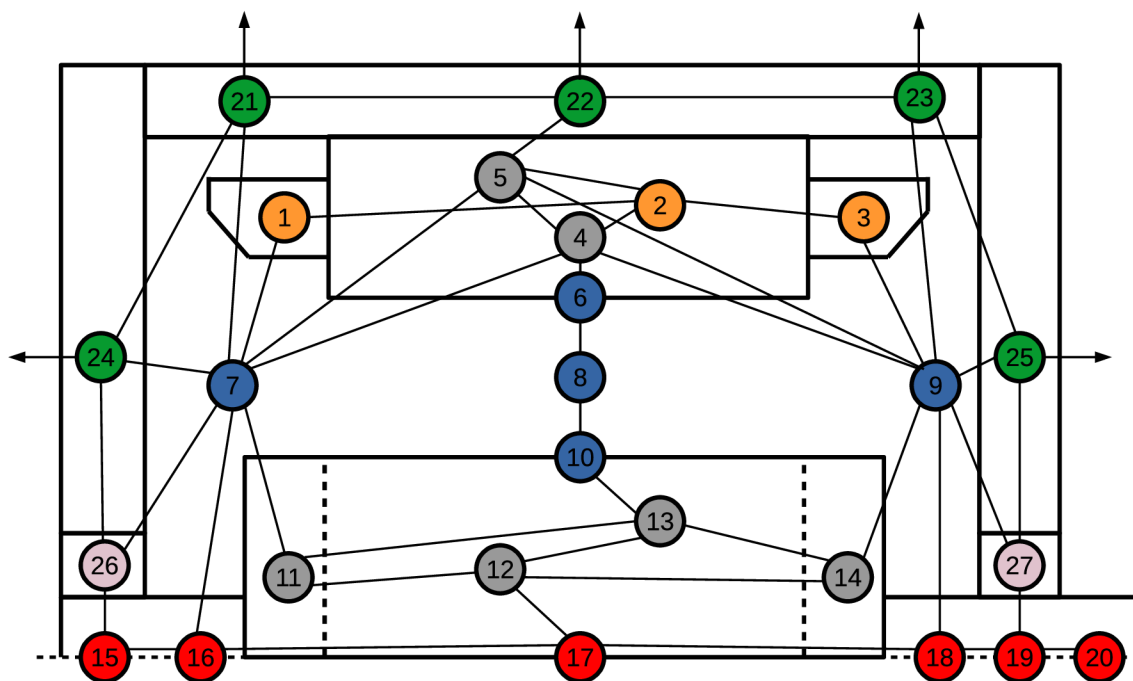
Obecný vztah pro odpor přenosu tepla konvekcí lze podle [15] uvažovat ve tvaru

$$R_{\text{konv}} = \frac{1}{\alpha S}, \quad (3.10)$$

kde S je teplosměnná plocha. Výpočtem konkrétních tepelných odporů pro tepelnou síť vysokootáčkového stroje se podrobněji zabývá kapitola 4.1.

4 Tepelná síť pro vysokootáčkový stroj

Tato kapitola se zabývá řešením výsledné tepelné sítě pro vysokootáčkový stroj, která je zobrazena na Obr. 4.1. Tato síť obsahuje 27 uzlů, které jsou znázorněny jednotlivými body. Spojnice těchto uzlů znázorňují jednotlivé tepelné odpory.



Obr. 4.1: Tepelná síť asynchronního vysokootáčkového stroje.

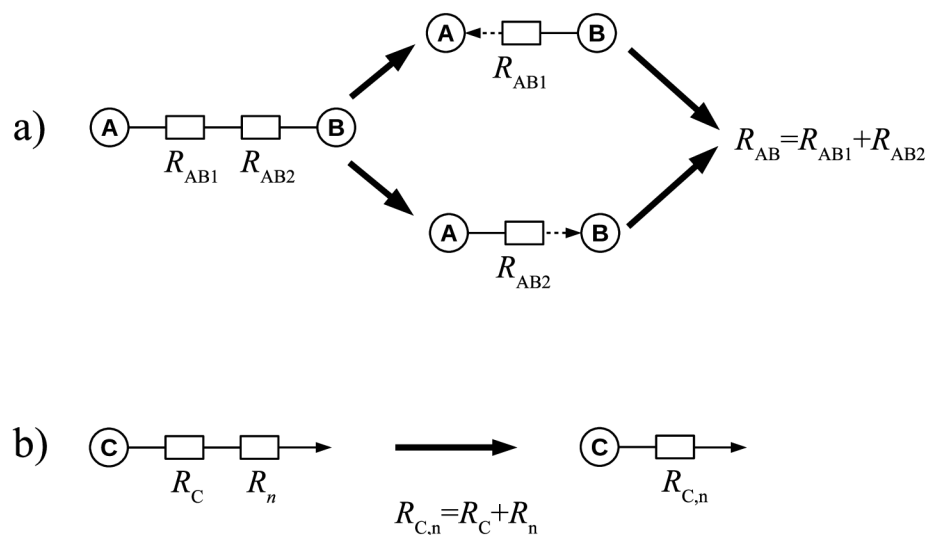
Význam jednotlivých uzlů sítě:

1 – Čelo vinutí statoru	10 – Vnitřní vzduch ($R-\delta$)	19 – Hřídel (pod lož.)
2 – Vinutí v drážkách statoru	11 – Kruh rotoru	20 – Hřídel (okolí)
3 – Čelo vinutí statoru	12 – Jho rotoru	21 – Kostra
4 – Zuby statoru	13 – Zuby rotoru	22 – Kostra
5 – Jho statoru	14 – Kruh rotoru	23 – Kostra
6 – Vnitřní vzduch ($S-\delta$)	15 – Hřídel (pod lož.)	24 – Ložiskový štít
7 – Vnitřní vzduch	16 – Hřídel (do vn. vzduchu)	25 – Ložiskový štít
8 – Vzduchová mezera	17 – Hřídel (střed)	26 – Ložisko
9 – Vnitřní vzduch	18 – Hřídel (do vn. vzduchu)	27 – Ložisko

4.1 Výpočet tepelných odporů v jednotlivých částech sítě

V této kapitole je uveden výpočet jednotlivých tepelných odporů sítě zobrazené na Obr. 4.1. Vzhledem k předpokladu, že teplota i geometrie stroje jsou rozloženy symetricky okolo jeho vodorovné osy, předpokládáme rotační symetrii rozložení teplot.

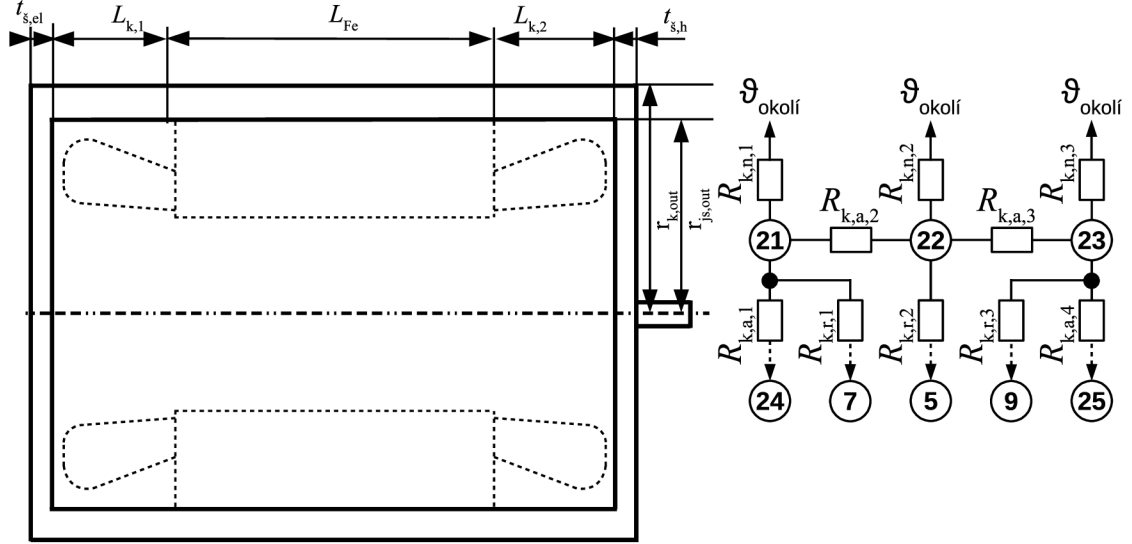
V rámci přehlednosti je následující popis výpočtu tepelných odporů pro jednotlivé části stroje rozdělen na dílčí části, které jsou uvedeny v následující části kapitoly. Způsob jakým jsou vzájemně spojeny jednotlivé části sítě a s nimi spojené dílčí tepelné odpory je uveden na Obr. 4.2 a). V případě Obr. 4.2 b) je uveden způsob značení tepelných odporů z daného uzlu do okolí.



Obr. 4.2: Příklad výpočtu dílčích odporů.

4.1.1 Kostra stroje

Kostru stroje lze popsat jako válec viz Obr. 4.3. Konkrétní typ chlazení z povrchu válce (např. žebrování nebo vodní chlazení) není v této práci analyzován. Ve výpočtech je uvažovaná hodnota součinitele přestupu tepla z kostry do okolí.



Obr. 4.3: Kostra stroje.

K přenosu tepla z kostry stroje do okolí dochází prostřednictvím konvekce do okolní teploty $\vartheta_{\text{okolí}}$. Z tepelné sítě uvedené na Obr. 4.1 je patrné, že kostra je rozdělena na tři úseky. Výsledné odpory přenosu tepla z jednotlivých úseků kostry do okolí určíme prostřednictvím vztahů

$$R_{k,n,1} = \frac{\ln \frac{r_{k,\text{out}}}{r_{k,\text{stř}}}}{2\pi\lambda_k L_{k,1}} + \frac{1}{\alpha_{k,n} 2\pi r_{k,\text{out}} L_{k,1}}, \quad (4.1)$$

kde $R_{k,n,1}$ vyjadřuje odpor přenosu tepla z části kostry, která je situována na straně el. přívodu (levá strana) a je ohraničena koncem stroje z jedné strany a z druhé strany tvoří pomyslnou hranici začátek statorového paketu uvnitř stroje. Odpor situovaný v pomyslném středu kostry lze určit jako

$$R_{k,n,2} = \frac{\ln \frac{r_{k,\text{out}}}{r_{k,\text{stř}}}}{2\pi\lambda_k L_{Fe}} + \frac{1}{\alpha_{k,n} 2\pi r_{k,\text{out}} L_{Fe}}, \quad (4.2)$$

kde oblast, pro kterou je určen odpor $R_{k,n,2}$, je pomyslně ohraničena z obou stran konci statorového paketu. Při určování odporu ze strany hřídele (vpravo) platí vztah

$$R_{k,n,3} = \frac{\ln \frac{r_{k,\text{out}}}{r_{k,\text{stř}}}}{2\pi\lambda_k L_{k,2}} + \frac{1}{\alpha_{k,n} 2\pi r_{k,\text{out}} L_{k,2}}, \quad (4.3)$$

kde $R_{k,n,3}$ odpovídá oblasti, která je ohraničena koncem stroje z jedné strany a z druhé strany tvoří pomyslnou hranici začátek statorového paketu obdobně, jako v případě (4.1).

