

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Brno, 2024

Jan Filip Staněk



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 SYNCHRONNÍHO MOTORU S PERMANENTNÍMI MAGNETY

THERMAL MODEL OF A PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Filip Staněk

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marek Toman, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Jan Filip Staněk

ID: 240804

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety

POKyny PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nastudujte a popište základní vztahy přenosu tepla a metodu tepelných sítí.
2. Provedte literární rešerši zaměřenou na tepelnou analýzu synchronních motorů s permanentními magnety s využitím metody tepelných sítí.
3. Vytvořte tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety. Model bude založený na metodě tepelných sítí.
4. Pomocí vytvořeného modelu proveďte výpočty a zhodnoťte výsledky výpočtů.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] CENGEL Yunus a Afshin GHAJAR. Heat and mass transfer. Fifth edition. McGraw hill education, 2015.
- [2] PYRHONEN, Juha, Tapani JOKINEN a Valéria HRABOVCOVÁ. Design of rotating electrical machines. Second Edition. WILEY, 2014.
- [3] A Real-Time Thermal Model of a Permanent-Magnet Synchronous Motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010.

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: Ing. Marek Toman, Ph.D.

prof. 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 řešením na téma tepelných výpočtů synchronních strojů s permanentními magnety. V první části jsou popsány základní mechanismy přenosu tepla, je ukázána spojitost mezi tepelnými a elektrickými veličinami a je ukázán postup výpočtu teplot pomocí tepelné sítě. V druhé části je proveden průzkum používaných tepelných sítí pro tepelné modelování synchronních motorů. Ve třetí části jsou odvozeny tepelné odpory některých geometrických těles, ze kterých se stroj skládá a jsou popsány součinitele přestupu tepla. V další části jsou uvedeny geometrické parametry stroje. Ve páté části jsou vytvořeny tepelné modely rotorů a provedeno jejich ověření. V poslední části je ukázána kompletní tepelná síť motoru a jsou vypsány výsledné střední teploty.

KLÍČOVÁ SLOVA

Ansys, metoda tepelných sítí, součinitel přestupu tepla, synchronní motor s permanentními magnety, tepelný model, výpočet tepelných odporů.

ABSTRACT

This work deals with research on the topic of thermal calculations of synchronous machines with permanent magnets. In the first part, the basic mechanisms of heat transfer are described, the connection between thermal and electrical quantities is shown, and the procedure for calculating temperatures using a thermal network is shown. In the second part, a survey of used thermal networks for thermal modeling of synchronous motors is carried out. In the third part, the thermal resistances of some geometric bodies of which the machine is composed are derived and the heat transfer coefficients are described. In the next part, the geometric parameters of the machine are presented. In the fifth part, thermal models of the rotors are created and their verification is carried out. In the last part, the complete thermal network of the engine is shown and the resulting mean temperatures are listed.

KEYWORDS

Ansys, thermal network method, heat transfer coefficient, permanent magnet synchronous motor, thermal model, calculation of thermal resistances.

STANĚK, Jan Filip. *Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety*.
Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a ko-
munikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024. Vedoucí
práce: Ing. Marek Toman, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Jan Filip Staněk
VUT ID autora: 240804
Typ práce: Bakalářská práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího 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, Ph.D. za odborné vedení, profesionální přístup, dále za velmi přínosné konzultace a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	13
1 Základní vztahy přenosu tepla	14
1.1 Mechanismy přenosu tepla	14
1.1.1 Vedení tepla	14
1.1.2 Přenos tepla prouděním	15
1.1.3 Sálání	16
1.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami	17
1.3 Metoda tepelných sítí	18
1.4 Sestavení matic pro obecnou tepelnou síť	18
2 Rešerše používaných tepelných sítí synchronního motoru s permanentními magnety	19
2.1 Jednoduchá tepelná síť synchronního motoru	19
2.2 Tepelná síť synchronního motoru s vnořenými magnety	21
2.3 Další tepelné sítě	22
3 Výpočet tepelných odporů	23
3.1 Vedení tepla v tyči se zdrojem ztrát	23
3.1.1 Symetrické chlazení	24
3.2 Vedení tepla válcovým mezikružím v radiálním směru	25
3.3 Vedení tepla válcovým mezikružím v axiálním směru	27
3.4 Vedení tepla v plné válcové tyči v radiálním směru s vnitřními ztrátami	28
3.5 Obvodový tepelný tok v mezikružích	29
3.6 Vícerozměrné vedení tepla	29
3.7 Výpočet tepelného odporu prouděním	31
3.7.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře	31
3.7.2 Výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje	32
3.7.3 Výpočet součinitele stykového odporu	32
3.8 Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti vinutí	33
4 Rozměry stroje a jeho částí	34
4.1 Rozměry rotoru s vnořenými magnety i s magnety na povrchu	34
4.2 Rozměry statoru	34
4.3 Rozměry kostry	35

5	Modely částí synchronního stroje	36
5.1	Rotor s vnořenými permanentními magnety	36
5.1.1	Výpočet tepelných odporů v rotoru	37
5.1.2	Podřadná tepelná síť s dílčími odpory	39
5.1.3	Tepelná síť rotoru s vnořenými magnety	40
5.2	Rotor s magnety na povrchu (SMPM)	43
5.2.1	Výpočet dílčích tepelných odporů	43
5.2.2	Podřadná tepelná síť	45
5.2.3	Tepelná síť SMPM rotoru	46
5.3	Ověření funkčnosti tepelných sítí rotoru pomocí FEM	48
5.3.1	Rotor s vnořenými magnety	49
5.3.2	Rotor s magnety na povrchu	50
5.3.3	Zhodnocení porovnání metod při výpočtu teplot u rotorů . . .	51
5.4	Ověření tepelné sítě statoru	53
6	Tepelný výpočet synchronního motoru s vnořenými magnety	55
6.1	Rozmístění uzlů v motoru	55
6.2	Tepelná síť motoru	56
6.3	Vstupní hodnoty použité do výpočtu	58
6.4	Vypočtené střední teploty v celém motoru	58
	Závěr	60
	Literatura	61
A	Seznam hodnot vodivostí a součinitelů přestupu tepla zadávaných do výpočtu	67

Seznam obrázků

1.1	Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou bez vnitřních zdrojů tepla.	14
1.2	Průběh teplot a rychlosti nad povrchem, mezní vrstvy.	15
2.1	Synchronní stroj s permanentními magnety na povrchu.	19
2.2	Tepelná síť synchronního motoru.	20
2.3	Druhá tepelná síť synchronního motoru.	21
3.1	Tyč se zdrojem vnitřních ztrát.	23
3.2	Tepelný model tyče se zdrojem vnitřních ztrát.	24
3.3	Tepelný model tyče při symetrickém chlazení.	25
3.4	Zjednodušený tepelný model tyče.	25
3.5	Válcové mezikruží radiálně.	26
3.6	Zjednodušená tepelná síť pro radiální vedení tepla válcovým mezikru- žím.	27
3.7	Vedení v mezikruží axiálně.	28
3.8	Plná tyč se ztrátami.	28
3.9	Část mezikruží při obvodovém tepelném toku.	29
3.10	Tyč při vícerozměrném vedení tepla.	30
3.11	Model vícerozměrného vedení tepla v tyči.	30
4.1	Rozměry rotoru.	34
4.2	Rozměry statoru.	34
4.3	Rozměry kostry motoru.	35
5.1	Rozdělení rotoru na jednotlivé části.	36
5.2	Rozměry rotoru s vnořenými magnety.	37
5.3	Tepelná podsít rotoru s vnořenými magnety.	40
5.4	(a) Výsledná tepelná síť rotoru s vnořenými magnety. (b) Rozmístění uzlů v rotoru a vyznačení okrajových podmínek.	41
5.5	Rozdělení SMPM rotoru na jednotlivé části.	43
5.6	Rozměry SMPM rotoru.	44
5.7	Tepelná podsít SMPM rotoru.	45
5.8	Tepelná síť SMPM rotoru.	46
5.9	Rozložení uzlů v SMPM rotoru a okrajové podmínky.	47
5.10	Model rotoru s vnořenými magnety.	50
5.11	Teplotní pole rotoru s vnořenými magnety.	50
5.12	Teplotní pole rotoru s magnety na povrchu.	51
5.13	Tepelná síť statoru.	53
5.14	Model statorové výseče.	54
5.15	Teplotní pole statoru v programu Ansys.	54
6.1	Rozmístění uzlů v motoru.	55

6.2	Tepelná síť synchronního motoru s vnořenými magnety.	57
-----	--	----

Seznam tabulek

1.1	Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami.	17
2.1	Přiřazení čísel uzlům v tepelné síti.	20
2.2	Přiřazení čísel uzlům v tepelné síti.	22
3.1	Součinitele přestupu tepla mezi částmi motoru a vnitřním vzduchem.	32
3.2	Velikosti stykových součinitelů odporu pro různé povrchy.	33
5.1	Přiřazení čísel uzlům rotoru a okolí.	37
5.2	Přiřazení čísel uzlům SMPM rotoru a okolí.	43
5.3	Okrajové podmínky rotoru.	48
5.4	Srovnání teplot rotoru s vnořenými magnety. a)	49
5.5	Srovnání teplot rotoru s vnořenými magnety. b)	49
5.6	Srovnání teplot SMPMSM.	51
5.7	Význam jednotlivých uzlů na Obr. 5.13.	53
5.8	Srovnání teplot statoru.	54
6.1	Význam jednotlivých uzlů na Obr. 6.1 a Obr. 6.2.	56
6.2	Generované ztráty ve stroji.	58
6.3	Vypočtené střední teploty.	59
A.1	Tepelné vodivosti.	67
A.2	Stykové koeficienty a součinitele přestupu tepla.	67

Úvod

V dnešní době se rozrůstá použití elektromotorů pro pohon vozidel. Jedná se o motory, které musí mít velkou hustotu výkonu, neboť máme omezený prostor a nadbytečná hmotnost zvyšuje spotřebu vozidla, zhoršuje jeho chování a zvyšuje namáhání podvozkových dílů. Z velké hustoty výkonu plyne, že vznikají velké objemové ztráty, které se ale odvádí přes malý objem a povrch. Stává se tedy nutností dělat i tepelný návrh, aby nebyly překročeny kritické hodnoty teplot v motoru. Jedná se hlavně o teplotu vinutí, protože při zvýšené teplotě rapidně klesá životnost izolace. U synchronního motoru s permanentními magnety by nemělo docházet k vysokým teplotám permanentních magnetů, protože s vysokými teplotami výrazně klesá koerzivní síla magnetu a magnet se stane náchylný k demagnetizaci, a už vůbec se nesmí překročit Curieova teplota magnetu, protože by došlo k trvalé demagnetizaci magnetů (zničení magnetů). Cílem této bakalářské práce je vytvořit teoretický podklad pro výpočet středních teplot v určitých oblastech synchronního motoru s permanentními magnety (PMSM-Permanent magnet synchronous motor), následně na konkrétním modelu provést výpočet a ověřit jednotlivé části sítě.

V první kapitole jsou popsány základní mechanismy přenosu tepla, je naznačena podobnost mezi tepelnými a elektrickými veličinami, je popsán způsob výpočtu teplot metodou tepelné sítě. V druhé části je proveden průzkum používaných tepelných sítí pro tepelné modelování synchronních motorů. Třetí kapitola se zabývá výpočty tepelných odporů základních geometrických těles, ze kterých se elektrický stroj skládá. Dále je v této kapitole popsán výpočet tepelného odporu prouděním, výpočet součinitelů přestupu tepla ve stroji a stykového odporu. V závěru této kapitoly je popsán výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti vinutí. Ve čtvrté kapitole je ukázáno značení rozměrů stroje, které jsou potřebné pro výpočet tepelných odporů mezi uzly středních teplot. V páté kapitole je detailně vysvětlen postup tepelného modelování rotoru s vnořenými magnety a rotoru s magnety na povrchu (SMPM-Surface mounted permanent magnet) a vytvoření jejich tepelných sítí. Dále je v této kapitole provedeno porovnání výsledných vypočtených středních teplot statoru a rotorů pomocí programu Ansys. V poslední kapitole je ukázána kompletní tepelná síť motoru, rozmístění uzlů v motoru a jsou ukázány vypočtené střední teploty jednotlivých částí synchronního stroje.

1 Základní vztahy přenosu tepla

1.1 Mechanismy přenosu tepla

Existují tři základní způsoby odvodu (přenosu) tepla:

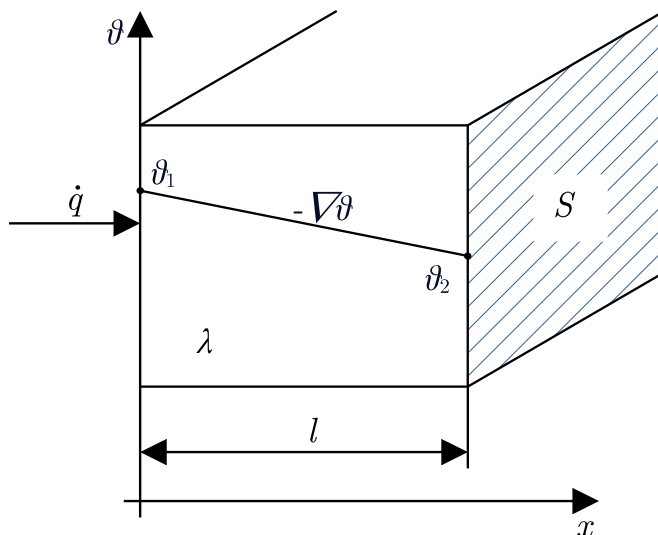
- Vedením (kondukcí)
- Prouděním (konvekcí)
- Sáláním (radiací)

1.1.1 Vedení tepla

Vedení tepla probíhá mikroskopickým pohybem molekul ve struktuře materiálu. Existují dva mechanismy přenášení tepla vedením. První způsob je přenos vzájemnou interakcí molekul. Molekuly s vyšší teplotou více kmitají a přenášejí tuto energii na chladnější molekuly pomocí vibrací krystalické mřížky. Druhý způsob je přenos pomocí volných elektronů. Toto nastává hlavně u čistých kovů s dobrou elektrickou vodivostí. [1] Vedení tepla je podle Fourierova zákona [2] dáno vztahem

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

kde \dot{q} je vektor hustoty tepelného toku (W/m^2), λ je měrná tepelná vodivost ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$). $\nabla\vartheta$ je gradient teploty, tj. vektor kolmý k izotermické ploše S (K/m), záporné znaménko vyjadřuje, že gradient teploty má opačný směr než vektor tepelného toku.

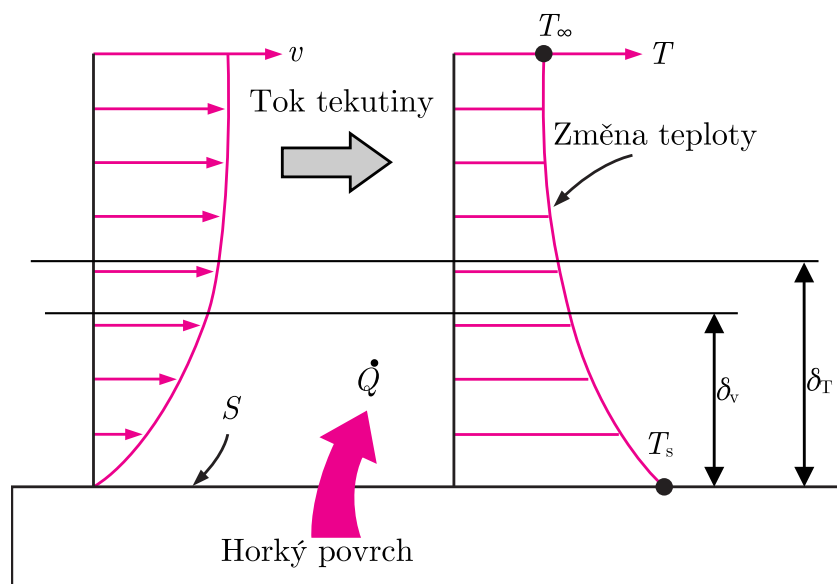


Obr. 1.1: Vedení tepla jednoduchou rovinnou stěnou bez vnitřních zdrojů tepla, upraveno z [3].

1.1.2 Přenos tepla prouděním

Konvekce je způsob přenosu tepla mezi pevnou látkou a tekutinou (kapalina, plyn). Přenos tepla je uskutečňován pomocí makroskopického pohybu tekutiny. Jsou dva druhy proudění:

- Proudění přirozené – vzniká samovolně v důsledku vztlakových sil, protože tekutina s vyšší teplotou má menší hustotu a logicky tedy stoupá vzhůru.
- Proudění nucené – je vyvoláváno vnějšími prostředky (stlačený vzduch, ventilátor, vítr). [4]



Obr. 1.2: Průběh teplot a rychlosti nad povrchem, mezní vrstvy, upraveno z [4].

Na obrázku 1.2 je vidět průběh teploty a rychlosti proudění. Těsně u povrchu je rychlost tekutiny obtékající povrch nulová a teplota je stejná jako teplota povrchu. S narůstající vzdáleností od povrchu se rychlost tekutiny zvětšuje. Toto místo s velkým gradientem rychlosti a teploty se nazývá mezní vrstva. Tloušťka mezní vrstvy rychlosti δ_v je definována jako 99 % rychlosti tekutiny v nekonečné vzdálenosti (ustálená rychlost). [1]

Newtonův ochlazovací zákon vyjadřuje tepelný tok, který prochází plochou mezi stěnou a okolní proudící tekutinou [4]

$$\dot{Q} = \alpha \cdot S \cdot (T_s - T_\infty), \quad (1.2)$$

kde α je součinitel přestupu tepla ($\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$) a udává jak velký tepelný tok prochází jednotkovou plochou stěny do tekutiny při rozdílu teplot 1 K, T_s je teplota povrchu (K), T_∞ je teplota tekutiny (K). V případě, že T_∞ bude větší než T_s , tak vyjde tepelný tok se záporným znaménkem, což značí, že tepelný tok má opačnou orientaci, teče tedy z tekutiny do stěny.

