

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ELEKTROMECHANIKY A VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Model chlazení asynchronního motoru s využitím MKP

vedoucí práce: Ing. Roman Pechánek, Ph.D.

autor práce: Bc. Jan Toufar

2015

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TOUFAR**
Osobní číslo: **E13N0047P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Průmyslová elektronika a elektromechanika**
Název tématu: **Model chlazení asynchronního motoru s využitím MKP**
Zadávací katedra: **Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky**

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

1. Na základě návrhu asynchronního motoru (KEV/PEZ) vytvořte v programu SolidWorks 3D model motoru.
2. Proveďte ventilační a tepelný výpočet stroje metodou náhradní tepelné sítě.
3. Výpočet oteplení a dílčí výsledky výpočtu ověřte pomocí CFD a MKP.

Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**

Rozsah pracovní zprávy: **30 - 40 stran**

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. Nasar, S. A., Bolera, I.: **The induction machine handbook**, CRC Press, 2002, ISBN 0-8493-0004-5.
2. Ondruška, Maloušek: **Chlazení elektrických strojů**, SNTL 1985.
3. Vlach, R.: **Chlazení elektrických strojů, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky, Fakulta strojního inženýrství, VUT Brno**, 2004, ISBN 80-214-2848-1.
4. Hrabovcová, V; Jokinen; T.; Pyrhönen, J.: **Design of rotating electrical machines**, Wiley, 2008. ISBN 978-0-470-69516.

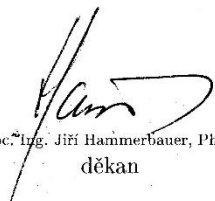
Vedoucí diplomové práce:

Ing. Roman Pechánek, Ph.D.


Katedra elektromechaniky a výkonové elektroniky

Datum zadání diplomové práce: **15. října 2014**

Termín odevzdání diplomové práce: **11. května 2015**


Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.
děkan




Prof. Ing. Václav Kůs, CSc.
vedoucí katedry

V Plzni dne 15. října 2014

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě elektrotechnické Západočeské univerzity v Plzni. Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce. Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

V Plzni dne 11. 5. 2015

Jan Toufar

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Romanu Pechánkovi, za odborné vedení diplomové práce, cenné připomínky a trpělivost před termínem odevzdání.

Abstrakt

Diplomová práce ověřuje správnost výsledků ventilačního a tepelného výpočtu asynchronního stroje, za pomoci numerických metod CFD a MKP ve výpočetním prostředí ANSYS. První tři kapitoly seznamují se vznikem, šířením a odváděním tepelných ztrát, kvůli kterým je potřeba tepelný výpočet provést. V dalších dvou částech je rozebrána teorie okolo metody náhradní tepelné sítě a numerických metod, jenž jsou používány v samotném výpočtu. Dále je proveden tepelný výpočet výše zmíněných metod. Výpočet je realizován na asynchronním stroji nízkého výkonu. V závěru práce jsou vyhodnoceny a porovnány jednotlivé výsledky.

Klíčová slova

Asynchronní motor, ztráty, přenos tepla, chlazení, náhradní tepelná síť, numerické metody, CFD, MKP, ANSYS, model, proudění, oteplení.

Abstract

The master thesis verifies correctness of the results by ventilation and thermal calculations with the help of numerical methods CFD and FEM in the computing environment ANSYS. The first three chapters acquaint with the creation, transfer and removal of the heat losses, due to which thermal calculation needs to be undertaken. The theory of the thermal network and numerical methods is examined in the other two chapters, that are used in itself calculation. Another thermal calculation is performed by the above-mentioned methods. The calculation is realized on the asynchronous machine. The results are evaluated and compared individually at the end of the thesis.

Key words

AC induction motor, losses, heat transfer, cooling, thermal network, numerical methods, CFD, FEM, ANSYS, model, convection, temperature rise.

Obsah

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ	10
ÚVOD	12
1 ZTRÁTY A PŘENOS TEPLA.....	13
1.1 VZNIK TEPLA V ASYNCHRONNÍCH STROJÍCH	13
1.1.1 Ztráty ve vodičích	13
1.1.2 Ztráty v magnetickém obvodu.....	14
1.1.3 Ztráty mechanické a přídavné	14
1.1.4 Způsoby omezení ztrát	16
1.2 PŘENOS TEPLA V ELEKTRICKÝCH STROJÍCH	17
1.2.1 Kondukce	17
1.2.2 Sálání.....	18
1.2.3 Konvekce	19
2 CHLAZENÍ ELEKTRICKÝCH STROJŮ	21
2.1 VENTILÁTORY	21
2.1.1 Vlastní ventilace	22
2.1.2 Cizí ventilace	23
2.2 ZPŮSOBY CHLAZENÍ.....	23
2.2.1 Vzduchové chlazení	23
2.2.2 Chladicí médium	24
2.3 VENTILAČNÍ SYSTÉM ASYNCHRONNÍCH STROJŮ	25
3 TEPELNÉ OBVODY	27
3.1 METODA TEPELNÉ SÍTĚ	27
3.2 EKVIVALENCE MEZI ELEKTRICKÝMI A TEPELNÝMI OBVODY	27
3.2.1 Měrná tepelná vodivost vinutí.....	28
3.2.2 Tepelný odpor vsypávaného vinutí.....	28
3.2.3 Tepelný odpor mezi rozdílnými materiály	29
3.3 ANALÝZA PROUDĚNÍ CHLADÍČÍHO MÉDIA	30
4 NUMERICKÉ METODY ŘEŠENÍ	32
4.1 MKP (METODA KONEČNÝCH PRVKŮ).....	32
4.1.1 Pre – processing	33
4.1.2 Processing – solver	33
4.1.3 Post – processing.....	33
4.2 CFD (METODA KONEČNÝCH OBJEMŮ)	33
4.3 ANSYS.....	34
4.3.1 DesignModeler	34
4.3.2 Mechanical	34
4.3.3 CFX.....	35
4.3.4 Thermal Analysis	35
5 MODEL A NÁVRH MOTORU	36
5.1 NÁVRH ASYNCHRONNÍHO STROJE	36
5.2 ZTRÁTY V ASYNCHRONNÍM STROJI.....	37
5.3 MODEL ASYNCHRONNÍHO STROJE	38
6 VÝPOČET METODOU NÁHRADNÍ TEPELNÉ SÍTĚ.....	39
7 VÝPOČET POMOCÍ MKP A CFD.....	42
7.1 VÝPOČET V CFX.....	42

7.1.1	<i>Nastavení okrajových podmínek</i>	42
7.1.2	<i>Ventilátor</i>	43
7.1.3	<i>Proudění na vnějším povrchu motoru</i>	44
7.1.4	<i>Proudění uvnitř motoru</i>	46
7.2	VÝPOČET TEPLOTNÍ ANALÝZY.....	48
8	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	51
	ZÁVĚR	53
	POUŽITÁ LITERATURA	54

Seznam použitých symbolů

α	.....	koeficient přestupu tepla [W/m ² ·K]
α_r	.....	koeficient přestupu tepla radiací [W/m ² ·K]
ρ	.....	hustota [kg/m ³]
ε	.....	emisivita povrchu [-]
σ	.....	elektrická konduktivita [S]
σ_{SB}	.....	Stefan-Boltzmannova konstanta [W/m ² ·K ⁴]
μ	.....	koeficient tření [-]
δ	.....	velikost vzduchové mezery [m]
Ω	.....	úhlová frekvence [rad/s]
Θ_p	.....	ventilační ztráty [W]
λ_d	.....	rozměr stroje [m, m ² , m ³]
λ	.....	měrná tepelná vodivost [W/m·K]
Φ_t	.....	tepelný tok [W/m ²]
c_p	.....	tepelná kapacita látky [kJ/kg·K]
E	.....	intenzita elektrického pole [V/m]
B	.....	magnetická indukce [T]
f	.....	frekvence [Hz]
I_{ef}	.....	efektivní hodnota elektrického proudu [A]
J	.....	proudová hustota [A/m ²]
k_h	.....	koeficient tloušťky plechu [-]
k_r	.....	koeficient vlivu skin efektu [-]
k_v	.....	koeficient materiálu plechu [-]
l_{av}	.....	délka vinutí [m]
m	.....	počet fází [-]
m_{cu}	.....	hmotnost vinutí [kg]
m_{fe}	.....	hmotnost železného svazku [kg]
N	.....	počet závitů v sérii jedné fáze [-]
N_u	.....	Nusseltovo číslo [-]
ΔP_{cu}	.....	tepelné ztráty ve vodiči [W]
ΔP_h	.....	hysterezní ztráty v železe [W]

ΔP_m	.....	mechanické ztráty [W]
ΔP_v	.....	vířivé ztráty v železe [W]
q	.....	průtok [m^3/s]
R	.....	elektrický odpor [Ω]
R_{th}	.....	tepelný odpor [K/W]
R_q	.....	tepelný odpor proudícího média [K/W]
S_c	.....	celkový průřez vinutí [m^2]
v	.....	rychlost proudění [m/s]
ΔT	.....	oteplení [$^{\circ}C$]
T_a	.....	Taylorovo číslo [-]

Úvod

Tepelný a ventilační výpočet je dnes a vždy byl nedílnou součástí návrhu každého elektrického stroje. Jeho určením můžeme nejen posoudit schopnost motoru pracovat bez poruchy v pracovním prostředí, pro které je navržen, ale také stanovit kritická místa a zjistit informace o kompletním rozložení teploty v motoru. Díky těmto informacím lze upravit chlazení motoru, tak aby bylo intenzivnější v případě nutnosti, či naopak nebylo nadbytečné. Životnost stroje je závislá na intenzitě tepelného působení, lze tedy na základě statistických výpočtů stanovit přibližnou životnost stroje. Cílem tepelného a ventilačního výpočtu je dosáhnout co nejmenšího rozdílu mezi analyticky a numericky stanoveným oteplením oproti skutečnému ohřátí stroje.

Na asynchronním motoru jsou provedeny výpočty metodou náhradní tepelné sítě, která je rozložena po podélném řezu stroje, kde ekvivalencí mezi tepelným a elektrickým obvodem jsou sestaveny rovnice. Řešení těchto rovnic je z důvodu jejich množství provedeno ve výpočetním programu *Matlab*. Při výpočtu jsou brány v úvahu také ventilační uzly, nimiž je odváděno teplo z povrchu stroje.

Pro výpočet pomocí numerických metod byl vytvořen model stroje, který odpovídá stejným parametrům a rozměrům jako pro analytický výpočet. Řešení tímto způsobem se provedlo ve výpočetním programu *ANSYS*. Zde se prostřednictvím výpočtu proudění chladiva stanoví koeficient přestupu tepla. Ten je aplikován v teplotní analýze motoru, kde výstupním parametrem je rozložení teploty v celém objemu stroje.

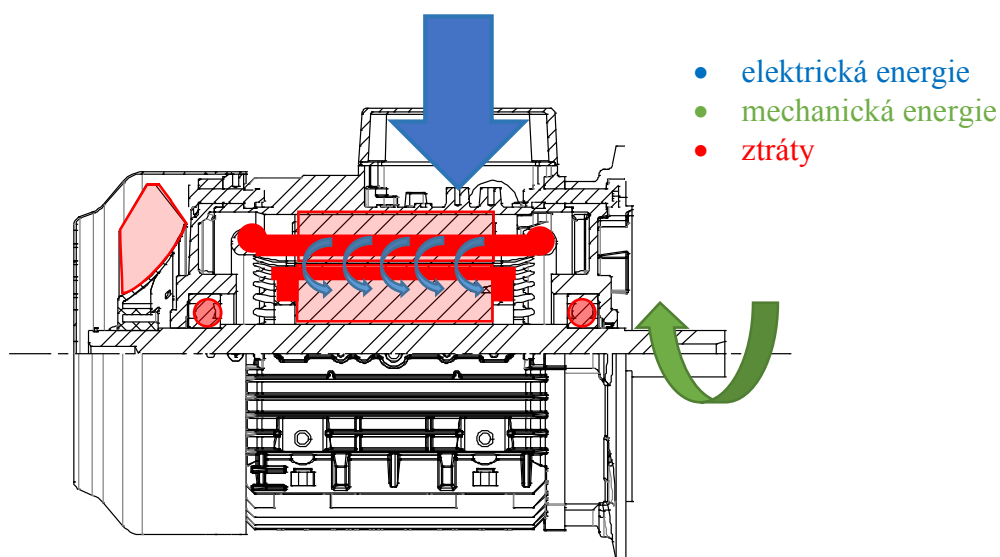
Tyto dvě zmíněné metody jsou porovnány v uzlových místech a vyhodnoceny v závěru práce. Na základě zkušeností získaných při řešení výpočtů jsou zmíněny i pozitiva a negativa těchto metod.

1 Ztráty a přenos tepla

V oblasti elektrických strojů je projektování a návrh přenosu tepla ze stroje stejně důležitý jako elektromagnetický návrh stroje, neboť oteplení stroje určuje maximální výkon, při kterém může být stroj trvale zatížen.

1.1 Vznik tepla v asynchronních strojích

U motorů vznikají ztráty z elektrické energie, která není přeměněna na mechanickou. Tyto ztráty jsou úměrné zatížení stroje a nepřímo úměrné účinnosti stroje.



Obr. 1-1 Obecné schéma přenosu energie v asynchronním stroji

1.1.1 Ztráty ve vodičích

Jouleovy ztráty zaujímají největší podíl z celku ztrát a vznikají průchodem proudu ve vinutí stroje. Základní vztah pro výpočet Jouleových ztrát statorového vinutí je:

$$\Delta P_{cu} = m \cdot I_{ef}^2 \cdot R. \quad (1.1)$$

Tento vztah je možné upravit pomocí výpočtu hmotnosti:

$$m_{cu} = \rho \cdot N \cdot l_{av} \cdot S_c, \quad (1.2)$$

čímž dostaneme vztah:

$$\Delta P_{cu} = \frac{k_r}{\rho \cdot \sigma} \cdot J^2 \cdot m_{cu}. \quad (1.3)$$

Tato rovnice vyjadřuje úměru ztrát k hmotnosti a kvadrátu proudové hustoty. Činitel k_r vyjadřuje vliv skin efektu, pokud neuvažujeme skin efekt je roven 1. S rostoucí teplotou stroje roste také odpor vinutí, při zvýšení teploty o 50 °K (nad teplotou 20 °C)

vzroste rezistivita o 20 %, pro vyšší teploty je růst nelineární. Tím vzniká růst odporových ztrát i při konstantním proudu. (1)

Menší část těchto ztrát vzniká na rotoru, kde je sice odpor nižší o jednotky řádů oproti statoru, avšak převodem proudu statoru je zde mnohem vyšší proud. To je důvodem pro řešení úloh přestupu tepla přes vzduchovou mezeru.

1.1.2 Ztráty v magnetickém obvodu

Se dělí na ztráty hysterezní, které vznikají v důsledku neustálého přemagnetování elektrického obvodu (měnící se působení intenzity magnetického pole) a ztráty vířivými proudy vznikající uzavíráním smyček naindukovaného proudu v magnetickém obvodu a tyto ztráty jsou dány obdobným vztahem jako (1.1). Velikost naindukovaných proudů je úměrná působení magnetického pole a frekvence, to objasňuje Faradayův indukční zákon.

Tyto ztráty je obtížné přesně stanovit, neboť jsou závislé na technologii, kvalitě výroby a materiálu, krom toho nejsou rovnoměrně rozložené v celém objemu a má zde vliv i drážkování magnetického obvodu. (1)

Orientační výpočet za účelem zjištění účinnosti či oteplení, vychází z rovnice:

$$\Delta P_v = k_v \cdot f^2 \cdot B^2 \cdot m_{fe}, \quad (1.4)$$

pro ztráty vířivými proudy a z rovnice:

$$\Delta P_H = k_h \cdot f \cdot B^2 \cdot m_{fe}, \quad (1.5)$$

pro ztráty hysterezní. Udávané koeficienty k_v a k_h jsou parametry tloušťky a materiálu plechů magnetického obvodu. Materiálem magnetických obvodů jsou neorientované plechy s úzkou hysterezní smyčkou. Používají se křemíkové elektrotechnické plechy o tloušťkách 0,35 a 0,5 mm s množstvím křemíku 0,3 - 4,6 %, tím se sníží vodivost plechů (ztráty ΔP_v). Při větším množství křemíku je materiál velmi křehký, to komplikuje technologické zpracování. (2)

Ztráty v železe rotoru jsou pouze při rozběhu, ve jmenovitých otáčkách je rotorová frekvence velmi nízká. U asynchronních motorů obvykle dosahují ztráty v železe 1-3 % z příkonu stroje.

1.1.3 Ztráty mechanické a přídavné

Do ztrát mechanických patří tření v ložiskách a ventilační ztráty. Ložiskové ztráty závisí na otáčkách, typu ložiska, vlastnostech maziva a zatížení ložisek. Výrobci ložisek udávají v technickém listu výrobku vztahy pro výpočet tření, viz (1.6) podle výrobce SKF. (1)

$$\Delta P_m = 0,5 \cdot \Omega \cdot \mu \cdot F \cdot D \quad (1.6)$$

Z rovnice (1.6) vidíme závislost ztrát na úhlové frekvenci Ω , koeficientu tření μ , síle působící na ložisko F a vnitřním průměru ložiska D . Teplo působící na ložiska způsobuje zkrácení jejich životnosti. Tento problém je řešen tepelně odolným mazivem, nebo v ojedinělých případech chlazeným oběhem maziva ložisek.

Ventilační ztráty vznikají třením mezi rotujícím tělesem a okolním vzduchem. Závisí na rychlosti otáčení více než ztráty v ložiskách. Pro výpočet těchto ztrát existují empirické rovnice, viz (3).

Přídavné ztráty jsou definované jako rozdíl mezi ztrátami celkovými a součtem všech výše zmíněných ztrát. Důvodem pro vznik těchto ztrát je:

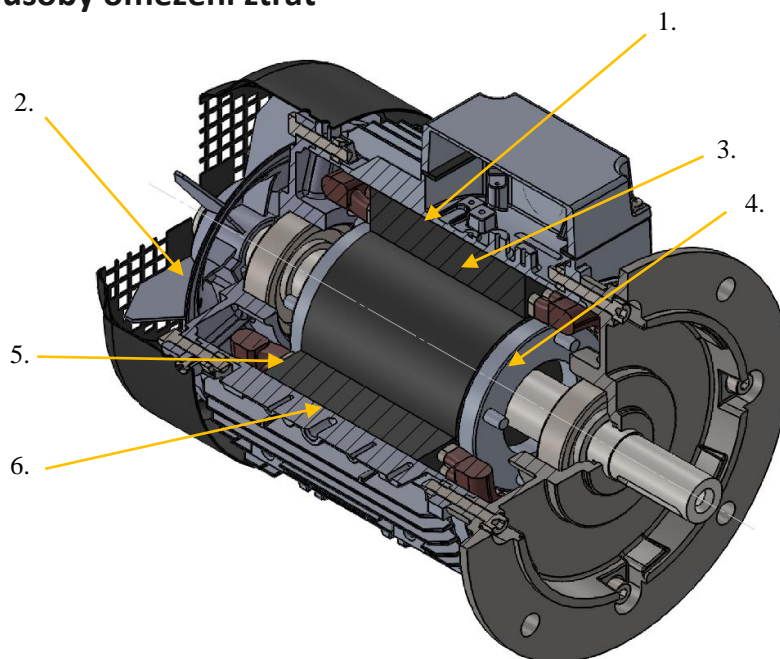
- působení skinefektu (koeficient k_r nelze přesně stanovit),
- vliv prostorových harmonických,
- nerovnoměrné stažení magnetického obvodu,
- vířivé ztráty od rozptylového toku (v kostře, ložiskách),
- ztráty způsobené technologií výroby a kvalitou materiálů aj.