Následující vztahy vyjadřují tepelné odpory přenosu tepla kondukcí uvnitř kostry v radiálním a axiálním směru, kdy lze psát

$$R_{k,r,1} = \frac{\ln \frac{r_{k,stř}}{r_{js,out}}}{2\pi\lambda_k L_{k,1}}, \quad (4.4)$$

$$R_{k,r,2} = \frac{\ln \frac{r_{k,stř}}{r_{js,out}}}{2\pi\lambda_k L_{Fe}}, \quad (4.5)$$

$$R_{k,r,3} = \frac{\ln \frac{r_{k,stř}}{r_{js,out}}}{2\pi\lambda_k L_{k,2}}, \quad (4.6)$$

kde $R_{k,r,1}$, $R_{k,r,2}$ a $R_{k,r,3}$ udávají tepelné odpory kostry stroje v radiálním směru, přičemž jednotlivé odpory jsou situovány ve stejných oblastech, jako odpory přenosu tepla z kostry stroje do okolí, viz Obr. 4.3. V případě axiálního šíření tepla kostrou stroje uvažujeme vztahy

$$R_{k,a,1} = \frac{L_{k,1}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)}, \quad (4.7)$$

$$R_{k,a,2} = \frac{L_{k,1}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} + \frac{L_{Fe}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)}, \quad (4.8)$$

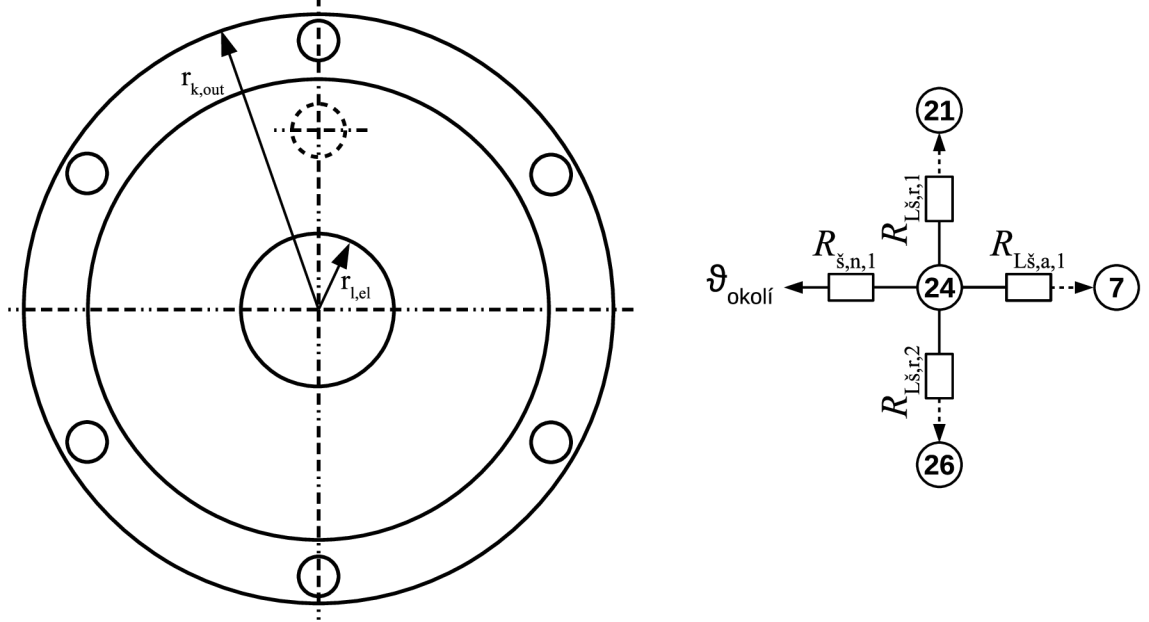
$$R_{k,a,3} = \frac{L_{k,2}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)} + \frac{L_{Fe}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)}, \quad (4.9)$$

$$R_{k,a,4} = \frac{L_{k,2}}{6\lambda_k\pi (r_{k,out}^2 - r_{js,out}^2)}. \quad (4.10)$$

Tepelné odpory $R_{k,a,1}$ a $R_{k,a,4}$ jsou situovány směrem k ložiskovým štítům. Odpory $R_{k,a,2}$ a $R_{k,a,3}$ jsou situovány směrem od ložiskových štítů do středu kostry.

4.1.2 Ložiskový štít

Štít si můžeme obecně představit jako desku kruhového průřezu, který je připevněn kolmo na osu kostry stroje prostřednictvím šroubů.



Obr. 4.4: Ložiskový štít ze strany elektrického přívodu.

Ložiskový štít ze strany elektrického přívodu lze u tohoto typu stroje nahradit kruhovou deskou, ve které je vsazené ložisko. Odpor přestupu tepla z tohoto štítu do okolí určíme prostřednictvím vztahu

$$R_{\check{s},n,1} = \frac{t_{\check{s},el}}{6\pi (r_{k,out}^2 - r_{l,el}^2)} + \frac{1}{\alpha_{\check{s},el,n}\pi (r_{k,out}^2 - r_{l,el}^2)}, \quad (4.11)$$

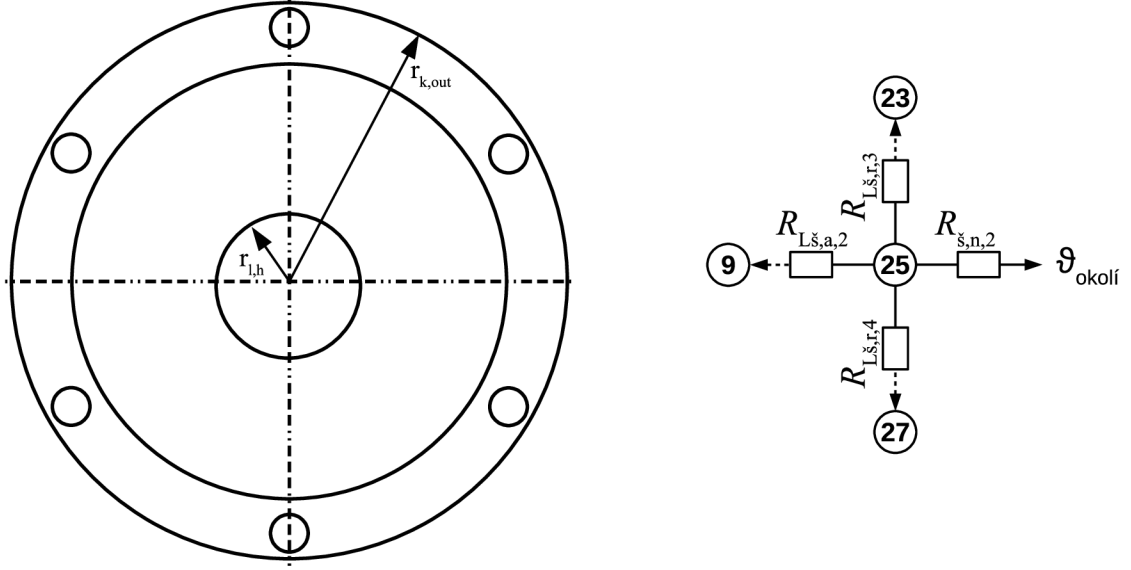
kde $R_{\check{s},n,1}$ vyjadřuje tepelný odpor přenosu tepla ze štítu na straně el. přívodu do okolí. Ostatní odpory se týkají přenosu tepla uvnitř stroje a nemají přímý vliv na odvod tepla do okolí. Tyto odpory jsou definovány jako

$$R_{L\check{s},r,1} = \frac{\ln \frac{r_{k,out}}{r_{\check{s},stř}}}{2\pi \lambda_{\check{s}} t_{\check{s},el}} + \frac{1}{\alpha_{\check{s},k}\pi (r_{k,out}^2 - r_{\check{s},stř}^2)}, \quad (4.12)$$

$$R_{L\check{s},r,2} = \frac{\ln \frac{r_{\check{s},stř}}{r_{l,el}}}{2\pi \lambda_{\check{s}} t_{\check{s},el}} + \frac{1}{\alpha_{\check{s},1} 2\pi r_{l,el} t_{l,el}}, \quad (4.13)$$

kde $R_{L\check{s},r,1}$ a $R_{L\check{s},r,2}$ vyjadřují tepelné odpory ložiskového štítu, ze strany elektrického přívodu, v radiálním směru. V případě tepelného odporu ložiskového štítu v axiálním směru $R_{L\check{s},a,1}$ uvažujeme vztah

$$R_{L\check{s},a,1} = \frac{t_{\check{s},el}}{6\lambda_{\check{s}}\pi (r_{js,out}^2 - r_{l,el}^2)}. \quad (4.14)$$



Obr. 4.5: Ložiskový štít ze strany hřídele.

Ložiskový štít ze strany hřídele lze nahradit mezikružím, kdy vnější poloměr odpovídá poloměru kostry a vnitřní poloměr je dán vnějším poloměrem použitého ložiska vsazeného do štítu. Tepelný odpor ze štítu do okolí lze definovat jako

$$R_{\dot{s},n,2} = \frac{t_{\dot{s},h}}{6\pi (r_{js,out}^2 - r_{l,h}^2)} + \frac{1}{\alpha_{\dot{s},h,n}\pi (r_{js,out}^2 - r_{l,h}^2)}, \quad (4.15)$$

kde $R_{\dot{s},n,2}$ je obdobou odporu $R_{\dot{s},n,1}$. Zbylé odpory definované v této oblasti ovlivňují přenos tepla uvnitř stroje a lze pro ně psát

$$R_{L\dot{s},r,3} = \frac{\ln \frac{r_{k,štř}}{r_{s,štř}}}{2\pi\lambda_{\dot{s}}t_{\dot{s},h}} + \frac{1}{\alpha_{\dot{s},n}\pi (r_{k,out}^2 - r_{s,štř}^2)}, \quad (4.16)$$

$$R_{L\dot{s},r,4} = \frac{\ln \frac{r_{s,štř}}{r_{l,h}}}{2\pi\lambda_{\dot{s}}t_{\dot{s},h}} + \frac{1}{\alpha_{\dot{s},1}2\pi r_{l,h}t_{l,h}}, \quad (4.17)$$