Součinitel přestupu tepla α je dle [1] vyjádřen vztahem

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{l}, \quad (1.3)$$

kde l je charakteristický rozměr (m), Nu je Nusseltovo číslo, které vyjadřuje kolikrát je přenos tepla prouděním efektivnější než vedením. [1]

1.1.3 Sálání

Tento způsob sdílení tepla lze v mnoha případech výpočtu chlazení zanedbat, protože tepelný tok sáláním bývá o dost menší než tepelný tok sdílený pomocí vedení a proudění. K přenosu tepla sáláním dochází díky elektromagnetickému záření. Každé těleso s teplotou větší než absolutní nula (0 K) vyzařuje elektromagnetické záření. Na rozdíl od předchozích dvou druhů přenosu tepla se při sálání nepodílejí na přenosu žádné molekuly, tudíž přenos probíhá i ve vakuu. [4] Tepelný tok sáláním vyjadřuje následující rovnice dle [1]

$$\dot{Q} = \epsilon \cdot S \cdot \sigma_{\text{SB}} \cdot (T_1^4 - T_2^4), \quad (1.4)$$

kde ϵ je emisivita materiálu. $\epsilon = 1$ pro absolutně černé těleso, což je těleso, které veškeré dopadající záření na jeho povrch pohltí. Pro reálné povrchy se emisivita pohybuje od nuly do jedné. Absolutně černé těleso je dokonalý přijímač, ale taky zářič. [4] σ_{SB} je Stefan-Boltzmannova konstanta $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$, S je plocha zářiče, T_1 je termodynamická teplota zářiče a T_2 je teplota povrchu tělesa, které záření přijímá. [1]

1.2 Analogie mezi elektrickými a tepelnými veličinami

K teplotním výpočtům se používá analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami. Díky tomuto vzniknou tepelné obvody, které můžeme řešit pomocí běžných metod řešení elektrických obvodů. [1]

Tab. 1.1: Analogie mezi tepelnými a elektrickými veličinami, upraveno z [1].

Tepelná veličina	Symbol	Jedn.	El. veličina	Symbol	Jedn.
Tepelná energie	Q	W	El. náboj	Q_e	C
Tepelný tok	\dot{Q}	W	El. proud	I	A
Hustota tep. toku	\dot{q}	$\frac{W}{m^2}$	Proud. hust.	J	$\frac{A}{m^2}$
Teplota	ϑ	°C	El. potenciál	φ	V
Oteplení	$\Delta\vartheta$	°C	El. napětí	U	V
Měrná tep. vod.	λ	$\frac{W}{m \cdot K}$	Měrná el. 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 Tab. 1.1 plyne, že pokud elektrické veličiny v Ohmově zákoně

$$I = \frac{U}{R_e}, \quad (1.5)$$

kde I je elektrický proud (A), U je elektrické napětí (V) a R_e je elektrický odpor (Ω), převedeme na tepelné veličiny, získáme následující vztah

$$\dot{Q} = \frac{\Delta\vartheta}{R}. \quad (1.6)$$

Stejně jako u elektrických veličin se vodivost vypočítá jako převrácená hodnota tepelného odporu dle [3]

$$G = \frac{1}{R}, \quad (1.7)$$

kde G je tepelná vodivost a R je tepelný odpor.

1.3 Metoda tepelných sítí

Je snaha zmenšovat pohony, například v elektromobilu je nevhodné vozit těžký a velký motor, tudíž roste hustota výkonu elektromotorů. S tím roste i tepelné zatěžování motoru. Proto k návrhu motoru patří i tepelný návrh. Tepelný návrh se dá realizovat numericky pomocí počítačových programů, nebo pomocí metody tepelných sítí. [3] Tato metoda funguje tak, že složité tepelné pole s rozloženými parametry zjednodušíme na schéma se soustředěnými parametry, což znamená vy počítat ekvivalentní tepelné odpory, které se poté zapojí do správné formace, aby se chování výsledného obvodu co nejvíce blížilo realitě. Tepelná síť se skládá z uzlů, větví a norů. [2].

Uzel – charakterizuje střední teplotu dané části, která může i nemusí být zdrojem tepla.

Větev – tvoří cestu mezi jednotlivými uzly, obsahuje tepelný odpor.

Nor – zajišťuje přestup tepla do okolí. [3]

1.4 Sestavení matic pro obecnou tepelnou síť

Výpočet je proveden pomocí metody uzlových napětí. Matici tvoří n lineárních rovnic, kde n je počet uzlů tepelné sítě. Obecná matice n -uzlové soustavy může vypadat následovně:

$$\begin{pmatrix} G_1 & -g_{12} & -g_{13} & -g_{1j} & -g_{1n} \\ -g_{21} & G_2 & -g_{23} & \dots & -g_{2n} \\ -g_{31} & -g_{32} & G_3 & \dots & -g_{3n} \\ -g_{i1} & \dots & \dots & \dots & -g_{in} \\ -g_{n1} & -g_{n2} & -g_{n3} & \dots & G_n \end{pmatrix} \times \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \\ \vartheta_3 \\ \vdots \\ \vartheta_n \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{Q}_1 + g_{out,1} \cdot \vartheta_{okolí,1} \\ Q_2 + g_{out,2} \cdot \vartheta_{okolí,2} \\ Q_3 + g_{out,3} \cdot \vartheta_{okolí,3} \\ \vdots \\ Q_n + g_{out,n} \cdot \vartheta_{okolí,n} \end{pmatrix}, \quad (1.8)$$

kde v hlavní diagonále jsou členy G_i . Tyto členy jsou dány součtem všech vodivostí připojených k danému uzlu i . Členy $-g_{ij}$ jsou vodivosti spojující i -tý a j -tý uzel. Na pravé straně jsou generované ztráty a odvod tepla do okolí. [5] Tepelná vodivost větve je dána převrácenou hodnotou tepelného odporu

$$g_{ij} = g_{ji} = \frac{1}{R_{ij}}. \quad (1.9)$$

Existuje také zkrácený zápis maticové rovnice (1.8)

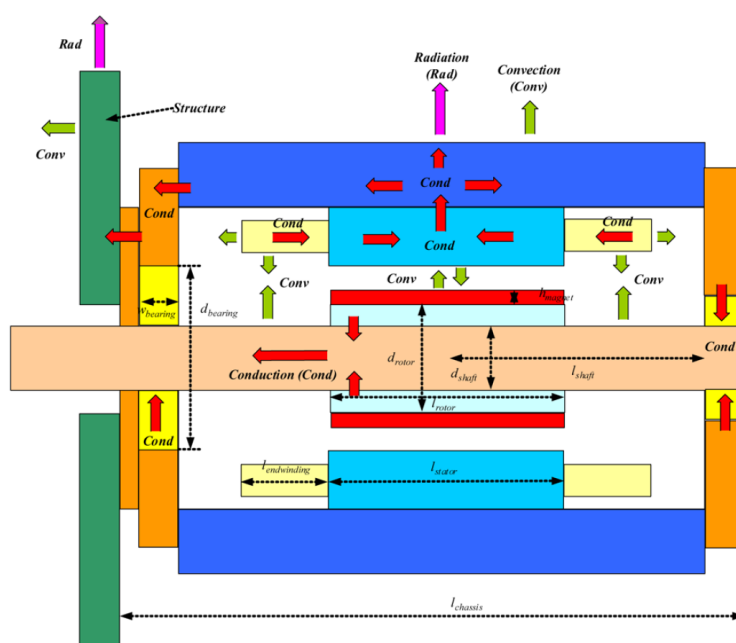
$$\mathbf{G} \times \boldsymbol{\vartheta} = \dot{\mathbf{Q}}, \quad (1.10)$$

kde \mathbf{G} je matice vodivostí, $\boldsymbol{\vartheta}$ je matice neznámých teplot, které chceme zjistit a $\dot{\mathbf{Q}}$ je matice tepelných toků.

2 Rešerše používaných tepelných sítí synchronního motoru s permanentními magnety

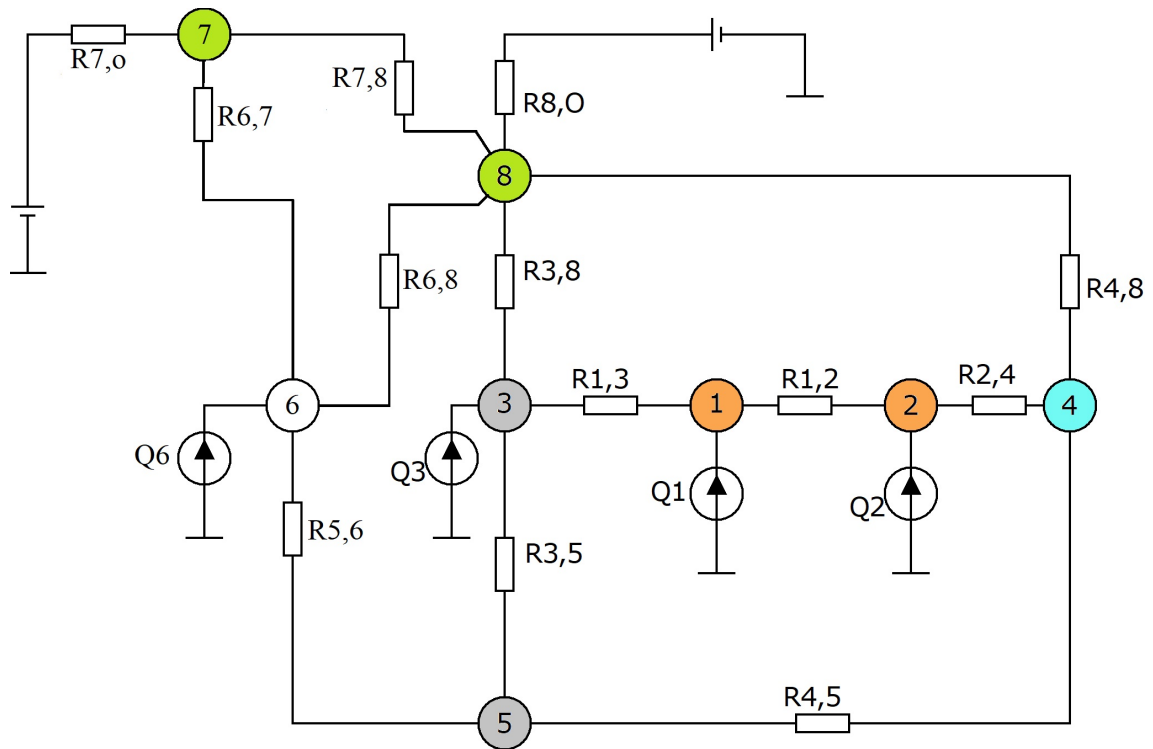
V této kapitole bude ukázáno několik tepelných sítí, kterými lze tepelně modelovat synchronní stroj.

2.1 Jednoduchá tepelná síť synchronního motoru



Obr. 2.1: Synchronní stroj s permanentními magnety na povrchu, převzato z [6].

Následující tepelné schéma z článku [6] na Obr. 2.2, které platí pro synchronní motor s rotorem s magnety na povrchu, je velmi jednoduché. Schéma obsahuje 8 uzlů, 13 tepelných odporů, 4 tepelné zdroje a 2 nory. Motor je symetrický podle axiální i radiální osy, tudíž nám stačí analyzovat pouze čtvrtinu stroje. Tepelná síť na Obr. 2.2 se skládá ze dvou zelených uzlů, které se nachází v kostře stroje a přírubě na štítu motoru. Modrý uzel značí vnitřní vzduch. Oranžové uzly značí vinutí statoru. Stříbrnou barvou je vyznačen magnetický obvod rotoru a statoru a bílou barvou je označen uzel v ložisku.



Obr. 2.2: Tepelná síť synchronního motoru, upraveno z [6].

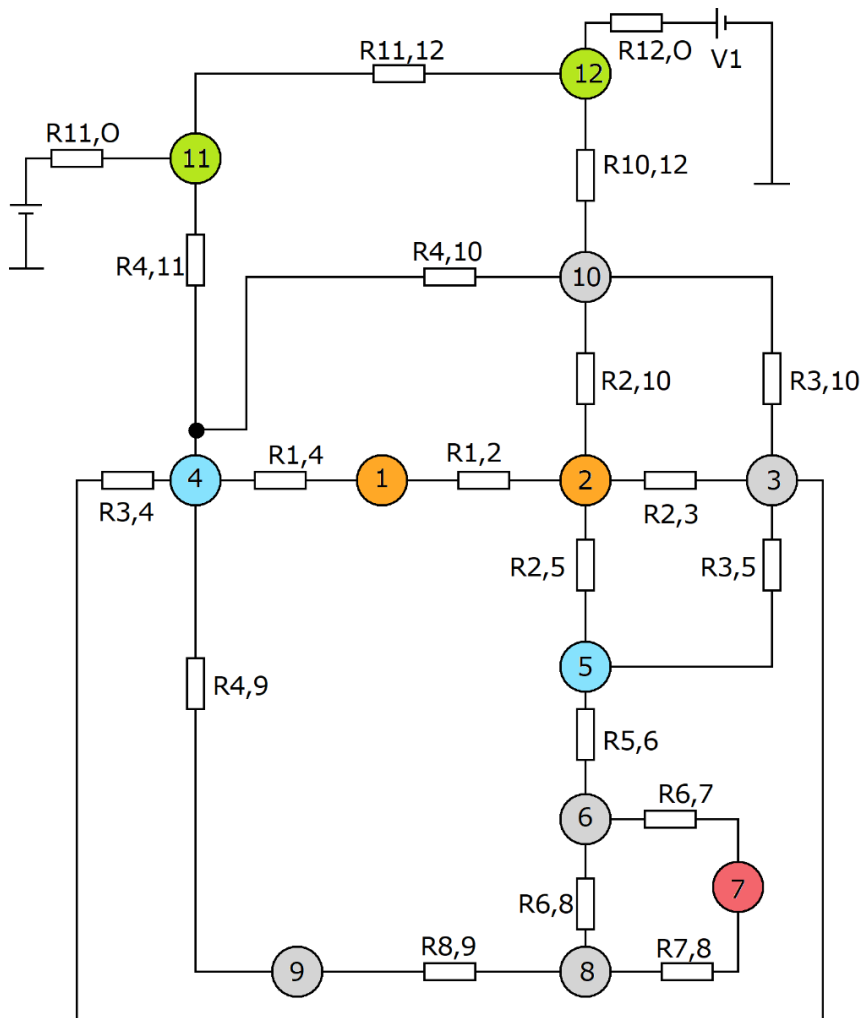
Tab. 2.1: Přiřazení čísel uzlům v tepelné síti.

Číslo uzlu	Uzel	Číslo uzlu	Uzel
1	Vinutí v drážce statoru	5	Rotor
2	Čelo vinutí statoru	6	Ložisko
3	Jho statoru	7	Příruba
4	Vnitřní vzduch	8	Kostra

Toto schéma obsahuje velmi málo uzlů, tudíž matice tepelných odporů bude menší, ale výpočet odporů mezi jednotlivými uzly bude o dost složitější. V této síti například chybí uzel reprezentující střední teplotu zubů statoru. Dále jsou zanedbány ztráty v magnetech a v rotorovém jhu. Tato síť vůbec nepočítá teplotu v permanentním magnetu, což je poměrně choulostivé místo synchronního motoru s permanentními magnety. Výsledná vypočtená střední teplota permanentního magnetu, může mít zásadní vliv na volbu materiálu permanentního magnetu ve stádiu návrhu stroje. Rotor je modelován pouze jedním uzlem.

2.2 Tepelná síť synchronního motoru s vnořenými magnety

Na obrázku 2.3 je vidět tepelná síť motoru s vnořenými magnety a vodním chlazením. Tato síť v článku [7] byla vytvořena pro synchronní motor s rotorem s vnořenými magnety a vodním chlazením.



Obr. 2.3: Druhá tepelná síť synchronního motoru, upraveno z [7].

Tato síť obsahuje 12 uzlů, některé jsou s vnitřními zdroji tepla. Červený uzel je uzel v permanentním magnetu. Stříbrně označeny byly uzly v magnetickém obvodu statoru a rotoru. Modré uzly středních teplot jsou v oblasti vzduchové mezery a vnitřního vzduchu.

Tato síť zanedbává tepelný tok z hřídele přes ložisko do štítu motoru. Oproti předchozí síti je v tomto schématu navíc uzel v zubu statoru, v permanentním magnetu a na povrchu rotoru. Tepelné odpory mezi jednotlivými uzly budou tudíž jednodušší

Tab. 2.2: Přiřazení čísel uzlům v tepelné síti.

Číslo uzlu	Uzel	Číslo uzlu	Uzel
1	Čelo vinutí statoru	7	Permanentní magnety
2	Vinutí v drážce statoru	8	Jho rotoru
3	Zuby statoru	9	Boční plocha rotoru
4	Vnitřní vzduch	10	Jho statoru
5	Vzduchová mezera	11	Ložiskový štít motoru
6	Vrchní jho rotoru	12	Vodní chlazení

pro výpočet. Je zajímavé, že se v této síti uvažuje o tepelném toku tekoucím z vinutí v drážce přímo do vzduchové mezery, jelikož se poměrně často zanedbává, např. v [8], [3], [9]. Tok vedením do zubů a jha statoru má pravděpodobně mnohem větší vliv na odvod tepla z vinutí.

2.3 Další tepelné sítě

V článku [10] byla popsána tepelná síť pro synchronní uzavřený motor chlazený kapalinou s magnety na povrchu. Tato velmi jednoduchá síť obsahuje pouze pět uzlů, reprezentující střední teplotu chladicí kapaliny, statoru, rotoru, ložiskových štítů motoru a kostry motoru. V této síti se zanedbávají stykové odpory dvou pevných těles, neboť jsou dle [10] komplikované na výpočet. V uzlu statoru a rotoru vznikají vnitřní ztráty. Teplo se odvádí pouze vodním chlazením z kostry motoru. Ostatní způsoby odvodu tepla jsou dle [10] zanedbatelné, tudíž se neuvažují.

V článku [11] je znázorněna tepelná síť pro synchronní uzavřený motor chlazený obtékajícím vzduchem s magnety na povrchu. Tato síť se skládá z dvanácti uzlů. V této síti se zanedbává tepelný tok tekoucí z hřídele přes ložiskový štít do kostry.

V článku [12] je znázorněna jednoduchá tepelná síť pro synchronní uzavřený motor s magnety na povrchu. Tato síť se skládá z osmi uzlů. Tento motor má koncentrované vinutí, tudíž čela vinutí nejsou modelována. Vnitřní ztráty se uvažují pouze ve vinutí.

V článku [9] je tepelná síť pro synchronní uzavřený motor chlazený obtékajícím vzduchem s magnety na povrchu. Tato síť je poměrně dost složitá, neboť obsahuje 35 uzlů. Rotorový i statorový svazek je rozdělen na třetiny, což je zbytečně složité dělení, pokud by motor nebyl nesymetricky chlazen zevnitř, například radiálními nebo axiálními ventilačními kanály. Z tohoto schématu, po jistém zjednodušení, vychází i tepelná síť synchronního motoru vyskytující se dále v této práci.