Tyto ztráty jsou většinou pro asynchronní motory s klecí nakrátko v rozmezí 0,3-2 % z příkonu. Mohou být stanoveny dle normy IEC 60034-2-1, 2007 viz tab. 1. (1)

<i>Jmenovitý výkon stroje</i>	<i>Přídavné ztráty z příkonu stroje</i>
$\leq 1 \text{ kW}$	2,5 %
1 – 10 000 kW	2,5 – 0,5 %
$\geq 10 000 \text{ kW}$	0,5 %

Tab. 1-1 Velikost přídavných ztrát podle IEC 60034-2-1, 2007

1.1.4 Způsoby omezení ztrát



Obr. 1-2 Snižování ztrát u asynchronních strojů

Možnosti jak snížit ztráty asynchronního motoru, viz obr. 1-2:

1. tenčí elektrotechnické plechy, materiál s užší hysterezní smyčkou,
2. efektivnější konstrukční provedení ventilátoru,
3. vhodnější návrh drážek,
4. větší průřez rotorových tyčí a kruhů,
5. větší průřez statorového vinutí a využití statorových drážek,
6. větší průměr jho statoru sníží hustotu magnetického toku (nižší ztráty v železe).

1.1.4.1 Technologie výroby

Má také vliv na snížení ztrát. Vyhovující ostří při ražení elektrotechnických plechů, aby nedocházelo k deformaci hran a vzniku otřepů. Odstředivé lití rotorových klecí snižuje jejich rezistivitu oproti tlakovému lití. Minimální manipulace jednotlivých dílů (vodiče, železné plechy) během sestavení stroje za účelem snížení rizika deformace a oděrek. (1)

1.1.4.2 Změnou rozměrů stroje

Lze také snížit ztráty, neboť větším průřezem jha a zubů snížíme hustotu magnetického toku. Stejně tak to platí pro zvýšení průřezu vodiče, čímž také snížíme proudovou hustotu. Pokud vyjádříme rozměry z rovnic pro ztráty (1.3), (1.4) a zanedbáme některé konstanty, dostaneme:

$$\Delta P_{\text{cu}} \sim J^2 m_{\text{cu}} \sim \left(\frac{1}{\lambda_d^2}\right)^2 \lambda_d^3 = \frac{1}{\lambda_d}, \quad (1.7)$$

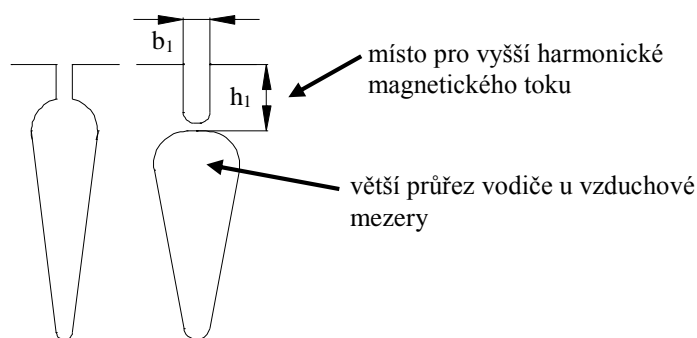
$$\Delta P_{\text{Fe}} \sim B^2 m_{\text{cu}} \sim \left(\frac{1}{\lambda_d^2}\right)^2 \lambda_d^3 = \frac{1}{\lambda_d}. \quad (1.8)$$

Avšak zvýšení rozměrů vede ke zvýšení výrobní ceny, která roste s objemem λ_d^3 .

1.1.4.3 Prostorové harmonické

Vznikají vlivem drážkování, neboť magnetický odpor je na různých místech vzduchové mezery rozdílný.

Způsob snížení těchto přídavných ztrát je zvýšením počtu drážek s ohledem na konstrukci a ekonomický faktor. Omezit ztráty mohou také magneticky vodivé klíny a vhodná volba zkrácení kroku vinutí. V



Obr. 1-3 Drážky rotoru

otevřených rotorových drážkách pole vyšších harmonických zvyšuje odporové ztráty, které mohou být omezeny zavřenou drážkou, viz Obr. 1-3. (1)

1.2 Přenos tepla v elektrických strojích

Veškerá nevyužitá energie ve formě tepla odchází ze stroje třemi základními způsoby, kondukcí, konvekcí a sáláním. Pokud nebereme v potaz přímé vodní chlazení, tak je nucená konvekce neúčinnějším a nejpoužívanějším způsobem chlazení. Při návrhu stroje musí být spočteno potřebné proudění chladicího média, ale také musí být dostatečně velké ochlazované plochy, popřípadě chladicí kanály. Kondukcí slouží jako mezičlen pro přestup tepla, takže odvádí teplo ze zdrojů k povrchu kostry, kde se přestupu tepla ujímá proudění. Přenos tepla radiací má minimální význam v elektrických strojích a závisí na emisivitě povrchu motoru.

U asynchronních strojů s přírubou je výrazné množství tepla přenášeno kondukcí samotnou přírubou do převodového prostoru, či jiné části za motorem. V mnoha případech proudí za přírubou olej, který může přenos tepla usnadnit, pokud je jeho pracovní teplota nižší, než teplota motoru.

1.2.1 Kondukcí

První způsob kondukcí je skrze vzájemnou interakci mezi molekulami. Částice v krystalické mřížce s přibývajícím tepelnou energií zvyšují svou kinetickou energii,

kteřou předávají skrze vzájemné vazby částicím s nižší energií. Tento přenos funguje mezi všemi skupenstvími.

Jiný způsob je šíření tepla volnými elektrony, stejně jako šíření elektrického proudu. To objasňuje souvislost mezi tepelnou a elektrickou vodivostí u kovů. Jiné prvky např. diamant, plasty, oxidy na povrchu kovů mají rozdílné tyto vodivosti. Nejlepší tepelné (elektrické) vodiče jsou čisté kovy, které mají vysoký počet volných elektronů. Množství volných elektronů je úměrné tepelné vodivosti materiálů a pro šíření tepla kondukcí o tepelném toku Φ platí Fourierův zákon s gradientem teploty ∇T v ploše materiálu S o tepelné vodivosti λ .

$$\Phi_t = -\lambda \cdot S \cdot \nabla T \quad (1.9)$$

U kovových materiálů se zhoršuje tepelná vodivost s rostoucí teplotou, avšak u plynů a izolačních materiálů s teplotou roste. Rovnici (1.9) je možné obdobně napsat i pro elektrické obvody. (3)

$$I = -\sigma \cdot S \cdot E \quad (1.10)$$

1.2.2 Sálání

Jedná se o elektromagnetické záření o vlnové délce 0,1 – 100 μm vyzařované z povrchu o teplotě vyšší než absolutní nula. Sálání nepotřebuje k šíření tepla žádné médium a při kontaktu elektromagnetické vlny s objektem dojde k absorpci, odrazu a pohlcení. Sálání je definováno Stefan-Boltzmannovou rovnicí, kde je tepelný tok Φ závislý na čtvrté mocnině rozdílu teplot dvou ploch (1.11). Pro zjednodušení se v elektrických strojích uvažuje šíření tepla radiací pouze 2D, tj. mezi dvěma povrchy.

$$\Phi_t = \varepsilon \cdot \sigma_{\text{SB}} \cdot S \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.11)$$

Emisivita povrchu ε je v rozsahu (0;1), přičemž absolutně černé těleso má $\varepsilon=1$. Absolutně černé těleso neexistuje a lze dosáhnout hodnot maximálně $\varepsilon=0,98$. Tmavý povrch elektrických strojů vyzařuje do okolí s emisivitou přibližně $\varepsilon=0,85$.

Pro elektrické stroje bez vnější nucené konvekce je radiace a kondukce skrze patky, nebo přírubu nezanedbatelná. Zde hraje velkou roli koeficient přestupu tepla sáláním α_r , který je stejně jako tepelný tok silně závislý na teplotě.

$$\alpha_r = \varepsilon \cdot \sigma_{\text{SB}} \cdot S \cdot \frac{(T_1^4 - T_2^4)}{(T_1 - T_2)} \quad (1.12)$$

Tento koeficient se pohybuje u většiny elektrických strojů okolo $\alpha_r = 6 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ při emisivitě $\varepsilon=0,85$ a rozdílu teplot povrchu stroje a okolí $\Delta T=40 \text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní koeficient sálání je stejný s koeficientem konvekce, tudíž je možné porovnat účinnost těchto dvou tepelných přenosů. (3)

1.2.3 Konvekce

Konvekce probíhá výměnou pozic částic v plynném, nebo kapalném médiu. Spolu s konvekcí vždy působí konduktce mezi těmito částicemi, které mají rozdílnou tepelnou energii. Základním vztahem konvekce je Newtonův zákon.

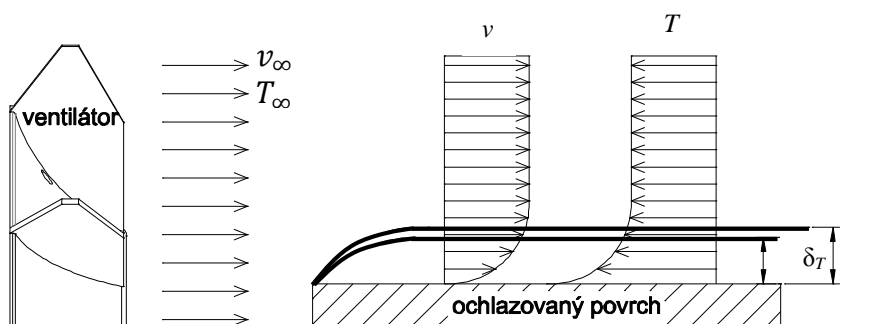
$$\Phi_t = \alpha \cdot S \cdot (T_1 - T_2) \quad (1.13)$$

Koeficient přestupu tepla α je funkcí viskozity, tepelné vodivosti, tepelné kapacity a rychlosti proudění. Tyto veličiny se vztahují k proudícímu médiu skrze tyto parametry:

- Reynoldsovo číslo – *poměr setrvačných a vazkých sil,*
- Nusseltovo číslo – *převrácená hodnota tloušťky mezní vrstvy teploty,*
- Prandtlovo číslo – *poměr tloušťky mezní vrstvy rychlosti a teploty.*

Reynoldsovým číslem mohou určit typ proudění: *laminární x turbulentní.* S Nusseltovým číslem porovná efektivitu přenosu tepla: *konduktce x konvekce.*

Existují tzv. mezní vrstvy, pro tepelný přenos konvekcí jsou to vrstvy rychlosti, teploty a koncentrace. Tloušťka mezní vrstvy rychlosti δ_v je od povrchu k místu, kde gradient je zanedbatelný. Nad vrstvou již na médium nepůsobí vnitřní tření od povrchu. Jinými slovy, nad vrstvou je již rychlost proudění stejná s rychlostí ve volném prostoru. Naopak u ochlazovaného povrchu je vnitřní tření, takže zde je médium v klidu. Gradient rychlosti proudění je závislý na koeficientu tření f . (1)



Obr. 1-4 Průběh rychlosti a teploty proudícího média

Velikost mezní vrstvy teploty δ_T proudícího vzduchu je dána poměrem teploty povrchu a teploty okolí v nekonečnu, číselná hodnota poměru je 0,99. Uvnitř této vrstvy je teplota média vyšší než nad vrstvou. Pod vrstvou je přenos pomocí konduktce, neboť proudění je zde minimální. Poslední vrstva koncentrace má stejný průběh s teplotou, avšak místo teploty je zde molekulární koncentrace částic.

1.2.3.1 Konvekce kostra – okolí

Jelikož je koeficient přestupu tepla závislý na rychlosti proudění, liší se orientační výpočet koeficientu pro přirozenou konvekci:

$$\alpha \approx 1,32 \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{D} \right)^{0,25}, \quad (1.14)$$

kde D je průměr válcového motoru a pro nucenou konvekci:

$$\alpha \approx 3,89 \cdot \sqrt{\frac{v}{l}}, \quad (1.15)$$

kde v je rychlost proudění a l je délka kostry motoru. Při nucené konvekci je koeficient přestupu přibližně 5 krát větší v závislosti na otáčkách. (4)

1.2.3.2 Konvekce ve vzduchové mezeře

Zde je koeficient závislý na délce a šířce vzduchové mezery, otáčkách rotoru a kinematické viskozitě proudícího média. Ve vzduchové mezeře vzniká Taylor-Couette proudění, které je důsledkem tečných sil mezi dvěma paralelními povrchy, z nichž jeden rotuje. Pro jeho výpočet se používá Taylorův vztah, ten je poměrně komplikovaný a udává poměr mezi viskózními a odstředivými silami. Pokud výsledné Taylorovo číslo přesáhne kritickou mez, proudění se stane nestabilní a vzniknou Taylorovy víry. Ze znalosti Taylorova čísla je již možné stanovit Nusseltovo číslo, viz Tab. 1-2. (1)

<i>Nusseltovo číslo [-]</i>	<i>Taylorovo číslo [-]</i>
2	$T_a < 1700$
$0,128 \cdot T_a^{0,367}$	$1700 < T_a < 10^4$
$0,409 \cdot T_a^{0,241}$	$10^4 < T_a < 10^7$

Tab. 1-2 Stanovení Nusseltova čísla

Teplotní koeficient přestupu tepla ze statoru, rotoru do vzduchové mezery se určí pomocí rovnice (1.16).

$$\alpha = \frac{N_u \cdot \lambda}{\delta} \quad (1.16)$$

Existuje také zjednodušený výpočet, který je vztažený pouze k rychlosti otáček rotoru, viz vztah (1.17). (4)

$$\alpha = 14,7 \cdot v^{0,65} \quad (1.17)$$

Drsnost povrchu má také vliv na zvýšení ochlazované plochy a zvýšení turbulence. Dvěma studii je prokázáno, že drsnější povrch zvýší o 40 – 70 % koeficient přestupu tepla oproti hladkým povrchům. (1)

1.2.3.3 Konvekce v čelech motoru

V prostoru mezi rotorem a čely statorového vinutí se uvažuje obdobné proudění jako ve vzduchové mezeře. Pro výpočet proudění se použije empirických výpočtů Taylorova čísla a z rovnice (1.16) se stanoví koeficient přestupu tepla na povrchu čel statorového vinutí. V části mezi čely vinutí a kostrou motoru je proudění vzduchu mnohem menší a laminární. Přes tuto část se musí brát v úvahu i přenos tepla sáláním. (1)

2 Chlazení elektrických strojů

Důvodem pro odvod tepla je zamezení zničení izolace, která je z tepelného hlediska nejslabším článkem stroje. Životnost izolace je přibližně stanovena statickými metodami avšak může být značně zkrácena zvýšením teploty, při zvýšení o 10 °K se sníží životnost o 50 %.

Existuje mnoho způsobů chlazení elektrických strojů a pro ně existují označení, která jsou shrnuta v IC kódu stroje daném normou ČSN 60034-6. Podle této normy každý stroj musí mezi svými štítkovými hodnotami udávat tento kód. Následující tabulka udává význam IC kódu. Je možné mít dvouokruhové chlazení, tj. další označení a, y.

<i>IC</i>	<i>x</i> <i>způsob proudění</i>	<i>a</i> <i>chladičí médium</i>	<i>y</i> <i>zdroj tlaku</i>
<i>význam</i>	0 volný okruh 1 – 3 přívod, odvod chladiva 4 povrchové chlazení 5 – 9 různá provedení s výměníky	A vzduch W voda H vodík U olej C oxid uhličitý N dusík F freon S ostatní média	0 nenucená konvekce 1 vlastní ventilace 5 – 6 nezávislý ventilátor 7 cizí chladičí jednotka 8 – 9 tlak vlivem pohybu

Tab. 2-1 Chlazení elektrických strojů IC

2.1 Ventilátory

Slouží jako zdroj tlaku pro motory s nucenou konvekcí. Základní rozdělení je mezi ventilátory vlastními, které jsou umístěny na hřídeli motoru a ventilátory cizími, jenž jsou zpravidla mimo stroj. Vlastní chlazení je častějším řešením, pro jeho spolehlivost, jednodušší údržbu a bez potřeby jej řídit a napájet.

2.1.1 Vlastní ventilace

Je účinná zejména pro vysokootáčkové stroje a se snižujícím počtem otáček se většinou exponenciálně snižuje účinnost. Nejmenší účinnost mají ventilátory s rovnými radiálními lopatkami u strojů s možným reverzním chodem, zde se pohybuje účinnost v rozmezí $\eta = 0,15 - 0,20$. Naopak pro ventilátory s lopatkami zahnutými dozadu je účinnost $\eta = 0,50 - 0,55$. Základní rozdělení podle směru průtoku vzduchu jsou:

- radiální,
- axiální,
- jejich kombinace.

2.1.1.1 Radiální ventilátory

Součástí tohoto ventilátoru je spirální skříň, do které vstupuje vzduch v axiálním směru a mění část kinetické energie vzduchu odcházející z oběžného kola na statický tlak. Proudnice ve skříni mají tvar logaritmické spirály. Pro dopředu zahnuté lopatky je účinnost ventilátoru $\eta = 0,55 - 0,65$. Tyto ventilátory mají velkou šířku oběžného kola a nízké otáčky. (3)

Jiné provedení je s dozadu zahnutými lopatkami, výroba je komplikovanější a počet lopatek nižší, ale účinnost je $\eta = 0,80 - 0,85$. To značí nízký hydraulický odpor mezi výtlačným hrdlem a průřezem potrubí. Obecně tyto ventilátory zajišťují na výstupu poměrně vysoký tlak.

2.1.1.2 Axiální ventilátor

Vzduch proudí v axiálním směru s možností dopravy velkého množství vzduchu avšak nízkým statickým tlakem. Jelikož v elektrických strojích nelze za axiálním ventilátorem použít difuzor ani usměrňovací lopatky je veškerá kinetická energie ztracená. Při porovnání těchto ventilátorů je zásadní statický tlak a jeho účinnost. U těchto ventilátorů mohou vznikat časté poruchy proudění (prstencové víry) na sací straně oproti radiálním ventilátorům. V porovnání s průmyslovými ventilátory jsou méně účinné. Používají se pro stroje s vysokými otáčkami až do obvodových rychlostí přesahujících 50 m/s. (3)

2.1.1.3 Axiálně radiální ventilátor

Rovné radiální lopatky nakloněné v určitém úhlu ve směru otáčení. Jejich použití je u synchronních strojů s vyniklými póly, kde vhání vzduch mezi pólové cívký. Pomáhají chladit čela statorového vinutí vlivem recirkulace. Počet lopatek je většinou dán počtem pólu rotoru, či jeho násobkem. (5)

2.1.2 Cizí ventilace

Je uskutečněna pomocí průmyslových ventilátorů a vzduchovodů. Toto řešení nachází využití mezi stroji s proměnnými, či nízkými otáčkami. U strojů asynchronních je jejich použití zejména u strojů pracujících ve výbušném prostředí. Další možná využití jsou pro stroje v traktoru. Účinnost průmyslových ventilátorů je okolo $\eta = 0,90$. Základní konstrukční uspořádání jsou: radiální, axiální, diagonální a diametrální.

Dále mohou být průmyslové ventilátory rozděleny podle dopravního tlaku (nízkotlaké, středotlaké, vysokotlaké), podle počtu stupňů (jedno a více stupňové) a podle přenosu energie od pohonu (přímo na hřídeli, přes řemen a spojku). (6)

2.2 Způsoby chlazení

Způsob chlazení je dán zejména požadavkem na jeho efektivitu, spolehlivost a ekonomickou náročnost. S intenzivnějším způsobem chlazení můžeme předimenzovat stroje na hranici jejich únosnosti. Základní rozdělení při šíření chladiva v elektrickém stroji jsou axiální a radiální ventilace.