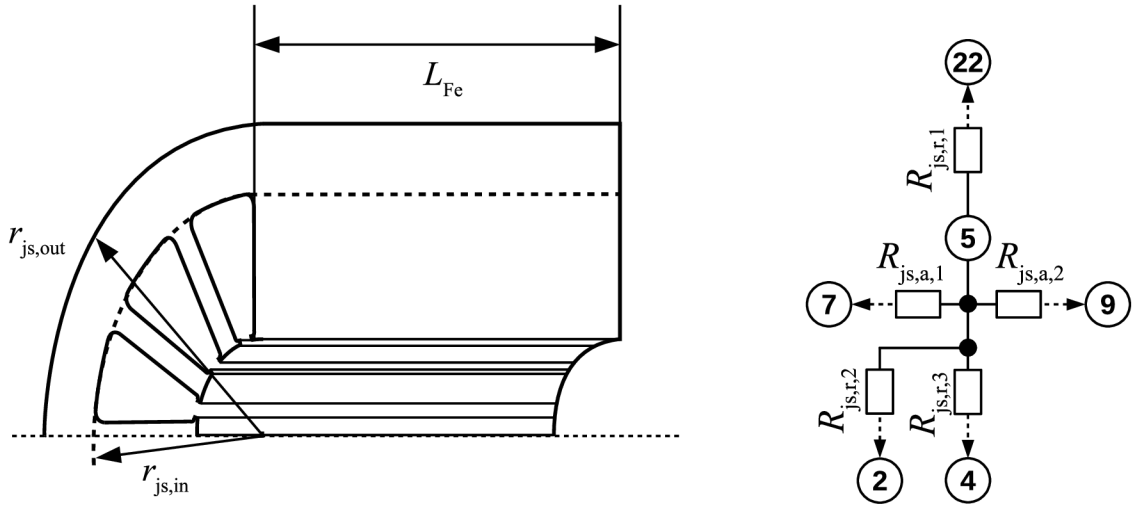
kde $R_{L\dot{s},r,3}$ a $R_{L\dot{s},r,4}$ jsou obdobou tepelných odporů $R_{L\dot{s},r,1}$ a $R_{L\dot{s},r,2}$, tato symetrie platí i v případě tepelného odporu $R_{L\dot{s},a,1}$.

$$R_{L\dot{s},a,2} = \frac{t_{\dot{s},h}}{6\lambda_{\dot{s}}\pi (r_{js,out}^2 - r_{l,h}^2)}. \quad (4.18)$$

4.1.3 Jho statoru

Jho statoru lze nahradit válcovým mezikružím složeným z plechů, na kterých je nanesena tenká izolační vrstva. Rozdělením statoru na jednotlivé plechy a přidáním izolační vrstvy vznikne statorový paket s nehomogenními tepelnými vlastnostmi. To znamená, že tepelná vodivost statoru v radiálním směru je mnohem lepší,

než v axiálním. V axiálním směru je tepelná vodivost ovlivněna typem použité izolace a pro praktický výpočet uvažujeme ekvivalentní tepelnou vodivost zohledňující vlastnosti plechu i izolace.



Obr. 4.6: Jho statoru.

Tepelné odpory statorového jha v radiálním směru lze určit prostřednictvím vztahů

$$R_{js,r,1} = \frac{\ln \frac{r_{js,out}}{r_{js,stř}}}{2\pi\lambda_{sp}L_{Fe}k_{Fe}} + \frac{1}{\alpha_{Fe}2\pi r_{js,out}L_{Fe}}, \quad (4.19)$$

$$R_{js,r,2} = \frac{\ln \left(\frac{r_{js,stř}}{r_{js,in}} \right)}{2\pi\lambda_{sp}L_{Fe}k_{Fe}} \cdot \frac{b_{2s} + b_{zs}}{b_{2s}}, \quad (4.20)$$

$$R_{js,r,3} = \frac{\ln \left(\frac{r_{js,stř}}{r_{js,in}} \right)}{2\pi\lambda_{sp}L_{Fe}k_{Fe}} \cdot \frac{b_{2s} + b_{zs}}{b_{zs}}, \quad (4.21)$$

kde rozměry b_{2s} a b_{zs} jsou naznačeny na Obr. 4.8 a $R_{js,r,1}$, $R_{js,r,2}$ a $R_{js,r,3}$ definují tepelné radiální odpory jha statoru. Tepelné odpor v axiálním směru lze určit jako

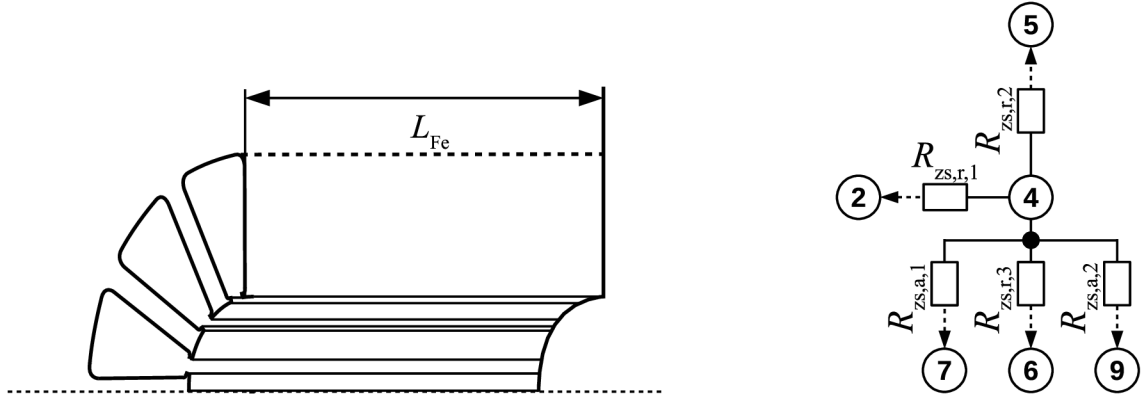
$$R_{js,a,1} = \frac{L_{Fe}}{6\lambda_{s,ekv,a}\pi \left(r_{js,out}^2 - r_{js,in}^2 \right)}, \quad (4.22)$$

$$R_{js,a,2} = R_{js,a,1}, \quad (4.23)$$

kde $R_{js,a,1}$ a $R_{js,a,2}$ vyjadřují axiální odpory přenosu tepla ze jha statoru na jeho povrch

4.1.4 Zub statoru

Statorové zuby jsou modelovány jako tyče, ze kterých se šíří teplo do jha, vzduchové mezery a drážek statoru. Ve skutečnosti je každý statorový zub tvořen stejnými plechy jako jho statoru a proto mají zuby obdobné vlastnosti, které jsou popsány v kapitole 4.1.3.



Obr. 4.7: Zub statoru.

Jednotlivé odpory uvedeného schématu v obr 4.7 lze vypočítat pomocí následujících vztahů.

$$R_{zs,r,1} = \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{b_{zs}}{6\lambda_{sp}h_{ds}L_{Fe}k_{Fe}}, \quad (4.24)$$

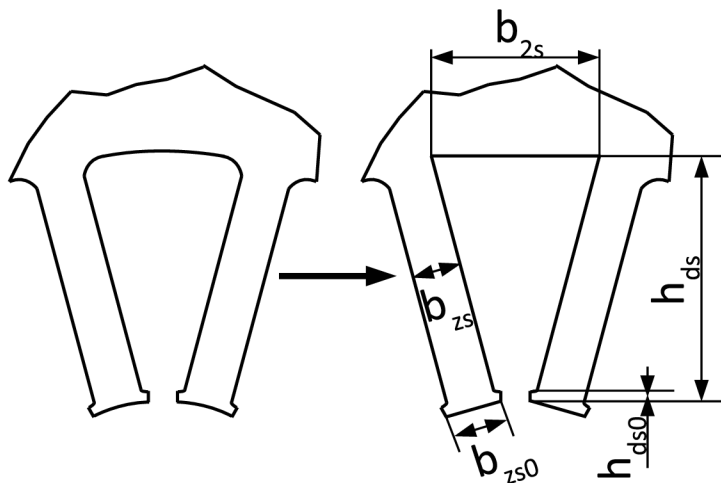
$$R_{zs,r,2} = \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{h_{ds}}{6\lambda_{sp}b_{zs}L_{Fe}k_{Fe}}, \quad (4.25)$$

$$R_{zs,r,3} = R_{zs,r,1}, \quad (4.26)$$

kde rozměr h_{ds} je uveden v Obr. 4.8, ve kterém je v rámci snížení náročnosti výpočtů zavedeno zjednodušení geometrie statorové drážky. Odpory $R_{zs,r,1}$, $R_{zs,r,2}$ a $R_{zs,r,3}$ jsou odpory zubu statoru v radiálním směru. Odpory zubu statoru v axiálním směru jsou popsány dalšími dvěma rovnicemi

$$R_{zs,a,1} = \frac{L_{Fe}}{6\lambda_{s,ekv,a}h_{ds0}b_{zs}}, \quad (4.27)$$

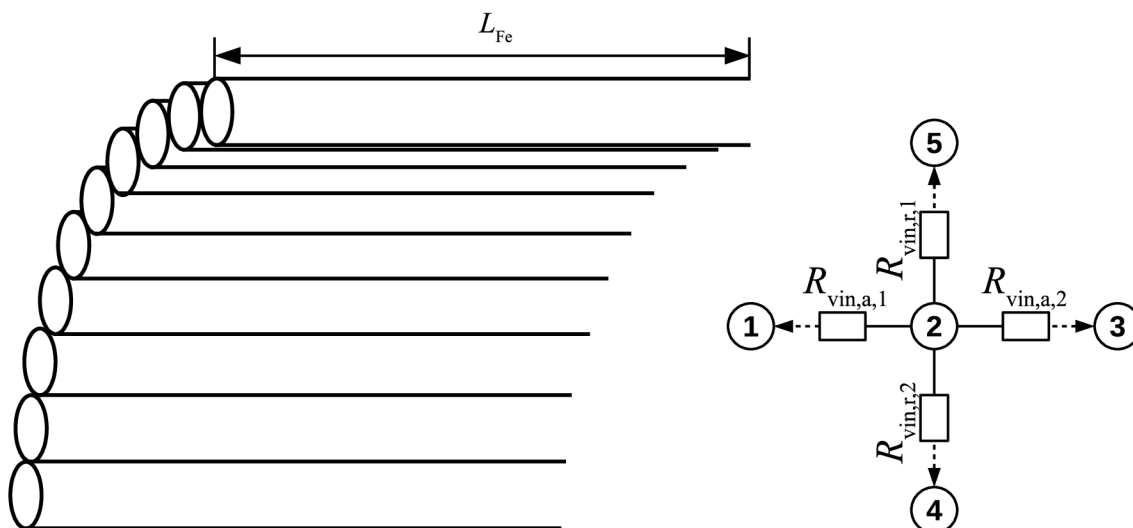
$$R_{zs,a,2} = R_{zs,a,1}. \quad (4.28)$$



Obr. 4.8: Drážka statoru.

4.1.5 Vinutí statoru

V axiálním směru uvažujeme velice dobrou tepelnou vodivost, naopak v radiálním směru je tepelná vodivost závislá na použité izolaci. Stejně, jako v kapitole 4.1.3, uvažujeme ekvivalentní tepelnou vodivost, tentokrát ale v radiálním směru.



Obr. 4.9: Vinutí statoru.