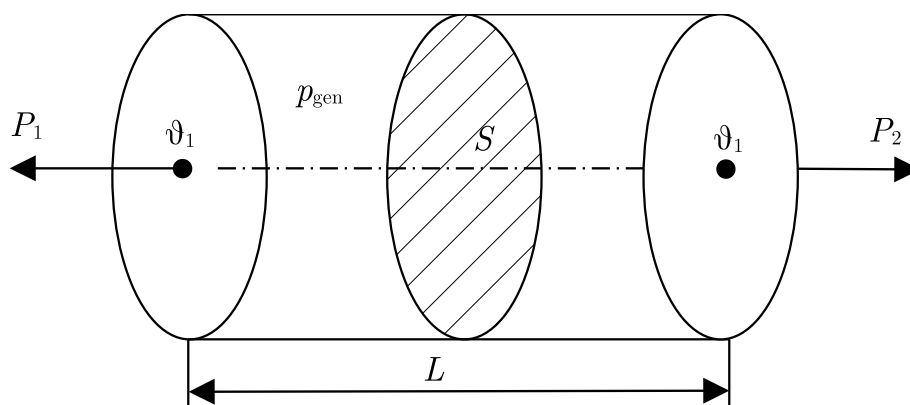
3 Výpočet tepelných odporů

Je nutné rozlišovat vztahy výpočtu odporu pro přenos tepla pomocí vedení nebo proudění. V případě vedení je nutno rozlišovat, zda je v tělese vnitřní zdroj ztrát. Tepelný odpor vedením v tělese, kde nevznikají ztráty, se vypočte dle [13]

$$R = \frac{l}{\lambda \cdot S}, \quad (3.1)$$

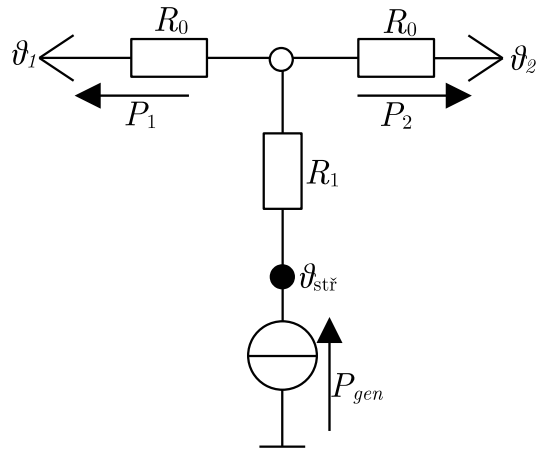
kde l je délka tělesa ve směru šíření tepelného toku, λ je měrná tepelná vodivost ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$), S je průřez (m^2).

3.1 Vedení tepla v tyči se zdrojem ztrát



Obr. 3.1: Tyč se zdrojem vnitřních ztrát, upraveno z [14].

Na obrázku 3.1 je zobrazena kruhová tyč s vnitřním zdrojem tepla. Průřez je kruhový, ale může být libovolný. Pokud bude jiný, tak se pouze změní výpočet průřezu, kterým se teplo odvádí.



Obr. 3.2: Tepelný model tyče se zdrojem vnitřních ztrát, upraveno z [14].

Toto jednoduché těleso lze namodelovat pomocí tepelné sítě, která je znázorněna na obrázku 3.2. Síť má dva uzly. Jeden uzel reprezentuje střední teplotu tělesa a do tohoto uzlu je připojen vnitřní zdroj tepla. Další uzel je tzv. doplňkový a teplota v tomto bodě nemá žádný fyzikální význam, tato metoda ale tento uzel vyžaduje. Pokud jsou v materiálu s konstantním průřezem S o délce L generovány měrné ztráty p_{gen} , které jsou rovnoměrně rozloženy v objemu a jsou nezávislé na teplotě, tak průběh teploty bude parabolický. [14]

Výsledné tepelné odpory se dle [14] vypočítají takto

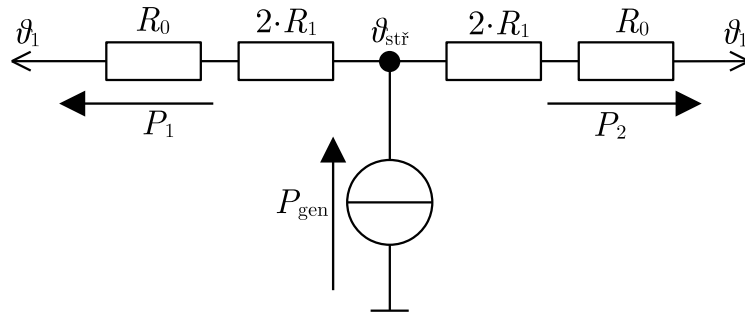
$$R_0 = \frac{L}{2 \cdot \lambda \cdot S} = \frac{R}{2}, \quad (3.2)$$

$$R_1 = -\frac{L}{6 \cdot \lambda \cdot S} = -\frac{R}{6}, \quad (3.3)$$

kde $R = \frac{L}{\lambda \cdot S}$.

3.1.1 Symetrické chlazení

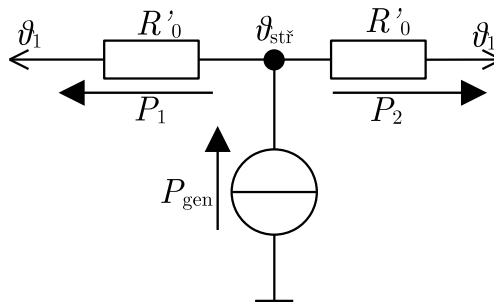
Pokud je stejný odváděný tok do obou konců tyče, tedy $P_1 = P_2$, tak budou v tomto případě i stejné teploty stěn, tedy $\vartheta_1 = \vartheta_2$. Maximální teplota se bude nacházet ve středu tyče. Při symetrickém chlazení lze tepelný model upravit a tepelný odpor R_1 přesunout do dvou vodorovných větví a připojit sériově k odporům R_0 (viz Obr 3.2). Tímto zjednodušením se zbavíme doplňkového uzlu, což je výhodné. Tato úprava nezanášá žádnou chybu.



Obr. 3.3: Tepelný model tyče při symetrickém chlazení, upraveno z [14].

Jak je tedy vidět z obrázku 3.3, tak výsledný tepelný odpor R'_0 mezi uzlem střední teploty a koncovou plochou zjednodušeného modelu na Obr. 3.4 se vypočte takto

$$R'_0 = R_0 + 2 \cdot R_1 = \frac{R}{2} - 2 \cdot \frac{R}{6} = \frac{R}{6} = \frac{L}{6\lambda S}. \quad (3.4)$$

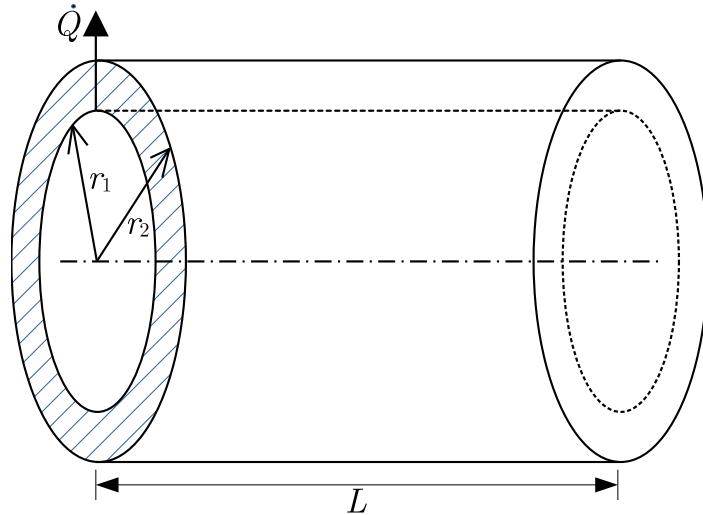


Obr. 3.4: Zjednodušený tepelný model tyče, upraveno z [14].

Tuto zjednodušenou síť lze použít i když se P_1 nerovná P_2 , tedy pokud tato nesymetrie není příliš velká. Pokud jsou tedy podmínky splněny, dává tento model korektní řešení. Pokud nejsou splněny podmínky modelu o rovnosti toků, tak tato síť poskytuje výsledky pouze přibližné, ale často pořád velmi přesné. Kvůli jednoduchosti se tedy používá i při nesplnění podmínek. [14]

3.2 Vedení tepla válcovým mezikružím v radiálním směru

Tepelný tok je kolmý k vzájemné ose válcových mezikruží. Bude řešen výpočet tepelného odporu v radiálním směru přes stěnu mezikruží, tedy od vnitřního poloměru r_1 k vnějšímu poloměru r_2 .



Obr. 3.5: Válcové mezikruží radiálně, upraveno z [14]

V průběhu prostupu tepelného toku se mění průřez, kterým tok protéká, ten se dle [1] vyjádří jako

$$S = 2\pi rL. \quad (3.5)$$

Vzdálenost l , kterou musí tok překonat, je dr . Když l a S dosadíme do vztahu (3.1), tak

$$dR = \frac{dr}{2\pi\lambda rL}. \quad (3.6)$$

Pro výpočet tepelného odporu je nutné rovnici (3.6) integrovat

$$R = \int_{r_1}^{r_2} \frac{1}{2\pi\lambda L} \cdot \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \cdot \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \frac{1}{2\pi\lambda L} \cdot [\ln r]_{r_1}^{r_2} = \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi\lambda L}, \quad (3.7)$$

kde R je tepelný odpor stěny trubky, r je poloměr kruhu, λ je měrná tepelná vodivost stěny a L je délka válcového mezikruží. Pokud v mezikruží vznikají vnitřní ztráty, existuje dle [14] zjednodušené řešení spočívající v pomyslném rozdělení válcového mezikruží na středním poloměru r_m , který se vypočte

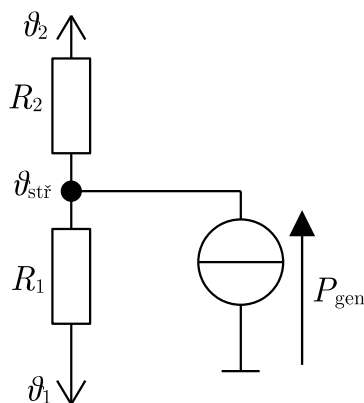
$$r_m = \frac{r_1 + r_2}{2}. \quad (3.8)$$

Pro tyto dvě válcová mezikruží se použijí vztahy platné pro výpočet tepelného odporu mezikružím bez vnitřních ztrát.

Výsledné vztahy pro výpočet tepelných odporů zobrazených v síti na obrázku 3.6 mají dle [14] tvar

$$R_1 = \frac{\ln \frac{r_m}{r_1}}{2\pi\lambda L}, \quad (3.9)$$

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_2}{r_m}}{2\pi\lambda L}. \quad (3.10)$$



Obr. 3.6: Zjednodušená tepelná síť pro radiální vedení tepla válcovým mezikružím, upraveno z [14].

Z rovnice (3.9) dle [15] vychází i výpočet části odporu mezi zuby a jhem statoru.

$$R = \frac{\ln \frac{r_{js,m}}{r_{js}}}{2\pi\lambda L \cdot P_v}, \quad (3.11)$$

kde R je tepelný odpor od paty zubu do středu jha, koeficient P_v je poměr mezi objemem zubů a celkovým objemem, tedy objemem zubů plus drážek, $r_{js,m}$ je poloměr středu jha statoru a r_{js} je vnitřní poloměr jha statoru (rozdělení na zuby a drážky).

3.3 Vedení tepla válcovým mezikružím v axiálním směru

Pokud tepelný tok prochází axiálně válcovým mezikružím, tedy ve směru délky mezikruží, je výpočet výsledného tepelného odporu vedením jednodušší než v předchozím případě.

Jak je vidět z obrázku 3.7, tak se v průběhu vedení tepla od začátku po konec mezikruží nemění průřez.

$$S = \pi(r_2^2 - r_1^2). \quad (3.12)$$

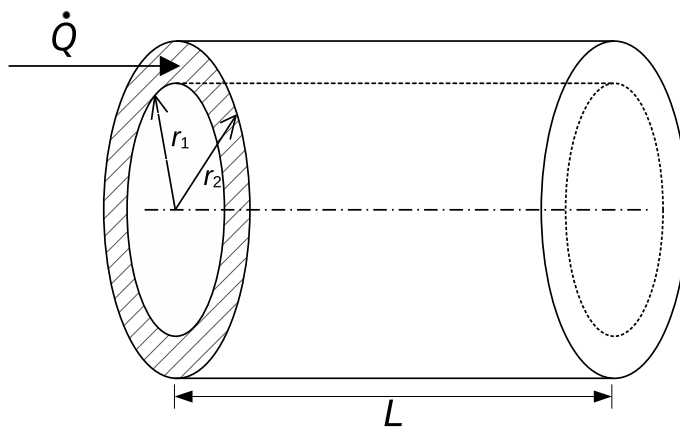
Tepelný odpor se dle [3] vypočte následovně

$$R = \frac{L}{\lambda \cdot \pi(r_2^2 - r_1^2)}, \quad (3.13)$$

kde L je délka mezikruží, r_2 je vnější poloměr mezikruží a r_1 je vnitřní poloměr mezikruží.

Tepelný odpor mezikruží s vnitřními ztrátami je dle [3] třetinový a vypočte se podle rovnice

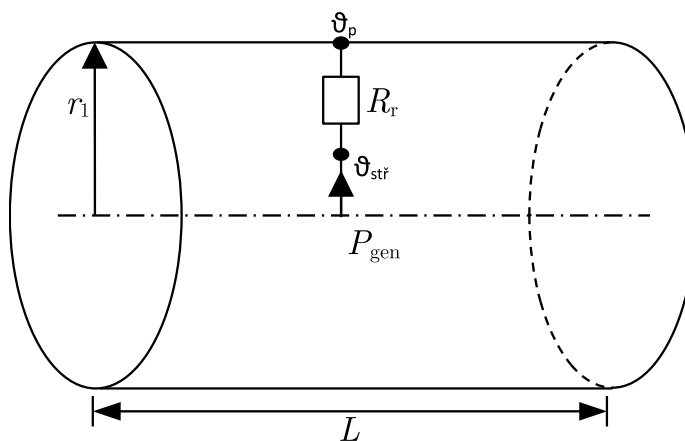
$$R = \frac{L}{3\lambda \cdot \pi(r_2^2 - r_1^2)}. \quad (3.14)$$



Obr. 3.7: Vedení v mezikruží axiálně, upraveno z [14].

3.4 Vedení tepla v plné válcové tyči v radiálním směru s vnitřními ztrátami

V ose tyče je maximální teplota. Průběh teploty má parabolický průběh.

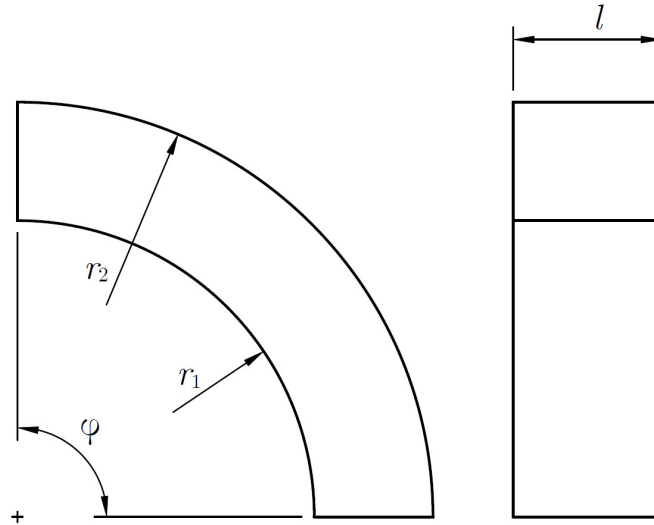


Obr. 3.8: Plná tyč se ztrátami, upraveno z [15].

Tepelný odpor plné tyče v radiálním směru je definován dle [15] jako

$$R = \frac{1}{8\pi\lambda L}. \quad (3.15)$$

3.5 Obvodový tepelný tok v mezikruží



Obr. 3.9: Část mezikruží při obvodovém tepelném toku, upraveno z [8].

Tepelný odpor při obvodovém tepelném toku v mezikruží se vypočítá jinak než při radiálním nebo axiálním toku. Neboť cesta toku tepla je podél středního poloměru. Obvodový tepelný odpor R_c mezikružím se dle [8] vypočítá

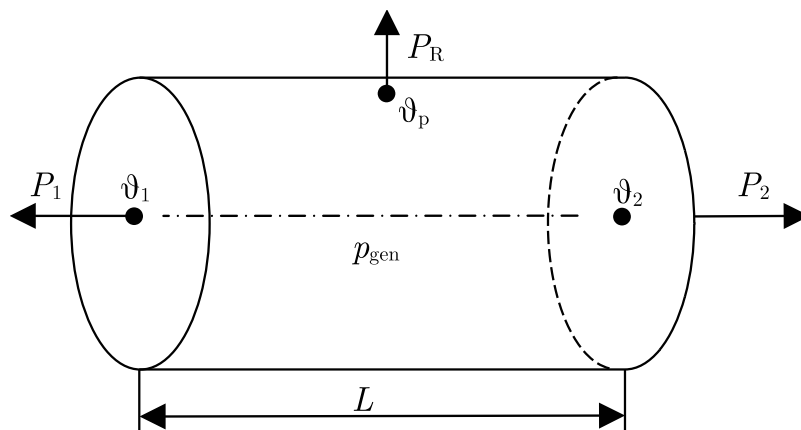
$$R_c = \frac{\varphi_{\text{rad}}}{2\lambda l} \cdot \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1}, \quad (3.16)$$

kde φ_{rad} je úhel (v radiánech) výseče mezikruží, ve kterém je veden tok.

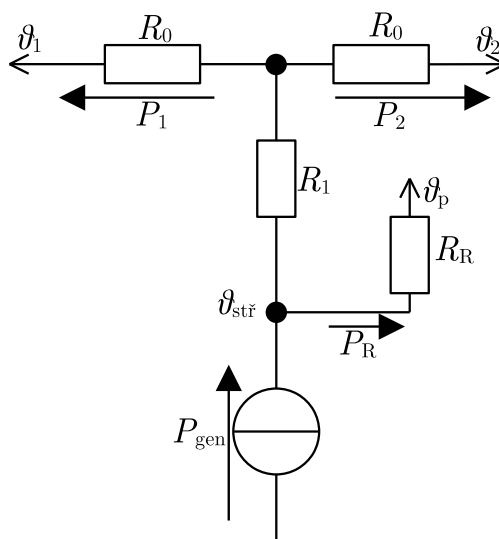
3.6 Vícerozměrné vedení tepla

Zatímco jednorozměrné vedení tepla lze přesně analyticky popsat, tak u vícerozměrného vedení tepla, které se ve stroji vyskytuje častěji, nelze situaci jednoduše analyticky odvodit a popsat, tudíž je přenos tepla popsán jako jednorozměrné vedení tepla v konkrétních směrech a následně jsou modely popisující přenos jednorozměrného tepla spojeny svými uzly středních teplot dohromady. Toto řešení je tedy pouze přibližné, nejedná se o přesné analytické řešení. Tento způsob řešení je ale dostatečně přesný. [14]

Pro lepší vysvětlení bude použita válcová plná tyč (Obr. 3.10), ve které vznikají ztráty a teplo se odvádí bočními stěnami, ale v tomto případě i pláštěm, tedy radiálně. Stejný postup a tepelné schéma bude i v případě, pokud v tyči nebudou vznikat ztráty, neboť při rozdílných teplotách povrchů se bude tělesem uzavírat vícerozměrný tepelný tok. Tuto situaci popisuje tepelná síť, která je na obrázku 3.11.



Obr. 3.10: Tyč při vícerozměrném vedení tepla, upraveno z [14].



Obr. 3.11: Model vícerozměrného vedení tepla v tyči, upraveno z [14].