2.2.1 Vzduchové chlazení

Přirozené chlazení strojů se používá do výkonu 1 kW, pro vyšší výkony roste tepelné zatížení, které je potřeba chladit použitím umělých prostředků.

2.2.1.1 Otevřený okruh

Jeden ze způsobů chlazení je otevřené provedení, kde do stroje vstoupí studený vzduch z okolí, uvnitř stroje změní svou tepelnou bilanci a zpět vystoupí do okolního prostředí. O odvedený vzduch se již nijak nestaráme, avšak vzduch se odvádí do prostoru v místě elektrického stroje a může ohřívat systémy poblíž elektrického stroje. Tento typ stroje by se měl používat v neprašných prostředích, aby se prachem nezanášeli vnitřní části stroje. Hluk, jehož šíření nic nebrání, zvýší hlučnost pracovního prostředí v prostorách stroje. (6)

2.2.1.2 Uzavřený okruh

U uzavřeného provedení cirkuluje vzduch v uzavřeném okruhu uvnitř stroje, nebo mezi strojem a výměníkem. Stroje s tímto chlazením jsou vhodné do prašného prostředí a v jejich okolí je nižší úroveň hluku oproti strojům otevřeným. Únik vzduchu z okruhu je doplňován přes filtry z venkovního prostředí. Typickým příkladem uzavřeného provedení jsou stroje s označením TEFC (totally enclosed fan-cooled).

2.2.1.3 Axiální ventilace

Chladicí médium proudí ve směru osy rotace hřídele a to buď na vnějšku motoru, nebo uvnitř mezi statorem a rotorem. Uvnitř stroje proudí vzduch kolem ploch, které se ohřívají, tj. čela, svazky rotoru, statoru skrze ventilační kanály. Ohřátý vzduch se odvádí ven ze stroje. Při delším magnetickém svazku může dojít k nerovnoměrnému oteplení, a proto se tato ventilace volí pro motory o poměru délka/ průměr menším než 1,2. Samotná axiální ventilace je pro stroje nižších a středních výkonů, pro vyšší je nutná kombinace s radiální. (6)

2.2.1.4 Radiální ventilace

Vzduch proudí ve směru kolmém na osu otáčení (radiálním) skrze ventilační kanálky, které jsou mezi statorovými pakety vytvořeny pomocí distančních vložek. Šířka těchto kanálů je dána potřebným průtokem chladiva s ohledem na hydraulický odpor kanálu a pohybuje se okolo 10 mm. Distanční vložky mohou plnit funkci radiálních lopatek a vhnět vzduch do kanálu. (6)

2.2.1.5 Povrchová ventilace

Zdrojem tlaku jsou výše zmíněné axiální, nebo radiální ventilátory, které tlačí vzduch od krytu ventilátoru na žebra kostry motoru, díky kterým je ochlazovací plocha vyšší. Pro zvýšení účinnosti ochlazení ploch kostry, jsou často zahnuté lopatky, avšak to nelze pro stroje s reverzním chodem. Pro nižší výkony není potřeba nucené ventilace a teplo z motoru se šíří zejména tepelnou radiací. Ta se může zvýšit černým lakem kostry motoru.

2.2.2 Chladicí médium

Je látka, která odvádí, přenáší tepelnou energii, za účelem snížení střední hodnoty teploty na částech stroje. Primární chladivo odvádí teplo zevnitř stroje a sekundární chladivo z povrchu kostry, či chladiče.

2.2.2.1 Vzduch

Nejpoužívanější chladicí médium, které není potřeba vyrábět. Při proudění má velmi nízké hydraulické ztráty, avšak teplotní koeficient přestupu tepla je v porovnání s ostatními chladivy poměrně nízký při stejném průtoku. Průtok, ale může být mnohonásobně vyšší oproti např. vodě. Vzduch vyplní všechny prostory v motoru. Nevýhodou jsou mikročástice prachu, které se ve vzduchu snadno šíří. Další nevýhodou jsou korozivní účinky vzduchu, dané jeho vlhkostí, při niž může dojít k tvorbě povrchových vrstev na krajích magnetických svazků, ložisek a jiných

místech, která nejsou chráněna mazivem a lakem.

2.2.2.2 Vodík

Má přibližně ≈ 14 x nižší hustotu oproti vzduchu, čímž se snižují hydraulické ztráty. Koeficient přestupu tepla je při stejném průtoku přibližně $\approx 1,4$ x vyšší oproti vzduchu. Mezi jeho nevýhody patří poměrně složitá výroba, výbušnost při určité koncentraci se vzduchem a nutnost udržování jeho čistoty. Celé chladicí hospodářství musí být velice dobře těsněno a tím je dosti náročné na údržbu.

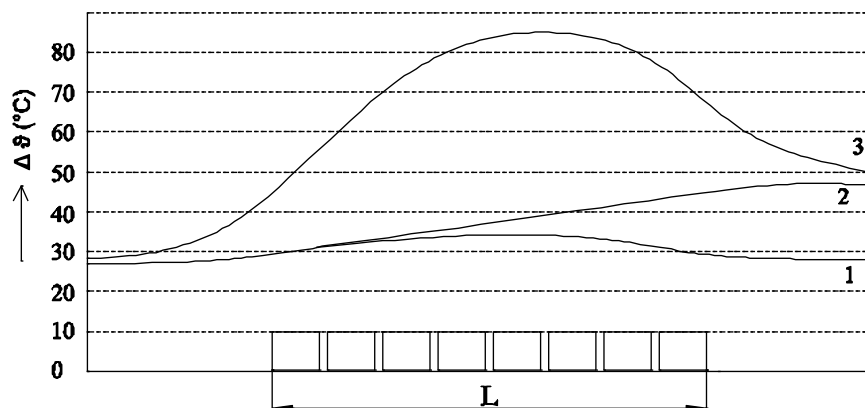
2.2.2.3 Voda

Používá se většinou destilovaná voda bez minerálů, tudíž je i elektricky nevodivá. Teplotní koeficient přestupu tepla je ≈ 50 x vyšší oproti vzduchu. Hustota vody je přibližně ≈ 800 x vyšší oproti vzduchu a tím jsou i vysoké hydraulické ztráty, proto při použití vodního oběhu jsou velmi nízké rychlosti proudění, neboť by docházelo k ohřevu vlivem hydraulických ztrát. Komplikací je i složitost vodního chlazení a soustavy čerpadel pro oběh.

Ostatní chladicí média uvedené v tab. 2-1, jsou jen výjimečně používána z důvodu ceny a vlastností chladiva. (6)

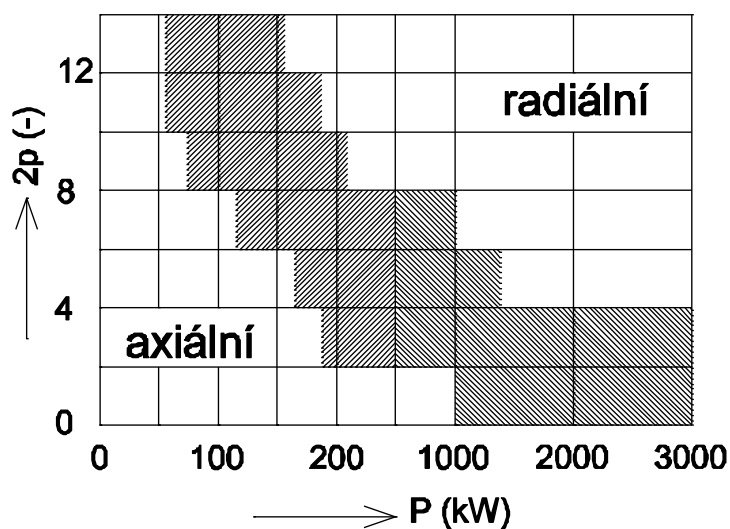
2.3 Ventilační systém asynchronních strojů

Jsou používány všechny výše uvedené typy ventilace, pro které existují průběhy oteplení v závislosti na délce svazku magnetického obvodu. Průběh axiální ventilace je nejméně účinný a rozdíl oteplení je velmi nevyvážený, viz Obr. 2-1. Pro ventilaci v axiálním směru je nutné použít radiální ventilátor, neboť ventilační účinky od rotace rotoru nejsou dostačující. Průměr takového ventilátoru musí být vyšší, než je průměr rotoru. Pro dostačující axiální ventilaci je potřeba vytvořit kanály ve jhu, nebo zubech rotoru, méně častá varianta je kanál mezi klíny v drážce. Použití axiální ventilace se z důvodu technologicky snazšího řešení a využití najde ve strojích malých a středních výkonů. Na Obr. 2-1 jsou zobrazeny průběhy oteplení na délce svazku L pro (1) symetrickou radiální ventilaci, (2) jednostrannou radiální ventilaci, (3) axiální ventilaci. (5)



Obr. 2-1 Průběh oteplení pro různé způsoby chlazení

Symetrická radiální ventilace se používá pro rychloběžné stroje. Při snížení vzdálenosti vnějšího krytu od čel vinutí je možné docílit zvýšení intenzity chlazení čel vinutí a zkrácení vzdálenosti ložiskových stojanů. Tato vzdálenost je omezena izolačními parametry izolace čel vůči krytu. Kombinace axiálního a radiálního chlazení není příliš častá. Na Obr. 2-2 je možné vidět rozsah používaných výkonů pro axiální a radiální ventilaci. (5)



Obr. 2-2 Rozsah použití axiální a radiální ventilace

3 Tepelné obvody

Slouží k určení maximální a průměrné hodnoty oteplení částí stroje, které mohou být potenciálně ohroženy vlivem zvýšené teploty. Jedná se zejména o izolaci vinutí stroje. Oteplení nemůže překročit hodnotu, která je dána tepelnou odolností dané izolace. Pokud hodnotu překročí, je třeba změnit, upravit chladicí systém, elektromagnetický návrh (větší rozměry), či zvýšit třídu odolnosti izolace.

3.1 Metoda tepelné sítě

Sdílení tepla v elektrických strojích probíhá ve všech třech rozměrech, to je však z důvodu složitých parciálních diferenciálních rovnic, nehomogenity a anizotropie nereálné. Proto se zde aplikuje níže uvedená analogie. Cílem této metody je nalézt tepelné odpory a místa zdrojů ztrát, pomocí níž co nejpřesněji určíme oteplení stroje. Elektrické sítě lze vypočítat pomocí soustavy lineárních rovnic, které můžeme metodami lineární algebry řešit. V dnešní době je možné tyto soustavy (matice) řešit pomocí softwarů jako např. *Matlab*, avšak tyto matice je potřeba vyjádřit. Metody, pomocí kterých vyjádříme soustavu:

- Metoda smyček - úbytky napětí uzavřeného obvodu jsou rovny nule.
- Metoda uzlů - součet proudů v uzlu se rovná nule.
- Kombinovaná metoda - kombinace předešlých.

Výběr metody závisí na veličině, která je zjišťována, v případě metody smyček se jedná o tepelné toky. Pokud chceme znát oteplení v uzlech, počítáme metodou uzlů. (1)

3.2 Ekvivalence mezi elektrickými a tepelnými obvody

Analogie tepelných a elektrických obvodů se soustředěnými parametry je vhodná z důvodu aplikace Kirchhoffových zákonů a Ohmova zákona. Ekvivalence jednotlivých veličin je zobrazena v Tab. 3-1 Tepelné ztráty ve stroji jsou nahrazeny zdroji tepelného toku.

<i>Tepelný obvod</i>	<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>	<i>Elektrický obvod</i>	<i>Symbol</i>	<i>Jednotka</i>
Teplo	Q_t	J	Elektrický náboj	Q	C
Tepelný tok	Φ_t	W	Elektrický proud	I	A
Hustota tepelného toku	q	W/m^2	Proudová hustota	J	A/m^2
Teplota	T	K	Elektrický potenciál	φ	V
Oteplení	Θ	K	Napětí	U	V
Měrná tepelná vodivost	λ	$W/m \cdot K$	Konduktivita	σ	S/m
Tepelný odpor	R_t	K/W	Elektrický odpor	R	Ω
Tepelná vodivost	G_t	W/K	Elektrická vodivost	G	S
Tepelná kapacita	C_t	J/K	Kapacita	C	F

Tab. 3-1 Analogie tepelných a elektrických obvodů

Pro řešenou oblast určíme místa, kde budeme zjišťovat oteplení, zde budou uzly. Jsou to místa, která je třeba kontrolovat při tepelném výpočtu, zejména vinutí. Mezi nimi jsou tepelné odpory jednotlivých materiálů. V řešené oblasti můžeme zvolit vyšší počet uzlů, tím bude řešení přesnější a více komplexní v dané oblasti. Řešení většího počtu uzlů je pracnější a vede na soustavy rovnic o n neznámých, kde n je počet uzlů. (1)

Magnetický svazek se skládá z plechů, které jsou od sebe izolovány, takže je možné zanedbat šíření tepla v axiálním směru, kde je příliš velký tepelný odpor. Drážky jsou úzké a v radiálním směru je přenos tepla v drážce nízký. Plocha mezi drážkou a jhem je minimální, tudíž tepelný přenos bude nízký a je možné přestup tepla zanedbat. Pro výpočet tepelného odporu platí tyto vzorce:

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

pro tepelný odpor v látce

$$R_{th} = \frac{1}{\alpha \cdot S}, \quad (3.2)$$

pro tepelný odpor při přestupu mezi látkami

$$R_q = \frac{1}{2\rho \cdot c_p \cdot q}, \quad (3.3)$$

pro tepelný odpor v plynu, kapalině při jeho proudění q a tepelné kapacitě c_p . (1)

3.2.1 Měrná tepelná vodivost vinutí

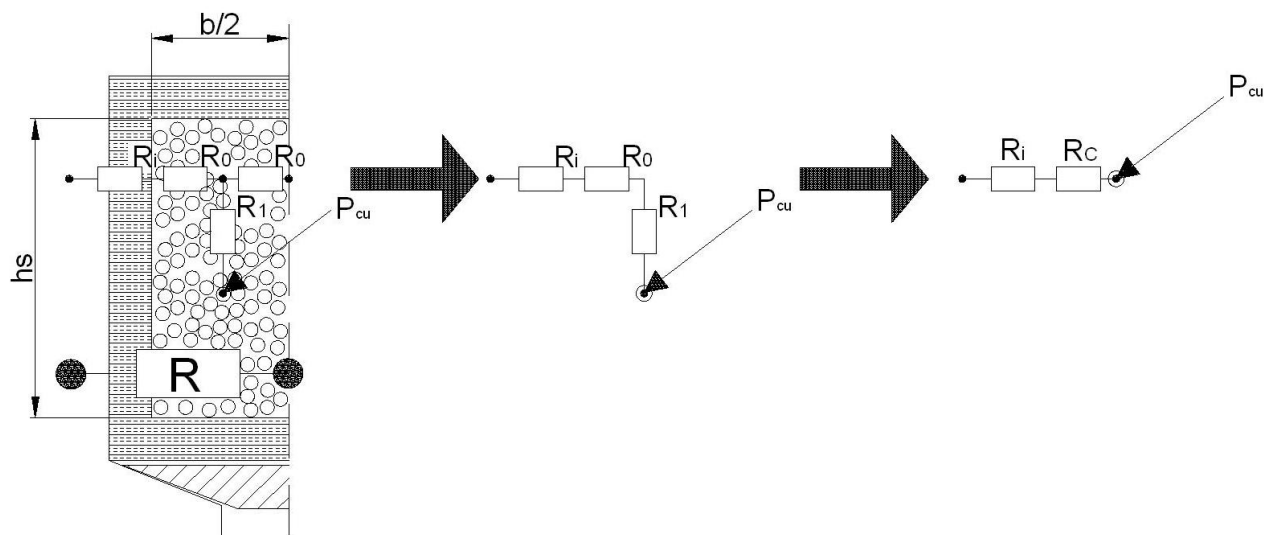
Vinutí elektrických strojů je nehomogenní, to je dáno dobrými vodivými vlastnostmi samotného vodiče a špatnými vodivými vlastnostmi izolace. Lze nahradit nehomogenní vinutí vinutím homogenním, kde bude přepočtená tepelná vodivost vzhledem k množství izolace. Pro vsypávané vinutí platí následující vztah:

$$\lambda_{av} \approx \lambda_i \cdot \left(\frac{d}{\delta_i} + \frac{\delta_i}{d} \right), \quad (3.4)$$

kde d je průměr vodiče a d' je průměr izolace a δ_i je mezera mezi vodiči. Výpočet je přibližný, neboť vzdálenosti jednotlivých vodičů nejsou všude stejné. Pokud budeme počítat přestup tepla vodiče v axiálním směru, tj. z čel vinutí do vinutí v drážce, použije se tepelná vodivost elektrického vodiče. Teplo bude přenášeno cestou nejnižšího odporu, tím se zmenší průřez, kterým je teplo přenášeno. (1)

3.2.2 Tepelný odpor vsypávaného vinutí

Rozložení teploty v příčném řezu vinutí nebude konstantní. Při předpokladu tepelného toku pouze do zubu, může být uvažován tok v jednom směru od středu drážky, kde je maximální teplota. Při tomto zjednodušení, neteče tepelný tok přes střed drážky.



Obr. 3-1 Náhradní schéma drážky pro vsypávané vinutí

Při zjednodušení tohoto schématu a dosazení příslušných hodnot dostaneme výsledný tepelný odpor, který tepelný tok překonává ve směru do zubu magnetického obvodu. Platí:

$$R = R_i + R_0 + R_1 = R_i + \frac{R}{2} - \frac{R}{6} = R_i + \frac{1}{6} \cdot \frac{b}{\lambda_{av} h_s l} \quad (3.5)$$

3.2.3 Tepelný odpor mezi rozdílnými materiály

Žádný povrch není dokonale hladký a při spojení dvou pevných materiálů, vzniknou místa, kde nebude dotyk. Tepelný odpor mezi těmito materiály bude záviset na kvalitě opracování dílčích materiálu a s tím souvisí technologie výroby. Lze stanovit střední hodnotu drsnosti povrchů a uvažovat tepelný přestup skrze vzduch pomocí rovnic (3.1), (3.2). Mezi dvěma kovovými povrchy s drsností 30 μm je hodnota teplotního koeficientu α přibližně 1100 W/m² K.

V elektrických strojích je důležité zohlednit tyto technologické mezery zejména mezi prvky uvedenými v tab. 3-2. Kde největší odpor je mezi statorovým vinutím a magnetickým obvodem statoru. Hodnoty drsnosti povrchu se liší pro každý totožný vyrobený stroj, a proto je obtížné stanovit tyto hodnoty přesně. Je sice možné je změřit, avšak je nereálné měřit každý vyráběný kus za účelem získání přesnějšího tepelného výpočtu. V tab. 3-2 jsou uvedeny rozsahy těchto hodnot vzdálenosti a koeficientu přestupu tepla.