V případě statorového vinutí jsou tepelné odpory $R_{vin,r,1}$ a $R_{vin,r,2}$ v radiálním směru velké, ale v důsledku velkých ztrát v této oblasti hrají významnou roli v mož-

nosti odvodu tepla ze statorového vinutí. Lze je určit jako

$$R_{\text{vin},r,1} = \frac{1}{Q_s} \left(\frac{h_{\text{Cu}}}{3\lambda_{\text{Cu,ekv},r}L_{\text{Fe}}b_{\text{Cu,stř}}} + \frac{t_i}{\lambda_i b_{2s}L_{\text{Fe}}} \right), \quad (4.29)$$

$$R_{\text{vin},r,2} = \frac{1}{2Q_s} \cdot \left(\frac{b_{\text{Cu,stř}}}{6\lambda_{\text{Cu,ekv},r}L_{\text{Fe}}h_{\text{Cu}}} + \frac{t_i}{\lambda_i h_{2s}L_{\text{Fe}}} \right). \quad (4.30)$$

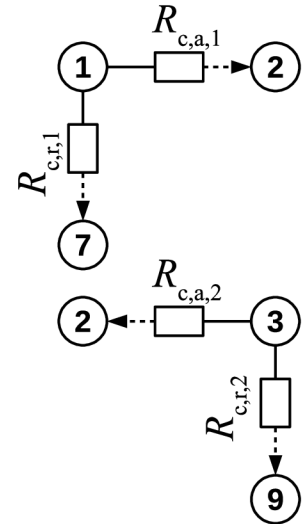
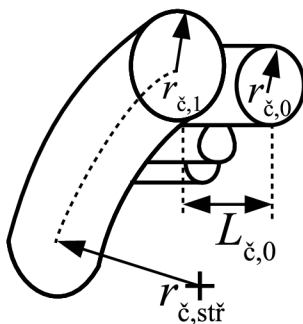
Axiální odpory vinutí $R_{\text{vin},a,1}$ a $R_{\text{vin},a,2}$ jsou oproti radiálním velice malé z toho důvodu, že na vedení tepla se majoritně podílí materiál vinutí a nikoliv izolace. Jako materiály vinutí jsou vždy používány výhradně materiály s dobrou elektrickou i tepelnou vodivostí jako například měď nebo hliník. Axiální odpory jsou definovány prostřednictvím vztahů

$$R_{\text{vin},a,1} = \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{L_{\text{Fe}}}{3\lambda_{\text{Cu}} \frac{\pi d_{\text{vs}}^2}{4} N_{\text{vs}}}, \quad (4.31)$$

$$R_{\text{vin},a,2} = R_{\text{vin},a,1}. \quad (4.32)$$

4.1.6 Čelo vinutí statoru

Čelo statorového vinutí můžeme nahradit toroidem složeným z jednotlivých vodičů tohoto vinutí. Do zmíněného toroidu postupně vstupuje a vystupuje vinutí z každé statorové drážky. Proto se jedná o poměrně komplexní problém, ve kterém se přistupuje k mnohým zjednodušením. V oblasti čela vinutí statoru dochází k jednomu z největších oteplení stroje.



Obr. 4.10: Čelo vinutí statoru.

Radiální odpory přenosu tepla $R_{c,r,1}$ a $R_{c,r,2}$ jsou dány paralelní kombinací odporu přestupu tepla ze střední teploty čela vinutí na jeho povrch v oblasti toroidu a odporu

v oblasti vodičů vystupujících z drážek, proto je pro přehlednost zavedeno následující značení těchto odporů. Odpor toroidu R_{tor} a odpor vinutí R_{vin} , kterým je myšlen odpor ze středu vinutí na jeho povrch. Tepelné odpory jsou dány vztahy

$$R_{\text{tor}} = \frac{1}{16\pi^2 \lambda_{\text{Cu},\check{c},\text{ekv},r} r_{\check{c},\text{stř}}}, \quad (4.33)$$

$$R_{\text{vin}} = \frac{1}{8\pi \lambda_{\text{Cu},\check{c},\text{ekv},r} L_{\check{c},0} Q_s}. \quad (4.34)$$

Díky zavedenému zjednodušení lze výsledný vztah psát ve tvaru

$$R_{\text{c},r,1} = \frac{R_{\text{tor}} \cdot R_{\text{vin}}}{R_{\text{tor}} + R_{\text{vin}}}. \quad (4.35)$$

Z principu symetrie stroje plyne

$$R_{\text{c},r,2} = R_{\text{c},r,1}. \quad (4.36)$$

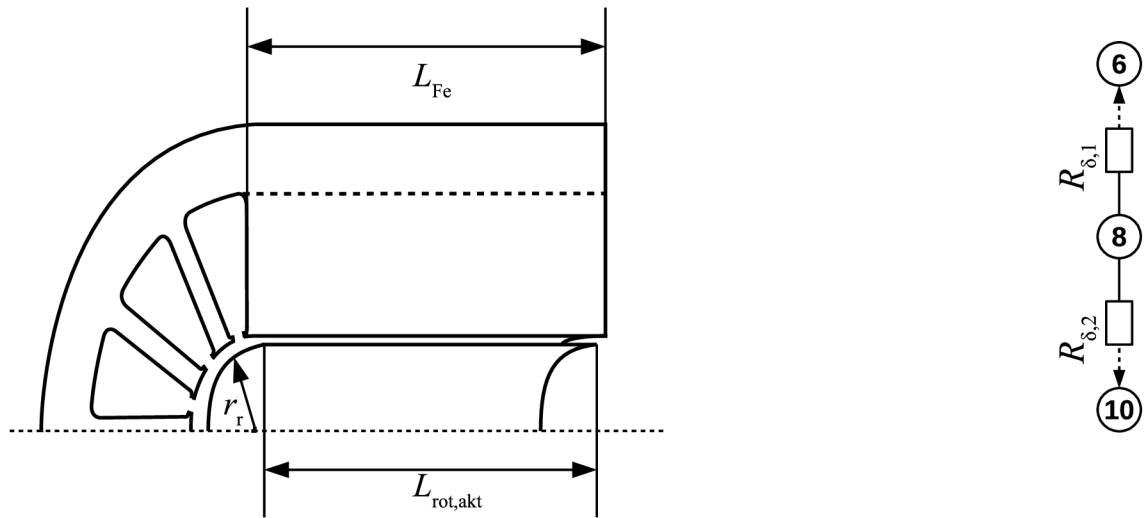
Tepelné odpory čela vinutí statoru v axiálním směru je možné definovat jako

$$R_{\text{c},a,1} = \frac{1}{Q_s} \cdot \frac{L_{\check{c}}}{3\lambda_{\text{Cu}} \pi r_{\check{c},0} N_{\text{vs}}}, \quad (4.37)$$

$$R_{\text{c},a,2} = R_{\text{c},a,1}. \quad (4.38)$$

4.1.7 Vzduchová mezera

Vzduchová mezera představuje mezikruží, které je z vnější strany definováno statorovými a z vnitřní strany rotorovými zuby. U vysokootáčkových strojů se ve vzduchové mezeře projevují třecí ztráty mnohem více, než u pomaluběžných. To má za následek zvyšování povrchové teploty rotoru. Přebytečné teplo je poté částečně odváděno přes vzduchovou mezera do statoru a částečně přes rotor do hřídele. Pro možnost správného výpočtu tepelného odporu je klíčové určit součinitel přestupu ve vzduchové mezeře, jehož výpočet je uveden v kapitole 2.2.1



Obr. 4.11: Vzduchová mezera.

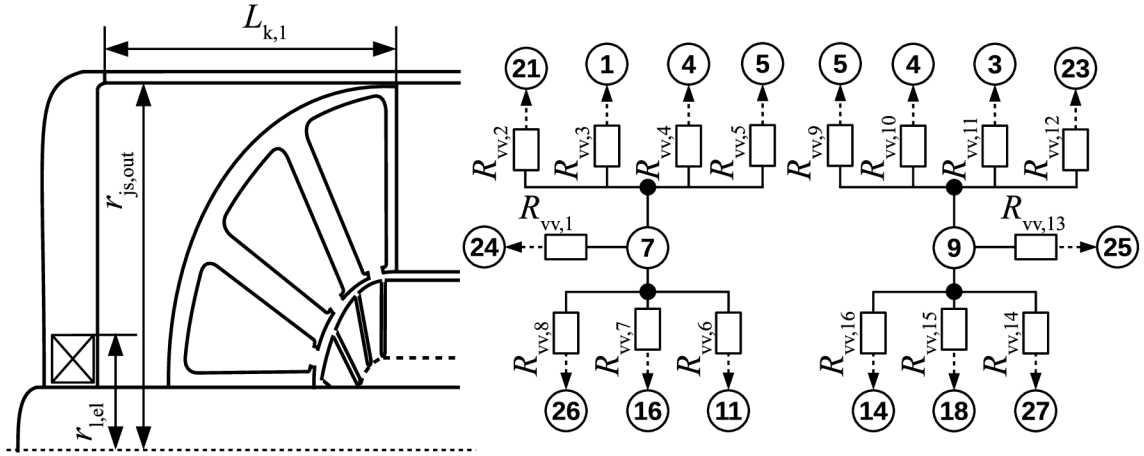
Ve vzduchové mezeře uvažujeme pouze radiální přenos tepla mezi rotorem a státorem. Axiální proudění v mezeře zanedbáváme hlavně z toho důvodu, že motor není axiálně profukován. Tepelné odpory $R_{\delta,1}$ a $R_{\delta,2}$ jsou určeny vztahy

$$R_{\delta,1} = \frac{1}{\alpha_{s,\delta} Q_s b_{zs0} L_{Fe} k_{Fe}}, \quad (4.39)$$

$$R_{\delta,2} = \frac{1}{\alpha_{r,\delta} [(2\pi r_r - Q_r b_{d,r}) L_{rot,akt}]}. \quad (4.40)$$

4.1.8 Vnitřní vzduch

Oblast vnitřního vzduchu je z jedné strany ohraničena kostrou stroje a z druhé strany tvoří pomyslnou hranici čela vinutí statoru, statorový paket, vzduchová mezera a kruhy rotoru. Tato oblast je v kontaktu s největším množstvím ploch uvnitř stroje. Teplo z těchto ploch je právě přenášeno z/do oblasti vnitřního vzduchu. Množství přivedeného, případně odvedeného tepla z oblasti závisí na součiniteli přestupu tepla. Tento součinitel se odvíjí od mnoha faktorů jako například typ proudění vzduchu, povrchová úprava, styková plocha atd..



Obr. 4.12: Vnitřní vzduch.