Kde R_0 a R_1 jsou tepelné odpory pro axiální vedení tepla, které jsou popsány v kapitole 3.1 a R_R je tepelný odpor tyče v radiálním směru a jeho výpočet je popsán v kapitole 3.4.

3.7 Výpočet tepelného odporu prouděním

Odpor přestupu tepla z povrchu do okolí se vypočte dle [13] následovně

$$R = \frac{1}{\alpha \cdot S_p}, \quad (3.17)$$

kde R je tepelný odpor (K/W), α je koeficient přestupu tepla ($\frac{W}{m^2K}$), S_p je povrch plochy (m^2).

3.7.1 Výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře

Součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře výrazně ovlivňuje výslednou teplotu rotoru, protože velká část tepelného toku prochází přes vzduchovou mezeru. Mezi dvěma soustřednými otáčejícími se válci vzniká Taylor-Couettovo toroidní víření. Tyto toroidní víry ovlivňují přenos tepla přes vzduchovou mezeru. Součinitel přestupu tepla můžeme vypočítat pomocí Taylorova čísla, které udává vliv těchto vířivých proudů. Taylorovo číslo popisuje poměr mezi odstředivými a viskózními silami. [1]

$$Ta = \frac{\rho^2 \omega^2 r_{\delta, \text{stř}} \delta^3}{\mu^2}, \quad (3.18)$$

kde ρ je hustota vzduchu ve vzduchové mezeře (kg/m^3), ω je úhlová rychlost rotoru (rad/s), $r_{\delta, \text{stř}}$ je střední poloměr vzduchové mezery (m), δ je tloušťka vzduchové mezery (m) a μ je dynamická viskozita vzduchu v mezeře ($Pa \cdot s$).

Modifikované Taylorovo číslo se vypočte dle [1]

$$Ta_m = \frac{Ta}{F_g}, \quad (3.19)$$

kde F_g je geometrický faktor, který modifikuje Taylorovo číslo kvůli zakřivení vzduchové mezery a vypočte se dle [1] takto

$$F_g = \frac{\pi^4 \frac{2r_{\delta, \text{stř}} - 2,304\delta}{2r_{\delta, \text{stř}} - \delta}}{1697 \left[0,0056 + 0,0571 \left(\frac{2r_{\delta, \text{stř}} - 2,304\delta}{2r_{\delta, \text{stř}} - \delta} \right)^2 \right] \cdot \left(1 - \frac{\delta}{2r_{\delta, \text{stř}}} \right)^2}. \quad (3.20)$$

Obvykle je šířka mezery o dost menší než poloměr rotoru a díky tomu se F_g rovná přibližně jedné.

$$Ta \cong Ta_m \quad (3.21)$$

Součinitel přestupu tepla přes vzduchovou mezeru se dle [1] rovná

$$\alpha_\delta = \frac{Nu \cdot \lambda_v}{\delta}, \quad (3.22)$$

kde λ_v je měrná tepelná vodivost vzduchu ($\frac{W}{m \cdot K}$), δ je tloušťka vzduchové mezery. Nusseltovo číslo se určí z modifikovaného Taylorova čísla dle [1] vztahem

$$\begin{array}{ll}
Nu = 2 & \text{pro } Ta_m < 1700 \text{ (laminární proudění)} \\
Nu = 0.128 \cdot Ta_m^{0.367} & \text{pro } 1700 < Ta_m < 10^4 \\
Nu = 0.409 \cdot Ta_m^{0.241} & \text{pro } 10^4 < Ta_m < 10^7
\end{array}$$

3.7.2 Výpočet součinitele přestupu tepla uvnitř stroje

Součinitele uvnitř stroje se vypočítají podle vztahů v tabulce 3.1, dle [6].

Tab. 3.1: Součinitele přestupu tepla mezi částmi motoru a vnitřním vzduchem [6].

Název oblasti	Vztah pro výpočet
Čelo vinutí	$\alpha_{\check{c},vv} = 6,5 + 5,25^{0,6} u_r^{0,6}$
Statorový paket	$\alpha_{Fes,vv}$
Ložiskové štíty	$\alpha_{LS,vv} = 15 + 6,75^{0,65} u_r^{0,65}$
Hřídel	$\alpha_{h,vv}$
Kostra	$\alpha_{k,vv}$
Rotorové kruhy	$\alpha_{rk,vv} = 16,5 \cdot u_r^{0,65}$

u_r (m/s) v tabulce 3.1 je obvodová rychlost rotoru.

3.7.3 Výpočet součinitele stykového odporu

Jestliže se dva materiály dotýkají, vzniká na jejich rozhraní tepelný odpor, který je způsoben nedokonalostí povrchů. Velikost tohoto odporu je dána plochou styku S a součinitelem stykového odporu α_{st} . Ten vyjadřuje, jak velký tepelný tok přenese jednotková plocha při rozdílu 1 K. Velikost součinitele je závislá na drsnosti povrchů. Stykový odpor lze modelovat pomocí ekvivalentní vzduchové mezery, která vzniká kvůli drsnosti povrchu. [1]

Stykový odpor pomocí ekvivalentní vzduchové vrstvy se vypočte dle [1] takto

$$R = \frac{l_{ekv}}{\lambda_v \cdot S}, \quad (3.23)$$

kde l_{ekv} je tloušťka ekvivalentní vrstvy vzduchu, λ_v je koeficient tepelné vodivosti vzduchu a S je plocha. Určení těchto stykových koeficientů je velmi složité a jsou určovány převážně měřením. Tyto koeficienty určují přenos tepla ve stroji a abychom byli schopni tento přenos vypočítat, tak musíme znát určité empirické hodnoty tepelných součinitelů přestupu tepla. [1]

Tyto koeficienty jsou dle [1] v tabulce 3.2.

Tab. 3.2: Velikosti stykových součinitelů odporu pro různé povrchy, převzato z [1].

Druh styku	Ekvivalentní vzd. vrstva (mm)	α_{st} (W/(m ² · K))
Stat. vinutí – jho	0,1-0,3	80–250
Kostra (Al) – jho	0,03-0,04	650–870
Kostra (ocel) – jho	0,05-0,08	350–550
Rot. tyč – rot. jho	0,01-0,06	430–2600

3.8 Výpočet ekvivalentní tepelné vodivosti vinutí

Při výpočtu tepelného odporu mezi vinutím statoru a magnetickým obvodem statoru, je nutno vyjádřit ekvivalentní tepelnou vodivost vinutí v příčném směru oproti směru vodičů, protože se střídají vodiče s vysokou tepelnou vodivostí a izolace s velmi nízkou tepelnou vodivostí, a u kruhových vodičů i mezery mezi vodiči. [16] Výsledná tepelná vodivost vinutí se většinou zlepšuje vakuovou impregnací, neboť impregnační lak má větší tepelnou vodivost než vzduch a nahradí vzduchové mezery mezi vodiči.

Neprve je nutno určit činitel plnění mědi $K_{f,cu}$, což je poměr průřezu čisté mědi v drážce a dostupné plochy v drážce a vypočte se dle [17]

$$K_{f,cu} = \frac{\pi d_v^2 \cdot N_{dr}}{4 \cdot S_{dr,vin}}, \quad (3.24)$$

kde d_v je průměr jednoho vodiče v drážce bez izolace, N_{dr} je celkový počet vodičů v drážce a $S_{dr,vin}$ je užitná plocha drážky a vypočte se dle [17]

$$S_{dr,vin} = S_{dr} - t_{di} \cdot o_{di}, \quad (3.25)$$

kde S_{dr} je plocha drážky, t_{di} je tloušťka drážkové izolace a o_{di} je obvod drážkové izolace. Ekvivalentní tepelná vodivost vodičů a jejich izolací se dle [17] vypočte

$$\lambda_{vi} = \lambda_{iz} \frac{\lambda_v(1 + \kappa) + \lambda_{iz}(1 - \kappa)}{\lambda_v(1 - \kappa) + \lambda_{iz}(1 + \kappa)}, \quad (3.26)$$

kde λ_{iz} tepelná vodivost izolace vodičů, λ_v je tepelná vodivost vodičů a κ je poměr průřezu čistého vodiče a průřezu vodiče i s izolací a vypočte se

$$\kappa = \frac{d_v^2}{d_{v,iz}^2}, \quad (3.27)$$

kde $d_{v,iz}$ je průměr vodiče v drážce i s izolací. Následně lze vypočítat ekvivalentní tepelnou vodivost vinutí v příčném směru, která se dle [17] vypočte

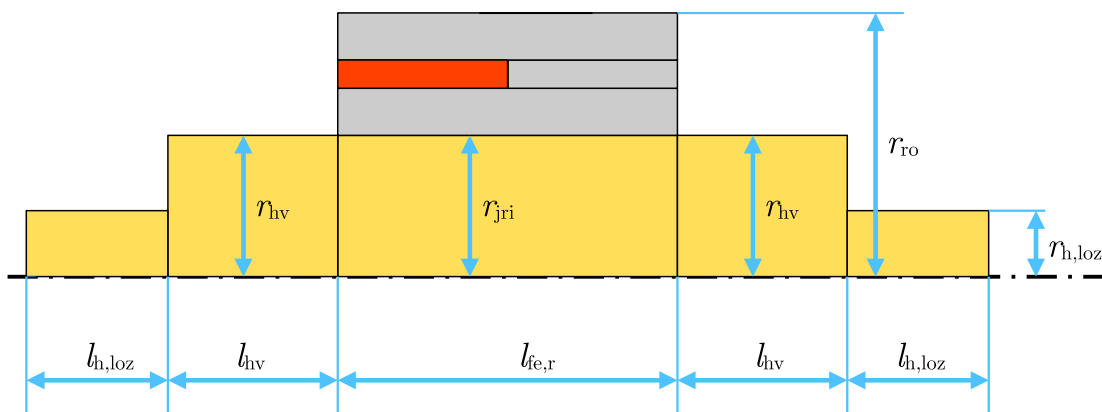
$$\lambda_{ekv} = \lambda_{imp} \frac{\lambda_{vi}(1 + K_{f,cu}) + \lambda_{imp}(1 - K_{f,cu})}{\lambda_{vi}(1 - K_{f,cu}) + \lambda_{imp}(1 + K_{f,cu})}, \quad (3.28)$$

kde λ_{imp} je měrná tepelná vodivost impregnace.

4 Rozměry stroje a jeho částí

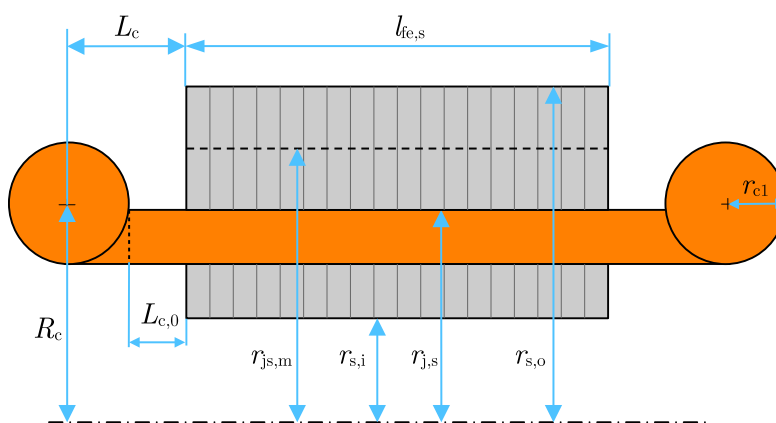
4.1 Rozměry rotoru s vnořenými magnety i s magnety na povrchu

Na obrázku 4.1 jsou znázorněny jednotlivé rozměry rotoru. Tyto rozměry platí pro rotor s vnořenými magnety i pro rotor s magnety na povrchu.



Obr. 4.1: Rozměry rotoru.

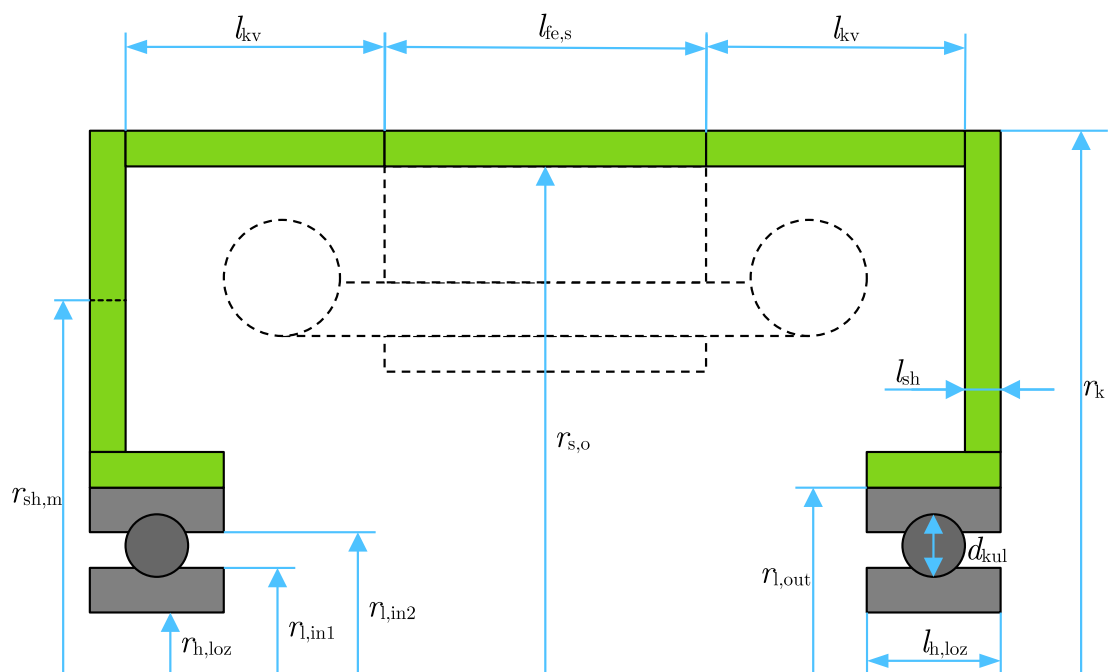
4.2 Rozměry statoru



Obr. 4.2: Rozměry statoru.

Na obrázku 4.2 jsou vidět rozměry statoru, které vstupují do výpočtů. Plechy jsou pomyslně rozděleny na jho a zuby.

4.3 Rozměry kostry



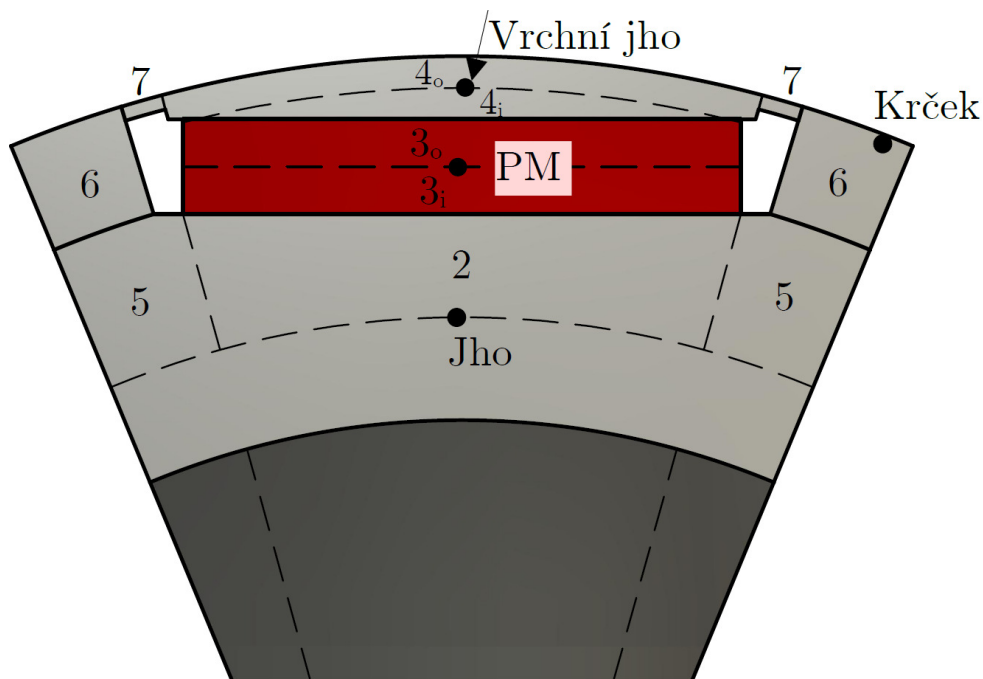
Obr. 4.3: Rozměry kostry motoru.

5 Modely částí synchronního stroje

V této kapitole je popsán postup vytvoření tepelné sítě rotoru a výpočet jednotlivých odporů mezi jednotlivými pomyslně rozdělenými částmi rotoru s vnořenými magnety a rotoru s magnety na povrchu (SMPM). Je ukázána tepelná síť statoru. Dále je pomocí FEM (Finite element method-metoda konečných prvků) programu provedeno ověření výsledných středních teplot, které dávají tyto sítě v jednotlivých částech.

5.1 Rotor s vnořenými permanentními magnety

Tento model vychází z tvarů a rozměrů rotoru použitého v první generaci Toyota Prius dle [18], [19] a [20]. Kvůli nedostatku zdrojů jsou ale některé rozměry a tvary odhadnuty nebo upraveny.



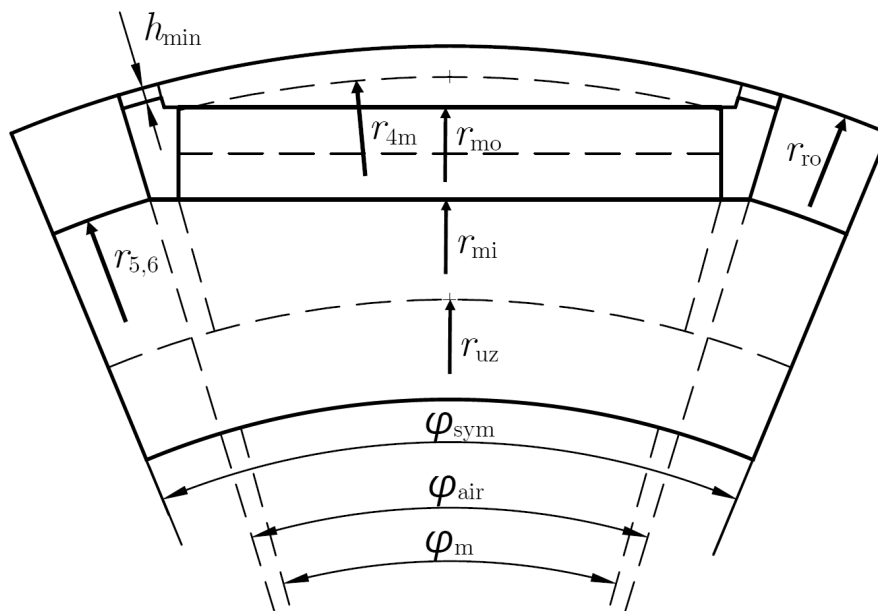
Obr. 5.1: Rozdělení rotoru na jednotlivé části.