Místo spojení povrchů	Vzdálenost vzduchové mezery [mm]	Koeficient přestupu tepla [W/m ² K]
statorové vinutí – statorové jádro	0,10 – 0,30	80 – 250
kostra (hliníková) – statorové jádro	0,03 – 0,04	650 – 870
kostra (litinová) – statorové jádro	0,05 – 0,08	350 – 550
tyče rotoru – rotorové jádro	0,01 – 0,06	430 – 2600

Tab. 3-1 Parametry technologických mezer mezi částmi elektrického stroje

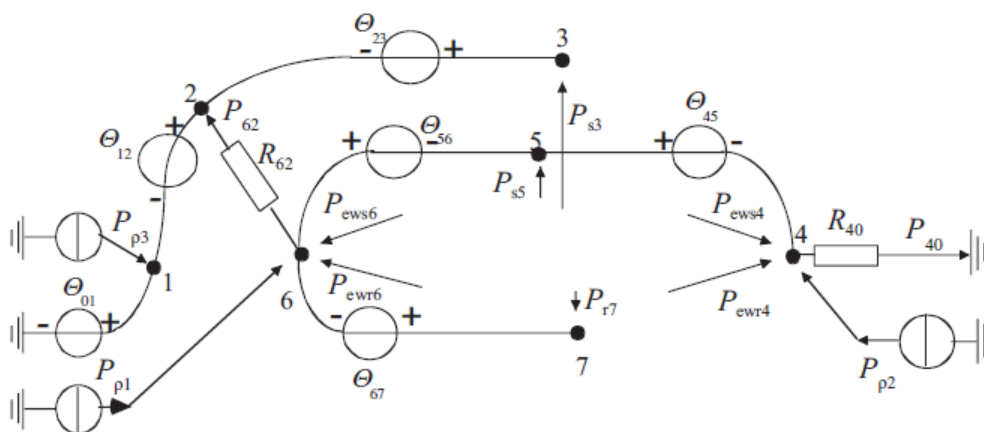
3.3 Analýza proudění chladicího média

Při výpočtech proudění chladicího média se nejčastěji uvažuje nějaká střední hodnota teploty, která je po celé délce motoru konstantní a bez problému dostačující pro uzavřené, ventilátorem chlazené motory. Pro motory s otevřeným oběhem chladiva je tato konstantní teplota nedostačující. Je možné odhadnout teploty média v jednotlivých částech a poté na základě znalosti tepelné sítě přepočítávat teplotu chladiva. Tím je možné se neustále dostávat k bližším hodnotám reálné teploty. (3)

Tepelná síť popsaná pasivními prvky je lineární a platí zde reciprocita, avšak pro chladicí oběh reciprocita neplatí, proto nelze změnu teploty chladicího média nahradit pasivními součástkami.

Přesnějšího výpočtu je dosaženo při řešení rovnic tepelné sítě ve stejnou dobu s rovnicemi teploty chladiva. Pro řešení modelu se používají řízené zdroje teploty. Řešení menší sítě je možné na papíře a na komplexnější sítě je již potřeba podpůrný software jako *Spice*, *Saber*.

Pro ukázkou tepelné sítě chladiva uzavřeného, ventilátorem chlazeného motoru, viz obr. 3-2, kde uzly 1,2,3 je dáno vnější proudění a uzly 4,5,6,7 udávají vnitřní proudění. Proměnné zdroje znázorněné ve schématu jsou závislé na ztrátách P_{xx} a hodnotě odporu chladicího média (3.3). (1)



Obr. 3-1 Náhradní tepelná síť chladicího média

Při hledání hodnoty odporu chladicího média, viz (3.3) je nutné stanovit průtok chladiva. Následující vztah udává úměru mezi průtokem a součtem všech ztrát ve stroji.

$$q = \frac{P_{ztráty}}{\rho \cdot c_p \cdot \theta} \quad (3.6)$$

Hodnota oteplení θ ve vzorci je dána teoretickým předpokladem, který se může pohybovat okolo 15 °C. (1)

Při řešení tepelných obvodů se sestaví matice vodivosti o rozměrech $n \times n$, kde n je počet uzlů v náhradním schématu. Sčítání vodivostí se lépe zapíše, nežli převrácené hodnoty odporu. Na hlavní diagonále jsou sečteny všechny vodivosti, které vstupují do daného uzlu. Mimo diagonálu jsou tyto vodivosti ve stejné řádce odečteny. Další matice jsou sloupcové a jsou to matice hledaných, neznámých oteplení a matice příchozích a odchozích výkonů. Tím je myšleno, příchozí výkon jsou ztráty vstupující do uzlu a odchozí výkon jsou ztráty odváděné chladicím médiem z uzlu. Ve zkráceném tvaru lze napsat:

$$[G] \cdot [\theta] = \begin{bmatrix} P \\ [-\Phi] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P \\ [0] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [0] \\ [\Phi] \end{bmatrix}. \quad (3.7)$$

Teplotní toky odvádějící tepelný výkon chladicím médiem jsou neznámé a pro jejich stanovení jsou potřeba další rovnice. Ve zjednodušeném případě uzavřeného motoru s vnějším oběhem, kde jsou uzly na každém ložiskovém štítu a uprostřed kostry, je potřeba stanovit další 3 rovnice. Z těchto rovnic lze vytvořit matice a zapsat je jako:

$$[\theta] = [R] \cdot [\Phi] + [\theta_p], \quad (3.8)$$

kde při zanedbání ventilačních ztrát θ_p můžeme vyjádřit odcházející tepelný tok jako:

$$[\Phi] = [R]^{-1} \cdot [\theta] \quad (3.9)$$

a při dosazení do rovnice (3.7) a upravení vztahu, dostáváme:

$$[\theta] = \left[[G] + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & [R]^{-1} \end{bmatrix} \right]^{-1} \cdot \begin{bmatrix} [P] \\ [R]^{-1} \cdot [\theta_p] \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Pokud definujeme prvky matic (vodivosti a ztráty) je možné skrze tento výsledný maticový tvar dojít k výslednému oteplení, např. pomocí *Matlabu*. (1)

4 Numerické metody řešení

Záměr použití těchto metod je vytvoření algoritmů při řešení různých matematických problémů. A pomocí tohoto algoritmu stanovit číselné výstupy podle námi zadaných vstupních informací (okrajových podmínek). Tyto metody slouží k analýze inženýrského problému nějakého prvku, který mění své parametry. Chování této změny nelze popsat přesně, avšak lze vytvořit model prvku. Analytické řešení není u složitějších změn na místě z důvodu časové náročnosti a obtížnosti. Díky znalostem numerické matematiky uplatněných v softwarech pro modelování jevů, lze řešit i rozsáhlé výpočetní modely.

4.1 MKP (metoda konečných prvků)

Jedná se o numerickou metodu používanou pro nalezení aproximovaného řešení soustavy diferenciálních nebo integrálních rovnic, popisujících vlastnosti určité fyzikální soustavy. Tato soustava je nahrazena konečným počtem vzájemně spojených uzlů, která jsou vzájemně propojena pomocí elementů. Rozdělení modelu prvku na tyto malé elementy konečných rozměrů se nazývá diskretizace. Každý element je popsán jednoduchou matematickou funkcí, tudíž celý model je popsán soustavou rovnic. Diferenciální řešení zkoumaných fyzikálních problémů je převedeno do algebraických rovnic. Pro správnou definici výsledků je nutné stanovit čtyři základní parametry modelu:

- materiál,
- výpočetní síť,
- okrajové podmínky,
- interpretaci výsledků.

Přesné výsledky budou stanoveny pouze v uzlových místech, ve zbylých částech jsou výsledné hodnoty interpolovány. Tím pádem hustota sítě je úměrná přesnosti řešení, proto v kritických místech je potřeba síť zjemnit.

Okrajové podmínky stanoví vnější působení na počítaný model, nebo stanový kontaktní místa mezi tělesy. Nesprávná interpretace okrajových podmínek vede ke špatnému výsledku. (7)

<i>Analytické metody</i>	<i>Numerické metody</i>
<ul style="list-style-type: none"> • nekonečný počet neznámých 	<ul style="list-style-type: none"> • Převod na konečný počet stupňů
<ul style="list-style-type: none"> • spojité rozložení veličiny v prostoru 	<ul style="list-style-type: none"> • Aproximace diferenciálních rovnic
<ul style="list-style-type: none"> • diferenciální rovnice 	
<ul style="list-style-type: none"> • řešení „přesné“ a „spojité“ 	<ul style="list-style-type: none"> • Řešení přibližné a diskrétní

Obr. 4-1 Porovnání analytických a numerických metod

4.1.1 Pre – processing

Část před procesem zahrnuje tvorbu 2D, 3D modelu a přiřazení materiálových vlastností k tělesům. Volba hustoty sítě a metody síťování, včetně typu elementu. Pro rovinné úlohy je volba elementu mezi trojúhelníky a čtyřúhelníky. V případě prostorové úlohy je volba elementu mezi čtyřstěnem, pětistěnem a šestistěnem. Do pre – processing patří i vytvoření aproximačních funkcí jednotlivých uzlů. Tím se definuje místo, jenž bude řešeno. Nastavuje se zde také typ analýzy a její přesnost spolu s okrajovými podmínkami dané úlohy.

4.1.2 Processing – solver

Zde probíhá samotné řešení úlohy a zapsání jejího výsledku do souboru.

4.1.3 Post – processing

Poslední část zahrnuje vyhodnocení řešené úlohy s grafickou interpretací počítaných neznámých. Možnosti zobrazení ve 3D modelech, grafech, či tabulkových hodnotách. (7)

4.2 CFD (metoda konečných objemů)

Tato metoda je v principu obdobná metodě konečných prvků, avšak využívá integrálního tvaru rovnic. Řešené těleso je také rozděleno na konečný počet malých objemů a základní rovnice, které popisují spojité prostředí, jsou diskretizovány do soustavy algebraických rovnic. Každé objemové tělíčko v síti má středový uzel, kde jsou vypočteny výsledné hodnoty a hodnoty v hraničních oblastech jsou získány interpolací. CFD slouží k řešení dynamiky tekutin a užívá jej přibližně 80 % komerčních řešičů. (7)

4.3 Ansys

Je inženýrský program sloužící pro simulaci fyzikálních jevů pomocí metod konečných prvků a objemů patřící stejnojmenné Americké společnosti. Řeší rozsáhlé soustavy lineárních a nelineárních úloh. Univerzálním prostředím zahrnuje spoustu podprogramů, které řeší jednotlivé fyzikální jevy.

Poměrně nové uživatelské prostředí ANSYS Workbench je pro uživatele velmi přehledné a snadno ovladatelné. Starší verze APDL je ovládána pomocí skriptů a pro laika dosti nepřehledná.

Balíček podprogramů, který ANSYS řeší spousty úloh od termodynamiky, elektromagnetických polí až po chemické reakce. Zde jsou uvedeny jen úlohy spojené s řešeným problémem.

4.3.1 DesignModeler

Jedná se o podprogram pro tvoření geometrie modelu. Pro člověka pracujícího 3D CAD softwaru jako SolidWorks, Catia, ProE může být DesignModeler dosti nepřehledný a nevhodný pro ovládání. Proto je možné importovat model ze široké škály 3D CAD softwarů. Tento program má poměrně nepřehledné zobrazení ve stromu osnovy, kde nelze měnit umístění prvků, těles ani pojmenovaných oblastí, i přesto, že na sobě nejsou závislé. Je proto vhodné provést veškeré úpravy geometrie v původním softwaru a do DesignModeleru nahrát již model, který je potřeba minimálně upravovat, například uzavřít model, nebo sečíst tělesa. Při modelování je také velmi důležité mít pojmenované oblasti, to je z důvodu přehlednosti lepší provést až v Mechanical APDL. Nahráný soubor nesmí mít přesahy materiálů, DesignModeler je sice pošle do dalšího podprogramu, ale tam již budou při výpočtech vznikat chyby.

Při tvorbě modelu je základem stanovení soustavy jednotek, se kterými budu pracovat. Dále se zvolí rovina a v záložce *sketching* se vybírají geometrické útvary pro vytvoření skici. Skica se vytvoří pomocí 4 základních způsobů vysunutí do prostoru, které jsou uvedeny v záložce *create*. Pokud se na vytvořeném objektu bude zkoumat proudění, nebo šíření magnetického pole, je potřeba objekt uzavřít. K tomu slouží funkce *enclosure*, kde se vybere tvar objemu a vzdálenosti od uzavřeného tělesa. Tento nástroj je možné nahradit vlastním vysunutým objektem, avšak je poté potřeba provést pomocí funkce *boolean* odečet objemů.

4.3.2 Mechanical

Slouží pro tvorbu sítě v modelu, která po připojení DesignModeleru je

importována do prostředí. V tomto programu je možné potlačit prvky, které nechceme v úloze řešit. Dále se vybere v postranním okénku ikona *Mesh* a v jejím detailu se vybere řešený problém, jemnost sítě a její vyhlazování. Velmi vhodné je nastavení velikosti elementu na námi zvolený povrch, či objem pomocí funkce *sizing*. Spuštění tvorby sítě je příkazem *generate mesh*.

4.3.3 CFX

V tomto programu se řeší proudění kapalin a plynů. Při spuštění buňky *setup* se spustí soubor CFX-Pre, kam se importuje mesh z Mechanical. Zde je potřeba stanovit typ úlohy (statická, přechodová) v záložce *Analysis Type*. Poté je vhodné vymazat automaticky vygenerované domény (to lze přenastavit) a vytvořit pro každé těleso s odlišným materiálem novou doménu. V případě rotujícího tělesa zvolit otáčky tělesa.

V doméně vzduchu, kapaliny se nastaví okrajové podmínky *wall*, *inlet*, *outlet a open*. Kde je možné nastavit vstupní, výstupní parametry prostředí (tlak, rychlost aj.). Pakliže je povrch označen jako *wall* je pevný a neprochází jím žádné proudící médium, je to překážka. Záložka *interface* nastavuje přechody mezi prostředími z kapaliny do pevného tělesa aj.

V ikoně *Solver Control* se nastaví přesnost iterace a počet kroků iterace při výpočtu. První dosažená hodnota (počet, přesnost) vypne iterační proces. CFX-Pre nyní je možné vypnout a spustit buňku *Solution*.

V *Solution* se zobrazí list s místem uložení výstupní složky a s volbou počtu aktivních procesorů během výpočtu v záložce *Run Mode*. Po spuštění výpočtu je možné sledovat křivky přesnosti výpočtu turbulencí, tepelných přenosů a přenosů hmoty.

Po dokončení výpočtu se spustí buňka *Result*, kde se z horní lišty vybere způsob zobrazení počítané veličiny. Pro plošné zobrazení je vhodná volba *Contour* a pro zobrazení proudnic se vybere *Streamline*, nebo *Vector*.

4.3.4 Thermal Analysis

Je tvořena ve stejném prostředí jako mesh, tj. Mechanical a slouží pro řešení statického a tranzientního přestupu tepla v tělese. Materiály je potřeba nadefinovat v buňce *Engineering Data*, kde se materiály vyberou z knihovny, nebo se definují z tabulek Microsoft Excel, pro případ nelineárních charakteristik. Dále se importuje geometrie a spustí se Mechanical.

V záložce *Geometry* se pro každé těleso vybere materiál nadefinovaný v *Engineering Data* a vytvoří se síť v záložce *Mesh*. Ve složce *Steady-state/ Transient*

Thermal Analysis se vybere způsob zadání zdroje tepla (teplotou, teplem, výkonem) a importují se informace z CFX (teplota, koeficient přestupu tepla), to musí být připojeno. Těmto přeneseným informacím jsou přiřazeny plochy, na které se zátěž přenesse. Ve složce *Solution* se vybere hledaný parametr (teplota, tepelný tok) a spustí se řešení analýzy.

5 Model a návrh motoru

Navržený asynchronní motor byl zvolen přírubový a při tvorbě geometrie a elektromagnetického návrhu se postupovalo dle skutečného motoru. Důvodem bylo zejména stanovení přesných rozměrů geometrie kostry, ventilátoru a ložiskových štítů, aj. Pro uvedený stroj byl proveden elektromagnetický návrh, ve kterém se postupovalo podle hodnot získaných z reálného motoru. Hodnoty byly získány z katalogových údajů rozměru, štítkových hodnot a z měření pomocí posuvného měřítka. Hodnoty, které nebylo možné stanovit touto cestou, byly dopočteny v elektromagnetickém návrhu.

5.1 Návrh asynchronního stroje

Jak již bylo zmíněno, účelem elektromagnetického návrhu stroje bylo dopočítání neznámých rozměrů, například rozměry drážek a vinutí. Dalším důvodem bylo stanovení ztrát v jednotlivých částech stroje za účelem výpočtu oteplení pomocí náhradní tepelné sítě a MKP. Štítkové hodnoty motoru pro frekvenci 50 Hz jsou uvedeny v Tab. 5-1.

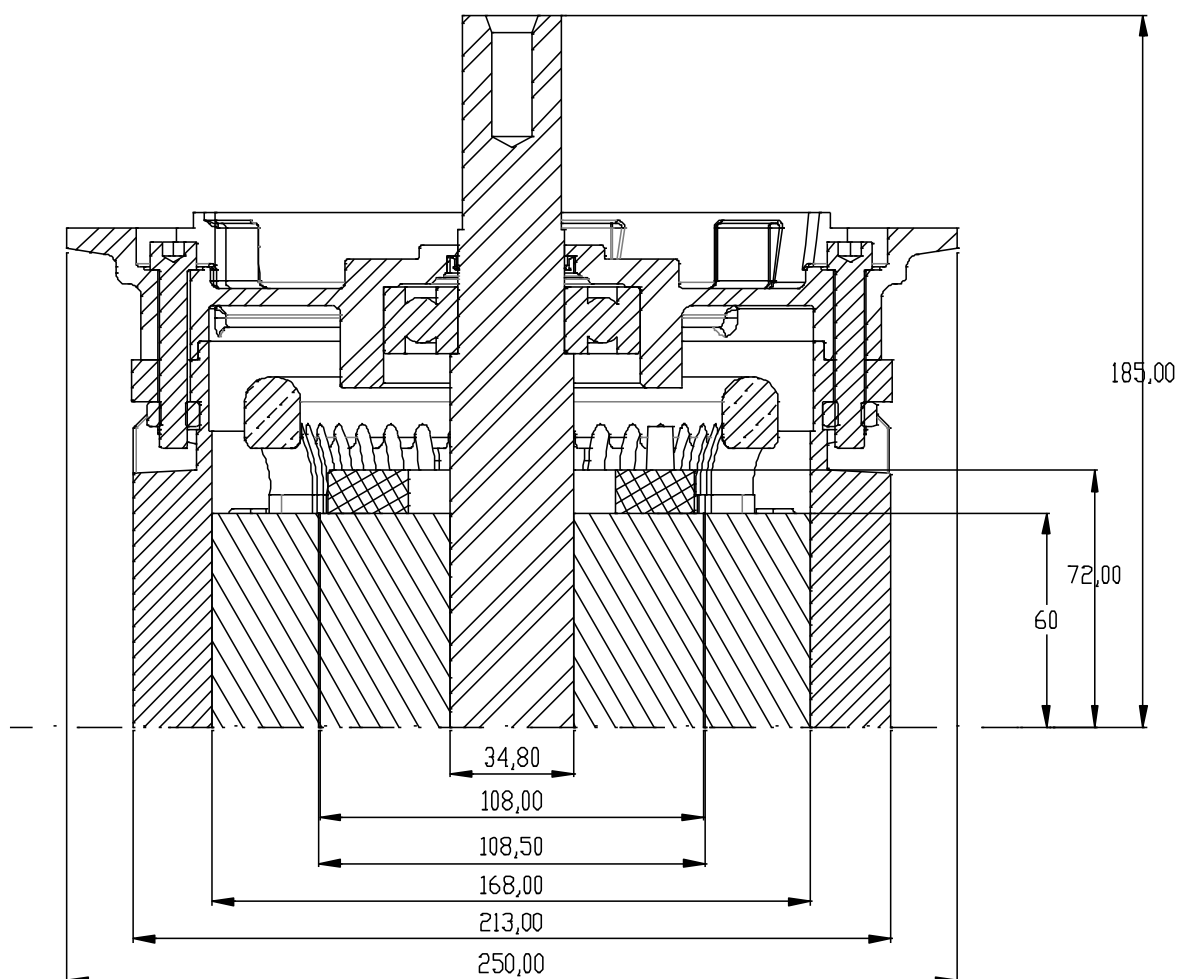
Typ	3~ Mot 7AA112M34
Výrobce	MEZ
Výkon	4 kW
Napětí	400/690 V Δ/Y
Proud	8,2/4,7 A
Účinnost	0,83
Otáčky	1440/min
Krytí, Provedení	IP 55, IM 3641
Hmotnost	31 kg