Tepelné odpory pro přenos tepla do vnitřního vzduchu jsou ze samotné podstaty jejich vzniku uvažovány jako konvekční. V této oblasti se dále využívají symetrie stroje. Využití těchto symetrií je vždy popsáno u konkrétního příkladu. Jednotlivé odpory jsme poté schopni určit vztahy

$$R_{vv,1} = \frac{1}{\alpha_{s,vv} \pi (r_{js,out}^2 - r_{l,el}^2)}, \quad (4.41)$$

$$R_{vv,2} = \frac{1}{\alpha_{r,vv} 2\pi r_{js,out} L_{k,1}}, \quad (4.42)$$

$$R_{vv,3} = \frac{1}{\alpha_{\check{c}v,vv} (4\pi^2 r_{\check{c},1} r_{\check{c},ekv} + 2\pi r_{\check{c},o} L_{\check{c},o} Q_s)}, \quad (4.43)$$

$$R_{vv,4} = \frac{1}{\alpha_{js,vv} h_{ds} b_{ds} Q_s}, \quad (4.44)$$

$$R_{5,vv} = \frac{1}{\alpha_{js,vv} \pi (r_{js,out}^2 - r_{js,in}^2)}, \quad (4.45)$$

Pro odpor $R_{vv,6}$ uvažujeme obdobně, jako pro odpor $R_{c,r,1}$ paralelní kombinaci odporů. Proto opět zavedeme zjednodušení, kdy jednu větev této kombinace označíme

jako $R_{vv,a,6}$ a druhou větev jako $R_{vv,r,6}$. Odpor $R_{vv,a,6}$ tak lze vypočítat jako

$$R_{vv,a,6} = \frac{L_{kruh}}{6\lambda_h\pi(r_r^2 - r_{h,2}^2)} + \frac{1}{\alpha_{k,vv,a}\pi(r_r^2 - r_{h,2}^2)}, \quad (4.46)$$

Tepelný odpor $R_{vv,r,6}$ lze definovat vztahem

$$R_{vv,r,6} = \frac{\ln \frac{r_r}{r_{h,2}}}{2\pi L_{kruh}} + \frac{1}{\alpha_{k,vv,r}2\pi r_r L_{kruh}}, \quad (4.47)$$

Výsledný vztah poté uvažujeme ve tvaru

$$R_{vv,6} = \frac{R_{vv,a,6} \cdot R_{vv,r,6}}{R_{vv,a,6} + R_{vv,r,6}}, \quad (4.48)$$

$$R_{vv,7} = \frac{1}{\alpha_{h,vv}2\pi r_{h,2}L_{h,2}}, \quad (4.49)$$

$$R_{vv,8} = \frac{1}{\alpha_{1,vv}\pi(r_{1,el}^2 - r_{h,1}^2)}. \quad (4.50)$$

$$R_{vv,9} = R_{5,vv}. \quad (4.51)$$

Nyní můžeme s výhodou využít symetrii statorového paketu a uvažovat vztah

$$R_{vv,10} = R_{vv,4}. \quad (4.52)$$

Z principu navíjení statorových vinutí je možné tyto čela považovat za symetrické a proto zde úspěšně využijeme vztah

$$R_{vv,11} = R_{vv,3}. \quad (4.53)$$

Další tepelné odpory definujeme jako

$$R_{vv,12} = \frac{1}{\alpha_{r,vv}2\pi r_{js,out}L_{k,2}}, \quad (4.54)$$

$$R_{vv,13} = \frac{1}{\alpha_{s,vv}\pi(r_{js,out}^2 - r_{l,h}^2)}, \quad (4.55)$$

$$R_{vv,14} = \frac{1}{\alpha_{h,vv}2\pi(r_r^2 - r_{h,5}^2)}, \quad (4.56)$$

$$R_{vv,15} = \frac{1}{\alpha_{h,vv}2\pi r_{h,4}L_{h,4}}. \quad (4.57)$$

V případě odporu $R_{vv,16}$ využijeme toho, že nejen stator, ale i rotor je osově symetrický a zavedeme obdobný předpoklad a následné zjednodušení jako u odporu $R_{vv,6}$, kdy jednu větev označíme jako $R_{vv,a,16}$ a druhou jako $R_{vv,r,16}$

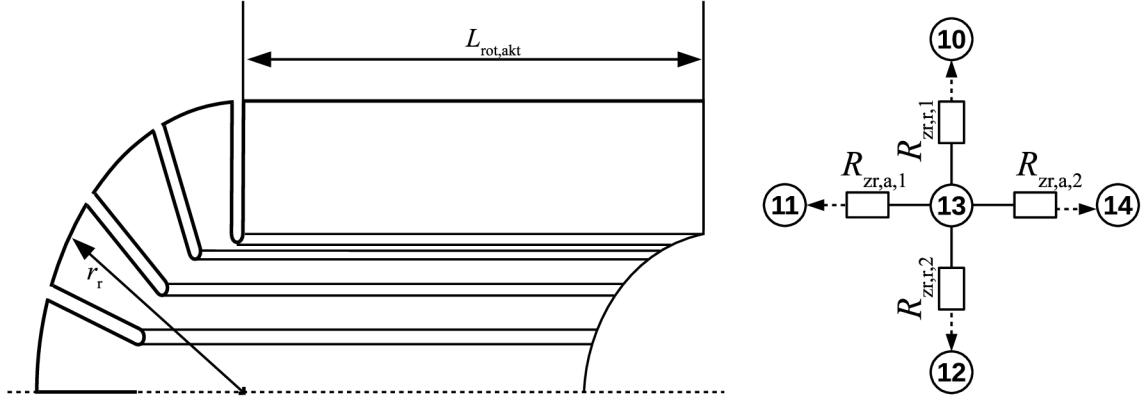
$$R_{vv,a,16} = \frac{L_{kruh}}{6\lambda_h\pi(r_r^2 - r_{h,4}^2)} + \frac{1}{\alpha_{k,vv,a}\pi(r_r^2 - r_{h,4}^2)}, \quad (4.58)$$

$$R_{vv,r,16} = \frac{\ln \frac{r_r}{r_{h,4}}}{2\pi L_{kruh}} + \frac{1}{\alpha_{r,vv,r}2\pi r_r L_{kruh}}, \quad (4.59)$$

$$R_{vv,16} = \frac{R_{vv,a,16} \cdot R_{vv,r,16}}{R_{vv,a,16} + R_{vv,r,16}}. \quad (4.60)$$

4.1.9 Zub rotoru

Zuby rotoru je možné aproximovat válcem, do jehož stěny jsou kolmo na osu vyříznuty drážky. Vzhledem k atypické konstrukci stroje, kdy celý rotor je vytvářen z jednoho kusu kovu, považujeme rotor z hlediska přenosu tepla za homogenní. To znamená, že tepelná vodivost v axiálním i radiálním směru je totožná.



Obr. 4.13: Zub rotoru.

V případě radiálních odporů přenosu tepla $R_{zr,r,1}$ a $R_{zr,r,2}$ uvažujeme vztahy pro jejich výpočet ve tvaru

$$R_{zr,r,1} = \frac{\ln \frac{r_{r,red}}{r_{jr,red}}}{2\pi\lambda_h (2L_{kruh} + L_{rot,akt})}, \quad (4.61)$$

$$R_{zr,r,2} = \frac{\ln \frac{r_{r,stf,red}}{r_{jr,red}}}{2\pi\lambda_h L_{rot,akt}}. \quad (4.62)$$

Pro odpory v axiálním směru $R_{zr,a,1}$ a $R_{zr,a,2}$ je možné využít vztahy

$$R_{zr,a,1} = \frac{L_{rot,akt}}{6\lambda_h\pi (r_r^2 - r_{jr}^2)} + \frac{L_{kruh}}{6\lambda_h\pi (r_r^2 - r_{jr}^2)}, \quad (4.63)$$

kdy díky osové symetrii rotoru lze zavést

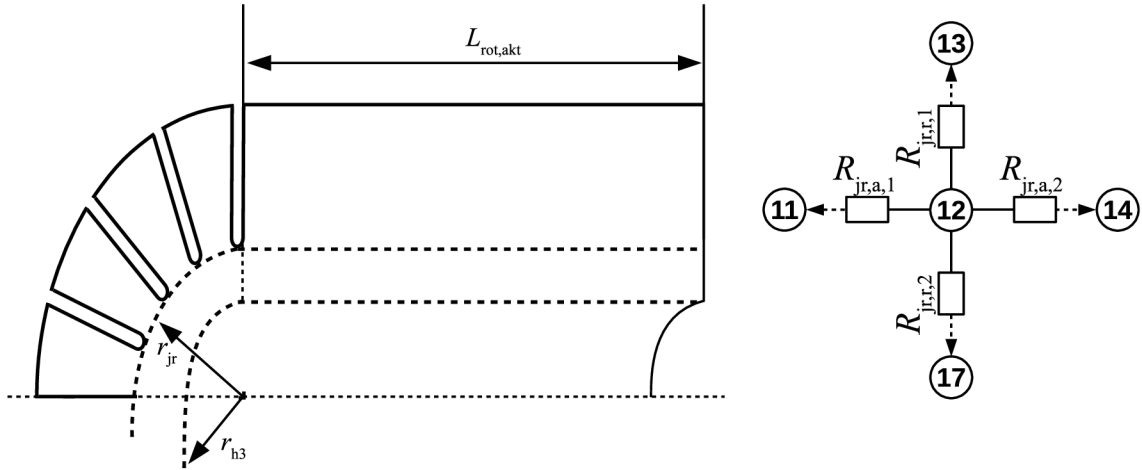
$$R_{zr,a,2} = R_{zr,a,1}. \quad (4.64)$$

Redukovaný poloměr, který je využíván v jednotlivých rovnicích pro výpočet odporu v radiálním směru je definován jako

$$r_{r,red} = r_r \frac{(1 - Q_r)}{\pi \arcsin \left(\frac{b_{d,r}}{2r_{rot}} \right)}. \quad (4.65)$$

4.1.10 Jho rotoru

Jho rotoru představuje, obdobně jako jho statoru, válcové mezikruží. Tepelné vlastnosti jha jsou obdobné jako v kapitole 4.1.9.



Obr. 4.14: Jho rotoru.