Na obrázku 5.1 je vidět část rotoru s vnořenými magnety osmipólového stroje, který je pomyslně rozdělen na jednotlivé jednoduché geometrické tvary, mezi kterými lze jednoduše vypočítat tepelné odpory. Protože má rotor 8 pólů a je rotačně symetrický, lze řešit pouze 1/16 rotoru, ale pro větší přehlednost se bude řešit jedna osmina. Počet os symetrie se tedy rovná osmi. Výsledné vypočtené odpory se tedy vydělí počtem os symetrie. Tmavě šedá část je hřídel. Osmina hřídele není na obrázku celá, protože by obrázek byl příliš velký. Dále se na obrázku 5.1 vyskytují

uzly, ve kterých nás bude zajímat střední teplota. Tyto čtyři uzly se budou po zbytek práce vyskytovat ve schématech a výsledcích. V tabulce 5.1 jsou těmto uzlům přiřazeny čísla, která budou představovat tyto uzly po zbytek práce.

Tab. 5.1: Přiřazení čísel uzlům rotoru a okolí.

Uzel	Číslo uzlu
Jho	11
Krček	12
Permanentní magnet	13
Vrchní jho	14
Vzduchová mezera	15



Obr. 5.2: Rozměry rotoru s vnořenými magnety.

Na obrázku 5.2 jsou vidět důležité rozměry rotoru, které vstupují do výpočtu odporů mezi jednotlivými částmi rotoru.

5.1.1 Výpočet tepelných odporů v rotoru

Při výpočtu je nutné rotor rozdělit na jednoduché geometrické tvary. Analytický výpočet tepelných odporů přes tato tělesa by byl velmi složitý, ne-li nemožný, tudíž ve vzorci je již zavedeno geometrické zjednodušení. Například v oblasti 2 se uvažuje, že se jedná o mezikruží bez zkosení pro permanentní magnet. Dále je nutno podotknout, že ve výpočtu není uvažováno vícerozměrné vedení tepla, ale jen jednorozměrné, protože by byl výpočet příliš komplikovaný. Vedení tepla v axiálním

směru je řešeno separátně, což určitě zanáší chybu, její velikost je ale technicky přípustná.

Radiální tepelný odpor R_2 přes část 2 se dle [8] vypočte

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_{mi}}{r_{uz}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{360^\circ}{\varphi_m}. \quad (5.1)$$

Tepelný odpor od konce jha k uzlu permanentního magnetu R_{3i} se dle [8] vypočte

$$R_{3i} = \frac{h_{PM}}{6 \cdot \lambda_{PM} b_{PM} l_{fe,r}}, \quad (5.2)$$

kde b_{PM} je šířka permanentního magnetu (tangenciální směr) a h_{PM} je výška magnetu (radiální směr).

Tepelný odpor R_{3o} z uzlu permanentního magnetu na vnější povrch magnetu se vypočte

$$R_{3o} = \frac{h_{PM}}{6 \cdot \lambda_{PM} b_{PM} l_{fe,r}}, \quad (5.3)$$

kde 6 ve jmenovateli je z důvodu, že tok teče pouze přes polovinu výšky magnetu a v tělese vznikají ztráty.

Ve výpočtu tepelného odporu R_{4i} mezi magnetem a středem vrchního jha je také zavedeno zjednodušení tvaru a vypočte se dle [8]

$$R_{4i} = \frac{\ln \frac{r_{4m}}{r_{mi}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{360^\circ}{\varphi_{air}}. \quad (5.4)$$

Tepelný odpor R_{4o} ze středu vrchního jha k poloměru rotoru se vypočte dle [8]

$$R_{4o} = \frac{\ln \frac{r_{ro}}{r_{4m}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{360^\circ}{\varphi_{air}}. \quad (5.5)$$

Tepelný odpor R_5 z poloměru uzlu jha přes jednu oblast 5 se vypočte dle [8]

$$R_5 = \frac{\ln \frac{r_{5,6}}{r_{uz}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{2 \cdot 360^\circ}{\varphi_{sym} - \varphi_m}. \quad (5.6)$$

Tepelný odpor R_6 z poloměru $r_{5,6}$ přes jeden krček (oblast 6) se vypočte dle [8]

$$R_6 = \frac{\ln \frac{r_{ro}}{r_{5,6}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{2 \cdot 360^\circ}{\varphi_{sym} - \varphi_{air}}. \quad (5.7)$$

Nyní je nutno vypočítat obvodové tepelné odpory, protože se teplo šíří v tangenciálním směru. Jedná se o oblast vrchního jha (4) a můstku spojujícího vrchní jho s krčkem (7), viz Obr 5.1. Do následujících dvou vztahů je již nutno úhly zadávat v radiánech. Jednotky se totiž již nevykrátí, jako je to ve výpočtech výše, které

jsou pro jednoduchost a přehlednost ve stupních, ale lze do nich samozřejmě dosadit i úhel v radiánech.

Při výpočtu odporu R_{4c} je zavedeno další zjednodušení a uvažuje se, že tepelný tok teče konstantním průřezem. Obvodový tepelný odpor R_{4c} z rozhraní 4-7 přes celou oblast 4 se vypočte dle [8]

$$R_{4c} = \frac{\varphi_{\text{air,rad}}}{2\lambda_{\text{fe,r}}K_{\text{fe,r}} \cdot l_{\text{fe,r}}} \cdot \frac{r_{\text{ro}} + r_{\text{mo}}}{r_{\text{ro}} - r_{\text{mo}}}. \quad (5.8)$$

Obvodový tepelný odpor R_{7c} přes jednu oblast 7 se vypočte dle [8]

$$R_{7c} = \frac{\varphi_{\text{air,rad}} - \varphi_{\text{m,rad}}}{4 \cdot \lambda_{\text{fe,r}}K_{\text{fe,r}} \cdot l_{\text{fe,r}}} \cdot \frac{2r_{\text{ro}} - h_{\text{min}}}{h_{\text{min}}}. \quad (5.9)$$

Nyní je ještě potřeba vypočítat tepelný odpor lepidla permanentního magnetu. Lepidlo se nachází z obou stran PM (Permanentní magnet), neboť zlepšuje pevnost a zároveň funguje jako teplovodivá pasta, která má sice malou tepelnou vodivost, ale o dost větší tepelnou vodivost než vzduch a vyplní mikroskopické mezery.

$$R_{\text{lep}} = \frac{1}{\alpha_{\text{lep}} \cdot l_{\text{fe,r}} \cdot b_{\text{PM}}}, \quad (5.10)$$

kde $l_{\text{fe,r}}$ je délka svazku rotoru, b_{PM} je šířka permanentního magnetu a α_{lep} je součinitel přestupu tepla a vypočte se

$$\alpha_{\text{lep}} = \frac{\lambda_{\text{lep}}}{h_{\text{lep}}}, \quad (5.11)$$

kde λ_{lep} je tepelná vodivost lepidla, která se pohybuje okolo $0,8 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ a h_{lep} je výška vrstvy lepidla.

5.1.2 Podřadná tepelná síť s dílčími odpory

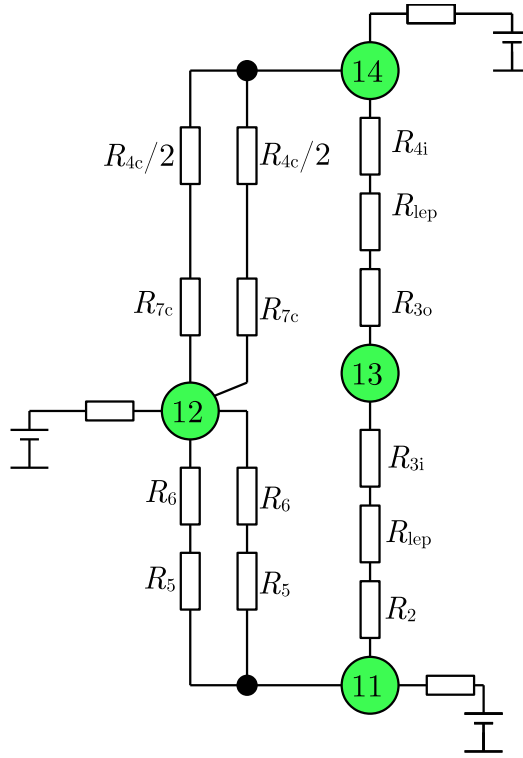
Tato síť zobrazená na Obr. 5.3 slouží pouze pro výpočet hlavních tepelných odporů mezi uzly se středními teplotami, které nás zajímají. V této síti se vyskytují pouze tepelné odpory jednotlivých částí rotoru, které byly vytvořeny pomyslným rozdělením a jsou vypočtené výše. Je nutno si při výpočtu tepelných odporů uvědomit, že tato síť znázorňuje pouze jednu osminu stroje. Následující vztahy už platí pro celý rotor.

Tepelný odpor mezi uzlem jha a krčkem se dle [8] vypočte (viz Obr. 5.3) takto

$$R_{11,12} = \frac{R_5 + R_6}{2 \cdot n_{\text{os,sym}}}, \quad (5.12)$$

kde $n_{\text{os,sym}}$ je počet rotačních os symetrie rotoru, v tomto případě tedy 8. Tepelný odpor mezi uzlem jha a magnetem se dle [8] vypočte

$$R_{11,13} = \frac{R_2 + R_{3i} + R_{\text{lep}}}{n_{\text{os,sym}}}. \quad (5.13)$$



Obr. 5.3: Tepelná podsít rotoru s vnořenými magnety. Upraveno z [8].

Tepelný odpor mezi krčkem a vrchním jhem se dle [8] vypočte

$$R_{12,14} = \frac{\frac{R_{4c}}{2} + R_{7c}}{2 \cdot n_{os,sym}}. \quad (5.14)$$

Tepelný odpor mezi permanentním magnetem a vrchním jhem se dle [8] vypočte

$$R_{13,14} = \frac{R_{3o} + R_{lep} + R_{4i}}{n_{os,sym}}. \quad (5.15)$$

Tepelný odpor mezi vrchním jhem a vzduchovou mezerou se vypočte takto

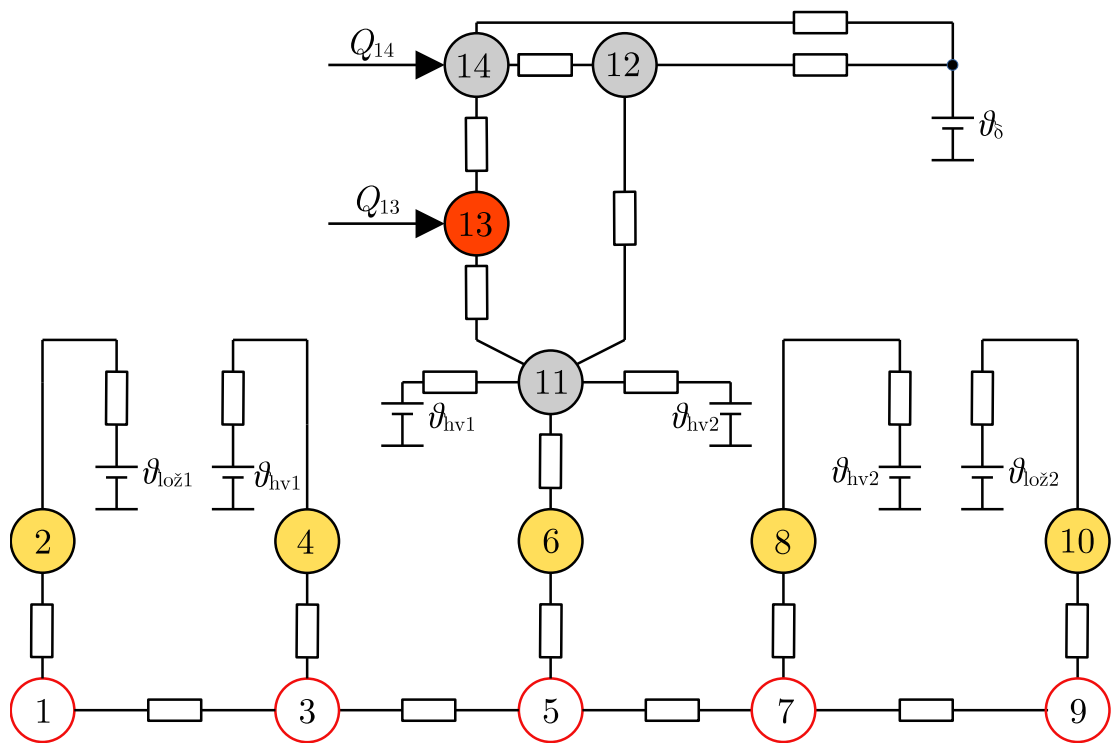
$$R_{14,15} = \frac{R_{4o}}{n_{os,sym}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot 2\pi r_{ro} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{\varphi_{sym}}{\varphi_m}, \quad (5.16)$$

kde α_{δ} je součinitel přestupu tepla ve vzduchové mezeře, který je popsán výše.

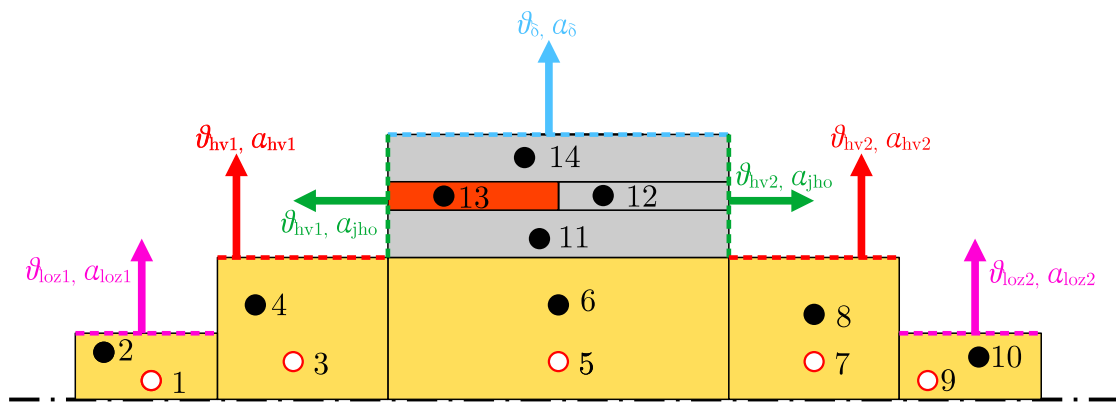
Tepelný odpor mezi krčkem a vzduchovou mezerou se vypočte velmi podobně

$$R_{12,15} = \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot 2\pi r_{ro} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{\varphi_{sym}}{\varphi_{sym} - \varphi_m}. \quad (5.17)$$

5.1.3 Tepelná síť rotoru s vnořenými magnety



(a)



(b)

Obr. 5.4: (a) Výsledná tepelná síť rotoru s vnořenými magnety. (b) Rozmístění uzlů v rotoru a vyznačení okrajových podmínek.

Na obrázku 5.4 je vidět tepelná síť rotoru a rozmístění uzlů v rotoru. Červeně ohraničené uzly znázorňují doplňkové uzly, které jsou rozmístěny v hřídeli. Tyto uzly jsou potřebné kvůli vícerozměrnému šíření tepla. Doplňkové uzly ve zbytku rotoru byly eliminovány, neboť bylo zavedeno zjednodušení popsané výše v kapitole 3.1.1, tedy, že tepelný tok je na obě strany stejně velký. Mezi uzly je ve skutečnosti více odporů zapojených do série. V uzlech 13 a 14 vznikají vnitřní ztráty, což je naznačeno šipkami, které vedou do uzlů.

Tepelný odpor mezi uzly 1 a 2 se vypočte

$$R_{1,2} = R_{1a,1}, \quad (5.18)$$

kde $R_{1a,1}$ je tepelný odpor připojený k uzlu 1 v axiálním směru a vypočte se dle [14] takto

$$R_{1a,1} = -\frac{l_{h,loz}}{6 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{h,loz}^2}. \quad (5.19)$$

Tepelný odpor mezi uzly 1 a 3 se vypočte

$$R_{1,3} = R_{0a,1} + R_{0a,3} = \frac{l_{h,loz}}{2 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{h,loz}^2} + \frac{l_{hv}}{2 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{hv}^2}. \quad (5.20)$$

Ostatní odpory v hřídeli se počítají stejným způsobem, pouze se zaměňuje délka a poloměr v dané části hřídele.

Tepelný odpor mezi uzlem hřídele (6) a uzlem jha (11) a vypočte se

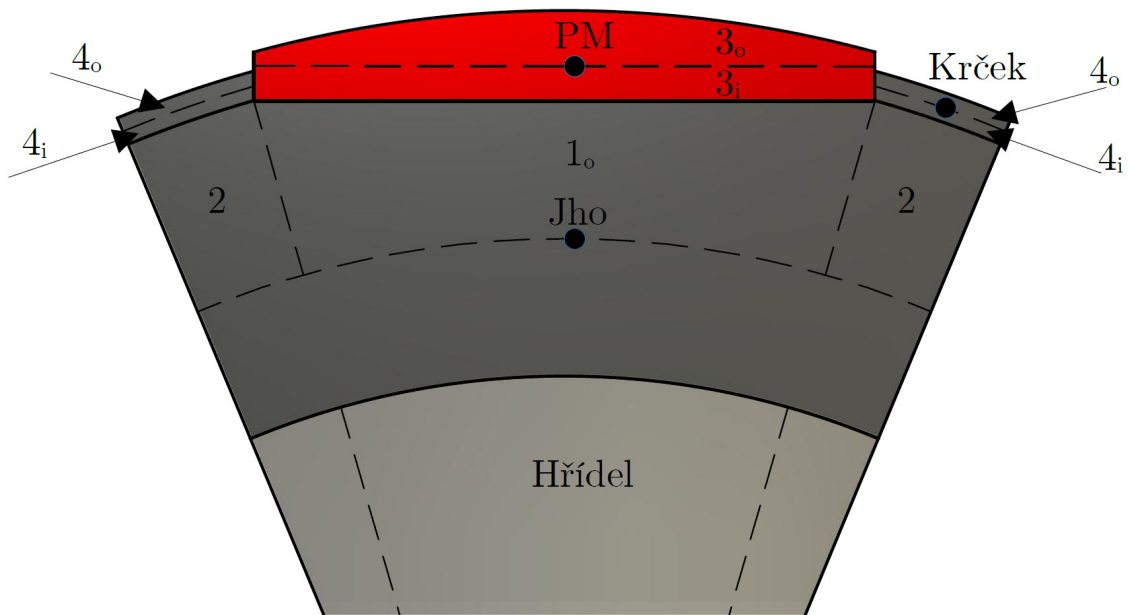
$$R_{6,11} = R_{rad,h} + R_{st,jh} + R_{j,h} = \frac{1}{8\pi\lambda_h \cdot l_{fe,r}} + \frac{1}{\alpha_{st,jh} \cdot 2\pi r_{jri} \cdot l_{fe,r}} + \frac{\ln \frac{r_{uz}}{r_{jri}}}{2\pi\lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}}, \quad (5.21)$$

kde $\alpha_{st,jh}$ je součinitel stykového odporu. Odpor mezi uzlem 2 a teplotou okrajové podmínky $R_{2,o}$ se vypočítá takto

$$R_{2,o} = R_{r,h,loz1} + R_{k,lož1} = \frac{1}{8\pi\lambda_h \cdot l_{h,lož}} + \frac{1}{\alpha_{lož1} \cdot 2\pi r_{h,lož} \cdot l_{h,lož}}. \quad (5.22)$$

Ostatní tepelné odpory do okolních teplot se vypočtou velmi podobně.