Tab. 5-1 Štítkové hodnoty asynchronního stroje

Důležité změřené a vypočtené parametry stroje:

- Příkon stroje 4681,2 W
- Délka vzduchové mezery 120 mm
- Typ drážky statoru S
- Počet drážek statoru 36

- Typ vinutí vsypávané
- Počet efektivních vodičů v drážce 32
- Indukce ve vzduchové mezeře 0,842 T
- Velikost vzduchové mezery 0,25 mm
- Počet tyčí rotoru 28
- Proud v tyči rotoru 276 A
- Typ drážek rotoru zavřené lichoběžníkové



Obr. 5-1 Konstrukční rozměry stroje v řezu

5.2 Ztráty v asynchronním stroji

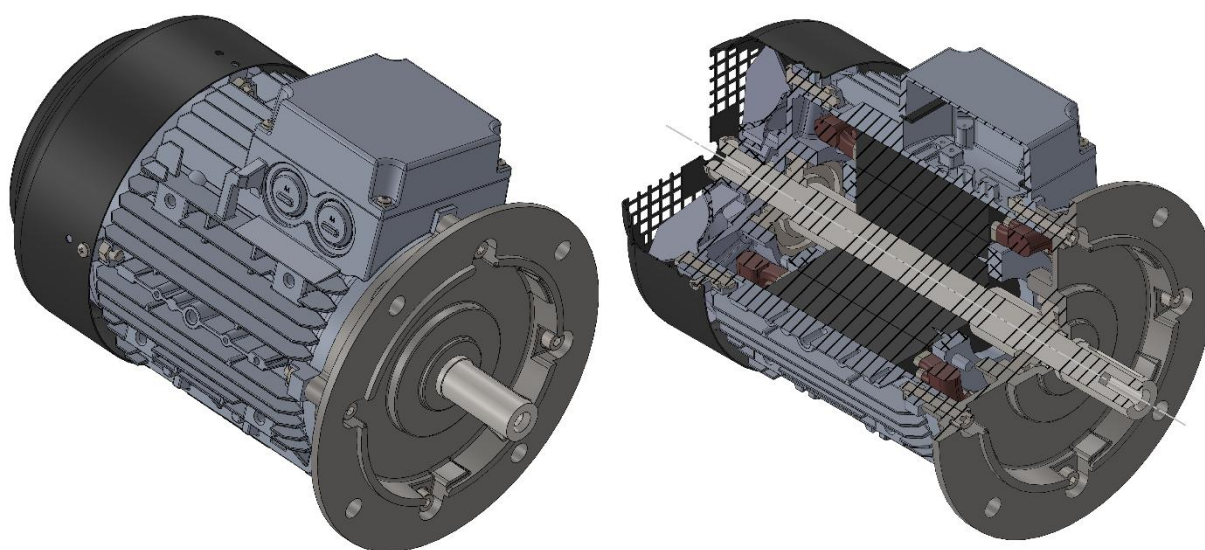
V kapitole 1.1.3 jsou sice podrobně zmíněny mechanické a přídatné ztráty, avšak ve výpočtech byly zanedbány vzhledem k rozměrům stroje a jejich aplikaci při numerickém výpočtu. V Tab. 5-2 jsou uvedeny ztráty vypočtené pomocí elektromagnetického návrhu stroje. Ztráty v čelech a kruzích byly při výpočtu náhradní tepelné sítě rozděleny pro každou stranu tělesa.

Ztráty v železe	Ztráty v zubech statoru	20 W
	Ztráty v zubech rotoru	5 W
	Ztráty v jho rotoru	4 W
	Ztráty v jho statoru	49 W
Ztráty ve vodičích	V drážkové části statoru	135 W
	V čelech statoru	125 W
	V drážkové části rotoru	79 W
	V kruzích rotoru	43 W
Mechanické ztráty	Ztráty v ložiskách a ventilátoru	107 W
Součet ztrát		567 W

Tab. 5-2 Tabulka ztrát v asynchronním stroji

5.3 Model asynchronního stroje

Pro tvorbu modelu byl použit CAD software SolidWorks. Vinutí stroje je vsypávané a je dosti komplikované vytvořit jej z jednotlivých drátů cívky, proto bylo vytvořeno z plného materiálu o stejném průřezu.



Obr. 5-2 Model Asynchronního motoru

Za účelem zjednodušení modelu, pro numerický výpočet byl magnetický obvod statoru a rotoru z masivního materiálu. Vinutí v drážkách statoru je také z plného materiálu, stejně tak čela vinutí jsou z plného materiálu a jejich průřez je dán součtem 4 průřezů drážek, neboť vinutí je koncentrické. Další prvky, které byly upraveny, odebrány:

- šroubové spoje, segerovy pojistné kroužky a pera na hřídeli,
- gufera, izolace, stahovací pásy magnetického obvodu,

- konstrukční zdíčky včetně mříže krytu ventilátoru,
- ložiska byla nahrazena plným materiálem,
- vše uvnitř svorkovnice bylo vybráno,
- ohyb rotorových tyčí, magnetického svazku byl zanedbán,
- veškerá zaoblení o poloměru ≤ 2 mm byly odebrány.

V odebraných prvcích by se automaticky zjemňovala síť a tím by se zvyšoval výpočetní čas. Tímto zjednodušením není znatelně ovlivněn výpočet proudění. Výpočet teplotní analýzy je ovlivněn odstraněním izolace vodičů, to vede ke zvýšení tepelné vodivosti a lepšímu odvodu tepla v drážkové části.

6 Výpočet metodou náhradní tepelné sítě

V řezu motoru byla vytvořena tepelná síť o 18 uzlech, které byly umístěny ve středech důležitých, kritických místech pro oteplování stroje. Postupovalo se dle kapitoly 3.2. Potřebné rozměry se získaly z modelu a uvažovaná plocha při výpočtech odporů byla 1/36 válcových ploch, z toho vyplývá, že výpočet byl řešen pro jeden řez drážky statoru. Použité materiálové vlastnosti při výpočtech jsou znázorněny v Tab. 6-1.

<i>Materiál</i>	<i>Použití</i>	<i>Měrná tepelná vodivost [W/m K]</i>	<i>Tepelná kapacita [kJ/kg K]</i>	<i>Hustota [kg/m³]</i>
Měď	statorové vinutí	394	0,385	8960
Hliník	rotorové tyče a kruhy, kostra a ložiskový štít	209	0,896	2700
Ocel	hřídel a příruba	40	-	7900
Železo	mag. obvod v radiálním směru	30	-	7700
	mag. obvod v axiálním směru	0,6		
Izolace	izolace statorového vinutí	0,3	-	-
Vzduch	-	0,025	1	1,2

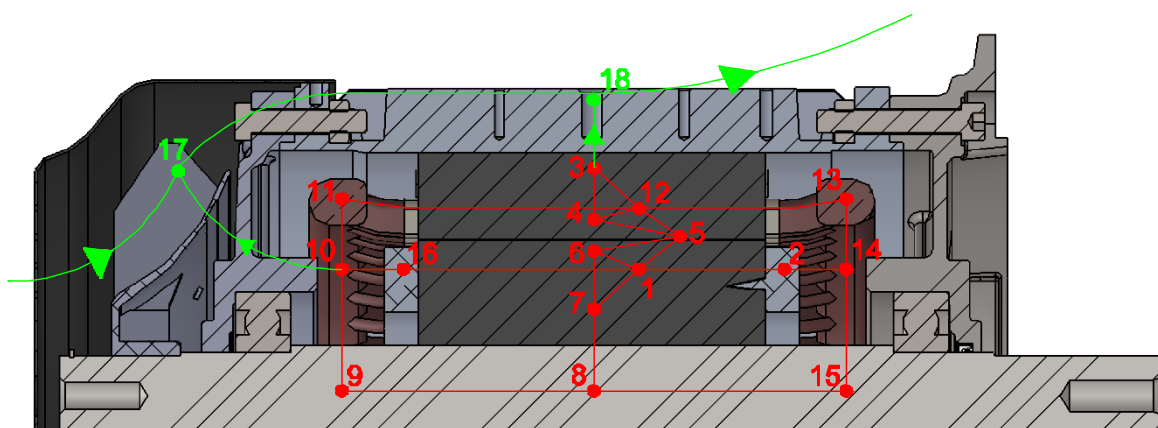
Tab. 6-1 Materiálové vlastnosti

Hodnoty koeficientu přestupu tepla uvnitř a na povrchu motoru jsou určeny podle kapitoly 1.2.3. Výpočet průměrné měrné tepelné vodivosti vinutí dle vztahu (3.4) a jednotlivé odpory byly určeny pomocí rovnic (3.1), (3.2), (3.3). Hodnota průtoku vzduchu byla určena rychlostí proudění v axiálním směru a plochou mezi kostrou a krytem ventilátoru. V Tab. 6-2 jsou zobrazeny vypočtené a předpokládané hodnoty používané při řešení sítě.

	<i>Poloha</i>	<i>Hodnota</i>	<i>Jednotka</i>
Koeficient přestupu tepla α	kostry - okolí	21,89	[W/m ² K]
	rotor - čela	57,46	
	čela - kostra	20	
	vzduchová mezera	57,46	
Měrná tepelná vodivost λ	statorové vinutí – zuby, jho	1,34	[W/m K]
Průtok vzduchu q	ventilátor - okolí	0,00094	[m ³ /s]
Odpor vzduchu R_q	ventilátor - okolí	0,4	[K/W]

Tab. 6-2 Hodnoty použité při výpočtu

Na Obr. 6-1 je znázorněna řešená síť, kde červeně je označen tepelný výpočet a zeleně ventilační výpočet. Jelikož zvolený motor je přírubový, není proto uvažován odvod tepla na druhé straně přes uzel číslo 14.



Obr. 6-1 Tepelná síť

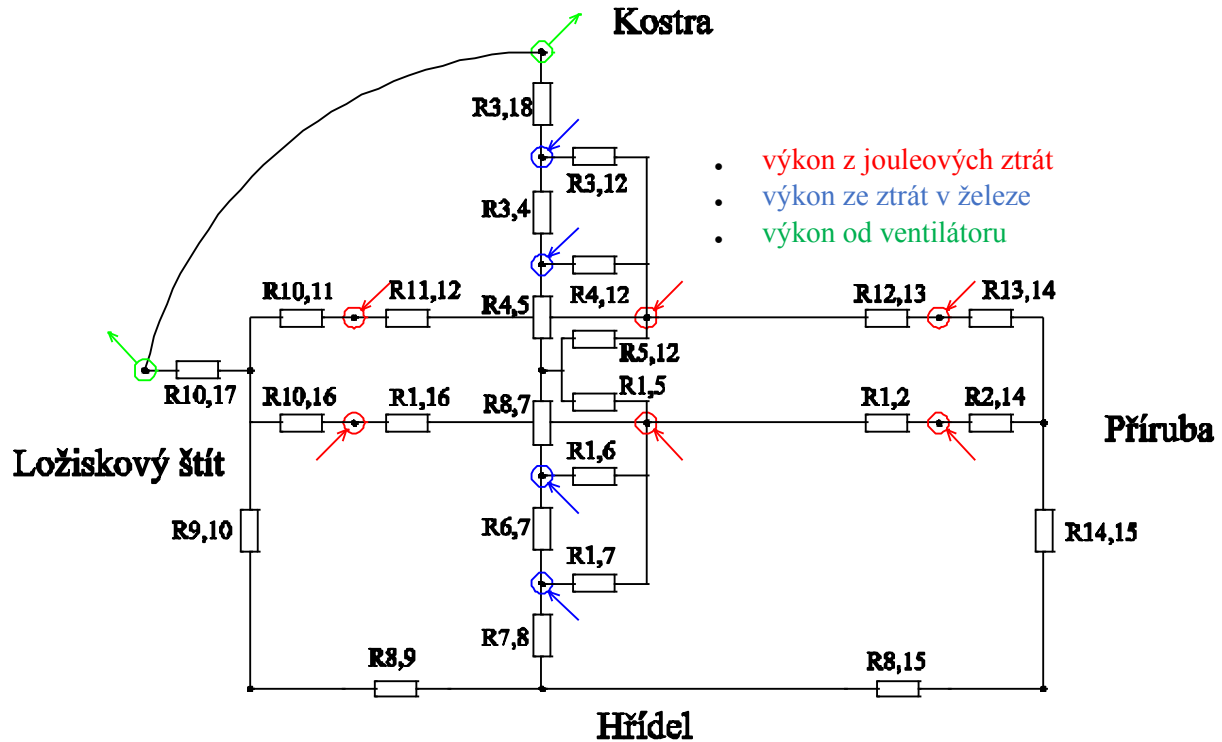
Mezi uzly uvedenými v Obr. 6-1 jsou tepelné odpory. Jejich výpočet je poměrně obsáhlý a byl proveden v programu *Matlab*. V Tab. 6-3 níže jsou uvedeny jednotlivé odpory s oblastmi, jenž musí překonat.

<i>Tepelný odpor</i>	<i>Materiály</i>	<i>Poloha</i>
R_{17-18}	vzduch	Ventilátor – kostra
R_{18-3}	vzduch, hliník, tech. mezera, železo	Kostra – statorové jho
R_{3-4} R_{6-7}	Železo	Statorové/rotorové jho – zub statoru/rotoru
R_{4-5} R_{5-6}	Železo, vzduch	Zub stator/rotor – vzduchová mezera
R_{7-8}	Železo, tech. Mezera, ocel	Jho rotoru – hřídel
R_{8-9} R_{8-15}	Ocel	Axiální směr na hřídeli
R_{9-10} R_{14-15}	Ocel, vzduch	Hřídel – vzduchový prostor pod čely
R_{10-11} R_{13-14}	Vzduch, měď	Vzduchový prostor pod čely – čela statoru
R_{11-12} R_{12-13}	Měď	Čela vinutí – střed drážek statoru
R_{10-16} R_{2-14}	Vzduch, hliník	Vzduchový prostor pod čely – kruhy rotoru
R_{10-17}	Vzduch, hliník	Vzduchový prostor pod čely – ventilátor
R_{3-12} R_{1-7}	Železo, tech. mezera, *izolace, měď	Jho statoru – vodič statoru
R_{4-12} R_{1-6}	Železo, tech. Mezera, *izolace, měď	Zub statoru – vodič statoru
R_{5-12} R_{1-5}	Vzduch, tech. Mezera, *izolace, měď	Vodič statoru – vzduchová mezera
R_{1-16} R_{1-2}	Hliník	Kruh rotoru – střed tyčí rotoru

* platí pouze pro stator, tech. = technologická

Tab. 6-3 Souhrn počítaných tepelných odporů v síti

Ekvivalentní elektrický obvod pro tuto tepelnou síť je vidět na Obr. 6-2. Jednotlivé odpory se skládají z dílčích sériově zapojených odporů. Při pohledu na tento obvod je patrné, že řešení ručně by zabralo velkou spoustu času. Proto byla pomocí Kirchhoffových pravidel sestavena vodivostní matice, viz příloha.



Obr. 6-2 Ekvivalentní obvod k řešené Síti

Výsledek je dán sloupcovou maticí, kde rozdíl prvků určuje oteplení vůči předchozímu uzlu. V Tab. 6-4 jsou zobrazeny již konečné hodnoty teplot v uzlech. Tato teplota je počítána z teploty okolí 25 °C, pro kterou je počítán i numerický výpočet.

Uzel	Poloha	Teplota [°C]	Uzel	Poloha	Teplota [°C]
17	Ventilátor	25,00	18	Kostra	30,86
3	Jho statoru	44,70	7	Jho rotoru	62,22
4	Zub statoru	45,71	6	Zub rotoru	62,25
12	Drážka statoru	49,46	1	Drážka rotoru	62,31
16	Kruh rotoru	61,69	2	Kruh rotoru	62,41
10	Vzduch pod čely	50,77	14	Vzduch pod čely	57,95
11	Čelo vinutí	51,52	13	Čelo vinutí	52,40
9	Hřídel	59,16	15	Hřídel	60,64
5	Vzduchová mezera	54,99	8	Střed hřídele	61,35

*nižší teplota, vyšší teplota

Tab. 6-4 Výsledné hodnoty tepelné sítě

Z Tab. 6-4 jsou na barevné škále rozloženy teploty s maximální hodnotou 62,41 °C v kruhu rotoru u příruby. Rozložení teplot v rotoru je poměrně stejné, neboť zde nejsou izolace a kvůli nízkému proudění uvnitř motoru odchází velká část tepla skrze hřídel.

7 Výpočet pomocí MKP a CFD

Se provedl v již dříve zmíněném programu ANSYS, kam byl naimportován zjednodušený model asynchronního stroje. Z důvodu jednoduššího řešení a limitu operační paměti se řešená úloha proudění rozdělí na vnitřní a vnější prostor motoru. Nejdříve je ale potřeba mít vymezenou vzduchovou oblast. (8)

7.1 Výpočet v CFX

Pro zjednodušení výpočtu byly vždy neřešené oblasti potlačeny, včetně samotného tělesa motoru, který při výpočtu CFX není potřeba. Výpočty byly řešeny při teplotě vzduchu 25 °C a tlaku 1 atm. Výsledná řešení jsou počítána s přesností $10e^{-3}$ počítaných hodnot v uzlech, kvůli omezenému výpočetnímu času.

7.1.1 Nastavení okrajových podmínek

Při spuštění záložky Setup v buňce CFX se načte soubor Pre-processing, ve kterém se nejdříve vytvoří domény pro všechna tělesa. V tomto výpočtu CFX jsou pouze tělesa vzduchu, a rotujících těles. Pro domény se vybere oblast a materiál (vzduch – *fluid*), dále se nastaví *heat transfer – thermal energy*. Rotující těleso (ventilátor) má doménu nastavenou jako *immersed solid* bez definice materiálu, avšak nastaví se zde otáčky (*rotating speed – 1440 rev/min*). Touto definicí materiálu se nemusí mezi dvěma tělesy řešit *interfaces*.