V oblasti jha rotoru uvažujeme, díky homogenitě materiálu, jak radiální tak axiální tepelný odpor. Radiální tepelné odpory $R_{jr,r,1}$ a $R_{jr,r,2}$ jsou definovány jako

$$R_{jr,r,1} = \frac{\ln \frac{r_{jr}}{r_{jr,stř}}}{2\pi\lambda_h L_{rot,akt}}, \quad (4.66)$$

$$R_{jr,r,2} = \frac{\ln \frac{r_{jr,stř}}{r_{h,3}}}{2\pi\lambda_h L_{rot,akt}}. \quad (4.67)$$

V případě axiálního šíření tepla uvažujeme odpory $R_{jr,a,1}$ a $R_{jr,a,2}$

$$R_{jr,a,1} = \frac{L_{rot,akt}}{6\lambda_h\pi (r_{jr}^2 - r_{h,3}^2)} + \frac{L_{kruh}}{6\lambda_h\pi (r_{jr}^2 - r_{h,3}^2)}, \quad (4.68)$$

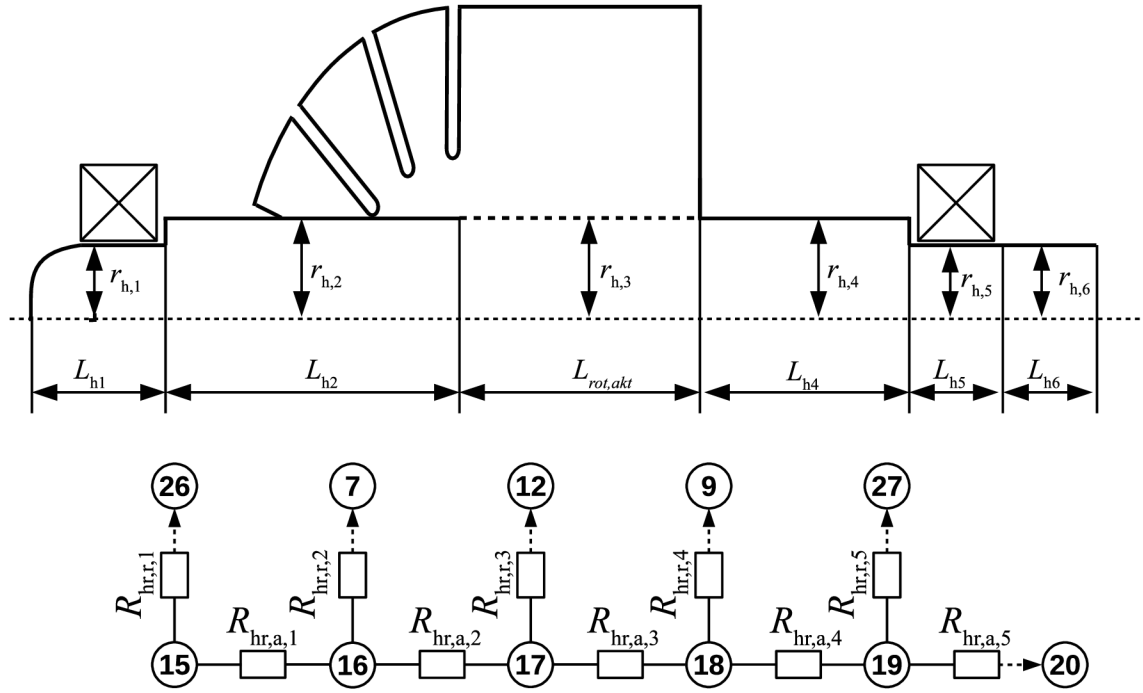
$$R_{jr,a,2} = R_{jr,a,1}. \quad (4.69)$$

4.1.11 Hřídel

Hřídel si můžeme představit jako tyč kruhového průřezu se stejnými tepelnými vlastnostmi, které jsou popsány v kapitole 4.1.9. Jelikož je předpokládán velký odvod tepla z rotoru prostřednictvím hřídele, je pro přesný výpočet teploty tato hřídel rozdělena do několika částí:

- část pod ložisky
- část rotující ve vnitřním vzduchu
- část „uvnitř“ jha rotoru

Tyto části jsou znázorněny v tepelné síti.



Obr. 4.15: Hřídel.

Tepelné odpory v radiálním směru jsou téměř totožné pro všechny části hřídelle a liší se vždy pouze délkou dané části, pro kterou je tento odpor určen. Jednotlivé odpory jsou tak definovány vztahy

$$R_{hr,r,1} = \frac{1}{8\pi\lambda_h t_{l,el}} + \frac{1}{\alpha_{h,1} 2\pi r_{h,1} L_{h,1}}, \quad (4.70)$$

$$R_{hr,r,2} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h,2}}, \quad (4.71)$$

$$R_{hr,r,3} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{rot,akt}}, \quad (4.72)$$

$$R_{hr,r,4} = \frac{1}{8\pi\lambda_h L_{h,4}}, \quad (4.73)$$

$$R_{hr,r,5} = \frac{1}{8\pi\lambda_h t_{1,h}} + \frac{1}{\alpha_{h,1} 2\pi r_{h,5} L_{h,5}}. \quad (4.74)$$

Pro tepelné odpory v axiálním směru opět uvažujeme téměř stejné vztahy, které se v tomto případě liší délkou a poloměrem konkrétní části hřídelle.

$$R_{hr,a,1} = \frac{L_{h,1}}{3\lambda_h \pi r_{h,1}^2} + \frac{L_{h,2}}{6\lambda_h \pi r_{h,2}^2}, \quad (4.75)$$

$$R_{hr,a,2} = \frac{L_{h,2}}{6\lambda_h \pi r_{h,2}^2} + \frac{L_{rot,akt}}{6\lambda_h \pi r_{h,3}^2}, \quad (4.76)$$

$$R_{\text{hr},a,3} = \frac{L_{\text{rot,akt}}}{6\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},3}^2} + \frac{L_{\text{h},4}}{6\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},4}^2}, \quad (4.77)$$

$$R_{\text{hr},a,4} = \frac{L_{\text{h},4}}{6\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},4}^2} + \frac{L_{\text{h},5}}{6\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},5}^2}, \quad (4.78)$$

$$R_{\text{hr},a,5} = \frac{L_{\text{h},5}}{6\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},5}^2} + \frac{L_{\text{h},6}}{3\lambda_{\text{h}}\pi r_{\text{h},6}^2}. \quad (4.79)$$

Na základě odporů uvedených v kapitolách 4.1.1 až 4.1.11 byla sestavena výsledná tepelná matice podle principů, které jsou uvedeny v kapitole 3.1.

5 Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje

Tato kapitola obsahuje výsledné vypočtené střední teploty v jednotlivých uzlech tepelné sítě zobrazené na Obr. 4.1. Výpočty byly provedené pro vysokootáčkový stroj se jmenovitými otáčkami 180 000 ot/min a výkonem 3 kW. Další základní parametry jsou uvedeny níže. Dále jsou zde uvedeny tepelné toky mezi vybranými uzly sítě.

5.1 Vstupní parametry

Mezi vstupní parametry nutné pro výpočet patří geometrické rozměry, vlastnosti použitých materiálů (především tepelná vodivost), součinitel přestupu tepla, ztráty generované v různých částech stroje a také jmenovité otáčky.

5.1.1 Geometrické rozměry

Základní geometrické rozměry, které jsou použity při výpočtu tepelných odporů, prostřednictvím kterých byly určeny výsledné teploty, jsou uvedeny v tabulce 5.1 Zbylé značení rozměrů nutných pro výpočet je uvedeno v přílohách v tabulce A.1. Z důvodu ochrany konstrukčních parametrů stroje však nejsou uvedeny přesné rozměry.

5.1.2 Materiálové vlastnosti

V této kapitole jsou uvedeny hodnoty tepelných, případně ekvivalentních tepelných vodivostí materiálů použitých při konstrukci stroje. Hodnoty a značení těchto tepelných vodivostí jsou uvedeny v tabulce 5.2.

Tab. 5.1: Tabulka geometrických rozměrů

Název	Označení	Rozměr [mm]
Stator		
Počet zubů statoru	Q_s	12 [-]
Počet vodičů vinutí v jedné drážce statoru	$N_{v,s}$	20 [-]
Délka statorového paketu	L_{Fe}	40
Vnější poloměr jha statoru	$r_{js,out}$	26
Vnitřní poloměr jha statoru	$r_{js,in}$	24,4
Vnitřní poloměr statoru	$r_{s,in}$	18
Vnější poloměr kostry	r_k	41
Výška drážky statoru	h_{ds}	6,4
Rotor		
Počet zubů rotoru	Q_r	16 [-]
Vnější poloměr rotoru	r_r	15
Vnější poloměr jha	r_{jr}	10
Aktivní délka rotoru	$L_{rot,akt}$	30
Šířka drážky rotoru	$b_{d,r}$	1
Hřídel		
Vnější poloměr hřídele po celé délce	r_h	5

Tab. 5.2: Tabulka použitých materiálů

Materiál	Označení	Velikost [$W/m K$]
Stator		
Vinutí	λ_{Cu}	394
Drážková izolace	λ_i	0.15
Plech	λ_{sp}	54
Lak plechu	$\lambda_{lak,sp}$	1
Kostra	λ_k	209
Štít	$\lambda_{\check{s}}$	209
Vinutí + lak	$\lambda_{Cu,ekv,r}$	5
Vinutí + lak čela	$\lambda_{Cu,\check{c},ekv,r}$	5
Lak+plech axiálně	$\lambda_{s,ekv,a}$	2
Rotor		
Rotor	λ_h	42

5.1.3 Generované ztráty

Základní rozdělení ztrát, které lze v tomto vysokootáčkovém stroji uvažovat, je rozdělení na ztráty mechanické a ztráty elektromagnetické. Součástí této práce je výpočet mechanických ztrát, které jsou uvedeny v tabulce 5.6. Tato tabulka obsahuje i elektromagnetické ztráty, jejichž hodnota byla stanovena na základě elektromagnetických výpočtů, kterými se tato práce nezabývá.

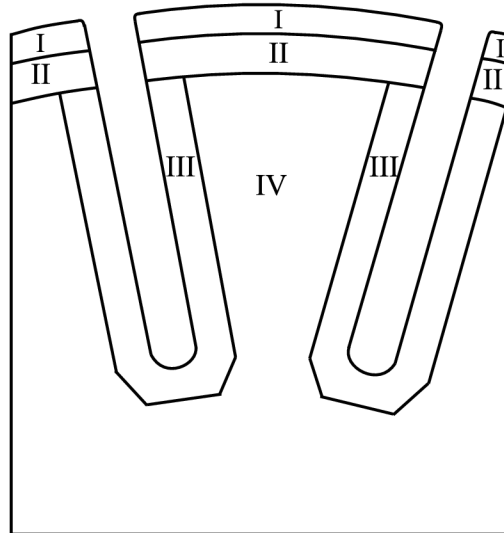
Tab. 5.3: Ztráty generované ve stroji

Část stroje	Oblast	Typ ztrát	Velikost [W]
Stator	Plechý	Celkové	76,8
	Drážka	Ztráty v mědi	14
	Čela		74,3
Rotor	I	Hysterezní	41,6
		Výřivé proudy	65,5
	II	Hysterezní	10,1
		Výřivé proudy	24,1
	III	Hysterezní	16,3
		Výřivé proudy	40,7
	IV	Hysterezní	14
		Výřivé proudy	69,7
	Vzduchová mezera	Mechanické ztráty	228,5
	Kruhy rotoru ze strany		22,2

Oblasti I až IV uvedené v Tabulce 5.6 jsou naznačeny na Obr. 5.1. Jedná se o řez rotorem stroje a naznačeným rozložením ztrát.

5.1.4 Součinitelé přestupu tepla

Určením součinitelů přestupů tepla se zabývá kapitola 2.2. Správné určení těchto součinitelů je klíčové pro možnost provedení relevantního tepelného výpočtu. Jednotlivé součinitele jsou uvedeny v tabulce 5.4.