5.2 Rotor s magnety na povrchu (SMPM)



Obr. 5.5: Rozdělení SMPM rotoru na jednotlivé části.

Na obrázku 5.5 je znázorněna osmina rotoru s magnety na povrchu. Rotor je rozdělen na několik částí, podobně jako u předchozího rotoru. Na obrázku jsou vidět uzly jha, krčku a permanentního magnetu.

Tab. 5.2: Přiřazení čísel uzlům SMPM rotoru a okolí.

Uzel	Číslo uzlu
Jho	9
Permanentní magnet	10
Krček	11
Vzduchová mezera	15

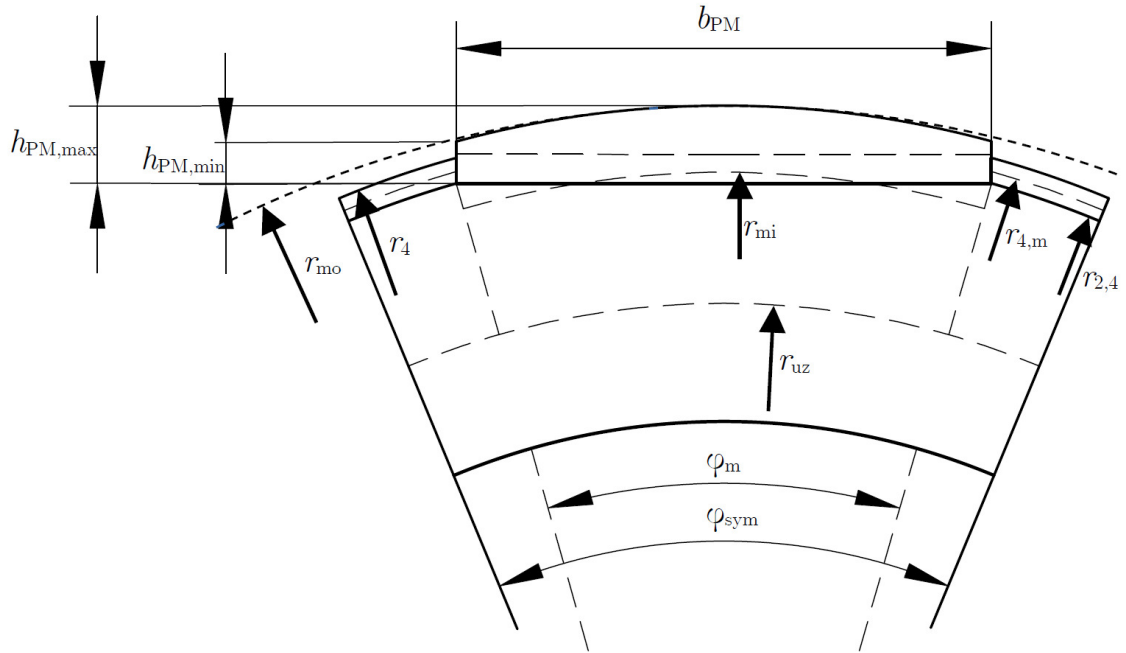
Na obrázku 5.6 jsou vidět důležité rozměry rotoru s magnety na povrchu, které jsou potřebné pro výpočet tepelných odporů jednotlivých částí rotoru.

5.2.1 Výpočet dílčích tepelných odporů

Tepelný odpor R_{1o} v radiálním směru přes oblast 1_o se vypočte

$$R_{1o} = \frac{\ln \frac{r_{mi}}{r_{uz}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{360^\circ}{\varphi_m}, \quad (5.23)$$

kde r_{mi} je vnitřní poloměr magnetu, který je mírně zvětšený, aby tepelný model více odpovídal realitě (viz obr. 5.6).



Obr. 5.6: Rozměry SMPM rotoru.

Tepelný odpor R_2 z poloměru uzlu jha přes jednu oblast 2 se vypočte takto

$$R_2 = \frac{\ln \frac{r_{2,4}}{r_{uz}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{720^\circ}{\varphi_{sym} - \varphi_m}. \quad (5.24)$$

Pro výpočet tepelného odporu R_{3i} a R_{3o} nahradíme magnet kvádrem o střední výšce a odpor R_{3i} se tedy vypočte takto

$$R_{3i} = R_{3o} = \frac{h_{PM,m}}{6 \cdot \lambda_{PM} b_{PM} l_{fe,r}}, \quad (5.25)$$

kde $h_{PM,m}$ je střední výška magnetu a vypočte se

$$h_{PM,m} = \frac{h_{PM,max} + h_{PM,min}}{2}. \quad (5.26)$$

Tepelný odpor R_{4i} z poloměru $r_{2,4}$ k uzlu v krčku se vypočte

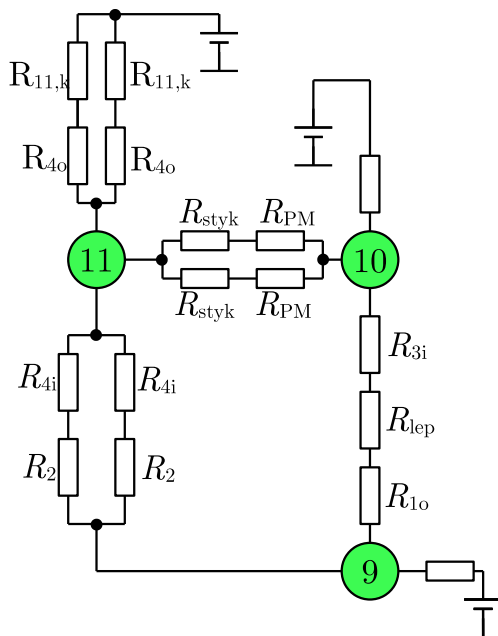
$$R_{4i} = \frac{\ln \frac{r_{4,m}}{r_{2,4}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{720^\circ}{\varphi_{sym} - \varphi_m}. \quad (5.27)$$

Tepelný odpor R_{4o} od uzlu v krčku k povrchu krčku se vypočte

$$R_{4o} = \frac{\ln \frac{r_4}{r_{4,m}}}{2\pi \lambda_{fe,r} K_{fe,r} \cdot l_{fe,r}} \cdot \frac{720^\circ}{\varphi_{sym} - \varphi_m}. \quad (5.28)$$

5.2.2 Podřadná tepelná síť

Tato síť slouží pouze k určení tepelných odporů mezi uzly středních teplot, tedy uzlem jha, krčku a permanentního magnetu. Je nutno si při výpočtu tepelných odporů uvědomit, že tato síť znázorňuje pouze jednu osminu stroje. Následující vypočtené odpory platí již pro celý rotor.



Obr. 5.7: Tepelná podsíť SMPM rotoru.

Tepelný odpor mezi uzlem jha a krčkem se vypočte (viz. Obr 5.7) takto

$$R_{9,11} = \frac{R_2 + R_{4i}}{2 \cdot n_{os,sym}}. \quad (5.29)$$

Tepelný odpor mezi uzlem jha a magnetem se vypočte

$$R_{9,10} = \frac{R_{1o} + R_{lep} + R_{3i}}{n_{os,sym}}, \quad (5.30)$$

kde R_{lep} tepelný odpor vrstvy lepidla je popsán výše.

Při výpočtu tepelného odporu $R_{10,11}$ mezi permanentním magnetem a krčkem se zanedbal obvodový tepelný odpor v krčku, protože je dráha poměrně krátká a tepelný odpor magnetu převažuje a odpor $R_{10,11}$ se tedy vypočte

$$R_{10,11} = \frac{R_{styk} + R_{PM}}{2 \cdot n_{os,sym}}, \quad (5.31)$$

kde R_{styk} je tepelný odpor přechodu magnetu a krčku. V tomto případě je uvažováno, že mezi těmito částmi bude také lepidlo. Budeme pro zjednodušení uvažovat,

že styková plocha je o výšce celého boku PM.

$$R_{\text{styk}} = \frac{1}{\alpha_{\text{lep}} \cdot l_{\text{fe}} \cdot h_{\text{PM,min}}}. \quad (5.32)$$

Tepelný odpor R_{PM} přes polovinu šířky magnetu v rovnici (5.31) se vypočte takto

$$R_{\text{PM}} = \frac{b_{\text{PM}}}{6 \cdot \lambda_{\text{PM}} h_{\text{PM,m}} l_{\text{fe,r}}}. \quad (5.33)$$

Tepelný odpor mezi PM a vzduchovou mezerou se vypočte

$$R_{11,15} = \frac{R_{3o}}{n_{\text{os,sym}}} + \frac{1}{\alpha_{\delta} \cdot S_{\text{PM}} \cdot n_{\text{os,sym}}}, \quad (5.34)$$

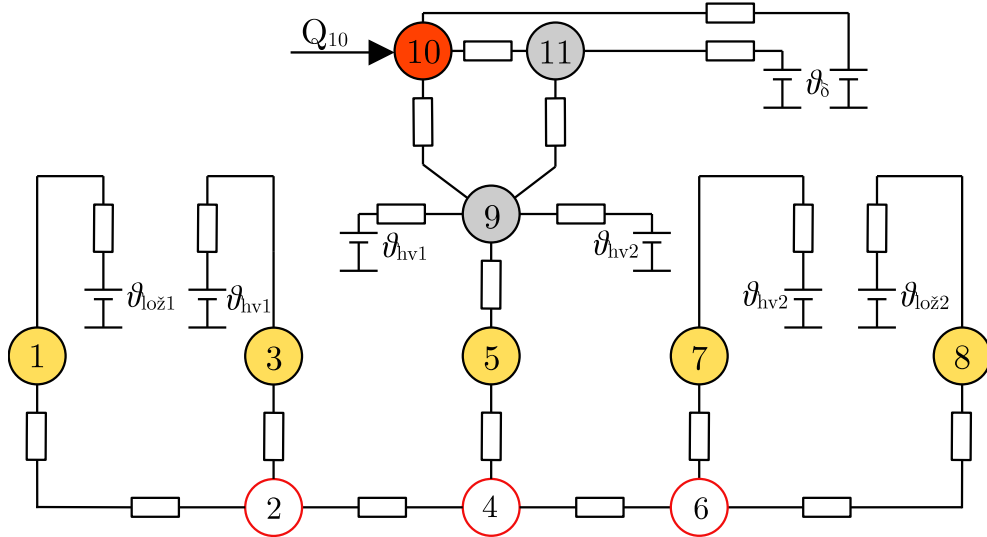
kde S_{PM} je povrch permanentního magnetu směrem do mezery.

Tepelný odpor $R_{11,15}$ z krčku do vzduchové mezery se vypočte

$$R_{11,15} = \frac{R_{4o}}{2 \cdot n_{\text{os,sym}}} + \frac{1}{2 \cdot \alpha_{\delta} \cdot S_{\text{kr}} \cdot n_{\text{os,sym}}}, \quad (5.35)$$

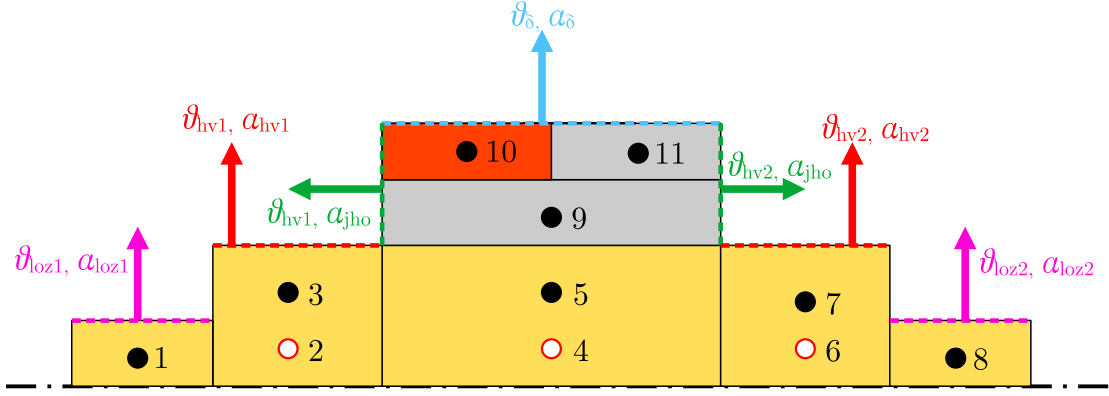
kde S_{kr} je povrch jednoho krčku do vzduchové mezery.

5.2.3 Tepelná síť SMPM rotoru



Obr. 5.8: Tepelná síť SMPM rotoru.

Na obrázku 5.8 je vidět tepelná síť SMPM rotoru. Červeně ohraničené uzly jsou doplňkové uzly, ve kterých nás nezajímá teplota, ale jsou nutné pro výpočet. Dva doplňkové uzly v oblasti hřídele pod ložiskem byly zredukovány, neboť neuvažujeme tepelný tok, který by tekł z čel hřídelů do okolí. Oranžové uzly jsou uzly středních



Obr. 5.9: Rozložení uzlů v SMPM rotoru a okrajové podmínky.

teplot v hřídeli. Šedé uzly jsou v magnetickém obvodu rotoru. Červený uzel je v permanentním magnetu. V PM vznikají vnitřní ztráty, což představuje tepelný tok Q_{10} . Na obrázku 5.9 je vidět rozmístění uzlů v rotoru a vyznačení okrajových podmínek. Doplňkové uzly byly v rotoru kromě hřídele eliminovány, protože bylo použito zjednodušení popsané v kapitole 3.1.1.

Tepelný odpor mezi uzlem 1 a 2 se vypočte

$$R_{1,2} = R_{1a,1} + R_{0a,1} + R_{0a,2} = -\frac{l_{h,loz}}{6 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{h,loz}^2} + \frac{l_{h,loz}}{2 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{h,loz}^2} + \frac{l_{hv}}{2 \cdot \lambda_h \pi \cdot r_{hv}^2}. \quad (5.36)$$

Ostatní tepelné odpory v hřídeli se počítají obdobným způsobem jako u rotoru s vnořenými magnety, což je popsáno výše v předchozí podkapitole.

5.3 Ověření funkčnosti tepelných sítí rotoru pomocí FEM

K ověření správnosti vytvořené tepelné sítě byly vytvořeny 3D modely rotoru s vnořenými magnety a s magnety na povrchu. Tepelné modely byly vytvořeny v programu Ansys. Díky rotační symetrii rotoru byla namodelována pouze výseč rotoru o úhlu $\frac{360^\circ}{2p}$, kde $2p$ je počet pólů rotoru, v tomto případě tedy 8.

V tabulce 5.3 jsou uvedeny čtyři sady okrajových podmínek, které byly vždy zadány do tepelného modelu i do programu. Hodnoty teplot a součinitelů přestupu jsou zvoleny tak, aby odpovídaly přibližně reálným hodnotám, ale abychom mohli sledovat správnost vypočtených teplot i při odlišných situacích, například při změně provozního stavu motoru, nebo při rozdílu teplot mezi jednotlivými stranami rotoru. Poslední řádek v tabulce 5.3 platí pouze pro rotor s vnořenými magnety. Okrajové podmínky číslo 4 jsou podmínky, ve kterých se přibližně nachází stroj ve jmenovitém stavu a v kompletním výpočtu.

Tab. 5.3: Okrajové podmínky, které se zadávají do výpočtů a jsou vysvětleny na Obr. 5.4 b) a Obr. 5.9.

Parametr	Jednotka	Okr. p. 1	Okr. p. 2	Okr. p. 3	Okr. p. 4
ϑ_δ	$^\circ\text{C}$	110	90	60	124,22
$\vartheta_{\text{vzd},1}$	$^\circ\text{C}$	70	80	45	104,21
$\vartheta_{\text{vzd},2}$	$^\circ\text{C}$	70	70	55	104,21
$\vartheta_{\text{loz},1}$	$^\circ\text{C}$	50	50	35	70
$\vartheta_{\text{loz},2}$	$^\circ\text{C}$	50	40	45	70
α_δ	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$	150	180	100	139,89
α_{fe}	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$	50	35	20	43,19
α_{hv}	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$	40	30	15	43,19
$\alpha_{\text{loz},1}$	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$	500	350	600	300
$\alpha_{\text{loz},2}$	$\text{W} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K}^{-1}$	500	350	400	300
ΔP_{PM}	W	40	25	50	40
ΔP_{vjho}	W	52,285	35	29	40

5.3.1 Rotor s vnořenými magnety

V tabulce 5.4 a 5.5 je vidět porovnání výsledků teplot rotoru s vnořenými permanentními magnety podle tepelné sítě a dle FEM. Výsledky metodou konečných prvků jsou brány jako referenční přesné řešení. Tabulka byla rozdělena kvůli velikosti.

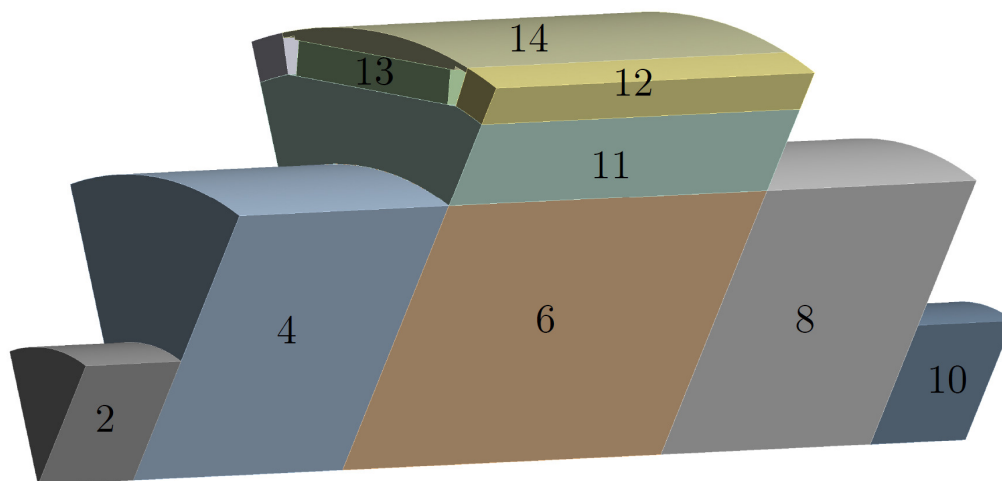
Tab. 5.4: Srovnání teplot rotoru s vnořenými magnety, kde je $\vartheta_{\text{sít}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_{FEM} ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\vartheta = |\vartheta_{\text{sít}} - \vartheta_{\text{FEM}}|$.