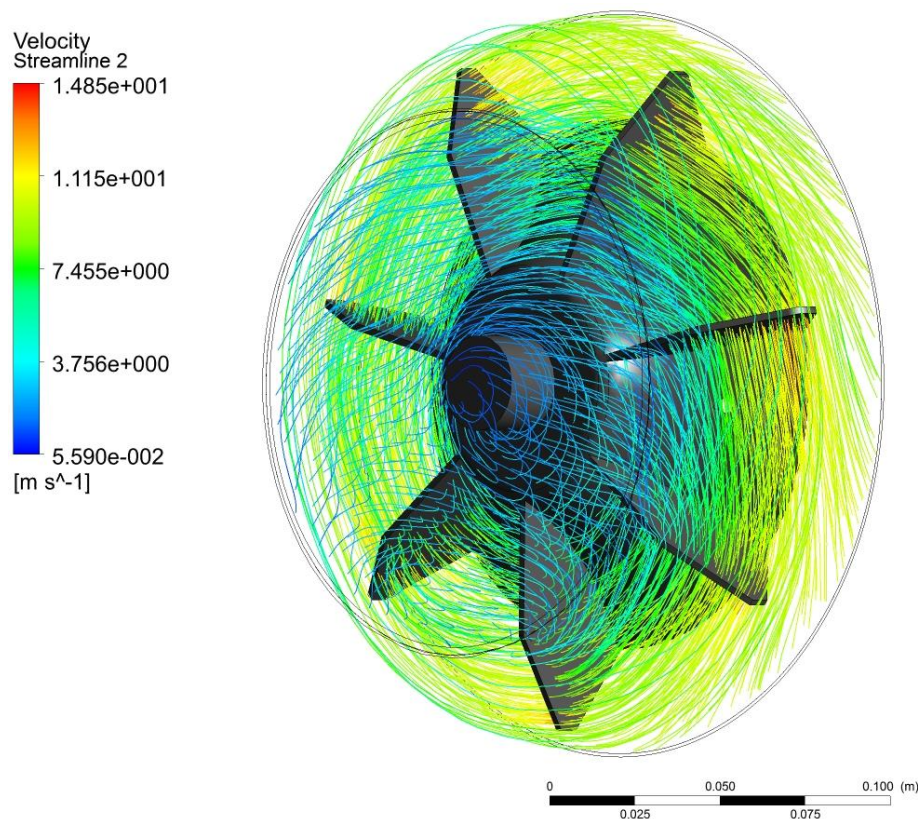
Pod doménou vzduchu se nastaví okraje vzduchové kapsy, kterou výpočet řeší. Vytvoří se *boundary* a pro okolní vzduch se nastaví podmínka *open*, tím může být vzduch do kapsy volně nasáván i odfukován. Nastavení tlaku je na hodnotě 1 atm. Druhá vstupní podmínka se nastaví *inlet* a tudíž bude vstupovat vzduch bez možnosti vrátit se zpět. Poslední podmínka *wall* se vytváří automatickým programem, aby byly definovány všechny plochy

Při řešení vnitřní kapsy motoru (vzduchová mezera) je nastavení těla rotoru jako *immersed solid*. Tímto nastavením, ale nevzniká ve vzduchové mezeře proudění, a proto je třeba nastavit válcovou plochu samostatně jako *wall* a zadat do záložky *wall velocity* rychlost otáčení. Ostatní Wall jsou nastaveny pevně – *stationary*.

Nastavení výpočetní přesnosti, nebo počtu iterací je poslední změna v *Pre-processingu*, vše ostatní zůstává beze změny.

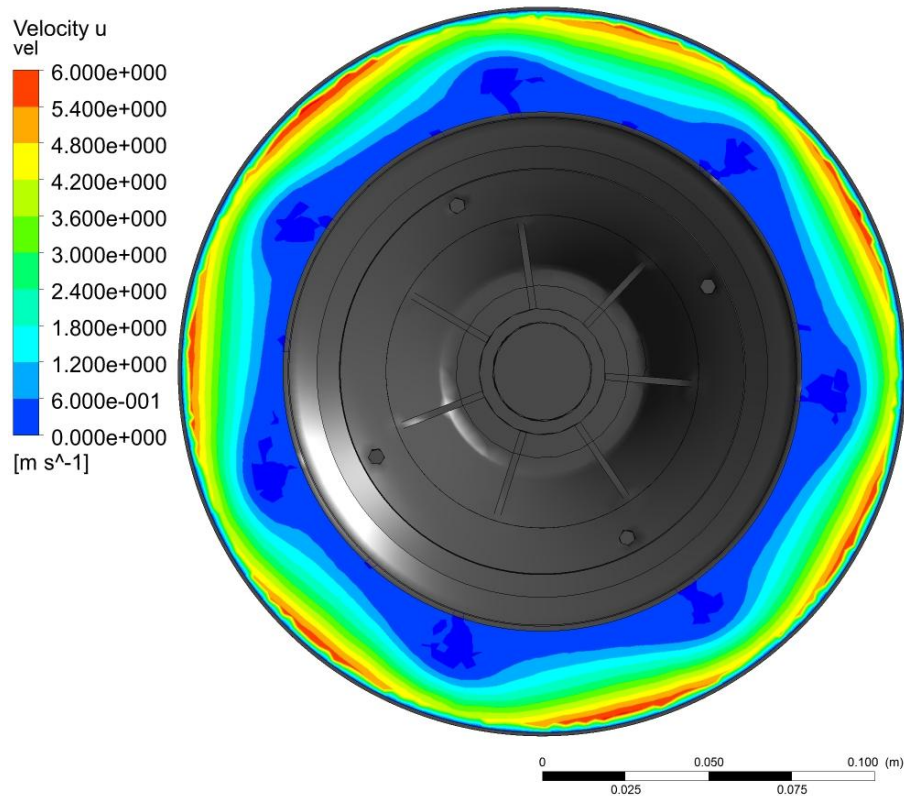
7.1.2 Ventilátor

V prvním výpočtu byla provedena samotná studie ventilátoru, neboť bylo potřeba ověřit správnost výsledku proudění při složitějším výpočtu s modelem. Vstupem do ventilátoru je vnitřní radiální stěna krytu ventilátoru se vstupní rychlostí 0,2 m/s.



Obr. 7-1 Rychlost proudění ventilátoru

Z Obr. 7-1 je vidět, že některé proudnice dosahují rychlosti až 14 m/s to je na špičkách lopatek. Výstupem je plocha mezi krytem ventilátoru a ventilátorem, její obsah je 1,86 dm². Průměrná rychlost na této ploše je 10,16 m/s, avšak v axiálním směru je tato rychlost pouze 2,18 m/s. Tudíž výsledný průtok v axiální ose je 0,94 dm³/s. Nízká hodnota byla vypočtena kvůli rovným lopatkám, které téměř veškerý vzduch tlačí v radiálním směru na vnitřní povrch krytu. S tímto výpočtem lze předpokládat, že ofukování motoru nebude mít příliš velkou účinnost.

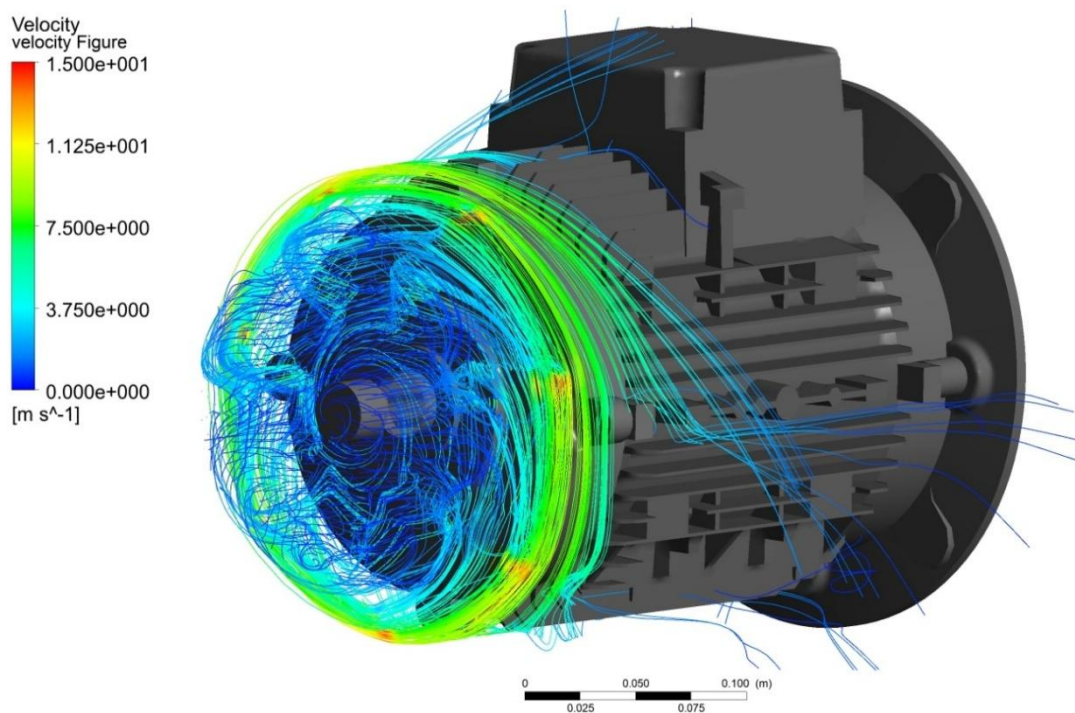


Obr. 7-2 Rychlost proudění v axiálním směru na výstupní ploše

Na Obr. 7-2 je zobrazena rychlost proudění v axiálním směru, kde je viditelné, že nejvyšší rychlost bude u stěn krytu ventilátoru. Obrazec vytvořený na ploše rotuje kolem středu a je možné vidět jak mezi lopatkami, jenž tlačí vzduch před sebou, vzniká nárůst rychlosti proudění.

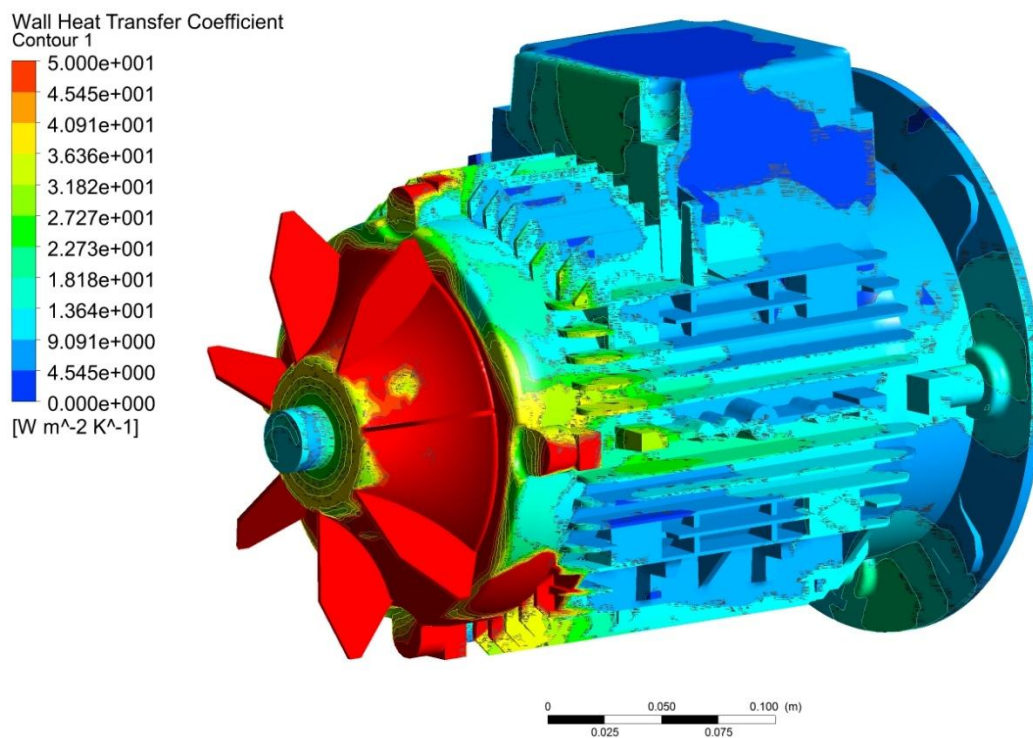
7.1.3 Proudění na vnějším povrchu motoru

Vstupní rychlost je zase 0,2 m/s a okolní vzduch daný okrajovou podmínkou open, je nastaven na statický tlak 1 atm. Pro lepší viditelnost jsou stěny vzduchu motoru tmavé barvy. Z Obr. 7-3 je vidět jak minimální počet proudnic vystupuje z krytu na kostru motoru, což má vliv na koeficient přestupu tepla, který je výstupní hodnotou z CFX a vstupní pro teplotní analýzu.



Obr. 7-3 Rychlost proudění na vnějším povrchu motoru

Ložiskový štít je spojen s kostrou pomocí čtyř výčnělků, které vynikají z povrchu ložiskového štítu. Proudnice mění směr před výčnělky, díky tomu směřují k povrchu kostry, kde je teplo nejvíce odváděno. Tyto místa jsou v Obr. 7-4 výrazně zbarvena.

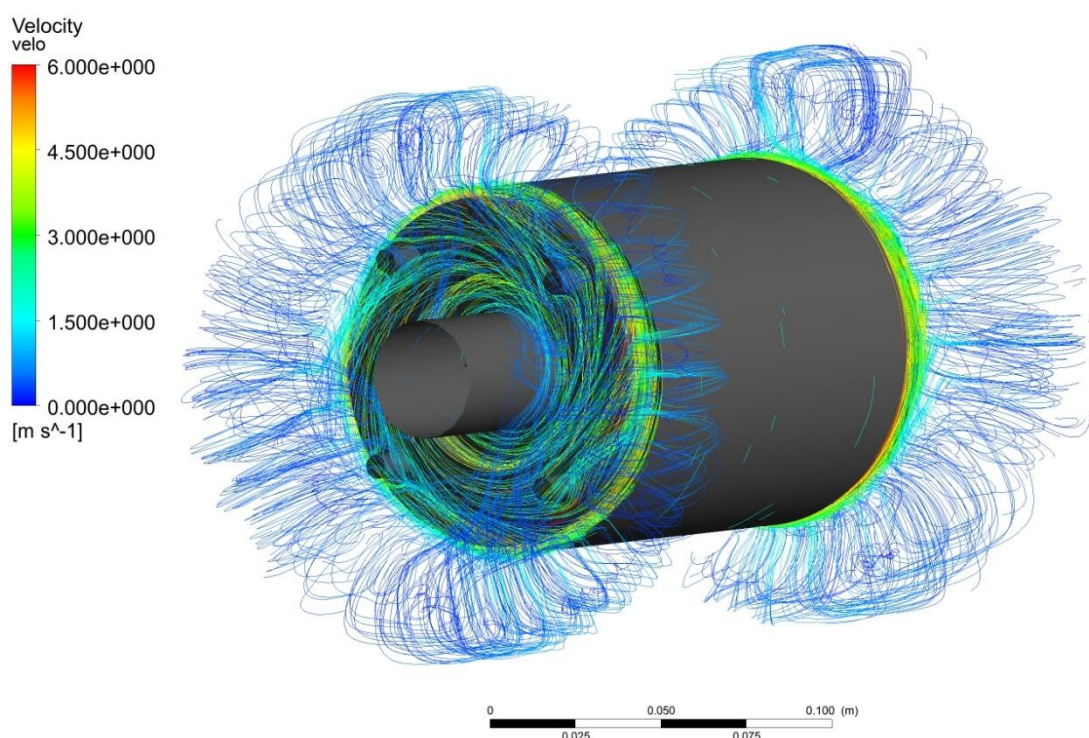


Obr. 7-4 Teplotní koeficient na vnějším povrchu motoru

Na Obr. 7-3 nejsou vidět proudnice po celé délce motoru, protože program zobrazí proudnice jen v místech s nejvyšší hustotou proudění částic vzduchu, avšak ofukována je celá délka motoru. Při analytickém výpočtu dle vztahu (1.15) je koeficient přestupu tepla na povrchu $\alpha = 22 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Podle Obr. 7-4 je viditelná přibližná hodnota na celém povrchu také $\alpha \approx 20 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, avšak je rozložena po povrchu s vyšší hodnotou u ventilátoru a nižší u příruby.

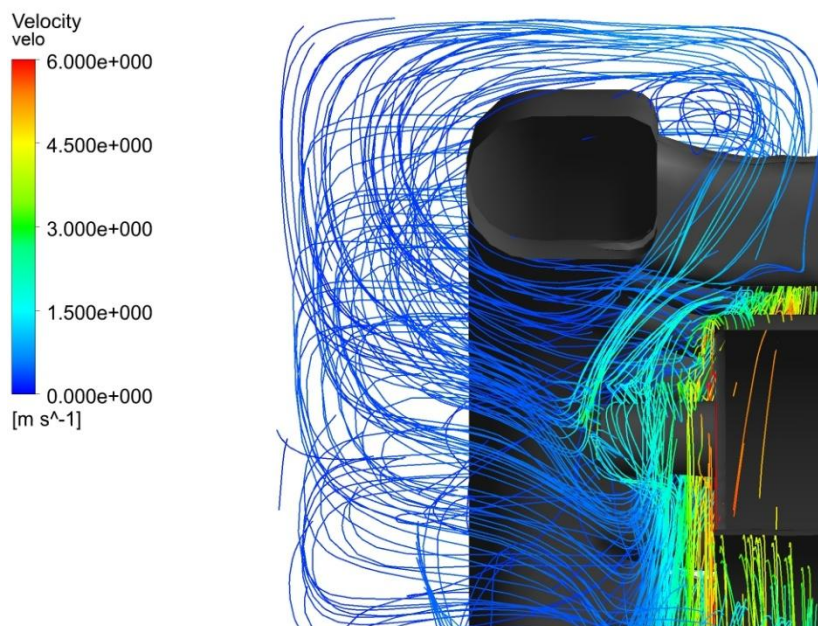
7.1.4 Proudění uvnitř motoru

Motor nemá vnitřní ventilátor, který by profukoval vzduch z jedné strany motoru na druhou stranu skrze vzduchovou mezeru, nebo ofukoval povrch čel vinutí. Vzduch je rozprouděn pomocí válcových ploch rotoru a výčnělků pro vyvažování rotoru jak je možné vidět na Obr. 7-5. Rychlost proudění dosahuje na kruzích rotoru místy až 6 m/s. Ve vzduchové mezeře proudnice vidět nejsou, ze stejného důvodu jako v kapitole 7.1.3 při proudění na povrchu motoru. Rychlost proudění ve vzduchové mezeře dosahuje rychlosti přibližně 2,5 m/s.



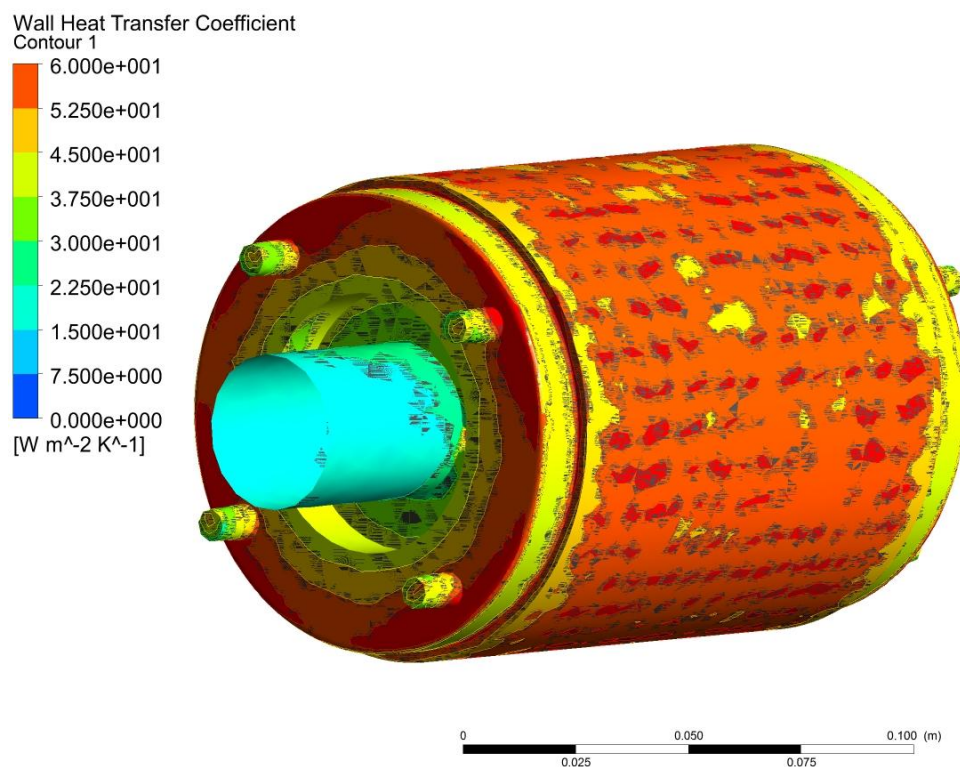
Obr. 7-5 Proudění ve vnitřním prostoru motoru

Detailní pohled na proudění skrze čela vinutí je na Obr. 7-6. Rychlost proudění mezi vodiči vystupujících z drážky je přibližně 2 m/s a v prostoru mezi čely a kostrou je rychlost už jen okolo 1 m/s. Koeficient přestupu tepla na vinutí nebude na povrchu vinutí příliš vysoký a lze předpokládat vyšší teplotu čel vinutí blíže ke kostře motoru.