Obr. 5.1: Rozložení ztrát v rotoru stroje

Tab. 5.4: Tabulka použitých součinitelů přestupů tepla a stykových koeficientů

Název	Označení	Velikost [W/m ² K]
Styk mezi štítem a kostrou stroje	$\alpha_{\text{š,k}}$	5200
Styk mezi štítem a ložiskem stroje	$\alpha_{\text{š,l}}$	5200
Styk mezi statorovým paketem a kostrou stroje	α_{Fe}	866
Styk mezi hřídelí a ložiskem stroje	$\alpha_{\text{h,l}}$	5200
Z kostry stroje do okolí	$\alpha_{\text{k,n}}$	1000
Ze štítu ze strany el. přívodu do okolí	$\alpha_{\text{š,el,n}}$	20
Ze štítu ze strany hřídele do okolí	$\alpha_{\text{š,h,n}}$	20
Ze statoru do vzduchové mezery	$\alpha_{\text{s},\delta}$	561
Ze jha statoru do vnitřního vzduchu	$\alpha_{\text{js,vv}}$	150,6
Z rotoru do vzduchové mezery	$\alpha_{\text{r},\delta}$	561
Z kostry do vnitřního vzduchu	$\alpha_{\text{r,vv}}$	150,6
Z čela vinutí do vnitřního vzduchu	$\alpha_{\text{čv,vv}}$	86,47
Z kruhů rotoru do vnitřního vzduchu (axiálně)	$\alpha_{\text{k,vv,a}}$	242,53
Z kruhů rotoru do vnitřního vzduchu (radiálně)	$\alpha_{\text{k,vv,r}}$	242,53
Z hřídele do vnitřního vzduchu	$\alpha_{\text{h,vv}}$	150,6
Ze štítu vnitřního vzduchu	$\alpha_{\text{š,vv}}$	150,6

5.2 Výsledné střední teploty

Výsledné střední teploty, které jsou uvedené v tabulce 5.5 byly vypočteny prostřednictvím programu vytvořeném v softwaru Matlab.

Tab. 5.5: Tabulka vypočtených teplot

Číslo uzlu	Název uzlu	Teplota [°C]
1	Čelo vinutí statoru	143,53
2	Vinutí v drážkách statoru	143,53
3	Čelo vinutí statoru	143,53
4	Zuby statoru	151,74
5	Jho statoru	119,72
6	Vnitřní vzduch (S- δ)	168,47
7	Vnitřní vzduch	138,65
8	Vnitřní vzduch	178,21
9	Vnitřní vzduch	138,65
10	Vnitřní vzduch (R- δ)	377,48
11	Kruh rotoru	374,92
12	Jho rotoru	377,48
13	Zuby rotoru	380,37
14	Kruh rotoru	374,91
15	Hřídel (pod lož.)	233,6
16	Hřídel (do vn. vzduchu)	268,86
17	Hřídel (střed)	372,5
18	Hřídel (do vn. vzduchu)	268,86
19	Hřídel (pod lož.)	233,6
20	Hřídel (okolí)	233,6
21	Kostra	70,56
22	Kostra	71,16
23	Kostra	70,56
24	Ložiskový štít	87,95
25	Ložiskový štít	87,95
26	Ložisko	171,79
27	Ložisko	171,79

Výsledné teploty značí, že se stroj bude přehřívat zejména v rotoru. Jedním z možných způsobů snížení teploty stroje je snížení generovaných ztrát. V případě mechanických ztrát by bylo možné potáhnout rotor např. kevlarem, čímž by se od-

stranily nerovnosti rotoru a zároveň by došlo k překrytí axiálního drážkování rotoru. Tento postup by sice rapidně snížil generované mechanické ztráty, na druhou stranu by došlo ke zhoršení přenosu tepla z rotoru do vzduchové mezery. Jelikož se tato práce nezabývá výpočtem elektromagnetických ztrát, není možné spekulovat o způsobu jejich snižování.

Dalším možným způsobem, kterým by mohlo úspěšně dojít ke snížení teplot je zvýšení odvodu tepla z kostry do okolí. Zvýšení odvodu tepla je možné dosáhnout například integrací vodního chlazení do samotné kostry stroje, případně zvýšit rychlost vzduchu proudícího přes tuto kostru. Proto bylo provedeno několik simulací, při kterých se záměrně zvyšoval součinitel přestupu tepla z kostry (tím byl uměle navyšován odvod tepla z kostry). I přesto se nepodařilo snížit teploty v rotoru na přijatelnou mez. Z toho plyne, že samotné zvyšování intenzity chlazení z kostry je pro snížení teplot v rotoru nedostačující a v daném stroji by bylo nutné snížit celkové rotorové ztráty nebo zvolit jiný způsob chlazení stroje.

5.3 Tepelné toky

V tabulce 5.6 jsou uvedeny vypočtené tepelné toky, které slouží pro lepší představu toho, jakým způsobem proudí teplo z oblastí generování ztrát to oblastí odvodu tepla do okolí.

Tab. 5.6: Tabulka Tepelných toků

Označení	Velikost [W]
Tepelné toky uvnitř stroje	
$P_{1,7}$	71
$P_{3,9}$	71
$P_{5,22}$	390, 46
$P_{7,11}$	41, 23
$P_{7,16}$	6, 12
$P_{7,21}$	52, 17
$P_{7,24}$	69, 49
$P_{8,10}$	367, 78
$P_{9,14}$	41, 23
$P_{9,18}$	6, 13
$P_{9,23}$	52, 17
$P_{9,25}$	68, 49
$P_{15,26}$	34, 89
$P_{16,17}$	41, 02

$P_{17,18}$	41,02
$P_{19,27}$	34,89
Tepelné toky do norů	
$P_{21,n}$	168,32
$P_{22,n}$	343,17
$P_{23,n}$	168,23
$P_{24,n}$	8,6
$P_{25,n}$	8,6

Hodnoty vypočtené v tabulce 5.6 naznačují, že velká část generovaných mechanických ztrát a ztrát v rotoru bude odváděna přes stator do kostry, ze které jsou tyto ztráty odváděny do okolí. Ztráty generované v rotoru jsou dále odváděny přes hřídel do štítu, ze kterých se však neodvádí velké množství tepla, proto tyto štíty působí spíše jako most sloužící pro přenos tepla z hřídele do kostry.

Závěr

Cílem této práce bylo provést rešerši na téma tepelných výpočtů vysokootáčkových strojů a provést tepelný výpočet vysokootáčkového asynchronního stroje.

Jelikož ve vysokootáčkových strojích dominují mechanické ztráty, byla na tuto problematiku provedena rešerše, která je uvedena v první části této práce. Na základě nastudovaných vztahů byl proveden výpočet mechanických ztrát analyzovaného stroje. Tyto ztráty jsou uvedeny v tabulce 5.6.

Dále jsou v práci popsány mechanismy přenosu tepla a způsob jejich výpočtu v elektrických strojích. Na to dále navazuje popis metody tepelné sítě, která slouží právě pro výpočet oteplení elektrických strojů. Součástí popisu této metody je i způsob, jakým lze určit odpory přenosu tepla prouděním a vedením, které vystupují v tepelné síti.

Stěžejní částí této práce je popis konkrétní tepelné sítě určené pro vysokootáčkový asynchronní stroj společně se vstupními parametry potřebnými pro úspěšný tepelný výpočet. Tato síť byla pro přehlednost rozdělena do několika dílčích částí, kdy každá dílčí část je podrobněji zobrazena a popsána v kapitole 4.1. Tepelné odpory vycházející z této sítě byly použity pro výpočet výsledných středních teplot v jednotlivých částech analyzovaného vysokootáčkového stroje. Tyto výpočty byly provedeny v kapitole 5.2. Výsledné teploty jsou uvedeny v tabulce 5.5.

Z výsledků výpočtů plyne, že při současné konfiguraci vstupních parametrů by docházelo k přehřívání daného stroje. Snížení výsledných teplot by bylo možné dosáhnout snížením generovaných ztrát, především v rotoru, případně zvýšením chlazení. Oba tyto způsoby mají svá úskalí a bez další analýzy není možné určit zda a jak moc by pomohly při snížení teplot ve stroji.

Literatura

- [1] BÁRTA, Jan. *Návrh elektrického stroje 6kW, 120 000 ot/min pro turbo-cirkulátor hélia*. Antonínská 548/1, 601 90 Brno, 2017. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informačních technologií.
- [2] *ELUC: Ztráty a účinnost* [online]. Olomoucký kraj: MŠMT, 2015 [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/781>
- [3] SAARI, Juha. *Thermal analysis of high-speed induction machines* [online]. Acta Polytechnica Scandinavica, 1998 [cit. 2019-11-23]. Dostupné z: <http://urn.fi/urn:nbn:fi:tkk-001237>. Dizertační práce. HelsinkiUniversityoftechnology, LaboratoryofElectromechanics.
- [4] LÁZNIČKOVÁ, Ilona. *Technická mechanika: Mechanika poddajných těles*. Fakulta elektrotechniky a komunitkačních technologií: VUT v Brně, 2014.
- [5] NERG, Janne. Thermal Modeling of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor. In: *Sborník z 5. mezinárodní konference WSEAS o aplikacích elektrotechniky*. Lappeenranta University of Technology: Lappeenranta University of Technology, 2006. Dostupné také z: Thermal Modeling of a High-Speed Solid-Rotor Induction Motor
- [6] PYRHÖNEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. *Design of Rotating Electrical Machines*. 2nd Edition. New Delhi, India: Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 2013. ISBN ISBN: 978-1-118-58157-5.
- [7] CENGEL, Yunus A. a Afshin J. GHAJAR. *HEAT AND MASS TRANSFER: FUNDAMENTALS APPLICATIONS*. 5th edition. New York: McGraw-Hill Education, 2015. ISBN 978-0-07-339818-1.
- [8] SCHAUER, Pavel. *Aplikovaná fyzika* [online]. Antonínská 548/1, 2014 [cit. 2019-10-31]. Dostupné z: [http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BB02-Aplikovana%20fyzika/BB02-Aplikovana_fyzika_\(A,K\)--M04-Prenos_teplo.pdf](http://lences.cz/domains/lences.cz/skola/subory/Skripta/BB02-Aplikovana%20fyzika/BB02-Aplikovana_fyzika_(A,K)--M04-Prenos_teplo.pdf). Skripta.VUTvBrně.
- [9] Département de formation MÉCANIQUE DES FLUIDES, ÉNERGÉTIQUE ENVIRONNEMENT: Travaux des élèves. *Année 2000-2001: HYDRODYNAMIC INSTABILITIES* [online]. Toulouse Cedex 7, France: 2, rue Charles Camichel, 2001 [cit. 2019-12-24]. Dostupné z: <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/cdroms.htm>