Uzel	Okr. podm 1			Okr. podm 2		
	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$
2	78.76	76,32	2,44	74.70	73,08	1,62
4	86.53	87,27	0,74	79.31	79,85	0,54
6	91.92	92,42	0,50	81.67	82,08	0,41
8	86.53	87,26	0,73	77.45	78,04	0,59
10	78.76	76,34	2,42	71.49	69,39	2,10
11	98.27	98,37	0,10	85.44	85,65	0,21
12	99.59	99,79	0,20	86.11	86,43	0,32
13	100.54	100,71	0,17	86.74	86,94	0,20
14	101.67	101,97	0,30	87.35	87,58	0,23

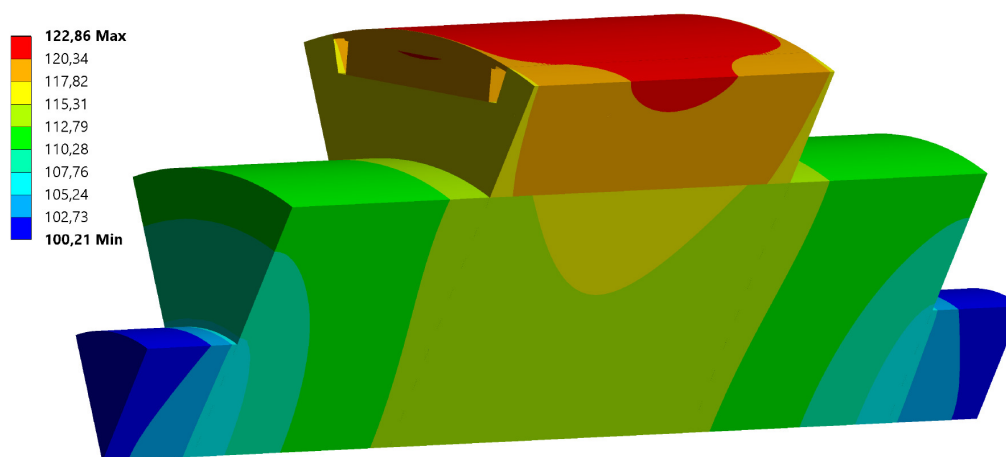
Tab. 5.5: Srovnání teplot rotoru s vnořenými magnety, kde je $\vartheta_{\text{sít}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_{FEM} ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\vartheta = |\vartheta_{\text{sít}} - \vartheta_{\text{FEM}}|$.

Uzel	Okr. podm 3			Okr. podm 4		
	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$
2	51,30	49,94	1,39	105,20	102,89	2,31
4	56,43	57,25	0,82	110,97	111,27	0,30
6	60,29	60,86	0,57	114,76	114,90	0,14
8	59,28	59,85	0,57	110,97	111,27	0,30
10	56,76	56,14	0,62	105,20	102,90	2,30
11	63,08	63,48	0,40	119,16	119,06	0,10
12	63,26	63,71	0,45	119,87	119,75	0,12
13	64,26	64,77	0,51	120,77	120,96	0,19
14	64,37	65,02	0,65	121,39	121,84	0,45

Na Obr. 5.10 je vidět model rotoru s vnořenými magnety a jeho rozdělení na jednotlivé části, ve kterých se počítá střední teplota. Na Obr. 5.11 je vidět teplotní pole při čtvrtých okrajových podmínkách, tedy podmínkách, ve kterých se rotor



Obr. 5.10: Model rotoru s vnořenými magnety.

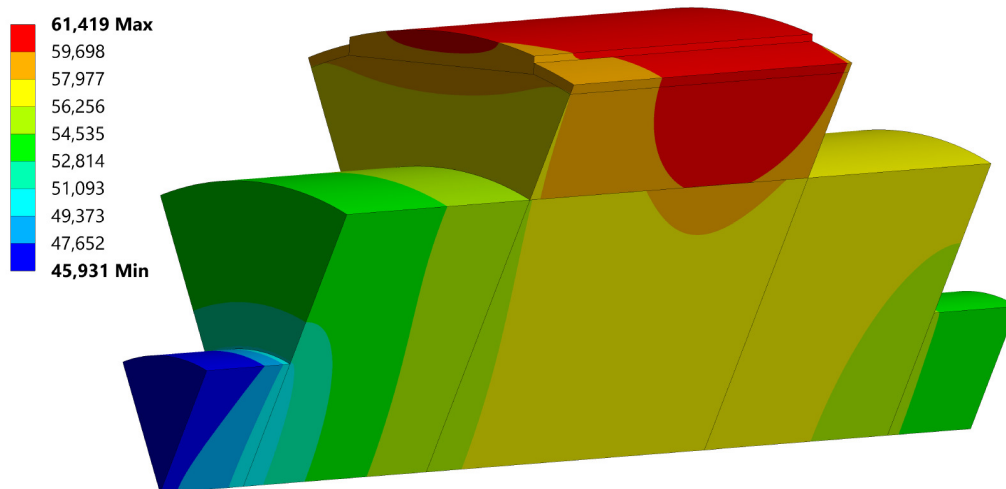


Obr. 5.11: Teplotní pole rotoru s vnořenými magnety.

nominálně provozuje. Tyto podmínky vznikly z výsledků tepelné sítě kompletního motoru popsané v kapitole 6.4.

5.3.2 Rotor s magnety na povrchu

V tabulce 5.6 je vidět porovnání výsledků teplot rotoru s permanentními magnety na povrchu podle tepelné sítě a dle FEM. Výsledky metodou konečných prvků jsou brány jako referenční přesné řešení. Na Obr. 5.12 je vidět teplotní pole vypočtené programem Ansys. Tento obrázek platí pro třetí okrajové podmínky.



Obr. 5.12: Teplotní pole rotoru s magnety na povrchu.

Tab. 5.6: Srovnání teplot SMPMSM, kde je $\vartheta_{\text{sít}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_{FEM} ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\vartheta = |\vartheta_{\text{sít}} - \vartheta_{\text{FEM}}|$.

Uzel	Okr. podm 1			Okr. podm 2			Okr. podm 3		
	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$
1	76,30	73,80	2,50	72,88	71,19	1,69	49,08	47,92	1,16
3	83,38	83,67	0,29	77,12	77,39	0,27	53,50	54,24	0,74
5	88,22	88,22	0,00	79,20	79,30	0,10	56,85	57,37	0,52
7	83,38	83,66	0,28	75,26	75,58	0,32	56,20	56,70	0,50
8	76,30	73,80	2,50	69,67	67,49	2,18	54,23	53,77	0,46
9	94,07	93,60	0,47	82,71	82,57	0,24	59,21	59,57	0,36
10	96,02	96,00	0,02	83,81	83,90	0,09	60,13	60,61	0,48
11	94,91	94,42	0,49	83,17	83,01	0,16	59,34	59,73	0,39

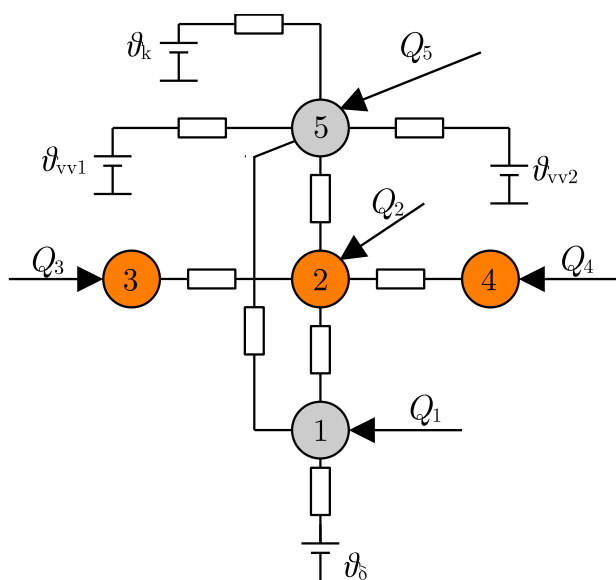
5.3.3 Zhodnocení porovnání metod při výpočtu teplot u rotorů

Výsledky metodou tepelné sítě se liší jen nepatrně od vypočtených teplot pomocí metody konečných prvků. Rozdíly teplot mezi jednotlivými metodami v konkrétních částech rotorů nejsou větší než 1°C , lze tedy říct, že obě tepelné sítě fungují velmi dobře. Jediné uzly, kde jsou rozdíly teplot větší než 1°C , jsou uzly hřídele v oblasti ložiska. Tato chyba je způsobena velikou změnou průměru hřídele. Pokud bychom chtěli tuto chybu eliminovat, bylo by nutné rozdělit hřídel v oblasti vnitřního vzduchu na hřídel s poloměrem $r_{\text{h,loz}}$ a na mezikruží s vnitřním poloměrem $r_{\text{h,loz}}$ a vnějším poloměrem r_{hv} . Toto řešení by problém vyřešilo, ale bylo by zbytečně komplikované, jelikož tato chyba je celkem malá. Nejdůležitější místo těchto sítí, ve kterých nás zajímá teplota, je v permanentních magnetech. Neboť při zvýšené teplotě oproti plánované teplotě klesá jeho indukce a koerzivní síla, hrozí tedy demagnetizace

magnetu a jeho trvalé zničení. Rozdíly teplot v těchto uzlech jsou max $0,51\text{ }^{\circ}\text{C}$, což je zanedbatelný rozdíl, touto sítí lze tedy účinně předpovědět teplotu magnetu, pokud budeme znát přesně okrajové podmínky.

5.4 Ověření tepelné sítě statoru

Na Obr. 5.13 je vidět tepelná síť statoru sloužící k ověření správnosti výsledků v oblasti statoru. Tepelná síť musela být oproti kompletní síti upravena, neboť pro složitost modelování nebyla modelována čela vinutí. Uzly čel vinutí byly nahrazeny uzly středních teplot krajních ploch vinutí. Generované ztráty, které vznikají v čelech vinutí, byly rozděleny počtem drážek statoru a byly zavedeny do bočních ploch vinutí (tepelný tok Q_3 a Q_4). Toto číslování platí jen pro tuto dílčí síť statoru, která ověřuje

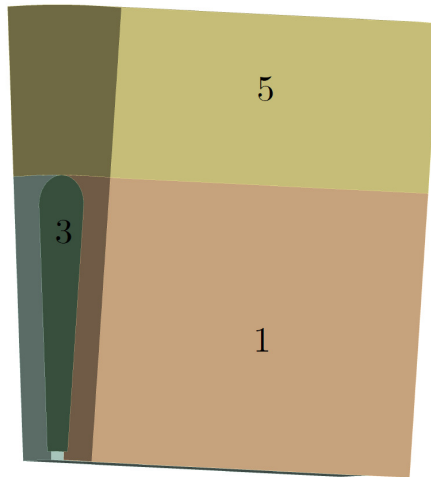


Obr. 5.13: Tepelná síť statoru.

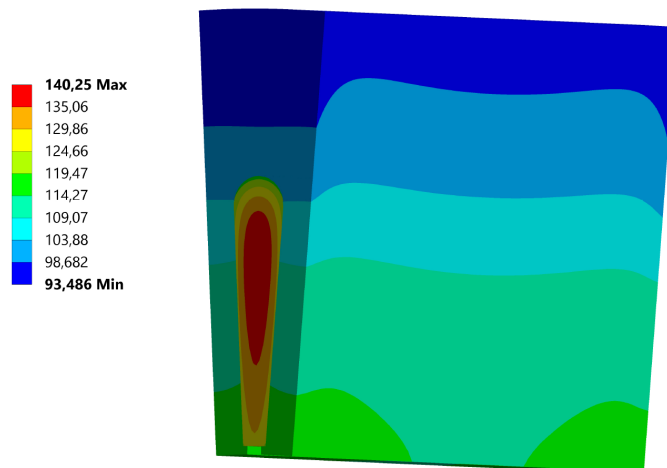
Tab. 5.7: Význam jednotlivých uzlů na Obr. 5.13.

Uzel	Název uzlu	Uzel	Název uzlu
1	Zuby statoru	4	Boční plocha vinutí
2	Vinutí	5	Jho statoru
3	Boční plocha vinutí		

funkčnost kompletní sítě v oblasti statoru. Na Obr. 5.14 je vidět výseč statoru s některými uzly středních teplot. Výseč je o úhlu $360^\circ/Q_s$, kde Q_s je počet drážek statoru. Teoreticky by šla výseč rozdělit ještě na polovinu drážkové rozteče. Uzel 3 je střední teplota čelní plochy vinutí. V tabulce 5.8 lze vidět porovnání středních teplot pomocí tepelné sítě a tepelného modelu metodou konečných prvků. Teploty v oblasti jha a zubů se liší o méně než 1°C . Vyšší rozdíl teplot je v oblasti vinutí. Rozdíl teplot ale nepřesáhne 2°C , takže tato síť dává poměrně přesné výsledky středních teplot.



Obr. 5.14: Model statorové výseče.



Obr. 5.15: Teplotní pole statoru v programu Ansys.

Tab. 5.8: Srovnání teplot statoru. Kde je $\vartheta_{\text{sít}}$ ($^{\circ}\text{C}$), ϑ_{FEM} ($^{\circ}\text{C}$), $\Delta\vartheta = |\vartheta_{\text{sít}} - \vartheta_{\text{FEM}}|$.

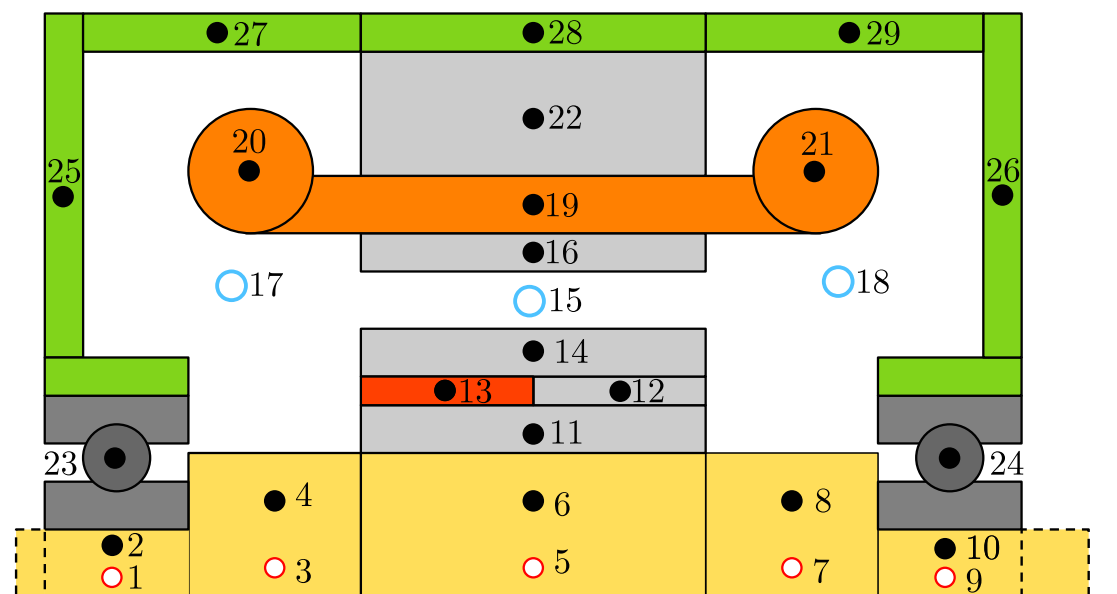
Uzel	$\vartheta_{\text{sít}}$	ϑ_{FEM}	$\Delta\vartheta$
1	110,21	110,45	0,24
2	131,32	129,46	1,86
3	133,35	131,45	1,90
4	133,35	131,45	1,90
5	100,00	99,20	0,80

6 Tepelný výpočet synchronního motoru s vnořenými magnety

V této kapitole je ukázáno rozmístění uzlů středních teplot v synchronním stroji s vnořenými magnety. Dále je ukázána kompletní tepelná síť, jsou vypsány vstupní parametry, které ovlivňují výsledné teploty a jsou vypsány výsledné vypočtené střední teploty.

6.1 Rozmístění uzlů v motoru

Rozmístění uzlů v motoru je vidět na Obr. 6.1. Na tomto obrázku je vidět 29 uzlů, které jsou vyznačeny body a očíslovány. Tyto uzly značí střední teplotu, která se vypočte v jednotlivých geometrických částech okolo daného uzlu. Bílé uzly s červeným okrajem jsou tzv. pomocné uzly, které jsou potřeba pro přesnější výpočet, ale jejich teplota nemá žádný fyzikální význam. Bílé uzly s modrým okrajem jsou uzly ve vzduchu. Části stroje jsou rozděleny na jednotlivé sekce, které jsou značeny černými obrysy. Toto rozdělení je pouze myšlené a slouží k ohraničení objemů, ve kterých je počítána střední teplota.



Obr. 6.1: Rozmístění uzlů v motoru.