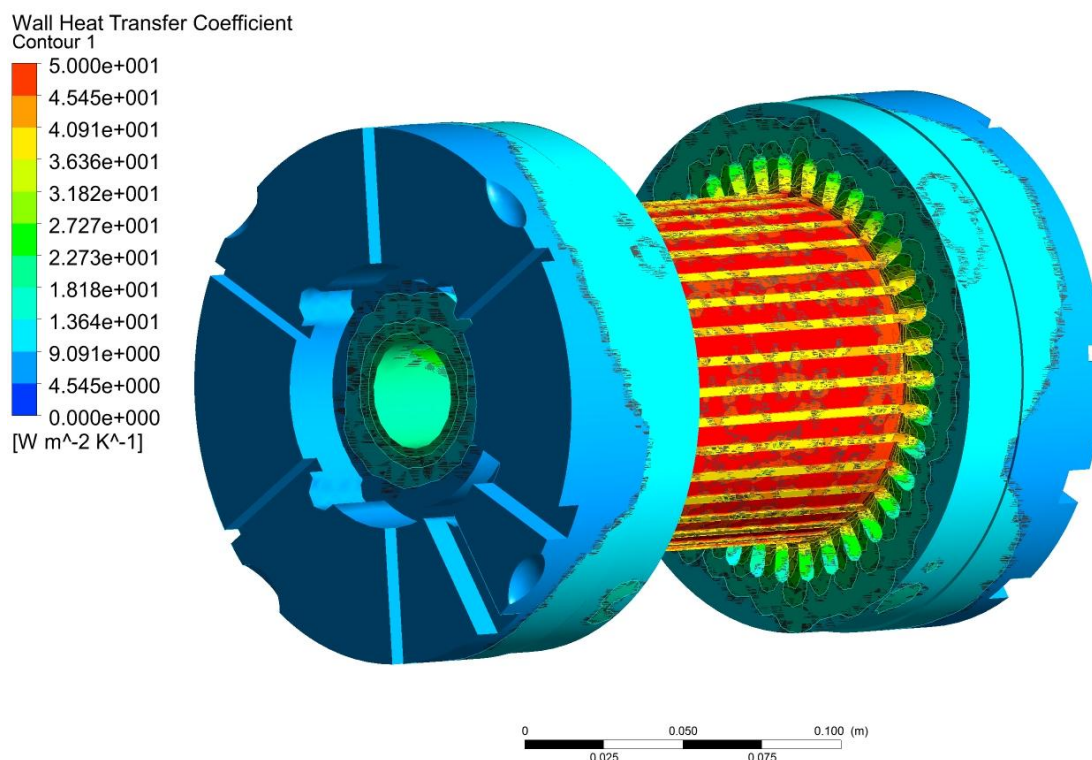
Obr. 7-6 Detailní pohled na proudění v čelech

I přes nízkou rychlost proudění ve vzduchové mezeře je koeficient přestupu tepla na rotoru poměrně vysoký $\alpha \approx 55 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. To je důkaz, že tento koeficient nezávisí jen na rychlosti proudění a materiálu, ale také na geometrii. Na povrchu je možné místy vidět v řádkách červené oblasti, to může být způsobeno víry, jenž vznikají v drážkách statoru a urychlují tok částic, tím zvyšují koeficient přestupu tepla na $\alpha \geq 60 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.



Obr. 7-7 Koeficient přestupu tepla na povrchu rotoru

Na Obr. 7-8 je kompletní pohled na vzduchovou kapsu uvnitř motoru. Na stěnách ložiskových štítů a příruby se koeficient α pohybuje pouze na hodnotách $\alpha \leq 10$ W/m²·K. Na povrchu vinutí v drážkách jsou hodnoty α poměrně vysoké a dosahují hodnot $\alpha \approx 40$ W/m²·K.



Obr. 7-8 Koeficient přestupu tepla na vnitřních plochách motoru

7.2 Výpočet teplotní analýzy

Všechny získané výsledky koeficientů přestupu tepla v analýze proudění byly importovány do tepelné analýzy. To bylo provedeno spojením buněk *solution* v CFX a *setup* v *thermal-analysis*. Tímto spojením nám *Mechanical* nabídne ve „stroměčku prvků“ *import load*, kde se vybere přidání *convection coefficient*. V *properties* se vyberou plochy vzduchu, jenž se protnou na námi vybrané plochy v teplotní analýze.

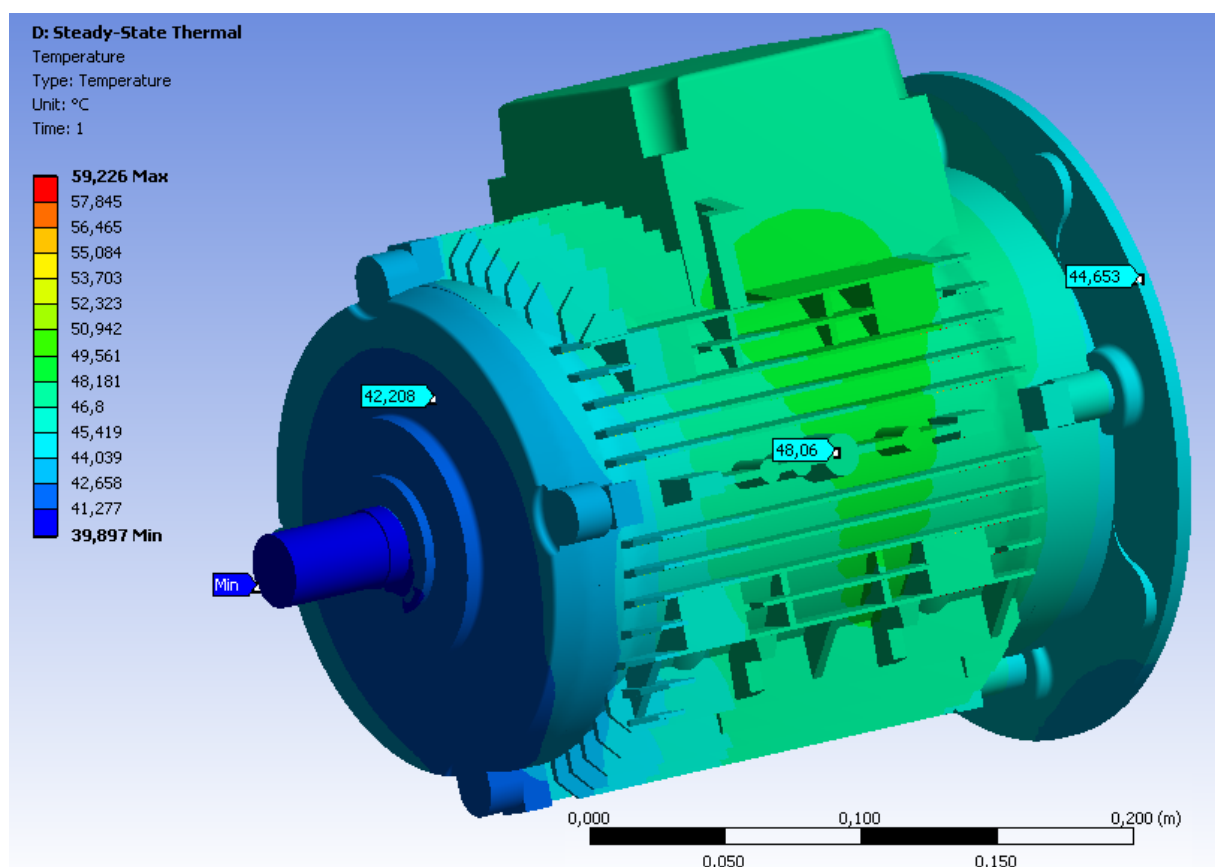
Nastavení ztrát v teplotní analýze je pomocí *Internal heat generation*, což je hustota výkonu na objem těla. Důležité je v prvku *Solution* zadat výsledný, zjišťovaný prvek. V našem případě *Temperature*. Poslední je spuštění výpočtu tlačítkem *Solve*. Importování ploch z CFX je časově náročné a trvá nejdéle na celém tepelném výpočtu.

Materiálu magnetického obvodu a vinutí statoru byla nastavena rozdílná hodnota měrné tepelné vodivosti v jednotlivých osách, aby byla zohledněna izolace, viz Tab. 6-1 a Tab. 6-2. Dále byla nastavena hustota výkonu do všech těles, ve kterých vznikalo teplo. Objem těles se

určil snadno s pomocí CAD softwaru SolidWorks a znalostí ztrát, viz Tab. 5-2.

Jak již bylo zmíněno, některé části modelu byly zanedbány jako třeba izolace vodičů a technologické mezery, z důvodu velkých nároků na výpočetní proces. Program uvažuje dokonalý dotyk mezi tělesy, takže teplo přestupuje v kontaktních plochách beze změny.

Na Obr. 7-9 je zobrazeno rozložení teploty na povrchu motoru, kde nejnižší teplota se nachází na konci hřídele u ventilátoru s hodnotou 39,9 °C a nejvyšší teplota na vnějším povrchu je uprostřed kostry s hodnotou okolo 48 °C.

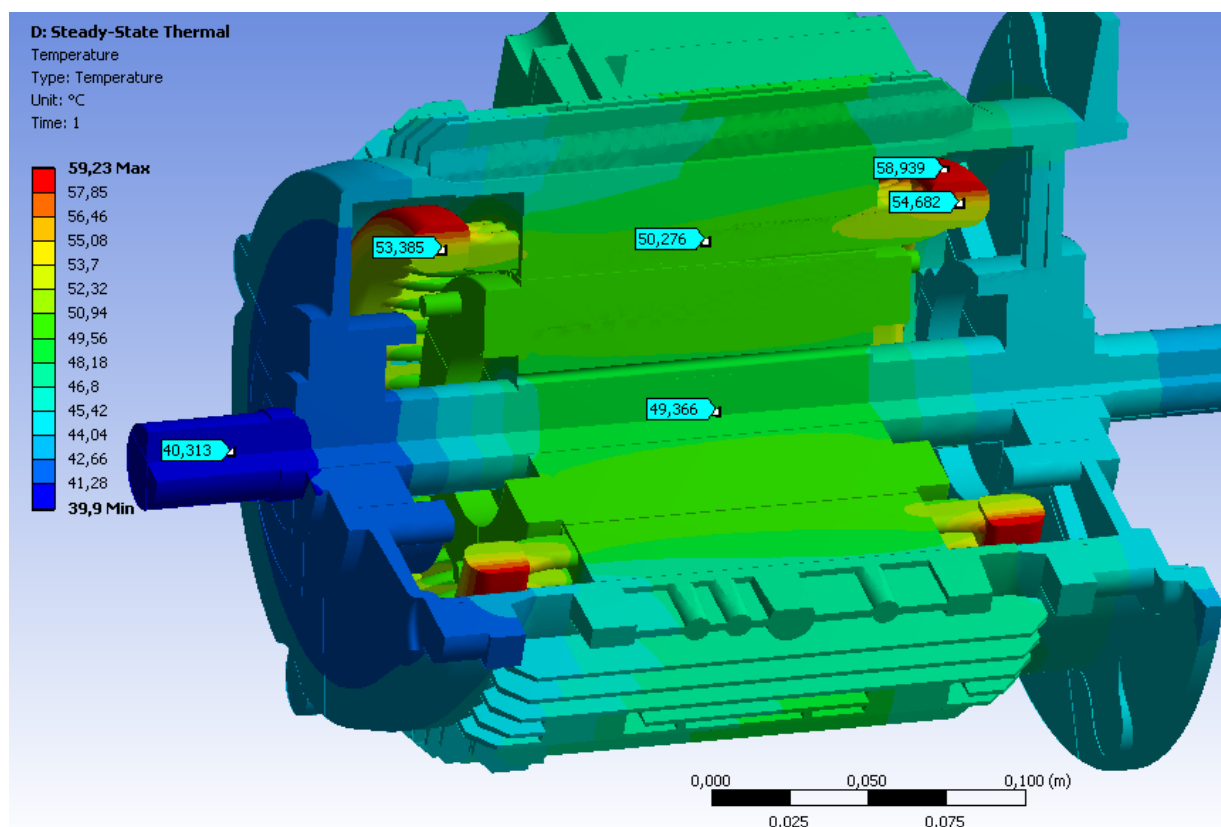


Obr. 7-9 Rozložení teploty na povrchu motoru

Na Obr. 7-10 je možné vidět rozložení teploty v částečném řezu. Nejteplejším místem motoru je na čelech vinutí blíže ke kostře, kde je plochá málo ochlazovaná proudícím vzduchem. Teplota zde dosažena má hodnotu 59,2 °C a oproti vnitřní straně čel je zde rozdíl o 9 °C. Rozložení teploty uvnitř magnetického svazku statoru a v drážkách je stejné, neboť není izolace, která by bránila přestupu a tím je vše odváděno k povrchu kostry. Tělo rotoru má také rovnoměrně rozložené teploty mezi vinutím a magnetickým svazkem, teplota zde se pohybuje okolo 50 °C.

Pokud se zobrazí pohled na tepelný tok, který udává gradient teploty, bude nejvyšší při

přestupu tepla z čel statoru do drážek a jeho hodnota bude přibližně $0,1 \text{ W/mm}^2$. O jeden řád nižší je hodnota tepelného toku z kostry do ložiskového štítu. Ložiskový štít je nejlépe ofukován vzduchem a tím má nízkou teplotu, naproti tomu střed kostry je tepelně napájen z magnetického svazku. Gradient mezi kostrou a ložiskových štítem vytváří tepelný tok o hodnotě okolo 2 W/cm^2 . Rozložení tepelného toku v podélném řezu je možné vidět v příloze.



Obr. 7-10 Rozložení teploty uvnitř motoru

Pokud vybereme z modelu teploty na stejných místech jako pro analytický výpočet, dostaneme hodnoty, viz Tab. 7-1. Hodnoty teploty ve vzduchu nelze z teplotní analýzy stanovit, nicméně tyto hodnoty jsou nepodstatné při tepelném výpočtu. Nejdůležitější je stanovit kritická místa jakými jsou vinutí a zejména jejich izolace.

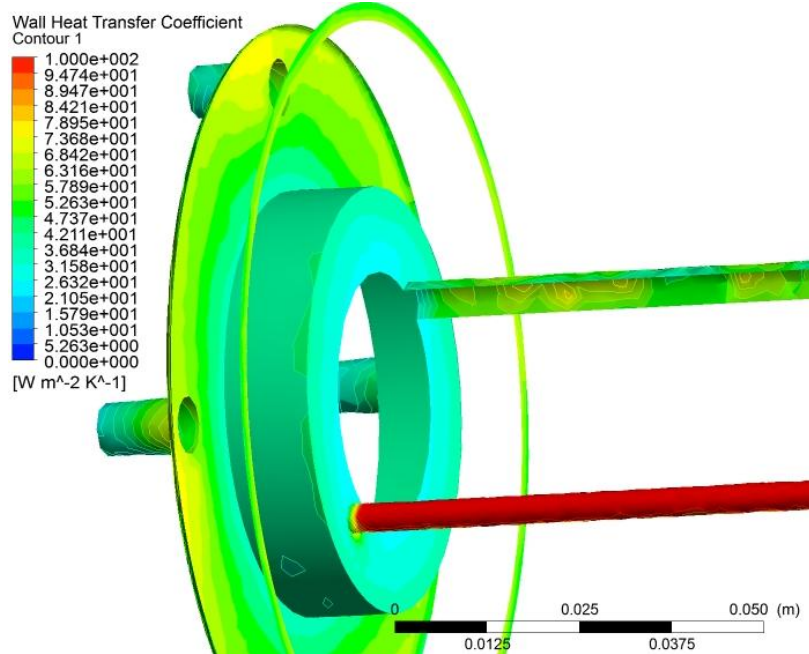
Uzel	Poloha	Teplota [°C]	Uzel	Poloha	Teplota [°C]
17	Ventilátor	-	18	Kostra	-
3	Jho statoru	49,60	7	Jho rotoru	49,90
4	Zub statoru	50,30	6	Zub rotoru	50,30
12	Drážka statoru	50,40	1	Drážka rotoru	50,30
16	Kruh rotoru	50,30	2	Kruh rotoru	50,30
10	Vzduch pod čely	-	14	Vzduch pod čely	-
11	Čelo vinutí	55,11	13	Čelo vinutí	56,00
9	Hřidel	44,11	15	Hřidel	46,00
5	Vzduchová mezera	-	8	Střed hřídele	49,37

*nižší teplota, vyšší teplota

Tab. 7-1 Rozložení teploty v modelu

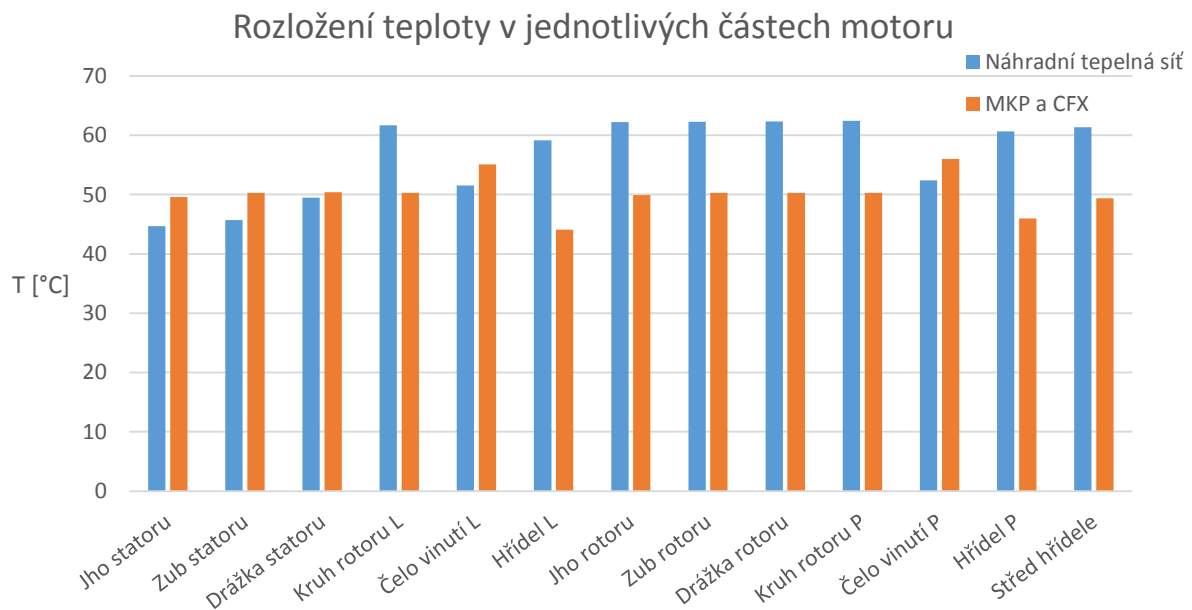
8 Porovnání výsledků

V Graf 8-1 je možné vidět srovnání teplot vypočtených rozdílnými způsoby. Z prvního pohledu je viditelný rozdíl hodnot, který na rotoru dosahuje až 12 °C. Vliv může mít empirický výpočet koeficientu přestupu tepla při analytickém výpočtu, který byl nižší než pro koeficient získaný z CFX. Při analytickém výpočtu také nejsou zohledněny veškeré plochy, jenž mohou odvádět teplo. Příkladem jsou podstavy válcového tělesa rotoru, nebo axiální kanál v magnetickém svazku u hřídele. Tento kanál je zde sice z výrobního hlediska, avšak při výpočtu CFX zde byl vysoký koeficient α , viz Obr. 8-1.