- [10] WIESCHE a STEFAN. *Heat Transfer in Rotating Flows* [online]. Department of Mechanical Engineering, Muenster University of Applied Sciences, Steinfurt, Germany: Springer International Publishing, 2017 [cit. 2020-05-26]. ISBN 978-3-319-32003-8. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-319-32003-8_12-1
- [11] KENDOUSH, Abdulah Abbas. An approximate solution of the convective heat transfer from an isothermal rotating cylinder. *TECHNICAL NOTE* [online]. 1996, , 439-441 [cit. 2020-05-27]. DOI: Show more [https://doi.org/10.1016/0142-727X\(95\)00002-8](https://doi.org/10.1016/0142-727X(95)00002-8). Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0142727X95000028>
- [12] LIST, Vladimír a Josef HAK. *Elektrotechnika II: Elektrické stroje - část 1. 3.* Praha: SNTL - nakladatelství technické literatury, 1969.
- [13] PATOČKA, Miroslav. *Vybrané statě z výkonové elektroniky. Svazek I, Tepelné jevy, činný výkon.* Vyd. 3. Brno: Zdeněk Novotný, 2004, 61 s. ISBN 80-214-2742-6.
- [14] TOMAN, Marek. *VÁZANÉ MODELOVÁNÍ ASYNCHRONNÍHO MOTORU METODOU FYZIKÁLNÍHO MODELOVÁNÍ.* Antonínská 548/1, 601 90 Brno, 2015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a informačních technologií. Vedoucí práce Doc. Ing. RADEK VLACH, Ph.D.
- [15] TOMAN, Marek, Radoslav CIPIN a Pavel VOREL. Thermal Networks Respecting Asymmetric Cooling of Electrical Machine Parts. *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*. Brno, Czech Republic, 2018, , 1-6.
- [16] MELLOR, P.H., D. ROBERTS a D.R. TURNER. *Lumped parameter thermal model for electrical machines of TEFC design* [online]. Department of Electrical Engineering and Electronics: University of Liverpool, **1991**, 205-218 [cit. 2020-06-09]. DOI: 10.1049/ip-b.1991.0025. Dostupné z: <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/ip-b.1991.0025>

Seznam příloh

A	Tabulka geometrických rozměrů	55
B	Výsledné tepelné odpor	57
B.1	Vnitřní odpory stroje	57
B.2	Odpory odvodu tepla do okolí	58

A Tabulka geometrických rozměrů

Tab. A.1: Tabulka geometrických rozměrů

Název	Označení
Stator	
Počet zubů statoru	Q_s
Počet vodičů v jedné drážce statoru	N_{vs}
Tloušťka izolace vodičů vinutí	t_i
Vnější poloměr jha statoru	$r_{js,out}$
Střední poloměr jha statoru	$r_{js,stř}$
Vnitřní poloměr jha statoru	$r_{js,in}$
Vnitřní poloměr zubu statoru před rozšířením	r_{zs}
Střední poloměr zubu statoru	$r_{zs,m}$
Vnitřní poloměr statoru	$r_{s,in}$
Střední poloměr čela vinutí statoru	$r_{č,stř}$
Ekvivalentní poloměr čela vinutí statoru	$r_{č,1}$
Ekvivalentní poloměr vinutí vystupujícího z drážky	$r_{č,0}$
Poloměr vodiče statoru	$r_{v,s}$
Vzdálenost středů sousedních vodičů statoru	r_a
Poloměr vodiče statoru	r_{vs}
Délka statorové paketu	L_{Fe}
Délka statorového paketu	L_{Fe}
Délka čela vinutí statoru	$L_{č}$
Délka vinutí statoru od drážky do čela	$L_{č,0}$
Činitel plnění železa statoru	k_{Fe}
Šířka drážky statoru v horní části	b_{2s}
Šířka zubu statoru	b_{zs}
Šířka zubu statoru ve vzduchové mezeře	b_{zs0}
Šířka drážky statoru při vstupu	b_{ds0}
Střední šířka mědi v drážce statoru	$b_{Cu,stř}$
Ekvivalentní průměr čela vinutí statoru	$d_{č,ekv}$
Výška zubu statoru při vstupu	h_{ds0}
Výška mědi v drážce statoru	h_{Cu}
Výška drážky statoru	h_{ds}
Průměr vodiče statoru	d_{vs}
Rotor	
Počet zubů rotoru	Q_r

Vnější poloměr rotoru	r_r
Vnější redukovaný poloměr rotoru	$r_{r,red}$
Vnější poloměr jha	r_{jr}
Redukovaný poloměr jha	$r_{jr,red}$
Střední poloměr jha	$r_{jr,stř}$
Střední redukovaný poloměr rotoru	$r_{r,stř,red}$
Šířka drážky rotoru	$b_{d,r}$
Aktivní délka rotoru	$L_{rot,akt}$
Délka kruhu rotoru	L_{kruh}
Hřídel	
Poloměr hřídele uvnitř ložiska (el. přívod)	$r_{h,1}$
Poloměr hřídele ve vnitřním vzduchu (el. přívod)	$r_{h,2}$
Poloměr hřídele uvnitř rotoru	$r_{h,3}$
Poloměr hřídele ve vnitřním vzduchu (hřídel)	$r_{h,4}$
Poloměr hřídele uvnitř ložiska (hřídel)	$r_{h,5}$
Délka hřídele uvnitř ložiska (el. přívod)	$L_{h,1}$
Délka hřídele ve vnitřním vzduchu (el. přívod)	$L_{h,2}$
Délka hřídele uvnitř rotoru	$L_{rot,akt}$
Délka hřídele ve vnitřním vzduchu (hřídel)	$L_{h,4}$
Délka hřídele uvnitř ložiska (hřídel)	$L_{h,5}$
Kostra	
Vnější poloměr kostry	$r_{k,out}$
Střední poloměr kostry	$r_{k,stř}$
Délka kostry v oblasti vnitřního vzduchu (el.přívod)	$L_{k,1}$
Délka kostry v oblasti vnitřního vzduchu (hřídel)	$L_{k,2}$
Štít	
Tloušťka štítu ze strany el. přívodu	$t_{š,el}$
Tloušťka štítu ze strany hřídele	$t_{š,h}$
Tloušťka ložiska ze strany el. přívodu	$t_{l,el}$
Tloušťka ložiska ze strany hřídele	$t_{l,h}$
Poloměr ložiska ze strany el. přívodu	$r_{l,el}$
Střední poloměr štítu	$r_{š,stř}$
Poloměr ložiska ze strany hřídele	$r_{l,h}$

B Výsledné tepelné odpor

B.1 Vnitřní odpory stroje

$$R_{1,2} = R_{\text{vin},a,1} + R_{c,a,1}, \quad (\text{B.1})$$

$$R_{1,7} = R_{c,r,1} + R_{\text{vv},3}, \quad (\text{B.2})$$

$$R_{2,3} = R_{\text{vin},a,2} + R_{c,a,2}, \quad (\text{B.3})$$

$$R_{2,4} = R_{\text{zs},r,1} + R_{\text{vin},r,2}, \quad (\text{B.4})$$

$$R_{2,5} = R_{\text{vin},r,1} + R_{\text{js},r,2}, \quad (\text{B.5})$$

$$R_{3,9} = R_{c,r,2} + R_{\text{vv},11}, \quad (\text{B.6})$$

$$R_{4,5} = R_{\text{js},r,3} + R_{\text{zs},r,2}, \quad (\text{B.7})$$

$$R_{4,6} = R_{\text{zs},r,3}, \quad (\text{B.8})$$

$$R_{4,7} = R_{\text{zs},a,1} + R_{\text{vv},4}, \quad (\text{B.9})$$

$$R_{4,9} = R_{\text{zs},a,2} + R_{\text{vv},10} \quad (\text{B.10})$$

$$R_{5,7} = R_{\text{js},a,1} + R_{\text{vv},5}, \quad (\text{B.11})$$

$$R_{5,9} = R_{\text{js},a,2} + R_{\text{vv},9}, \quad (\text{B.12})$$

$$R_{5,22} = R_{\text{js},r,1} + R_{k,r,2}, \quad (\text{B.13})$$

$$R_{6,8} = R_{\delta,1}, \quad (\text{B.14})$$

$$R_{7,11} = R_{\text{vv},6}, \quad (\text{B.15})$$

$$R_{7,16} = R_{\text{hr},r,2} + R_{\text{vv},7}, \quad (\text{B.16})$$

$$R_{7,21} = R_{k,r,1} + R_{\text{vv},2}, \quad (\text{B.17})$$

$$R_{7,24} = R_{\text{Lš},a,1} + R_{\text{vv},1}, \quad (\text{B.18})$$

$$R_{7,26} = R_{\text{vv},8} + R_{\text{lož},\text{el}}, \quad (\text{B.19})$$

$$R_{8,10} = R_{2,\delta}, \quad (\text{B.20})$$

$$R_{9,14} = R_{\text{vv},16}. \quad (\text{B.21})$$

$$R_{9,18} = R_{\text{hr},r,4} + R_{\text{vv},15}. \quad (\text{B.22})$$

$$R_{9,23} = R_{k,r,3} + R_{\text{vv},12}. \quad (\text{B.23})$$

$$R_{9,25} = R_{\text{Lš},a,2} + R_{\text{vv},13}. \quad (\text{B.24})$$

$$R_{9,27} = R_{\text{vv},14} + R_{\text{lož},\text{h}}, \quad (\text{B.25})$$

$$R_{10,13} = R_{\text{zr},r,1}, \quad (\text{B.26})$$

$$R_{11,12} = R_{jr,a,1}, \quad (\text{B.27})$$

$$R_{11,13} = R_{zr,a,1}, \quad (\text{B.28})$$

$$R_{12,13} = R_{jr,r,2} + R_{zr,r,2}, \quad (\text{B.29})$$

$$R_{12,14} = R_{jr,a,2}. \quad (\text{B.30})$$

$$R_{12,17} = R_{jr,r,2} + R_{hr,r,3}, \quad (\text{B.31})$$

$$R_{13,14} = R_{zr,a,2}. \quad (\text{B.32})$$

$$R_{15,16} = R_{hr,a,1}, \quad (\text{B.33})$$

$$R_{15,26} = R_{hr,r,1} + R_{lož,el}, \quad (\text{B.34})$$

$$R_{16,17} = R_{hr,a,2}, \quad (\text{B.35})$$

$$R_{17,18} = R_{hr,a,3}, \quad (\text{B.36})$$

$$R_{18,19} = R_{hr,a,4} \quad (\text{B.37})$$

$$R_{19,20} = R_{hr,a,5}, \quad (\text{B.38})$$

$$R_{19,27} = R_{hr,r,5} + R_{lož,h}. \quad (\text{B.39})$$

$$R_{21,22} = R_{k,a,2}, \quad (\text{B.40})$$

$$R_{21,24} = R_{Lš,r,1} + R_{k,a,1}, \quad (\text{B.41})$$

$$R_{22,23} = R_{k,a,3}, \quad (\text{B.42})$$

$$R_{23,25} = R_{k,a,4} + R_{Lš,a,3}, \quad (\text{B.43})$$

$$R_{24,26} = R_{Lš,r,2} + R_{lož,el}, \quad (\text{B.44})$$

$$R_{25,27} = R_{Lš,r,4} + R_{lož,h}, \quad (\text{B.45})$$

B.2 Odpory odvodu tepla do okolí

$$R_{21,n} = R_{k,n,1}, \quad (\text{B.46})$$

$$R_{22,n} = R_{k,n,2}, \quad (\text{B.47})$$

$$R_{23,n} = R_{k,n,3}, \quad (\text{B.48})$$

$$R_{24,n} = R_{š,n,1}, \quad (\text{B.49})$$

$$R_{25,n} = R_{š,n,2}, \quad (\text{B.50})$$