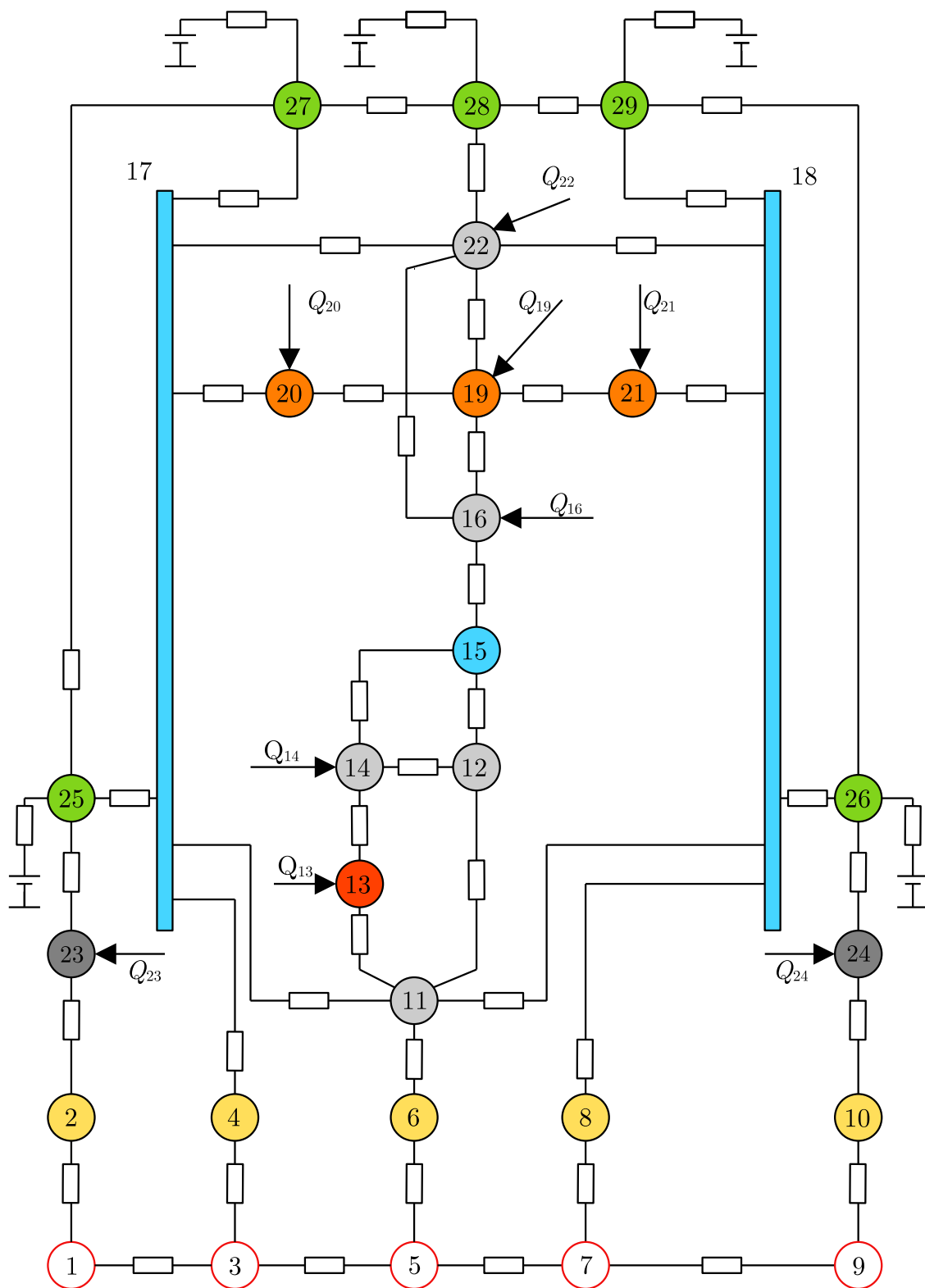
6.2 Tepelná síť motoru

Na obrázku 6.2 je vidět kompletní tepelná síť synchronního motoru s rotorem s vnořenými permanentními magnety. Tato síť byla inspirována sítí v článku [9]. Počet uzlů v síti koresponduje s počtem uzlů na předchozím obrázku. Pro lepší přehlednost jsou uzly ve schématu vybarveny stejnými barvami jako části, ve kterých se uzly nacházejí na Obr. 6.1. Červeně ohraničené uzly jsou doplňkové, ve kterých nás

Tab. 6.1: Význam jednotlivých uzlů na Obr. 6.1 a Obr. 6.2, kde VV znamená vnitřní vzduch.

Uzel	Název uzlu	Uzel	Název uzlu
1	Hřídel ložisko 1-pomocný	16	Zuby statoru
2	Hřídel ložisko 1	17	Vnitřní vzduch 1
3	Hřídel VV 1-pomocný	18	Vnitřní vzduch 2
4	Hřídel VV 1	19	Vinutí v drážce
5	Hřídel -pomocný	20	Čelo vinutí 1
6	Hřídel	21	Čelo vinutí 2
7	Hřídel VV 2-pomocný	22	Jho statoru
8	Hřídel VV 2	23	Ložisko 1
9	Hřídel ložisko 2-pomocný	24	Ložisko 2
10	Hřídel ložisko 2	25	Ložiskový štít 1
11	Jho rotoru	26	Ložiskový štít 2
12	Krček	27	Kostra-oblast VV 1
13	Permanentní magnet	28	Kostra střed
14	Vrchní jho rotoru	29	Kostra-oblast VV 2
15	Vzduchová mezera		

teplota nezajímá. Běžové uzly 2 až 10 jsou uzly středních teplot v hřídeli. Světle šedé uzly jsou v magnetickém obvodu rotoru a statoru. Červený uzel č. 13 je uzel permanentního magnetu, ve kterém vznikají ztráty, což znázorňuje tok Q_{13} . Ztráty také vznikají v uzlu 14, což je vrchní jho, v ložiskách třením, tedy v uzlech 23 a 24, dále v magnetickém obvodu statoru. Největší ztráty však vznikají v oranžových uzlech, což je statorové vinutí. Zelené uzly 25 až 29 jsou uzly kostry a štítů. Tyto zelené uzly se starají o odvod veškerého vznikajícího tepla do okolí. Oranžové uzly představují vinutí v drážkách a čela vinutí. Vinutí je z materiálu s vysokou tepelnou vodivostí, konkrétně z mědi. Toto vinutí je tvořeno izolovanými vodiči, tudíž v drážkách má vinutí dobrou vodivost v axiálním směru. Pro výpočet bylo vinutí v drážkách nahrazeno tyčemi s ekvivalentní tepelnou vodivostí v jednotlivých směrech. Čela vinutí mají vysokou vodivost v tangenciálním směru. Zde bylo zavedeno zjednodušení



Obr. 6.2: Tepelná síť synchronního motoru s vnořenými magnety.

a čela vinutí byla nahrazena toroidem s vysokou tepelnou vodivostí v tangenciálním směru, do kterého jsou zapuštěny jednotlivé vodiče vinutí nahrazené tyčemi, které vystupují z drážek.

6.3 Vstupní hodnoty použité do výpočtu

Geometrické rozměry vychází z článků [18], [19] a [20]. Motor má jmenovitý výkon $P = 40 \text{ kW}$ při jmenovitých otáčkách $n = 3000 \text{ ot/min}$ a počet pólů $2p = 8$. V tabulce 6.2 jsou ukázány ztráty v jednotlivých částech stroje, které byly zadávány do výpočtu. Jejich velikosti byly odhadnuty procentuálně k jmenovitému výkonu, aby motor splňoval obvyklou účinnost. Okolní teplota byla stanovena na 40 °C .

Tab. 6.2: Generované ztráty ve stroji.

Tepelný tok	Oblast	Hodnota (W)
Q_{13}	Permanentní magnet	40
Q_{14}	Vrchní jho rotoru	40
Q_{16}	Zuby statoru	100
Q_{19}	Vinutí v drážce	650
Q_{20}	Čelo vinutí 1	200
Q_{21}	Čelo vinutí 2	200
Q_{22}	Jho statoru	100
Q_{23}	Ložisko 1	30
Q_{24}	Ložisko 2	30

6.4 Vypočtené střední teploty v celém motoru

V tabulce 6.3 jsou uvedeny vypočtené střední teploty v jednotlivých částech stroje. Nejvyšší teplota je v uzlech čela vinutí, neboť zde vzniká největší množství ztrát, tedy až po vinutí v drážce. Vinutí v drážce má, ale na rozdíl od čel vinutí, lepší tepelný odvod. Teplota vinutí je přibližně 136 °C . Druhé důležité místo, ve kterém nás zajímá střední teplota, je v permanentním magnetu. Střední teplota magnetu byla vypočtena $120,64 \text{ °C}$. Střední teplota ve vzduchové mezeře je $124,22 \text{ °C}$ a teplota vnitřního vzduchu je $104,21 \text{ °C}$. Teplota v rotoru směrem k ložiskům postupně klesá, jelikož tepelný tok teče směrem ze vzduchové mezery k ložiskům a do štítů motoru. Hřídel v oblasti ložiska má $104,9 \text{ °C}$. Teplota ložisek je přibližně $91,5 \text{ °C}$. Nejchladnější místo na motoru je ložiskový štít se střední teplotou $70,15 \text{ °C}$. Kostra stroje má poměrně vysokou teplotu $99,41 \text{ °C}$. Z výsledných teplot je vidět, že teplota

Tab. 6.3: Vypočtené střední teploty.

Číslo uzlu	Název uzlu	Teplota (°C)
2	Hřidel ložisko 1	104,90
4	Hřidel VV 1	110,75
6	Hřidel	114,58
8	Hřidel VV 2	110,75
10	Hřidel ložisko 2	104,90
11	Jho rotoru	119,01
12	Krček	119,74
13	Permanentní magnet	120,64
14	Vrchní jho rotoru	121,26
15	Vzduchová mezera	124,22
16	Zuby statoru	128,45
17	Vnitřní vzduch 1	104,21
18	Vnitřní vzduch 2	104,21
19	Vinutí v drážce	135,31
20	Čelo vinutí 1	136,73
21	Čelo vinutí 2	136,73
22	Jho statoru	120,46
23	Ložisko 1	91,56
24	Ložisko 2	91,56
25	Ložiskový štít 1	70,15
26	Ložiskový štít 2	70,15
27	Kostrá-oblast VV 1	84,51
28	Kostrá střed	99,41
29	Kostrá-oblast VV 2	84,51

stroje se pohybuje za těchto podmínek chlazení na horní hranici akceptovatelných teplot.

Závěr

Tato bakalářská práce se zabývala rešerší tepelných výpočtů synchronních motorů s permanentními magnety pomocí metody tepelných sítí. Nejprve bylo nutné nastudovat základní vztahy přenosu tepla, které jsou popsány v první kapitole. Dále je popsán výpočet součinitele přestupu tepla ve vzduchové mezeře a ukázány empirické vzorce pro výpočet ostatních součinitelů přestupu tepla ve stroji a jsou ukázány výpočty tepelných odporů jednotlivých částí stroje. Hlavní část práce se věnuje detailnímu popisu vytvoření tepelné sítě rotoru s vnořenými magnety a rotoru s magnety na povrchu. Pro ověření správnosti výsledných středních teplot rotorů a statoru získaných metodou tepelných sítí byly vytvořeny tepelné modely v softwaru Ansys. Porovnání těchto teplot lze vidět v tabulkách 5.4, 5.5, 5.6 a 5.8. Střední teploty metodou tepelné sítě a metodou konečných prvků se lišily jen velmi drobně. Nejpodstatnější chyby vznikly u hřídele v oblasti ložiska a v oblasti vinutí. Chyba v oblasti hřídele pod ložiskem je způsobena velkou změnou průměru hřídele viz například Obr. 5.10. Chyba v oblasti vinutí bude pravděpodobně způsobena nahrazením přesného tvaru vinutí tyčemi s ekvivalentní tepelnou vodivostí. Další stěžejní částí práce byl výpočet tepelných odporů mezi všemi částmi synchronního stroje a vytvoření jeho kompletní tepelné sítě. Výsledné střední teploty motoru jsou zaznamenány v tabulce 6.3. Při běžných ztrátách v různých částech stroje, odvozených procentuálně od jmenovitého výkonu při zvolených podmínkách chlazení, jsou vypočtené výsledné teploty relativně vysoké, zhruba na horní hranici dovolených teplot jednotlivých materiálů, hlavně tedy magnetu a izolace vinutí.

Literatura

- [1] Pyrhonen, J.; Jokinen, T.; Hrabovcová, V.: *Design of rotating electrical machines*. John Wiley, druhé vydání, 2014, ISBN 978-1-118-58157-5.
- [2] Ondruška, E.; Maloušek, A.: *Ventilace a chlazení el. strojů točivých*. Praha: Nakladatelství technické literatury, první vydání vydání, 1985.
- [3] Súkeník, J.: *Tepelný model vysokootáčkového asynchronního motoru s plným rotorem a vodním chlazením*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Brno, 2021.
- [4] Cengel, Y. A.; Ghajar, A. J.: *HEAT AND MASS TRANSFER*. McGraw-Hill Education, páté vydání, 2015, ISBN 978-0-07-339818-1.
- [5] Světlík, M.: *Tepelný výpočet vysokootáčkového stroje*. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Brno, 2020.
- [6] DEMETRIADES, G. D.; PARRA, H. Z. D. L.; ANDERSSON, E.: A Real-Time Thermal Model of a Permanent- Magnet Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Power Electronics*, , č. 25(2), 2010: s. 463–474, ISSN 0885-8993. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5204128>
- [7] DONG, T.; NAKAMURA, T.: Research on the speed-dependence of heat convection in high-speed EV motors and its application in the model-based rotor temperature monitoring technology. *IET Electric Power Applications*, , č. 16(12), 2022: str. 1452–1463. Dostupné z: <https://doi.org/10.1049/elp2.12197>
- [8] ANDERSSON, B.: *Lumped Parameter Thermal Modelling of Electric Machines*. Master of science thesis, Chalmers University of Technology, 2013. Dostupné z: <https://odr.chalmers.se/server/api/core/bitstreams/608ffd7a-4c70-499d-92e8-b9f8bff4545d/content>
- [9] Zhao, J.; Wu, X.: Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Equivalent Thermal Network Method. *IEEE Xplore*, 2022. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9982995>
- [10] Zhu, Y.; Xiao, M.; Lu, K.; aj.: A Simplified Thermal Model and Online Temperature Estimation Method of Permanent Magnet Synchronous Motors. 2019. Dostupné z: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/15/3158>

- [11] Kačenka, A.; Pop, A.-C.; Vintiloiu, I.; aj.: Lumped Parameter Thermal Modeling of Permanent Magnet Synchronous Motor. *IEEE Xplore*, 2019. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=8892937>
- [12] Dimolikas, K.; Kefala, T.; a spol: Lumped-Parameter Network Thermal Analysis of Permanent Magnet Synchronous Motor: s. 1–6. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/269372329>
- [13] Rollinger, O.: *Tepelný a ventilační výpočet asynchronního trakčního motoru*. Diplomová práce, Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky., Plzeň, 2019. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/38224/1/DP_Rollinger.pdf
- [14] Toman, M.: *Výpočet optimálního magnetického toku asynchronního motoru pro minimalizaci ztrát se zohledněním teplotních vlivů*. Disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, Brno, 2022. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143130>
- [15] SÚKENÍK, J.: *Tepelný model synchronního motoru s permanentními magnety s přímým připojením na síť*. Diplomová práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, Brno, 2023.
- [16] Skalický, M.: *Zpracování teplotního modelu synchronního stroje s PM v prostředí MATLAB*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, fakulta elektrotechnická, katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky, Plzeň, 2018. Dostupné z: https://otik.zcu.cz/bitstream/11025/32210/1/BP_scalicky.pdf
- [17] Toman, M.: Analysis of equivalent thermal conductivity of winding using fem-based model. In *Proceedings I of the 27th Conference STUDENT EEICT 2021*, 2021: str. 544–548. Dostupné z: <https://www.eeict.cz/download>
- [18] Kuptsov, V.: Electromagnetic Analysis and Design Methodology for Permanent Magnet Motors Using MotorAnalysis-PM Software. 2019. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/331843748_Electromagnetic_Analysis_and_Design_Methodology_for_Permanent_Magnet_Motors_Using_MotorAnalysis-PM_Software
- [19] Dalal, A.; Kumar, P.: Investigation of PMSM motor performance with different magnet configurations and rotor surface profiling. 2015. Dostupné z: <https://www.researchgate.net/publication/302479468>

- [20] Hsu, J. S.; Ayers, C. W.; Coomer, C. L.: REPORT ON TOYOTA/PRIUS MOTOR DESIGN AND MANUFACTURING ASSESSMENT. 2004. Dostupné z: https://prius-touring-club.com/librairie/mediatheque/pdf/motorisation_comp_prius_2003_2004.pdf

Seznam symbolů

Symbol	Název	Jednotka
U	Elektrické napětí	(V)
I	Elektrický proud	(A)
R_e	Elektrický odpor	(Ω)
q	Hustota tepelného toku	(W/m ²)
λ	Měrná tepelná vodivost	($\frac{W}{m \cdot K}$)
$\nabla\vartheta$	Gradient teploty	(K/m)
$\Delta\vartheta$	Rozdíl teplot	(K)
ϑ	Teplota	(K)
l, L	Délka	(m)
\dot{q}	Vektor hustoty tepelného toku	(W/m ²)
\dot{Q}	Vektor tepelného toku	(W)
S	Plocha	(m ²)
α	Součinitel přestupu tepla	($\frac{W}{m^2 \cdot K}$)
δ_ϑ	Mezní vrstva teplotní	(m)
δ_v	Mezní vrstva rychlostní	(m)
T_∞	Termodynamická teplota okolní tekutiny	(K)
T_s	Termodynamická teplota povrchu	(K)
Nu	Nusseltovo číslo	(-)
ϵ	Emisivita materiálu	(-)
σ_{SB}	Stefan–Boltzmannova konstanta	($\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$)
\mathbf{G}	Matice tepelných vodivostí	(W/K)
$\dot{\mathbf{Q}}$	Matice tepelných toků	(W)
ϑ	Matice teplot	(°C)
g	Tepelná vodivost mezi uzly	(W/K)
T_1	Termodynamická teplota zářiče	(K)
T_2	Termodynamická teplota povrchu přijímače	(K)
R	Tepelný odpor	(K/W)

Symbol	Název	Jednotka
G	Tepelná vodivost	(W/K)
Ta	Taylorovo číslo	(-)
F_g	Geometrický faktor	(-)
Ta_m	Modifikované Taylorovo číslo	(-)
α_δ	Součinitel přestupu tepla přes vzduch. mezeru	$\left(\frac{W}{m^2 \cdot K}\right)$
u_r	Obvodová rychlost rotoru	(m/s)
δ	Tloušťka vzduchové mezery	(m)
r_1	Vnitřní poloměr mezikruží	(m)
r_2	Vnější poloměr mezikruží	(m)
L	Délka válce	(m)
ρ	Hustota	(kg/m ³)
ω	Úhlová rychlost	(rad/s)
μ	Dynamická viskozita	(Pa · s)
K_{fe}	Činitel plnění magnetického obvodu	(-)
h	Výška	(m)
b	Šířka	(m)
φ	Úhel	(°, rad)
P_{gen}	Generované vnitřní ztráty	(W)
p_{gen}	Měrné vnitřní ztráty	(W/m ³)

Seznam zkratek

Zkratka	Název
PMSM	Permanent magnet synchronous motor – synchronní motor s PM
SMPM	Surface mounted permanent magnet – magnety na povrchu
PM	Permanentní magnet
FEM	Finite element method – metoda konečných prvků
VV	Vnitřní vzduch

A Seznam hodnot vodivostí a součinitelů přestupu tepla zadávaných do výpočtu

Tab. A.1: Tepelné vodivosti.

Materiál	Značení	Hodnota (W/(m · K))
Měd vinutí a čel	λ_{cu}	380
Kombinace laku a mědi	λ_{ekv}	0,6815
Drážková izolace	λ_{di}	0,2
Plech statoru	$\lambda_{fe,r}$	50
Kombinace plechu a laku	$\lambda_{fe,r}$	1
Kostra–hliník	λ_k	230
Hřídel–ocel	λ_h	50
Lepidlo PM	λ_{lep}	0,8
PM	λ_{PM}	8,5

Tab. A.2: Stykové koeficienty a součinitele přestupu tepla.

Materiál	Značení	Hodnota (W/(m ² · K))
Styk mezi státorem a kostrou	$\alpha_{k,j}$	800
Styk mezi štítem a kostrou	$\alpha_{sh,k}$	2000
Styk mezi ložiskem a štítem nebo hřídelí	α_{loz}	2000
Styk mezi kuličkami a kroužkem ložiska	α_{kul}	8000
Styk mezi jhem rotoru a hřídelí	α_{kul}	1000
Styk mezi rotorem a PM	α_{lep}	4000
Kostra-okolí	$\alpha_{okolí}$	120
Vzduchová mezera	α_{δ}	139,89
Vnitřní vzduch	α_{vv}	43,19
Čelo vinutí-VV	$\alpha_{\check{c},vv}$	25,25