Obr. 8-1 Detailní pohled na axiální kanály v rotorovém svazku

Rozdíl teplot rotor – hřídel je pro obě metody přibližně stejný a rozdíl teplot na levé a pravé straně hřídele je dán lepším odvodem tepla u ložiskového štítu.



Graf 8-1 Porovnání dílčích výsledku vypočtených hodnot

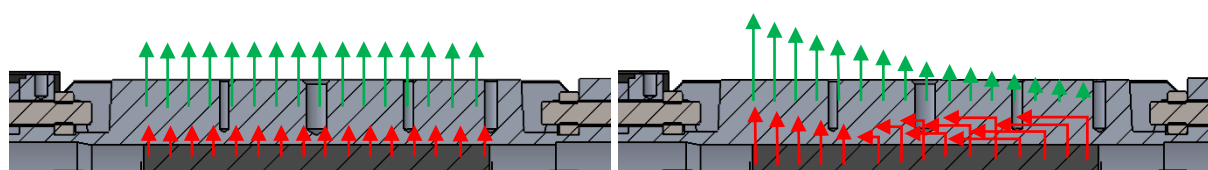
Teplota v čelech vinutí je pro obě metody velmi blízká a jejich průměrem dosáhneme teploty 53,5 °C. Výpočtem náhradní tepelné sítě není zohledněn měnící se koeficient na povrchu čel vinutí a tím může vznikat tento rozdíl. Na Obr. 8-2 je vidět detailní pohled na čela statorového vinutí ze středu a ze shora. Koeficient α je proměnný od hodnot 6 W/m²·K až k hodnotám okolo 40 W/m²·K. V náhradní tepelné síti se nikde na čelech neuvažuje hodnotu $\alpha \leq 20$ W/m²·K. Tento rozdíl je kompenzován tím, že metodou náhradní tepelné sítě není uvažována kompletní vyzařovaná plocha z čel a svazků vinutí.



Obr. 8-2 Detailní pohled na čela vinutí

Nejdůležitější řešenou oblastí je teplota v drážkové části statorového vinutí, kvůli teplotní odolnosti izolace. Teploty v těchto místech se pro obě metody téměř shodují na hodnotě 50 °C. Tudíž při návrhu tohoto stroje ověřeného těmito metodami výpočtu může být zvolena teplotní třída Y. Samozřejmě velmi důležitý je i tepelný výpočet získaný při zatěžování stroje v různých chodech S2, S3 aj.

Teplo ze žebra statoru je nejvíce odváděné skrze hliníkovou kostru a žebra, mezi kterými proudí vzduch. Metodou náhradní tepelné sítě je uvažována střední hodnota koeficientu přestupu tepla z žebra do okolí $\alpha = 21,87$ W/m²·K rovnoměrně rozložená na celém povrchu kostry. Avšak při výpočtu CFX je rozložení teploty nerovnoměrné s rozdílem až 40 W/m²·K mezi začátkem a koncem povrchu kostry. Kvůli tomuto rozložení přestupuje teplo v axiálním směru přes aluminiovou kostru a tím je více ohříván její povrch, viz Obr. 8-3.



Obr. 8-3 Přestup tepla ze žebra motoru pro a) náhradní tepelnou síť, b) MKP a CFX

Závěr

Při výpočtu motoru pomocí náhradní tepelné sítě lze poměrně rychle a snadno stanovit hodnoty oteplení vybraných uzlových míst. Nevýhodou jsou poměrně zdlouhavé výpočty ploch, přes které teplo prostupuje, to je možné velmi zjednodušit 3D CAD softwarem s modelem stroje, kde změření ploch subjektů je záležitostí několika minut. Matice nutná pro výpočet soustavy rovnic je poměrně rozsáhlá a její vepsání do výpočetního programu je zdlouhavé a nepřehledné, pro častější používání je vhodné vytvořit si jednoduchý program. Další nevýhodou jsou znalosti koeficientů přestupu tepla, ty je sice možné stanovit z empirických vztahů, ale nelze přesně stanovit chování proudění v poměrně složité geometrii motoru, lze jej určit pouze na místech, jenž jsou geometricky jednoduchá (válcové plochy).

Numerické řešení výpočtu je poměrně zdlouhavé a jeho výpočet je velmi detailní v závislosti na kvalitě sítě. Oproti prvnímu zmíněnému, zde se tvoří síť i na místech, kde není potřeba znát hodnoty oteplení. Avšak vypočtený model vytvoří kompletní rozložení teploty v celém objemu motoru a tím konstruktér dostane komplexní informaci využitelnou při dalších výpočtech, například výpočet tepelné dilatace. Předností metody je určení koeficientu přestupu tepla z CFX. Poměrně snadno lze rozpohybovat předmět (ventilátor, rotor) a prohlédnout si proudění v okolí řešených ploch. Čím bližších výsledků se chce touto metodou dosáhnout, tím jemnější je potřeba mít síť a přesněji zadané okrajové podmínky. Proto výpočet s vyšší přesností potřebuje odpovídající hardware, například v této diplomové práci byla z důvodu slabšího hardwaru zanedbána izolace vodičů, svazky vodičů a plechy magnetického svazku.

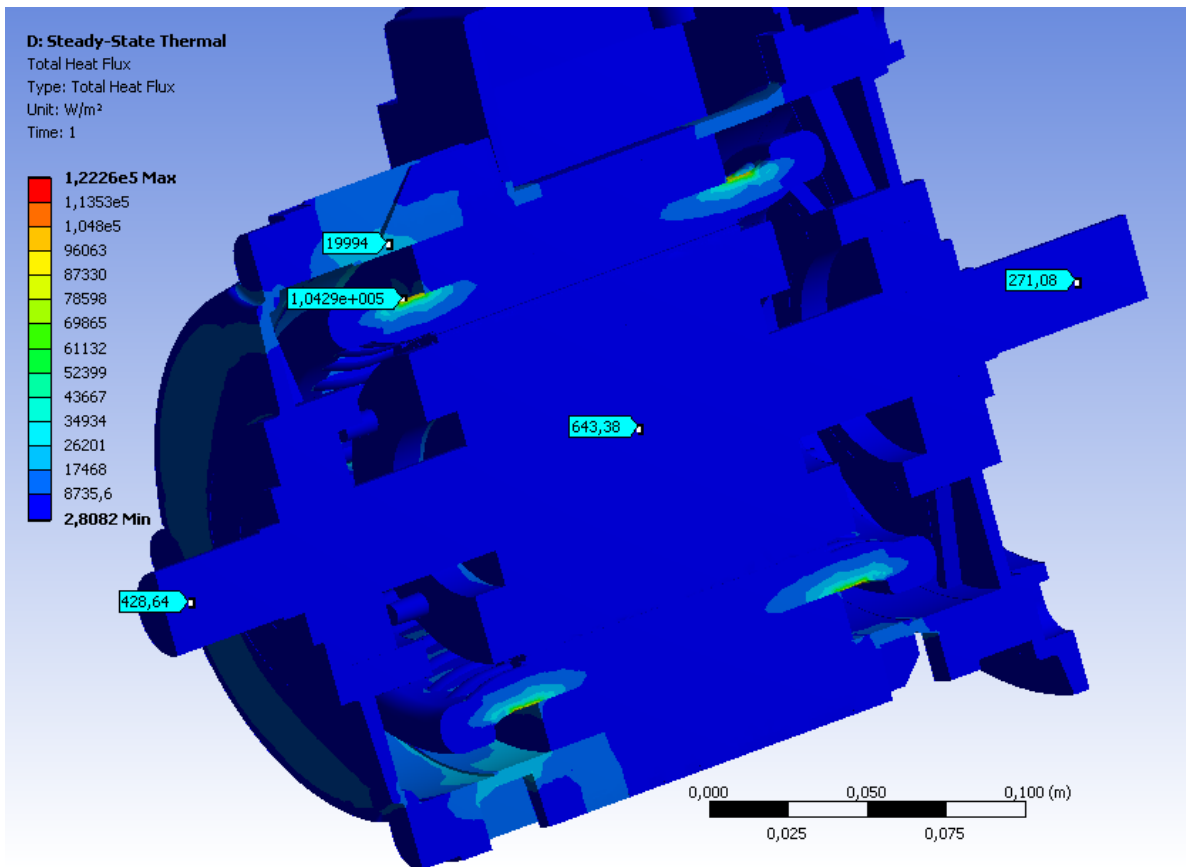
Pokud bych vybíral metodu řešení tepelného výpočtu z těchto dvou. Zvolil bych metodu náhradní tepelné sítě pro rychlé a orientační zjištění hodnot v mezivýpočtu návrhu. A pro konečné určení rozložení teploty bych zvolil numerický výpočet, který by reprezentoval skutečnou tepelnou odolnost částí stroje. MKP má vyšší přesnost řešení, neboť dokáže při výpočtu řešit detail řešené struktury a lze dokonce zohlednit i drsnost kontaktních povrchů.

Poměrně rychlá a přesná je i kombinace CFX a náhradní tepelné sítě. Z CFX stanovím průměrný koeficient přestupu tepla na počítaných přestupových plochách a použiji jej v tepelné síti. Výpočet bude přesnější na úkor doby iteračních procesů CFX. Ve své podstatě MKP je náhradní tepelná síť řešená rovnicemi přestupu tepla. A při stejném počtu uzlů bychom měli dosáhnout stejných výsledků.

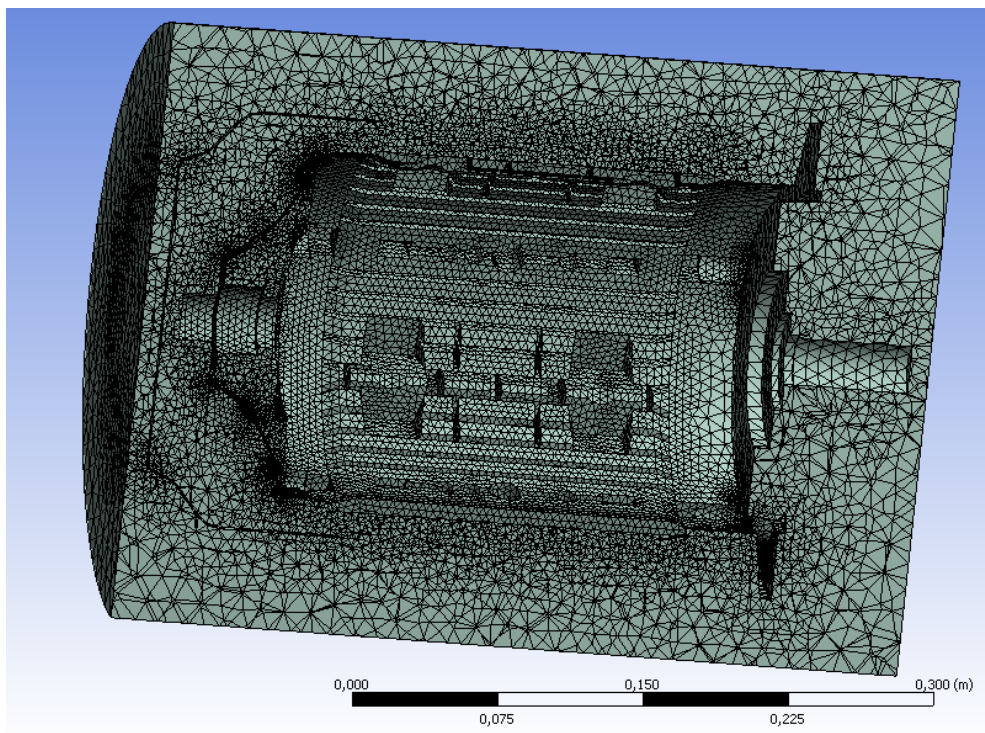
Použitá literatura

1. **Pyrhonen, Juha, Jokinen, Tapani a Hrabovcová, Valéria.** *Design of Rotating Electrical Machines.* Chichester : John Wiley & Sons, Ltd., 2014. 978-1-118-58157-5.
2. **I.P.Kopylov.** *Stavba elektrických strojů.* Praha1 : Státní nakladatelství technické literatury, 1988.
3. **Boldea I., Nasar, Syed A.** *The induction machine handbook.* Boca raton : CRC Press, 2002. 0-8493-0004-5.
4. **R., Pechanek.** Ventilací a tepelná analýza trakčního asynchronního motoru. *Disertační práce ZČU FEL.* Plzeň : autor neznámý, 2011.
5. **Ondruška E., Maloušek A.** *Ventilace a chlazení elektrických strojů točivých.* Praha : STNL, 1985.
6. **Hak J., Ošlejšek O.** *Výpočet chlazení elektrických strojů.* Brno : Výzkumný a vývojový ústav elektrických strojů točivých, 1973.
7. **LEE, Huei-Huang.** *Finite element simulations with ANSYS workbench 14.* Mission : SDC Publications, 2012. str. 602 s. 978-1-58503-725-4.
8. **14.0, ANSYS Workbench.** *Tutorial.* Schererville : CAD/CIM Technologies, 2012.
9. **Cigánek, Ladislav.** *Stavba Elektrických strojů.* Praha 2 : Státní nakladatelství technické literatury, 1958.

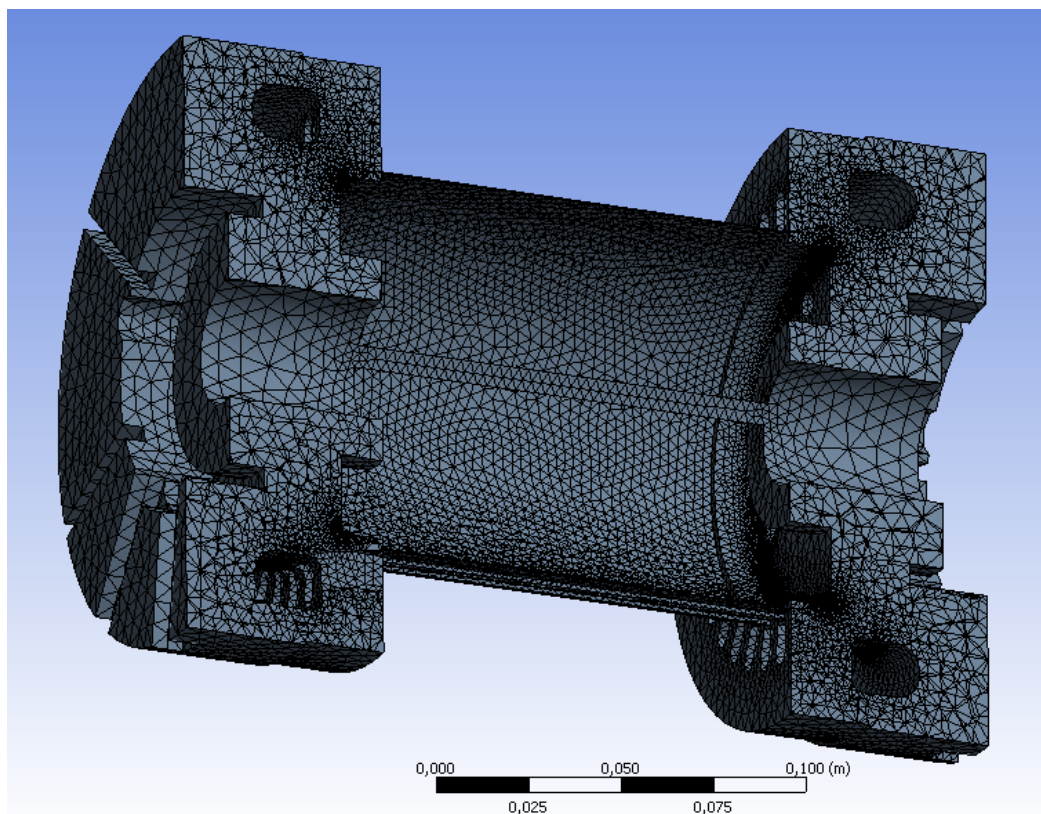
Příloha



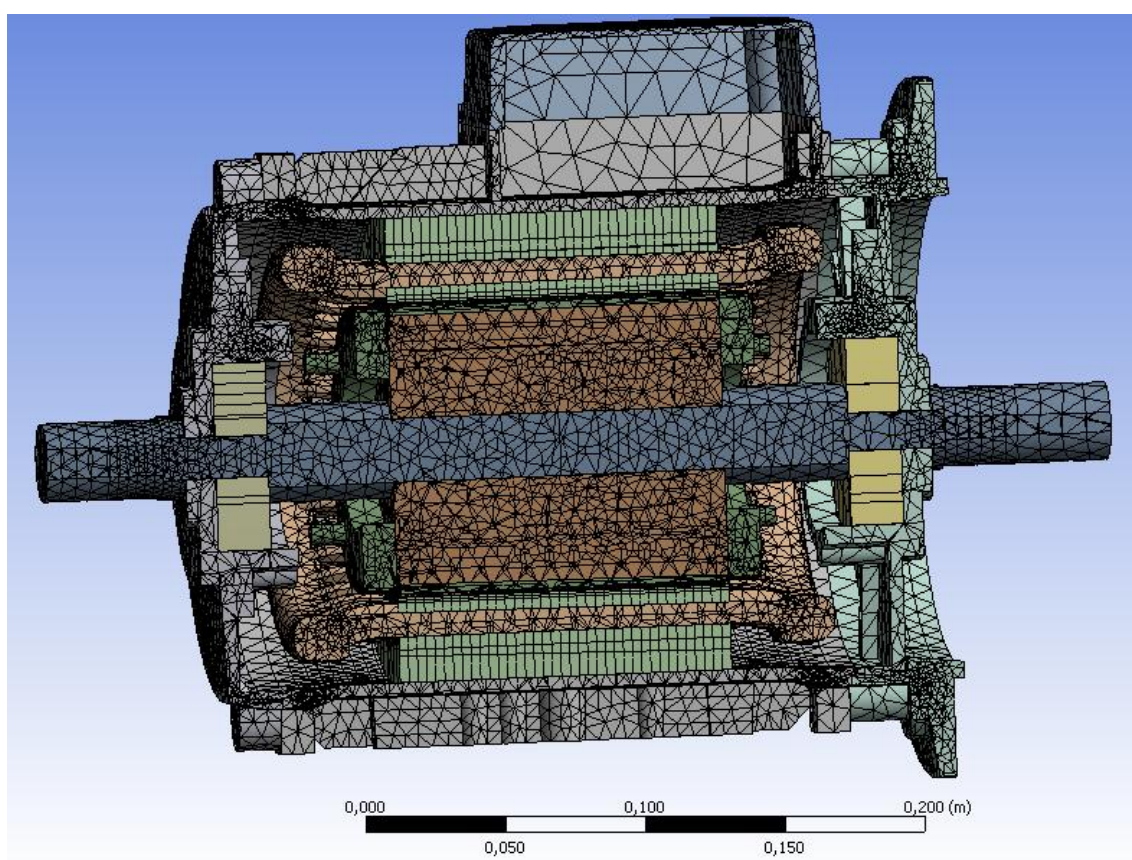
Obr. P1 Tepelný tok v řezu motoru



Obr. P2 Síť vytvořená v objemu vzduchu



Obr. P3 Síť vytvořena v objemu vzduchu uvnitř motoru



Obr. P4 Síť vytvořená v tělese motoru

